

東京大学大学院・総合文化研究科
広域科学専攻・相関基礎科学系
博士学位論文

ファラデーの電磁気学研究における力・力能・粒子

Forces, Powers and Particles in Faraday's Researches in Electromagnetism

夏目賢一

Kenichi Natsume

目次

序論	ファラデーの電磁気学研究についての課題	4
第1章	可感的性質についての議論と遠隔作用説	16
1.1.	「誘導」という電磁気現象の特殊なふるまい	16
1.2.	力と物質についての知識と感覚との関係	25
1.3.	ニュートン力学的な電磁気学研究と「遠隔作用説」	36
1.3.1.	電磁気現象に対する数学的研究のはじまり：エピヌス	37
1.3.2.	電気力の逆二乗則：キャヴェンディッシュとクーロン	47
1.3.3.	中心力に基づく電磁気学研究の到達点：ポアソン	56
1.4.	近接作用説と遠隔作用説のそれぞれの限界	61
第2章	物理学における力学的方法の有効性と限界	64
2.1.	実証主義と解析的方法	66
2.2.	感覚を補う方法としての数学的アナロジー	73
2.3.	学問の分類と力学	80
2.4.	力学的な説明とアナロジー	96
第3章	ファラデーを育んだ環境	103
3.1.	ファラデーの生まれた時代	103
3.2.	感覚できないものへの探究：ファラデーの徒弟時代	105
3.3.	電流の磁気作用の発見	117
3.4.	デーヴィーとファラデー	124
3.5.	デーヴィーにおける力と粒子	129
3.6.	ファラデーの電磁気学研究の出発点	139
第4章	電気緊張状態と誘導	146
4.1.	電磁誘導の瞬間的作用	147
4.2.	電気分解における電流発生との因果関係	158
4.3.	静電誘導と放電	174
4.4.	粒子の移動と分極	187
第5章	近接粒子による誘導の一般理論	197
5.1.	「誘導」を中心とした電磁気現象の理解	197
5.2.	誘導容量の測定をきっかけとした曲線的作用への着目	202
5.3.	モソッティの分子論	207
5.4.	誘導の理論の一般化	213
5.5.	「近接」粒子に対するヘアの批判	220
5.6.	ファラデーの遠隔作用説批判と力線の位置づけ	223
第6章	光磁気効果（ファラデー効果）の発見	231

6.1.	偏光に対する電磁気的作用.....	233
6.2.	光磁気効果の実験.....	235
6.3.	電磁気と光の関係.....	242
6.4.	ボスコヴィッチ的な原子論.....	246
6.5.	「場」という表現の誕生.....	253
6.6.	光と磁気と物質.....	261
第7章	トムソンによる力線の数学的・力学的表現.....	266
7.1.	光磁気効果とエーテル.....	267
7.2.	フーリエの流束とファラデーの力線.....	273
7.3.	ストークスの弾性固体論と「力学的表現」.....	283
7.4.	理解を促すための力学的モデル.....	294
7.5.	トムソンにおける力学.....	304
第8章	マクスウェルによる力線と場の数学的解釈.....	310
8.1.	ファラデーにおける磁力線と磁場の理論.....	311
8.2.	力線と流体との「物理的アナロジー」.....	323
8.3.	電気緊張状態についての分子渦モデル.....	330
8.4.	マクスウェルにおける力学と数学.....	341
第9章	ファラデーにおける「力」と「場」と「粒子」.....	355
9.1.	地球についての考察と万有引力.....	355
9.2.	力の保存と変換可能性.....	360
9.3.	ファラデーの電磁気学研究における「場」と「粒子」.....	371
結論	電磁気学の形成とファラデー.....	386
資料一覧	397

注記

- ・ 引用する数式において偏微分記号は出典の表記に準じている。そのため、現代では“ ∂ ”や“ ∇ ”を用いるところを“ d ”で記述している数式がある。

略語

ファラデー資料

Correspondence Michael Faraday. *The Correspondence of Michael Faraday*. ed. Frank A. J. L. James, 6 vols. London: IEE, IET, 1991-2012.

Diary Michael Faraday. *Faraday's Diary*. ed. Thomas Martin, 7 vols. London: G. Bell and Sons, 1932-1936.

ERCP Michael Faraday. *Experimental Researches in Chemistry and Physics*. London: Richard Taylor and William Francis, 1859. Reprint, Bruxelles: Culture et Civilisation, 1969.

ERE Michael Faraday. *Experimental Researches in Electricity*. 3 vols. London: Richard and John Edward Taylor, 1839-1855. Reprint, Bruxelles: Culture et Civilisation, 1969.

その他の資料

BL William Thomson. *Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*. Baltimore: Johns Hopkins University, 1884; republish, Robert Kargon, and Peter Achinstein, ed. *Kelvin's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics*. Cambridge: MIT Press, 1987: 7-263.

Collected Works Humphry Davy. *The Collected Works of Sir Humphry Davy, Bart. LL.D., F.R.S.* ed. John Davy, 9 vols. London: Smith Elder, 1839-40.

MPP William Thomson. *Mathematical and Physical Papers*. 6 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1882-1911.

RPEM William Thomson. *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*. London: Macmillan, 1872, 2nd ed., 1884.

SP James C. Maxwell. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. ed. W. D. Niven, 2 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1890. Reprint, New York: Dover, 2003.

SLP James C. Maxwell. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*. 3 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

序論 ファラデーの電磁気学研究についての課題

ファラデーの電磁気学研究についての従来の論点

本論文は、19世紀イギリスの自然哲学者マイケル・ファラデー (Michael Faraday, 1791-1867) の電磁気学研究を対象とする歴史研究である。具体的には、ファラデーがおこなった「誘導 (induction)」現象を中心とする電磁気学研究について、その目的や方法、実際の過程、あるいは彼が導入した「力線」や「場」といった概念について、「力 (force)」「力能 (power)」「粒子 (particle)」に象徴されるいくつかの論点から歴史的な分析を進めていく。もちろんここでは、力や力能、粒子についてのファラデーの見解ないしそれらの概念史を限定的に論じようとしているわけではない。本論文の目的は、ファラデーの研究におけるそれらの位置づけに注目することで、それらと関連する複数の論点から彼の電磁気学研究全体についてのより包括的な歴史的理解を与えることにある。

ファラデーは、電磁気学や化学の分野で数多くの重要な業績を上げたことで知られている。その中でも電磁気現象に関する代表的なものとしては、電磁回転の装置 (モーター) の開発、電気分解の法則 (ファラデーの法則) や電磁誘導の発見、そして光磁気効果 (ファラデー効果) の発見があげられる。もっとも、これらの業績はそれぞれが独立した関心から生み出されたものではなく、その背後には一貫して「誘導」現象についての関心があった。この「誘導」とは、ある物体に存在している電気や磁気が、それとは離れたところにある別の物体に対して、新たに電気や磁気を生じさせる現象のことである。ファラデーは、この「誘導」における力の作用を説明するために「力線 (lines of force)」や「場 (field)」といった概念を導入していくことになる。

ファラデーが導入したこれらの概念は、その後の物理学の発展において大きな意味を持つことになり、とくに「場」という概念は現代物理学の基本概念となった。そのため、電磁場という観点からファラデーを取り上げた研究ないし一般書は数多く存在している¹。しかし、これらの先行研究の多くでは、基本的に力線や場という概念はファラデー独自の考案物として扱われる傾向があり、理論的な影響としては後述するボスコヴィッチ (Rudjer J. Bošković, 1711-87) の原子論との関係が指摘される程度である。そして、その独自性は、ファラデーが受けた教育や研究環境、あるいは生活態度や出自などと結びつけて説明され

¹ その中でもとくに、ファラデーやトムソン、マクスウェルを中心として電磁場の理論形成過程を論じた研究が数多く存在している。9.3節で論じるように、場の理論の形成過程を論じる研究の多くは、このような観点からファラデーの事例を書籍の中の一章や一つの論文程度で論じることが多く、ファラデーの理論については十分に分析を加えられていないのが現状である。例えば、日本語で出版されたものとしては、辻、恒藤、広重「電磁場の理論の成立」があげられる。辻らは、エフルヴィア理論が遠隔作用説を経ることで近接作用説に発展していった過程を説明しながら、力学とは異なる方法論が極めて有効に作用したことを主張している。本論文では、このような先行研究を踏まえながら、電磁気現象を研究する上で生じていた本質的な問題点を改めて分析し、そこに新しい論点を求めた。

ることが多い。しかし、このような説明では、ファラデーが「力線」や「場」といった概念を展開するようになった歴史的要因を十分に説明できているとは言えない。これは、ファラデーの独自性を前提としていることで、ファラデーの電磁気学研究を歴史的に深く分析することが妨げられ、結果的にその理解を不十分なものにする原因が作られてしまっていると考えられる。

多くのファラデー研究においてこのような傾向が生じてきた理由は、ファラデーが次に引用するようなファラデー自身の言葉を文字通り実践し、それに成功したからこそ多くの業績を残せたとする根強い評価にあると言える²。

哲学者は、あらゆる示唆に耳を傾けるが、自分自身のために判断することを心に決めた人であるべきだ。見かけに偏見を持つべきでも、好みの仮説を持つべきでも、学派に属するべきでも、そして教義において師を持つべきでもない³。

ここでファラデーが述べているように、「偏見」「仮説」「学派」「教義」などの影響から独立して研究を進めることは、科学者の研究姿勢としてはとても重要な目標になるかもしれない。しかし、学問が過去からの蓄積によって発展する以上、ファラデーにしても過去の研究の蓄積と無関係に研究を進めることができたはずはなく、これを文字通り実践することは不可能である。そうすると、当時の「仮説」や「学派」の影響を改めて分析しながらファラデーの独自性を批判的に再検討していける可能性はやはり残されており、科学史におけるファラデーの業績の重要性を考えれば、その可能性は極めて重要な研究課題になりうると考えたい。

それでは、ファラデーの電磁気学研究を分析していくためには、どのような論点があり得るのだろうか。先行研究から最初にあげられるのは、前述のボスコヴィッチの原子論の影響である。イタリア・パヴィア大学の数学教授ボスコヴィッチは、ある中心のまわりに分布している力そのものが物質に他ならないとする原子論を1758年に発表した。そして、ファラデーはこのボスコヴィッチの原子論と同じような物質観を持っていた。このように力を物質の本質とみなす原子論は当時よく知られていたが、あくまでこれは仮説的な理論であり、十分に認められていたわけではなかった。当時は、物質をあくまで一般的な意味での実在物とみなすドルトン (John Dalton, 1766-1844) の原子説が有力視されていたから

² 例えばアインシュタイン (Albert Einstein, 1879-1955) は、ニュートン力学の変革者としてファラデーとマクスウェルの名をあげ、遠隔作用的な力の概念から場の概念への移行を論じている。そこでアインシュタインは、ファラデーが実験によって現象を直観的に把握し、マクスウェルがそれらの概念を定量的に数式化することで電磁場の理論が形成されていったとして、彼らをガリレオとニュートンになぞらえている。(Einstein, "Autobiographical Note," 32-5)

³ Jones, *Life and Letters of Faraday*, 1:220. 他にも、例えばファラデーは電気化学当量についての研究を進める中で、「私は自分の研究を真に「実験的」なものに保ち、どこにも「仮説的想像」の性格があると評価されるようなことがあってはならない」と自分自身を戒めている。(20 December 1833, *Diary*, 2:184, par. 1207.) このように自戒しているということは、少なくともファラデーの研究方法が「仮説」とは無縁ではなかったことを示している。

である。このように、ボスコヴィッチ的な原子論という理解は当時においても特殊なものであったため、ファラデーの物質観を形成した歴史的な要因とみなされ、このボスコヴィッチの原子論という観点からいくつかの研究がなされてきた。

その代表が、ウィリアムズの研究である。ウィリアムズは、1965年に出版した著書の中でファラデーについて多面的かつ包括的に論じ、ファラデーは生涯にわたってボスコヴィッチの原子論の影響を受けていたと主張した⁴。しかし、確かにファラデーはボスコヴィッチの原子論を擁護しているものの、それは1844年頃の一時期だけのことである。そして、それ以外の時期では、明示的にボスコヴィッチの名をあげることもなければ、その影響ははっきりと認められる議論を展開しているわけでもない。そのため、このウィリアムズの主張は、その後の研究によって指摘されているように論拠が不十分であり、満足できるものではない⁵。

原子論以外の影響としては、ドイツ自然哲学の影響も指摘されることが多い。ファラデーは自然界の諸力が変換可能で統一的な起源を持っていると考えており、さらに前述の原子論との関係でも述べたように、物質の本質が力そのものであるかのように考えていた。このファラデーの傾向は、当時のドイツ自然哲学の思想的な特徴とかなり似通ったところがある。しかし、例えばカネヴァが、ファラデーを含めた19世紀前半の科学者たちとドイツ自然哲学との関係についての包括的な検討をおこなったが、ファラデーについては有意な関係を見出せないと結論づけている⁶。

このように、ファラデーの電磁気学研究を包括的に理解するために何らかの思想的な影響を見出すことはこれまで十分に成功してこなかった。ウィリアムズの議論がまったく的外れであったわけではなく、ファラデーがボスコヴィッチの原子論と同じような物質観を持っていたことは確かである。また、ウィリアムズが主張するように、ボスコヴィッチの理論が19世紀の電磁気学や化学の理論的考察に大きな影響を与えたことも事実であるし、その影響がまったくファラデーに及んでいなかったとは言えないだろう。しかし、それがボスコヴィッチからの直接的な影響であったかどうかは疑問であり、当時のさまざまな自然哲学の議論を経て加工された間接的な影響であった可能性が高い。

このように影響が間接的であったとすると、それはファラデーの上司であり学問的な師でもあったデーヴィー (*Sir Humphry Davy*, 1778-1829) を経たものであった可能性が大きいと考えられる。ファラデーの物質観はデーヴィーの物質観と極めて近く、例えばルヴィアは、ボスコヴィッチについてのウィリアムズの研究を批判しつつ、デーヴィーとファラデーの化学親和力についての理解には密接な関係があったことを指摘している⁷。このルヴィアの研究は基本的に化学ないし電気化学を対象としたものであるが、電磁気現象一般への影響関係についても同じように言える可能性はあるだろう。

⁴ Williams, *Michael Faraday*.

⁵ Spencer, "Boscovich's Theory and its Relation to Faraday's Research."

⁶ Caneva, "Physics and Naturphilosophie."

⁷ Levere, *Affinity and Matter*.

その他にも、分析のためのよい論点を設定できれば、ファラデーの電磁気学研究についての一般的な理解を得ていくことは可能であろう。例えば、視点を変えて、前述のように実験を駆使した実直な姿勢をファラデーの特徴として注目し、その実験手法と認知過程の分析を進めた研究もある。その代表として、グッディングの1990年の研究がある。グッディングは、当時の研究者コミュニティについての社会史的な分析も交えながら、実験におけるファラデーの認知過程を分析し、力線や場という考え方が理論と実験との相互作用によって構築されていった過程を明らかにしている⁸。このグッディングの研究は、ファラデーの研究日誌を詳細に分析することによって説得力の高い議論を展開している⁹。しかし、認知過程の分析に主眼を置いている分だけ、ファラデーの理論の内容を包括的に説明しようとする視点には欠けている。このことは、グッディングの研究の価値を損なうものではないが、本論文の目的とは異なる。

さらに、ファラデーはサンデマン派というキリスト教非国教会の少数派に属していたことから、その教義がファラデーの物質観などに独特の影響を及ぼしていた可能性も指摘されている。カンターは1991年の著書で、そのような宗教的な観点からファラデーについての包括的な議論を展開している¹⁰。また、それとは別の観点として、例えばモーラスは、

⁸ 例えばグッディングは、地磁気についての当時の表現がファラデーの力線という表現方法に与えた影響について論じている。その一方で、ファラデーにおける力の概念を数学や力学といった他の分野との比較において論じることは目的としていないし、そのような議論がまとまった形で展開されることもない。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*.) なお、グッディングはこの著書の最初と最後でパトナムに言及していることから、パトナムの「意味」の意味(The Meaning of “Meaning”)への批判の意味もこめて、この書名を選んだと考えられる。なお、ウィリアムズやグッディングの研究をはじめとして、ファラデーの理論を対象とする科学史研究の多くは、ファラデーの残したテキストの分析で完結している。このような傾向が生じる理由は、前述のように研究対象としてのファラデーの独自性にあると考えられる。まず、ファラデーの研究日誌をはじめとする資料が詳細かつ多量にあり、その分析だけでまとまった研究になることが理由にあげられる。また、ファラデーは高等教育を受けておらず、つねに実験を研究の主体とし、その実験結果を解釈するために独自の概念を展開した。そうすると、同時代の自然哲学的な思想体系との影響関係など、他の一般的な学説に依存することによる思想的影響は見出しにくくなるだろう。

⁹ もちろん、ファラデーが出版した論文と彼の研究日誌(Diary)とでは記述内容に差があり、グッディングもこの点に注目して研究日誌の分析を進めたと言える。ファラデーは「研究し、仕上げ、発表する(Work, Finish, Publish)」を研究のモットーとして語ったと言われているが(Gladstone, *Michael Faraday*, 123.)、実際には必ずしもそれを繰り返せたわけではなかった。成果の得られなかった実験も多数あり、研究(とくに実験)の創意工夫という観点では研究日誌には論文として発表されていないアイデアがいろいろと記録されている。本論文でも、研究日誌からこのような記録を多数引用して分析の対象とし、その経緯についても必要に応じて論じている。その一方で、「力線」や「場」といった概念をめぐる形而上学的な考察については、研究日誌中にはほとんどその記述を見出すことはできない。むしろ、そのような記述は貴重であるため、そのほとんどを本論文中に引用したほどである。そもそもファラデーがこのような形而上学的な考察をどれほど深めていたかも疑問ではあるが、ファラデーの研究日誌はあくまで実験ノートであり、このことを踏まえると上記のような傾向が生じていることも理解できる。

¹⁰ 代表的な研究としては、Cantor, *Michael Faraday: Sandemanian and Scientist*. があり、その他ではWilliams, *Michael Faraday*, 102-106. Levere, *Affinity and Matter*, 75-9. などがあげられる。なお、ファラデー自身は自然神学的な発言も残しているものの、自然哲学と宗教とは二つの区別されたものであると、ある書簡の中で述べている。(Faraday to Augusta Ada Lovelace, 24 October 1844, *Correspondence*, 3:266.) もっとも、この書簡の宛先であるラブレス(Augusta Ada née Byron Lovelace, 1815-52)は、9.2節で論じるメスメリズムとの関係から神経系統に興味を持ち、6.4節で論じる原子論についてのファラデーの1844年の論文や宗教的な観点を踏まえて、生命における神経系の「隠れた影響」を数学的ないし分子論的に研究することを希望していた。そして、そのような研究についてファラデーと研究上の親密な交流を持ちたいと願う書簡を送ったのである。また、ラブレスは自身がユニタリアンであるが、他のいくつかの教義にも共感を覚える部

1998年に発表した著書の中で、ファラデーの社会的立場をその研究内容の特徴と関連づけながら社会的に論じている¹¹。しかし、これらの宗教的な観点や社会史的な観点は後述するように本論文の方向性とは異なる。そのため、これらの先行研究については、必要に応じて議論を補強するための参考とし、その範囲にとどめたい。

以上がファラデーについての代表的な先行研究であり、とくにグッディングが1990年の研究を発表して以降は、ファラデーの電磁気学研究の理論的な内容にまで踏み込んで分析を進め、「仮説」や「学派」の影響関係を踏まえて包括的な理解を与えるような新しい論点は見出されていないのが実情である¹²。しかし、そのことで結局のところ、冒頭で述べたようにファラデーの独自性をさらに強調する結果になり、ファラデーの導入した概念そのものについての歴史的な分析は、いまだ不十分な課題として残されることになる。

そこで本論文では、先行研究とは異なる新しい論点を提示することで、ファラデーの研究の目的や方法、およびその実際の過程についての分析を踏まえながら、ファラデーが電磁気学研究で導入した諸概念についての包括的かつ先行研究よりも見通しの良い理解を与えることを目指したい。

本論文の目的と論点

以上で述べたように、ファラデーの電磁気学研究についてはさまざまな研究がなされてきたが、それらはファラデーの導入した概念を歴史的に理解していくためには十分であったとは言えない。そこで本論文では、次の新しい論点を提示したい。

そもそも、ファラデーがこのように「力線」や「場」といった考え方を導入した理由は、電磁気現象の特殊性に求められる。電気や磁気は、離れたところにある物体へと作用を及ぼす。そして、その作用には引力だけでなく斥力もあるし、その作用も直線的にはたらくだけでなく曲線的にもはたらく。このような特殊性は、18世紀に広く認知されるようになった万有引力の特殊性とも異なり、説明の与えにくいものであった。

分はあり、ファラデーの宗派は知らないものの包括的な宗教観を持っていることも付記していた。(Augusta Ada Lovelace to Faraday, 16 October 1844, *Correspondence*, 3:253-5.) このような内容の書簡に対する返信であったため、ファラデーはラブレスと距離を置くために、とくに自然哲学と宗教との区別を強調したとも考えられる。なお、ラブレスはその後、9.2節で論じるクロスの実験などについて、ファラデーに報告を続けている。(Augusta Ada Lovelace to Faraday, 8 November 1844, *Correspondence*, 3:276-7.)

¹¹ Morus, *Frankenstein's Children*.

¹² それ以外では、ファラデーを研究対象としてさまざまな角度から複数の研究者たちによって検討した『ファラデー再発見』という研究論集も出版されている。(Gooding and James eds., *Faraday Rediscovered*.) しかし、グッディングの1990年の研究以降、ファラデーの理論の内容に具体的に踏み込んだ新しい研究は、ほとんど実現していないのが現状である。この傾向は、科学史研究の一般的な研究動向を反映したものだとも言えるだろう。1990年代以降、従来の科学史研究から現代を対象とした科学技術社会論(STS)研究へと、研究者の関心の方向性が制度的な動きをともなって大きく変化している。そのため、ファラデーの電磁気学研究の内容に詳細に踏み込んだ本論文のような研究においては、研究者層が薄くなっているのが現状である。

このように研究を困難なものとしていた根本的な原因は、これらの作用が空間を伝わる過程が可感ではないためである¹³。しかも、それが直線的ではなく曲線的で複雑な作用であったことが、さらに現象の説明を難しくしていた。そうすると、自然現象のさまざまな性質の可感性についての当時の理解を踏まえて、ファラデーらの電磁気理論を再検討する必要があるだろう。

自然現象の性質と可感性との関係として、当時はイギリス経験論を代表する哲学者ロック (John Locke, 1632-1704) の議論が一般的であった。ロックによると、精神は感覚器官を通じて外的対象を知覚し、その観念を得ていると考えられていた。そして、「理解すること (understanding: 知性)」は、この感覚を通じて外的な可感的な事物を観察するか、あるいは内省を通じて精神の内的作用を観察することによって得られると考えられた¹⁴。この可感性の基準としては、例えば、対象の大きさがあげられる。あまりに微小なものは感覚器官ではとらえられないため、可感ではない¹⁵。また、電気や磁気的作用のように、媒体の存在が予想されるにもかかわらず、感覚器官ではその存在を知覚できないとき、その作用を伝える原因は可感ではないということになる。そしてロックによると、原因が可感でないものはその観念を得ることができないとされた。18世紀から19世紀にかけての電磁気学は、一般的に言って、まさにロックが理解の可能性を否定したような困難な現象に対して進めていかざるを得ない状態にあったのである。

このように困難な研究対象ではあったが、電磁気的作用については主に二つの立場から研究が進められた。一つめは、いわゆる近接作用説であり、可感ではないにせよ何らかの媒体の存在を仮定して、そのふるまいを論じることで現象を説明しようとする研究であった。二つめは、いわゆる遠隔作用説であり、作用が万有引力のような中心力として及ぼされていると仮定して、その中心力のあり方を調べようとする研究であった。

この分類からすると、ファラデーの研究は近接作用説に属することになる。ファラデーは、「物体は、それが存在しないところには作用しない」¹⁶として遠隔作用説を否定し、力線と物質粒子の存在によって電磁気的作用を説明しようとしたからである。原子論との関係で述べたように、ファラデーは力そのものを物質の本質であるかのように考え、その観点から力線と物質粒子とを結びつける理論を展開していた。そうすると、力はずねに物質としてはたらくことになり、遠隔作用説とは相反することになるだろう。本論文では、この力と物質についてのファラデーの特徴的な考え方を踏まえて、「力」と「粒子」の関係を

¹³ 本論文では *sense* については基本的に「感覚」という訳語を用い、*sensible* については哲学研究の定訳である「可感」という訳語を用いる。

¹⁴ Locke, *Essay Concerning Human Understanding*, book 2, chap. 1.

¹⁵ 感覚器官で直接的に認識できなくても、顕微鏡などの機器を用いて間接的に観察・測定可能になる事象の可感性については議論の余地があるだろう。これについては当時の資料で明示的に分類されているわけではないので推測の域を出ない。ただし、1.2節で論じるように、可感ではない現象とは一次性質としての因果関係が観察・測定できない現象を意味していた。そのため、このように間接的であっても観察・測定可能な場合は、あくまで可感であると判断されていたと考えられる。

¹⁶ *ERE*, 2:293. ファラデーは、この言葉を「古くからの格言」として紹介している。詳細は6.4節を参照せよ。

重要な一つの論点として分析の対象としたい。

さらに、本論文では「表現」と「説明」という論点も導入したい。可感ではない電磁気作用を研究する上では、その作用のあり方を表現し、説明することが求められる。そして、感覚でとらえられる事象にはつねに限界があるため、この表現と説明をどのように求めていくかということが研究を進める上での本質的な問題となる。しかし先行研究では、このように「表現」と「説明」という論点からファラデーの電磁気学研究を包括的に分析しているものはない。そこで本論文では、ファラデーの誘導現象の原因となる力と粒子の関係についての表現と説明のあり方に注目しながら分析を進め、ファラデーの電磁気学研究を目的や方法などから包括的に理解することを目指したい。なお、この「表現」と「説明」という言葉について、基本的に本論文では、電磁気現象の「表現」を、その作用のあり方を図や方程式によって記述することを意味する言葉として用い、「説明」を、その作用の伝達のあり方の原因・根拠を示すことを意味する言葉として用いている。

詳細は第9章で改めて論じるが、ここで簡単にファラデーの「力」についての考え方の特徴を指摘しておく。ファラデーは、例えば晩年の1858年に、力の定義を粒子と関連づけながら次のように与えている。

「力 (force)」という言葉は、多くの人にとって単純に「ある場所から別の場所へと移動する物体の傾向 (tendency)」という意味で理解されており、それは私が思うに、「力学的な力 (mechanical force)」という語句に等しい。その意味に限定している人は、私の議論をとっても不明瞭だと思うに違いない。私が「力」という言葉で意味していることは、物理的な作用の「原因 (cause)」である。万物の粒子あるいは物質のあいだのあらゆる可能な変化の源泉のことなのである¹⁷。

この力の定義の中に、本論文の課題が端的に現れている。このファラデーの「力」の定義を表現と説明という観点から分析すると、次のように考察できるだろう。

まず、ファラデーがここで述べているように、力を「物体の傾向」と定義すると、力を研究することの目的は、物体の運動の変化を記述することになる。すなわち、運動の様子を「表現」することが研究の目的になる。それに対してファラデーは、力を「原因」と定義し、あくまで作用による変化の原因を「説明」しようとしている。

ここで、物質ではなく力そのものを作用の原因とみなしているところに、ファラデーの力についての考え方の特徴が現れている。もちろん、このように力を作用の原因とみなすことは力学的にも極めて一般的な考え方であったが、その力が及ぼされるためには、力とは独立にその原因として物質の存在を想定することが通常であった。しかしファラデーは、力そのものを物質であるかのようにみなし、前述のような原子論を展開したのである。

¹⁷ ERCP, 460. ファラデーは、この「傾向」という表現を電磁気の研究を始めた1821年当時から用いている。ファラデーの「力線」や「場」という表現は、この「傾向」の可視化を目的としたものであったと言える。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 171-3.)

このように、力についてのファラデーの考え方の特徴をファラデーの原子論と結びつけることは、前述のように先行研究でも指摘されてきたところである。そのため、先行研究では不十分であったファラデーの物質観について新たな理解を得るためには、そのための新たな論点が必要になるだろう。本論文では、それをファラデーの想定していた「粒子」の特殊性に求めたい。そもそも、ファラデー自身は「原子」よりも「粒子」という言葉をよく用いているが、これまでの研究ではファラデーの「粒子」の持つ独特な意味が注目されたことはなかった。一般に先行研究では、この「原子」と「粒子」はほとんど区別されることがなく、ファラデーの物質観についての研究の関心はファラデーの「原子」論へと集まっていたのである。

それに対して、本論文ではファラデーの用いる「粒子」には「質量」と対比される独特な意味が含まれており、この違いが、ファラデーの電磁気学研究を理解するための重要な論点の一つになることを指摘したい。このように考えると、ファラデーが力の定義で述べていた「力学的な力」には限定されない「力」を知るための手掛りが得られることになる。ニュートン (*Sir Isaac Newton, 1642-1727*) は、この「力学的な力」の対象として「質量」を定義し、その運動の変化を論じる学問として力学を展開した¹⁸。この「運動の変化」は、ファラデーが力の定義において「傾向」という言葉で表現していたものである。ファラデーは、力学的な運動の変化だけではなく、その原因を探ろうとしたのである。このように力学との研究目的の違いが論点になるのであれば、当時の力学や物理学、そして化学における方法論と関連づけながらファラデーの電磁気学研究を分析することも必要となるだろう。そのため、当時の学問分類のあり方も重要な論点となる。

もともと、ファラデーは質量と粒子とをまったく別のものと区別していたわけではなく、むしろ両者を積極的に関連づけようとしていた。そもそもファラデーは、前述のように、自然界の諸力が共通する起源を持ち、電気や磁気はもちろん重力などもその共通する起源の異なる形式に過ぎない可能性が高いと考えていた。そのため、これらの諸力は相互に変換可能であり、統一的な説明が与えられる可能性が模索され続けた¹⁹。さらにファラデーは、さまざまな自然界の作用がそれらの形式の変換された力によって生み出されているに過ぎないとすると、「力は創造されることも破壊されることもあり得ない」²⁰として、その力の総量が保存されるという確信も抱くようになった。このように力が保存するという確信は、同時代に確立されつつあったエネルギー保存則と類似の考え方である。しかし、フ

¹⁸ Koyré and Cohen eds., *Isaac Newton's Philosophiæ naturalis principia mathematica*, 1:39-40.

¹⁹ ファラデーは、1849年3月19日、重力と電気力の関係調べる中で次のように研究日記に書きとめている。「まったくこれは夢である。さらにいくつかの実験で調べよう。自然の諸法則との一貫性があるならば、何が真実であっても不思議すぎるということはないし、このような物事においては、実験がそのような一貫性の最もよい確認方法なのである。」(19 March 1849, *Diary*, 5:152, par. 10040) このように、ファラデーにとって、重力と電磁気力が互に変換可能であることを実証することは、研究上の大きな「夢」であった。重力と電磁気力の原因について変換可能であることが実験で確かめられれば、それらの原因を統一的なものとして考えることができるようになる。このファラデーの重力研究については、第9章で論じる。

²⁰ *ERCP*, 443.

ファラデーはあくまで「エネルギー」ではなく「力」が保存されると考えていたのであり、この違いを分析していくことが彼の考え方を理解する上で本質的に重要なものとなるはずである。力が保存すると考えられていたならば、あたかも力を物質のような実在物として扱うことにもなるだろうし、それは前述のファラデーの物質観とも大きく関係しているはずだからである。

以上のように、本論文では、現象の「表現」と「説明」という論点を手掛かりとしながら「力」と「粒子」の関係について分析し、さらに当時の感覚論や学問論と関連づけることで、ファラデーの電磁気学研究について、その目的や方法、実際の過程、そして彼が導入した概念についての新しい包括的な理解を与えることを目指したい。

論文の構成

ここで、本論での分析を始めるにあたって、本論文の全体的な構成について述べておく。まず、第1章では、遠隔作用説と近接作用説の違いについて論じたい。電磁気現象を論じる上で、その作用を遠隔作用であるかのように扱うか、あるいは近接作用として扱うか、その方法の違いは現象の表現や説明のあり方と大きく関係していた。そこで、ファラデーの議論を始めるための基礎として、この電磁気学に特有の問題であった遠隔作用説と近接作用説の違いを歴史的に分析することから始めたい。

まずは、ファラデー以前の電磁気学の理論についてとくに誘導現象の表現や説明のあり方を中心に概説する。当初から、電気や磁気的作用についての原因物質を仮定することは一般的であった。これがいわゆる近接作用的な説明である。しかし、このような物質的な説明には限界があり、新しい方法としてニュートン力学的な万有引力の議論を応用した遠隔作用的な研究も進められていった。このように物質的な説明に限界が生じた理由は、そもそも電磁気作用の原因物質が可感ではなかったためである。そこで、1.2節では、物質の性質と感覚との関係について、イギリス経験論などの議論を通じて当時の理解のあり方を探っていきたい。なお、万有引力も作用の原因が可感ではなく、遠隔作用であるかのようにふるまう特殊な力であった。しかし、その力の作用は距離の逆二乗則で表現することができ、この力の存在を認めることによって地上の落体運動から天体の運動まで普遍的に説明できた。そのため、万有引力の力学的な研究は広く一般に受け入れられ、電気や磁気の研究にも応用されていったのである。そして、これらの研究が遠隔作用説の議論を形成していくことになった。そこで1.3節では、遠隔作用説の特徴をそれに分類される研究者たちの具体的な議論の内容を分析することで、近接作用の議論との違いを表現と説明という論点において整理していきたい。

この第1章の議論を通じて、この遠隔作用説と近接作用説との違いは、端的に言えば、現象の原因をめぐる研究方法の違いであったことが明らかになるだろう。そして19世紀に

なると、この方法の違いはさらに洗練され、可感ではない原因を知ることはできないとして原因物質の議論を放棄し、測定可能な量の関係性だけを研究の対象にしようとする考え方が拡大していく。これが、いわゆる実証主義であり、フランスの哲学者コント (Auguste Comte, 1798-1857) によってその理論的な基礎が与えられた。第2章では、この実証主義の考え方に注目し、その表現と説明のあり方をフーリエ (Jean B. Joseph Fourier, 1768-1830) の解析的方法やアナロジーによる研究方法論と関連づけながら論じたい。なお、この章で扱うコントやフーリエについての議論は、一見するとファラデーの議論とは関連性が低いように思われるかもしれない。そもそも本論文では、ファラデーの研究がいかに関証主義的であったのかという論点から分析を進めることを意図しているわけではない。あくまでこの第2章の内容は、第7章以降でトムソンやマクスウェルの議論を通じてファラデーの研究を評価していく段階になって重要となるが、歴史的な順序を考えて第2章で扱っておくことにする。

また、実証主義で提起された科学の方法は、学問分類とも関連することになる。方法を考察するためには、既存の学問を分類・整理する必要があったからである。この学問の分類は、コントやアンペール (André-Marie Ampère, 1775-1836)、ヒューエル (William Whewell, 1794-1866) らによって少しずつ異なる形で進められた。なお、彼らは基本的に、数学や力学を科学研究の模範的な方法と考えていた。しかし、ファラデーの見解は彼らの見解とは異なっていた。ファラデーは数学や力学を模範的な方法とはみなしておらず、これらの方法については懐疑的でした。このファラデーの考え方の特殊性と、それに基づく表現や説明のあり方の特徴を論じる上では、以上の実証主義と学問分類についての理解が重要な考察を与えてくれることになるだろう。

第3章では、ファラデーが誘導現象の研究を本格的に開始するまでの期間について、ファラデーの電磁気学研究に影響を与えたであろうさまざまな経験や制度的・学說的背景について概観しておきたい。例えば、ファラデーの研究に影響を与えた制度的な要因としては、王立研究所 (Royal Institution) の存在があげられる。ファラデーは生涯にわたってロンドンにある王立研究所に所属し、その建物の地下にある実験室で研究を続けた。この王立研究所やデーヴィーとの関係についても、この第3章で論じることにする。

このように、第1、2章では本論文の分析を進めるにあたって必要となる思想的・学說的背景を分析し、第3章ではファラデーの直接的な学問的基礎とその社会制度的背景について論じる。そして第4章からは、それまでの章の内容を踏まえて、電磁気現象における誘導作用についてのファラデー自身の研究内容を具体的に分析し、ファラデーがその作用をどのように物質に帰着させ、粒子と関連づけていったのかを明らかにしていく。前述のように、ファラデーはこの誘導現象の様子を力線によって表現し、近接粒子 (contiguous particle) の作用として説明した。しかし、ファラデーの近接粒子の作用という説明には、真空での作用が説明できないという本質的な矛盾が含まれていた。この矛盾によって、ファラデーは力線によって表現される作用が物質によって説明できないという本質的な困難

に直面し、新たな説明を求められることになる。このように、ファラデーにおける表現や説明のあり方は研究の当初から自明であったわけではなく、実験と考察を繰り返す中で具体化されていった。第4章から第6章ではこれらの理論形成の過程や真空の問題の経緯について、とくに「力」と「粒子」の関係に注目しながら分析を進め、それによってファラデーの電磁気学研究についての基本的な理解を与えていきたい。

第7、8章では、さらにファラデーの次の世代にあたるトムソン (*Sir William Thomson, Baron Kelvin of Largs, 1824-1907*) とマクスウェル (*James Clerk Maxwell, 1831-79*) の研究を取り上げ、彼らがフーリエの方法やファラデーの概念を応用しながら新しい数学的な電磁気学研究を展開していった過程を論じたい²¹。

トムソンとマクスウェルは、ファラデーの力線や場という表現を数学的・力学的に再構成し、現象の表現や説明に活用していった。この過程は、研究者が何をもって現象を理解できたとみなすか、という問題とも密接に関連していた。そして、この議論を進める上で、第2章の議論が生きてくることになる。例えば、トムソンやマクスウェルは、現象の表現や説明においてアナロジーや力学的モデルという方法を重視したことで知られている²²。彼らは、原因が可感ではない現象を研究するためにアナロジーを積極的に評価した。この考え方は、現象の原因を説明することを放棄する実証主義の立場と関連づけることができる。また、トムソンやマクスウェルにおける学問分類と表現や説明のあり方との関連を分析し、先行研究では十分に意識されてこなかった彼らの方法論におけるアナロジーと力学的モデルとの関係について考察することで、ファラデーの研究についての歴史的な理解を

²¹ このトムソンやマクスウェルについても、いくつかの重要な研究がある。まずトムソンについては、スミスとワイズの共著による伝記的研究 (*Smith and Wise, Energy and Empire*) があげられる。この研究では『エネルギーと帝国 (*Energy and Empire*)』という書名にも表れているように、当時のイギリス社会における帝国主義的な工業化の体現者としてのトムソン像が描き出されている。さらにスミスは当時の哲学的傾向の考察を出発点として、エネルギーという概念の文化史的な研究 (*Smith, Science of Energy*) もおこなっている。一方でワイズはトムソンとマクスウェルの研究をアナロジーという観点から考察した博士論文 (*Wise, Flow Analogy to Electricity and Magnetism, 1977*) を発表した後、スミスとの共同研究を通じてイギリスの工業化についての文化史的な研究に関心を移している。またマクスウェルについての代表的な研究としては、マクスウェルの自然哲学全般を論じたハーマンの研究 (*Harman, Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*) や、特に渦粒子や変位電流について論じたシーゲルの研究 (*Siegel, Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory*) があげられる。しかし、ファラデーとトムソンやマクスウェルとの関係はよく指摘されるものの、この三者の関係を詳細に論じた研究は少ない。

²² 19世紀イギリスにおける電磁気学の傾向についての考察として、デュエムによる古典的な研究がある (*Duhem, Théorie physique*)。デュエムは、イギリスの傾向をフランスの抽象理論に対する力学的モデル、ないし理性に対する想像力という大局的な構図によって対比している (*Duhem, La théorie physique, chap. 4*)。この構図はイギリスにおける近接作用説とフランスにおける遠隔作用説という構図にも置き換えられる。この分析の枠組みは厳密性には欠くものの、19世紀の電磁気学史を理解するための一つの基本的な枠組みを与えるものとして広く受け入れられている。もっとも、デュエムもトムソンやマクスウェルの研究をイギリス的傾向の代表者として主張の根拠としているのであり、ファラデーについて詳細に論じているわけではない。また、オルソンは、デュエムが19世紀のイギリス物理学の特徴とした力学的モデルやアナロジー重視の源流をスコットランドのコモン・センス哲学に求め、ランキン (*William J. M. Rankine, 1820-72*) やマクスウェルに至る1750年から1880年という時代区分においてその影響関係を分析している (*Olson, Scottish Philosophy and British Physics*)。しかしオルソンの研究では、ファラデーについてはマクスウェルとの関係において簡単に言及されているだけであり、ファラデーとコモン・センス学派との関係については分析が進められていない。

深めていけることを期待したい²³。

そして、最後の第9章では、これら第8章までの議論を踏まえて、「場」や「力の保存」、「力の変換可能性」といったファラデーに特徴的な考え方について総合的に論じたい。それによって、ファラデーの電磁気学研究における力と粒子について、原因が可感ではない現象に対する表現と説明という論点から、本論文で目指してきた新しい包括的な理解を提示したい。

なお、繰り返しになるが、第2章におけるコントやフーリエの方法論や学問分類についての議論や、あるいは第7、8章におけるトムソンやマクスウェルのアナロジーや力学的モデルについての議論などは、ともすると最初はファラデーの電磁気学研究との関係性が低いと思われる議論もあるかもしれない。ファラデーの電磁気学研究が「仮説」や「学派」に関係なく、思想的・学說的に独立した実験と考察の試行錯誤の中だけで生み出されてきたものであれば、ファラデーのおこなった研究の内容だけに議論の対象を限定することもできるし、その方が議論も単純化されて理解しやすくなるであろう。このようにファラデーの研究を独立したものとして解釈しようとする、それがある程度まで可能であったところに、ファラデーについての科学史研究の難しさがある。このことは、先行研究の傾向に表れていた通りである。しかし、このような解釈ではファラデーの独自性の由来が彼の性格や才能に帰着されてしまいかねないし、それではファラデーの電磁気学研究を歴史的な観点から十分批判的に検討できているとは言えないだろう。

これらの単純だが不十分な解釈を克服していくためには、ファラデー自身の研究内容からは外れるように思えるテーマについても分析と検討を重ね、そこから得られた論点を踏まえてファラデーの電磁気学研究の全体像を浮かび上がらせていく必要がある。その新しい論点を与えることが本論文の第1、2章と第7、8章の議論で意図しているところである。議論を進めていくにつれて、それらの周辺的な章の内容が相互に関連し合いながら、その中間に位置する第3章から第6章で扱われるファラデーの研究内容についての理解を深め、さらには最終的に第9章でおこなう「力」と「粒子」についての包括的な理解へと導いてくれることが実感できるであろう。

それでは、さっそく本論に入り、まずは近接作用と遠隔作用についての議論を進めていくことにしよう。

²³ 例えば、デュエムは力学的モデルについて論じる際に、力学的モデルとアナロジーの混同について注意を促している。デュエムによると、アナロジーは抽象理論を互いに結びつけることで相互的に現象の理論を発展させることができるのに対し、力学的モデルはせいぜいのところ想像力を喚起して抽象的な理論を表現できるに過ぎない。(Duhem, *La théorie physique*, 149-58.) ただ、デュエムはトムソンが1884年におこなった分子論講義の内容を中心に力学的モデルの議論を展開しているため、そこでの力学的モデルは、過度に機械的モデル(歯車やゴムのような具体的な実在物を組み合わせたモデル)となっている。また、科学の発展は抽象理論の論理的な展開であるということが前提となっているため、むしろ当然の結果として力学的モデルが抽象理論に対して劣っているという論調になっている。このイギリスにおける力学的モデルでの問題については第7章以降で検討する。

第1章 可感的性質についての議論と遠隔作用説

第1章では、本論文の背景となる18世紀から19世紀に至る電磁気学の歴史と人間の感覚についての議論を踏まえながら、近接作用説と遠隔作用説の違いについて論じたい。とくに、電磁気現象の特徴となっている誘導 (induction) という現象に注目し、ファラデー以前のさまざまな研究者たちが誘導現象に対しておこなった理論的な説明を概観する。それによって、遠隔作用説と近接作用説の違いなど、ファラデーの理論の特徴を考察していく上での基本的な理解が得られるだろう。さらに、粒子についての議論の基礎となる感覚についての当時の議論を検討しながら、作用の遠隔的／近接的という二項対立的な図式を再検討したい。この感覚についての議論は、本論文の中心的なテーマとして重要な意味を持つことになる。そして、ファラデーが批判した電気の遠隔作用について、それぞれの研究者の具体的な議論の内容に即して、「遠隔作用説」の特徴を形成していった要因について考察したい。

1.1. 「誘導」という電磁気現象の特殊なふるまい

電気と磁気とは異なる自然現象であるため、両者の研究は同時に進んできたわけではない。この二つの力は、その類似性から並列的に論じられることが多く、相互の関連性が意識されることもあった。しかし、電気と磁気が相互作用することが実際に確かめられたのは1820年のことである。ファラデーは、この頃に三十代という研究者として最も充実した年齢を迎えていた。そして、電磁気学の研究が全体的に進展していくのに合わせて、ファラデーも第一線で活躍するようになっていった。しかしそれまでの長い間は、電気と磁気は比較の対象という以上の関係を持つものではなく、したがって研究も独立の現象として進められた。

近代的な磁気研究の始まりとして象徴的なのは、1600年にイギリスの医師ギルバート (William Gilbert, 1544-1603) が発表した『磁石論 (De magneti)』である。ギルバートは、彼が「テレラ (terrella: 小地球)」と呼んだ球形磁石を地球のモデルとして用いることで、地磁気的作用を実験的に考察した。なお、ギルバートは磁気とともに電気についても考察している。しかし、ギルバートにおいて磁気と電気はまったく性質の異なるものであると考えられ、磁気は非物質的な遠隔作用として扱われたが、電気は物質的なエフルウィウム (effluvium: 発散気) の作用として扱われた。このギルバートの区別は、19世紀に至るまで、一般的な考え方として基本的に受け入れられていった。

一方、17世紀に広まった機械論的な考え方では、磁気を遠隔作用として説明することが意図的に避けられた。その理由は、機械論では原則として自然現象を機械的な接触力によ

る近接作用として説明することが要求されたからである。例えば、デカルト (René Descartes, 1596-1650) は磁気を空間に分布したネジ状の粒子による作用だと説明し、ボイル (Robert Boyle, 1627-91) は磁気もエフルウィウムの作用として説明した。しかし 18 世紀になると、ニュートンがおこなった万有引力の研究の理論的成功にともない、接触力だけを想定する厳密な意味での機械論は影響力を弱めていった。多くの場合、遠隔作用という考え方は積極的に擁護されたわけではなかったが、距離を隔てて直接的に作用する力を想定することは、少なくとも研究を進める上での数学的形式としては受け入れられるようになっていったのである¹。

電気についての近代的な研究が進み始めたのは、18 世紀に入ってからであった。それまでは、摩擦によっておこる静電気現象だけが知られており、ギルバートは摩擦によって電気が生じる物質を「電気体 (electrica)」と名づけた²。その一方で、金属などは摩擦によって電気を生じないために「電気体」ではないと考えられた。もっとも、このように摩擦による静電気だけが知られていたため、ギルバートがそうであったように、電気現象は磁気現象との比較で論じられることも多かった。ただし、磁気には航海用コンパスなどの実際上の用途があったが、電気にはそのような実際上の用途がなかったため、積極的な研究の対象にはなりにくかった。

電気現象に注目が集まり、研究が進むようになったのは、電気が物質を伝わることをイギリスのグレイ (Stephen Gray, 1666-1736) が実験的に確かめ、その結果を 1729 年に発表してからのことである³。この 18 世紀の前半は啓蒙思想が普及し始め、人間の理性に信頼を置く新しい時代の象徴として、科学実験に人々の関心が注がれていった時代であった。このような時代背景において、電気現象は格好の実験対象となり、数多くの実験がおこなわれた。そして、それにとまって理論的な考察も進むようになった。

例えば、フランスのデュフェ (Charles-François Dufay, 1698-1739) は、電気現象がガラスのような物質から生み出されるものと樹脂のような物質から生み出されるもの（それぞれの物質をこすることによって生じる電気で、同種のものとは反発し、異種のものとは引き合う）があり、それに対応する形で二種類の電気流体が存在していると考えた。また、エリコット (John Ellicott, 1702/3-72) はギルバートにならってエフルウィウムという考え方を導入した。そして、このエフルウィウムを構成している粒子は、互いに斥力を及ぼし合い、それ以外の

¹ 遠隔作用説と機械論との歴史的な関係については、山本『磁力と重力の発見』で通史的に考察されている。

² Gilbert, *De magnete*, 50. この「電気体 (electrica)」という名称は、ラテン語の「琥珀 (electrum)」を語源としている。なお、この *electrica* については、「起電物体」や「電氣的物質」という訳語も用いられることがあるが、本論文では後述する「誘電体 (dielectric)」に近い語感を持たせるために一括して「電気体」と訳している。そして、ファラデーが用いる *electric* という言葉も同じように「電気体」と訳している。

³ この 1729 年は、ニュートンの死 (1727 年) の 2 年後にあたる。グレイはグリニッジ天文台長のフラムステッド (John Flamsteed, 1646-1719) の下で天体観測に従事しており、ニュートンとフラムステッドとの確執を周囲が配慮した結果、間接的にグレイの研究活動にも制約を与えることになったことが指摘されている。(Ben-Chaim, "The Empiric Experience and the Practice of Autonomy.")

物質には引力を及ぼしていると考えた⁴。さらにエリコットは、エフルウィウムからアトモスフィア (atmosphere) を分け、エフルウィウムを物体の表面付近に存在する物質的なものとして扱う一方で、そのエフルウィウムから生じてくる作用をアトモスフィアによるものと解釈した⁵。

フランクリン (Benjamin Franklin, 1706-90) は、デュフェとは異なり、電気の流体は一種類であると主張した。すなわち、電気とは物質の中に入り込めるような極めて希薄な流体であり、電氣的な引力や斥力はその流体が自然状態に対して豊富に存在しているか、あるいは不足しているかの違いによって生じていると考えた。これをフランクリンは電氣的な正と負 (ポジティブとネガティブ、あるいはプラスとマイナス) と呼んだ。

さらにフランクリンは、エリコットの理論を基礎として、この電気流体 (エリコットの理論のエフルウィウムに相当する) から物体の形状に即してアトモスフィアが引き出され、物体を取り巻いていると考えた⁶。フランクリンは、電気のアトモスフィア的作用を次のように説明している。

電気のアトモスフィアの形状は、それが取り巻いている物体の形状である。この形は、帯電した物体の下にある熱いティースプーンに落とした乾燥ロジンから煙を立ち上らせることにより、静かな空気の中で可視化できる。それは引き寄せられて、その物体を覆い隠すように側面すべてに均等に広がる。そして、物体表面のすべての部分に引き寄せられているために、この形状をそれが取ったところで、すでに充満した物質に入り込むことはできない。この牽引がなければ、それは物体周囲にとどまることはなく、空中に散ってしまうだろう⁷。

つまり、アトモスフィアは物質的なものと考えられ、物体のまわりに存在して物体表面に引き寄せられていると考えられた。そのため、その基礎となる面が小さいほどアトモスフィアは引き出しやすくなると考えられた。そうすると、とくに物体の角では拘束力が弱くなり、そこからアトモスフィアがより遠くまで引き出されやすくなる⁸。それによって、物体の先端では電気の作用が強くなることが説明された。

図1は、物体まわりのアトモスフィアを表現した図である。物体の形状に合わせるように、先端ではより遠くまでアトモスフィアが到達している様子が描かれている。

⁴ Ellicott, "Several Essays," 196.

⁵ Ibid., 209-10.

⁶ Franklin, "Opinion and Conjectures," 213. このアトモスフィアは空気とは異なる。フランクリンは湿った空気も電氣的性質を持っているとしながら、空気とアトモスフィアとは排他的ではないと論じている。(ibid., 248.)

⁷ Ibid., 216.

⁸ Ibid., 216-7.

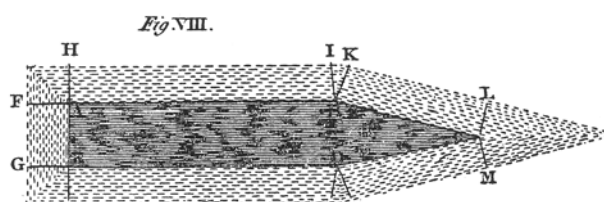


図 1：物体の周囲に分布するアトモスフィア (Franklin, *Experiments and Observations on Electricity*, 162.)

このフランクリンの理論は、1751年に『電気についての実験と観察 (*Experiments and Observations on Electricity*)』として出版され、ヨーロッパで広く受け入れられて電気の基礎理論となった⁹。しかし、このフランクリンの理論では、なぜ電気流体が物体表面から大気中に放出されずにとどまっていたのか、また、なぜアトモスフィアが物体のまわりに継続的にとどまっていたのか、その説明を十分に与えることが難しかった。そして一般には、電気流体は大気圧によって物体表面にとどめられているという説明が追加的に与えられるようになった。

フランクリンの理論が発表された1750年代は、電気研究が注目を集めた年代であった。ライデン瓶の発明に続いて1751年にフランクリンの『電気についての実験と観察』が出版されたことから、電気に関する理論的考察が進んだ。そして、さらにカントン (John Canton, 1718-72) やウィルケ (Johan C. Wilke, 1732-96) によって電気の誘導現象が発見され、アトモスフィアによる説明が試みられた。この誘導現象は電気現象の説明をさらに困難にする複雑な現象であり、ファラデーの重要な研究テーマとなっていく。例えばヒューエルは、この誘導現象による作用の特徴を次のように説明している。

電気が与えられた物体は、どのような形状の導体が差し出されても、ふさわしい流体を自分自身の側に牽引し、それとは逆の流体を逆側へと斥けるよう、導体内の電気流体に新しい配置を決定する。これが電氣的な「誘導」である¹⁰。

すなわち、誘導とは、離れたところにある物質の電氣的な状態を変化させ、新たな極性を生じさせる作用のことである。ここでヒューエルが説明しているように、誘導の作用は電気流体から及ぼされるが、その作用は対象となる物体の形状に応じて複雑に変化し、その対象となる物体内の電気流体の配置を変化させる。また、その作用は、作用を及ぼし合う物体間に別の物体を挿入することで顕著に変化する。そのため、電気の誘導は万有引力のような遠隔作用ではなく物質によって媒介される近接作用であると考えられ、アトモス

⁹ この書物は、電気について論じた1747年からの書簡をまとめたものであり、1751年に出版された。

¹⁰ Whewell, *History of the Inductive Sciences*, 3:522.

フィアやエーテルなどの不可秤流体を仮定してその説明が試みられた。

しかし、このように不可秤流体を仮定しても、その流体そのものは可感ではないため、その存在を実証することはできない。このように肝心の原因物質の存在を実証できないことが、研究を進める上での大きな障害となった。作用の原因が可感ではなかったことが、電気現象に対する物質的な説明の限界となり、それ以上の説明は保留せざるを得ない状態となったのである。

その一方で、電気や磁気の力を直線的な作用に還元し、それらの組み合わせによって数学的に表現することも試みられた。その数学的研究の先駆となったのが、エピヌス (Franz Ulrich Theodosius Aepinus, 1724-1802) の『電気と磁気の試論 (*Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi*)』である¹¹。エピヌスは1756年末に友人の紹介により、熱を加えると電気を生じるというトルマリンの電氣的性質に興味を持ち、電気の研究に本格的に取り組むようになった。そしてトルマリンの電氣的性質と磁石との類推から、電気と磁気とが基本的に同じようなものだという考えを深めるようになった。『電気と磁気の試論』は、そのような前提によって考察が進められ、1759年に発表されたものである¹²。エピヌスは、フランクリンの理論から出発しながらも、電気や磁気的作用を直接的かつ直線的な二点間作用に還元し、数学を用いて現象を定式化していった。このエピヌスの『電気と磁気の試論』はラテン語で書かれたこともあって難解な印象を与えたが、その議論の概要は広く知られることとなり、エピヌスは電磁気学の数学的研究ないし遠隔作用説の代表者として知られるようになった。

さらに電気のための数学的研究は、キャヴェンディッシュ (Henry Cavendish, 1731-1810) やクーロン (Charles Augustin Coulomb, 1736-1806) によって、それぞれ独立に進められてい

¹¹ エピヌスは、1757年よりサンクト・ペテルブルクに移り、雷の実験中に命を落としたリヒマン (George Wilhelm Richimann, 1711-53) の後継としてロシアの帝国アカデミーの物理学教授および天文台長になった。そして、1759年にそれまでの電気と磁気についての研究をまとめた『電気と磁気の試論』を発表した。なお、エピヌスの研究をイギリスに広めたプリーストリは、『電気と磁気の試論』について「労作である (elaborate)」という評価を繰り返しながらも数学的側面については触れていない。(Priestley, *History and Present State of Electricity*, 2:34-5.) すなわち、エピヌスの議論は表面的な解説としてイギリスに伝えられたと言える。これは、1.3.2節で論じるように、キャヴェンディッシュのエピヌス理解においても同様である。

¹² エピヌスは『電気と磁気の試論』の導入部分で電気と磁気の類似性を繰り返し主張している。このエピヌスの電気と磁気との類似性への確信は、18世紀半ばのトルマリンの「発見」とライデン瓶の発明によって補強されたものであった。トルマリンは、いわば電気における磁石のようなものと考えられた。このトルマリンの焦電気の性質を当時のヨーロッパに広く紹介したのは、エピヌスであった。(“An Account of the Surprising Electrical Qualities of a Precious Stone, found in the Island of Ceylon,” *Gentleman's Magazine* 28 (1758): 617-9.) そして、磁石は電気におけるライデン瓶のようなものと考えられた。この経緯については、ホームの研究を参照せよ。(Home, “Aepinus, the Tourmaline Crystal, and the Theory of Electricity and Magnetism.”) なお、電気と磁気については、どちらも二つの極を持つという性質を有することはもちろん、かなり物性的な内容に至るまで、多くの面でも対応づけが可能であると考えられた。例えば、1830年代にヒューエルが当時の理論を概括して「物体を導体と起電物体に区別することが、軟鉄と硬鋼の区別に対応する」と論じている。(Whewell, *History of the Inductive Sciences*, 3:43.) しかしまた相違点も多く、電気で観測されるような現象でも磁気では観測されないことが多くあることは知られていた。例えば、同じくヒューエルは「その仮説は顕著なほどの精確さで現象の広い部分に説明を与えたとはいえ、物質的流体の存在は、火花、先端からの放電、ショック、その力学的作用といった種々の事実によっては示されていない」と指摘している。(Whewell, *History of the Inductive Sciences*, 3:57.)

った。どちらの研究でも、電気の力は万有引力と同じような中心力であることが前提となっており、万有引力と同じように距離の逆二乗に比例して作用することが実験によって確かめられた。キャヴェンディッシュは、電気の強さを電気流体の圧縮状態と考えることで電気一流体説を支持し、1780年頃までに電気についてのさまざまな定量的研究をおこなった¹³。一方、クーロンは、電気流体による説明は保留とし、あくまで電気の力の強さと距離の関係を数学的に記述するための研究に終始した。そして、キャヴェンディッシュとは異なる方法で電気の力の逆二乗則の正しさを確かめ、さらに磁気についての測定も進めて、1785年から1789年にかけてそれらの結果を発表した。この、エピヌスからキャヴェンディッシュ、クーロンへと数学的方法によって研究が進められていく過程は、1.3節で改めて検討する。

このように、18世紀の後半になると、電気や磁気の現象を力学的な方法によって数学的に研究することが進められていった。しかし、これらの研究において数学的に表現できる場合は単純で特殊な現象に限られており、一般的な現象を表現するためには数学的な方法は不十分なものであった。そして、これが数学的に与えられる直線作用による表現の限界であり、すなわち遠隔作用説による表現の限界となった。

19世紀に入ると、「物理学 (physical sciences あるいは physics)」の分野でさまざまな研究の展開が見られるようになる。当時の「物理学」という学問分野の特徴は第2章で詳しく論じるが、基本的には力学と化学という既存の学問分野の中間領域に位置づけられ、電磁気学や熱学などを含む分野であった。すなわち、力学のように運動と力の組み合わせによって説明がつくわけでもなく、化学のように物質の性質に帰着させて説明がつくわけでもない、原因のよくわからない現象を扱う分野であった。

この物理学分野の研究が進み始めたのは、新しい現象が発見されることで新しい実験が可能となり、現象の理解が深まっていったからである。とくに電気学の分野では、1791年に発表されたガルヴァーニ (Luigi Galvani, 1737-98) による動物電気の発見と、1800年に発表されたヴォルタ (Alessandro G.A.A. Volta, 1745-27) による電堆の発明が決定的であった。この電堆を追実験する過程で、その同じ年にニコルソン (William Nicholson, 1753-1815) とカーライル (Anthony Carlisle, 1768-1840) によって水の電気分解が発見・報告され、この電気分解という現象を研究することによって電気現象と化学現象の研究が結びついて飛

¹³ キャヴェンディッシュは、電解質の電気抵抗 (電流に逆らう力として考えた) の測定をおこない、物質の電気容量が電圧によらずに物質固有のものであるとして物質の比誘電率を測定し、また、精度の点では問題が残るものの、電気の力の逆二乗則も実験によって確かめていた。これらの研究は未発表のままではあったが、後にファラデーやクーロンが発表した研究を先取りするような内容であった。その他にはシビレイエイの出すショックを電気装置で再現して、電流の強さと感じる衝撃の大きさとの関係について研究をおこなって1776年に発表している。彼は論文をあまり発表せず、未発表の研究も多かった。また、それら未発表の研究の内容は発表された論文に反映されることが少なかったため、その研究の全容は評価されることなく長く放置されたままであった。彼の未発表の業績が評価されるようになったのは19世紀半ばを過ぎてからである。その編集作業はハリスから資料を譲り受けたウィリアム・トムソンによって着手され、その作業はマクスウェルによって引き継がれて1879年に出版された。最終的にその研究の全容が出版されて公になったのは彼の死後100年以上を経た1921年のことであった。

躍的に進歩していった。例えば、電堆や電池を改良することで定常的な電流の供給源が得られ、電気と磁気の相互作用を理論的に研究していく基礎となったし、そこで生じる電気分解は、元素の同定をはじめとする化学研究には欠かせない技術となった。

また、18世紀末からは熱学の研究も進んでいた。イギリスのラムフォード伯 (Benjamin Thompson, Count Rumford, 1753-1814) やデーヴィー、ヤング (Thomas Young, 1773-1829) といった研究者たちは摩擦熱の研究を進め、熱運動説や熱量保存といった新しい学説を提唱した。ヤングは光の波動説の提唱者としても有名である。彼らはイギリスの王立研究所の教授であり、ラムフォードはその創設の中心人物でもあった。この王立研究所は、イギリスにおける物理学研究の中心であった。もともと、この王立研究所での物理学研究とは、数学を用いた力学的方法ではなく実験重視の化学的方法による研究であり、彼らにとって化学と物理学とは、異なる分野であるという意識はあっても互いに排他的な専門分野であるという意識はなかった。化学の研究者の多くは電気を使って研究を進めたし、電気も熱も彼らの研究対象であった。ファラデーもまた王立研究所に所属しながら、化学の研究と電磁気学の研究とを横断的に進めていったのである。

電磁気現象は、エールステズ (Hans Christian Ørsted, 1777-1851) が1820年に電流の磁気作用を発見してから、より複雑な様相を呈するようになっていった。この作用は、電流を取り巻くように交差する力 (skew force) として発生し、さらには瞬間的な変化をともなって発生するものであった¹⁴。この新しい性質は、万有引力のような直線的かつ持続的な遠隔作用とは異なるものであり、もはや数学的に単純な表現に還元することは難しいように思われた¹⁵。

ファラデーも、1820年から21年にかけての一時期と、さらに1830年代に入ってからには継続的に、この電気と磁気の誘導現象の配置の問題に取り組んだ¹⁶。そして、1837年になって、電気の誘導現象を基礎として導体から絶縁体までを包括的に説明する、力線および近接粒子の分極作用という独自の考え方に基づく理論を発表した。

なお、前述の誘導作用についてのヒューエルの説明は、1857年に出版された『帰納科学の歴史 (History of the Inductive Sciences)』第3版の付記「ファラデー博士の静電誘導につ

¹⁴ こうした新しい認知体験は、既存の言葉では観察対象を直接的にうまく表現できないという状態が生じる。3.5節で論じるように、エールステズは、この現象を近接空間に広がる「電気相克」として表現しようとした。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 30-3.)

¹⁵ そもそも未知の対象を実験する場合、その現象の空間的配置を理論的に記述することすら難しいものであったが、それが時間変化をともなう複雑なものであればなおのこと、理論的に把握することは困難なものとなった。例えばビオは、磁針のまわりで導線を移動させて作用の方向を観察しようとしたが、導線を地面に水平に置いた場合には、磁針に対して引力とのつり合いによる水平方向の傾きや、地磁気からの力、電流による磁針そのものの消磁など、さまざまな要因が作用して、とても文字通りの「円」とは結論づけられなかった。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 41-3.)

¹⁶ ファラデーは、エールステズの発見を受けてこの電気と磁気との関係について研究を始め、電磁モーターの開発に成功した。しかし、上司であるデーヴィーから、この研究成果に対してウォラストン (William Hyde Wollaston, 1766-1828) のアイデアを盗用したという疑いをかけられてしまう。ファラデーが電磁気学の研究を本格的に開始したのは、デーヴィーが死去した1829年より後のことであった。この経緯の詳細は、第3章で論じる。

いての見解」¹⁷からの引用である。そこでヒューエルは、「この誘導の力による導体における流体の配置は対称ではなく、決定するためには複雑で困難な計算を必要とする法則に支配されているようだ」¹⁸としながらも、「私たちの見出したその配置が、クーロンの理論では説明できないものであり、私たちに曲線的な作用を仮定することを強いている」¹⁹と述べている。このヒューエルの記述からも、誘導現象の配置の複雑さは、直線的な中心力に還元して現象を表現しようとする遠隔作用説の立場を困難なものにしていたことがわかる。ファラデーが誘導の理論を発表した1837年から20年を経過してもなお、この配置の問題は依然として大きな課題であった。遠隔作用説には表現に限界があったが、ファラデーの説明にも限界があった。ファラデーは、力線と近接粒子という独自の仮説的な概念によってこの複雑な曲線作用を表現し、説明を与えようとした。しかし、このファラデーの理論は定性的なものであり、定量的なものではなかった。そのため、同時代の研究者たちにとってもファラデーの記述は曖昧さのある不十分なものとみなされ、賛否両論を生んだのである。

例えば、ティンダル (John Tyndall, 1820-93) はファラデーの誘導の理論を賞賛し、その理解しづらく曖昧な表現については次のように弁護している。

私にはときに、ファラデーが明らかに流体やエーテル、原子といったもののはたらきを見ていたのだろうと思われた。しかし、彼の受けた訓練ゆえ、彼がその構成要素であろうと見抜いていたものを分解し、力学に熟達した精神を満足させる方法でそれを記述することができなかったのだ。そのため、言ってしまうと、理解しがたく、結論に確信を持つことを妨げるような、曖昧な言い方がまた生じてくるのである。しかし、彼は私たちの知識のまさに境界で仕事をしていたのであり、彼の心はいつもその知識を取り巻く「果てしなく続く陰」の中にあっただということをつねに思い起こさねばなるまい²⁰。

ここでティンダルが述べている、ファラデーが対象としていた「知識の境界」とは、既存の力学的な方法では説明のできない、感覚ではとらえられない領域に踏み込んで説明を与えようとするときに直面する境界のことであった。そして、2.3節などで改めて論じるが、「電磁気学」という分野は物理学の中でも化学との境界に位置づけられ、その領域を記述するためには、新しい方法が必要とされたのである。

この新しい方法は、1840年代にトムソンによって、ついで1850年代にマクスウェルによって、それぞれ導入が進められた。トムソンは、フーリエの「熱の解析的理論 (*Théorie*

¹⁷ Whewell, "Dr. Faraday's View of Statical Electric Induction," in *History of the Inductive Sciences*, 3:522-3. 『帰納科学の歴史』の初版は、ファラデーが誘導について発表した年と同じ1837年に出版された。

¹⁸ Ibid., 3:522.

¹⁹ Ibid., 3:523.

²⁰ Tyndall, *Faraday as a Discoverer*, 72-3.

analytique de la chaleur)」の方法を電磁気現象に応用し、ファラデーが力線によって表現しようとした曲線的な作用を数学的に表現することを試みた。

このフーリエの熱の研究は、広くヨーロッパの研究者たちに影響を与え、とくに電磁気学の分野ではトムソンやマクスウェルの他にもオーム (Georg Simon Ohm, 1789-1854) に影響を与えたことが知られている。フーリエの論文は、三角関数を用いた級数展開など、数学の方法において革新的であっただけではなく、科学の方法としても重要であった。フーリエの熱の解析的理論では、作用の伝達が微分方程式を利用することで中間の微分的な変化として扱われる。そのため、この方法によって、現象の原因や仕組みを力学的に説明することなく、あくまでその作用を分析して近接作用的かつ数学的に表現することが可能となった。事実、2.1 節で改めて検討するように、フーリエは力学が熱の研究には不十分であると主張している。フーリエの方法は、可感ではない原因の説明を放棄する実証主義の考え方を、そのままの形で数学的に表現したものであった。そして、この数学的方法は、力学的な方法では論じきれない物理学という新しい学問分野を研究するための新しい方法になったのである。

トムソンは、このフーリエの方法を応用することで、作用の原因については論じることなく、物理的にはまったく異なる熱の作用とのアナロジーを想定する。そして、それによってファラデーが力線によって表現しようとした近接作用的な曲線作用を数学的に記述したのである。当時は一般に、熱は連続的な物質による作用とみなされており、とくに数学的にはほとんど遠隔作用として扱われていた電気現象とは対照的であった。トムソンは、この表現においても説明においてもまったく異なる扱いを受けていた二つの物理現象をアナロジーで結びつけたのであり、それは極めて異色の試みであったと言える。その斬新さについて、マクスウェルは、それから 30 年後に執筆した著書の中で、「当時の人たちにとっては、それら自体の類似性のなさが、この本の読者よりもかなり大きく感じられただろう」²¹と述べている。

ファラデーの電磁気学研究は誘導現象を中心としたものであり、この現象は離れたところにある物体に対する作用であり、本質的に空間の性質を扱うものであった。この作用を説明するためには、アトモスフィアなどの物質的な原因が想定されたが、この原因物質は可感ではなかったため、このことが近接作用的な説明の限界となった。その一方で、万有引力の力学的な議論を応用した遠隔作用的な理論も発展していった。しかし、誘導の作用は複雑であったことから、直線的な中心力に還元する遠隔作用的な表現にも限界があった。すなわち、近接作用説にも遠隔作用説にも、それぞれに限界があった。そして、この限界は、そもそも作用の原因が可感ではなかったことと、数学的方法が十分に発達していなかったことに起因していた。逆に、ファラデーの直面していた課題は、いかに感覚でとらえることができない微小な領域の説明を与えるかという問題であり、この可感ではない原因によって生み出される現象を表現するためにはティンダルの言う「力学に熟達した精神」

²¹ Maxwell, *Elementary Treatise on Electricity*, 52.

においても新しい数学的方法を受け入れて、最終的にはその力学的な考え方そのものを変えていく必要があったのである。

この数学的・力学的な方法の限界と遠隔作用説との関係は 1.3 節で論じることにして、次の 1.2 節では、まずは、18 世紀から 19 世紀にかけての物質の性質とその可感性についての理解を物質観と関連づけながら論じることにしてほしい。

1.2. 力と物質についての知識と感覚との関係

前節で、誘導という現象を理論的に記述することの難しさを指摘したが、その難しさは作用の原因が感覚ではとらえられないことが大きな理由の一つであった。力にしろ物質にしろ、それらにはつねに感覚を通じて認識される。しかし、電磁気作用の原因として仮定されていた粒子や原子は、感覚では直接的にはとらえられない微小な存在と考えられる。このような微小な領域の作用を歴史的に分析するためには、物質の性質やそれによる作用が感覚との関係でどのように理解されていたのかを知っておく必要がある。そこでこの節では、物質の性質や作用とその可感性との関係について、当時の代表的な議論を概観しておきたい。

18 世紀以降の感覚についての議論は、ニュートンとロックの影響を強く受けて発展した。ニュートンは 1687 年に『プリンキピア (*Philosophiae naturalis principia mathematica*)』を発表し、機械論的な自然観では受け入れがたい遠隔作用的な万有引力を導入し、既存の機械論的な枠組みにとらわれない新しい力学の基礎をつくった。そして、1704 年には『光学 (*Opticks*)』を発表し、粒子論的な観点から光の実験について論じるとともに、一般的な物理現象や化学現象へと議論を拡大しながら自然現象全般にわたる諸問題を提示した。一方、ロックは 1689 年に発表した『人間知性論 (*An Essay Concerning Human Understanding*)』において生得観念を否定し、観念ないし知識は感覚 (*sensation*) と内省 (*reflection*) を通じた経験によって作られると主張して、イギリス経験論の基礎をつくった。そして、これらニュートンとロックの議論は、近代科学を基礎づける方法論ないし認識論の象徴的存在として、イギリスだけでなくヨーロッパ全体に影響を与えていった。

それでは、これらニュートンとロックの感覚に関する議論をもう少し詳しく検討していこう。ニュートンの『プリンキピア』は、何よりも万有引力という概念を導入したことで同時代に大きな影響を与えた²²。万有引力は、遠隔的に作用する力であり、その力の原因を機械論的に接触力へと還元して説明することができず、そのため「隠れた性質」を持つ力であると考えられた。この隠れた性質を認めることは、自然現象を機械論的な近接作用に還元することで成功を収めてきた近代的な自然哲学の方法を放棄することにもつながり

²² この経緯については、山本『古典力学の形成』を参照せよ。18 世紀において、例えばニュートンの三法則については、慣性の法則はガリレオの業績であったし、運動方程式も現在の形式に整っていたわけではなく、したがってニュートンの業績とは自他ともにみなされていなかった。

かねない。そのため、ライプニッツ (Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646-1716) をはじめとして当時の研究者の中には、この万有引力という概念を理論として不十分であると非難する者もいた。

もっとも、ニュートン自身も自然現象に対して隠れた性質を想定することを問題視していなかったわけではない。しかしニュートンは、機械論的な仮説を導入してその原因を無理に説明することはせずに、この隠れた性質についての議論を回避することを選んだ。例えば『プリンキピア』では、重力の性質が普遍的であるとして「万有引力 (gravitas universalis: 普遍的重力)」と名づけられたが、その原因が不明であったため、重力の普遍性はあくまで自然哲学上の「規則」として位置づけられている²³。そして、あくまで運動と力の関係を記述することでその現象の法則性を表現することを研究の目的とした。

ニュートンは『光学』の疑問 31 で、この隠れた性質について次のように説明している。

アリストテレス主義者たちは、顕示的な性質 (manifest qualities) にではなく、物体の中に隠されていて顕示的な効果の未知の原因であると思われるような性質に、隠れた性質 (occult qualities) という名を与えた。例えば、重力や、磁気や電気の引力、そして発酵は、これらの力や作用が私たちには未知の性質から引き起こされるものであって、発見されたり顕示されたりすることが不可能であると考えれば、これらの原因がその隠れた性質ということになるであろう。このような隠れた性質は、自然哲学の向上を止めてしまうものであり、そのため近年では斥けられている。あらゆる事物の形象には、それによって作用し、顕示的な効果を生み出すような隠れた特定の性質が付与されていると語ることは、何も語らないことである²⁴。

すなわちニュートンは、重力や磁気、電気、発酵など、人間の感覚ではその原因がよくわからない作用については無理に機械論的な説明を与えたりせず、むしろそれらが隠れた性質であることを率直に認めている。その上で、その隠れた性質についてそれ以上の議論を放棄し、感覚によってとらえることのできる顕示的な性質 (すなわち物体の運動) に限定した理論を構築しようとしたのである。

ニュートンは、まずは運動の原理を研究することの重要性について、次のように述べている。

しかし、現象から二、三の運動の一般原理を引き出し、その後すべての有形の事物の特性や作用がそれらの顕示的な原理からいかにして引き起こされるかを語ることは、それらの原理の原因はいまだ発見されていないにせよ、哲学における極めて偉大な一

²³ ニュートンは、このように重力が普遍的であることを、『プリンキピア』の「哲学することの諸規則 (Regulae philosophandi)」のなかで明記している。(Koyré and Cohen eds., *Isaac Newton's Philosophiae naturalis principia mathematica*, 2:552-5.)

²⁴ Newton, *Opticks*, 377.

歩となるだろう²⁵。

このように、ニュートンは観察できる可感な運動について数学的原理を導くことを自然哲学の目的としたのであった。さまざまな自然界の性質についての原因を知ることはできないが、そのような性質は、顕示的な運動に基づいて議論することが有効であると考えたのである。

運動の数学的な分析によって現象の研究を進める方法は、渦動論をはじめとするデカルトの機械論の誤りが観測によって明らかになるにつれて、広く社会に受け入れられていった。例えば、ベントリー (Richard Bentley, 1662-1742) は、ボイル・レクチャーの中で「普遍的な重力は、自然の中に確かに現存するものであり、すべての機械論や物質的原因より上にあつて、より高い原理、すなわち神的な活力 (energy) や刻印に起因している」²⁶と述べ、無神論へと結びつく機械論を積極的に否定する根拠として万有引力を位置づけている。その一方で、機械的な力に還元できない万有引力を例外として扱わないようにするためにも、力は物体の運動の変化として論じられるようにもなっていた²⁷。こうして、従来の機械論からは脱却した新しい形の力学が展開されていくことになった。

一方、ニュートンと同時代にあつて、18世紀の自然思想に大きな影響力を持ったのがロックの経験論である。ロックは、前述のように、すべての観念は経験によって獲得されると考えた。そして経験は、感覚によって外界の事物を観察することで得られるものと、内省によって心を内的に観察することで得られるものの二種類に分けられると考えた²⁸。自然現象の研究を進める場合には、とくに外的な自然現象の観察が重要となる。そのため、この感覚の作用について理解を深めることが重要な問題となっていたのである。

自然現象は、感覚によってさまざまな観念と結びついて認識される。例えば、ロックによると、雪を感覚によってとらえると、「冷たい」「白い」「まるい」といった観念として認識される²⁹。ロックは、これらの観念を感覚と運動との関係において二つの性質に分類する。まず基本となるのは、容積や形状、数量、位置、運動といった一次性質 (primary qualities) である。この一次性質は力学的な量に対応している。すなわち、雪の「まるい」という形状についての性質は一次性質になる。次に、熱や音、匂い、味などの二次性質 (secondary qualities) がある。すなわち、雪の「冷たい」や「白い」という性質は二次性質になる。二次性質は、それ自体は可感な性質 (sensible qualities) であるが、その原因を感覚で把握す

²⁵ Ibid.

²⁶ Bentley, *A Confutation of Atheism from the Origin and Frame of the World: Part II*, in *Works of Richard Bentley*, 3:165. ベントリーは、重力を磁気の力能でも渦動の効果でもないとして述べている。(Ibid., 164.) なお、ベントリーは、この講演の内容を事前にニュートンにも書き送っている。(Bentley, "405 Bentley to Newton: 18 February 1693," *Correspondence of Isaac Newton*, 3:247.) この点についてのニュートンの見解は、1.3.1節を参照せよ。

²⁷ ニュートンによる運動の第二法則のこと。ニュートンは『プリンキピア』において運動の第二法則を「運動の変化は及ぼされる起動力に比例し、その力が及ぼされる直線に沿って生じる」と定めている。(Koyré and Cohen eds., *Isaac Newton's Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1:54-5.)

²⁸ Locke, *Essay*, book 2, chap. 1.

²⁹ 雪の例はロック自身による。(Ibid., book 2, chap. 8, 134.)

することはできない。ただし、感覚ではとらえることはできないが、二次性質の原因はやはり一次性質であるとされ、その一次性質が人間の認識のはたらきによって二次性質として認識されていると考えられた。そして、この二次性質として認識される自然現象は、ヒューエルの分類によると「純粋な力学」ではなく光学や熱学などの「物理学（二次的力学）」の研究対象になるとされた。二次性質は一次性質に還元されて力学的に論じることが可能であると考えられたが、あくまで原因は可感ではないために「二次的」力学に分類されたのである。このヒューエルの分類については2.3節で詳しく論じる。

さらにロックは第三の性質として、二次性質を変化させる「力能 (powers)」の存在を論じている³⁰。例えば、太陽はその熱や光によってロウを白く柔らかく変質させる性質を持つ。これは太陽の力能である。力能は、結果的に一次性質を変化させる作用そのものであり、その意味では一次性質や二次性質とは異なり、物質そのものの性質ではない³¹。しかしロックは、単純観念については力能とは分離されるが、それらが組み合わせられた複雑観念 (complex ideas) として事物を把握する場合には、力能も含めた三つの性質が複合的に一つの観念を構成していると考えた。例えば、磁石という複雑観念は、鉄を引き寄せる力能を含み、逆に鉄という複雑観念は磁石の力を受ける力能を含む³²。このように力能を物質に帰着することができるのは、力能が物質の関係において規定されるからである³³。例えば、磁石と鉄の関係にしても、太陽とロウの関係にしても、能動的な力能を持つものと受動的な力能を持つものが関係し合うことによってはじめてその力能は顕在化する。このロックの考え方によれば、電磁気学や化学は、これら三つの性質からなる複雑観念としての物質の関係を通じて力能について研究する学問分野ということになるだろう。

しかし、二次性質は一次性質に還元できるとして、自然現象の力能そのもの、すなわち重力や電気、磁気の力についてはどのように考察を進めることができるのだろうか。ロックは、これらの特殊な力能については明確な議論を避けており、またエーテルのように一次性質に還元されないものについては思考することすらできないと論じている³⁴。そして、自然界は一次性質に還元される微粒子の力学的な作用から構成されているとだけ述べるのであった。

このロックの考察の進め方は、ニュートンのように隠れた性質についての議論を避けるものであると同時に、知覚できない事物の存在を否定し、逆に知覚こそが事物の存在を形成している原因と考える観念論へと発展する契機を持っていた。実際、バークリ (George Berkeley, 1685-1753) は、ロックの認識論を観念論へと発展させ、物質の観念は知覚の中に

³⁰ ロックは通常力 (force) とは別に、この力能 (power) を専門用語として用いている。そのため、本論文でもロックについての研究に於いて *power* を「力能」と訳出する。なお、本論文では基本的に、*force* を「力」として、それに対して *power* をイギリス経験論の研究に於いて「力能」として、統一的に訳出している。

³¹ Ibid., book 2, chap. 8.

³² Ibid., book 2, chap. 23, 271. 本論文で用いている「複雑観念」などの専門用語の訳出にあたっては、前述の「力能 (power)」と同様にイギリス経験論研究の定訳にならっている。

³³ Ibid., book 2, chap. 2, 220-1.

³⁴ Ibid., book 2, chap. 8, 278-9.

存在しているものであると主張して、精神の外部に実体が存在することを否定する議論を展開した³⁵。さらにヒューム (David Hume, 1711-76) は、経験論を徹底することで知識を構成している観念についての懐疑論を展開し、自然現象の同一性や因果関係も知覚の恒常的接続 (constant conjunction) によって習慣的に形成される観念連合 (association of ideas) に過ぎないと主張した。この観念連合という考え方はロックによって導入されたものであるが、ヒュームによって展開され、さらにハートリ (David Hartley, 1705-57) によって生理学的ないし心理学的に深められて、3.4 節で論じるようにデーヴィーの認識論の基礎となっていく。

しかし、自然現象の実在性を否定するようなバークリやヒュームの議論の進め方は極端であり、常識的には受け入れがたいように思われる。そこで、グラスゴー大学の道徳哲学教授リード (Thomas Reid, 1710-96) は、このように極端な結論に至った理由として、彼らが感覚内容と感覚対象とのあいだに類似性があることを議論の前提としていたため、事物の存在や観念のあり方が知覚に還元されてしまったのだと考えた。そして、リードはこの前提そのものを、デカルトからマルブランシュ (Nicolas Malebranche, 1638-1715)、そしてロックに至る感覚論に共通する傾向として批判した。

リードが批判した感覚器官のはたらきの典型的な理解としては、ニュートンが『光学』の疑問 31 で与えている次のような説明があげられる。

感覚器官では、いかなる第三の事物も介さず、精神 (soul) が直接的に事物の形象 (species) を知覚する。感覚器官は、精神が感覚中枢で事物の形象を知覚することを可能にするためのものではなく、それらの形象をそこへと運ぶためのものである³⁶。

このように感覚器官が事物をありのままに把握して精神へと運んでいるという理解は、当時の一般的な感覚論として共有されていた考え方であった。例えばデカルトは、脳にある松果腺という器官が精神と身体との結節点になっており、その器官によって人は外界の事物を認識することが可能になるのだと論じていた。

感覚器官が外界の事物の形象をそのまま精神へと運んでいるとすると、外界にある感覚対象は知覚の中に形成される感覚内容と対応関係にあると考えられる。そうすると、事物のすべての性質を精神内部の知覚そのものへと還元可能になり、観念論へと展開できてしまう。こうしてバークリは、物質の一次性質も二次性質と同じように知覚によって形成されているに過ぎないとして、「存在するとは知覚されることである (*esse is percipi*)」という基本命題に至ったと考えられる。それに対してリードは、感覚そのものが人間の判断や信念を含んでいて、そのはたらきによって感覚内容が構築されているため、感覚内容と感

³⁵ もっともバークリの目的は、懐疑論へと至る原因と考えられた物質主義を否定することであり、精神外部の実在世界を否定することではなかった。この問題点はバークリ自身も認識しており、彼は後にコモン・センス擁護の議論を展開していくことになる。(戸田『バークリ』98-104.)

³⁶ Newton, *Opticks*, 379.

覚対象との類似性は必ずしも成立しないと主張した。そうすると外界の事物の性質を精神内部へと還元することができず、事物の存在を外界に措定せざるを得なくなり、バークリの観念論やヒュームの懐疑論はその前提が崩れると考えたのである³⁷。

もっとも、ここでリードの問題意識は観念論や懐疑論を否定することによって實在論を擁護することではなく、その議論の前提となっていた感覚の機能そのものを批判的に再検討し、人間の認知過程を左右している「コモン・センス（共通感覚＝常識）」のはたらきを解明することへと向かっていく³⁸。そして、このリードの問題意識を共有することで、スコットランドのコモン・センス学派が形成されていくことになった。

なお、リードの目的は自然哲学よりも道德哲学を論じることであり、そこでは人間の行動を左右する自由意志という人間の力能が重要な研究対象となった。自然現象に関する力能と人間の道德に関する力能は異なる性質を持つものだが、リードは著書『人間の能動的力能論 (*Essays on the Active Powers of Man*)』の議論を展開するにあたって、力能一般について論じている。その中で、自然現象の力能については次のように説明している。

自然という劇場において、私たちは、能動的力能を授けられた作因 (*agent*) を必要とするような数え切れないほどの効果を目にしている。しかし、その作因は舞台の背後にある。それが第一原因 (*Supreme Cause*) であろうと、従属的な原因であろうと、もし全能者によって従属的な原因が用いられているとすると、それらの本質や数、そしてそれらの異なる役割が何であるのかということは、疑いなく、賢明なる理由によって、人間の目からは隠されているのである³⁹。

このように、リードもまた自然現象の動因 (*efficient cause*) としての作因は感覚ではとらえられないとしている。そして、ニュートンの万有引力の議論と同じように、自然哲学の目的は原因を探究することではなく、実験や観察から帰納によって導かれる自然現象の法則性を発見することにあると考えていた⁴⁰。

それでは、電磁気や化学反応なども含んだ自然現象一般について、万有引力の法則のような自然法則を見出そうとするならば、どのような考察が可能になるのだろうか。この考察を進める上で、スチュアート (*Dugald Stewart, 1753-1828*) やロビソン (*John Robison, 1739-1805*) といったコモン・センス学派の自然哲学者たちの関心を引いたのが、プリーストリ (*Joseph Priestley, 1733-1804*) によって1772年にイギリスに紹介されたボスコヴィッチの原子論であった⁴¹。

序論でも簡単に紹介したように、ボスコヴィッチの原子論の特徴は物質を力の分布とし

³⁷ Reid, "An Abstract of the *Inquiry*," 259-60.

³⁸ 長尾『トマス・リード』130-45.

³⁹ Reid, *Essays on the Active Powers of Man*, 47.

⁴⁰ *Ibid.*, 46-7. ここで、*agent* は「作因」の他に「媒体」などと訳することができるだろう。ただし、本論文では *medium* を「媒体」として、*agent* は「作因」、*agency* は「作用因」と統一的に訳出している。

⁴¹ Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 102.

て説明する独特な考え方であった。ボスコヴィッチは、原子の中心のまわりには感覚できないほどの極小領域において引力と斥力が交互に変化しながら分布していると考え、その力の分布によって自然界に現れる多様な力を説明することができると考えた。この理論は、万有引力という概念を含んだ新しいニュートン的な力学を化学現象などの自然現象一般の説明に拡張するだけでなく、機械論の基礎となっている物質の延長や不可入性といった概念をも力によって一元的に説明しようとする、いわば機械論から脱却したニュートン力学を、その対極まで推し進めようとする独特な物質観を展開するものであった。

ボスコヴィッチ以前は、機械論やロックの影響もあって、一次性質を物質の基本要素と考えることが一般的であった。ニュートンも『光学』の中で、物質は固体で有限の「粒子」からなると論じている。

神ははじめに物質を、彼がそれらを形づくった目的に最も資するような、大きさや形、その他の性質、空間的な比率を持つ、固形で、重く、硬く、不可入で、可動な粒子 (particles) として形づくった⁴²。

このニュートンの「粒子」論は、まさに一次性質を備えた「物質」としての粒子を仮定している。そのため、観念論の立場をとるバークリヤヒュームは、このような見解を物質主義 (materialism) 的であると批判した。そして、二次性質だけでなく一次性質も結局は知覚の作用によって形成される観念に過ぎないと主張して、このニュートン的な物質観を否定したのである。その点、ボスコヴィッチの原子論は一次性質を力能に還元するものであり、物質と精神との新しい関係を模索する上で示唆に富んでいると理解された⁴³。

その一方で、バークリヤヒュームの観念論を否定したコモン・センス学派にとっても、物質主義はやはり批判の対象とされた。例えば、スチュアートはすべての作用を機械論的な衝突に帰することには懐疑的であり、その点でもボスコヴィッチの原子論は有望な理論であると考えていた⁴⁴。ボスコヴィッチの原子論では、自然は飛躍しないとするライプニッツの「連続律 (lex continui)」が前提とされていた。運動における「連続律」を考えると、運動は必ず連続的に変化するものであり、衝突の前後で速度が不連続に変化することはあり得ないことになる。その点、ボスコヴィッチの原子論では、力は原子の中心のまわりに連続的に分布しているため、衝突における力の相互作用も過渡的におこなわれ、速度も連続的に変化するようになる⁴⁵。このように、ボスコヴィッチの原子論は粒子の物質的な接触を想定せずに原子の存在を認めることができたため、コモン・センス学派の認識論的関

⁴² Newton, *Opticks*, 375-6.

⁴³ Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 102-3. ただし、ここでオルソンも指摘しているように、ボスコヴィッチはコモン・センス学派のような認識論を考慮していたわけではない。また、オルソンがレスリー (John Leslie, 1766-1832) を例にあげて指摘しているように、スコットランドの哲学者たちは一般に原子は有限であると考えており、その点ではボスコヴィッチの原子論および 19 世紀に受容されたその内容とは異なっていた。(Olson, "Reception of Boscovich's Idea in Scotland," 98-103.)

⁴⁴ Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 103-4.

⁴⁵ Robison, *System of Mechanical Philosophy*, 1:294-5.

心に対して全体的な親和性を持っていたのである⁴⁶。

これと同じ理由により、エディンバラ大学の自然哲学教授であったロビソンもボスコヴィッチの原子論に注目した⁴⁷。ロビソンは、『力学的哲学の体系 (*System of Mechanical Philosophy*)』第1巻で100ページにわたって⁴⁸、またファラデーにとって教科書的な役割を果たした『エンサイクロペディア・ブリタニカ、第3版への補遺』では15ページにわたって⁴⁹、それぞれボスコヴィッチについての解説をおこなっている。

ロビソンは、ボスコヴィッチの原子論における力のふるまいを、感覚との関係において次のように紹介している。

感覚では接していると観察され、1000 から 1500 分の 1 インチを超えないような小さく感覚できない距離において、原子の距離の変化に応じて引力と斥力とが交互に存在している⁵⁰。

すなわち、「1000 から 1500 分の 1 インチ」という基準で判断されるような可感ではない微小な領域において、可感領域とは異なる力の分布が存在していると考えたのである。この分布を表したものが次の図2であり、図のARが1000分の1インチ以下の程度の感覚できない距離に対応している⁵¹。

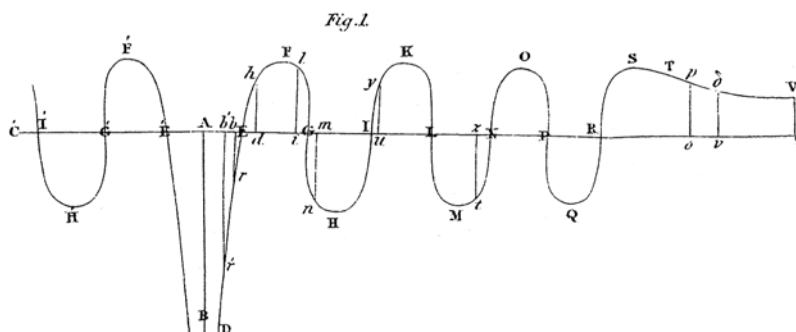


図2：ボスコヴィッチの原子論における、感覚できない距離（AR）における力の変化（Robison, *System of Mechanical Philosophy*, vol. 1, plate 3, fig. 1.)

⁴⁶ Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 103-4.

⁴⁷ ロビソンは、グラスゴー大学やエディンバラ大学で生涯を通じて広く自然哲学を講じ、力学的哲学を中心に多数の著作を残した。グラスゴーでは化学の講師も務めたが、蒸気機関の開発においてグラスゴー時代のウォット (James Watt, 1736-1819) に影響を与えるなど、その関心の中心は力学であった。(DNB, s.v. "Robison, John.")

⁴⁸ Robison, *System of Mechanical Philosophy*, 1:267-8. このロビソンの著書は、彼の死後、ブリュースター (Sir David Brewster, 1781-1868) の編集によって1822年に出版された。

⁴⁹ *Supplement to Third Edition of the Encyclopaedia Britannica*.

⁵⁰ Robison, *System of Mechanical Philosophy*, 1:268. なお、ここでの「1000 から 1500 分の 1 インチ」という基準の根拠は不明である。

⁵¹ *Ibid.*, 1:276-7.

ロビソンは、このボスコヴィッチの理論が「ある触知できる物質の質量 (a mass of tangible matter) の外観や可感的性質」について、その可感ではない領域における作用の仕組みを説明するものであると考えていた⁵²。この可感ではない微小な距離での力は、感覚では接触によって及ぼされているように観察される⁵³。すなわち物体の質料が「集合体 (mass)」を形成することではじめて、単独の原子では感覚できなくても集団として可感となる。

このようにある程度の「集合体」で議論を進める必要があったことは、感覚の能力の限界を示している。化学的な性質の原因として力学的な一次性質が想定されていたが、認識できるのはあくまでその「集合体」の二次性質であった。逆に、感覚によって一次性質として把握されて力学の基本要素となりうる物質の「質量 (mass)」とは、この原子の「集合体 (mass)」に他ならなかった。そして、万有引力も、この「集合体」に対して働くのであり、それより微小な可感ではない領域に対しては、また別の力がはたらくと考えられたのである。すなわち、ここでロビソンが「物質の質量 (mass of matter)」として言及している「質量 (mass)」とは、ニュートンがプリンキピアで規定した「質料の量 (quantitas materiae)」ではなく「質料の嵩 (massa materiae)」として理解することができる⁵⁴。

この「質量」と「集合体」という *mass* の訳語について、『オックスフォード英語辞典 (Oxford English Dictionary: OED)』は、力学的な「質量」とは異なる *mass* の意味として次のような意味をあげている。

広い意味において、比較的大きな体積を持ち、凝集して（実際、あるいは外見的に）重い物質からなる物体のこと。広い空間を占める固体の物理的対象。近代物理学において、よく分子や原子と対比される⁵⁵。

デーヴィーやファラデーも、この「質量 (mass)」という言葉がこのような「集合体」ないし「かたまり」という意味で用いており、その力が特定の粒子に対する選択的な作用ではないことを示すために用いていた。3.5 節や第4章以降で改めて論じるが、デーヴィーやファラデーは、この「質量 (mass)」を「粒子 (particle)」と対照的なものとして区別していた。ここで、もし重さとして「質量」を理解するならば、粒子と質量とを区別することは不合理であろう。粒子にも重さはあるはずだからである。当時、質量という考え方は一般的であったが、その解釈は十分に定まっていなかった。すなわち、OEDにおける意味の区別は現代的なものであり、19世紀前半においては必ずしも自明ではなかった。ラヴォアジエ (Antoine-Laurent Lavoisier, 1743-94) が発表した化学変化における質量保存則のように、質量は物質の「重さ」として理解される一方で、力を本質と考えた場合には、その力

⁵² Ibid., 1:282.

⁵³ Ibid., 1:283.

⁵⁴ Koyré and Cohen eds., *Isaac Newton's Philosophiæ naturalis principia mathematica*, 1:39-40.

⁵⁵ *Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. "mass." OEDによると、この意味での初出は1440年頃になっている。

の作用の「集合体」こそが「質量」として理解されたのである⁵⁶。

なお、本論文でもファラデーの理解に合わせて、この *mass* を基本的に「質量」と訳出すことにする。これは場合によっては奇異に感じるかもしれないが、この特殊性こそが、力学の考え方とファラデーの考え方の齟齬を生む原因となっている。本論文では、この齟齬に着目することによって、ファラデーにおける「力」と「粒子」の関係をよりよく理解できることを示していきたいと考えている。

議論をロビソンに戻すと、彼は『エンサイクロペディア・ブリタニカ (*Encyclopaedia Britannica*)』第3版の「物理学 (Physics)」の項目の執筆もおこなっている。その内容によると、ロビソンにとって「物理学」とは自然哲学とほとんど同義であり、「自然の体系 (system of nature)」とくに「物質の体系」を扱う分野であった⁵⁷。さらに、この物質の体系においては可感な運動と可感ではない運動の二つがあるとされ、可感な運動は力学的哲学の対象とされて、その例としては機械学や天文学があげられた⁵⁸。そして力学的哲学において、「力」とは、その運動の変化の原因であると定義された⁵⁹。その一方で、可感ではない運動はとくにイギリスでは化学や生理学の研究対象になっているとされ、熱や動植物の成長のように不可視な粒子が引き起こしている現象と考えられた⁶⁰。なお、電磁気現象はこの両方にまたがる現象であり、機械や天体の運動に近い力学的方法で研究できる範囲では可感な運動とされ、それ以外の多くは可感ではない運動とされた⁶¹。

電気の力の可感性については、ニュートンもまた『光学』の疑問 31 で次のように述べている。

重力や磁気や電気の引力は、はっきりと感覚できる距離にまで届く。そのため普通の人々の目によって観察されてきた。今のところ感覚から逃れているような小さな距離にしか届かない他の引力もあるかもしれない。おそらく電気の引力は、摩擦によって励起されていなくても、そのような小さな距離には届いているのであろう⁶²。

すなわちニュートンによると、電気の力は、観察できるほどの可感な距離において顕示的に作用することもあれば、観察できないほどの微小な距離において作用して何らかの自

⁵⁶ Levere, *Affinity and Matter*, 51-2. このことが原因で、デーヴィーやファラデーとベルセリウスとのあいだには見解の相違が生じることになる。この見解の相違の具体的な内容は、3.5 節や 4.2 節で改めて論じる。

⁵⁷ *Encyclopaedia Britannica*, 3rd ed., s.v. "Physics," 14:637-42.

⁵⁸ *Ibid.*, 14:643. コモン・センス学派や主意主義 (voluntarism) では、物理的な運動の因果関係と物事の動因すなわち究極的な神の意志とを分離し、絶対的な神の意志が奇跡といった形で働く場合に限って物理的な世界で生成消滅を引き起こす第一原因が生じると考えられた。スミスは、ヒューエルやトムソンにも、この主意主義的な傾向が強くみられるとしている。(Smith, "'Mechanical Philosophy' and the Emergence of Physics in Britain," 3-29. See also *Energy and Empire*, 84-99.)

⁵⁹ *Encyclopaedia Britannica*, 3rd ed., s.v. "Physics," 14:647.

⁶⁰ *Ibid.*, 14:643.

⁶¹ *Ibid.*, 14:643.

⁶² Newton, *Opticks*, 351. なお、引用文の最後の電気の引力についての記述は第2版で追加されたものである。(島尾『光学』374n.)

然現象を生み出している可能性もある。例えばボスコヴィッチが述べていたように、そのような微小な電気の力で化学現象を説明できる可能性もあるだろう。そうすると、ロビソンが述べているように、電気現象は力学の研究対象にもなりうるし、化学の研究対象にもなりうる。

ファラデー自身が自覚していたように、ファラデーの力の概念は特殊なものであったため、力学的な考え方からすると「不明瞭」との判断を免れないものであった⁶³。序論で引用したファラデーの「力」についての定義は、イギリス経験論の文脈で解釈すると、一次性質の変化の原因としての「力 (force)」というよりも、二次性質の変化の原因としての「力能 (power)」に近い解釈であると考えられる。イギリスではロックの『人間知性論』やニュートンの『光学』の影響により、多様な自然現象の質的な違いは二次性質であるとされ、さらにその質的な変化を生み出しているものは力能であると定義されていた。その一方で、二次性質そのものは、延長や運動などの力学的な量として表わすことのできる一次性質に還元して理解できると考えられた。この考えによると、化学は力能を扱う分野ということになり、感覚ではとらえられない自然現象の微細な領域における運動や力の因果関係を扱う分野ということになる。事実、ファラデーの「力 (force)」という言葉の用い方には曖昧さがあり、「力能 (power)」と混同される場合があることが指摘されている⁶⁴。このことは、ファラデーが力学ではなく化学に学問的な基礎を置いて研究を進めたためだと理解することができる。

なお、これらの議論は、ロックの認識論を批判的に継承する形で18世紀から19世紀初頭にかけてコモン・センス学派によって深められ、ファラデーと同時代のロビソンやトマス・トムソン (Thomas Thomson, 1773-1852) へと受け継がれた。ロビソンは、前述のようにファラデーが徒弟時代から教科書として利用していた『ブリタニカ』の第3版で「物理学」の項目を執筆しており、トマス・トムソンは、そのロビソンやスチュアートの講義をエディンバラ大学で受講し、その学問的な影響を受けた⁶⁵。そして、トマス・トムソンは化学の教科書を出版し、そこで展開された化学観は、青年時代のファラデーに強い影響を及ぼすことになった。すなわち、この節で論じてきた物質の性質についての理解が、ファラデーの化学研究における理論的な基礎となっていた。このトマス・トムソンとファラデーとの関係については3.2節で改めて論じる。

この可感ではない距離における作用の問題は、ファラデーが近接粒子という考え方によって遠隔作用を批判した際の重要な論点となっていく。ロビソンの説明では、原子の作用は可感な距離とそうではない距離で異なり、一次性質として力学の直接的な対象となるのは可感な距離における運動や作用だけであった。したがって、電磁気現象においても可感

⁶³ ERCP, 460. ファラデーは、この「傾向」という表現を電磁気の研究を始めた1821年当時から用いている。ファラデーの「力線」や「場」という表現は、この「傾向」の可視化を目的としたものであったと言える。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 171-3.)

⁶⁴ Levere, "Faraday, Matter, and Natural Theology," 104; Buchwald, "William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics," 121-2.

⁶⁵ Olson, "The Reception of Boscovich's Idea in Scotland," 96.

な距離における作用だけが力学的方法による研究対象になりうるとされた。ファラデーも、このような理解において、可感な距離における遠隔作用説を批判していくことになる。この経緯は第4章以降で改めて論じることにするが、次節ではその批判の対象となった遠隔作用説の特徴について考察しておきたい。

1.3. ニュートン力学的な電磁気学研究と「遠隔作用説」

前節で論じたように、イギリス経験論では感覚との関係で力が分類され、電気や磁気の力は可感な距離においてはたらく力であると考えられた。もっとも、電磁気の力がそのように可感な距離を隔てて作用する原因は不明であったが、電磁気の力の作用を万有引力のような直線的に作用する中心力と考えた場合には、作用の媒体に配慮することなく研究を進めることができた。ニュートンの万有引力の研究が広く受け入れられていたため、その数学的な議論を参考にしながら研究する場合には、ニュートンにならって作用が伝わる原因についての説明を保留することが社会的に容認されたからである。このような数学的研究が、いわゆる遠隔作用説を形成していくことになった。

一方、ファラデーは、誘導現象についての独自の理論を展開するにあたって、この遠隔作用説を批判していくことになる。ファラデーは、1837年に発表した電気の誘導現象についての論文の中で、曲線的な作用を説明するために「近接粒子 (contiguous particle)」という考え方を導入する。そして、この導入にあたって批判したのが、次のようにエピヌス、キャヴェンディッシュ、ポアソン (Siméon-Denis Poisson, 1781-1840) に代表される「遠隔的で直線的な作用 (an action at a distance and in straight lines)」を想定した理論であった。

その理論のすべてが誘導を遠隔的で直線的な作用として考えていると私は思う、エピヌス、キャヴェンディッシュ、ポアソン、その他の卓越した人々の名に抱いていた尊敬の念は、私が上述のような見解をとることを長くためらわせたのである⁶⁶。

このようにファラデーは、遠隔作用説の代表者として、エピヌス、キャヴェンディッシュ、ポアソンの名前をあげていたが、最初からこれらの研究者たちの理論を批判していたわけではない。ファラデーは、誘導の理論を発表する直前の1836年にモソッティ (Ottaviano Fabrizio Mossotti, 1791-1863) の理論に傾倒している。このモソッティの理論とは、エピヌスやクーロンの電気論を数学的に精緻化することを目指したものであり、アトモスフィアを仮定しつつも分子のクーロンの引力や斥力のバランスによって自然界のさまざまな力を説明しようとするものであった。詳しくは5.3節で扱うが、モソッティの理論はイギリスでは1830年代半ばに注目され、その際には、ファラデーもこの理論を推薦していた。そ

⁶⁶ ERE, 1:362, par. 1165.

して、ファラデーはヒューエルに宛てた手紙の中で、エピヌス、キャヴェンディッシュ、ポアソンの理論には問題があるとしてモソッティの理論を紹介しているが、モソッティがクーロンの力を前提としていたことからわかるように、その問題点は引力と斥力のバランスの問題であり、遠隔的な直線作用を想定していたことについてはなかった⁶⁷。

このように、ファラデーはエピヌスやクーロンの遠隔作用説を発展させたモソッティの研究を評価しており、さらに1844年頃には中心力を仮定したボスコヴィッチの原子論にも注目している。これらの事実を配慮すると、ファラデーが遠隔作用説の研究を根本的に批判していたとは言えないだろう。そこには、ファラデーの理論とは相容れなくなっていた何らかの条件があったはずである。

この節ではファラデーが批判した遠隔作用説の理論を実際に検討することで、遠隔作用説の特徴を把握したい⁶⁸。そして、遠隔作用説が近接作用説とは異なる点を整理したい。それによって、第3章以降で論じていくファラデーの理論との相違点と、ファラデーが遠隔作用説を批判した理由がより具体的に理解できるようになるだろう。なお、ファラデーは上記の引用とは別に、クーロンの研究についても遠隔作用説を代表するものとして批判している⁶⁹。そのため、この節ではエピヌス、キャヴェンディッシュ、クーロン、ポアソンの四名の研究の具体的な内容を分析の対象とする。

1.3.1. 電磁気現象に対する数学的研究のはじまり:エピヌス

時代的な順序を踏まえて、まずはエピヌスの電気論から分析を始めよう。エピヌスは、フランクリンの電気論を基礎とし、さらに電気と磁気の力の類似性に着目し、磁力についても電気の理論を応用して議論することができると考えた。そのため、エピヌスの『電気と磁気の試論』は電気の考察よりも、それを応用した磁気の考察が中心となっている。ただ、この節ではファラデーの電気論との比較をおこなうことが目的のため、エピヌスの電気論を中心に分析を進める。

エピヌスはまず、フランクリンの理論を発展させて、電気流体を互いに反発し合う粒子からなると仮定する。さらに、物質粒子間には斥力がはたらき、電気流体の粒子と物質粒

⁶⁷ Faraday to William Whewell, 13 December 1836, *Correspondence*, 2:391.

⁶⁸ エピヌスの磁気論についてはホームが詳細な解説をおこなっている (Home, "Introduction.")。また、クーロンについてはギルモアの研究が第一にあげられる。(Gillmor, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering*.) ただ、ギルモアは磁気論については、クーロンの論文の解説にとどまっており、独自の視点を提示したものではない。ポアソンは、その自然科学の発展への寄与にもかかわらず科学的な研究が少ない科学者のひとりである。代表的な研究はアーノルドの研究 (Arnold, "Mécanique Physique of Siméon Denis Poisson.") であろう。しかし、この研究を含めて、ポアソンの磁気についての論文を考察した研究はほとんど存在しない。なお、この論文で研究の対象となるこれらの研究者たちは、1837年に出版されたヒューエルの『帰納科学の歴史』の「磁気の歴史」の章で挙げられている主要な研究者でもある。

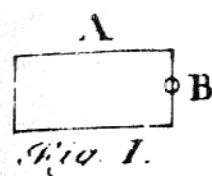
(Whewell, *History of the Inductive Science*, 3:37-58)

⁶⁹ 4.4節を参照せよ。なお、マクスウェルは遠隔作用的な電気理論を導入した研究者として、キャヴェンディッシュ、クーロン、ポアソンの名をあげている。(Maxwell, "On Action at a Distance," in *SP*, 2:317.)

子とのあいだには引力がはたらくと仮定する。そして、それらの力のバランスから、電気流体の増減によって物体全体としての引力や斥力を説明できると考えた。また、この電気流体の移動を阻止して帯電を引き起こすことのできる物体を「本質的に電氣的 (per se electrica)」であるとして、そうでない物体と区別した⁷⁰。このように電気流体と物質とのあいだに引力や斥力を仮定して電気流体の増減によって全体的な牽引や反発を説明することは、エピヌスの一流体説の特徴として広く一般に知られていくことになる。

エピヌスは、このような前提を踏まえて、物体にはたらく電氣的な力について次のように議論を進める。

ある量の流体を含む Fig. I の物体 A があるとする。その流体の部分は物体 A に引き寄せられ、しかしそれぞれが互いに反発し合うため、B のように物体 A の表面にまとわりつくように、二つの作用がそのときにこの流体の粒子に及ぼされることは疑いなく明らかである。[中略] これらの相反する力は等しいことも等しくないこともあり、後者の場合には、反発か牽引のどちらかが優勢になる⁷¹。



⁷⁰ 原文は以下の通り。「a) あらゆる電気現象を生み出し、それゆえに電氣的と称され、極めて微細でとても弾性的な、その部分が互いにより長い距離を隔てても感覚できるほどに斥け合うような流体がある。β) この流体の粒子は、これまで知られているすべての物体を形成している物質により、引き寄せられる。γ) 他の物体が電気流体の粒子に働きかける方法には著しい相違がある。電気物質全体がその細孔の中を容易に動き、どのような抵抗にもあわずに、あらゆる方向に自由にその細孔をそれ自身が通過するように構成されている物体が確かに存在する。その他の物体は対照的に、そのように動くことを容易には許さず、さらに自由になることを阻止する性質がある。前者の種類は、「本質的に電氣的 (per se electrica)」ではないもの、後者は、「本質的に電氣的」であるものと一般に称されている。δ) 電氣的な現象は二種類ある。あるものはすなわち、ある物体から別の物体へと、この流体をより多くの蓄えているものから、他のより少ししか含んでいないものに移動するように、電氣體の実際の移動から生じるものであり、それはとくに電気火花とその他の電気の光が見られる現象に関係する。他のものは実際の流体の運動、あるいは一方の物体から他方へと移動することなくその場にどまるもので、それは電氣的物体によって一般的に及ぼされる引力と斥力に、主に関係づけられる。」(Aepinus, *Tentamen*, 9-10) 前述のように、フランクリンは電気流体の量の加減によって、電氣のプラスとマイナスの説明がつくと考えていた。エピヌスもこの点においてはフランクリンと同じ意見であったが、フランクリンが主張するように電氣が一種類の流体からなるとすると、正の電氣どうしが反発することは説明がつくが、負の電氣どうしが反発することを説明できなかった。そのため、物質粒子との引力が仮定されたのである。また、フランクリンはガラスが電氣を通さないためにライデン瓶に電氣がたまと主張している、エピヌスはその主張にも疑問をもつようになった。さらにフランクリンは、電氣の力はガラスを越えて作用すると考えたが、その一方で遠隔作用を否定し、その理論は考察を進めるにつれて歯切れの悪いものになっていった。こうしたフランクリンの説明に対して、エピヌスは、フランクリンが問題視した電氣に対するガラスの非浸透性は、ガラス固有の問題ではなく電氣的物体全般にあてはまる性質であると考えたのである。なお、エピヌスは物質には電気流体の粒子の動きやすさに応じて電氣的であるかどうかの違いが生じているとした。この「本質的に電氣的」な物質は、ギルバートやファラデーの「電氣體 (electrica)」に対応する。

⁷¹ Aepinus, *Tentamen*, 14-5.

図3：電気流体を含む物体Aと、その流体の部分B。電気流体のふるまいを考える場合、あくまで点に対してはたらく作用が考えられた。これは、万有引力のような引力と斥力を想定していたためである。(Aepinus, *Tentamen*, table 1, fig. 1.)

このように牽引と反発はそれぞれの粒子の相互作用によるものであるため、反発によって電気流体が物体から流出していけば引力が優勢になる。また、その逆も起こりうる。そして、電気流体はこのような牽引と反発のつり合いによって物体表面の付近にとどまっていると考えられた⁷²。ここで、付近と考えられていたことは、電気流体の所在が物体の内部に限定されていたわけではないことを意味している。

なお、エピヌスは、電気流体間の力の原因には言及せず、感覚できるほどの距離を隔ても力は作用するとしている。このように、電気流体と物質粒子の力がそれぞれ同列に扱われていることから、電気の力と万有引力とは本質的には区別されず、電気の力は万有引力と同種の作用であると考えられていたことがわかる。しかし、エピヌスは、電気の力を万有引力と同じように牽引と反発の力として考えていたにせよ、物体の力が遠隔的に作用するという考え方そのものは否定していた。彼は、自身の遠隔作用を前提とするかのような議論のあり方について『電気と磁気の試論』の冒頭で次のように弁明している。

作用についての私の案は、自然哲学において牽引と反発について話すことに耐えられない人たちによって疑いなく酷評されるだろう。これらの人たちを満足させるために、私は牽引と反発の力の存在を十分に確信していることを明言するが、偉大なるニュートンの何人かの軽率な弟子たちがなしたように、これらが物体固有の力だということを支持するまではしないし、距離をおいた作用の可能性を肯定するような学説を認めることはない。なぜなら疑いえない公理として、物体はそれがいないところには作用しえないという大前提があるからだ⁷³。

すなわち、エピヌスは電気や磁気の方が万有引力と同じような力であると考えていたが、遠隔作用そのものについては否定していた。そしてその一方で、その力の原因については説明を保留し、現象において観察される牽引と反発の力を形式的に表現しようとしたのである。すなわち、エピヌスの議論も何らかの媒体による近接作用を前提としており、しかしその作用の原因を「説明」するための理論ではなく、あくまでその現象を「表現」するための理論を展開したのだと言える。そしてこれは、ニュートンの万有引力に対する姿勢を踏襲したものであった。

それでは、このエピヌスの遠隔作用に対する考え方は、ファラデーの遠隔作用に対する

⁷² Ibid., 15.

⁷³ Ibid., 7.

考え方とどのように異なっていたのだろうか。この違いを、ファラデーの万有引力に対する見解から分析してみたい。ファラデーは1857年の論文で、万有引力を次のように定義している。

それは、任意の二つ、あるいはすべての物質の粒子ないし質量 (particles or masses of matter) のあいだで、あらゆる可感な距離において、距離の二乗に反比例して変化する強さをもってはたらく単純な引力のことである。その力の通常の観念は、ある距離において「直接的」に作用することを含意しており、ニュートンや、彼と同じような意見を持っている私自身を含めた数人を除いては、そのような見方はほとんど問題視されていないように思える⁷⁴。

なお、ここで「粒子」と「質量」が並列的に扱われている理由は、1.2節で論じたようにファラデーの物質観によるものである。ファラデーは万有引力が距離において直接的に作用するということについては否定的であったが、ニュートンの万有引力という考え方そのものに否定的であったわけではなかった。むしろ、自分こそがニュートンの問題意識を積極的に継承しているという自負すら持っていたのである。

ファラデーがこのように考える根拠となっていたのが、ニュートンがベントリーに宛てて書いた、遠隔作用の不合理さを論じた手紙であった。ニュートンは、この手紙で次のように述べている。

重力が物質に固有で内在的かつ本質的なものであり、そのため、ある物体が離れたところにある別の物体にはたらくのに、他の何もかも媒介せずに、その作用や力が真空を通じて一方から他方へと運ばれるということは、私にはあまりにも不合理であると思われまじ、哲学的な問題について考える能力のある人でそれに同意し得る人はいないと信じています。重力はある法則に従って絶えず作用する作因 (agent) によって引き起こされているに違いありません。しかし、この作因が物質的であるか非物質的であるかは、読者の考察にゆだねる問題です⁷⁵。

すなわちニュートンは、物質的であれ非物質的であれ、万有引力の作用は何らかの媒体によって伝えられているはずだと考えていた。

もっとも、『プリンキピア』の第二篇は物質抵抗の観点からエーテルのような物質的な媒体の存在を批判する内容になっており、ニュートン自身がこの判断をまったく読者の考察

⁷⁴ ERCP, 446.

⁷⁵ Newton, "406 Newton to Bentley: 25 February 1692/3," *Correspondence of Isaac Newton*, 3:253-6. ファラデーがニュートンのこの見解をたびたび引用していたことについては、ティンダルも同様の証言をしている。(Jones, *Life and Letters of Faraday*, 2:77-8.) 例えば、この一節は1853年の論文にも引用されている。(ERE, 3:507.)

にゆだねていたわけではないと考えられる⁷⁶。すなわちニュートンは、遠隔作用が不合理であるとしながらも、その媒体は少なくとも物質的なものではないと判断していた。そして、ファラデーも、物質的なものについての新しい解釈を模索しながら、何らかの媒体を模索し続けた。ファラデーが自然界の諸力の変換可能性を模索していたということは、万有引力と電気之力とは本質的に同じ力だと考えていたと言える。そのため、前述のようにファラデーは、万有引力と電気之力を組み合わせ可能な力として考えるモソッティの理論にも傾倒したのである⁷⁷。

しかし、エピヌスもファラデーもニュートンの万有引力の理解を継承して遠隔作用を否定していたとすれば、ファラデーとエピヌスの考え方の違いは不明瞭になってしまう⁷⁸。そうすると、ファラデーがエピヌスらの遠隔作用説を否定した理由は他の要因に求められなければならないだろう。

エピヌスは遠隔作用を否定していたが、前述のニュートンの議論と同じように、その媒体が物質的なものであると考えることには懐疑的であった。エピヌスは、電気のアトモスフィアの存在を次のように否定している。

とにかく私は、正負どちらの電気であれ、すぐ近くで物体を取り囲んでいる空気が、あたかも完全に本質的に電氣的ではないかのように、それが触れている物体とまったく同じように、しかし緩慢かつ弱い状態で、それが取り囲む物体からほんの少しの距離だけ電気を得ているということを否定はしない。だからもしこの帯電した空気を電気のアトモスフィアと表記したいのなら、それに私は反対しないが、しかし、電気現象の生み出す大抵のものにおいて、このアトモスフィアに帰せられるものはないし、帯電した物体からそのアトモスフィアを奪い去るような風がふいごの働きで絶え間なく起こされているとすると容易にわかるように、そうであっても、それがその物体を静かに取り囲んでいるかのようにその現象はいつもの状態と同じ状態を続けるのだということを書きとめておく⁷⁹。

すなわち、エピヌスは、アトモスフィアが物質的なものであるならば、物体のまわりに生じている電気の状態は空気の流れによって乱されるはずだと考えていた。しかし、実際

⁷⁶ Westfall, *Never at Rest*, 505-6.

⁷⁷ 詳細は5.3節のモソッティの理論についての解説を参照せよ。

⁷⁸ 例えばホイッターカーは、エピヌスの考え方では電気流体が物体表面にとどまることになったため、遠隔作用が想定されることになったと論じている。「こうして、静止した状態にある電気流体は励起された物体表面の薄い層に閉じ込められていると仮定することが必要になった。これを認めると、物体間で観測される牽引や反発は、電気が介在する空気を横切って遠隔的に作用すると考えることを強いる。」(Whittaker, *History of the Theories of Aether and Electricity*, 51.) しかし、以上の議論から、このような理由は遠隔作用説の理解としては不十分であることがわかる。なお、ファラデーは3.5節で論じるようにデーヴィーの研究の基礎となったニュートンの研究についても高く評価しており、この様子については、次のルヴィアの研究が詳しい。(Leverre, *Affinity and Matter*, 68-75.)

⁷⁹ Aepinus, *Tentamen*, 258.

にはそのような乱れは観察されないことから、アトモスフィアは物質的なものではないと判断していたのである。そして、アトモスフィアが物質的なものとして存在しているかのように感じられたとしても、それは感覚の作用に過ぎないと論じている。

さて、次のように例えば、手の甲を帯電した物体に向けて近づけていくと、私たちは、あたかもクモの巣のような細かい網が手に触れたときとまったく似たような感覚にとられるため、電気のアトモスフィアの存在について確信する。しかしこの感覚は、帯電した物体が手に含まれる電気流体に作用し、その部分の皮膚において、その感覚を刺激しているとみなされるのではないだろうか⁸⁰。

そうすると、エピヌスのアトモスフィアは、従来の意味での物質的なアトモスフィアとは異なる意味が与えられることになる。エピヌスはこの点について『電気と磁気の試論』の第4章「電気と磁気の渦に浸された物体の現象について」の中で次のように記している。

私が決して磁気や電気の物質を物体の外側に付着したりそれを取り巻いたりしているものと考えているわけではないことは、電気と磁気現象の前述の説明から明白である。それゆえ、私が渦やアトモスフィアといった単語をこれらが本来意味しているようには用いていないことは明らかである。これらの単語がこれ以降に出てくるときは、私の見解に従えば、別のときには作用の圏と一般に名づけられるものによって示されることを考えているに過ぎない。すなわち私において、電気と磁気の牽引と反発が、その物体のまわりで、あらゆる方向に感覚できるように広がっているその空間だけをその言葉は述べているのである⁸¹。

このように、エピヌスは作用の圏を物質が存在しているかのように感覚される空間的性質として考えていた。すなわちエピヌスは、空間的な概念としてアトモスフィアを再定義しているのである⁸²。

ギルバート以来、研究者たちは作用の圏というものを想定していた。その作用の圏として物質的なアトモスフィアを想定すると、その作用の及ぶ範囲には空間的な限界が生じて

⁸⁰ Ibid., 258-9. この「クモの巣」のたとえについては、デザギュリエ (John T. Desaguliers, 1683-1744) が1733年にアカデミー・デ・シアンズで「クモの巣」になぞらえた説明をおこなっている。(Whittaker, *History of the Theories of Aether and Electricity*, 43.) なお、6.4節で引用するように、ファラデーもこの「クモの巣」の比喩を用いており、「クモの巣」の糸として力線を説明している。

⁸¹ Aepinus, *Tentamen*, 257.

⁸² この章ではエピヌスは「アトモスフィア」という語は用いておらず、そもそも、この章は主に磁気について論じており、電気についてはほとんど論じられていない。さらにそれ以前の章でも、このエピヌスは自説を展開する上では、この「渦」や「アトモスフィア」という言葉を用いることはない。この主張については、Aepinus, *Tentamen*, 258. を参照せよ。この「渦」という用語は、オイラー (Leonhard Euler, 1707-83) やベルヌイ (Daniel Bernoulli, 1700-82) が電気や磁気の現象を説明するために用いていた。なお、オイラーは二点間作用のイメージは持っていたが、もっぱら流体の「流れ」の方程式の記述に関心があったようである。

しまう。しかしエピヌスは、アトモスフィアを物質的なものではなく空間的な概念として規定したため、作用の有限性を想定する必要がなく、その到達範囲を無限遠方まで延長することが可能となった。

こうして、エピヌスの想定する作用はフランクリンの想定していたアトモスフィアの作用よりも万有引力の作用に近いものになっていく。エピヌスは、距離と作用の関係を次のように論じている。

Fig. XXIV の曲線 AB が、電気の反発の段階、あるいはそうなる特性があれば、横座標 CD を距離にとって、対する縦座標 DE を斥力に比例するようになれば、この曲線は漸近的であろう。もしこれが確かでなければ、距離が増加すると斥力が連続的に減少するということが可能ではなくなるだろうし、その場所より距離が増加して斥力が減少しないような限界点がいつかあるだろう。さらにこの漸近曲線は二種類あり得て、漸近線 CR に連続的に凸状に向かっているか、あるいはどこかに変曲点があり、あるときは漸近線に向かって凹状でも、そのあとすぐに逆に凸状になるのである⁸³。

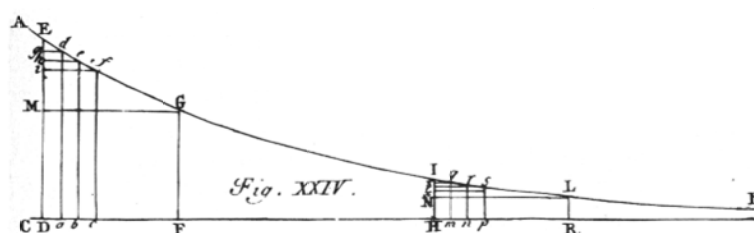


図4：電気の作用の大きさと距離との関係。作用が無限遠方まで続いている様子が表現されている。(Aepinus, *Tentamen*, table 1, fig. XXIV.)

このように、アトモスフィアを万有引力と同じように空間的ないし数学的な概念として扱うことで、電気の作用はゼロへと漸的に減衰していくにせよ、無限遠方でもゼロにはならないと考えることが可能になる。もしアトモスフィアが物質であるならば、必ず有限にしか存在しえないからである。そして、作用の原因となる電気流体からの距離を考察することによって、必然的に直線的な作用が想定されることになる。このように、力が空間を隔ててはたらくかどうかの判断は保留とされるとしても、無限遠方まで続く直線的な作用を想定することが遠隔作用説の大きな特徴となる。

なお、図4では、作用の減衰曲線に変曲点がない場合が扱われているが、ボスコヴィッチの原子論のように変曲点があるとも考えることも可能である。エピヌスも、例えば図5のように、作用の減衰曲線が点Lで変曲点を持つ（すなわち点Lで「 $ddy = 0$ 」になる）場

⁸³ Aepinus, *Tentamen*, 140. ここでの「凸状 (convexio)」とは、真ん中が高くなっている状態であり、図4の曲線 AB の形状に相当する。

合を考察している⁸⁴。

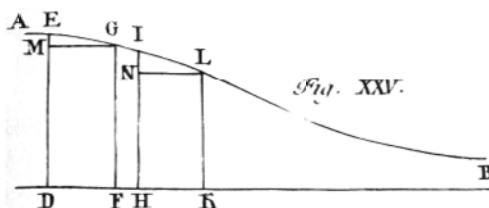


図5：作用が変曲点Lを持つ場合の分布。(Aepinus, *Tentamen*, table 2, fig. XXV.)

もつとも、このように可感な距離において変曲点を持つと仮定すると、物質粒子との力のバランスが変わって、異種の電気が反発し合う場合が出てくると考えられた。しかし、そのような実験結果は報告されていないことから、エピヌスは作用の減衰曲線は変曲点を持たないと結論づけている⁸⁵。また、図4のように変曲点のない減衰曲線として扱われるにせよ、作用の大きさは明確な形で距離の逆二乗に関係づけられていたわけではない。逆二乗則を示唆する記述もあるが、電気については作用の及ぶ距離が変数として扱われることはなく、作用の大きさと距離の関係についての定量的な議論はおこなわれなかった。

なお、エピヌスは、磁気的作用についても電気の作用と同様に磁気流体の増減で説明している。彼はまず、電気流体と物質粒子との関係と同じように、磁気流体どうしは相互に反発し、磁気流体と鉄の粒子とは引き合うことを理論の前提とする。そして、磁気的作用は曲線的にはたらくが、その曲線的な形状は各点からの直線的な作用の集合によって形成されるものであると考えた。エピヌスはこれらの前提から、作用の大きさが距離に反比例して減衰すると仮定した場合には、各点からの直線的な作用の集合が磁気の「渦」に相当する形で円形になることを示そうとする⁸⁶。この証明は、図6の曲線PDQについて次のように進められている。

点MとNにかかる力は、距離ME、NFに反比例し、さらに $NS = x$ 、 $DS = y$ 、 $MN = a$

とすると、EMにそってのはたらく力は、艇子FEが限りなく小さいために、 $= \frac{1}{\sqrt{(a-x)^2 + y^2}}$

となり、FNにそった点Fを引く力は $= \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ となる。さらにFNにそった力とFK

にそった力との比は、FNとNHの比であるので、FKにそって引く力は $= \frac{NH}{x^2 + y^2}$ であ

⁸⁴ Ibid., 141-2.

⁸⁵ Ibid., 143.

⁸⁶ Ibid., 259-60.

る。しかし、上で論じたことから明らかなように、EF あるいは IG は曲線 PDQ の正接であり、DG:DS すなわち EF:dy は、=NG:NH になり、それゆえ $NH = \frac{ydx - xdy}{EF}$ を得て、したがって FK にそった力は $= \frac{ydx - xdy}{EF(x^2 - y^2)}$ のようになるであろう。同様に比がわかれば、EL にそってはたらく力は $= \frac{ydx - xdy + ady}{EF((a-x)^2 - y^2)}$ である。

これから、得られる曲線 PDQ に対して、方程式 $\frac{ydx - xdy}{x^2 + y^2} = \frac{ydx - xdy + ady}{(a-x)^2 + y^2}$ を得る⁸⁷。

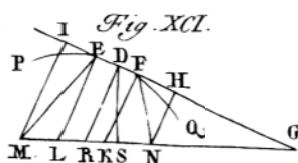


図6：M や N からの直線的な作用の集合として、EF 上には PDQ のような曲線的な作用が記述できる。エピヌスの計算では、この PDQ は円弧を描くという結果になった。(Aepinus, *Tentamen*, table 5, fig. XCI.)

さらにエピヌスは、この方程式を積分し、積分定数を β とすることで、最終的に曲線 PDQ について $ax - x^2 - y^2 = \beta y$ という方程式を得ている。すなわち、曲線 PDQ はエピヌスの仮定の下では円形になる。ただし、この方程式においては β が積分定数として任意に選択可能であり、この数を変えることで円の中心を任意に選ぶことができる。そのためこの方程式は、磁気的作用の形状を一意に定めるには不十分であり、円という形状を擁護するだけの説得力しかない。さらに、エピヌス自身も認めていたように、実際の磁気的作用は円形ではない。エピヌスは、磁気作用の形状について次のように述べている。

磁石のまわりにまかれた鉄粉が形成する線は、描かれたこの円と完全に一致するわけではない。なぜなら、点 M と N から発する力は距離に反比例して減少すると仮定したからであり、私はこれを磁気作用の従う法則だと断言しているわけではない。[中略] それゆえ今や、磁気の牽引と反発の法則から、自然の探究者たちがこれほどまでに驚嘆し、その多くが誤って、本当に磁気の渦、あるいは一方の極から他方の極へと連続的に動く磁気物質の流れの存在の明らかな証拠として評価してきた、磁石のまわりにまかれた鉄粉の規則的な配置がどのようにしてできるのかは明らかである⁸⁸。

⁸⁷ Ibid., 278-9.

⁸⁸ Ibid., 281-2.

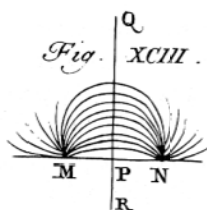


図7: エピヌスによる磁力の分布図。この作用の形状は完全な円形ではなく、したがって数学的に正確に表現することは困難であった。(Aepinus, *Tentamen*, table 5, fig. XCIII.)

すなわち、エピヌスは、磁力の線が完全な円形ではないことから、磁力が距離に反比例することは否定している。エピヌスの数学的議論はあくまで「試論」に過ぎない不完全なものであったし、それは本人も自覚していた。しかし、この数学的な方法は、それまでの「渦」という定性的な表現に対して、そのような形状が生じる数学的な根拠を与えるものであり、それを示すことでエピヌスの目標はとりあえず達成されたのである。そして、このように作用を不完全にしか表現できなかったことは、曲線的な作用を直線的な中心力に還元しようとする遠隔作用説の限界であった。

エピヌスは、電気流体と物質粒子とのあいだに引力や斥力を仮定し、電気流体の増減によってそのバランスが変わると考えることで、物体の全体的な牽引と反発を説明しようとした。このエピヌスの考え方は、電磁気の力を万有引力と本質的に同種の力として扱うものであった。そしてこのことによって、エピヌスはフランクリンのアトモスフィアの理論を出発点としながらも、その作用の圏を空間的ないし数学的な概念として扱うことになり、電磁気の作用を無限遠方まで続く直線的な作用と考えることになったのである。このエピヌスの議論の進め方はニュートンの万有引力の議論を応用したものである。そしてファラデーもまた、モソッティやボスコヴィッチの議論を擁護していることからすると、このエピヌスの議論を共有することは可能だったのではないかと考えられる。

しかし、その一方で、ニュートンの万有引力の議論に依拠することは、曲線的な作用を直線的な作用の集合として表現することになった。そして、この方法では実際の現象で生じている作用の曲線を十分に表現することはできなかった。これは、遠隔作用説による表現の限界であったが、エピヌスにとっては本質的な問題ではないとみなされていた。

以上のように、ファラデーとエピヌスでは遠隔作用に対する認識そのものに大きな違いがあったわけではなかった。両者とも、それぞれニュートン自身による万有引力の議論に言及しながら遠隔作用の存在を否定しているからである。そして、いわゆる遠隔作用説と近接作用説の違いとは、作用の原因についての説明の違いではなく、作用の表現方法の違いであったと考えられる。エピヌスは万有引力の数学的な議論に依拠していたため必然的に直線的な作用を前提とすることになり、その方法では曲線的な作用を不十分にしか表現

できなかった。遠隔作用説に対するファラデーの批判の根拠については第5章で詳しく分析するが、この遠隔作用説の表現の限界は、それを批判する上での重要な論点になっていく。

このエピヌスの議論の分析を通じて遠隔作用説の特徴はかなり明らかになったと考えられるが、これはエピヌスについてだけの特徴かもしれない。したがって、ファラデーが名前をあげていた残りの研究者の議論についても検討しておく必要があるだろう。そこで次は、電気の力の逆二乗則を実験的に検証したキャヴェンディッシュとクーロンの議論の分析に移ることしよう。

1.3.2. 電気の力の逆二乗則:キャヴェンディッシュとクーロン

この節では、キャヴェンディッシュとクーロンの議論について、前節で確認したエピヌスの議論の特徴と比較しながら、遠隔作用説についての分析を進めていきたい。

キャヴェンディッシュは、1771年に発表した「電気流体による、電気の主要な現象のいくつかを説明する試み (An Attempt to explain Some of the Principal Phaenomena of Electricity, by Means of an Elastic Fluid)」という論文の中で一流体説に基づく電気論を展開した。このキャヴェンディッシュの一流体説は、基本的にエピヌスの一流体説と同じ前提に立つものである。すなわち、電気流体は互いに引力を及ぼし合い、他の物体とは斥力を及ぼし合うと考えられた。キャヴェンディッシュは、物体が外部に電氣的な作用を及ぼしていない場合、その物体はその中にちょうど良い量の電気流体を含んでいる自然の状態にあるとして、その状態を電気流体の「飽和状態 (saturated state)」とした。そして、物体中に含まれる電気流体が飽和状態よりも過多 (overcharged) であるか過少 (undercharged) であるかによって、外部に及ぼす力が変化すると考えた。例えば、電氣的に過多と過多、あるいは過少と過少の状態にある物体は互いに反発し合い、過多の状態にある物体と過少の状態にある物体とは牽引し合うと考えた⁸⁹。

もともと、このように牽引と反発とを考えていたにせよ、キャヴェンディッシュは電気が遠隔的に作用していると明言していたわけではなかった。しかし、物体のまわりにアトモスフィアが広がっているという考え方にも、それが媒体となって作用が及ぼされているという従来の考え方にも否定的であった。キャヴェンディッシュは、アトモスフィアの存在に

⁸⁹ Cavendish, "Attempt to explain," 586, 590. この過多や過少といった状態は、電気流体の圧縮状態によって生じると考えられた。このように「圧縮」による状態変化を考えていたことは、キャヴェンディッシュが電気流体のはたらきを熱の発生における空気粒子の圧縮の作用とのアナロジーで考えていたことによる。(McCormmach, "Henry Cavendish," 303-4.) マコーミックは、キャヴェンディッシュがとくに自身の導入した概念である「人工空気 (factitious air)」との類推を考えていたと主張している。なお、電気流体が弾性流体であるとする、ニュートンが空気の粒子について論じたように、粒子間力が距離に反比例して作用するならば、その作用の届く範囲は近傍のみに極めて限定されたものであると考えられた。(Cavendish, "Attempt to explain," 648.)

ついて次のように説明している。

電気は、物体の粒子のあいだに散在する何らかの弾性流体によっているようであり、おそらくアトモスフィアの形で物体そのものを取り巻いているようである。この流体は、もしそれがアトモスフィアの形で物体を取り巻いているとすれば、物体から知覚できないほどの距離にしか広がっていないようだが、この流体の牽引と反発の力能は相当な距離に広がっているようだ⁹⁰。

すなわち、電気のアトモスフィアが存在するとしても、そのアトモスフィアは可感ではないほどの微小な距離にしか広がっていないとされ、アトモスフィアの分布する範囲と電気的作用が届く範囲とはまったく別のものとして区別された⁹¹。アトモスフィアはあくまで物体に含まれている電気流体のすぐ近くにとどまっており、物体外部に及ぼされる作用の媒体にはなっていないと考えられたのである。

キャヴェンディッシュがこのように物体外部のアトモスフィアの存在に懐疑的であった理由は、次のように考えていたからである。例えば、帯電した平行平板が互いに放電し合わないほどに接近する場合を考えると、アトモスフィアは平板間で混じり合うことになって何らかの電気の流れが生じることが予想された。あるいは、二枚の帯電していない平行平板が接している場合を考えたとき、その接触面においてアトモスフィアは可感な距離に広がることができず、電気流体は互いに接触面とは反対側に押しやられ、その反対側の面には電氣的に過剰な状態が生じるはずであると予想された。しかし、そのような現象は観察されないため、アトモスフィアは可感な距離には広がっていないと結論づけられたのである⁹²。

もつとも、このように結論づけられた事は、キャヴェンディッシュが遠隔作用を擁護していたことを意味しているわけではない。キャヴェンディッシュは、離れたところにある物体に電気が励起される場合、それはアトモスフィアではなく「近接空気 (contiguous air)」による作用であると考えていた⁹³。すなわち、キャヴェンディッシュは空気を電気の媒体と考えたのであり、やはり作用の原因を説明するためには近接作用説の立場をとっていたのである。むしろ、近接する空気に作用の原因を求めていたことは、ファラデーの近接粒子という説明に近いとすら言える。

なお、このキャヴェンディッシュの理論では、エピヌスに比べて、あくまでアトモスフィアは物質的であることが前提となっている。だからこそ、アトモスフィアは互いに排他的であると考えられたのである。しかし、電気的作用圏をアトモスフィアと同一視しようがしまいが、すなわち作用の原因をどのように説明しようと、キャヴェンディッシュとエピヌ

⁹⁰ Cavendish, "Thoughts Concerning Electricity," *Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish*, 1:110.

⁹¹ *Ibid.*, 1:113.

⁹² *Ibid.*, 1:110.

⁹³ *Ibid.*, 1:111.

スの議論によって導かれる数学的な表現には基本的に同じ特徴が与えられることになった。

それでは次に、キャヴェンディッシュによる数学的な議論の特徴について検討したい。キャヴェンディッシュは、電気力が万有引力と同じように距離が増えるにつれて減衰する直線的作用であるとして、その作用の大きさは、少なくとも距離の3乗より低いべき乗に反比例して減衰していくと考えた⁹⁴。この、電気力が距離の何乗に反比例するのかという問題について、キャヴェンディッシュは、ニュートンの『プリンキピア』の議論を応用しながら次のように論じている。

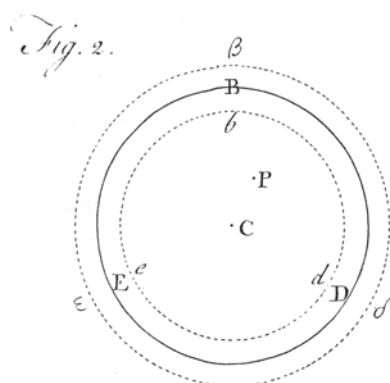


図8：力が距離の逆二乗に比例してはたらくならば、BDEの表面Bbに電気流体が均等に分布している場合にはあらゆる点で力はつり合い、電気流体に動きは見られないはずである。(Cavendish, “Attempt to Explain,” Fig. 2.)

図8において、もし球BDEが電氣的に過多であれば、電気流体は表面Bbに一様に分布する。そしてBbに分布している粒子から距離の逆二乗で斥力がはたらいているのであれば、『プリンキピア』第一篇の命題70でニュートンが論じているように、球の内側にある点Pではそれらの合力はつり合うことになる⁹⁵。そうでなければ、点Pには中心Cに牽引されるか、あるいはCとは反発する力がはたらくことになる。その一方で、もしそれが逆二乗でなければ、球の内部Cbにある粒子には力がはたらき、中心や球殻上へと向かう運動が生じる。しかし、粒子はそれぞれが反発し合うために完全に偏ることはなく、最終的には中心Cから表面にかけて電気流体の密度はなだらかに分布すると考えられる⁹⁶。すなわち、力が逆二乗で働くのであれば、最終的につり合った状態では電気流体が表面上にしか分布しないはずだが、そうでなければ球の内部にも分布しているはずだと考えられる。あとは、うまく球の内部の電氣的状態を観察できれば、その結果によって逆二乗則の正しさを検証できることになる。

⁹⁴ Cavendish, “Attempt to explain,” 585.

⁹⁵ Koyré and Cohen eds., *Isaac Newton’s Philosophiæ naturalis principia mathematica*, 1:299.

⁹⁶ Cavendish, “Attempt to explain,” 592-8.

キャヴェンディッシュは、このような理論的考察に基づいて、1773年に逆二乗則の検証実験をおこなった⁹⁷。この実験では、図9の装置が用いられた。

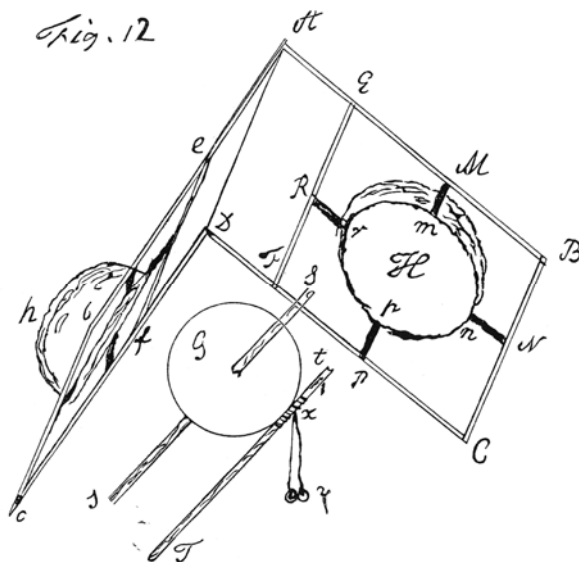


図9: キャヴェンディッシュが用いた電気の力の測定機器。球殻内部の電気の状態を測定することで、逆二乗則の正しさを検証できる。(Cavendish, “Experimental Determination of the Law of Electric Force,” in *Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish*, 1:118.)

この装置は、スズ箔で覆われた球 G と半球の球殻 H および h を中心に構成されている。直径 12.1 インチの内球 G はガラス棒 S で固定され、封蝋 (sealing-wax) が表面に塗られていて周囲とは絶縁されている。それを、4本のガラス棒で固定された直径 13.3 インチの球殻 $H-h$ の中に入れる。外球 $H-h$ を閉じて内球 G と短絡させながら帯電させると、この内球には前述のように理論的に予測されたいずれかの状態が生じているはずである。

キャヴェンディッシュは、実際にこの状態で帯電させ、次いでこの内球の電気的狀態を保持するために短絡を外して再び外球を開き、内球 G の電荷を測定した。その結果、内球 G は帯電しておらず、帯電した球の内部には電気流体が分布していないことが確かめられた。この結果から、電気の力はほぼ逆二乗で作用していることが実証されたのである。

キャヴェンディッシュは、ニュートンの『プリンキピア』の議論を応用していることもあり、少なくとも表現上は電気の力を万有引力と同じ性質を持つ力として扱っている。そのため、電気の力は中心から球対称で直線的に作用し、距離の逆二乗に近い形で減衰することが前提となっていた。キャヴェンディッシュの議論の進め方は、エピヌスの議論とは異なる

⁹⁷ Cavendish, “Experimental Determination of the Law of Electric Force,” *Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish*, 1:118-25.

るものであったが、その前提は同じであった。少なくとも、数学的な表現という観点からは、両者の力は同じ性質を持つものであった。そして、電気的作用圏とアトモスフィアとの関係、すなわち作用が空間を伝わる原因についての見解は異なっていたが、どちらもその説明は保留としながらも、基本的には近接作用を前提としていたのである。

なお、キャヴェンディッシュは、1771年の論文で展開した自説がエピヌスの『電気と磁気の試論』の議論に近いことを明記し、自分の電気論はエピヌスの議論を異なる方法でさらに厳密に拡張するものであると主張している⁹⁸。キャヴェンディッシュは、フランクリンから得られた情報をプリーストリやカントンと共有することで、1766年にエピヌスの『電気と磁気の試論』を入手していたことがわかっている。しかし、エピヌスの議論の内容そのものを詳細には検討していなかったことも指摘されている⁹⁹。そうすると、1771年の論文におけるエピヌスへの言及も形式的なものであったと考えられる。しかし、エピヌスにせよキャヴェンディッシュにせよ、ニュートンの『プリンキピア』を基礎としてため、無限遠方まで直線的に作用する中心力という作用の表現においては、共通の前提が与えることになったのである。異なっていたのは、作用が減衰する割合についての設定ぐらいであったが、これは遠隔作用説と近接作用説を区別する上では本質的な問題ではない。なお、エピヌスの『電気と磁気の試論』がイギリスで最初にきちんと論じられたのは、それから半世紀を経て出版されたロビソンの『力学的哲学の体系』においてであった¹⁰⁰。

一方、キャヴェンディッシュとは独立に、電気的作用の大きさと距離との関係について測定を進めたのがフランスのクーロンであった。クーロンは、キャヴェンディッシュとは異なる方法で電気や磁気の力の大きさと距離との関係を定量的に測定し、1785年から1789年にかけて7本の論文で発表した。これらの論文では、電気力の大きさと距離との関係、その大きさを左右している電気流体の密度、そして物体表面から空気中への電気の損失などが検証された。そして、キャヴェンディッシュが逆二乗則の検証実験を論文として発表しなかったため、このクーロンのおこなった測定は、逆二乗則を検証する最初の公式測定と

⁹⁸ Cavendish, "Attempt to explain," 584.

⁹⁹ ユングニッケルとマコーミックは、プリーストリが『電気の世界』の改訂版を出版する際にもエピヌスの理論の誤った理解が残されていたことから、プリーストリの交友関係の中ではエピヌスの理論は十分には理解されていなかったと指摘している。(Jungnickel and McCormmach, *Cavendish: the Experimental Life*, 233-5.) エピヌスの理論のイギリスへの需要については、ホームも詳細な調査をおこなっている。(Home, "Aepinus and the British Electricians," in *Electricity and Experimental Physics in Eighteenth-century Europe*, XVI, 190-204.)

¹⁰⁰ Jungnickel and McCormmach, *Cavendish: the Experimental Life*, 235. なお、ロビソンは一流体説に基づくエピヌスの理論を称賛しているが、それは遠隔作用説を擁護していたからではない。(Robison, *System of Mechanical Philosophy*, 4:176-98.) ロビソンは、観察の結果から電気流体や電気物質 (electric matter) が物体から流出していることを否定し、「帯電した空気 (electrified air)」が作用していると考えた。(Robison, *System of Mechanical Philosophy*, 4:196.) ロビソン自身は、電気現象を「力学の議論の課題」と考えており (Robison, *System of Mechanical Philosophy*, 4:198.)、その観点からエピヌスの方法を評価していたことがわかる。なお、ファラデーは空気を近接粒子として想定することになるが、一般的には「エーテル」や「アトモスフィア」が想定される中で空気を電気作用の媒体として考えていたことはファラデーとロビソンの共通点である。

して知られることになった¹⁰¹。

クーロンは第一論文で、図10のような振り秤を用いて、同種に帯電した物体間にはたらく斥力の法則性を見出そうとしている。

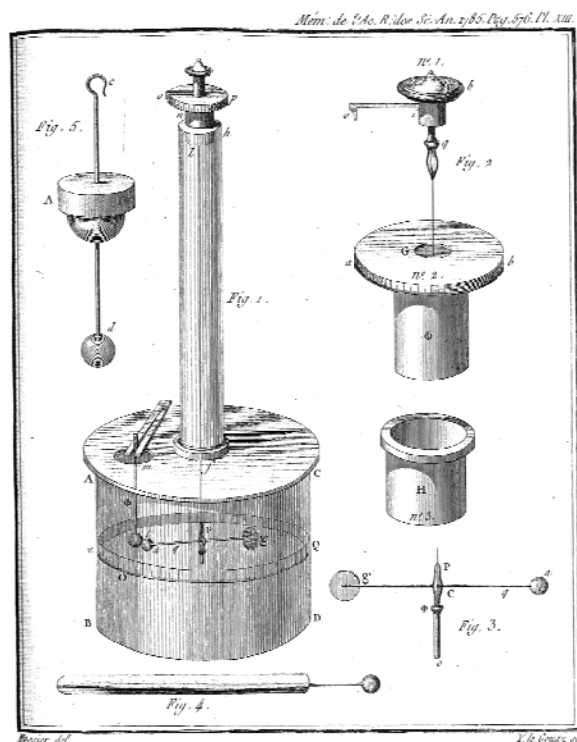


図10：クーロンの振り秤。小球 a に電気の力がはたらくことによって、その小球が取り付けられた秤 q と上部の指針 o とのあいだにはねじれが生じる。この角度から、小球 a にはたらく電気の力の大きさを測定した。

(Coulomb, "Premier mémoire," 576.)

この振り秤という測定機器は、クーロンが前年の1784年に発表した針金のねじれの力の測定を応用したものであった。ガラス製の円筒からできている装置の中に、先端に Fig. 3 のようなニワトコの小球 a とテレピン油をしみこませた紙の円盤 g からなる秤を作成し、それを銀製の針金によってつるす。ここで円盤 g は、小球 a を釣り合わせるとともに、秤の振動を抑えるために取り付けられていた。そして、装置にあげられた穴 m から挿入した小球 t が小球 a に及ぼす力を、指針 o と針金 q とのねじれ角から測定し、その力と $a-t$ 間の距離との関係を求める。それによって、クーロンは電気の力の逆二乗則を検証しようとしたのである。

¹⁰¹ クーロン以前にも、電気が距離の逆二乗で作用している可能性は、エピヌスやベルヌイ、プリーストリやロビソンなどによって指摘されていた。(Gillmor, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering*, 193.)

もつとも、このクーロンの測定機器では力の空間的な配置については観測できない。キャヴェンディッシュの測定機器でもそうであったように、クーロンの測定機器でも二点間の力が直線的な作用であることが前提となっており、曲線的な作用であることは想定されていなかった。もし作用が曲線的であったとしても、その様子を観察できるようには設計されていなかったし、それが装置の欠点であるとも考えられていなかった。このクーロンの測定機器はキャヴェンディッシュの測定機器とは異なる理論や動作原理に基づくものであったが、それらはニュートンの万有引力の議論に基づいていたという点では共通していた。そのため、電気の力が二点間の直線的な作用であることを大前提として測定装置が設計されていたのである。

このように直線的な作用が前提となっていたことは、クーロンが第4論文から第6論文でおこなった導体表面の電気流体の分布の議論にも表れている¹⁰²。電気流体は、それぞれの要素が距離の逆二乗則にしたがって物体表面に分散することで平衡状態にあると考えられていた¹⁰³。そこで例えば第5論文では、帯電した二つの物体間で電気の力がはたらくときに、その物体表面で電気流体が分布する様子は次の図11のように表現されていた。

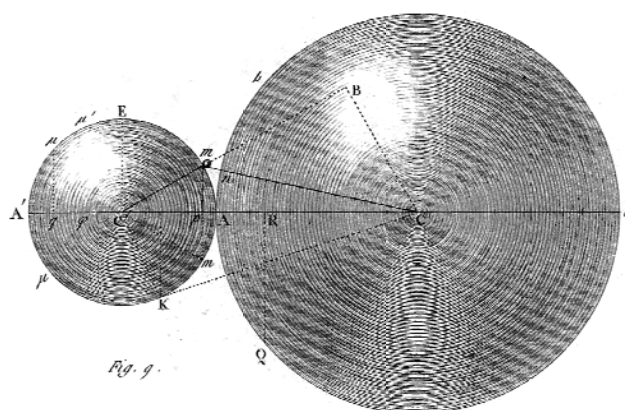


図 11：物体表面に及ぼされる力を求めるための関係図。物体上の電気流体の分布を知るために、点 m に及ぼされる力を導出した。(Coulomb,

¹⁰² クーロンは導体だけではなく誘電体の表面の電荷分布についても研究を進めようと考えていたが、その研究が発表されることはなかった。(Gillmor, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering*, 203.)。なお、物体外部への電気流体の移動については、第三論文で論じられる。クーロンは、物体を取り巻く空気がある程度の湿気を含んでいることや、その他の大気元素の電気的性質によって、物体に近接する分子のあいだで電気流体はある一定距離まで伝わり、物体表面からは少しずつ失われると考える。(Coulomb, “Troisième mémoire,” 613-4.) クーロンは、物体の表面は導体分子 (molécule conductrice) によって構成されており、電気流体はその電気的性質の差異に応じて移動するとされた。クーロンは「したがって、一方から他方の導体分子へと移動していく電気流体は、物体の性質に応じて電気的性質の大きさの異なる小さな空間を横断しなければならない。導体分子は一様に分布しているため、この横断する空間は、同じ物体あるいは互いに同じ距離であれば一定の抵抗を示す」(Coulomb, “Troisième mémoire,” 632-3.) と述べている。

¹⁰³ Coulomb, “Quatrième mémoire,” 75. ここで、電気流体が物体内部には「浸透 (pénétrer)」しないことが繰り返し強調される。

“Cinquième mémoire,” 466.)

この図からは、球 C' の表面に位置する点 m に及ぼされる力が、その点と球 C と C' の中心点とを結ぶ直線の幾何学的な関係によって考察されていることがわかる。クーロンによると、図 11 の点 m における電荷密度 δ は、球 C 表面の電荷密度の平均値 D と球 C' 表面の電荷密度の平均値 D' および、球 C の半径 R と球 C' の半径 r 、そして m の位置を表す変数 x ($=Ap$) を用いて、次式のように導出された¹⁰⁴。

$$\delta = D' - \frac{2DR^2 \left[R - \frac{(R+r)x}{r} \right]}{[R^2 + 2(R+r)x]^{\frac{3}{2}}}$$

この方程式は、図 11 で表現されているように、球の中心点と観測点 m とを結んだ直線的な距離によって規定され、そのあいだの状態には規定されていない。すなわち、アトモスフィアなどが中間に介在することによって作用の形状が変化する可能性は、議論の前提として排除されている。そもそも、クーロンは、電気流体が物体の表面全体に分布していると仮定して距離の逆二乗則を適用すると任意の点の電気の力は導出できるとして、物体をアトモスフィアが覆っているという仮説を導入することには否定的であった¹⁰⁵。

さらに第 6 論文では、第 5 論文の議論を応用することで、球が連続している場合や、球と円筒とを組み合わせた場合の電荷密度の変化、そして、帯電した球から離れたところにあるさまざまな形状の物体への電气的作用についての考察が進められる。この作用を考察するために電気流体の分布や作用の方向を数学的に表現したものが、図 12 である。

¹⁰⁴ Coulomb, “Cinquième mémoire,” 460.

¹⁰⁵ Ibid., 452.

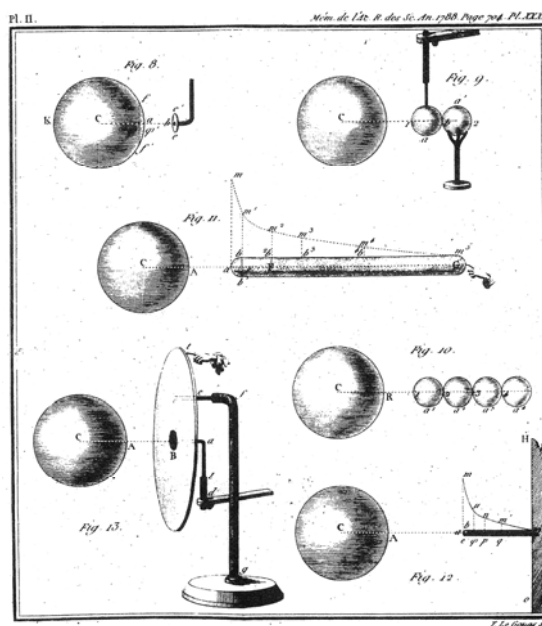


図 12：さまざまな形状の物体に励起される電気流体の密度の考察
(Coulomb, “Sixième mémoire,” plate 2.)

図 12 には、球 C から離れたところにある物体を対象として、そこに励起される電気流体の密度を考察するための数学的な表現が記されている。いずれの場合でも、電気的作用は物体の中心間を結んだ直線にそってばかりが前提とされ、球 C からの作用が周囲の空間にどのように分布しているかといったことは考察の対象とはなっていない。作用が球 C と物体とを結ぶ中心軸について対称であったので、空間の不規則な形状を考慮することが求められなかったのである。

なお、クーロンは、一流体説では電気流体の粒子が引力と斥力の両方を同時に持つ必要が生じると考え、どちらかという二流体説を支持していたようである¹⁰⁶。しかし、エピヌスの一流体説と他の研究者たちの二流体説とを比較しながらも、それらの議論は実質的に同等になるとして、その選択は保留としていた¹⁰⁷。この判断は、クーロンがフランクリンやノレなどのそれまでの伝統的な議論とは意図的に距離を置き、エピヌスと同じようにニュートンの伝統において牽引と反発の力によって議論を進めようとした結果であるといえる¹⁰⁸。牽引と反発が生じる原因は不明であったため、その原因についての一切の議論を放棄するという立場がとられたのである。

クーロンもまた、作用が空間的に離れたところまで伝わる原因についての「説明」は避けているが、明確に遠隔作用を擁護していたわけではない。少なくとも、クーロンが議論の対象としていたのは、エピヌスやキャヴェンディッシュと同じように、作用を数学的に「表

¹⁰⁶ Gillmor, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering*, 215-6.

¹⁰⁷ Coulomb, “Sixième mémoire,” 672-3.

¹⁰⁸ Gillmor, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering*, 175-6.

現」することであった。そして、このニュートンからクーロンへと至る万有引力的な中心力を前提とする数学的な議論をさらに発展させていったのが、次節で論じるポアソンであり、さらには、ファラデーが擁護したモソッティであった¹⁰⁹。

1.3.3. 中心力に基づく電磁気学研究の到達点:ポアソン

ファラデーが遠隔作用説の代表としてあげていた三人の研究のうちでも、とくにポアソンの研究は、ニュートン力学に基づく電磁気学研究の集大成であった。ポアソンは、ニュートンやクーロンに加えて、ラプラス (Pierre Simon Laplace, 1749-1827) やラグランジュ (Joseph Louis Lagrange, 1736-1813) の研究から強い影響を受けていた。とくにラプラスは、『天体力学 (*Traité de mécanique céleste*)』などの高度に発展した力学的研究を発表し、革命期からナポレオン期にかけてのフランスにおける学問的権威として絶大な影響力を誇っていた。そして、その影響を受けた研究は、ニュートン力学をモデルとして分子レベルの微小領域での中心力や不可秤流体の作用を前提とし、そのニュートン力学的な分子論に基づいて可感な現象を説明しようとする共通の特徴があった¹¹⁰。ポアソンも、このラプラスの影響を強く受け、天体力学や電気論、そして磁気についての分子論的な研究を進めていった¹¹¹。なお、この時代における「分子 (molécule)」とは、物質の構成要素をモデル化したものであると同時に中心力の原因と位置づけられるものであった。例えばヒューエルは、ポアソンの議論に言及しながら、分子を「力の中心」と言い換えている¹¹²。

それでは次に、ポアソンの議論の内容を具体的に検討していこう。ポアソンは1812年に静電気の分布についての論文を発表しており、この論文は英訳されて、翌1813年にはイギリスでも出版されている¹¹³。このポアソンの電気論では、同種の流体は反発し合い、異種の流体は引き合うと仮定される二流体説が採用された。そしてこの仮説の下で、外部から電氣的な状態が観察できない「自然状態 (état naturel)」は、物体の中に異なる二流体が同じ量だけ含まれるときに生じると考えられた¹¹⁴。またポアソンは、電気流体は物体の表面に分布しており、力はその表面から垂直方向に物体外部へと及ぼされていると考えた。すなわち、ポアソンもキャヴェンディッシュやクーロンと同じように、直線的な作用を前提と

¹⁰⁹ このモソッティの位置づけは、ヒューエルの議論にもみられる。(Whewell, *History of the Inductive Sciences*, 3:30-1.)

¹¹⁰ Fox, "Rise and Fall of Laplacian Physics," 92-109. このように、一般の可感な距離においては逆二乗則が受け入れられていた一方で、極めて短距離だけにはたらく力の存在も考えられていた。この力によって生じる自然現象としては、熱や電磁気のほかには、とくに屈折や偏光、毛管現象などが考えられていた。

¹¹¹ ポアソンは、毛管現象の研究ではイギリス王立協会の1832年のコプリーメダルをファラデーとともに受賞している。ファラデーは、「磁気電気 (magneto-electricity: 電磁誘導のこと)」の研究によって、この1832年のコプリーメダルを受賞した。この「磁気電気」の研究については4.1節を参照せよ。

¹¹² Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:433-6.

¹¹³ 『哲学年報 (*Annals of Philosophy*)』の第1巻(1813年)および第3巻(1814年)に掲載された。(Crosland and Smith, "Transmission of Physics from France to Britain," 19-20.)

¹¹⁴ Poisson, "Mémoire sur la distribution de l'électricité," 1-2.

していた。

なお、ポアソンの議論は万有引力についてのラプラスの議論を応用するものであったため、引力や斥力の大きさも万有引力と同じように距離の逆二乗に比例することが前提となっていた。そしてこれらの前提に基づいて、物体表面における電気流体の分布を考察し、さらにはその電気流体から任意の点に及ぼされる作用を面積分によって求めようとした。

これらのポアソンの研究の特徴は次のような前提として与えられ、その議論の出発点となっている。

ある与えられた点に物体が及ぼす牽引ないし反発の成分は、その点の座標におけるある特定の関数の偏微分によって表される。なお、この関数は、それぞれ与えられた点との距離で割った物体の分子の総和を表すものであり（この総和は V によって表される）、私たちが考察している流体の層と関係している。それでは、空間における任意の点の座標の関数において V の値を求めてみよう¹¹⁵。

このようにポアソンは、電気流体の各分子からの作用の総和を V と置いて、その V の値を求めることを考える。なお、この V という関数は、1785年頃にラプラスが万有引力を論じる際に導入した関数であり、ポアソンの議論においては任意の点における電場のポテンシャルに相当する関数となっている¹¹⁶。

ポアソンの議論の特徴を整理するために、この V の導出過程を簡単に紹介しておこう。ポアソンはまず、電気流体が回転楕円体の形状をした物体表面に分布している場合を考える。この回転楕円体の中心に極座標の中心を取ると、半径 r と偏角 θ および ω によって回転楕円体の表面上の点の満たす方程式が与えられる。また、表面における電気流体の層の厚み（電気の密度に相当する）を y とすると、それは θ と ω の関数として与えられる。

今、半径 r の延長上に位置し、中心から x の距離にある任意の点を $O(x, \theta, \omega)$ とし、回転楕円体の表面上にある別の任意の点を (r', θ', ω') とすると、この二点間の距離は次式のように与えられる。

$$\sqrt{r'^2 - 2r'x(\cos\theta\cos\theta' + \sin\theta\sin\theta'\cos(\omega - \omega')) + x^2}$$

さらに、回転楕円体上の面積要素は $r'd\theta' \times r'\sin\theta' d\omega'$ ($= r'^2 \sin\theta' d\theta' d\omega'$) となるた

¹¹⁵ Ibid., 14-5.

¹¹⁶ Heilbron, *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, 498-9. この「ポテンシャル」という言葉は、後にイギリスのグリーンがポアソンの研究を進めるにあたって名づけたものであり、ポアソンがこの時点で「ポテンシャル」という言葉を用いていたわけではない。なお、グリーンは、ラプラスやポアソンの研究を独自に進めて一般化し、1828年に『数学的解析の電気と磁気の理論への応用についての論文 (An Essay on the Application to the Theories of Electricity and Magnetism)』を自費出版した。しかし、この著書はあまり知られることはなかった。ウィリアム・トムソンも、グリーンの研究を知らずに独自に同様の研究を進めて1842年に発表している。このトムソンの1842年の論文については、7.2節を参照せよ。

め、表面上に分布している電気流体の各要素は、その面積要素に流体の厚みをかけることによって求められ、 $y'r'^2 \sin \theta' d\theta' d\omega'$ となる。そうすると、回転楕円体の表面に分布している電気流体から点 O に及ぼされる作用は、各要素の大きさをそこからの距離で割ったものとなり、作用の総和 V は、その式を表面について積分することによって求められる¹¹⁷。

$$V = \iint \frac{y'r'^2 \sin \theta' d\theta' d\omega'}{\sqrt{r'^2 - 2r'x(\cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\omega - \omega')) + x^2}}$$

この作用の総和 V は、前述のように点 O における電場のポテンシャルに相当する。そして、任意の点 O に及ぼされる力は、この関数 V を偏微分して、 $-dV/dx$ で与えられる。ポアソンはいくつかの場合についてこの V の値を具体的に計算しており、例えば球の場合における V は次式のように求められた¹¹⁸。

$$V = \frac{4\pi ba^2}{x}$$

ここで、 a は球の半径、 b は電気流体の厚み (= y') を表す。なお、この式を距離 x で微分することで、力の逆二乗則が導出される。

このように、ポアソンの 1812 年の論文では、電気流体の各要素から離れた場所へと及ぼされる直接的かつ直線的な作用が前提となっていた。このことから、ポアソンの議論は遠隔作用説に分類されることになる。

さらに、ポアソンは 1813 年に、牽引や反発の原因となる密度の項を含んだラプラス方程式、いわゆるラプラス=ポアソン方程式を発表している¹¹⁹。この方程式は次式のように与えられた。

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2} = -4\pi\rho \tag{1.1}$$

この方程式は、空間の各点における作用の大きさを表現するものであり、近接作用説による曲線的な作用を基礎づけることもできる。しかし、この方程式では時間変化が考えられていないため、媒質の作用を前提とするような拡散や振動といった現象を表現することはできない。これらの動的な現象の方程式を準備していったのは、フーリエやグリーン (George Green, 1793-1841) であり、彼らは作用が媒質を通じて時間をかけて伝わることを数学的に表現しようとした。それに対して、ポアソンは万有引力の議論をモデルとして静電気力を議論していたために、作用は瞬時に伝わるのが前提となっており、時間の項を

¹¹⁷ Poisson, "Mémoire sur la distribution de l'électricité," 17.

¹¹⁸ Ibid., 20.

¹¹⁹ Poisson, "Remarque sur une équation," 390.

必要としなかった¹²⁰。(1.1)式は、あくまで万有引力の議論を前提として導出された式であり、曲線的な作用を表現できるとしても、それは直線的な作用の集合として与えられる表現と同等であった。すなわち、(1.1)式はあくまで遠隔作用説の前提において導かれた方程式であり、近接作用説を基礎づける方程式とは理解されていなかった。

結果的に言うと、ポアソンは作用の原因を方程式に含んでいたため、時間微分の項を必要としなかったが、フーリエの方程式ではその原因を排除したため、時間微分の項を含む必要があった¹²¹。フーリエは、作用の原因よりも、その作用が伝わる過程を数学的に表現することが重要だと考えたのである。このように方程式の中に作用の原因を含めるかどうかの違いは、作用の原因を議論の対象とするかどうかという、研究の目的や方法についての大きな見解の相違によるものであった。そのため、フーリエの研究はポアソンの研究を拡張したものであると単純に理解することはできない。このフーリエの方法の特徴については、第2章で改めて論じることにする。

このポアソンの分子論的な説明は、電気流体よりも磁気流体の議論において、より顕著に展開されている。まずポアソンは、磁気流体がある物体から別の物体へと移動することがないことから、同一の物体内部においても磁気流体の移動そのものを否定する¹²²。そして、この移動については、「可感ではない変位は決して検証されない」¹²³として磁気流体の議論を保留とし、「不可秤流体」¹²⁴という表現を用いて磁気流体の説明を実質的に放棄している¹²⁵。そして、この磁気流体そのものは無限小の数学的な点である「磁気要素」の集合へと置き換えられて、力学的な質点と同じように扱われて議論が進められていった¹²⁶。ヒューエルは、ポアソンの論文が発表されてから約10年後に、ポアソンが磁気流体を「主として現象の法則を初等的な形式で表現する手段として」¹²⁷用いていると述べている。

このようにポアソンは、それまでの電磁気学研究と比べても、物質的な原因よりも力そのものを考察の対象の中心としていった¹²⁸。しかし、そうであっても、結局その理論には物質的な原因が組み込まれていた。このポアソンの基本姿勢は、ニュートンからラプラスへと受け継がれてきた伝統的な力学的方法を踏襲する限り避けられないものであった。

¹²⁰ これは、トムソンやマクスウェルも自覚していたことであった。例えばマクスウェルは、キャヴェンディッシュやポアソンらの議論とフーリエの議論とを比較して、前者は作用が距離を隔てて瞬時に伝わることを前提としており、後者は時間をかけて段階的に伝わることを前提としているとして両者を区別している。(Maxwell, "Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism," in *SP*, 2:301-4.)

¹²¹ Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 99.

¹²² Poisson, "Mémoire sur la Théorie du Magnétisme," 251. ポアソンは、このように移動を限定する理由として、クーロンと同様に「保磁力」を仮定している。

¹²³ Ibid.

¹²⁴ Poisson, "Extrait d'un Mémoire sur la Théorie du Magnétisme," 114.

¹²⁵ ポアソンがこの論文を発表してから約10年後に、ヒューエルもまたこの磁気流体について「主として現象の法則を初等的な形式で表現する手段として」用いられているものに過ぎないと述べている。(Whewell, *History of the Inductive Sciences*, 3:57.)

¹²⁶ Poisson, "Mémoire sur la Théorie du Magnétisme," 262-3. なお、ポアソンなどの磁気流体の議論については、夏目「磁気流体」という概念と言葉との関係」を参照せよ。

¹²⁷ Whewell, *History of the Inductive Sciences*, 3:57.

¹²⁸ Home, "Physical Principles and the Possibility of a Mathematical Science of Electricity and Magnetism," in *Electricity and Experimental Physics in Eighteenth-century Europe*, XVIII, 166.

1828年に、ポアソンは分子論を展開するにあたって自分の研究方法を「物理力学」として次のように特徴づけている。

つり合いと運動の一般法則を発見するために、まったく抽象的な方法を扱う必要があった。この一般化と抽象化のジャンルにおいては、ラグランジュが物体の物理的な結びつきを異なる点の座標のあいだの方程式によって代替し、私たちの考えられる限界まで推し進めていった。これがまさに「解析力学 (Mécanique analytique)」を構成するものである。しかし、この見事な考え方とは別に、今は「物理力学 (Mécanique physique)」を取り上げよう。その固有の原理は、与えられた力の作用を一点から他の一点へと伝え、それらのつり合いを仲介する分子の作用にすべてを帰着させることにある¹²⁹。

このように、ポアソンの「物理力学」とは、物質的な原因としての分子を想定し、現象をその分子の二点間作用に帰着させて説明するものであった。このように分子の作用として自然現象を理解しようとする姿勢は、第5章で論じるファラデーの近接粒子の理論や、第7章で論じるトムソンの「ボルティモア講義」の分子論と近い。

なお、科学史家フォックスは、この19世紀初頭のフランスにおいて物理学の方法上の変化が生じたとして、それを「ラプラス物理学」の衰退として説明している。フォックスによると、当時のフランスには、ラプラスやポアソン、アンペールに代表される「力学的＝分子論的 (mechanico-molecular)」方法を重視する研究者たちと、フーリエやコントに代表される「分析 (解析) 的＝実証主義的 (analytico-positivistic)」方法を重視する研究者たちが存在していた。前者は、18世紀に大きく進展した天体力学をさらに一般化し、万有引力的な中心力を備えた分子のはたらきをモデルとしてさまざまな物理現象を説明しようとした。すなわち、自然現象の原因を当時の力学的方法の範囲内で説明しようとしたのである。これがフォックスの言う「ラプラス物理学」である¹³⁰。

ここでポアソンが述べている「物理力学」は、フランス革命期に大きな力を持ったラプラス的な「力学的＝分子論的」方法、いわゆる「ラプラス物理学」に基礎を置くものであった。しかし、このラプラスやポアソンの議論の方法は、抽象的な「解析力学」、ひいてはフーリエやフレネル (Augustin J. Fresnel, 1788-1827) の「分析的＝実証主義的」方法に取って代わられることによって、1815年頃から1820年代にかけて急速に力を弱めていった。ポアソンが上記の言葉を残した1828年には、ポアソンの影響力も弱体化していたのである。

この「ラプラス物理学」の衰退とともに「力学的＝分子論的」な方法は絶対的なものではなく、相対化されて研究方法の一つに過ぎなくなった。その一方で、このポアソン

¹²⁹ Poisson, “Mémoire sur l'équilibre et le mouvement,” 361.

¹³⁰ Fox, “Rise and Fall of Laplacian Physics.” Herivel, “Aspects of French Theoretical Physics,” 121. および Crosland and Smith, “Transmission of Physics from France to Britain,” 6-8, 55-6. なお本論文では、analysis ないし analytico-などは、慣例にならい、主に数学的文脈においては「解析」と訳出し、その他の文脈においては「分析」と訳出する。

が「物理力学」の特徴としていた分子の中心力を想定する議論の方法は、19世紀後半のイギリスにおいて「力学的モデル」として再評価されることになる。そこでは、研究方法の一つとして相対化されたポアソンの方法は、抽象的な表現に具体的なイメージを与えて理解を促すための「モデル」として意識的に利用されることになったと考えられる。このイギリスにおける力学的モデルの展開については、第7章以降で改めて議論したい。

ポアソンの研究は「力学的=分子論的」な「モデル」を用いていたために、その表現方法に限定を受けることになった。ポアソンは結局のところ、原因となる分子を想定して、そこから直線的に生じる中心力の作用によって現象を説明する方法から離れることはできなかった。また、作用の時間的な変化が考えられることもなかった。そして、このことが遠隔作用説の特徴でもあり限界でもあった。遠隔作用説は基本的に近接作用を前提としていたが、その作用が伝わっていく原因を説明することを放棄し、あたかも直接的な遠隔作用であるかのように表現していた。そのことは、直線的な作用を前提としていたからこそ可能となったのであり、複雑な曲線的作用を表現する上での制約にもなったのである。

1.4. 近接作用説と遠隔作用説のそれぞれの限界

力学の体系化は、ニュートンが1687年に出版した『プリンキピア』によって大きく前進した。この成功を受けて、18世紀にはニュートンの方法が自然現象のさまざまな作用を数学的に研究するためのモデルとなっていく。力学は、当初は接触力だけを前提とする機械論として発展したが、ニュートンはこの機械論の近接作用的な説明にとらわれずに遠隔作用的な万有引力を導入して自然界の運動を体系的に記述することに成功した。万有引力を導入するにあたってニュートンが重視したことは、作用を生み出している原因を説明することではなく、現象を表現するための数学的法則ないし原理を見出すことであった。これが大きな方法論的な転換点となり、それ以降は遠隔作用的な中心力を議論に積極的に導入することが可能となった。これが、18世紀に形成された、いわゆる「ニュートン力学」の方法であった。

イギリス経験論における物質の性質と感覚との関係の議論も、このニュートン力学の影響が強く反映されていた。イギリス経験論では、物質の性質は一次性質と二次性質とに分けられた。ここで、一次性質とは力学で扱うことのできる量のことであった。また、二次性質も根本的には一次性質に還元されうると考えられ、この一次性質と二次性質との違いは感覚への現れ方の違いに過ぎないと考えられた。すなわち、感覚できないほどの微小な距離における力学的な作用が人間には二次性質として知覚されると考えられたのである。なお、ニュートンが『光学』の疑問31で採用した物質観の影響もあって、この感覚できないほどの微小な距離における力学的な作用は、牽引や反発といった遠隔作用的な中心力を認めるものであった。むしろ、牽引や反発といった力こそが物質の本質であると考えるポ

スコヴィッチの原子論のような考え方も現れた。そして、このような物質観はコモン・センス学派の思想的影響もあってイギリスで普及していったのである。

ただし、可感ではない微小領域ではたらく作用を説明することは重要な問題ではあったが、この問題を論じるためには検証不可能な仮説に頼らざるを得なかった。そのため、実際には、可感な距離においてはたらく作用が研究の対象とされた。その中でも、ニュートンが万有引力の議論で用いた幾何学的方法を電磁気現象に応用した研究は、いわゆる「遠隔作用説」を形成していった。科学史家のホームは、エピヌス、キャヴェンディッシュ、クーロン、ポアソンなどを「数学的な重力理論の技法」を導入した研究者としてあげ、彼らの研究の「根本的な問題は、18世紀の物理学者たちの定量化への熱望と彼らの基本となる理論的前提とのあいだの両立不可能性であった」と述べている¹³¹。すなわち、ファラデーが批判したこれらの研究者たちの共通点は、電磁気学にニュートン力学の方法を導入したことであり、それによって電気や磁気力は直線的な作用として論じられることになった。しかし、このことは遠隔作用説を特徴づけるとともに、結果的に数学的表現の形式上の制約を生み、その表現の限界となっていた。

この点において、遠隔作用と近接作用の違いでは説明できない、近接作用「説」と遠隔作用「説」の本質的な違いが生じることになった。遠隔作用説は、作用が遠隔的にはたらくことを積極的に肯定するものではなく、むしろ近接作用を前提としていた。しかし、そのように作用を伝える原因となっている媒体について「説明」を与えることは回避され、あくまで作用を数学的ないし定量的に「表現」することが目的とされた。ただし、その表現は直線的な作用の集合として与えられたため、複雑な曲線的作用を表現することには限界があった。また、作用が瞬間的に伝わることが前提とされていたことも、遠隔作用説の限界であったと言える。そのままでは、時間的な変化が関係する動的な電磁気現象を表現することは困難であった。

その一方で、伝統的な近接作用説では、アトモスフィアなどの媒体を仮定して電気の作用を「説明」することが目的とされた。この研究の目的の違いが、近接作用説と遠隔作用説の本質的な違いになったと言える。しかし、結局は仮定された媒体が可感ではなかったため、この近接作用による説明は実証性に限界があった。また、電気流体やそこから出てくるアトモスフィアによって作用を定性的に表現する場合、フランクリンの示した図1にも表れているように、作用は逆二乗則と明確に結び付けられるわけではないし、直線的なものに限定されるわけでもない。そのことが作用を定量的に表現することを困難とし、基本的には定性的な説明にとどめてしまうことになった。このような表現の特徴もまた、近接作用説と遠隔作用説との違いとなった。

近接作用説と遠隔作用説の違いとは、作用が伝わる原因を「説明」することを目指すか、それとも作用を数学的・定量的に「表現」することを目指すかという研究の目的の違いに

¹³¹ Home, "Physical Principles and the Possibility of a Mathematical Science of Electricity and Magnetism," in *Electricity and Experimental Physics in Eighteenth-century Europe*, XVIII, 166.

起因していた。しかし、そのどちらの方向にも限界があった。この限界は、一つは感覚の限界に由来するものであり、もう一つはその当時に利用できた数学的方法の限界に由来するものであった。ファラデーは、3.2節で論じるように、可感ではない現象を扱う化学という分野に共感を持ち、自分の専門的な基礎としていた。そのため、感覚の限界については受け入れつつ積極的に克服していくべき対象となり、その一方で、数学的方法の限界については別の方法を模索することで克服すべき対象となった。このことが、数学や力学から距離を置いて遠隔作用説を批判するようになったファラデーの姿勢と結びついていくことになる。

このように「遠隔作用説」の共通点は、作用を遠隔的であるとみなしていたことではなく、作用の表現方法にあった。そのため「遠隔作用」説は、その研究を進める研究者自身によって意識的に標榜されたものではなく、他者からの評価として形成されたものであった。ニュートン力学を応用した中心力と二点間作用に基づく遠隔作用説は、ポアソンに至ってある程度の完成度を持つようになったが、そこには前述のような表現方法の限界があった。そして、この表現方法の限界を克服していくためには、作用の物質的な原因を作用の説明からだけでなく、その表現からも排除することを必要とした。すなわち、その限界の原因となっていた分子論的な中心力という仮定を放棄し、作用が伝わる過程のみを表現することが研究の目的になりうることを認め、さらにそのための表現方法を模索する必要があった。

この遠隔作用説の表現方法の限界は、機械論からニュートン力学へと、近代科学の発展に大きく寄与してきた従来の力学的な研究方法を物理学一般へと拡張していくことの限界でもあった。研究の主流は、自然界の作用を牽引や反発という万有引力のような力能によって解釈する方法から、空間座標における作用の連続的な変化を微分方程式によって分析・表現する方法へと大きく転換していった。その代表が次章で論じるフーリエの「熱の解析的理論」であった。このフーリエの研究は実証主義を代表する研究であり、作用を生み出している原因を分析の対象としたり、そのために「力学的＝分子論的」なモデルを想定したりしないことに特徴があった。その議論には、それまで以上に高度で抽象的な数学が必要とされたが、それによって万有引力のような直線的作用に基づく遠隔作用説から脱却する可能性を開き、ファラデーの力線などを用いた定性的な表現を数学的に表現し直すための方法の準備にもなったのである。

次章では、この実証主義における現象の研究方法を「表現」と「説明」という論点から分析し、その表現と説明の新しい関係からアナロジーに基づく研究方法の重要性が高まっていた過程を論じたい。さらに、これら科学における研究方法の理解を深めるために、その方法の違いの基準ともなった学問の分類についても議論を進めたい。

第2章 物理学における力学的方法の有効性と限界

第1章で論じたように、ニュートンは近接作用を原理とするそれまでの機械論的な力学に遠隔作用的な万有引力を導入することで、自然哲学の体系化において大きな成功を収めた。そして、牽引や反発という遠隔作用的な力を組み込んだ新しいニュートン力学が、18世紀の研究方法の模範となっていった。こうして、ポアソンの「物理力学」に代表されるように、電磁気学などの新しい研究分野に対してもこの枠組みで研究が進められ、電気や磁気の力の遠隔作用説が形成されていったのである。

この遠隔的な中心力を組み込んだ力学的方法は、18世紀に大きく発展した天体力学などの分野では大いに有効であった。しかし、19世紀にかけて研究が進んでいった新しい物理学の分野に対しては、その作用や運動のあり方を十分に表現することができなかった。ニュートンは、万有引力の原因については感覚ではとらえられない隠れた性質であるとして議論を避け、それによって成功を収めた。しかし、万有引力のような中心力を備えた分子を仮定しながらさまざまな物理現象を研究していくことは、その原因となる分子が可感ではなかったために、実証性の乏しい説明になってしまうことを余儀なくされたのである。

このような経緯により、19世紀初頭のフランスではラプラスやポアソンなどの「力学的＝分子論的」方法を重視する研究者たちとは別に、フーリエやコントなどの「分析（解析）的＝実証主義的」方法を重視する研究者たちが現れることになった。前者は1.3.3節で論じたように、自然現象を分子レベルの微小領域における中心力によって説明しようとした。すなわち、自然現象の原因を当時の力学的方法の範囲内で説明しようとしたのである。しかし、この方法は原因の説明としても作用の表現としても限界があったし、そもそも天文学の分野では現象を距離の逆二乗ではたらく中心力によって記述することに成功したかもしれないが、それは万有引力についての議論だったからこそ成功したことでもあった。電気や磁気の力能は、明らかに万有引力とは異なる性質を持っていた。そこで後者のように、自然現象を生み出す原因にはそもそも言及せず、感覚を通じて測定可能な量によって作用の様子を表現するための数学的な法則性を見出そうとする方向性が打ち出されていった。このような方法は一般に実証主義といわれ、その基本理念はコントによってまとめられた。そして、実証主義的な研究の有効性が認められるようになると、万有引力のような中心力を想定する従来の力学的方法の限界も意識されるようになっていった。それとともに、この新しい研究方法の有効性がしだいに広く認識されるようになっていったのである。

なお、このような研究方法の変化にともなって、力学とアナロジーの有効性ないし役割についても変化が生じていく。ここで、アナロジーとは、ある二つの対象の要素のあいだの類似性ないしその対応関係のことである。一方、モデルとは、ある対象が持っている構造や体系をわかりやすく単純化し、抽象化ないし図式化したものである¹。力学的説明ない

¹ 『オックスフォード英語辞典（OED）』（*Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. “model,” “analogy.”）、およ

し力学的モデルを用いた説明では、その原因として機械的な構造物や中心力を備えた分子が仮定され、それによって現象に表現と説明を与えることが目指された。ただし、この方法では、研究対象における作用の原因が力学的な因果関係に還元できることが前提になっていた。

それに対して、とくに実証主義的なアナロジーは、力学的な原因や構造を絶対視せず、むしろ原因の議論を放棄して、あくまで現象の類似性に着目するものであった。そもそもアナロジーとは、類似の既知の対象との比較によって未知の対象を説明することである。アナロジーという言葉は、比例を意味するギリシア語の数学用語「アナロギア (ἀναλογία)」に由来している。ある自然現象の因果関係ないし法則性がわかっている場合、その関係性を未知の現象に適用して表現することができれば、その原因を知覚できなくても現象に説明を与えることができる。アナロジーとは、そのような類推のことである。

作用の研究を進める上で、力学的な原因や構造を仮定するか、あるいはそのような仮定を排除して、実証主義的なアナロジーを利用しながら作用の伝わり方だけを表現するかといった選択は、その研究者の定める目的を反映したものであり、その研究の目的を端的に整理したのが学問の分類についてのさまざまな議論であった。この章では、これらの力学とアナロジーについての論点を踏まえながら、実証主義と学問分類についての分析を進めていきたい。

なお、序章でも述べたが、とくに 2.1 節と 2.2 節のアナロジーの議論はファラデーの電磁気学研究とは関連性が低いように思われるかもしれない。本論文では、ファラデーの研究

びブラック『モデルとメタファー』(Black, *Models and Metaphors*, chap. 13.)などを参照せよ。なお、アナロジーについてはヘッセの研究がよく知られている。ヘッセは、デュエムとキャンベルの議論を踏まえながら、アナロジーにはその対象の性質間の対応関係に応じて「肯定的」「否定的」「中立的」の三種類があると述べている。まず、肯定的アナロジーとは、その性質が相互に対応しており、その関係が両者の共通点になっている場合である。一方、否定的アナロジーとは、その性質が相互に対応しておらず、その関係が両者の相違点となっている場合である。さらに、中立的アナロジーとは、その性質の対応関係が肯定的であるか否定的であるか不明の場合である。この中立的アナロジーは、肯定的アナロジーである可能性があり、したがって研究を進めることで未知の性質の発見につながることを期待される。(Hesse, *Models and Analogies in Science*, 8-9.) さらにヘッセは、アナロジーの用法を「形式的アナロジー (formal analogy)」と「質的アナロジー (material analogy)」に分類している。形式的アナロジーとは、因果関係のアナロジーである。ある対象の性質のあいだの因果関係が何らかの理論に基づいて説明され、その説明がもう一方の対象においても可能であり、その形式が一对一の対応になっている場合、ヘッセはこれを形式的アナロジーと分類する。例えば、流体や熱、電磁気などのふるまいが同じ方程式で記述される場合、これらは形式的アナロジーの関係にある。一方、理論的な関係性については未知であるものの、それぞれの対象の性質を列挙した場合に、それらの性質間に対応関係が予想されることがある。ヘッセはこれを質的アナロジーと分類する。例えばアリストテレスは、音の高さと光の色とを、ある組み合わせが好ましいと感じられることや、過度の明暗や高低が感覚を損なうという経験的な事実から、アナロジーとして考えた。(Hesse, *Models and Analogies in Science*, 42-43, 67-71.) この質的アナロジーは対象の性質の理論的な因果関係や対応関係が不明であるが、だからこそ将来的な発見に結びつく可能性を持っている。ただ、ヘッセの研究ではモデルとアナロジーの区別が曖昧であり、そこに十分に歴史的な分析は加えられていない。その他に、ヘッセは著書『力と場』においても遠隔作用の歴史を論じる上でアナロジーやモデルという考え方をしている。しかし、その対象はギリシア時代の自然思想から現代物理学にまで広範囲に及び、通史を扱っている本論文では、モデルやアナロジーについての議論はあくまで折に触れてその説明として用いられているに過ぎない。(Hesse, *Forces and Fields*.) このようなヘッセの科学哲学的な研究に対して、本論文は、トムソンやマクスウェルが実際にアナロジーやモデルとして分類した複数の実例を比較・分析することにより、あくまで 18-19 世紀の実際の議論や用語に基づいた歴史的な理解を目指している。

を実証主義的であるかどうかという観点から考察したいわけではない。実証主義に関しての本論文の目的は、あくまでトムソンとマクスウェルによるファラデー評価を歴史的に分析することにある。トムソンとマクスウェルは、ファラデーが導入した力線などの概念を、アナロジーやモデルを利用して電磁気学研究を進めていく上で高く評価しており、それについては本論文の第7章以降で詳細に分析を進めていく²。ただし、彼らはフーリエをはじめとするフランスの数学的研究から多くを学んだのであり、各章の歴史的な順序に配慮して、彼らの電磁気学研究を理解するための基礎となるフーリエやコントの議論はこの章で扱っておくことにしたい。

2.1. 実証主義と解析的方法

実証主義とアナロジーについて考察するために、まずは、コントやフーリエの議論を取り上げながら、実証主義という19世紀の新しい研究動向の特徴とその力学との関係について分析していきたい。

実証主義についての体系的な考え方は、コントが1822年に発表した「社会再組織に必要な科学的作業のプラン (Plan des travaux scientifiques nécessaires pour réorganiser la société)」と題する論文によって与えられた³。この論文は、コントの主著である『実証哲学講義 (*Cours de philosophie positive*)』の、文字通り「プラン」となる論文であった⁴。そして「社会再組織」という言葉が端的に示しているように、この論文ではフランス革命によって混迷した社会についての建設的な議論を展開していくためには「観察科学の地位」⁵から学問を再構成する必要があるとして、それまで一般的であった旧体制の封建的思想はもちろん18世紀の啓蒙思想すらも批判的なだけであるとして否定し、実証的な学問としての「社会学 (sociologie)」を新しく立ち上げることを目的としていた⁶。なお、コントは自然哲学そのものにおいて何か新しい研究をおこなったわけではない。それはコントの目的が、同時代

² トムソンやマクスウェルは、実際の議論ではアナロジーやモデルをより限定的に「力学的表現」「力学的モデル」「物理的アナロジー」「力学的説明」といった言葉で表現している。これらの言葉の意味の分析は第7章以降でおこなうとして、第2章ではその議論を理解する上での基礎となるアナロジーやモデルについての当時の理解を分析することを目的としたい。

³ この論文は1822年に、「社会再組織に必要な作業の概要 (Prospectus des travaux nécessaires pour réorganiser la société)」という題名で発表されたが、1824年に「社会再組織に必要な科学的作業のプラン (Plan des travaux scientifiques nécessaires pour réorganiser la société)」と改題され、後に『実証政治学体系 (*Système de politique positive*)』の第4巻 (1854年) に収録された。現在は、一般にこの題名が用いられているため、ここでもそのように記した。なお、本論文での引用は『実証政治学体系』所収の「プラン」を用いている。なお、この1822年は、フーリエが「熱の解析的理論」を出版した年でもある。

⁴ コントはこの論文を発表することで、それまで秘書として働いていたサン＝シモン (Claude H. Saint-Simon 1760-1825) のもとを去り、独自に実証哲学の構築に力を注いでいくことになる。

⁵ Comte, “Plan,” 77.

⁶ Ibid., 56-7. コントは「プラン」でとくにコンドルセ (Marquis de Condorcet, 1743-94) の名前をあげて、コンドルセの時代区分に哲学的な原理がないこと、そして批判的姿勢にとどまっていた実践的でないことを批判している。

の自然哲学の状況を整理し、それに基づいて人間社会の実証的な学問を構築することになったからである。

コントの議論は「三段階の法則」に代表される。この三段階の法則とは、知識の発展段階を「神学的段階」「形而上学的段階」「実証的段階」という三つの段階に分類するものであった。とくに最後の実証的段階では、19世紀までに大きな成功をおさめていた近代自然科学の方法が模範とされ、学問はこの段階に至ることで成熟段階に達すると考えられた。コントは、この実証的段階にある科学の目的について次のように解説している。

実証的段階では、人間精神は絶対的な観念を得ることが不可能であることを知っている。推論と観察をうまく組み合わせて用い、諸現象の法則、いわば継起 (succession) と相似 (similitude) との不変の関係を発見することだけに専念する。そのため、万物 (univers) の起源やその行方を探究することや、それらの諸現象に内在する原因を知ろうとすることは放棄するのである。事実の説明とは、実在についての言葉へと還元されるのであって、もはや今後は多様な個別の現象といくつかの一般的事実とのあいだに存在している結びつき以上のものではない。そして、科学の進歩とは、少しずつその数を減らしていくことを目的としているのである⁷。

このように実証主義の考え方では、自然現象の原因を探究することを放棄し、現象をなるべく少ない法則に還元して説明することが学問上の目的とされた。そして、「説明」のあり方に対する認識そのものに対する変更を迫ったのである。それまでの「説明」では、原因を論じることが不可欠であった。しかし、コントの提案する新しい「説明」のあり方では、原因についての議論は放棄され、その内容が「継起と相似」の関係性を記述することへと限定されたのである。

ここでコントが述べている「原因」には、キリスト教における神学的な第一原因やスコラ哲学における形而上学的な目的因はもちろん、万有引力を生み出している原因なども含まれる。コントは、原因と法則との関係について次のように述べている。

実証哲学の基本的性格とは、すべての現象が不変の自然「法則」に従っているとみなすことである。正確さをもって発見することと、できる限り少ない数に還元することが、私たちのすべての努力の目標である。第一原因であつても目的因であつても、「原因」と称しているようなものを探し求めることはまったく到達不可能なことであり、意味のないことだと考えられる⁸。

コントは物理学について「実際に判断可能であるためには、科学の仮説のすべては現象

⁷ Comte, *Cours de philosophie positive*, 1:4-5.

⁸ *Ibid.*, 1:14.

の法則だけに基づかなければならず、その生成の様式 (modes de production) に基づくものであってはならない」⁹としていた。この現象の「生成の様式」とは、コントにおいて「原因」と並置される概念であり、その作用が原因から生じてくるあり方のことであった。コントは、現象についての議論からその生成原因に対する説明を排除し、さらには作用が生み出される「生成の様式」を想定することも排除して、現象として表れている作用の法則性のみを考察の対象としたのである。

コントは、これらの前提から考察を進めて、科学には「合理的分類 (classification rationelle)」とその「序列 (hiérarchie)」が存在し、それは「数学、天文学、物理学、化学、生理学、社会学」の順序になっているとした¹⁰。なおここで、数学は抽象的数学である「計算」と具体的数学である「幾何学」および「力学」とに分類され、力学は数学の一部と考えられた¹¹。そしてコントは、諸学問がこの序列に則してこの数学的方法によって記述されること、すなわち幾何学的ないし力学的方法に還元されることが理想的であるとした。このことをコントは次のように述べている。

具体的分野は必ず抽象的分野に基づいており、自らは、すべての自然哲学の直接的基礎となる。そして可能な限り、万物のあらゆる現象を幾何学や力学のように考えるのである¹²。

このように、コントは幾何学や力学を学問全体の模範的な方法とした。そして、その代表的事例としてニュートンやガリレオ (Galileo Galilei, 1564-1642) の研究をあげていた。例えばニュートンの万有引力の法則は、その力がなぜはたらくのかを教えてくれるものではないが、コントによると、そもそも原因を明らかにすることは不可能であることが前提になっていたため、そのことは問題視されなかった。膨大な現象を統一的に表現する不変の法則が与えられた時点で、「万物の一般現象が「説明 (expliqués)」された」¹³とみなされたのである。

しかし、このようにニュートンやガリレオの方法を実証哲学の模範的な方法として位置づけると、実証主義を19世紀初頭に固有の傾向として評価することは難しくなるだろう。ニュートンの研究を実証主義の代表とすると、ラプラスやポアソンなどの分子論も実証主義に含まれることになり、「力学的＝分子論的」方法と「分析的＝実証主義的」方法との対照性が不鮮明になってしまう¹⁴。分子論は力学的な想像上のモデルであり、コントの言う

⁹ Ibid., 2:454.

¹⁰ Ibid., 1:115.

¹¹ Ibid., 1:112-3.

¹² Ibid., 1:113

¹³ Ibid., 1:15.

¹⁴ Friedman, "Creation of a New Science," 89-91. フリードマンは、ピオの例をあげて、彼が第一原因などの探究を放棄し、分子論的な説明を導入するにしても、あくまで現象の法則性を求めることを目的としていたことを指摘する。ピオの研究を実証主義的だとすると、実証主義という観点だけではフーリエとの違いを評価できないことになる。

ところの「生成の様式」を考察するためのものであるから、実証主義的とは言えないのではないだろうか。遠隔作用説の議論を具体例にとると、原因として分子を仮定することも、原因から万有引力のような中心力として力が及ぼされていると仮定することも、どちらも議論からは排除すべきだということになるはずである。

ただし、コント自身は、ラプラスの分子論を天文学と化学とを統一的に理解するための試みとして評価しており、これらの二つの方法論の違いをはっきりと意識していたわけではなかった¹⁵。すなわち、コントは19世紀初頭のフランスで起こりつつあった物理学の研究方法の変化に対して自覚的であったわけではなく、あくまで数学的な法則の有無が、彼の実証哲学の端的な判断基準となっていたと言える。

しかし、本人がはっきりと意識していなかったにせよ、コントの議論には「力学的＝分子論的」方法から「分析的＝実証主義的」方法へと移行する方法論的な変化の契機を見出すことができる。そのような契機は、フーリエに対するコントの評価の中により顕著な形で認めることができる。本論文でもフーリエを実証主義の代表者と位置づけているが、コントもまた、実証哲学の代表者としてニュートンやガリレオの名前をあげる一方で、同時代における実証哲学の最も顕著な例として、フーリエの熱の研究をあげていた¹⁶。

現代の研究の中で、今、ただ一つ引用するとすれば、私はフーリエ氏の熱の理論についてのすばらしい一連の研究を選ぶであろう。それは、これまで注記してきたこと全般についての極めてはっきりとした証明を、私たちに与えてくれている¹⁷。

ここでコントが述べているフーリエの場合の「証明」とは、フーリエが、カロリックやエーテルなどを仮定して「熱の本質 (nature intime)」を問うようなことをせずに、熱という現象の法則のみを与えたことであった¹⁸。このコントの評価を裏付けるように、フーリエ自身も「熱の解析的理論」の序論の冒頭において、研究の目的が原因についての知識を得ることではなく、それが従っている法則を見つけることにあることを明記している。

第一原因は我々にはまったく知られていない。しかしそれは観察によって発見できる単純かつ一定の法則に従っているのである。そして、その研究こそが自然哲学の目的なのである¹⁹。

すなわち、フーリエもまた、自然現象の原因を知ろうとする姿勢が想像上の物質やモデ

¹⁵ Comte, *Cours de philosophie positive*, 1:53-5.

¹⁶ コントは、『実証哲学講義』を親交のあった動物学者ブランヴィル (Henri Marie Ducrotay de Blainville, 1777-1850) とともにフーリエに捧げている。この二人は、コントの講義の出席者でもあった。(Herivel, *Joseph Fourier*, 227. や、清水『オーギュスト・コント』126. など)

¹⁷ Comte, *Cours de philosophie positive*, 1:16-7. なお、コントは中退したもののエコール・ポリテクニクで学び、フーリエはそのエコール・ポリテクニクの教師であった。

¹⁸ *Ibid.*, 17.

¹⁹ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, i.

ルを仮定する実証性の低い議論につながっていると考えていた。そのため、原因の探究を放棄して、現象における可感な作用についての法則性を見出すことに研究の目的を限定しようとしたのである。この研究方針は、コントの主張していた典型的な実証哲学の研究方針と同じである。

その一方で、力学に対するコントとフーリエの位置づけは異なっていた。コントは実証哲学の代表的な方法として力学をあげていたが、フーリエは「熱の解析的理論」の序論で熱の現象と力学的現象とを明確に区別していた。

力学的理論の範囲がどれほどのものであろうと、熱の効果には決して適用できない。その効果は、運動やつり合いの原理では説明することができないような現象の特殊な秩序を構成しているのである²⁰。

ここでフーリエにとっての力学とは、アルキメデス (Archimēdēs, 287-212 BCE) からガリレオに至るつり合いの原理や運動の法則についての研究と、それを全宇宙の万物に対して体系的に拡張したニュートンの研究のことであった²¹。そうすると、フーリエが適用できないと考えていた力学的な理論とは、まさにコントが模範的と位置づけていた研究ということになる。

ここでフーリエが力学に還元できないと考えていた「熱の効果」とは、物体によって異なる「熱を保持したり、表面を横切って受け取ったり譲り渡したり、そして物質の内部で伝えたりする能力」²²のことであった。確かに「熱を保持」するような性質はニュートン力学に還元することは難しいかもしれないが、このように力学を否定するような態度は当時の物理学研究においては珍しいものであった。

科学史家のヘリヴェルは、力学的理論の範囲を限定するフーリエの記述を「序論の中で最も謎めいた言説」であるとした上で、技術的側面と思想的側面の二つの側面からの説明を与えている²³。

まず、ヘリヴェルは技術的側面からの説明として、熱の方程式が当時の既知の力学的理論とは異なる形式を持っていたという理由をあげている。フーリエは「熱の解析的理論」において、均質な固体内の温度分布を、温度 v 、熱伝導率 K 、熱容量 C 、密度 D として次の (2.1) 式として与えている²⁴。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K}{C \cdot D} \left(\frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} + \frac{d^2v}{dz^2} \right) \quad (2.1)$$

²⁰ Ibid., ii-iii.

²¹ Ibid., i-ii.

²² Ibid., iii-iv.

²³ Herivel, *Joseph Fourier*, 226.

²⁴ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 135.

このフーリエの熱の拡散方程式は、空間については波動方程式と同じように二階の偏微分で表されるが、時間については一階の偏微分になっている。この形式の方程式は、当時の力学で扱われていた理論や現象では知られていないものであった。そのため、フーリエは熱と力学とを区別したのだと判断することができる。

一方、ヘリヴェルは、思想的側面からの説明として、フーリエが「熱の解析的理論」の研究に取り組んでいた1805年頃から1822年頃にかけて影響力のあったラプラスの方法、とくに、そのラプラスが目にかけていたビオ (Jean-Baptiste Biot, 1774-1862) の「力学的=分子論的」な熱伝導研究との差別化をはかったという理由をあげている²⁵。熱については、カロリックの存在を仮定する熱物質説であれ、それを仮定しない熱運動説であれ、フーリエ以前は物体中にはたらく斥力を前提として理論が組み立てられていた。しかし、フーリエはビオのように熱の斥力を考えずに、熱を自由運動する流体として扱った。そして、これらの考え方の違いによって、フーリエの研究はラプラスやラグランジュらによって厳しく批判されることになった²⁶。このような経緯から、フーリエはこの引用した記述によって、自分の熱伝導現象の研究がラプラスを中心とする「力学的=分子論的」研究とは異なることを明示しようとしたとも考えられる。

なお、ヘリヴェルは、コントの光学についての考察を引用しながら、コントとフーリエが、現象の本質と法則との「分離主義」的な態度を共有している点も指摘している²⁷。コントは、光の現象が力学的な因果関係ではなく、幾何学的な図式によって説明づけられると主張していた。

真に合理的な物理学者は、それゆえ今後はいかなる科学的空想によっても、光の現象を運動の現象に結びつけることをその根本的な異種性に鑑みて慎まなければならない。現状において光学が数学を含んでいるということはすべて、実際のところ、力学ではなく幾何学によっているのである²⁸。

ただ、このようにコントが光学を力学ではなく幾何学によって論じるべきであると考えていたとしても、フーリエは熱の現象を幾何学的な図式によって論じようとしていたわけ

²⁵ Herivel, *Joseph Fourier*, 226-8.

²⁶ Ibid., 100-103, 149-191; Wise “Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I,” 1981, 28. まず、1807年に論文の要旨をフランス学士院に提出した段階でラグランジュ、ラプラス、モンジュ、ラクロワによって審査され、さらに1810年に懸賞論文として提出した段階で、ラグランジュ、ラプラス、ルジャンドル、マリユス、アユイ (René-Just Haüy, 1743-1822) によって審査された。その審査結果によると、研究の重要性は認められて章も与えられたものの、級数展開など方程式の導出過程に問題があり、一般性や厳密性に欠ける場所があると評価された。フーリエは境界において温度が不連続になることを認めていた。フーリエは、それを数学的な境界条件として扱い、さらに熱源なども物理的実体というよりも境界条件として扱ったのである。しかし、ラプラスやポアソンにとって温度とはカロリックの密度であったので、それが不連続になるということは容認しがたいことであった。

²⁷ Herivel, *Joseph Fourier*, 227-8.

²⁸ Comte, *Cours de philosophie positive*, 2:649-50. なお、ここでコントは、ニュートンによる光の粒子説に対する批判を意図していたわけではないと考えられる。

ではない。すなわち、コントの実証哲学がその模範的な方法として幾何学と力学という選択肢を持っていたとしても、フーリエの方法はそのどちらとも「根本的な異種性」を持っていたと言える。

しかし、前述のようにコントについても、その現象が力学的であるか幾何学的であるかの区別はあるにせよ、それは同じ数学という序列が上の階層へと還元することを意味していたのであり、数学的方法を踏まえていれば、どのような学説を構築するかは分野によって異なると考えていたと解釈できる。コントの想定していた「法則」そのものは、先の引用にあったように「継起と相似との不変の関係」であり、必ずしも幾何学的な図式ないし力学的な運動や力に限定されるものではない。この継起の法則とは、ヒュームの恒常的連接に相当するものであり、時間的かつ空間的に連続する二つの事象を結びつける法則のことである。前述のように、幾何学と力学をともに数学に分類していたことからわかるように、コントが幾何学や力学に求めたものは、力や運動に還元することではなく、対象を数学的に妥当な方法で取り扱うことができる可能性であったと言える。数学は、現象の関係を厳密に表現するための理想的な方法であり、まずは、それが統一的に用いられていることが求められたのである。

コントは、この数学的方法と学問分野との関係を、方法の統一性と学説の同質性として次のように述べている。

明らかに存在するはずであって多くの部分ではすでに立証されている方法の統一性 (unité) を除いて、不可欠な統一性というものはない。学説 (doctrine) については、それは一つである必要はなく、同質 (homogène) であれば十分である。そのため、この講義で私たちは、方法の統一性と学説の同質性という二つの観点において、実証的理論の異なる分類について考察する²⁹。

すなわち、コントの実証哲学においては、学問の諸分野において実証哲学に基づく方法の統一性を確保し、それによってそれぞれの学問分野に全体的な同質性をもたらすことが目的とされたのである。ここでコントが用いている同質性という言葉には、あらゆる自然現象を統一的な原理や法則に帰することは空想的であるとしても、異なる現象に対してもその研究方法には統一性を見出そうとする方針が反映されており、それが実証哲学の目的そのものに他ならなかった³⁰。

このように実証主義では、分野間に方法の統一性を見出すことができれば、そこで与えられる学説間には形式の同質性以上のものを求めず、その現象の原因を問わないという立場が取られた。この立場は、力学還元的な自然観に依存しないような内容へと研究の方向性を変化させることを促す一方で、それぞれの物理現象の法則の同質性に一層の注目を集

²⁹ Ibid., 1:55.

³⁰ Ibid., 1:53.

めさせることになった。そして、このような傾向が、結果的に力学的な表現のあり方を相対化し、力学的な現象にこだわらず、それ以外の物理現象のあいだでのアナロジーを積極的に想定していく可能性を開いていったのである。そこで次節では、このアナロジーという論点について、さらに踏み込んだ議論を進めておきたい。

2.2. 感覚を補う方法としての数学的アナロジー

物理現象を力学的に説明しようとする、ニュートン力学が基礎となるため、機械的な構造物や中心力を持つ分子などが作用の原因として想定された。これに対して実証主義の立場では、物理現象の原因そのものを議論の対象から排除し、あくまで測定可能な範囲において、その現象の要素が満たしている数学的な関係性ないし法則性だけを議論の対象としようとした。すなわち実証主義においては、コントにおいてどれほど意識されていたかは不確かではあるが、フーリエにおいては明確に意識されていたように、あらゆる自然現象を力学と幾何学だけに還元しようとする姿勢への批判が内包されていた。そのため、作用の原因が可感ではない現象を研究する場合に実証主義の立場をとることが、原因を仮定する力学的なモデルを導入することから、原因そのものを問わない、法則的な関係性についてのアナロジーを想定することへと、研究方法を転換させていく契機になったのである。

もっとも、このようにアナロジーが実証主義の要求を満たすと言っても、実際にその方法の活用が積極的に進められていったのは19世紀半ば以降のイギリスにおいてであり、熱と電磁気などのアナロジーを通じてであった。その代表となるのがトムソンやマクスウェルのアナロジーを活用した電磁気学研究であり、彼らの研究については第7章と第8章で詳しく論じる。それに対して、19世紀初頭では、物理学における実証主義的な研究はまだ始まったばかりであり、力学以外のアナロジーといっても具体例はそれほど多くは存在していなかった。しかし、方法論的な理念として、アナロジーの有効性に対する確信が着実に形成されつつあったと考えられる。そして、そのような確信には、18世紀後半のフランスで考察が進められていった記号論的な認識論が少なからず影響していた可能性がある。そこで、この節では、トムソンとマクスウェルの議論を分析していくための準備として、このフランスにおけるアナロジーに関する議論をもう少し深く分析しておきたい。

実証主義の目的とは、観察結果をただ表現するだけでなく、自然現象の中に数学的な法則性を見出すことである。しかし、自然現象の細部まで観察しようとしても感覚には限界があるため、それを補うための方法が必要になる。コントは観察に推論を組み合わせることの必要性を主張していたが、その推論とは、ポアソンにおいてはニュートン力学的な中心力を備えた分子モデルであり、フーリエにおいては数学的解析であった。

数学的解析と感覚との関係について、フーリエは「数学的解析は観察をしのいでおり、われわれの感覚を補って、いわば物体内部の熱の規則的な運動や調和についての証言を与

えてくれるのだ」³¹と述べている。感覚の能力には限界があり、必要な情報のすべてを観察によって得ることはできない以上、何らかの推論によってそれを補う必要があった。それがフーリエにとっては数学的解析であり、それによって明らかになる数学的な形式のアナロジーであった。

フーリエは、数学的解析の有効性について次のように述べている。

その第一の特徴は明らかである。それは、曖昧な概念を表す記号をまったく持っていないのだ。それは、この上なく多様な複数の現象を近づけ、それらを結びつける隠れたアナロジーをあらわにするのだ³²。

ここで、フーリエはアナロジーの例として、大気中の光の運動と固体中の熱の拡散、そして確率論の主要な問題とのあいだに、それぞれ同一の数学的な法則が成り立つことをあげている³³。すなわち、数学的解析においては数学的な記号のみによって議論が組み立てられるため、記号間の関係に厳密な論理性を確保することができる。そして、この論理性は、記号間の関係だけに依存するものであり、記号の意味内容に依存するわけではない。そのため、物理的には異なる現象を対象としていても、それぞれの現象の測定可能な構成要素が満たしている関係については、アナロジーによって対応づけられる可能性が出てくる。そうすると、ある分野の研究によって得られた成果（法則性についての表現）を別の分野の現象へと応用することにより、その異なる分野の研究も進めることができるようになる。

このようなアナロジーについての理解は、19世紀初頭のフランスではある程度共有されていたものであり、その考え方は18世紀後半のフランスの哲学者コンディヤック (Etienne Bonno de Condillac, 1714-80) の記号論的な認識論によって基礎づけられていたと考えられる³⁴。

コンディヤックの考え方の基本は、記号のはたらきに注目することである。事物の分析 (analyse: 解析) を進めるにあたって、「分析は記号をともなつてしかなされぬし、なされぬのである」³⁵ことが彼の議論の基本的な前提となっていた。これは、コンディヤックが、事物の実体そのものは感覚で把握できるわけではなく、事物の観念、すなわちそれを表す記号こそが知識の本質であると考えていたためである。コンディヤックは、事物の実体と観念との関係を次のように述べている。

³¹ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 15.

³² *Ibid.*, xiv.

³³ *Ibid.*, xiii.

³⁴ フリードマンは、この時期のフランスにおける実証主義的研究の特徴が単純な「ニュートン主義」ではとらえられないとして、その特徴を知るためにコンディヤックの思想をあげている。(Friedman, "Creation of a New Science," 89-97.) なおフリードマンは、19世紀後半に科学技術の工業への応用が進むにつれて、フーリエのような解析の方法の実践的な方法としての需要が、専門的な技術者たちのあいだで高まっていたことも指摘している。(Friedman, "Creation of a New Science," 98-9.)

³⁵ Condillac, *Logique*, 95.

私たちの感覚とは、感覚対象について私たちが持っている諸観念に過ぎないものであるから、私たちは、それが表現していることをそこに見ているに過ぎないのである。それ以上、私たちは何も見出すことはないし、したがって何も知りえないのである。物質の実体は何か、その性質とは何か、その本質は何か、といったことをたずねる人にする返答は、それゆえ何もないのである。私たちはその実体、その性質、その本質を見ていないのである。まさに空しく、それを見出そうとしているのである³⁶。

すなわちコンディヤックによると、ものごとの実体は可感ではないため、人間の知識を構成しているものは、感覚対象を表現するための諸観念を形成している記号そのものに過ぎないとされた。その記号によって表現される観念のみが、自然現象について得られる知識のすべてだと考えられたのである。

このコンディヤックの議論は、第 1.2 節でも論じたロックの認識論を独自に発展させたものであり、代表的な科学基礎論として 18 世紀末から 19 世紀初頭のフランスで広く受容された³⁷。例えば、化学の分野ではラヴォアジエなどにも大きな影響を与えていたことが指摘されている³⁸。そしてフーリエが所属していたことのあるエコール・ノルマル (École Normale Supérieure) でも、このコンディヤックの認識論がその教授であったモンジュ (Gaspard Monge, 1746-1818) やラグランジュによって解析学の教育に取り入れられており、彼らの下で助講師をしていたフーリエにも影響を与えたと考えられている³⁹。また、フーリエがコレージュ・モンテギユ (Collège de Montaigu) に入学した 1786 年頃にコンディヤックの思想を学んだ可能性が高いことも指摘されている⁴⁰。

このコンディヤックの考え方は、物質についての観念を対象としているが、自然現象の法則性も見据えたものであり、実証主義の立場を認識論的に正当化する根拠を与えるものであった。すなわち、記号そのものが知識の本質であると考えれば、前述のフーリエの議論にあったように、記号の関係 (法則性) が自然現象について人間の得られる知識の限界となるため、対象を分析 (解析) して、その関係性を (できれば数学的に) 表現することが研究の目的になる。コンディヤックは、この分析という方法を、対象を要素に分解し、それを再構成してその要素間の関係性を見出すための手段として位置づけている。コンディヤックは、この分析の目的について次のように述べている。

私たちは、再構成するために分解しているに過ぎない。知識が得られるとき、それら

³⁶ Ibid., 37.

³⁷ ヒューエルは、コンディヤックについてロックの議論から感覚によって議論を発展しているとして紹介し、コンディヤックが言語を主題としている点に注目して、科学のほとんどの発見において、専門用語の選定がその前進には不可欠であると述べている。(Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:302.) この専門用語についての考え方は、ファラデーとも共有されていた。

³⁸ Albury, *Logic of Condillac*, 25-6. ただ、アルバリーは、ラヴォアジエなど化学との関係については細かく論じているが、物理学との関係についてはほとんど論じていない。

³⁹ Albury, *Logic of Condillac*, 26-7; Friedman, "Creation of a New Science," 93-4.

⁴⁰ Herivel, *Joseph Fourier*, 224-5.

の事物は、それらが外界で持つと同じように精神の中で、継起的であるところ同時的な秩序を持つのである。私たちが事物について持っている知識を構成するのは、この同時的な秩序においてである。もし私たちがそれらを一緒に語ることができなければ、それらのあいだにある関係を判断することは決してできないだろうし、不適切にしか知りえないであろう⁴¹。

すなわち、時間変化をともなう動的な物理現象は、分析によってその現象を表現するための記号の要素へと分解され、その後同時にないし法則へと再構成されて、それによって人間にも認識可能になると考えられた。このように、現象に法則性を見出すために要素へと分解してそれらを記号化（言語化）することが、分析の目的であると規定されたのである。

そして、コンディヤックにとっての物理学の目的とは、その記号間の法則性を体系的に把握することであった⁴²。コンディヤックは物理学の目的を次のように説明している。

「現象」によって、事実は自然の一連の諸法則としてきちんと解釈される。これらの法則は、それ自身、事実と同等のものである。物理学の目的は、これらの現象、法則、そしてもし可能であれば、その体系を把握することである。

そのため、私たちは現象に対してある特定の注意を向けるのである。それらをあらゆる関係（*rapport*）において考察し、どんな状態も見逃すことなく、そして観察によってそれがよく確認されたときに、それらに改めて「観察結果（*observations*）」という名が与えられるのである⁴³。

このように、物理学の目的とは感覚対象としての自然現象を、それを構成する記号の法則性を見出すことによって体系的に把握・表現することであり、現象の観察もそのような意図を持ってなされるものであった。

ここでコンディヤックが述べているように、現象の要素を分析して記号化し、それらの記号間の「関係（*rapport*: 比率）」について考察する過程では、アナロジーが有効な手段となる。アナロジーとは、まさに「関係／比率」の対応関係によって推論していくための方法だからである。コンディヤックは、まずは通常の言語について、観念を認識する過程でのアナロジーの重要性を次のような根拠によって説明している。

⁴¹ Condillac, *Logique*, 19.

⁴² 物体の運動についても、コンディヤックは「私が、空間、時間、運動、そしてそれを生み出す力を測定すれば、その測定の結果は関係でしかない。なぜなら関係を求めるのも測定するのも同じことだからである」（*Ibid.*, 40.）として、力が生み出す運動の時間的ないし空間的な「関係」を測定することこそが力学の目的であると述べている。

⁴³ *Ibid.*, 143-4. 括弧による表現は著者による。すなわち、原文の *rapport* は、「関係」と「比率」との両方の意味を持つ。

観念の生成やその精神の能力 (*facultés de l'ame*) は、この言語というものにおいて可感となり、そこでは言葉の第一の意味がわかれば、そのアナロジーが他のすべての意味を与えるであろう。感覚ではとらえられない観念の名称には、それらが由来する可感な観念と同じ名称を見出す。それをこの観念に固有の名称であるかのように見るのではなく、その起源を明らかにする比喩的表現のように見るのである⁴⁴。

すなわち、感覚では把握できない抽象的な観念は、可感な事物とのアナロジーによって言葉が与えられて表現され、意味づけがなされていく。このように、感覚できないものを知識化する手段として、アナロジーは極めて重要な手段と考えられたのである。そして、観念は言葉によって把握されるのであるから、推論は観念の関係性を表す言葉の分類とそのアナロジーによって進められることになる。コンディヤックは、この分類とアナロジーとの関係を次のように述べている。

推論の技術が一つよくできた言語に帰するということは、私たちの観念の秩序が、それ自身、類 (*genres*) と種 (*especies*) で与えられた名称のあいだの従属関係に過ぎないからである。私たちが新しい観念を持つということは、新しい分類を作ることによって他ならないので、私たちがまさに分類を規定する限りにおいて観念を規定しているに他ならないということは明らかである。アナロジーが語彙能力と同じように判断力においても私たちを導いてくれるので、私たちはうまく推論しているのである⁴⁵。

すなわち、まずは観念を分析すると単純な観念が得られ、それらの単純観念の関係性をさまざまな対象についてアナロジーによって整理することで共通要素を見出すことができると考えられた⁴⁶。そして、それらの共通要素を抽象化して類や種として分類することで、新しい観念が得られることになる。

このように、コンディヤックにとっての認識とは、類や種において観念の分類を形成することであり、それらを対象としたアナロジーによる推論を繰り返しながら、その対象を表現している記号を適切に扱うことに他ならなかった⁴⁷。そして、このような観念の分類は言葉によっておこなわれるため、その言葉を体系的に分類するためのアナロジーこそが新しい観念を形成していくための重要な手段とされたのである。

コンディヤックは、このように一般的な言語に対しては分類のアナロジーを考えていたが、物理現象を対象とする場合には時間変化をとまなう因果関係のアナロジーを考えてい

⁴⁴ Ibid., 102.

⁴⁵ Ibid., 108. コンディヤックはこの類と種の関係について次のように述べている。「私たちは名を個別のものとして想定することはしていない。私たちが特有の名で区別している異なる分類に、その個別性を割り振っただけであり、この分類は、「類」や「種」と名づけられている。」(Ibid., 29.) なお、原文でも *especies* にはアクセント記号は付けられていない。

⁴⁶ 山口『コンディヤックの思想』63-4.

⁴⁷ Ibid., 94.

た。この因果関係のアナロジーは、単なる分類のためのアナロジーとは異なり、フーリエが述べていた数学的解析のアナロジーに近いものであった⁴⁸。そして、コンディヤックにとって、この因果関係のアナロジーは最も有効なアナロジーとして位置づけられていた。

結果に対する原因、あるいは原因に対する結果の関係に基づくアナロジーは、最も有力なアナロジーである。それは、すべての状況を合わせて確証されるときに、まさに証明と同じものになる⁴⁹。

そして、この「原因」の中でも、コンディヤックはとくに物体の運動についての原因を「力」と規定していた⁵⁰。物体の運動の継起についての因果関係そのものは、数学的解析によって同時的な関係へと再構成され、力学的な法則として表現されることで認識可能となる。そして、この結果として得られた現象の法則性が、他の自然現象を考察していくためのアナロジーとして利用されていく。これがコンディヤックの考える数学的解析とアナロジーとの関係であった。そして、そもそも前述のように、人間は記号化された観念とその関係以上のことを知りえないと考えられていたのであるから、アナロジーという方法は、推論における本質的に重要な方法として理解されたのである。

ここでコンディヤックは、物理現象に対して力学的な因果関係だけを想定していた。このように力学のみを想定していることは、このコンディヤックの議論が18世紀になされたものであることを考えると当然とも言える。もちろん幾何学的な関係は知られていたが、それは因果関係ではない。

しかし19世紀になると、力学的な因果関係だけでは現象を十分に説明することは困難になっていった。そしてフーリエは、力学的な因果関係を想定することは避けながら、コンディヤックと同様の考え方を熱伝導現象へと応用していったのである。

前述のようにフーリエは、ビオなどがおこなったように熱伝導を物質的な原因からの斥力として扱うのではなく、熱源とは独立な自由運動として偏微分方程式によって表現できると考えていた。フーリエは、熱現象が微分的に表現されうることを次のように述べている。

一般に熱は、微分的秩序 (*un ordre différent*) を持った物理的諸問題に共通するように、ある偏微分方程式で表現される単純な法則に従って、固体内部において自分自身を分配するのだ⁵¹。

⁴⁸ コンディヤックにとっての数学的解析の方法とは、代数学を用いた方法であった。

⁴⁹ Condillac, *Logique*, 146.

⁵⁰ 「力」について、コンディヤックは次のように述べている。「物体の運動とは結果であり、それゆえ原因を持っている。この原因が存在することは、疑う余地がない。私たちのいかなる感覚もそれを認めさせえないのであるが、私はそれを「力」と名づける」(Condillac, *Logique*, 39-40.)

⁵¹ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 16.

そして、このように熱現象を表現するために偏微分方程式を利用するとき、他にも同じような形式の偏微分方程式によって表現された既知の物理現象が存在するならば、それらの現象のあいだには数学的なアナロジーが成立する可能性がある。とくに、フーリエは、この「微分的秩序」がさまざまな物理現象に普遍的に備わっている関係であると考えていた。そうすると、それぞれの現象のあいだに微分方程式による数学的なアナロジーが成り立つ可能性も極めて高いものになる。フーリエは、この微分的な関係の普遍性を次のように述べている。

弾性媒質の振動、曲線や曲面の性質、天体の運動、光や流体の運動では、一般的解析をおこなうと、その結果や基本的な要素のすべてが同じであることがわかる。このように、無限級数展開と方程式の数値解法に用いられる連続的な微分によって得られる関数は、物理的性質にも対応しているのだ。これらの関数の一階微分、いわゆる流率は、幾何学においては曲線の接線の傾きを表し、動力学においては運動が変化していくときの運動体の速さを表す。そして、熱の理論においては、ある面を通して物体の各点に流れる量を定めている。したがって数学的解析は、可感な現象と必然的な関係にあるのである。その対象は決して人間の頭によって作り出されたものではなく、古来より存在していた万物の秩序 (*ordre universel*) の一要素なのであり、偶然や運などではないのである。それは自然にあまねく刻み込まれているものなのである⁵²。

このように、微分方程式によって表現される数学的な関係は、さまざまな現象に対して適用可能であると考えられた。熱や電気、磁気など 18 世紀から 19 世紀初頭にかけて研究が進んだ物理現象においては、その原因は可感ではなく、観察できる現象の範囲は限られていた。そのため、その現象は簡単に説明が与えられるものではなく、観察結果から「単純かつ一定の法則」を抽出していくためには、数学的解析による補助とアナロジーによる推論が必要とされたのである。

フーリエの研究に対する考え方は、コントの実証哲学と必ずしも一致するものではなかった。例えば、フーリエは熱の研究を力学や幾何学とは区別しており、このような区別はコントには見られなかったことである。また、コントの主張するような観察の優位性も、フーリエにおいては絶対ではなかった。フーリエは、「数学的解析が観察をしのいでいる」⁵³と考えていたからである。そして、このようなフーリエの考え方の傾向は、コントよりもコンディヤックの記号論的な認識論により近いものであった。

その一方で、コントにせよ、コンディヤックにせよ、それらの議論には関係のアナロジーを用いることでさまざまな物理現象へと研究を拡張していく方向性が内在されていた。もっとも、この両者がアナロジーとして想定していた形式は、18 世紀の自然哲学で模範的

⁵² Ibid., 16-7.

⁵³ Ibid., 15.

な方法とされた力学ないし幾何学な形式に限定されたものであった。そのため、彼らの研究方法は「力学的＝分子論的」な研究と十分に差別化されたものではなかったし、差別化しようという意識もなかったであろう。しかし、19世紀初頭において、新しい数学的方法が導入されなければ十分に表現できない物理現象に直面していったときに、そこに何らかの原因を想定して説明を与える方法には限界が生じるようになり、作用のあり方をより詳細に分析して表現するための新しい方法が求められたのである。このようにして、フーリエの「分析的＝実証主義的」方法の新しさが、次第に社会的にも認知されるようになっていった。

もともと、フーリエ自身は熱伝導の研究を他分野の研究に応用することはなかったため、実証主義的なアナロジーという方法を十分に活用することはなかった。そして、このような活用が進んだのは、イギリスの電磁気学研究においてであった。ただし、イギリスにおいては、実証主義的なアナロジーを重視する一方で、現象を説明するために力学的モデルを求める傾向も存在していた。そのため、19世紀中葉のイギリスにおけるアナロジーと力学的モデルの関係を、ここまでに論じてきた18世紀から19世紀初頭のフランスの場合と同じように理解することはできない。しかし、トムソンやマクスウェルの電磁気学研究に対してフランスで発展した研究方法が及ぼした影響を分析すれば、現象の「表現」と「説明」に対する認識の違いとして、このイギリスとフランスとで異なっている傾向についても理解することができるだろう。

このようにイギリスで活用されていったアナロジーや力学的モデルの特徴については第7章以降で改めて論じることにして、次節では、これまでに論じてきた研究方法についての理解を深めるために、当時の学問の分類についての議論を、とくに力学的方法との関係において整理しておきたい。

2.3. 学問の分類と力学

前節までで、新しい物理現象を実証主義的な方法で研究していく上では、アナロジーが重要な方法だと考えられていたことがわかった。アナロジーとは、何らかの異なる現象のあいだに共通性を見出し、それを関係性や法則性がわかっている既知の現象から未知の現象へと適用していくことで、未知の現象を説明しようとする方法であった。このように異なる現象のあいだに関連性を見出していくためには、その学問的な分野についての理解ないし学問全体の分類についての理解のあり方が大きく影響してくることになるだろう。そこでこの節では、とくにこれまで大きな論点の一つとなってきた力学的方法の位置づけに注目しながら、学問分類と研究方法との関係について分析しておきたい。

近代的な学問分類は、イギリスの司法官であったフランシス・ベーコン（Francis Bacon, 1561-1626）の分類方法に始まる。ベーコン以前の学問分類は、基本的にアリストテレス

(Aristotelēs, 384-322 BCE) の分類を発展させたものであった。アリストテレスは『形而上学 (Metaphysica)』において「学問 (epistēmē)」と「技術 (technē)」とを区別し、学問を理論的学 (theōrētikē) と実践的学 (praktikē)、および制作的学 (poiētikē) に区別し、さらに理論的学を自然学、数学、神学に区別した。もっとも、このアリストテレスの区別は分類といえるような体系的な基準によってなされたものではなかった。なお、アリストテレスは、自然学を質料と形相についての運動の学であると規定している⁵⁴。このような自然学の理解は、二次性質を可感ではない微小領域で生じている運動によるものであるとみなす考え方として、ニュートンからコモン・センス学派、そしてファラデーへと広く受け継がれていった。この経緯は1.2節で論じた通りであるし、ファラデーについては、3.2節で改めて論じることとする。

中世以降のヨーロッパでは、これら古代ギリシアの議論を踏まえながら知識の順序、区別、それぞれの領域についての議論が展開された。一般的には、専門としての法学、医学、神学とともに、文法学、修辞学、弁証学の三学と、数学、幾何学、音楽、天文学という四科からなる自由学芸が設定されていた。しかし、これらも分類というよりは区別であり、やはりそれぞれの知識の体系性が十分に意識されていたわけではなかった。

これに対して、ベーコンは知識の体系性を十分に意識しながら学問の分類を進めた。例えば、数学的公理などを普遍的知識として「第一哲学」とし、それを支脈である他の諸知識が集まる幹として位置づけた。そして、知性のはたらきを記憶・想像・理性の三種類に分類し、その分類に対応させる形で知識を歴史・詩・哲学の三種類に分類した。さらに、哲学の中でも自然哲学を、因果関係を扱う理論的な分野と、何らかの効果を生み出す操作的な分野とに分類した。この操作的という分類は、職人的伝統における操作的な知識観をベーコンが重視していたことを反映したものである。なお、因果関係についてはアリストテレスにならって四種類の原因が考えられ、理論的な分野は、質料因と作用因を扱う自然学と、形相因と目的因を扱う形而上学とに分類され、操作的な分野は、自然学の実験的研究から得られる機械学と、隠れた性質を対象とする「魔術 (Magick)」とに分類された⁵⁵。

18世紀後半になると、ディドロ (Denis Diderot, 1713-84) とダランベール (Jean Le Rond d'Alembert, 1717-83) の編集により、このベーコンの学問観とロックの経験論とを踏まえた『百科全書 (Encyclopédie)』がフランスで出版された。そして、この『百科全書』のとくにダランベールの執筆した「序論 (Discours préliminaire des éditeurs)」が、諸科学の関連性や階層性といった考え方の基本となり、後述するヒューエルの学問観にも影響を及ぼしていった⁵⁶。

この「序論」では、ベーコンの記憶・想像・理性の分類に対応して、しかし想像と理性の順序が入れ替えられて、学問が記憶 (歴史)・理性 (哲学)・想像 (芸術) の三種類に分類された。そして、哲学の筆頭には一般形而上学と存在論があげられ、形而上学と数学は、

⁵⁴ アリストテレス『形而上学』などを参照せよ。

⁵⁵ Kusukawa, "Bacon's Classification of Knowledge," 48-59.

⁵⁶ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:303.

理性の分野の中では最も想像の関与する分野であるとされた。この数学には、幾何学などの純粋数学の他に、混合数学としての力学や天文学、光学なども含まれた。また、物理学（自然学）は、一般物理学（*physique générale*）と特殊物理学（*physique particulière*）とに区別されていた。なお、ここで混合数学と一般物理学との違いとしては、前者が定量的測定を目的とする分野であり、後者が物体の形而上学的思索をおこなう分野であるとされた⁵⁷。

このように、18世紀フランスでは、物理学は一般物理学と特殊物理学に区別されており、前者はすべての物体に関係すること、すなわち延長や不可入性、可動性、慣性、重力などについて、後者は物体の性質や効果、すなわち硬度、不透明度、磁気などについて、それぞれ研究する分野であるとされた。あるいは前者はニュートンの『プリンキピア』の数学的・力学的伝統に属し、後者は『光学』の仮説的・実験的伝統に属すものであったとも言える。なお、当初は化学や博物学も特殊物理学に含まれており、パリの科学アカデミーでは、物理学の分野に化学、鉱物学、解剖学、動物学が含まれていた。その一方で、より限定的に規定する場合には、物理学の分野には音響学、熱学、光学、電気学、磁気学が含まれていた。18世紀末になっても、一般物理学と特殊物理学には範囲やアプローチの違いがあり、それらはほとんど統一的な分野とはいえなかったが、力学はこれら物理学（自然学）の共通的なモデルであると一般に考えられていた⁵⁸。

19世紀になると、ヒューエルやアンペールが学問の分類についての議論を進めていった⁵⁹。ヒューエルは、コンディヤックに代表される「感覚学派（*Sensational School*）」が考えたように知識の形成を感覚の作用のみに帰するのではなく、その知識の分野ごとに独自の観念が内在されていると考えた⁶⁰。このような考え方が、学問分類の階層的な説明へと展開されていく。力学が科学の方法論的な代表として扱われるとしても、やはりそれぞれの分野にはその研究対象だけでなく研究方法の違いも存在する。そうになると、それらの方法の違いによって、科学を階層的に分類して整理しようとする動きが生じてくる。さらに、このように科学の専門分化が進む一方で、電気と磁気などのそれまで異なると考えられていた自然現象のあいだにも関連性があることが実験によって明らかになっていくと、さらに多くの自然現象における関連性ないし物理学（自然学）全体の統一性が予想されることになった。この階層的な分類という考え方は、コントの実証哲学とも基本理念を共有する、この時代の新しい考え方であったと言える。2.1節で論じたように、コントもまた、数学的方法と学問分野との関係において「方法の統一性と学説の同質性」を見出そうとしていた。

これらの当時の新しい科学観を反映して、サマヴィル夫人（*Mary Somerville, 1780-1872*）の『物理的（自然的）諸科学の結びつきについて（*On the Connexion of the Physical Sciences*）』

⁵⁷ D'Alembert, "Discours préliminaire des éditeurs," *Encyclopédie*, 1:xvi-xvii. なお、ダランベールの「序論」の最後に折り込まれた「人間知識の系統図」には、電磁気現象についての独立した分類は設けられていない。

⁵⁸ Silliman, "Fresnel and the Emergence of Physics," 141.

⁵⁹ ファラデーは、この科学の分類についてアンペールが論じた著書を、アンペール自身から献本されている。（*André-Marie Ampère to Faraday, 17 Februaury 1835, Correspondence, 2:234-6.*）

⁶⁰ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:314.

という本が1834年にイギリスで出版されている。この本は、自然科学の各分野をそれぞれの関連性に注目しながら解説した一般向けの科学書であり、ヒューエルをはじめとして当時の人々の注目を集めることになった⁶¹。サマヴィル夫人の著書についてはファラデーやマクスウェルが自らの学問観に照らしながら批判しており、これらの関係については4.1節および8.4節で改めて議論を深めたい。

それでは次に、科学の分類における物理学分野の位置づけについて、力学を基準としながら分析を進めよう。当時の学問の分類を知るために、一般に近代科学のモデルと考えられた力学という学問分野について理解しておく必要がある。力学とはすなわち *Mechanics* のことであるが、この *Mechanics* という学問分野の構成は、歴史的な変遷を経ることによって少し複雑なものとなっている。

そもそも、*Mechanics* は、「力学」の意味において理解できるとともに「機械学」の意味でも理解できる。事実、19世紀に *Mechanics* について論じられるとき、この *Mechanics* という言葉は「機械 (machine)」のイメージと不可分であった。ヒューエルは、「機械的な力能 (mechanical powers)」をアルキメデスにならって「梃子」「車輪」「車軸」「歯車」「滑車」「斜面」「くさび」「ねじ」という七つの機械部品に還元している⁶²。このように、「力学」とは「機械学」を基礎とするものであり、両者のあいだに明確な区別があったわけではなかった。

そして、力を機械という「もの」に還元する議論において力学を理解すると、19世紀においても力学的な構造（すなわち「メカニズム」）は、機械と密接に結びつけられる対象であったことがわかる。そうすると、「力学」が「機械学」に近いものであることをつねに意識しておく必要がある一方で、「機械」にもまた蒸気機関などの産業機械の工学的イメージを読み込み過ぎないように注意する必要がある⁶³。19世紀の力学では、遠隔作用的な中心力を含んだ新しい「ニュートン力学」という理解が一般的になっていたからである。そのことから、とくに本論文で論じる「力学的モデル」が、「機械的モデル」でもありつつ「分

⁶¹ Yeo, *Defining Science*, 109-112. この本が注目を集めたことに対しては、女性が執筆した物理学書だったという理由もあげられている。(Whewell, "On the Connexion of the Physical Sciences," 66-8.) このサマヴィル夫人の『物理的諸科学の結びつきについて』に対するヒューエルの書評は匿名で掲載され、この書評において歴史上初めて「科学者 (scientist)」という言葉が用いられた。この言葉に至る経緯として、まずは「物理学」という新しい分野が形成されてきている状況を踏まえ、ヒューエルは1831年に発足したBAAS (イギリス科学振興協会) の会合で、数学者と化学者とのあいだに「物理学者 (physicist)」という言葉を作る必要があることを提案していた。フランスでは物理学者に対して *physicien* という言葉が用いられているが、イギリスにはそれに相当する言葉がなかったのである。さらに彼は、「哲学者 (philosopher)」では意味が尊大かつ広範囲になりすぎるため、「芸術家 (artist)」にならって「科学者 (scientist)」という言葉も考えられるとし、それは「えせ学者 (sciolist)」や「家政・経済学者、倹約家 (economist)」「無神論者 (atheist)」と同様の言葉として導入できると述べている。また、自然哲学者に対するドイツ語の「自然学者 (natur-forscher)」を引き合いに出して、「自然の詮索家 (nature-poker)」ないし「自然ののぞき屋 (nature-peeper)」と言ってもよいが、それではあまりに侮蔑的なので却下したとも述べている。(Ibid., 59-60.)

⁶² Whewell, *First Principle of Mechanics*, 1-2.

⁶³ なお、スミスとワイズは、原子論的な考察と実証主義的な研究の違いについて、機械の内側を考察するか、あるいは外側から記述するかの違いとしても理解できると主張している。(Smith and Wise, *Energy and Empire*, 161-2.)

子論的モデル」でもあったことも念頭に置いておいてほしい。

一方、「力学」に対して、*Mechanics* ではなく *Dynamics* という言葉が用いられる場合もある⁶⁴。一般に *Mechanics* とは、前述のように機械に関連する知識の総体であり、運動の学である *Kinematics* と力の学である *Dynamics* とに分けられる上位概念である。そして、この *Dynamics* は、静力学 *Statics* と動力学 *Kinetics* とを包括する上位概念である⁶⁵。このように、運動学が力学から区別される場合には、*Dynamics* は *Mechanics* とは別の概念として存在することになる。*Dynamics* は初期の用法においては「動力学」を意味していたが、「動力学」の意味を担う *Kinetics* という言葉が導入されるようになり、*Dynamics* はより一般的な「力学」の意味を持つようにもなった⁶⁶。

なお、『オックスフォード英語辞典』は、このような意味の変化が 1863 年から 1867 年頃に生じたとし、その典拠としてトムソンとテイト (Peter Guthrie Tait, 1831-1901) の『初等力学の概略 (*Sketch of Elementary Dynamics*)』や『自然哲学論 (*Treatise on Natural Philosophy*)』をあげている⁶⁷。それ以前の用例をあげると、例えばヒューエルは動力学を静力学とともに力学の下位に位置づけている⁶⁸。しかし、ハーシェル (John F. W. Herschel, 1792-1871) は、1830 年に出版した『自然哲学序説 (*A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*)』の中で、力と運動の科学という意味での力学としての *Dynamics* を諸科学の筆頭に据えている⁶⁹。このように、ヒューエルとハーセルの記述を比較するだけでも、「力学」と *Mechanics* と *Dynamics* との対応関係は十分に定まっていなかったことがわかる。

この *Mechanics* と *Dynamics* の意味の変化には、動力学 *Kinetics* だけではなく、むしろ運動学 *Kinematics* の導入も大きな影響を及ぼしている。この *Kinematics* という単語は、物理学を分類する上で、アンペールによって *Cinématique* というフランス語として導入された。アンペールは、この *Cinématique* を運動における方向や速さの変化を扱う分野であると定

⁶⁴ 日本では、文部省および日本物理学会が、*Mechanics* に対しては「力学」という訳語を、*Dynamics* に対しては「力学、動力学」という訳語をそれぞれ与えている (『学術用語集、物理学編 (増訂版)』s.v. 「mechanics」「dynamics」)。この訳語から判断する限りでは、*Mechanics* と *Dynamics* は同じように力学を表し、しかし *Dynamics* はとくに運動を含んだ分野に対して用いられると考えられるだろう。

⁶⁵ 『オックスフォード英語辞典 (OED)』によると、*Mechanics* は次のように説明されている。「a. もとは (そしていまだに一般的な用法) 機械の考案と組み立てに関する理論的および実践的な知識のまとまり。b. 運動および運動しようとする傾向を扱う応用数学の部門であり、(現在一般的に受け入れられている区別によれば) 抽象的な運動の科学である *kinematics* と、運動や物体の平衡を生み出す力の作用の科学である (*statics* と *kinetics* を含む) *dynamics* から成る。」(*Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. “mechanics.”)

⁶⁶ 『オックスフォード英語辞典 (OED)』によると、*Dynamics* は次のように説明されている。「力の作用を扱う物理学の分野。初期の用法では運動を生み出したり変化させたりする力の作用に制限されており、それゆえ *Statics* (力の作用の下で静止や平衡を扱う) と対置された。近代になって、前者には *Kinetics* の名が導入されるようになり、*Dynamics* は静力学と動力学を含み、より包括的 (かつより語源的) な意味で受け取られている。しかし、*Statics* と *Dynamics* が同格に扱われるという初期の用法は、一部の物理学者たちによっていまだに保持されており、一般に普及し転移したその言葉と派生語の適用例に大きく影響している。」(*Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. “dynamics.”)

⁶⁷ *Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. “dynamics.”

⁶⁸ Whewell, *Elementary Treatise on Mechanics*, 7.

⁶⁹ Herschel, *Preliminary Discourse*, 96. ただし、ハーセルは同書の別の場所では、*dynamics* と *statics* を *mechanics* の分野として並置している。ハーセル自身、この *dynamics* の意味の多重性には自覚的であった。(Ibid., 223.)

義している。その一方で、アンペールは、運動の法則を用いて運動と力との関係を扱う分野を *Dynamique* と分類した⁷⁰。そして、ある運動を別の運動へと変える機器 (*instrument*) のことを機械 (*machine*) と名づけるならば、この *Cinématique* という分野の目的は、原因となる力に言及することなくその機械の仕組みを知ることであると説明している。

したがってこの定義は、機械に作用する力を考察することとは独立に与えられる。その考察は、その機構 (*mécanisme*) を理解しようとすることから注意をそらすことにしかならない。例えば、時計の時針が1回転しかしないあいだに分針が12回転するときに用いられる歯車の明確な観念を得るために、時計を動かしている力に関わる必要があるだろうか。その歯車の作用は、その運動が通常の原動力とは異なる力に起因するときに同じものではないが、最終的な規則性としては二つの針の速さの比である。例えば、指で分針を回転させるときはどうだろうか⁷¹。

ここでアンペールが述べているように、歯車やばねなどの仕掛けによって動く機械の構造を知りたいときには、機械に力をかけて動かし、その動き方を観察すればよい。それがどのような力によって引き起こされるものであれ、機械的な構造は運動の様子だけで表現できるはずである。このように、*Cinématique* では、ものごとの仕組みを知るために、原因としての力を議論の対象とせず、その運動のあり方だけをその対象とすることが目的とされた。すなわち、アンペールは、原因を「説明」することなく運動を「表現」することを運動学に求めたのだと言える。そして、ヒューエルは、このアンペールの用いていた *Cinématique* という言葉を『帰納科学の哲学 (*Philosophy of the Inductive Sciences*)』で導入したのであった⁷²。なお、*Kinetics* は1864年頃に最初に用いられたと考えられており、*Kinematics* の導入よりも後のことである⁷³。

以上の経緯により、最初は機械学 (力学) *Mechanics* と、その下位に静力学 *Statics* と動力学 *Dynamics* という分類とが存在していたことがわかる。そこから力という原因の議論を除外した運動学 *Kinematics* という分野が独立することで、機械学 (力学) *Mechanics* の中にその「運動学」に対置する「力学」という区分が生じ、*Dynamics* がその分野を表すようになった。そして本来は *Dynamics* が意味していた「動力学」という分野に対して、*Kinetics* が用いられるようになった。

これら「機械学/力学 (*Mechanics*)」の細分化は、1840年代から1870年代にかけてヒューエルやトムソンを中心にしておこなわれたものである。このように「機械学/力学」

⁷⁰ Ibid., 54.

⁷¹ Ampère, *Essai sur la philosophie des sciences*, 51-2.

⁷² Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:152. *Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. “kinematics.” なお、ヒューエルだけでなくウィリス (Robert Willis, 1800-75) なども1840年頃にこの「運動学」という言葉を用いるようになり、普及が進んでいった。(Smith and Wise, *Energy and Empire*, 199. Ampère, *Essai sur la philosophie des sciences*, 50-3. *Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. “kinematics.”) こうした経緯もあり、トムソンも当初はフランス語のように「cinematics」と記述していた。

⁷³ *Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. “kinetics.”

の細分化が、運動の原因である力という概念をめぐる進められていくにしたがい、*Mechanics* も本来の対象であった「機械」あるいは「機構」という概念ではとらえきれないものになっていった⁷⁴。この意味上の変化は、ニュートン力学の展開とともに実質的に始まっていたことであるが、19世紀に入って物理学の研究が進むとともにより顕著になっていった。この過程は、2.1節で論じた実証主義の議論にも対応するものである。

それでは次に、これまでの力学についての議論を踏まえながら、物理学という分野についての分析に進みたい。諸科学の中での物理学の位置を知るためには、ヒューエルの『帰納科学の哲学』(1840)に掲載された分類表(表1)がわかりやすい。ヒューエルは、科学が「基本的観念あるいは概念」によって階層的に分類できること、すなわち「科学の階層的分類 (Classification of Sciences)」を考えた。その中で物理学は、その階層的分類の序列の中で力学と化学のあいだに位置づけられる分野であった。

さらに、物理学の基本的な知識は、さまざまな事例の関連性や体系性を見出すことで得られると考えられた⁷⁵。すなわち、物理学には何らかの統一的な研究方法があるわけではないと考えられていたのである。ヒューエルにおいて物理学とは、何らかの内的な基準によって規定された分野というよりも、力学と化学から差異化されることで現れてくる分野であった。力学のような形式化も進んでおらず、化学のように物質固有の性質を研究するのでもない、いまだ不明なことの多い、一般的かつ多様な自然現象を対象とする集合的な研究分野であった。ヒューエルは、この「物理学」という言葉を次のように説明している。

「物理学 (Physics)」という用語は、科学の特定の階層に制限される場合、一方で力学的科学 (Mechanical Sciences) を、他方で化学を除外するものとして理解されている。そして、二次的力学的科学 (Secondary Mechanical Sciences) と分析的=力学的科学 (Analytico-Mechanical Sciences) とを含んでいる。しかし、あらゆる科学に対して用いることができ、「形式的 (Formal)」と対置されるこの「物理的 (Physical)」という

⁷⁴ なお、この論文では以上を踏まえた上で、慣例にしたがって *Mechanics* を「力学」、*Statics* を「静力学」、*Dynamics* を「動力学」、*Kinematics* を「運動学」と訳出している。そして、*Kinetics* は、とくに原語を併記する形で「動力学 (kinetics)」と訳出している。こうした訳語は、先に引用した OED の記述にもあるとおり旧来の分類に基づくものである。ファラデーの時代は、まさにこの旧来の意味から新しい意味が形成されていく過程にあたる。そのため、論文の中では意味上のずれが生じてくることは避けられないが、それによって言葉の意味の変遷を実感することもできるだろう。また、「力学的モデル (Mechanical Model)」などの *Mechanical* についても基本的には「力学的」と訳出するが、「力学」というよりも「機械論」や「機構」の含意のほうが強ることが多々あるだろう。そのような場合には、適宜指摘するようにしたい。なお、*Mechanism* については「機械論」あるいは「機構」と訳出する。また、*Mechanical Philosophy* については、基本的に「力学的哲学」と訳出している。これは、この論文で扱う *Mechanical Philosophy* が、デカルトやボイルが17世紀に展開したような機械的な接触力に帰着させる「機械論」ではなく、とくに18世紀以降、スコットランドを中心として万有引力も含んだニュートンの「力学」を基礎として展開されたものだからである。

⁷⁵ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:8-9. なお、科学史家のカノンは、イギリスにおいて用いられた「物理学 (Physics)」という言葉とその意味内容について歴史的に分析し、今日的な意味での「物理学 (Physics)」という学問分野の成立がこの19世紀前半であったと結論づけている。(Canon, *Science in Culture*, 111-36.)

形容詞は、天文学や光学のように、私たちがその現象の法則だけでなく、その原因（一般にこうした場合はそれらの力学的原因）をも考えるときの、その思索を意味しているのである⁷⁶。

まず、ここで「形式的」であることが「物理的」であることと対置されていることに注目したい。この「形式 (form)」とは「物質 (matter)」と対置される概念である。そして、「物理的 (physical)」とはこの「物質的」という含意を持っていた。

このヒューエルの「形式」と「物質」の分類は、アリストテレスの「形相」と「質料」の分類を踏まえたものである。例えば、前者が立体などの形状を表し、後者は象牙や木、石といった素材を表す。ただし、ヒューエルによると、このように両者を区別することはできるものの、「物質」のない「形 (figure)」も「形」のない「物質」も現実には存在しないため、個別的にはそれぞれが抽象的な概念である。そのため、両者はつねに結びついて存在するものであり、そのようにしか知覚しえない。なお、「形」は幾何学の対象であり、「物質」は力学や化学の対象であると考えられていた⁷⁷。そのため、天体の運行を扱う天文学や、屈折や回折を扱う光学は、幾何学的に研究が進められるがゆえに、流体力学などを利用する物理的天文学や物理的光学とは区別され、形式的天文学や形式的光学として「形式的科学」の中に分類されたのである⁷⁸。

さらにヒューエルは、科学における「アンチテーゼ」として、この「形式」と「物質」の関係に対比させながら観念と感覚の関係についても論じている⁷⁹。ヒューエルは、形を持たない物質があり得ないように、観念をとまなわぬ感覚はあり得ないと考える。すなわち、観念は形式化という精神のはたらきによって生じ、その観念をとまなうことによって感覚対象は知覚され、知識として「形成 (inform)」されるのである⁸⁰。すなわち、物質

⁷⁶ Ibid., 2:116. *Mechanical Sciences* は、単純に「力学」と訳すこともできるかもしれない。しかしそのように訳していくと、電磁気学を対象とする *Analytico-Mechanical Sciences* が「解析力学」と訳されることになり、通常の解析力学との意味の混乱を招くことになる。ヒューエルにおいて *Mechanical* や *Analytico-* といった言葉は、あくまで *Sciences* を規定する上で「力学的」な性質を持つことや「解析 (分析) 的」性質を持つことを示すために用いられていると考えられる。そのため、ここでは簡潔な訳語ではないことを自覚しながらも「力学的科学」や「解析的=力学的科学」という訳語を選んだ。

⁷⁷ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:33-4. これと同様の分類はハーシェルにも見られる。ハーシェルは、数学は一義的で厳密であるため研究には必要であるが、それが有用なのはあくまで観念を扱う上でのことであるとして、自然現象そのものに対しては限定的であると論じている。(Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 256-7.) なお、ハーシェルは自然現象に対する数学を「肉体面 (corporeal)」に対する「精神面 (mental)」として区別している。(Herschel, *Preliminary Discourse*, 95.) これらの議論は、スコットランド哲学、とくにトマス・ブラウンの『精神哲学講義 (*Lectures on the Philosophy of the Mind*)』の直接的な影響によると指摘されている。(Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 253-7.)

⁷⁸ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:84. なおヒューエルは、道徳科学についても幾何学や力学とのアナロジーで考察を進めていた。このような議論について、ヒューエル自身が問題を感じていなかったわけではないが、道徳が人間の本性から生じるという考えに基づき、さらに自然科学も多様であると考えた場合、このようなアナロジーを想定することは有効であると考えられていた。(Yeo, *Defining Science*, 236-9.)

⁷⁹ ヒューエルは『帰納科学の哲学』において、このようにカント (Immanuel Kant, 1724-1804) のアンチテーゼを意識した議論展開をおこなっている。

⁸⁰ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:34-6. ヒューエルはここで、この物質を感覚する上での

が形式化されることで知識になる。そして、ここでの観念と感覚との関係は、理論と事実との関係として理解することもできるとされた⁸¹。

次に、物理学と力学との関係について分析しておこう。物理学は「力学的科学」を除外するとしておきながら、「二次的力学的科学」ないし「分析的＝力学的科学」を含む。これらの記述は、どちらにも「力学的 (mechanical)」という言葉が用いられている。そのため、この分類は論理的に混乱していると考えられるかもしれない。ヒューエルの分類では、数学では物質とは独立している時間や空間、数といった「形式」が扱われ、力学では力と物質の因果関係が扱われる。それに対して、ヒューエルにとっての物理学は、数学とも純粋な力学とも区別される分野であった。1.2 節で論じたように、自然現象は必ずしも力学的に取り扱い可能な一次性質として知覚されるわけではない。音や光、熱などは、二次性質として知覚される。そして、これらの二次性質としての作用は、物質の外部へと及び、媒体あるいは「外在性 (externality)」をとともなうという共通の特徴を持っていると考えられた。それゆえ、二次性質を対象とする物理学は、一次性質を対象とする「力学的科学」とは区別されるが、その二次性質は一次性質を念頭に置いている点では力学的であるとして、「二次的力学的科学」として分類されたのである⁸²。

なお、ヒューエルは、二次性質を一次性質へと還元できるとするロックやリードの前提は根拠が不十分であることを認めている。もしそれが還元可能であるとするならば、物理学における二次性質と一次性質との区別は不明瞭になるからである。そこでヒューエルは、二次性質が一次性質に還元できるかどうかについては断定を避けながらも、少なくとも一次性質と二次性質には、その性質が物体から直接的に知覚されるか、あるいは何らかの媒体をとともなって知覚されるかという違いがあるとして両者を区別した⁸³。物理学が対象とする音や光、熱、匂いなどは、媒体のはたらきによって知覚される。すなわち、ヒューエルにとっての二次性質とは媒体という「外在性」をとともなうものであり、そのため「二次的力学的科学」においては空間的な作用が考察の対象となるのである⁸⁴。

このように媒体について考察しようとすることは、物体と人間の感覚器官を空間的に結びつけている何らかの連続的な近接作用を想定していることになり、そこに力学的な因果関係を見出せる可能性も生じてくる。ヒューエルは、ここでは各論を展開することで、そのような力学的な考察も可能であると主張する。例えば、音については空気の波が媒体であり、その作用は一次性質に還元することができると述べている。あるいは、光の原因が粒子であるかエーテルの波動であるかは現時点では判断がつかず、ただし近年の理論によ

「形式 (form)」のはたらきについて、感覚が観念によって変化するのではなく与えられるのであるから「変形 (transform)」ではなく「形成 (inform)」であると論じている。

⁸¹ Ibid., 2:120.

⁸² Ibid., 1:80, 272.

⁸³ Ibid., 1:277-80.

⁸⁴ Ibid., 1:280. そうすると、観察者と観察対象とを同一空間において結びつけることになり、パークリの観念論に移行する可能性が出てくるかもしれない。しかしヒューエルは、リードの議論を引きながら、物体もまた私たちの外部に存在しているのであり、そのような意味において外在性という考えが不可避免的に重要であると論じている。(Ibid., 1:280-1.)

ると偏光は横波によって生じているようだとしながら、いずれにしても光という現象を力学的に扱うことは可能であろうと述べている。そして熱については、光と密接に関連していることから、光と同じ媒体によるものである可能性が高いと述べている⁸⁵。以上のことから、これらの分野は通常の力学とは異なり「二次的」ではあるが、やはり「力学的」な分野として分類されたのである。

それでは、電気や磁気についてはどうだろうか。電気や磁気の力は力学的に取り扱い可能だと考えられる一方で、電磁気に現れる極性 (polarity) という特徴的な性質は、音や光以上に力学的に説明することが困難なように思われた⁸⁶。そのため電磁気現象は、「二次的力学的科学」とはさらに区別されて、「分析的=力学的科学」ないし「力学的=化学的科学 (mechanico-chemical sciences)」として分類された⁸⁷。ここで、「分析的」とは、ニュートンの分析と総合の議論に基づく概念であり、事実を実験によって分解し、それを観察ないし測定するという実証的なプロセスのことを表すとされた⁸⁸。

このように、物理学は純粋な力学とは区別されていたが、あくまで「力学的 (mechanical ないし mechanico)」であることが意識された分野であった。物理学は何らかの独立した方法を持った専門分野であるというよりも、つねに数学や力学を念頭に置いた研究領域だったのである。これについて、ヒューエルは「それぞれの科学は、表の中でそれと対応するところにある観念や概念だけではなく、それに「先立つ」すべての観念や概念をも含むのである」⁸⁹と述べている。

もともと、このように「それに先立つすべての観念や概念を含む」ということは、例えば化学や生物学までが力学や数学に還元できるということを必ずしも意味していたわけではなかった。力学や数学は、化学や生物学の研究を進める上で必要ではあったが、十分であると考えられていたわけではなかった。例えば、ヒューエルは化学について次のように述べている。

化学における原因の理論を推し進める上で、私たちの仕事は決して「力学的」な力ないしその効果を生み出すような力の集合の諸法則を作り出すことではない。これまでに、そのような試みで成功したものはないことがわかっている。私たちのねらいは、それらの特性の中でも分極というものを取り入れながら、その結果をできるだけ理解しやすくするような新しい種類の力を考えることでなければならない⁹⁰。

⁸⁵ Ibid., 1:282-318.

⁸⁶ ヒューエルは、放電や電流の磁気作用などが電流の「運動量」や「慣性」の作用であるとして、電磁気現象を力学とのアナロジーで考えており、ファラデーの研究は現象の法則性を記述しているに過ぎないと考えていた。(Anderson, "Whewell-Faraday Exchange," 582-90.) ファラデーの議論については 4.3 節も参照せよ。

⁸⁷ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:272.

⁸⁸ Ibid., 2:278.

⁸⁹ Ibid., 2:114.

⁹⁰ Ibid., 2:99.

このように、力学的な説明は化学現象を説明する上では不十分であると考えられた⁹¹。むしろヒューエルは、ファラデーの誘導の理論を新しい時代の象徴として例示しながら、自然界の力の説明原理が力学的な力から極性を持った力へと移行している傾向があるとさえ考えていた。

あらゆる作用を力学的な力に還元することが先代の習慣であったように、当代の物理の理論家たちはあらゆる力を極の力に還元する傾向があるようだ。モソッティは、正負の電気があらゆる物体に行きわたっており、重力とはそれらの一方が他方よりもはつきりと超過しているだけであることを示そうと努力してきた。すでに見たように、ファラデーは、帯電した物体の遠隔的と考えられる作用が実際は近接粒子間の極の力の効果であるとする強固な実験的根拠を与えている⁹²。

ここで引用されているモソッティの理論とはポアソンの分子論を発展させた理論であり、ファラデーが誘導の理論を形成していく上で一定の影響を持った理論である⁹³。このモソッティの理論については、5.3節で改めて論じることにする。このように、電磁気学や化学の研究が進むことによって、あらゆる現象の説明を力学的な議論に還元できるとする考え方は、ヒューエルにとっては時代遅れとすら考えられるようになった。分極は、電気や磁気に始まり、光（偏光）、結晶、そして化学親和力などにも認められ、しかもそれらの作用のあいだには実際に関連性も認められていた⁹⁴。そして、この分極についての重要な知見として、極性が単独で存在しないということがファラデーの電気分解の研究などを通じて確かめられていった⁹⁵。物理学を分類する名称にはあくまで「力学的」という言葉が残されていたが、分極という現象は力学的に説明できると考えられていたわけではなかった。こうして、従来とは異なる新しい種類の作用については化学に近い学問分野として理解され、とくに電磁気現象は「分析的＝力学的科学」ないし「力学的＝化学的科学」として分類されたのであった。

このヒューエルの分類は、1.2節のロビソンの分類と対応づけると理解しやすい。ロビソンは、電磁気現象を可感な運動と可感ではない運動の両方にまたがる現象として説明していた。可感な運動は力学の対象であり、可感ではない運動は化学の対象である。ファラデーはまさに、このような力学と化学の中間領域において、電磁気学研究を進めていったのである。

このようにヒューエルは、自然現象の原因を考えるにあたって二次性質を媒体に帰した

⁹¹ Ibid., 2:435-6.

⁹² Ibid., 2:433.

⁹³ 8.3節でも論じるように、マクスウェルは、モソッティがポアソンの磁気論を利用して「磁気という言葉は電気という言葉に、フランス語をイタリア語に翻訳しただけ」であるとして、かなり否定的に評価している。(Maxwell, "On the Mathematical Classification of Physical Quantities," in *SP*, 2:258.)

⁹⁴ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:345-75.

⁹⁵ Ibid., 1:356-7.

り、分極や化学親和力を想定したりしており、これはコントの実証哲学とは異なるところであった⁹⁶。ヒューエルとコントの考え方の違いは、形而上学に対するコントとヒューエルのそれぞれの評価に端的に現れている。コントは「形而上学的段階」を「実証的段階」の前段階として否定的に扱っていたが、ヒューエルは形而上学的な議論は「実証的段階」にある研究にとっても重要であると考えていた。ヒューエルは、ケプラー (Johannes Kepler, 1571-1630) やニュートンの事例をあげながら、コントの仮説が歴史的に誤っていると次のように指摘している。

コント氏の仮説が歴史的に誤っているということは、先に述べたような例から明らかである。形而上学の議論は、それぞれの科学の進歩の中で不可欠なステップである。科学史上のこれらの部分をすべて、役に立たない無益なこと、知識における最も無作法な試みに属するものとして勝手に退けてしまうとすれば、ものごとの進歩を歪めてしまうばかりでなく、純粋な事実をも曲解してしまうことだろう⁹⁷。

このようにヒューエルは、科学史的観点から、自然現象の原因の存在についての形而上学的な議論の重要性を認めている。ここでの形而上学的な議論とはコント的な分類によるものであり、分極や化学親和力の原因についての議論（すなわち化学的な議論）は、この形而上学的な議論に含まれることになる。そのため、このヒューエルの立場からすると、電磁気現象に対して、その原因となる実体の存在について考察することは重要であると考えられることになる。

例えばヒューエルは、フーリエやコントが流れの形式的な側面だけを「流束」として扱おうとしていることに対して、次のように疑問を投げかけている。

フーリエの述べるカロリックの「流束 (flux)」とは、物質的な流れを暗示することより他には考えられない。コント氏は、この表現がかなり比喩的であるとして、それは「事実」をたんに示しているものだと弁解している。しかし、事実というものを除いた流体の流れ (flow) とは何なのだろうか。こうした表現や、それ相応の考えがなければ、フーリエは彼の理論を導くことも考えることもできなかった、ということは明白ではないのではないのだろうか⁹⁸。

このように、現象の法則として形式的に「流れ」を考察する一方で、その現象の物理的な実体を考察から外すという姿勢は、ヒューエルにとっては不十分なものと思われた⁹⁹。

⁹⁶ Ibid., 2:321-2. コントも物理学と化学とを区別して考えていたが、その区別は曖昧かつ不安定なものであった。(Ibid., 2:332.)

⁹⁷ Ibid., 2:324.

⁹⁸ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:327-8.

⁹⁹ Ibid., 2:328-9.

ヒューエルにとって、作用の形式は、あくまでその物質的な原因の存在を通してのみ認識できるものであった。

このようにヒューエルは形式的なだけの観念を批判していたが、もちろん前述のように、形式を議論することの重要性は十分に認識していた。そのため、科学の分類をおこなうにあたっては、それぞれの分野の理論的な形式も念頭においていたのである。

そしてヒューエルは、理論における形式の共通性についても意識しており、それぞれの分野間にアナロジーが成立する可能性も考えていた。

諸科学の階層的分類は、私たちの真理への到達能力の範囲を示すことに主として用いられるものであり、私たちがここで関心を寄せている知識の確かで明らかな部分と、ここでは意識的に触れていないが、関心や根拠のまったく異なる別の部分とのあいだのアナロジーを有するものである¹⁰⁰。

このように、ヒューエルは科学の分類がアナロジーを内包すると考えており、その方法を明らかにしていくことは、書名でもある「帰納科学の哲学」へと結びつくものであると考えていた。ヒューエルは、このような帰納的推論のあり方を「帰納の統合 (consilience of inductions)」と名づけている¹⁰¹。そして、この「帰納の統合」によって、新しい分類に属する現象に対しても、その仮説に「新しい仕組み (machinery)」を導入する必要はなく、つねに単純かつ統合的な理論へと収斂するように体系の複雑さが抑えられると考えていた¹⁰²。すなわちヒューエルは、ある現象についての既存の研究で明らかになった理論構造をアナロジーによって新しい別の現象へと応用することで、その別の現象の研究を進めることができる考えたのである。

もちろん、分野間の関係性や階層性についてはヒューエルの見解が当時のすべてであったわけではない。例えば、ハーシェルは「自然哲学は本質的にすべての部門において結びついており、すべてを通じて一つの精神が支配し、一つの研究方法が適用される」¹⁰³ことを前提としており、そのために「高次における一般化」¹⁰⁴が可能になると考えていた。例えば電気と磁気は、当初は別の現象だと考えられていたが、その後の研究によって相互の関連が明らかになり、理論の一般化が進んでいる¹⁰⁵。ハーシェルは、ニュートン的な天体力学を科学の理想的な方法と位置づけ、研究分野の方法論的な階層性はあまり意識せず、それらの違いは対象の特徴によるものであると考えていた。ヒューエルは、物理的分野と化学や鉱物学などの分野を区別し、後者は帰納科学としては未熟であると考えていた。そのため、ハーシェルの方がヒューエルよりも分野間の関連性をより強く意識していたとも

¹⁰⁰ Ibid., 2:113.

¹⁰¹ Ibid., 2:65.

¹⁰² Ibid., 2:73-4.

¹⁰³ Herschel, *Preliminary Discourse*, 219.

¹⁰⁴ Ibid., 360.

¹⁰⁵ Ibid., 324.

言える¹⁰⁶。もっともヒューエルにしても、諸分野の関連性が少しずつ実証され、またそのような議論がヨーロッパ全体で展開されていく状況を踏まえていたからこそ、諸分野の差異ないし統一性の限界について注意を促すような議論を意識的に展開したとも言える¹⁰⁷。

コントやハーシェルなどの議論に比べてヒューエルの議論は慎重かつ複雑であったが、いずれにせよ、とくに電磁気学などの物理学の範囲では、力学や化学などの他分野との相互の関連性が十分に意識される状況にあった。そして、力学を諸科学のモデルとして強く意識する場合には、力学的モデルの構築が研究の有効な手段となるだろうし、力学をそれほど重視せずに、しかし分野間に関連性を認める場合にはアナロジーが有効な手段となるだろう。この歴史的経緯について、本論文の目的であるトムソンとマクスウェルについての分析は第7章以降で詳しく進めていくが、ファラデーについての具体的な分析を次章で始める前に、次節で改めて、これまでに進めてきたアナロジーと学問分類の議論を整理しておきたい。

¹⁰⁶ Yeo, *Defining Science*, 94-6.

¹⁰⁷ Ibid, 231-232. ここでは例えば、実験的研究としてはエールステズやファラデーによる電磁気の相互作用の研究があげられるだろうし、哲学的研究としてはフランスではクーザン (Victor Cousin, 1792-1869) やコント、ドイツではシェリング (Friedrich W. J. Schelling, 1775-1854) やヘーゲル (Georg W. F. Hegel, 1770-1831)、イギリスではコールリッジ (Samuel Taylor Coleridge, 1772-1834)、そしてスコットランドではリードやスチュアート、ハミルトンなどの研究がそれぞれあげられる。科学史家カノンは、「物理学」という分野が、既存の研究分野から分かれて独立していったものであるというよりも、いわばそれとは逆方向に、さまざまな「部門」をニュートン的ではない根本的に新しい形において統合されることで生じていった分野であると論じている。(Cannon, *Science in Culture*, 125-6.)

基本的観念あるいは概念	諸科学	分類
空間	幾何学	}
時間		
数	算術	
記号	代数学	}
極限	微分	}
運動	純粋力学	
	形式的天文学	
原因		}
力	静力学	
物体	動力学	
慣性	流体静力学	}
流体圧	流体動力学	
	物理的天文学	
外部性		}
感覚の媒体	音響学	
性質の強さ	形式的光学	
性質の等級	物理的光学	}
	熱学	
	蒸発学	
極性	電気学	}
	磁気学	
	ガルヴァニズム	
元素（構成）		}
化学的親和性	化学	}
物質（原子）	結晶学	}
対称性	系統的鉱物学	
類似性	系統的植物学	
類似性の度合い	系統的動物学	}
自然的親和性（生命力）	比較解剖学	
同化、刺激感应性（生物体）	生物学	
目的因		}
本能	心理学	}
感情		}
思考		}

<p>歴史的因果関係</p> <p>第一原因</p>	<p>地学</p> <p>動植物の分布</p> <p>言語学</p> <p>民族誌学</p> <p>自然神学</p>	<p>} 考古学</p>
---	--	--------------

表 1：ヒューエルによる諸科学の階層的分類（Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:117）

2.4. 力学的な説明とアナロジー

この第2章で論じてきたように、物理学研究は18世紀末から19世紀初頭になって飛躍的に進み、その研究を進めるにあたっては、力学的な説明とは異なる形でのアナロジーが重要な方法として認識されるようになった。

ここでの力学的な説明とは、これまで指摘してきたように、機械的な接触力に万有引力のような中心力を組み合わせた「ニュートン力学」を動作原理とする何らかの原因を想定することで、その現象を説明することであった。当時、とくに「力学的=分子論的」な研究においては、力学的な方法が現象の因果関係を数学的に論じるための唯一とも言える方法であった。そのため、当時はそのような言葉で理解されていたわけではないにせよ、実質的に力学的モデルが導入され、架空の力学的な原因や構造が想定されていた。

この力学的な説明は、デカルトやホブズ (Thomas Hobbes, 1588-1679) の機械論にその源流を求めることができる。例えばデカルトは、磁気的作用を渦粒子が接触し合うことで生じている作用として説明しようとした。その後、ニュートンは、近接作用を原理とするそれまでの機械論に遠隔作用的な万有引力を導入し、自然現象の運動を体系的に説明した。もちろん、この万有引力は現象の説明になっていないという批判もあった。しかし、少なくとも数学的な形式として体系的な理論を与えることに成功したことによって、この「ニュートン力学」は18世紀の研究方法のモデルとなったのである。そして、化学反応や電磁気的作用についても、このような牽引や反発などの中心力を有する原子ないし分子を組み合わせることで理論的な説明を与えることが模索されていった。

その一方で、この章で論じてきた実証主義的なアナロジーは、ニュートン力学の動作原理を想定するような物理現象の原因には言及せず、異なる物理現象の要素間の関係を比較して対応づけるものであった。例えば、熱伝導の方程式を静電誘導の記述に応用しようとするとき、この方程式を介した現象間の対応関係においてアナロジーが見出されていることになる。

一般に、力学的モデルとアナロジーは包含関係にある。力学的モデルとは物理現象の原因を力学的な理念によって単純化した想像上の構築物であるから、実際の研究対象とモデルとのあいだには対応関係としてのアナロジーが存在する。すなわち、力学的モデルにはアナロジーが含まれている。ただし、その反対に、実証主義的なアナロジーでは原因の議論そのものが放棄されている。そのため、アナロジーと力学的モデルとは異なる研究方法として歴史的に区別することができる。

アナロジーの比較対象としてこのように力学的な動作原理を想定しているかどうかの違いは、この時代に熱学や電磁気学といった新しい分野が進展し、それに合わせて新しい方法論が模索されていったことに起因しており、それが研究者の立場の違いにもなっていた。18世紀後半において、物理学の方法論的なモデルは力学や幾何学であった。力学や幾何学を用いれば、自然現象の作用を厳密かつ論理的に表現できたからである。そもそも、当時

の「物理学」には力学は含まれず、音や光、熱、電磁気などがその対象となっていた。その中でも音や光については、それまでも図式的な幾何学的方法や波動などの力学的方法によって一定の理論を与えることができた。そのため、力学的な自然観が広く普及することになった。しかし、熱や電磁気に対しては、従来の力学や幾何学による説明では限界が生じるようになってきていた。そのため、研究方法およびその研究を基礎づけている自然観にも変化が求められるようになったのである。

1.3.3 節で論じたように、ポアソンなどの「力学的=分子論的」研究では、作用の原因として中心力を備えた分子を想定し、それによって作用を力学的に説明しようとしていた。しかし、このように分子を想定しても実証性には乏しかったし、あらゆる物理現象をニュートン力学に還元する方法には限界があった。そこで、自然現象の原因を議論から排除し、測定可能な量の法則性だけを考察の対象とする新しい方法論が優勢になっていった。これがいわゆる実証主義であった。

この実証主義の基本理念はコントによってまとめられ、その方法論的な模範として、同時期に発表されたフーリエの「熱の解析的理論」があげられていた。当時、力学は学問的な方法の標準となっており、コントも力学を方法論的なモデルとしながら諸学問を階層的に分類していた。その一方で、フーリエの研究は力学的方法にこだわらず、それぞれの現象の理論や法則の形式に注意を向けるものであった。こうして実証主義の展開において、考察の対象が作用の原因ではなく作用そのものへと移り、それとともに力学的な原因を想定しない関係性そのもののアナロジーの有効性が認識されるようになっていった。

以上の分析はフランスの事例を中心としたものであるが、このようなアナロジーの有効性についての認識の変化はイギリスでも生じつつあった。イギリスでは、アナロジーの有効性についての実証主義的な理解は、主としてウィリアム・トムソンやマクスウェルによって展開されていくことになる。ただし、彼らの新しい理解のあり方については第7章以降で扱うことにするため、ここではその前段階の理解のあり方について整理しておくことにする。

そもそも、アナロジーの有効性は古くから認められており、近代に入ってから、例えばロックは、アナロジーは磁石が鉄を引く力などの感覚では原因を把握できない自然現象についての知識を得るための唯一の助けであると述べていた¹⁰⁸。しかし、アナロジーは蓋然的な判断をとまなう方法であり、厳密性や実証性に欠けるともみなされていた。プリーストリーは、人間の顕著な能力としてアナロジーを用いた推論をあげ¹⁰⁹、「「アナロジー」は哲学的な研究すべてにおける私たちの最善の道しるべ」¹¹⁰であり、「単なる偶然によるものではない発見のすべては、その助けによってなされたもの」¹¹¹であると評価する一方で、

¹⁰⁸ Locke, *Essay*, book 4, chap. 12, 587-8. ロックは、こうしてアナロジーによって得られた知識は蓋然的なものだとして述べているが、そもそも感覚でとらえきれない多くの複雑観念については、このような蓋然的な確からしい知識しか得られないと考えている。

¹⁰⁹ Priestley, *History and Present State of Electricity*, 1:iv.

¹¹⁰ *Ibid.*, 2:13.

¹¹¹ *Ibid.*

アナロジーによる推論は仮説に過ぎないものであり、これを事実と考える危険性ともなうことに注意を促している¹¹²。

アナロジーによる推論のこのような限界は、当時において一般的に指摘されていた。例えばリードは、アナロジーによる判断は有用であるが、それは確からしい推論に過ぎず、実証性を欠いていて誤りを含むものであると注意を促していた¹¹³。スチュアートやハミルトン (*Sir William Hamilton*, 1788-1856) も、アナロジーについて、基本的にリードと同じような見解を示している¹¹⁴。例えば、ハミルトンは、推論の方法としての「帰納」と「アナロジー」の共通点と相違点を次のように説明している。

帰納による推論とアナロジーによる推論とは、次のことで共通している。すなわち両者は、観察されることから観察されないことを結論づけるのだ。現実の経験の範囲内のことから、それを超えたことを結論づけるのだ。しかし、それらは次の点で異なる。すなわち帰納では、それは観察されることから観察されないことへと推論が導かれるのであって、複数における統一である。それに対して、アナロジーでは、統一における複数である。言い換えれば、帰納では、私たちは多において一を見出しているのであり、アナロジーでは、一において多を見出しているのである¹¹⁵。

すなわち、アナロジーとは、ある一つの現象の説明をまったく異なる別の現象へと拡張して適用していくことで、感覚によって経験的に得られる範囲を超えて対象の原因を推論して説明を与えていく方法であり、それだけ不確実性がともなうと考えられた¹¹⁶。

このようにアナロジーとは、原因の可感ではない現象を説明するための方法として位置づけられていたが、それ以前にも、例えばニュートンは『プリンキピア』の「哲学することの諸規則 (*Regulae philosophandi*)」の中で、自然はつねに単純で調和的であることから、「アナロジー」から離れることがあってはならないと述べており、そこでは数学的な関係性についてのアナロジーが意識されていたと言えるかもしれない¹¹⁷。しかし、ニュートンがそうだとすると、現象の原因ではなく数学的関係の厳密性に注目するような実証主義的な視点は、19世紀に入ってもまだ十分には意識されていなかったと考えられる。

そして、上記のように、アナロジーによる推論は可感ではない対象を扱うことから本質的に不確実であり、その確実性を上げるためには観察や実験による確認が必要不可欠であると考えられた。アナロジーについてのこのような認識は、デーヴィーやファラデーの資料にも見出すことができる。デーヴィーは自身の化学研究の集大成である『化学哲学提要 (*Elements of Chemical Philosophy*)』の冒頭で、アナロジーを利用する際の実験の重要性に

¹¹² Ibid., 2:14-5.

¹¹³ Reid, *Inquiry into the Human Mind*, 444-6.

¹¹⁴ Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 146-7.

¹¹⁵ Hamilton, *Lectures on Logic*, 166.

¹¹⁶ Ibid., 172-4. もっともここでは、帰納もアナロジーと同様に不確実性をともなうと論じられている。

¹¹⁷ Koyré and Cohen eds., *Isaac Newton's Philosophiae naturalis principia mathematica*, 2:553.

ついて次のように述べている。

化学哲学の基本は、観察と実験とアナロジーである。観察によって、事実ははっきりと細かく心に刻み込まれる。アナロジーによって似通った事実が結びつけられる。実験によって新しい事実が発見される。そして新しい知識が進歩していく中で、観察はアナロジーに導かれながら実験を作り出し、実験によって確証されたアナロジーは科学的真実になるのである¹¹⁸。

このように、アナロジーとは観察や実験によって得られた事実に説明を与えていくための有効な方法として位置づけられていた。ファラデーも、1837年に発表した誘導についての論文の冒頭で、「電気学 (science of electricity)」研究の基本的な方法として実験とアナロジーをあげている。

疑問を熱心かつ注意深く追及し、実験とアナロジーを組み合わせ、自分の先入観を疑い、理論よりも事実により敬意を払い、一般化を急ぎ過ぎず、何よりも自分自身の意見を、あらゆる段階で論証と実験の両方から吟味しようとする哲学者たちにとって、これほど素晴らしくすぐに発見のできる場を与えてくれる知的分野はあり得ない¹¹⁹。

ファラデーも、このようにアナロジーを、実験によって得られた事実に対して既存の理論への批判性を保ちながら新しい理論を構築していくための重要な方法であると認識していた。いわば、アナロジーとは、より安全な形で仮説を作るための方法として位置づけられていた¹²⁰。

しかし、これらの事例を詳細に分析していくと、彼らの用いていたアナロジーとは、あくまで現象の可感ではない原因を推測して、その現象を分類し、説明を与えていくための方法であったことがわかる。デーヴィーによると、化学におけるアナロジーとは、新しく発見された物質の命名に反映させることでその理解を助けるものでもあった。ヒューエル

¹¹⁸ Davy, *Elements of Chemical Philosophy*, in *Collected Works*, 4:2. なお、デーヴィーは研究を進める中でもアナロジーについて繰り返し言及している。例えば、1810年代後半のノートには次のように記されている。「あらゆる「実在物 (existence)」にはアナロジーが存在する。魚の分かれた尾は、そのような目的の長い継起の中で、二足の人間とつながっている。「惑星系」において、おそらく人はより高次の知性 (intellectual nature) と結びついていることがわかるのであろうし、「モナド」あるいは魂が一連の進歩において絶えず通底しているのであろう。」(John Davy, *Memoirs of the Life of Sir Humphry Davy, Bart. LL.D. F.R.S.*, in *Collected Works*, 1:217.) また、1807年の化学についての講義の冒頭では、自然科学における事実はアナロジーに支配されていると語っている。(Davy, “Introductory Lecture to the Chemistry of Nature,” *Collected Works*, 7:167-8.)

¹¹⁹ *ERE*, 1:360, par. 1161. また、1855年には「精神教育についての観察 (*Observation on Mental Education*)」と題された講演報告で、物理的な学問を追及する上では、あらゆる可能性を考えて研究課題を与えるために想像力ないアナロジーというものが教えられるべきであると論じられている。(ERCP, 480-1.) この講演報告は、とくに当時ファラデーが調査をおこなった「テーブル・ターニング」という心霊現象に対する批判を前提として、科学的な思考の重要性を論じたものである。

¹²⁰ Knight, *Humphry Davy*, 78.

も、前節で論じたように「基本的な観念あるいは概念」による科学の分類をおこない、その分野間のアナロジーの可能性を考えていたが、さらにギリシア語やラテン語の言語規則とのアナロジーに踏み込んで、命名におけるアナロジーの重要性についても包括的に論じている¹²¹。

ここでデーヴィーやヒューエルが論じているアナロジーは、何らかの現象や事物について、他の現象ないし事物と比較しながら、その原因を推測し、分類や説明を与えることを目的としている。いわば、それは事物の観念についてのアナロジーであり、そのようなアナロジーの重要性は、18世紀以前にも主に分類を基本とする博物学的な分野で認められてきた¹²²。デーヴィーは、「科学 (sciences) とは、アナロジーによって関連づけられた種々の事実の分類 (classes) である」¹²³とも述べている。このように事物の観念を整理していくためのアナロジーのあり方は、ヒューエルによる科学の分類に従えば「分類的科学」の階層、すなわち「親和性」や「類似性」を基本概念とする階層におけるものであった。プリーストリも、18世紀の電気研究は基本的に「事実のアナロジー」に過ぎない段階にあると述べている¹²⁴。

このような原因についてのアナロジーの例として、他にもハーシェルが議論をあげることができる。まず、ハーシェルは、自然哲学の目的とはその現象を存在せしめている真の原因 (Vera Causa) を模索することであるとする。その上で、その原因を説明するために有効な三つの要因を次のようにあげ、アナロジーを重要な判断基準の一つとして位置づけている。

第一に、私たちの処理範囲にある原因の数と種類。第二に、それらを自然現象の説明に結びつける私たちの習慣的方法。第三に、すでに説明がついているか、あるいはそれらの原因のうちのいずれかによる説明が受け入れられるような、私たちが集めることができる似たような現象の数、そしてその問題となっているものとのアナロジーの近さ¹²⁵。

また、ハーシェルは、何らかの類似の現象があつて、その一方にはっきりとした説明が与えられていれば、もう一方にもそれと同じ説明を与えようとすることは自然なことであり、むしろそれを拒む方が不自然であるとも述べている¹²⁶。

¹²¹ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:549-64. この議論の中で、ヒューエルは「科学者 (Scientist)」という名称の妥当性を主張している。(Ibid., 2:560.)

¹²² 例えば、Herschel, *Preliminary Discourse*, 140-3.

¹²³ Davy, *Syllabus of a Course of Lectures*, in *Collected Works*, 2:329.

¹²⁴ Priestley, *History and Present State of Electricity*, 2:54.

¹²⁵ Herschel, *Preliminary Discourse*, 148.

¹²⁶ ハーシェルは次のように述べている。「ここで、似たような事例や現象の蓄積を持ち、それを考察中のものとともに分類しておくことが大変重要であることがわかる。そのうちの一つの説明によって、残りのすべての説明が自然とついていくと期待できるだろう。二つの現象のアナロジーがとても近くて際立ったものであり、それと同時に、一方の原因が極めて明らかであるならば、似たような原因がもう一方でも作

このようにハーシェルは、すでに説明された類似の現象とのアナロジーを想定していくことが研究方法として有効であると考えていた。ただし、その目的はあくまで自然現象の「真の原因」を探究することに定められており、これは実証主義的な方法論では放棄されたことであった。例えば力学的な例として、ハーシェルは、投石器を使って手のまわりで石を振り回す際に、その石が円軌道を描く原因がひもの張力であることがわかっているならば、月が地球のまわりで円軌道を描く原因についても、物質的な裏付けはないにせよ、何らかの力が月と地球のあいだにはたらいていると考えることは自然なことである、と述べている¹²⁷。このアナロジーでは、投石器のひもに対応する万有引力の原因として、不明ではあるが何らかの存在が想定されている。すなわち、この投石器のアナロジーでは、視点があくまで現象の原因に向けられている。また、ハーシェルは電磁気現象についても、電気と磁気の極の性質についてのアナロジーを指摘している¹²⁸。このアナロジーも、前述のデーヴィーのアナロジーと同じような、事物の観念についてのアナロジーであった。

第1章で論じた遠隔作用説の限界は、ポアソンの「力学的＝分子論的」な研究の限界でもあった。そして、その限界を克服する新しい方法として、「分析的＝実証主義的」な研究が重視されるようになっていった。実証主義的な研究では、作用そのものをその物質的な原因から独立させて議論の対象とした。このように、物質的な原因を明らかにすることを研究目的から外すだけでなく、原因についての議論そのものを研究方法において放棄するという立場は、従来の「説明」のあり方そのものに対して認識の変更を迫るものであった。

従来の力学的な説明は、機械的な実在物や中心力を備えた分子を作用の原因として仮定することで、その作用を説明しようとする方法であった。しかし、実証主義的な方法では、そのような力学的な原因についての議論を排除して、あくまで作用の法則性そのものを議論の対象とすることが目指された。この議論の対象の変化は、推論の方法として力学的なモデルを想定していたところに、力学的な原因や構造からは独立した、より自由なアナロジーの利用可能性を切り開いていった。この新しい実証主義的なアナロジーでは、現象の作用を数学的に表現することが目指され、この新しい方法の可能性は、とくに力学と化学の中間領域にあって研究方法の定まっていなかった電磁気学の分野で有効にはたらくことになる。

19世紀半ばになっても、電磁気についての知識の多くは不完全な状態にあった。19世紀に入って研究は大きく進展していったが、その進展は電気と磁気の相互作用などのまったく新しい現象が発見されたことによるものでもあり、それによって説明を必要とする現象の数は増大することになった。すなわち、研究が進展するにしたがって、ますます総合的な理解を得ることが困難な状態に陥っていったのである。ファラデーは、これらの新しい

用していることを受け入れることを拒むことは、それ自身ではそれほど明らかではなくても、ほとんど不可能となる。」(Ibid., 149.)

¹²⁷ Ibid., 149.

¹²⁸ Ibid., 339-40.

現象に説明を与えるために、電磁気作用を力線によって表現し、その原因を説明するために近接粒子などの考え方を導入することになった。その一方で、トムソンやマクスウェルは、このファラデーの表現方法だけに注目し、アナロジーを活用することによって、それらを数学的に表現し直そうとしたのであった。

このトムソンやマクスウェルの研究は、ファラデーの電磁気学研究を数学的・力学的な観点から理解する上で極めて重要となる。しかし、本論文においては、まずはファラデーの研究内容そのものを分析することが必要であり、彼らの研究についての分析は第7章以降で改めて進めることにする。

この第2章までで、ファラデーにおける「力」と「粒子」との関係について分析するための歴史的な背景の分析と整理を一通り進めてきた。次章からは、この章までの議論を踏まえながら、ファラデー自身の電磁気学研究について分析を進めていくことにしたい。

第3章 ファラデーを育んだ環境

ファラデーの電磁気学研究を分析していくにあたって、第1章では、18世紀以降のニュートン力学の展開と関連づけながら、近接作用説と遠隔作用説の違いとそれぞれの限界について論じた。さらに第2章では、19世紀の実証主義における作用の原因についての議論を踏まえて、物理学と力学との関係について論じ、さらにその方法論がアナロジーに対して新たな重要性を見出していったことを指摘した。ここからは、以上の議論を踏まえてファラデーの研究内容を具体的に分析していきたい。そのため、まずはこの章で、青少年期から王立研究所でデーヴィーの助手として研究をおこなうまでの、ファラデーの研究を基礎づけた要因について一通り明らかにしておきたい。とくに、その吟味を進める上では、ファラデーの初期の研究で「力」と「粒子」がどのように扱われていたかという点に注目したい。第4章以降で論じるように、ファラデーの電磁気学研究は1830年代になってから本格的に進められていくが、このときファラデーは四十代になっている。しかし、この四十代からの電磁気学研究は、この章で論じる三十代までのさまざまな要因によって基礎づけられていたと考えられるからである。

3.1. ファラデーの生まれた時代

ファラデーは1791年9月22日に、ロンドン近郊南部のニューイントン・バツツで生まれた。当時は1789年に始まったフランス革命が進行し、ヨーロッパ社会全体に大きな動揺を与えていた時期である。このフランス革命は、科学の世界にも大きな影響を与える出来事であった。フランスでは、革命によって失われた研究者を補い、さらに科学技術によって国力を増進していくために、エコール・ポリテクニク (École Polytechnique) や国立学士院 (Institut National) の設置による科学の制度化が進められていた。

イギリスでも科学の制度化や職業化は進み始めていた。ファラデーの生涯にわたる活躍の場となった王立研究所は、その代表的な存在である。イギリスではフランス革命と産業革命という二つの革命の影響を受けて、階級間の緊張緩和なども念頭に置かれながら、農業や産業の振興が図られていった。そのような状況の中で、地主貴族たちを中心として1793年に農政局 (Board of Agriculture) が設置され、続いて1796年には貧民の状態改善協会 (Society for Bettering the Condition of the Poor: SBCP) が設立された。そして、これらの組織によってラムフォード伯 (ベンジャミン・トンプソン) を中心としながら1799年に設立されたのが、ロンドンの王立研究所であった。

ベンジャミン・トンプソンは1753年にアメリカのマサチューセッツで生まれ、植民地軍に従事しながら活躍の場を広げていった。まず、軍事活動に従事する中で、火薬と弾丸の

速度の関係についての論文を執筆し、その研究が認められて王立協会（Royal Society）の会員になるとともに熱の運動説を展開するようになった。

もともと、トンプソンは、熱や光といった自然現象だけではなく政治的・社会的な関心も強く持ち合わせており、植民地軍の情報をイギリス軍に流すという諜報活動もおこなっていた。そのため、トンプソンはイギリス軍が劣勢になると身の危険を感じてアメリカから逃亡し、ロンドンへと逃れることになる。さらにその後、ミュンヘンへと移って軍の司令官や大臣などを歴任し、軍事や産業に関連する慈善事業を展開する一方で、ストーブなどの生活用品の改良などにも取り組み、熱運動説の根拠となる砲身切削の実験などもおこなった。

これらの活動が認められて、トンプソンはイギリスのジョージ三世から爵位を授かるとともに、バヴァリア選帝侯からも爵位を与えられて「ラムフォード伯」と名乗るようになった。そして、このような社会的な活動の一環としてロンドンへと戻った後に、王立協会の会長であり農政局のメンバーでもあったバンクス（*Sir Joseph Banks*, 1743-1820）や慈善事業家のバーナード（*Sir Thomas Bernard*, 1750-1818）をはじめとする SBCP の委員たちと意気投合して、上流階級からの出資を募ってロンドン中心部のアルバマール通りにある建物を買取り、王立研究所の設立準備を進めていったのである¹。

以上の設立経緯からわかるように、王立研究所は、上流階級による救貧のための慈善事業としての性格を持ち、そこでは農学を中心としながら、産業や生活用品の技術改良などを視野に入れたさまざまな分野の講義がおこなわれた。王立研究所の設立目的は、その第一回設立準備会議の冒頭で「知識の普及と、有用な機械的発明とその改善の一般的な導入の容易化、そして哲学的な講義ないし実験の課程を通じて、生活の共通目的への科学の応用について教育をおこなうため」²と掲げられている。そのため、化学の研究も当初は農業などの実用的な技術を学問的に基礎づけるためにおこなわれていた。しかし、社会の関心に対応することによって寄付や聴講者数を増やしたいという経営上の思惑もあり、次第に化学の基礎的な分野にも力が入られるようになっていった³。そして、その分野での中心的な役割を担っていったのが、デーヴィーであり、ファラデーであった。

また、科学に対する新しい社会的な動きはケンブリッジでも進められていた。当時、イギリスの科学はアマチュア的であり、数理科学教育を制度的に展開していたフランスに比べて専門性において大きく遅れを取っているという意識があった。このような状況を改善すべく、ハーシェル、バベッジ（*Charles Babbage*, 1792-1871）、ピーコック（*George Peacock*,

¹ 1.3.2節で取り上げたヘンリー・キャヴェンディッシュも、親戚である第5代デヴォンシャー公が経営者の一人であったことから王立研究所の準備委員になっていた。

² *Archives of Royal Institution*, 1:1; Faraday to Charles Richard Weld, 20 March 1848, *Correspondence*, 3:680-1.

³ 王立研究所は所属する教授陣に給与を支給しており、そのような観点からしても科学の活動をアマチュア的な営みから専門職業的ないし功利主義的な営みへと変える性格を持っていた。その王立研究所における代表的な人物が、ブランドである。ブランドは薬剤師を親に持ち、医学を学んだ後に王立研究所の化学教授となった。そして、医学生に化学を教えるかわら、天然ガスなどの実用的なテーマから化学研究を進めていった。（*Berman, Social Change and Scientific Organization*, 100-55.）

1791-1858) は、1812年にケンブリッジで解析学会 (Analytical Society) を組織する。それにヒューエルやエアリー (George Biddell Airy, 1801-92) が加わり、ニュートン力学を発展させたラプラス的な「力学的=分子論的」研究とともに、フランスの数学者ラクロワ (Sylvestre F. Lacroix, 1765-1843) の『微分積分論 (Traité du calcul différentiel et du calcul intégral)』の翻訳を進めるなど、フランスの新しい解析的方法を導入した「分析的=実証主義的」研究にも積極的に取り組んでいった。そして、ケンブリッジ大学におけるこれらの学術的な動向によって、いわゆる「ケンブリッジ・ネットワーク」が形成され、1820年代からは数学を用いた物理学を発展させるための教育制度改革がケンブリッジ大学を中心に進められていった⁴。この結果、本論文でも取り上げることになるグリーンやストークス (Sir George G. Stokes, 1819-1903)、ウィリアム・トムソンなどが輩出されることになった。また、ファラデー自身も彼らケンブリッジの研究者たちとは親密な関係を持つようになった。

前述のように、イギリスの科学界では、王立協会の当時の実情に代表されるように大衆化は進んでいたが、その反面で専門化ないし制度化があまり進んでいないという意識があった。バベッジは、その状態を1830年に出版した著書『イギリスにおける科学の衰退とその原因についての考察 (Reflections on the Decline of Science in England and on Some of Its Causes)』において批判し、議論を呼ぶことになる。しかし、このイギリスにおける科学の大衆化は、ファラデーに活躍の場を与えることにもなった。

それでは次節で、ファラデーが青少年期を通して科学の基本的な素養を育んでいった過程について概観していきたい。

3.2. 感覚できないものへの探究:ファラデーの徒弟時代

この節では、ファラデーが王立研究所に雇われる以前に受けていた知的影響について整理しておきたい。ファラデーは青少年期を書店の徒弟として過ごした。ファラデー自身が「私の教育はほとんど初等的なもので、読み書き算術の初歩を普通のデイ・スクールで学んだくらいのもので、放課後の時間は家や外の通りで過ごしました」⁵と述べているように、ファラデーの科学についての知識は、高等教育ではなく基本的に独学で得られたものであった。ファラデーは、ロンドンで書籍販売や製本業を営んでいたリーボウ (George Riebau, 1757-1824) の下で1812年まで徒弟生活を続けた⁶。ファラデーの友人であったアボ

⁴ Cannon, *Science in Culture*, 29-71. この「ケンブリッジ・ネットワーク」には人文系の学者も幅広く関わっており、カントやシェリング、ゲーテ (Johann Wolfgang von Goethe, 1749-1832) などのドイツ観念論やロマン主義文学の受容も進んだ。ここにはコールリッジも関係しており、間接的にデーヴィーにも影響を与えることになった。

⁵ Jones, *Life and Letters of Faraday*, 1:9.

⁶ ファラデーは1804年に給仕として新聞の集配業務を担当することから始め、1805年から製本職の徒弟になった。(Jones, *Life and Letters of Faraday*, 1:10-1.) なお、リーボウは革命を逃れてフランスから来た移

ット (Benjamin Abbott, 1793-1870) によると、ファラデーは当時の学習の様子を次のように語っていたという⁷。

ファラデーは「徒弟をしているあいだ、私は手もとにある科学の本を読むことを好み、中でもマーセットの『化学についての会話』と『エンサイクロペディア・ブリタニカ』の電気の論文に喜びをおぼえた。そして、一週間あたり数ペンスほどの金額をかけて簡単な化学の実験装置をつくった。最初はガラスの小ビンで、後に本物のシリンダーを用いて、それと関連する電気の器具も用いながら、電気の実験機器も組み立てた」と自ら語っていた。そして、彼は友人に、ウォッツの『精神について』が彼の思想を最初に形成し、彼が製本に携わったエンサイクロペディアの「電気」の項目によって自分の注意が科学に向けられるようになった、と語っていた⁸。

この回想から、ファラデーが影響を受けた主要な文献として、ウォッツ (Isaac Watts, 1674-1748) の『精神の向上 (*Improvement of the Mind*)』⁹とマーセット (Jane Marcet, 1769-1858) の『化学についての会話 (*Conversations on Chemistry*)』¹⁰、そして『エンサイクロペディア・ブリタニカ』の三冊をあげることができる。ファラデーは書店の徒弟であったこともあり、多くの本や雑誌から化学や電気を中心とした知識を学ぶことができる有利な環境にあった¹¹。しかし、この三冊はファラデー自身もそれ以降とくによく言及しており、彼が

民であった。18世紀から19世紀にかけて、書店は大衆に対する知識の発信源であった。当時の記録はあまり残されていないが、数少ない関係者の証言から当時の状況を推し量ることはできる。(James “Tales of Benjamin Abbott.”) 代表的な資料としては、王立研究所の事務局長であったベンス・ジョーンズがファラデーの死後に書簡や講義ノートをもとにまとめた自伝 (Jones, *Life and Letters of Faraday*.) がある。また、徒弟時代の書簡からも当時の様子を知ることができる。この節でも、これらの資料を踏まえながらファラデーの青少年期についての分析を進めている。

⁷ ウィリアムズがファラデーの伝記 (Williams, *Michael Faraday*.) を執筆する際に、ベンス・ジョーンズの著作 (Jones, *Life and Letters of Faraday*.) からジョーンズが直接ファラデーから聞いたこととして引用したため、近年までは一般的にそのように考えられていた。しかし、科学史家ジェームズの研究により、これはファラデーの没後にジョーンズがアボットに取材したものであることが判明した。(James “Tales of Benjamin Abbott.”)

⁸ Memorandum to Robert Peel, 31 March 1835, *Correspondence*, 2:244; Jones, *Life and Letters of Faraday*, 1:11.

⁹ ウォッツは、1702年にロンドンにある非国教会・会衆派のマーク・レーン教会 (Mark Lane Chapel) の牧師になった。早くから詩の才能を示し、とくに750に上る讃美歌を書き残したことで有名である。この時代のイングランドでは讃美歌が多く作られたが、これは原始教会以来の神秘主義的な伝統を踏まえた敬虔主義に基づくものであり、メソヂスト運動につながるものであった。ファラデー自身も非国教会であるサンデマン派に所属しており、同じような信条を共有していたと考えられる。なお、ウォッツはロックの思想を一般向けに解説する著書をいくつか執筆しており、『精神の向上』はその中でもベストセラーになっていた。

¹⁰ この『化学についての会話』は、1806年の初版から1853年まで16版を重ね、1853年までにアメリカだけで16万部を売り上げるベストセラーとなった。(DNB, s.v. “Marcet, Mrs. Jane”)

¹¹ Jones, *Life and Letters of Faraday*, 1:12-3. なお、ジョーンズによるとファラデーはテイラー (Brook Taylor, 1685-1731) の『線遠近法 (*Linear Perspective*)』に学び、ファラデーの当時のノートには、アッカーマン (Rudolph Ackermann, 1764-1834) の『宝庫 (*Repository*)』からダーウィン (Robert Darwin, 1766-1848) の「熱気用器具 (Pyropneumatic Apparatus) の説明」と「光と色の視覚領域」、*Gentleman's Magazine* から「稲妻」と「電気魚」、*Evangelical Magazine* から「隕石」、*Zoological Magazine* から「噴水」、シュトゥルム (Christoph C. Sturm, 1740-86) の『内省 (*Reflections*)』から「雪の形成」、*Lady's Magazine* から「ガラス栓を緩めるた

大きな影響を受けたことは間違いないと考えられる。

ファラデーがこれらの書籍を通じて研究の基本的な方法論、および専門分野となる化学や電気についての知識を得ていったのだとすれば、その内容にはどのような傾向が存在していたのだろうか。そこで次に、これら三冊の具体的な内容についてファラデーとの関係を踏まえながら分析していきたい。

まずファラデーは、『精神の向上』を日常的に参照し、学習の手本としていたようである。ファラデーの親方であったリーボウは、ファラデーが『精神の向上』を携帯し、つねにその内容を参照していたとして、その様子を次のように語っている。

エンフィールドのエンサイクロペディアを何巻か持ち歩き、ウォッツ博士の精神の向上に言及しながら対象を図解するために、ときにエンジンの絵や機械の図を描いたりしていました。芸術家の工房を訪れたり、ハイゲート・アーチウェイのホロウエー揚水場や、ストランド・ブリッジのウェスト・ミドルセックス揚水場、ジャンクション揚水場などで、珍しい鉱物や植物を採取したり、機械装置をスケッチしたり蒸気機関の力を計算したりしながら、朝の散歩に行くときには、ウォッツ博士の精神の向上を読み、よくポケットに入れていました。彼は製本業にきちんと携わるかたわらで、そうしたことにいつも熱心でした¹²。

このような状況的な証言からしても、『精神の向上』の内容がファラデーに与えた影響は小さくなかったと考えられる。ファラデーはベーコンとともにウォッツの著作から多くの知識を学んだと語っており、この『精神の向上』を「この種の中ではとてもよく、誰もがこれを欠かすべきではない」内容であると極めて高く評価していた¹³。

なお、ウォッツはこの著書の中で「精神の向上」を実現するための方法として「観察 (observation)」「読書 (reading)」「講義 (lectures)」「会話 (conversation)」「瞑想 (meditation)」の五つをあげていた。ファラデーは、このウォッツの五項目に対応させる形で、「会話」「講義」「読書」「観察」「学習 (study)」がシティ・フィロソフィカル・ソサエティの活動、と

めに、『化学についての会話』から「二種の液体を一つの固体にするために」と「酸素ガス」「水素ガス」「窒素と炭酸ガス」「塩素酸ガス」、*Chemical Observer* から「ガルヴァニズム」と「デーヴィー氏が王立協会に発表した化学における偉大な発見—固定アルカリがガルヴァーニ電池で分解されたこと」、および *Literary Panorama* から「ガルヴァニズムとガルヴァノメーターの説明」といった項目が記録されていた。

¹² George Riebau to an unidentified journal, October or November 1813, *Correspondence*, 1:67. なお、「エンフィールドのエンサイクロペディア」は全10巻からなる携帯できる大きさの百科全書であった。内容は、天文学から始まり、言語、法律、地理、論理学、哲学、家政・経済、画法、工芸、自然哲学などが扱われていた。自然哲学（実験哲学）は第9巻と第10巻で扱われ、元素や引力の議論からはじまって人体の構造に至るまで幅広く論じられた。特徴としては磁気を引力の次に論じ、一方で電気やガルヴァニズムはそれとは離れた章で論じられ、それらの関連性は明示されていない。また、力学的力能を「てこ」「車輪と車軸」「滑車」「斜面」「くさび」「ねじ」からなるとして、力学をその複合的なものとして論じていた。(Enfield, *New Encyclopædia, or Circle of Knowledge and Science*, 9:60, 9:78-82.)

¹³ Faraday, *Some Observations*, 9.

くにその会合において持ち回りでおこなわれる講義によって得られると述べている¹⁴。なお、ファラデーはここで「瞑想」ではなく「学習」という言葉を用いているが、ウォッツもまた「瞑想」が一般的には「学習」と呼ばれるものだと説明している¹⁵。

このシティ・フィロソフィカル・ソサエティとは、銀細工師のテイタム（John Tatum, 1772-1858）が毎週水曜日の夕方に自宅で開いていた学習会のことである。この会は、参加者が隔週で講義をおこない、化学についての自然哲学、実験哲学を中心に、解剖学、歴史などのさまざまな分野を対象とした相互学習の場となっていた¹⁶。ファラデーは、このシティ・フィロソフィカル・ソサエティに1810年2月から参加し、その活動を通じて自然哲学の素養を深めていったのである¹⁷。

この「会話」「講義」「読書」「観察」「学習」の五項目は、当時のイギリスでも一般的に受け入れられていた代表的な素養であり、ファラデーの人格形成とも密接に結びついていると考えられる。例えば、会話については、ファラデーはシティ・フィロソフィカル・ソサエティを通じて知り合った友人のアボットとの文通を始めるにあたって、ウォッツに言及しながらその文通という方法の有効性を次のように述べている。

文通を推奨することについて筆を置く前に、(学問を修めることに関するすべての方法において優れている)偉大なるアイザック・ウォッツ博士が、書き手にも読み手にも精神の向上に大変効果のある方法として、文通を勧めていることを述べさせていただきます¹⁸。

また、講義については、シティ・フィロソフィカル・ソサエティ時代はもちろん、彼の王立研究所での講演活動を重視する姿勢にも表れていると言えるだろうし、読書については、まさにファラデーの徒弟先であった製本業そのものと関連している。そして何より、観察の重視は、ファラデーの実験研究に対する姿勢そのものであると言える。ウォッツは観察の重要性を次のように説明している。

ある存在の本質や特性をあらゆる方法を試すことで探し出そうとするとき、あるいは何らかの能動的力能（active power）をかけて、あるいは何らかの原因をはたらかせ、それらがどのような効果を生み出すかについて観察するとき、この種の観察は実験と呼ばれる。すなわち、弾丸を水に投げ入れると、それが沈むことを発見する。そして

¹⁴ Ibid., 9-10. ファラデーはこの「学習」について、「会話」「講義」「読書」「観察」の四項目を知識としてきちんと定着させるために最も重要なものであると論じている。(Faraday, *Some Observations*, 14.)

¹⁵ Watts, *Improvement of the Mind*, 19.

¹⁶ “City Philosophical Society,” *Philosophical Magazine*, 34 (1809): 237-8. Faraday to T. Huxtable, 18 October 1812, *Correspondence*, 1:42.

¹⁷ ウィリアムズは、ファラデーがシティ・フィロソフィカル・ソサエティに参加したことの理由として、ウォッツが講義への参加を推奨していたことをあげている。しかし、この理由にはきちんとした典拠があるわけではない。(Williams, *Michael Faraday*, 12.)

¹⁸ Faraday to Benjamin Abbott, 12 and 13 July 1812, *Correspondence*, 1:3.

同じ弾丸を水銀に投げ入れると、それが浮かぶことがわかる。しかし、この弾丸を皿のような薄くてくぼんだ形に打ち延ばすと、水にも浮かぶだろう。そして、二つの火打石を打ち合わせると、それらは火を生み出すことを発見する。種を大地に投げ入れると、植物に成長する。これらすべてのものは知識の第一の方法に属し、それを私は観察と呼ぶのである¹⁹。

すなわち観察とは力能についての実験と結びついたものであり、これを重視する姿勢はファラデーの生涯にわたる研究を特徴づける共通要素にもなっている。

そして、観察を重視することは、思弁的考察に頼り過ぎないということでもあった。思弁的考察に頼りすぎると、難解なだけの表現で飾られた表面的な議論に陥ることを助長しかねないからである。ウォッツは、このような思弁的で難解な表現を弄することにも注意を促している。

若者に対して最初に指導すべきはこれである。すなわち、言葉と物の区別を折にふれて学ぶことである。諸君が学び始めている物のはっきりとわかりやすい観念を得ることだ。諸君が苦心して得た向上が、難解な表現の寄せ集めにならないように、実ではなく殻ばかり食べ過ぎないように、単なる言葉や名前に満足してはならない。この規則は、すべての科学において暗黙のうちに用いられるものである²⁰。

ここで回避すべき難解な表現とは、ファラデーにとっては数学的方法による表現がそうであったと言える。ファラデーにとって、例えばアンペールの数学的な理論は、難解な表現を用いているが、「実ではなく殻ばかり」の理論であると感じられたのかもしれない。そのため、後述するように、「言葉」に則した数学的方法に対する、「物」に則した実験的方法の重要性を繰り返し主張していくことになる。また、ファラデーはほとんど検討すらおこなっていないが、ドイツ自然哲学の議論なども、このような「難解な表現」に入ると言えるだろう。

その一方で、ウォッツは自分の思考の限界を知るために、真空や原子論といったテーマを通じて無限や不可分性、無理数といった抽象的な概念について深く考察することも推奨していた²¹。この態度は観察の重視とは相いれないようにも思われるかもしれない。例えば原子論は、当時は実証不可能な思弁的な理論に過ぎなかった。しかし、これら真空や原子論といった研究テーマは、ファラデーが生涯にわたって取り組んでいく大きな課題となった。そして、ファラデーはこの実験的観察と思弁的理論の微妙なバランスの中で研究を進めていくことになるのである。真空と原子論についてのファラデーの議論は、第5章や第6章で改めて論じることにする。

¹⁹ Watts, *Improvement of the Mind*, 20.

²⁰ *Ibid.*, 130.

²¹ *Ibid.*, 4-5.

このように、ウォッツが精神の向上のために推奨していた項目は、ファラデーの研究における基本姿勢ときわめて近いものであった。その一方で、ウォッツは幾何学をはじめとして天文学や光学、力学などを推奨している²²。これらの分野を推奨していることは、ファラデーの傾向とは異なるところである。ファラデーは研究において、力学をほとんど議論の対象としていないからである。このファラデーの研究と力学との関係は本論文の大きなテーマであるが、この問題は、まずは彼が受けた教育の問題として理解することができるだろう。ファラデーは高等教育を受けなかったため、数学や力学について専門的な素養を教育によって身につける機会を持たなかった。もちろん、ファラデーは化学についての教育も受けたわけではない。しかし、とくに当時の化学は大衆文化と結びついており、ファラデーもその研究に参加して成果を出しやすい分野だったのである。

このようなファラデーの化学に対する関心は、メアリー・シェリー (Mary W. Shelly, 1797-1851) の小説『フランケンシュタイン (*Frankenstein*)』の主人公であり、化学の知識を応用してモンスターを産み出したヴィクター・フランケンシュタインにも通じるところがある。フランケンシュタインは、インゴルシュタットの大学に進学して化学研究に没頭するようになり、その言葉を借りれば、「この日から自然哲学、とくにその言葉の最も包括的な意味での化学が、ほとんど私のただ一つの仕事になった」²³のであった。

科学史家のゴリンスキーによると、このように新しい化学研究の公共化が進んでいったことは、啓蒙思想との関係において当時の社会的な論争の対象にもなっていた。化学は、例えば、プリーストリやベドゥース (Thomas Beddoes, 1760-1808) といった急進派からは社会の知的発展のために重要な分野であるとみなされていたし、バーク (Edmund Burke, 1729-97) やロビソンといった保守派からは、その健全な発展を阻害する可能性が危惧されていた²⁴。プリーストリは非国教徒であり、アメリカの独立やフランス革命を擁護していたことから自宅を焼き討ちにされている。化学研究はこのように最先端であるがゆえに評価の定まらない、しかしだからこそ注目を集める学問分野だったのである。

19世紀初頭のイギリスでは、デーヴィーがこの化学という分野を代表する研究者であった。『フランケンシュタイン』は、著者のメアリー・シェリーがデーヴィーに影響を受け、化学についての想像力を刺激されて執筆されたという経緯があった。このデーヴィーの影響は、ファラデーが影響を受けたと語っていたマーセット夫人の『化学についての会話』にも及んでいる。そして、力学よりも化学を重視する傾向は、このマーセット夫人の『化

²² Ibid., 218.

²³ Shelly, *Frankenstein*, 51.

²⁴ Golinski, *Science as Public Culture*, 8-9. プリーストリは非国教派の牧師であり、著書『キリスト教の退廃の歴史 (Joseph Priestley. *An History of the Corruptions of Christianity*. London, 1782.)』などで国教派の批判をおこない宗教論争に巻き込まれていった。1791年にバーミンガムの自宅を実験装置ごと暴徒に焼かれてロンドンへと逃れ、さらに1794年からはアメリカに移住した。ベドゥースは化学に精通した医師であり、1798年に呼吸に関する疾病を研究するための「気体研究所 (Pneumatic Institute)」をブリストルに設立した。彼は、その研究所の助手としてデーヴィーを雇用している。(DNB, s.v. "Beddoes, Thomas") 一方、バークは保守派の政治思想家であり、フランス革命を批判したことで有名である。

学についての会話』にも見られる²⁵。

『化学についての会話』では、教師であるB夫人(Mrs. B.)と、生徒であるエミリー(Emily)およびキャロライン(Caroline)との対話形式で化学についての解説が進められる²⁶。その中でB夫人は、化学の力によって産業は活気づけられ、労働は楽なものになってきていることから、化学がとても重要であることを強調している。その主張に対して、エミリーは化学よりも力学の方が重要なのではないかと反論するが、このエミリーの反論に対してB夫人は次のように述べている。

労働をより簡単なものにするにかけは、力学とは独立に多くの方法があり、蒸気機関という最も効果的で素晴らしい機械でさえ、化学の助けがなくては理解することはできません。農業においても、土壌や植物の性質の化学的知識は、大いに有用なものです。生活の快適さや利便性と関連するこのような学芸において、この科学の研究に起因する利点を数え上げると切りがありません²⁷。

このようにB夫人は、化学の重要性が力学に比べて劣るものではないことを強調する。このB夫人の主張は、第2章で論じたような力学を諸科学のモデルとする考え方とは異なり、化学を力学とは独立した学問分野として扱うものであった。

この力学と化学との独立性は、化学の対象となる力が力学で扱われる力には還元できないと考えられていたことにもよっていた。例えばこの『化学についての会話』では、化学的な引力という言葉が従来の親和力に代わって用いられているが、この引力は決して力学的(mechanical)なものではないことに注意が促されている²⁸。すなわち、ここでの化学の力とは、2.3節のヒューエルの議論に出てきた「梃子」や「滑車」の組み合わせによっては説明できない力だと考えられたのである。この考え方はデーヴィーの影響によるものとも考えられ、力についてのデーヴィーの考え方については3.5節で改めて論じることにする。なお、B夫人の知識は王立研究所での講義によって得られたものであるという設定になっており、とくにそれにはデーヴィーの講義が想定されていた²⁹。なお、後述するように、ファラデーもデーヴィーの講義を受けており、さらにそれをきっかけとして王立研究所での職を得ている。

この『化学についての会話』では、第1章で「化学の一般原理について」論じたあと、

²⁵ Faraday to Arther-Auguste De La Rive, 2 October 1858, *Correspondence*, 5:453. この書簡の中で、ファラデーはマーセットの『化学についての会話』で扱われている実験の追試を通じて化学の知識を学んでいったと語っている。なお、ファラデーがマーセットの『化学についての会話』に大きな影響を受けたことも、ウォッツが論じている会話を重視する姿勢との共通点と言えるだろう。

²⁶ エミリー(Emily)という名は、ルソー(Jean-Jacque Rousseau, 1712-78)の有名な「エミール(Émile)」の女性名であり、キャロライン(Caroline)という名は、不真面目な生徒を連想させる名前であったとの指摘がある。(Bahar, "Jane Marcet and the Limits to Public Science," 34.)

²⁷ Marcet, *Conversations on Chemistry*, 4-5.

²⁸ *Ibid.*, 14-5.

²⁹ *Ibid.*, vi.

光と熱の議論へと移る。その光と熱の議論は、基本的には現象を定性的に説明するものであり、幾何光学の研究でおこなわれたように幾何学や力学を応用した説明はなされていない。そして、さまざまな物質を元素に関連づけながら論じ、最終的には動植物の考察へと至る。このマーセットの視点から化学という分野をとらえると、かなり広範囲な自然現象がその研究対象となる³⁰。

この視点からファラデーが化学について学んでいたとすると、ファラデーにとって化学とは、力学ではとらえきれない自然現象を広範囲に研究する、極めて包括的な学問分野であったと言えるだろう。1.2節で論じたロビソンの「力学的哲学」の理解にも表れていたように、力学は可感な原因による運動と力を扱う学問であった。ファラデーもまた力学に対してはこの「力学的哲学」のイメージを共有しており、だからこそ力学には限界があると考えていた。その一方で、化学とは、可感ではない未知の原因についての研究を進める新しい分野であり、だからこそ大きな可能性があると考えたのであろう。

ファラデーは、このように化学という分野に基礎を置くことによって、力学を基礎とするような他の電磁気学の研究者たち、すなわち「遠隔作用説」の擁護者とされた研究者たちとは異なる傾向を持つことになった。2.3節で取り上げた科学の分類の観点からすると、化学は力学とは逆の方向から物理学に接近する分野ということになる。そして、化学は力学とは異なり、自然現象の感覚できない運動を扱う分野であると考えられていた。そのため、思弁的な考察に発展する余地も多分にあった。

ファラデーは、トマス・トムソンの言葉を引きながら、自身が共感する化学という学問分野の特徴について次のように述べている。

私は、化学とは可感ではない運動の科学、すなわち可感な運動を扱う力学とは対照的に、「化学とは、自然の物体における感覚できない運動からなる出来事や変化を扱う」とするトムソン博士の化学の定義に極めてよく満足しています³¹。

³⁰ このように化学の対象が動植物にまで及んでいたことは、その模範となったデーヴィーの研究対象を反映しているためとも言える。3.4節で論じるように、デーヴィーは、王立研究所が農学分野を重視していたことから、動植物から地質まで幅広い研究をおこなっていた。なお、デーヴィーは晩年に『サルモニア (Salmonia: or Days of Fry-Fishing)』というサケやマスのフライ・フィッシングについての著書も出版している。

³¹ Faraday to Benjamin Abbott, 11 August 1812, *Correspondence*, 1:17. トマス・トムソンの『化学体系 (System of Chemistry)』は全5巻からなり、物質の具体的な分析結果の解説がほとんどを占めている。とくに第3巻では親和力や物質の三態、化合と分解など一般的な現象の説明も扱われ、鉱物や植物、動物由来の物質の分析へと進んでいく。なお、ここでファラデーは、トマス・トムソンの「可感なき動きをともなわない (which are not accompanied by sensible motions)」という表現を「可感ではない (insensible)」と読み替えている。

(T. Thomson, *System of Chemistry*, 1:3.) この化学と距離との関係について、ファラデーは1821年に出版した『化学の操作 (Chemical Manipulation)』の序文で「化学」について論じるにあたって、化学の要素 (element) について「それは延長を持つが、本当にとっても小さな距離においてであり、さらに不確かな方式 (manner) においてである」と述べている。(Faraday, *Chemical Manipulation*, i.) このように、化学が微小な距離において引き起こされている現象であることは異論のないところであったが、その原因については、感覚ではとらえられずに不確かであったため、さまざまな見解を生むことになったのである。

すなわち、ファラデーは化学を、力学とは異なり自然現象の感覚できない運動を扱う分野として位置づけており、このことは、ファラデーが化学変化という「運動」の原因を、力学的な原因としての力とは異なる能動的力能であると考えていたことと結びつけて理解することができる。

トマス・トムソンは「科学とは、物体が受けるさまざまな「運動」とその結果としての相互作用の説明である」³²と定義している。そして、惑星など目で見てわかる可感な運動の変化を対象とする分野を力学的哲学として分類する一方で、感覚できない運動の変化を扱う分野を化学として分類し、科学はその二つに区分できるとしている³³。なお、ファラデーが言及している個所で、トマス・トムソンは次のように記載している。

化学は、「可感」な運動をともしなわ「ない」自然の物体における事象や変化を扱う科学である。化学の事象も、力学的哲学に属する事象と同じく多様であり、まったく同じように重要である。それゆえ、その科学は、その下に私たちが直接的に結びつけられ極めて大きな関心を抱いている自然物のほとんどすべての変化を含むのである。化学はそれゆえ、それ自身の目的のためだけではなく、私たちの知識を増進させて自然の造物主の知恵と善との崇高なる開示を私たちにもたらしてくれるがゆえに、大いに注意を傾ける価値のあるものなのである³⁴。

ここでトマス・トムソンは、化学を「可感な運動をともしなわない」と述べているのであり、それが可感ではないにせよ運動であるとまでは述べていない。すなわち、化学現象が運動であると明記しているわけではない。ファラデーがそれを「可感ではない運動」と記憶していたことから、化学現象が力能による運動であることはファラデーの基本認識になっていたことがわかる。

1.2節で論じたように、化学を感覚できない運動を扱う分野であるとするのは、ロビンソンなど当時のとくにスコットランドの自然哲学者に共通する認識であった³⁵。すなわちファラデーにおいて、化学という分野の基本原理は、1.2節で論じたような物質観に基づいて形成されたものであったとすることができる。

さらにトマス・トムソンは、可感ではない距離における粒子の作用が接触力ではないことを前提としており、そのことについて次のように述べている。

水の粒子がそのように組み立てられているように、互いにとても近くて、少なくとも私たちの感覚ではそれらのあいだに距離を知覚できないものがある。それらの持つ性

³² T. Thomson, *System of Chemistry*, 1:1. 「科学 (Science)」は、この「運動」という基準によって、静止状態にある対象の類似性ないし差異を扱う「自然誌 (Natural History)」と区別されていた。

³³ Ibid., 1:2.

³⁴ Ibid., 1:3.

³⁵ Crosland and Smith, "Transmission of Physics from France to Britain," 3-4.

質によってのみ、それらが実際には接触していないことがわかるのだ³⁶。

このように、トマス・トムソンは、可感ではない距離において粒子が遠隔的に作用することを認めており、この考え方にはニュートン力学の影響が認められる。そして、この粒子が遠隔的に作用するかどうかという問題は、5.5節で論じるファラデーの近接粒子の本質的問題点にも発展していく問題である。

化学現象は可感ではない距離における運動を対象とする分野であり、そこでは感覚では接触していると思われる物質も、必ずしも可感ではない距離においても接触していなければならないわけではなかった。物質の作用は、感覚という基準によって区別されていたのである。これは、イギリス経験論における第一性質と第二性質との区別に対応している。すべての現象は第一性質に還元できたとしても、人間に対しては第一性質とは異なる第二性質として知覚されることがあると考えられていた。この違いと同じように、物質の作用の原因となっている第一性質は、必ずしもそれと同じ性質として可感であるとは考えられておらず、むしろ積極的に区別して考えられていたのである。

1.2節で論じたように、コモン・センス学派の物質観において、互いに接触していると知覚される粒子も、感覚できない距離においてまで接触していることは求められていなかった。接触作用を想定する上で、厳密に遠隔作用が否定されていたわけではなかったのである。そして、その可感ではない微小な距離においては特別な力能が作用していると考えられており、化学とはその作用の研究を目的とした学問分野であった。そして、その感覚できない距離における力能の作用を説明する理論として、ボスコヴィッチの原子論が有力視されていたのである。

なお、トマス・トムソンもこの著書でボスコヴィッチの原子論を紹介しており、これもコモン・センス哲学の伝統を踏まえたものであると考えられる³⁷。ただし、トマス・トムソン自身は、この同じ著書でドルトンの原子説も紹介しており、それ以降の研究を原子量という考え方に注目しながら進めるようになる。一方、ファラデーは1812年に、ドルトンの原子説のイメージで原子について語っており、ファラデーがこの時期にトマス・トムソンの影響によってボスコヴィッチの原子論を学んだ明確な証拠はないという指摘もある³⁸。しかし、トマス・トムソンもまたドルトンの原子説に注目していたことを考えると、この時期のファラデーは、逆にトマス・トムソンの影響を強く受けていたと考えることもできるだろう。いずれにせよ、少なくともこの初期の時点では、ファラデーがボスコヴィッチ的な原子論に傾倒していた可能性は低いと考えられる。すなわちファラデーは、デーヴィーの影響や、それ以降の自分の研究の中で考察を進めていくことによって、ボスコヴィッチ的な原子論を形成していったと言える。

このことは、次節以降で展開していく議論の重要性を再認識させてくれるものであるが、

³⁶ T. Thomson, *System of Chemistry*, 1:2.

³⁷ Olson, "Reception of Boscovich's Idea in Scotland," 96.

³⁸ Williams, *Michael Faraday*, 87.

その一方で、ファラデーの考察の基礎として、ここまでで論じてきた物質観や、それに基づく化学観が存在していたことも事実である。当然であると言えるが、ファラデーの物質観はこの初期の段階で定まっていたわけではない。すなわち、この時点のファラデーは、粒子の作用が可感ではない距離において遠隔作用的な中心力としてはたらいっていることは認めながらも、ボスコヴィッチの原子論などの個別具体的な理論に傾倒していたわけではなく、その中間に位置するような不確定な状態にあったと言えよう。

そして、ファラデーは化学についての以上のような意味において、電気現象の研究には化学が不可欠であると考えていた。ファラデーは1821年に出版した『化学の操作 (*Chemical Manipulation*)』の中で、電気と化学の関係について次のように述べている。

例えば、電気の力能は化学の力能と密接に結びついており、それを助けたり阻害したりする上で多大な影響を持っているため、この科学における実験者は、物質の独特でかなり変わった検査の中でその力能に訴え続けることになる³⁹。

このように電気現象は、化学的な研究手法を利用し、物質の化学的な力能の助けを借りることではじめて解明されうるものだと考えられた。すなわち電気の作用は、化学と同じように感覚できない距離で作用する力能によって引き起こされており、力学的な研究手法ではとらえきれないものであると考えられていたのである。

なお、ファラデーが力学的な考え方に批判的な傾向を持っていたことについては、教育上の理由の他に、宗教上の理由も指摘されている。ファラデーはサンデマン派というキリスト教の少数派に所属していた。サンデマン派とは1730年頃にスコットランドの長老派から分離してできた宗派で、聖書を文字通り忠実に解釈するという教義を特徴としていた。ファラデーについて宗教的な観点から研究を進めたカンターは、このサンデマン派の教義に照らして、ファラデーにとっての神とは天地創造に力を与えた源であって力学的な宇宙の設計者などではなく、その力も数学や力学に還元できるようなものではなかったと論じている⁴⁰。カンターがファラデーに求めるほど強い主張ではないが、ヒューエルも同様の見解を示している。ヒューエルは、神の領域である第一原因は人知を超えているため、数学や論理による演繹的推論は不十分なものとならざるをえず、数学あるいは力学は、現象が生起する過程を記述することで自然に法則性を見出しながら第一原因に近づいていくことができるだけだとしている⁴¹。すなわち、数学や力学は真理に近づくことのできる有効な方法ではあったが、それは自然現象の本質が数学や力学によって説明できることを意味していたわけではなかった。

最後に、ファラデーがあげていた『エンサイクロペディア・ブリタニカ』について、フ

³⁹ Faraday, *Chemical Manipulation*, 425.

⁴⁰ Cantor, *Michael Faraday: Sandemanian and Scientist*, 192-3.

⁴¹ Whewell, *Astronomy and General Physics*, 329-42.

ファラデーはその第3版を利用したと考えられている⁴²。『ブリタニカ』の第3版では、それまでは編集者の個人的な著作物という性格が強かったが、第2版までに比べて執筆者や内容が大幅に充実し、この第3版からは執筆陣による集団的な作品としての性格が明確になった⁴³。

その中で、ファラデーが言及していた「電気」の項目は、文筆家のタイラー (James Tytler, ca. 1747-1804) によって執筆された。タイラーは、エディンバラ大学で医学を学んだ後、外科や薬局を開業した。しかし、これらの事業には失敗を繰り返し、そのような生活の中で幅広く文筆活動を始めて『ブリタニカ』の第2版から執筆にかかわるようになった。またタイラーは「気球のタイラー (Balloon Tytler)」としても知られ、モンゴルフィエ兄弟 (Joseph-Michel Montgolfières, 1740-1810; Jacques-Étienne Montgolfières, 1745-99) が気球による初飛行に成功した1783年の翌年に、エディンバラにおいてイギリスでは最初の気球による飛行に成功した⁴⁴。これらの経歴からもわかるように、タイラーは電気についての専門家ではなかった。そのため、彼が執筆した『ブリタニカ』の「電気」の項目は、プリーストリの『電気の歴史と現状 (*History and Present State of Electricity*)』に依拠した幅広い解説になっており、それに加えて当時知られていたさまざまな実験を追加し、紹介する内容になっていた。

もっとも、タイラーの執筆した内容は必ずしも中立的な解説ではなく、例えば電気の原因については一流体説を擁護する内容になっていた。さらに、光と熱と電気は同一の種類のものであり、作用の仕方が異なるだけであるとも説明されていた。具体的には、光は単純な層流であり、熱はそれが収束したものであり、電気は光や熱とは異なり振動をとまなうものであると説明されていた⁴⁵。そして、このように熱や光が物質ではなく運動であると考え、例えばガラスなどの絶縁体が光を通すにもかかわらず電気は通さないという問題を説明することができるとも考えられた。ガラスはある運動の仕方に対して障害物としてはたらくのだと理解すればよいからである。ファラデー自身は、『ブリタニカ』の説明を最初からすべて受け入れていたわけではなかったが、結果的に、少しずつこのような説明に傾いていくことになった⁴⁶。

ファラデーは初等教育しか受けなかったが、そもそも、イギリスでは科学の専門教育の制度化が進んでいなかった。そのため、学校教育よりもこの『ブリタニカ』をはじめとする出版文化が18世紀後半のイギリスにおける知的レベルを向上させていくことに貢献したことが指摘されている⁴⁷。ファラデーも、この節であげたようなさまざまな書籍を通じて科学について学び、4.4節などでも言及するように、その後も『ブリタニカ』を参考文献

⁴² Williams, *Michael Faraday*, 14.

⁴³ 本田『大英帝国の大事典作り』53-4.

⁴⁴ DNB, s.v. "Tytler, James"

⁴⁵ *Encyclopaedia Britannica*, 3rd ed., s.v. "Electricity," 6:451-2.

⁴⁶ Williams, *Michael Faraday*, 15. 例えば、熱の運動説はデーヴィーが主張していたことでもあるし、光や電磁気現象の相互関係を模索することで研究を進めていくことになる。

⁴⁷ 本田『大英帝国の大事典作り』31-3.

として利用しながら研究を進めていった。

もちろん、これらの独学だけでファラデーの科学についての基礎知識が育まれたとは言えないだろう。これ以降さらに、直接の師となるデーヴィーによって理論的な影響が具体的に加えられていったと考えられる。さらに、1820年に電流の磁気作用が発見されたことは、ファラデーの研究全体を方向づけていく重大事となった。デーヴィーとファラデーの影響関係については3.4節以降で論じることにして、次節では、彼らの研究に多大な影響を与えることになった電流の磁気作用の発見とその理論的な解釈について、エールステズとアンペールの研究を取り上げて概観しておきたい。

3.3. 電流の磁気作用の発見

電流のまわりには、それを中心とする円環的な磁気力がはたらいっている。この電流の磁気作用は、コペンハーゲン大学の教授であったエールステズによって、1820年に発見された。この節では、誘導現象についてのファラデーの研究の出発点ともなったこの電気と磁気との関係について、発見当初に進められた主要な研究について説明しておく。とくにその中でもアンペールの理論については、ファラデーは懐疑的な立場を取るようになったが、生涯にわたってその主張を意識し続けることになった。

エールステズは、デンマークのコペンハーゲン大学で物理学や薬学などを学び、カント (Immanuel Kant, 1724-1804) についての研究誌の編集にも携わっていた。1799年に受理された彼の博士論文は、カントが『自然科学の形而上学的原理 (*Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*)』で展開した力学論をテーマにしたものである。その後、エールステズはドイツなどに留学し、リッター (Johann W. Ritter, 1776-1810) の助言もあって電流の化学作用に注目するようになった。また、シェリング (Friedrich W. J. Schelling, 1775-1854) をはじめとするドイツ自然哲学に親しみ、ブダ (ハンガリー) の化学・植物学教授ヴィンタール (Jacob J. Winterl, 1739-1809) が提唱していた酸性とアルカリ性についての物質の相克理論にも強い影響を受けて⁴⁸、そのような観点から理論に体系性を求める傾向を強めていった。

デンマークに帰国した後、エールステズは、カントの「根本力 (Grundkraft)」という概念に基づいて、物質の燃焼や酸とアルカリの中和についての化学研究に着手する。カントは、物質を引力と斥力からなる「根本力」によって規定し、万有引力から化学親和力に至る自然界の諸力を「根本力」の引力と斥力の差異性として解釈していた。このように諸力の根源が同一であると考えれば、電気と磁気の方も互いに変換可能であると考えられるようになる。このカントの「根本力」という考え方がエールステズにも影響を与え、彼の「電

⁴⁸ ヴィンタールは、酸性とアルカリ性の原因物質として、Andronia と Thelycke という根源的かつ相反する二つの物質の存在を仮定した。これは、カント自然哲学の「根本力」という概念に基づいて物質の化学作用を規定したものだと考えられる。(DSB, s.v. "Oersted, Hans Christian," 184.)

気相克 (conflictus electrici) 理論や、電流の磁気作用の発見に結びついていった⁴⁹。エールステズは、電流は二つの相反する電気的状態の平衡とその断絶が連続して繰り返される「電気相克」を引き起こしていると考えた。そして、この連続的な「電気相克」によって周囲に熱や光が生じ、さらには磁気も生じるはずだと考えたのである。ただし、当時の一般的な認識からすると、その作用は原因となる電流と同じ方向に生じるはずだと予想されていた⁵⁰。

エールステズがこのような電流の磁気作用を最初に見出したのは、1819-20年の冬に開講された電気と磁気のアナロジーについての講義においてであった。エールステズは、磁気作用が電流とは異なる方向に生じる可能性を考え、この講義の中で初めて、電流の磁気作用を生み出すことに成功した。しかし、その作用は微弱かつ不規則なものであり、この時点では聴講生たちにもたいした印象を与えなかったし、エールステズ自身もこれが期待していた結果であることを確信できなかった⁵¹。

このように、得られた効果が確信を持っていないほどに微弱なものであり、それに彼自身の多忙さも手伝って、エールステズがその追実験に取り組んだのは、それから3か月以上を経た7月に入ってからであった。エールステズは、改めて実験装置を整えて、電気の流れている導線が磁針の上にあるときと下にあるときでは磁針の受ける力が反転することや、磁針に垂直に配置した導線を磁針に近づけると磁針に仰角が生じることなどを見出した。これらの観察結果から、エールステズは、導線に生じている「電気相克」が磁針の磁極に対して渦巻状に円環的な作用を及ぼしていると結論づけ、その結果を7月21日付の『電気相克の磁針への効果についての実験 (Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam)』と題したラテン語の論文で発表した⁵²。

エールステズは新しく発見した磁気作用が及ぼす作用の方向性を、改めて次のようにまとめている。

相反する電気的な力能が抵抗を示す状況下でぶつかり合うと、それらは新しい形の作用にさらされる。そして、この状態でそれらは磁針に対して次のような作用を及ぼす。正の電気はコンパスの南極を斥けて北極を牽引する。そして負の電気は北極を斥けて南極を牽引する。しかし、この状態で電気的な力能によって引き起こされる方向は、直線ではなく、左手から右に回転する渦巻状のものである⁵³。

⁴⁹ Caneva, "Physics and Naturphilosophie," 48-54.

⁵⁰ Ørsted, "Thermo-Electricity," in *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, 546.

⁵¹ *Ibid.*, 546-7.

⁵² Ørsted, "Experiments on the Effect of the Electric Conflict on the Magnetic Needle," in *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, 413-20. このように電流の磁気作用という新しく発見された現象についてのエールステズの解釈のあり方と、それ以降の研究者たちが進めていった解釈の過程については、グッディングが詳細な分析をおこなっている。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, chap. 2.)

⁵³ Ørsted, "Observation on Electro-magnetism," in *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, 432. この報告は、1821年にロンドンで *Annals of Philosophy* 誌に掲載されたものである。そして、ファラデーも、

この表現からわかるように、電流の磁気作用は、あくまで電気と磁気のそれぞれの極のあいだの作用として認識されていた。しかし、それまでに知られていた極性を持つ力は直線的な作用に還元することができたが、この電流の磁気作用は導線を中心とする円の接線方向にはたらく力であった。そのため、この新しく発見された作用を従来と同じように中心方向の直線的な力に還元することは困難であった。

このエールステズの発見は、ジュネーヴにいたアラゴー (Dominique F. J. Arago, 1786-1853) によって9月4日にフランスの科学アカデミーに報告され、論文そのものもヨーロッパの各国語に翻訳されて、すぐに多くの人々の注目を集めるところとなった。ただし、エールステズがドイツ自然哲学に強い影響を受けて展開した「電気相克」という理論は、これらの国々で十分に受け入れられたわけではなかった。例えばファラデーは、1822年に出版された雑誌の中でエールステズの理論を紹介しながら、「私は[エールステズ]教授の言説の全体を理解することはできていない」⁵⁴といった断りを繰り返し述べており、それ以降もエールステズの理論の正当性を検討することはしていない。このような反応は、イギリスでもフランスでも大差なく、あくまで電流の磁気作用という現象そのものが、新しく発見された極めて興味深い研究対象として注目を集めたのであった。

エールステズの発見がフランスではじめて報告されたのは、前述のように1820年9月4日のことであった。エールステズの発見が科学アカデミーで報告されると、アンペールは率先してその研究に取り掛かった。そして、9月18日までには磁針に対する作用の方向が導線と直交していることを確かめ、その性質を検流計として利用することを考案して「ガルヴァノメートル (galvanometre)」と名づけた⁵⁵。さらに10月2日までには、この検流計を用いて電堆の中でも電流が生じていることを確認し、それまでビオらが支持していた、電堆の起電力を異なる金属の接触による静的なものとして解釈する説に異議を唱えるようになった⁵⁶。

さらにアンペールは、9月末の時点で、磁気が本質的に電流の作用に他ならないと考えるようになっていた。そこで、二つの螺旋状のコイルに電気を流して、それらが磁石と同じように引力や斥力を及ぼし合う様子を観察しようとした。しかし、この実験ではコイルと磁石のあいだでは作用が生じることを観察できたが、地磁気とのあいだではコンパスのような作用を観察することができなかった。さらに、アンペールは二つのコイルを用いて実験していたが、これらは電流の向きが同じ場合には同極が生じて反発し合うという予想に反してわずかに牽引し合い、また、電流の向きが逆の場合には反発し合い、期待とは逆

同時期の1821年から22年にかけて、これと同じ雑誌で電流の磁気作用についての発見の経緯や理論を解説した「電磁気学の歴史的な概略 (Historical Sketch of Electro-magnetism)」という解説を執筆している。

⁵⁴ Faraday, "Historical Sketch of Electro-magnetism," 3:108.

⁵⁵ Ampère, "Mémoire présenté à l'Académie royale des sciences, le 2 octobre 1820," 67. このように電流の磁気作用を原理とする *galvanometre* (galvanometer: 検流計) は、この時点で初めて考案されたと考えられる。ただし、"Galvano-meter" という言葉そのものは、19世紀初頭にすでに用いられていたようである。(Oxford English Dictionary, 2nd ed., s.v. "galvanometer.")

⁵⁶ Williams, "What were Ampère's Earliest Discoveries in Electrodynamics?" 498-9.

の結果が得られたのであった。その一方で、導線を平面的な渦巻状にした場合には、電流の向きが同じであれば両者は牽引し合い、向きが逆であれば反発し合うという結果が得られ、こちらは磁石と同じ反応が得られた⁵⁷。

このように、最初の実験結果はアンペールを困惑させるものであった。しかし、10月にはコイルの先端に磁石と同じように極が生じていることを見出し、円筒形のコイルに流れる電流が棒磁石と同等のふるまいをすることを確認した。アンペールは1827年の論文で、このような円筒形のコイルを「ソレノイド (solénoïde)」と名づけている⁵⁸。また、平行電流が流れる二本の導線が互いに引力や斥力を及ぼすという発見については、実験装置を製作して1820年10月9日の科学アカデミーの会合で演示実験をおこなった。

アンペールは、これら1820年に得られた実験結果を、次の9点にまとめている。

- ① 二つの電流は、互いに平行かつ同方向に流れている場合には引力を及ぼし合い、逆方向に流れている場合には斥力を及ぼし合う。
- ② 平行平板上に電流が流れている二本の導線があれば、それらは互いに同方向になるように振れようとする。
- ③ これらの引力や斥力は、通常の静電気の引力や斥力とはまったく異なる。
- ④ 磁石が鋼鉄の粒子の作用によって生じる電流の集まりであり、これらの要素が両極を結ぶ線に垂直になるように配置されていると考えれば、エールステズが発見した電流と磁石とのあいだの作用のすべては二つの電流の引力と斥力の法則性に帰せられる。
- ⑤ 磁石が地磁気と同じ方向にある場合には、その電流は太陽の見かけの回転とは逆の向きに流れる。逆の方向にある場合には、電流は太陽の回転と同じ向きに流れる。
- ⑥ 磁石が磁石に対して及ぼす作用は、これと同じ法則に従う。
- ⑦ 地磁気が磁石に対して及ぼす作用も、これと同じである。
- ⑧ 磁石の両極に優劣はなく、ただ鋼鉄に磁気を与えている電流が右回りか左回りかの違いである。
- ⑨ 電堆の極と摩擦電気の引力と斥力とを同じ法則に帰したヴォルタの議論と同じように、電流と磁石それぞれの引力と斥力の同一性を示すことができる⁵⁹。

このようにアンペールは電流の磁気作用についての考察を進めることで、それまで磁気を説明するために仮定されていた磁気流体の存在を否定し、永久磁石の磁気作用も、その内部に電流の存在を仮定することで説明できると主張した。ヴォルタ電堆で異なる金属が積み重なって電流が生じていることを参考にして磁石の中にも連続的な電流の存在を仮定

⁵⁷ Ibid., 502-6. ウィリアムズは、このような結果が得られた理由として、導線が被覆されていなかったためにコイルの巻の間隔が広がり、コイルとしての十分な効果が生じていなかったことをあげている。

⁵⁸ Ampère, “Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques,” 267. このフランス語の「ソレノイド (solénoïde)」という言葉は、ギリシア語の「円筒 (σωλήν)」から造語された。

⁵⁹ Ampère, “Suite du mémoire sur l'action mutuelle entre deux courants électriques,” 209-12.

し、それによって全体の磁気作用が説明できると考えたのである。また、地球内部にも同じように電流の存在を仮定することで、地磁気的作用が説明できると主張した。

この時点でのアンペールの議論は、あくまで現象論的なものにとどまっている。しかしその後は、フレネルの助言もあって、磁石を構成する物質の分子そのものが電流を内在していると考えようになっていった。それぞれの分子の周囲に円環電流が生じているとすれば、それらが一方向にそろっている場合には全体で一つの大きな電流が形成されていることと同等になり、全体として磁気が生じることになる。アンペールは、この分子電流が永久磁石に磁力を与えている物質的な原因だと考えたのである。こうして、分子論によって体系づけられた、アンペールの「電気動力学 (électro-dynamique)」が誕生した⁶⁰。

そして、アンペールは 1820 年末から 25 年にかけて、電気動力学の数学的な理論を実験的に導出する研究に取り組んでいく。この数学的な研究は、互いに r の距離にある二つの電流要素 i と i' のあいだには次式のような力がはたらいっていると想定されて展開されていた⁶¹。

$$\frac{ii'(\sin\theta\sin\theta'\cos\omega + k\cos\theta\cos\theta')}{r^n} ds ds'$$

ここで、 θ と θ' は、それぞれの電流要素が両者を結ぶ線となす角を表し、 ω はそれぞれの角が形成する二つの平面がなす角を表す。そして、この式の n と k の値を実験的に同定していくことが、アンペールの主要な目的となった。当初、アンペールは $n = 2$ かつ $k = 0$ となる式を考えていた。しかし、1822 年になって $k = (1 - n)/2$ という関係式を導き、 $n = 2$ であれば、この式からは $k = -1/2$ であると結論づけられることがわかった⁶²。そして、これらの研究をまとめた論文を「実験だけから演繹される電気動力学現象の数学理論についての論文 (Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience)」と題して 1827 年に発表した。

なお、アンペールは 1822 年に、銅環に磁石を挿入することで電流が誘導されることを実験的に見出していた。しかし、それは磁石には反応しない、したがって磁化しないはずの銅の中に電流が誘導されてしまったことになり、アンペールの分子電流理論にとっては不都合な結果であった。この現象を説明するために銅にも分子電流が存在していると仮定すると、磁性体の特殊性を分子電流の整列というアンペールの理論からは十分に説明できなくなってしまう。そのため、アンペールはこの実験をそれ以上進めることはなく、1831 年

⁶⁰ アンペールはファラデーに対して、電流間の相互作用から理論を展開していく独自の分野を「動力的電気論 (électricité dynamique)」と紹介している。(André-Marie Ampère to Faraday, 3 July 1825, *Correspondence*, 1:377.) アンペールは、化学親和力などもこの分子電流の作用である可能性を考えていた。

⁶¹ 例えば、Ampère, “Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques,” 323. を参照せよ。なお、式の中で用いられる文字は論文によって異なっている。例えば角度を表す θ と θ' は、論文によっては α と β が用いられている。

⁶² Hofmann, *André-Marie Ampère*, 302-8. 電流間にはたらく力の式の導出過程については、橋本の研究がわかりやすい。(Hashimoto, “Ampère vs. Biot,” 32-42.)

にファラデーがおこなったように、この現象を磁気の変化による特殊な「電磁誘導」の作用として意味づけることはなかった⁶³。

後にマクスウェルは、以上のアンペールの研究を踏まえて、アンペールの理論や実験が「電気学のニュートンの頭脳」からもたらされたものであると評している⁶⁴。実際、アンペールは1827年の論文でもニュートンを強く意識しているし、彼が導出した電流要素間にはたらく力の式も、万有引力の数学的形式に則したものであると言える。しかし、アンペール自身が述べていたように、電流から及ぼされる力は、それまで一般に知られていた静電気の力とは根本的に異なる性質を持っていた。そのため、電磁気現象に対する従来のニュートン力学的な理論とは異なる解釈が必要とされたのであった。

実際、エールステズの発見がフランスで報告されたとき、ニュートン力学の影響を受けていた多くの研究者たちはその報告を懐疑的に受け止めた。このような評価が一般的である中で、アンペールは率先してその研究に取り組んだのである。このアンペールの積極性は、他のフランスの研究者に比べて際立っていた。

ここで、アンペールのこの積極性を分析するにあたって、彼の経歴を簡単に紹介しておこう。アンペールは、1775年にフランスのリヨンで生まれた。幼少のころから数学に才能を示し、リヨンに新設されたリセの数学教師などを経て、エコール・ポリテクニクやパリ大学などで教鞭をとりながら大学の視学官を務めていた。なお、アンペールは電流の磁気作用が発見される1820年までに数学だけでなく化学（元素）や物理（光の波動論）の研究もおこなっており、1810年以降は塩酸やフッ素の研究をきっかけとしてデーヴィーと書簡のやり取りもおこなっている。そして、アンペールは、次節でも解説するように、デーヴィーとファラデーが1813年にフランスへ渡航した際に彼らと会見している。

以上の経歴からは、1820年以前には、アンペールがとくに他の研究者よりも電磁気現象に注目して研究に取り組んでいた形跡は見られない。元素についての研究は、後の分子論へと結びついていったと言えるかもしれないが、それ以外の思想的な要因を探す必要があるだろう。

このことについて、実は、アンペールは哲学に強い関心を持っていたことが知られている。彼は、フランスでは先駆的にカントの自然哲学を学んでおり、現象の本質として不可知的な「物自体 (Ding an sich)」の存在を想定していたようである。そして、エールステズのように、電流が二種類の電気流体の局所的な分極による振動の連鎖であり、それらの

⁶³ Hofmann, *André-Marie Ampère*, 310-5. その一方で、ファラデーは1822年の時点でこのアンペールの報告の重要性を強く認識し、その再現実験を1825年と1828年に試みていた。しかし、アンペールの実験の報告は「銅環」を「銅の円盤」と勘違いするような表現で英訳されており、ファラデーは銅の円盤を用いて実験をおこなっていた。そのため、どちらの実験においてもファラデーは現象を再現することができなかった。(Williams, "Why Ampère did not Discover Electromagnetic Induction," 310-1.)

⁶⁴ Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, 2:175. マクスウェルは、この評価に続いて、アンペールの法則は実験から導かれたものかもしれないが、その実験による試行錯誤の過程が十分に示されていないと述べ、それに対して、ファラデーの研究はそのような試行錯誤の過程が示されているため「科学的な精神 (scientific spirit)」を学ぶことができると評価している。(Ibid., 175-6.)

合成によってエーテルの作用が生じていると考えていた⁶⁵。

アンペールは、電流の磁気作用を伝える媒体としての不可秤流体の存在について、例えばファラデーに宛てた書簡の中で次のように述べている。

ヤング博士の光の研究やエールステズ氏の発見以来、物理学においてなされてきたことのすべては、この科学に新しい時代を準備するものであり、不可秤流体の運動によって生じる効果から演繹される説明が、今日採用されている、現象の真の原因の発見を知らしめることを計算のための最短方法を与えることよりも軽んじるような説明と、次第に置き換わっていくことでしょう。一般的な事実を説明するためには空間に広がっている流体の運動を見出さねばならず、それは、その細部を知らしめて計算する方法を与えるために実験から演繹される公式に至るものであると私は思っています⁶⁶。

すなわち、アンペールは、電流の磁気作用が発見されたことによってエーテル理論の妥当性が飛躍的に高まると考えたのである。アンペールは、オーギュスト・ド・ラ・リーヴに宛てた書簡でも、アラゴの回転磁気現象に言及しながら、「私たちはこれらの現象すべての真の原因をやがて知るだろうし、空間を満たしており、二つの電気の結びつきによって形づくられ、その二つの要素の振動や結合と分解の連続が光を構成するような流体によって伝わる運動の中にそれを見出すことだろう」⁶⁷と述べている。

そもそもアンペールは、エールステズの1820年の発見を知る以前から彼の論文に目を通して可能性が高いことが指摘されており、アラゴやフレネルの光の波動説を支持して、彼らに対立していたビオやポアソンらの「ラプラス物理学」からも距離を置いていた⁶⁸。この「ラプラス物理学」では、基本的に電気の原因としては電気流体が、磁気の原因としては磁気流体が、それぞれ想定されていた。そうすると、磁気的作用が電気から直接的に生じることは原理的にあり得ないことになる。このように、そもそもアンペールがエールステズの理論に近い考え方を持っており、それに加えて「ラプラス物理学」からは距離を置いていたことが、彼が電流の磁気作用の報告を率先して受け入れたことの原因として考えられる。

⁶⁵ Caneva, "Ampère, the Etherians, and Oersted Connexion," 130-1; Hofmann, *André-Marie Ampère*, 266. すなわち、エールステズとアンペールは、それぞれ化学作用と熱、光、そして電気など自然界の諸力についてエーテルの波動のようなものを想定し、それらを統一的に説明する方法を模索していた。(Caneva, "Ampère, the Etherians, and Oersted Connexion," 128-30.)

⁶⁶ Ampère to Faraday, c May 1825, *Correspondence*, 2:365-7.

⁶⁷ Ampère to Auguste de La Rive, 5 August 1826, *Correspondance du grand Ampère*, 2:686. アンペールは、1824年の書簡では、「電流の引力と斥力が、(ニュートン的な)引力のように、空間全体を満たしている流体の運動の結果ではないということは、はなはだ疑わしいと思います」とも述べている。(Ampère to Auguste de La Rive, 2 July 1824, *Correspondance du grand Ampère*, 2:658.) その一方で、電流を互いに逆方向に進んで通過し合うだけの正負の二流体として扱っている場合もあり、電流についてのアンペールのイメージは必ずしも一つに定まっていたわけではなかった。この点について、1822年にファラデー自身が指摘している。(Faraday, "Historical Sketch of Electro-magnetism," 3:112.)

⁶⁸ Caneva, "Ampère, the Etherians, and Oersted Connexion," 123-30; Hashimoto, "Ampère vs. Biot."

その一方で、ビオはこの「ラプラス物理学」の伝統においてポアソンの電気論を継承していた⁶⁹。このポアソンの電気論は1.3.3節で説明した通りである。そのため、彼もまた他の多くのフランスの研究者たちと同じく、電流の磁気作用の発見に対して最初は懐疑的であった。しかし、その現象が実験によって確かに再現されることを知ると、サヴァール (Félix Savart, 1791-1841) とともに、その電流の磁気作用の精密な測定を進めていった。ただし、彼らはあくまで電流が導線の金属を磁化させて、それによって生じた磁気が導線の周囲に作用していると考えていた⁷⁰。そして、その考え方を踏まえて、電流の磁気作用を受けている磁石の振動を実験的に観測することによって、導線要素から及ぼされる磁気作用が距離の逆二乗に比例するという、いわゆる「ビオ＝サヴァールの法則」を導いたのである⁷¹。

このように、アンペールとビオの研究は、理論的な前提においても研究の方法においても異なっていた。アンペールは作用の平衡状態を実験的に作り出し、想定している現象の一般式の定数を導いていくことに努めた。それに対して、ビオは動的な実験を精密に測定することで、その特殊な場合における作用の法則性を帰納的に導いていくことに努めた。結果的には、アンペールの研究は包括的なものであり、その数学的理論の構築をさらに推し進めていくことができたのに対して、ビオの実験方法は一般法則を導くためには不十分であることがわかり、ビオはその問題を解決できずに電流の磁気作用の研究からは遠ざかっていくことになった。もっとも、アンペールの研究についても、その後のファラデーの電磁回転の実験によって、磁気を電流の作用に還元するというその理論的な前提についての不十分性が認識されるようになっていく。この問題については、3.6節で改めて論じることにはしたい。

この節で論じてきた電流の磁気作用の発見は、ファラデーが電磁気学研究を進めていくにあたって、電気化学とともに大きな影響を与えることになった。次節からの第3章の後半では、電気化学についてのデーヴィーの理論的な解釈に注目しながら、また少し時間を戻して、1820年代までのデーヴィーとファラデーとの関係や、そこから進められていったファラデーの初期の研究について分析を進めたい。

3.4. デーヴィーとファラデー

ファラデーが科学研究に進む上で、その道を開いたのがデーヴィーであった。ファラデーは、1812年に王立研究所でおこなわれたデーヴィーの講義を聴講し、それをきっかけと

⁶⁹ Hofmann, *André-Marie Ampère*, 118-22.

⁷⁰ Hashimoto, “Ampère vs. Biot,” 47-8. ビオが1821年に発表した論文「運動する電気によって金属に刻み込まれた磁化について (Sur l’aimantation imprimée aux métaux par l’électricité en mouvement)」の題にも、このビオの認識が表れている。

⁷¹ Biot, “Sur l’aimantation imprimée aux métaux,” 228-9. この解析はラプラスの助力を得ておこなわれた。

して王立研究所への求職活動をおこなった。その結果、ファラデーは1813年からデーヴィーの助手として王立研究所での職を得ることができた。このような経緯と環境によって、デーヴィーの考え方はさまざまな形でファラデーに強い影響を与えていることが予想される。

デーヴィーは、1778年12月17日にイギリス南西部のコーンウォールで木彫り職人の息子として生まれた。その後、デーヴィーは薬剤師の徒弟となり、その徒弟生活を送るかたわらで熱の運動説につながる研究を手掛けていった。また、この頃より1.2節でも取り上げたロックやバークリ、ヒューム、ハートリ、そしてリードやスチュアートなどのコモン・センス学派の書籍にも親しむようになった⁷²。デーヴィーは当時のノートに次のような哲学的考察を記している。

人間の生活は、感覚、観念、快樂、そして苦痛の継起以上のものではない。科学や知識は、ある秩序において心に想起されうる観念や用語をともなう、多数の観念の連合なのである⁷³。

このデーヴィーの考察には、ヒュームやハートリの観念連合という考え方の影響が強く表れている。そして、このようにイギリス経験論の哲学的考察について学んでいく中で、人間の観念が言語のはたらきに過ぎないというコンディヤック的な言語論も独自にまとめていった⁷⁴。このように、デーヴィーが当時の認識論を踏まえて自然哲学に取り組んでいたとすれば、このころからボスコヴィッチの原子論のような物質観を持っていた可能性も高いと考えられる⁷⁵。この可能性については、次節で改めて論じることにした。

さらにデーヴィーは、1797年末よりラヴォアジエの『化学原論 (*Traité élémentaire de chimie*)』やニコルソンの『化学事典 (*A Dictionary of Chemistry*)』を通じて化学について本格的に学び始めた⁷⁶。そして、1798年にベドゥースがブリストルに設立した気体研究所 (Pneumatic Institution) に入り、ブリーストリが発見していた笑気ガス (亜酸化窒素) の麻酔作用を発見する。また、このブリストル時代には、ドイツから帰国したコールリッジ (Samuel Taylor Coleridge, 1772-1834) と知り合い、ロマン主義的な文学ないし哲学の影響も受けている⁷⁷。

⁷² John Davy, *Memoirs of the Life of Sir Humphry Davy, Bart. LL.D. F.R.S.*, in *Collected Works*, 1:28-9; Hartley, *Humphry Davy*, 12; Knight, *Humphry Davy*, 18.

⁷³ John Davy, *Memoirs of the Life of Sir Humphry Davy, Bart. LL.D. F.R.S.*, in *Collected Works*, 1:29.

⁷⁴ *Ibid.*, 1:29. コンディヤックの言語論的な認識論については2.2節を参照せよ。

⁷⁵ この可能性については、デーヴィーの熱と光の理論からも指摘されている。(Williams, “Boscovich and the British Chemist,” 161.) なお、ラヴォアジエも、ニュートン力学の伝統においてボスコヴィッチのような物質観を有していた。(Levere, *Affinity and Matter*, 24.)

⁷⁶ Hartley, *Humphry Davy*, 12. このニコルソンの『化学事典』を通じて、デーヴィーは化学親和力の極性を意識するようになったと考えられる。(Levere, *Affinity and Matter*, 26.)

⁷⁷ Hartley, *Humphry Davy*, 22-5. ナイトは、デーヴィーがその後継にあたるリッターやエールステズの形而上学的側面には批判的であったことは認めながらも、シェリングから思想的影響を受けた可能性はありうるとしている。(Knight, *Humphry Davy*, 58.) 後述するように、デーヴィーはドイツ自然哲学をきちんと学

1800年になると、ヴォルタによって電堆が発表され、それに続いてニコルソンとカーライルによって水の電気分解が確認された。この相次ぐ発見は電気研究の新時代の幕開けとなり、デーヴィーも電気と化学反応の関係に注目して研究を開始する。その翌年1801年2月に、デーヴィーはラムフォードによってガーネット(Thomas Garnett, 1766-1802)の助手として王立研究所に招かれ、同年6月にガーネットが王立研究所を辞職するとともに講師に昇格した⁷⁸。この1801年には、ヤングも自然哲学教授として王立研究所に雇われている。

デーヴィーは王立研究所に入ると、製革産業のためのタンニンの研究や、化学肥料による土壌改良の研究や技術指導をおこない、研究の範囲を化学だけではなく植物学や地学にも広げていった。その一方で1806年からは電気分解の研究に本格的に取り組み、その研究成果によって1807年には当時イギリスと交戦中であったフランスの学士院より賞を与えられた。さらに、カリウムやナトリウムなどのアルカリ金属やアルカリ土類金属などの元素の単離にも成功する。こうしてデーヴィーは、化学の基礎的な研究を進めるとともに、その実用性についても社会的な認知度を高め、さらに上流階級との交流も深めて、王立研究所の経営に大きく貢献した。そしてデーヴィーは、これらの業績が認められて1812年に爵位を与えられることになり、スコットランドの裕福な未亡人ジェーン・アプリース(Jane Apreece, 1780-1855)と結婚して、名実ともに上流階級の一員となっていった⁷⁹。

一方、ファラデーは、この1812年にデーヴィーが王立研究所でおこなった四回からなる最終講義を聴講する機会を得る。そして、その聴講ノートを製本して自分の力量を示すための証拠として添えて、王立研究所に求職願を提出したのであった⁸⁰。すぐに職があったわけではなかったが、その数か月後にちょうど助手の職に空きができ、ファラデーは翌1813年3月より王立研究所で働くことができるようになった⁸¹。

さらに、ファラデーが王立研究所に入った直後の1813年10月13日から、デーヴィーは夫人やファラデーをともなってフランスやイタリア、スイスを巡るヨーロッパ大陸縦断旅行に出発することになった。この旅行は、前述の1807年にデーヴィーがフランスの学士院より授与された賞を受け取るために計画されたものでもあった。この大陸旅行で、一行はまずパリに滞在し、ベルトレ(Claude Louis Berthollet, 1748-1822)やキュヴィエ(Georges L. C. F. D. Cuvier, 1769-1832)、フンボルト(Frederich Wilhelm H. A. von Humboldt, 1769-1859)、ラプラス、アンペールらと会見した。さらにデーヴィーは、ゲーリュサック(Joseph Louis

んでいたわけではなく、シェリングの哲学も批判している。そのため、シェリングの思想的影響は否定的であると考えられるが、ロマン主義的な傾向については時代の雰囲気として共有していたと言えるだろう。⁷⁸ デーヴィーは、ラムフォードと同じく熱の運動説を支持していた。この点がラムフォードに評価されたものと考えられる。(Ibid., 43.)

⁷⁹ このジェーン・アプリースは、スコットランドの作家ウォルター・スコット(Sir Walter Scott, 1771-1832)の従妹にあたり、文学を通じて社交に熱心な女性であった。

⁸⁰ ファラデーは、王立協会の職を求めてバンクスにも書簡を送っていたが、これに対する返答は得られなかった。(Memorandum to Robert Peel, 31 March 1835, *Correspondence*, 2:245.)

⁸¹ ファラデーは、商業が悪意のある利己的なものと思えたため、科学の道を選んだと述べている。そのようなファラデーに対して、デーヴィーは、科学が「無情な女主人(harsh mistress)」であり、金銭的な報酬を期待することはできないがあきらめないように諭したという。(Faraday to John Ayrton Paris, 23 December 1829, *Correspondence*, 1:497.)

Gay-Lussac, 1778-1850) とヨウ素の単離と同定についての研究競争もおこなった。

続いて、一行はフィレンツェやローマに滞在し、アカデミア・デル・チメント (Accademia del Cimento) を訪問してガリレオの望遠鏡を見学したり、トスカナ公の大口径レンズを用いてダイヤモンドを燃焼させ、それによってダイヤモンドと黒炭との同一性を実証したりした。その後、ナポリでは地学的な関心からベスビオ火山を訪れ、ミラノではヴォルタとも会見している。さらにスイスに向かい、ジュネーヴではド・ラ・リーヴ親子 (Charles-Gaspard de la Rive, 1770-1834; Arthur-Auguste de la Rive, 1801-73) と会見し、ファラデーとド・ラ・リーヴ親子はその後にも書簡を通じて研究についての情報交換をおこなう関係になった。また、ジュネーヴではマーセット夫妻とも会見している。

1814年11月からは、一行は再びイタリアに戻って翌年の3月まで滞在した。当初、デーヴィーはさらにギリシアやトルコなど東方へと旅行を続けることも考えていたようだが、その方面で伝染病が発生していたことや、ナポレオン (Napoléon Bonaparte, 1769-1821) がエルバ島から脱出したことなどを憂慮して帰国を決断することを余儀なくされたのであった。そして、最終的に1815年4月23日にロンドンに帰着した⁸²。

ファラデーは、この旅行には研究助手として同行していたにもかかわらず、デーヴィー夫人から従者として差別的に扱われ、しばしば不満を募らせていた。しかし、貧しい家庭の出自であったファラデーが、イギリスの上流階級の子弟が伝統的におこなっていたいわゆる「グランド・ツアー」を経験できたことは、その後のファラデーの研究内容および人脈に幅を持たせていくことに大きく寄与する意義深いことであった。

大陸旅行から帰国した直後、ファラデーは1815年5月より、実験室の助手および鉱物コレクションと実験機器の管理者になった。そして、その翌1816年に、ファラデーは最初の学術論文「トスカナ地方の生石灰の分析」⁸³を王立研究所の紀要に発表した。また、デーヴィーの助手として鉱山で用いる安全灯の発明にも寄与している。

なお、デーヴィーは、大陸旅行に出発するにあたって王立研究所の化学教授の職を後任のブランド (William Thomas Brande, 1788-1866) に譲り、自身は名誉教授になっていた。デーヴィーはその後にも王立研究所で研究を続ける一方、1820年にはこの年の6月に死去したバンクスの後任として王立協会の会長を務めることになった。なお、この会長選をめぐるのは、電気や化学の研究者であり、「ケンブリッジ・ネットワーク」の中心的存在でもあったウォラストン (William Hyde Wollaston, 1766-1828) がデーヴィーの有力な対立候補となった⁸⁴。ケンブリッジの改革派たちは、デーヴィーではバンクスの旧体制を温存させてしまうと考え、その体制から距離を置いていたウォラストンが会長に適任であると判断していた。結局、ウォラストンは立候補を辞退したが、ハーシェルやバベッジなどのケンブリッジの改革派たちは不満を抱き続け、1830年代前半の「イギリス科学の衰退」論争へと

⁸² Bowers and Symons ed., *Curiosity Perfectly Satisfied*, xiv, 156-64.

⁸³ Michal Faraday, "Analysis of the Native Caustic Lime of Tuscany," *The Journal of Science and the Arts*, 1 (1816): 261-2.

⁸⁴ Miller, "Between Hostile Camps," 27-30.

発展することになった。

デーヴィーは、このような政治的に微妙な立場に置かれながら王立協会の会長を務めることになった。そして、その影響はファラデーとの人間関係にも及ぶことになった。ファラデーは1821年に電磁回転の実験に成功し、1821年10月に自分が編集していた王立研究所の『科学季刊誌 (*Quarterly Journal of Science*)』でその成果を発表した。しかし、この発表のあり方について剽窃疑惑が指摘されることになる。

実は、1821年の最初にウォラストンが王立研究所を訪れ、電気を流した導線が磁石の力で自軸を中心に回転する可能性についてデーヴィーに伝え、その検証実験までおこなっていた⁸⁵。そして、この実験では期待する結果を得られなかったが、ファラデーもその情報を耳にしており、その後にデーヴィーがおこなった実験も手伝っていた。ファラデーは、これらの失敗を踏まえて独自に研究を進めたのであるが、ファラデーはその研究成果を発表するにあたって、論文中でウォラストンの名前に言及していなかったのである。

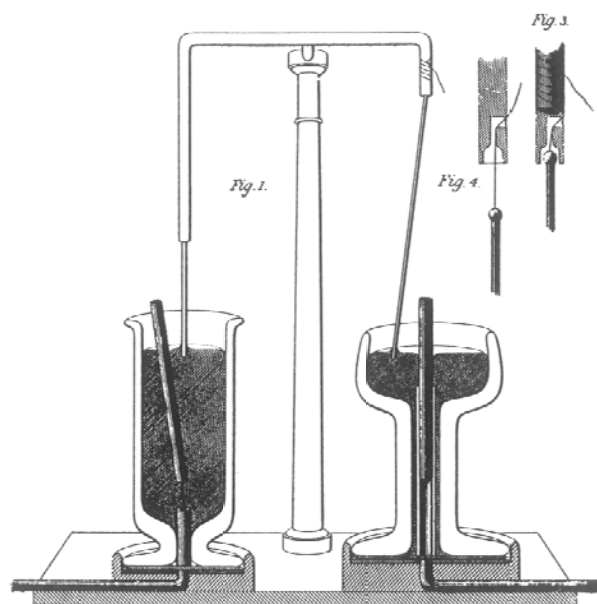


図 13：ファラデーが製作した電磁回転の実験機器。左側の容器では中心に取り付けられた磁石が回転し、右側の容器では導体棒が磁石のまわりを回転する。詳しい動作原理は3.6節を参照せよ。(ERE, 2, fig. 1, 3, 4.)

実際、この件ではウォラストンの考えていた回転は実現できなかったし、ファラデーもウォラストンについて論文で引用すべきかどうか事前に本人に確認しようとしたが、ウォ

⁸⁵ John Davy, *Memoirs of the Life of Sir Humphry Davy, Bart. LL.D. F.R.S.*, in *Collected Works*, 1:280. Davy, “On the Magnetic Phenomena produced by Electricity. In a Letter to W. H. Wollaston, M.D. F.R.S.,” in *Collected Works*, 6:225-7.

ラストンがロンドンを不在にしていたため、事前確認ができずに記載を見送ったという経緯もあった。しかし、やはり何らかの言及があつてしかるべきであり、ファラデー自身も後悔しているように、確認を優先して発表は遅らせるべきであったと言える⁸⁶。デーヴィーはこの件についてファラデーを厳しく非難し、さらにファラデーが塩素ガスの液化に成功した際にデーヴィーが自分の貢献を主張するという別の問題も重なって、この頃から少しずつデーヴィーとファラデーの人間関係は難しいものになっていった⁸⁷。

このようなデーヴィーの態度の変化は、助手であったファラデーの活躍に対する嫉妬として理解されることが多い。しかし、ある程度までは、王立協会の会長としてのデーヴィーの政治的配慮と考えることもできる。例えば、1823年5月にファラデーが王立協会の会員として推薦されたとき、デーヴィーはファラデーに推薦を辞退するように求めた⁸⁸。これは、バンクスのように自分の地位を人事に濫用しているとみなされることを危惧し、さらに王立協会に対して高まりつつあった王立研究所の存在感を弱めるための配慮と考えられなくもない⁸⁹。デーヴィーはこのような心労を重ね、1825年9月に母親を亡くしたところから体調を崩すようになる。そして、1827年11月には王立協会の会長を辞し、最終的には1829年5月29日に旅行先のジュネーヴで客死してしまう⁹⁰。そのとき、彼はまだ50歳であった。

その一方で、1820年代よりファラデーは少しずつデーヴィーとは独自に研究を進めるようになり、その存在感を高めていった。そして、ファラデーは1825年にデーヴィーの後任として実験室管理者になり、さらに1833年には王立研究所に新設されたフラー化学教授職に就任し、他界する1867年までこの職にあった。

3.5. デーヴィーにおける力と粒子

前節で説明したように、ファラデーはデーヴィーの影響が強く及ぶ環境で研究生活を送

⁸⁶ Faraday, "Historical Statement respecting Electro-Magnetic Rotation," in *ERE*, 2:159-62. Faraday to James Stodart, 8 October 1821, *Correspondence*, 1:228-30. なお、1820年にエールステズが電流の磁気効果を発表して以来、アンペールによる電流の相互作用の研究など、新しい研究成果をめぐる国際的な競争が生じていた。

⁸⁷ デーヴィーは自身の論文の中で、ファラデーが発表したこの電磁回転の実験を「巧妙な (ingenious) 実験」であると皮肉を込めて評価している。(Davy, "On a New Phenomenon of Electro-magnetism," in *Collected Works*, 6:258.) デーヴィーは、1811年にベルセリウスに宛てた書簡の中で、自分が同意できなかったドルトンの原子説についても「正しいというより巧妙 (ingenious) である」と同じように評価している。(Davy to Berzelius, 24 March 1811, in Berzelius, *Jac. Berzelius Bref*, 2:23.)

⁸⁸ 結局、ファラデーは翌1824年に王立協会の会員になった。

⁸⁹ Knight, *Humphry Davy*, 7, 135-6. ナイトは、デーヴィーが自身の政治的立場に加えて、ファラデーの剽窃疑惑なども勘案してこのような判断を下したとして、過度にデーヴィーの嫉妬心を想定すべきではないとしている。(Knight, "Davy and Faraday," 43-6.) カノンは、ファラデーがこのような意味においてアマチュア的であり、改革派からは「専門家としての素養」が不十分であると判断されていたと分析している。(Cannon, *Science in Culture*, 171.)

⁹⁰ John Davy, *Memoirs of the Life of Sir Humphry Davy, Bart. LL.D. F.R.S.*, in *Collected Works*, 1:323-4.

り、デーヴィーの助手として熱や電気分解の考察を進めていた。そのため、これらの現象についてのデーヴィーの考え方がファラデーの電磁気学研究の理論的な基礎になっていったことは、十分にその可能性があると考えられる。

前述のようにデーヴィーは王立研究所に入る以前から熱の運動説を擁護していた。当時の熱についての代表的な理論としては、熱の物質説があった。例えばラヴォアジエは、熱をカロリックのような物質と考え、光は熱の効果であると考えていた。しかしデーヴィーは氷の摩擦についての考察から熱を運動と考えるようになり、熱の物質説を否定した。さらに銃の火打石が発光しない場合の実験的考察から、光がカロリックの発散やエーテルの振動であるとする説にも反対した。そして、光を微粒子であるとして、熱はあくまで光の効果であると考えた⁹¹。

一方、前述のように1800年に電堆の発明に続いて水の電気分解という現象が発見され、デーヴィーも電気化学についての研究に取り組むようになった。ヴォルタは電気的作用が異種の金属の接触によって生じていると考えたが、電解質をともなう電池がつくられるようになると、電気は化学変化によって生じているという考え方が一般的になっていった。デーヴィーは、当初は、水が化学変化を起こしているという考え方には懐疑的であったが、どのような容器を用いても酸とアルカリが生じることから、容器ではなく水そのものが電気によって分解されていることを認めるようになる。そして、電気分解によって水素と酸素が一定の割合で析出されることから、電気そのものは独立した物体として流れているのではなく、水の分解の過程で生じていると考えるようになった。こうして、デーヴィーも当初はヴォルタの接触説を支持していたが、実験を進める過程で1806年までには化学変化説を支持するようになっていった⁹²。

このようにデーヴィーは、分解された水の粒子の作用として電気が生じていると考えるようになった。デーヴィーは、この粒子の分解を促す力が伝わる仕組みを次のように説明している。

反発したり牽引したりする活力 (energies) が、流体中に伝導の鎖を確立するために、同種の「粒子から別の粒子」へと伝わり、その結果として移動が起こると考えることはとても自然なことである⁹³。

すなわち、分離した状態は極からの引力や斥力によって生じ、そのような引力は粒子を通じて伝わっていると考えられた。電気によって溶液中に「活力」が生じることで粒子がいたところで分離されるが、分離された粒子はその隣の粒子と再合成する。しかし、その合成した粒子がさらに再び「活力」によって分離され、この過程が繰り返されることで力が伝わっていると考えられた。このような繰り返しの過程について、デーヴィーは、「水

⁹¹ Davy, "An Essay on Heat, Light, and the Combinations of Light," in *Collected Works*, 2:5-32.

⁹² Davy, "On Some Chemical Agencies of Electricity," in *Collected Works*, 5:49.

⁹³ *Ibid.*, 5:29.

の成分の分離や、その鎖の全体を形づくっている中性塩の溶解の場合には、おそらく流体においてくまなく分解と再合成の連続が生じている」⁹⁴と述べている。

さらにデーヴィーは、そのように分解と再合成が連続して生じているとした上で、極でのみ物質が析出する理由を次のように説明している。なお、ここで「表面」とされているものは、王立研究所で使用されていた電気分解の装置の「極板」の表面のことである。

分解と移動の一般的な現象から、水から「酸素」と「水素」が離れて放出されている様子を説明することは容易である。水の一部である酸素は正の表面に引きつけられ、それと同時に他の成分として、水素がそれから斥けられる。そして逆の過程が負の表面で起こるのである。そして、回路の中間あるいは中性の点で、分解と再合成とが連なっているにせよ、末端の点からだけ粒子が活性化されるにせよ、斥けられた物体の新しい組み合わせが存在するのである⁹⁵。

このように、デーヴィーは、電気分解においては分解と再合成の連鎖が生じているため、対となる粒子の組み合わせが必要であると考えた。デーヴィーはこの理論を提示するにあたってリッターの硫酸を用いた実験を引用しており、リッターは水素を発生させずに酸素だけを得ることができたと考えていたが、それは硫黄が溶液中にとどまって生成物の新しい組み合わせが生じたためであると説明した⁹⁶。すなわち、溶液内で生じている化学変化によって何らかの物質が一方向的に発生することはなく、その溶液中の粒子による分解と再合成が量的なつり合いを保ちながら連鎖的に力を伝えていくことで、末端の極でだけその粒子が析出されると考えたのである。

このデーヴィーの理論において、粒子は力が作用する対象であり媒体でもある。引力は、粒子を極へと引きつける遠隔作用でもあるが、粒子間を伝わっていくものでもあった。このように、遠隔作用であるかどうかは曖昧に考えられていたが、これは1.2節で扱った原子論を踏まえると、むしろ当時の一般的な考え方であったと言うこともできる。このデーヴィーの考え方は、次章で詳しく論じるファラデーの近接粒子の理論と極めて近いイメージを持っている。しかし、デーヴィーにおいては、粒子は分離して電極からの引力や斥力によって移動することが想定されており、この点はファラデーの近接粒子の分極の理論とは異なる点であった。

なお、デーヴィーは化学作用と電気の力の類似性を十分に意識していた。極板で析出する酸やアルカリの化学的な力は電気の引力や斥力と「同じ法則に支配されているようだ」⁹⁷

⁹⁴ Ibid., 5:29.

⁹⁵ Ibid., 5:30.

⁹⁶ Ibid., 5:30-1. さらにデーヴィーは、リッターがドイツ自然哲学に影響を受けて独断的な形而上学的議論にとらわれていると非難していた。(Davy, "Historical Sketch of Electrical Discovery," in *Collected Works*, 7:272.)

⁹⁷ デーヴィーは、酸やアルカリの作用と電気の力との関係について次のように述べている。「電気の作用の最も単純な場合では、金属から電気を受け取ったアルカリは、そこから離れて、かならず正に現れる。

と指摘している。そして、この1806年の論文の中では電氣的な力が化学親和力と同一であるかどうかは不明であるとしながら、十分に関連していることは明白であると述べていた⁹⁸。そして、1826年には次のような仮説を提示している。

電気による化合と分解とは、電気の引力と斥力の法則に当てはまるものであり、仮説を進めれば「化学と電気の引力は同じ原因から生み出されるものであり、一方の場合は粒子 (particles) に、もう一方は質量 (masses) に作用するものである。」そして、その同じ性質が、さまざまな加減の下で、異なるヴォルタ的化合によって現れるすべての現象の原因となっているのである⁹⁹。

ここで言及されている電氣的な力とは一般的な静電気のことであり、その力は物質の集合体としての「質量 (mass)」に作用すると理解されていた。その一方で、化学親和力は、元素を単離する過程に見られるように「粒子 (particle)」に選択的に作用すると考えられた。あるいは、粒子 (particle) はその語源的な意味において力の「部分 (part)」的な対象であり、全体的な質量 (mass) とは対照的に理解されていたとも言える。そして、ヴォルタ的化合すなわち電気化学においては、この電氣的な力と化学親和力が組み合わせられて作用すると考えられたのである¹⁰⁰。

なお、デーヴィーは1.2節で論じたような物質観を共有しており、その物質観がこの「質量」と「粒子」との区別にも反映されていると考えることができる。1.2節でも論じたように、「化学親和力 (chemical affinity)」は、ニュートンが『光学』の疑問31で取り上げた主要な論点であった。ニュートンは、「物質の最も小さな粒子は最も強い引力によって凝集し、それより弱い力を持つ、より大きな粒子を構成している」¹⁰¹として、そのような粒子の構成が繰り返されて大きくなっていくことで、可感な物質ができていと論じていた。このように、粒子のあいだの極めて小さな距離ではたらく引力や斥力が「化学親和力」として化学作用をつかさどっていると考えられ、ニュートンの後継者たちにとっての化学研究の対象となったのである¹⁰²。1.2節で論じたボスコヴィッチの原子論でも、このニュートンの

一方で類似の状況にある酸は負である。そして、それぞれが金属に関して電氣的な正と負の活力 (energy) と呼ぶようなものを持っているこれらの物体は、斥けたり引きつけたりするそれらの機能において、よく知られた電氣的な牽引と反発の法則と同じ法則に支配されているようだ。正の活力を保持している物体は正に帯電した表面に斥けられ、負に帯電した表面に引きつけられる。そして、負の活力を保持している物体は、逆の秩序に従っているのである。」(Davy, “On Some Chemical Agencies of Electricity,” in *Collected Works*, 5:33.)

⁹⁸ Ibid., 5:39-40.

⁹⁹ Davy, “On the Relations of Electrical and Chemical Changes,” in *Collected Works*, 6:312.

¹⁰⁰ このようにデーヴィーは、選択的にはたらくという点において化学親和力は電気の力と異なると考えていた。しかし、例えばトマス・トムソンは、デーヴィーのこの区別には十分な根拠がないとして、化学と電気の力が同一のものである可能性が高いと主張していた。(Leverre, *Affinity and Matter*, 108-10.)

¹⁰¹ Newton, *Opticks*, 370.

¹⁰² Leverre, *Affinity and Matter*, 4-22. ジョフロア (Étienne François Geoffroy, 1672-1731) が1718年に発表した「関係表 (Table des différens rapports)」が、この親和力を物質ごとに整理した歴史的に画期的な表として知られている。

な引力と斥力による説明が取り入れられて、中心から感覚できないほどの距離において力の変化が生じていると考えられたのである。

デーヴィーは「化学の知識」について、「それらの作用の知識は私たちの感覚に由来するものであり、それらを表す事実は微粒子論 (corpuscular theory) に分類される」¹⁰³としている。デーヴィーは、この「微粒子論」を次のように説明している。

自然における種々の物体は、単独では感覚では知覚できない粒子や微小部分から組成されている。これらの粒子が似ているときは、それらが構成している物体は単体 (simple) と名づけられ、それらが異なるときは化合物 (compound) と名づけられる。化学現象は、物体粒子の異なる配置 (arrangements) の結果であり、それらの配列を生み出す力能は、斥力ないし熱の作用因 (agency) と引力である。斥力によって物体の粒子は互いに離れようとし、引力によって互いに接しようとする¹⁰⁴。

すなわち、デーヴィーは、粒子は可感なものではなく、引力と斥力を有するものであると考えていた。このようにデーヴィーは、ニュートン的な中心力に基づく物質観を基本的に継承し、粒子の力能によって物質の構成や化学作用を説明できると考えていた¹⁰⁵。ただし、デーヴィーの物質観は、ニュートンが光学で述べていた「固形で、重く、硬く、不可入で可動な粒子」¹⁰⁶を想定するものではない。そのため、デーヴィーの物質観は、ニュートンの物質観というよりも、それを批判的に発展させたコモン・センス学派の物質観に極めて近い。

一方、このようなデーヴィーの物質観とは異なる考え方として、当時はドルトンの原子説が有力視されていた。ドルトンは、物質は異なる原子からなるとして、物質を特徴づけている「元素 (element)」は原子が単純な割合で結合したものであると考えていた¹⁰⁷。そして、原子量を指標とした重量組成によって物質の特徴を説明し、化学変化とは原子の組成変化であると考えた。このドルトンの原子説の立場からすると、例えばベルセリウス (Jöns Jacob Berzelius, 1779-1848) が異議を唱えたように、前述のデーヴィーの「質量」と「粒子」の区別は不合理であると考えられることになる¹⁰⁸。

ただ、このドルトンの原子説では、異なる元素が単離されるたびに原子の数も増えていくことになる。デーヴィーは、このような物質主義的な理論には批判的であり、化学的な性質を決めているものは、その物質の原子の組み合わせだけではなく、むしろ物質に付随する力能であると考えていた¹⁰⁹。例えば、水が温度によって氷や水蒸気にもなるように、

¹⁰³ Davy, *Syllabus of a Course of Lectures*, in *Collected Works*, 2:330.

¹⁰⁴ *Ibid.*, 2:330.

¹⁰⁵ Levere, *Affinity and Matter*, 25-8, 62-4.

¹⁰⁶ Newton, *Opticks*, 375.

¹⁰⁷ ここでの「元素 (element)」とは、物質の性質を決定する最小単位であり、今日的な意味での「分子」に相当する。

¹⁰⁸ Levere, *Affinity and Matter*, 51-2; Berzelius, *Jac. Berzelius Bref*, 2:43.

¹⁰⁹ Knight, *Humphry Davy*, 73.

原子の組成が同じでも物質の性質が異なることがある。デーヴィーは、それが水素と酸素についても同じであると考え、ニュートンやボスコヴィッチに言及しながら、最終的には化学的性質の違いが同じ物質の状態や組み合わせの違いに還元できる可能性を指摘している¹¹⁰。なお、この考え方は、人間における身体と精神のはたらきを念頭に置いて、人間の性質が身体よりも精神に大きく左右されているとする考え方に依拠していた可能性も指摘されている¹¹¹。

デーヴィーは、このように物質の構成要素は極めて単純なはずだという信念を持っており、生涯の研究生活を通じてボスコヴィッチの点原子論を擁護し続けていたとも考えられている¹¹²。科学史家ウィリアムズは、デーヴィーが徒弟時代においてボスコヴィッチの理論を知っていた証拠はないものの、後にボスコヴィッチに言及しながら展開した理論との整合性から考えて、熱運動説を考えていた時点ですでにボスコヴィッチの影響を受けていた可能性があるのではないかと指摘している¹¹³。6.4節で論じるように、後にファラデーもボスコヴィッチに言及しながら独自の理論を展開することになるが、これはデーヴィーの物質観の影響が大きな要因として作用していることは間違いないであろう。すなわちファラデーは、3.2節で論じたようにロックからトマス・トムソンに至るイギリス経験論の物質観に強い影響を受けていたが、さらにデーヴィーによって、その物質観に化学研究に即した具体性が与えられていったと言える。

なお、デーヴィーは、このように粒子の力能によって自然現象を説明しようとしていたため、エーテルなどの不可秤流体の存在には否定的であった¹¹⁴。デーヴィーは、かつては自分もエーテルを想定するような考え方をしていたこともあるとしながら、それらはやはり引力や斥力で説明づけられるべきであると述べている。

私はかつて、この考えを持っていた。それは想像力を満足させるが、理性を満足させることはない。もし、ある流体を仮定すれば、この流体はそれとともに熱を運ぶことになるが、その熱はどこからくるのだろうか。その流体が熱や光になると考えるなら、なぜそれが物体によって強く牽引された瞬間に熱や光に変わるのだろうか。熱は金属から押し出されたものであると言われるが、そこには平衡状態があるはずだ。熱が運動の状態にある物質であり、電気的な変化はこれらの運動によって生み出される引力と斥力の連続であるという理論以外に矛盾のない理論はないのである¹¹⁵。

¹¹⁰ Davy, *Elements of Chemical Philosophy*, in *Collected Works*, 4:364-5.

¹¹¹ Knight, *Humphry Davy*, 80.

¹¹² Levere, *Affinity and Matter*, 43-67; Levere, "Faraday, Matter, and Natural Theology," 97; Knight, *Humphry Davy*, 76.

¹¹³ そのため、ウィリアムズは、デーヴィーが実際の化学研究にボスコヴィッチの理論を用いた最初の研究者であると結論づけている。(Williams, "Boscovich and the British Chemist," 161.) デーヴィーがラヴォアジエの理論に異議を唱えた大きな理由は、塩酸には酸素が含まれないという実験的知見からであった。

¹¹⁴ Levere, *Affinity and Matter*, 44.

¹¹⁵ Davy, *Collected Works*, 8:347-8.

このように、作用を遠隔作用的な引力や斥力に帰する考え方は、デーヴィー自身の電気分解の説明とも共通している。そして、現象を不可秤流体に帰属させる考え方が存在することを、なかばあきれるように批判している。

あらゆるものを流体によらしめることは、あらゆるものを春によらしめる農民のような粗野な考え方である。エーテルは古代の流体であり、そのあとフロギストン流体があった。これまでも磁気流体やガラス流体、樹脂流体があり、ここ最近では音の流体がある。私が最近フランスから受け取ったアゼ氏が出版した本では、すべての自然現象が重力流体によって説明されていた¹¹⁶。

この記述は、自然現象を物質の力能に帰属させようとするデーヴィーのニュートン的な考え方を反映している¹¹⁷。ただ、デーヴィーはこのように理論から不可秤流体を排除しようとしていたが、それに代わる説明を与えることができたわけではなかった。ファラデーは、このデーヴィーの研究を批判的に継承しながら電磁気現象の研究に取り組んでいくことになる。

さらに、このような物質と力についての考え方を進めていくと、自然界の諸力は引力と斥力という同様の形式を持つことになり、そもそもそれらが同じ起源を持つ可能性が意識されるようになる。デーヴィーは物質の凝集力 (cohesion) が重力と同一である可能性を次のように示唆している。

それは、確かに小さな距離ではより大きな活力 (energy) をもって作用するが、流体の微小部分の球の形は、互いに、それらが構成されるあらゆる部分の引力によって生じているのである。そして、それらの引力のほとんどは可感な距離において及ぼされており、私たちの知っている対照的なものとして、重力と凝集力は同じ一般的な引力の力能の単なる変容に過ぎないかもしれないが、一方の場合は容易に測定できるほどの距離ではたらき、もう一方の場合は見積りにくいほどの距離で作用するのである¹¹⁸。

そして、その引力について何らかの未知の物質が直線的に作用しているとする説に言及しながら、その証拠はまだ存在していないとも述べている¹¹⁹。

このようにデーヴィーは、その原因を説明することはできなかったが、少なくともそれらの作用の形式はほぼ同じであると考えていた。1823年にデーヴィーは、自然界の諸力を

¹¹⁶ Ibid., 8:348. ここで批判されているのはフランスの哲学者アゼ (Pierre Hyacinthe Azaïs, 1766-1845) のことだと考えられる。

¹¹⁷ Levere, *Affinity and Matter*, 44.

¹¹⁸ Davy, *Elements of Chemical Philosophy*, in *Collected Works*, 4:47.

¹¹⁹ Ibid., 4:47-8.

アナロジーによって関連づけることは容易であると次のように述べている。

電磁気のような不鮮明な課題について、違いの大小はあれ、熱や光、電気、化学的引力の学説とのアナロジーで結びつけられれば、「仮説」を組み立てることは難しくはない。しかし、その科学は、満足のいく何らかの「理論」の発展を期待できる揺籃期の状態にある。そして、その進歩は、その諸原理の上に広く一般的な推論をおこなう方法を準備するような新たな知識と実験によってのみ確かなものとなりうるのである¹²⁰。

この記述からも、諸力が共通の形式を持っている可能性をデーヴィーが意識していたことがわかる。前述のように、電気と化学の力は密接に関連しており、同一のものである可能性も考えられていた。しかし、それはあくまで仮説に過ぎず、さらなる実験的研究によって批判的に研究されねばならないものであった。

このように、デーヴィーは、自然界の諸力が形式だけでなく本質的にも同一のものであると考えていたようである。そして、このような考え方は、デーヴィーだけでなくファラデーにも共有されていた。諸力の相互関係についてのファラデーの具体的な議論については第9章で改めて論じるが、このような傾向が生じた原因を当時の哲学的考察に求めるならば、ドイツの「自然哲学 (Naturphilosophie)」の影響が考えられるかもしれない。

カントやシェリングをはじめとするドイツ自然哲学は、当時、自然界の諸力についての研究とその哲学的考察に対して一定の影響力を有していた。例えば、前述のリッターは、シェリングの自然哲学から影響を受けており、1800年にハーシェル (Frederick William Herschel, 1738-1822) がおこなった赤外線の見つけを知り、光についての分極やアナロジーについての自然哲学的な考察を踏まえて、1801年に紫外線を見つめることに成功した¹²¹。また、3.3節でも述べたように、エールステズは博士論文ではカントの力学論に取り組んでいる。そして、リッターの影響から電流の作用に注目するようになり、引力や斥力についての「根本力」というカントの考え方によって、電流の磁気作用の見つけや、その現象を説明するための「電気相克」という理論を導いていった¹²²。アンペールもまたカントの自然哲学の影響を受けていたことは、同じく3.3説で指摘したとおりである。

このように、19世紀初頭の自然研究に対するドイツ自然哲学の影響は看過できないものがある。しかし、デーヴィーやファラデーについては、力の相互関係や極性についてアナロジーを用いた研究を進めてはいるものの、ドイツ自然哲学の影響を直接的に受けている可能性は低いと考えられている¹²³。例えばデーヴィーは、カントを「形而上学的な教義」

¹²⁰ Davy, "On a New Phenomenon of Electro-magnetism," in *Collected Works*, 6:257.

¹²¹ Caneva, "Physics and Naturphilosophie," 42-8. ただし、リッターの電気化学研究については、ドイツ自然哲学との関連性は低いと考えられている。

¹²² *Ibid.*, 48-54.

¹²³ デーヴィーに対するドイツ自然哲学の影響については、例えばナイトの論文を参照せよ。(Knight, "Steps towards a Dynamical Chemistry.") デーヴィーはコールリッジとの交流の中でカントなどについて学んでおり、それがファラデーに影響を与えたとする見解もある。(Williams, *Michael Faraday*, 62-7.) しか

であって「似非プラトニズム」であるとして、ベーコンやロック、ハートリの議論に比べて幼稚であると批判している¹²⁴。もっとも、ここで批判の対象とされるべきは、カントではなくシェリングであろう¹²⁵。ただ、このように両者の名前を取り違えていたことから、ドイツ自然哲学に対するデーヴィーの理解は極めて低かったことが伺える。ファラデーについても、自分がドイツ語を理解できないことを繰り返し述べており、ドイツの哲学を学んだ形跡すらない¹²⁶。またファラデーは、1835年にヒューエルから諸力の関係性についてのシェリングの議論を紹介されているが、それに対して目立った反応は何も示していない¹²⁷。以上のことから、デーヴィーやファラデーについては、ドイツ自然哲学の影響は乏しく、ニュートンの伝統を踏まえたイギリス経験論の影響、とくにコモン・センス学派の物質観の影響の方が比べるほどもなく格段に強かったと考えられる。

以上で、電気化学の作用についてのデーヴィーの考え方を整理してきたが、ここで電流の磁気作用についてのデーヴィーの考え方についても整理しておきたい。デーヴィーもまた1820年のエールステズによる発見を受けて追実験をおこない、ウォラストンとともに電磁回転についての研究を進めた。この経緯におけるファラデーとの関係は3.4節でも説明したとおりである。そこでは、磁気の力が極を中心とする作用であることは認識されていたが、その法則性を十分に抽出できてはいなかった。デーヴィーは1820年の秋にウォラストンに宛てた報告の中で次のように述べている。

これらの実験は、集中した電気 (concentrated electricity) が空間を通過するところではどこでも磁気が生み出されるということを明白に示しています。しかし、それらからは、それが生じる正確な状況や法則ははっきりしませんでした。磁石がスチールのやすりくず (steel filings) に作用するとき、これらのやすりくずは両極を取り囲むよう

し、デーヴィーは経験論的な観点からドイツ自然哲学に対して否定的であった。(Levere, "Faraday, Matter, and Natural Theology," 95-7, 100.) 結局のところ、最近の研究では、基本的にデーヴィーやファラデーはイギリスにおけるニュートン力学の伝統にあり、用語の面からもドイツ自然哲学の影響を受けている証拠はないことから、この影響関係については否定的であると結論づけられている。(Caneva, "Physics and Naturphilosophie," 71-74; Levere, *Affinity and Matter*, 29-34.)

¹²⁴ Davy, "Historical Sketch of Electrical Discovery," in *Collected Works*, 7:272.

¹²⁵ このデーヴィーによる「カント」批判はリッターの議論に対する批判の一部としておこなわれているため、リッターの受けた影響関係を考えても「カント」ではなく「シェリング」についての批判であると考えられる。なお、この批判は電気化学についての1810年の講義の中でおこなわれたものであり、コーリッジに代表されるロマン主義的な観念論に対する批判とも取ることができる。(Levere, *Affinity and Matter*, 33-4.)

¹²⁶ Faraday to Ludwig Wilhelm Gilbert, 18 October 1821, *Correspondence*, 1:230; Faraday to Julius Plücker, 11 November 1847, *Correspondence*, 3:649; Faraday to Otto Ernst Julius Seyffer, 19 April 1848, *Correspondence*, 3:689; Faraday to Julius Plücker, 12 June 1848, *Correspondence*, 3:698-9. ファラデーは1846年にも、ドイツ語が自分にとっては「封印された言語 (sealed language)」であると述べている。(Faraday to Christian Ernst Neeff, 24 March 1846, *Correspondence*, 3:490.) なお、ファラデーは、フランス語についてはある程度の素養があった。

¹²⁷ William Whewell to Faraday, 23 November 1835, *Correspondence*, 2:296-7. この書簡で、ヒューエルはまず、シェリングが1832年にミュンヘン王立科学アカデミーでおこなった講演からファラデーの「磁気から電気への転換」ないし「磁気があらゆる電気の効果を生み出せること」を発見したことを称賛している部分を紹介している。

に曲線状に並び、しかし直線状に発散します。そして、互いにくっつくように直線を形成して、スパイクのようになります。ヴォルタ回路の導線のまわりのやすりくずの牽引では、それとは対照的に、それらは重力の影響がなければおそらく完全に円筒形になるような密着したかたまり (mass) を形成します¹²⁸。

ここで、デーヴィーは磁気的作用を「やすりくず」によって可視化して表現し、導線からの作用では、その形状が円形になる様子を観察していた。その一方で、通常の磁石の場合では、曲線的な配置と直線的な発散とが混在していると考えられ、電流の磁気作用と磁石の作用の関係は不明なままであった。しかし、少なくとも「やすりくず」が導線のまわりに円形に配置されることは、導線の軸のまわりで磁気が回転しているというウォラストンの考えを裏付けるものであると考えられた¹²⁹。デーヴィーは、電流による磁気作用の形状を確かめるため、小さな磁針を用いてさらに実験を続けている。

この問題を明らかにし、電気によって正と負の状態に磁化されたスチールの北極と南極の関係を正しく確認するために、短いスチールの針を厚紙の上に直径 2.5 インチほどに円形に置き、互いに近づけ、しかし接触しないように厚紙に糸でとめ、それらが円に内接する六角形の各辺を形成するようにしました。導線はこの円の中心に固定し、それゆえ円は水平になり、その上側は電池の正の側につながれ、下側は負とつながれて、電気ショックが導線を通過します¹³⁰。

このように、さまざまな配置においてこのような磁針を用いた実験を繰り返すことによって、デーヴィーは磁針による作用の「弦が導線のまわりに円を描くであろうことはまったく明らか」¹³¹であると結論づけている。そして、デーヴィー自身は、次に電気の磁気効果と温度との関係についての研究へと移っていった。

ここで、デーヴィーは導線のまわりの磁気の分布を検証していたため、磁気は導線を中心とした円を描くことになった。しかし、デーヴィーが「電気ショック」と述べているように、この円形という形状は、不安定な電流によって観察されたものであった。そのため、配置の検証は容易ではなく、その形状の特定は自然現象の作用は単純なものであるはずだという信念に支えられたものでもあった¹³²。

¹²⁸ Davy, "On the Magnetic Phenomena produced by Electricity. In a Letter to W. H. Wollaston, M.D. F.R.S.," in *Collected Works*, 6:223-4. この引用では *mass* に「質量」という意味があるとは考えにくいことから「かたまり」と訳出した。

¹²⁹ *Ibid.*, 6:224.

¹³⁰ *Ibid.*

¹³¹ *Ibid.*, 6:225. 続いてデーヴィーはウォラストンに次のように伝え、自身は磁気と温度の関係の研究に移るのであった。「そして、今のところこれらの現象は回転する磁気というあなたの考えに合っています。しかし、私はこの課題を止めますので、「協会」への情報としては、問題となっている他の状況や事実に言及して、あなた自身で説明していただければと思います」(*Ibid.*, 6:225-6.)

¹³² グッディングは、デーヴィーがファラデーとともに起こった電流の磁気作用の実験について、そも

デーヴィーは、電気分解を説明するにあたって、粒子間を作用が連続的に伝わっていると考えていた。この考え方は、近接粒子によるファラデーの理論と同じような考え方である。しかしその一方で、デーヴィーは極から粒子に対して遠隔作用的な引力や斥力がはたらいっていると考えており、そもそも電気や磁気の力にせよ、化学的な力にせよ、それらは粒子の中心力として同一の形式を持っているだけでなく、本質的に同一である可能性を考えていた。このように遠隔作用的な引力や斥力によって現象を表現しようと考えていたため、電流からの磁気作用も、直線と円という完全な幾何学図形に帰着させて理解している。これは、1.3節で論じた遠隔作用説の一般的な特徴であると言える。

このようなデーヴィーの考え方は、基本的にはニュートンの影響を強く受けたものであろう。しかし、ニュートンは「固形で、重く、硬く、不可入で可動な粒子」¹³³を考えていたのに対して、デーヴィーは力をその本質とみなすような粒子を考えていた。そのため、デーヴィーの物質観は、ニュートンの影響というよりも、それを批判的に継承したコモン・センス学派の物質観の影響を強く受けたものであると考えられる。電気的作用が「質量」とは区別された「粒子」を対象としているという理解も、ニュートン力学ではなくボスコヴィッチ的なコモン・センス学派の理解に近いと言えるだろう。

ファラデーは、以上のデーヴィーの考え方や実験手法を踏まえながら、まずは電流の磁気作用について研究を進めていくことになる。それでは次節で、デーヴィーの考え方の特徴と比較しながら、1820年代前半におこなわれたファラデー初期の電磁気学研究についてさらに分析を進めていくことにしよう。

3.6. ファラデーの電磁気学研究の出発点

3.4節でも論じたように、ファラデーは、電気分解についてはデーヴィーの研究助手として実験を続けていたわけであるし、エールステズの電流の磁気作用についてもデーヴィーやウォラストンの情報に基づいて実験をおこなった。このように、ファラデーとデーヴィーは弟子と師匠のような関係にあり、電磁気研究についても3.5節で論じたデーヴィーの理論的考察を踏まえて、ファラデー自身の理論的な考察も進められていくことになった。

なお、電気分解の研究については、誘導現象の理論化の本質にかかわる重要課題であり、1830年代になってからの研究でもあるため、次の第4章で改めて扱うことにする。この節では、ファラデーの最初のまとまった電磁気現象の研究であり、しかしデーヴィーやアンペールをはじめとする同時代の考え方を踏襲していた1820年代初めの研究を取り上げる。

そも現象は複雑なふるまいを示すものであり、研究の文化的背景などによって「解釈 (construal)」の違いが生じたと論じている。例えば、ピオはその現象を引力や斥力の作用として意味づけようとしたのに対して、デーヴィーは力能の線の作用として意味づけようとしたと分析している。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 46-55.) なお、グッディングはこの *construe* を認知過程における *interpret* の前段階として位置づけている。(Ibid., 249.)

¹³³ Newton, *Opticks*, 375.

これらの研究は、近接粒子の理論に基礎を置く 1830 年代以降のファラデーの研究とは異質な点が多く、だからこそファラデーが批判的に乗り越えていく出発点として位置づけることができる。

ファラデーもまたデーヴィーと同様に、引力や斥力について論じるにせよ、その力による運動の力学的な関係よりもその作用の配置などを表現しようとする傾向を持っていた¹³⁴。1821 年の電流の磁気作用の実験では、電流ないし磁極のまわりでの円形的作用が想定されており、論文中でもそのように図示されている。このような作用の形状についての理解は、基本的に 3.5 節で論じたデーヴィーの理解と同じものであると言える。この形状を示しているのが、次の図 14 である。

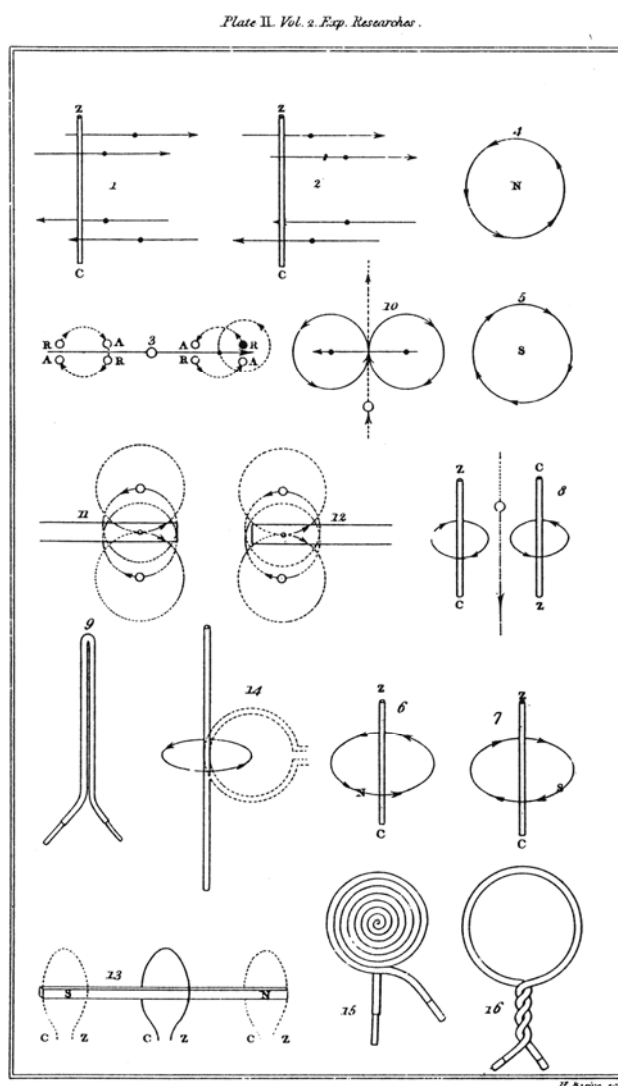


図 14 : 円と直線による作用の線を表したもの。電磁気的作用が磁極のま

¹³⁴ Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 51.

わりを円形に回転する力として考えられていることがわかる。(ERE, 2, plate 2.)

例えば、この図 14 の 4 や 5 は磁極のまわりで電流が受ける回転作用の方向を図示したものである。ファラデーの 1821 年 9 月 3 日から 4 日にかけての研究日誌には、この円形の作用の導出過程が記録されている。そこでファラデーは、図 14 の 1 や 2 のように導線から磁針が受ける力と位置との関係を調べ、磁極のまわりに図 14 の 3 のような形で導線に対する引力 (A) と斥力 (R) が生じていることを観察し、それらの観察結果から磁針が「それぞれの極のまわりで円形に運動している」と結論づけている¹³⁵。また、同年の 9 月 12 日の書簡では、「あらゆる場合において、引力と斥力が極のこの循環による見かけのものに過ぎない」¹³⁶ことを実験的に示すことができたと述べている。

しかし、このように運動が円形であることを実証しようとしても、実際には導線と磁石とが互いに反発し合ったりして、その回転運動を再現させることは難しかった¹³⁷。そのため、図 15 左上にあるように、導線をクランク状にする工夫が考案された。

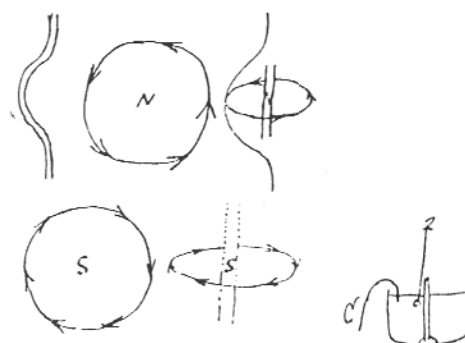


図 15：それぞれの磁極は、電流に対して円運動させる力をおよぼすと考えられるため、その回転運動を持続させるためにクランク状に導線を曲げる工夫（左上）と、さらに水銀を入れた桶を用いて導線が回転できるように工夫した装置（右）（3 September 1821, *Diary*, 1:50.）

¹³⁵ 3 September 1821, *Diary*, 1:49, par. 6. 現象を意味づける過程は、現象と実験者の介入のあり方との相互作用と考えることができる。実際、長さのある磁針は導線のまわりで複雑にふるまうため、デーヴィーやウォラストンとファラデーとでは磁針の動きについての「円形」や「回転」という認識についても、その意味づけのあり方は異なっていた。グッディングは、認知過程に対して「一通りとみなす誤り (one pass fallacy)」に陥っている解釈を批判し、ファラデーの認知過程を分析してダイアグラムとして示している。なお、さらにグッディングは、パトナムの「意味」の議論やデュエム＝クワイン・テーゼなどを引きながら科学哲学的な批判的考察を展開していくが、この科学哲学的な議論は本論文の目的とは外れるため、ここでは基本的に立ち入らないことにする。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 36-62, 87-9, 116-61.)

¹³⁶ Faraday to Charles-Gaspard De La Rive, 12 September 1821, *Correspondence*, 1:223.

¹³⁷ 3 September 1821, *Diary*, 1:49-50, par. 7.

そして、最終的にファラデーは水銀を用いることを考案する。図 15 右のようにロウで底に磁石を立てた桶を水銀で満たし、一端にコルクをつけて浮くように工夫した導線を上側から設置した。この装置によって、磁石の上端部が導線に対して単極のようにはたらく、導線を回転させることに成功したのである¹³⁸。また逆に、二つの導線のあいだでは、図 14 の 8 にあるように、導線の電流の向きが互いに逆であれば磁力が生じ、同じ向きであれば磁力は相殺されることから、電流のまわりでは円形に磁力が生じていると考えられた。そのため、ファラデーは「あらゆることが、磁極と導線のあいだに引力はなく、円方向の運動だけであることを証明する結果になっており、磁石ないしその磁極の導線についてのあらゆる運動はこのことから演繹できるようだ」¹³⁹と結論づけている。

なお、図 13 の実験装置は、ここで用いた実験装置にさらに改良を重ねることで完成したものである。この図 13 の装置では、磁石のまわりで導線が、導線のまわりで磁石が、それぞれどちらも同じように回転する様子を観察できるようになっている。

この作用の形状についての考察は、この実験を発表した 1821 年 10 月の論文において次のようにまとめられている。

導線と磁極とのあいだにはいかなる引力もない。導線は磁極のまわりを、磁極は導線のまわりを、それぞれ回転する。つないだ導線の引力、そしておそらく磁石の引力は、どちらも合成作用 (compound actions) である。真の磁極は棒全体によって誘導される作用の中心である¹⁴⁰。

ここで、「合成作用」の原因とされる導線にせよ磁石にせよ複数形で述べられていることからわかるように、作用の原因はそれぞれ単独では「極」であり、それぞれを中心とする円形の作用を及ぼしていると考えられていた。そして、導線や磁極が引力をおよぼし合う場合は、このような円形作用が複数合わさることで引力が生み出されていると考えられたのである。

このように、導線が円形に運動するため引力がはたらいっていないとファラデーが述べていることは、この回転作用を中心力によるものではないと考えていたことになる。この回転作用は、向心力によって中心に「落下する」作用としては解釈できないほどに、明らかに接線方向の力が生じているように観察された。また、このように中心力を想定していないことは、電流の磁気作用による回転が中心方向とは直交する方向に生じている力によるものであり、ファラデーが完全な円形を想定していたことを裏付けている。そして、ファラデーはその形状について「単純で美しい」という感想を抱いていた¹⁴¹。この時点では、ファラデーも極を中心とする円の接線方向に作用する力を考えており、この見解はデーヴ

¹³⁸ 4 September 1821, *Diary*, 1:50-1, par. 14-16.

¹³⁹ 4 September 1821, *Diary*, 1:51, par. 20.

¹⁴⁰ Faraday, "On Some New Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism," *ERE*, 2:129.

¹⁴¹ Faraday to Charles-Gaspard De La Rive, 12 September 1821, *Correspondence*, 1:222.

ィーと共通するものであった。

そして、ファラデーが物質ではなく力能そのものを作用の本質であると考えていた点にも特徴がある。ファラデーは、1823年の研究日誌には、電磁回転について「その作用は中心にある物質ではなく、単純に電流や磁極と関係しており、その物質は力能に場所(*locality*)を与えているに過ぎないように思われる」¹⁴²とも書き留めている。このように力能を物質とは独立の存在として想定し、それを現象の直接的な原因として考える傾向は、ファラデーの力線の議論や、とくに第6章で論じる光磁気効果の解釈において顕著に現れていくことになる。

なお、3.3節で論じたように、アンペールは磁気が電流の作用に還元でき、磁石は分子電流の作用ではないかと考えていた。そのため、ファラデーの電磁回転の実験を知って、それが自説を裏付ける有力な証拠になるのではないかと期待したのである。しかしファラデーは、少なくともこの電磁回転の現象については、アンペールの分子電流という解釈には否定的であった。そもそも、このような回転運動は、どのような永久磁石の組み合わせによっても生み出すことはできないと考えられた¹⁴³。そのため、ファラデーは、分子電流がそのまま導線に流れる電流と同等になるとは思えず、磁石との相対的な位置関係と電流の通過とが特別に影響して粒子の状態が同じように整うことで、同一方向の回転が生み出されているのではないかと考えたのである¹⁴⁴。

そもそも、図14のfig. 11や12に示されているように、磁極は磁石の末端から少し内側に位置しており、それが導線の回転の中心にもなっているとファラデーは考えていたが、これはアンペールの理論では説明できないことであった¹⁴⁵。また、電流の方向とその磁気作用の方向とのあいだの関係性は単純であるが、その一方で、アンペールの理論の基礎となる二つの電流間の相互作用は、電流の相対的な向きによって同じ電流のまわりで引力と斥力が入れ替わるため、作用の関係性としては複雑であるようにも思われた¹⁴⁶。前述のようにファラデーは、電磁気現象における引力や斥力を、あくまで回転的な力によって引き起こされている見かけの力であるとみなしていた。そのため、磁気を電流の作用に還元することは、数学的には単純化されるかもしれないが、物理的には十分な説明を与えるものではなく、むしろその説明を複雑にしているように思われたのである。

とはいえ、ファラデーは、1820年代においては、電磁気現象に対しては数学によって記述される幾何学的な形状を容認していた。そして1821年の段階では、コイルと磁石の同等性についての確信は深まっているとして、ファラデーはアンペールの理論を必ずしも否定

¹⁴² 21 January 1823, *Diary*, 1:93.

¹⁴³ そうすると、電磁回転の実験では磁気作用とは異なる電流の作用が本質的に重要ということになる。この点については、アンペール自身も認識していた。(André-Marie Ampère to Faraday, 10 and 25 July 1822, *Correspondence*, 1:271-2.)

¹⁴⁴ Faraday to André-Marie Ampère, 2 February 1822, *Correspondence*, 1:251-2. この時点における、アンペールの理論の不十分性に対するファラデーの認識については、ウィリアムズが詳しく議論している。(Williams, "Faraday and Ampère," 88-93.)

¹⁴⁵ Faraday, "Historical Sketch of Electro-magnetism," 3:117.

¹⁴⁶ Faraday, "On Some New Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism," *ERE*, 2:131-2.

的にとらえるわけではなく、実験をていねいに進めていくことでアンペールの理論的な説明の実証性が高まる可能性もあると述べている¹⁴⁷。すなわち、作用の原因についての説明はどうか、現象を表現するための方法としてはアンペールの理論を評価していた¹⁴⁸。しかしその一方で、電磁回転の実験を通じて、少しずつアンペールの理論に疑問を感じるようになっていたことも事実である。ファラデーは、この点について、ガスパール・ド・ラ・リーヴに宛てた 1822 年の書簡で次のように述べている。

その美しさには感心しますが、実験的証拠を絶えずともなっている他の物理学の知識の中にそれらの理論を同列に並べることに、心から同意する気になれません。それは、すべてではないにせよ、ほとんどの現象とかなりよく調和しますが、その中の多くの部分は単なる仮説のように思われるからです¹⁴⁹。

このようにファラデーは、アンペールの理論があくまで現象に対して単純で美しい表現を与えるための仮説に過ぎず、多くの現象を表現することはできるものの物理的な説明としては不十分であると感じるようになっていった。

3.5 節でも指摘したように、作用の形状を特定していくことはそれほど容易なことではなかった。そして、デーヴィーは磁気が電流のまわりに円形に作用していると考えていたわけであるし、またアンペールやエールステズが円形的作用を考えていたこともファラデーは知っていた¹⁵⁰。電流の磁気作用は、原因とその作用点とを結ぶ直線的な引力によるものではなく、むしろそのような直線とは直交する方向にはたらく作用であった。そのため、その作用が「合作用」であるとしても、中心にある電流から近接的に伝わっていく曲線的な力に還元して解釈することは困難であった。このような条件において、当初はファラデーが電流の磁気作用をその原因となる電流を中心とする円環的な作用として考えたことは無理のないことであったと言えよう。

しかし、ファラデーはデーヴィーの死後、1830 年代になって電磁気現象の包括的な研究

¹⁴⁷ Faraday to Charles-Gaspard De La Rive, 12 September 1821, *Correspondence*, 1:222-3; Faraday to Charles-Gaspard De La Rive, 9 October 1822, *Correspondence*, 1:292. この可能性は、むしろアンペールの方が積極的に検討していた。アンペールは、自分の理論の定数を調整すればファラデーの実験結果を説明できると考え、アド・ホックな説明を導入していくことになった。(Williams, "Faraday and Ampère," 93-100.)

¹⁴⁸ Doncel, "Reconsidering Faraday," 53-84; Williams, "Faraday and Ampère," 86-91. ウィリアムズは、ファラデーが 1820 年当時 29 歳で、分析化学ではロンドンで知られるようになっていたものの、電磁気学の研究はほとんどおこなっておらず、アンペールを批判する実績や能力に欠けていた点を指摘している。(Ibid., 85.) ファラデーは 1820 年代には、アンペールと頻りに文通をおこなっていた。アンペールがファラデーに宛てた 13 通、およびファラデーがアンペールに宛てた 9 通の書簡が、それぞれ残されている。(Correspondence, 1.)

¹⁴⁹ Faraday to Charles-Gaspard De La Rive, 9 October 1822, *Correspondence*, 1:292. ここでファラデーは、数学的考察が先行して実験結果がともなっていない点を憂慮していた。ファラデーは、1821 年 9 月 12 日の書簡でも、同じように実証性について疑問視している。(Faraday to Charles-Gaspard De La Rive, 12 September 1821, *Correspondence*, 1:221-3.)

¹⁵⁰ Faraday, "On Some New Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism," *ERE*, 2:128-32, 137-47.

に取り組むようになり、円形などの幾何学的な形状を仮定することから次第に距離を置くようになる。そして、力線によって表現される不規則な曲線的作用を主体とした独自の理論を展開するようになっていった。

次章では、ファラデーがこのように電磁気作用についての新しい理論を展開していく過程を分析していきたい。

第4章 電気緊張状態と誘導

この第4章からは、これまでの議論を踏まえながら、ファラデーの電磁気学研究の中核となる誘導現象についての理論形成過程を分析していきたい。とくにその分析にあたっては、力と粒子に関する表現と説明のあり方に注目することで、第1章で論じた遠隔作用説と近接作用説のそれぞれの限界がファラデーの研究においてどのように問題化され、それに対して、第2章や第3章で論じた物質観や学問観との関係においてどのような解釈が与えられていったのかが明らかになるであろう。

第3章で論じたように、ファラデーは1820年代にもデーヴィーの下で電磁回転についての研究をおこない成果を上げていた。しかしファラデーが、本格的に電磁気学の研究を始めるのは、デーヴィーが他界した後の1831年になってからである。そして、それらの研究は、王立協会の発行する『哲学紀要 (*Philosophical Transactions*)』に定期的に発表され、まとまった時点で論集『電気実験研究 (*Experimental Researches in Electricity*)』として出版された¹。

この1830年代の研究の第一の課題は、誘導現象の解明であった。ただし、ここでとくに問題とされたのは、1.1節で概観したような静電気による誘導というよりも、電流、すなわち運動している電気によって引き起こされる動的で特殊な「誘導」であった。ファラデーは、『電気実験研究』の第一集の冒頭でこの新しい種類の「誘導」を次のように定義している。

緊張している電気がその近辺に反対の電气的状態を引き起こすよう保持している力能は、誘導という一般的な言葉で表わされている。それは科学の言語の中に受け入れられてきたのであるから、それにならって同じ一般的な意味において、電流がそのすぐ近くにある物体に何らかの特殊な状態を誘導するよう保持している力能を表現する上でも用いてよいし、問題はないであろう。私がこの論文でその言葉を用いる目的は、この意味においてである²。

このように、それまでの誘導は、一般に緊張状態にある静電気の作用を意味していたが、ファラデーはその意味を電流による作用へと拡張したのであった。電流による誘導作用とは、電流と磁気の相互作用であり、電気化学作用である。そして、この電流によって誘導される特殊な作用に理論的な表現と説明を与えていくことが、ファラデーの第一の研究目的になったのである。

本論文では、この過程を第4章から第6章にかけて段階的に分析していくが、とくにこ

¹ この『電気実験研究』は、1831年の時点で論集として出版されることが意図されていた。(Faraday to Richard Phillips, 29 November 1831, *Correspondence*, 1:589.)

² *ERE*, 1:1, par. 1.

の第4章では誘導の理論を形成するにあたって最初の段階で注目された「電気緊張状態」の研究について論じたい。

ファラデーは、この「電気緊張状態」を、電流が電気分解や電磁誘導を引き起こす際に生じる状態の総称として位置づけていた。前述のように、18世紀において研究の対象となったのは静電誘導であり、これは静止した電荷が離れたところにある物体に電荷を励起する現象を指していた。それに対して、ここでファラデーが研究の対象としたのは、電流という動的な電気によって生じるさまざまな現象であった。ファラデーは、この二つの緊張状態の違いを次のように区別している。

電気によって示されるさまざまな現象は、比較のために、二つの項目に整理されうるだろう。すなわち、緊張による電気 (*electricity of tension*) に関連するものと、運動している電気に属するものである。この区別は、今のところ哲学的なものではなく、単に便宜的になされるものである。緊張による電気の効果は、静止的で、可感な距離における引力や斥力である。運動している電気ないし電流の効果は、第一に熱の発生、第二に磁気、第三に化学的な分解、第四に生理現象、第五に火花であると考えられる³。

ファラデーは、このように静止した電気によって生じる作用と運動している電気によって生じる作用を区別する。そして、前者については、従来のように引力や斥力の作用として解釈し、後者については電気緊張状態によって生じる特殊な作用と考えたのである。すなわち、この時点では、1.3節で論じた遠隔作用説がはっきりと否定されていたわけではなかった。

それでは次節から、電磁誘導や電気分解についてのファラデーの研究を歴史的な順序を踏まえて詳しく分析していきたい。

4.1. 電磁誘導の瞬間的作用

ファラデーは1831年8月29日より、磁気から電気を生み出すための実験を始める。エールステズの報告によって電流のまわりには磁気が生じることはわかっていたし、アンペールの報告によって電流間には互いの向きの違いに応じて引力と斥力が生じることもわかっていた。アンペールはさらに、磁気が電流の作用に他ならず、磁石の磁気はそれを構成している分子内に生じている電流によって説明できるという理論を発表して議論を呼んでいた。これらの先行研究を踏まえると、理論的な予測はどうあれ、磁気が電気を生み出すような作用が発見できることは十分に期待できるだろう。ファラデーは、この研究の方向性を次のように述べている。

³ *ERE*, 1:78, par. 267.

アンペールの美しい理論が採用されようと、その他の理論であろうと、どのような懸念を心中に抱いても、すべての電流がその流れと直角に相応の強さの磁気作用をともなうが、電気の良導体がこの作用の圏内に置かれたときに、そこに何の電流も誘導されない、あるいはそのような電流の力と等しい可感な作用が生じないことは、とても異常なことであると思われる⁴。

このように、電流には磁気的な作用や電流に対する相互作用が認められていたが、その逆の作用は見出されていなかった。ファラデーは、この作用の非対称性に対して疑問を抱き、磁気が電流を生み出すような作用が存在することを何とかして発見したいと考えたのである。そして以下で論じるように、このような作用が何らかの形で存在することは実験から比較的容易に確認できたが、問題はその作用の全容を把握して理論的な説明を与えることであった。

まず、ファラデーは、外径6インチの軟鉄の輪に二つのコイルを形成するように銅線を巻いた図16左のような実験装置を用意した。

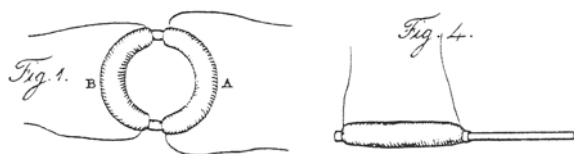


図16：通常の磁石による作用（右）と、電磁石あるいはヴォルタ電流による作用（左）。左の実験ではA側のコイルの電池を接続したり遮断したりすることでB側のコイルに一時的な電流が生じ、右の実験では磁石の出し入れによりコイルに一時的な電流が生じる。(ERE, 1, fig. 1, 4.)

そして、コイルAに電池をつなぎ、コイルBから引き出した導線が3フィート離れたところで磁針の上を通るように設置した。そうすると、コイルAの電流を入れたり切ったりした場合に、磁針がまずは振動し、その後に振動が落ち着いて最初の位置に戻る様子が観察された⁵。すなわち、コイルAの電流の変化が、コイルBの電流の変化を生じさせていることが観察できた。

ただし、この磁針の作用はかなり小さいものであったので、次に3フィート離れたところで導線を螺旋状にして磁針のS極の西側に置いた。そうすると、電池と接続したときには磁針は強く牽引された後に振動して元の位置に戻り、その接続を遮断したときには磁針は強く斥けられた後に振動して元の位置に戻った⁶。これは、コイルを電池と接続したり遮

⁴ ERE, 1:2, par. 3.

⁵ 29 August 1831, *Diary*, 1:367, par. 3.

⁶ *Ibid.*, par. 6-7. ファラデーはこの磁気による誘導電流の発生に成功したことについて、9月23日に友人

断したりするときに、コイル A と B のあいだに特殊な状態が生じているためであると考えられた。

これについてファラデーは、コイル A の電流が生み出す磁気作用によって、このコイル B の電流が生じていると解釈した。そこで、図 16 右のように棒磁石を用いて、電磁石と同じように電流が生じることを確かめる実験をおこなった⁷。その結果、ファラデーは電磁石を用いた場合と同様の結果を得た。この電磁石と磁石の誘導作用の等価性を、ファラデーは次のように説明している。

通常磁石 (common magnets) と電磁石 (electro-magnets) あるいはヴォルタ電流とのあいだの、実質的にはほとんど等しい作用の類似性は、アンペール氏の理論と極めてよく一致して、それを確証するものであり、両方の場合において作用が同一であると信じる力強い理由を与えるものである。しかし言葉の上での区別はまだ必要であろうから、私は通常磁石によって引き起こされた作用を、磁気電気 (magneto-electric) あるいは磁電気 (magnelectric) 誘導と呼ぶことを提案する⁸。

ここで、「通常磁石」の作用とは、図 16 右のように、コイルの中に磁石を出し入れすることでコイルに電流が生じる作用のことであり、「電磁石あるいはヴォルタ電流」の作用とは、図 16 左の二次コイルに電流が生じる作用のことであり、これらの電流を生み出す作用は、磁気の状態が変化するときだけに一時的に観測されるという点に特徴があった⁹。また、磁石であるか電磁石であるかの違いは、前者において少しだけ作用の遅れがあるように思われたが、力としての本質的な違いは存在しないように思われた¹⁰。

その一方で、磁気の変化による誘導電流は、磁極に近づけるととき、そこから遠ざけるとときでは生じる電流の向きが逆になるという特徴があった¹¹。さらに、外部から磁力がかかっていたとしても、それが定常的であれば金属には磁力に対する反応はとくにみられなかった¹²。ファラデーは、「電流は、それが通過するところのそばにある導体中の電気を同じ向きに動かそうとする」¹³法則性が存在するとアンペールが述べていることをあげて、このアンペールの理論が電流の逆転現象には当てはまらないことを主張した。

3.6 節でも述べたが、上の引用にもあるように、ファラデーは磁気を一括して電流の作用とみなすアンペールの説明を否定していたわけではなかった。しかし、このように作用が

に対して「よいものをつかまえたと思うが、口にはできない。魚ではなく海藻かもしれないので、すべての仕事が終わってから、最後に釣り上げたい」(Faraday to Richard Phillips, 23 September 1831, *Correspondence*, 1:580.) と語っている。

⁷ *ERE*, 1:11, par. 39.

⁸ *ERE*, 1:16, par. 58.

⁹ *ERE*, 1:11, par. 39.

¹⁰ *ERE*, 1:16, par. 59. この作用の遅れも、研究を精緻化することで「哲学的な区別として」は存在しなくなると考えられていた。(Ibid.)

¹¹ *ERE*, 1:10-5, par. 36-55.

¹² *ERE*, 1:16-8, par. 61-4; *ERE*, 1:23, par. 78.

¹³ *ERE*, 1:23, par. 78.

瞬間的にしか生じず、その方向も逆転したりすることは、それまでニュートン力学で扱われてきたような引力や斥力の作用とは大きく異なる点であった。そこでファラデーは、これらの違いは特殊な「電気緊張状態」によって生じているとして、その状態が生じている原因を次のように粒子の作用に求めたのであった¹⁴。

すべての結果は、電気緊張状態 (electro-tonic state) が誘導の下で導線あるいは物質の質量 (mass) ではなくその粒子 (particles) に関係しており、それについては緊張による電気 (electricity of tension) によって引き起こされる誘導とは異なるという見解に有利なものである。そうすると、この状態は電流が感覚できないときの液体や、不導体においてさえ想定できるだろう。電流そのものは、それが生じるときには、伝導するための力能が存在していたことによる、いわば偶発的なもの (contingency) であり、粒子がそれらの配列のあいだで引き起こす瞬間的な推進力のことなのである¹⁵。

静電気による誘導は、効果が持続的である。しかし、電気緊張状態は電流についての特殊な状態であり、効果は一時的であった。このように、電気緊張状態とは、静電気による一般的な緊張ではなく、物質を構成する粒子に瞬間的に生じる作用を引き起こす原因と考えられる状態のことであった¹⁶。ここで、電流を偶発的と位置づけていることは、後に発表される誘導の一般理論に結びつく考え方である。誘導の一般理論では、電流も静電気も同じように近接粒子の分極作用によって引き起こされると説明されるようになるからである。もっとも、この時点では電流を粒子の移動とみなしていたと考えられるし、静電気と電流の作用の仕方は大きく異なると考えられていた。

そして、このようにファラデーは、電気緊張状態の原因を質量ではなく粒子に帰属させていた。3.5 節で論じたように、デーヴィーは電氣的な力は質量 (masses) に、化学親和力は粒子 (particles) に、そして電気化学はその組み合わせとして、それぞれ作用すると述べていた¹⁷。それに対してファラデーは、電気緊張状態は電気分解と関連づけられるような特殊な化学作用を生み出す状態であると理解していたため、粒子に関係する状態であるとみなしたのであろう。誘導の作用は、物体全体にではなく、部分 (part) に対してはたらくため、粒子 (particle) に対してはたらくと考えられたのである。

ファラデーは同じ論文の中で、電気緊張状態にある粒子と電気分解との関連性を次のように説明している。

¹⁴ *ERE*, 1:19-20, par. 71. また、Doncel, "Reconsidering Faraday," 61. も参照せよ。

¹⁵ *ERE*, 1:20, par. 73. なお、続いて、伝導は粒子の性質に依存する作用であるから、その大きさはさまざまであると述べている。「伝導の力能は等しくても、今のところこの状態の指標に過ぎない電流が等しいわけではないであろう。なぜなら、粒子自身において数や大きさ、電氣的状態などが異なっているからである。」(*ERE*, 1:20-1, par. 73.)

¹⁶ ここで、「緊張による電気 (electricity of tension)」とは、電圧がかけられて電位差の生じている静電的な状態として理解することができる。

¹⁷ Davy, "On the Relations of Electrical and Chemical Changes," in *Collected Works*, 6:312.

電気緊張状態において、均一な物質の粒子は、電流の向きに強制的ではあるが規則正しい電氣的配列をとっていると思われる。その物質が分解できないものであれば、解放されたときには元に戻る流れを生み出す。しかし分解できる物質では、この強制的な状態は、十分に、関係がより自然な状態になるように、元素粒子 (elementary particle) を束縛された状態にある相手とは引き離し、隣にある同種の粒子と結びつけ、それと同時に、強制された電氣的配列そのものも、誘導から自由になったかのように放電されて解放されるのである。しかし、もとのヴォルタ電流が続いているために、電気緊張状態がすぐにまた新しく生じて化合粒子の強制的な配列を生み出し、正反対の種類元素粒子を逆向きに、ただし電流と平行に移動させて、またすぐに放電するのである¹⁸。

このように、電気分解において粒子の電氣的配列の変化を引き起こす原因は電気緊張状態による粒子の作用によって説明できると考えられた。むしろ電気緊張状態については、最初は電気分解における連続する粒子のイメージが強く、それが電磁誘導の考察に応用されたとも考えられる¹⁹。いずれにせよ、このようにして電磁誘導と電気分解とは電気緊張状態の異なる現れであると考えられていた。第5章で論じる誘導の理論では近接粒子の電氣的配列が重要な論点になるが、このような考え方は電気緊張状態についての初期の議論ですでにそのイメージができていたと言える。

なお、ファラデーは、この節の冒頭で論じたコイルの実験をおこなった翌日の8月30日には、この電磁誘導の現象がアラゴの回転磁気現象と関連している可能性を考えていた²⁰。このアラゴの回転磁気現象とは、吊り下げた磁針の下で銅板を回転させると磁針もその動きに引きずられて回転するという現象のことであり、フランスのアラゴによって1824年に発見された現象のことである²¹。

この回転磁気現象において、銅はそのままだと磁石に引きつけられるわけではない。そのため、円形銅板を回転させることで銅が磁石に引きつけられるような何らかの効果が生じているはずだと考えられた。この現象について、イギリスではバロウ (Peter Barlow, 1776-1862) が研究に取り組んでおり²²、さらにバベッジとハーシェルらは、効果を大きくする目的で強力な馬蹄磁石を回転させることでその上に吊り下げた銅板を回転させるという、銅板と磁石の関係を逆転させた実験をおこなっていた²³。そして、バベッジらの実験

¹⁸ *ERE*, 1:22, par. 76.

¹⁹ Levere, *Affinity and Matter*, 82-83.

²⁰ 30 August 1831, *Diary*, 1:369, par. 17.

²¹ Arago, "L'Action que les corps aimantés." ゲー＝リュサックが1825年春にロンドンに立ち寄った際に紹介したことで、この現象はイギリスでも知られるところとなった。なお、アラゴはこの功績で1825年のコプリーメダルを受賞している。

²² バロウは、この研究を進める上での「ヒント」をファラデーの手紙から得ており、それが参考になったことをファラデーに伝えている。ただし、そのファラデーの手紙の内容については不明である。(Peter Barlow to Faraday, 4 May 1825, *Correspondence*, 1:368.)

²³ Babbage and Herschel, "Account of the Repetition of M. Arago's Experiments." このバベッジらの実験によ

では、磁石を回転させると円盤の回転も少しずつ加速していくことがわかった。そこで、磁石を回転させたときの円盤の回転の様子を時間（周期）について測定したり、また円盤を回転させたときに生じる磁力を磁針によって測定したりした。

さらにバベッジらは、図17のように直径2インチの切れ込みを入れた鉛の円盤を用いて、その切れ込みの入れ方によって回転が変化する様子を調べた。その結果、切れ込みが多いと回転にかかる時間が長くなり、したがって回転の力が弱まることがわかった²⁴。

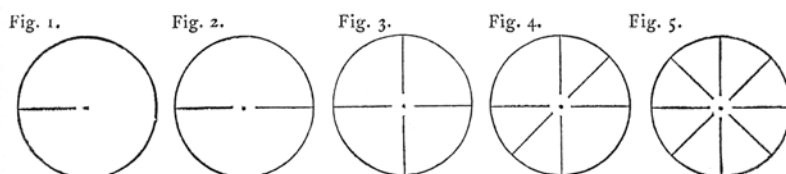


図 17：バベッジらが実験で用いた、のみで切れ込みを入れた鉛の円盤。
これらの円盤を用いた実験によって、切れ込みが多いと回転の力が弱まることがわかった。(Babbage and Herschel, “Account of the Repetition of M. Arago’s Experiments,” 481.)

この切れ込みと回転との関係について、バベッジらは、微弱な磁気を帯びた粒子の存在を円盤内部に想定することで説明しようとした。円盤の回転によって接線方向に磁気が生み出されるのだが、切れ込みによって粒子間を伝わる磁氣的なつながりが断ち切られるため、その前後で磁気が一端減少して全体的な回転の力が弱まるのだと考えたのである²⁵。また彼らは、磁石と円盤の回転に時間差が存在しているようにも観察されたため、物質はそれぞれの磁化率 (susceptibility) を持っており、磁気の伝達にはそれに応じた時間がかかるとも考えていた²⁶。

ファラデーは、このアラゴーの回転磁気現象を、前述のように電気緊張状態と結びつけて考えていた。回転する円盤内で磁気の変化が生じるとすれば、そこから電流が誘導される可能性がある。そのためファラデーは、アラゴーの実験を電源として用いることを目的として、1831年10月28日から図18のような実験装置を用いて円形銅板に流れる誘導電流を観測する実験をおこなった²⁷。そして最終的に、「通常の磁石から永続的な電流が生み出されることを示す」ことに成功したのであった²⁸。

り、アラゴーの回転磁気現象は、磁石を回転させることで銅板が回転する現象としても知られるようになった。

²⁴ Ibid., 481.

²⁵ Ibid., 484, 494-5. なお、バベッジらは、導体以外の物質でも磁氣的な性質が生じる可能性を考え、内部に電気の循環が生じることで磁気が生じているという可能性を留保している。(Ibid., 484.)

²⁶ Ibid., 485-6.

²⁷ ERE, 1:25, par. 83.

²⁸ ERE, 1:27, par. 90.

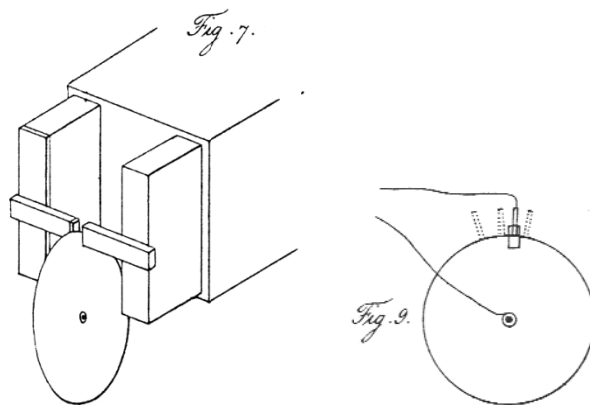


図 18 : 円形銅板に磁力をかけた状態で回転させ、それによって生じる誘導電流を測定する。この装置は、磁石から持続的な電流を得るための電源として動作した。(ERE, 1, fig. 7, 9.)

この現象を、ファラデーは回転板の径にそった線要素にはたらく作用として分析する。そして、その線要素を導線で代替して磁石のまわりで動かし、そのときに生じる作用を観察した。例えば、1831年12月9日の実験では、図19のように導線を磁石と平行および垂直に動かして、それによって導線に生じる電流を観察した。

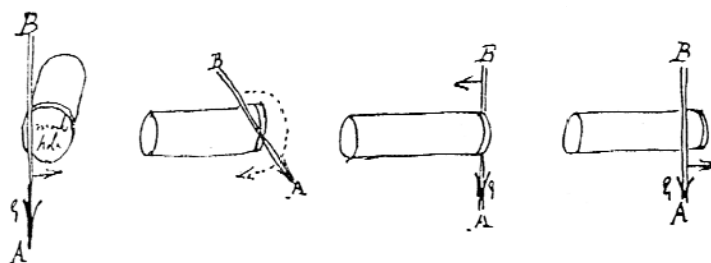


図 19 : 導線を磁極のまわりで移動させて、そこに生じる誘導電流を観察した。(8-9 December 1831, *Diary*, 1:394.)

そうすると、導線を磁極のまわりで円形に動かしたときに、電流が一定方向に生じることがわかった。そこでファラデーは、この導線の運動と生じる電流の向きとの関係を、例えば次のように磁極を中心とする「単純」な円形とみなして表現するのであった。

磁極と動く導線あるいは金属、そして発生する電流の方向とのあいだを取り持つ関係、すなわち磁気電気誘導の発生をつかさどる「法則」は、とても単純なものであるが表現するとなると難しい。Fig. 24のPNが目標とされた磁極のそばを通る水平の導線を

表すような、すなわちその運動の方向が下から上へと進む曲線に一致するならば、あるいはその運動がそれ自身とは平行であって曲線に対しては接線上にあり、しかし矢印のような方向にあるならば、さらには、他の方向で極を通過するが、磁気曲線と同じような方向で切る、あるいは導線が点線に沿って動くときにその導線によって切られる磁気曲線と同じ側にあるならば、それぞれ導線の中の電気の流れはPからNである²⁹。

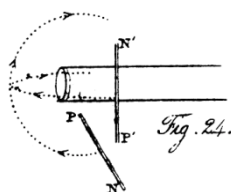


図 20: 誘導電流が生じるときの、磁極の周囲での動かし方 (ERE, 1, fig. 24.)

ファラデーは、この図に描かれているように、磁極のまわりで導線を円形に動かすことで誘導電流を生じさせていた。そして、磁極のまわりでこのような動きをさせると電流が誘導されることは、アンペールの理論からは説明できないと思われた³⁰。

この図 20 で導線を円形に移動させていることから、この時点でファラデーが磁極を点として考えていたことがわかる。これは、1821 年の論文における図 14 の考え方を踏襲したものであると言える。次節で論じるように、後にファラデーは電気分解の考察を通じて、電気や磁気の極をむしろ磁力線の通過する「道」とみなすようになる³¹。ただし、この時点では図 20 で示したように磁極のまわりで導線を円形に動かすことで電流が誘導されていたことから、磁気が磁極を中心に発散していると考えていた。

なお、この図 20 の磁極のまわりに生じている磁気の様子は、磁気の線として図 21 のように表現されている。

²⁹ ERE, 1:32, par. 114.

³⁰ Doncel, “Reconsidering Faraday,” 78-81. ファラデーは、前述のようにアンペールの理論には当初から懐疑的であった。アンペールに対しても、自分の数学への無知さが理解の障壁になっているのが残念だとしながら、電磁気現象については書簡では書ききれない 50 もの疑問点があると述べていた。すなわち、アンペールの理論は疑問を解決するものではないと考えていた。(Faraday to André-Marie Ampère, 5 September 1827, *Correspondence*, 1:439.)

³¹ 磁石内部の磁力線の分布については 1851 年の研究を待つ必要があった。(ERE, 3:328-70.)

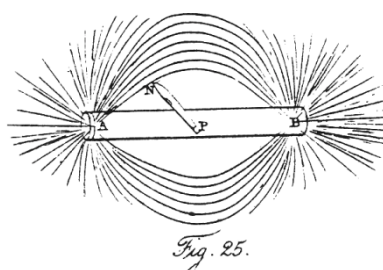


図 21：磁気の線を表現した図。磁気は磁極を中心として放射状に発散していることがわかる。(ERE, 1, Fig. 25.)

この図 21 から、この時点でファラデーが磁気の線をそれぞれの磁極から発して両極を結んでいる線として考えていたことがわかる³²。そして、磁気によって生じる誘導電流は、導線で「その磁気曲線を切る」³³ことによって生じると考えられた。このように、磁気曲線は磁気的作用の分布を表現するための方法であるだけでなく、その作用を説明するための作用の原因とも考えられた。磁気曲線は切断される対象として想定されており、実際にファラデーがこの図 21 に描いている PN は、文字通り「銀のナイフの刃」であった。すなわち、ファラデーはこの 1831 年秋において、力線を物理的に独立した実在物であるかのように扱っていた。

また、前述のようにバベッジらは、磁気作用の伝達には時間がかかっていると考えていた³⁴。そしてこのことを、回転によって円盤と磁石の相対的な位置が変化し、その結果として磁気を生み出すような状態が円盤内で生じているのだと考えていた。しかしファラデーは、回転によって円盤と磁石との相対運動が生じる以前に、すでに渦状の電気緊張状態が生じていたのではないかと考えていた³⁵。前述のようにファラデーは、電気緊張状態の原因となる磁気曲線を物理的に独立した実在物であるかのように考えていた。そのため、円盤が回転して磁石との相対的な位置に変化が生じたことが作用の原因というよりは、そのような作用を生み出すための原因が回転とは関係なく前もって独立して存在していたのだと考えたのである。

ファラデーは、友人のフィリップス (Richard Phillips, 1788-1851) に宛てた 1831 年 11 月 29 日付の書簡の中で、電気緊張状態と回転との前後関係について次のように述べている。

³² ウィリアムズは、ファラデーが電磁気現象の研究を始めた 1821 年当初には、電気を物質とは独立の流体と仮定し、磁気は化学的性質として物質に帰属すると考えていたと指摘している。(Williams, *Michael Faraday*, 165-6.) この指摘が正しければ、磁力線が磁極に集中しているとファラデーが考えていたことも理解できる。

³³ ERE, 1:63, par. 217.

³⁴ バベッジは、さらに研究を進めて、1826 年に電気についても伝達には時間がかかると発表した。しかし、バベッジの主張はイギリスで受け入れられることはなかった。彼の回顧録には、その不満とともに、その数年後にベルリンでミッテェルリヒ (Eilhard Mitscherlich, 1794-1863) に彼の考えを話したらあっさりとその説の正しさが認められたことが語られている。(Babbage, *Passage from the Life of a Philosopher*, 340.

³⁵ Faraday to Richard Phillips, 29 November 1831, *Correspondence*, 1:590.)

実験が数学を前にして怯む必要がなく、発見においてはそれと比肩してまったく有能であるのだと見出すことは、私にとってまことに心地良いことです。そして、高度な数学者たちが回転すなわち「時間が必要とされること」に対して「必要条件」であると告げてきたことが、万が一にも時間が必要とされるのではなく前もっておこなわれているのだとすれば、すなわち、磁石がその場所にやってくる「前」であって、その効果が同じように起こった「後」ではないとすれば、ほとんど根拠がないとわかることは愉快的ことです³⁶。

すなわちファラデーは、円盤の回転が電気緊張状態を生み出す原因ではなく、その状態を生み出している真の原因は回転に先駆けて生じており、それが回転によって生じる作用を規定していると考えていた。そして、この考え方が正しいとすれば、アンペールなどの数学的な理論に対する実験的な研究の優位性を示すことになると考えたのである。

ファラデーは、円盤の回転と作用の発生との因果関係をさらに分析するため、円筒形の棒磁石の先端に紙を挟んで円形銅板を固定し、磁石を軸としてそれらを一緒に回転させた場合の実験もおこなっている。この実験では、円盤と磁石との相対的な位置は変化しないため、もしこれで同じ作用が起こるとすれば、電気緊張状態を生み出す原因は回転とは独立に存在していることになるだろう。そして実際、この場合に発生する電流は、円形銅板だけを磁石とは独立に回転させた場合に発生する電流と等しいことが確かめられた³⁷。すなわち、この結果は、磁気そのものが磁石とは独立に存在していることを意味していると考えられた。

さらに、磁石そのものを回転板に見立てることも考えられた。実際に円筒形の棒磁石を回転させて検流計を接続した場合にも、電流が誘導されることが確かめられた。この結果は、磁石を構成する金属が磁気曲線を横切っているためであると考えられ、磁石が回転している一方で、磁気そのものは回転していないためであると考えられた。以上のことから、ファラデーは、磁気が磁石に対して「それぞれ独立 (singular independence)」の存在であると結論づけている³⁸。

このように、回転磁気現象の考察を通じて、ファラデーにとっては磁気曲線そのものが物質とは独立した存在であると認識されるようになっていった。そして、磁気曲線によって電気緊張状態の原因が説明できるのであれば、電気緊張状態を何らかの特殊な状態とみなす必要もなくなるだろう。電磁誘導を電気緊張状態による現象として分類しなくとも、磁気曲線を原因とする作用として、他の電磁気現象とともに一般的に説明できるようになるからである。

ファラデーは1831年12月21日に、次のような文章で電磁誘導の論文をまとめている。

³⁶ Ibid., 1:591.

³⁷ ERE, 1:63, par. 218.

³⁸ ERE, 1:64, par. 220.

磁石に対して相対的に運動する物体に誘導電流が励起されるとき法の法則は、金属による磁気曲線の横断（intersection）に依存しており、そうするとさらに確かではっきりとしてくるし、今となつては以前の論文の最初の節の原因にも適用できるようにも思われる。そして、そこで生み出される効果に対して完全な理由づけがなされれば、私が電気緊張状態と呼ぼうとしている特殊な状態を想定することに対して何の障害もなくなるであろう³⁹。

このように、ファラデーが電気緊張状態という言葉で分類していた誘導現象は、電磁誘導に関しては、あくまで金属が磁気の線を横切ることによって生じる現象として説明できるようになった。そうすると、「電気緊張状態」という表現を用いる必要がなくなり、この表現は次第に用いられなくなっていった⁴⁰。

それから約2年後の1833年11月、ファラデーは、著者のサマヴィル夫人から依頼されて『物理的諸科学の結びつきについて』の草稿に目を通し、その中で数学が多くの結果を「予測した」と述べられていることについて、夫のウィリアム・サマヴィル（William Somerville, 1771-1860）に宛てて次のような反論を書き送っている。

私には数学が多くを「予測した」という覚えはありません。おそらくアンペールの理論における一つ、あるいは多くとも二つの独立した事実のことでしょう。私は二つを疑わしく思っています。事実は数学に先行してきましたし、そうでなくとも、電磁回転や磁気電気におけるように、計算ができたところで事実は疑いえないものであり、たいていはアラゴの現象のようにその事実が明らかになつても、他の諸事実が助けに入るまでは計算はその真の本質を描き出すのに不十分だったのです⁴¹。

ファラデーは、電磁誘導を生じさせる電気緊張状態は、アンペールの発表していたような数学的な理論では説明できないと考えた。また、アラゴの回転磁気現象についての実験を繰り返す中で、磁気の線は金属によって切断される対象として、物質とは独立した存在と考えられるようになった。すなわち、作用を表現するための手段であつた磁気曲線は、作用を説明するための作用の原因そのものとみなされるようになったのである。こうして、ファラデーが磁気に関係する現象を説明する上では、この磁気曲線の存在が作用の原因と

³⁹ *ERE*, 1:66-7, par. 231. ここで「以前の論文の最初の節」とは、電流が他の導線に電流を生じさせる現象の実験を指している。

⁴⁰ ファラデーは「電気緊張状態」という特殊な現象を想定することについて次のように述べている。「こうして私に導線中に特殊な状態を想定するよう促していた理由は消えてしまった。それでもなお、強力な電流が通っている導線の近くで静止している導線が、それとはまったく無関係であることはなさそうに思われるが、それが特殊な状態にあるとする結論を正当化する明確な「事実」は何も知り得ていないのである。」（*ERE*, 1:322, par. 242.）このことは、ファラデーの自己誘導の研究についてヒューエルが「運動量」や「慣性」という特殊な状態を想定しようとした際にも、ファラデーによって再確認されている。（*Faraday to William Whewell*, 19 September 1835, *Correspondence*, 2:279.）

⁴¹ *Faraday to William Somerville*, November 1833, *Correspondence*, 2:152. この書簡の日付は未定である。

して中心的な意味を持つようになっていった。

ただ、電磁誘導についてはこのように磁気の線で説明が可能になったが、電気分解についてはまだ説明できたわけではない。また、3.6節で論じたように、ファラデーは1820年代の研究において、電磁気現象の基本的な作用は回転方向の円環的な力によるものであると考えていた。そのため、電磁誘導についてのこの時点でのファラデーの解釈では、アンペールやデーヴィーと同じように、作用の形状は図14にも記述されているような円形として認識されていた。しかし、ファラデーは、力線を意識しながら電気分解の考察を進めていく中で、この作用の形状についても少しずつ認識を改めていくことになる。

それでは次節で、その過程を論じるために、電気分解についてのファラデーの研究とその解釈について分析していくことにしよう。

4.2. 電気分解における電流発生 of 因果関係

ファラデーは前節で論じたように、1831年の論文で電気緊張状態と電気分解との関連性を示唆していた。また、フィリップスに宛てた1831年11月29日の書簡では、電気緊張状態が「分解における電堆の極のあいだの「元素の移動 (transference of elements)」を完全に説明する」⁴²ことができる可能性も示唆していた。さらに、電流を通過させたときの検流計の磁針がふれる角度と、電気分解の化学作用を引き起こす能力が、同じようにそこを通過する電気の絶対量に比例するらしいことも実験によって確かめていた⁴³。これらを前提として、ファラデーは、電気緊張状態によって生じる作用には、粒子の移動、すなわち電流の「量」が本質的に関係していると考えていた⁴⁴。

もっとも、粒子の移動を想定するにせよ、それが実際にどのような力によって生じているのかは不明であった。例えば、ファラデーにとって電流とは、次のように「流れ」でもあり「配列」でもあるような不確かなものであった。

「流れ (current)」という言葉に関しては、私はそれが電気の一流体であろうと、逆方向に動く二流体であろうと、あるいは単に振動であろうと、あるいはもっと一般的に言えば力の前進であろうと、前進的 (progressive) な何かを意味している。「配列 (arrangement)」という言葉に関しては、私は粒子ないし流体や力の局所的な調整 (adjustment) と理解しており、前進的なものではないと理解している。他の多くの理由によって「配列」よりも「流れ」という観点を支持するよう急ぎ立てられるところ

⁴² Faraday to Richard Phillips, 29 November 1831, *Correspondence*, 1:590.

⁴³ *ERE*, 1:104, par. 366, 1:107, par. 377. ファラデーはこの段階から、電気分解によって分解される物質の量が電氣的な緊張の強さに比例するのではなく通過した電気の量に比例するという、いわゆる電気分解についての「ファラデーの法則」を意識していた。(ERE, 1:92, par. 329.)

⁴⁴ このように、ファラデーは当初から電気分解を粒子の移動と関連づけて考えていた。(Williams, *Michael Faraday*, 22-3.)

だが、その瞬間に人々に思い起こされるであろうことを不必要に言明してしまうことは避けたいと思う⁴⁵。

ここでの「配列」による流れとは、連続的に並んでいる粒子の位置が局所的に調整されていくことであり、物質そのものが前進するわけではないものの、その変化があたかも前進しているように観察される状態のことである。このようにファラデーは、電流を両義的に、粒子の移動としても配列の局所的な変化としても考えられるとされていたが、どちらかというとな実際の移動が生じていると考えていたようである。

この、ファラデーの「配列」という考え方はデーヴィーの考え方にならったものであると言えよう。3.5節で論じたように、デーヴィーは電気分解を引き起こす力が粒子から粒子へと伝達されていくと考えていたし、他の多くの同時代の研究者たちも、このような配列の変化を考えていた。ただし、それらの配列の変化は、電極から及ぼされる牽引や反発によって引き起こされるとされ、その力によって短い距離の移動が連続して起こっていることが想定されていた⁴⁶。例えば、デーヴィーやグロトゥス (Theodor von Grotthuss, 1785-1822) は、電気分解の作用が粒子間を連続的に伝わっていると考えていたが、基本的にはそれらの原因を電極からの牽引と反発に帰していた⁴⁷。

それに対して、ファラデーは、電気分解が電気緊張状態の作用であり、したがって電流そのものの誘導作用の結果であると考えていた。そのため、電極からの牽引や反発による説明には疑問を抱いており、この観点から電気分解と粒子の移動とのあいだの関係を実験的に調べようとしたのである。

まずファラデーは、1832年10月26日に、溶液をゼリーで固めることで電気分解にどのような影響が出るかを調べている。この実験では、図22左のように円錐形のガラスが用意され、そこに硫酸ソーダが注がれてゼラチンで固められた。そして、その両端部分 *b* が切り取られてくぼみをつけられ、そこに高濃度の硫酸ソーダ溶液が注がれて、電極 *c* が挿入された。すなわち、ファラデーは、溶液の中間にゼリー状の固体部分が介在する状態を作り出したのである。

⁴⁵ *ERE*, 1:81-2, par. 283.

⁴⁶ *ERE*, 1:135-40, par. 480-492.

⁴⁷ *ERE*, 1:136, par. 481; *ERE*, 1:142-3, par. 499-500. 両者の理論について、ファラデーは次のように述べている。「ハンフリー・デーヴィー卿がより限定的な表現を用いるとき、彼は分解の効果を極の引力に帰しているように思われる。これは1807年の『哲学紀要』の28から29ページおよび30ページで与えられた「事実の一般的表現」の事例である。『化学哲学提要』の160ページでも、両極の表面における大きな牽引の力能について語っている。彼は、流体のあらゆるところで分解と再合成が連続的に生じている可能性を述べており、グロトゥスに関しても同じである。」(*ERE*, 1:136-7, par. 483.)

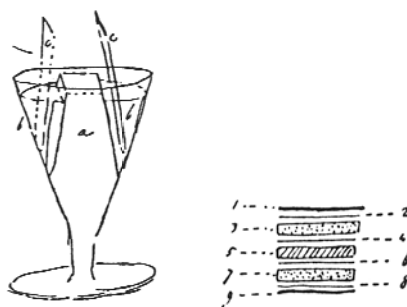


図 22 : ゼリー状の固体部分が介在する場合の電気分解の実験 (左) と、その内部で生じている電気分解の様子を調べるための実験 (右) (26 October 1832, *Diary*, 2:29.)

この装置に電気をかけると、強い電気分解が生じて気体が発生し、数分後には電極 *c* を挿入していた溶液部分 *b* においてそれぞれ強い酸とアルカリが検出された。この結果は、ファラデーの期待とは異なるものであったと考えられる。このようにゼリーで分離された場所にそれぞれ酸とアルカリが検出されたことについて、ファラデーは酸とアルカリがそれぞれ中間のゼリー部分 *a* を「横断した (traversed)」と理解している⁴⁸。

このように溶液が液体であろうとゼリー状であろうと電気分解が生じたため、電極間の粒子にどのような作用が生じているのかが問題となった。そこで、ファラデーは図 22 右のように、両極のあいだに硫酸ソーダのゼリー (図の 5) や塩基を含まないゼリー (図の 3 と 7) を配置して、それをリトマス紙 (図の 2 と 4) や薑黄 (ターメリック) 紙 (図の 6 と 8) ではさみ込んで、酸やアルカリの移動を観察した。その結果、4 や 6 では酸やアルカリは検出されなかった。ファラデーはこの結果を、酸やアルカリが単純に電極からの引力によって分解されて別々に電極へと移動しているのではなく、「じわじわと連続的に合成と分解が生じている」⁴⁹ 結果であると考えた。ゼリーは固体に近いが、それを構成する粒子にはある程度の運動の自由度が与えられている。そのため、合成と分解をとまなないながら、電氣的配列の変化が「じわじわと連続的に」伝わるのが可能なのだと考えられた。このように作用が粒子間を連続的に伝わっていくという理解は、電気分解についてのデーヴィーの見解に近いものだが、その一方でファラデーは、作用が電極からの牽引や反発によるものであるという見解には疑いを感じていた。

そのため、ファラデーは、さらに溶液を完全な固体にした場合の実験が必要であると考へ、その 3 か月後の 1833 年 1 月 23 日にそれを検証するための実験をおこなった⁵⁰。この

⁴⁸ 26 October 1832, *Diary*, 2:29, par. 165.

⁴⁹ *Ibid.*, 2:30, par. 175.

⁵⁰ 10 月下旬におこなわれたゼラチンの実験よりも、この 1 月下旬におこなわれた氷の実験の方が実験の方法としては適切であるように考えられるかもしれない。しかし、氷を用いた実験をおこなうためには 10 月では難しく、いずれにせよ冬を待つ必要があったと考えられる。

実験では、氷を用いた図 23 のような実験装置が準備された。



図 23：氷についての電気分解の実験。凍らされて完全に固体になった状態の溶液で電気分解が生じるかどうかを検証された。(23 January 1833, *Diary*, 2:37.)

この装置は、板状の白金電極をグラスに挿入し、さらにその電極間に氷の板を挿入し、まわりを氷の粉末と冷水で満たして、それらの全体を冬の外気で一晩かけて凍らせたものであった。そしてファラデーは、この装置の電極をそれぞれ銅の導線でヴォルタ電堆につなぎ、電気伝導が生じるかどうかを観察した。

最初は、すべてを氷の状態にして実験をおこなったが、電流が観測された。ファラデーはこの結果を「氷は水と同じように伝導するからだ」⁵¹と記している。そして、氷が底の方から溶けてくると、溶けたところからは気体が発生した。これは、10月26日の硫酸ソーダのゼリーを用いた実験と同様の結果であった。

しかし、この結果は、ファラデーの期待に沿うものではなかったと考えられる。氷でもゼリーと同じように電流が観測されたということは、それらが電気の移動をきちんと妨げているのだとすれば、粒子の移動は電気分解の原因ではないということになる。あるいは、氷やゼリーの中でも粒子が移動しているか、そもそも電流が粒子の移動をとまなう現象ではない可能性や、電気分解が電極からの遠隔作用的な引力や斥力によって生じている可能性も高くなるだろう。

そこで、この日の実験の後半では、極と氷のあいだに硫酸ソーダに浸した薑黄紙とリトマス紙を重ねて、図 22 右のように氷と電極とのあいだにそれぞれはさんで実験をおこなった。その結果、氷に接していた方の試験紙には変化が見られなかったため、酸やアルカリは氷を通して逆の電極の方に移動したとも考えられた。しかしファラデーは、この実験結果の解釈を「私はそう思わない」⁵²と否定して、乾いた氷を用いて改めて実験をし直すべきだと結論づける。

その乾いた氷を用いた実験は、翌1月24日におこなわれた。今度はスズの容器を用いて、白金電極はスズの外壁とは接しないようにコルクで固定された。そして、蒸留水を注いで

⁵¹ 23 January 1833, *Diary*, 2:37, par. 223.

⁵² *Ibid.*, par. 226.

凍らせた上で電気が流れるかどうかを測定し、またその氷をアルコール・ランプの熱で溶かして電気が流れるかどうかを再度測定した。その結果、氷が溶けているときには電気を通すが、まったく溶けていないときには厚さが極めて薄くても電気を通さないことを確認した⁵³。さらに、固体になると電気を通さなくなるという現象は、塩化鉛などさまざまな化合物でも同じように確認された。

固体では、粒子の結合を保持しようとする引力の影響が強く、粒子の移動が制限されていると考えられる⁵⁴。しかし、液体ではそれが弱まっていると考えられる。そのことから、電気分解は粒子の移動によるものであると結論づけられた。そして、この1833年1月下旬におこなわれた氷の実験は「これまで認められてこなかった電気伝導のまさに「一般法則」による効果」⁵⁵と評価され、物質が「液体であるあいだには伝導する力能を持ち、凝固しているあいだにはそれを失うという法則」⁵⁶を実証する重要な結果とみなされた。後にファラデーは、この実験が誘導現象の一般的な理論を確信するきっかけになったとして次のように回顧している。

電解質は、固体の状態ではそれらの諸元素を電流へと譲り渡すことを拒むのだが、液体の状態であれば自由に与えるという一般的な事実を発見したときに、誘導の作用の解明への道が開かれ、似たところのない現象の多くを一つの法則に従わせる可能性が見えたと考えた⁵⁷。

ここで可能性が見えたとされる法則とは、誘導で生じる緊張状態を近接粒子の連続的な作用の伝達として理解するものであった。そして、この緊張状態を保持する度合いに応じて、絶縁体から導体までのさまざまな物質の電気的性質を一元的に説明するものであった。

この段階では誘導についての理解も十分なものではなかったが、この氷についての実験結果は、電気分解の「一般法則」の問題点を解決していく上で一定の指針を与えるものであった。前述のように粒子の移動を電気分解の必要条件と考えると、粒子が移動できない場合には電気分解はまったく生じないことになる。しかし、例えば極から試料に対して遠隔的に電気の力が及ぼされた場合には電流は生じないが、その試料には電気分解が生じることもありうる。そのため、この電気分解と粒子の移動とを結びつける主張は必ずしも成り立つものではなかったし、その点はファラデーも自覚していた⁵⁸。ファラデーはこの点を次のように述べている。

⁵³ 23 January 1833, *Diary*, 2:38-9, par. 233; *ERE*, 1:110-3, par. 383-92.

⁵⁴ *ERE*, 1:270, par. 910.

⁵⁵ *ERE*, 1:110, par. 380.

⁵⁶ *ERE*, 1:113, par. 394. なお、ファラデーはこの論文で、固体の場合には熱伝導の力能を持ち、液体の場合にはそれが電気伝導の力能へと変わるという相互関係を示唆している。(*ERE*, 1:118-9, par. 416.)

⁵⁷ *ERE*, 1:361, par. 1164. この電気分解の実験の詳細については、*ERE*, 1:419-20, par. 1325; *ERE*, 1:433, par. 1358; *ERE*, 1:543-4, par. 1705. なども参照せよ。

⁵⁸ *ERE*, 1:129-30, par. 460-1.

その法則がよく成り立つとすると、伝導そのものは単に分解の能力というよりもその作用の帰結とはならないか。そしてこの疑問は別の疑問をともなう。すなわち凝固が、凝集力の影響の下で単に粒子をその場所につなぎとめ、分解に不可欠であるような最終的な分離を妨げているということ、伝導を妨げてはいないのかどうか⁵⁹。

すなわち、粒子の移動は電気分解の原因ではなく、結果に過ぎないという疑いが持ちあがってきたのである。もし必要条件ではなく偶発的な結果に過ぎないとする、電流の発生をともなわない電気分解がありうることになる。そして、この問題は、この節の最初で示した粒子の「移動」かつ「配列」であるような電流の解釈のあり方を大きく左右することになる。

ファラデーは、このような粒子の移動をともなわない電気分解の実験を 1832 年 9 月 6 日におこなっている。ファラデーは、試料に単極しか接触していない場合の電気分解を調べる目的で、図 24 のような実験装置を用いた実験をおこなっていた。

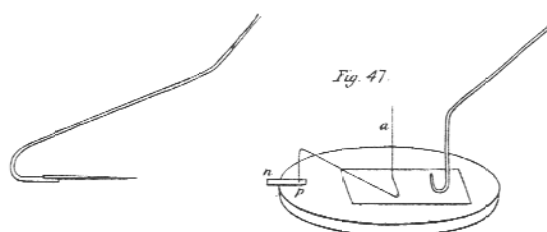
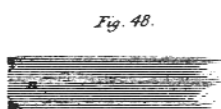


図 24: 試料に単極しか接触していない場合の電気分解の実験 (ERE, 1, fig. 47.)

この装置では、左側の針金は接地した導線につながれ、右側には硫酸ソーダに浸したりトマス紙や薑黄紙 ($n-p$) が、電気分解の有無を確認するための試料として円形ガラス板の端に設置された。そして、ガラス板の中央にはスズ箔が置かれ、スズ箔には起電機から引いた導線およびスズ箔を通して試料と接点を持つための針金で作られたスイッチ (a) が設置された。そして、この装置に電気をかけると、薑黄紙の n 端の両側には図 25 のようにアルカリが析出して赤く染まった。



⁵⁹ ERE, 1:118, par. 413.

図 25: アルカリが検出された薑黄紙。その n 端が赤く変色している。(ERE, 1, fig. 48.)

ファラデーはこの様子を、薑黄紙の隅から「電気が流れ出ていった (the electricity has gone off in streams)」⁶⁰と描写し、あるいは逆の場合には、その隅から「正の電気が空気中から入った (the pos. electricity entered from the air)」⁶¹と描写している。このように、電気が空気から出たり入ったりするという解釈は、そもそもファラデーが、空気が電気を伝える媒体になりえることを念頭においていたことを意味している。

もちろん、この実験で薑黄紙にアルカリが析出されたことは、左側の針金からの直接的な引力や斥力の作用として解釈できるかもしれない。しかし、電気がかけられていたのは、あくまで薑黄紙の一端に接触していたスイッチ (a) の針金だけであった。そのため、電極と理解されるべき針金もその針金だけであると解釈されていたのである。ファラデーは、この実験結果が「電気化学的な分解が、二つの金属極の同時的な作用によるのではなく、単極でもはたらく」⁶²ことを示していると述べている。すなわち、左側の針金からの遠隔作用ではなく、空気から電気が出入りするすることで生じる作用と考え、空気を電気の媒体と解釈したのである。

さらに、この実験では電流が生じていなかったため、空気中の粒子が全体として移動していないとすると、その電氣的な配列に部分的な変化が生じることで電気の出入りが生み出されたことになる。このことについてファラデーは、この日の実験を微粒子の化学作用に帰して、「分解の効果は極からの直接的な引力や斥力ではなく、むしろ化学親和力の一方向への緩みと他方向への高まりであるようだ」⁶³と結論づけている。すなわち、電気分解は電極からの「外部的」な力ではなく、分解される物質の「内部的」な力によって生じていると解釈したのであった⁶⁴。

このように、電気分解は電極からの引力や斥力が原因でも、電極のあいだの粒子の移動が原因でもなく、中間にある物質内部の粒子にはたらいている化学親和力が一方向に連続的にはたらくことが原因であると解釈されるようになった⁶⁵。そうすると、電気分解によって析出される物質は、その電氣的配列の末端において「内部的」な力によって追い出された (expelled) ものだと説明できる⁶⁶。

ファラデーは、電極での物質の析出と物質の内部的な力との関係を次のように述べている。

⁶⁰ 6 September 1832, *Diary*, 2:17, par. 99.

⁶¹ *Ibid.*, par. 100.

⁶² *ERE*, 1:130, par. 461.

⁶³ 6 September 1832, *Diary*, 2:18, par. 104.

⁶⁴ *ERE*, 1:151, par. 524.

⁶⁵ *ERE*, 1:140, par. 493.

⁶⁶ *ERE*, 1:155-6, par. 537.

電気化学分解が両極（ヴォルタ電池や通常の起電機の金属の終端部を意味する）の直接的な引力や斥力にはよらず、またそれらの極と接触あるいは近くにある元素にもよらないということは、空気中でおこなわれた実験からとても明白であるように思われる。発生した物質はどの極のまわりにも集まらずに、電流の向きに従って分解される物質の末端で発生したのであり、排出された（ejected）とも言える⁶⁷。

このように、ファラデーは、個々の粒子の内部的な力によって押し出されるからこそ、分解した物質は電極のある場所で析出すると考えた。もし、このように「排出された」のではなく、電極からの引力によって牽引されたのであれば、電極で物質が保持されずに析出してしまう理由が説明できないだろう⁶⁸。

この節の最初で言及したように、デーヴィーやグロトゥスは電気分解の原因を電極からの引力や斥力に帰していた。ファラデーはこのデーヴィーによる遠隔作用的な解釈の特徴を次のようにまとめている。

彼は、流体のあらゆるところで分解と再合成が連続的に生じている可能性を述べており、グロトゥスに関しても同じである。そして牽引や反発する作用因（agencies）が、「同種の粒子から別の粒子へと」伝達されて、両極の表面からその中間の点にかけて強さが弱まり、その中点では必然的に中性になるように、金属表面から溶媒全体のあらゆるところに伝えられると仮定している⁶⁹。

すなわち、電気分解の作用を電極からの引力や斥力に帰すると、両極から離れるほど作用は小さくなり、しかも両方の電極の中間点では両極からの力が相殺されて作用が生じないはずだと考えられた。そして、この見解は、電気分解が電極からの牽引や反発によると考える研究者に共通していた⁷⁰。

両極の中間点で作用が生じないという見解は、実験結果にも合っている。電気分解においては、分解された物質は電極付近でのみ析出し、中間点では析出しないからである⁷¹。このように、両極の中間点では作用が生じないことは、電気分解を電極からの牽引や反発による作用とみなす場合に導かれる論理的な帰結であり、逆にファラデーにとっては、中間点でも作用が生じていることを示すことが、牽引や反発の作用ではないことを示すための重要な論点となった。

このファラデーの見解は、例えば前述の1832年9月6日の実験でも確かめられていたこ

⁶⁷ *ERE*, 1:140, par. 493.

⁶⁸ *ERE*, 1:155-6, par. 535-7.

⁶⁹ *ERE*, 1:136-7, par. 483.

⁷⁰ *ERE*, 1:135-40, par. 480-92.

⁷¹ 中間点で電気分解が生じていたとしても、引力や斥力によって電極に引きつけられていると解釈することはできるが、電極からの引力や斥力がはたらいっていないとすると、なぜそこで分解された物質が発生してしまわないのかということが問題になる。この点についてファラデーの理論では、前述のように内部的な配列の連続的な転換を考えているために、中間点での物質の析出はないと考えられていた。

とだが、よりはっきりした形では、1833年4月22日におこなわれた図26の実験によって示されることになった。

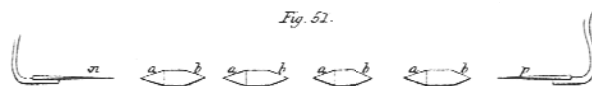


図26：中間点における電気分解の作用を観察するために、硫酸ソーダを浸したリトマス紙と薑黄紙を重ねたもの (a-b) を針金のあいだに配置した実験。この実験では、いずれのリトマス紙と薑黄紙にも酸とアルカリが観測された。(ERE, 1, fig. 51.)

この実験では、起電機と放電路につないだ針金 $n-p$ 間に、硫酸ソーダを浸したリトマス紙と薑黄紙を重ねたもの (a-b) を図のように配置した。そして、これらの試験紙の両側から起電機によって電気をかけると、リトマス紙と薑黄紙にはそれぞれ酸とアルカリが検出された⁷²。もし、電気分解が極からの引力や斥力による作用であれば、四つのリトマス紙ないし薑黄紙では、その分解作用が両側の針に近づくほど強くなり、中央に近づくほど弱くなるはずである。しかし、そのような傾向は観察されず、電気は針の先から試験紙の列へと受け渡されていったように観察された⁷³。そのためファラデーは、電気分解の原因は電極からの引力や斥力ではないと結論づけることができた⁷⁴。

このように、電気分解が電極からの引力や斥力ではなく粒子の内部的な力による電氣的配列の連続的な変化によるものであるとすると、その力はどのような状態によって生じているのかという電気緊張状態についての最初の問題へと立ち戻ることになる。そして、これは前述のように粒子の「内部的」な力、すなわち化学親和力との関係において理解されることになった。

3.5節で引用したように、デーヴィーは「化学と電気の引力は同じ原因から生み出されるもの」⁷⁵であると考えており、それはファラデーにおいても同様であった。しかし、デーヴィーはその原因をあくまで電極からの引力や斥力に戻していたが、ファラデーは物質内部の化学親和力に戻していた。もちろん、デーヴィーも化学親和力が電気分解の作用に関連しているとは考えていたが、問題はそのどれが電気分解の第一原因であるかという解釈の違いにあった。

デーヴィーのように電極からの引力や斥力が第一原因となって電気分解が生じているな

⁷² ERE, 1:132, par. 469.

⁷³ 22 April 1833, *Diary*, 2:67, par. 469.

⁷⁴ なお、ファラデーはその他にも実験をおこない、分解された物質は必ずしも両端の金属で析出するわけではないことを確認した。また、電気分解は、空気（導体でもなく電気分解もされない）、水（導体でもあり電気分解もできる）、金属（導体であるが電気分解はできない）という、電氣的には異なる性質を持つ物質を介して起こりうることから、電気分解の作用は電極からの引力や斥力ではないと考えた。(ERE, 1:140-2, par. 494-7.)

⁷⁵ Davy, "On the Relations of Electrical and Chemical Changes," in *Collected Works*, 6:312.

らば、弱い電氣的な引力でさえ、強い化学的な引力よりもさらに強いことになる。そのようなことは、ファラデーには不合理であるように思われた⁷⁶。むしろ、粒子はあくまで化学親和力によって結びついており、電気の力がいくら強くてもその化学親和力に勝ることはないとして、局所的な電氣的配列が連続的に調整されていくことが電気分解という現象で生じている電気化学作用の本質であると考えたのである。

この見解をまとめたものが、いわゆる電気分解についての「ファラデーの法則」である。ファラデーは、この「ファラデーの法則」を次のように与えている。

一定量の電気に対しては、水、塩類の溶液、酸、溶解した物体など、分解する導体が何であろうとも、電気化学的作用の総量もまた一定量である。すなわち、通常の化学親和力において見出される標準的な化学的効果とつねに等しい⁷⁷。

なお、この法則では、流れる電気と化学作用との総量には一定の関係があるということだけでなく、電気による化学的効果が化学親和力による化学的効果と同等であることも規定されている。この法則の前半部分は、この節の最初で言及したように、通過させる電気の量とそれによって分解されて析出する物質の量とのあいだに相関関係があると述べているに過ぎない。しかし後半部分は、電気による化学的作用と一般的な化学作用が本質的に同等であることを主張している。

これら前半部分と後半部分の内容は、さらなる研究の進展によって、1834年には前半が「電流の化学的な力能は、通過する電気の絶対量に比例する」⁷⁸に、後半が「電気化学当量は通常の化学当量と一致しかつ同一である」⁷⁹に、それぞれさらに厳密に定義しなおされている。そして、これらの定量的な関係は、最終的に電気の力によって一元的に理解されるようになった。このことをファラデーは次のように述べている。

物体の当量の重さは、単純に等しい電気量を含んでいる分量、あるいは等しい電気の力能を自然に持っている分量である。当量数を「決定」しているのは「電気」である。なぜなら、それが結合する力を決定しているからである。あるいは、原子の理論や用語を用いれば、通常の化学作用において互いに当量である複数の物体の原子は、それらと自然に結びついた等しい電気量を持っている⁸⁰。

すなわち、ファラデーの電気分解の法則では、重さも化学作用も一元的に電気の力に関連づけられ、それらの関連性は原子という物質的な存在によって根拠づけられたのである。

⁷⁶ *ERE*, 1:145, par. 506.

⁷⁷ *ERE*, 1:145, par. 505.

⁷⁸ *ERE*, 1:231, par. 783.

⁷⁹ *ERE*, 1:245, par. 836.

⁸⁰ *ERE*, 1:256, par. 869. ここでファラデーは、「原子」という言葉が、とくに化合物について考える場合、その本質を概念的に明確化することが困難であり、注意して用いなければならないと述べている。

このように、物体の重さも電気のと関連づけて理解できるとすれば、ファラデーがここで述べている原子論とは、ドルトンの理論ではなく、ボスコヴィッチ的な理論ということになるだろう。

ファラデーが定めた電気分解の法則の前半のように、二つの量に相関関係があることは、定量的な実験をおこなえば比較的簡単に確かめることができる。しかし、電気と化学親和力の効果の同等性を主張することは、自然現象における諸力の統一性や変換可能性を前提としている。すなわち、この主張は、1.2節や3.5節で出てきたような原子の性質をその力や力能に還元する考え方を前提とすることによって初めて生み出されるものなのである。

このような原子論を前提とする主張は、デーヴィーやファラデーにとっては自然なものであったかもしれない。しかし、とくにドルトンの原子説の観点からすると、その化学的な違いに関係なく物質の重さだけを電気のと関連づけることや、重さと化学作用の両方を電気という一つの力能に還元することは、説明不十分であり不適切であると思われた。そもそも、電気分解を起こすにはある程度の強い電気が必要であり、その強さは化学親和力と何らかの関係があると考えられていたが、ファラデーが法則化したように電気のと量だけに依存し、電気の強さが法則に関係しない理由は不確かであった。

このような問題があったため、このファラデーの電気分解の法則はメッキ業者などにとっては実用的な経験則として重宝されるようになったが、とくにドルトンの原子説を擁護するベルセリウスのような化学者からは実験の不備や根拠の不確かさを指摘されることになった⁸¹。ファラデー自身は、1857年になってこの電気分解の現象を「力の保存が真実であることの証拠」⁸²であると述べているが、1833年の時点では化学親和力や電気の力と粒子との関係はよくわからないままであり、それ以降も実験結果によって十分な結論が得られることはなかった⁸³。

ファラデーは結局、自分の発表した電気分解の法則を実証的に説明することが最後までできなかった。しかし、実験的な証拠はないとしながらも、電気分解や電流の原因を二種の粒子によって理論的に説明することは試みていた⁸⁴。

ファラデーは、電気分解の法則を理論的に説明するにあたって、電流を「方向が正反対で厳密に量が等しい正反対の力を持つ力能の軸」⁸⁵として考えることが最良であろうと述べている。この見解は一般に電気の二流体仮説として知られている理論に近いが、ファラデーはそれぞれの流体の全体的な移動を想定していたのではなく、次のように化学親和力と関連した「内部的な微粒子の作用」による局所的な変化を想定していた。

⁸¹ Guralnick, "The Contexts of Faraday's Electrochemical Laws," 63-5; Berzelius, *Jahres-Bericht*, 15:30-39. ベルセリウスは分極の生じ方も原子によって異なると考えており、化学親和力と電気の力とを区別していた。これは、デーヴィーやファラデーとは異なる見解であった。(Levere, *Affinity and Matter*, 149-51.)

⁸² *ERE*, 3:454.

⁸³ *ERE*, 1:321n; Guralnick, "The Contexts of Faraday's Electrochemical Laws," 62-3.

⁸⁴ ファラデーは、先行研究を検討した結果、一電気理論よりも二電気理論を支持できる事実は認められず、二種の電気を想定することはあくまで仮説に過ぎないとしている。(ERE, 1:147-8, par. 516.)

⁸⁵ *ERE*, 1:148, par. 517.

その効果は電流の方向にしたがって及ぼされた「内部的な微粒子の作用 (internal corpuscular action)」によって生み出され、与えられた物体の「通常の化学親和力に付加されたり方向づけしたりする」力によるものであると思われる⁸⁶。

ここでの内部的な微粒子の作用とは、電気分解における電気の力と化学親和力とのバランスを考慮することで前述のように説明されていたものである。これらの粒子は、それぞれが独立に存在しているが、あくまで「相互的な化学親和力」⁸⁷に基づく軸上の配置転換としてのみ移動が可能であり、移動によって一方が他方を量的に上回るようなことはないと考えられていた。そして、電気分解における粒子の移動は図 27 の *a* と *b* の変化のように図示された。

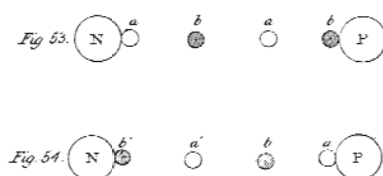


図 27：二種の電気粒子 *a* と *b* の移動を図示したもの。それぞれが配置転換によってつり合いを保ちながら移動すると考えられた。(ERE, 1, fig. 53, 54.)

この図の上下で示されているように、粒子は、それぞれにはたらいっている通常の化学親和力とは別に電気の作用が加わることで、正極 P あるいは負極 N に向けて配置を変えると考えられた。そして、その配置転換が粒子のあいだで連続的におこなわれ、極に到達した粒子は、その後ろの粒子に押し出される形で析出するのだと考えられた⁸⁸。

この図 27 で注意すべきことは、粒子の移動が局所的な領域にとどまっていることと、粒子間に距離が存在していることである。すなわち、粒子間では遠隔作用が否定されていた

⁸⁶ Ibid., par. 518.

⁸⁷ ERE, 1:149, par. 519.

⁸⁸ ERE, 1:148-9, par. 518-20. なお、ファラデーは電極が引力および斥力を及ぼすとする説を否定したことから、一般的な「極 (pole)」という名称に対して、ギリシア語の「道 (óðós)」に由来して「エレクトロード (electrode: 電気の道)」という名称を導入し、同様に、陽極には「アノード (anode: 上への道)」、陰極には「カソード (cathode: 下への道)」という名称をそれぞれ与えた。(ERE, 1:195-196, par. 662-663.) さらに、作用粒子については、ギリシア語の「行くもの (ión: iévai の中性形現在分詞)」に由来して、アノードに向かう粒子には「陽イオン (anion: 上に行くもの)」、カソードに向かう粒子には「陰イオン (cation: 下に行くもの)」、そして、それらの総称としての「イオン (ion)」という名称をそれぞれ与えた。(ERE, 1:198, par. 665.) これらの名称はファラデーの相談を受けたヒューエルによって提案されたものであった。他には、*dexiodo* と *skaiode* ないし *stechion* といった候補があげられていた。(Faraday to William Whewell, 24 April 1834, *Correspondence*, 2:176-8; William Whewell to Faraday, 25 April 1834, *Correspondence*, 2:178-80; Faraday to William Whewell, 3 May 1834, *Correspondence*, 2:180-1; William Whewell to Faraday, 5 May 1834, *Correspondence*, 2:182-4; William Whewell to Faraday, 6 May 1834, *Correspondence*, 2:184-5.)

わけではない。これは、1.2節で論じた物質観を踏襲するものである。あくまで、可感ではない微小領域ではたらく化学親和力は、引力や斥力のような遠隔作用として考えられていたのである。

また、このように両極のあいだで生じる作用として電気分解を考察しているが、その作用の線が必ずしも両極を結ぶ直線であると想定されていたわけではなかった。電気分解の作用の線について、ファラデーは次のように述べている。

ここで作用している粒子が両極のあいだで直線上にあるはずだとは仮定していない。分解している液体を通過している電流を表すと仮定されている作用の線は、多くの実験においてとても不規則な形を持つのである⁸⁹。

このように、むしろ作用は曲線であることが強調され、しかも法則性のよくわからない不規則な形状であると考えられていた。そして、ファラデーにとってこの不規則な線とは「極から急速に拡散する」⁹⁰ことや「その線が電流と平行になるときに効果が最大になる」⁹¹こと以上には理論的に説明しがたいものであった。

この作用の曲線の不規則性は、遠隔作用的に中心力によって表現される規則的な形状とは対照的であり、誘導の理論を一般化していく過程で、極めて重要な意味を持つようになる。しかしこの時点では、形状の不規則性は体系的に意味づけられていたわけではなく、あくまで説明できない特徴の一つとして認識されていたにすぎなかった。

なお、このように電気分解の法則を発表した後で、ファラデーはさまざまな物質を用いてその法則の正しさを確認し、さらには発生する気体を通じて電流を測定する測定機器としてヴォルタ電気計を開発した。そして、研究の目標をヴォルタ電池による発電過程の解明へと向けていく。

ヴォルタ電流が化学作用によって生じることはわかっていたが、その電流を生み出す第一原因が金属の接触なのか、あるいは溶液の化学作用なのかという、電流の発生原因についてのより根本的な問題が十分に解明されていなかった⁹²。ヴォルタは金属の接触説を提唱していたが、ファラデーは接触する前から生じている化学的な作用の方が本質的なのではないかという可能性を疑っていたのである。そして、希硫酸に浸した一組の亜鉛板と銅版とを導線でつなごうとする前に放電が生じることがあることから、金属の接触ではなく化学作用こそが電流の発生にとって本質的であり、物質による親和力の強さ（すなわちイオン化傾向）の違いによって電気が生じるのだと考えた⁹³。

⁸⁹ *ERE*, 1:149, par. 521.

⁹⁰ *Ibid.*

⁹¹ *Ibid.*

⁹² *ERE*, 1:260, par. 877-8.

⁹³ *ERE*, 1:271-2, par. 915-6; *ERE*, 1:286-8, par. 956-8. ファラデーはここで「イオン化傾向」という言葉を用いているわけではないが、陽イオンや陰イオンとしてはたらく物質の相互関係について詳細に検討している。（*ERE*, 1:289-91, par. 962-4.）

ファラデーはヴォルタ電池における電気の発生と化学親和力との関係を次のように述べている。

「ヴォルタ電気の発生」は化学作用の一事例にすぎず、「ヴォルタ電気分解」は、ある組の化学親和力が本質的に強力であり、それより強力ではない他の組の化学親和力に対して単純に優勢であるということなのだ。そして、そのような力の相反する組の例を考え、それらの相互関係や依存を考慮すると、そのような例において化学親和力以外の言葉を用いること（電気についての言葉があれば便利であるが）や、その結果を生み出すことに関与する他の要因を仮定することは、まったく必要ないと思われる⁹⁴。

そして、ファラデーは、このようにヴォルタ電池の電気的作用が化学親和力によって説明できるとして、「化学親和力および電気と名づけられる力は同一のものである」⁹⁵と結論づけた。

しかし、このように結論づけたものの、ヴォルタ電池では電気が生じる際には化学作用も付随するのだが、化学親和力と電気の力を同一視するにせよ、電流の結果として化学作用が生じるのか、それとも化学作用（化学親和力）の結果として電流が生じるのか、どちらが原因でどちらが結果であるかについては不確かであった。ファラデーは、化学作用こそが原因であり本質であると考えていたが、化学作用も電気が流れないと始まらないことから、導線がつながれて電気が流れる前後の電解質の状態変化を知ることが重要な課題となった⁹⁶。ファラデーはこの問題について次のように述べている。

私は、電解質導体の中に緊張の状態を示唆するものを注意深く探し求めてきた。そして、その放電の前か最中に、何らかの構造のようなものを生み出しているのではないかと考え、これを偏光によって明らかにしようと努めた⁹⁷。

ここで述べられているように、ファラデーは、電解質の中で生じていると考えられる粒子の電氣的配列の変化を調べるために、同じように極性をともなう偏光（polarized light）を用いて、その影響を観察する実験をおこなった⁹⁸。しかし結果的には、これらの偏光を用いた実験では何らの作用も観察されることはなく、「緊張や構造」⁹⁹についての発見は得られなかった。ただし、この1833年の時点では偏光の実験によって有意な結果を得ること

⁹⁴ ERE, 1:272, par. 917.

⁹⁵ ERE, 1:273, par. 918.

⁹⁶ ERE, 1:283, par. 946.

⁹⁷ ERE, 1:285, par. 951.

⁹⁸ この実験は、電気分解の研究を本格的におこなう10年前の1822年9月10日にもおこなわれ、否定的な結果が得られていた。(10 September 1822, *Diary*, 1:71.) しかし、重要な実験であったため、1833年5月2日と6日に再実験がおこなわれた。(2, 6 May 1833, *Diary*, 2:69-73, par. 482-504.)

⁹⁹ 6 May 1833, *Diary*, 2:72, par. 503.

ができなかったが、1845年になって改めて実験が進められ、光磁気効果の発見という大きな成果に結びつくことになる。この経緯については、第6章で改めて論じる。

結局のところ、このように電流の発生が化学親和力の違いによるものだと結論づけられても、溶液中で粒子の配列が整って電流になる原因は不明なままであった。しかし、その配列がきちんと最初から最後まで整わなければ、金属が接触しても電流は流れないはずである¹⁰⁰。したがって、ファラデーは、金属が接触したときに電気的な作用がその接触した場所から広がっていくのではなく、そもそも可能な粒子の配列が前もって決まっていた、接触によってその配列が顕在化するのだと考えた。ファラデーは、その状態が接触によって顕在化する瞬間に起きていることの重要性を次のように述べている。

電気の学問において、単純なヴォルタ回路における、金属接触が最初に完了するときの「前とその瞬間」の金属と電解質導体の状態より重要なものは少しもないように思われる¹⁰¹。

そして、ファラデーはヴォルタ電池の電流発生においても電磁誘導による電流発生と同じように、前もって作用のあり方が規定されているのではないかと考えた。すなわち、電気緊張状態によって電流が生じる場合、それが磁気的な作用にせよ電気的な化学作用にせよ、導線の移動や金属の接触によって現象が顕在化する以前から、電気緊張状態は潜在的に存在していると考えたのである。

こうしてファラデーは、誘導現象ではその現象に先だって作用の空間的な状態が決まっていると考えるようになっていた。そして、この前もって与えられた状態を表現するためにファラデーが用いたのが、磁気や電気の作用の「線」であった。この作用の線は、研究が進められていく中で、「力線 (lines of force)」としてファラデーの中心的な概念として定着していくことになる¹⁰²。

もっとも1830年代前半の段階では、この「力線」については「磁気曲線 (magnetic curves)」や「作用線 (lines of action)」といった言葉が用いられており、「力線 (lines of force)」というように対象が「力」に限定されていたわけではなく、それは作用を表現するための便宜的な方法に過ぎなかった。しかし、4.1節で論じたように電磁誘導の研究を通じて、力線は

¹⁰⁰ *ERE*, 1:275, par. 923.

¹⁰¹ *ERE*, 1:283, par. 946. この問題については、ファラデーの化学作用を擁護する説明に対してフェヒナー (Gustav Theodor Fechner, 1801-87) から異議が唱えられる。(Christian Friedrich Schoenbein to Faraday, 14 July 1838, *Correspondence*, 2:507; Christian Friedrich Schoenbein to Faraday, 12 August 1838, *Correspondence*, 2:515.) そのためファラデーは、1838年の誘導の理論の発表後に他の研究者たちの研究成果を踏まえて再び詳細な実験に取り組み、改めて化学作用説を擁護する立場から1840年に研究結果を発表している。(ERE, 2:18-105.)

¹⁰² 1832年3月12日付の書簡によると、ファラデーはそれまでの研究からさらに一般化して、電磁気現象を音と光とのアナロジーで考え、振動によって空間を伝わるものと考えていた。この書類は封をされて王立協会の秘書であるチルドレン (John George Children, 1777-1852) に託された。(Faraday to John George Children and Sealed Note, 12 March 1832, *Correspondence*, 2:26; Williams, *Michael Faraday*, 181.)

作用を説明するための作用の原因そのものとして位置づけられ、さらに電気分解の研究を通じてその形状の不規則性が意識されていった。そして、その線の不規則性は、引力や斥力ではなく、粒子の連続的な作用によって担われていると考えられた。また、ヴォルタ電池の電流発生過程の考察でも、物質が存在しているために作用の原因はその物質の化学作用に帰されたものの、作用の分布そのものは前もって空間的に定まっていると考えられた。

そして、磁気の線と電気の線には似たような点も多かったが、根本的に異なる点もあった。磁気の線は、作用の原因を説明するために空間的に独立した存在であるかのように扱われ、作用の形状は幾何学的な直線や円形で表現されていた。その一方で、電気の線はあくまで物質粒子による化学作用の方向を表現するための手段であり、その作用の形状は説明のできない不規則なものであると考えられていた。

しかし、このような違いがあるにせよ、「線」という概念がファラデーの中で独特な意味を持つようになりつつあったことは事実である。そして、このように作用の線や粒子の存在によって作用を説明できるようになるにつれて、「電気緊張状態」という言葉は不要になり、用いられなくなっていった。

なお、ファラデーは後に、近接粒子の連続的な分極によって作用の伝達を説明するようになるが、この1834年の時点では分極という概念には重要な意味が与えられていたわけではない。ここまでの研究は、あくまで電流をとまなう電気緊張状態の研究の一環であり、電流は局所的な配置転換であるにせよ粒子の移動で説明づけられていた。

その一方で、粒子についての理解は少しずつ変化していった。電気化学的な作用の原因となっている粒子は、電気分解の法則では重さとも関係していると考えられた。そうすると、引力も粒子に対して作用することになり、そうすると粒子を原子と同一視してボスコヴィッチ的な原子論によって一元的に理解できる可能性も出てくることになった。ファラデーは、この粒子と原子の区別について次のように述べている。

私は、長らく、引力と物質の粒子と原子について考えてきましたが、(実験との関連において) 考えれば考えるほど、私の中で物質の原子と粒子の観念の区別は小さなものになっていきます¹⁰³。

このように、電磁気現象における粒子のはたらきについては、当時の原子論で説明できる可能性も見えてくるようになった。そのため、電磁気現象を解明するために、粒子のはたらきについての理解を深めることがさらに重要な課題となった。そしてこの理解は、誘導と放電という二つの対極的な現象に注目して、それらの一般的な理論化を進めていく中で深まっていくことになる。

それでは次節で、この放電と、その前段階にある現象としての静電誘導について、ファラデーが考察を進めていった過程を分析していくことにしよう。

¹⁰³ Faraday to Frederick Oldfield Ward, 16 June 1834, *Correspondence*, 2:194.

4.3. 静電誘導と放電

前節までに論じたように、ファラデーは1831年から1834年にかけて、電流によって引き起こされる「電気緊張状態」の研究に取り組んでいた。これによって、当初から研究の対象とされていた電磁誘導と電気分解という二つの特徴的な誘導現象について、一通りの研究がおこなわれたことになる。

そして、この時点では、粒子が移動して分解と合成を繰り返すことによって、電気が伝えられていると考えられていた。4.2節の前半で論じたように、電気分解においては電解質が液体の場合には電流が発生するが、固体になると電流が止まることから、電気が生じるためには「元素の移動」が必要条件であると考えられていたのである。そして、この電気分解の研究から得られた「元素の移動」の有無という基準は、その直後に進められていく静電誘導と放電の研究を通じて、一般的な誘導の理論へと拡張されていった。4.1節の最初で引用した電気緊張状態と電気分解との関連性についてのファラデーの説明では、電気分解は誘導と放電の連続によって引き起こされていると述べられていた。しかし、この誘導と放電との関係は、電気分解の研究の中では判然としないものであった。

このように、誘導と放電についての研究の方向性は、最初からはっきりと計画されていたわけではなく、電気緊張状態の実験を進める中で徐々に明らかになっていった。ファラデーは、電気分解の研究を進めるかたわら、他の研究者たちと電磁誘導についての議論を重ねていた。そして、1834年秋には周りの報告に基づいて電磁石によって引き起こされる放電現象に注目していた¹⁰⁴。この現象は、電磁石に流れる電流を切断するときだけ、電気ショックや電気火花が観察されるというものであった。このような強い効果は、電池と接続するときや、電池そのものからは観察できないものであった。

当初ファラデーは、この現象が導線中を循環するために電気が持っている「運動量 (momentum)」や「慣性 (inertia)」の効果ではないかと考えた。しかし、その効果の大きさが導線の長さや、それが直線状か螺旋状かといった形状の違いによって大きく変化することから、運動量や慣性に帰着させる解釈は不相当であると判断するようになった¹⁰⁵。そして、その原因が電流による自己誘導にあると考えるようになる。すなわち、導線中の電流の変化が磁気作用を生み、それが近接する導線にも電流を誘導し、その電磁誘導の作用

¹⁰⁴ *ERE*, 2:164-211. 放電現象について、ファラデーはジェンキン (William Jenkin) という若者から電磁石の電流を切断するときの電気ショックについて報告を受けて研究を進めた。(15 October 1834, *Diary*, 2:330, par. 2073; *ERE*, 1:322, par. 1049, 2:204.) ジェンキンについての詳細は不明だが、ティンダルによると、科学研究に有望な若者であったが、父親の意向で別の進路を選んだという。(Tyndall, *Faraday as a Discoverer*, 33.) ジェンキンの実験に対するファラデーの研究態度についてはモラスの研究を参照。(Morus, "Different Experimental Lives," 16-8.)

¹⁰⁵ *ERE*, 1:330, par. 1077. ファラデーは、アンペールの「電気動力学 (Electro-dynamic)」にも言及しながら、基本的に電磁気現象を力学的に解釈することには否定的であった。Faraday to William Whewell, 19 September 1835, *Correspondence*, 2:277-79. なお、ヒューエルは、このファラデーの解釈に満足せず、「運動量」や「慣性」といった力学的な観点から電磁誘導を解釈する立場を取り続けた。(William Whewell to Faraday, 9 September 1835, *Correspondence*, 2:275-7; Anderson, "The Whewell-Faraday Exchange," 582-90.) ヒューエルの議論については2.3節を参照せよ。

が電気ショックや電気火花を生み出していると考えたのである¹⁰⁶。そうすると、長い導線が短い導線に比べて効果が大きくなることは、誘導の作用に関与する距離が長くなるためであると考えられたし、形状によって効果が変わるのは、螺旋状であるときに「旋回部分の相互の誘導作用によって隣どうしが助け合い、効果の総量がとても大きく増幅される」ためであると考えられた¹⁰⁷。そして、この効果が電流の状態変化によって瞬間的に生じることも、放電が電磁誘導の作用であるためだと判断された¹⁰⁸。このように、放電の発生は誘導と関連づけて理解されるようになった。しかし、その具体的な過程については十分に説明を与えることはできなかった。

ファラデーは、この放電と自己誘導の関係を『電気実験研究』の第9集として発表した。そして、次の第10集はヴォルタ電池について書かれた論文であり、1834年10月に執筆された。しかし、それに続く第11集は第5章で論じる誘導の一般理論についての論文であり、1837年11月に執筆された。したがって、この第10集と第11集のあいだには2年以上の期間が存在することになる。もちろん、このあいだにもファラデーは誘導現象についての研究を続けていた。そして、その期間は結果的に、それまでに形成されつつあった誘導現象についての理解を総合して、一般的な理論へと再構成していくために必要な準備期間となった。

その理論の再構成のための契機となったのが放電現象についての研究であった。放電は第4章の冒頭で引用したように、「運動している電気」によって引き起こされる第五の効果としてあげられていた¹⁰⁹。この放電現象については、静電誘導が電気分解などの「運動している電気」に至る前の緊張状態として理解されていく中で、典型的な「運動している電気」の現象として注目されるようになった。そのため、この節でも、まずは静電誘導についてのファラデーの研究を論じることにする。なお、この節では区別のために「静電誘導」という名称を用いているが、ファラデーがこの時点で現象が「静的 (statical)」であることをとくに明記していたわけではない。むしろ、この節で論じる「静電誘導」は、次で述べるように、ファラデーにとってあくまで「一般」の電気現象であった。

ファラデーは、1835年11月3日付の研究日誌で「このところ一般の電気とヴォルタ電気との関係について、すなわち前者の誘導と後者の分解との関係について多くを考察してきたが、私はそこにまったく密接な結びつきがあるはずだと確信している」¹¹⁰と記し、静電誘導の研究を始めている。そして、この静電誘導と電気分解とを包括的に理解するための「結びつき」としては導体ではなく「電気体 (electric)」が第一に考えられ、その物理的な特徴を中心に据えることで電気現象の再解釈が目指された。その再解釈の手掛りを、フ

¹⁰⁶ *ERE*, 1:334, par. 1092. *ERE*, 2:209-10. そのためファラデーは、この現象が電流相互の誘導の効果であり「電気緊張状態」が関係しているという認識の下で研究を進めていく。(27 October 1834, *Diary*, 2:332, par. 2092-7.)

¹⁰⁷ *ERE*, 1:334-5, par. 1093-4.

¹⁰⁸ *ERE*, 1:337, par. 1100.

¹⁰⁹ *ERE*, 1:78, par. 267.

¹¹⁰ 3 November 1835, *Diary*, 2:387, par. 2468.

ファラデーは次のように述べている。

電気は、導体の表面に存在しているのだろうか、それともそれと接触している電気体 (electric) の表面に存在しているのだろうか。私は電気体にてあると考えており、その観点で結果を出さなければならない。それは、さまざまな電気現象を照合して結びつける上で、そしてそれらを解釈する上で、大きな違いをもたらすであろう¹¹¹。

すなわちファラデーは、さまざまな電気現象が「電気体」の効果として一元的に説明できると考えたのであった。そして、この表面の帯電については、物質内部の粒子の電気的状態、すなわちプラスとマイナスの分極状態が連続的に並ぶことで、両端にのみ電気が現れる状態として説明された。例えば、両側から電気をかけられた一枚のガラス平板では、実際には内部の粒子に電荷が存在し続けており、二枚に分割されるとそれぞれ新しくできた表面に電荷が現れ、逆にその二枚を合わせると電荷は消滅したように見える¹¹²。あるいは、このような「誘導の下にある平板の状態は磁石の状態と同じであるから、分割したり砕いたりしたら、新しい正あるいは負の面が一緒に、以前はまったく明らかではなかったところに現れる」¹¹³のだと理解された。

さらに、このような電気的配列の状態は粒子が横断する前の電解質の状態と同じであり、電解質が固体である状態とも同じであると考えられた¹¹⁴。このように、電気現象が物体の粒子の作用であるならば、その粒子の電気的な力と化学親和力との大小関係も問題となる。この問題は、前節で論じた電気分解の「ファラデーの法則」の導入の際にも問題視されていたことである。この問題についてファラデーは次のように述べている。

もし、電気が電気体に存在しているのであれば、その現象は質量ではなく「粒子」、すなわち導体に触れている電気体の粒子に関係しているのだろう。それゆえ、「電気体や導体」の表面に存在している電気の割合は、自然な状態において粒子に属しており、それに化学親和力を与えているもののうち、ほとんど無限に小さい量でなければならない¹¹⁵。

すなわち、化学親和力が電気的な力と同一なものであるとすると、外部に作用している力 (すなわち、「電気的」な力) は内部で作用している力 (すなわち、「化学親和力」) に比べて極めて小さいと考える必要があった。そうでなければ、電気分解が小さな電気のも生じることから、化学親和力も極めて小さい力であると結論づけられてしまう。その一方で、外部に作用している電気の力が小さいとすると、それが物質の帯電のような形で感

¹¹¹ Ibid., par. 2469.

¹¹² 3 November 1835, *Diary*, 2:390, par. 2507.

¹¹³ Ibid., par. 2509.

¹¹⁴ Ibid., par. 2511.

¹¹⁵ 3 November 1835, *Diary*, 2:392, par. 2531-2.

覚できるような大きさになるためには、何らかの方法で小さな電気の力が増幅されなければならない。

ファラデーは、この増幅の方法が電気体に特徴的な誘導作用のあり方によって説明できると考えていた。また、電気体は、その内部の粒子の電氣的配列を連続的に整えることで大きな電気を保持できるという物質的な特徴を持っていると考えていた。この特徴をファラデーは空気についての考察から次のように述べている。なお、ここで議論の対象となっている空気の問題については後述する。

かたまり (mass) としての空気が大きな容量を持たないことは明らかであり、空気や金属で満たされて等量の電気を帯びた球は、等しく、あるいはほぼ等しく緊張している。それゆえ空気と金属との相違、あるいは電気体と導体との相違は、かたまり (masses) として考えると、それらの接触面において前者が後者よりも多くの容量を持つということではない。

真の相違は、電気体がくまなく分極し、金属にはそれができないためであろう。とくに誘導の下では、電気体の表面の容量は相当に大きくなるが、導体の表面の容量としての特性は決して変化しない¹¹⁶。

すなわち、電気体が帯電して大きな電気を保持できるのは、表面にそのような容量があるからではなく、誘導作用によって物質内部の粒子が全体的に分極して電氣的配列を維持しているからであると考えられた。そして、この電氣的配列は、連続する粒子が移動を妨げられて緊張している状態であると理解された。

このように電気体が電気を保持できる一方で、導体は電気を保持できないという考え方は、1.1 節で解説したように電気学における伝統的な理解であった。ギルバートが摩擦によって電気を帯びる物質を「電気体 (electrica)」と名づけて電気現象の中心に位置づけたように、19 世紀のファラデーの時代においても、「電気体」とは静電気を帯びることのできる物質のことであり、導体は「電気体」ではなかった。あるいは、1.3 節のエピヌスの分類に従うと「電気体」とは「本質的に電氣的 (per se electrica)」な物体と考えることができる。その一方で、導体は「本質的に電氣的」な物体とは考えられない。ファラデーはこの区別を排除して、電気分解や絶縁、誘導、伝導といったさまざまな電気現象を、その物質的な構造を統一的に理解することによって一元的に説明することを目指したのである。それが「誘導」ないし「電気体」を中心とした説明であった。

このように誘導現象を基本とすると、まずは物質内部の状態を知ることが不可欠となり、「不導体として中間にある物体の状態を考えなければならない」¹¹⁷ことになる。そのため、前述の引用のように、帯電した金属板で囲われた空気の電氣的状態が、この時期のファラ

¹¹⁶ 7 December 1835, *Diary*, 2:412, par. 2706-7.

¹¹⁷ 7 December 1835, *Diary*, 2:413, par. 2708.

デーの重要な関心事になったのである。

導体で囲われた空間の電気の状態としては、例えば 1.3.2 節のキャヴェンディッシュの実験にあるように、図 28 上のような帯電した球殻の内側では電気が観測されないことが報告されていた¹¹⁸。ファラデーは、この球殻という形状を一般化して、導体内部の電気の状態についての考察を進める。例えば、導体球中の電気の状態は、図 28 下のようにその球殻を開いていくことによって、空間に向かって開かれた平板や尖端とも関連づけて論じられるようになる。

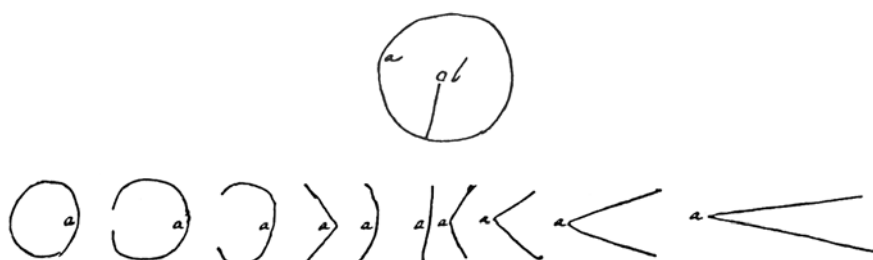


図 28：導体球中の電気の状態を考察する際の図（上）と、導体球から平板、そして尖端へと至る形状の変化（下）。*a* 点の電気の状態は、このようにさまざまな形状と関連づけて考察することができる。（3 November 1835, *Diary*, 2:387-388.）

そしてファラデーは、球殻内で電気が観測されない理由を、向かい合う導体からの力が相互的に作用しているためだと考えた¹¹⁹。そして、この考え方を実証するため、大きな銅製の容器を王立研究所近くの銅細工師から借りてきて、導体で囲われた空間の電気の状態を詳細に調べる計画を立てる。

この大きな銅製の容器を用いた実験は、1835 年 12 月 5 日よりおこなわれた。この実験で用いられた銅製の容器は、図 29 のような形状をした直径 31 インチの「ボイラー（煮沸器）」であった。このボイラーは絶縁のために台の上に設置され、さらにライデン瓶によって帯電されて、その周囲の電気の状態を銅製の小球や導線によって測定された。

¹¹⁸ 3 November 1835, *Diary*, 2:387, par. 2474. ファラデーはこの実験を、クーロンとビオによって報告された実験として研究日誌で言及している。

¹¹⁹ 26 November 1835, *Diary*, 2:404, par. 2649. および、11 月 3 日時点での同様の考察は 3 November 1835, *Diary*, 2:388-9, par. 2483-94. を参照せよ。



図 29：銅製の容器の周囲における電気的状態の観測点（左）と、観測された力が等しい点を結んだ線（右）（8 December 1835, *Diary*, 2:414.）

ファラデーは、まずはボイラー内外の電気的な状態を簡単に調べた。続いて、ボイラーに銅板で蓋をした場合についても調べたが、その場合には内部に電気は観測されなかった¹²⁰。そして、さらにボイラー内部の電気的状態を詳細に知るために、図 29 左のように、ボイラー内部の各点で導線に誘導される電気の強さを調べた。ファラデーは、その観測結果を次のように述べている。

すべての面が一度に作用するために、 h における誘導が最も強くなった。そして、導線の先を h から i や k に向けて水平に運ぶと、金属にかなり近づくことになるが、誘導の効果はそれほど増加しなかった。そして、 l や m などのより高いところになると、金属に近づいても減衰しさえした¹²¹。

このように誘導される電気の強さは、金属からの距離に比例していたわけではない。そこで、ファラデーはこの結果を表現するために作用の等しい点を線で結ぶことにし、その線は図 29 右のようになった。

この作用の形状について、ファラデーは「誘導のととても美しい状態である」¹²²と評価している。ファラデーがこのように評価した理由は、誘導される電気の強さが、容器の形状に沿いながら、観測点に向き合うボイラーの表面の電気的状態に応じて変化していたためであった¹²³。すなわち、この観測結果から、誘導の作用が帯電した物体からの距離によって決まるのではなく、両側から緊張状態を生み出している帯電した物体の形状によって決まることになる。

この二つの理解は一見すると似ているが、その本質は大きく異なる。このように誘導作用が両側からかけられた緊張状態であるならば、向かい合う物質が存在しない場合には緊

¹²⁰ 5 December 1835, *Diary*, 2:411, par. 2697.

¹²¹ 8 December 1835, *Diary*, 2:414, par. 2718.

¹²² *Ibid.*, par. 2719.

¹²³ 8 December 1835, *Diary*, 2:413, par. 2714. ボイラーの形状に応じた作用の説明は、『電気実験研究』においてより具体的に与えられている。(ERE, 1:497-8, par. 1565-6.)

張が生じえないため、電気も観測されないことになる。この第4章の冒頭でも引用したように、ファラデーは静電誘導を生み出す緊張状態を「引力や斥力である」¹²⁴としていたが、誘導現象が中心力ではなく両端からの緊張ないし張力によって引き起こされる作用であるとする考え方に傾いていったのである。

この予測を確認するための実験は1835年12月10日におこなわれた。ファラデーは、大気圏外が真空であるとするならば両側から緊張状態を担うために必要な物体の片方が存在しないため、誘導の作用は起こりえないのではないかと考えた。そして、快晴の夜空に向けて金属製の凹面鏡を設置して帯電させ、その表面の電氣的状態を測定した。しかし、その結果はファラデーの予想に反するものであり、金属鏡の表面付近には電気が観測された。ファラデーは後に誘導の一般理論を発表するにあたって、この時点では誘導作用が曲線的であることについての理解がなかったために、このように予想していたと述べている¹²⁵。すなわち、ファラデーはこの時点では、遠隔作用的な引力や斥力には批判的であったものの、作用が曲線的であることに本質的な意味を見出していたわけではなく、そこに何らかの新たな重要性があると意識していたわけでもなかった。

なお、前述のようにボイラーに銅板で蓋をした場合には、ボイラーの内部では電気は観測されなかった。そして、このボイラーの実験をより大規模にした実験が1836年1月に実行に移されることになった。この実験では、王立研究所の講堂の中に、木枠に紙を貼って網目状に銅線を巻きつけた一辺12フィートの立方体が作られた。図30は、この立方体を描いたものである。

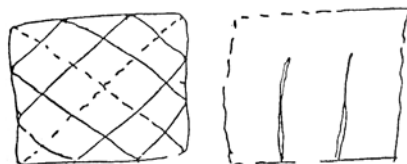


図30：ファラデーは、立方体状に組み立てた木枠に紙を貼り、外側には網目状に銅線を巻きつけ（左）、内側には各側面に2本のスズ箔を貼りつけ（右）、帯電させてその内部の電氣的状態を調べた。この籠状の立方体は「ファラデー・ケージ」として知られている。（15 January 1836, *Diary*, 2:426.）

ファラデーはこの立方体を十分に荷電したが、ボイラーの実験と同じように、立方体の内部では基本的に電気は観測されなかった¹²⁶。ファラデーはこの結果から、立方体の内部

¹²⁴ *ERE*, 1:78, par. 267.

¹²⁵ *ERE*, 1:513-4, par. 1614. ただし、5.5節で改めて論じるように、ファラデーの近接粒子の理論には真空状態の電気現象について説明できないという欠陥があった。（*ERE*, 1:514, par. 1615.）

¹²⁶ 15 January 1836, *Diary*, 2:426-38, par. 2808-59; *ERE*, 1:365-6, par. 1173-4. ただし、真鍮球とガラス棒から

で空気全体が帯電していたわけではなく、電気は空気を通して作用していたと結論づけている¹²⁷。もし、空気が帯電していたのであれば、それに対応する電荷が立方体の内側でも観測されるはずだと考えられたからである¹²⁸。その一方で、帯電した立方体の外側を放電した場合には、内部で電気が観測された。そのため、ファラデーは「作用が前もってそこにあった」¹²⁹と考え、これまで誘導について抱えてきた、電气的状態が現象に先立つという見解を再確認した。この籠状の立方体を用いた実験は、いわゆる「ファラデー・ケージ」の実験として知られている。

ファラデーはこのように静電誘導の実験を通じて、物質内部の電气的状態についての考察を進めていった。前述のようにファラデーは、「電気体」の帯電は、物質内部の粒子の電气的配列が連続的に整うことによって生じていると考えていた。その一方で、電気分解においては、電解質による誘導は静電誘導では起こり得ない効果を生み出しているにせよ、それらは本質的に同じ理論で説明できると考えるようになった¹³⁰。そうすると、静電気現象において「質量」に及ぼされる電气的な力は、「粒子」に及ぼされる化学的な力に他ならず、前者は後者の直接的な帰結であると考えられるようになる¹³¹。これについてファラデーは、電気現象が必ず分極をとまなうことから、「電気とは、あらゆる場合において質量への (*en masse*) 力能の蓄積ではなく、極の位置にある粒子の配列に過ぎない」¹³²と述べている。このファラデーの主張は、デーヴィーが、化学的な力は粒子に対して作用し、その一方で電气的な力は質量に対して作用すると区別していたことを意識したものであろう。

なる観測機器を挿入するとき、その入口付近では電気が観測された。また、ファラデーは一通りの観測を終えて、実際に自分が立方体の中に入って電気を観測することを試みた。その結果、箔検電気には何の影響もなく、フランネルで摩擦すると、通常と変わらない様子で電気が観測された。また、ロウソクの炎などにも何の影響も見られなかった。

¹²⁷ 15 January 1836, *Diary*, 2:436, par. 2843-50. ボイラーの実験でも、誘導の作用が空気を通して及ぼされている様子が報告されていた。(8 December 1835, *Diary*, 2:416, par. 2733.)

¹²⁸ *ERE*, 1:365-6, par. 1173.

¹²⁹ 15 January 1836, *Diary*, 2:435, par. 2841. ファラデーは、「ケージ」の内部で電荷が観測されたことについて、この「ケージ」が金属ではなく、不導体の紙を用いて作られていたことを理由にあげている。なお、このように作用が前もって存在することが確認されたことから、グッディングはこの「ファラデー・ケージ」の実験が静電誘導や荷電について考える上での決定実験になったと論じている。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 244.) この第4章で繰り返し引用してきたように、ファラデーは他の実験においても作用が前もって存在するという同様の見解を示していた。しかし、この実験の前後でのファラデーの行動から考えると、新たな実験によってその見解が再確認されたことについては重要性が高いと言えるだろうが、決定実験とまで言えるかどうかは疑問である。

¹³⁰ 11 December 1835, *Diary*, 2:419, par. 2758-9. なおファラデーは、電気分解の研究を進める中で、1832年末に空気の電气的作用についての実験もおこなっていた。ただ、その時点では空気については「一般的な言葉からすると、それは導体ではなく、分解もされない」(*ERE*, 1:142, par. 497.) といった不明確な位置づけしかなされていなかった。1832年9月6日の実験では空気が電気を伝える媒体と考えられていたが、空気はもちろん導体ではない。ファラデーは1832年12月22日に空気の影響を考察するために、9月6日の実験で用いた電気回路の中に排気することのできるガラス球をつなぎ、その中で電気分解が生じるかどうかを確かめる実験をおこなった。結局、このガラス球をつないだ状態では、ガラス球を排気してもしなくても電気分解は生じなかった。この結果は、針にかかる電気の強度が十分であっても、針を通る電気の量が十分ではないためであると考えられた。しかし、電池がゆっくりと放電されていくことから、針を通る電気の量は十分ではないにせよ存在すると考えられていた。(22 December 1832, *Diary*, 2:35, par. 210-2.)

¹³¹ 11 December 1835, *Diary*, 2:419, par. 2761.

¹³² 22 December 1835, *Diary*, 2:420, par. 2770.

電気力も化学力と同じく粒子に対して作用しているものであり、その作用が集まることで、全体として帯電などの電気現象を生み出していると理解されたのである。

これらの考察から、金属は、誘導の緊張状態を維持できないという意味で極端な物質であり、空気やガラス、セラック（天然樹脂）の対極に位置づけられることになる。そしてさらに、放電現象が、粒子から粒子へときわめて迅速に電気が移動する現象として、誘導によって引き起こされる極端な現象として注目されるようになった¹³³。ファラデーはヴォルタ電池による電流発生と放電との関係について次のように述べている。

強力なヴォルタ電池の終端のあいだにある空気やガラス、あるいは水の中で起こりうる誘導は、それと同じ終端間において「固体であれ液体であれ」電解質の中で起こる誘導と同じであり、それよりも弱い終端や、一組の平板のあいだで起こる誘導とすら同じである。ヴォルタ電池でもライデン瓶の被膜でも、その終端間にある二枚の金属表面のあいだの電気火花は、接合していようがいまいが一組の平板のあいだで起こる電気火花と同じである。金属の伝導する力能は、空気の伝導する力能と同じであり、空気の絶縁する力能は金属の遅延させる力能と同じである¹³⁴。

このように、物質の帯電は一貫して粒子の緊張によって引き起こされる化学現象であると考えられるようになっていった¹³⁵。なお、ここで述べられている一組の平板とは、4.2節のヴォルタ電流の発生原因の議論で言及した、希硫酸中で電気火花を生じる一組の亜鉛板と銅板のことである¹³⁶。ファラデーは、前述の自己誘導の研究を通じて、誘導と関連させながら放電についての理解を深めていた。そして静電誘導についての考察をある程度まで進め、その理解を電気化学作用の理解とすり合わせながら包括的に再構成していく中で、放電現象が、誘導によって引き起こされる極端な現象として改めて注目されるようになったのである。

一方、前述のボイラーの実験を終えた段階で、ファラデーは曲線的に作用することが誘導の特徴の一つだと考えていた¹³⁷。また、放電も電気分解も、同じように粒子の作用であると考えていた。しかし、この二つの条件が因果関係として重要な意味を持って結びつけられていたわけではなかった。また、作用が曲線的であることが、それほど重要な意味を持っていたわけでもなかった。そもそも、ファラデーは誘導の作用を両端からかけられた

¹³³ Ibid., par. 2768-75.

¹³⁴ 22 December 1835, *Diary*, 2:420-1, par. 2772. なお、金属における伝導の遅延はホイートストンによって報告されていた。(22 December 1835, *Diary*, 2:420, par. 2769; *ERE*, 1:420-21, par. 1328-30; *ERE*, 1:512-3, par. 1612; *ERE*, 1:525-6, par. 1649) ホイートストンの実験については、5.4節や6.4節も参照せよ。

¹³⁵ 1 February 1836, *Diary*, 2:442, par. 2887-92.

¹³⁶ *ERE*, 1:271-2, par. 915; *ERE*, 1:286-8, par. 956-8.

¹³⁷ 16 January 1836, *Diary*, 2:438, par. 2867. このように曲線的な作用であるとする理由を、ファラデーは次のように述べている。「角をまわることによって容易にわかるように、分解する溶液においてそうである。そして、上記のように、そしてガラスの端をまわり込んでいく電気火花や、ガラスの背後から表面を放電させる尖端によって容易にわかるように、空気においてもそうである。などなど。」(16 January 1836, *Diary*, 2:438-9, par. 2867.)

緊張状態として考えており、そうすると曲線的であるよりも直線的である方が基本的な状態であるということになるだろう。なぜなら、糸などでも、力が両端にかかって張っている状態では、そのような形状になるからである。だからファラデーは、1835年12月10日におこなった天空に向けた誘導作用の実験で、作用が直線的になることを想定していたのである。それに対して、1837年に発表される「近接粒子」の理論では、作用が曲線的であることが強調され、その曲線を生み出す原因として「近接粒子」が重要な意味を持たされることになる。

この時点で、ファラデーが曲線と粒子との結びつきを十分に意識していなかった理由は、どちらの現象も粒子の移動をとまなうからであろう。粒子が移動する場合には粒子がその場所に固定されているわけではないので、粒子を複雑な曲線を担う原因とみなすことは困難である。粒子の移動についてのファラデーの理解の変化は、次の4.4節で改めて論じることにするが、この変化の重要な契機となったのは、この放電の研究であったと考えられる。

放電には、ブラシ放電 (brush) やグロー放電 (glow)、電気火花 (spark) などの区分が存在する。ファラデーはこれらの中でも、まずは「遅い放電 (slow discharge)」であるブラシ放電に注目する¹³⁸。

固体と流体の絶縁体の違いを考えなければならない。前者がおこなうことは後者にはおそらくおこなえないような、ある種の伝導や放電がある。それは、尖端がライデン瓶を「一度に」放電しえないような、遅い放電でもって考察できるだろう¹³⁹。

このように、ブラシ放電は空気という流体と関係しており、さまざまな形の放電の中でも緩やかであるために、誘導に近い現象であるとみなされていた¹⁴⁰。そして、一般的な放電とブラシ放電との違いは、前者が蓄積された電気を一度に放出するのに対して、後者は部分的に放出することにあるとされた¹⁴¹。

これらを確認するための実験は、1836年2月よりおこなわれた。そして、ブラシ放電が連続的 (continuous) ではなく断続的 (successive) であることなどが確かめられた¹⁴²。これらの議論からもわかるように、ファラデーは放電を「流れ (stream)」であると考えていた¹⁴³。しかし、電気が流れるとしても、放電は伝導とは異なる現象だと考えられた。なぜ

¹³⁸ 「ブラシ放電」とは、コロナ放電の中でもとくに線状 (ブラシ状) の放電のことを指す。コロナ放電とは、強い電場が生じている場所で局所的におこる放電のことである。

¹³⁹ 16 January 1836, *Diary*, 2:438, par. 2860.

¹⁴⁰ ファラデーは、そもそも1835年11月に静電誘導の実験を始めるにあたって、ブラシ放電が空気の荷電であって誘導の一現象である可能性を想定しながら、どのようにして電気火花や放電が生じているのかを調べる必要があると考えていた。(3 November 1835, *Diary*, 2:391, par. 2529.)

¹⁴¹ 11 February 1836, *Diary*, 2:455, par. 2966.

¹⁴² 8 February 1836, *Diary*, 2:443, par. 2897. また、電気の出力を上げることで、ブラシ放電からグロー放電に変化することを新たに見出した。(8 February 1836, *Diary*, 2:444, par. 2902-6.)

¹⁴³ 例えば、21 June 1836, *Diary*, 3:14-25, par. 3110-66; 4 July 1836, *Diary*, 3:44-5, par. 3250. しかも、「わずか

なら、空気は導体ではないし、空気そのものが流れている場合も観測されていたからである。

そこでファラデーは、放電している針の周囲に生じる空気の流れを、煙を用いて観察することにした。そして、この針の尖端の空気の流れの原因が「誘導および（問題含みの）空気の帯電に対して最も本質的で直接的な関係を持っている」¹⁴⁴と考え、空気の電氣的状態についての観察を進める。そして、その観察の結果を次のように考察している。

そのような空気は全体的に P や N に帯電しているのか、それともその実際の量の上では P も N も得ておらず、方向づけられた極性としてのみ帯電しているのだろうか。これは現在の大きな問題であり、すなわち電気体 (electric) が帯電できるかということである。私は導体ができるとは考えていない¹⁴⁵。

空気が極性を持つように帯電しているのであれば、帯電した空気に流れがあるにせよ、放電は誘導に近い現象になる。そしてブラシ放電は、その過渡的な状態として位置づけられる。こうしてファラデーは、放電を基本的に「空氣的媒体 (aerial medium)」の分極の効果だと考えるようになった¹⁴⁶。

しかし、放電を空気の電荷と結びつけるファラデーの解釈には本質的な問題が内在していた。その問題とは、放電の物質的な原因を空気に求めると、真空中に近づくほど放電がおこりやすくなるという事実を説明できなくなることであった。そのため、ファラデーは空気の希薄なところでは空気のかわりにエーテルのような「弾性媒体 (elastic medium)」を想定するなど、アドホックな説明をせざるを得なかった¹⁴⁷。

ファラデーはこの半年後に、誘導を一般原理としてさまざまな電気現象を統一的に理解しようと試み、放電もまた誘導によって引き起こされる現象であるとみなすようになる¹⁴⁸。しかし、そのように一般原理を想定しても、粒子の分極によって説明することが不可能な真空状態については、例外として扱わざるを得なかった。ファラデーは、この真空中の放電の特殊性を次のように述べている。

もし、誘導が緊張の電気現象に対して本質的であるとすれば、そのような現象は「物質」を必要とせざるをえない。伝導も物質によるとして、真空の現象はその両方とも異なり、特殊なものとなるはずである。あるいは、そこを通過するときには「誘導」

にたわんで、くねくねとねじれている」と表現している。(21 June 1836, *Diary*, 3:16, par. 3121.) なお、この6月21日に、ファラデーはグロー放電の一端が暗くなり、導体から離れたように見える現象が起きることを発見した。この現象は「ファラデー暗部 (Faraday dark space)」として知られている。(21 June 1836, *Diary*, 3:19, par. 3136-7; *ERE*, 1:490-6, par. 1544-60.)

¹⁴⁴ 4 July 1836, *Diary*, 3:45, par. 3253.

¹⁴⁵ 4 July 1836, *Diary*, 3:47, par. 3269.

¹⁴⁶ 1 July 1836, *Diary*, 3:42-43, par. 3243.

¹⁴⁷ 1 July 1836, *Diary*, 3:43-44, par. 3245.

¹⁴⁸ 1 October 1836, *Diary*, 3:98, par. 3589.

と「伝導」のどちらでもないはずである¹⁴⁹。

すなわち、誘導という観点から一元的な説明を与えるためには、それを媒介する物質が存在しなければならず、物質の存在しない真空状態で生じる電気現象は特殊なものであると考えざるを得なかった。

この真空の問題は、5.4節でも論じていくようにファラデーの理論にとっての本質的かつ解決困難な問題点として残り続けた。そして5.5節で詳しく論じるように、ファラデーは、ペンシルヴェニア大学の化学教授ヘア（Robert Hare, 1781-1858）から、この本質的な問題点について批判を受けることになる¹⁵⁰。

このように真空という例外は存在したものの、ファラデーは基本的には放電が誘導という観点から理解できると考えて研究を進めていった。そして、誘導を引き起こすと考えられる物質をそれまでの「電気体」とは別に「誘導体 (inductor)」と称して、その物質の誘導を引き起こす程度についての研究を進めていく。なお、この「誘導体」という言葉は、1836年7月11日の研究日誌における「テレピン油は空気よりも強い誘導体としてふるまうようだ」¹⁵¹という記述の中で初めて用いられている。ファラデーは、針先の電気の流れを確かめるため、針をテレピン油に入れて実験をおこなった。そしてこの実験によって、空気やテレピン油が極性を持つように帯電し、そのため「空気もテレピン油もこの場合には不導体として作用する」¹⁵²ことが確かめられた。さらに、テレピン油は空気よりも誘導の状態を保持する程度が大きいことも確かめられた。そして、このように電気現象を誘導という観点から一元的に分析し、物質がその誘導の分極状態を引き起こす程度を調べていくにあたって、その対象となる物質を「誘導体」という新しい言葉で表現するようになったのである。

このように、テレピン油や空気を媒体として生じる放電は、粒子の分極による誘導現象によって生み出されていると考えられた。そのため、この時点で次のような目標が掲げられることになった。

物体はまるごと全部は荷電しないことを示さねばならない。

すべての荷電が誘導あるいは分極の事例であることを示さねばならない。

起電機の励起も同じであることを示さねばならない。

正の電気が出てくるときは、負の電気が入っていくことを示さねばならない。これは一般に知られていることだが、とても重要なことである。

¹⁴⁹ 12 September 1836, *Diary*, 3:97, par. 3574.

¹⁵⁰ Robert Hare, "A Letter to Professor Faraday, on Certain Theoretical Opinions," in *ERE*, 2:251-61.

¹⁵¹ 11 July 1836, *Diary*, 3:63, par. 3372. テレピン油とは松の樹液を蒸留精製してできる植物性の精油のこと。ランプの灯油などに用いられる。

¹⁵² 11 July 1836, *Diary*, 3:63, par. 3371.

起電機の励起と電池とは同じであることを示さねばならない¹⁵³。

すなわち、このように誘導と分極との結びつきが明確に意識されるようになると、次にはこの理解の下で、さまざまな電磁気現象を分極という観点から理論的に整理して、その現象が生じる原因についての説明を与えていくことが目標となった。

例えば、樹脂棒を摩擦することで生じる電荷は、誘導によって励起されているようには見えなかった。もし摩擦電気が誘導の作用ではないとすると、極性を得る手段として誘導とは異なる手段が存在することになる。しかし、ファラデーはそのような電荷も周囲の空気などの電気体の状態によるのだと解釈する¹⁵⁴。また、放電などの電気の流れについても、電氣的に逆の流れが生じており、絶対的な帯電ではなく分極の配列によって説明できると考えた¹⁵⁵。導体と絶縁体との違いも前述のように分極状態を維持する能力の差にあるとして、導体表面の電荷も誘導によって保持されていると考えた¹⁵⁶。

このように粒子の分極という観点から電気現象を説明する考え方は、ファラデーの中でより強固なものになっていった。そして、あらゆる電気現象が分極によって説明されるのであれば、さまざまな物質における電荷は、磁極のN極とS極と同じかそれ以上に、正や負として単独では存在しえないとすら考えられるようになっていった。このことについて、ファラデーは次のように述べている。

主な事実として、絶縁体や電解質の一部が負より正を得ることや、正より負を得ることは不可能ではないのだろうか。プラス (plus: 過多) やマイナス (minus: 過少) は不可能ではないのだろうか。私はそれが、南性 (southness) より北性 (northness) を持っているような磁石やその一部分を得ることが可能だとすること以上に不可能であると考えている¹⁵⁷。

ここでファラデーが述べているように、電気が必ず分極をともなって生じており、さらに作用が中間にある粒子によって生じているならば、その分極と粒子との関係が問題になるだろう。

以上で論じてきたように、ファラデーは運動する電気によって生じる電気緊張状態の考察を通じて、電気分解の現象の理解を電気現象の一般的な理解へと拡張していった。そして、その過程で静電誘導と放電との関係に注目するようになり、電気分解もそれらの現象と関連づけて理解するようになっていった。しかしその一方で、電気分解において電気が

¹⁵³ 28 July 1836, *Diary*, 3:68, par. 3405.

¹⁵⁴ 29 July 1836, *Diary*, 3:69, par. 3411-3. ファラデーは『電気実験研究』第1巻の最後でも、摩擦による電気の励起についての注釈をおこなっている。そこでは、摩擦電気を化学作用ではなく誘導と放電に帰して説明している。しかし、これらの考察は実証されているわけではないとして、最終的な判断は保留している。(ERE, 1:553-5, par. 1737-46.)

¹⁵⁵ 29 July 1836, *Diary*, 3:70, par. 3417-8.

¹⁵⁶ *Ibid.*, par. 3421-2.

¹⁵⁷ 29 July 1836, *Diary*, 3:70, par. 3420.

流れる原因としては、局所的であるにせよ、粒子の移動による電氣的配列の変化が想定されていた。

そうすると、誘導の作用が伝わっていくときの粒子の状態、すなわち粒子の移動と分極との関係を理論的に関連づけることが必要になる。図 27 から明らかなように、電気分解において移動する粒子は、あくまで個別にプラスかマイナスのどちらかの電気を帯びていると考えられており、そうすると電気が必ず分極をともなって生じているとする前述の考え方とは必ずしもかみ合わなくなるからである。

そこで次節では、この粒子の移動と分極との関係について、ファラデーが実際におこなった考察を分析していくことにしよう。

4.4. 粒子の移動と分極

前節の議論ではっきりしてきたように、ファラデーは原則として粒子の分極が電気現象を生じる原因になっていると考えるようになった。そのため、電気が単極だけで生じるようなことはなく、つねに大きさが等しく正負が逆の二つの極として一緒に生じるはずだと考えるようになった。

この粒子の分極という考え方を、ファラデーが最初からはっきりと持っていたわけではない。前述のように電気分解の「一般法則」、すなわち「液体であるあいだには伝導する力能を持ち、凝固しているあいだにはそれを失うという法則」¹⁵⁸では、電気分解の作用が生じる原因を中間にある粒子の連続的な作用に帰したが、そこではあくまで局所的な移動による配列の変化が想定されていた。そもそも、電気分解という現象の考察においてはあくまで電気が流れているときの状態が注目されていた。この状態こそが電気分解という特別な現象が顕在化する状態だからである。前述の「一般法則」にもあるように、粒子が移動できない状態になると、電気分解という現象も止まってしまうことになる。そのため、粒子の移動こそが電気分解の本質であると理解され、4.2 節の後半でも論じたように、その分極も粒子の移動と関連づけられて理解されたのである。

その一方で、電磁誘導やヴォルタ電池での電流発生の原因を考察する中で、ファラデーは電流が発生する瞬間の前後の状態にも強い関心を寄せるようになった。そして、電流の発生に先立って、それを生じるような状態が空間的に定まっていると考えるようになっていた。

ファラデーは、このような関心において静電誘導と放電という二つの対極的な現象についての研究を進め、粒子の移動が生じていない状態に注目するようになる。そして、この第4章で論じてきた研究成果を踏まえて、1836年8月3日に誘導と放電との関係についての包括的な考察を始めている。その考察の出発点として、粒子の移動はあくまで放電とみ

¹⁵⁸ ERE, 1:113, par. 394.

なされ、分極そのものは粒子の移動を生ぜしめるための緊張状態であると考えられた。そして、上記の電気分解の「一般法則」も誘導と放電との関係を示す法則として再認識されるようになる。この認識の下では、物質の電氣的性質の違いは、誘導に対する「様式 (modes)」の違いに過ぎないと理解された¹⁵⁹。そして、この違いを一般的に理解するために、電気の移動をともなわない分極している状態を基本として、それまでの理解が再構成されていった¹⁶⁰。

すなわち、粒子の移動そのものは誘導現象の本質的な原因ではなく結果の一つであり、移動へと至る潜在的な方向性を示す「緊張の線」こそが誘導を説明するための本質と考えられるようになっていった。この「緊張の線」について、ファラデーは次のように説明している。

しかしこれらの力能は「方向によって」のみ識別されるものであり、磁針の元素の中にある北と南の力ほどにも切り離せないものかもしれない。それらは物体の粒子に最初から配置されている力の極端かもしれないし、私が以前に与えた力能の軸としての電流という描写は、静止した電気の力に対しても似たような一般的表現を想起させる。「電氣的緊張の線 (lines of electric tension) がそうであろう。」そして、私は正や負という用語を使うつもりだが、それは単にそのような線の「終端 (termini)」を意味しているに過ぎない¹⁶¹。

このように、「緊張の線」は誘導の作用を説明する上で本質的な重要性を持つようになった。作用の方向性は緊張状態としてはたらく一続きのものであったため、方向性の集合として「線」という表現が見出されたのである。そして、正や負といった電気の極性も、その線の両端において顕在化しているに過ぎないと考えられた。

また、この「電氣的緊張の線」には、方向とともに「強さ」がともなっていると考えられた。ファラデーは、この「強さ」と電氣的な誘導や励起との関係を次のように述べている。

私の経験する限り、物体が絶対的に荷電されることはあり得ず、相対的にだけであり、誘導と同じ原理によるものである。あらゆる「電荷」は誘導によって保持される。「強

¹⁵⁹ 3 August 1836, *Diary*, 3:71, par. 3424.

¹⁶⁰ なお、空間的な移動として考えられていた粒子の分極を可感ではない微小な領域に閉じ込めていく傾向は、1.3.3節で紹介した磁気流体の議論でも認められる。ポアソンは物体内部の磁極の空間的な変化を論じることを避け、分子内部の分極へと想定する力の原因の空間的要素を排除していった。そして、磁気が流体であるかどうかという問題はポアソンの理論にとっては重要な問題ではなくなっていった。こうして、磁気の力の原因は移動をともなう磁気流体から空間的に固定された無限小の磁気元素の中へと閉じ込められていった。そして、磁気元素の分極の連鎖によって全体的な磁気の力とそのふるまいが説明されたのである。このポアソンの説明は、近接粒子の分極による力の伝達というファラデーの説明にも類似している。

¹⁶¹ 3 August 1836, *Diary*, 3:71, par. 3423.

さ (intensity)」についてのあらゆる現象は、誘導の原理をともなうものである。あらゆる「励起」は、私の目にする限り、誘導に依存している。あらゆる「電流」は前もって強さ (intensity) をともない、それゆえ前もって誘導をともなう。「誘導」は電気の発生において不可欠な原理であるようだ¹⁶²。

すなわち、あらゆる電気現象は誘導によって規定されており、その誘導は分極のあり方を規定する「方向」と「強さ」をともなう緊張状態として考えられた。そうすると、「電氣的緊張の線」とは「方向」と「強さ」を持つ要素の連続としての「線」であり、その「線」上の各点における粒子の電氣的状態は数学的にはベクトルで表現されうる量ということになる。

この「線」についての数学的な議論は第7章以降で改めて論じることにするが、もちろんこの時点でファラデーがベクトルのような数学的概念との同等性を意識していたわけではない。そもそも「ベクトル」とは、1840年代になってハミルトン (Sir William Rowan Hamilton, 1805-65) が四元数の虚数部分を表現するために導入した数学的概念であり、1836年の時点でファラデーが力線とベクトルとの数学的關係に思い至ることは不可能であった¹⁶³。

ファラデーは、「緊張の線」をあくまで作用を描写するための空間的な表現として考えていた。そして、「緊張の線」が実在物であるとはみなしにくい以上、ファラデーは、この「電氣的緊張の線」をあくまで物質的な粒子の分極との関係で考えていた。そのため、ファラデーにとって現象を説明するための重要な関心事となったのは、抽象的な「線」そのものを考察することではなく、その「線」の物質的根拠となっている粒子の電氣的状態を考察することであった。「緊張の線」だけでは緊張状態を表現するための方法に過ぎず、物質的な原因を十分に説明するものではない。そのため、「緊張の線」を粒子と結びつけて説明する必要性が残されていたのである。

ファラデーは、この1836年8月時点での「線」を図31のように描写している。この図から明らかのように、「線」はそれぞれの粒子について個別に与えられ、それぞれの粒子の作用の方向を表現している。このように「電氣的緊張の線」は、それぞれの粒子の電氣的状態を表現するための方法として用いられていた。

¹⁶² 3 August 1836, *Diary*, 3:71-2, par. 3425. ファラデーは1854年の論文で、この「強さ (intensity)」のことを「抵抗を克服する力能」として次のように説明している。「強さという観念あるいは抵抗を克服する力能は、ボイラー中の蒸気や、絞り穴や筒を通る空気に対する圧力の観念と同じように、静的であれ流れの状態であれ、必要な電気の観念なのである。」(ERE, 3:519.)

¹⁶³ ハミルトンは、この四元数を1843年10月16日に初めて記録しており、この1843年の時点で四元数の虚数部分が「極性を持った強度 (polarized intensity)」とのアナロジーで考えることができると認識していた。(Hamilton, *The Mathematical Papers of Sir William Rowan Hamilton*, 3:103-10.) なお、四元数における「ベクトル」とは、「代数的には虚数部分」であり「幾何学的には空間において与えられた長さ方向」とであると説明されている。(Hamilton, *The Mathematical Papers of Sir William Rowan Hamilton*, 3:236-7.)

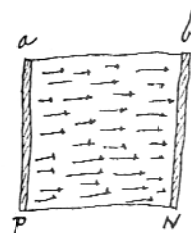


図 31：帯電した 2 枚の導体表面 *a* と *b* に挟まれた電気体の内部の電氣的緊張の線。それぞれの粒子の電氣的状態は、それぞれ独立した線として描かれている。なお、それぞれの線の+側が正の電気を表している。(3 August 1836, *Diary*, 2:72.)

それでは、ファラデーは、誘導が生じている状態において、それぞれの粒子の電氣的状態がどのようになっていると考えていたのだろうか。ファラデーは、この節で分析してきた 1836 年 8 月 3 日の考察を、ヴォルタ電池についての考察から始めていた。ヴォルタ電池では、酸素と水素のような「等しい大きさで互いに作用し合う力能を持った二つの元素」¹⁶⁴によって分極が生じていると考えられた。これは 4.2 節で論じた電気分解の「ファラデーの法則」を導入する際に前提とされていた考え方である。もっとも、この 1833 年の考察では電気分解は化学親和力ないし「内部的な微粒子の作用」として図 27 のように図示されていた。その一方で 1836 年の考察では、ヴォルタ電池の起電力は、亜鉛と酸素の粒子のあいだの化学作用ではなく、あくまで電氣的な誘導の作用によるものであると述べている¹⁶⁵。このようにファラデーが考え方を変えた理由として、ファラデーが誘導の作用を粒子の分極による作用だと考えるようになり、ヴォルタ電池の電流発生の原因をその分極の作用に求めるようになったことがあげられる。

ヴォルタ電池における酸素と水素の電氣的な変化を図示したのが図 32 右である。この図によると、白金と亜鉛の誘導作用によって、水素と酸素にそれぞれ P と N の電荷が誘導されて分極することで電気が発生している様子がわかる。

¹⁶⁴ 3 August 1836, *Diary*, 3:71, par. 3423.

¹⁶⁵ 3 August 1836, *Diary*, 3:79, par. 3455-8.

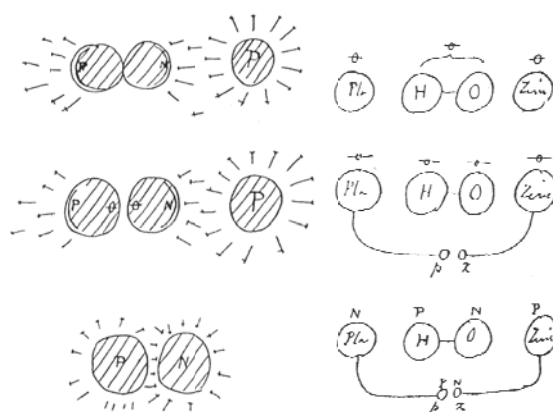


図 32: 誘導下で分極した導体の分割 (左) と、白金 (Pl) と亜鉛 (Zinc) の作用によって分極した水素と酸素 (右)。左図では分割された導体がそれぞれ P と N の電気を帯びている。また、右図では、白金および亜鉛から導線を伸ばして接近させることで、そのあいだにある水素と酸素 (H-O) にも電気が誘導される。さらに導線を接続すると、電気が流れることになる。(3 August 1836, *Diary*, 3:75, 77.)

そして、このようにヴォルタ電池が粒子の分極によって説明されることは、電気分解の「ファラデーの法則」が成立する根拠にもなると考えられた。「ファラデーの法則」は、化学親和力と重さにはたらく力との関係を示した法則であった。そして、ファラデーは電気的な誘導の作用を次のように化学親和力と重力とに結びつけている。

その現象は、それぞれの粒子が等しい割り当ての電気を運んでいると信じるに足る強い根拠をもたらしている。電気化学当量は物体の原子の重さを表している。これは、重力と化学の牽引力のあいだに設けられた、隔たりはあっても直接的な関係である¹⁶⁶。

このように、電気の誘導は、電気の力と化学親和力を結びつけるだけでなく、重力とも結びつく、極めて一般的な作用であると考えられた。

その一方で、誘導によって分極が生じ、それによって電流が発生するというヴォルタ電池のイメージは、図 32 左に示されているように、帯電させた導体を分割するイメージと共通のものであった。この図では、物体どうしは距離を隔てて作用を及ぼし合っており、作用が遠隔的であるかどうかには注意が払われていない。すなわち、4.1 節の電気緊張状態の定義を与えたときからこの時点まで、誘導は一貫して引力や斥力による現象であると考えられていた。

また図 32 左上にあるように、これらの引力や斥力が最初は単極としてはたらくことも容

¹⁶⁶ Ibid., par. 3459.

認されていた。ファラデーは、この問題を認めつつ、「この最初の電荷の受け入れを拒むことは、私には不可能であるように思われるが、それからは一方あるいは他方だけが蓄積してくることはあり得ない」¹⁶⁷と述べている。すなわち、ファラデーの理論を基礎づけていた物質観は、遠隔作用的な中心力を前提としたものであった。

もちろん、ここで「最初の電荷」が一つの極性を持つものであるだけでなく、電気が誘導された導体についても分割後はそれぞれ一つの極性しか保持していないという問題もあるだろう。ファラデーは、この問題について分極という観点からの首尾一貫した説明を与えることはできていない。ファラデーは、あくまで電気的な状態が新たに生じてくる「過程」に関心を持っていたのであり、それが粒子の分極による誘導作用によって一元的に説明できることを示そうとしていたのである¹⁶⁸。

このヴォルタ電池による電流発生の過程と同様の議論は、電気体との場合でもおこなわれている。例えば、ファラデーは、図 31 ないし図 33 左のような二枚の金属板 AB に挟まれて誘導を生じているガラスについての考察をおこなっている。

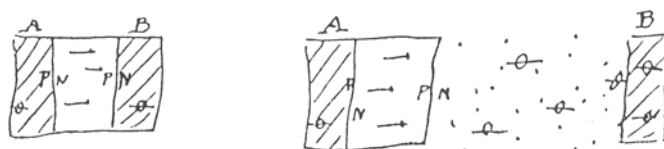


図 33：二枚の金属板 AB に挟まれて誘導が生じているガラス（左図の中央）について、一方の金属板 B を引き離しても（右図）、空気の誘導によって電気体の表面は帯電し続ける。（4 August 1836, *Diary*, 3:82.）

ここで、右のように一方の金属板 B を引き離しても、空気の誘導によってガラス内部の粒子の分極状態が保持され続けている様子が描かれている。その一方で、導体 B は電気を帯びていない状態になっている。また、金属板 A と B は、それぞれ一つの極性しか持っていない状態になっている。ここで、電気体の表面に向き合う金属板や空気に P や N の一方の電気しかない状態を、ファラデーは「半分の荷電 (half charged)」と述べている。しかし、この「半分の荷電」が生じる原因については、やはり十分な説明は与えられていない¹⁶⁹。

一方、空気の粒子が連続的に誘導の作用を伝えているとすると、それらの粒子はことごとく分極している必要があるだろう。しかし、ファラデーはこの 1836 年 8 月の時点では「あいだの空気はまったく分極されたり荷電されたりしていない」¹⁷⁰と述べており、分極が連

¹⁶⁷ 3 August 1836, *Diary*, 3:75, par. 3443.

¹⁶⁸ *ERE*, 1:364-7, par. 1169-78. 1840 年にファラデーはヘアからの批判に対して、自分の理論が電気の「力能の発生や励起状態の起源を含むものではない」と弁明している。(Faraday, "An Answer to Dr. Hare's Letter on Certain Theoretical Opinions," *ERE*, 2:262, 268-9.) この議論については、5.5 節も参照せよ。

¹⁶⁹ 4, 6 August 1836, *Diary*, 3:82-6, par. 3483-506;

¹⁷⁰ 8 August 1836, *Diary*, 3:86, par. 3503.

続的に伝わっている状態を考えていたわけではなかった。これは、図 33 右の空気の部分の電気状態としても描かれている。

この節の最初で述べたように、このように誘導による粒子の分極という観点から理論の体系化を進める中で、ファラデーは放電にもなって生じる物質的な移動が誘導の作用の本質ではないと考えるようになっていった。

私は、空気やテレピン油における風や流れは、「付随的な (incidental)」結果であり、「必須の (essential)」結果ではないに違いないと考えている。もしそれが必須であれば、それらの作用は理解すべきとても重要なものであろうが、必須なのであろうか¹⁷¹。

このように、放電するときに粒子の移動が生じるとしても、それは放電という現象の本質ではなく付随的な現象に過ぎないと考えようになった。すなわち、誘導という緊張状態は、あくまで粒子の移動という結果を導くための原因として理解されていたが、原因と結果の重要性が逆転し、粒子の移動という結果はあくまで本質ではないとみなされるようになった。そして、粒子の分極が、電気現象全般を説明しうる原理とみなされるようになったのである。そうすると、さらに「放電 (discharge)」という言葉そのものについても、「電荷 (charge)」の低下を意味する言葉として再定義され、何らかの影響は与えているにせよ、電気火花そのものや実際の電気の移動を意味する言葉ではないとみなされるようになった¹⁷²。

このように粒子の分極を電気現象の本質と考えると、誘導の曲線的な作用を粒子に帰属させて理解しやすくなる。そして、この節で論じてきたファラデーの考察がおこなわれた 1836 年の 8 月上旬から 1 か月後の 1836 年 9 月 6 日に、ファラデーはこの年の 1 月以来となる「曲がった (curved)」という言葉を用いて、作用が曲線的であることに改めて注目している。

空気などを通じた誘導が、直線状ではなく、状況に応じてさまざまな形で大きく湾曲した (curved or bent) 線状に作用することは、それが互いに次へと影響を及ぼしていく連続的な粒子 (continuous particle) の作用であり、遠隔的な作用ではないことの「強い証拠」である。重力や磁気といった、それに対して反応のない空気や水、ガラス、金属などの物質を通り抜ける直接的な牽引力とは対照的である¹⁷³。

このように、ファラデーは誘導の作用が曲線的であることに注目することで、その作用

¹⁷¹ 3 August 1836, *Diary*, 3:81, par. 3478. 同様の見解は、この日の別の場所でも繰り返されている。(3 August 1836, *Diary*, 3:73, par. 3435.) そして 1837 年の論文では、このような粒子の移動が、空気やほこりの荷電した粒子によるものであると述べている。(ERE, 1:424-5, par. 1336; ERE, 1:517, par. 1624.)

¹⁷² 3 August 1836, *Diary*, 3:79, par. 3461.

¹⁷³ 6 September 1836, *Diary*, 3:86, par. 3512.

が連続的な粒子による分極作用であるとはっきりと認識するようになった。電気分解や放電などで粒子が移動する場合には、その曲線的な形状を担うには粒子の位置が不安定であった。しかし、粒子の移動が付随的であり本質的ではないと理解したときに、作用の線上に連続して存在する粒子は、その曲線的な作用を安定的に担える存在とみなされるようになったのである。

この1836年9月になってようやく、誘導の体系的な理論を構成することになる「連続的な粒子の作用」「分極」「曲線的な作用」といった要素が出そろい、それぞれに理論的な意味が与えられた。しかし、これらの要素はまだ体系的に整理されていたわけではなく、ファラデー自身も理論が完成したとは考えていなかったようである。例えば、ファラデーはのちにこのような粒子の状態を「近接粒子 (contiguous particle)」と名づけることになるが、この時点では「連続的な粒子 (continuous particle)」と称しており、必ずしも「接している」ことを明確に意識していたわけではない。この時点では、誘導が距離を隔てた作用である可能性を、あくまで「感覚的」に否定していたに過ぎない¹⁷⁴。

ファラデーは1836年9月の時点ではまだ、このように誘導現象についての理解を体系的に整理できていなかった。そのため、さらに先行研究を再検討しつつ、新たな実験を進めている。このような先行研究の再検討は、『エンサイクロペディア・ブリタニカ』を参考にしながら進められた。例えば、曲線的な作用に注目した9月6日の記述は、ファラデーがその日に『エンサイクロペディア・ブリタニカ、第3版への補遺』を引いて、ビオやポアソン、クーロンに言及する中でおこなわれたものであった¹⁷⁵。

例えばファラデーは、ポアソンが帯電を電気流体の相互作用や空気の圧力などに帰しており、誘導の原理や電気分解については論じていないため、ポアソンの研究では粒子の分極や電気の発生を考察するための参考にはならないと判断している¹⁷⁶。

その一方で、クーロンの研究では電気が導体の外側に存在していて導体の化学的性質には何ら影響を受けないとされていたことについて、「これは極めて注意すべき重要なことである」¹⁷⁷と研究日誌に記している。そして、10月から11月にかけて1.3.2節で論じたキャヴェンディッシュやクーロンの一連の論文を詳細に検討している¹⁷⁸。クーロンは、物体の周囲にアトモスフィアが存在することは否定しており、電気体であるセラックの帯電についても電気流体は内部に入り込まずに表面だけに存在していると考えていた¹⁷⁹。このように誘導の作用が物質によらないとすると、誘導を物質粒子の分極作用に帰着させるファラデー

¹⁷⁴ 1.2節や3.2節の議論、とくにトマス・トムソンの議論で明らかであったように、可感な範囲での遠隔作用を否定することは、実際に粒子が接触していることを意味しているわけではなかった。なお、グッディングも、1835年から1837年までのファラデーの第一の関心は、遠隔作用の否定にあったわけではなかったと指摘している。(Gooding, “Conceptual and Experimental Bases,” 146.)

¹⁷⁵ 6 September 1836, *Diary*, 3:86, par. 3507-11.

¹⁷⁶ *Ibid.*, par. 3509.

¹⁷⁷ 6 September 1836, *Diary*, 3:86, par. 3510.

¹⁷⁸ 1, 21 October and November 1836, *Diary*, 3:97-9, par. 3577-96.

¹⁷⁹ Coulomb, “Cinquième Mémoire,” 452-3. 1.3.2節でも言及したように、クーロンは誘電体の実験を本格的におこなうことはなかった。

一の説明の理論的根拠は危うくなる。この問題についてファラデーは、クーロンの実験が導線の被覆の有無による荷電の違いについて調べたものであり、作用を及ぼしている別の導体から導線までのあいだの空間にある誘導の作用全体を評価したものではないとして、ファラデーの理論を反証する実験結果ではないと説明している¹⁸⁰。

なお、この『エンサイクロペディア・ブリタニカ』は、ファラデーが研究日誌の中で出典を明らかにして言及している代表的な参考資料である。3.2節で述べたように、ファラデーは青年時代から『ブリタニカ』の「電気」の項目に多くを学んでいた。そして、この1836年9月から10月にかけても、ファラデーは空気を通じた誘導の曲線的作用について考察するために『ブリタニカ』第3版の「電気」の項目などを再検討している。そして、その中でもとくに、誘導の原理としてはカヴァロ (Tiberius Cavallo, 1749-1809) の理論が優れていると評価している¹⁸¹。

カヴァロの理論では、物体表面に電気が誘導される様子から、空気の電氣的性質が次のように説明されていた。

空気は一般に、電気を帯びた物体表面と向かい合っている電気体である。それは完全導体ではなく、帯電した物体からほんの少しだけ離れたところにあるその物質の層に反対の電気を容易に獲得する。そして、この層ができた結果、そこからまた少し離れたところに反対に帯電した別の層を獲得する。そして、これに別の層が続き、交互に正と負の電気を保持し、それらが消えてなくなるまで力能は減衰していく¹⁸²。

すなわちこのカヴァロの理論は、帯電した物体に接する空気の層が物体の電荷とは反対の極に帯電し、その層が連続的に分極を繰り返していくと考えることで、空気の分極という観点から物体表面の電荷の誘導を説明するものであった。図33でも描かれていたように、ファラデーは空気の分極が連続的に続いていると必ずしも考えていたわけではない。しかし、曲線的な作用を説明するためには、誘導が「連続的な粒子の作用」であるとみなすことが有効であるとする考えを強めるようになった。そして、この空気の層の連続的な分極というカヴァロの説明は、ファラデーが求めていた空気の粒子の連続的な分極という説明と極めて近いものであった。もっとも、カヴァロは電気の力を電気流体の振動によるもの

¹⁸⁰ ERE, 1:393-4, par. 1253. このクーロンの実験では、導線の被覆としてセラックを用いることの有無が検証された。

¹⁸¹ カヴァロはイタリアのナポリで生まれ、1771年にイギリスに移住した。そして、フランクリンの風の研究をはじめ、とくに大気の電気に関する研究をおこなった。彼の代表的な著作である『電気についての理論と実践における完全論文 (A Complete Treatise on Electricity in Theory and Practice)』は、電気学の初学者にとっての良い教科書であった。(DSB, s.v. "Cavallo, Tiberius.") ただし、ファラデーがこの書籍を読んでいたかどうかは不明である。なお、ファラデーはカヴァロの他に、ベッカリア (Giambattista Beccaria, 1716-81) やニコルソン、ファン・マールム (Martinus van Marum, 1750-1837) などの研究にも言及している。ERE, 1:452-3, par. 1422. や ERE, 1:461-2, par. 1448. も参照せよ。

¹⁸² Encyclopaedia Britannica, 3rd ed., s.v. "Electricity," 6:444.

であると考え、この電気流体の微細性に帰することで誘導の曲線的な作用を説明していた¹⁸³。このカヴァロの説明は、作用を粒子に帰するファラデーの説明とは異なっている。しかし、曲線的な作用の原因を分極の連続に求めるという点では、カヴァロの理論はかなりファラデーの考え方に近いものであった。

この節では、1836年の時点でおこなわれた電気現象に対するファラデーの考察の内容を具体的に分析してきた。そもそも誘導作用を表す「緊張の線」は、作用を表現するための方法に過ぎなかった。そのため、その根拠を物質的な粒子に求める必要があり、ファラデーは、その作用を粒子の分極と結びつけて説明するようになった。その結果、その粒子の分極による誘導作用の説明が、誘導の「原理」とみなされるようになった。そして、あらゆる電気現象がその原理によって説明されるようになり、ヴォルタ電池や放電による電流の発生過程も、粒子の分極によって説明されるようになった。そうすると、これまでは電気の移動という結果を説明するために誘導による緊張状態という原因を想定していたのであるが、誘導作用における粒子の分極があらゆる電気現象の原理として重視されるようになったため、粒子の移動は付随的な結果とみなされるようになった。また、曲線的な作用も、粒子の連続的な分極作用によって説明づけられるようになった。しかし、この時点では、ファラデーの誘導の理論を構成する「連続的な粒子の作用」「分極」「曲線的な作用」といった要素が整いつつあったが、まだしっかりと体系化されていたわけではなかった。それらが体系化される最後の過程については、次章で論じることとする。

それでは次の第5章では、ファラデーが1837年に発表した誘導の一般理論について、この章で考察してきた内容を踏まえながら、その理論構築の最終段階とそこから生じてきた問題点について分析を進めていくことにしよう。

¹⁸³ Ibid., 6:461.

第5章 近接粒子による誘導の一般理論

ファラデーは、1837年から1838年にかけて、本論文の第4章で論じてきた誘導現象の理論的な要素を体系的に結びつけ、「誘導」についての一般理論として発表した。この論文は『電気実験研究』第1巻を締めくくる最後の四集を構成し、とくに最後の第20集では、電気の力の本質についての議論が展開された。この第20集について、ファラデー自身が「実験研究の先行する三集において打ち出され、描かれた誘導の理論は、電気の力の本質については、その分布だけで他には何も新しいことは考えていない」¹と述べている。この言葉が示しているように、作用の「分布」のあり方に粒子による説明を与えることが、これらの論文の第一の課題であった。この「分布」は、ヒューエルも誘導の「配置」について「複雑で困難な計算を必要とする」²と述べていたように、遠隔作用的な中心力に還元するような従来の数学的説明では、把握することが実質的に困難なものであった。そのため、ファラデーは「近接粒子」という独自の説明を与えることになる。

この節では、まず、このファラデーの誘導の理論について解説し、その曲線的な作用の理論的根拠となった「近接粒子」についての理解を促すとともに、その問題点について分析を進めたい。その問題点へのファラデーの対応を1.2節で論じた物質の性質と感覚との関係から考察することで、ファラデーが電気現象や、その「力」と「粒子」について持っていた考えが、より明らかになってくるだろう。

5.1. 「誘導」を中心とした電磁気現象の理解

第4章で論じたように、1836年の時点ですでに、ファラデーは誘導を「原理」であると考えていた。1837年の論文の冒頭でも、ファラデーは「電気を慣例的に分割しているさまざまな種類の作用の中で、「誘導」と称されるものより優れた、あるいは同程度でさえ重要なものはないと考えている」³と述べ、誘導を「第一の、本質的で、根本的な原理」⁴と位置づけている。そして1837年から1838年にかけて、それまでに研究を進めてきたさまざまな電気現象を包括的に説明するために、この「誘導」という現象を中心に据えながら理論の体系化を進めた。そして、現象の各論を進めた後に、それらを誘導の理論として次の五点のようにまとめた。なお、この五点は議論を進めるために筆者が便宜的にまとめたものであり、ファラデー自身によるまとめは注に別記しておく。

¹ ERE, 1:533, par. 1667.

² Whewell, “Dr. Faraday’s View of Statical Electric Induction,” in *History of the Inductive Sciences*, 3:522. このヒューエルの見解については、1.1節を参照せよ。

³ ERE, 1:360, par. 1162.

⁴ ERE, 1:360-1, par. 1162.

- ① この理論では、どのような物体であれ、すべてを導体 (conductor) と考える⁵。
- ② 荷電された近接粒子の電気的作用により、物体にはそれとは反対の電荷が励起されて分極状態が瞬時に作り出され、この作用はさらに次の粒子へと連続的に伝わっていく⁶。
- ③ 分極状態は強制された状態であり、何もなければ極性のない状態に戻ろうとする⁷。
- ④ 「伝導 (conduction)」とは、作用線上にある近接粒子が作用を容易かつ迅速に伝える状態であり、それが困難な場合には「絶縁 (insulation)」になる⁸。
- ⑤ 「誘導 (induction)」とは、絶縁の場合において、物体表面に電荷が励起された状態であり、その逆側には反対の電荷が励起される⁹。

この理論の大きな特徴は、①にあるように、導体から絶縁体まで、すべての物質の電気的性質を誘導という観点から一般化したことである。そこでは分極する粒子が想定され、その分極の起こりやすさによって導体や絶縁体のふるまいが説明された¹⁰。

なお、物質の電気的性質の違いを説明する上で、自然界の物質が一元的に「導体 (conductor)」とみなされたことには注意しておく必要である。第4章のこれまでの議論からすると、誘導を論じるのであれば、その理論は「電気体 (electric)」を中心として構成されるべきであろう。しかし、「電気体」は「誘電体 (dielectric)」として再定義され、「導体」が理論の中心に位置づけられたのであった。なお、この「誘電体」という言葉は、「電気体

⁵ これは、ファラデーのあげる次の項目の要約である。「この理論は次のことを仮定する。すべての「粒子」が絶縁物体であろうと伝導物体であろうと、全体 (wholes) として導体であること。」(ERE, 1:534, par. 1669.) および「全体として導体であり、「まるごと (bodily)」であれ「極性的 (polarly)」であれ、たやすく荷電されうる。」(ERE, 1:534, par. 1672.)

⁶ これは、ファラデーのあげる次の項目の要約である。「通常の状態では極がなく、隣にある荷電粒子の影響によってそうなりうること、まさに多くの粒子からなる絶縁された伝導する「質量 (mass)」においてそうであるように、極のある状態が瞬時に作り出される。」(ERE, 1:534, par. 1670.) および「同じことを次におこない、さらにそれを次におこなうということは、近接する粒子を分極させることによってのみ可能である。そして励起された物体から次の伝導する質量 (mass) へと作用が伝わり、その伝導する質量 (mass) に引き続きその物体の粒子の分極として伝達の効果が現れることに明らかのように、そこで正反対の力を及ぼすのである。」(ERE, 1:534, par. 1677.)

⁷ これは、ファラデーのあげる次の項目の要約である。「分極したときの粒子は強制された状態であり、その通常の自然な状態に戻ろうとする傾向がある。」(ERE, 1:534, par. 1671.)

⁸ これは、ファラデーのあげる次の項目の要約である。「誘導の作用線上にある近接する粒子は、それらの極の力を一方から他方に「多かれ少なかれ」たやすく伝え、運ぶことができる。」(ERE, 1:534, par. 1673.) および「それほどたやすくはないものは、この移動や伝達が起こる前に、極の力をより高くまで引き上げさせる。」(ERE, 1:534, par. 1674.) 「近接粒子のあいだでの力の「迅速な」伝達は、「伝導」を構成し、「困難」であれば「絶縁」を構成する。導体と絶縁体とは、粒子がそれぞれの力を容易にあるいは困難をともなって伝える性質をもとから保持している物体であり、粒子が他の本来的性質において違いがあるのと同じように、これにも違いがある。」(ERE, 1:534, par. 1675.)

⁹ これは、ファラデーのあげる次の項目の要約である。「通常の誘導は、絶縁物体上に励起されるか自由にある電気で荷電された物体の作用に起因する効果であり、正反対の状態を同じ量だけその中に生み出そうとする。」(ERE, 1:534, par. 1676.) 「それゆえ、誘導は絶縁体を通してあるいは横断してのみ起こりうる。誘導とは絶縁であり、そのような絶縁媒体を通してあるいは横断して電気の力の影響が移動あるいは伝送されるような様態であり、粒子の状態の必然的な結果なのである。」(ERE, 1:534, par. 1678.)

¹⁰ ヒューエルは、このように対極的な性質を段階的に説明する方法を「段階的変化 (gradation) の方法」として一般化している。ヒューエルはこの方法を、『帰納科学の歴史』の「類似性による帰納の方法」の章の連続律の節の次で、ファラデーの例を引きながら紹介している。(Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:416-8.)

「electric）」に「通る (through)」を意味する接頭語「*dia-*」をつけたものであり、ヒューエルによって提案された造語であった¹¹。そして、この「誘電体」は、導体から絶縁体までを含めた分極によって誘導作用を導く物体の総称として用いられた¹²。そのため、誘電体と導体の違いはファラデーの理論では程度の問題ということになり、その立場を明確にするために、ここでは導体を中心に位置づけたと考えられる。

そして、この誘導の理論において最も重要な課題は、前述の「分布」であった。第1章で論じたように曲線的な作用を既存の理論で厳密に表現することは難しく、遠隔的な直線的作用に還元することが当時の理論研究の主流となっていた。その方法を否定するのであれば、新しい理論的根拠を提示する必要があったのである。ファラデーはこの曲線的な作用の根拠を「近接粒子 (contiguous particles)」に求めて次のように説明している。

もし直線的であるだけならば、決定的ではないにせよ、私の見解には反するものであろう。しかし曲線的でもあるなら、それは近接粒子の作用の自然な結果となるであろうし、思うに、私たちがよく知っているあらゆる事実やアナロジーによるとつねに直線的である、従来理論で仮定されていた遠隔作用とはまったく相いれないものとなる¹³。

このようにファラデーは曲線的な作用をの原因を説明するために、直線的な作用に還元する遠隔作用説を斥けて、近接粒子の分極という説明を導入したのであった。そして、1.3節の最初で引用したように、エピヌス、キャヴェンディッシュ、ポアソンを批判したのである。

その理論のすべてが誘導を遠隔的で直線的な作用として考えていると私は思う、エピヌス、キャヴェンディッシュ、ポアソン、その他の卓越した人々の名に抱いていた尊敬の念は、私が上述のような見解をとることを長くためらわせたのである¹⁴。

それでは、ファラデーがここで重視している「曲線」とは、どのような形状のものだろうか。ファラデーは、図34とそれに類する装置において生じる曲線的な誘導作用に注目し、その作用を媒介する空気のふるまいを観察・考察することによって、近接粒子による理論

¹¹ William Whewell to Faraday, 29 December 1836, *Correspondence*, 2:398. あわせてヒューエルは「dioptric (屈折光学)」「diaphanous (透明な)」「diathermal (透熱)」という言葉ギリシア語由来の接頭辞 *dia-* を用いた例としてあげている。なお、この「誘電体」は、4.3節で言及した「誘導体 (inductor)」とは異なる言葉であることに注意してほしい。

¹² この見解は、例えば *ERE*, 1:418, par. 1320; *ERE*, 1:425, par. 1337. などから読み取ることができる。現在の用語からすると、この誘電体は、電場がかけられると誘電分極して電気双極子モーメントを持つ物質と定義することができる。

¹³ *ERE*, 1:363, par. 1166.

¹⁴ *ERE*, 1:362, par. 1165. ファラデーは1837年12月4日に、やはり『ブリタニカ』を引きながら、ポアソンらの説を再検討している。(4 December 1837, *Diary*, 3:225-6, par. 4275-86.)

を構築していた。

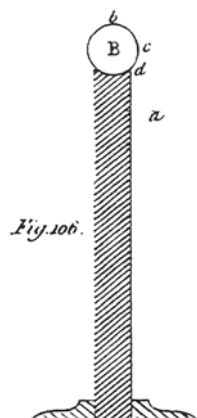


図 34: 作用が曲線的であること示す装置。上端にある球 B の周囲の点 (a-d) に誘導される電荷の強度の違いを測定することで、誘導作用の分布の様子が調べられた。(ERE, 1, fig. 106.)

この図 34 の装置は、セラックで作られた棒の上に真鍮製の球 B が据えつけられたものであった。そして、絶縁体であるセラックが帯電しているためにその真鍮球には電荷が誘導され、その誘導作用が周囲に曲線的に分布している様子が観察された。なお、誘導された電荷の測定にはクーロンの振り秤が用いられた。また、振り秤まで電荷を運ぶための搬送球には、金メッキを施した木球が用いられた¹⁵。

もつとも、このように誘導作用の分布を観察するために用いられた装置は、そもそも別の目的のために作られた装置の一部であった。ファラデーは 1836 年末から図 35 左の実験装置を用いて、誘導電荷を保持しうるさまざまな物質の「容量」を測定していた。すなわち、4.3 節で言及した「誘導体」の程度を測定していた。そして、図 34 の装置は、この図 35 左の装置の上端部だけを再現したものであった。

¹⁵ ERE, 1:368-9, par. 1180-1. この装置の詳細は、10 月 14 日の研究日誌を参照せよ。(14 October 1837, *Diary*, 3:194-6, par. 4092-107.)

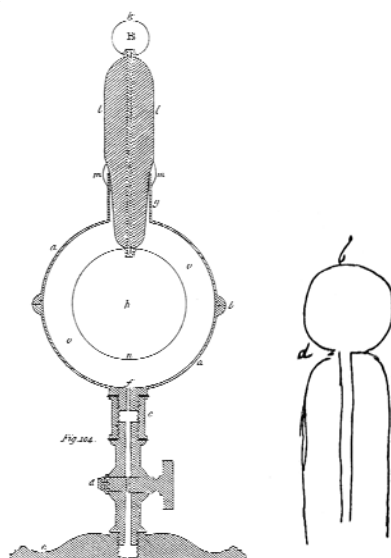


図 35：誘導の容量の測定装置。左図の上端だけに注目して描かれたスケッチが右図である。この測定装置の目的は中心にあるマクデブルク球殻の誘導の容量を測定することであり、上端部はその容量を測定するための端子に過ぎなかった。(左：ERE, 1, fig. 104; 右：6 October 1837, *Diary*, 3:177.)

この図 35 左の装置は、中央のマクデブルク球殻の外球と内球が絶縁されてコンデンサーになっている。そして、あらかじめ内球に電荷を与えたあと、保持されている電荷の量の時間経過を測定することで、誘導の容量を測定するものであった。なお、この内球の電荷はセラック製の絶縁軸の内部を通した導体によって球 B に達しているため、内球に保持されている電荷は球 B で測定できるようになっていた。

ファラデーは、この装置を用いて、半年ほどさまざまな物質の「比誘導容量 (specific inductive capacity)」¹⁶を測定していた。しかし、1837 年 10 月 6 日になって偶然、セラック製の心棒 *l* からの誘導作用が曲線を描いていることに注目する。そして、半年以上にわたってとくに関心の対象ではなかった装置の上端部の電荷分布に関心を寄せるようになったのであった。

この過程が偶然であった理由は後述するが、この日の研究日誌に装置の上端部だけの図 (図 35 右) を初めて描いていることから、ファラデーの注目がその部分に集中したことをうかがい知ることができる。そして翌 10 月 7 日に再度実験をおこなったファラデーは、研究日誌に次のように記述し、その「分子作用」を考えることで誘導現象を体系的に理論化できることを確信したのであった。

¹⁶ この「比誘導容量」とは、現在の静電容量ないし電気容量のことであり、SI 単位系ではファラデーにちなんで「F (ファラド)」という単位が与えられている。

誘導が曲線的であるよい証拠が、心棒からのこれらの誘導の効果の中で得られており、そのような曲線的な作用は、比容量がそうであるよりも、分子作用 (molecular action) のより良い評価基準になるように思われる¹⁷。

この引用の記述では、これまでファラデーが用いてきた言葉からすると「原子」や「粒子」の作用とされるべきところで、ファラデーがこれまで一般的には用いてこなかった「分子」という言葉が用いられている。しかも、その作用を「評価基準」としていることから、この時点でファラデーに何らかの考え方の変化があったことをうかがわせる。そしてファラデーは、この記述の直後に「心棒の誘導作用と、その曲線的作用」¹⁸と記して誘導の容量の測定実験を終了し、この作用の空間的配置を検証する実験を開始するのであった。

それでは、その空間的配置の検証実験と、ここで新たに言及されている「分子作用」という言葉について、次節で論じることにしよう。

5.2. 誘導容量の測定をきっかけとした曲線的な作用への着目

前節で述べたように、ファラデーは1836年12月から、図35の装置を用いて物質の「比誘導容量」の測定を始めていた。この測定の目的は、静電容量が物質によって異なることを示し、4.4節で引用したように、電気現象が電気体の物性に依存することを実証することであった。この主張は、ファラデーが次のように述べているように、当時においては、一般的な考え方として必ずしも認められていたわけではなかった。

クーロンによると、すべての伝導する物体は同じ容量を持つ。そこで私が、絶縁体が異なる容量を持つことを示すことができれば、誘導において電気は電気体に存するのであり、導体 (conductor) に存するのではないということにかなりの見込みがあるのではないだろうか¹⁹。

ここで、ファラデーは電気体を従来通りに導体とは区別している。電気体とは、1.1節や4.3節で説明したように、摩擦により静電気を生じさせることのできる物体である。その一方で、導体は摩擦によって電気が生じることはない。そして、誘導容量が物質によって異なるとすれば、クーロンの研究結果から誘導は導体ではなく電気体に生じているはずだと

¹⁷ 7 October 1837, *Diary*, 3:178, par. 4016. ここでは *specific* という単語を「比」と訳出しているが、この *specific* という単語が現在の物理学で定訳となっている「比」という意味で使われるようになったのは、まさにこの1838年と同時期のことであった。そのため、この引用の記述がなされた1837年頃は、ファラデーにおいても意味が定まっているわけではなく、従来の「固有」という意味で解釈すべきと考えられる個所も数多く存在する。(Oxford English Dictionary, 2nd ed., s.v. “specific.”)

¹⁸ 7 October 1837, *Diary*, 3:178, par. 4017.

¹⁹ 21 October 1836, *Diary*, 3:98, par. 3591.

考えられた。もちろんこの段階では、すべての物体を一元的に導体として考える前節の最終的な理論①の主張には至っていない。何より、理論①では、すべての誘導作用が「導体」に還元されており、この時点の主張とは正反対であると言えらる。

ファラデーがこの比誘導容量の定量的な測定として最初に取り組んだのは、気体の種類と濃度の違いによる誘導作用の強度の違いと、それによる誘導容量の違いであった。その結果、気体の濃度に関しては、「空気の濃さや薄さは誘導の力や量には何らの変化も引き起こさない」²⁰という否定的な結果しか得られなかった。連続的な粒子によって誘導を説明しようとする、密度の違いによってその作用にも大きな違いが生じてくるはずである。しかし、その予想については否定的な実験結果しか得られなかった。

そのため、その後もファラデーは、この誘導容量の測定実験をさまざまな物質で続けるものの、容量に関する理論的な考察はほとんどおこなうことがなかった。実験で否定的な結果しか得られなかったため、それ以上の考察を進めることができなかったのである。そして、考察によって得られたのは、「帯電された線としてまわりこむような、誘導の等しい緊張表面の形状を確かめること」²¹や「物質の絶対的な荷電は存在しない」²²こと、そして「誘導によらない荷電や電流は存在しない」²³こととといった、これまで第4章で取り上げてきた事実の再確認に過ぎなかった。

このようにファラデーは、物質によって容量が違うということは実験で確認できたものの、誘導作用が連続的に分極した粒子によって引き起こされていると主張するための実験的な根拠を得ることはできなかった。その一方でファラデーは、この装置でさまざまな物質の誘導容量を測定する実験を続けるうち、1837年9月30日に球B上で観測される誘導電荷に差が生じているという問題を発見する。もしそのような差が生じているとすれば、それまでおこなってきた定量的な測定が正確にできていなかった可能性がある。そこでファラデーは、これをセラック製の心棒の影響ではないかと疑って対策を講じていくのであった²⁴。

ファラデーがこのように不都合な状況の対策として問題に取り組んだことからわかるように、当初の関心は心棒の帯電を防ぐことであった。そのため、球B(図36の球R)に電荷が誘導されているかどうかを調べるだけで目的を達することができ、観測点も図35左の装置の最上部k点のみであった。

しかし、この問題を検討する中で、10月6日に球B(図36の球R)上での別の観測点、すなわち図35右のb点だけでなくd点における電荷の量を測定してみたのであった²⁵。これは、経過時間による誘導電荷の量の推移を測定した後で、球B(図36の球R)の放電を確認するためであったと思われるが、b点に実際に指で触れて誘導電荷の有無を確かめよ

²⁰ 29 December 1836, *Diary*, 3:108, par. 3639.

²¹ 24 July 1837, *Diary*, 3:135, par. 3771.

²² 24 July 1837, *Diary*, 3:135, par. 3773.

²³ 24 July 1837, *Diary*, 3:135, par. 3774.

²⁴ 30 September 1837, *Diary*, 3:173-4.

²⁵ 6 October 1837, *Diary*, 3:177, par. 4010.

うとしたために、測定機器による観測点が d 点になったようだ。そして、観測された電荷に差を見出したファラデーは、翌 10 月 7 日になって、図 36 で図示されているような、いくつかの点で再度測定をおこなうのであった。

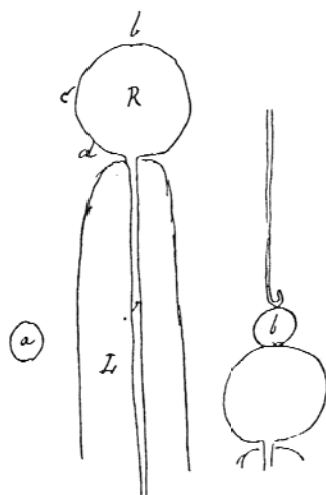


図 36 : 各点での観測 (7 October 1837, *Diary*, 3:179.)

この測定でファラデーは、図 36 の球 R の各点で異なる値を得た。この値の違いは心棒からの直線距離によって単純に減衰する関係にはなかった。そのため、誘導の作用は心棒から何らかの曲線状に分布していると考えられた。このように複雑かつ極めて曲線的な作用は、直線的な作用に還元することが難しく、したがって空気中の粒子が作用を媒介して方向を曲げているのでなければ説明できないと思われた。こうして、ファラデーは誘導が近接粒子の作用であることを確信したのであった。そのため、ファラデーは前節の最後で引用したように、次の記述を書き留めたのである。

誘導が曲線的であるよい証拠が、心棒からのこれらの誘導の効果の中で得られており、そのような曲線的な作用は、比容量がそうであるよりも、分子作用のより良い評価基準になるように思われる²⁶。

1836 年 12 月よりおこなわれた誘導の容量を測定する実験では、空気の疎密による誘導作用の強さの違いが測定できなかった。そのためファラデーは、誘導が粒子の分極作用によるとする主張を実証することができなかった。しかし、この電荷分布の測定では、曲線的な作用という観点から誘導が粒子の分極作用によると確信できるほどの、強固な実験的

²⁶ 7 October 1837, *Diary*, 3:178, par. 4016. このように粒子による曲線的な作用であるという点で、誘導は重力などとは異なると判断された。(7 October 1837, *Diary*, 3:180, par. 4029.)

証拠を得ることができたのであった。

この発見のための重要な条件として、媒質である空気に流れがながったことがあげられるだろう。電気分解や放電では媒質の移動が生じることから、連続的な粒子の作用という考えと、それによって分極が次々と引き起こされることで曲線的な作用が生じるという考えが十分に結びつかなかった。しかし、媒質に移動がない状況であれば、現象を説明するために両方の条件を結びつけることができる。

なお、先に引用した1837年10月7日のファラデーの記述には「分子作用」という表現が用いられている。しかし、この「分子」という言葉は、それまでファラデーがほとんど用いてこなかった言葉である²⁷。ファラデーは、一般的に「粒子」という言葉を用い、ごく一部で「原子」という言葉を用いていた。この「粒子」と「原子」との関係は、4.2節の最後でも論じた通りである。しかし、この1837年10月7日の研究日誌からの引用は、誘導の理論を実験的に確信した重要なときに書かれた記述である。そのため、この「分子作用」という言葉も、恣意的に用いられたのではなく、むしろ何らかの重要な意味が込められて積極的に用いられた可能性も高い。誘導が「分子作用」であることは、1837年の論文で繰り返し主張されており、「固有の分子的配列」²⁸といった表現はイタリックで強調されている。例えば、「分極 (polarity)」という重要な概念についても、「同一の分子が異なる部分において正反対の力能を得るような力の配置」²⁹と定義されている。このように用語の変化をとまなげて考え方が変化したとすると、この「分子」という言葉には、この時期にファラデーが受けた何らかの学説的な影響が反映されている可能性も予測できる。

この「分子」という言葉は、1.3.3節などで論じたように、ラプラスやポアソンの「力学的=分子論的」研究において、万有引力のような中心力に基づいた物質観の中核をなす概念であった。前述のように、ヒューエルはポアソンの議論に言及しながら「分子」を「力の中心」と言い換えている³⁰。ファラデー自身が分子という言葉で定義して用いているわけではないが、同時期にアンペールが与えている「原子」と「分子」および「粒子」の定義をその区別を知るための参考として紹介しよう。

アンペールが与えた定義は、ファラデーが誘導について考察を進めていた1835年11月の『哲学雑誌 (*Philosophical Magazine*)』誌上で、英訳されて次のような文章で掲載されている。

私は、自身と同じ性質を持つ物体の限りなく小さな部分を「粒子」と称する。すなわち、固体の粒子は固体、液体の粒子は液体、そして気体の粒子は空気、といったものである。「粒子」は互いから少しの距離を保っている分子から構成されている。まず、

²⁷ なお、『電気実験研究』の項目索引によると、「分子」という記述は、1837年より前では1822年の論文で「水銀の分子の引力」(*ERE*, 2:159.)の1回だけがあげられている。

²⁸ *ERE*, 1:361, par. 1164.

²⁹ *ERE*, 1:411, par. 1304.

³⁰ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 1:433-6.

その距離は原子固有の引力や斥力がはたらく距離であり、次に、そのあいだにあるエーテルの振動によって形成される斥力によるものであり、そして第3に、質量に正比例し、かつ距離の二乗に反比例する引力によるものである。「分子」という用語を、私はすべての原子固有の引力と斥力によって互いから少しの距離を保っている原子の集合に対して与えている。斥力は引力に比べて、ほとんど感覚できないほど勝っていると私は考えている。私が「原子」と称するものは、これらの引力や斥力が発している物質的な点である³¹。

アンペールは、このように物質的な点とそこから発しているエーテルの振動としての力からなる原子を考え、その原子の集合として分子を考えている。そして、粒子とは、それらの分子が少なくとも可感ではないほどの距離を保ちながら集まったものであると定義された。

この分子についてのアンペールの考え方は、彼自身の化学研究を踏まえたものであり、彼自身は「ラプラス物理学」からは距離を置いていたとはいえ、フランスにおける分子論的な力学の影響から自由ではなかったと考えられる。アンペールは、運動と力に関する学問を四つに分類するにあたって、「運動学 (cinématique)」「静力学 (statique)」「動力学 (dynamique)」とともに「分子力学 (mécanique moléculaire)」という分野を導入している。この分子力学とは、孤立した質点を扱うのではなく、物体の平衡状態や運動状態を構成する分子の集合という観点から考察するものであった³²。このような「原子」ないし「分子」は、実証できない仮説であるため批判の対象ともなったが、物質のさまざまな作用を考える上では広く普及した考え方でもあった。

ここでアンペールが言及している「粒子」は、神がはじめに形づくったものだと定義したニュートンの「粒子」の定義とは意味が異なる。アンペールは、あくまで原子を物質の最小単位と考えている。また、アンペールの「粒子」が、デーヴィーやファラデーが区別して用いていた電気や化学作用の対象としての「粒子」と、どれほど同じ意味を共有していたのかも不明である。むしろ、アンペールの原子は、4.2節の最後で引用したようにファラデーが「原子と粒子の観念の区別は小さなもの」³³であると述べていたところの、ファラデー的な原子と粒子の性質をあわせ持った存在であり、1.2節で論じたボスコヴィッチ的な原子に近いと考えられるだろう³⁴。

³¹ Ampère, “Note by M. Ampère on Heat and Light,” 343. この論文の中で、アンペールは光や熱を分子の振動による活力 (vis viva) の伝播として論じている。なお、アンペールのこの英訳論文は、『哲学雑誌』の11月号でファラデーの論文 (Michael Faraday, “Reply to Dr. John Davy’s ‘Remarks on Certain Statements of Michael Faraday Contained in his ‘Researches in Electricity.’”,” *Philosophical Magazine*, 7 (1835): 337-42.) の直後に掲載されていた。

³² Ampère, *Essai sur la Philosophie des Sciences*, 54.

³³ Faraday to Frederick Oldfield Ward, 16 June 1834, *Correspondence*, 2:194.

³⁴ 第4章の注102でも記したが、王立協会の秘書であるチルドレンに託した書簡に記されていたように、1832年の時点では、ファラデーは電磁気現象が振動として空間を伝わっている可能性を考えていた。

(Faraday to John George Children and Sealed Note, 12 March 1832, *Correspondence*, 2:26; Williams, *Michael*

そして、ファラデーが「分子」として言及している対象は、その区別は曖昧であるにせよ、粒子的な性質と原子的な性質をあわせ持った存在であると考えられる。だからこそファラデーは、近接粒子の作用を論じる際に「分子作用」という言葉を用いるようになったと言えるだろう。このことは、ファラデーが分子と分極との関係について述べている次の記述にも表れている。

私が到達した結論としては、それは全体として分極している物質の分子である。そして、物体の構成が複雑であろうと、結合体の一つの分子を形成する化学親和力によって一緒になっている粒子や原子はすべて、それがその一部をなしている物質において誘導現象や分極が生じたときに、一つの伝導する質量や粒子として作用する³⁵。

すなわち、ファラデーは、分子が粒子や原子によって形成されていると考えていた。そして、その分子は化学的な作用には粒子として、そして力学的な作用には質量として、それぞれ作用すると考えていた。いわば、原子は物質的な構成要素を考えるときに言及される対象であり、粒子は電気的な作用を考えるときに言及される対象であったとも言えるだろう。

以上のように、ファラデーは分子を粒子や原子の作用を包括する概念として用いたと考えられる。ただし、ファラデーが分子について言及するようになった理由はそれだけではなく、イオニア大学の数学教授モソッティの分子論からの影響も大きかったのではないかと考えられる。モソッティは、1836年に引力と斥力の組み合わせからなる「分子作用」についての論文を発表してイギリスでも知られるようになった。そして、このモソッティの分子論をイギリスで普及させるために尽力したのが、他ならぬファラデーであった。次節では、このモソッティの分子論について詳しく論じることにしよう。

5.3. モソッティの分子論

ファラデーは、まさに前節で論じた誘導容量の測定実験をおこなっていた1836年から1837年にかけて、モソッティの分子論に傾倒していた。モソッティは「分子作用の諸法則と原因の決定に役立つ、見かけの物体の内部構成をつかさどる諸力について (*Sur les forces qui régissent la constitution intérieure des corps aperçu pour servir à la détermination de la cause et des lois de l'action moléculaire*)」という題の論文を1836年に発表した³⁶。そして、この論

Faraday, 181.)

³⁵ ERE, 1:542-3, par. 1700.

³⁶ Ottaviano F. Mossotti, *Sur les forces qui régissent la constitution intérieure des corps aperçu pour servir à la détermination de la cause et des lois de l'action moléculaire*, (Turin: 1836). モソッティはファラデーと同年にイタリア・ノヴァラで生まれる。ミラノ大学で学び、同地の天文台に勤務。のち、プエノスアイレス大学の物理学教授および地勢局の天文台長に就任。1824年創設のイオニア大学に移った後、1841年にはピサ

文をテイラー (Richard Taylor, 1781-1858) に推薦し、彼が海外の主要論文を編集・英訳して出版した『サイエンティフィック・メモワール (*Scientific Memoirs*)』に掲載するために尽力したのが、ファラデー自身であった³⁷。ファラデーは 1837 年 1 月 20 日におこなわれた王立研究所の金曜講演でも、このモソッティの理論を取り上げている³⁸。なお、これと同時期には、同じくテイラーが編集していた『哲学雑誌』で、モソッティの理論が「現代科学における最も特筆すべき理論の一つ」³⁹として紹介されている。前述のようにファラデーは、このモソッティの論文の題名にある「分子作用」という言葉を用いており、その点でもファラデーの誘導の理論にはモソッティの研究との対応関係が見られる。

この論文では、アンペールの分子論と同じく、物質を構成している分子は作用を及ぼし合いながら互いに距離を隔てて存在していることが前提とされ、この分子間作用を数学的に記述することが目的とされた。物質には万有引力がはたらいているが、圧縮によって体積がどんどん小さくなってしまわない。そのため、分子間には引力とともに、とくに短い距離では斥力も働いていると考えられた。なお、このように分子が可感ではない距離では遠隔的に作用を及ぼしていると考えすることは、トマス・トムソンなども前提としていたことである。

モソッティは、万有引力や静電気力などの多様かつ複雑な力の作用を説明するために、力が階層構造をなしていると考える。モソッティの分子論は、彼自身も認めているとおり、フランクリンやエピヌスの理論を基礎としていた。エピヌスは、1.3.1 節で論じたように、フランクリンの理論を拡張して電気を相互に反発し合う粒子からなる流体と考え、電気流体の粒子間の斥力および電気流体と物質粒子との引力、そして物質粒子同士の斥力との合力のバランスを考えていた。そして、電気流体の増減のバランスによって全体として引力あるいは斥力が生じるのだと説明していた。

モソッティは、このエピヌスの理論を応用して独自の分子論を展開する。まず、物質は

大学の数学・理論天文学・測地学教授になる。電気的な分極率についてのクラウジウス＝モソッティ理論で知られている。モソッティは、ラプラスやポアソン、アンペールといったフランスの科学者の研究に強く影響を受け、さまざまな物理現象を流体間の遠隔作用的な中心力で説明できると考えていた。1840 年代になって、モソッティはファラデーの論文に影響を受けて「分極」を電気現象の説明原理として取り入れた。しかし、ファラデーがすべての電気現象を粒子の分極で説明したのに対して、モソッティは分極した粒子がまわりの電気流体 (エーテル) に及ぼす作用で説明するという、あくまで電気流体を中心とした議論を展開した。そのため両者の議論には大きな違いも存在していた。(Jed Z. Buchwald, DSB, s.v. "Mossotti, Ottaviano Fabrizio.")

³⁷ Mossotti, "On the Forces which Regulate the Internal Constitution of Bodies." とくにこの『サイエンティフィック・メモワール』の第 2 巻では、オームやウェーバー (Wilhelm E. Weber, 1804-91) といったドイツの電磁気学研究が英訳されて紹介されている。

³⁸ "Friday Evening Proceedings at the Royal Society," *Philosophical Magazine*, **10** (1837): 317-8. なお、ファラデーが金曜講演でモソッティの理論を取り上げる 1837 年 1 月 20 日の未明に、バベッジはファラデーに宛てて原子論を解説する書簡を送っている³⁸。その中でバベッジは、アトモスフィアを持つ点原子からの放射として力を取り扱うことについて解説して、重力をその力の集合と考えるルサージュ (George-Louis Le Sage, 1724-1803) の重力理論にも言及している。なお、バベッジは、モソッティの論文についてイギリス人の聴衆にとって誇張的な部分には講演で言及しないように忠告している。(Charles Babbage to Faraday, 20 January 1837, *Correspondence*, 2:402-3.) この書簡の署名には「1837 年 1 月 20 日午前 2 時」とある。

³⁹ "Intelligence and Miscellaneous Articles," *Philosophical Magazine*, **10** (1837):320-1, 320.

弾性流体であるエーテル中にひたっている状態にあると考える。そして、エーテル原子は距離に応じて密度が小さくなるアトモスフィアに取り囲まれているとし、また、そのアトモスフィアは互いに空間的な干渉をおこなわず、浸透し合っていると考える。アトモスフィアの斥力が例えば指数関数的に比較的すぐに減衰するならば、ある適当な場所で引力と斥力が逆転し、その場所で分子の距離は平衡状態に保たれることになる。すなわち、モソッティは、万有引力が電気力や化学親和力に比べてかなり微弱であるが、これらの力のバランスのわずかな差によってそれぞれ有効にはたらいっていると考えたのである。

ここで、モソッティがエーテル原子間の力を考えていた点は、ボスコヴィッチの原子論とは異なる点である。1.2節で論じたように、ボスコヴィッチは単独の原子が及ぼす力を考察していた。それに対してモソッティは対となる原子のあいだの力を考察している。このことは、後でファラデーへの影響を評価する上での重要な論点となる。

そして、モソッティはこれらの関係を数学的に記述することを試みる。モソッティによると、エーテルが受ける斥力 F は、点 (x, y, z) にある密度 q のエーテル原子と点 (x', y', z') にあるエーテル原子とが力を及ぼし合うとして、エーテル原子間の斥力を規格化した f の空間積分として次式の上のように与えられる。また、エーテルが物質分子から受ける引力 G も、点 (ξ, η, ζ) にある密度 ω の物質分子と点 (x, y, z) にあるエーテル原子とが力を及ぼし合っていると考えて、エーテル原子と物質分子のあいだの引力を規格化した g の空間積分として次式の下のように与えられる⁴⁰。

$$F = \iiint \frac{f q' dx' dy' dz'}{\{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2\}^{\frac{1}{2}}}$$

$$G = \iiint \frac{g \omega d\xi d\eta d\zeta}{\{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2\}^{\frac{1}{2}}}$$

そうすると、点 (x, y, z) においてエーテルおよびあらゆる物質から受ける力 ϵ は、平衡状態において次式を満たすはずである⁴¹。なお、この式は x 成分の式であり、 y および z 成分においても同様に記述される。

$$\frac{d\epsilon}{dx} = -q \frac{dF}{dx} + q \frac{dG_1}{dx} + q \frac{dG_2}{dx} + q \frac{dG_3}{dx} \dots + q \frac{dG_v}{dx} + \text{etc.}$$

ここで、上式で力の空間積分として与えられる F 、 G は、ポテンシャルに相当する関数である。ただし、1.3.3節のポアソンの議論と同様に、モソッティにおいてもポテンシャルという概念が導入されていたわけではない。

さらにモソッティは、この F と G の式を、1.3.3節で紹介したラプラス＝ポアソンの方程式に極座標で代入する。そして、最終的には斥力の項に距離の指数関数の逆数 e^{-ar} が

⁴⁰ Mossotti, "On the Forces which Regulate the Internal Constitution of Bodies," 452.

⁴¹ Ibid., 452.

係数としてかかってくることを導出し、全体としての斥力が距離の増加とともに極めて弱まっていくはずだという結論を得ることができたのであった。

ファラデーがこのモソッティの議論の数学的な側面を積極的に評価したとは考えにくい。が、ヒューエルに宛てた 1836 年 12 月 13 日付の書簡の中で、ファラデーはモソッティの論文の感想を熱心に語っている⁴²。この論文についてのファラデーの説明によると、論文の主旨はまず、物質と電気とはそれぞれ引力と斥力を及ぼし、それらは距離の逆二乗に比例すると考えることにある。ただし、物質の及ぼす斥力は他の力より若干弱いために、物質には重力が観測されるのだと考える。そうすると、重力や電気の力などによる現象が「互いに接触していない」⁴³分子の作用として説明可能になる。

ここでファラデーは、モソッティの論旨ないし一般的な分子論に従って、分子間の作用には遠隔作用を認めている。その上で、モソッティの論文に大きな可能性を見出していたのである。もちろん、モソッティは遠隔作用的な中心力を基本としながらも、分子間の中心力を考える上でエーテルの存在を仮定していた。このようにエーテルの存在を仮定することは、少なくとも理論的な立場として、遠隔的な直接作用を否定するものである。もっともエピヌスの遠隔作用説においても、1.3 節で論じたように一般に遠隔作用そのものは否定されていた。そうすると、モソッティの立場はエピヌスの立場と本質的に異なるものではない。ファラデーは、基本的にはデーヴィーと同じようにエーテルの存在を想定することはなかったが、6.4 節で詳しく論じるように、ボスコヴィッチやモソッティに言及しながら電気のアトモスフィアや光エーテルを力線に読み替えている。このように、何らかの作用媒体を想定する点はモソッティの議論と共通しているが、それは同時にエピヌスの議論とも共通していると言えるだろう⁴⁴。

⁴² ファラデーはこの書簡の中で、「私が判断できるものではない数学の部分においても正しいことを願っている」と述べている。そして、ファラデーはこの書簡の中で、この論文についての意見をヒューエルに求めた。(Faraday to William Whewell, 13 December 1836, *Correspondence*, 2:391.) ヒューエルから届いた 12 月 21 日の返信では、そもそもヒューエルはモソッティの論文を読んでいないため、論文を送付してほしいと書かれていた。(William Whewell to Faraday, 21 December 1836, *Correspondence*, 2:393.) 次にヒューエルが書簡を送ったのは 12 月 29 日で、その中ではファラデーの実験を引いて「dielectric (誘電体)」という造語の提案をおこなっている。(William Whewell to Faraday, 29 December 1836, *Correspondence*, 2:398.) なお、1837 年 1 月 20 日のファラデーの金曜講演までに、ヒューエルはモソッティの計算の正しさを確認していた。(“Royal Institution,” *Athenaeum* 483, 28 January 1837, 67.)

⁴³ Faraday to William Whewell, 13 December 1836, *Correspondence*, 2:391.

⁴⁴ ウィリアムズは、1836 年から 1837 年にかけてファラデーがモソッティの理論に傾倒したことを、ボスコヴィッチの点原子論への傾倒が続いている根拠であるかのように論じている。(Williams, *Michael Faraday*, 294-6.) しかし、ファラデーがボスコヴィッチとの関係においてモソッティに傾倒した根拠はなく、ウィリアムズ自身がファラデーの思想的傾向にボスコヴィッチの点原子論の影響を過度に読み込み、そのためにこのような解釈が生じたと考えられる。(Williams, *Michael Faraday*, 120-31.) なお、デーヴィーはボスコヴィッチに言及しながら点原子論について肯定的に論じているものの、ファラデーは 1844 年までボスコヴィッチの原子論には言及していないが、ウィリアムズはボスコヴィッチが初期からファラデーの考え方に影響を与えたとしている。(Williams, *Michael Faraday*, 77-80.) ファラデーとボスコヴィッチとの関係を改めて検討したスペンサーは、ファラデーにとってボスコヴィッチの原子論は、1844 年以降の一時期に自説に近いものとして紹介しただけのものであり、その初期からの影響関係はそれぞれの理論の内容を比較しても仮説の域を出ないとして否定的であると結論づけている。(Spencer, “Boscovich’s Theory and its Relation to Faraday’s Research.”) なお、ルヴィアは、1840 年代までファラデーがボスコヴィッチについて明示的に言及していないことについて、ボスコヴィッチの原子論が、数学的な概念としては

そもそもファラデーがモソッティの議論に傾倒していた1836年末には、近接粒子によって誘導の曲線的な作用を説明することが十分に体系化できていたわけではなかった。そのため、遠隔作用説が明確に批判の対象として意識されていたわけではなかった。むしろ、次のようにモソッティの議論を紹介する際にも、ファラデーは、エピヌスやキャヴェンディッシュらの「遠隔作用」を否定していたわけではなく、むしろ議論の前提として共有すらしていたのであった。

彼はまず、ポアソンの研究が、電気が一流体であるか二流体であるかという問題の解決には何もおこなっていないことを示そうとします。そして彼は、物質が（エピヌスとキャヴェンディッシュの理論によると）距離の二乗に逆比例する斥力を持つとともにそれと同じ比率の引力も持つと考えると想定される困難が、実際のところは存在しないのだということを示していきます⁴⁵。

ファラデーは、ここでポアソン、エピヌス、そしてキャヴェンディッシュの3名を遠隔作用説の代表者としてあげている。1.3節で述べたように、この3名は、誘導現象について発表した1837年の論文では、遠隔作用説の代表者として批判の対象となっている⁴⁶。すなわちこの時点では、これらの研究者たちの理論には問題があるとはいえ、遠隔作用説そのものが否定されていたわけではなかった。そして、5.5節でも改めて論じるように、近接粒子による遠隔作用説批判がおこなわれた後でも、基本的に分子ないし粒子間の力としては遠隔作用に代わる説得力のある理論を与えることができなかった。

また、このモソッティの論文では、重力と電磁気力との原因が同じであるとして、ファラデーが求めていた力の統一的な説明が与えられており、そこにファラデーが魅力を感じたという見方もできるだろう⁴⁷。そうすると、ファラデーは、例えばモソッティの次の記述に代表される主張によって、分子論に対してより深い魅力を感じたと考えられるかもしれない。

分子作用の法則の発見は、一つの原理の上に「分子的機構 (molecular mechanism)」を確立することへと数学者たちを導くはずである。まさに、万有引力の法則の発見が、彼らを単一の基礎の上に人間の知性の最も輝かしい記念碑である「天界の機構 (mechanism of the heavens)」を打ち立てることへと導いたように⁴⁸。

このように、モソッティは、自身の分子論がニュートン力学における万有引力の理論と

ともかく、その実在性が判明しにくいものであったことを理由にあげ、ウィリアムズの主張を擁護している。(Levere, "Faraday, Matter, and Natural Theology," 99.)

⁴⁵ Faraday to William Whewell, 13 December 1836, *Correspondence*, 2:391.

⁴⁶ *ERE*, 1:362, par. 1165.

⁴⁷ Cantor, *Michael Faraday: Sandemanian and Scientist*, 245-6.

⁴⁸ Mossotti, "On the Forces which Regulate the Internal Constitution of Bodies," 451.

同等の重要性を持つ力学的（メカニズムの）理論だと主張していた。ここで用いられている「分子作用」という言葉は、4.1節でも引用した、ファラデーが誘導の理論を確信した際に用いていた表現である。ファラデーも、「分子作用」によって説明される誘導の原理が、少なくとも電気現象の一般理論になりうると考えたのであった。

なお、この1830年代の後半には、ボスコヴィッチの原子論もイギリスで再び注目されるようになっていた⁴⁹。例えば1837年には、イギリス科学振興協会（British Association for the Advancement of Science: BAAS）の会合で、ハミルトン（Sir William Rowan Hamilton, 1805-65）が「物質的」な原子の存在を否定し、原子とは数学的な点から生じる引力と斥力の作用であると主張していた⁵⁰。また、ファラデーの友人であったダニエル（John F. Daniell, 1790-1845）も、1840年頃にボスコヴィッチの原子論に注目している。例えば彼は、自著『化学哲学研究序説（*An Introduction to the Study of Chemical Philosophy*）』の第1版（1839年）では紹介しなかったボスコヴィッチの理論を、第2版（1843年）では追加したりしている⁵¹。ただ、ダニエルはドルトンの原子説も紹介しており、ボスコヴィッチの原子論についても、あくまで仮説として限定的に扱っているに過ぎない⁵²。また、ファラデーがダニエルとボスコヴィッチの理論について議論した書簡などは残っていない⁵³。そしてダニエルは、基本的にファラデーの説を採用し、電気の誘導現象も大気圧ではなく近接粒子による作用であると説明していた⁵⁴。

すなわち、1830年代の後半において、ファラデーの近接粒子の理論は、ファラデーによっても他の研究者によっても、ボスコヴィッチの原子論と明示的に結びつけられて理解されていたわけではなかった。少なくとも1836年の時点では、ファラデーはボスコヴィッチの原子論よりもモソッティの分子論に注目していた。ここで近接粒子の理論に対して影響を及ぼした理論をあげるとすれば、それはボスコヴィッチの原子論ではなく、やはりモソッティの分子論であったと言えるだろう。

モソッティの分子論は、ファラデーにとって、重力など他の力との関係を一般的かつ発展的に説明できるという点で極めて期待の持てる理論であり、近接粒子の分極作用につい

⁴⁹ Williams, *Michael Faraday*, 295-6.

⁵⁰ “Seventh Meeting of the British Association for the Advancement of Science,” *Athenaeum* 519, 7 October 1837, 747. ハミルトンがこのような主張した BAAS での議論にファラデーも参加していたが、ファラデーはボスコヴィッチについては明示的に言及していない。こうした理由から、サットンがファラデーが1844年までボスコヴィッチの原子論に確信を持ってはいなかっただろうと結論づけている。（Sutton, “J.F. Daniell and the Boscovichean Atom,” 288-90.）なお、ハミルトンは彼の妹に宛てた1834年6月30日付の書簡の中で、ファラデーが「私自身とほとんど同じように反物質的（anti-material）な観点に至っている」（W.R. Hamilton to his sister Sydney, 30 June 1834, *Life of Sir William Rowan Hamilton*, 2:95-6.）と述べており、ハミルトンとファラデーが以前から同じような考え方を共有する機会を持っていたことは指摘できる。しかし、これをボスコヴィッチの原子論とまで限定することはできないだろう。

⁵¹ Daniell, *An Introduction to the Study of Chemical Philosophy*, 7-8. このようにダニエルが考えるようになった原因には、ロンドン聖トマス病院の外科医であったグリーン（Joseph Henry Green, 1791-1863）の影響があった。（Sutton, “J.F. Daniell and the Boscovichean Atom,” 277-92.）

⁵² Sutton, “J.F. Daniell and the Boscovichean Atom,” 285-6.

⁵³ *Ibid.*, 277-92.

⁵⁴ Daniell, *An Introduction to the Study of Chemical Philosophy*, 245-58, esp. 245-6.

での考察を深める上でも影響を与えたと考えられる。このようにファラデーの理論への影響という観点から、モソッティの理論はその歴史的な影響を評価できる。

しかし、モソッティの理論はエピヌス的な遠隔作用説に基づいていたため、ファラデーが「遠隔作用説」を否定した時点で、その重要性は低下したと考えられる。ヒューエルは1837年の『帰納科学の歴史』で、モソッティを「エピヌス理論の帰結をはるかに完全な形で計算した」⁵⁵新しい研究として肯定的に紹介しているが、1840年の『帰納科学の哲学』では、「モソッティのごとくそのような仮説的問題に早まった判断をしようとするのは、確かにきわめて哲学的洞察に欠いたことであろう」⁵⁶と否定的な評価に転じている。このようにヒューエルが態度を変えた時期は、ファラデーが誘導現象についての包括的な理論を発表した時期と重なる。

ファラデーはその後もモソッティの理論に言及することはあったが、この1836年以上に深く取り上げることはなかった。また、例えば後述するようにマクスウェルもモソッティに言及することはあったが、ファラデー以外の研究者によってもこの時期以上に注目されることはなかった。

5.4. 誘導の理論の一般化

ファラデーは、この章でこれまで論じてきたような過程を通じて、第4章で述べた「連続的な粒子の作用」「分極」「曲線的な作用」などの理論的な要素が体系的に結びつくことを確信するに至った。それまで、曲線的であることは作用の形状の表現として認識されていたに過ぎなかったが、粒子の分極作用と結びつくことで、それが現象を説明するための根拠になったのである。そして、この理解を整理して一般化し、誘導の理論として発表したのであった。そこで、この節ではファラデーが5.2節の測定から誘導の理論を実験的に確認し、さまざまな電気現象についても考察を進めて一般的な理論へと再構成していく過程を分析していきたい。

5.2節で論じたように、ファラデーは、移動のない近接粒子の連続的な分極作用が誘導の曲線的な作用の物質的な根拠になっていると考えるようになった。ファラデーは、この考えを検証するため、図34の装置上端の真鍮球をさまざまな形状のものに取り替えて誘導作用の空間的な分布についての検証を続ける。その実験では、例えば、次の図37のような形状の装置が用いられた。

⁵⁵ Whewell, *History of the Inductive Sciences*, 3:30.

⁵⁶ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:289.

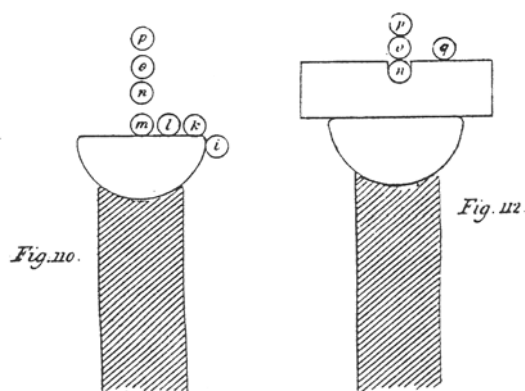


図 37: 作用が曲線的であることを実証するための実験装置。図 34 に比べて真鍮球の形状に工夫が凝らされている。(ERE, 1, fig. 110, 112.)

この図 37 左の半球を用いた実験では、振り秤による電荷の測定結果が、 i 点では 112 度、 k 点では 108 度、 l 点では 65 度、 m 点では 35 度となった。そのためファラデーは、「誘導の力が予想されたようにこの点に向けてしだいに減少している」⁵⁷と述べている。その一方で、さらに搬送球を n 点まで持ち上げると振り秤の測定結果は 87 度に増加し、 o 点へとさらに高く持ち上げると 105 度まで増加した。そしてさらに高い p 点では、振り秤による測定結果は 98 度に減少し、さらに位置を高く上げていくと減少を続けたのであった。作用が m 点より n 点や o 点で強く観測されるということは、作用が曲線的であることの何よりの証拠であろう。そのため、この実験はファラデーにとって「誘導がきちんと角をまわった」⁵⁸良い事例であるとみなされた。そしてファラデーは、これらの結果をまとめて、「思うに、誘導に依存するすべては、極性や緊張のある状態に投げ入れられた誘電体の近接粒子の作用であり、その力によってあらゆる方向に相互関係がある」⁵⁹と結論づけたのである⁶⁰。

またファラデーは、図 37 左の半球上に液体であるテレピン油をセラック膜で覆ったガラス皿に注いで乗せて実験をおこなったり、図 37 右のように固体である硫黄などの不導体を乗せて実験をおこなったりして、気体である空気との作用の差を調べた。その結果、液体であるテレピン油には有意な差は認められず⁶¹、固体である硫黄などではより大きな作用が観測された⁶²。液体でも気体と同じように作用が観測されたことについて、ファラデーは、「ある人たちが想像するような、流体や気体中を荷電粒子が移動することから起こりう

⁵⁷ ERE, 1:383, par. 1224.

⁵⁸ ERE, 1:383, par. 1224.

⁵⁹ ERE, 1:383, par. 1224.

⁶⁰ なお、ここで「あらゆる方向に」相互関係を持つとしているが、ファラデーは作用が曲線状になることについて、それらの線に「横方向の張力 (lateral tension)」がはたらいていると考えている。

⁶¹ ERE, 1:384, par. 1227.

⁶² ERE, 1:385, par. 1229.

る作用は、ここではまったく否定された」⁶³と述べている。すなわち、粒子が移動していないことが理論の前提となっていたため、液体と気体で差がなかったことはその理論の正しさを実証していると考えられた。そして、硫黄などの固体でより大きな作用が観測されたことについては、比誘導容量の差による結果だとみなされた⁶⁴。

また、ファラデーは誘導の「原理」から「通常の絶縁と伝導とは、互いに密接に関連する、むしろある共通の状態の極端な事例である」⁶⁵とみなし、導体と絶縁体との違いは比誘電容量の違いに過ぎないと考えた。すなわち、この「共通の状態」とは近接粒子の分極状態であり、絶縁も伝導も同じように誘導の作用の極端な例として考えられたのである⁶⁶。ファラデーは、この導体と絶縁体の関係について次のように述べている。

もし誘導が減衰しないままであるならば、その結果として完全な絶縁となる。そして、粒子が獲得ないし保持できる分極状態がより高いものになれば、はたらく力に与えられる強さもより大きくなる。逆にもし、分極状態を得るにあたって近接粒子がそれらの力を伝える力能を持っているならば伝導が生じ、伝導は隣り合う粒子のあいだの放電の異なる作用であり、その緊張はより低いものである。このように物体粒子のあいだで放電が起こる際の緊張状態が低いほど、その物体は良導体である。この見解からすれば、絶縁体とは分極状態を保持できる粒子からなる物体であり、導体とは永続的には分極できない粒子からなる物体であると言える⁶⁷。

このように電気現象を誘導という観点から包括的に理解すると、放電は誘導を原因として生じる特殊な現象であると考えられるようになる。これは4.4節で、ファラデーが粒子の移動を付随的な結果とみなすようになった過程として論じた通りである。粒子の移動をともなう現象はすべて放電として誘導の極端な例に分類され、放電の形態の違いも、粒子の「緊張あるいは分極の状態」⁶⁸の程度の違いとして説明されるようになった。

さらにファラデーは、近接粒子の作用という観点から、粒子の移動を局所的な変位 (displacement) とみなし、その変位をあくまで誘導の付随的な結果とする。そして放電を、この粒子の変位の様子によって次の四種類に分類した。

絶縁の逆は「放電 (discharge)」である。「放電」という一般的な用語で表現される作用や効果は、現時点で私たちが知っている限り、いくつかの様式で生じているようだ。すなわち、化学作用を含まない単純に「伝導 (conduction)」と呼ばれているもので、関与している粒子には明らかに変位 (displacement) はない。第2の様式は「電解放電

⁶³ ERE, 1:385, par. 1228.

⁶⁴ ERE, 1:385, par. 1229.

⁶⁵ ERE, 1:419, par. 1324.

⁶⁶ ERE, 1:418, par. 1320.

⁶⁷ ERE, 1:425-6, par. 1338.

⁶⁸ ERE, 1:420, par. 1326.

(electrolytic discharge)」と呼ばれるもので、そこでは化学作用が生じ、粒子はある程度変位する。第3の様式、すなわち火花やブラシによるものは、その途中にある「誘電体」の粒子に激しい変位が生じることから、破裂放電 (disruptive discharge) と呼ばれる。そして第4のものは「対流 (convection)」あるいは「搬送放電 (carrying discharge)」という言葉でとりあえず便宜的に区別されるもので、固体や気体、液体のうち、どの粒子を運ぶ力能によっても引き起こされる放電である⁶⁹。

この分類で示されているように、ファラデーは、放電では必ずしも粒子の変位 (移動) が生じているわけではないと考えた。そして、伝導も電解放電 (電気分解) も、そして火花などの光をとまなう放電も、放電という現象としてまとめ、その粒子の変位のあり方の違いとして説明したのである。

例えば、電解放電 (電気分解) は、電気がある程度の強さに達すると「結合や分解といった化学作用が生じる度合いに比例して放電を起こす」⁷⁰と考えられた。そして、このように粒子の変位が化学作用と関係するために、その他の放電とは区別された。なお、電解放電で用いられている「誘電体」は水であると考えられる。そのため、分極も水の粒子において生じていると考えられる。そこでファラデーは、この水の粒子が、酸素と水という元素粒子 (elementary particle) に分割されて、図27のように逆方向に変位しつつ次の粒子と結合することで放電し、この過程を繰り返すことで電気分解を生じさせていると考えた⁷¹。そのため、粒子の移動があるにせよ、それは局所的な変位であるため、電解放電は「近接粒子の作用の証拠に他ならない」⁷²と理解されたのである。もっとも、電解質が固体の状態では分極していた粒子が、液体になると「元素粒子」へと分割されて移動を始める⁷³。このように粒子が化学作用として分割されるという点が、電解放電と通常の誘導との違いであると理解された。そのため、ファラデーは、この分割に影響している「原子」の力や配列などの電气的状態を探る必要性があると指摘しているが、この時点では一貫した仮説を与えることはできなかった⁷⁴。

このように放電という現象は粒子の局所的な変位によって説明されたため、電気の「流れ」という表現の意味が問題になる。すなわち4.2節の最初でも論じたように、粒子そのものの移動と粒子による作用の移動とは、同じように「流れ」として認識されるために混同されやすい。この点をファラデーは次のように指摘している。

⁶⁹ ERE, 1:417-8, par. 1319. 第4の「対流 (convection)」や「搬送放電 (carrying discharge)」は、実際に粒子の移動をとまなう放電であった。

⁷⁰ ERE, 1:427, par. 1344. ファラデーは別の個所でも、放電に至る前の分極の度合いが異なるために、「異なる電解質ないし誘電体は、それらを分解するためにそれぞれ異なる最初の強度を必要とする」と述べている。(ERE, 1:431, par. 1353.)

⁷¹ ERE, 1:428, par. 1347.

⁷² ERE, 1:429, par. 1349.

⁷³ ERE, 1:542-3, par. 1702-4; 1 April 1838, *Diary*, 3:272-3, 278-9, par. 4571-4; 5 April 1838, *Diary*, 3:278-9, par. 4618-20.

⁷⁴ ERE, 1:542-5, par. 1703-8.

「流れ (current)」という言葉は、一般的な言語ではとても表現豊かであり、電気現象を考察する上で用いるときには、その意味するところを十分に削ぎ落とし、私たちの精神をそれによる先入観を受けることから免れることがなかなかできない。私は、この言葉を一般的な電氣的な意味において、前進 (progression) していると考えられる電気の力のある状態や関係を表すために用いるつもりである⁷⁵。

ただし、このようにファラデーは「流れ」を状態の前進として定義したが、電流にはつねに二つの力が存在し、「一つの力の流れや一つの流体だけがある、ということは決してない」⁷⁶ことにも注意を促している。「流れ」においては「前進」が生じているとはいえ、それは分極という両方向的な変化によって担われているものであり、その「力能の軸のあらゆる部分において、両方の電気の力は等しい量で現れる」⁷⁷ことになる。そのため、全体的な移動というものは想定されず、局所的な変位の連続として理解された。すなわち、電流もまた近接粒子の作用として理論化された⁷⁸。ファラデーは電流においても「二つの力の中心ないし力の元素は、可感な距離には決して分離しえず、あらゆる事象において二つの近接粒子のあいだの空間より遠くはならない」⁷⁹と述べている。

なお、「流れ」を考える場合には、電気の作用が伝わる速度も問題になる。この問題については、ホイートストン (Charles Wheatstone, 1802-75) が、ファラデーの協力を得ながら、光と電気の速度を測定するための回転鏡を用いた実験を 1834 年におこない、電気が導線を伝わる速度は少なくとも光速と同程度であると結論づけていた⁸⁰。ファラデーは、この「速度」を実際の粒子の移動というよりも力の移動と考えることで、この結果が「力を粒子と同一のものともみなし、それを連続して先導する部分に分配することによって、その力を位置づける」⁸¹ように促すものであると考えた。そして、ファラデーはこの「力」と「粒子」の関係を探るため、重力、凝集力、電気力、化学親和力を「微粒子の力 (corpuscular forces)」としてあげて、それらの力を比較する研究の必要性を再認識するのであった⁸²。

また、電解放電とは異なる放電の形態として、火花やブラシ、グロー放電の総称としての破裂放電についても論じられた。ファラデーは、破裂放電において空気や流体の流れが生じることがあっても、それは現象の本質ではないとする。そして、空気の流れを生み出す「力学的な力 (mechanical force)」は、あくまで放電を生じさせる物体の形状やその物質

⁷⁵ ERE, 1:515, par. 1617.

⁷⁶ ERE, 1:518, par. 1627.

⁷⁷ ERE, 1:523, par. 1642.

⁷⁸ ERE, 1:515, par. 1619.

⁷⁹ ERE, 1:518, par. 1628.

⁸⁰ Wheatstone "An Account of Some Experiments to Measure the Velocity of Electricity and the Duration of Electric Light," 1834. ホイートストンはファラデーの協力を得てこの伝達速度の研究をおこない、1834 年に発表した。なお、ホイートストンは電気の伝達速度が秒速 25 万マイル程度だという結論を得ており、これは光速の 1.3 倍に相当することになる。なお、フーコー (Jean Bernard Léon Foucault, 1819-68) もこの実験に着想を得て回転鏡を用いた光速度の測定をおこなった。電気の速度の議論については、4.3 節や 6.4 節を参照せよ。

⁸¹ ERE, 1:526, par. 1650.

⁸² ERE, 1:537, par. 1686.

のなどに依存する付随的な作用であると説明している⁸³。また、電解放電でも「対流 (convection)」が起こりうるが、これも破裂放電における空気粒子の移動と同様の現象であり、付随的な現象に過ぎないと理解された⁸⁴。

すなわち、破裂放電もまた近接粒子の作用として理論化され、4.3節で論じたように分極状態として保持できる以上の電気の力がかかることで生じる現象であると説明された⁸⁵。例えばブラシ放電は、その様子が論文の中では次のように描かれている。そして、改めてファラデーは、放電に先立つ分極状態において曲線的な形状が生み出されていることを強調している⁸⁶。

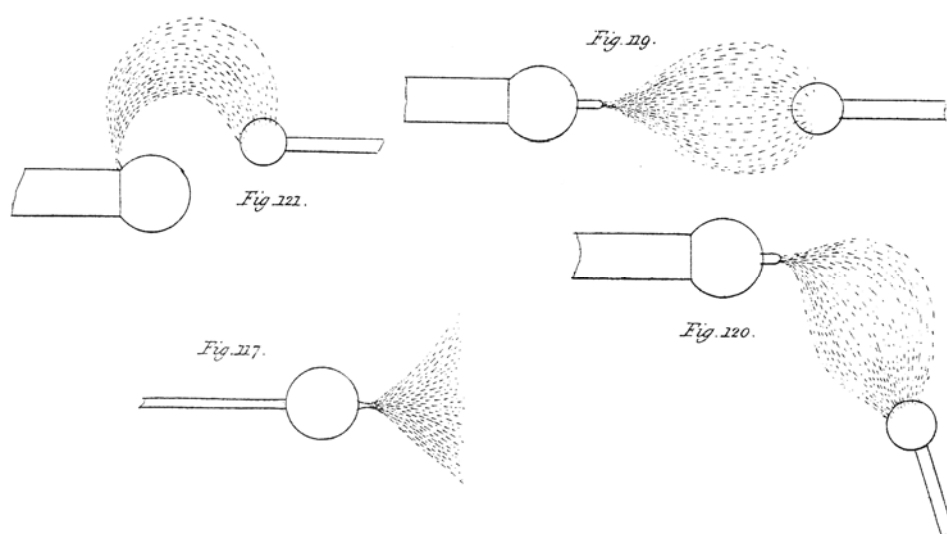


図38: ブラシ放電のさまざまな曲線的な作用 (ERE, 1, fig. 117, 119, 120, 121.)

このように近接粒子の分極作用という原理によって理論を一般化すれば、空気粒子の濃度と誘導作用の強弱との関係が本質的な問題となる。例えば、粒子の数が多いほど、すなわち空気の濃度が高いほど誘導も生じやすいように思われる。

最初に考えやすいのは、誘導によって緊張状態が生じているが放電には至っていない状態についてである。この場合、基本的に空気の濃度と誘導の作用の大きさに関連性は認められない。そのため、ファラデーは空気の濃度と作用の大きさとの関係を次のように説明している。

⁸³ ERE, 1:433, par. 1359; ERE, 1:500-8, par. 1573-600. ファラデーは、ブラシ放電についても、ほとんどの場合には媒質の流れは結果として生じることを認めながら、それが必要条件ではないと主張している。(ERE, 1:459, par. 1440.)

⁸⁴ ERE, 1:516-7, par. 1622-3.

⁸⁵ ERE, 1:447-9, par. 1406-9.

⁸⁶ ERE, 1:454-63, par. 1425-50. グロー放電は「空気のほとんど連続的な荷電」と説明されている。(ERE, 1:486, par. 1526.) ブラシ放電とグロー放電の関係については4.3節も参照せよ。

電気の量と距離が同じまま、空気が半分に希薄化されれば、誘電体の粒子の半分は取り除かれるが、残りの半分がその分極において2倍の張力を引き受ける。そのため誘導の力はつり合い、その結果は誘導や絶縁が保たれている限り変わらない⁸⁷。

そして、「空気の「希薄化」は誘導作用の「強さ」を変えることはないし、認められる限り、そのようないかなる理由もない」⁸⁸と結論づけるのであった。

その一方で、放電という現象については空気の希薄化が明らかに影響する。真空中の方が、容易に放電が生じるからである。この点について、ファラデーは、完全な真空の場合は理論的にまったく異なる現象であることを認めている⁸⁹。このように真空の場合を除外した上で、誘導作用の「強さ (intensity)」と電気の「量 (quantity)」とを区別し、空気の密度変化を誘導作用の強さではなく電気の量の変化と関連づけて考察を進める。そして、空気が希薄化すると放電が生じやすくなる理由として、「希薄な大気中で、誘電体粒子の数が半分だけのときは、以前の電気量の半分で放電の強さに達してしまうから」⁹⁰であると説明する。そして、ポアソンやビオによって提唱されていた「空気中にある導体表面の電気の保持を大気圧に帰する見方」⁹¹を斥けて、分極状態を保持するための一つ一つの粒子の力の大きさには限界があるために、放電に耐えうる状態にも限界が生じているのだと説明するのであった。

ファラデーは、破裂放電についても、次のように一般的な誘導現象と同様の説明を与えている。

ある「一定の」間隔において放電を生じさせるのに必要な電気の量は、密度の変化とともに厳密に変化する。電気の量と空気の密度とは同じ単純な比率のうちにある。あるいは、量が同じに保たれ、間隔と空気の密度が変化すれば、それらは互いに単純な反比例にあることがわかる。そして同じ量は、空気が半分に希薄化されると、二倍の距離を通過するのである⁹²。

このファラデーの理論は、ハリス (William Snow Harris, 1791-1867) の測定結果を説明するものであった⁹³。ハリスは、電気の媒体となる空気の温度や密度を変えながら、物体にはたらく電気の力の大きさや放電が生じる条件などを定量的に測定して 1834 年に発表していた。そのハリスの論文では、例えば、物体に誘導される電気の力が物体の形状によら

⁸⁷ ERE, 1:438, par. 1375.

⁸⁸ ERE, 1:438, par. 1375.

⁸⁹ ERE, 1:438, par. 1375.

⁹⁰ ERE, 1:438, par. 1375.

⁹¹ ERE, 1:438-439, par. 1377. すなわち、同種の電気には互いに斥力がはたらいているにもかかわらず、空気中に放出されずに物体にとどまっている理由を、気圧のはたらきによって説明する考え方のこと。(ERE, 1:412, par. 1305.)

⁹² ERE, 1:435, par. 1365.

⁹³ ERE, 1:405-6, 438, par. 1284, 1287, 1375.

ず等しいことや、平行平板間にはたらく電気の力が距離に反比例することなどが示されていた⁹⁴。その一方でハリスは、電気の引力や斥力が生じている仕組みや真空や大気と放電との関係については、電気の力がモソッティの分子論のように分子の斥力として考えられる可能性を指摘しながら、その理論的な説明は保留としていた⁹⁵。

このファラデーの説明のように、空気が希薄になっても、少なくなった粒子が誘導の作用を担うという説明は可能だが、その粒子の間隔は空気が希薄になればますます広がることになる。ファラデーは、誘導が曲線的に作用する根拠として、それが近接する粒子の作用によるからだと考え、遠隔作用説を否定した。しかし、空気が希薄になると、それらの粒子は十分に近接しなくなり、遠隔作用を否定する根拠が成立しなくなる。また、完全に真空の状態では粒子そのものが存在しなくなるため、誘導という現象が生じえないことになってしまう。

ファラデーは前述のように真空を例外として扱っており、「私が挑んだ限りにおいて、私の理論は真空についての結果を決定することを主張するものではない」⁹⁶と述べていた。しかし、真空という例外が存在するだけでなく、空気が希薄な場合には遠隔作用を否定できなくなることは、ファラデーの誘導の原理そのものを揺るがす深刻な問題であった。そして実際に、この問題についてファラデーは的確な批判を受けることになる。次節では、この批判の内容と、ファラデーのおこなった反論の内容について分析することで、ファラデーの「近接粒子」についての理解をさらに深めたい。

5.5. 「近接」粒子に対するヘアの批判

前節で論じたように、ファラデーの近接粒子は希薄化した空気においても作用するとされた。しかし、空気が極度に希薄になった状態では、粒子は理論的に考えて接触することがなくなるだろうし、逆に接触し続けているとすれば、空気が希薄化しているとは言えないだろう。

そもそも、ファラデーにとって、近接粒子とは厳密には接触していない粒子のことであった。ファラデー自身は、「可感な距離を隔てた粒子や質量への作用ではなく、ある種の分極からなる近接粒子の作用」⁹⁷という表現を用いており、可感な距離だけを遠隔作用の判断基準として考えている。さらに、「近接 (contiguous)」という言葉が「互いに接触していない粒子」を想定するものであり、厳密には正しい用語ではないとする注を 1838 年にわざ

⁹⁴ Harris, "On Some Elementary Laws of Electricity," 239. なお、ハリスは、電気が弾性流体であるという前提の下で、「緊張とは、ある空間にたまった、ある量の弾性的な力を意味する」と説明している。(Ibid., 222.)

⁹⁵ Ibid., 243-5. ファラデーが分子に言及しながら誘導現象の考察を進めたことには、モソッティの影響とともに、このハリスとの関係も影響している可能性もあるだろう。

⁹⁶ ERE, 1:514, par. 1615.

⁹⁷ ERE, 1:362, par. 1165.

わざ追加している⁹⁸。また、「分子作用」についても、「可感な距離を隔てた作用とは対照的な分子作用」⁹⁹として、あくまで可感な範囲でのみ遠隔作用を否定していた。

すなわち、この「近接」という言葉は、可感な距離を隔てた電気の作用が中間に存在する粒子を媒介して伝わるということを意味しているに過ぎなかった。すなわち、近接粒子とは「最も隣に存在している」粒子という程度のことであった¹⁰⁰。そして、近接粒子がそれぞれ接触しているわけではなく、粒子間の作用は空間を隔てて伝わると考えられていたのであるから、ファラデーは遠隔作用そのものを否定していたわけではなかったことになる。ファラデーは、万有引力は遠隔的に作用することを認めており、これを「より高い質と状態 (some higher quality and condition)」¹⁰¹を持つ力に分類していた。誘導の作用は、この万有引力のように可感な距離を遠隔的に伝わる力とは異なるが、可感ではない距離では、やはり遠隔的に伝わるのが前提とされていたのである。

このように、可感な距離とそうでない距離を区別し、可感ではない距離においては粒子間の遠隔作用を認めるという考え方は、前述のようにトマス・トムソンやモソッティらの見解と同じであった。そのため、ファラデーもとくに強く意識することなく、可感ではない距離での遠隔作用を前提としえたのであろう。しかし、密度変化が生じて、それによって作用そのものが大きく変化しない場合には、粒子間の距離が可感かどうかという基準で遠隔作用を否定し続けることは困難となる。空気の希薄化が進めば、粒子間の距離はいつか感覚できるほど大きくなってしまい、その基準が成立しなくなるからである。前節の最後で指摘したように、ファラデーの理論は完全な真空中で成り立つものではなかった。また、粒子間において可感な距離にわたって真空部分が存在する場合には、その部分では作用が遠隔的に伝わっていると考えざるを得なかったのである。

ファラデーは、真空状態における近接粒子と距離との関係を次のように説明している。

正に帯電した粒子が直径1インチの真空の中心にあるという状態が可能であると仮定すると、私の現時点の見解は、その粒子がよく知られた距離の二乗則と一致する力をもたなって、球の境界内面を形成するあらゆる粒子に半インチを隔てて作用するだろうということを禁じるものではない。しかし、絶縁体で満たされた1インチ球を仮定すると、私の意見によれば、帯電した粒子は隔たった粒子に直接作用するのではなく、その粒子と直に連なる粒子に対し、その粒子を分極させることに「すべての」その力能をはたらかせることで作用するのである¹⁰²。

すなわち、ファラデーは帯電した粒子が真空を通して遠隔作用することを認め、真空中で

⁹⁸ *ERE*, 1:362n, par. 1164.

⁹⁹ *ERE*, 1:392, par. 1248.

¹⁰⁰ グッディングは、これがファラデーにとっては推測や仮説というよりも決まりごとのようになっていたと指摘している。(Gooding, "Conceptual and Experimental Bases," 124-7.)

¹⁰¹ *ERE*, 1:530, par. 1663.

¹⁰² *ERE*, 1:514, par. 1616.

はない場合にのみ近接粒子の理論を適用して、その物体の粒子が分極によって作用を伝えると説明したのであった。このように、ファラデーの誘導の理論は明らかに十分ではなく、論理的な矛盾を抱えていた。

ペンシルヴェニア大学の化学教授であったヘアは、このファラデーの誘導の理論的問題点を1840年の『哲学雑誌』で批判している。ヘアは、ファラデーの「可感な距離」についての議論を引用した上で、次のようにその矛盾点を指摘している。

誘導が「可感な距離を隔てた粒子や質量への作用」ではないならば、どのようにして粒子が、上に述べられた状態で「球の境界内面を形成するあらゆる粒子に半インチを隔てて作用する」ことができるのでしょうか。半インチがそうでないなら、可感な距離とは何なのでしょう¹⁰³。

さらにヘアは、「空気が希薄化することに応じて、それらの粒子はさらに離れないのでしょうか」¹⁰⁴という疑問も投げかけている。そして、作用が空虚な空間を横切ることはあり得ない以上、モソッティのように不可秤流体を考えるべきではないかと反論した¹⁰⁵。それに加えて、4.4節でも問題視したように、すべてを分極で考えると単一の極性だけを持つような帯電は説明できないし、絶縁と伝導を同じ原理で説明することにも無理があるとファラデーの理論を批判した¹⁰⁶。

このヘアの批判に対する回答を、ファラデーは同年に発表している。その回答の内容は、ヘアの用語の理解には誤解があったとした上で、自分の理論が電気の「力能の発生や励起状態の起源を含むものではない」¹⁰⁷のであって、あくまで「静的誘導 (static induction)」に限定した内容であると強調するものであった¹⁰⁸。実際にファラデーは、この回答の中で、正と負の電荷が等量ではない状態で存在することも認め、電流に起因する「動的誘導 (dynamic induction)」については自分の見解を決定的だと考えているわけではないと述べている¹⁰⁹。また、近接粒子は「隣 (next) にある」¹¹⁰粒子という意味に過ぎないとし、さらには真空中でも隣の粒子に作用しないと述べていないとして、「半インチ」についてもはっきりとした説明はおこなわなかった¹¹¹。

もっとも、5.1節で解説したように、ファラデーが誘導の理論を電気現象一般の説明原理と考えていたことは明白であり、ヘアの理解や批判は正当なものであると言える。そもそも第4章の冒頭で引用したように、ファラデーは『電気実験研究』を展開するにあたって

¹⁰³ Robert Hare, "A Letter to Professor Faraday, on Certain Theoretical Opinions," in *ERE*, 2:252.

¹⁰⁴ *Ibid.*, 2:252.

¹⁰⁵ *Ibid.*, 2:254.

¹⁰⁶ *Ibid.*, 2:254-61.

¹⁰⁷ Faraday, "An Answer to Dr. Hare's Letter on Certain Theoretical Opinions," in *ERE*, 2:262.

¹⁰⁸ *Ibid.*

¹⁰⁹ *ERE*, 2:265, 268-9, 273-4.

¹¹⁰ *ERE*, 2:266.

¹¹¹ *ERE*, 2:267.

「誘導」の意味を電流による動的な誘導へと拡張して定義していた。すなわち、1837年から1838年にかけて発表された誘導の理論は、ファラデーの勇み足を含むものであり、ファラデーもその点について、少なくともこの1840年の時点で自覚せざるをえなくなったと考えられる。

ファラデーは近接粒子という説明を導入したが、結局のところそれぞれの粒子の可感ではない微小領域では遠隔作用を想定せざるを得なかった。このように可感でない距離を可感な距離から区別する一方で、可感でない距離においては特別な力能のはたらきを認める見解は、コモン・センス学派の物質観と共通の考え方によるものである。例えば、ロビンソンはボスコヴィッチの原子論を紹介する際に、可感性について「1000から1500分の1インチ」という基準を設けていた。そして、ファラデー自身が議論の前提としてこのような見解を共有していたからこそ、誘導の現象に対して近接粒子という説明を与えることができたと言えるだろう。

しかし、ファラデーの場合は遠隔作用を明確に否定しており、さらにはエーテルなどの不可秤流体ではなく粒子にその作用の物質的な原因を求めたために、空気が希薄化した場合には粒子間の距離が可感かどうかという基準が成立しなくなるという本質的な欠陥を抱えることになった¹¹²。

このような理由によって、ファラデーは新しい説明を模索することが必要になった。それは、誘導の曲線的な作用そのものを粒子とは独立の存在とみなすか、あるいは粒子間の真空状態を原理的に否定するような、物質についての新しい理解を求めることであった。そして、ファラデーの取った方法は、前者においては作用を力線としてより独立的に扱い、後者においては物質が中心のまわりに力が広がっているボスコヴィッチ的な原子によって構成されていると考えて、その両者を統合していくものであった。なお、このボスコヴィッチの原子論については第6章で改めて論じることにして、この時点でのファラデーの力線についての理解を次節でまとめておこう。

5.6. ファラデーの遠隔作用説批判と力線の位置づけ

ファラデーは、電流による誘導現象を研究するために、その特殊な状態である「電気緊張状態」に注目した。そして、この「電気緊張状態」の研究を進める中で、4.1節で論じたように電磁誘導における電流の発生過程の考察から、磁気曲線が作用の原因として現象に先立って独立して存在していると認識するようになった。また、4.2節で論じた電気分解の研究によって、引力や斥力による作用の説明を否定し、粒子が連続的に分極することによる電氣的配列に本質的な意味を見出すようになっていった。そして、ヴォルタ電流の発生

¹¹² このようにファラデーがエーテルのような不可秤流体の存在を想定外としていたことには、デーヴィーの影響も考えられるだろう。デーヴィーの見解については3.5節を参照せよ。

過程を考察することにより、この電氣的配列の経路を前もって規定するものとして作用の線の存在を認識するようになった。

ただ、ファラデーが当初から作用を線として表現する傾向を持っていたことは、同時代の他の研究者に比べても珍しいことではなかった。例えば、3.5節でも引用したように、デーヴィーも磁気の形状を「線」によって表現している¹¹³。ファラデーにとっては、最初は「線」よりも粒子の作用のあり方そのものを知ることが重要な関心事であり、「線」はあくまでその作用をわかりやすく表現するための便宜的な方法に過ぎなかった。すなわち、ファラデーの関心はあくまで物質に帰着させて現象を説明することにあつた。

しかし、誘導という現象を粒子の作用として説明する上では、物質の性質である「誘導容量」よりもむしろ、作用の曲線的な形状が注目された。作用の「分布」が直線や円などに還元できない決定的に複雑な曲線として認識されたことによって、その分布を表現するための「誘導力の線」は作用の原因としての存在価値を与えられたのである。

すなわち、ファラデーの力線は、最初は作用の分布を線によって表現するためのものであつたが、次第に現象に先立って存在している作用の原因を説明するために用いられるようになったと言える。

そして、この複雑な形状の曲線は、「誘導力の線」の横方向作用によって生じていると理解された。この誘導の横方向作用は、次のように説明されている。

二つの有限の荷電された導体表面のあいだの線ではたらいっていると考えられる直接的な誘導の力は、これらを表す線の膨張や反発に相当する側面ないし横方向の力をもとなう。あるいは、誘電体の粒子のあいだに誘導の方向に存在する牽引力は、横方向の反発ないし発散する力をもとなう¹¹⁴。

このように誘導の力を表す線が、力の作用の方向を結んだものというだけではなく、その横方向作用を生み出す原因にもなっていると考えると、「線」そのものを物質的なものとして扱う傾向が生じるようになった。

そして、ファラデーは「誘導力の線」による作用はもちろん、その横方向作用も、その場所に存在する粒子の作用に過ぎないと考えていた。ファラデーは、誘導の作用やその横方向作用を、次のように粒子の「分子作用」に帰着させている。

すべての分子は、近接しているそれらの緊張や反作用によって「すべての」方向において他のすべての分子と関係している。横方向の力は、誘導力の線に対して斜め方向にあると考えられるこの関係に過ぎず、今のところ、それ以上の意味でこの言い回し

¹¹³ Davy, "On the Magnetic Phenomena produced by Electricity. In a Letter to W. H. Wollaston, M.D. F.R.S.," in *Collected Works*, 6:224. 当時は、例えば地磁気の作用が地図上で線として記述されていた。

¹¹⁴ *ERE*, 1:409, par, 1297.

を用いているわけではない¹¹⁵。

このように、「誘導力の線」やその横方向作用は、あくまで近接粒子の「分子作用」として理解されるべきだと考えられていた。しかしこの認識は、それをわざわざ明記しておかなければ誤解を受けそうなほど、実際の議論の中では「力の線」が作用の原因そのものであるかのように表現されることも多かった。例えば、ファラデーは次のように、「誘導力の線」を力能の方向を「表現」する手段に過ぎないとしながらも、「線」そのものが互いに作用し合うことで曲線的な形状を生み出しているかのような説明をおこなっている。

私は、誘導の場合に、力能の方向を表現するとりあえずの便宜的な様式に過ぎないものとして「誘導力の線」という用語を使う。半球を用いた実験で、ある線が金属の底面や角で終端するとき、前にはその横にあった線がどのように「広がり互いに開いていった」かを見ることは興味深い。回り込んで半球の上面で作用を終端させるものもあれば、いわば外へと進んで上方で交わり、力能の源泉から「遠く離れて」も搬送球により多くの電荷を与えるべくそれらの力を一つにするものもある。そして、二番目の屈曲を最初のものとは逆方向に与えるために互いに影響を及ぼすのである。これらのすべてが、私には、「誘導体」と「被誘導体」の表面のあいだで誘電体を通して形成していると思われる線だけではなく、それ以外の横方向においても、すべての作用が互に関連する近接粒子の作用であることを証明しているように思える。これこそが私が述べるところの力の線における横方向の反発あるいは拡張と同等の効果を与えるものであり、誘導が角を回ることを可能にしているものである。その力能は、そのあいだに他の粒子があっても、粒子を互いに直線的に作用させる重力のようなものではなく、それよりも磁針の列、あるいは棒磁石や曲った磁石全体を形成していると考えられる粒子の状態に類似のものである¹¹⁶。

この引用の最後で、ファラデーは電気の誘導を磁力とのアナロジーで説明している。そして、実際にファラデーは、磁力もまた近接粒子の作用である可能性についての検証を試みている。すなわち、ファラデーは電流の横方向作用である磁力についても、「静電誘導や、誘導に依存している伝導、放電といったさまざまな効果とのアナロジーにおいて、「中間粒子の作用」によって離れたところへ広がっているのか、あるいはその遠隔的な影響はそのような中間粒子とはまったく独立であるのか」¹¹⁷を調べるための実験をおこなっていた。

もっとも、この磁力の作用を媒介する中間粒子を探るための実験では、コイルと磁石とのあいだでセラックや硫黄、銅などの物質を動かしながら電磁誘導を生じさせたが、これらの物質を動かしたことによる変化は観察されなかった。すなわち、磁力が中間粒子によ

¹¹⁵ *ERE*, 1:411, par. 1304.

¹¹⁶ *ERE*, 1:386, par. 1231.

¹¹⁷ *ERE*, 1:545, par. 1710.

る作用である実験的証拠を見出すことはできなかった¹¹⁸。

しかし、ファラデーは、4.1節で論じたように銅をはじめとする物質そのものには磁石による電気緊張状態が生じているはずであり、さらに物質の電氣的性質は誘導の理論により一元的に説明されるはずであると考えていたため、この実験結果には満足していなかった¹¹⁹。あるいは実際に、電気と磁気的作用のあいだに決定的な違いがあるのであれば、静電気において横方向作用が存在しないということが、電流の場合には磁気として現れているのだとも考えていた¹²⁰。さらにファラデーは、電磁気現象で観察されている磁気作用や電流間の相互作用といった横方向の作用を誘導力の線の横方向作用に関係づけられるのではないかと考えている¹²¹。すなわち、静電気においても横方向作用は何らかの形で別の作用を生じている可能性を考えていた¹²²。

結局、この時点では、電気と磁気的作用が本質的に異なるのかどうかを確かめる方法はなかったが、このように「力線」の横方向作用は、さまざまな電磁気現象を結びつけて説明するための糸口として期待され、「力線」の独立性を意識していく上でも大きな要因になっていた。

このように、アナロジーの相手として想定されていた磁気的作用は、近接粒子の作用ではないという実験結果が得られていたし、「力線」を考察する上では、その原因にわざわざ言及することは議論をいたずらに複雑化することにつながった。何より、このように力線を基準として考察を進めると、それまでにファラデーが持っていた問題点を解決できる可能性があった。そのため、「力線」という概念を用いることは、少なくとも研究を進める上ではファラデーの友人であったハリスが述べているように、「物質原子についての一般論から彼自身を解放した」¹²³のである。

しかし、実際にはファラデーは力線の物質的な根拠を求め続けた。あるいはむしろ、物質観そのものに変更を迫ろうとした。まず、前述のように、「誘導力の線」は近接粒子に帰着されるべきものであり、それ自体は実体のないものであるとされていた。ファラデーは、「誘導力の線」が「想像上のもの (imaginary)」¹²⁴であると念を押した上で、さらに「もちろん、その任意の部分の力は複合的な力の合力である」¹²⁵と説明し、あくまでこれが力であり、空間を排他的に占める物質とは異なるという見解を明示していた。ファラデーは近接粒子という説明を導入したが、モソッティの分子論に傾倒していたことからわかるように、ファラデーは基本的に作用の伝達において必ずしも接していることを仮定していなかった。しかしその一方で、デーヴィーと同じように、エーテルなどの不可秤流体の存在を仮定することもなかった。そうすると、結局のところ、粒子一つ一つの作用としては

¹¹⁸ *ERE*, 1:545-9, par. 1711-1726; *ERE*, 1:552, par. 1735-6.

¹¹⁹ *ERE*, 1:549-50, par. 1727-30; 21, 23, 28 August 1838, *Diary*, 3:336-41.

¹²⁰ *ERE*, 1:550-2, par. 1731-4.

¹²¹ *ERE*, 1:449-50, par. 1411; *ERE*, 1:527-32, par. 1653-66; *ERE*, 1:550-2, par. 1731-4.

¹²² *ERE*, 1:528-9, par. 1658.

¹²³ Harris, *Rudimentary Magnetism*, 338.

¹²⁴ *ERE*, 1:411, par. 1304.

¹²⁵ *Ibid.*

直線的な遠隔作用を想定することになるし、だからこそ曲線的な作用を表現するために粒子の配列を必要としたのである。

繰り返しになるが、このような粒子に対する考え方は、トマス・トムソンなどの説明と共通するものである。そのためファラデーも当初は、可感ではない領域で粒子間に距離があることを、とくに問題とは考えていなかったようである。しかし、結局はヘアの批判にもあったように、ファラデーの近接粒子による説明は空気が希薄になっていった場合において十分に感覚できる距離での遠隔作用を認めざるを得ず、近接粒子の作用という理論的前提の本質的な欠陥となった。

すなわち、ファラデーについて歴史的に分析する限り、遠隔作用は近接作用を否定するものではないし、近接作用も遠隔作用を否定するものではなかった。それは、作用が直線的であるか、それとも複雑な曲線的であるかの違いを区別する、学説の標準的な表現方法の違いであったと言える。遠隔作用説は作用の原因と対象のあいだの力を直線作用に帰する数学的な表現方法であり、近接作用説は作用の原因として物質を仮定する説明方法であり、中間的な物質の影響を考えることで複雑な曲線を表現できたのである。もし作用が曲線的であれば近接粒子が説明原理になるが、近接粒子もまた、当時の物質観においては遠隔作用を前提としていたのである。これが、ファラデーの理論に本質的に内在する矛盾点となった。そして、ファラデーは、モソッティのようにエーテルなどの不可秤流体を仮定していなかった以上、力と粒子の関係について独自の説明を求められることになった。

第2章で取り上げた実証主義が標榜していたように、このように物質的根拠を模索せずにあくまで関係のみに研究の対象を絞るという方向性もあり得るだろう。しかし、この実証主義は、数学や力学という方法に裏付けられることで説得力のある議論になるが、ファラデーは、第4章で引用した記述でも繰り返し見られたように、力学や数学に対して不信感を抱いていた。例えば、4.3節の最初で論じた自己誘導について、ヒューエルが「運動量」や「慣性」といった力学的な概念を用いた説明を支持したことに対して、ファラデーは次のように強い口調で自身の実験家としての考察方法の正当性を主張していた。

申し上げておくべきでしょうが、アンペールの理論が現時点で事実を表現する最良のものであることは認めます。ただ、私はそれには若干の保留があると考えています。この保留は、それに対するはっきりした反対理由に基づいた何かというよりも一般的な感覚なのです。私が数学者でないことを思い出してください。もし私が数学者であって、その理論を現時点で私に可能であるよりも詳細に確かめることができるならば、何の疑いも残っていないかもしれません。しかし私の数学は、皆が多かれ少なかれ持っているような幾何学の素朴で自然な部分からなっています。それゆえ、私は自分の事実をアンペールの理論の用語で表現していませんし、自分が知覚できる最も単純なものとして磁気と電気の力の関係にこだわっているのです。繰り返しになりますが、これらは熟練によってすぐにはっきりしてくることであって、実験家が言及する上で

は最良ではないにせよ最も便利なのです¹²⁶。

このように、ファラデーは数学によって現象を表現する能力に欠けていたというだけでなく、そもそも、そのような表現方法そのものに批判的になっており、その可能性を評価しようとする意識に欠けていた。アンペールの理論は数学的な表現方法としては優れているかもしれないが、ファラデーにはそれが実際の物理現象の説明としては複雑で、しかも十分な説明を与えていないように思われた。アンペールの理論は、いわばウォッツが戒めていた「難解な表現」を弄するものであった。そして、このように数学という方法そのものに反感を抱いていたため、実証主義のように数学的厳密さをもって研究の対象を現象の関係性に限定するという方針も採用できなかったし、そもそもそのような極端な方法論を検討もしなかったと考えられる。

ファラデーが誘導の研究を進めた 1830 年代においては、誘導の複雑な曲線を表現できる可能性を評価できるような数学的研究は存在していなかった。当時の電磁気学分野における数学的研究は基本的にニュートン力学的な遠隔作用説に限られており、そのため、数学的な表現方法がファラデーの近接粒子による表現方法に比べて優位であったとは言えないだろう。

ファラデーの研究と、その他の数学を用いた研究との違いは、力学的な作用を可感な領域における巨視的な現象の説明に対してどこまで直接的に適用するかという点にあった。例えば、エピヌスは二点間の作用を考察したため、その作用の線は直線や円などの幾何学的な形状になった。そしてファラデーも二点間で作用を考察しており、3.6 節の図 14 からわかるように、1821 年頃の作用の線は単純に幾何学的な図形として描かれていた。しかし、研究が進むにつれて、二点間の作用の方向が複雑に変化していることを意識するようになり、さらにはその複雑な変化を説明するために二点間の任意の場所における横方向作用なども考えざるを得なくなり、少なくとも二点間作用には還元できないと考えるようになっていった。そのため、ファラデーは最終的には作用を近接粒子に帰することで遠隔作用説を批判したのであるが、そもそも遠隔作用説の代表とされたエピヌスも、1.3.1 節で引用したように実際の現象が遠隔作用によって生じていると認めていたわけではなかった。

ファラデーが 1830 年代後半に進めた誘導現象の研究を数学によって記述するためには微分方程式の理解が必要であった。しかし、その方法は 1830 年代の電磁気学研究では一般的ではなく、したがって少なくともファラデーの周囲では電磁気学への応用の可能性もほとんど認識されてはいなかった。

この微分方程式を用いた研究方法を進めたのが、第 7 章以降で論じることになるウィリアム・トムソンやマクスウェルである。そして、ファラデーの研究もその枠組みにおいて再評価されていくことになる。

¹²⁶ Faraday to William Whewell, 19 September 1835, *Correspondence*, 2:278. 自己誘導の研究をめぐるヒューエルとファラデーのやりとりについては、第 4 章の注 105 を参照せよ。

もつとも、ウィリアム・トムソンも当初はファラデーの研究方法には否定的な評価を下していた。トムソンは、ファラデーの従兄弟でもあるデヴィッド・トムソン (David Thomson, 1817-80) の自然哲学講義を受講し、その影響でファラデーの研究も知っていた¹²⁷。しかし、近接粒子の作用として説明されるファラデーの理論は、現象の表現方法としても洗練されたものとは言えず、ウィリアム・トムソンもファラデーの研究には懐疑的であった。ウィリアム・トムソンが初めてファラデーについて言及している資料は、ケンブリッジで学生生活を送っていた 1843 年 3 月 16 日の日記である。この日記の中で、トムソンは「私たちはそのとき長い会話をして、ファラデーとダニエルを罵った」¹²⁸と酷評している。さらに翌日には「ダニエルの本と、彼がファラデーの研究に与えている説明を読んだ。現象を「述べる (speaking)」彼の方法には大いにうんざりさせられた。彼の理論には何も得られるものがない」¹²⁹と記している¹³⁰。

このようなファラデーの表現方法に対する評価は、程度の差はあれ、多くの研究者が抱くところであったと思われる。ティンダルもファラデーの理論については「これらの研究を批判することはたやすく、用いられる言葉のいい加減さや、ときに不正確さを見出すこともたやすいが、この批判的精神はファラデーからほとんど何も良いものを得ることはないだろう」¹³¹と述べており、理論の実質的な内容については肯定しながらも、その表現方法についてはトムソンと同じように否定的に評価していた。

さらに、ファラデーの理論が実験に基づいていたからといって、同時代の他の研究よりも実証性に優れていたわけではない。そもそもファラデーの物質観は、ベルセリウスによってデーヴィーとともに批判の対象とされていたように、力を物質の本質とみなすような特徴的でありながら実証的とは言えない前提に依拠していた。このような前提に依拠していたことは、ファラデーの研究があくまで「自然哲学」であった所以だとも言えるだろう。しかし、実験による実証性を重視した場合には、実験装置によって可視化される範囲を超えて現象を説明しようとするファラデーの姿勢は無条件に受け入れられるものではなく、スタージョン (William Sturgeon, 1783-1850) のような実験装置の製作・販売を手掛ける技術者の批判の対象となった。

科学史家モーラスの分類に従うと、スタージョンらは、ファラデーなど王立研究所や大学を中心に活動する「教授職 (professoriate)」とは異なり、実用的な製品開発に関心を持ち、アデレード・ギャラリー (Adelaid Gallery) やロンドン電気協会 (London Electrical Society) を中心に活動する「電気技師 (electrician)」の集団を形成していた¹³²。この「電気技師」

¹²⁷ Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 1:19; Wilson, *Kelvin and Stokes*, 26.

¹²⁸ W. Thomson, "16 March 1843," NB29, MS Add. 7342. なお、日記の記述の中でこの「罵った」の部分は“(abused)”と「n 乗」で強調されている。

¹²⁹ W. Thomson, "17 March 1843," NB29, MS Add. 7342.

¹³⁰ Smith and Wise, *Energy and Empire*, 213. スミスとワイズは、とくに直線の重ね合わせで曲線的な作用を数学的に表現できることをファラデーが理解していなかったことを、トムソンの否定的評価の理由にあげている。

¹³¹ Tyndall, *Faraday as a Discoverer*, 72.

¹³² Morus, "Currents from the Underworld," 52.

にとっては、現象に隠された可感ではない事実を探究することよりも、現象を効果的に再現する実験装置を製作することが目的であった¹³³。

例えば、磁石のまわりで回転する導線を観察するとき、ファラデーがその現象に電流の一般的な性質を見出そうとする研究を進めたのに対して、スタージョンは化学作用や熱電気などの電源の違いによる現象の変化について分析を進め、装置のさまざまな改良に努めた¹³⁴。あるいは、磁石の運動による誘導電流が生み出す放電現象の研究については、電気緊張状態や誘導などの概念を展開することにより実験機器を離れてその理論を一般化しようとするファラデーに対して、スタージョンはあくまで電気流体の解釈の範囲内において「量」を「強さ」に変換する現象として説明し、その関心は実験機器の出力を向上したり小型化したりする改良に向かっていった¹³⁵。そして、ファラデーが実験によって導いた理論的説明に対しては、実験の技術的観点から評価して、その正当性を疑う反論をおこなった¹³⁶。

またスタージョンは、自分の装置が可視化に優れていて研究だけでなく講義での演示にも有用であることを強調しており、ファラデーのように研究のための実験と大衆に向けた演示実験とを区別していなかった¹³⁷。すなわち、ファラデーは実験を通じて可感ではない現象の考察を進めたのに対して、スタージョンはつねに実験装置で現象を可視化することにこだわったのであった。いわば、スタージョンにとって実験装置とは自然そのものであり目的であったのに対して、ファラデーにとっての実験装置とは可感ではない領域の現象を理解するための手段だったのである¹³⁸。

このように、ファラデーの誘導の研究には多分に問題が含まれており、その理論も決して完成したものではなかった。ファラデー自身もその点については自覚していたが、その問題を解決することは容易ではなかった。そして、それらの問題が十分に解決しないままに、「力」や「場」についての独自の概念をさらに発展させていくことになる。そのきっかけとなったのが、1845年よりおこなわれた光磁気効果の研究であった。次章では、この光磁気効果の研究を分析することで、ファラデーにおいて力の概念が粒子から独立したものとして扱われていった過程を明らかにしていきたい。

¹³³ Morus, "Different Experimental Lives," 7-15.

¹³⁴ Ibid., 8-9.

¹³⁵ Ibid., 18-9.

¹³⁶ Ibid., 21.

¹³⁷ Ibid., 10-2.

¹³⁸ Morus, *Frankenstein's Children*, 48-68. これは、ファラデーとスタージョンの仕事の環境にも表れている。ファラデーは王立研究所の地下にある閉鎖的な実験室で研究を進めており、研究のための実験装置の細部を公開する必要はなかった。それに対して、スタージョンは実験装置そのものが商売の対象であり、積極的に情報を公開しつつ、その装置を意味づける必要があった。(Ibid., 67.)

第6章 光磁気効果(ファラデー効果)の発見

第5章で論じた誘導の研究によって、ファラデーの電磁気学研究は一つの節目を迎えることになった。そして、年齢も四十代の後半になり、社会におけるファラデーの立場も向上していった。しかし、そのような多忙な生活を続ける中で、ファラデーは、1839年末より記憶力の減退や目まいに悩まされるようになる。そして、その1839年の12月にはブライトンで休暇を取り、さらに1841年には静養のためにスイスのブリエンツ湖周辺へと3か月ほどの旅行をするなどして、研究や講義のペースを大きく落としている¹。こうして3年ほどが過ぎるが、ファラデーは1844年から再び精力的に研究を進めるようになる。そして、その年になされた光磁気効果の発見によって、ファラデーの電磁気学研究は新たな局面を迎えることになった。

1845年11月に、ファラデーは、王立協会の『哲学紀要 (*Philosophical Transactions*)』に「光の磁化と磁力線の照明について」と題して光磁気効果の研究結果を発表した²。この研究成果は、ファラデー自身が「ついに光線を磁化すること (magnetizing) と帯電すること (electrifying)、および磁力線を照らし出すこと (illuminating) に成功した」³と述べているように、電磁気の力が光に対して直接的に作用を及ぼしうることの実証例とみなされた。そのため、この実験結果は、自然界の諸力の関係性を探る上で極めて重要な発見であると考えられた。

そして、この見解の是非については議論の余地があり、その問題については6.3節で改めて論じるが、少なくとも社会からは大きな反響が寄せられた。例えば、一般紙『アシニアム (*Athenaeum*)』は、このファラデーによる光磁気効果の発見を1845年11月8日付の記事で次のように報じている。

ファラデー氏は、月曜日に王立研究所の評議会で、光や熱、電気が偉大な一つの普遍原理の変容に過ぎないことを実際に証明したわけではないかもしれないが、それらの不可秤の作用因 (agencies) をより密接に結びつけているように思われる、とても注目すべき発見を公表した⁴。

そして、この記事は、光と電気が密接に関連していることがわかれば、視覚などの生理

¹ Jones, *Life and Letters of Faraday*, 2:126-96; Hare, “Michael Faraday’s Loss of Memory,” 33-8.

² Faraday, “On the Magnetization of Light and the Illumination of Magnetic Lines of Force,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **136** (1846): 1-20, in *ERE*, 3:1-26.

³ *ERE*, 3:2, par. 2148.

⁴ “Our Weekly Gossip,” *Athenaeum* **941**, 8 November 1845, 1080. 光磁気効果は光と磁気との関係である。ただし、ファラデーは1845年11月19日に温度変化による磁力の変化についても実験をおこなっている。(19 November 1845, *Diary*, 4:357-8, par. 8324-9; *ERE*, 3:54-66, par. 2343-99.)

現象の理解も一段と進むだろうという期待で締めくくられていた⁵。すなわち、ファラデーのこの発見は、エーテルの存在に帰せられてきたような自然界のさまざまな作用に対して、その理解を大きく進展させる可能性がある発見として、強い関心と期待をもって受けとめられたのである。

この光磁気効果とは、磁場中に置かれた物質によって、その物質を通る光の振動面が回転する現象のことである。この振動面の回転角は、光が通過する物質内の経路長と物質にかけられた磁場の強さとに比例し、次式のように与えられる。

$$\theta = VHI\cos\varphi$$

ここで、これらの変数はそれぞれ、 H は磁場の強さ、 l は物質中を伝搬する光の経路長、 φ は光の伝搬方向と磁場の方向とのなす角、 V は物質の屈折率や光の振動数によって定まるベルデ定数と呼ばれる量を表している⁶。そして、この振動面の回転は、振動面が限定された状態にある光、すなわち偏光を用いることで容易に観察することができる。

もちろん、この説明は現代的な表現ないし理解であり、ファラデーが実験をおこなった当時には磁場という概念は存在しなかったし、光と磁気との関係も上式のように明確に理解されたわけではない。むしろ、ファラデーはこの研究を通じて、通常の磁性体とは異なる「反磁性体」を発見し、そのふるまいを記述するために「磁場」という言葉を導入することになったのである。

この章では、この光磁気効果の発見がファラデーに与えた考え方の変化とその進展について論じたい。そこで、まず最初の節では、偏光という現象が知られるようになった歴史的な経緯を解説する。その上で、磁力線と光や物質との関係についてファラデーがおこなった実験と考察の評価へと議論を進めていきたい。

⁵ “Our Weekly Gossip,” *Athenaeum* **941**, 8 November 1845, 1080. マーセットは、ファラデーの発見が報じられたこの11月8日付の『アシニアム』の記事を読んで、次のような書簡をファラデーに送っている。「今朝、アシニアムで、熱や光、電気といった不可秤の作因 (agent) の正体についてあなたが公表した発見についての説明を読みました。この瞬間にでも私の化学についての会話の原稿を新版に向けて訂正しますので、勝手ながら、この発見の正しい説明をどこで得ることができるかお知らせいただけないでしょうか。私の幼い生徒たちに合わせるには難解な性質のものであることを恐れてはいますが、このことに触れずに新版を出版する決心はつきません。」(Jane Marcet to Faraday, 24 November 1845, *Correspondence*, 3:432-3.) マーセットとは、3.2節で述べたように、ファラデーが徒弟時代に強く影響を受けた書籍としてあげていた『化学についての会話』の著者である。このマーセットや後述するハーシェルなどから続々と反応が寄せられていることから、ファラデーの発見に対する当時の注目度と評価の高さをうかがい知ることができる。(John Frederick William Herschel to Faraday, 9 November 1845, *Correspondence*, 3:423-5; Jones, *Life and Letters of Faraday*, 2:205-10.)

⁶ ベルデ定数はフランスの物理学者ベルデ (Marcel E. Verdet 1824-66) が1854年に光と磁気の効果の比例関係を認めたことにより導入された。ベルデは、分子作用の集合として光磁気効果を解釈した。ウィリアム・トムソンはストークスに対して、ファラデーがこの関係を先に発見しており、その一方でベルデ自身はその関係を明確に示していないとして、「ベルデ定数」と呼ぶことに反対している。(Kelvin to Stokes, 9 November 1876, Thomson and Stokes, *Correspondence between Sir George Gabriel Stokes and Sir William Thomson*, 2:422-3.)

6.1. 偏光に対する電磁気の作用

偏光という現象は、コペンハーゲン大学の医学教授バルトリヌス（Erasmus Baltholinus, 1625-98）がアイスランドから持ち帰った方解石（氷州石）の複屈折現象として 1669 年に発表され、ホイヘンス（Christian Huygens, 1629-95）やニュートンによって研究が進められた。ニュートンはこの複屈折光が、円柱に対する角柱のように、回転に対して直角方向に現れる特殊な「側面 (sides)」的性質を持っていると考えた⁷。一方、マリユス（Étienne-Louis Malus, 1775-1812）は、この複屈折の研究をおこなう中で、反射によって偏光を生じさせる方法を 1808 年に発見した。さらにマリユスは、この側面的性質を表現するために「偏光 (polarisation)」という表現を最初に用いた⁸。この反射によって偏光を得る方法は、ファラデーも光磁気効果の実験で用いることになる。

この偏光面は、ファラデーがおこなったように磁気をかけなくても、結晶に通過させることでも回転を生じる。この結晶による自然旋光は、1811 年にアラゴーによって発見された。イギリスで、この偏光の研究に取り組んだのがハーシェルやブリュースター（Sir David Brewster, 1781-1868）であった。ハーシェルは音と光とをアナロジーで考え、さらに光と電気との関係を探るべく 1820 年に結晶の形と偏光面の回転方向との関係について研究をおこなっている⁹。

また、イギリスのヤングやフランスのフレネルは、偏光が回転によって変化することから、光は縦波ではなく、弾性固体中を伝わる横波であると考えた。フレネルは光の反射と偏光との関係について理論的な説明を与えたが、フレネルの理論は数学的に高度であったため、イギリスではすぐに普及することはなかった。しかし、1827 年にフレネルが王立協会のラムフォード・メダルを受賞し、さらにフレネルの論文も英訳されて 1827 年から 1829 年にかけてファラデーやブランドが編集する王立研究所の『科学季刊誌 (*Quarterly Journal of Science*)』に掲載された¹⁰。それにともなって、ファラデーも 1820 年代の終わりには、フレネルの光の波動理論を踏まえて電磁気と光との関係について考察を進めるようになった¹¹。

このように電磁気と光との関係について関心を深める中で、ファラデーは第 5 章で論じたように近接粒子と力線による誘導の理論を発表した。そして、この曲線的な近接作用を説明するためのファラデーの理論と遠隔作用的なクーロンの理論との数学的な同等性を示

⁷ Newton, *Opticks*, 333-6.

⁸ *Oxford English Dictionary*, 2nd ed., s.v. “polarization.”

⁹ Herschel, *Preliminary Discourse*, 248-9.

¹⁰ Fresnel, “*Elementary View of the Undulatory Theory of Light*.”

¹¹ ウィリアムズは、ファラデーが空気中の波のアナロジーとして、フレネルの光の理論から音、そして電気の理論を考えていったと指摘している。確かに、1832 年 3 月 12 日付の書簡において、ファラデーは電磁気現象を音と光との振動のアナロジーとして考えられる可能性を示唆している。(Faraday to John George Children and Sealed Note, 12 March 1832, *Correspondence*, 2:26; Williams, *Michael Faraday*, 181.) しかし、実際に電気の誘導を研究する過程において、こうした振動の可能性についてまで検討した形跡は見られない。ウィリアムズもそのことは認めているが、力の統一性を想定しようとする傾向からして、このファラデーのアナロジーへの志向が説明できると述べている。(Williams, *Michael Faraday*, 176-8.)

そうとしたのがウィリアム・トムソンであった。トムソンは、ファラデーの力線の表現に準じて静電誘導の曲線的な作用が幾何学的に求められることを1845年6月のBAASで発表し、その旨を同年8月6日付でファラデーに宛てて次のように伝えている¹²。

私の考えが正しければ、その数学的な定義や、帯電した物体のあらゆる可能な組み合わせにおいて誘導の曲線を決定するための条件は、とても簡単に記述することができます。任意の形の導体上における力の分布（あるいはクーロンの言葉では、電気の強度分布）は、その曲線の形状が見出されれば、純粹に幾何学的な考察によって決定されるでしょう¹³。

このようにトムソンは、ファラデーの力線の理論が数学的に表現可能で、かつその研究が有効であると考えていた。5.6節で引用したように、トムソンは当初ファラデーの研究に対して否定的な評価を与えていたが、それは数学を用いないファラデーの表現方法に対する評価であった。それにトムソンも、その曲線的な形状を数学的に表現することの難しさは自覚しており、自分の研究でも円筒や楕円体などの単純かつ特殊な形状に限ることしか数学的に表現することはできなかつた。そしてトムソンは、誘導現象で生じる多様な曲線の性質について考察する中で、表現方法が洗練されていないという問題はあるにせよ、力線の分布についてのファラデーの研究内容そのものについては高く評価するようになったのである¹⁴。この数学的観点からのトムソンの評価については、改めて第7章などで詳しく論じることにしたい。

さらに同じ書簡の中で、トムソンはファラデーに対して水晶などの透明な誘電体が偏光に対して及ぼす作用を実験すべきであると伝えている¹⁵。それに対してファラデーは、8月8日付の返信の中で、過去に自分がそのような実験をおこなったこと、および偏光と電気との関係については否定的な結果しか得られなかつたことを伝えた¹⁶。その後、トムソンは8月25日付の書簡で、その週にケンブリッジからグラスゴーへと帰郷する際にロンドンへと立ち寄るので、ファラデーと会見することを希望している¹⁷。しかし、ファラデーは週末の29日金曜日まではロンドンを不在にする予定であったため、この会見は実現しな

¹² なお、この会合において、トムソンは次のように発表していた。「もう一つの疑問は、実験でのみ判断されることですが、強い「分極」状態にある透明な誘電体が単軸結晶と同じように伝播する光に作用するのではないかということです。」(W. Thomson, “On the Elementary Laws of Statical Electricity,” in *RPEM*, 12.) なお、この会合で発表されたこの研究成果は1845年にリウヴィルの『数学雑誌 (*Journal de Mathématique*)』および『ケンブリッジ・ダブリン数学雑誌 (*Cambridge and Dublin Mathematical Journal*)』に掲載された。

¹³ William Thomson to Faraday, 6 August 1845, *Correspondence*, 3:404-6.

¹⁴ *Ibid.* そして、このトムソンの数学的研究の有効性はファラデー自身も認めるところとなった。(Faraday to William Whewell, 24 November 1848, *Correspondence*, 3:732-5.)

¹⁵ *Ibid.* なお、この他にも、荷電した物体の表面付近における空気の密度変化についても調査すべきであると伝えていた。

¹⁶ Faraday to William Thomson, 8 August 1845, *Correspondence*, 3:407. ここであげられている過去の研究とは、1833年におこなわれた電解質の状態を探るための実験のことである。(ERE, 1:285-6, par. 951-5; 2, 6 May 1833, *Diary*, 2:69-73, par. 482-504.) この実験の詳細は4.2節を参照せよ。

¹⁷ William Thomson to Faraday, 25 August 1845, *Correspondence*, 3:408.

かった¹⁸。こうしてファラデーとトムソンとのやりとりは中断されることになる。しかし、ファラデーはロンドンに戻ってすぐの8月30日から、光磁気効果の発見へと至る一連の実験を開始するのであった¹⁹。

なお、ファラデーが電磁気の実験で偏光を用いた理由は、「偏光 (polarization)」を光の「極性」の現れとして、電気や磁気の「極性」と関連づけていたからであろう。1837年に発表された誘導現象の一般理論では、近接粒子の「分極」という観点から包括的な説明が与えられていた。もちろん、光と電磁気とでは極性の現れ方に違いがある。電磁気は、両側へと互いに打ち消し合う性質を持って離れるように分極するが、偏光は両側では同じ性質を持ち、側面に対して互いに打ち消し合う性質を持つように分極した。しかし、いずれも自然現象における二極的な性質の現れには違いなく、この極性の現れに注目して研究を進めることがファラデーの関心事であった²⁰。そのため、極性を持つ電気や磁気との関係を調べる上で偏光が用いられたのである。

6.2. 光磁気効果の実験

光磁気効果の存在は、1845年9月に鉛ほう酸ガラスを用いた実験によってはじめて確認された。他の物質では電磁石などの強い磁力を用いることでしか効果が測定できなかったが、鉛ほう酸ガラスの場合にはその効果が顕著であり、馬蹄磁石を用いても効果を観測することができた²¹。なお、この鉛ほう酸ガラスは、ファラデーが16年前に製作したものであった²²。この16年ほど前に、ファラデーはさまざまな光学ガラスの製作に取り組んでおり、鉛ほう酸については可融性が高く、固体では電氣的な効果を持たないことを確認していた²³。

さらにファラデーは、トムソンにも書簡で伝えていたように、1833年に偏光に対する電気的作用についての実験をおこなっていた。実験そのものについては4.2節でも言及したが、この実験でも鉛ほう酸が用いられた。ファラデーは、鉛ほう酸を用いた理由を「液体では優れた電解質であり、固体では完全な絶縁体である」²⁴からであるとしている。すなわち、電解質の状態で持っている電氣的な性質が、ガラス状に固定化されても偏光に対し

¹⁸ Faraday to William Thomson, 25 August 1845, *Correspondence*, 3:409.

¹⁹ 30 August 1845, *Diary*, 4:256.

²⁰ *ERE*, 3:20, par. 2222.

²¹ *ERE*, 3:5, par. 2157.

²² *ERE*, 3:3, par. 2151.

²³ Faraday, "The Bakerian Lecture," 46-50. ファラデーは、鉛ほう酸の特性について1845年の論文で次のように述べている。「鉛ほう酸」はかなりの可融性を持つ物質で、沸騰した油の熱で軟らかくなる。そのため、きわめて容易にガラス板のかたちに整えられ、焼きなまされる。そして、ほう酸ケイ素そのものと同じくらい光に対して磁気回転力を持つ。「フリントガラス」もその特性を示すが、そうした物質よりも程度は低い。クラウンガラスもそうした特性を示すが、さらに程度は低い。」(*ERE*, 3:9, par. 2176.)

²⁴ *ERE*, 1:286, par. 955; 6 May 1833, *Diary*, 2:72, par. 501.

て何らかの効果を及ぼすことを期待していたのであった²⁵。こうして実験に鉛ほう酸ガラスが用いられたのであったが、結局のところ、電気と偏光とのあいだには何の作用も見出すことはできていなかった。

ファラデーは 1845 年の実験も、最初は偏光に対する電気の作用の検証、すなわち 1833 年に否定的な結果しか得られなかった実験の追試から始めている²⁶。ただし今度は、固体ではなく電解質そのものを測定の対象にしている。そして、最初の 1845 年 8 月 30 日におこなわれた実験では、電解質に硫酸ソーダ飽和溶液が用いられた。

ファラデーはまず、その溶液を縦 24 インチ、横 1 インチ、深さ 1.5 インチの水槽に満たし、その中に偏光を通すことにした。水槽にはグローブ電池につないだ電極が取り付けられており、定常電流を通すとともに、磁気ブレーカーを用いてその電流を断続的に遮ることもおこなわれた。これによって、電解質の内部では電氣的な状態に変化が生じているはずであった。また、光源にはアルガンド・ランプを用い、背面を黒塗りにしたガラス板でこの光線を反射させて偏光を作り出した。

次の図 39 は、この実験装置の配置図である。右下のランプから発せられた光線が、ガラスの反射板 (glass reflector) で反射されて偏光になり、長方形の水槽内を通過する様子がわかる。なお、偏光の観察ではソケットにはめたニコル・プリズムのアイピース (接眼レンズ) が用いられた²⁷。ニコル・プリズムは 1828 年にニコル (William Nicol, 1768-1851) が製作・発表したもので、簡単に偏光を観察することができるために重宝されていた。

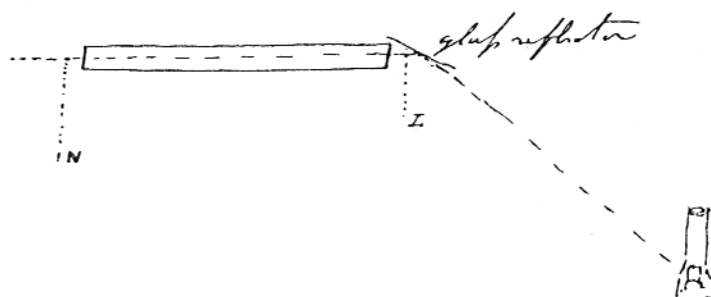


図 39：水槽中で偏光の変化を観測するための実験装置の配置。右下のランプから発せられた光がガラスの反射板 (glass reflector) で偏光を受け、水槽に入射される。(30 August 1845, *Diary*, 4:256.)

この実験によって、ファラデーは偏光に対する電解質の影響を改めて調べたのであるが、水槽にどのように電気をかけても偏光の状態には何の変化も観察することはできなかった。定常的な電流はもちろん、電流の大きさに変化を加えても影響は認められず、トルマリン

²⁵ *ERE*, 1:286, par. 955.

²⁶ *ERE*, 3:2, par. 2147.

²⁷ 30 August 1845, *Diary*, 4:256-7, par. 7434-40.

に透過させることでさらに偏光を重ねて観察しても、何の変化も見られなかった。電流のかけ方を、光線と垂直にしても平行にしても、影響を観察することはできなかった。こうして結局、9月5日の時点では、どのような影響も観察することはできず、電気と偏光との関係については再度否定的な結果しか得られなかったのである²⁸。

しかし、それから1週間後の9月13日になって、ファラデーは、今度は磁力線と偏光との影響関係を調べる実験に着手する。第4章で論じたように、1833年には電気緊張状態として何らかの構造が想定されていたが、その状態についてのファラデーの理解はまだ曖昧なものであった。しかし1837年の誘導現象の理論的な考察を経て、1845年においては力線という概念がファラデーの中で大きな意味を持つようになっていた。とくにファラデーは、5.6節でも論じたように、磁気が電気力線の横方向作用とも関連しているのではないかと考えていた。このような考え方の進展もあり、ファラデーは電気の力線では作用を観察できなくても磁気の力線では作用を観察できる可能性があると考えたのではないかと予想できる。

この実験でファラデーは、図40のように磁石の配置を変えながら、その磁極のあいだに試料を置き、さらにこの試料を通る点線上に偏光させた光線を通過させて、偏光の状態に変化が生じている可能性を調べた。

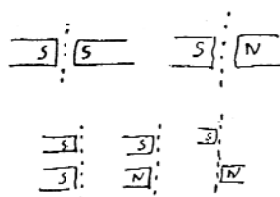


図40：磁石と試料の配置。点線で示されている偏光の光線に対してさまざまな磁極の配置が試されている様子が見える。(13 September 1845, *Diary*, 4:263.)

ファラデーは、空気、鉛ガラス（フリント・ガラス）、水晶、方解石と試料を換えながら実験を続けたが、期待に反して偏光への影響は一切観察されなかった²⁹。しかし、鉛ホウ酸ガラス（ヘビー・ガラス）を用いたときに偏光の状態に変化が見られた。図40の下段中央の配置のように、異極が隣り合うように磁石を配置した場合に、あるいは図41のように配置された電磁石に磁気が生じている場合に、試料を通過する偏光に対して、その状態を

²⁸ 30 August, 1, 4, 5 September 1845, *Diary*, 4:257-63, par. 7441-97.

²⁹ ファラデーは、鉛ホウ酸ガラスによる効果が確認された後に追試をおこない、フリントガラスについては効果を確認している。しかし、条線（striae）が多く緊張状態が不規則に生じているため、磁気の影響がそれらの効果に隠れてしまっていると判断された。他には、水や空気などについても実験をおこなったが、それらの効果は観測されなかった。(18 September 1845, *Diary*, 4:270-1, par. 7555-67.)

「消極する力能 (power of depolarizing)」³⁰がはたらいていることを発見したのである。

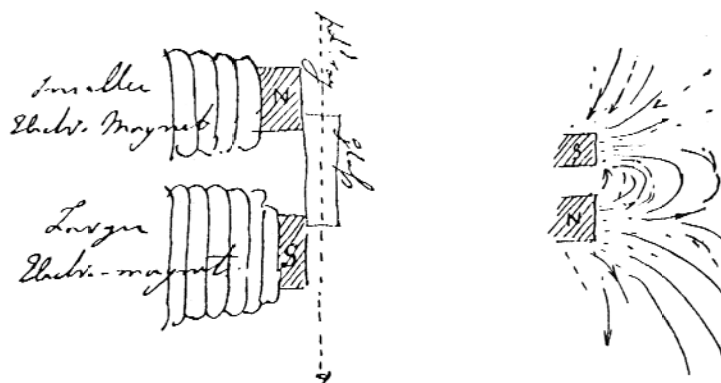


図 41 : 偏光の状態に変化が見られたときの電磁石の磁極の配置 (左)。偏光の光線がガラスを通過する様子が点線で示されている。(13 September 1845, *Diary*, 4:264.) および、磁極の周囲に分布する磁力線を図示したものの (右)。(18 September 1845, *Diary*, 4:273.)

こうしてファラデーは、磁気は何らかの形で光に作用を及ぼしていることを確認した。ここで、ファラデーは磁極の周囲には図 41 右のように磁力線が分布していると考えていた。そして、試料を磁極ではさみこむような配置にしている場合には現象は生じないが、異極が隣り合うという特殊な配置になっている場合には現象が生じることから、この光磁気効果は光の伝搬方向と磁力線の方向とが平行になっているときに生じ、逆に垂直になったときには生じないのだと推測した³¹。

なお前述のように、ファラデーは最初、その特殊な効果を「消極」として認識していた。しかし、実験を進めることによって、その作用が「円環的な極性を持つ力 (circular polarizing force)」による「回転」であることがわかった³²。ファラデーはこの偏光に対する回転作用を次のように述べ、この関係を図 42 のように描いている。

反磁性体に与えられた力の特徴は「回転」である。ランプの炎の像が見えるときに、アイピースを左右にいくらか回すと、その像が消失するようになる。そして、この位置からさらにどちらかの側に動かすことで、再び光が見えるようになる³³。

³⁰ 13 September 1845, *Diary*, 4:264, par. 7505.

³¹ 18 September 1845, *Diary*, 4:273, par. 7585.

³² 18 September 1845, *Diary*, 4:269, par. 7550.

³³ *ERE*, 3:4, par. 2154.

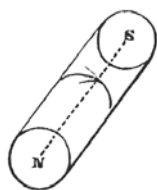


図 42：偏光の回転と磁気との位置関係を示した図（*ERE*, 3:6, par. 2161.）

ファラデーは、このような効果が通常の磁石によって生じるということは、電流の磁気作用によっても同様の効果が生じるはずであると考えた³⁴。そこで、物質ではなくコイル内部に生じる磁気そのものが光に効果を及ぼしていることを確かめるために、コイルの中にアルコールや精油などの液体を封入できるガラス管を入れ、コイルに電気を流して磁気をかけて偏光の様子を調べた。そうすると、例えば蒸留水をガラス管に入れて電気を流したときには、そこに入射した偏光面が回転することが認められた³⁵。ファラデーは、この結果を「光線が帯電され、電気の力が照らし出された」³⁶と表現している。すなわち、電気の力がはたらいている様子を、光を通すことで可視化できたと考えたのであった。

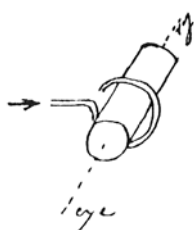


図 43：電流による光磁気効果の実験図。ファラデーはこの実験結果を「光線が帯電され、電気の力が照らし出された」と評価した。（11 October 1845, *Diary*, 4:293.）

なお、この光磁気効果で作用する磁気の「線」は、「磁力の線（line of magnetic force）」「磁氣的な力の線（magnetic line of force）」「磁気曲線（magnetic curve）」といった複数の言葉によって表現され、それらの表現のあいだに厳密な使い分けがなされていたわけではな

³⁴ 18 September 1845, *Diary*, 4:271, par. 7569-70.

³⁵ *ERE*, 3:12-3, par. 2189-95; 11 October 1845, *Diary*, 4:293-8, par. 7744-89. なお、電流を用いた場合には、電気を流しているあいだに光量が少しずつ増加し、電流を切ると少しずつ減少して消えていくといった二次的な効果も観察された。この二次的な効果は、何らかの「消極（depolarization）」であると考えられた。（11 October 1845, *Diary*, 4:296, 298, par. 7767, 7784.）

³⁶ *ERE*, 3:13, par. 2195. ファラデーは電気の力が光に与える効果であると述べているが、結局は光磁気効果ということになる。電気が光に与える効果としては、電気の力によって物質の屈折率が変化して複屈折が生じる「カー効果」があり、スコットランドの物理学者カー（John Kerr, 1824-1907）によって 1875 年に発見された。

かった。ファラデーはこれらの「線」について、「通常は磁気曲線とよばれる線においてはたらき、磁極を出入りするように、あるいは電流のまわりで同心円を描くように等しく存在する磁力のはたらき」³⁷を示すものであると説明している。そして、その同じ論文の個所で、電気の「線」については「二つの物体をつなぐ線ではたらき、静電誘導の原理によって互いに作用する力」³⁸と表現している。すなわち、表現にはさまざまな違いがあったが、この「線」は、作用の分布というよりも作用ないし力そのものと考えられていた。

「力線」についてのこれらの考え方は、ファラデーが前年の1844年に発表していた、ボスコヴィッチ的な原子論とも関係していると考えられる。この原子論については、6.4節で論じることにする。

また、ファラデーは、光磁気効果を生じさせる際に必要となる「反磁性体 (diamagnetic)」を「磁力線が通過しても、その作用によって通常の鉄や磁石の磁気の状態を帯びない物体」³⁹と表現している。そして、磁性体には、磁力線に沿おうとする「磁性体」と磁力線と交差しようとする「反磁性体」の二種類が存在し、さまざまな物質の磁性はその二つの性質の程度の差で説明できると考えた⁴⁰。ファラデーは、反磁性体による作用がこれまで知られていた通常の磁性とは異なる新しいものであるという点を次のように説明している。

これらの二つの様式は、電気における正と負や、分極における北性と南性、あるいは磁電気における電気と磁気の力線のように、互いに同じ一般的な相反関係にある。そして、反磁性現象がより重要なことには、磁力が保持していると今まで多少なりとも知られていた二元性を、新しい方向に大きく拡張したのである⁴¹。

そして、これまでも新しい概念を導入する際におこなってきたように、ファラデーはヒューエルにこの新しい磁性について説明し、その名称の是非について次のように問い合せをおこなっている。

今ここに、電気の正と負のような、あるいはその特性において二元的である他の関係でもよいのですが、そのようなもう一つ別の作用があります。私はこの力能を発見する前は、鉄などを慣習的に「磁性体 (magnetics)」と呼んでおり、それ以外の水や土などの物体を「反磁性体 (dimagnetics)」と呼んでいましたが、私はこの新しい作用の様式を何と呼ぶべきでしょうか⁴²。

³⁷ *ERE*, 3:2, par. 2149.

³⁸ *ERE*, 3:2, par. 2149.

³⁹ *ERE*, 3:3, par. 2149. 現在では、反磁性とは磁場をかけた時に磁場とは逆方向に磁化が生じる性質のことであり、負の磁化率を意味する。

⁴⁰ *ERE*, 3:65-6, par. 2399; *ERE*, 3:69-74, par. 2399-431; 12 December 1845, *Diary*, 4:385-6, par. 8603.

⁴¹ *ERE*, 3:70, par. 2419.

⁴² Faraday to William Whewell, 8 December 1845, *Correspondence*, 3:441. 現在は *diamagnetic* というスペルが

このファラデーの質問に対して、ヒューエルは、電気現象における「誘電体 (dielectric)」とのアナロジーを考えるのであれば、この新しい磁性を「反磁性体 (diamagnetism)」と名づけるべきであると返答し、さらにこれまでの「磁性体」を「反磁性体」とは区別するために、鉄やニッケルなどの磁力線に沿おうとする物質を「常磁性体 (paramagnetic)」とすることも提案した⁴³。

なお、本論文のこれまで議論では、光磁気効果を偏光に対する作用として位置づけてきたが、その作用の対象は偏光だけに限られるわけではないだろう。実際、ファラデーも偏光していない「通常の光線」に対して作用が生じる可能性を次のように想定していた。

磁気や電気の力は、通常の光線、あるいは偏光していない光線には何の力も及ぼしていないようだが、それらが何らかの特別な影響を持っていることは疑い得ないであろうし、おそらく近いうちに実験によって明らかにされるであろう。それと同じような作用が熱や化学的な力のような放射を生み出す他の形式にも当てはまるであろうことは、想像に難くない⁴⁴。

しかし、このようにファラデーは、原因がよくわからないまま、通常の光に対する作用は現状では観察できないと結論づけざるを得なかった。

このようにファラデーが通常の光での実験に成功していないと判断したことは、ファラデーの偏光についての理解の仕方によるものであったと考えられる。もちろん実際は、通常の光であっても、やはり光磁気効果による振動面の回転は生じている。しかし、通常の光にはさまざまな振動面を持つ光が混在しているために、それらの振動面が光磁気効果によって回転した後でも、やはり全体としては同様の光として観測されることになる。そのため、ファラデーの実験方法では通常の光に対する光磁気効果を観測することはできない。すなわち、ここでファラデーが実験に成功しなかったと考えたことは、ファラデーが通常の光線を偏光の集合とはみなしていなかったことを示している。

ファラデーは、光を波動と考えながらも、偏光に対して図 42 のような円柱のイメージを持っていた。そうすると、通常の光は偏光の集合ではなく、極性という特殊な状態が生じていないという意味において「通常」の状態だと考えられることになり、その特殊性のなさゆえに効果が生じないのだと結論づけられる。このように、通常の光に対する光磁気効

一般的であるが、ファラデーは当初 *dimagnetic* というスペルを主に用いていた。

⁴³ William Whewell to Faraday, c10 December 1845, *Correspondence*, 3:442. 前者についてはすなわち、ファラデーの綴りでは *Dia-*の *a* が抜けているという指摘である。ただし、この「常磁性」は現在の意味での「常磁性」ではなく、現在の「強磁性体」に対して提案された表現であった。なお、ファラデーは 1850 年に改めてヒューエルに問い合わせをおこない、この「常磁性 (paramagnetic)」という言葉を用いるようになったが、それまではこの言葉を用いていなかった。(ERE, 3:196, par. 2790; Faraday to William Whewell, 1 August 1850, *Correspondence*, 4:168; William Whewell to Faraday, 12 August 1850, *Correspondence*, 4:169; Faraday to William Whewell, 22 August 1850, *Correspondence*, 4:176-7; William Whewell to Faraday, 2 September 1850, *Correspondence*, 4:179-80; Faraday to William Whewell, 6 September 1850, *Correspondence*, 4:180-1.)

⁴⁴ ERE, 3:26, par. 2241. 同様の見解は研究日誌にも見られる。(16 October 1845, *Diary*, 4:306, par. 7853.)

果の考察は、ファラデーの実験と理論の両方における必然的な帰結であったと言える。ファラデー自身が用いていた実験装置と偏光についての理解からは通常の光と偏光との違いについて分析を進める余地がなかった。そのため、ファラデーの実験結果は、影響が認められないとする現象の記述にとどまったのである。

6.3. 電磁気と光の関係

前節では、光磁気効果についてのファラデーの発見を磁力線との関係で説明した。しかし、図 41 右のように図示された磁力線の様子だけでは、光に対する磁気作用として読み込まれたファラデーの考えの特殊性は十分に見えてこない。光磁気効果の現象には、視覚的に観察できる以上の解釈が、さまざまな形で読み込まれていた。そこでこの節では、ファラデーがこの光磁気効果の実験において光と電磁気との関係について抱いていた特殊な解釈について論じていきたい。

ファラデーは、光磁気効果を光に対する磁気の直接的な作用と考えた。しかし、光磁気効果には必ず物質が介在するため、その効果は物質の磁気的な効果の一つであるとも考えることもできる。すなわち、光磁気効果とは光に対する磁気の間接的な作用であり、あくまで磁気力によって物質の構造が変化し、その物質の変化によって偏光が影響を受けたと解釈することも十分に可能である。

そして実際に、このように直接的な作用と判断するファラデーの解釈には批判も多かった。例えばハーシェルは、ファラデーの実験の成功を知って賛辞を送ったものの、ガラスが実験には必要不可欠であることから、光磁気効果は磁気から光への直接的な作用ではなく、結晶の状態変化を光によって確かめているに過ぎないのではないかという疑いをファラデーに伝えている⁴⁵。実はハーシェルも、光と磁気との相互作用を調べるために、1823年にファラデーと同じような実験をおこなっていた。この実験は、ロンドン・インスティテュートのピープス (William H. Pepsy, 1775-1856) の協力を得ておこなわれたが、ピープスがこの実験を新しい電池の演示実験としておこなっていたこともあり、十分な検証がなされずに否定的な結果しか得られないままになっていた。ハーシェルは光磁気効果の発見というファラデーの成功を知り、この 1823 年の実験に失敗した理由が、その実験では物質を介在させなかったことにあると考えたのである⁴⁶。

⁴⁵ John Frederick William Herschel to Faraday, 9 November 1845, *Correspondence*, 3:423-35. ハーシェルも、この第6章の冒頭で引用した 11月8日付の『アシニアム』の記事を読んで、ファラデーにこの書簡を送ったのであった。(Ibid.) 同様の批判はド・ラ・リーヴなどからも送られている。(Arthur-August De La Rive to Faraday, 25 December 1845, *Correspondence*, 3:450-4; Christian Friedrich Schoenbein to Faraday, 30 December 1845, *Correspondence*, 3:457-8.)

⁴⁶ Gooding, "He who proves, discovers," 232-40. なお、ガシヨット (John P. Gassiot, 1797-1877) も 1845年12月26日にファラデーに送った手紙の中で、コイルの中に電解質を入れて実験をおこなったが失敗したことを報告し、グローブ (William R. Grove, 1811-96) も同様の実験をおこなったがこうした失敗を電流の弱さに帰着させていると書いている。(John Peter Gassiot to Faraday, 26 November 1845, *Correspondence*,

このハーシェルの批判に対して、ファラデーは自分が発見した現象が直接作用によるものであると判断した理由として、偏光の回転方向が物質ではなく磁気に依存していることをあげている⁴⁷。光の回転方向は磁力の方向によって決まり、同じ磁力の方向に対してつねに同一である⁴⁸。そのため、光を往復させると回転角は2倍になる。これは、水晶などの一般的な光学活性物質の自然旋光とは異なる点であった。水晶やテレピン油などの磁気とは無関係の物性としての旋光性は、入射方向によらず、回転も一方向だけである。そのため、自然旋光では、光を往復させると回転角は相殺される。

このような違いがあったため、ファラデーは磁気による偏光面の回転を、電流のまわりに生じる磁気と同じような回転作用として理解した⁴⁹。すなわち、電気と磁気の相互作用が直接的なものだとみなされているのと同じように、光磁気効果における光と磁気の相互作用も直接的なものだと考えたのであった。ファラデーはこの論点を次のようにまとめている。

磁力は、物体を介さずに直に光線に作用するわけではなく、磁力と光線とが同時に存在する物質が媒介することによって作用する。物質と力とは光に作用する力能を互いに与えたり受け取ったりするのである。これは、真空や空気、気体では作用しないことから示される。そして異なる物体が持つ性質の程度は、それに固有のものであることから、さらによくこのことが示される。磁力が、物質の種類、固体か液体かといった状態、あるいは固有の回転力とは独立に、光線に対してつねに同じような特性で同じ方向に作用することから、磁力と光とが直接的な関係 (a direct relation) にあることがわかる。しかし、物質が必要であり、それが異なる程度で作用することから、磁気と光とは物体の介在 (intervention) によって互いに作用していることがわかる⁵⁰。

ここでファラデーは、光磁気効果における光と磁気との相互作用をあくまで直接的な関係であるとしながら、その相互作用には物質の介在が必要であると述べている。このファラデーの記述では「直接的な関係にある」という理解と「物質の介在による」という理解が両立せず、関係性についての理解が矛盾していると思われるかもしれない。しかし、自然界の諸力を物質の力能とするファラデーの理解においては、これらの関係性は次のように両立すると考えられていた。

ここで述べられている相互作用とは、あくまで現象の相関関係を記述しただけに過ぎないとも考えられる。しかし、光磁気効果を生じさせるために必要とされる物質は、これまでに磁気的な作用を認められてこなかった物質であった。通常、ガラスなどの透明な物質

3:456-7.)

⁴⁷ Faraday to John Frederick William Herschel, 13 November 1845, *Correspondence*, 3:425-38.

⁴⁸ *ERE*, 3:4, par. 2155.

⁴⁹ *ERE*, 3:22-3, par. 2231.

⁵⁰ *ERE*, 3:20-1, par. 2224. 同じ見解が、磁気作用における一般的考察として、改めて1845年12月の論文にまとめられている。(ERE, 3:72-3, par. 2427-8.)

では磁石を作ることができない。しかし、この効果はそのような磁気作用がないものとされていた透明な物質の仲介によって生じ、しかも水晶などによってもたらされる自然旋光とは異なるふるまいを見せたわけであるから、何らかの新しい説明が必要とされることになる。これが、ファラデーがこの効果を光と磁気との直接的な相互作用と考えた根拠であった。

その一方で、物質はこの効果を生み出すために必要なのであるから、物質も何らかのはたらきをしており、そこには変化も生じているはずである。それについて、ファラデーは、1834年の電解質中の化学作用を考察する際に想定した力線の構造的な変化と同じように、反磁性体にもそのような分子の構造的な変化が生じているはずだと想定していた⁵¹。そして、電気的作用における近接粒子のはたらきと同じように、磁気的作用も反磁性体の分子によって光へと伝えられたのではないかと考えた。磁気はそれまで一般に、粒子的作用ではなく遠隔的な作用とみなされてきた。ファラデーは、自分の発見したこの光磁気効果を、一般的に言われるような遠隔作用ではなく、これまでには知られていなかった分子による新しい作用と考えたのである。

この作用の新しさについて、ファラデーは次のように述べている。

それゆえ、前述の状態にあるとき、これらの物体の分子状態は磁化された鉄の状態とは明確に区別される状態であり、「新しい磁気的な状態」であるに違いない。その状態は緊張状態（磁気の誘導が取り除かれたら、通常の状態へと瞬時に戻ることから明らか）であるので、この状態にある物体が持つ「力」とその作用の様式は、私たちにとって「新しい磁力」あるいは物体の「作用の様式」であるに違いない⁵²。

このように、ファラデーは光磁気効果の作用を電気における緊張状態とのアナロジーで考えていた。ファラデーは、5.6節で言及したように、誘導の研究を進めていく中で磁気も電気と同じように近接粒子の作用である可能性を考えていた。それを検証するための実験では否定的な結果しか得られなかったが、ファラデーはその可能性を排除せずに持ち続けていたのである。そして、この光磁気効果の実験で、磁気は物質を介在して光に作用することが確かめられた。ファラデーはこのように磁気が近接粒子による作用である可能性を考えていたため、光磁気効果を生じさせるために反磁性体の介在を必要としたことを、光と磁気の間接的な作用、すなわち磁気が物質に作用を及ぼして、その物質が光に対して効果を生じさせているとは考えなかった。むしろ、磁気が中間粒子によって作用するという、かねてからの可能性を肯定する結果とみなしたのである⁵³。

⁵¹ ウィリアムズも指摘するように、電気緊張状態の類推として「磁気緊張状態」が想定されていたのだと考えることもできるだろう。しかし、この状態の特徴は回転にあり、その状態は電気緊張状態とはかなり異なるため、単純にアナロジーが成り立つ関係にはなかった。(Williams, *Michael Faraday*, 386.)

⁵² *ERE*, 3:21, par. 2227.

⁵³ ファラデーは、磁気が介在する粒子によって作用することを言明するとともに、この結果を「最初の真の磁気と光の効果」と表現している。(26 September 1845, *Diary*, 4:288, par. 7693-705.)

ファラデーは、以上のように光磁気効果を磁力線と光線との直接的な作用と解釈していたわけであるが、さらにこの解釈には、ファラデーが持ち続けていた自然界の諸力の統一性や変換可能性といった考え方が強く影響していた⁵⁴。ファラデー自身が、この諸力の統一性について、光磁気効果を発表した1845年の論文の冒頭で次のように述べている。

私は長いあいだ、ほとんど確信とまで言えるような、ある見解を持ち続けてきた。私は、物質の諸力が顕在化してくるさまざまな形式が一つの共通する起源を持つということを自然の知識を愛好する人たちとともに信じている。言い換えれば、それはいわば一方から他方へと変換可能で、それらの作用において力能の等価性を保持するというかたちで諸力が直接的に関係づけられているということである⁵⁵。

このように自然界の諸力が何らかの統一性な起源を持ち、その変容として生じているに過ぎないという考え方は、3.5節で論じたようにデーヴィーとも共有していた認識であり、ファラデーがずっと抱いてきた考え方であった。そして、この光磁気効果の実験によって、その考え方に対する確信がまた一つ深まったのである。

ファラデーは、1845年10月25日の研究日誌の中で、これらの自然界の力能が持つであろう関係性について次のように述べている。

異なる自然の力能はその他の力能と「直接的に」関係づけられている。むしろ、異なる偉大なる力能のある形式 (form) が別の諸形式 (forms) とはっきりと直接的に関係づけられているとも言える。そして、特定の現象の特定の形式に現れる偉大なる力能は、光という形式と電気や磁気の形式との直接的な関係において、よりはっきりとつきとめられるのだ⁵⁶。

このようにファラデーは、自然界の力能は共通する一つの起源から変容して生じたものであると考えていた。そのため、それぞれの「形式 (form)」を持っていてもその起源にお

⁵⁴ ウィリアムズやクヌーセンは、ファラデーによる光磁気効果の解釈をこうした諸力の統一性や変換可能性といった観点から議論している。(Williams, *Michael Faraday*, 408-9; Knudsen, "The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873," 235-6.) ウィリアムズは、ファラデーの1844年と1846年の点原子論の展開を考察した後で、改めて光磁気効果の説明に進んでいるため、本論文で論じる1844年から1846年に至る概念展開については、光磁気効果の実験との相互関係の中で十分に考察されていない。一般に指摘されることだが、ウィリアムズは、ボスコヴィッチの原子論という理論的前提をまず想定し、その影響下で実験の解釈がなされたという解釈が強く反映されている。その一方でクヌーセンは、ファラデーが明確な物理的モデルを用いたり定量的な測定をおこなったりはしていないとして、こうした議論には深入りしていない。なお、クヌーセンの研究はファラデー効果の理論的説明の歴史的展開をとくにマクスウェルを中心に論じたものである。

⁵⁵ *ERE*, 3:1-2, par. 2146. ファラデーは、この光磁気効果を、光と電磁気の直接的な関係を実証した最初の例であると位置づけている。ファラデーは、デーヴィーとともにローマを訪れていた1814年5月に、太陽光線による磁化の実験をおこなっていたが、その実験結果が直接的な効果である確信を得られなかったとしている。(ERE, 3:19n, par. 2221.)

⁵⁶ 20 October 1845, *Diary*, 4:308, par. 7872.

いて互いに直接的な関係があるはずだと考えていたのである。

自然界の諸力が直接的な関係を持っているという信念の下では、磁気の及ぼす偏光への作用が、それらの力能の本質的な関係性から生み出される直接的な作用と解釈され、その作用に必要な物質は、作用を媒介する副次的なものと解釈される傾向が生じることは無理のないことだと言える。また、力と粒子の関係についてのファラデーの解釈からすると、力というものはつねに物質に帰属し、その物質の補助によって伝えられることになる。すなわちこの見解からは、力線が物質から独立に存在するとは想定できないことになる。そのため、光磁気効果は、光と磁気との直接的な関係によると解釈されたのである。

5.5 節や 5.6 節で論じたように、電気の力を近接粒子に帰着させようとするファラデーの考え方には根本的な欠陥が内在していた。しかし、ファラデーはこの光磁気効果の実験においても、やはり力を物質の分子作用によって伝わると考えており、光磁気効果をその実証例として解釈していた。

他の研究者たちからも寄せられていたように、このような解釈には問題もあった。しかし、ファラデーは、光磁気効果を発見する前年の 1844 年に、物質と力について原子論的な説明を展開していた。そして、その考え方が正しいとすると、この欠陥ないし問題が解消できると考えていた。そのような考察がなされていたこともあって、ファラデーは光磁気効果について光と磁気の相互作用であるとより強く確信することができたと考えられる。次節では、このファラデーが 1844 年に発表していた原子論について論じることにしよう。

6.4. ポスコヴィッチ的な原子論

光磁気効果が生じるためには物質の媒介が必要不可欠であった。そのため、前節で論じたハーシェル批判は誤った解釈であるとは言えないだろう。ファラデーの実験結果が光と磁気との直接作用であると解釈することは、実験で示されている現象の解釈としては実証性の範囲を超えていた。ファラデーがこのような解釈を取るようになった背景には、本論文で繰り返し論じてきたように、ファラデーの力と物質についての理解が大きな影響を及ぼしていたのである。ファラデーは、この物質観について光磁気効果を発表した論文の中で次のように示唆している。

「物質」をその力能でのみ認識あるいは知覚し、これらの力能という観念から導き出されるような想像上の核などというものは存在しないことを知れば、この論文で記した現象は、私が以前のある機会にその本性について言及しながら進めた見解を信頼するように大いに強いるものである⁵⁷。

⁵⁷ *ERE*, 3:21, par. 2225.

このように、ファラデーは物質が力能そのものであると考え、その力能が相互作用を及ぼしていると理解することによって、物質と力のふるまいについてよりよく説明できると考えていた。すなわち、力能は、それ自体が実在物であり物質そのものであるかのように考えられていたのである。

このファラデーのこの独特な解釈を端的に表しているのが、論文の題名にある「照明 (illumination)」という言葉であった。題名にこのような特殊な言葉を用いたことは、ファラデーの勇み足によるものであると考えられる。実際、ファラデーはその年の12月になって、この表現について次の注釈を追加している。

地球が太陽に照らされることや、クモの巣が天文学者のランプに照らされるのと同じように、磁力の線が照らされることを表現している。光線をあてると、物体を通る磁気の線の方向を「肉眼で」見定めることができる。光線やその肉眼への光の具合を変えることで、ガラス糸の道筋が見えるように、あるいはそのような透明な物質が光によって可視化されるように、その線の道筋が見えるのである。これが、私が「照明 (illumination)」という言葉で意味するところであり、論文全体で説明しようとしているところである⁵⁸。

図41 右のように図示されただけでは、磁力線についてファラデーがどのようなイメージを持っていたのかを推し量ることは難しい。しかし、この「クモの巣」のアナロジーが、この時点でのファラデーの力線のイメージを表現したものであることは、これがファラデー自身の言葉であることから確かであろう。「クモの巣」が実在するように、ファラデーは力そのものも実在するかのように考えていたのである⁵⁹。そして、光によってクモの巣がくっきりと照らし出されて可視化されるように、偏光面の回転によって磁力線が可視化されたのだと判断したのである。

このファラデーの「クモの巣」のイメージに対して理論的な説明を与えたのが、1.2節で論じたボスコヴィッチの原子論であった。ファラデーは、光磁気効果を発見する前年の1844年に、このボスコヴィッチの原子論を擁護する論考「電気伝導と物質の本質に言及する推察 (A Speculation touching Electric Conduction and the Nature of Matter)」を発表している。ファラデーはこの論考の前提として、従来の物質論的な観点からすると、粒子のあいだには空隙が網のように存在することになると次のように述べている。

空間は連続的な部分だけとなるはずで、粒子は空間によって互いに隔てられていると考えられます。空間はすべての方向に網のように、セルを形成する網の目をのぞいて、物質のあらゆる質量 (masses) に行き渡りましょう。それぞれの原子は隣とは孤立さ

⁵⁸ “Note 2,” *ERE*, 3:2n.

⁵⁹ Williams, *Michael Faraday*, 388. ニュートンもまた、このように物質が繊細な網状の力で結ばれた点状の粒子からなるという考え方を持っていた。(Westfall, *Never at Rest*, 645-6.)

せられ、その網そのものだけが連続しているのです⁶⁰。

このように粒子が空隙によって隔てられている状態は、そのまま、ファラデーが 1837 年に導入した近接粒子の理論的な問題点を説明するものである。5.5 節で論じたように、ファラデーは遠隔作用説を否定して、近接する粒子がその分極状態を連続的に伝えていく状態を仮定することで電気の誘導作用を説明した。しかし、微視的なレベルではやはり粒子間の空隙を認めざるを得なかった⁶¹。これが、上の引用の空間の網にあたるものであり、この空間の網が存在しているとする、作用が遠隔的であることを認めることになる。この問題点は 5.5 節で論じたヘアの批判によって指摘されていたところである。

その一方で、粒子間に空隙を認めると、すべての粒子は接触していないことになって空間そのものが電気伝導性を持つと考える必要がある。そうすると、空間はあらゆる物質粒子のあいだに遍在しているため、今度は導体と不導体の区別がつけられなくなるという問題が生じてしまう⁶²。

ファラデーがこの論考で注目したボスコヴィッチの原子論は、これらの問題点を一度に解決できる可能性を持っていた。1.2 節で説明したように、ボスコヴィッチの原子論は、原子を物質論的な大きさを持たない数学的な点であると考えた。そして、中心点から及ぼされる力そのものが、感覚において物質として認識されると考えるのである。ファラデーはこの原子の構造について次のように説明している。

私が正しく理解しているとすれば、彼の原子は力や力能の単なる中心であり、力能そのものが備わった物質の粒子ではありません。原子についての通常の見方では、力能から分離した物質の粒子を a といい、そのまわりの力能や力のシステムを m といいます。そして、ボスコヴィッチの理論では a が消えるか、あるいは単なる数学的な点であり、普通の見解では、それは小さくて不変であり、不可入な物質片であり、 m はそのまわりに群がった力のアトモスフィアということになります⁶³。

すなわち、物質の原子の本質は、中心を持って広がる力能そのものであると考えたのである⁶⁴。そしてファラデーは、この力能そのものである m には、電気伝導性だけでなく「光

⁶⁰ Faraday, "A Speculation Touching Electric Conduction and the Nature of Matter," *Philosophical Magazine* 24 (1844): 136-44. Reprint, *ERE*, 2:286. ここでの「あらゆる質量 (masses)」とは、ほぼ「全体」の意味であろう。なお、この論考は 1844 年 1 月 19 日の王立研究所における金曜講演の内容をもとに執筆された。この金曜講演では、とくに「火」を例として原子論の説明がなされたようである。("Royal Institution," *Athenaeum* 848, 27 January 1844, 90.)

⁶¹ あるいは、いくつかの物質で単位体積当たりに含まれる原子の数を比較した場合に、それらの数が大きく違えば原子のあいだには空間が存在していることを認めざるを得ないように考えられた。(*ERE*, 2:288-9.)

⁶² *ERE*, 2:287.

⁶³ *ERE*, 2:290.

⁶⁴ なお、ファラデーはこの前年にあたる 1843 年に、誘導と伝導を結びつけて理解することに対するヘアの批判を受けて、両者の違いを緊張状態の持続と解放という観点から考察を進めていた。ウィリアムズは、

や磁気、固体性、硬さ、比重などに関する性質」⁶⁵なども帰属していると考えた。

さらに、このように力能によって物質のあらゆる性質を説明することができるならば、例えばモソッティの分子論などで想定されていた中心核の存在すらも不必要な仮定になるだろう。すなわち、力能こそが物質そのものであると考えることができるようになる。この推論の帰結を、ファラデーは次のように説明している。

私の考えでは、それゆえ、 a あるいは核は消滅し、物質は力能あるいは m で構成されることとなります。実際、どのような見解を取れば、その力能とは独立した核という考えを形成することができるのでしょうか。私たちの原子に対する知覚や知識、そして私たちが思いつくことですら、その力能という観念に限定されているのです⁶⁶。

このように、認識論的な観点からも、物質は力能を備えてさえいればよいと考えられた。1.2節のコモン・センス学派とボスコヴィッチの原子論の議論にあったように、一次性質にせよ二次性質にせよ、すべてその力能に還元できると考えられたのである。

さらにファラデーは、このボスコヴィッチの原子論を採用し、さらに力能は物質のように排他的ではないと考えるならば、「物質はあまねく「連続」になり、大きさについて考えるときに、私たちはその原子と介在する空間との区別を想定する必要がない」⁶⁷とも述べている。すなわち、物質と空間とを同一視することができるようになり、空間には原子が重なり合って充満しているとみなせるようになる。ファラデーの説明によれば、原子がいれば「太陽系全体」まで広がっていることになり、周囲の空間とまったく独立した真空状態にある空間を想定することは原理的に不可能となるのである⁶⁸。

そしてファラデー自身が述べているように、このボスコヴィッチの原子論は、自然界の諸力を統一的に論じようとするモソッティの研究とも、そして遠隔作用を否定する「物体はそれが存在しないところには作用しない」という古くからの格言とも、うまく調和する理論であった⁶⁹。こうしてボスコヴィッチ的な原子論を仮定すると、希薄化についての近接粒子の問題点を解決する糸口が得られるとともに、ファラデーの研究対象であった力能そのものを前面に押し出す形での理論構成が可能になったのである。

ファラデーは、光磁気効果を発表した翌年の1846年に、「光線の振動についての考察

このように1843年になされた物質ではなく力の作用のみに帰するような理解は、1844年に展開された点原子論に極めて近いものであると論じている。(Williams, *Michael Faraday*, 375-6.)

⁶⁵ *ERE*, 2:290.

⁶⁶ *ERE*, 2:290.

⁶⁷ *ERE*, 2:291.

⁶⁸ *ERE*, 2:292-3.

⁶⁹ *ERE*, 2:293. この「古くからの格言」は“Matter cannot act where it is not.”として引用されているもので、エピヌスも『電気と磁気の試論』で遠隔作用を否定する際に引用している。エピヌスの議論は、1.3.1節の引用を参照せよ。この格言の典拠は不明であるが、アリストテレスの『自然学 (*Physica*)』に由来するものであり、ギルバートの時代には一般に知られていたと考えられる。(山本『磁力と重力の発見』1:1-15; *Debus The Chemical Philosophy*, 1:280.) この「格言」は、空間における磁気作用についての1850年の議論でも引用されている。(ERE, 3:194, par. 2787.)

(Thoughts on Ray-vibrations)」を發表し、その中で力線と光エーテルの等価性について論じている⁷⁰。ファラデーはこの論考においても、1844年の原子論と同様に、周囲へと力を及ぼす点原子と、その集合としての粒子を想定している。原子が力のみの存在であるならば、それらを結びつけている力線の存在をどこまでも延長して想定することができ、その力線の広がり「放射現象の振動の座 (seat)」⁷¹として機能していると考えられる。ファラデーは、このように解釈することによって、光の振動の媒体と考えられていたエーテルの存在を力線という概念で説明しようと試みたのである⁷²。

この議論を進める上で、まずファラデーは、電気伝導性が物質に依存することから、電気が物質粒子そのものによって媒介されていることは間違いないという前提を立てる。それに対して、光を伝えるエーテルは、物質とは異なり重さがなく、究極的な弾性を備えていると考えられる。そうすると、電気と光の媒体である物質とエーテルとのあいだには、万有引力の作用や弾性という観点から大きな違いがあるように思われる。しかしその一方で、5.4節でも述べたように、ホイートストンによる光と電気の速度計測によって、電気が導線を伝わる速度は少なくとも光速と同程度であることがわかってきた⁷³。

このように、電気と光を伝える媒体には相違点もあるが、作用そのものには類似点もある。そこでファラデーは、電気と光が「共通する起源」を持ち、異なる「形式」を持って現れたものだと仮定する。そして、力能としての起源が同じだとすることで、作用の媒体である物質とエーテルの重さの有無といった違いもあくまで形式的な程度の差であり、中心核の有無といった構造上の本質的な違いではないと推論する。

ここでファラデーは、エーテルに重さがなく弾性的であるということは、エーテルの持つ重力の作用が通常の物質に比べて極めて弱いためだと考えた。前述のように、原子が太陽系全体まで広がって空間を充満していると仮定するボスコヴィッチ的な理解に基づくと、地球上で最も小さな原子の力でさえも地球と太陽のあいだほどの長い距離に対して作用を及ぼしうることになる。そうすると、地球と太陽のあいだで作用が伝わるためには、そのあいだにたかだか一個の原子があればよいことになる。そして、このように二つの原子が力線によって互いに結びついているとすれば、一方が垂直に振動すれば、光のような横波が生じて作用が振動として伝わっていくと考えられる。すなわち、エーテルの密度が極端

⁷⁰ Faraday, "Thoughts on Ray-vibrations," *Philosophical Magazine* 28, no. 188 (1846): 345-50. Reprint, *ERE*, 3:447-52. これは、フィリップス個人に宛てた論考が出版されたものである。ファラデーは、9.1節で論じる太陽光と反磁性体との関係についての考察から、この1846年の3月から8月まで光線についての実験を続けていた。

⁷¹ *ERE*, 3:447.

⁷² ファラデーは、既存の磁気についての仮説を次の三つに分類している。第一の仮説は、磁石から磁気流体ないしエーテルが流れ出していると考えられるもので、とくに数学を用いずにこの仮説を簡単に説明した例として、ファラデーはオイラーの『ドイツ王女への手紙 (*Lettres à une Princesse d'Allemagne*)』をあげている。第二の仮説は、二種類の磁気流体が磁極に蓄積して引力や斥力を及ぼしていると考えられるものである。そして第三の仮説はアンペールの仮説で、粒子のまわりに生じている電流を考えるものである。ファラデーは、自身の「物理的仮説 (physico-hypothetical notion)」が、この第二および第三の仮説に対して何らかの答えを与えるわけではなく、さらには第一の仮説とも近いものであると述べている。(*ERE*, 3:528.)

⁷³ Wheatstone "An Account of Some Experiments."

に低く、その作用が弱くても、光を原子から出ている力線で説明することができる。また、光の作用が伝わるために時間を要することも、作用がこのように力線の振動によって伝えられている証拠だと考えた⁷⁴。

このように物質と力線とを同一視すると、力線は、粒子の作用であるとともに質量の作用でもあり、さらにエーテルそのものでもあると考えられるようになる⁷⁵。ファラデーは、エーテルが力線によって説明できると仮定すると、それらの対応関係は次のようになると説明している。

エーテルは空間と同様にすべての物体にも浸透していると推測されます。今導入した観点からすると、あらゆる物体に浸透して（それを形づくり）空間にも行き渡っているのは、原子の中心の力なのです。空間に関して言えば、その違いは、エーテルは作用の連続していく部分あるいはその中心を与えるものであり、現在の仮定では作用の線だけということになります。物質に関して言えば、その違いは、エーテルが粒子のあいだにあって振動をはこぶものであり、その仮定によると、振動を続けている粒子の中心間にある力線によるということになります⁷⁶。

すなわち、原子が中心点とそこから広がる力線から構成されていると考えると、エーテルは中心点のまわりの力線の部分と解釈することができ、エーテルのあらゆる物質への透過性も説明できると考えられた。

このようにファラデーは、ボスコヴィッチ的な原子論の理解に基づいて、力線と光エーテルとの等価性を論じた。しかし、ファラデー自身はこの時期以降、ボスコヴィッチの名前に言及しながら原子論を展開していくようなことはしていない。それにファラデーは、万有引力や電磁気力などの諸力が起源は共通でも形式は異なると考えていた。そのため、ファラデーの物質観は、ボスコヴィッチの原子論というよりもモソッティの分子論に近いものであったと考えられる⁷⁷。ファラデーは、この論考の中でも「モソッティが、重力、凝集力、電気力、そして電気化学的作用がすべて一つの共通する結びつきないし起源を持つことを示した」⁷⁸ことを忘れてはならないとして、モソッティの分子論に簡単に言及している。このことから、ファラデーはボスコヴィッチの原子論を、あくまで仮説の一つとしてみなしていたと考えられる。

しかし、仮説としてでもボスコヴィッチの原子論を擁護したことは、ファラデーがそれ

⁷⁴ ERE, 3:448-51.

⁷⁵ ERE, 3:448-51; Nersessian, *Faraday to Einstein*, 64-5. これと同様の見解は、6.6節で論じる1848年の磁気結晶軸の考察においても示されている。(ERE, 3:122, par. 2591.)

⁷⁶ ERE, 3:451-2.

⁷⁷ ERE, 3:449-50. 前述のように、ファラデーはボスコヴィッチの原子論がモソッティの分子論にもよく調和すると評価していたが、その逆ではなかったことに注意せよ。この関係から察する限り、ボスコヴィッチの原子論よりもモソッティの分子論の方が、ファラデーにとっては基本的な考え方として位置づけられていた。

⁷⁸ ERE, 3:450.

を受け入れるための物質観を持っていたことになる。そして、このようにファラデーがボスコヴィッチの原子論に先立って「点原子論」的な物質観を有していたとすれば、そこには当時のイギリスを代表する自然哲学として普及していたイギリス経験論ないしコモン・センス学派の影響が考えられるだろう。1.2節で論じたように、コモン・センス学派の哲学者たちは、ボスコヴィッチの原子論を受容しながら、従来のイギリス経験論に根差した、より一般的な物質観を展開していた。ファラデーは、コモン・センス学派の哲学者たちがボスコヴィッチの原子論に影響を受けて議論を展開していった過程とは逆に、とくにデーヴィーの強い影響もあって、まずはその力を物質の本質と考えるような物質観を漠然と受容するようになったと考えられる。そして、その物質観に基づいて、研究を進める中で1836年にはモソッティの分子論を擁護し、さらには1840年代の半ばになってボスコヴィッチの原子論を擁護したのだと考えられる⁷⁹。すなわち、ファラデーにおいては、その物質観とボスコヴィッチの原子論との影響関係が、コモン・センス学派のそれとは逆であったと言えるだろう。

なお、ここでは力線に対して中心点を仮定していることから、ファラデーは、あくまで力線を物質からの中心力であると理解しており、この考え方は「場」の概念とは異なる⁸⁰。この時点で展開された力線についての議論は、あくまで第5章で論じた近接粒子の矛盾点を解決し、物質と力についての関係を説明することを目的とするものであった。すなわち、作用が曲線的な形状を持つことの物質的な原因を説明するために、それまでは作用の表現方法に過ぎなかった力線を、物質的な原因そのものであると解釈しようとしたのである。そして、このように解釈すると、それまでの問題の根源となっていた遠隔作用と近接作用の対立の図式からも解放されることになる。

その一方で、これから論じる「場」とは、通常の磁性体とは異なる反磁性体のふるまいを論じるために新しく導入された表現であった。反磁性体のふるまいは、それまでファラデーが力線によって表現してきたふるまいとは、質を異にしていたのである。そして、そ

⁷⁹ ファラデーがボスコヴィッチについてのくわしい知識を得た時期や出典は不明確であるものの、ヘアによる反論がなされた1840年頃であり、その内容はプリーストリが1777年に出版した『物質と精神に関する論説 (Disquisition Relating to Matter and Spirit)』やエクスリー (Thomas Exley, 1775-1855) が1829年に出版した『自然哲学の諸原理 (Principles of Natural Philosophy)』に依拠している可能性が高いとの指摘もある。エクスリーはこの書籍の内容を発展させて1836年や1838年のBAASの会で発表していた。ハイマンも指摘しているように、ファラデーの原子論は、ボスコヴィッチの原子論そのものというよりも、プリーストリやロビンソン、モソッティといったイギリス国内で受容されていたものであると考えられる。

(Heimann, "Faraday's Theories of Matter and Electricity," 236-7, 246-53.) そして、ファラデーがこれらの情報を得ていった時期を考慮すると、ファラデーは、まずはコモン・センス学派的な物質観を共有していて、次に1836年にモソッティの分子論に注目し、そして1840年頃にボスコヴィッチの原子論にも注目するようになったと結論づけられる。

⁸⁰ 中心から延びる力線の集合として原子を考えると、その中心の「歪み」によって分極が説明できることになり、「力線」が「極性」よりも重要性の高い本質的な概念とみなされるようになる。ウィリアムズは、このファラデーの理解が、マクスウェルによって展開されていく場の理論の基礎になったと論じている。

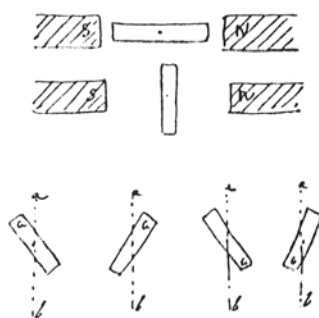
(Williams, *Michael Faraday*, 381.) この1844年に展開された力線が、このように場の理論へと発展していくという解釈は確かに正しいだろう。しかし、それによって1844年の時点での力線についての理解が、そのまま場の理論と同じであるとは言えない。

のための新しい表現の導入は、1845 年末におこなわれた実験を通じて進められていった。次節では、光磁気効果の実験をきっかけとして展開されていった反磁性体のふるまいを調べるための実験と、その実験を通じて「場」という表現が導入されていった過程について議論を進めよう。

6.5. 「場」という表現の誕生

前節で論じたように、ファラデーは中心を持つ力としての原子を考えていた。そして、その力が空間に充満していると仮定することで、電気や光などの作用の伝播を説明することができると考えていたのである。ただし、その説明はあくまで「力線」によって担いうるものであり、「場」という新しい考え方に結びつくものではなかった。ファラデーは、この「場」という新しい考え方を、ある特殊な現象の観察結果を表現するために導入していったのである。

まず、ファラデーは光磁気効果の実験を発展させる形で、1845 年 11 月 4 日より反磁性体に対する磁力のはたらきを調べるための実験を開始した。そしてその実験の結果、鉛ホウ酸ガラスの棒は、図 44 上のように、磁極のあいだにつるすと両側が磁極を結ぶ軸線から離れるように垂直に向くことがわかった⁸¹。すなわち、磁極の南北に対して東西の方向を指したのである。また、この回転の方向は、磁極の位置を変えても、あるいは電磁石の場合には電流の向きを変えても変化することはなかった。すなわち、棒に極性が生じているわけではなく、ただ、垂直方向の位置へと最短経路で回転しているだけのように観察されたのである⁸²。



⁸¹ このように反磁性体が磁石に反発することは、ビスマスについてはドイツのブルグマン (Anton Brugmans, 1732-89) によって 1778 年に発表されていた。また、それ以外のいくつかの物質についても他の研究者による報告があった。ファラデーはこの事実を知らず、1846 年 2 月に改めて論文の注として追記している。(ERE, 3:82n.) なお、これはホイットストーンからの情報でファラデーの知るところとなった。

(Charles Wheatstone to Faraday, 17 January 1846, *Correspondence*, 3:467-8.) ただし、ホイットストーンも述べているように、これらの先行研究ではファラデーのような反磁性への一般化はおこなわれなかった。

⁸² 4, 7 November 1845, *Diary*, 4:313-23; ERE, 3:30-1, par. 2253-8.

図 44 : 反磁性体のふるまい。磁気曲線から反発するように垂直方向へと移動する様子が観察された。(7 November 1845, *Diary*, 3:315.)

さらに、鉛ほう酸ガラスなどの物体の重心が磁極を結ぶ軸線からずれているときには、物体の重心は磁極から離れるように移動する様子が観察された⁸³。また、二つの物体が磁極を結ぶ軸線上に並べて配置されたときには、それぞれが磁極に反発しつつ、互いに牽引し合うかのように近づいていく様子が観察された。その一方で、それらの二つの物体が磁極を結ぶ軸線と垂直に配置されたときには、それぞれが軸線から反発するように、そして互いにも反発するように離れていく様子が観察された⁸⁴。

これらの観察結果から、ファラデーは、鉛ほう酸ガラスなどの物質には「磁力のより強いところからより弱いところへと動く傾向がある」⁸⁵と考えた。ファラデーは、このような磁極に対する新しいふるまいを、物質の粒子との関係において次のように説明している。

それは、粒子が外側、ないし最も磁気作用が弱い位置へと動こうとする傾向の結果に過ぎない。すべての粒子の作用が合わさってはたらくことで、その質量 (mass) を、実験によってそれがあべきだとわかる位置へと持っていくのである⁸⁶。

このようにファラデーは、反磁性体に対する磁気作用も、これまで一般的に知られてきた磁性体と同様に、粒子に対する作用として説明した。ここで、あくまで粒子の作用であるとした理由は、次節で論じる磁気結晶軸についての考察からはっきりするように、磁極ないし磁力線との相互作用によって引力や斥力が生じていると考えられたからであった。その一方で、「磁気作用が弱い位置へと動こうとする傾向」があるとすると、その傾向は磁極からの引力や斥力によるのではなく、そもそもそのような力を避けようとする作用であると考えられた。すなわち、反磁性体に対する作用は、従来の磁気作用とは質の異なる作用であると考えられた。

そこで、ファラデーはさまざまな物質の磁性について調べ、あらゆる物質を磁極に引きつけられる程度だけでは説明できないとして、従来の磁性に対する見解を次のように批判した。

その新しい事実は、単にこの意見を否定するものではなく、何かそれを超えて、あらゆる普通の物質には磁性体に存在している力とは正反対の力が存在していることを肯定するものである。その力は、実際に引力を生み出すこともあれば斥力を生み出すこともある。これらは軸方向に物体を配置することもあるし、二等分線 (equatorial) の

⁸³ *ERE*, 3:31-2, par. 2259-62.

⁸⁴ *ERE*, 3:32, par. 2265.

⁸⁵ *ERE*, 3:33, par. 2267. 同様の考察は、ビスマスを用いた実験でも示された。(*ERE*, 3:41-3, par. 2298-308.)

⁸⁶ *ERE*, 3:33, par. 2269.

位置を取らせることもある。物体一般について、事実は引用した見解が示すところとは厳密に反対方向なのである⁸⁷。

すなわち、この新しい作用は、ある特定の方向への牽引や反発をともなう「線」の作用ではなく、「位置」に関係する作用として認識された。そのためファラデーは、この作用が従来の磁性とはまったく質が異なるとして、磁極間を結ぶ軸方向の作用だけに物質の磁気作用を帰することはできないと主張したのであった。

もっとも、ファラデーはこの「位置」の作用を表現するために、最初は「線」を用いざるを得なかった。ファラデーは、この磁気に対する新しいふるまいのあり方を表現するために、この運動の方向を示す線を「反磁性曲線 (diamagnetic curves)」⁸⁸と名づけ、通常の「磁気曲線」とは区別している。しかし、この「反磁性曲線」という言葉は、その後は基本的に用いられることはなかった。それは、磁気の線に対して生じる運動の方向性が、物質によってさまざまに異なっていたためである⁸⁹。そして、この「反磁性曲線」や「磁気曲線」に代わってさまざまな方向性を包括するために用いられたのが「磁場 (magnetic field)」という表現であった。

この「磁場」という表現は、それまでは磁性を持たないと考えられていた銅などの物質が特殊な磁性を持つことを発見したことから、そのふるまいを表現するために用いられるようになった。銅製の棒は、磁性体のように磁極を結ぶ軸線の方向に向かうが、一般の磁性体のようにその軸線の前後で振動するようなことはなく、移動した後に任意の不規則な位置でそのままとどまるという特殊なふるまいを見せた。さらに、電磁石によって両側から磁気をかけた後にその電磁石の電流を切った場合には、銅がその不規則な位置から回転をともなうような強い「引き戻し (revulsion)」の作用を受ける様子も観察された。そして再び電流を入れるとその動きは止まった⁹⁰。

この特殊な現象は、銅の中に生じた誘導電流によって磁極が生み出されているためだと解釈された⁹¹。そして、ファラデーはこの磁気による物質の不規則なふるまいを記述するために「磁場」という表現を用いたのである。この「磁場」という表現が用いられた理由は、磁性体ではない銅などの金属が、それまで「力線」で表現されてきたような一定の方向性を持った緊張状態を示すわけではなく、斜め方向の不規則な配置を示したためだと考えられる。すなわち、これまでファラデーは「力線」を力の方向を表現するための線とみなして利用してきたが、新しく「反磁性曲線」を導入したところで、不規則な方向の作用をうまく表現することはできなかった。そのため、「線」とは異なる新しい表現方法が必要

⁸⁷ *ERE*, 3:38, par. 2286.

⁸⁸ *ERE*, 3:33, par. 2270.

⁸⁹ 14 November 1845, *Diary*, 4:339, par. 8167.

⁹⁰ 7 November 1845, *Diary*, 4:318-23, par. 7961-86; *ERE*, 3:44-5, par. 2310-7. このように銅のふるまいは鉛ホウ酸ガラスなどに比べても特殊であったが、ファラデーは後の研究で銅を「反磁性体」の側に分類している。(*ERE*, 3:66, par. 2399.)

⁹¹ *ERE*, 3:51, par. 2336. ここでの銅に対する磁気の作用は、1825年に4.1節で紹介した実験に関連してアラゴーによって見出され、ハーシェルやバベッジによっても研究されていた。*ERE*, 3:52n, par. 2341.

とされたのである⁹²。

次の引用は、ファラデーが最初に「磁場」という言葉を用いた 1845 年 11 月 7 日の研究日誌の一節である。

この磁性を持たない金属の作用が通常の磁気作用とどのように異なって現れてくるのか、まだ初めのところではあるが、かなりはっきりとわかりはじめてきた。封ロウやアスベストや紙が磁場 (magnetic field) の中にあるとき、その円柱が最初にこのように接触していれば、一方の極から他方の極へと向いている磁気の線へと引き込まれる。あるいはその振動の力がその円柱をさらに向こうまで運んでしまうと、その線へと戻りながら静止する場所を見つける。ただ、その前に静止する場所を見つけ、そこを通り過ぎて振れることはないので、磁性のない金属がその線に至ることはない⁹³。

このファラデーの表現からは、「磁場」が「磁気の線」を包含するような空間的性質の表現として導入されたことがわかる。「磁気の線」はあくまで「磁場」の中にあり、「磁場」こそが「磁気の線」と物質の運動との関係を包括的に規定していると考えられたのである。

しかし、この時点で「磁場」の性質についてそれ以上の分析がなされたわけではなかった。ファラデーの「場」という表現は、理論的な概念というよりも「線」では表現しきれない不規則な現象を不明瞭な空間的性質に帰するために導入された便宜的な表現に過ぎなかった⁹⁴。いわば、「場」とは「力線」の補助的な表現方法であった。

実際、ファラデーはその後に公に発表した論文の中でも、「磁場」という言葉を定義することなく次のように唐突に用いている。

調査対象となる約 2 インチの金属棒が磁場中につるされ、最初は軸線に対して斜めになっているものが、二等分線へと追いやられるのではなく、いくらか斜め方向のままにあるのでもなく、軸の位置へと引き寄せられるような磁力を引き起こすのだとすれば、私はそれを磁性体と理解する⁹⁵。

この引用からわかるように、ファラデーの論文における「磁場」という表現の初出は、通常の磁性体を説明するための文脈においてであった。しかし、少し注意すればわかることだが、ここでの「磁場」という表現は、磁性体のふるまいを直接説明するために用いら

⁹² Gooding, "Empiricism in Practice," 55-6. グッディングは、この「場」という考え方を導入することで、自然現象の経済性に基づく目的論的な言説を用いるようになったと分析している。また、グッディングはこのような目的論にはファラデーの神学的な考え方が影響していると論じている。(Ibid., 62-4.)

⁹³ 7 November 1845, *Diary*, 4:322, par. 7979.

⁹⁴ ファラデーが場という概念の起源については諸説あるが、資料に基づいた歴史的な考察の中ではグッディングの研究が最も分析的で信頼性も高いと考えられる。グッディングも、ファラデーが「場」という概念を持つようになったのは 1845 年頃であると結論づけている。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 101.)

⁹⁵ *ERE*, 3:39, par. 2290.

れているのではない。ここでの磁性体の説明は、「二等分線へと追いやられるのではなく」という反磁性体や磁性を持たない金属のふるまいの否定として与えられていることがわかる。すなわち、磁性体ではない物質のふるまいによって、磁場と磁性体との関係も規定されている。実際、「磁場」という言葉は、前述のように銅などの磁性を持たない金属の特殊な動きを表現するために用いられるようになった。このように、「磁場」という表現は従来の概念に対する否定的な説明において導入されていることから、この表現が合理的に説明できないような不規則な現象を説明するための便宜的な手段に過ぎなかったことがわかる。

このように磁場という考え方はきわめて不明瞭なものであったが、その中に置かれた物質の状態については理論的な考察が少しずつ進められていった。例えば、前述のようにファラデーは磁場中の不規則な運動を最初は回転運動として認識していた。そのため、磁場中の運動を考察するにあたっては、同じように回転運動を基調とするアンペールの理論や、電気緊張状態という初期の考え方が再び持ち出されることになった⁹⁶。「電気緊張状態」という言葉は、1830年代の最初に誘導現象の研究を始めるにあたってその不明瞭な状態を表現するために用いられていたが、その言葉で表現されていた状態は力線と粒子の作用として説明されたため、基本的には用いられなくなっていた。しかし、力線では説明できない現象に直面することになり、この「電気緊張状態」という考え方が再び用いられるようになったのである。

ファラデーは、アンペールの理論を引用しながら、この反磁性体の関係する新しい「電気緊張状態」について次のように説明している。

おそらく、この状態は「流れを起こそうとする電氣的な緊張」の状態である。アンペールの理論によると、磁石の中ではその状態は「流れ (current)」の状態である。コイルに鉄心を入れたとき、その内部ではコイルの軸に垂直な面で回転したり動いたりする電流の流れが生み出されると、あらゆることから信じられている。反磁性体はその同じ場所に置かれた場合には、同じ面において光を回転させる力能を得るのである。反磁性体を受ける状態は緊張の状態だが、流れにはならない。しかし、作用する力やその他すべての状況や状態は、鉄やニッケル、コバルトなどの、そうした力を受けることに適した物体の中に流れを生み出すものと同じである⁹⁷。

このようにファラデーは、すべての物質が何らかの磁氣的な反応を回転という形式によって生み出すと考えた。この回転とは、磁性体で生じる電磁回転や電磁誘導であり、反磁性体で生じる光磁気効果のことである。すなわちファラデーは、磁性体と反磁性体の違いは、その反応が電気と光のどちらの作用として現れるかの違いであると考えた。6.4節で論

⁹⁶ 7 November 1845, *Diary*, 4:323, par. 7982-6.

⁹⁷ *ERE*, 3:22, par. 2229.

じたように、ファラデーは電気之力線と光エーテルとが根本的に同じ構造を持っているとみなしていった。この観点からすると、磁性体と反磁性体には本質的な違いがないことになる。

また、磁性体と反磁性体とを統一的に説明するファラデーの考え方は、電気伝導性の有無という観点から考えた場合にも、「仮説的な電流はその物質の質量 (mass) にではなく、その粒子のまわりに存在していると考えられるため、伝導しない磁性体や反磁性体の物質に関しても、何も問題は生じない」⁹⁸と考えられた。すなわち、アンペールが提唱していたような分子電流を反磁性体の説明へと拡張した場合にも、反磁性体には電気伝導性がないという事実と矛盾しないと考えられた。

もっとも、分子電流を考えても、反磁性体のふるまいは電流の向きが逆になるといった安易な解釈では現象を説明することはできないし、そもそもあらゆる方向に反発されるような現象を説明することはできなかった⁹⁹。しかし、それらの問題は根本的な困難であるとはみなされなかった。そもそもファラデーは、アンペールの理論をあくまで仮説的な推論に過ぎず、十分に検証された問題のない理論であるとは考えていなかった。そのため、まずは反磁性体の中に分子電流を想定することによって大きな矛盾が生じなければよく、あとは将来の研究によって解決されるべき課題だと考えていたのである¹⁰⁰。

そして、このファラデーの考察をさらに進めて、光磁気効果をアンペールの理論の実証例とみなすウィリアム・トムソンのような研究者もいた¹⁰¹。トムソンは、この見解を次のように述べている。

それゆえ、ファラデーの光学上の発見が、磁気の究極的な本性についてのアンペールの理論が事実であることの証明を与え、熱の動力学的な理論 (dynamical theory) において磁気の定義を与えていると言えるだろう¹⁰²。

このようにトムソンは、ファラデーの光磁気効果の発見が磁気の究極的な原因としてのアンペールの分子論の証明になりうると考えていた。なお、この引用の後半にある熱と磁気についての議論はトムソンの分子論的な解釈と関係するものであり、第7章で改めて論じることにする。

ファラデーは、このような「粒子を通じた誘導」という見解を踏まえて、現象として区

⁹⁸ *ERE*, 3:74, par. 2430.

⁹⁹ 14 November 1845, *Diary*, 4:340, par. 8171.

¹⁰⁰ ファラデーは、1854年の論文で、アンペールの仮説では反磁性体のふるまいを説明できないことを指摘し、アンペールの仮説において粒子間の電流を仮定して改善したウェーバーの仮説などを紹介している。なお、ファラデーはアンペールの分子電流について、この論文の中では「原子ないし粒子」の電流と表現している。(*ERE*, 3:524-7, 534.)

¹⁰¹ トムソンやマクスウェルをはじめとする当時の研究者たちは、光磁気効果にアンペールの理論的解釈を応用することで渦理論を展開していった。(Knudsen, "The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873," 244-61.)

¹⁰² W. Thomson, "Dynamical Illustrations," 152.

別されていた磁性体と反磁性体を「一つの磁性のリスト」において整理できると考えるようになった¹⁰³。ファラデーは、近接粒子の理論において、絶縁体から導体に至るまでのさまざまな物質の電氣的性質を統一的に説明したように、さまざまな物質の磁性についても統一的に説明できると考えたのである。

ファラデーは、物質粒子の微視的な構造を推測することに、とりわけ固執していたと言える。3.2節で引用したように、ファラデーはトマス・トムソンによる化学の定義に強い共感を抱いていた。このように自然現象を粒子の可感ではない微小領域の作用として説明しようとするのは、研究を進める上でのファラデーの基本姿勢になっていた。それに、「遠隔作用説」は原理的に否定されると考えていたため、電気や磁気の作用を説明するためには、その作用を媒介する何らかの物質的な原因を探る必要があると強く考えていたのである¹⁰⁴。このファラデーの考え方が、前述の独特な原子論を支持する原因になったと言えるし、真空中での作用についての問題を意識させる原因にもなった。

このことについて、例えばファラデーは、真空中の磁気の作用について、「真空は何をなしているのでしょうか。このことは、空気、ガス、そして本当にすべての課題にとって重要である」¹⁰⁵と述べている。このことから、ファラデーは、真空が気体と同じように、磁気作用に影響を及ぼしていると考えていたことがわかる。そして実際に、水中の空気が磁極に引き寄せられることが観察されたことと、空気が希薄になっても反磁性を示すことはないことから、空間 (space) が空気などと同じように磁性を持つ可能性も考えられていた¹⁰⁶。この可能性は後に否定されるが、このようにファラデーは、あくまで空間をさまざまな物質と同じように扱っていたのである¹⁰⁷。

空間を物質であるかのようにみなすことは、ファラデーの物質観からすると自然なことであろう。真空においては、物質の中心点は存在しないかもしれないが、その周囲の力が充満していると考えられるからである。そのため、真空が他の物質と同じように磁性を持たないと結論づける方が、ファラデーにとっては説明を必要とすることであった。ファラデーは、1850年に気体の磁性を研究する中で、磁力線は重力や電気と同じように純粋な空間 (pure space) を横断できるが、空間の磁気作用は通常の磁性体や反磁性体の作用とは異なるものであり、エーテル仮説を受け入れたとしても空間は物質と同じようには作用でき

¹⁰³ 6 December 1845, *Diary*, 4:378, par. 8514-7.

¹⁰⁴ あるいは、遠隔作用を認めるかのような説明がなされたとしても、その作用はあくまで物質間の作用であって、作用そのものが空間内に物質とは独立して存在しているとは考えられなかった。このような考え方に対してファラデーは、6.4節で論じたように粒子間の力線の存在を考え、その力線の作用は、点原子という中心核のない力能だけの存在として仮定するにせよ、やはり粒子を媒介して伝わると考えていた。

¹⁰⁵ 15 November 1845, *Diary*, 4:351, par. 8257.

¹⁰⁶ *ERE*, 3:76-7, par. 2438-40.

¹⁰⁷ グッディングが指摘しているように、ファラデーは空間を磁性体と反磁性体のあいだにある「ゼロ点」として扱っていた。これはすなわち、空間を幾何学的にはなく、あくまで「試験物質 (test substance)」の一つとして、他の物質との比較において化学的に分析していたと言える。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 266-7; Gooding, "Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field," 100-2; Gooding, "Final Steps to the Field Theory," 249-53, 266-8, 270.)

ないと述べている¹⁰⁸。この議論の組み立て方そのものからわかるように、ファラデーは空間をあくまで物質との比較において論じていた。空間に対するこのような位置づけは、ファラデーが物質も空間も、中心核の有無に違いはあるにせよ、同じように力線による作用として考えていたことから理解できる。

もつとも、中心核がたかだか「数学的な点」に過ぎないにせよ、力線には発生源としての物質が必要であった。そもそも、「物体はそれが存在しないところには作用しない」のであり、力線はあくまで物質とは不可分な存在と考えられていた。そのため、力線は物質の相互作用によって伝わりと考えられた。そして、物質は必ず磁力の影響を受けるという前述の結論からも、ファラデーはますます近接粒子の作用による説明の妥当性を確信するようになった。

ファラデーは、この近接粒子の作用という理論と反磁性体との関係について次のように述べている。

ここで、媒介する反磁性体の粒子が獲得する状態とは、まさにそれらを通ずる力の移動 (transfer) を維持し、その原因となるような状態であろう。以前の論文で、私は近接粒子の作用に基づく電気の誘導の理論を提案したが、今ではそれを提案した時よりもさらにその理論に満足している¹⁰⁹。

このように磁気作用においても作用が粒子によって媒介されていると考えることで、電気と磁気的作用は同一の原理によって総合的に説明されるようになり、電気と磁気が直接的に相互作用しているとみなすことの物質的な根拠も与えられることになった。

ファラデーは、1845年の論文をまとめるにあたって、電気と磁気は両方とも、介在する物質によってその作用が変化するが、空気を希薄化しても作用が持続するという点に言及している。そして、このような共通点があることから、磁気は、電気と同じく近接粒子による作用であり、そもそも磁気が電気的作用である可能性も考えられると述べている¹¹⁰。そしてこの考察もまた、アンペールの分子電流という仮説と両立するものであると考えられた。

以上のような当時の解釈を総合すると、ファラデーが光と磁気との作用が物質粒子を媒介して伝わる直接的な作用であると考えすることは不自然なことではないだろう。物質が介在するという事は、ファラデーにとって直接的な作用であることを否定する根拠にはならなかった。5.6節で論じたように、ファラデーは磁力線においても近接粒子のような媒体が存在するのではないかと考えていたが、その存在を実験で確かめることはできなかった。それが、この光磁気効果の実験では、「単なる緊張状態ではなく、物質を通ずる磁気の流れ

¹⁰⁸ *ERE*, 3:194, par. 2787.

¹⁰⁹ *ERE*, 3:78, par. 2443.

¹¹⁰ *ERE*, 3:79, par. 2445.

にまったく依存している」ことを見出すことができたのである¹¹¹。すなわち、誘導が物質に依存するように、光磁気効果が物質に依存しているという事実は、磁気も何らかの媒体による作用である可能性をより確かなものにする実験的根拠として肯定的に解釈されたのである。そして、誘導の理論を構築していったときと同じように、「単純な基本原理にもとづいた一般的な磁気作用の理論を構築すること」¹¹²が期待できるようになったのである。

それでは次節で、その後のファラデーの研究も踏まえながら、この光と磁気と物質との関係について第6章の議論をまとめることにしたい。

6.6. 光と磁気と物質

光磁気効果の発表から3年近くが経過した1848年8月に、ボン大学のプリュッカー (Julius Plücker, 1801-68) が王立研究所のファラデーのもとを訪れ、プリュッカー自身が前年に発表していた反磁性体の結晶が持つ光学軸 (optic axis) と光磁気効果との関係について共同で実験をおこなった¹¹³。そして、ファラデーはこの訪問をきっかけとして結晶の持つ「軸性」についての研究を続け、ビスマスやアンチモンなどには、光学軸とは別に、磁場に平行になろうとする「磁気結晶軸 (magnecrystallic axis)」が存在していることを発見した¹¹⁴。ビスマスは反磁性体であるため、一般的には磁場が強いところから弱いところへと移動しようとする。しかし、この磁気結晶軸が磁場と同じ方向にあるときには、そのような動きは見られなかった¹¹⁵。結晶軸は、ビスマスの結晶に生じている主要な劈開 (cleavage) に対して垂直に生じており、その場所での回転などを生み出すだけで、磁気とのあいだには引力も斥力も生じていないようであった。そのため、この結晶軸は極性ないし粒子とは関係なく、結晶の分子構造ないし質量 (mass) だけに関係していると考えられた¹¹⁶。

ファラデーは、これらの実験結果から結晶の内部構造へと考察を進めていった。そして、磁気の極性と相互作用する粒子は、結晶の力によってその結晶の質量 (mass) にとどめられていると考え、それらの質量と粒子とを関係づけている結晶の力について次のような説明を与えた。

まさにこの力によって粒子が質量 (mass) の中の規則的な位置に置かれているということが、それらの粒子が磁石や電流と結びついて作用し、影響を及ぼし合うことを可

¹¹¹ *ERE*, 3:26, par. 2240.

¹¹² *ERE*, 3:28, par. 2243.

¹¹³ 16, 22, 25 August 1848, *Diary*, 5:57-62; Julius Plücker to Faraday, 19 July 1848, *Correspondence*, 3:706-7; Julius Plücker to Faraday, 28 September 1848, *Correspondence*, 3:714-5. プリュッカーは、1846年にそれまでの解析幾何学の研究から実験物理学の研究に転向し、1847年にはトルマリンの磁気効果を発見するとともに、光学軸についての論文を発表していた。(DSB, s.v. "Plücker, Julius.")

¹¹⁴ Faraday to Julius Plücker, 14 December 1848, *Correspondence*, 3:740-1.

¹¹⁵ *ERE*, 3:86, par. 2464.

¹¹⁶ *ERE*, 3:89-90, par. 2475-2479; *ERE*, 3:110, par. 2550; *ERE*, 3:114, par. 2563.

能にしているのである。粒子がそのように配置されておらず、質量の中であらゆる方向を向いていれば、それらの力が外に及ぼす総和は何もなくなり、磁石や電流による誘導がどのようにはたらいても、現象にはほんのわずかな痕跡も発生し得ないのである¹¹⁷。

このように、結晶構造の考察において粒子は質量に包含される関係にあると考えられた¹¹⁸。すなわち、質量は粒子の「集合体」として位置づけられた。前節で引用したアンペールの分子電流の理論からしても、磁力は粒子に生じた極性によって生み出されていると考えられた。そのため、磁極によって及ぼされる引力や斥力は粒子と関連づけられていた。その一方で、磁気結晶軸に対する磁場の作用は引力や斥力を及ぼすわけではなく、極性とは無関係と考えられた。そのため、粒子ではなく質量と関連づけられたのである。

こうして、光磁気効果の発見をきっかけとして磁気についての理解が進み、磁性体や反磁性体をその結晶内の粒子や質量の作用と関連づけて説明できるようになった。ファラデーは、この磁気結晶軸の論文を次のような文章で締めくくっている。

数年前、磁気は私たちにとって隠れた力能 (occult power) であった。それが今や、あらゆる物体に影響を及ぼすことがわかり、電気、熱、化学作用、光、結晶化、そしてそれを通じて、凝集力に関係する力と、それぞれ密接な関係を持っていることがわかった。そうすると私たちは、現在のこれらの状態にあって、自分たちの研究を続けるように強く促され、磁気を重力そのものと結びつけるという希望によって励まされていると感じざるを得ないのである¹¹⁹。

このように、磁力が粒子と関連づけられて理解されることにより、同じように「隠れた力能」であると考えられた万有引力についても、電磁気力との関連を見出せる可能性が高まったと考えられた。実際、ファラデーはこの翌 1849 年 3 月に、重力の実験に着手している。この重力の実験については 9.1 節で改めて論じることにする。

ファラデーの光磁気効果の発見は、当時の新しい科学的知見や実験機器が組み合わせられて実現したものであった。そのような先端的な研究で用いられる実験機器や試料は、それぞれが十分に理解されているわけではない。このように理論的な不確定要素が多い場合には、それらが組み合わせることで解釈の自由度も高くなっていく。そして、未知の現象に対してさまざまな意味を読み込むことが可能となる。

光磁気効果も、それが発見された当時は光そのものに対するところから不十分な理解し

¹¹⁷ *ERE*, 3:119, par. 2577.

¹¹⁸ ファラデーは、銅の磁性について鉄と比較しながら次のようにも述べている。「すなわち、それは質量 (mass) としてのみ作用することができるのであろう。粒子や分子からなる磁石や反磁性体はつねに同じ向きにあるときだけ極を作るが、質量 (mass) は「逆向き」になっているときに極を作るのである。」(29 October 1849, *Diary*, 5:211, par. 10361.)

¹¹⁹ *ERE*, 3:129, par. 2614.

がなく、その現象が生じる理由として、さまざまな解釈の余地があった。そのため、まずは当時の光学や電磁気学の理論を裏付ける方向で解釈がなされていった。光学の分野では波動説が有力視されていく中で、エーテルの存在が理論の前提となっていた。また、ファラデーは、光や電気や磁気などの作用は、何らかの統一的な力能が異なる形式で現れたものであり、等価かつ変換可能であると考えていた。このような理論的な前提があると、光と磁気とが直接的に作用し合うという事実の発見が期待されるようになる。そして、これらの期待を裏付ける現象として、光磁気効果が受容されたのであった。

この光磁気効果の実験を、光と磁気との直接的な作用であると解釈することは自明なことではない。効果が生じるためには物質の媒介が必要不可欠であり、その点を考慮すると物質を媒介とする間接的作用であると結論づけることも可能であるからだ。現象としては確かに光と磁気との作用には相関関係が認められるが、因果関係を考えたときに、それを直接的な作用とまで結論づけることはできない。実験の考察に確実性を求めるならば、あくまで現象レベルの相関関係を指摘するにとどめるべきであり、その現象の因果関係を説明するために原子論やエーテルといった考察を導入すべきではないだろう。それらは、用いられた実験機器によって検証できるものではないからだ。しかし、研究のテーマからして、ファラデーがそのような考察に踏み込んでいくことは避けられないことであった。

物質とはどのようなものであるか、1845年当時にはその理論を実証する手段はなかった。原子論は19世紀の半ばにおいても検証不可能な思弁的な理論であった。そのためファラデーが探究していた研究テーマでは、その原因を説明するためには、必然的に実験では検証できない仮説を導入していく必要があった。またファラデーは、光や磁気などは力線の作用であると考えていた。しかし、力こそが物質であるという解釈を採用するようになると、光や磁気と物質との区別はととも曖昧になる。そして、電気や磁気的作用が本質的に近接粒子によって伝えられているとすれば、光と磁気的作用が物質を介在したものであっても、そのことが光磁気効果を光と磁気の直接的な作用とみなすことを否定する理由にはならなくなる。

ファラデーの光磁気効果の研究は時代の期待に応えるものであり、ウィリアム・トムソンをはじめとする次世代の研究者たちにエーテルの存在を確信させるきっかけにもなった。ファラデーは1845年の論文をまとめるにあたって、6.5節で論じた考察の結果が、「熱の放射と伝導を一つの作用原理の下で理解しようと企てる人々の心に驚きを与えるようなことは何も与えていない」¹²⁰と述べている。そして、ファラデーが述べているように、まさにこの時期に熱と電磁気の数学的同等性に注目して研究を進めた研究者たちがいた。その代表が、次章で論じるウィリアム・トムソンである。ファラデーも、ここで述べている「人々」の代表としてトムソンを想定していたのであろう。ファラデーはヒューエルに宛てた書簡で、トムソンが進めている静電誘導の数学的研究を次のように紹介している。

¹²⁰ ERE, 3:79, par. 2446.

貴方がケンブリッジのセントピーター・コレッジのウィリアム・トムソン氏をご存知かどうかわかりませんが、思うに、彼は問題のこの部分の数学に多少なりとも深く入り込み、直線的な作用についてのクーロンの仮説と、近接粒子による曲線的な作用についての私の仮説とのどちらにおいても、その結論は「厳密に同じ」であるはずだと私に伝えてくれました。彼の論文は数学の雑誌で発表されていますが、私はその研究は知りません¹²¹。

ここファラデー自身が述べているように、ファラデーはトムソンの数学的な研究の内容をきちんと評価していたわけではない。そもそも、論文をきちんと検討しようとはしていないからである。しかし、ここでトムソンを紹介している文章の表現には、それまでファラデーが抱き続けてきた数学に対する懐疑は影を潜めている。そのことから、ファラデーがトムソンの数学的な研究の方向性を評価していたことがわかる。

ファラデーは、誘導の作用の曲線的な作用を力線によって表現し、その複雑な形状の根拠を近接粒子の作用という理論によって説明しようとした。ファラデーの近接作用説は、誘導の作用を直線に還元する考え方を批判することによって、その正当性が主張された。しかし、その物質的な説明には1.1節で論じた可感性にともなう実証性の限界があったし、そもそもファラデーの粒子は可感ではない微小領域では遠隔作用を前提としており、さらには物質の本質が力そのものであるとみなす原子論を展開したことで、一般的な遠隔作用説との本質的な違いが曖昧なものになった。ファラデーの原子論によって遠隔作用説を基礎づけることもできるし、そもそも遠隔作用説とされる研究でも、作用が遠隔的であることが認められていたわけではなかったからである。5.6節で明らかにしたように、ファラデーについて歴史的に分析する限り、遠隔作用は近接作用を否定するものではないし、近接作用も遠隔作用を否定するものではなかった。その区別は第一に、直線的な作用を標準とするか、それとも曲線的な作用を標準とするかという、その標準的な表現方法の違いにあったと言える。

そして、遠隔作用説にせよ、ファラデーの近接作用説にせよ、どちらも十分に作用のあり方を表現できていたわけではなかった。遠隔作用説による表現の不十分性はファラデーが指摘していた通りであったし、ファラデーの表現の不十分性も、1.1節で引用したヒューエルやティンダルの評価、あるいは5.6節で引用したトムソンの評価に表れていた通りである。ファラデーの表現方法は、数学的な方法に比べて厳密性に欠け、曖昧で洗練されていないと思われた。そうすると、もしこの二つの方法の長所をあわせ持つような表現方法が与えられるとしたら、遠隔作用説と近接作用説との対立は解消されることになる。そして、その可能性を持った研究が、ファラデー自身もヒューエル宛ての書簡で述べていたように、ウィリアム・トムソンの数学的研究であった。

そこで次章では、このウィリアム・トムソンがファラデーの力線に与えた数学的な表現

¹²¹ Faraday to William Whewell, 24 November 1848, *Correspondence*, 3:735.

方法についての分析を進め、それがどのように電磁気現象の説明と結びついていったのかを論じたい。そして、トムソンの研究との比較を通じて、これまでの章とは違った角度からファラデーの電磁気学研究についての理解を深めていきたい。

第7章 トムソンによる力線の数学的・力学的表現

第6章までで、ファラデーの電磁気理論の基本概念は出そろったことになる。ファラデーは、「電気緊張状態」を電流と関係する動的な誘導作用の原因として想定し、その状態をそれ以外の電気現象と結びつけて、「力線」と「近接粒子」との関係によって一般的かつ体系的な説明を与えた。しかし、この「近接粒子」には遠隔作用を内包するという矛盾があった。そのため、力を物質そのものとみなす原子論を展開し、作用を表現するために用いられていた力線を、原因物質そのものであるかのように考えるようになった。ただし、光磁気効果の発見とともに見出された反磁性体のふるまいについては力線では表現できず、「場」という表現も新たに導入されるようになった。

ファラデーは、これらの概念を用いて曲線的な作用を表現するとともに、作用を直線によって表現する遠隔作用説を批判した。しかし、前述のように近接粒子は遠隔作用を内包せざるを得なかったし、さらに中心力からなる原子論を仮定すると、ファラデーの理論と遠隔作用説との本質的な区別は小さくなった。そのため、作用の形状についての表現の問題が相対的に際立つようになった。

この両者の表現方法の違いは、学問的な方法の違いによって生じたとも言えるだろう。ファラデーの研究方法は、物質の可感ではない微小領域の作用を対象としていたという点においても、「質量」ではなく「粒子」を対象としていたという点においても、化学を基礎としていた。そして、直線に還元する遠隔作用説には表現の限界があったが、ファラデーの表現方法も力学を基礎とする研究者たちにとっては異質で曖昧なものだと感じられた。すなわち、遠隔作用説にせよ近接作用説にせよ、現象の表現にはそれぞれの問題があった。その一方で、ファラデーの理論と数学的な遠隔作用説の異質性をうまく統合することができれば、それぞれの限界を克服した理論を展開できる可能性もあった。

この新しい数学的研究の方向性を模索したのが、ウィリアム・トムソンであった。トムソンは、5.6節で引用したように、当初はファラデーの表現方法を軽蔑すらしていたが、フーリエの熱伝導の議論を電気現象へと応用することによって、ファラデーが表現しようとしている内容そのものの重要性を認識するようになる。なお、トムソンがこのようにファラデーの研究に注目するようになった時期は、6.1節で引用した書簡が交わされた1845年頃のことであった。そして、トムソン自身も期待していた偏光への回転作用をファラデーが磁気において発見したことで、ファラデーの研究はトムソンにとって決定的な重要性を持つようになった。

そこでこの章では、まずは電磁気現象についてのトムソンの解釈を概説し、次に、その解釈に対して数学的・力学的な表現が与えられ、ファラデーの理論と結びつけられていった過程を分析したい。さらに、そのような数学的・力学的な表現に対して、その原因についての説明が求められていった過程についても、第2章で論じた実証主義、およびアナロ

ジーや力学的モデルと関連づけながら分析を進めたい。それによって、遠隔作用説とファラデーの近接作用説との対立がどのようにして解消され、しかし新たにどのような問題を生み出していったのかを考察したい。

7.1. 光磁気効果とエーテル

トムソンは、6.1 節で引用したように、1845 年までにファラデーの力線が数学的に表現可能であると考えられるようになった。そして、その年の9月にファラデーが光磁気効果を発見したことによって、電磁気現象の媒体として弾性固体を想定し、さらに力線をその作用の軸として位置づけることが妥当であると考えられるようになった。そして、実際に電磁気的作用を弾性固体の作用として数学的・力学的に表現できたことによって、トムソンはエーテルの存在を強く意識するようになっていった。

トムソンがこのように弾性固体の作用として電磁気的作用を「表現」した論文が、1847年に発表された「電気、磁気、そしてガルヴァーニ電気の諸力の力学的表現について (On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic, and Galvanic Forces)」である。この論文でトムソンは、ストークスの弾性固体論を応用しながら、電荷、磁石、および電流の磁気作用の分布を与える偏微分方程式について論じている。

トムソンはこの論文の冒頭で、静電誘導を弾性固体論として研究するための手掛りがファラデーの誘導現象の研究によって与えられ、さらに磁気や電流の磁気作用について研究するための手掛かりが光磁気効果の発見によって与えられたと述べている。

ファラデー氏は『電気実験研究』の第11集で静電誘導の理論を発表しており、それは、導体上の電気の分布や、帯電した物体によっておよぼされる引力や斥力に結びついたあらゆる問題に対応するような弾性固体 (elastic solids) の理論の中に解決すべき課題があるという考えを示唆するものであった。磁気やガルヴァーニ電気の力を同じように表現するための糸口は、偏光に関する偏向、すなわち磁石や電磁石の力にさらされた透明な固体についてのファラデー氏の最近の発見によって与えられた。こうして私は、弾性固体の平衡の方程式について三つの異なる特殊解を見出すに至ったのである¹。

このようにトムソンは、平衡状態にある弾性固体の方程式によって電磁気的作用を包括

¹ W. Thomson, "On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic, and Galvanic Forces," *Cambridge and Dublin Mathematical Journal* 2 (1847). Reprint, *MPP*, 1:76. ここでトムソンはファラデーの誘導現象の研究に言及しているが、ファラデーは『電気実験研究』の第11集で弾性固体の理論について言及しているわけではない。そもそも、ファラデーは弾性固体という概念を用いていなかった。しかし、電磁気現象一般について、力線と近接粒子という観点から電気と磁気を包括的に論じる可能性を追求していた。そしてトムソンは、このファラデーの考え方が、弾性固体論を電磁気現象に応用する上で示唆を与えるものと考えたのである。

的に表現するために、ファラデーの研究が参考になったと述べている。そして、弾性固体として現象を表現できたことは、電気や磁気の媒体としてのエーテルが実際に存在している可能性を示すものであった。

トムソンは晩年の1896年に、フィッツジェラルド (George F. Fitzgerald, 1851-1901) に宛てた書簡の中で、このエーテルという考え方が持った誘惑の大きさについて次のように回顧している。

1846年11月28日より、電磁気学の理論については一時も安穏や幸福感を抱いたことがありません。(『数物論文 (M.P.P.)』の第1巻80ページをご覧ください。) いつの時もエーテル中毒の発作にみまわれそうで、時折、厳しく慎むことで、この主題について考えることから距離を置くようにしてきました²。

この書簡に記されている1846年11月28日とは、まさにこの「力学的表現」論文を脱稿した日付であった。50年後に書かれた回想にしては日付が具体的であるが、それほどまでに自分の意識に生じた変化が印象的だったのであろう。トムソンは、1846年の研究を通じて弾性固体という考え方を電磁気研究の基礎に据えるようになった。そして、その数学的な表現に対して物理的な根拠を求めると、エーテルの存在を意識せざるを得なくなったのである。

エーテルは、18世紀から19世紀にかけて光の波動説が有力になるにつれて、光を伝える媒質として実際に存在する可能性が強く意識されるようになった。そして、この光エーテルの存在を念頭に置いた弾性固体という概念がヤングやフレネルによって導入され、グリーンやストークスによってその数学的な研究が進められていった³。

しかし、このように光を波動として説明するためにはエーテルの存在を念頭に置かざるをえないとしても、電磁気現象を説明する上では、エーテルの存在は議論の対象から排除される傾向にあった。電気の作用については、18世紀まではエーテルやアトモスフィアなどで説明されることも多かったが、遠隔作用説の研究においては、エーテルの存在が議論に不必要な前提となったからである。その一方で、作用の媒体を粒子の存在に求める研究者たちからも、やはりエーテルは不必要な仮説であるとみなされた。この傾向は、3.5節で

² William Thomson to G. F. Fitzgerald, 9 April 1896, *Life of Lord Kelvin*, 2:1065.

³ Whittaker, *History of the Theories of Aether and Electricity*, chap. 5. ただし、光の波動説が正しいとした場合には、光行差を説明するためにいくつかの問題が生じた。光行差とは、星からの光を観測するときに、その観測者の運動に応じて光のやって来る角度が変化して観測される現象のことである。最初、この光行差という現象を発見したブラッドレー (James Bradley, 1693-1762) は、この現象を光の粒子説の立場から説明した。その後、ヤングは光の波動説の立場から、エーテルが地球の運動に対して静止していると仮定すれば、この光行差を説明できると主張した。これによって静止エーテル仮説が導入されることになる。その一方で、星からの光の屈折を考えた場合に、それが静止系での方向に従って生じているのか、それとも地球上での観測系における光行差による見かけの方向に従って生じるのかが問題になった。フレネルはこの問題を研究し、エーテルは基本的に静止しているが、物体内部では物体の運動に引きずられていると考えられるようになった。ストークスも弾性固体論において、このフレネルのエーテル理論と似たような考え方をしている。

引用したデーヴィーのエーテル批判にも端的に現れている。このようにエーテルの実在性は一般に認められていたわけではなかったため、トムソンも電磁気現象を弾性固体の作用として表現しながらも、エーテルの存在を認めることには躊躇したのである。

しかし、現象の表現を与えることができたとしても、その物理的な原因を想定することが許されないとすれば、その説明はアナロジーとしての対応関係も欠くために不完全なものとならざるを得ない。弾性固体論では弾性固体の存在が前提となっているが、電磁気現象では作用の原因が特定できないためにその前提が満たされず、アナロジーの対応関係をそこから導かれる表現の議論のみに限定しなければならないからである。

このようにエーテルの存在は極めて特殊なものであった。そのため、1884年におこなわれた「ボルティモア講義」の冒頭でトムソンは光エーテルと弾性固体との関係について説明しているが、その説明も次のように歯切れの悪いものであった。トムソンは、エーテルの性質について次のように述べている。

光エーテル (*luminiferous ether*) は、光振動 (*luminiferous vibrations*) が関係する以上、物質であると想像せざるをえないものであり、弾性固体であるかのように運動する。私は、それが弾性固体である、と言っているのではない。光振動について弾性固体であるかのように運動するということが、光の波動説の基本的な仮定なのである。

最初の困難は、克服しがたいと考えられるかもしれないが、すべての空間に充滿しながらある程度の硬さを持ち、他の天体とは相対的なあらゆる事象において、すなわち、地球が太陽のまわりを動くくらいの割合で地球はその中を動き、太陽や太陽系はそれらが空間を動くくらいの割合で、そしてあらゆる事象がその他の星々に対して、それぞれその中を動くような弾性固体はどのようにしたらあり得るのだろうか、ということであろう⁴。

このようにトムソンは、光エーテルに対して、弾性固体のようでありながら弾性固体ではないという矛盾するような微妙な説明しか与えることはできなかった。光が振動するのであれば、一般的にはその媒体の存在を想定するだろうが、そのような媒体が空間に充滿しているとしたら天体などの運動を妨害してしまうことになる。

もっとも、エーテルの存在をうまく説明できないのであれば、可感ではないエーテルそのものを論じることは保留として、その前提から得られる数学的關係だけに議論を限定することも考えられる。例えば 2.1 節で論じた実証主義の立場では、そのように議論が進められた。しかし、トムソンがエーテルそのものを物理的に説明しようとしたことは、この「ボルティモア」講義で意図的に重視されたことであった。トムソンは分子論に基づく力学的モデルを導入することで、エーテルという可感ではない対象の理解を与えようとしたのである。

⁴ *BL*, 12.

そもそも、この「ボルティモア講義」とは、トムソンがジョンズ・ホプキンス大学でおこなった集中講義であり、その内容は、光の波動説を分子動力学 (molecular dynamics) の観点から解説するものであった⁵。この分子動力学とは、気体分子運動論を発展させた理論であり、そこでは光の波動が光エーテルの力学的な作用によって伝わるのが前提とされていた⁶。そして、この講義では、マクスウェルが 1873 年に出版した『電気磁気論 (*A Treatise on Electricity and Magnetism*)』が数学的形式の議論に終始していたことへの批判の意味を込めて、物理的実体ないし力学的モデルを重視した議論が展開された⁷。なお、この講義がおこなわれた 1884 年は、ヘルツ (Heinrich R. Hertz, 1857-94) によって電磁波の存在が実験的に確認される 4 年前にあたる年であった。

このマクスウェルの研究に対するトムソンの姿勢は、1828 年にポアソンが「解析力学」に対して「物理力学」の重要性を主張した姿勢と近いものであったと言える⁸。第 8 章で論じるように、マクスウェルは、ファラデーの力線を非圧縮性流体の圧力や速度とのアナロジーによって論じ、さらに分子渦モデルを導入して電磁誘導現象なども説明していった。しかし、それらの研究を発表した後は、アナロジーやモデルを議論の中から意識的に排除し、数学的な議論のみによって光が電磁気現象であると解釈できることを示していった⁹。トムソンは、このマクスウェルの数学的かつ抽象的な議論だけでは説明が不十分であると考え、その方法への批判を念頭に置いて、いわば「物理力学」の立場からこの「ボルティモア講義」の内容を構成したのであった。

しかし、エーテルそのものについての説明をおこなうことは容易なことではなかった。

⁵ マイケルソン (Albert A. Michelson, 1852-1931) とモーリー (Edward W. Morley, 1838-1923) は、このトムソンの「ボルティモア講義」に参加したことをきっかけとして、当時有力視されていた静止エーテル仮説を検証するための実験を 1887 年におこなった。マイケルソンは、この 1887 年の実験と同様の実験を 1881 年にもおこなっており、否定的な結果しか得られていなかった。しかし、1884 年にトムソンの「ボルティモア講義」に参加したことをきっかけとして、モーリーとともに再び検証実験に着手することにしたのであった。静止エーテルを介して進む光は、地球上の観測系では地球の公転方向とその垂直方向とで相対速度が変わり、それに応じて一定の距離を進むために要する時間も変わると考えられる。そこで、同じ光源から発せられた光をその二方向に分岐させ、それぞれ同じ距離を進んだ後に一つに合わせると、この時間の違いによる位相のずれから干渉が生じると予想される。しかし、入念な検証にもかかわらず、そのような干渉は観測されずに、やはり検証実験は失敗に終わることになる。ただし、この実験は静止エーテル仮説の実証には失敗したものの、後になってアインシュタインの光速不変の原理を実証し、静止エーテル仮説を棄却するための決定実験として再解釈されることになった。ファラデーの光磁気効果の実験は、トムソンにエーテル仮説を確信させるきっかけになったという点において、マイケルソン＝モーリーの実験とは歴史的に逆の役割を果たすことになったと言えるだろう。

⁶ この「分子動力学 (molecular dynamics)」は、5.2 節で言及したアンペールの「分子力学 (mecanique moléculaire)」と類似のものである。7.5 節で論じるように、トムソンは *Dynamics* を「力学」の意味で用いており、したがって、この *molecular dynamics* も「分子力学」と訳すこともできる。もっとも、トムソンは、後述する渦原子として分子内部に電流を想定していたため、アンペールの分子の外側に電流を想定する理論に対しては批判的であった。(Smith and Wise, *Energy and Empire*, 219-21; Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 270.)

⁷ Harman, “Mathematics and Reality in Maxwell’s Dynamical Physics,” 268-9. なお、トムソンは、ボルティモア講義の最初で、マクスウェルの「光の電磁気理論」をフレネルの力学的な運動の理論からの「後退 (backward step)」であると批判している。(BL, 12.)

⁸ ポアソンの主張の内容は 1.3.3 節を参照せよ。

⁹ Harman, “Mathematics and Reality in Maxwell’s Dynamical Physics,” 270.

そもそも、エーテルは通常の物質には見られないような極端な性質を持っていると考えられていたが、エーテルそのものが可感ではないため、その性質を直接的に確認することはできなかった。そのため、エーテルの性質については光や物質のふるまいなどを通じて間接的に推測することしかできず、前述の引用のように比喩的で曖昧な説明を与えることしかできなかったのである。

その一方で、このようにエーテルの存在は不確実であったが、少なくともその中を動く物体の速度によって抵抗が大きく変化する性質は持っていなければならないと考えられていた。通常の物体に対しては極めて柔軟で抵抗があってはならないが、抵抗がなくなると復元力も生まれなくなり、光の振動を担うことはできなくなるからである。

このエーテルの柔軟性と弾性との問題を考える上で参考となったのが弾性固体のふるまいであった。トムソンは、弾性固体を代表する物質として靴用ワックス (shoemaker's wax) を例にあげている。トムソンによれば、このワックスは自由自在に変形することができ、音叉のように振動させることもできる。また、比重の小さなコルクはこのワックスの中をゆっくりと浮かんでいき、比重の大きな鉛はこのワックスの中をゆっくりと沈んでいく。すなわち、ワックスは振動に必要な弾性を持つと同時に、物質がその中を移動していくこともできる。これらの性質は、高速でおこなわれる光の振動と、その振動に比べると遅い天体の運動に対応づけられるものであった。また、エーテルは、すべての空間に充満している基本的な存在であるはずなので、微細で単純なはずだと考えられた。ワックスの持つ柔軟性は、このようにエーテルが空間に充満するために必要となる性質としても解釈された。このようにワックスの持つ弾性固体としての性質は、実在物を想定しながらエーテルの性質を説明する上で都合なものであった¹⁰。

トムソンは、これらのエーテルとワックスの関係を次のようにまとめている。

光エーテルは、極端に単純な物体のはずである。そして、それはおそらく柔らかいだろう。それは、その根源的な性質が非圧縮性であるような物体であり、一定の限度以下の時間で振動するときには確かな剛性を持つが、十分な時間をかけて力がかけられ続けるときには、ワックスのような物体に見られるような絶対的な柔軟性を持っているのだと考えられるだろう¹¹。

このように、エーテルの性質は、ワックスないし弾性固体とのアナロジーによって表現された。ただし、もちろんワックスが実際に光や電気の媒体になっているわけではない。そのため、このアナロジーはあくまで「力学的表現」に過ぎなかった。そして、そのような「表現」を与えることが、まずはトムソンの研究目的になっていたのである。トムソン

¹⁰ BL, 12-4.

¹¹ BL, 14. ここで非圧縮性の弾性固体を想定した理由は、光が縦波 (longitudinal wave) ではなく横波 (transverse wave) であると考えられたからである。縦波だと疎密波として伝わるので、媒質が圧縮性を持つことになる。横波だと摩擦を考えることで、弾性固体を粘性流体と同じように扱うことができる。

は、1847年の「力学的表現」論文の執筆を終えた1846年11月28日に、ついに電気と磁気および電流の力に対して数学を用いた「力学的＝運動学的 (mechanico-cinematical) 表現」を与えることに成功したと興奮気味に記している¹²。

ここでトムソンが述べている「運動学」とは、2.3節で論じたように運動の原因に言及することなく、その構造を知ることを目的とする分野であった。トムソンは、電磁気作用の原因は不確かであれ、この論文でその構造を数学的に表現することには成功したと判断して、「力学的」という言葉に加えて「運動学」という言葉を用いたのであろう。

2.3節で論じたように、ヒューエルは電磁気学を「力学的＝化学的 (mechanico-chemical) 科学」と分類していた。そして、ファラデーはその化学の側から電磁気現象を説明しようとしたと言える。それに対してトムソンは、ストークスの弾性固体論に基づいてファラデーの実験結果や力線という考え方を参考にしながら、数学ないし力学の側から電磁気現象を研究しようとしたのである。この弾性固体論による「力学的表現」に対して、電磁気学研究としての実験的な裏付けを与えたのが、ファラデーの光磁気効果の発見とその作用についての力線による説明であった。

トムソンは、1847年の論文の執筆途中にあたる1846年10月31日に、ファラデーの光磁気効果の発見が「磁気と電気が弾性固体のひずみ (straining) によってある特定の方法で表現されうるといふ諦めざるを得なかった私の考えに立ち戻る」¹³きっかけを与えたと記している。そしてさらに、その弾性固体のひずみが磁気を「軸 (axis)」として回転方向の作用を生み出していると考えようになったとも記している¹⁴。トムソンは、晩年の1898年11月28日にフィッツジェラルドに宛てた書簡の中でも、力線を回転軸と考えるようになった経緯を次のように述べている。

ファラデーの光磁気についての1846年の発見によって、年末までには磁力の線が何らかの回転軸であることを確信していました。そしてそれ以来ずっと、これを確かだと感じています¹⁵。

ここでの「1846年の発見」とは、ファラデーが光磁気効果を発見した「1845年」の誤りであろう。トムソンは、1845年の年末までに光磁気効果が磁力線を軸とする回転作用であると考えようになり、その確信を踏まえて1847年の論文を執筆したのである。この記述からもわかるように、トムソンは光磁気効果を、物質の介在する間接的な作用ではなく、磁力線が軸となって偏光面を回転させる、磁気の直接的な作用であると考えたのであった。

¹² Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 1:197. なお、トムソンは、この1846年11月28日以前にも静電気現象に対して「力学的＝動力的 (mechanical-dynamical)」な表現を与えようとしたが、失敗の繰り返しであったと述べている。(Ibid., 2:1062-3.)

¹³ Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 1:197.

¹⁴ Ibid.

¹⁵ “Copy of Letter signed ‘Kelvin’ from William Thomson to G. F. Fitzgerald, 28 November 1898,” MS Kelvin F17, Glasgow University Library.

その一方で、6.4 節で論じたように、1846 年にはファラデー自身も力線とエーテルとを関連づける考察を發表している。すなわち、トムソンの力線によるエーテル解釈はファラデーとも共通するものであった。こうして、ファラデーもまたトムソンの研究を評価するようになったのである。

以上のように、トムソンの電磁気学研究は弾性固体論とファラデーの理論に強い影響を受けたものであった。ただし、トムソンはファラデーの力線という考え方を検討する以前に、電磁気現象が弾性固体の「ひずみ」として解釈できる可能性をあらかじめ検討していた。これは、トムソン自身が 1846 年 10 月 31 日に記していた通りである。すなわち、ファラデーの理論はトムソンにとって重要であったとは言え、それはトムソンにとって電磁気現象を研究する上での出発点ではなかった。そしてトムソンは、弾性固体論について検討する以前の 1840 年代前半に、フーリエの熱伝導の理論を電気現象へと応用する研究に取り組んでいた。そうすると、ファラデーの理論と弾性固体論との関係も重要であるが、まずはこのフーリエの理論との関係を明らかにしておく必要があるだろう。

そこでまずは次節で、このフーリエの熱の理論を応用したトムソンの電気学研究とファラデーの理論との関係について論じることにはしたい。

7.2. フーリエの流束とファラデーの力線

前節で述べたように、ウィリアム・トムソンの電磁気学研究の基礎となったのは、1840 年代前半におこなわれたフーリエの熱の理論を応用した電気研究であった。トムソンは、若干 15 歳であった 1840 年 5 月 1 日からフーリエの『熱の解析的理論』を学び始め、その理論の内容に傾倒していった¹⁶。後にトムソンは、フーリエの研究を学ぶようになったきっかけを次のように回想している。

そもそも私がこれらの問題に傾倒することになった始まりは、1839 年にニコルの自然哲学クラスのセミナーに参加して以来、フーリエの壮麗さや詩的さにこの上なく感嘆するようになったことにあります。ニコルは数学者ではありませんでしたし、フーリエを実際に読んだとも明言してはいませんでした。彼の偉大さに気づいて彼がやろうとしていたことを理解し、私たちにそれを認めさせることはできました。私は、自分がフーリエを読めると思うかどうかをニコルに尋ねました。彼は「おそらく」と答えました¹⁷。

¹⁶ この 1840 年 5 月 1 日は、トムソンが地球の形状についての論文でグラスゴー大学から賞を与えられた日でもあった。トムソンは、その受賞後に大学図書館からフーリエの『熱の解析的理論』を借りたのであった。(Ibid., 1:9-10, 13-4.)

¹⁷ Ibid., 1:14.

このようにトムソンは、グラスゴー大学の天文学欽定講座担当教授であったニコル (John Pringle Nichole, 1804-59) の紹介を受けてフーリエの熱の研究を学び始め、その内容を高く評価するようになっていった。

当時のイギリスでは、フーリエの研究が十分に受け入れられていたわけではなかった。例えば、エディンバラ大学の数学教授ケランド (Phillip Kelland, 1808-79) は、熱伝導についての先行研究をまとめるにあたって、フーリエの研究には否定的な評価を下していた。ケランドは、ラプラスやラグランジュが「力学的=分子論的」な観点からフーリエの「分析的=実証主義的」な研究を批判したように、ラプラスやポアソンのように熱現象を分子論的な中心力に還元して考えなければ熱と温度を混同することになり、熱伝導を正確に論じることができないと考えたのである¹⁸。

フーリエの研究を評価していたトムソンは、ケランドがこのようにフーリエの研究を批判し、とくにその著書の中で、フーリエの研究をその「ほとんどすべてが誤りである」¹⁹と否定したことに衝撃を受ける。そして、ケランドの誤りを指摘してフーリエを擁護するために、その1840年7月に論文「三角級数における関数のフーリエ展開について (On Fourier's Expansions of Functions in Trigonometrical Series)」を執筆したのであった²⁰。

トムソンは、この論文を端緒に、フーリエの熱の理論を応用して電磁気現象の研究を進めていくことになった。トムソンは、1842年に論文「均質固体中の熱の一樣運動とその電気の数学的理論との結びつきについて (On the Uniform Motion of Heat in Homogeneous Solid Bodies, and its Connexion with the Mathematical Theory of Electricity)」を發表し、フーリエの議論を踏まえながら熱と電気の「結びつき」について論じている。後年、トムソンは1854年になって、この1842年の「均質固体」論文と、後述する1845年の「静電気の基本法則について (On the Elementary Laws of Statical Electricity)」²¹の二本の論文について、「それらがファラデーによって見事なまでに実験的に調べられた力線の特性についての十分な理論 (full theory) を与え、「力線の伝導力 (conducting power)」という言葉にその観念が含まれているように、熱伝導の理論とのアナロジーを完成させた」²²と述べている。すなわち、

¹⁸ Kelland, *Theory of Heat*; Kelland, "On the Present State of our Theoretical and Experimental Knowledge," 5-8; Wise, "Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I," 1981, 33-4; Smith and Wise, *Energy and Empire*, 166-8; Crosland and Smith, "Transmission of Physics from France to Britain," 52-5.

¹⁹ W. Thomson, "On Fourier's Expansions of Functions in Trigonometrical Series," in *MPP*, 1:3; Kelland, *Theory of Heat*, 64.

²⁰ Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 1:17-9. この論文の目的は、フーリエ級数における正弦関数と余弦関数との区別を検証することにあった。トムソンは、級数展開をするときの積分区間 $[0-2\pi]$ をサインとコサインの対称性を考えて $[0-\pi]$ で扱うことによって、ケランドの結論を避けることができるとしている。(W. Thomson, "On Fourier's Expansions of Functions in Trigonometrical Series," in *MPP*, 1:1-6.) なお、この論文は、家族旅行で滞在していたドイツのフランクフルトで1840年7月に書きあげられた。そして、内容に対する配慮から、1841年5月に『ケンブリッジ数学雑誌 (*Cambridge Mathematical Journal*)』に匿名で掲載された。

²¹ W. Thomson, "On the Elementary Laws of Statical Electricity," *Cambridge and Dublin Mathematical Journal* **1** (1846). Reprint, *RPEM*, 15-37. この論文は、まずはフランス語で執筆され、1845年にリウヴィルが編集する雑誌に掲載された。(W. Thomson, "Note sur les lois élémentaires de l'électricité statique," *Journal de mathématiques pures et appliquées* **10** (1845): 209-22.)

²² *RPEM*, 1n. なお、ファラデーは「伝導力 (conducting power)」という概念を通じて流れの「量」と勾配

1840年代前半にトムソンが研究を進めていたフーリエの理論には、すでにファラデーの力線との数学的に同等な内容が含まれていた。

この「力線の伝導力」については8.1節で改めて論じるが、熱とのアナロジーで「力線の特徴」を論じていくにあたっては、それぞれの作用の対応関係が問題となる。トムソンが熱と電気のアナロジーの基礎としたのは、流束についてのフーリエの議論であった。

フーリエは、『熱の解析的理論』の中で、熱の流束 (flux) を単位時間あたりの熱量 (quantités des chaleur) の変化と定義していた。そして、熱が等速運動していることを前提として、熱の流束 F は、ある固体した二つの面の温度差をそのあいだの距離で割った値から (7.1) 式のように求められると考えた²³。ここで、 a と b はそれぞれ与えられた固体の底面と上面の温度、 e はその両面のあいだの距離、 z は両面のあいだの任意の断面の底面からの距離、そして K は物質によって異なる熱の伝導率を表している。

$$F = K \frac{a - b}{e} \quad \text{あるいは} \quad F = -K \frac{dv}{dz}, \quad v = a + \frac{b - a}{e} z \quad (7.1)$$

この (7.1) 式では、係数 K によって熱の流束と温度勾配という物理的に異なる二つの量に関係づけられている。この定数 K は媒質に依存する量であり、その値によって熱と温度との関係が決まってくるため、熱の拡散を論じる上では極めて重要な意味を持っている²⁴。その一方で、適当な単位を取ってこの K を 1 にすれば、(7.1) 式はいわゆる $F = -\text{grad } V$ の形式に帰着でき、熱の流れを温度勾配と同等のものとして扱うことができるようになる。このように異なる物理量が等価なものとして記述されてしまうことは、ラプラスやポアソンによって区別が不十分であると問題視されていた点でもあった²⁵。

この点について、フーリエは熱の流れと温度勾配とを経験的に区別していたが、トムソンは電気とのアナロジーを考えるにあたって、むしろこの伝導率の持っていた役割を積極的に省略し、流れと勾配とを同等のものとして位置づけた²⁶。トムソンは研究ノートの中で、この係数 K (トムソンにおいては小文字の k) の扱いについて次のように記している。

k を任意の点の誘導を受けやすい物質のかたまり (mass) の任意の点における誘電容量 (熱とのアナロジーの問題では伝導の力能) としよう。そして k を、この物体で占められていない空間のすべての点で 1 に等しい関数と考えよう²⁷。

ないし緊張の「強さ」を関係づけていたが、後述するように、トムソンはその区別を無視することになった。(Wise “Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I,” 1981, 42.)

²³ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 54.

²⁴ Wise, “Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I,” 1981, 53.

²⁵ Ibid., 39.

²⁶ Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 41.

²⁷ W. Thomson, “30 September 1847,” NB34, MS Add. 7342, 83.

すなわち、電磁気の誘導作用では空間を伝わる作用を考えることになるため、トムソンは空間における係数 K を 1 に規格化することで、フーリエの熱伝導方程式を簡略化したのであった。そして、この流れと勾配との同等性の下で、フーリエの流束とファラデーの力線とが数学的に関連づけられるようになる。

それでは次に、トムソンの議論を具体的に検討していこう。この熱の流れと電気とのアナロジーの議論は、前述のように 1842 年の「均質固体」論文で展開された。トムソンは、議論を始めるにあたって、熱を帯びた物体の表面は等温になっており、表面から外の温度は表面の形状と温度に依存すると考えた。そうすると、表面の外にある任意の点の温度 v と熱源の強さ ρ_1 のあいだには、次の (7.2) 式のような関係があると考えられた²⁸。ここで $d\omega_1^2$ は表面の面積要素、 r_1 は表面からその点までの距離を表している。

$$v = \iint \frac{\rho_1 d\omega_1^2}{r_1} \quad (7.2)$$

熱の作用をこの (7.2) 式のように定式化することは、物体表面に分布している電荷の作用に対しても応用できる。トムソンは、(7.2) 式を電気現象におけるポテンシャルの式と解釈し、 ρ_1 を電気の強さと読み替えることで電気の引力を次のように与える²⁹。

$$-\frac{d}{dx} \iint \frac{\rho_1 d\omega_1^2}{r_1}$$

さらにトムソンは、フーリエの議論を参考にしながら、流束についての考察を進めていく。例えば、フーリエの (7.1) 式からすると、等温面では温度 v が一定であり、表面に平行な成分についての温度変化は生じない。そのため、流束を考える上では、次のように表面に対する法線 n の方向に生じる温度勾配のみを考えればよいことになる。

ρ_1 が電気の強さではなく熱の流束を表すとするならば、 $-dv/dn$ は変数 n の極限における熱の流束の合計を表し、この流束の方向は n に沿っており、等温面に垂直になるだろう³⁰。

ここで、温度 v の法線方向の微分は温度勾配に他ならない。このように、トムソンはフーリエと同じように、流束を温度勾配と関係づけている。その結果、流束は、熱の流れの重ね合わせとして、数学的な量として与えられることになる。例えば、表面付近の熱の流

²⁸ W. Thomson, "On the Uniform Motion of Heat in Homogeneous Solid Bodies, and its Connexion with the Mathematical Theory of Electricity," *Cambridge and Dublin Mathematical Journal* 3 (1842). Reprint, *RPEM*, 2-3.

²⁹ *Ibid.*, 4. トムソンは、1842 年の時点で、この形式の方程式に対してグリーンが「ポテンシャル」と名づけていたことを知っていた。(W. Thomson, "Propositions in the Theory of Attraction," in *RPEM*, 126.)

³⁰ W. Thomson, "On the Uniform Motion of Heat in Homogeneous Solid Bodies," 4.

束の方向と大きさは次のように与えられた。

表面内部には熱源がないので、表面にある熱源からは内部に流れ込むのと同じだけの熱が表面を横切って内部から流れ出るはずである。そのため、もとの表面からその内側に近接している等温面への熱の流束の合計はゼロ (nothing) である。その内側の表面からさらにその内側に近接している等温面への熱の流束もゼロとなり、それはもとの表面内部にある物体全体に言える³¹。

そして、トムソンはこの考察を進めて、表面内部の温度は一定であり、その温度は表面温度 v_1 に等しくなると結論づけた。すなわち、実際には流入と流出が生じていたとしても、流束はそれらの流れの数学的な量の総和として与えられた³²。

このように、流束は実体のある流れそのものではなく、力ないし勾配の数量的な重ね合わせとして与えられた。そもそも、時間的な変化を考えていない時点で、熱の「流れ」という意味は無効化されている。ポテンシャルの勾配としての力は、つり合って平衡状態にある場合、その合力はゼロになる。熱の流束も、これと同じ意味において、温度勾配と数学的に等価なものだとみなされたのである³³。そして以上より、トムソンは、物体表面における温度勾配と流束との関係を次式のように導いている³⁴。ここで、変数 ρ は熱の流束を 4π で割った量である。

$$-\frac{dv}{dn} = 4\pi\rho$$

この式では、(7.2) 式で熱の強さを表していた ρ に対して流束としての意味が与えられている。そして、トムソンも流束を、あくまでフーリエと同じように単位時間当たりに変化する熱量と考えており、流れの空間的な移動は考えていない。そして、フーリエの (7.1) 式と比較すると伝導率 K が 1 になっていることがわかる³⁵。すなわち、熱の流束は、実体をとまなう流れではなく、温度変化を生じさせる原因としての熱の強さとして、その変化の方向と大きさを考えるための数学的な概念となっているのである³⁶。

³¹ Ibid., 3-4. 物体内部の粒子に熱損失がある場合に物体から放出される熱の流束の合計は、ポアソンが証明したように各粒子が失った熱の総量に等しくなる。(W. Thomson, "Propositions in the Theory of Attraction," *Cambridge Mathematical Journal* 3 (1843). Reprint, *RPEM*, 135.)

³² この議論は、熱と力のアナロジーが前提となっており、証明になっているわけではない。(Buchwald, "William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics," 113.)

³³ ワイズは、トムソンが温度勾配を流束と同一視し、熱の流れをその流束の議論に縮約していると指摘している。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 41.)

³⁴ W. Thomson, "On the Uniform Motion of Heat in Homogeneous Solid Bodies," 5-6. この場合は表面からの放射を考えているため、フーリエが固体の二断面間でおこったようには考えられない。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 35-6.)

³⁵ Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 36.

³⁶ ワイズは、トムソンが力を「押す」という力学的作用として考えていたため、熱現象についての力とは熱ではなく温度勾配を意味することになったと説明している。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and*

そして、トムソンはこの熱の流束の議論とのアナロジーを考えながら電気現象の分析を進めていく。トムソンは、1845年の「静電気の基本法則」論文で、熱の流束と電気のと力の対応関係を次のようにまとめている。

「これらの条件による」と、「分布している熱源」の問題は、AとBの面で「平衡状態」で分布している「電気」の問題と数学的に同等である。熱の場合には、任意の点における「恒常的な温度」が、電気の体系においてはそれに対応する場所の「ポテンシャル」に取って代わることで、「熱の合成的な流束 (resultant flux)」は帯電した物体の「合成的な引力 (resultant attraction)」に方向と大きさにおいて置き換わるのである³⁷。

このように、熱源と電荷を数学的に同等であると考え、温度はポテンシャルと等価とみなされ、「流束」は電気の「力」を表すことになる。

もっともこのアナロジーは数学的な形式を表現するためのものであり、トムソン自身、流束が何らかの実体の流れを表す概念であるとは考えていなかった。トムソンは、とくに電磁気現象を論じる上で、この流束という概念を実在物が担っていると想定されがちであることについて、次のように注意を促している。

「流束 (flux)」という言葉が、同じ方程式が用いられるにせよまったく異なる物理的主体のたんなる類型 (analogue) としてではなく、あたかも電気や磁気の力を備えた物理的実在 (physical reality) であるかのように用いられることが多く、私はその有害なほどの誤用には反対です。(1842年2月初版の)「静電気と磁気」の第4、5、および6節をご覧ください³⁸。

ここで言及されている「静電気と磁気」とは、まさにこの1842年の「均質固体」論文のことである³⁹。流束は、異なる物理現象において共有されうる形式上の関係ないアナロジーを表現するための手段に他ならないものであった。そのため、流束は、何らかの実体をともなう物理的な流れとして意味づけられていたわけではなく、あくまで現象を分析するための数学的な表現方法として用いられていたのである⁴⁰。

Magnetism, 1977, 74.) しかしその一方で、熱源を考えた場合には、熱現象を温度勾配だけでは説明できないため、流束という概念を必要とした。このように、一つの現象を説明するために、勾配と流れという二重の意味が導入されたことが、新しい概念を生み出す「創造的融合 (creative conflation)」になったのだと説明している。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 6.) もちろん、トムソン自身はこの二重性を意識して導入したわけでも、逆に問題視していたわけでもない。だからこそ「創造的融合」を生み出すことができたとも言える。なお、熱の流れは等温面と垂直に交わり、これは等電位面と力とが垂直に交わることに対応している。これが、熱と電気とのアナロジーにおける重要な共通点となっている。

³⁷ W. Thomson, "On the Elementary Laws of Statical Electricity," in *RPEM*, 28-9.

³⁸ William Thomson to G. F. Fitzgerald, 29 April 1896, *Life of Lord Kelvin*, 2:1071.

³⁹ *MPP*, 1:vii.

⁴⁰ また、トムソンはフーリエとは異なり帯電面の厚みを考えていないが、このことも、トムソンが現象を

もつとも、ここまでは均質固体が前提とされているとはいえ、空間を伝わる電気現象についての議論であった。しかし、空間ではなく物質を伝わる場合について考えると、係数 K は1ではなくなり、その値は物質に応じて変化することになる。このことは、1837年にファラデーが報告していたように、比誘電容量 (specific inductive capacity) の異なる媒質では電気の力の大きさも変化することに対応する。そして、電気の力の大きさが変化することは、流束の大きさが変化することになる。しかし、異なる物質の接続面で流れが湧き出したりたまっていったりするわけではないだろう。そうすると、流束が実体をともなう流れであると考えた場合には、その実体が保存されないことになる。そのため、トムソンは均質固体を議論の対象とし、さらに流れの実体を想定しないことによって、この問題を回避したのであった⁴¹。

このアナロジーとその物理的な意味の関係については、フーリエも流束を何らかの流体として解釈することはできないと考えていた。例えばフーリエは、熱と弾性流体とのアナロジーを次のように否定している。

熱の効果は、分子が静止しているような弾性流体 (fluide élastique) の効果と比較することは少しもできない。私たちがこの著作において明らかにし、あらゆる実験によって確かめられた伝搬 (propagation) の法則をこの仮説から推論しようとしても、それは無駄であろう。熱の自由な状態というものは光のそれと同じである。したがってその元素のふるまい方も、気体の状態にある物質のそれとはまったく異なるのである。熱は真空中でも、弾性流体においても、液体や固体のかたまり (masses) においても同じようにふるまい、そこでは輻射の道すじを通して (par voie d'irradiation) 伝わるだけであるが、その感覚上の効果は物体の性質に応じて異なるのである⁴²。

すなわちフーリエは、熱は実際の流体のように独立して移動しているのではなく、あくまでその熱を媒介している物質の分子の作用であると考えた。熱があたかも移動しているように観察されたとしても、それは光と同じように、分子によって生み出された「自由な状態」に過ぎないと考えたのである。フーリエは、この分子の作用について次のように述べている。

したがって伝送 (transmission) の様式は、その原因の本性についてのあらゆる仮説とは独立に確信を持って知られているし、異なる二つの観点から考察できるものではない。すぐ隣への伝達 (communication) は、すべての方向にもたらされ、不透明な液体や流体では極めて近接している分子のあいだでしか起こらないということは明らかで

より数学的に考えていたことを示している。Ibid., 45-48; W. Thomson, "Demonstration of a Fundamental Proposition in the Mechanical Theory of Electricity," *Cambridge Mathematical Journal* 4 (1845). Reprint, *RPEM*, 103.

⁴¹ Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 35.

⁴² Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 37-8.

ある⁴³。

ここでは不透明な媒体について分子の作用が想定されているに過ぎず、ガラスのような透明な媒体について論じているわけではないが、フーリエは基本的に熱を近接する分子の作用として考えていた。そしてフーリエは、結果は極めて複雑になるだろうが、分子の作用を積分することによって流束の式が導出できるはずだと述べている⁴⁴。なお、2.1節で論じたように、フーリエは、熱の効果が力学的には説明できないと述べていた。すなわち、フーリエは、熱の作用を流体の力学的なふるまいとみなすことに反対し、あくまでその媒体となっている分子の近接作用として理解しようとした。このフーリエの理解は、エーテルやアトモスフィアを想定せずに、電気的作用をあくまでそこにある物質粒子に帰したファラデーの理解と共通するものである。

そしてトムソンも、1845年の論文で、電気現象が遠隔作用であると思われる場合であっても、熱伝導の場合と同じように、近接粒子の作用である可能性が高いと述べていた。

そのような遠隔的な力が、まったくのところある中間媒質の近接粒子の作用によって生じていることが判明する可能性は疑いえず、これとのアナロジーとして、同じ法則にしたがう一定の効果が粒子から粒子へと疑いなく伝わっていく熱の場合がある⁴⁵。

このようにトムソンも、熱にせよ電気にせよ、近接粒子の作用であることを想定していた。

さらに、フーリエが熱の作用を論じる上で「輻射の道すじ (voie d'irradiation)」を考えていたことも、トムソンがファラデーの「力の線 (lines of force)」をフーリエの流束とのアナロジーとして理解するための十分なイメージを与えるものであったと言える。トムソンは、流束によって導かれる線とファラデーの力線との関係を、1845年の「静電気の基本法則」論文の中で次のように述べている。

その定義された線は、それゆえファラデーが「誘導作用の曲線」と呼ぶところのものである。これらの現象が研究された実験の詳細な説明を知るためには、『哲学紀要』で発表され、彼の『実験研究』でも抜刷の形で発表されたファラデー自身の論文を参照してほしい⁴⁶。

そして、フーリエは、流束を近接する分子によって伝わる作用の道すじとして考えていたのであるから、このフーリエの考え方は、誘導現象を近接粒子の作用として説明し、力

⁴³ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 589.

⁴⁴ Ibid., 590-1.

⁴⁵ W. Thomson, "On the Elementary Laws of Statical Electricity," in *RPEM*, 37.

⁴⁶ Ibid., 30.

線によって表現したファラデーの考え方と極めて近いことがわかる。

また、このように力線を流束として理解すると、ファラデーの考察の出発点であった緊張状態という表現も流束と関連づけることができる。緊張状態は、トムソンが電気の引力についてそう定式化していたように、まさに勾配として説明されうるからである。すなわち、この緊張状態というファラデーの理解は、力線とともに流束についても同じように基礎づけることになり、そのことから、力線と流束とが同等の表現になっていることがわかる。そして、この緊張状態という理解は、8.3節で論じるマクスウェルの理論においても重要な意味を持つことになる。

さらに、ファラデーの分極という説明も、流束の作用を説明するための条件を備えていた。トムソン自身が述べているように、ファラデーやハリスの研究によって「非絶縁体の任意の点において強度が絶対的に消滅してしまうことはない」⁴⁷ことがわかっていたため、電気の作用は連続的な「流れ」として解釈することができたのである。第5章の議論の繰り返しになるが、ファラデーは、電気現象がつねに分極をともなつて生じると考えていた。ファラデーは電気の力の伝搬について次のように述べていた。

それゆえ、「誘導」は本質的に近接粒子の作用であると言えるだろう。それを媒介して、ある場所を起源として現れる電気の力は、ある距離を伝わり、あるいは保持され、そこに同じ種類で量が厳密に等しい、しかし方向と傾向が逆の力として現れる⁴⁸。

ファラデーの理論では、作用を伝える力線の両端では、符号は逆にせよ大きさは保持されており、しかも力線の作用は粒子の移動をともなうものではなかった。トムソンも1847年の「力学的表現」論文で「その境界面以外には何の力も作用していない物体」⁴⁹を考え、力の作用を考える上でその境界に接している端を考察の対象としていた。流束は実体をともなう流れではなかったが、流れである以上、途中に熱源がない空間に関しては、その最初と最後で量が保存される。そして、ファラデーの力線も、近接粒子の連続的な分極によって同じように最初と最後では量が保存される。このように分極というファラデーが重視した電気現象の特徴においても、力線は流束と同等の表現であるとみなせたのである。

このように、流束という概念を用いたフーリエの解析的方法によって、ファラデーの力線を数学的に表現するための準備が整えられた。そして、ファラデー自身も「W. トムソン教授が、静電気に適用された力線と同様の見解に言及しながら、そしてフーリエの熱の運動の法則に言及しながら、力線がクーロンの理論と数学的に同じ結果を与えると述べている」⁵⁰として、トムソンの進めた新しい数学的な研究の展開を積極的に評価している。

⁴⁷ Ibid., 19.

⁴⁸ *ERE*, 1:409, par. 1295.

⁴⁹ W. Thomson, "On a Mechanical Representation," in *MPP*, 1:77.

⁵⁰ *ERE*, 3:529, par. 3302. ファラデーは、不完全にしか内容を知らないとしながらも、ユトレヒト大学教授のファン・リース (Richard van Rees, 1797-1875) がトムソンと同様の研究を発表していることに言及している。(Ibid.; Faraday to John Tyndall, 11 November 1854, *Correspondence*, 4:798; Faraday to John Tyndall, 28

なお、先の引用でフーリエが否定していた弾性流体は、トムソンの論じていた弾性固体とは本質的に異なる。弾性固体は、それ自身が移動することはなく、あくまで作用を伝える媒体に過ぎないからである。そのため、熱が弾性流体であることを否定するフーリエの見解は、トムソンの弾性固体論を否定するものではない。

しかし、フーリエが熱の効果を力学的に説明できないと述べていたことは、トムソンの見解とは異なるものであると言えよう。7.1節で論じたように、トムソンは、光をあくまで弾性固体の力学的な作用に還元して表現しようとしていた。このフーリエとトムソンの見解の相違には、力学という学問分野に対する両者の見解の相違が反映されていると考えられる。トムソンの力学に対する見解については、力学的モデルの議論と関連づけながら、7.4節および7.5節で改めて論じることとする。

また、もう少し「流束」について厳密に分析すると、トムソンは流れと勾配とを流束という一つ概念によって理解していたため、流れとしての「量 (quantity)」と勾配としての「強さ (intensity)」や「緊張 (tension)」とを区別していなかった。これは、電気現象を荷電粒子とそれにはたらく力としてモデル化したことから、力についての量と強さという二元性を受け入れる余地がなかったためであると指摘されている⁵¹。

その一方で、ファラデーやマクスウェルは、この「量」と「強さ」や「緊張」とを区別していた。この区別は曖昧さの残るものであったが、例えば4.2節で論じたように、電気分解における「ファラデーの法則」ではこの区別が電流の量と強さの違いとして理解されており、力線の強さとその密度として理解されていた⁵²。そして、マクスウェルは力についての「量」と「強さ」の二元性を、力の場という概念で説明していくことになる⁵³。そして、このような見解の相違により、トムソンはファラデーやマクスウェルの「量」の議論を受け入れることができず、マクスウェルが流束の代わりに導入した変位電流という概念にも批判的であった⁵⁴。前述の「流束という言葉の誤用」に対するトムソンの批判は、この文脈でおこなわれたものである。このように、流束と力線とはアナロジーの関係になっていたが、その解釈は必ずしも厳密に一致していたわけではなかった。

トムソン自身は、1840年代前半にフーリエの理論を電気研究へと応用していくにあたって、ファラデーの研究を意識していたわけではなかった。トムソンがファラデーの研究を意識するのは、次節で論じるように1845年になってからである。しかし、この節で進めてきた議論から明らかなように、トムソンにとって、フーリエの熱伝導の研究はファラデーの力線に数学的表現を与えるための準備になっていた。フーリエは、熱の流束という概念を単位時間当たりの熱量の変化と定義し、トムソンは、この流束という概念を電気現象のポテンシャルの勾配と解釈した。そして、静電気現象については時間変化も考えられな

February 1855, *Correspondence*, 4:820.)

⁵¹ Wise, "Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I," 1981, 20.

⁵² *ERE*, 3:226-9, 328, par. 2866-70, 3070; Smith and Wise, *Energy and Empire*, 219-21; Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 55-7.

⁵³ 第8章の他、例えば次の文献を参照せよ。Harman, *Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, 84-7.

⁵⁴ Wise, "Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I," 1981, 19; Smith and Wise, *Energy and Empire*, 228.

ったため、この流束は何らかの実体をともなう流れではなく、あくまで数学的な表現として扱われた。そして、ファラデーが作用の原因として近接粒子の分極を想定していたことについても、流束と力線とはアナロジーの関係になっていた。

ただし、この節で論じたトムソンの研究においては、流束による表現は、あくまで静電誘導だけを対象としたものに過ぎなかった。そのため、電磁気現象を一般的に表現するためには、新しい概念を導入する必要であった。そして、この新しい概念となったのが、ストークスの弾性固体論であった。次節では、このストークスやトムソンの弾性固体論とファラデーの理論との関係について分析を進めたい。

7.3. ストークスの弾性固体論と「力学的表現」

トムソン自身が1845年の「静電気の基本法則」論文の中で指摘しているように、フランスのクーロンやポアソン、そしてイギリスのグリーンらは電気現象を数学的に説明しようとしたが、実験による検証が進むにつれてそれらの数学的理論の不十分さも明らかになっていった。トムソンは、この実験的な立場からおこなわれた数学研究批判の代表として、ファラデーやハリスの研究をあげている⁵⁵。ファラデーがクーロンやポアソンの数学的理論に対して懐疑的であったことは本論文でも繰り返し指摘してきた通りであるが、ハリスもまたファラデーと同じような見解を持っていた。ハリスは、現状でさまざまな数学的研究が試みられているものの、「計算の基礎として一般に考えられている電気作用の状態からは、極めて錯綜した方程式が引き出されることが珍しくなく、とても実用にたえない場合もある」⁵⁶と述べ、数学的な研究の不十分さを指摘していた。

5.6節で引用したように、トムソンは当初、このような態度を数学による空間表現の可能性に無知なだけであるとして軽蔑していた。しかし、ケンブリッジ大学を卒業後にパリで在外研究をおこない、リウヴィル (Joseph Liouville, 1809-82) と交流を持ったことをきっかけに、ファラデーやハリスの研究を数学的に表現するという課題に取り組むことになった⁵⁷。そして、この課題に取り組むことで、トムソンはファラデーの研究の数学的な意義を評価するようになった。また、そこから得られた考察について6.1節で引用したようにファラデーと書簡でやり取りしたことが、結果的にファラデーが光磁気効果を発見するきっかけにもなった。

⁵⁵ W. Thomson, "On the Elementary Laws of Statical Electricity," in *RPEM*, 16-8.

⁵⁶ Harris, "On Some Elementary Laws of Electricity," 245.

⁵⁷ トムソンは1845年1月30日よりパリのコレージュ・ド・フランス (Collège de France) のルニョー (Henri V. Regnault, 1810-78) の下で在外研究をはじめており、1845年3月26日に、ファラデーが遠隔作用説に反対していることについてリウヴィルと議論し、ファラデーの理論についての論文を執筆して送付することを約束する。この論文を英語で加筆修正したものが前述の「静電気の基本法則について」である。トムソンはこのときに、パリから父親に宛ててファラデーとハリスの研究論文のリストを届けてくれるよう依頼しており、このことから、ファラデーやハリスの研究を実際に検討し始めたのは1845年に入ってからであると考えられる。(William Thomson to James Thomson, 30 March 1845, *Life of Lord Kelvin*, 1:128.)

このトムソンの研究成果は、フランス語で発表されるとともに英語でも書き改められて、前述の論文「静電気の基本法則」として発表された。後にトムソンは、この論文の内容とファラデーの誘電体の議論に言及しながら、電磁気現象の法則性について次のように述べている。

磁気と電気の極性の物理的状況は異なるが、現象の実際的な法則は同じであり、それゆえ数学的な理論も同一であるように思われる。どちらの問題も、「極の力の数学的理論」と呼ばれうる、物理数学のとても重要な一部門の例としてとらえられる⁵⁸。

このように、1845年の論文では、物理的な原因や効果は異なるにせよ、作用の形状を表現するための具体的な数学的形式は共通していると考えられた。そして、その共通性の根拠とみなされたのが、電気と磁気のどちらもが有している極性という特徴であった。そこでトムソンは、電気や磁気の力を表現するための新たな数学的理論を模索することになった。

さらにトムソンは、電磁気現象に対するファラデーやハリスの説明とクーロンの逆二乗則を発展させた数学的なポテンシャル理論との同等性を示そうとした⁵⁹。この研究のとくに磁気についての考察は、7.1節で引用したように、ファラデーの発見した光磁気効果が糸口となって進められたものである。そして、このトムソンの研究が、1847年に前述の論文「電気、磁気、そしてガルヴァーニ電気の諸力の力学的表現について」として発表された。

この1847年の論文は、1845年の論文「静電気の基本法則」と同じく電磁気現象を数学的に記述することを目的としていた。しかし、この二つの論文で前提とされる物理的なイメージは大きく異なっていた。1845年の論文は、7.2節で論じたように、トムソンが1842年に発表したフーリエの熱の流れの研究を静電気現象に応用したものであった。その一方で、1847年の「力学的表現」論文は、ストークスの弾性固体論を応用したものであり、その議論の対象も、電気と磁気、そして電流の磁気作用へと拡大された。トムソンは、このように議論の対象を拡大するために、1845年の論文では拡散方程式を用いたが、1847年の論文では弾性固体の波動方程式を用いた⁶⁰。

それでは、この1847年の論文におけるトムソンの議論を具体的に検討していくことにしよう。2.2節でも説明したように、フーリエは『熱の解析的理論』において、均質な固体内の温度分布を、温度 v 、熱伝導率 K 、熱容量 C 、密度 D として (2.1) 式のように与えてい

⁵⁸ W. Thomson, "A Mathematical Theory of Magnetism," in *RPEM*, 351.

⁵⁹ 実は、グリーンが1828年にトムソンの1842年の研究と同様の研究を発表していた。しかし、トムソンがグリーンの研究を実際に検討したのは1845年になってからのことであった。(Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 1:45, 113; *RPEM*, 126n.) トムソンは、パリでの在外研究の直前にグリーン論文を入手し、その内容を検討している。グリーンは流れを考えていたわけではなかったが、巨視的な観点から境界条件を取り扱い、ラプラスの変数 V を「ポテンシャル」と名づけた。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 33.)

⁶⁰ ストークスの方程式には圧力の微分の項が含まれるため、厳密な分類での「波動方程式」ではない。

た⁶¹。この式を再掲しておこう。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K}{C \cdot D} \left(\frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} + \frac{d^2v}{dz^2} \right)$$

この方程式は、時間については一階微分になっており、温度が時間とともに空間内に均一に広がっていく様子を表している。

これに対して、ストークスは時間についての二階微分の方程式を与えている。ストークスは、1845年4月に「運動している流体の内部摩擦と、弾性固体の平衡と運動の理論について (On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids)」と題する論文を発表した。この論文で、ストークスは「あらゆる連続的な方法で動く無限個の点で満たされた空間、あるいは空間のある部分」⁶²を仮定する。そして、それらの点の微小変位 (α, β, γ) が満たす運動方程式を、圧力 p 、密度 ρ 、および微小変位 $\alpha = kx$ が圧力 Bk によるとした場合の定数 B とし、さらに m を比熱、 A を圧力の係数として、次の (7.3) 式および (7.4) 式を導出した⁶³。ここで (7.3) 式は微小変位の x 成分についての方程式であり、 y および z 成分についても同様の方程式が与えられた。

$$\rho \frac{d^2\alpha}{dt^2} - \frac{dp}{dx} + B \left(\frac{d^2\alpha}{dx^2} + \frac{d^2\alpha}{dy^2} + \frac{d^2\alpha}{dz^2} \right) = 0 \quad (7.3)$$

$$p = -mA \left(\frac{d\alpha}{dx} + \frac{d\beta}{dy} + \frac{d\gamma}{dz} \right) \quad (7.4)$$

さらに、エーテルのように横振動を生じる媒質を非圧縮的であると仮定すると、(7.4) 式の係数 $-mA$ は無限大になる。そのため、圧力 p の値を有限に保つためには、次の (7.5) 式が成り立つはずであると考えられた⁶⁴。

$$\frac{d\alpha}{dx} + \frac{d\beta}{dy} + \frac{d\gamma}{dz} = 0 \quad (7.5)$$

なお、ストークス自身は、光学の研究を進める一方で電磁気学は専門外と考えていたため、電磁気についての研究論文を発表することはなかった⁶⁵。以上の議論も、光が振動によって媒質を伝わっていく様子を論じたものである。

⁶¹ Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, 135.

⁶² Stokes, "On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion," 290.

⁶³ Ibid., 319.

⁶⁴ Ibid.

⁶⁵ Wilson, *Kelvin and Stokes*, 7.

トムソンは、このストークスの弾性固体論を電磁気現象へと応用していく。トムソンは1847年の論文で、このストークスの弾性固体論による圧力の式(7.4)に基づいて、圧力 p の方程式を次の(7.6)式のように置いている⁶⁶。

$$p = -k \left(\frac{d\alpha}{dx} + \frac{d\beta}{dy} + \frac{d\gamma}{dz} \right) \quad (7.6)$$

そして、電磁気的作用を媒介する弾性固体の特徴としても、前述のように非圧縮的であり、変形しても全体的な体積が変化しないことが仮定された。この仮定は、電磁気の振動が縦波ではなく横波であることを示す条件となる。そして、理想的な非圧縮性流体では係数 k が無限大になることから、(7.6)式で圧力が有限の値を取るためには、ストークスが(7.5)式を導出した時のように次の(7.7)式が成立しなければならないとトムソンは考えた⁶⁷。

$$\frac{d\alpha}{dx} + \frac{d\beta}{dy} + \frac{d\gamma}{dz} = 0 \quad (7.7)$$

この(7.7)式は、 (α, β, γ) で表される量が内部的に平衡状態にあつて、湧き出しがゼロで循環的であり、その量が保存されていることを示している。ここで、変数 (α, β, γ) はストークスの議論と同じく、弾性固体中の点 (x, y, z) における微小変位を表している。

この論文で、トムソンは(7.3)式を参考にして、電磁気作用の平衡状態の方程式を次の(7.8)式のように与えている⁶⁸。

$$-\frac{dp}{dx} + \frac{d^2\alpha}{dx^2} + \frac{d^2\alpha}{dy^2} + \frac{d^2\alpha}{dz^2} = 0 \quad (7.8)$$

この(7.8)式は、ストークスによって導入された(7.3)式の平衡状態を考えたものである。この(7.8)式は、(7.3)式と同様に微小変位の x 成分についての方程式であり、 y および z 成分についても同様に与えることができる。

以上の方程式の物理的な意味としては、フーリエの(2.1)式は拡散、ストークスの(7.3)式は振動を表しており、いずれも時間変化を想定して時間微分の項を含んでいる。しかし、ここでトムソンが導入した(7.8)式では、電気にしる磁気にしる、あるいは電流にしる、平衡状態が議論の対象となっているために時間変化は想定されていない。定常状態であるために時間微分の項は必要ないと考えられたのである。そして、このように時間微分の項

⁶⁶ W. Thomson, "On a Mechanical Representation," in *MPP*, 1:77.

⁶⁷ Ibid.

⁶⁸ Ibid.

が省かれたために、結果的に拡散や振動という、それぞれの方程式が表現していた運動の違いも無効化されることになった。

次に、トムソンがこの(7.8)式から電磁気作用を表現する特殊解を導出していく過程を概説しておこう。まず前提として、 $\alpha dx + \beta dy + \gamma dz$ で与えられる量が完全微分 (complete differential) であることが、ポテンシャル φ の存在条件であることが知られていた⁶⁹。そこでトムソンは、第一の場合として、次の(7.9)式がそのまま完全微分になる場合を考えた。

$$\alpha dx + \beta dy + \gamma dz \tag{7.9}$$

次に、この(7.9)式が完全微分ではない第二の場合として、次の(7.10)式が完全微分になる場合を考えた。

$$\left(\frac{d\beta}{dz} - \frac{d\gamma}{dy}\right) dx + \left(\frac{d\gamma}{dx} - \frac{d\alpha}{dz}\right) dy + \left(\frac{d\alpha}{dy} - \frac{d\beta}{dx}\right) dz \tag{7.10}$$

さらに第三の場合として、(7.8)式の (x, y, z) 成分に対応する式をそれぞれ足し合わせることによって導かれる(7.11)式が完全微分である場合を考えた⁷⁰。

$$\begin{aligned} \nabla^2 \alpha dx + \nabla^2 \beta dy + \nabla^2 \gamma dz \\ \nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \end{aligned} \tag{7.11}$$

この(7.9)、(7.10)、および(7.11)式は、それぞれ静電気、磁気、そして電流の磁気作用を表していると考えられた。

その一方で、「ポテンシャル」はグリーンによって次のように定義され、とくに静電気のポテンシャルは(7.12)式のように与えられていた⁷¹。ここで、 (X, Y, Z) は力を、 ρ は表面要素 $d\sigma$ における電荷密度をそれぞれ表しており、 r は $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ を満たすような距離を表す変数である。グリーンはポテンシャルの定義を次のように記している。

自然に存在するほとんどすべての引力や斥力は、任意の質点 p を考えるとき、考察対象となる物体 S の系から生じてその点へと及ぼされるすべての力の一定の方向を持つ

⁶⁹ この事実は、ストークスもトムソンに書簡で伝えている。(Stokes to Kelvin, 1 April 1847, Thomson and Stokes, *Correspondence between Sir George Gabriel Stokes and Sir William Thomson*, 1:8.) 完全微分であれば (α, β, γ) が保存力になるため、ポテンシャルが存在することになる。

⁷⁰ W. Thomson, "On a Mechanical Representation," in *MPP*, 1:77.

⁷¹ Green, *An Essay on the Application of Mathematical Analysis*, 9-10. トムソンは1847年に発表した「電気学理論における問題によって示唆される定積分について (On Certain Definite Integrals suggested by Problems in the Theory of Electricity)」という論文において等ポテンシャル面について扱っている。

た効果が、その点の空間における位置を与えている座標の特定の関数の偏微分によって表現されることはよく知られている。[中略] 結果的に、私たちはこの関数にしばしば言及することになるため、簡略化のために、その系 S から生じてくる関数をポテンシャル関数と名づけよう⁷²。

$$\text{cons} = a = \int \frac{\rho d\sigma}{r} - \int (Xdx + Ydy + Zdz) \quad (7.12)$$

トムソンは、このグリーンの定義を踏まえて (7.12) 式を微分し、さらに (7.9) 式を用いることで、静電気のポテンシャル関数を次式のように導いた⁷³。

$$\alpha dx + \beta dy + \gamma dz = -d\left(\frac{1}{r}\right)$$

ここでの左辺 $\alpha dx + \beta dy + \gamma dz$ は仮定により完全微分である。また、非圧縮性のエーテルの場合には湧き出しがないため、ラプラス=ポアソン方程式 (1.1) は次式のように与えられる。

$$\frac{d^2}{dx^2} \frac{1}{r} + \frac{d^2}{dy^2} \frac{1}{r} + \frac{d^2}{dz^2} \frac{1}{r} = 0$$

以上より、トムソンは静電気の力を最終的に次式のように導いた。

$$\alpha = \frac{x}{r^3}, \quad \beta = \frac{y}{r^3}, \quad \gamma = \frac{z}{r^3}$$

その一方で、磁気のポテンシャル関数は、(7.10) 式が完全微分になる場合であり、磁気分極を (l, m, n) として次式のように与えられた⁷⁴。

$$\left(\frac{d\beta}{dz} - \frac{d\gamma}{dy}\right) dx + \left(\frac{d\gamma}{dx} - \frac{d\alpha}{dz}\right) dy + \left(\frac{d\alpha}{dy} - \frac{d\beta}{dx}\right) dz = d \frac{lx + my + nz}{r^3}$$

この式より、トムソンは (α, β, γ) の解として次式を得た⁷⁵。

$$\alpha = \frac{mz - ny}{r^3}, \quad \beta = \frac{nx - lz}{r^3}, \quad \gamma = \frac{ly - mx}{r^3}$$

⁷² Ibid., 9.

⁷³ W. Thomson, "On a Mechanical Representation," in *MPP*, 1:78.

⁷⁴ この式は、現在の考え方からすると、磁気のベクトル・ポテンシャルではなく磁位 $(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})/r^3$ を表す式ということになる。なお、この磁位の式はグリーンによって与えられている。(Green, *An Essay on the Application of Mathematical Analysis*, 84-5.)

⁷⁵ この (α, β, γ) は、磁気のベクトル・ポテンシャルに相当する量ということになる。

そして、トムソンは最終的に、磁石が及ぼす磁気力の (X, Y, Z) を次式のように導いた⁷⁶。

$$X = \frac{d\beta}{dz} - \frac{d\gamma}{dy}, \quad Y = \frac{d\gamma}{dx} - \frac{d\alpha}{dz}, \quad Z = \frac{d\alpha}{dy} - \frac{d\beta}{dx}$$

この式のそれぞれの成分が軸に平行な線のまわりを回転する要素であることを表しており、したがって磁気の合力が回転的であることを示していると考えられた⁷⁷。

そして最後は第三の場合、電流がおよぼす磁気作用である。この電流の磁気作用のポテンシャル関数は、(7.11) 式を用いて次式のように与えられた。

$$\nabla^2 \alpha dx + \nabla^2 \beta dy + \nabla^2 \gamma dz = -d \frac{lx + my + nz}{r^3}$$

そして、この式から最終的に微小な電流要素からおよぼされる力の x 成分の方程式として次式が導かれた。なお、この式は x 成分についての方程式であり、 y および z 成分についても同様に与えられた。

$$\frac{d\beta}{dz} - \frac{d\gamma}{dy} = \frac{mz - ny}{r^3}$$

この式は、電流の磁気作用が回転的であることを示している。このように、第二の解にせよ第三の解にせよ、磁気作用が軸に対して回転的であることは、ファラデーの発見した光磁気効果によって実証された結果に合致すると考えられた。光磁気効果もまた、磁石にせよ電磁石にせよ、力線という軸を中心とした回転作用とみなせるからである。そして、弾性固体の数学的分析によって光磁気効果のような回転作用を表現できたことが、トムソンがエーテルの存在を確信する大きな根拠となった。

トムソンは、この (7.8) 式から導かれる解の物理的な意味について、次のようにまとめている。

私は、弾性固体の平衡の方程式において三種の特殊解を見出した。そのうちの一つは歪んだ状態を表しており、固体の任意の部分にある粒子の絶対的な変位が、帯電した物体によって生じる引力のこの点での合力を表している。もう一つは、その各要素が合成的な角方向の変位を持つ固体の状態を与え、磁気を帯びた物体によって生じる力のこの点での合力の大きさと方向を表している。三つめはガルヴァーニ電気の導線の任意の部分によって生じる力と類似の様式を表しており、その力の方向は固体の要素に加わる合成的な回転の軸によって与えられる⁷⁸。

⁷⁶ この式は、 $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ に相当する。

⁷⁷ W. Thomson, "On a Mechanical Representation," in *MPP*, 1:79.

⁷⁸ *Ibid.*, 1:76.

すなわち、この (7.8) 式を静電気、磁石および電流の磁気作用という電磁気現象の基本的な三つの作用の様式を包括的に導出できる基礎方程式とみなせることを、その三種の解を導くことで示したのであった。

なお、この 1847 年の論文は「諸力の力学的表現 (mechanical representation)」と題されていたが、このように「力学的」と題された理由は、弾性固体の波動方程式と万有引力のような中心力によるポテンシャルというニュートン力学的な理論に基づいて電磁気作用を表現したためである。

弾性固体論では、弾性固体の任意の点の微小変位がその点にはたらく力と関連づけられる。例えば、この論文に先行して 1845 年に発表した論文「電気の力学的理論における基本命題の証明 (Demonstration of a Fundamental Proposition in the Mechanical Theory of Electricity)」でも、同じように微小変位についての考察が議論の出発点となっている⁷⁹。この 1845 年の論文で、トムソンは、電気現象を論じるにあたって「力学的理論が適用されるならば、「電気」は事実上、距離の逆二乗に応じて反発し合う、重さのないいくつかの質点 (material points) ということになる」⁸⁰と述べている。このように中心力を備えた任意の点の作用として現象を表現していくことは、ラプラスやポアソンの「力学的=分子論的」方法に見られたように、18 世紀から 19 世紀にかけてニュートン力学に基づいて物理現象を論じていく上での基本的な方法であった。そして、7.4 節で改めて論じるが、この表現方法に基礎を置いたことによって、トムソンに力学的モデルを重視する姿勢が生まれていくことにもなった。

もっとも、このように微小変位は力学的理論における主要な考察対象であったが、その変位は理念的なものと考えられていた。実際、力学的表現とは、そもそも力学的理論を応用して現象に数学的な表現を与えるためのものであり、その変位が実際の空間的な変位と対応しているかどうかは別問題であった。むしろ、微小変位とは、空間的な変位そのものである必要はなかった。トムソンは、マクスウェルの変位電流という説明への批判をこめて、電気の力とエーテルの変位との関係について次のように語っている。

電気の力 (X, Y, Z) は単に変位というのではありません。単なる変位は、弾性固体や何らか想定されうる「エーテル」において、場の単位体積あたりで $R^2/8\pi$ に等しいエネルギーを生じさせることなどないからです。1846 年の 11 月においても、それ以降においても、「変位」を単に「「電気」の力の力学的表現」以上の何かと考えることはできませんでした⁸¹。

⁷⁹ W. Thomson, "Demonstration of a Fundamental Proposition in the Mechanical Theory of Electricity," *Cambridge Mathematical Journal* 4 (1845); Reprint, *RPEM*, 100.

⁸⁰ *Ibid.*, 102.

⁸¹ "Letter signed 'Kelvin' from William Thomson to G. F. Fitzgerald, 29 April 1896," Thomson, *Life of Lord Kelvin*, 2:1069. トムソンはそれに続いて、磁気の力については「しかし、私はその時から今まで、そして今なお、媒質の回転を「磁気」の力の本質と見るべきであろうと感じています」と述べている。すなわち、

このように、電気現象の「変位」は、少なくとも生じるエネルギーの大きさからして単に空間的なものだとは考えられなかった。この見解は、フーリエが熱の効果を力学的に説明することはできないと主張していたことに通じている。ただ、フーリエはこのことを根拠に力学とは距離を置いたが、トムソンはこの変位が実際には空間的な変位以上のものであるとして、それがあくまで力学的な「表現」に過ぎないとみなすことで、電磁気現象を力学的に論じることの正当性を担保したのである。トムソンの力学的理論とは、あくまで「表現」であった。ただし、トムソンはこの「表現」方法を、後には「説明」や「理解」と結びつけて「力学的モデル」として重視していくことになる。この力学的モデルについては、次の7.4節で改めて詳しく論じたい。

以上のようにトムソンが議論を「表現」にとどめていたことは、1847年までのトムソンの議論に共通する傾向である。流束についても、電気的作用を数学的に表現するための手段として導入しており、あくまで「物理的実在」ではないと注意を促していたし、弾性固体論による電磁気学研究も、あくまで「力学的表現」であった。前述のようにトムソンは、1846年11月28日を契機にエーテルの存在を強く意識するようになったが、「エーテル中毒の発作」⁸²にみまわれないように極めて慎重な姿勢を取っていた。

科学史家のウィルソンは、このトムソンの姿勢を「慎重な実在論 (cautious realism)」⁸³と名づけ、ストークスとも共通する姿勢だとして、そのような傾向が生じた原因を次のように推測している。トムソンが教育を受けたグラスゴー大学では、1.2節で論じたようにリードをはじめとするコモン・センス学派の伝統があり、一般に不可秤物質などの作因を知ることにはできないと教えられていた。その一方で、トムソンが次に進学したケンブリッジ大学では、エーテルの存在がある程度まで容認されていた。2.3節で引用したハーシェルのアナロジーの議論も、このようなケンブリッジ大学の風潮を反映したものであった。ハーシェルはエーテルの実在性は認めながらも、可感ではない微小領域の構造を知ることが困難であるため、まずは、例えば音又とのアナロジーを用いて現象のふるまいを説明しようとした。ウィルソンは、このような背景によって、トムソンやストークスがエーテルなどの可感ではない原因の存在を意識しながらもそれを議論の対象とすることを避け、しかしコントのような厳密な実証主義でもないような姿勢を持つようになったと説明している⁸⁴。

このように、トムソンとストークスは、エーテルの実在性については同じような見解を持っていた。しかし微小変位に関しては、その実在性についての見解は異なっていた。この理由としては、ストークスが研究の対象を光に限定していたのに対して、トムソンは電

磁気とは空間的な回転と考えることができるが、電気は空間的な変位では説明しきれないと考えていたのである。このトムソンの批判は、次の7.4節で説明するように、マクスウェルの「変位電流」に対する否定的な見解に基づくものであった。

⁸² William Thomson to G. F. Fitzgerald, 9 April 1896, *Life of Lord Kelvin*, 2:1065.

⁸³ Wilson, *Kelvin and Stokes*, 100.

⁸⁴ *Ibid.*, 101-7, 113. ウィルソンは、ストークスがトムソンに比べてエーテルをより実在的に論じていたが、これは光と電磁気という研究対象の違いであると結論づけている。すなわち、トムソンは電磁気というより未知の現象を扱っていたために慎重にならざるを得なかったのであり、トムソンがストークスに比べて実証主義や懐疑主義に傾倒していたわけではないとしている。(Wilson, *Kelvin and Stokes*, 113-20.)

磁気現象を研究対象としており、この研究対象の違いによって見解の相違が生じていたと考えられる。

ストークスは「柔軟な分子で構成された流体」⁸⁵を考えており、その流体は前述のように「あらゆる連続的な方法で動く無限個の点」⁸⁶からなると仮定していた。すなわち、分子は運動しているとしながらも、その物理的実体については詳細がはっきりしないため、「無限個の点」という数学的な表現によって論じようとした。そして、それぞれの点の変位は実際に空間的なものであると考え、観測できないとすればそれは観測精度の問題と考えていた。この振動と感覚との関係について、ストークスは弾性固体の論文の中で次のように述べている。

光エーテルのように、空気も横振動を許容するはずであると考える人がいる。この論文の観点からして、数学的に言えば、それも有り得るだろう。しかし、そのような振動の程度は、もし私たちがそれを感受するように作られている網膜と等しいくらいの繊細な器官を持っていなければまったく感覚できないほど、必然的にとても小さなものであろう⁸⁷。

すなわち空気については不確かだが、少なくとも光エーテルについては空間的に横振動していると考えていた。また、その後の1848年の論文では、ストークスはこの弾性固体をゼリーないし水糊のようなものと考えていた。そして、この水糊は、流体のようにふるまいながら、実際に小刻みな速い横振動をしているとされた⁸⁸。このように、ストークスは変位が空間的に実際に生じているものであると想定していた。

それに対してトムソンは、議論の力学的な内容を数学的な表現として解釈し、任意の点における微小変位を空間的な変位としてではなく、その点での「強さ」と「方向」を持った「ひずみ (strain)」として解釈した。トムソンは1848年になって、1842年の「均質固体」論文における流束の議論と1847年の「力学的表現」論文における弾性固体論の対応関係を、次のように「ひずみ」として説明している。

私たちは、任意の点における熱の流束の3成分のかわりに、歪んだ固体の要素の回転の3成分を考えなければならない。熱源のかわりに、力がかかった時にその点を取り巻いている「ひずみの源 (source of strain)」を考えるのだ⁸⁹。

このように、弾性固体論の力学的表現においては、「流束」が「ひずみ」と同等のものと

⁸⁵ Stokes, "On the Theories of the Internal Friction," 292.

⁸⁶ Ibid., 290.

⁸⁷ Ibid., 318.

⁸⁸ Stokes, "On the Constitution of the Luminiferous Aether," 346-8; Wilson, *Kelvin and Stokes*, 143.

⁸⁹ W. Thomson, "Note on the Integration of the Equations of Equilibrium of an Elastic Solid," *Cambridge and Dublin Mathematical Journal* 3 (1848). Reprint, *MPP*, 1:97-9, 99.

して解釈された。平衡状態では、非圧縮的な弾性固体にかけられた力が釣り合っている。そうすると、7.2節でおこなった流束と力線の同等性についての議論から、流束を緊張状態による「ひずみ」として考えることもできる。ここで、「ひずみ」を力線と同等のものともみなすことは、ファラデー自身が電磁気の緊張状態を表すために力線という考え方を導入したことから問題はなく、むしろ自然な考察であると言える。

もっとも、トムソンの「ひずみ」とは、その実際の物理的な意味を規定することをとりあえず留保し、その上で単に現象を記述するための数学的ないし力学的な「表現」に過ぎないものであった。トムソンはこの1847年の「力学的表現」論文の内容を、ファラデーに宛てた1847年6月11日付けの書簡の中で次のように紹介している。

弾性固体を通して「ひずみ (strain)」によって伝わる電気と磁気の力にアナロジーを与えるものだと貴方にお伝えしました論文を同封いたしました。私が記したことは数学的なアナロジーに過ぎません。それを、電気や磁気の力の伝搬の物理理論の基礎とする可能性をほのめかすところにすら踏み込んでおられません。そのような理論が完成すれば、電気と磁気を結びつける必然的な結果として表現されるのでしょうし、純粋に「静的」な磁気現象が、どのようにして動いている電気や、磁石のような慣性的な質量 (inert mass) から生じているのかを示してくれることでしょう。もしそのような理論が発見されれば、それは光の波動理論とも結びつき、おそらくは偏光に対する磁気の効果をも説明することでしょう⁹⁰。

このように、トムソンは弾性固体の「ひずみ」として表現することによって、光磁気効果も含めて電磁気現象を一般的に説明できると考えた。そして、この「ひずみ」は流束と同等の概念であった。ただし、7.2節で指摘したように、流束と力線とはアナロジーの関係になっていたが、例えば「量」と「強さ」の区別の有無のように、その解釈は必ずしも厳密に一致していたわけではなかった。

トムソンは、ファラデーの関心の中心であった力と物質の関係について深く考察していたわけではなかった。彼の目的はあくまで、フーリエやグリーン、ストークスなどの新しい数学的方法を用いて、ファラデーやハリスの報告していた複雑な誘導現象のふるまいを表現することであった。このように、数学的方法の有効性を開拓していくことがトムソン

⁹⁰ William Thomson to Faraday, 11 June 1847, *Correspondence*, 3:630. もっとも、この書簡に対するファラデーの返信は「論文を受け取りました。大変ありがとうございます。しかし、貴方が熱心に注目している x や y は、まったく私の理解を超えています。それでも、少しは楽しむことができますし、繰り返し感謝しています」というものであった。(Faraday to William Thomson, 14 June 1847, *Correspondence*, 3:631.) ファラデーはこの同時期に、モソッティからも誘電体の電荷分布を数学的に研究したイタリア語の論文を受け取っている。(Faraday to William Thomson, 2 July 1847, *Correspondence*, 3:634.) なお、ここで用いられている「慣性」について、トムソンは電気伝導を流体の運動とのアナロジーで考えている。そのため、逆に「慣性なし (inertialess)」流体ないし「質量なし (massless)」流体とは、不導体を意味することになる。(W. Thomson, "Ether, Electricity, and Ponderable Matter," in *MPP*, 3:498) このように「慣性」として理解されていたことから、トムソンが電磁気現象を力学現象として考えていたことがわかる。

の研究目的であったため、実験結果の解釈においては分野間で共通する数学的形式のアナロジーを用いて現象を表現していくことが積極的におこなわれたのであった⁹¹。その結果、ファラデーとフーリエがまったく異なる立場からそれぞれ力学的説明の限界を主張していたことに対して、トムソンはあくまで力学的な「表現」に過ぎないという立場から力学的な研究を擁護し、ひいては力学的モデルという説明のあり方を重視するようになっていった。それでは次節で、この力学的モデルを求めるようになったトムソンの意図を、アナロジーと「力学的表現」との関係からさらに詳しく分析することにしよう。

7.4. 理解を促すための力学的モデル

7.2節と7.3節で論じたように、トムソンは、まずはフーリエの熱伝導論を応用することで静電気的作用を数学的に分析し、さらにストークスの弾性固体論を応用することで、磁石や電流の磁気作用を数学的に分析していった。前者のフーリエの流束はファラデーの力線とのアナロジーになっており、後者の弾性固体論を応用した研究は「力学的表現」であると位置づけられた。フーリエ自身が熱の効果は力学的には説明できないと述べていたことからして、トムソンは、まずは熱とのアナロジーによって電気現象に数学的表現を与えたと言える。そして、弾性固体論を応用した力学的表現の研究を通じて、少しずつトムソンの考察の中での力学的方法の重要性が高まっていった。この節では、このトムソンの研究方法の変化を現象に対する表現と説明の違いという観点から分析し、トムソンが後期の研究で重視した力学的モデルと関係づけて論じたい。

この節で議論の対象となる「力学的表現」とは、7.3節で説明したように、例えば電気現象については作用の原因を「距離の逆二乗に応じて反発し合う、重さのないいくつかの質

⁹¹ Buchwald “William Thomson and the Mathematization of Faraday’s Electrostatics,” 123-5. この章では、トムソンが弾性固体論を応用しながら磁気的作用を記述する過程について分析の対象とし、磁気の原因そのものについては分析の対象としていない。そもそも、前述のようにトムソンはそのような議論を避ける傾向にあった。しかし、トムソンは1850年に磁気の原因についての物質的な説明も若干おこなっている。そこでは、「磁気の理論は、ポアソンによって最初に完全な形で数学的に取り扱われた」としてポアソンの「磁気要素」論を紹介しながらも「記述的」で「実証的」な研究の方向性を示すことにとどめ、磁気流体の存在については、ポアソンと同じく判断を保留にしている。(W. Thomson, “A Mathematical Theory of Magnetism,” in *RPEM*, 344-5.) この判断について、トムソンは次のように述べている。「そのような仮説を支持する物理的証拠は提示されておらず、逆に電磁気学の最近の発見では、それは極めてありそうにない」とされている。磁気に言及する上でのあらゆる推論はこれらの仮説的流体の存在を仮定せずに導かれるべきである、ということが肝要である。」(Ibid., 344.) もっとも、実際の議論では「磁気物質」の存在が想定され、その配置が議論されている。この「磁気物質」は次のように定義されている。「この想像上の物質は、通常の物質の主たる性質を何も保持しておらず、それを固体や「磁気流体」、あるいは「複数の流体」と、どれで称するのにもよくないだろう。ただ、どんな仮説も作らず、「磁気物質 (magnetic matter)」と称しよう。それはある決まった法則によって、磁石、つまり同種の「物質」の他の部分を引きつけたり斥けたりする性質だけを持つものと理解する。」(Ibid., 356.) そして、トムソンはガウスの地磁気の考察を参考しながら、さらに薄いシート状の「磁気殻 (magnetic shell)」も想定している。(W. Thomson, “A Mathematical Theory of Magnetism,” in *RPEM*, 384; Smith and Wise, *Energy and Empire*, 219-21; Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 66.) このように、トムソンの磁気論は、フーリエのような巨視的な視点で満足するものではなく、むしろ、ポアソンの微視的な分子論に近いものであると言える。

点」⁹²に還元して、そのポテンシャルを弾性固体の方程式に代入することで作用を表現することであった。そして、このポテンシャル関数には作用の原因としての電荷の存在が組み込まれており、フーリエのように作用だけをその原因から独立させて議論の対象とするわけではなかった。すなわち、この「力学的表現」は、ポアソンの「力学的=分子論的」な表現方法であったと言える。ただし、ここでトムソンが「重さのない質点」と述べているように、トムソンは電気を物質的なものと考えていたわけではなかった。もしそれが物質であれば、重さを持つはずだからである。トムソンはあくまで、電磁気的作用だけを受ける不可秤の存在として、「質点」を想定していたのである。

トムソンは、物体表面の電荷が大気圧によって保持されていると考えており、電気そのものは物質的なものであると考えていた⁹³。その一方で、光についてはアーンショウ (Samuel Earnshaw, 1805-88) の論文「光エーテルの構成を調整する分子の力の性質について (On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether)」や、ケンブリッジ大学の天文学教授チャリス (James Challis, 1803-82) の自然哲学講義を通じて光の波動説に影響され、1843年頃から不可秤のエーテルを想定するようになったと考えられている⁹⁴。さらにアーンショウは、電気についても分子からなる流体によって伝えられていると仮定し、その振動をモソッティの分子論のような引力と斥力の組み合わせとして論じていた⁹⁵。もっとも、ここで分子の作用が議論の対象になっているが、エーテルが物質であると考えられていたわけではない。7.1節のエーテルと弾性固体との関係についてのトムソンの説明にもあったように、数学的な考察を進めるために、エーテルを物質のようなものと便宜的に仮定していたに過ぎない。そして、トムソンもアーンショウなどの影響を受けて、電磁気現象がエーテルの作用である可能性を考えるようになっていった。そして、電磁気現象の媒体としてのエーテルの存在は、ファラデーが光磁気効果を発見し、それに続いてトムソン自身が電磁気現象を弾性固体として表現できたことによって、トムソンにとって確信になっていった。

しかし、前節でも論じたように、トムソンはこのようにエーテルの存在を意識しながらも、エーテル仮説を研究に持ち込むことには慎重であった。そして、このトムソンの姿勢は、とくに初期の研究において顕著であった。トムソンは、フーリエの議論を応用して電気現象を論じるにあたって、いわばその研究が「分析的=実証主義的」な議論にとどまるように努めていた。フーリエは、ポアソンがカロリック説の観点から熱現象をそのような粒子の総合ないし積分として考えたのに対して、カロリックのようなものを仮定せず、微分的な要素が作用を分析するための本質であると考えた⁹⁶。トムソンも、このフーリエ

⁹² W. Thomson, "Demonstration of a Fundamental Proposition," in *RPEM*, 102.

⁹³ W. Thomson, "On the Attractions of Conducting and Non-conducting Electrified Bodies," in *RPEM*, 98.

⁹⁴ Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 48-49; Buchwald, "William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics," 117-8.

⁹⁵ Earnshaw, "On the Nature of the Molecular Forces," 98-9.

⁹⁶ ワイズはこの相違点をフーリエなどの「幾何学派」とラプラスやポアソンなどの「代数派」の違いとして分類している。そして、この「幾何学派」は微分方程式の解釈において導関数を関数の連続的な接線と考え、「代数派」はテイラー展開などのべき級数の係数と考えていたと説明している。(Wise "Flow Analogy

の姿勢にならって、電気を粒子的で離散的なものではなく連続的なものとして扱い、その法則を求めようとしたのである⁹⁷。1856年の論文の中でも、トムソンはランキン (William J. M. Rankine, 1820-72) の「分子渦 (molecular vortices)」理論に言及しながら、現象の原因を考えることが無駄であると述べている。

電磁気の引力や斥力、および電磁誘導についてのあらゆる現象の説明は、その運動が熱を構成しているような物質の慣性や圧力に単純に求められるのだろう。この物質が電気であろうとなかろうと、あるいは、分子核のあいだの空間に浸透している連続的な流体であろうと、それ自身が分子的に集団をなしているものでであろうと、または、すべての物質が連続的であって、分子的な不均質性が物体における近接部分の限定的な渦動や他の相対運動によるものでであろうと、科学の現状では決定することは不可能であり、おそらくは推察することも無駄である⁹⁸。

このようにトムソンは、電磁気現象の原因は可感ではなく、それを考察することは不可能であり無駄であると考えていた。そのため、2.1節で論じた実証主義の見解と同じように、現象の原因を論じることは放棄すべきだとして、作用のふるまいを研究対象としたのである。当時の研究水準では、分子作用は実証性のない物理的仮説に過ぎなかった。そのため、作用を数学的に表現するためには、遠隔作用的な万有引力の法則を利用するか、あるいはトムソンがおこなったように熱伝導とのアナロジーを利用する必要があったのである。

トムソンは、微視的構造に立ち入って物理的仮説を立てようとする態度には慎重であり、とくに初期の研究ではそのような態度に懐疑的でした⁹⁹。ワイズもトムソンの熱と電気のアナロジーの議論について分析し、「そのアナロジーは、展開されるにあたって、純粹に数学的なものであった」¹⁰⁰と指摘している。トムソンの当初の研究目的は、熱伝導とのアナロジーを前提として、あくまで作用のあり方を数学的に表現することであった。

しかしその一方で、この引用にあるように原因を考えることを無駄であると主張していたことは、トムソン自身に対する自戒の意味も込められていると考えることもできるだろう。このように「分析的＝実証主義的」に研究を進めるにしても、前述のようにトムソンは、現象を引き起こしている原因としての近接粒子の存在を念頭に置いていた。トムソンは1845年の「静電気の基本法則」論文で、近接粒子の作用について次のように述べている。

フーリエが「熱の解析的理論」で規定した熱の運動法則は、適切にそう言われているように、数学的理論を構成する単純で基本的なものからなっている。それゆえ、荷電

to Electricity and Magnetism, Part I,” 1981, 28-9.)

⁹⁷ ただし、トムソンはラプラスやポアソンの議論を取り上げるが、彼らの媒質に関する問題には言及していない。(W. Thomson, “On the Elementary Laws of Statical Electricity,” in *RPEM*, 16.)

⁹⁸ W. Thomson, “Dynamical Illustrations,” 152.

⁹⁹ Wise, “William Thomson’s Mathematical Route to Energy Conservation,” 50.

¹⁰⁰ Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 40-1.

された物体によって与えられる現象に対しても正しい対応則を見出せば、それらの法則を電気の数学的理論の基礎に据えることができるだろう。何ら物理的仮説を採用することなく、単に当座の真実としてそれを理解するならば、それらが当然のように示唆している考え方は近接粒子の相互作用による何らかの効果の伝搬であろうが、それでよいのである。それはちょうどクーロンが、彼の法則は距離をおいて引き合ったり斥け合ったりする物質粒子を自然な形で示唆していたが、細心の注意を払ってこれを「物理的仮説」にすることを避け、彼が観測した力学的効果とその必然的な帰結を考えるにとどめるようなものである¹⁰¹。

このようにトムソンは、数学的な理論だけで作用を表現することの重要性を主張しながら、その表現からは、作用の原因としての近接粒子の存在が仮定できると述べている。確かにトムソンは、物理的仮説を排除することに努めていた。しかし、この引用からもわかるように近接粒子の存在は研究の前提となる仮説ではなく帰結に対する仮説であった。そうすると、作用をさらに詳しく分析していくためには、このような仮説的な媒体の存在がつねに念頭に置かれることになる¹⁰²。

トムソンはこれと同じ論文の中で、電気現象が遠隔作用であると考えられる場合でも、近接粒子がその原因になっているはずだと述べている。

そのような遠隔的な力が、まったくのところある中間媒質の近接粒子の作用によって生じていることが判明する可能性は疑いえず、これに対するアナロジーとして、同じ法則にしたがう一定の効果が粒子から粒子へと疑いなく伝わっていく熱の場合がある。磁力は第二の、そして重力は第三の媒質によって、それぞれ伝えられることもわかるだろう。私たちはしかし、そのような効果を生み出しえる分子作用については何も知らないで、物理学の現状にあっては、それぞれの理論において知られている事実を遠隔作用という究極的な法則の根拠として認める必要があるのだ¹⁰³。

このようにトムソンは、ファラデーと同じように近接粒子の分子作用が誘導作用の原因になっている可能性を考えていた。トムソンにおいて、電気的作用を「分析的＝実証主義的」に扱う姿勢は、あくまで方法上のことであった。トムソンは「分析的＝実証主義的」研究を心がけていたものの、つねにその物質的な原因を想定しようとする傾向を持っていた。いわば、トムソンにおいて、フランスでは対立的であった「分析的＝実証主義的」傾向と「力学的＝分子論的」傾向とが共存していたと言える¹⁰⁴。当初は実証主義的な立場を

¹⁰¹ W. Thomson, "On the Elementary Laws of Static Electricity," in *RPEM*, 29.

¹⁰² ワイズも、トムソンの解析的方法には自らの物理的な観念では満足できないような数学的構造があり、それが仮説を排除することの限界につながったと分析している。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 4.)

¹⁰³ W. Thomson, "On the Elementary Laws of Static Electricity," in *RPEM*, 37.

¹⁰⁴ バックウォルドは、トムソンがこれらのフランスの傾向に強く影響を受けながらも、そのいずれから

取っていたものの、その自然観として分子論的な力学的モデルを有していたために、少しずつ研究そのものも「力学的＝分子論的」な傾向が強くなっていったと考えられる。そして、この傾向はやがて、微視的で可感ではない現象に対して力学的モデルを導入して研究を進めようとする傾向へと発展していくことになった¹⁰⁵。弾性固体による「力学的表現」は、いわば「アナロジー」から「力学的モデル」に至る過渡期の方法として位置づけられる。

それでは次に、トムソンが力学的モデルを重視するようになっていった過程を分析していこう。7.2節で論じたように、熱と電気のアナロジーは数学的な形式としてのみ成り立つものであった。しかし、帯電した物体の合成的な引力とのアナロジーを考えることは、熱現象についても、その原因となる粒子ないし分子を想定することにつながった。7.2節でも引用したように、実際にトムソンは、フーリエの議論の対象であった熱現象そのものが近接粒子の相互作用の現れであると考えていた。

こうして、数学的な関係のアナロジーとして考えられていた熱と電気は、分子論的な力学的表現を模索していく中で、現象の形式は異なるがその原因は同一であると考えられる

も距離を置いていたと論じている。(Buchwald, “William Thomson and the Mathematization of Faraday’s Electrostatics,” 134-6.) これらの傾向に方法論的に拘泥しなかったことが、結果的に新しい研究の方向性を開くことになり、「分析的＝実証主義的」傾向と「力学的＝分子論的」傾向を共存させたと言えるだろう。なお、スコットランド哲学は代数を用いた解析的方法に懐疑的であり、トムソンの研究は、そのような考え方への挑戦であったという指摘もある。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 15.)

¹⁰⁵ クヌーセンはトムソンの研究を三層に分け、最も理想的なレベルとして動力学の理論を位置づけ、その下に動力学的な描写としての「物理的アナロジー」ないし「力学的表現」があったとし、最も低いレベルに「数学的アナロジー」があったとしている。そして、マクスウェルの研究をこの分類に対応づけながら、トムソンの動力学的な理論がマクスウェルの電磁場の理論とは相容れなくなっていった理由をトムソンが実用的研究に多忙になり電磁気現象の基礎研究に十分に時間が取れなくなったことと、マクスウェルのポアソンの「物理力学」に対して否定的であったことに起因すると分析している。(Knudsen, “Mathematics and Physical Reality,” 166-8, 171-8.) ただし後者の理由については、トムソンのボルティモア講義などでのマクスウェル批判を検討する限り十分とは言えないだろう。微視的な変位電流の議論に対して批判的であったことは確かだが、電磁誘導の分子論モデルには極めて肯定的だったからである。なお、トムソンは「物理的アナロジー」という言葉はあまり用いていないが、例えば1889年の論文「エーテル、電気、不可秤物質 (Ether, Electricity, and Ponderable Matter)」において物理的アナロジーとして電流と流体との関係をあげている。(W. Thomson, “Ether, Electricity, and Ponderable Matter,” in *MPP*, 3:498-501.) しかし、この関係は、8.2節で論じるように、マクスウェルが論文「ファラデーの力線について」の中で「物理的アナロジー」として議論をおこなったことを意識して用いられたものである。トムソンにおいて「物理的アナロジー」とは「数学的アナロジー」と「力学的表現」を包含するような意味を持っていたため、トムソンにとって「物理的アナロジー」という言葉の重要性は低く、マクスウェルの研究に関連しながら言及する程度でしか用いられなかったと言える。なお、「数学的アナロジー」から「力学的表現」への変化については、トムソンが電磁気現象を論じるにあたって、流束の議論から弾性固体論へと考え方を完全に移行したということを意味しているわけではない。例えば1847年に、トムソンは磁気を流体とのアナロジーで考えている。そこでトムソンは、水が流れる管と磁気を発する磁石を比較し、水の運動における速度と方向が磁気の分極における強度と方向に対応すると考えている。(W. Thomson, “29 March 1847,” NB34, MS Add. 7342, 53.) そして、このアナロジーについてトムソンはストークスと書簡で議論を進めている。

(Kelvin to Stokes, 30 March 1847, Thomson and Stokes, *Correspondence between Sir George Gabriel Stokes and Sir William Thomson*, 1:8.) もっともトムソンは、水の動きを磁気分極と磁力そのものの両方に曖昧に関係づけており、磁気は電気と異なり、実際に変位をとまなうと考えていた。(Smith and Wise, *Energy and Empire*, 219-221; Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 264.) ただし、ここで「流体」ではなく具体的に「水」を想定していることは、形式上のアナロジーというよりも実体を備えた力学的モデルを想定していることになるだろう。

ようになっていった。例えば6.5節でも引用したように、トムソンは1856年の論文「透明な物体の偏光に対する磁気的かつ螺旋回転的な効果の動力的描写 (Dynamical Illustrations of the Magnetic and the Helicoidal Rotatory Effects of Transparent Bodies on Polarized Light)」¹⁰⁶で、ファラデー効果の発見はアンペールの分子電流理論とともに熱の動力的な理論の実証例にもなっていると指摘していた。トムソンは、1860年にも電磁気と熱との関係について、「電気が何であれ、運動している電気が「熱」であり、この運動における回転軸の何らかの整列が「磁気」であるということは、かなり確からしいと思われる」¹⁰⁷と述べている。このようにトムソンは、電磁気と熱とが慣性や圧力といった概念による力学的なアナロジーによって説明できると考えていた。そして、1867年には電磁気現象の回転作用を力学的に説明するために渦原子 (vortex atom) という概念を発表し、渦運動 (vortex motion) 論に傾倒していく。すなわち、数学的な形式のアナロジーの議論が原因の同等性の議論へと発展していったのであった。

その一方で、トムソンは気体分子運動論の研究を通じてエーテルと空気の同一性に対しては否定的な見解を持つようになり、そこに存在している物質に現象の原因を求めることの難しさも強く認識するようになった。このような経緯から、現象の力学的な構造ないし「運動の様式」をモデル化することに価値を置くようになっていった¹⁰⁸。例えば、前述の1856年の「磁気的かつ螺旋回転的な効果の動力的描写」論文では、光磁気効果の偏光面の回転を振り子によって説明する力学的モデルが提案されている¹⁰⁹。1847年の論文で前提とされていた弾性固体については、エーテルが弾性固体そのものではないにせよ、それは実際に弾性固体にかなり近いものであると考えられた。しかし、光磁気効果で用いられる偏光は、明らかに振り子そのものではない。偏光の振動が振り子の力学的なふるまいとのアナロジーによって表現できるにせよ、実際に可感ではないほどの小さな振り子が多数存在して回転することで光磁気効果を引き起こしているわけではない。すなわち、この回転する振り子は、現象のふるまいを力学的な原理によって説明するための手段に過ぎない。

第2章で説明したように、力学的モデルとは、現象の原因として機械的な構造物や万有引力的な中心力を備えた分子などを仮定して、その現象に表現と説明を与えるためのものであった。また同じく第2章で論じたように、実証主義の立場では作用の原因を考察することは放棄され、議論の対象を数学的な関係に限定すべきだと主張された。しかし、その

¹⁰⁶ トムソンは、力学的モデルを用いた議論の中では「説明 (explanation)」や「理論 (theory)」という言葉ではなく、「描写 (illustration)」という言葉を用いていたことが指摘されている。(Knudsen, "The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873," 247.)

¹⁰⁷ W. Thomson, "Atmospheric Electricity," in *RPEM*, 224.

¹⁰⁸ Wilson, *Kelvin and Stokes*, 161-162. 「運動の様式」は、エーテルの弾性を考える上での観点として1881年の演題にもなっている。なお、渦理論については、*MPP*, 4:1-128. および、吉澤「19世紀渦理論とその自然観」などで詳細に議論されている。

¹⁰⁹ 具体的には、両端に結びつけたヒモの中央から別のヒモが垂らされて一つの錘と結びついているような水平な棒を考え、それがフーコーの振り子のように棒の中央を中心として水平方向に回転しながら振動するようなモデルが想定されている。そうすることで、軸を中心に横振動する様子が考察できる。(W. Thomson, "Dynamical Illustrations," 152-3.) この光磁気効果の力学的モデルについては、クヌーセンが詳しく図解している。(Knudsen, "The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873," 246-7.)

ような議論は物質的な根拠に乏しく、原因についての議論が不十分である。そのためトムソンは、物質的な原因を想定することで、力学的な力と運動の関係から巨視的に現象を説明できる力学的モデルを用いるようになったと考えられる。

トムソンが用いた力学的モデルの典型例は、7.1節で紹介した1884年のボルティモア講義の中で提示されている。トムソンはこの講義の冒頭で、光の分散を説明するために図45のようにバネで連結された球殻からなる力学的モデルを紹介している。

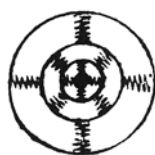


図 45：光分散を説明するためのバネと球殻からなる力学的モデル。(BL, 15.)

この力学的モデルでは、球殻の外側に存在するエーテルが光の振動を伝えており、球殻の直径はその波長に比べてかなり短いと仮定される。ここでもし、内側の球殻が一つしかなければ、その周期は一つに決定されるが、多くの球殻があれば、それぞれの球殻はそれぞれの周期を持ちうる。そのため、このような球殻がエーテル中に分布していると仮定すると、その中を進む波の速度は球殻の影響によって変化してくるはずである。トムソンは、この変化から光の分散が説明できるとし、このような力学的モデルはエーテルの粒子そのものではないにせよ、その作用は実際の粒子の作用をよく表現していると述べている¹¹⁰。すなわち、原因そのものは異なるが、振動という力学的な運動の様式は現象とモデルの両方に共通のものであると考え、物質的なモデルを提示することでその理解を促したのである。

トムソンは、このボルティモア講義の中で、力学的モデルを作れるかどうか、そもそもその現象を理解できているかどうかの判断基準になりうるという見解を表明し、それを次のように述べている。

「我々が物理学の特定の主題を理解しているかどうか」を検証することは、「我々がその力学的モデル (mechanical model) を作ることができるか」であるように思える。私は、マクスウェルの電磁誘導の力学的モデルに大変敬服している。彼は、誘導電流などで電気がもたらす驚くべきあらゆることをおこなうモデルを作っている。そのような力学的モデルが計り知れないほどに示唆的であり、電磁気学の真の力学的な理論に

¹¹⁰ BL, 16. トムソンは、このモデルを他の機会にも繰り返し用いている。

向けた一歩であることは疑いえないことであろう¹¹¹。

ここでトムソンが言及しているマクスウェルの力学的モデルとは、マクスウェルが論文「力の物理的な線について (On Physical Lines of Force)」で導入した分子渦モデルであると考えられる¹¹²。この分子渦モデルの詳細は、8.3 節で改めて論じる。そして、ここで引用したトムソンの見解には、これまでのマクスウェルの研究では力学的モデルという素晴らしい説明方法が用いられていたにもかかわらず、新しい『電気磁気論』ではそのような方法が用いられずに数学的な議論に終始しており、説明不十分で承認できないと批判する含みがある¹¹³。マクスウェルの発表した光の電磁気理論は、方程式によって現象を数学的に「表現」できたとしても、「説明」としては不十分であり説得力に欠けると考えたのである。

トムソンは別の際にも、力学的モデルを作ることが現象を理解する上で必要不可欠であると述べている。

私は、ものごとの力学的モデルを作ることができるまで、自分を満足させることは決してない。力学的なモデルを作ることができたら、私はそれを理解できる。徹頭徹尾、力学的モデルを作ることができない限り、私は理解することはできない。そのため、私は電磁気理論を受け入れられないのである¹¹⁴。

このように、トムソンは、自然現象が力学的な運動の様式に還元できるはずであり、最終的にはその現象を説明できる力学的モデルが与えられるはずだと考えていた。そして、現象の数学的表現については、その作用の原因そのものは可感でなく不明であっても、可感な物質的原因を仮定した力学的モデルを作成することで、その説明と理解につながると考えていたのである。

そして、このボルティモア講義で示された力学的モデルも、大学の講義のために現象をわかりやすく説明するための手段に過ぎないと考えられていた。そのため、トムソン自身も、これが学生の注意をひくための「雑な (rude) 力学的モデル」であって、光分散についての「粗っぽい (crude) 力学的な説明」に過ぎないことを、聴講者に対して繰り返し注意している¹¹⁵。さらにトムソンは、「これらの考察において仮定され、私たちのモデルにお

¹¹¹ BL, 111. この記述は、1904年に出版された改訂版では削除されている。

¹¹² Harman, "Mathematics and Reality in Maxwell's Dynamical Physics," 268.

¹¹³ マクスウェルは、トムソンの電磁気学の議論を出発点として自身の理論を作りあげていった。しかし皮肉なことであるが、その出発点となったトムソンは、マクスウェルの議論を不十分なものだと考えていた。(Wilson, *Kelvin and Stokes*, 9.)

¹¹⁴ BL, 206.

¹¹⁵ BL, 15-6. 力学的モデルを作ることができたとして、その妥当性はどのように保証されるのかという問題はあるだろう。トムソンにとって、力学的モデルとはあくまで理解を促すための手段であり、その理解の対象となる理論の正しさは、あくまで数学的表現において与えられるものであったと考えられる。そのため、力学的モデルには、アナロジーとしてある程度の精度があれば恣意的に選択することができ、「雑」で「粗っぽい」ものも積極的に用いられたのだと言える。

いて力学的に描かれた固体の分子的構成は、実際に真実であると受け入れられるものではない¹¹⁶とも念を押している。

このように注意が必要であっても力学的モデルが用いられた理由は、物質的な原因を明らかにして力学的な形式で構造を具体化しなければ、現象を理解することは困難であると考えられていたためである。トムソンは、反射による偏光や複屈折の説明の難しさを引き合いに出しながら、「光の波動説の難しさは、大衆的な想像力 (popular imagination) にまったく響かない難しさである」¹¹⁷と述べている。この「大衆的な想像力」に訴えるために、力学的モデルが用いられたのである。

すなわち、トムソンにおける力学的モデルとは、可感ではない微視的な原因によって引き起こされる作用について、何らかの巨視的な実体の運動を想定することで理解を促すための方法であった。そのため、あくまで力学的モデルの目的は作用の原因を解明することではなく、その原因によって生み出される運動のあり方を説明することであった。

このようにトムソンが力学的モデルにこだわるようになったことは、当時の社会的背景とも無関係ではないと考えられる。19世紀後半は、イギリスをはじめとして、多くの近代国家で産業機械への関心が一段と高まっていった時期である。トムソン自身が、経歴の初期から海底ケーブルの敷設や検流計の開発をはじめ、実験技術に数多く関わっているし、トムソンの父親や兄もまた産業機械への関心が高く、兄のジェームズ (James Thomson, 1822-92) は技術者を経て工学教授になった人物であった。トムソンは、1898年の電気学会 (Institution of Electrical Engineers: IEE) の会長就任演説において、力学的説明を求める動きがイギリスで大きくなってきている現状を次のように報告している。

電気現象の力学的説明といったものへの要求は新しいものではないが、年々大きくなってきている。英国協会 (British Association) の最近の会合の報告、とくに前回の英国協会の会合では、表面の下にあるものを知りたいという願望、すなわち磁石の作用、一般的な電気機器の動作、そして電磁気現象において、私たちの目前に置かれた力とエネルギーとの驚くべき現われに結びついている内部で関係しているものを知りたいという気持ちが大きくなってきていることが明らかになってきている¹¹⁸。

このトムソンの現状把握は、トムソン自身が力学的モデルの重要性を宣伝していたことを考えると、十分に客観的なものとは言えないだろう。しかし、確かにイギリスでは、19世紀末に向けて力学的モデルを重視する傾向が強くなっていった¹¹⁹。

¹¹⁶ BL, 110-1.

¹¹⁷ BL, 102.

¹¹⁸ W. Thomson, "Ether, Electricity, and Ponderable Matter," in *MPP*, 3:484. 引用中の「英国協会」とはBAAS (イギリス科学振興協会) のことである。

¹¹⁹ ワイズは、イギリスの力学研究には経験論と力学的モデルという対極的な二つの伝統があり、さらに物理現象が微分方程式によって巨視的に記述しようという共通認識が中核として存在し、それらが「経験的 (反仮說的) 方法論、幾何学的表記、偏微分方程式、一般動力学、力学的モデル」といった順序をなし

また、1840年代にケンブリッジ大学で進められた教養教育改革では2.3節で論じたヒューエルの学問分類と方法論が積極的に取り入れられており、このこともトムソンに影響を与えたと考えられる¹²⁰。詳しくは次節で論じるが、ヒューエルが *Mechanics* を「機械の力能」を対象とする分野と位置づけていたように、トムソンもそれを「機械の科学」ないし「技法」と位置づけていた¹²¹。そして、トムソンはこのような「機械的」な力学をとくに重視していた。トムソンは力学的モデルを重視するようになっていった背景には、これらのさまざまな社会的要因の影響があると考えられる¹²²。

19世紀初頭のフランスにおける「分析的＝実証主義的」方法は、「力学的＝分子論的」方法への批判というフランスの歴史的な文脈の中で生まれてきた方法であった。2.4節で説明したように、力学的モデルとアナロジーは包含関係にあり、力学的自然観や認識論についての社会的な制約がなければ、両者は対立的なものではない。これらの対立にはコントやフーリエが経験していたフランスにおける社会的な流れが多少なりとも影響しており、それらはイギリスにおいては自明なものではなかった。そのため、この歴史的な文脈から外れていたイギリスの研究者たちにとっては、「分析的＝実証主義的」研究もまた極端な方法と考えられたのであろう。そのため、イギリスでは「分析的＝実証主義的」説明では不十分だとして、力学的説明を求める傾向が共有されていったと考えられる¹²³。

2.3節でも引用したように、ヒューエルもコントの主張には懐疑的であり、フーリエやコントが論じる「流束」という数学的概念の物理的意味については次のような疑問を投げかけていた。

フーリエの述べるカロリックの「流束」とは、物質的な流れを暗示することより他には考えられない。コント氏は、この表現がかなり比喩的であるとして、それは「事実」をたんに示しているものだと弁解している。しかし、事実というものを除いた流体の流れ (flow) とは何なのだろうか。こうした表現や、それ相応の考えがなければ、フーリエは彼の理論を導くことも考えることもできなかった、ということは明白ではないのではないのだろうか¹²⁴。

ここでヒューエルが述べているように、実証主義的な研究は「事実」を表現するものであるが、実体をともなわない「事実」というものは存在しえないだろう。ヒューエルもこ

ていたと説明している。(Wise, "Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I," 1981, 20-1.)

¹²⁰ Smith and Wise, *Energy and Empire*, 61-5. スミスとワイズは、とくにヒューエルの『エンジニアリングの力学 (*Mechanics of Engineering*)』のような考え方が、トムソンの物理学的方法の基礎になっていると論じている。

¹²¹ Thomson and Tait, *Elements of Natural Philosophy*, 1.

¹²² Smith and Wise, *Energy and Empire*, 53-5.

¹²³ Kargon, "Model and Analogy in Victorian Science," 432-3. なお、カーゴンは、このフランスとイギリスの特色の違いを文化的な背景に関連づけ、フランスは天体力学的な中心力にもとづく分子論モデルが主流であったが、イギリスは産業革命の経験から機械論モデルが主流となったと説明している。(Ibid., 430.)

¹²⁴ Whewell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, 2:327-8.

の引用に続けて述べているように、観測できる事実から現象を論じるとしても、例えば熱や光について考える場合には、身近な物質と同じような性質を持つ媒質の存在を想像することは避けられない¹²⁵。そうすると、作用の原因を論じることは現時点では実証性に問題があっても、慎重を期しながら将来的にその方向へと研究を展開していくことは可能であるし、むしろそのように研究を進めていくべきであるとも言える。

トムソンも、前述のようにヒューエルと同様の見解を持っており、例えば光学理論について「現時点では集合体 (aggregate) としてしか私たちに知られていない物体や分子の集団の、究極的ないし「分子的」構成についてのいくつかのことを知らねばならない」¹²⁶と述べている。

このように、イギリスではフランスのような学説についての歴史的経緯がなかったため、アナロジーを用いながら数学的な関係性だけを議論の対象とすることは、その現象の説明として不十分だと判断された。そこで、とくにトムソンは、まったく別の物理現象であれ、実体をとまなう理解しやすい原因を仮定して、現象に対して力学的な説明を与える方法を求めるようになったと考えられる¹²⁷。これらはどちらもアナロジー的な説明ではあるが、前者では例えば熱と電気のようにどちらもその原因がはっきりしていないのに対して、後者はその実体や動作原理がはっきりしている。そのため、後者の力学的モデルを用いることが説明を与えるためには優れていると考えられたのだろう。こうして、トムソンの研究方法において、初期は実証主義的な数学的アナロジーに終始していたのに対して、後期は力学的モデルを重視するという傾向が生じることになったと考えられる。

7.5. トムソンにおける力学

この章で論じてきたように、トムソンは力学的な観点を次第に強めながら電磁気学研究を進めていった。その一方で、トムソンの研究関心は電信に関する技術開発や熱力学などに移り、電磁気学の基礎研究にはそれほど関与しなくなった。そのため、1840年代ではファラデーの理論が研究対象として意識されていたが、それ以降はファラデーの理論を積極的に発展させるような研究を進めることはなくなっていった。トムソンの1840年代の電磁気学研究を発展させていったのは、マクスウェルである。このマクスウェルについては次章で論じるとして、この節ではトムソンにおける力学の意味について分析を進め、トムソ

¹²⁵ Ibid., 2:328.

¹²⁶ Thomson and Tait, *Treatise on Natural Philosophy*, 1:446.

¹²⁷ 19世紀の後半には、電磁気現象の力学的モデルを発展させる形で、さまざまな機構によって現象を表現する装置が考案された。そして、このような傾向はこの時期に限定されたものであり、20世紀になると急速に衰退していった。19世紀後半になって電磁気学では急速に新しい概念が導入されていった。しかしマクスウェル方程式に代表されるように、それらの数学的な関係性は複雑かつ新奇的であり、研究者にとってもなかなか簡潔に認識しがたいものであった。そのような新しい概念を定着させるためにこうした力学的モデルを用いて実際に装置を作成することが必要とされたのである。(Brenni, "Mechanical and Hydraulic Models for Illustrating Electromagnetic Phenomena," 655-7.)

ンとファラデーの電磁気学研究の関係を力学という観点から整理しておきたい。

19世紀前半における学問の分類と力学との関係については、ヒューエルやアンペールの議論を参照しながら2.3節で論じた通りである。19世紀の学問分類では力学が方法論的な模範として位置づけられ、他の諸分野は力学との関係において階層的に分類された。トムソンは、これらの分類を踏まえながら、より厳密に力学を定義している。トムソンはテイトとの共著『自然哲学提要 (*The Elements of Natural Philosophy*)』の冒頭で、*Mechanics* と *Dynamics* との違いが混同されがちであるとして、それらの言葉を次のように整理している。

力の作用を研究する科学は、極めて論理的な執筆者たちによって、*Dynamics* と称されている。これはよく、誤って *Mechanics* と称される。この言葉は、機械の科学とそれを製作する技法というその本来の意味において、ニュートンによって用いられた。力は二つの方法で作用するものと認識される。1° 静止させておいたり運動の変化を妨げるたりするものとして、そして2° 運動を生み出したり変化させたりするものとして。*Dynamics* はそれゆえ、便宜的に静力学 (statics) と動力学 (kinetics) と称される二つの部分に分けられる。

静力学では静止状態を維持する、あるいは運動の変化を妨げる力の作用、すなわち「力のつり合い」や平衡が研究される。動力学では運動を生み出したり変化させたりする力の作用が研究される。

動力学では単なる「運動」ではなく「力」と運動との関係が研究される。動かされる物体、あるいは運動を生み出す力、そして運動によって呼び起こされる力に言及することなく考察される単なる運動の状況描写は、「運動学 (kinematics)」、あるいはより実践的な部門では、「機械論 (mechanism)」と称される純粋数学の一分野を構成している¹²⁸。

この記述から、トムソンが「力学」の意味を持つ言葉としては *Dynamics* という言葉を用いていたことがわかる。そして、この「力学」は「運動学」とは区別されていた。この区別は、2.3節で論じたアンペールの分類に準ずるものである。アンペールは、運動学とは原因となる力に言及することなく、その機構を理解するための分野であると説明していた。

7.1節でも指摘したように、この力学と運動学との区別は、トムソンの電磁気学研究の方法の変化を考察する上で重要な論点となる。ファラデーの力線は作用を「状況描写」するものであり、したがってトムソンの分類からすると運動学的であった。7.1節で論じたように、トムソンは、1847年の「力学的表現」論文で発表した研究成果を「力学的＝運動学的 (mechanico-cinematical) 表現」と述べていたが、この「運動学的」という言葉には、作用の形状を平衡状態の方程式によって数学的に表現しているという含意がある。基本となる

¹²⁸ Thomson and Tait, *Elements of Natural Philosophy*, 1. 原文では、*Mechanics* や *Dynamics* などの分類名は、すべて大文字で “MECHANICS” や “DYNAMICS” のように強調されている。引用するにあたっては、見やすさのために頭文字だけを大文字にして、代わりにイタリックを用いて強調している。

方程式そのものは弾性固体についての力学的な方程式であったが、平衡状態を論じたために、そこから得られた解も作用の「状況描写」になっていたのである。また、フーリエの流束という考え方を応用した1842年の「均質固体」論文も、力学的表現ではなかったが作用の分布を与える数学的表現には違いなかった。このように、1840年代前半のトムソンの電磁気学研究は、作用のふるまいに対して運動学的ないし幾何学的な表現を与えることを目的としていた¹²⁹。

もちろん、ここで「力学的=運動学的 (mechanico-cinematical) 表現」の「力学的」の方にも注意を向けておくべきであろう。上記のトムソンの分類によると、この言葉は「機械学的=運動学的表現」と訳すべきだということになる。このことは、トムソンが機械論 (mechanism) をあくまで純粋数学として位置づけながらも、運動学に対応する「実践的」な分野として位置づけていることにも表れている。機械論はあくまで現象の数学的な機構を扱う分野であり、議論の対象はどうあれ、理論としては運動学と等価だと位置づけられたのである。そうすると、この「力学的 (機械学的) =運動学的表現」とは、ほぼ同じ意味の言葉を重ねていることになる。

こうしてトムソンは、*Mechanics* を「力」についての学問体系からは除外して、「機械の科学とそれを製作する技法」¹³⁰と定義した。この定義からすると、トムソンの力学的モデル (mechanical model) も、文字通り機械として考案された機械的・工学的モデルということになる。2.3節では、19世紀前半の「機械」に対して過度に産業機械のイメージを読み込むべきではなく、「機械学」と「力学」は一連の同じような分野であったと指摘した。しかし、トムソンにおいては *Mechanics* と *Dynamics* が区別されており、*Mechanics* は「力学」よりも文字通りの「機械学」であることが強調されている。ただし、ここでトムソンは *Mechanics* と *Dynamics* の違いが混同されがちであると述べているが、トムソン自身もその意味を当初から明確に区別していたわけではなかった。この『自然哲学の基本要素』で与えられた「力学」の分類は、トムソンの他の記述に比べて極めて明確なものである。しかし、この分類は初めから得られていたものではなく、トムソンが1840年代から検討を重ねる中で移り変わっていったものであった¹³¹。

例えばトムソンは、1846年におこなわれたグラスゴー大学での就任講義では、「自然におけるあらゆる現象は「力」の現れである」¹³²のために、「動力学的な原理の完全な知識が絶対に必要である」¹³³として、「力学 (mechanics) は万人一致で物理的諸科学の筆頭に据え置かれるのである」¹³⁴と述べているが、この講義録の *Mechanics* という言葉は1862年に *Dynamics* に書き改められ、また1878年に *Mechanics* に訂正されたことがわかっている¹³⁵。

¹²⁹ Wise, “William Thomson’s Mathematical Route to Energy Conservation,” 69-80.

¹³⁰ Thomson and Tait, *Elements of Natural Philosophy*, 1.

¹³¹ Smith and Wise, *Energy and Empire*, 122-5.

¹³² Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 1:241.

¹³³ *Ibid.*

¹³⁴ *Ibid.*

¹³⁵ *Ibid.*, 1:192; Smith and Wise, *Energy and Empire*, 123n. スミスは、このトムソンの力についての見解がロビンソンに極めて近いものであることを指摘している。

また 1852 年には、力学的エネルギー (mechanical energy) を *Statical* (静的) と *Dynamical* (動的) の二種類に分類している¹³⁶。すなわち、ここではトムソンは、*Mechanics* を一般的な力学の意味で、静力学と動力学の集合を意味する言葉として用いている。他にも、トムソンはストークスに宛てて書いた運動学について説明する手紙の中で、*Mechanics* と書いた後にそれを訂正して *Dynamics* と書き改めたこともあった¹³⁷。このように、トムソンもまた *Mechanics* と *Dynamics* の意味を一貫して区別できていたわけではなく、力学と機械学の区別には不明瞭さが残されていた。社会的にも、*Mechanics* の言葉の意味は広範であり、トムソン自身もその区別を悩ましく感じていたのだろう。

トムソンの研究関心は、現象の作用のあり方を表現することから、エーテルの振動などの動力学的な因果関係を探ることへと移っていき、それにもなつて用いる方法も運動学から力学ないし動力学へと変化していった。このトムソンの研究の変化を 7.4 節で論じたようにアナロジーと力学的モデルとの関係から考えると、運動学と力学、そして動力学の区別にトムソンがこだわった理由も理解できる。このようにトムソンが力学の分類にこだわったことは、トムソンの力学への関心の高さを反映しているとともに、力学をさまざまな研究へと応用していくにあたって、改めてその位置づけを整理する必要が生じていたためであると考えられる。

最後に、トムソンにおける力学の問題として、近接作用説と遠隔作用説の位置づけについても論じておく必要があるだろう。7.3 節で論じたように、トムソンは「力学的表現」論文において中心力によるポテンシャルを前提として議論を展開していた。このように、トムソンの「自然哲学」の理解はニュートン力学に準拠しており、ポアソンと同じような「力学的=分子論的」な研究もおこなっていたが、遠隔作用そのものには否定的であった。そして、ボスコヴィッチの原子論についても、その内容が遠隔作用説につながるとして批判的であった¹³⁸。トムソンは、1893 年 11 月 30 日に王立協会でおこなった講演でも、次のようにボスコヴィッチの理論については批判的に言及している。

18 世紀末になる前に、絶対的な真空を通して遠隔的に作用が及ぶという考えが強固に確立されて、ボスコヴィッチの理論は現実のものとして無条件に受け入れられるようになった。そのため、重力や電気力、磁気力が媒体を通じて顕在化されていると考えることは、100 年前の自然研究者や数学者たちには洗練されていないように思われた。それは、さらにその 100 年前に遠隔作用がニュートンやその同時代人たちにとってそう思えたのと同様である。しかし、19 世紀初頭にその 18 世紀の学派からの逆行が始

¹³⁶ W. Thomson, "On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy," *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* 3 (1852); Reprint, *MPP*, 1:511.

¹³⁷ Kelvin to Stokes, 1 February 1848, Thomson and Stokes, *Correspondence between Sir George Gabriel Stokes and Sir William Thomson*, 1:8.

¹³⁸ このようなトムソンの遠隔作用としてのボスコヴィッチ理解は、グラスゴー大学のニコルから学んだと考えられる。(Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 1:20; Wilson, *Kelvin and Stokes*, 26-30.)

まったのである¹³⁹。

このようにトムソンは、18世紀において遠隔作用が当然視されるようになり、近接作用説が時代遅れとみなされるようになったと述べ、ボスコヴィッチの理論もその18世紀の遠隔作用説の中に位置づけている。その一方で、19世紀になるとまた近接作用説が有力になってきたとして、この引用文の後でファラデーの研究を紹介している。このトムソンの説明は、1.3節で引用したファラデーの見解と同じように、ニュートンは遠隔作用を否定していたが、後の研究者たちによって遠隔作用を認めるような理論が形成されていったという理解に基づいている。もちろん、このトムソンの遠隔作用説についての理解は、1.3節で論じたように必ずしも正しいものではないだろう。しかし、トムソンがファラデーと同じような根拠から、近接作用を前提としていたことがここからわかる。

その一方でトムソンは、前述のように空気がエーテルとしてふるまう可能性が否定されたことで、エーテルと物質とは排他的ではないと考えるようになった。そうすると、ファラデーが遠隔作用を否定しながらボスコヴィッチの原子論を近接作用の論拠として引用したように、トムソンもボスコヴィッチの原子論を部分的には認めるようになった。例えば、1900年頃にはエピヌスの電気一流体説をボスコヴィッチの原子論的な「電子イオン (electrion)」として解釈する可能性を模索し、それによって電気分解の「ファラデーの法則」も説明できるのではないかと考えていた¹⁴⁰。また、トムソンは、大きさのない点原子という考え方には否定的であったが、力の分布が距離に応じて変化するというボスコヴィッチの考え方は支持していた¹⁴¹。

このように、トムソンの考え方は、いくつかの点でファラデーの考え方に近いものであった。トムソンは、初期の頃はフーリエの流束とのアナロジーによって電気現象に数学的な表現を与え、ファラデーの力線と親和性のある研究を展開した。そして、トムソンが近接作用的な数学的理論を展開したことによって、遠隔作用説とファラデーの近接作用説との対立は、少なくとも数学的表現の問題としては解消に向かうことになった。

しかしその一方で、数学的な表現を与えるだけでは物理的な根拠に乏しいため、何らかの形で作用の原因を論じることが求められるようになった。こうして、次第に力学的な説明を求めるようになり、後期には力学的モデルを作ることが現象の理解には必要不可欠であると主張するまでになった。

トムソンはあくまで数学的表現を与えて、それを力学的に説明することを求めていたの

¹³⁹ W. Thomson, "Presidential Address: Extract from the Address of November 30, 1893," *Popular Lectures and Addresses*, 2:539-40.

¹⁴⁰ W. Thomson, "Contact-Electricity and Electrolysis according to Father Boscovich," in *MPP*, 6:145-7. この見解は、1901年に発表された「原子化されたエピヌス (Aepinus Atomized)」と題された論文でまとめられている。

¹⁴¹ このような考え方の変化は、物質の分子構造や放射線について考察を進めることによっても促された。(W. Thomson, "Molecular Constitution of Matter," in *MPP*, 3:398-410; Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 2:1050-6; Wilson, *Kelvin and Stokes*, 163-169, 221-31.)

であり、ファラデーのように力と粒子の関係について深く研究を進めていったわけではない。また、電磁気学の体系化を求めるともなく、マクスウェルのように電磁場の理論を展開することはなかった。トムソンにおいてこのような傾向が生じたことは、トムソン自身が電磁気学については実用的な関心が強くなったためであろう。

そして、これらのトムソンの研究の方向性は、ファラデーとは異質なものでもあった。とくにトムソンの研究は力学に基礎を置いたものであり、これはファラデーの立場とは相容れないものであった。そのため、ファラデーのトムソンに対する評価も近接作用説と遠隔作用説の対立の解消に関することにとどまっていた。そして、このトムソンの初期の研究を引き継いで発展させていったのがマクスウェルである。マクスウェルも力学を重視したが、その研究の方向性はトムソンとは異なるものであった。

それでは、次章でマクスウェルについて論じることにはしたいが、まずはその前に、改めてファラデーの電磁気理論についての分析に戻り、磁力線や磁場についてのファラデーの概念を整理しておきたい。その上で、マクスウェルの電磁気学研究の具体的な内容と、そのアナロジーと力学的モデルとの関係について分析を進めていくことにしよう。

第8章 マクスウェルによる力線と場の数学的解釈

第7章で論じたように、ウィリアム・トムソンによって、ファラデーの力線が数学的・力学的に表現できる可能性が開かれた。このトムソンの研究を継承し、それを独自に発展させたのがマクスウェルである。マクスウェルは、ファラデーの研究が数学的形式と親和性が高いことを1873年に出版した『電気磁気論 (*A Treatise on Electricity and Magnetism*)』の序論で次のように指摘している。

ファラデーの研究について取り組むにつれて、現象を考える彼の方法は数学的記号の慣例的形式では示されてはいないが、数学的なものであると思うようになった。私はまた、これらの方法が通常の数学的形式で表現されうるものであり、専門的な数学者の方法とも比肩するものであることがわかった¹。

ここでマクスウェルが述べているように、トムソンがおこなったような研究がなされるまで、ファラデーの研究は「数学的記号の慣例的形式」で表現できるとは考えられておらず、ファラデー自身もそのようには考えていなかった。そのような「慣例的」な方法では、一般的には1.3節で論じたように、電磁気現象を電気流体からの遠隔作用的な中心力に還元することになり、その作用の形状を直線ないし円の組み合わせとして表現することになるからである。そのため、ファラデーはそのような「慣例的」な数学的研究に対して批判的な立場を取っていた。

このような従来形式に対して、マクスウェルは、ファラデーの力線が流体とのアナロジーとして数学的に表現できると考えた。そして、実際にその観点から研究を進めて、その成果を1856年に論文「ファラデーの力線について (*On Faraday's Lines of Force*)」として発表した。マクスウェルはこの論文をファラデーに送り、ファラデーはその数学的な内容を1857年3月25日付の返信の中で次のように高く評価している。

貴方の論文をお送りいただき、そのことに大変感謝しております。貴方が力線について述べられていることに感謝していることは申すまでもありません。貴方がそれを哲学的な真理のためになさったのだということは存じ上げているからです。とはいえ、それは私にとってこの上なくうれしいことでしたし、考えを進めるための大きな励みになったことはお察しください。私は初め、その課題に対してそのような数学的な力が加えられていることを目にしたときに恐れに近い気持ちを抱きましたが、続いて、

¹ Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, 1:ix. マクスウェルはファラデーへの追悼文の中で、計算や方程式は有用であるが、それは数学の一部に過ぎないと述べている。(Maxwell, "Faraday," in *SP*, 2:360.)

その課題がそれにとってもよく持ちこたえていることを目にして驚きました²。

ファラデーが、どこまでマクスウェルの議論の数学的内容にまで理解が及んでいたかは極めて疑問であるが、自分の用いてきた独特な表現方法がマクスウェルによって数学的な表現を与えられ、さらなる包括的な発展を遂げつつあることは感じ取ることができたであろう。ファラデーが数学に対して不信感を抱き続けてきたことは、当時の数学的方法が中心力に基づく直線的な作用として現象を理解しようとする態度と密接に結びついていたからである。いまや、数学的研究は新しい展開を迎え、その関係は大きく変化しようとしていた。そして、ファラデーの研究は、その新しい研究の展開の中で評価されていくことになった。

なお、この章では、ファラデーが1850年頃に磁力線や磁場について理論的考察をおこなっているため、まずはその内容を整理することにする。その上で、マクスウェルの研究についての分析に進むことにしたい。

8.1. ファラデーにおける磁力線と磁場の理論

7.2節で言及したように、ウィリアム・トムソンは熱と電磁気とのアナロジーを考える上でファラデーの「力線の伝導力」という考え方に注目していた³。この「伝導力 (conducting power)」とは、ファラデーが1850年の論文で導入した考え方である。ファラデーは、さまざまな物質がそれぞれ異なる磁気の伝導力を持っていると考えることで、あらゆる磁気現象を説明できる可能性があると考えようになった。なお、この「伝導力」とは「力の伝送 (transmission)」に対する能力を意味しているだけであり、何らかの物質が実際に移動していることを意味していたわけではないとされた⁴。すなわち、ファラデーは力線に対し

² Faraday to James Clerk Maxwell, 25 March 1857, *Correspondence*, 5:207. なお、ファラデーは、この書簡を出す直前の1857年2月27日に出版された論文「力の保存について」の中では、数学的手法について次のように従来と同じような否定的な見解を述べていた。「私は、自然における作用の原理の本質や力能を感知することにかけて、数学的な精神が、単純にそれ自体で、同じくらい鋭敏だが数学的ではない精神よりも有利だとは思えない。数学的精神は、それだけで何か新しい原理についての知識を導入することはできない。静電気の一部あるいはすべての量を扱うならば、数学的精神は、それらを比較して調整することに驚くほど有利であり、実験家がもはや確かめられない結果すらも予測しており、その能力はある。しかし、それは動的な電気も、電磁気も、磁電気も発見できなかったであろうし、それを示唆することさえできなかったであろう。けれども、実験家によって一度発見されてしまえば、きわめてたやすくそれらを取り上げることができる」(*ERCP*, 458.) ここで述べられている「静電気」の研究とはトムソンの研究を指していると考えられる。この評価からも、7.5節で結論づけたように、ファラデーのトムソンに対する評価が静電気における近接作用説と遠隔作用説の対立の解消に関することにとどまっていたことが伺える。なお、この論文「力の保存について」については9.2節で改めて論じる。

³ *RPEM*, 1n; W. Thomson, “Magnetic Permeability, and Analogies in Electro-static Induction, Conduction of Heat, and Fluid Motion,” in *RPEM*, 489; W. Thomson, “On Certain Magnetic Curves; with Applications to Problems in the Theories of Heat Electricity, and Fluid Motion,” in *RPEM*, 520.

⁴ *ERE*, 3:200, par. 2797. ファラデーは、1845年から1848年にかけて反磁性体の通常に分極とは異なる現象に直面した際に、第5章で論じた電気の「誘導容量」とのアナロジーで理解し、静電誘導の研究と同じよ

て、フーリエやトムソンが「流束」という数学的概念で導入したように形式的な流れという意味を与えたのであった。

それでは次に、1850年代のファラデーの磁気論についての具体的な分析に入ろう。ファラデーはまず、磁場中では大きな伝導力を持つ物質ほど磁力が強くはたらいっている場所に引きつけられると仮定する。そうすると、例えば酸素の方が窒素よりも伝導力大きいと考えると、磁場中に酸素と窒素がある場合に酸素の方が磁場の中央に引き寄せられる現象が説明できる。また一種類の気体しかなければ、そのような移動が生じないことも説明できる。そして、この磁場中の作用は、万有引力のような中心力による作用とはまったく異なるものであり、軸を持つ径方向の作用とも異なる独特なものであった⁵。そのため、ファラデーはこの「伝導力」という新しい概念を導入したのである。

そして、このように磁気の伝導力という概念を導入することで、「常磁性体 (paramagnetic)」と「反磁性体 (diamagnetic)」の作用の違いも説明できると考えられた。常磁性体は磁場の強いところへ牽引されるが、反磁性体はそのようなところから反発する。この磁力線に対する作用の違いは、図 46 のように描かれている。なお、この図の左の球体 P は常磁性体、右の球体 D は反磁性体である。

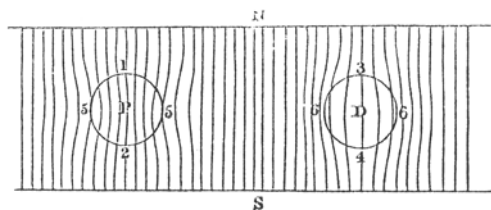


図 46 : N と S に磁化した鉄の壁のあいだに生じた磁場中にある、常磁性体 (P) および反磁性体 (D) による磁力線の変化 (ERE, 3:208, fig. 3.)

このように、物質の磁性の違いを磁力線に対する作用の違いと考えれば、磁場中にある常磁性体や反磁性体では、それらの伝導力の違いに応じて磁力線が集中したり分散したりするような場所が生み出されていると解釈できる。すなわち、常磁性体の内部では通常の空間よりも伝導力が大きいため力線が集中し、逆に反磁性体の内部では伝導力が小さいために力線が分散する。例えば、図 46 左の常磁性体 P では、磁力線が 1-2 に集中している

うな研究方針で臨んだ。ファラデーは、物質がそれぞれ固有の誘導容量を持つとして、電気伝導も近接粒子間の誘導作用の伝達として説明していた。(ERE, 3:201, 218, par. 2798, 2846; Gooding, “Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field,” 97-8.) なお、「力の伝送」という観点に注目すると、この考え方は、ファラデーが独自に発展させたと言うよりも、7.2 節で論じたトムソンのアナロジーにファラデーが影響され、それを自分なりに解釈したものだと考える見方もある。(Thompson, , *Life of Lord Kelvin*, 1:144. Gooding, “Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field,” 91-4.) 詳細は 9.3 節でも論じるが、グーディングは、ファラデーの「伝導力」の考え方がトムソンの交流以前にさかのぼることができることを示し、これらの見解に対しては否定的に結論づけている。(Ibid., 94-112.)

⁵ ERE, 3:201-202, par. 2798-802. この現象は現在、酸素と窒素の「磁化率」の違いとして説明されている。

し、図右の反磁性体 D では、磁力線が 3-4 から分散している。そうすると、常磁性体の 1-2 では極性が強まるのに対して、反磁性体の 3-4 では極性が弱まることになる。

ファラデーは、このように磁力線の状態変化によって生じる極性を、永久磁石に生じている極性とは区別して「伝導極性 (conduction polarity)」と名づけた⁶。そして、物体内外で生じる磁力線の密度の違いによって、反磁性体どうしが反発し合ったり、常磁性体とは引き合ったりする現象も説明できると考えた⁷。また、力線の「量 (amount)」すなわち密度を変化させる作用は、物体が占めている空間だけに限定されず、その近傍にある力線にも及んでいると考えたのであった⁸。

このように磁気の伝導力という観点から解釈すると、磁極という概念そのものも物質内部の粒子の状態によって生じているのではなく、磁力線ないし磁場の状態変化によって生じていると説明できるようになる。ファラデーは、磁気の極性と磁力線の関係について次のような見解を述べている。

それらの極性として考えられているものを、物質やそれらの粒子の内部状態ではなく、それ自身が磁力線を乱すことによってもたらされる、全体としての質量 (mass) の状態を示す言葉として用いたいと思っていることに注意してほしい。そして、他の物体に似たような影響を与える状態についても、それ自身の質量の異なる部分に存在する違いについても、同じように考えている⁹。

すなわちファラデーは、磁極は周囲の空間にある磁力線と結びつき、磁力線によって保持されていると考えた。そもそもファラデーは、極性が力線の両端で生じるものだと考えていた。それに加えて、1849年には反磁性体にも極性が生じている可能性について調べていたが、否定的な結果しか得られなかった¹⁰。これらの結果から、極性そのものを磁気の本質とみなすのではなく、あらゆる磁性のふるまいに共通して関係している磁力線の方を磁気の本質だと考えたのである¹¹。

そして、この磁力線の様子は、実際に棒磁石の周囲にまかれた鉄粉の分布から知ることができた。例えばこの分布は図 47 で描かれているようになり、その分布からは磁極が点ではなく広範囲にわたって分布している様子が観察された¹²。

⁶ ERE, 3:207-10, par. 2818-25. なお、ファラデーは、永久磁石の極性は粒子の作用によって生じると説明し、この「伝導極性」とは区別していた。(ERE, 3:212, par. 2832.)

⁷ ERE, 3:211-2, par. 2814-7, 2830-1.

⁸ ERE, 3:204-7, par. 2807-17.

⁹ ERE, 3:207, par. 2818.

¹⁰ ERE, 3:157, par. 2693.

¹¹ ERE, 3:368-9, par. 3174.

¹² ERE, 3:399-400, par. 3238.

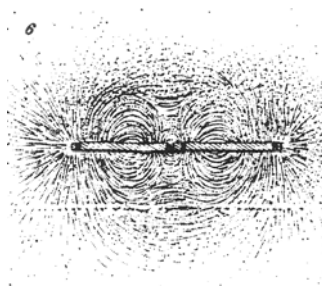


図 47：磁石のまわりの鉄粉によって現れている磁力線。とくに磁石の中央部分の様子からわかるように、磁力線はそれぞれの磁極の「側」から広い範囲で出入りしており、磁極が「点」として存在しているわけではないと認識されている。この点は、エピヌスの描いた図 7 やファラデーが 1831 年に描いていた図 21 とは対照的である。また、磁力線が癒着している様子も描写されている。(ERE, 3, plate 3, fig. 6.)

ファラデーはこの鉄粉の分布について、「磁石の表面のあらゆる部分が、いわば、外部に磁力線を注ぎ出しているのである」¹³と表現している。そして、「磁極」は「力の方向を表す性質」に過ぎないと理解され¹⁴、その意味において「極や作用の中心というものは存在しない」¹⁵と考えられた。すなわち、磁極とはあくまで磁力線が通過している場所に過ぎず、磁極から何らかの作用が生み出されているわけではないと考えたのである。そうすると、磁極が点ではなくある程度の範囲に分布していることも説明できることになる。

このように磁気の極性を「極」ではなく「線」によって理解しようとすることは、ファラデーが電気分解において電極を「極」ではなく「道」として解釈していたことと同様の理解である¹⁶。この電気化学とのアナロジーは、図 47 の中央にも描かれているように、磁力線が「癒着 (coalescence)」することの説明にも用いられた。ファラデーは、複数の磁石の磁力線が互いに癒着することがあり、しかしその癒着によっては磁力線の力の強さが増すことはないと考えていた¹⁷。この現象は、磁力線とヴォルタ電池とのアナロジーを考えた場合に、ヴォルタ電池の電氣的な「強さ」が電池を合わせても変化しないことに対応づけられ、さらに、磁力線が回路をなしているという理解にも結びつけられた¹⁸。

¹³ ERE, 3:432, par. 3289.

¹⁴ ERE, 3:532-3, par. 3307. ファラデーは、磁極がこのように方向性を持った磁力線の両端に現れる性質として理解できることを繰り返し主張している。例えば、ERE, 3:549, par. 3336.を参照せよ。

¹⁵ Faraday to William Whewell, 29 January 1853, *Correspondence*, 4:480.

¹⁶ 4.2 節を参照せよ。また、そうすると電気の場合に帯電が近接粒子の作用として説明されたように、磁気の極性も反磁性と常磁性で性質の違いはあるものの、いずれも何らかの粒子の作用である可能性もあり得ないわけではなかった。(ERE, 3:536-537, par. 3310-2.) なお、ファラデーは、常磁性体と反磁性体との極性の現れ方の違いを入れ子状になった楕円形の円筒に満たされた媒質のモデルを用いて、その配置の違いから説明している。このモデルによると、粒子の状態が同じでも、かたまり (mass) としては異なる極性が生じる様子が説明できるとされた。(ERE, 3:538-541, par. 3315-7.)

¹⁷ ERE, 3:395-7, par. 3226-7.

¹⁸ ERE, 3:395, par. 3228-32. なお、ここでは複数のヴォルタ電池を一つの回路に短絡した場合が想定されて

さらに、磁極がこのように周囲の磁力線によって規定され、むしろ磁力線こそが磁気の本質だとすれば、それは磁気の「観念性 (ideality)」を示していると考えられた¹⁹。すなわち、磁気は物質によって規定することができず、磁力線は観念的な存在であるとされたのである。ファラデーは、磁力線の観念性について次のように述べている。

(実質的にはかなり異なるものの) 光線や熱と同じように独立した存在であり、ある与えられた空間にあつて、その伝送には時間もかかり、放射線 (ray) を残すことはあつても私たちには絶対に感覚できず、その存在が途絶えるところで生じる効果を通してのみ知られる²⁰。

このように、磁気とは空間中に存在しながらも物質的なものとして知覚できない、あくまで観念的にのみ知られる存在であると考えられた。

ファラデーは別の論文で、この観念性について説明するために、空間そのものは可視的ではないために太陽と地球のあいだの真空の空間では「光ないし光の形式 (light or form of light)」は存在しないとする説を引用している²¹。光線が波であるならば、光そのものは物質的なものではない。光は媒体によって伝えられる作用そのものということになるからである。これと同じように、磁力線も物質的なものではない可能性が想定された。

この解釈は、第6章で論じた力線を物質そのものとみなす原子論とは異なるが、磁気を近接粒子の作用とみなす解釈とは両立するものである。例えばファラデーは、磁力線がこのように観念的なものであるとした上で、それをきわめて小さな磁針によって描かれる線として定義している²²。このことは、磁力線が近接粒子の作用をつないだ線として表現されることを示している。ファラデーは、磁力線の非物質性を次のようにまとめている。

私は「力線」という用語の意味を、(現時点では) 現象の物理的な原因の本質についての観念は何も含まないよう、あるいはそのような観念と結びつけられたり、何らかの形で依存したりするようなことのないよう、ある与えられた場所における力の状態、すなわち強さと方向以上のことを含意しないように制限してもらいたいと考えている²³。

すなわち、「力線」とは作用の原因となるような物質的な存在ではなく、あくまで力そのものの状態を表現するための観念であるとされた。このように力線が力の表現手段に過ぎ

いる。

¹⁹ *ERE*, 3:323.

²⁰ *Ibid.*

²¹ *ERE*, 3:540, par. 3317. またファラデーは、重力の原因について説明を与えることをニュートンやオイラーが周到に避けていることにも言及している。(Ibid.)

²² *ERE*, 3:328, 331, par. 3071, 3076.

²³ *ERE*, 3:330, par. 3075.

ないとすると、4.4節でも指摘したように、力線とはベクトルそのものとみなせるようになる。ここで力線が力の方向と強さ以外のことを意味しないとされていることは、それぞれの力線によって表現される力の「量」が一定であるとされたためである²⁴。すなわち、磁力の量は力線の密度で表現されるため、個々の力線が「量」を表す必要はないと考えられたのである²⁵。

このように力線を力の状態の表現や形式に過ぎないと位置づけることは、4.4節や5.6節などで論じたように、ファラデーが初期の頃から力線に対して与えていた定義と同じである。その一方で1840年代になると、少なくとも電気については、ファラデーは6.4節などで論じたように力線が物質と同等であるかのような議論を展開するようになっていた。しかし前述のように、ファラデーは「極」の存在を磁力線の伝導力によって説明するようになった。そうすると、作用の原因を考察することを放棄して、磁力線という概念を中心として理論を再構成した方がよいことになるだろう。

それまで磁気の原因は、例えば1.3.3節のポアソンの議論に見られるように、磁気流体として仮定されたり、中心力を及ぼす要素に還元されたりしてきた。しかし、磁気を「極」の作用と考えてその原因を仮定することは実証的ではなく、あくまで仮説の域を出ない。また、磁気的作用が空間を伝わる過程についても同様に不確かである。ファラデーは、この磁力の原因の不確かさを改めて次のように述べている。

どのように磁力が物体や空間を通過して移動していくのか、すなわちその結果は、重力の場合のように単に遠隔的な作用なのか、あるいは光や熱、電流、そして（私が信じているように）静電気的作用の場合のように何らかの中間の作用因によるものなのか、私たちは知らない²⁶。

このように、ファラデーは、磁気的作用が空間を伝わっている原因を実証的に説明することができなかった。その一方で、磁力の状態を表現するための方法として、磁力線を物質的な原因とは独立なものとする、磁力線は作用の原因がどのようなものであろうと、その作用を表現するための手段になりうる。いわば、フーリエが熱の原因に言及することなく、その作用が伝わる様子を方程式で記述したように、ファラデーも磁気の原因に言及することなく、その作用が伝わる様子を力線で表現しようとしていたのである。

そして、ファラデーは磁力線をこのように観念的ではあるが空間的に独立している特殊な存在とみなしており、その性質を力の伝送の「物理的様式 (physical mode)」として論じ

²⁴ *ERE*, 3:329, par. 3073.

²⁵ 4.1節で論じた誘導電流と力線との関係からもわかるように、このことから、電磁誘導による誘導電流の大きさは、導線が横切った磁力線の数に比例すると考えられるようになる。(ERE, 3:332, 344-5, 371, par. 3082, 3109, 3177.) ファラデーはこの1851年の論文で、この力線と誘導電流との関係を踏まえて、磁力線が磁石の外部だけでなく内部にも同じ量が存在していることを示している。(ERE, 3:347, 349, par. 3117, 3121.)

²⁶ *ERE*, 3:330, par. 3075.

ていた²⁷。この「物理的様式」とは、トムソンの力学的モデルにおける「運動の様式」と類似のものであるが、もちろんファラデーは力学的な運動が念頭にあったわけではない。ファラデーにとっての「物理的」様式とは、運動に還元されるような「力学的」ないし「数学的」な様式とは異なるものであった²⁸。

それでは、ファラデーはこの「物理的」という言葉をどのような意味で用いていたのだろうか。ファラデーは、1852年に「磁力線の物理的性質について (On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force)」と題した論文を発表し、力線についての考えをかなり自由に展開している²⁹。

まずファラデーは、作用が遠隔的であると考えられる場合であっても、そのような作用が空間を伝わる「方式 (manner)」を探るべきであるとし、それが定かではない場合には、それぞれの「力能の線の特性 (affection)」を区別することが重要であると主張している³⁰。例えば、重力については、その力線は直線的であり、その進路が逸れるような事例は観測されていなかった。すなわち、粒子が他の粒子に及ぼす重力の作用は、個々の粒子に対して、方向についても量についてもつねに一定であり、きわめて単純である。そのため、重力には「物理的な過程 (physical process)」は関係していないと判断された³¹。それに対して、電気や磁気的作用は、極性が存在することで引力と斥力という「二元性 (duality)」を持ち、その作用のあり方も曲線的であるなど、重力の作用とはかなり異なっている。そのため、電気力線や磁力線には「物理的な過程」が関係しており、その「物理的性質」を探ることが必要だと考えられた³²。すなわちファラデーにとっての「物理的」とは、何らかの物質的な存在が関与している状態を意味していたと言えるだろう。

もともと、電気の場合には、5.5節でも問題となったように、とくに真空の場合をどのように解釈するかということが大きな課題となった。真空の場合の電気力線について、ファラデーは次のように述べている。

完全な真空に関しては、どのように電気の力線が存在しているのだろうか、すなわち、

²⁷ ERE, 3:369, par. 3175.

²⁸ 例えば、ファラデーは磁力の消滅 (annihilate) や抑圧 (surpress) の可能性を「力の保存則」という観点から考察するにあたって、その「物理的 (physically)」な可能性と「数学的 (mathematically)」な可能性とを区別して考えている。(ERE, 3:546, par. 3330.)

²⁹ このことは、論文の冒頭でその内容が「推論のきちんとした筋道」を離れて「推察的で仮説的」になっていると断りが入れられていることからわかる。(ERE, 3:407.) ファラデー自身がこのように自覚していたため、この論文は、それまで磁力線に関する論文を発表してきた王立協会の『哲学紀要 (Philosophical Transactions)』ではなく、あえて『哲学雑誌 (Philosophical Magazine)』に投稿された。

³⁰ ERE, 3:408, par. 3245.

³¹ ERE, 3:408-9, par. 3245. なお、ファラデーは、重力の作用が伝わる上で時間がかかるようであれば、力線の経路に「物理的な作用因 (agency)」が存在しているはずだと考えていた。しかし、物体が及ぼす重力の作用を変化させたり消したりすることはできないため、このような時間を測定することは不可能であるとも考えていた。(ERE, 3:409, par. 3246; ERE, 3:506-7.)

³² ERE, 3:497. ファラデーは、重力が「粒子」に対して作用するのか「質量」ないし「系 (system)」全体に対して作用するのかは判断を保留しながらも、磁力はその「二元性」において重力と大きく異なるとしている。(Ibid.)

重力の線がそうだろうと仮定されているように直線なのだろうか、それとも誘導を境界づけたり終端したりする表面や粒子のわずかに離れた作用を、物理的実在のような何か隔っているというような方式において曲線なのだろうか、ということは定かではない。静電気力の線には、今のところまだ「質 (quality)」や「極性 (polarity)」といったものは発見されていないし、それについて何らかの「時間」との関係が確証されたということもない³³。

媒質が存在するならば、電気の曲線的な作用はその近接粒子のはたらきとして説明できる。しかし、そのような粒子が存在しない真空状態であれば、電気力線そのものを独立した存在とみなす必要があるだろう。ここでの「質」とは、熱や光線の偏光とのアナロジーで考えられるものであったが、電気についても磁気についても、そのような現象とのアナロジーを想定させるような質的な変化は観察できなかった³⁴。一方、ファラデー自身は粒子間の可感ではない微小領域では遠隔的な中心力を認めていた。そのことから、電気にせよ磁気にせよ、その延長として重力のような作用になるのか、あるいはやはり何らかの物理的実在によって伝えられる作用であるのかは不確かであった。

このように電気と磁気の作用は似通っていたが、中間媒体の実在性という観点からは違いも認められた。そして、ファラデーは離れたところにまで作用が及ぶような自然界の力を、「物理的様式」との関係から、次のように重力、放射、電気の三種類に区別している。

遠隔的に力がはたらく場合には、少なくとも三つの大きな区分がある。重力のそれについて、中間にある空間を通る物理的な線によって力が伝搬しているというようなことはあり得ないと考えられている。放射のそれについて、伝搬が実在し、伝搬する線あるいは放射は、一度生み出されたら、その発端とも終端とも独立に実在物 (existence) を持つ。そして電気のそれについて、放射のように伝搬する過程が中間の実在物を持っているが、それと同時に、力線の両端や、そのような両端に等しい（接続されたヴォルタ電堆のような）条件に依存する。磁気の遠隔作用をこれらと比べてみる必要がある。それは、どれとも似ていないようだ。そして、力が伝えられる物理的な方法や形式のすべてに私たちが気づいていると言える人はいるだろうか。けれども、ある人は重力のような遠隔的な力だけの純粋な事例であると仮定し、ある人は力能の流れ (streams of power) という考え方でよりよく表現できると考えている。現時点での疑問は、磁力線が物理的実在 (physical existence) を持つのかどうか、そして持つなら、そのような物理的実在は静的な形式なのだろうか、それとも動的な形式なのだろうかということである³⁵。

³³ *ERE*, 3:410, par. 3249.

³⁴ *Ibid.*

³⁵ *ERE*, 3:411, par. 3251.

すなわち、重力は純粋な遠隔作用であり、物理的実在に帰せられることはない。その一方で、放射は空間の中で発生源とは独立に存在するために物理的実在であると考えられた。そして電気は、その中間的な存在であり、空間中に実在するものの作用の原因と対象、すなわち力線の発端と終端となっている物質から独立に存在するわけではないと考えられた。なお、ここでの「物理的実在」とは、それが物質であるということの意味しているわけではなく、あくまで作用そのものが発生源から独立に存在しているということだけを意味している³⁶。

そうすると次に、磁気がこの分類の中でどのように位置づけられるかを判断することが問題となる。磁力は重力とは異なり、直接的な遠隔作用ではないと考えられたが、磁力線が作用を伝えるために時間を要しているのかどうかは不明であった。ただし、金属を磁化するためには時間を要することも知られており、ビスマスと鉄ではその時間が異なることも知られていた。そのため、磁気がエーテルの作用であり、その作用の伝達時間が短いだけだという可能性もあった³⁷。また、4.1節で引用したように、ファラデーは1831年には、磁気的作用が前もって空間的に規定されている可能性を考えていた。さらに、1854年の論文でも反磁性体が誘導の作用に先だって磁力を規定していると考えていた³⁸。もし、このように磁気的作用が誘導作用の発生に先立って空間的に規定されているとすれば、空間においてあらかじめ磁力線ないし磁場が存在していることになる。実際、ファラデーは、誘導作用の原因が整う前にその作用のあり方ないし「様式」が存在していたと考えることで、磁気を物理的実在であるかのように考えるようになった。そして、その実在性の根拠を模索していくことになった。

磁気が物理的実在かどうかは、その「力能の線の特性」である形状からも判断できると

³⁶ そのため、前述のようにファラデーにおける「物理的」という言葉の意味として述べたように、それ自身が物質ではないにせよ、それが伝わっていく上で何らかの形で物質的な存在が関与していることを予想させるものであった。

³⁷ *ERE*, 3:412, par. 3253. ファラデーは、この可能性を繰り返し検討しているが、結局は有意な結果を得られるような実験を考案することはできていない。例えば1855年8月には、磁気の伝達時間を測定するための実験について検討している。このような実験では効果はきわめて短時間に生じるはずであり、実際の測定は困難であるとしながら、直径の異なる三つのコイルを組み合わせて誘導電流の時間差を測定する実験を考えている。(15 August 1855, *Diary*, 6:434-7, 13942-64.) なお、ファラデーはこの章の冒頭で引用した1857年3月25日付の書簡の中でも、「磁気作用の時間、ないし電流を運ぶ導線のまわりに電気緊張状態が生じるために求められる「時間」について実験を進めたいと考えていることをマクスウェルに伝えていた。ファラデーは、その磁気的作用にかかる時間は「光の時間と同じくらいに短いに違いないだろう」と述べている。(Faraday to James Clerk Maxwell, 25 March 1857, *Correspondence*, 5:207.) なお、ナーセシアンはこのファラデーの論点を整理して、ファラデーが遠隔作用を、①即時的であること、②直進的であること、③中間物質に影響されないことの三点で特徴づけていたとしている。そして、磁気においては②と③は否定されたため、①が遠隔作用を否定するための評価基準となったが、ファラデーは磁気伝達に時間を要するかどうか確かめることができなかつたため、重力や放射との比較で研究を進めようとしたと説明している。(Nersessian, *Faraday to Einstein*, 59-60.)

³⁸ ファラデーは次のように述べている。「磁場中にあるビスマスの球や棒は、誘導の前後で時間的に分けられていると考えられるような状態にあるようだ。誘導が磁石の極性とは逆 (reverse) の極性の状態を立ち上げる場合、ビスマスは誘導の「後」よりも「前」にそれにかかる磁力を決定しようとするはずである。その一方で、私の見解によると、極性が逆 (reversed) にならずに磁石と同じであるならば、金属は誘導の「前」よりも「後」にそれにかかる、あるいはそれを通る磁力を決定しようとするはずである。」(*ERE*, 3:542, par. 3319.)

考えられた。ファラデーは、電気の場合では作用が曲線的であることが遠隔作用説を批判する重要な論拠であると考えていた。しかし、磁力線は電気の場合のように作用に影響を及ぼしている近接粒子の存在が見出しにくかったことから、空間そのものに原因が求められた。ファラデーは磁力線の原因と空間との関係について次のように述べている。

もしそれらが実在するのなら、それは、静電気の誘導の場合のように粒子の連続によってではなく、そのような物質的な粒子からは自由である空間の状態によるのであろう。私たちの作り出せる最良の真空の中に置かれた磁石は、その真空が常磁性体であれ反磁性体であれ、それまでそれらに占められていた空間に形成されれば、空気や水、ガラスに囲まれているのと同じように針に作用する。すなわち、これらの線は、物質があるところと同じように、そのような真空の中にも存在しているのである³⁹。

このように磁力線を物質的な根拠を持たない「空間の状態」に帰着させることは、一般に説得力を持つ解釈であるとは言えないだろう。しかし、ファラデーは空間を、物質と空間という二分法によってではなく、磁気の媒体という観点から等価なものとして、磁気の力能に関する物理的な性質の一つとして理解していた。ファラデーが空間の磁性を物質の磁性と等価に扱っていたことは、6.5節でも指摘しておいた通りである。グッディングは、ファラデーが磁気の媒体を、能動的な物質（強磁性）と受動的な物質（常磁性や反磁性）、そして反応のない空間の三つに分類していたと分析している⁴⁰。

空間の作用をこのように力能との関係で考えるファラデーの傾向は、6.4節で論じたボスコヴィッチ的な物質観とも関連している。ファラデーは、光磁気効果を磁力線の「照明」効果と位置づけていたが、1854年の論文でも磁力が本質的に空間に依存していることについて、「空間は、ちょうど照らす物体から照らされる物体へと通過していく光線がそうであるように、それを通過していく力と真に磁気的な関係を持っている」⁴¹と述べている。すなわち、空間は磁力と直接的な関係を持つ存在とみなされたのである。さらに、磁石が空間的に孤立していて、周りからの磁力の影響を受けない場合には、磁力の到達範囲も無限遠であると述べている。

磁石の物理的な力線は、磁石がまったく孤立している限りは、そのまわりに無限の距離にまで拡がっていくものと考えられるだろうし、そうに違いないが、他の磁力の系の影響によって、きわめて小さく局所的な空間に圧縮されているのである⁴²。

この考え方は、ボスコヴィッチ的な原子論の説明そのものである。ファラデーは、磁気

³⁹ *ERE*, 3:414-5, par. 3258.

⁴⁰ Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 266-70; Gooding, "Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field," 91; Gooding, "Final Steps to the Field Theory," 271-3.

⁴¹ *ERE*, 3:549, par. 3336.

⁴² *ERE*, 3:424, par. 3275.

が「物理的実在」であるとしても、このように無限の距離を想定することにより、磁力線が物質であるということを事実上否定していた。そして、他の物質との関係で磁力線が局所的にとどめられる可能性も考えていたが、それはあくまで他の物質との力の相互作用による排他性によるものだと考えていた。

前述のように、ファラデーは電気と磁気の「物理的様式」を区別し、電気の曲線的な作用は、その中間に分布している実在する近接粒子によって伝えられていると考えていた。その一方で、磁気の曲線的な作用は、観念的な存在としての磁力線によって伝えられていると考えていた。ただし、ファラデーはこのように両者を区別していたものの、本質的には同じ原理で考えていた。例えば、前述のようにどちらも「二元性」を持ち、「物理的な仮定」が関係している。そして、このように同じ原理を想定することは、次のように両者が図48のように相互作用によって発生することからも自然な考え方であった。この図では、Eを電流の電気力線、Mを誘導される磁力線として、電気と磁気の線が互いに直交する様子が示されている。

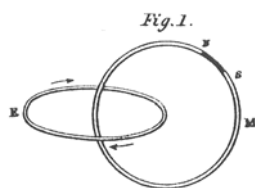


図48：電気力線（E）と磁力線（M）の相互作用（*ERE*, 3, plate 4, fig. 1.）

このように電流を軸として周囲に生じる特別な状態は、第4章で論じたように「電気緊張状態」として解釈されてきたものである。ファラデーはこの図から、磁力線が電気力線による電気緊張状態によって構成されると考えられるとも述べている⁴³。この考え方は磁気を電流によって規定するアンペールの理論と基本的に同じということになる。6.5節で論じたように、電気緊張状態は、反磁性体の研究を通じて、電気と磁気を結びつける概念として改めて注目されるようになった。ファラデーは、磁力線が観念的な存在であるとするれば、電気緊張状態を通じて電気力線と関連づけることで、その物理的根拠が与えられるのではないかと考えたのである。

ファラデーは、このように磁力線の物理的根拠について、空間の状態や電気緊張状態など、さまざまな可能性を検討した。他にもファラデーは、この磁気的な力を生み出す緊張状態が、静電気について伝統的に考えられてきたようにアトモスフィアとして分布してい

⁴³ *ERE*, 3:420, par. 3269. ただし、ファラデーは「磁石が、明らかにその内部の状態あるいはその粒子において力能を維持しており、その力能を表現する上でアンペールの考えに妥当性や美しさに何ら迫るような考えを提示するわけではない」（*ERE*, 3:423, par. 3273.）としながらも、コイルと磁石との相違は実験的に明らかであるとしている。

るとも考えている⁴⁴。

動いている導線のあらゆる現象は、磁石のまわりにある力能のアトモスフィアが物理的実在であることを示しているように思われる。その力能は相反的であって磁力線に沿って方向づけられており、そのアトモスフィアは、その線によって決定される紡錘体 (sphondyloid)、あるいは力の殻のようなものに配置されていると考えられる⁴⁵。

ここで用いられている「紡錘体 (sphondyloid)」とは、ファラデーがヒューエルに問い合わせたヒューエルから提案された造語である⁴⁶。ファラデーは、この磁石の紡錘体状の力能はヴォルタ電池とのアナロジーで考えられるとしている。ヴォルタ電池の電解槽の中では電気力線が生じており、それと垂直に検流計の端子を挿入しても電流は観測されない。そして、金属球などを入れると、その電気力線は乱されて曲げられる。ファラデーは、磁場中に物体を挿入した場合も、これと同じように考えることができるとしている。すなわち、磁石が自由空間の中に置かれていても、そのまわりに電解質と同様の磁氣的な媒体があると考えるのである。ファラデーはこれがエーテルであるとは言えないとしているが、ヴォルタ電池にとっての電解質が本質的な存在であるように、「磁気の系」にとってはこのアトモスフィアが磁石そのものと同じくらい本質的であるとしている⁴⁷。

結局、ファラデーは、磁気や電気といった物理的な力の形式が「二元的な力能によって、可感ではない距離で生じる力能と極めて密接に結びついている」⁴⁸ことは確かだとしながらも、磁力の「物理的条件について、はっきりした考えを持っているわけではない」⁴⁹ことを認めざるを得なかった。磁力線の物理的根拠については、空間そのものや電気力線との関係、あるいはアトモスフィアなど、さまざまな検討がなされた。しかし、それらはどれも十分な説明が得られるものではなかった。ファラデーは、「仮説を進めることは、今のところ私の心に満足を与えるものではない」⁵⁰と述べているが、それ以上の研究を進めることはできなかった。

このように、磁力の状態を「表現」するために導入された磁力線は、研究が進むにつれて、物理的実在であるかのようにみなされるようになった。しかし、ファラデーはあくま

⁴⁴ 1.1 節を参照せよ。

⁴⁵ *ERE*, 3:422, par. 3271.

⁴⁶ William Whewell to Faraday, 7 February 1852, *Correspondence*, 4:362; Faraday to William Whewell, 9 February 1852, *Correspondence*, 4:364-5; William Whewell to Faraday, 9 February 1852, *Correspondence*, 4:365. ヒューエルは、回転楕円体 (spheroid) という言葉では現象に対して十分に「メカニカル」ではないとして、この言葉を紹介している。そもそも、ファラデーが考えていた形状は軸に対して「円筒 (solenoid)」的であり、回転楕円体ではなかったのである。なお、ここでヒューエルは、*solen-* がギリシア語由来で「管」や「腸」を意味し、*sphondyl-* も同じくギリシア語由来で「滑車」や「軸」「紡錘」「脊椎」を意味すると述べている。

⁴⁷ *ERE*, 3:424-6, par. 3276-8.

⁴⁸ *ERE*, 3:570.

⁴⁹ *ERE*, 3:565, par. 3362.

⁵⁰ *Ibid.*

でその存在を観念的なものと考えざるを得ず、その物理的な根拠を特定して磁力線の存在をその原因から「説明」することはできなかった。なお、ファラデーは「磁場」という表現を導入していたが、6.5節で論じたように、磁場は磁力線を包含するような空間的性質についての便宜的な表現に過ぎないものであった。そのため、ファラデー自身も磁力線の物理的根拠の説明において磁場を議論の対象とはしていない。

そして、このように理論的な行き詰まりを見せつつあったファラデーの電磁気学研究を、トムソンとは異なる方法で発展させていったのがマクスウェルであった。マクスウェルは、ファラデーが改めて電気緊張状態に注目するようになったことを踏まえて、力線と電気緊張状態との関係についての数学的・力学的な説明を与えていった。次節からは、このマクスウェルの電磁気学研究の内容へと分析の対象を移し、それとファラデーの理論との関係について議論を進めていきたい。

8.2. 力線と流体との「物理的アナロジー」

前節では、ファラデーの力線の理論について論じたが、この節からはマクスウェルの電磁気学研究についての分析を進める。この章の冒頭で述べたように、マクスウェルは、1856年に「ファラデーの力線について (On Faraday's Lines of Force)」と題する論文を発表した。この論文は、7.2節で論じたトムソンの熱伝導とのアナロジーに基づく電気研究を参考にして、ファラデーの力線に流体力学的なモデルを与えることで電気現象を論じたものであった。マクスウェルは、このように論文でアナロジーという方法を意識的に用いたため、論文の冒頭では、研究手法としてのアナロジーの機能とその有効性についての説明をおこなっている。まずはここから分析を進めていこう。

この論文の冒頭でアナロジーという方法についての説明をおこなうにあたり、まずマクスウェルは、研究を進める上では先行研究を単純化することが重要であると述べる。

科学の効果的な研究における最初の過程は、精神 (mind) でそれらを理解できるような形式にするために、先行研究の結果を単純化して縮約することに違いない。この単純化の結果は、純粹に数学的な公式か、あるいは物理的な仮説の形式をとるであろう⁵¹。

このようにマクスウェルは、複雑な現象を研究対象とするためには、それをまずは単純化しなければならないと考える。そして、その単純化の結果は数学的な公式として与えられるか、あるいは物理的な仮説として与えられるかのどちらかであると考えた。しかし、数学的な公式はよいとして、もう一方の物理的な仮説を与える際には、どうしても先入観が入り込み、その概念や理論が歪められかねない。そのため、物理的な仮説に依存し過ぎ

⁵¹ Maxwell, "On Faraday's Lines of Force," in *SP*, 1:155.

ないような特別な方法が必要になるとされた。マクスウェルは、この仮説を用いる上での問題を次のように説明している。

その一方で物理的な仮説を適用するときには、私たちは媒体を通してのみ現象を見ることになり、部分的な説明によって支持される仮説の中には事実についての盲目さや軽率さを免れない。それゆえ、概念を借りることから物理科学の上に建てられる何らの理論にも与することなく、すなわち、好みの仮説によって真実を飛び越えてしまうことも、分析による精妙さを追求するという問題を脇に置くこともなく、精神がすべての段階ではっきりとした物理概念を保持するような研究方法を見出さなければならない⁵²。

すなわち、何らかの仮説的な理論を用いることは事実を歪めることになりかねないが、考察を進めるためには何らかの「はっきりとした物理概念を保持する」ことが必要であって、何の理論や概念もなく研究を進めても、現象を十分に分析することはできないと考えたのである⁵³。そのためマクスウェルは、研究対象とする現象そのものの仮説を作ることには控える一方で、あくまで「はっきりとした物理概念」がすでに確立されている他の現象を参考にすることを考える。そして、その既知の現象との「物理的アナロジー」に基づいて研究を進めることが、未知の現象を考察する上では有効だと考えた。マクスウェルは、この「物理的アナロジー」のはたらきを次のように説明している。

物理的な理論を適用することなく物理的な観念を得るためには、私たちは物理的アナロジー (physical analogies) の存在に精通しなければならない。私は、物理的アナロジーというものによって、各々が互いを描写するような、ある科学の法則とそれとは別の科学の法則とのあいだにある部分的な類似性を意味している。数学を用いる科学のすべては、物理法則と数の法則とのあいだの関係の上に構築されている。そのため、精密科学のねらいとは、数の操作によって自然の諸問題を諸量の決定へと還元することである。あらゆるアナロジーのきわめて普遍的なものから部分的なものに至るまで、光の物理的な理論のもととなる二つの異なる現象のあいだには、数学的形式の同じような類似性が見出される⁵⁴。

すなわち「物理的アナロジー」とは、物理量から構成される数学的理論を見出すために、その理論と同じような数学的形式を持つと考えられる別の現象の諸量やその法則性と対応

⁵² Ibid., 1:156.

⁵³ すなわち、マクスウェルはイギリス経験論の伝統において、未熟な仮説を立てることによる危険を避けることを重視していたと言える。(Siegel, "Mechanical Image and Reality in Maxwell's Electromagnetic Theory," 181-2.)

⁵⁴ Ibid.

づけることで研究を進めていくという方法であった。

議論を始めるにあたって仮説を用いないためには、理論的な考察をおこなわずに前提となる「物理的な観念」を準備する必要がある。もし、議論の出発点において「物理的な理論」を適用すれば、それは独自の仮説を用いることになるからである。したがって、理論的な考察を避けながら議論の土台となる「物理的な観念」を用意するために、マクスウェルは、他の物理現象において既に確立している諸法則をアナロジーとして利用することが有効だと考えたのである。そうすることで、研究対象についての物理的な仮説を新しく作らなくても、その数学的な関係性についての議論を進めることができるし、さらには、暫定的に物理的実体を与えることでわかりやすい議論を展開することもできるからである。

マクスウェルは、この物理的アナロジーの例として、異なる媒質に光が入射する際に方向が変わる現象と、狭い空間を通る粒子に強い力が加わったときにその道すじが変わる現象とのアナロジーや、光と弾性的な媒質の振動とのあいだのアナロジー、さらには、7.2節で論じたトムソンの「均質固体」論文に言及しながら、熱伝導と引力とのアナロジーをあげている⁵⁵。この1856年の論文においてではないが、マクスウェルは後に出版した『電気基礎論 (*An Elementary Treatise on Electricity*)』の中では電気と熱の物理的アナロジーの対応関係を次の表2のようにまとめている。そして、「粗っぽい (crude) 仮説の危険を避けるためには、この種のアナロジーの真の本質について学ばなければならない」⁵⁶と述べている。

静電気	熱
電場	不均一に熱せられた物体
誘電媒体	熱を伝える物体
場の異なる点における電気ポテンシャル	物体の異なる点における温度
正に帯電した物体をポテンシャルの高いところから低いところへと動かすような起電力	温度の高いところから低いところへと伝わる熱の流れ
伝導体	熱の完全導体
正に帯電した導体表面	熱が物体に流れ込む表面
負に帯電した導体表面	熱が物体から逃げ出す表面
正に帯電した物体	熱源
負に帯電した物体	熱の吸い込み、すなわち熱が物体から消える場所
等電位面	等温面
誘導の線あるいは管	熱の流れの線あるいは管

⁵⁵ Maxwell, “On Faraday’s Lines of Force,” in *SP*, 1:156-7. この議論をおこなう際に、マクスウェルは、光と振動との類似性は過大評価されているとして、形式における類似に過ぎないと主張している。

⁵⁶ Maxwell, *An Elementary Treatise on Electricity*, 52. なお、マクスウェルはポテンシャルを「単なる科学的概念」であり「物理的状態 (physical state) を示すものとみなす根拠はない」と述べている。(Ibid., 53.)

表 2：マクスウェルによる静電気と熱の物理的アナロジーの対応関係表

(Maxwell, *An Elementary Treatise on Electricity*, 51.)

なお、前述の物理的アナロジーの例で、熱伝導と引力とのアナロジーとは、7.2 節で論じたように流体と力線とのアナロジーのことを意味しており、力線の数学的な性質を抽出して、その数学的な要素を流体の運動と関係づけるものであった。

この力線の数学的な性質と流体の運動とのアナロジーの議論を、マクスウェルはさらに具体的に展開している。マクスウェルは、ファラデーの力線についての「観念と方法」を適用することによって、「彼が発見した現象のまったく異なる秩序の結びつきが、数学的な精神の前にはっきりと位置づけられる」⁵⁷と述べている。そして、ファラデーの力線についての「観念と方法」を、「単純な数学的方法」として次のように位置づけている。

ファラデーのこの電気理論の概要では、それらの理論は数学的な観点から用いられており、その電気現象を最もよく理解できて計算にも還元しようと考えられるような単純な数学的方法を示すこと以上のことは、私にはできない。私のねらいは、その数学的な諸観念を、線や表面の体系として具体的な形式 (**embodied form**) で心に浮かぶように与えることであって、それと同じ観念を伝えることでも、その観念そのものを説明すべき現象へと適合させることでもない⁵⁸。

すなわち、マクスウェルは物理的実在としてのファラデーの力線を認めているのではなく、その数学的な表現可能性にのみ注目している。つまり、ファラデーの力線という表現を用いることで、数学的な理論が具体的に展開しやすくなるように促したのである。

マクスウェルは、ファラデーの力線を支持する理由として、「ファラデーは空間における力の分布を第一の現象として扱っており、力の中心にある本質については何の理論も主張していない」⁵⁹ことをあげている。このことからわかるように、マクスウェルにとっての力線とは、電気現象と流体を「物理的アナロジー」によって対応づけるために有効な、電気現象についての数学的表現方法であり、それ以上のことは求められていなかった。マクスウェルは電気現象を流体とのアナロジーによって論じるために、力線という「単純な数学的方法」を与えようとしたのである。

なお、力線を幾何学的に表現する場合、その方向については幾何学的に表現することができる。しかし、力線のもう一つの性質である「強さ (**intensity**)」を幾何学的に表現する

⁵⁷ Maxwell, “On Faraday’s Lines of Force,” in *SP*, 1:158.

⁵⁸ *Ibid.*, 1:187. キャットは、マクスウェルの方法が「具体化 (**concretisation**)」と「理念化 (**idealisation**)」という特徴を持っているとして、これを「具体化された理解 (**embodied understanding**)」としてメタファーと関連づけながら論じている。(Cat “On Understanding,” 398.)

⁵⁹ Maxwell, “Abstract of Paper ‘On Faraday’s Lines of Force,’” in *SLP*, 1:353.

ためには、何らかの工夫が必要になる。そして、このような工夫をするためには、アナロジーを改良する必要があった。

この問題に対してマクスウェルは、力線のアナロジーとして、非圧縮性流体が通る「細い管 (fine tube)」を考案している。そうすると、流体の速度が管の断面積に反比例するとして、力線の強さは管の断面積に対応づけられると考えられるからである。もちろん、この流体は「想像上の流体」であり、だからこそ物理的アナロジーということになる。マクスウェルは、流体の運動として現象を把握することで、電気の物理的な性質については何らの仮説を持ちこむことなく、複雑な電磁気現象をよりはっきりと理解することができる考えたのである⁶⁰。そして、流体とのアナロジーは、まったく異なる現象を結びつけるものだからこそ、電気という研究対象についての仮説ではないとみなされた。

マクスウェルは、このアナロジーの対象としての流体を次のように位置づけている。

それは、実際の現象を説明するために導入される仮説的な流体ですらない。それは単純に想像上の性質の集まりに過ぎず、純粋数学における諸理論を、代数記号だけが用いられるよりも多くの人にとってはよりよく理解でき、物理的な問題にも応用できる方法で立証するために用いられるものである⁶¹。

マクスウェルにとって幾何学的に議論を進めることは、一般性と厳密性を確保し、未熟な理論に起因する危険性を避けるために重要なことであった。マクスウェルは、成熟した物理的な理論を構築するためには、さまざまな研究者がその幾何学的な議論の結果を用いながら実験を重ねる必要があり、その中でも「自然を問いただすことで数学的な理論が示唆する問題の唯一真実の解を得ることができた人によって、物理的な事実が物理的に説明される成熟した理論が形成される」⁶²のだと考えた。すなわち、マクスウェルにとっての物理的な理論とは、あくまで数学的な理論から解を求めることができた段階で検討されるべきものであった。それ以前の段階で物理的な理論を検討しても厳密性に欠けるし、先入観によって理論の内容に歪みが生じることになるだろう。マクスウェルは、物理的な理論を形成するにあたっては、数学的な一般性や厳密性を損なわずに議論を進めることが何よりも重要であると考え、物理的アナロジーと数学的な表現を、そのための有効な手段とし

⁶⁰ Maxwell, "On Faraday's Lines of Force," in *SP*, 1:158-9. なお、マクスウェルは1855年頃に書いた草稿の中で、流体を「互いに独立にあるいはいは何かの与えられた法則によって動くことのできる個別の粒子の集まりである」(Maxwell, "Manuscript on the Motion of Fluids," in *SLP*, 1:291.) と定義している。このように定義すると、電気の誘導現象を方程式で記述するときには、その流体を構成する粒子の存在を仮定していることになる。しかし、マクスウェルは「現実の流体 (actual fluids)」とは別に「仮説的な流体 (hypothetical fluids)」を想定する。そして、この「仮説的な流体は、その運動が完全に自由であるという点においてのみ、現実の流体に似ている」(Ibid.) とされた。

⁶¹ Maxwell, "On Faraday's Lines of Force," in *SP*, 1:160. なお、この論文の草稿では、「実際の現象」という言葉の前に「現実の (real)」という言葉が挿入され、強調されていた。(Maxwell, "Theory of the Motion an Imponderable and Incompressible Fluid (Draft of 'On Faraday's Lines of Force')," in *SLP*, 1:337.)

⁶² Maxwell, "On Faraday's Lines of Force," in *SP*, 1:159.

て位置づけたのである。

なお、論文「ファラデーの力線について」では、次のように力線と流体の議論が展開されている。まず、マクスウェルは、流体の非圧縮性を「任意の瞬間に、ある与えられた体積を占める流体の部分は、その後の瞬間においても等しい体積を占める」⁶³と定義し、その非圧縮性流体の運動の方向を指し示すように描かれた線を「流体の運動の線 (lines of fluid motion)」⁶⁴と定義する。すなわち、流体のある体積を持った部分が、そのまま様な運動を続ける場合を考える。そうすると、単位時間当たりの流量が等しくなるため、単位面積当たりの流量は、その面積に含まれている管の数で決まることになる。

次に、この数学的な議論を進めるために、「抵抗のある媒体を通して動いていく流体の任意の部分は、その速度に比例する遅延力 (retarding force) と直接的に向かいあう」⁶⁵ことを仮定する。そうすると、その「遅延力」は速度を v として kv で表すことができる。また、流体が進み続けるためには、その前方よりも後方から大きな圧力が加えられなければならないとして、長さ h の部分について流体に生じる圧力差を kvh と置いた。

今、この圧力差が 1 になるような連続した等圧面を考えると、ここでは $kvh = 1$ となる。そして、等圧面上を通る単位体積の断面積を s とすると、定義より $vs = 1$ なので、 $s = kh$ であることがわかる。そしてこの等圧面がわかれば、任意の点での流体の速度の大きさと方向がわかり、それによって力線としての管を規定することができる。そして、さらにはその管の最初と最後にある「湧き出し (source)」と「吸い込み (sink)」の大きさもわかる⁶⁶。

なお、流体はつねに圧力の大きなところから小さなところへと流れていくため、特別な条件がなければ循環する曲線を描くことはない。そのため、ある閉じた境界面内に湧き出しや吸い込みが存在しないなら、その内部では圧力は一定であり、境界面以外の場所で流体が動きはじめたり、動きを止めたりすることはないと考えられた⁶⁷。

その一方で、湧き出しからの球対称の流れを考えると、中心から距離 r のところでの速度は球の面積に反比例するため $v = 1/4\pi r^2$ となり、その圧力は $p = kvr = k/4\pi r$ となる。また、湧き出しが全体で S であれば、 $p = kS/4\pi r$ となる。以上より、任意の点の圧力は中心からの距離に反比例することがわかる⁶⁸。

この流体についての考え方を電気現象に応用すると、電気による引力の合力 X は圧力の減少分に相当すると考えられて、 $X = -dp/dx$ と与えられた。この式から、 V をポテンシ

⁶³ Ibid., 1:160.

⁶⁴ Ibid.

⁶⁵ Ibid., 1:164.

⁶⁶ Ibid., 1:164-5.

⁶⁷ Ibid., 1:166.

⁶⁸ Ibid., 1:167. また、面要素 δS を時間 δt に通過する流体は、密度 ρ 、速度の各成分 (u, v, w) 、面の法線成分 (l, m, n) として $-\rho(lu + mv + nw)\delta S\delta t$ と記述できる。(Maxwell, "Manuscript on the Motion of Fluids," in *SLP*, 1:291-2.) ここで $lu + mv + nw$ は、いわゆる速度ベクトルと通過する面の法線ベクトルとの内積となり、通過する面に対する速度の垂直成分を表している。これは、次に引用する電気現象におけるポテンシャルの方程式 $dV = Xdx + Ydy + Zdz$ に対応している。

ヤルとすると、 $dV = Xdx + Ydy + Zdz = -dp$ となる。また、電気のポテンシャルは、 dm を電気の「粒子のかたまり (masses)」すなわち電荷として、 $V = -\sum(dm/r)$ で与えられた。その一方で、流体の圧力は $p = \sum(kS/4\pi r)$ で与えられることから、 dm と S との関係も求まる。

以上より、マクスウェルは、電気のポテンシャル、引力、そして電荷と、流体の圧力、速度、湧き出しとの関係を次式のように求めた⁶⁹。これらの関係式が、電気と流体のアナロジーを数学的に基礎づけることになる。

$$V = -p$$

$$X = -\frac{dp}{dx} = ku$$

$$dm = \frac{k}{4\pi} S$$

マクスウェルは、これらの電気と流体の関係式を基礎として、いくつかの電気現象を論じていく。しかしその一方で、それらの現象を分析する上では、力線としての個別の「管」のふるまいが論じられるわけではなかった。マクスウェルは、この力線と流体との関係を「力線は流体運動の単位管であり、それらの管によって数値的に見積もることができる」⁷⁰とまとめている。そして、この「管」というイメージについては、アナロジーを正当化して、さらに考察を進めるために機能することだけが期待されていた。そのため、このような「管」の内部を通る流体の実在性については問題にされなかった。

このような流体の本質を問わない議論は、従来の自然哲学からすると、「管」の内部へと現象の本質を隠蔽していることになるだろう。そもそも、その「管」も実在するわけではないと考えることは、もはや、対象が何であるかを見失った議論だということになるのではないだろうか。しかし、マクスウェルにとっては、このような流体や管は数学的理論の理解を促すためのアナロジーとしての表現に過ぎず、その実在性は問題にはならなかった。現象の関係性をその数学的形式によって表現できるという事実こそが重要だったのである。

なお、マクスウェルはこのように電気と流体とのアナロジーを示す一方で、この論文の後半ではファラデーの電流に関する電気緊張状態についても論じている。マクスウェルは、回路を横切る磁力線の数の変化によって生じる電気緊張状態を考え、電流の強さの変化が生じる原因を、その電気緊張状態によって生み出される起電力 (electro-motive force) に求めている⁷¹。マクスウェル自身が述べているように、ファラデー自身が一度はこの電気緊張状態という概念を不要と判断していたが、1850年代には改めてこの概念を用いるようになっていた⁷²。この経緯は、6.5節や8.1節で論じたとおりである。しかし、マクスウ

⁶⁹ Maxwell, "On Faraday's Lines of Force," in *SP*, 1:175-7.

⁷⁰ *Ibid.*, 1:177.

⁷¹ *Ibid.*, 1:186-8, 197.

⁷² *Ibid.*, 1:177, 1:187. 電気緊張状態を不要と判断した過程は、4.1節を参照せよ。この判断は、『電気実験

エルは数学的表現としての電気緊張状態の可能性に注目し、それ以降の研究でも積極的にこの概念を用いるようになる。

もっとも、この論文「ファラデーの力線について」では、マクスウェルは、電気緊張状態として電流とその周りの磁力との関係を論じることはできたものの、電磁誘導という現象を十分に論じることはできなかった。すなわち、静的な現象については論じることができたものの、動的な現象については論じていかなかった。そこでマクスウェルは、次に、電磁誘導を論じるための新たな物理的アナロジーを模索していくことになる。この電磁誘導の研究についての分析は、次節で進めていくことにしよう。

8.3. 電気緊張状態についての分子渦モデル

前節で論じたように、力線に対して流体が通る管というアナロジーを考えることは、電磁気現象に数学的理論を与える上で、ある程度まで有効であった。しかし、この流体のアナロジーは、電磁誘導などの動的な現象に対しては数学的な理論を与えるものではなかった。そこでマクスウェルは、流体ではなく分子論的な力学的モデルを用いて、電磁誘導における力線の作用を説明することを試みる。そして、1861年と1862年に、この研究を論文「力の物理的な線について (On Physical Lines of Force)」として発表した。マクスウェルは、この論文で「分子渦 (molecular vortices)」などの新しい物理的アナロジーを導入して、磁気、電流、静電気、そして光磁気効果に対して数学的な理論を与えるために活用していた。なお、ここでマクスウェルが用いる「分子」という言葉は、それぞれの物質がその物質として存在する最も小さな部分のことを意味していた⁷³。

マクスウェルはこの論文でまず、力が大きさ (magnitude) と方向 (direction) を持つとして、力線をその力の道すじと定義している⁷⁴。そして、トムソンが1847年に発表した「力学的表現」論文で得た結果について、粒子の変位 (displacement) という観点から考察を進める。このトムソンの論文では、弾性固体の微小変位という観点から電荷、磁石、電流の磁気作用について論じられた。しかし、電磁誘導などの動的な作用については論じられていなかった。そこでマクスウェルは、電磁誘導については、電気緊張状態と粒子の変位とが次のような関係にあると推測する。

粒子の絶対変位は、私が電気緊張状態とみなしているものの大きさと方向に対応しているであろう。そして、粒子の相対変位は、そのすぐ隣り合う粒子との関係を考え

研究』の第2集において1831年におこなわれた。また、再び電気緊張状態という表現を用いるようになった経緯については8.1節を参照せよ。

⁷³ それゆえ、分子は不可視であり直接的には実験の対象にはなりえないとされた。なお、分子が物質の最小単位であるのに対して、原子 (atom) とは、それ以上は分割不可能なものであり、物質の最小単位より小さな存在であるとされた。(Maxwell, "Molecules," in *SP*, 2:361.)

⁷⁴ Maxwell, "On Physical Lines of Force," in *SP*, 1:451.

た場合に、磁気電気場 (magneto-electric field) の対応する点を通る電流の量の大きさと方向に対応しているのであろう⁷⁵。

すなわち、マクスウェルは7.3節で論じた微小変位 (α, β, γ) について、電気緊張状態は粒子の絶対変位として表現され、誘導電流は相対変位として表現されると考えた。

そして、マクスウェルは、磁気的作用を媒体の応力 (stress) によって圧力 (pressure) ないし緊張 (tension) がかけられている状態と考える。ここで、とくに制約がなければ、応力は一般的に、空間的に直交する三成分によって記述される。しかし、磁力線は単一の軸を持つ双極子的な性質を持っていることから、その軸の周りに及ぼす作用は軸対称になっていると考えられた⁷⁶。そのため、マクスウェルは、「あらゆる渦は本質的に双極子であり、その軸の二つの先端は、それらの点から観察したときの回転方向によって識別される」⁷⁷として、磁力線の方向を渦の回転方向と対応づける。すなわち、磁力線は回転作用を持つ渦とのアナロジーによって表現できると考えたのである。マクスウェルは、この分子渦のアナロジーを、力線の「力学的説明 (mechanical explanation)」⁷⁸と呼んでいる。

マクスウェルは、実際にこの渦による圧力を計算し、その方程式を導出している。例えば、 X を応力の x 成分、 (α, β, γ) を渦による力の各成分、 m を磁性体の量、 μ を磁気に対する誘導容量、 v を磁場の強さに対応する渦の速度、 (p, q, r) を単位体積当たりの電流量、そして p_1 を渦の軸に垂直にかかる圧力として、応力の x 成分は次式のように求められた⁷⁹。

$$X = \alpha m + \frac{1}{8\pi} \mu \frac{d}{dx} (v^2) - \mu \beta r + \mu \gamma q - \frac{dp_1}{dx}$$

さらにマクスウェルは、この方程式の力学的作用の電磁気学的な意味についても分析している。その分析によると、方程式の各項はそれぞれ、①磁場中の磁極に対する作用 (右辺第1項)、②磁力線の向きに関わらず、その力の変化に応じて物体が受ける作用 (第2項)、③電流による回転作用 (第3-4項)、④圧力の単純な減衰 (第5項)、を表していると

⁷⁵ Ibid., 1:453.

⁷⁶ Ibid., 1:453-4. マクスウェルは、このことを次のように述べている。「磁力線は方向と強さを備えているが、その線の「側面」のあいだに、偏光の場合に観察されるものと似たような何らかの差異を示す第三の性質がないということから、一般的な種類の応力は磁力の表現としては適していない。」(Ibid., 1:454.) ここで、力線に側面的作用がないことの根拠として、マクスウェルはファラデーの研究を引用している。この力線の特徴については、8.1節を参照せよ。

⁷⁷ Ibid., 1:455.

⁷⁸ Ibid. 分子渦モデルは「作業モデル」として現象において生じる効果の因果関係を再現することができるため、物理的アナロジーとは異なるという指摘もある。(Siegel, “Mechanical Image and Reality in Maxwell’s Electromagnetic Theory,” 181-4, 197-9.) このような意味において、確かに分子渦モデルは「力学的説明」を与える力学的モデルであり、作用に「表現」を与えるだけのアナロジーではないと言えよう。ただし、8.2節で論じたように、マクスウェルは「物理的アナロジー」を他の現象から「物理的な観念」を借りるための手段として位置づけており、この定義からすると、分子渦モデルもマクスウェルにとっては物理的アナロジーに含まれると考えられる。

⁷⁹ なお、 y 成分および z 成分も同様に求められた。(Maxwell, “On Physical Lines of Force,” in *SP*, 1:456-63.)

考えられた⁸⁰。そして、さらに考察を進めて、「力線は、媒質のあらゆる点における「最小の圧力」の方向を示す」⁸¹のものであるとし、その作用の力学的な原因として、磁力線と平行な軸を持つ分子渦が想定された。なお、この分子渦の方向は、S極からN極へと向かう磁力線に沿って見た場合には時計回りの方向であり、その回転速度は磁場の強さに比例し、さらに、渦の密度は磁気に対する媒質の誘導容量に比例すると考えられた⁸²。

しかし、渦とのアナロジーによって磁力線の数学的理論が与えられたとしても、そもそもこのような渦の回転を生み出す原因は不明であったし、このような法則性を持つ理由も明らかではなかった⁸³。すなわち、現象の作用の関係性を分子渦というモデルによって数学的に表現できたとしても、その電磁気現象の原因を説明できたわけではなかった。マクスウェルは、この分子渦モデルを力線の「力学的説明」と呼んでいたが、電磁気現象の数学的関係についての力学的な説明にはなっていない、電磁気現象そのものの説明にはなっていない。

マクスウェルは、この問題に対する答えは、次のように「電流とは何か」という根本的な問題を見据えながら、渦と電流との「物理的な結びつき (physical connexion)」を明らかにすることで与えられるだろうと述べている⁸⁴。

私たちの分子渦による力線の説明が正しいとすると、なぜ渦のある特定の分布が電流を示すことになるのだろうか。この問題に対する満足のいく答えは、「電流とは何か」という極めて重要な問題の答えに向けて、長い道のりを導いてくれることだろう⁸⁵。

ただ、ここで述べられているように、「電流とは何か」という問題に対する物理的な理論は「長い道のり」の先に得られるものである。前節でも論じたように、マクスウェルは、物理的な理論を求めるためには、まずは数学的な理論の研究が十分におこなわれなければならないと考えていた。そのため、まずは物理的なアナロジーを用いながら、この渦と電流との「物理的な結びつき」を明らかにしていく方針がとられたのである。

マクスウェルは、この分子渦による電磁誘導の力学的モデルを図49のように与えている。そして、このモデルを用いて、磁力線が誘導電流を生み出している過程を磁力線としての分子渦のはたらきによって説明している。

⁸⁰ Ibid.

⁸¹ Ibid., 1:467.

⁸² Ibid.

⁸³ Ibid., 1:467-8.

⁸⁴ Ibid., 1:468.

⁸⁵ Ibid.

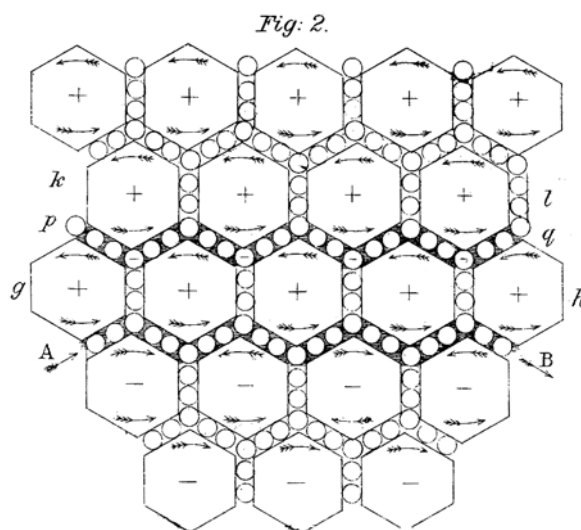


図 49 : マクスウェルによる電磁誘導の分子渦による説明図。六角形の分子渦が力線に対応している。このモデルでは、個々の渦を隔てている粒子の層において、A から B へと右向きの電流が生じることで $g-h$ 列の渦が回転し、 q から p に向けた左向きの誘導電流が生じる仕組みが図示されている。なお、下から二列めの分子渦の矢印にはいくつか誤りがあり、すべてが時計回りになっているはずである。(Maxwell, “On Physical Lines of Force,” in *SP*, vol. 1, plate 8, fig. 2.)

このモデルでは、分子渦を図のように並んだ六角形の輪として考える。そして、これらの輪は粒子の層によって隔てられており、それらの粒子が「遊び車 (idle wheel)」としてはたらくことで、輪が同じ方向に回転することができると考える。ここで、マクスウェルは、蒸気機関についての実際の報告例から、このような「遊び車」の中心が一方向に移動しうることも付記している。その報告例を参考にして、マクスウェルは「遊び車」の移動を分子渦の回転によって生み出される粒子の移動、すなわち磁力線のはたらきによる誘導電流と対応づけたのである⁸⁶。なお、このモデルでは、A から B へと右向きの粒子の移動が生じると $g-h$ 列の渦が反時計回りに回転する。これが電流による磁気作用に相当する。そして、この渦の回転によって、 q から p に向かう粒子の移動が生じる。この粒子の移動は、最初の電流を打ち消すような、逆方向の誘導電流となる。また、 $k-l$ 列の回転は電気抵抗としてはたらき、この回転の自由度が高いほど誘導電流は減少することになる。さらに、電流 (すなわち A から B に向けた粒子の移動) を止めると、この $k-l$ 列の回転によって q から p に向かっていた粒子の移動は逆向きになり、誘導電流は最初の電流と同じ方向の p

⁸⁶ Ibid., 1:468-9, 477, 485-8.

から q に向けて生じる⁸⁷。このようにしてマクスウェルは、分子渦という力学的モデルを用いることで、磁力線と電流の関係を力学的に説明できると考えたのである。

また、マクスウェルは誘電体の帯電についても、前述のように電氣的な変位 (displacement) によって論じている。この誘電体の変位は、第5章で論じたファラデーの近接粒子の分極作用と同じような考え方である。マクスウェルによると、静電誘導の作用を受けている誘電体では、それを構成するそれぞれの分子内部で電氣的な変位が生じて、分子の片側では電氣的に正になり、もう片側では電氣的に負になるとしている。そして、これらの変位そのものは絶対量に変化がないため電流が生じているわけではないが、電流の始まりにはなりうるし、それが変化していく状態は正と負の方向に移動する電流として観察できると考えられた⁸⁸。この電氣的な「変位」という考え方は、後に、光を電磁波として説明する上での振幅とみなされることになる⁸⁹。そして、7.3節などで論じたように、トムソンはこのマクスウェルの解釈には批判的であった。

こうしてマクスウェルは、動的な電磁気現象を引き起こす原因として分子渦と粒子による力学的モデルを導入し、そのモデルを通じて電磁誘導現象における渦と電流との「物理的な結びつき」を具体化することに努めた。マクスウェルは、この分子渦モデルを実際に「力学的モデル (mechanical model)」と名づけていたわけではないが、トムソンの力学的モデルと同じように、あくまで理解を促すための手段として用いられた。7.4節で引用した、トムソンが「私は、マクスウェルの電磁誘導の力学的モデルに大変敬服している」⁹⁰と称賛していたマクスウェルのモデルとは、この分子渦モデルのことだと考えられる。マクスウェルは、この分子渦モデルのあり方を次のように説明している。

その運動が完全な転がり接触によって渦の運動と結びつけられている粒子という概念は、いささか不格好なものであろう。私はそれを、自然に存在する結びつきの様式 (mode of connexion) として提示しているわけではないし、電気の仮説として心から賛同するものとして提示しているわけでもない。それは力学的に考えることができて容易に研究することもできる結びつきの様式であり、既知の電磁気現象のあいだにある実際の力学的な結びつきを引き出してくれるものである⁹¹。

すなわち、このモデルは「分子渦という想像上の体系によって模倣された」⁹²ものであ

⁸⁷ Ibid., 1:477. このことから、図49の下から二列めの分子渦に記載されている矢印のいくつかは誤りであり、すべてが時計回りとして描かれるべきであることがわかる。

⁸⁸ Ibid., 1:491.

⁸⁹ Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, 2:438-41. トムソンは、7.3節で論じたように、この変位電流という説明に対して批判的であり、変位電流をフレネルなどの旧来の波動説に戻るものとみなしていた。クヌーセンは、変位電流そのものが実証できない仮説であったこともあり、トムソンにとってはエーテルの動力学的な理論の方が現象を予測する上でも優れており合理的だと判断されたと分析している。

(Knudsen, "Mathematics and Physical Reality," 171-6.)

⁹⁰ *BL*, 111.

⁹¹ Maxwell, "On Physical Lines of Force," in *SP*, 1:486.

⁹² Ibid., 1:488.

り、マクスウェルは、実際の現象がこのモデルそのものであると主張していたわけではなかった。このモデルの目的は、磁力線と電流との数学的な関係を分子渦と粒子の力学的な関係に置き換えることで理解を促進することであり、可感ではない抽象的な現象を具体化することにあった。

このように、1861-2年の論文「力の物理的な線について」の目的は、1856年の論文「ファラデーの力線について」と同じように、力学的な理論によって電磁気現象のとくに力線の法則性を表現することであった。しかし、一方は電気力線を論じるために流体管とのアナロジーを用いているのに対して、もう一方は磁力線を論じるために分子渦とのアナロジーを用いている点に大きな違いがあった。

この「ファラデーの力線について」から「力の物理的な線について」へと至るマクスウェルの研究方法の段階的な進展は、トムソンがフーリエの研究を応用して熱と電気とのアナロジーを示し、さらにストークスの弾性固体論を応用して磁気現象も含めた「力学的表現」へと研究を進展させていったそれぞれの段階に対応している。実際にマクスウェルは、「ファラデーの力線について」ではトムソンの「均質固体」論文を、「力の物理的な線について」ではトムソンの「力学的表現」論文を、それぞれ強く意識していた。

そもそもマクスウェルは、1852年頃からファラデーの力線という考え方に注目するようになっていた。そして、1855年にはアンペールの理論を電磁誘導へと拡張したウェーバー (Wilhelm E. Weber, 1804-91) の遠隔作用的な理論を検討しているが、それによってむしろ、近接作用的な流体や分子運動とのアナロジーの有効性を再認識する結果になった。そして、「ファラデーの力線について」で電気力線が流れの線と数学的に同等であるとする議論を組み立てていった。その一方で、「力の物理的な線について」では、ファラデーの発見した光磁気効果を考察の手掛りとしていたこともあり、分子の渦という「物理的な観念」によって磁力線の力学的な議論を展開したのである⁹³。

以上の理由により、「力の物理的な線について」で導入された力線に対するモデルと「ファラデーの力線について」で導入された力線に対するモデルとでは、対象が電気力線と磁力線で異なるとはいえ、むしろだからこそ、それぞれの物理的なイメージは大幅に異なっていた。ただし、この物理的なイメージの乖離そのものは問題ではなく、あくまで電磁気現象の多面性を反映しているに過ぎないと考えられた。マクスウェルは、自分の用いる表現方法が多様であることを、論文の最後で次のように正当化している。

電磁気についての諸事実は複雑かつ多岐にわたっているため、それらの多くを複数の異なる仮説で説明することは、物理学者たちにとってだけでなく、その現象の説明に

⁹³ Harman, *Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, 77-80; Knudsen, “The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873,” 248-55; Siegel, *Innovation in Maxwell’s Electromagnetic Theory*, 29-44. マクスウェルは、「ファラデーの力線について」の中では、ウェーバーの理論を「優雅で数学的である」と評価している。(Maxwell, “On Faraday’s Lines of Force,” in *SP*, 1:207.) しかし、1855年5月にトムソンに宛てた書簡の中では、ウェーバーの理論が好みではないことを告白している。(Maxwell, “Letter to William Thomson, 15 May 1855,” in *SLP*, 1:305.)

においてどれほど多くの証拠が理論の信頼性に寄与しているのか、そしてある二つの現象の数学的表現にどれほどの一致があれば、それらが同じ種類であることを示しているとみなすべきか、ということを理解したいと願っているすべての人にとって興味深いものであるに違いない⁹⁴。

すなわち、流体や分子渦などの複数の物理的アナロジーを用いることは、現象の複雑性を踏まえて多面的にその数学的関係を吟味していくためには、むしろ必要かつ重要なことであるとみなされていた。

このように、論文「ファラデーの力線について」までは、マクスウェルは物理的アナロジーを極めて重要視していた。しかし、その次の研究からは物理的アナロジーの議論とは距離を置くようになっていく。そして、この新たな段階の研究成果として執筆されたのが、1864年に発表された論文「電磁場の動力学的理論 (A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field)」であった。この論文は、ウェーバーらの遠隔作用的な理論には「力学的な困難 (mechanical difficulty)」⁹⁵はあるもののその有効性を評価し、マクスウェル自身も「力学的=機械学的 (mechanical)」なモデルやアナロジーではなく、より抽象的な「力学的=動力学 (dynamical)」な理論だけを用いて、近接作用的な電磁場の理論を展開するものであった。

マクスウェルは、この論文の新しい方向性を次のように示している。

私は、それゆえ他の方向で、その事実の説明を探すほうがよいと思うようになった。すなわち、その周囲の媒体においても励起した物体と同じように作用が続いており、その作用によってその現象が生み出されると仮定する。そして、可感な距離において直接的に作用しうる力の存在を仮定することなく、隔たった物体のあいだの作用を説明しようと努めることである⁹⁶。

ここで述べられている「周囲の媒体」とは、電磁場のことである。マクスウェル自身が述べているように、この論文では、ファラデーが1846年に論文「光線の振動についての考察」で発表していた力線と光線との等価性、およびその主張の根拠となる物質観が共有さ

⁹⁴ Maxwell, "On Physical Lines of Force," in *SP*, 1:491.

⁹⁵ Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," in *SP*, 1:527.

⁹⁶ *Ibid.* マクスウェルは、そのような空間の中で電磁気現象を生み出すために物体が運動していると仮定されることから、「動力学」理論と名づけたと述べている。(*Ibid.*) なお、マクスウェルは「動力学 (dynamics)」を「与えられた力の結果としての物体の運動の理論」と定義している。(Maxwell, "Letter to George Gabriel Stokes, 18 December 1866," in *SLP*, 2:291.) あるいは、別の資料では、動力学と力、および力学を次のように定義している。「動力学は物体の運動への力の作用を扱う。力の定義。力とは静止あるいは運動の状態にある物体においてつり合いや変化を生み出すものである。」(Maxwell, V. (e). 15, MS Add. 7655.) 「力学とは、静止あるいは運動の状態を参照しながら想定された物体を論じる科学である。」(Maxwell, V. (e). 17(ii), MS Add. 7655.) 8.4節で論じるように、マクスウェルは基本的にトムソンと同じように、*Dynamics* を「力学」の意味で用いている。(*Encyclopaedia Britannica*, 9th ed. s.v. "Physical Sciences," 19:2; Maxwell, "Manuscript on the Classification of the Physical Sciences," in *SLP*, 2:777-9.)

れていた⁹⁷。ファラデーの力線は、この1864年の論文では、物理的アナロジーや力学的モデルによって表現されたわけではなく、数学的形式としてのみ利用されることになったのである。

このような前提の下で、マクスウェルは電流などのさまざまな電磁気現象において生じる電磁場について考察していく。そして、ファラデーの電気緊張状態に対応する「電氣的運動量 (electric momentum)」などの概念を用いながら、磁力や起電力 (electromotive force)、「電氣的弾性 (electric elasticity)」などのふるまいを記述する八つの方程式を導出していった⁹⁸。

さらにマクスウェルは、これらの導出された方程式を組み合わせることで、磁力が電磁場中で波動方程式を満たすことを導いた。マクスウェルはこの波動方程式の解の物理的な意味を次のように説明している。

この波は、まったく磁気の揺れ (disturbances) からなっており、その磁化の方向は波面の中にある。その磁化の方向が波面の中にある磁気の揺れは、平面波としてはまったく伝播できない。

それゆえ、電磁場を通して伝わる磁気の揺れは、その中の光と一致する。任意の点における揺れは、伝播の方向に対して横向き (transverse) であり、そのような波は、偏光の性質すべてを備えていると言えるだろう⁹⁹。

このように、マクスウェルは電磁場中の磁気の波が横波であり、その性質は光の性質に等しいと判断して、この結果を「光の電磁気理論」として発表した。すなわち、電磁気と光は同等であるという結論を理論的に導いたのである。マクスウェルは、この光を電磁場の横波と解釈する考え方を、ファラデーの論文「光線の振動についての考察」に帰している¹⁰⁰。6.4節で論じたように、ファラデーはこの論文で力線とエーテルの等価性について言及していた。

マクスウェルは、このように近接作用的な電磁場の理論を展開するにあたって、電磁場とは物体に近接する空間的な性質であると考えていた。そして、ファラデーが力線の存在を近接粒子に帰したように、マクスウェルも電磁場の存在を分子に帰していた。そうすると、ファラデーが困難に直面したように、真空中の作用の問題が出てくることになる。ファラデーが「光線の振動についての考察」で論じたような原子論を考えるようになった大きな理由として、空間における密度変化の問題があった。マクスウェルも、ファラデーと

⁹⁷ Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," in *SP*, 1:535-6.

⁹⁸ Maxwell, "Abstract of Paper 'Dynamical Theory of the Electromagnetic Field,'" in *SLP*, 2:192-4. この八つの方程式は、後にヘヴィサイド (Oliver Heaviside, 1850-1925) によって四つの方程式にまとめられ、一般にマクスウェル方程式として知られることになる。なお、マクスウェルはこの要旨の中で、起電力による誘電体の分極をファラデーが発見し、その数学的な理論をモソッティが展開していることを紹介している。

⁹⁹ Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," in *SP*, 1:579.

¹⁰⁰ Maxwell, "Abstract of Paper 'Dynamical Theory of the Electromagnetic Field,'" in *SLP*, 2:194.

同じような問題意識から、エーテルは空間に充満しながらも密度変化を実現するような分子であると考えている。そして、真空状態においても「光と熱の波動を受け取って伝えるために、つねに十分な物質が残っている」¹⁰¹として、「そのような波動がエーテルのような物質のものであることを認めざるを得ない」¹⁰²としている。すなわち、マクスウェルもまた真空の問題について十分な説明を与えることはできなかった。そしてマクスウェルは、媒体には真空部分や遠隔作用を認めることが必要であるという批判に対しては、次のように反論している。

よく、ある媒体が弾性的かつ圧縮可能であるという端的な事実は、その媒体が連続的ではなく、そのあいだに真空の空間を持つ分離した部分からなっていることの証拠であると断言されることがある。しかし、その媒体が厳密に連続的であろう場合において、小さくてもその媒体が分割されうると考えられ、そのすべての部分の性質が弾性的で圧縮可能なものであると仮定することには経験的に何ら矛盾するところはない。しかし、ある媒体は、その密度に関しては均質で連続的ではあるが、W・トムソン卿の完全流体中の渦分子の仮説にあるように、その運動において不均質とされることもありうる。

エーテルとは、それが電磁気現象の媒体であるのなら、少なくともこのような意味において、おそらく分子なのである¹⁰³。

このように、マクスウェルは、エーテルの実在性を分子の存在に求めていた¹⁰⁴。そして、マクスウェルの考えるエーテルの分子とは、その中心のまわりに力線が分布しているファラデーの考えていた原子とイメージを共有するものであった。

その一方で、確かにマクスウェルはこのようにファラデーの影響についてよく言及しているが、電気緊張状態の議論からもわかるように、それは基本的なイメージに限定されたものでしかなかった¹⁰⁵。そして、ファラデーの用いていた力線による表現も、数学的ない

¹⁰¹ Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," in *SP*, 1:528.

¹⁰² Ibid.

¹⁰³ Maxwell, "Ether," in *SP*, 2:774.

¹⁰⁴ なお、マクスウェルは『電気磁気論』を媒質について次のような肯定的な見解で締めくくっている。「しかし、これらすべての理論において、自然に疑問がわいてくる。もし何か一方の粒子から他方の粒子へと距離を隔てて伝わっているのなら、それが一方の粒子から離れてから他方の粒子に届くまでの状態とはどのようなものなのだろうか。この何かノイマンの理論にあるように二つの粒子のポテンシャル・エネルギーであるならば、私たちはこの空間の一点に存在しており、一方の粒子とも他方の粒子とも同時的ではないこのエネルギーをどのように理解すればよいのだろうか。」(Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, 2:493.) そして、マクスウェルは、作用を次のように媒質に帰着せざるを得ないのではないかとして次のように述べている。「これらの理論のすべてが、その中で伝搬が生じている媒質の概念へと先導しており、私たちがこの媒質を仮説として受け入れるならば、それは私たちの研究において突出した場所を占めるはずであって、その作用の詳細すべてについての心的な表現を構築しようと努めるべきだと考えられる。そしてこのことは、この論文における私の一貫した目的だったのである。」(Ibid.)

¹⁰⁵ Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 202-3. 例えば『電気磁気論』では、ハミルトンの四元ベクトルや微分演算子 ∇ (ナブラ) を取り入れて、「力 (force)」のポテンシャルとしてのベクトル・ポテンシャルと、「流束 (flux)」のポテンシャルとしてのスカラー・ポテンシャルについての議論が展開

し力学的な表現に置き換えられ、マクスウェル独自の分析や概念が大きく加えられていた。マクスウェルは、ファラデーの力線などの表現を、あくまで数学的で抽象的な関係性を具体化するための表現として利用していたのである。

このような態度は、ファラデーの理論に対する特別な態度というより、物理的な理論に対するマクスウェルの一般的な態度であったと言える。研究にとって重要であったのは物理量の数学的な理論であって、それに対してどのような物理的な理論を与えるかということは次の段階で求められることであった。

例えばマクスウェルは、モソッティがポアソンの磁気の研究を参考にして静電誘導の現象を論じたときには、その考え方を利用して「磁気という言葉に、フランス語をイタリア語に翻訳しただけ」であるし、フーリエの熱の理論から電気現象を論じたトムソンの議論も同様であるとしている¹⁰⁶。この見解は、それぞれの研究者たちが展開する表現方法やその理論的な説明が、それぞれの研究者の理解に応じた恣意的な側面を持っているという考え方を反映したものである。その根底には、本質的な原理が数学的な関係性として一貫して存在しているという確信が存在していた。物理的な理論は、数学的な関係性について研究を進めていく段階では二次的な存在に過ぎず、アナロジーを用いて現象の数学的な関係性を具体的に表現するための手段として扱われた。

その一方で、数学的な関係性が確かなものとなれば、アナロジーもまた二次的な存在となった。マクスウェルは、自然現象についてのアナロジーと数学的な体系とを次のように関係づけている。

しかし、この種のアナロジーすべてが、より根源的な自然の原理に依拠していることは明らかである。そして、物理量の真の数学的分類をなしえたならば、私たちに与えられる物理量の体系と、それとは別の既知の科学における物理量の体系とのあいだのアナロジーを一度に見出すことができるだろう¹⁰⁷。

すなわち、アナロジーは数学的な体系に迫るために重要なものであったが、数学的な体系が解明されてしまえば、そこから必要に応じて導き出されるものであった。したがって特定のアナロジーもまた、きわめて限定的な重要性しか持ち得ないものとなった。

前述のように、この論文「電磁場の動力的理論」においては「力の物理的な線について」で用いられた分子渦のような力学的モデルはまったく用いられていない。マクスウェルはこの「電磁場の動力的理論」では、あえてこのような「運動」や「ひずみ」を力学的に説明しようとするのを避けて、「電氣的運動量」や「電氣的弾性」という表現を用いるにとどめたと述べている¹⁰⁸。そして、このような表現についても、あくまで表現として

された。(Harman, *Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, 151-4.)

¹⁰⁶ Maxwell, "On the Mathematical Classification of Physical Quantities," in *SP*, 2:258.

¹⁰⁷ Ibid.

¹⁰⁸ Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," in *SP*, 1:563-4.

用いているに過ぎないことについて念を押している。

私は、読者の心を、電気現象を理解する上で助けになるであろう力学的な現象へと向けることだけを望んでいる。この論文のそのような言い回しのすべては、描写的 (illustrative) であり説明的 (explanatory) ではないと考えられるべきものである¹⁰⁹。

すなわち、この段階でマクスウェルは、既知の別の現象によって「物理的な観念」を与える必要がなくなるまで電磁気現象を数学的に体系化しえたと判断したのであろう。このマクスウェルの態度の変化は、物理的アナロジーによって現象の関係性を数学的に探究する段階が終了したと判断されたことを意味している。そして、力学的モデルによって与えられていた「説明」も、あくまで「力学的説明」であって電磁気学的な説明ではない。そのため、次の段階では電磁気学的な理論が求められることになり、さらには力学的モデルが放棄されたこともあって、「動力的理論」は表現に過ぎない「描写的」なものとして扱われるようになったと考えられる。

マクスウェルとトムソンの研究では、トムソンが既知の代表的な電磁気現象に対して数学的な表現を与えるのにとどまったのに対して、マクスウェルはそれを一般化して体系化していったという点に大きな違いがある¹¹⁰。しかし、マクスウェルの研究はトムソンの研究を基礎としており、それが、マクスウェルがトムソンと同じように力学的モデルを展開していく方向づけにもなった。

マクスウェルは、物理的な理論を検討する前段階では、物理的アナロジーを用いながら現象の数学的な関係性を厳密に論じられるようにすることが重要であると論じていた。この最初の物理的アナロジーを用いる段階が、論文「力の物理的な線について」までで試みられてきたことであった。そしてマクスウェルは、ここまでの研究で複数のアナロジーを用いることで理論の厳密性が高まり、より抽象度の高い数学的理論だけで現象の関係性を議論することが可能になったと判断したのであろう¹¹¹。

しかし、電磁気現象における物理的な関係性がはっきりすれば、アナロジーとして用いられていたまったく物理的に異なる個々の現象とは区別して、電磁気現象そのものの数学的な理論を体系化する段階に入らなければならない。「物理的アナロジー」は、動力的な理論ないし「場」の概念形成の前段階で用いられた手段であった¹¹²。こうして、マクスウェルは1864年の「電磁場の動力的理論」以降、電磁気現象の研究においては物理的アナ

¹⁰⁹ Ibid., 1:564.

¹¹⁰ Harman, *Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, 81-3.

¹¹¹ Cat "On Understanding," 435. マクスウェルは同時期に気体分子運動論の研究も進めており、この考え方によって電磁気現象も光も同じように分子渦によって説明する可能性を開かれたが、最終的にはこの考え方によって電磁気や光をエーテルの横波とみなして分子渦モデルを不要とする方向へと発展していくことになったという指摘もある。(Siegel, *Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory*, 47-50, 105-19; Siegel, "Mechanical Image and Reality in Maxwell's Electromagnetic Theory," 195-7.)

¹¹² Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 317-321; Kargon, "Model and Analogy in Victorian Science," 434-6.

ロジーを不要とみなすようになったと考えられる。

8.4. マクスウェルにおける力学と数学

この節では、これまでに論じてきたアナロジーやモデルについてのトムソンとマクスウェルの考え方を比較し、マクスウェルの電磁気学研究における力学と数学の位置づけについて考察したい。さらに、その考察を踏まえて、ファラデーの力線という概念がトムソンやマクスウェルの力学的な電磁気学研究において持ち得た、現象の表現とその原因の説明の可能性について論じたい。

前節で論じたように、マクスウェルは1864年の「電磁場の動力的理論」以降、アナロジーやモデルという方法からは距離を置くようになり、トムソンとは意見が分かれるようになった。マクスウェルが1870年におこなった次のBAASでの演説は、このマクスウェルの考え方の特徴をはっきりと示している。

それが複雑なものであれ、何らかの関係や法則が記号の形式で前に置かれたときに、抽象的な諸量のあいだの関係として、その意味しているところすべてを把握できる人々がいます。そのような人々はときに、諸量がこの関係を満たす自然界に実際に存在しているという、その先の言明をどうでもいいように扱います。具体的な実在についての心的なイメージは、彼らの観想を補助するのではなく、むしろ混乱させてしまうのです。

しかし大多数の人は、長期にわたる訓練がなければ、純粋な数学者の具体化されていない記号を心の中に抱くことがまったくできません。そのため、科学がまだまだ一般的になり、しかし科学的であり続けるとするならば、それは、私たちが見てきたように、あらゆる真なる科学的な描写の根源にある量の数学的分類の諸原理についての深い学習と豊富な応用によることになるに違いありません¹¹³。

すなわち、多くの人にとってはどうあれ、抽象的な数学的議論に対する理解力に優れた人々にとっては、物理的アナロジーや力学的モデルによって与えられる実在物のイメージは、不要だけでなく理解の妨げにもなると考えたのである。そして、もちろんマクスウェル自身は「記号の形式」をそのまま把握できたし、実在物のイメージを必要とはしなくなっていた。このマクスウェルの主張は、まさに力学的モデル批判であると言える。

このマクスウェルの変化に対して、ウィリアム・トムソンはボルティモア講義の中で不満を募らせながら次のように語っている。これは7.4節で引用したとおりである。

¹¹³ Maxwell, "Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association," in *SP*, 2:219-20.

「我々が物理学の特定の主題を理解しているかどうか」を検証することは、「我々がその力学的モデル (mechanical model) を作ることができるか」であるように思える。私は、マクスウェルの電磁誘導の力学的モデルに大変敬服している。彼は、誘導電流などで電気がもたらす驚くべきあらゆることをおこなうモデルを作っている。そのような力学的モデルが計り知れないほどに示唆的であり、電磁気学の真の力学的な理論に向けた一歩であることは疑いえないことであろう¹¹⁴。

ここでトムソンが言及している「マクスウェルの電磁誘導の力学的モデル」とは、マクスウェルが「物理的な力線について」で発表した図 49 の分子渦モデルのことであろう。アナロジーやモデルについてのマクスウェルとトムソンの見解の相違は、マクスウェルが分子渦モデルを発表した時点では顕在化していなかった。しかしその後は、トムソンが物理現象を理解するためには力学的モデルが必須であると考えていたのに対して、マクスウェルは力学的モデルを理解のために不要だけでなく有害であるとすら考えるようになっていったのである。

それではなぜ、両者にはこのように見解の相違が生じていったのだろうか。トムソンの研究の特徴については第7章で分析したので、この節ではマクスウェルの研究の特徴を分析しよう。そこでまず、マクスウェルの「物理的なアナロジー」の目的について再確認しておこう。8.2 節で引用したように、そもそもマクスウェルは、物理的なアナロジーの有効性を次のように述べていた。

物理的な理論を適用することなく物理的な観念を得るためには、私たちは物理的なアナロジー (physical analogies) の存在に精通しなければならない。私は、物理的なアナロジーというものによって、各々が互いを描写するような、ある科学の法則とそれとは別の科学の法則とのあいだにある部分的な類似性を意味している。数学を用いる科学のすべては、物理法則と数の法則とのあいだの関係の上に構築されている。そのため、精密科学のねらいとは、数の操作によって自然の諸問題を諸量の決定へと還元することである。あらゆるアナロジーのきわめて普遍的なものから部分的なものに至るまで、光の物理的な理論のもととなる二つの異なる現象のあいだには、数学的形式の同じような類似性が見出される¹¹⁵。

すなわち、物理的なアナロジーとは、仮説的な理論に頼らずに研究を進めるために、他の既知の物理現象から「物理的な観念」やその法則性を流用するための方法であった。そのため、アナロジーそのものは手段であり、その目的はあくまで数学的形式によって現象の法則性を把握することであった。電磁誘導を説明するために導入した分子渦モデルも、渦

¹¹⁴ *BL*, 111.

¹¹⁵ *Ibid.*

と電流との「物理的な結びつき」を力学的な観点から説明するための表現手段でしかなく、その目的は、モデルを通じて渦と電流の数学的な関係を理解することであった。

マクスウェルはこのように、数学的な形式によって議論を進めることの重要性を次のように主張している。

私たちは「自然を予想すること」、そして私たちがはっきりした観念を持っていない法則の特殊な形式において仮定された存在から推論すること、そして私たちがまだ知りえていない高次の法則が私たちの知っている低次の法則と同じ形式のもとに置かれる可能性があることとは、注意しなければならない。

曖昧な観念が物理的な議論の形式に入り込んでしまうと、曖昧な結論や、数学や物理学が神聖さを失って大きな不信につながるということ以外の何ごとも期待できない。

[中略] この曖昧さを避けるためには、量以外のすべての観念を破棄することで、最終的に最大限の明確さに到達する表現を使う必要がある。数学的な形式を除いては物理的な事実を表現することはできないのだ¹¹⁶。

すなわち、何らかの仮説から推論を進めてしまうと、曖昧な観念の上に議論を組み立てることになる。マクスウェルにとって、これは第一に避けるべきことであった。そのため、マクスウェルは物理的アナロジーを用いることによって、確かな物理的観念のもとに導かれた数学的形式を利用して議論を組み立てようとしたのである¹¹⁷。

そして、このように物理的アナロジーによって得られる議論は、物理量の「関係」についての議論であった。マクスウェルは研究の目的について、「科学的な観点においては、「関係」こそが最も知るべき重要なことであり、その一つのものごとの知識が、他のものごとの知識へと、私たちが長い道のりを通して導いてくれるのである」¹¹⁸と語っている。科学において、自然現象はあくまで「関係」として分析すべきものであると考えられた。

この「関係」についてのマクスウェルの見解は、彼の学問観にも表れている。マクスウェルは自然に関する知識そのものが一冊の本として編集されており、力学はその序章にあたりと考えていた。マクスウェルはこの「自然の本」について次のように述べている。

自然の本 (the Book of Nature) は、まったくのところ、第二章の意味がわかるようになる前に、第一章を理解しなければならないように書かれている。しかし、そのペー

¹¹⁶ Maxwell, "Inaugural Lecture at King's College, London, October 1860," in *SLP*, 1:671. これと同様のことは1856年の就任講義 (Maxwell, "Inaugural Lecture at Marischal College, Aberdeen, 3 November 1856," in *SLP*, 1:428.) でも述べられている。

¹¹⁷ Maxwell, "On the Mathematical Classification of Physical Quantities," in *SP*, 2:257. ハーマンもマクスウェルの物理的アナロジーを分析し、これらのアナロジーや統一性の議論は、基本的に、数学的な言語と物理的な実在物とを関係づけて理解するため、ないし数学的抽象概念と物理的実験データとを関係づけて理解するために用いられたと指摘している。(Harman, *Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, 4.)

¹¹⁸ Maxwell, "Essay for the Apostles on 'Analogies in Nature'," in *SLP*, 1:382.

ジはバラバラになっていて、私たちはそれより前のページにあるものを抜き出して並べ替えなければならない。私たちが学ばなければならない部分は序章の一部であり、今のところ私たちには関係のない化学や生理学の章から迷い込んだページが入ってきて混乱するようなことを、できるだけ避けるようにしなければならない¹¹⁹。

このように、それぞれの学問分野は「自然の本」の各章に対応づけられており、その各章はある程度の独立性を保ちながらも関係を持っているとされた。そして、それぞれの章の内容は、それ以前の章の内容に基づいて構成されていると考えられた。もっとも、そのままでは、それぞれの内容の順序は混乱しているため、それらを学問的に整理する必要があるとも考えられていた。その整理のために必要とされるのが、数学的な「関係」であると考えられていたのである。

ただし、マクスウェルは、この「自然の本」という見解に必ずしも確信を持っていたわけではなかった。マクスウェルは、8.2節で論じた論文「ファラデーの力線について」の準備を進めていた1856年に、「自然におけるアナロジー」という論考を執筆している。その中では、自然が「本 (book)」ではなく「雑誌 (magazine)」である可能性も示唆している。

おそらく自然の「本」というものは、まさにそう称されてきたように、規則正しくページ付けされているものであろう。もしそうであれば、導入部分はその後の部分を説明していることは疑いえないし、第一章で教えられる方法が、その先のもっと進んだ部分でも、当然のものとして用いられるであろう。しかし、まったくもって「本」などではなく、「雑誌」であったとしたら、ある部分が他の部分をも明らかにするのだと考えることは、この上なく愚かなことである¹²⁰。

このようにマクスウェルは、「自然の本」の各章が雑誌のように独立した存在である可能性も検討していた。すなわち、それぞれの分野が独立した内容になっている可能性もあった。そうすると、数学や力学は独立した分野であり、その方法をそれ以外の分野へと応用していくことは難しくなるだろう。数学や力学に対するファラデーの批判的態度は、この考え方に近いと言える。

もっとも、マクスウェルは、自然が「雑誌」であるよりは「本」に近いと考えていたようである¹²¹。そして、その「本」の内容は自然のままでは整理されていないにせよ、数学的な方法によって統一的に編集し直せるはずだと考えていた。すなわち、自然現象そのものは独立したものであっても、それらの数学的な「関係」には共通性を見出すことができると考えていたのである。

¹¹⁹ Maxwell, "Lecture on the Properties of Bodies," in *SLP*, 1:432-3.

¹²⁰ Maxwell, "Essay for the Apostles on 'Analogies in Nature'," in *SLP*, 1:382.

¹²¹ オルソンも、マクスウェルは当時の一般的な見解と同じく、自然を「雑誌」としてよりは「本」として考える傾向にあったと指摘している。(Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 292.)

このマクスウェルの学問観は、いわば 2.1 節で論じたコントの「方法の統一性と学説の同質性」の議論に近いものである。コントは、あらゆる学問分野では数学的な方法が統一的に用いられるべきだと考えた。その結果として、それぞれの学説には実証主義的な観点からの同質性が生まれると考えていたのである。マクスウェルも、学問分野そのものの独立性や多様性を認めつつ、科学における数学的な方法には統一性が存在するとして、その方法によって導かれる「関係」の共通性を探究しようとしたのである。

このマクスウェルの認識は、サマヴィル夫人の『物理的諸科学の結びつきについて』に対する彼の評価にも表れている。前述のようにマクスウェルは、物理現象がそのままで何らかの統一性を持って構成されているという見解には批判的であった。マクスウェルは、サマヴィル夫人の『物理的諸科学の結びつきについて』がベストセラーとなったことは、「物理学のいくつかの考えの全体を一つにまとめることができるという願望が一般に広まっていること」を反映したものであるとしながら、そこにあるのは「異なる科学の解説が連なったもの」であり「それらの結びつきというような言葉は見出しにくい」と述べている¹²²。マクスウェルが述べているように、物理学の諸分野に何らかの統一性を見出そうとする願望は当時の社会において一般的に共有されていたのだろう。しかし、実際に研究が進められるにつれて、科学は専門分化していく傾向にあった。そして、物理現象も個別的に論じられる傾向にあった。

そのような物理現象そのものの関連性に代わってマクスウェルが目にしたのが、数学的な方法の統一性ないし共通性であった。マクスウェルは、サマヴィル夫人の見出そうとする「結びつき」について次のような見解を述べている。

それらの諸科学は共通の方法、すなわち数学的解析を持っているようにも思われる。すなわち、ある科学の研究のために作られた解析的方法は、たいてい他のものにも役立つということだ。サマヴィル夫人の本にぼんやりと影のみえる統一性とは、それゆえ科学の方法の統一性であり、自然界でおこる一連のものごと (the processes of nature) の統一性ではない¹²³。

すなわちマクスウェルにとって、物理現象のあいだの結びつきとは、統一的な数学的方法によって得られる数学的関係の共通性のことであった。

もちろん、このような数学的関係を重視する議論は、数学的な技術が向上してはじめて有効になる。数学的な方法が説得力を持つようになった背景には、そもそも数学の物理学への応用が 19 世紀に入って一段と進んだことがあげられる。その中でもとくに、微分積分

¹²² マクスウェルは、この『物理的諸科学の結びつきについて』が 1834 年に出版され、1849 年には第 8 版を重ねていたことを根拠として、このように物理学に何らかの統一的な結びつきを見出そうとする願望が社会的に普及していると判断している。なお、この『物理的諸科学の結びつきについて』については、それぞれの情報を一冊にまとめあげた「製本者の技量」によるところが大きいと批評している。(Maxwell, "Grove's "Correlation of Physical Forces"," in *SP*, 2:401.)

¹²³ Maxwell, "Grove's "Correlation of Physical Forces"," in *SP*, 2:402.

法は、電磁気現象を表現する上では極めて重要な方法であった。マクスウェルは、微分積分法と物理的イメージとの対応関係を次のように述べている。

積分はそれゆえ、粒子間の遠隔的作用の理論として適切な数学的表現である。それに対して、微分方程式は媒質の近接する部分のあいだにはたらく作用の理論として適切な表現である¹²⁴。

すなわち、電磁気現象を近接作用的に表現するためには、微分方程式を用いた数学的解析方法の発展が不可欠であった。このような数学の技術の発展によって、力線や電磁場といったファラデーの近接作用的な概念を数学的に論じることができるようになったのである¹²⁵。ファラデーが電磁気現象の研究を始めた1830年頃には、電磁気学に対する数学の有効性はここまで自明ではなかった。そのため、ファラデーが数学的な方法に対して懐疑的になり、数学を用いない表現方法にこだわったことは、ファラデーの数学の能力の問題だけではなかった。

しかし、このように現象の数学的な関係性を重視する姿勢は、トムソンとマクスウェルでは違いはないのではないだろうか。7.4節で論じたように、トムソンも初期の研究では数学的關係に議論を限定する「分析的＝実証主義的」方法をとくに重視していた。そもそもマクスウェルは、7.2節で論じたトムソンの「均質固体」論文を通じてアナロジーの重要性を意識するようになった。さらに、マクスウェルは、1856年頃に論文「ファラデーの力線について」を執筆するにあたって、トムソンの助言に基づいて物理学における数学的形式についての研究を進めていた。このトムソンの「均質固体」論文は、熱伝導と静電気が同一の数学的形式で表現可能であることを示したものであり、第7章で論じたように、まさにその数学的關係を示すことが初期のトムソンの研究目的そのものであった。

そうすると、当初はむしろトムソンよりもマクスウェルの方が物理的なイメージを重視して議論を進める傾向が強かったと言える。トムソンが流体や弾性固体とのアナロジーで電磁気現象を論じたのに対して、マクスウェルは流体管や分子渦という、より特殊な力学的モデルを考案しているからである。科学史家ワイズの分析によれば、トムソンの電磁気学研究は「幾何学的で物理的 (geometrical-physical)」であり、すなわち両者は並存していたが、確固たる物理的なイメージを持っていたわけではなかった。それに対して、マクスウェルの研究は「物理的な幾何学 (physical geometry)」であり、すなわち明確な物理的なイメージを提示するものであった¹²⁶。このワイズの分析でもわかるように、この節の冒頭

¹²⁴ Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 1:124.

¹²⁵ Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, iii.

¹²⁶ *Ibid.*, 44. またワイズは、ケルヴィンの研究は「解析的」幾何学であり、マクスウェルの研究は「物理的」幾何学であったと分類している。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, 161.) ワイズは、とくに後年の力学的理論の位置づけにおける二人の傾向の違いを、経験論と力学的モデルというイギリスの二つの伝統的な考え方のあいだにおける幾何学の用い方の違いとして説明している。(Wise, "Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I," 1981, 20.) なお、ワイズは、物理的なイメージを重視するマク

で提示したマクスウェルとトムソンの見解の相違は、当初はむしろ関係が逆であったとさえ言えるだろう。

それでは、アナロジーや力学的モデルを不要とするマクスウェルの判断はどのようにして形成されていったのだろうか。7.5 節で論じたように、トムソンはアナロジー的な数学的「表現」に対して力学的「説明」を求めるようになった。そして、トムソンにとっての力学とは「機械学」に近いものであった。このことから、トムソンが力学的モデルを重視するようになっていった理由も説明できる。マクスウェルも力学的な説明を求めていたが、例えば 1864 年の論文「電磁場の動力学理論」では、力学的モデルは排除されていたし、そもそもその力学的議論は「説明」ではなく「描写」であるとされていた。すなわち、マクスウェルにおける「力学」とトムソンにおける「力学」の違いが、最終的にアナロジーやモデルに対する両者の見解の違いにつながった可能性がある。この違いを考察するためには、マクスウェルにおける力学の位置づけを分析しておく必要があるだろう。

マクスウェルにおける学問の分類は、基本的には 2.3 節で論じたヒューエルの考え方に近いものであった¹²⁷。マクスウェルは、物理学 (physical sciences) を「動力学の基礎的科学 (fundamental science of dynamics)」と「二次的物理学 (secondary physical sciences)」の二つに分類している¹²⁸。この分類は、前者がヒューエルの「力学的科学」に対応し、後者がヒューエルの「二次的力学的科学」と「分析的=力学的科学」とを合わせたものに対応している。そして、マクスウェルにとって、数学と力学は、物理的な意味内容としては違いがあるにせよ、そこで用いられる方法には違いのないものであった。マクスウェルは、力学と数学との関係について次のように述べている。

力学 (mechanics) は、量と空間という観念に加えて、物質、時間、そして力という観念を含むことによってのみ、数学と異なる。使用される方法は、数学のものと同じであり、科学がその上に構築される公理あるいは運動の法則は、幾何学のそれと同じ種類のものである¹²⁹。

すなわち、マクスウェルにとっての力学とは、一次性質に準ずる物理的な観念が与えられているものの、その方法としては数学そのものであると位置づけられた¹³⁰。そのため、力学的に現象を説明するということは数学的な関係性を明らかにすることを意味していた。

スウェルの傾向によって、マクスウェルは空間を曲線で分割するという発想を導入し、力線の作用を電磁場の理論として解釈していったと論じている。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, iv, 131-7, 181-4, 213-5.) ワイズは、とくにガウスの曲面論の影響をあげている。

¹²⁷ ハーマンは、明示的ではないものの、マクスウェルには 2.3 節で言及したヒューエルの「帰納の統合」という考え方の影響が認められると論じている。(Harman, *Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, 162-3.)

¹²⁸ *Encyclopaedia Britannica*, 9th ed. s.v. "Physical Sciences," 19:1.

¹²⁹ Maxwell, "Inaugural Lecture at King's College, London, October 1860," in *SLP*, 1:663.

¹³⁰ マクスウェルは研究の進展に応じて、力学 (dynamics) を運動学 (kinematics) と静力学 (statics)、動力学 (kinetics) およびエネルギー学 (energetics) の四つの分野に分類している。(Encyclopaedia Britannica, 9th ed. s.v. "Physical Sciences," 19:2; Maxwell, "Manuscript on the Classification of the Physical Sciences," in *SLP*, 2:777-9.)

なお、ヒューエルは物理学を何らかの独立した方法を持った専門分野というよりも、つねに数学や力学を念頭に置いた分野として位置づけていたが、マクスウェルも力学と物理学を密接に結びつけて考えていた。前述のように、マクスウェルは物理学の中に力学を含めていたし、別の分類のあり方としても、力学と物理学とを自然哲学という一つの学問領域として理解していた。マクスウェルは、自然哲学と力学および物理学の関係を次のように説明している。

自然哲学とは、この国では二つの主要なグループからなる諸科学の集まりに対して与えられる名称である。その第一のものは力学からなり、運動と平衡の一般的な理論を含むものである。それとともに、力学の原理は自然現象の研究に応用される。

科学の第二のグループは、通常、物理学と称され、現在は、光、熱、電気、そして磁気を含む。そして一般に、私たちがすでにより一般的な原理を考えながらも、既知の力学的な作用の結果ほどには十分に考えられてはいないような、そうした現象の研究も含むものである。

自然哲学は、力学の側を数学によって、そして物理学の側を化学によって、境界づけられている¹³¹。

すなわち、力学とは力がはたらくことで生じる運動や平衡状態を扱う分野であり、物理学とはそのような運動には明確に還元できないような対象を扱う分野であった。マクスウェルは別の場所で、力学は空間、時間、力を対象とし、物理学は光、熱、電気などの「能動的力能 (active power)」を対象とし、そして化学は物質の違いと関係を対象とする分野であると分類している¹³²。この「能動的力能」は、ロックが「受動的力能」と対比させて

¹³¹ Ibid. マクスウェルは1872-3年頃には「物理科学 (自然科学: Physical Science) と一般に称されるものは、算術的な代数と幾何という抽象的な科学と、形態学ないし生物学との中間の位置を占めている」と述べ、さらに「化学は物理科学であるが、とても高い階層 (rank) のものである」としている。(Maxwell, “Manuscript on the Classification of the Physical Sciences,” in *SLP*, 2:777, 779; *Encyclopaedia Britannica*, 9th ed. s.v. “Physical Sciences,” 19:3.) この化学に対するマクスウェルの見解は、自身がほとんど化学の研究には関わらず、また物理学的な関心からすると、まだまだ化学の研究は進んでいないと考えていたことによるのであろう。マクスウェルは、1860年の講演で、当時の化学研究の現状について次のように語っている。「私たちが化学の基本物質についての教義にしかけた攻撃はほとんど実を結んでいないが、物理現象の力学的説明に対しては何がしかの実を結んでいるし、熱や電気といった現象がおこなっているはずの運動の正確な種類が科学的にわかっているとは言えないが、力学の観念に助けられてそのような課題を探究する中で私たちが費やしている労力が無駄にはならないだろうという十分な証拠はある。」(Maxwell, “Inaugural Lecture at King’s College, London, October 1860,” in *SLP*, 1:664.)

¹³² Maxwell, “From a Letter to Lewis Campbell, 9 November 1851,” in *SLP*, 1:209. マクスウェルは、形状や位置を幾何学的性質とする一方で、「物理的性質 (physical properties)」としては、質量と速度、そして「凝集の状態 (state of aggregation)」をあげている。(Maxwell, “Inaugural Lecture at Marischal College, Aberdeen, 3 November 1856,” in *SLP*, 1:423.) この凝集とは、物質によって選択的にはたらく化学的な力とは異なり、固体や液体、気体などの状態を保つために、どのような物質においても普遍的にはたらいっていると考えられていた。そのため、この凝集の状態は、物理的性質として位置づけられることになった。(Maxwell, “Lecture on the Properties of Bodies,” in *SLP*, 1:436-7.) なお、化学的な性質は物理的な性質とは区別されているが、物理学を論じる上ではそのことにも言及すると述べられている。また、この「物理的性質」について論じられた講義の中で、電気はさまざまな物理学の分野の中でも最後に位置づけられた。これは電気が

おこなった説明や、あるいは 3.2 節で引用したウォッツの説明にもあったように、何らかの運動の変化を与える力能と理解することができる。

このように、一般に物理学の対象となる自然現象には、何らかの特別な力能が関与していると考えられた。しかし、その力能も力であることには変わりはなく、運動の原因になるため、やはり力学によって説明できることが期待された。マクスウェルは物理学の目的について、「物理学において、私たちは物質の一般的な性質を探究し、それらを一般的に物質に作用していると考えられる諸原因に帰する」¹³³と述べている。そして、原因と力の関係について、次のように述べている。

しかし私たちは、論拠に頼りながら把握することなく、まとまった考えを持つことはできない。これらの論拠は、対象物との関係で語られるとき「原因」という名を得る。この原因とは、思索のかわりに対象物にアナロジー的に言及していくものである。その対象物が力学的であるか、あるいは力学的観点から考えられている場合には、その原因はさらに厳密に定義され、「力」と称される¹³⁴。

すなわち、力学における原因とは「力」そのものであるとされた。また、マクスウェルは、時計の中の機械仕掛けと天体の運行や社会生活との関係から自然界のデザインの存在について言及し、「科学の役目は、これらの因果の連鎖を調べることである」¹³⁵と述べている。そして、この因果関係の「原因」となる物理的観念を暫定的に与えることが、物理的アナロジーの持つ重要な役割であった。そして、「力が動きを生み出すとき、その結果は力学と流体力学において研究される」¹³⁶と考えられていたため、アナロジーとしては、とくに力学や流体力学が重視された。これはトムソンも同様であり、電磁気現象を論じる上で、トムソンは、流体や弾性固体の振動とのアナロジーを利用していたし、マクスウェルは流体管や分子渦の回転とのアナロジーを利用していた。これらはいずれも、力学や流体力学を動作原理としている。

その一方で、7.5 節で論じたように、トムソンは力学を「機械学」に近いものと位置づけていたが、マクスウェルは力学を「数学」に近いものと位置づけていた。このことは、それぞれが力学という学問分野に対して求める研究の目的や方法が異なっていたことを意味している。そのため、両者はともに力学的説明から数学的關係性を導くことを求めたので

熱や光といった他の現象すべてを含む総合的な現象であると考えられたためである。(Maxwell, “Inaugural Lecture at Marischal College, Aberdeen, 3 November 1856,” in *SLP*, 1:422.) 「凝集の状態」は、別の機会に「構造的性質 (structural properties)」と分類され、物理的性質は、熱や光、電気に関する物体のふるまいに関するものであるとも説明されている。(Maxwell, “Lecture on the Properties of Bodies to the Natural Philosophy Class at Marischal College, Aberdeen, November, 1856,” in *SLP*, 1:433-7.)

¹³³ Maxwell, “Inaugural Lecture at King’s College, London, October 1860,” in *SLP*, 1:663.

¹³⁴ Maxwell, “Essay for the Apostles on ‘Analogies in Nature,’” in *SLP*, 1:378. この論考の中で、マクスウェルは「原因とは形而上学的な言葉である」とし、「力とはこれに対して科学的な言葉である」と語っている。(Ibid., 1:379.)

¹³⁵ Maxwell, “Fragments of an Apostles Essay ‘What is the Nature of Evidence of Design?’,” in *SLP*, 1:227.

¹³⁶ Maxwell, “Inaugural Lecture at Marischal College, Aberdeen, 3 November 1856,” in *SLP*, 1:421.

あるが、トムソンは結果的にそれが「力学的（＝機械学的）モデル」を求めることにつながり、マクスウェルは数学的關係性だけを求めて「力学的モデル」を排除することにつながったと考えられる。マクスウェルは「力学的モデル」という言葉を用いることはなく、一般に「物理的アナロジー」と称していたが、このことが端的に、トムソンとマクスウェルにおける「力学」のイメージの違いを表している。マクスウェルにとって力学とは、あくまで数学的な關係性を論じる分野であり、力学的モデルは「物理的」なものとして位置づけられたのである。

8.3節でも論じたように、マクスウェルにとって物理的な理論とは数学的な理論を構築した上で与えられるべきものであった。そして、数学的な理論を構築するために「物理的アナロジー」によって導入された他の現象の「物理的観念」は、数学的理論が与えられた時点で放棄されるべきものであった。マクスウェルは、「成熟した理論では物理的な事実が物理的に説明されている」¹³⁷状態が理想であると考えていたが、ここでの物理的な説明とはアナロジーやモデルではなく、あくまでその現象に独自の説明であった。このように、研究目的や方法における「力学」の位置づけの違いが、この節の冒頭で引用したトムソンとマクスウェルの見解の相違となって現れたと考えられる。

なお、アナロジーを重視するマクスウェルの傾向について、トムソン以外からの影響は推測の域を出ないが、エディンバラ大学で受けたハミルトンの講義の影響も指摘されている¹³⁸。マクスウェルは、1847年から1850年までのあいだにハミルトンの形而上学の講義を受講しており、マクスウェルの友人であったキャンベルも、「ウィリアム・ハミルトン卿から授かった考えが、彼の持ち前の有利な点となった」¹³⁹ことを指摘している。ハミルト

¹³⁷ Maxwell, "On Faraday's Lines of Force," in *SP*, 1:159.

¹³⁸ ハミルトンはグラスゴー大学やエディンバラ大学で医学を学んだ後、オックスフォード大学でアリストテレスについて学び、ドイツへと移った。ドイツではフィヒテ (Johann G. Fichte, 1762-1814) やシェリングの影響を受けながらカントの批判哲学を学んだ。ハミルトンは19世紀という時代からしても通常はコモン・センス学派に含められて論じられることは少ないが、彼自身は自分がコモン・センス学派に属していると認識しており、その代表的な研究もコモン・センス学派の問題意識に準じるものであった。(Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 26n, 131.) なお、ハミルトンはコモン・センス哲学を推し進めた結果として、数学の自然哲学への応用には否定的な立場をとっていた。(Ibid., 65.) ハミルトンは次のように述べている。「数学は事物を考慮するものではなく、ただ何らかの「像 (images)」と関係しているだけである。その知識全体は、この像の分離と結合および比較に収まるものである。哲学はそれに対して、主に「実在物 (realities)」で占められている。これは実際に存在するものの学問であり、単に想像の上で存在するものの学問ではないのである。」(Hamilton, *Discussions on Philosophy and Literature*, 276.) すなわち、数学は実在物との接点を持たないため、思考の中で閉じた考察になると考えていた。そしてオルソンは、マクスウェルもまたコモン・センス学派の考え方と同じく、自然現象を理解する上で数学という方法は不十分だと考えていたと論じている。(Olson, *Scottish Philosophy and British Physics*, 300.) また、ワイズもオルソンと同じく、マクスウェルにとっての幾何学が、スコットランド哲学の影響もあって物理的実在性を映し出す「ア・プリオリで構造を持ったスクリーン」になっており、また、物理的実在にはさまざまなレベルの記述が可能であるとして、それぞれが正しい代替モデルを適用することができるという考えを持つようになったと論じている。(Wise, *Flow Analogy to Electricity and Magnetism*, 1977, iii, 7, 118-31, 175-6.) しかしその一方で、ハーマンはマクスウェルが幾何学的な考察を極めて重視している点がこのような考え方とは異なるとして、マクスウェルの基本姿勢に対するスコットランド哲学の影響は限定的であると結論づけている。(Harman, "Edinburgh Philosophy and Cambridge Physics," 214.)

¹³⁹ Campbell and Garnett, *Life of James Clerk Maxwell*, 108. キャンベルはハミルトンとマクスウェルの違いとして、前者が抽象的な論理にとどまったのに対して後者がそれらの概念を物理的な事実へと応用してい

ンが議論しているアナロジーは、数学的形式のような厳密なものではなく、あくまで一般的な推論の手段に過ぎない。しかし、観察できる限界を超えて、その現象の原因を考えると、アナロジーは重要な方法として認識されていた。ハミルトンについては、2.4節で論じた通りである。

最後に、ファラデーの力線という概念と、トムソンやマクスウェルの「力学」的な表現や説明との関係についても論じておきたい。この章で繰り返し論じてきたように、物理的アナロジーは自然現象の数学的な関係性についての理解を促すための手段として位置づけられていた。マクスウェルは、この物理的アナロジーの有効性について次のように述べている。なお、ここでマクスウェルが述べている「条件」とは、二つの現象における形式的な対応関係が満たされ、それぞれの物理量の数学的な「分類 (class)」が同じであることを意味している。

この条件が満たされれば、描写 (illustration) は、楽しくやさしい方法で科学を教えるために便利というだけでなく、二つの観念の体系のあいだにある形式のアナロジーを認識することが、それぞれの体系を別々に学ぶことで得られるよりも深く、両方の知識へと導いてくれるのです¹⁴⁰。

すなわち、物理的アナロジーでは「関係」が共有されているため、アナロジーで結びつけられたそれぞれの自然現象の理解が相乗効果となって、両方の現象のより深い理解へと結びつくと考えられた。これをファラデーの力線の研究に当てはめれば、マクスウェルは流体管や分子渦とのアナロジーを考えることで、力線というものをより深く理解したということになる。これは当たり前のことのように思えるが、しかし、マクスウェルが理解した「力線」とは、ファラデーの理解していた「力線」と同じであったのかという疑問は残るであろう。

このように、アナロジーによって物理的な意味を与えて理解を深めていく過程では、それによって結びつけられた二つの対象のイメージが相互に意味の影響を与えあって変化していく可能性が考えられる。例えば、力線という「線」のイメージは、管や渦といったイメージをともなって想像されるようになるし、流体管や分子渦も、流れや渦であるがそのような実体が存在しない「線」としての特殊なものとして想像されるようになる。この作用は、メタファーを用いる際に生じる「意味の相互作用」として知られており、メタファーの一般的な作用としてブラックによって指摘された¹⁴¹。そして、この意味の相互作用は、とくにアナロジーを用いて思考を進めるときに生じやすいことも指摘されている¹⁴²。

った点をあげている。

¹⁴⁰ Maxwell, "Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association," in *SP*, 2:219.

¹⁴¹ Black, *Models and Metaphors*, 38-43.

¹⁴² Hesse, *Models and Analogies in Science*, 151-2. ヘッセは、ブラックの議論を押し進めると、通常の表現とメタファーを用いた表現との境界は曖昧なものになっていくという点も指摘している。とくにこのようなメタファーの性質は、レイコフとジョンソンの研究以降、一般に受け入れられるようになった。(Lakoff

メタファーとは、想像上においてある対象を別の対象にたとえて表現することである。メタファーはアナロジーと似ているが、メタファーは表現上の技法を意味し、そのメタファーで言及される対象との対応関係がアナロジーになっていると言える。ただし、メタファーにおけるアナロジーとしての関係性にはそれほど高い厳密性は求められず、それよりも、別の対象と結びつけることで、対象のある側面についての新しい表現を与えることが目的となっている。

そのためメタファーは、一般に、未知の現象を理解する上で極めて重要な働きをする。人が新しい現象に直面し、それを理解しようとするとき、その現象を的確に表現する言葉を持ち合わせていない。そのため、そのイメージを共有するためにはメタファーが用いられることになる。とくに、詩や小説などの文学活動においてはこの傾向が強いし、錬金術や占星術といった前近代的な自然思想においてもメタファーが多用されている。しかし、その一方で、知識に正確さを求めるためには、曖昧な表現や論理を排除する必要があるとも考えられていた。そのため、近代の自然哲学では論理や経験が重視され、メタファーは否定的に扱われていた¹⁴³。例えばロックは、比喩的な表現は誤りと欺瞞をもたらすものであり、正確な知識のためには絶対に避けるべきであると論じている¹⁴⁴。

このように、メタファーを研究に用いることは歴史的にも否定的に評価されてきた。このような扱いは、その本質が似ているにもかかわらず、アナロジーに対する歴史的評価とは対照的である。このように評価が対照的となった理由は、アナロジーがあくまで事物の関係性に注目するものであったのに対して、メタファーはその表現の対象に注目するものであったと言えるだろう。前述のように、自然現象を研究していく上で重要となるのは、あくまでその関係性である。マクスウェルもこの関係性に注目して物理的アナロジーを用いていた。

しかし、物理的アナロジーにおいて、自然現象についての理解を促すという側面に注目するとき、それはメタファーと同じような作用を持つことがわかる。すなわち、既知の表現によって未知の現象の関係性についての理解を促す一方で、それはあくまで表現の一つに過ぎないとして、表現として与えられた物理的なイメージの実在性は問題とはされなかった。むしろ、積極的に、仮想的なモデルを導入することによって具体的な表現が与えられたのである。実際、マクスウェルは1870年のBAASの数学・物理学部門の演説で、自分が精通している動力学などの分野の用語や観念を用いてそうではない分野の現象を語る場合に、そのような表現を「科学的メタファー (scientific metaphor)」と称している¹⁴⁵。すなわち、マクスウェルの物理的アナロジーとは、現象の関係性についての従来のアナロジーの条件を満たした上で、その関係性に対して理解を促すための新しい表現を与えるため

and Johnson, *Metaphors We Live By*.)

¹⁴³ Cat “On Understanding,” 396.

¹⁴⁴ Locke, *Essay*, book 3, chap. 10, 452.

¹⁴⁵ Maxwell, “Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association,” in *SP*, 2:227. 例えば、マクスウェルが論文「電磁場の動力学理論」で導入した「電氣的運動量」や「電氣的弾性」という表現も、この「科学的メタファー」に相当すると言えるだろう。

のメタファーとして機能するものであった。

このように、マクスウェルにおける物理的アナロジーとは、アナロジーとメタファーの両方の作用が数学的な厳密性の下に発展的に結びついたものであったと言える。そして、物理的アナロジーがこのようにメタファーと同じように作用していたとすれば、その対象のイメージには意味の相互作用が生じていたことが予想できる。マクスウェルは、ファラデーの力線というイメージを用いながら、それをさまざまな物理的アナロジーと結びつけることで独自のイメージを作り出していった。8.2節や8.3節で論じたように、マクスウェルが展開していった流体管や分子渦の物理的なイメージは、ファラデーのイメージからはかなり変容したものになっている。このようなイメージの変容は、半ば意識的なものであろうが、マクスウェルが展開していった数学的な議論による意味の相互作用の影響も受けていると考えられる。そして、このようなイメージの変容を許せたということは、マクスウェルがあくまで自然現象の数学的な関係についてのみ、その厳密な議論を求めていたことを示している。

第7章と第8章で論じた、力線についてのトムソンとマクスウェルの力学的モデルないし物理的アナロジーは、力線についてのファラデーのイメージとは大きく異なるものであった。とくに、トムソンの弾性固体論による表現やマクスウェルの分子渦による表現は、もはや「線」というイメージを前面に出しているわけではない。8.1節で引用したように、ファラデー自身は力線について次のように述べていた。

私は「力線」という用語の意味を、(現時点では)現象の物理的な原因の本質についての観念は何も含まないよう、あるいはそのような観念と結びつけられたり、何らかの形で依存したりするようなことのないよう、ある与えられた場所における力の状態、すなわち強さと方向以上のことを含意しないように制限してほしいと考えている¹⁴⁶。

しかし、このように強さと方向以上のことを含意しない概念といっても、ファラデー自身も力線を物質と等価とみなしたり、力線についての横方向作用を考えたりしており、独自のイメージを持っていたことは確かである。そして、そのファラデーの理解していた力線のイメージには、とくにマクスウェルによって、それとは大きく異なるイメージが与えられていった。そして、その新しい力線のイメージは、もはやファラデーが「数学的」であるとか「力学的」であるとして批判してきたようなイメージを超えていたと言えるだろう。

その一方で、アナロジーやモデルにはこのように表現の多様性が存在するにせよ、それらは科学的な方法として認知することができた。それは、そのような手段によって表現される物理量の関係性が数学的に与えられていたからである。マクスウェルは、物理現象の表現の多様性について次のように述べている。

¹⁴⁶ ERE, 3:330, par. 3075.

このような異なるタイプの人々のために、科学的な真実は異なる形式で提示されるべきでしょうし、がっしりとした形と鮮やかな色彩の物理的な描写によって現れようと、希薄で淡い記号的な表現によって現れようと、それらは等しく科学的なものとしてみなされるべきでしょう¹⁴⁷。

このマクスウェルの言葉によれば、この節の冒頭で引用したマクスウェルの力学的モデル批判も、トムソンの力学的モデル擁護も、等しく科学的であるということになる。そして、電磁気学研究に関して言えば、トムソンやマクスウェルが求めたのは、ファラデーが力線というイメージで表現していた現象の関係性を数学的な記号の関係として抽出することであった。それはあくまで関係性についての「表現」の問題であり、ファラデーが力線を「説明」するために模索していた物質的根拠の問題ではなかった。いわば、電磁気学研究における問題設定のあり方が異なっていたのである。

こうして、ファラデーの理論は次の世代の研究者たちによって、新しい解釈を与えられて電磁気学の発展に寄与していくことになった。しかし、ここから先の理論の発展は、本論文の目的において扱われるべき範囲を超えている。そこで次章では、再びファラデー自身の考察に戻り、これまでの議論を踏まえてファラデーの「力」と「粒子」、および「場」の概念について総合的に論じることで、本論文の目的としてきたファラデーの電磁気学研究についての包括的な理解へと進んでいきたい。

¹⁴⁷ Maxwell, “Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association,” in *SP*, 2:220.

第9章 ファラデーにおける「力」と「場」と「粒子」

この章では、本論文で進めてきた議論を踏まえて、ファラデーにおける「力」の概念について総合的に論じたい。そして、この「力」の概念を、その物質的な根拠とされた「粒子」の存在や、その不規則な形状を論じるために導入された「場」という表現と改めて関連づけていくことで、これらの概念についての本論文としての理解を提示したい。

なお、ファラデーの「力」の概念について論じるためには、「力の保存」や「力の変換可能性」というファラデーの主張が重要な鍵を握っている。これらの主張は、電磁気現象の考察を通じてだけ得られたものではなく、万有引力など、地球規模の自然現象の考察から多大な影響を受けて形成されたものであった。そこで、次節ではまず地球の作用を意識してファラデーがおこなった実験とその考察について概説し、それを踏まえてファラデーの「力」の概念についての理論的な考察に移っていきたい。

9.1. 地球についての考察と万有引力

これまではほとんど議論の対象にしてこなかったが、ファラデーは電磁気学研究を進める上で、たびたび電磁気現象と地球的な自然現象との関係についての考察をおこなっていた。例えば1832年1月には、電磁誘導の研究の一環として、地磁気によって誘導される電流の観測を試みている。この実験は、水を導体とみなして、ロンドンにあるケンジントン宮殿の庭園の池や、テムズ川のウォータールー橋でおこなわれたが、有意な結果は得られなかった。しかし、ファラデーはこの否定的な結果が規模の問題である可能性を疑い、ドーバー海峡や湾流ほどの規模であれば地磁気による誘導電流が生じている可能性があるのではないかと述べている。また、それに加えて、オーロラの出現と磁気作用との関係についても簡単に言及していた¹。

さらに、1835年にも静電誘導の研究を進める中で、「空気中にとどまっている導体としての地球の状態」²について推論し、地表に接している空気の電氣的状態や、それより上空での電氣的状態について考えることで、樹木が上向きに成長するといった地球上の一般的現象を説明できる可能性を示唆している³。そしてこの考察の後で、4.3節で論じた、実際に地上から上空に向けて設置した金属製の凹面鏡の電氣的状態についての実験を進めたのであった。

また、第6章で論じた1845年の光磁気効果の論文を締めくくるにあたって、ファラデーは「新しい磁気の状態」によって生み出される力について次のように述べている。

¹ *ERE*, 1:52-7, par. 181-92.

² 3 November 1835, *Diary*, 2:392, par. 2542.

³ 3 November 1835, *Diary*, 2:392-3, par. 2542-50.

全体としての地球において、あるいは磁石において、あるいは太陽との関係において、その力によって生じる効果とは何であるか、そして光によって電気や磁気を発生させる最もよい手段とは何であるか、ということは絶えず心を悩ませる考えである⁴。

そして、この光磁気効果による「照明」を地球上でも観測できる可能性を考え、地磁気の磁気曲線が物質と垂直に交わっている場所の効果についても推論をおこなっていた⁵。さらに、地磁気が太陽光に由来する可能性も考え、1845年11月5日には太陽光の磁気作用について屋外で実験をおこなっている⁶。また、6.5節で論じたように、この光磁気効果の発見を発端として、ファラデーはさまざまな物質の磁性について研究を進めていた。そして、あらゆる物質が何らかの形で磁気の影響を受けるという結果を得て、自然界のさまざまな現象とともに、物質の落下に対しても重力だけではなく磁気は何らかの形で影響を及ぼしている可能性を考えるようになった⁷。例えば、緯度が高くなり磁針の伏角が大きくなるころでは、ビスマスなどの反磁性体の重量は小さくなり、鉄などの磁性体の重量は大きくなる可能性を疑っている⁸。また、ファラデーは、地磁気が空気の中に存在するかもしれないと考えていた⁹。そして、土星についても、それが地球と同じような磁気を持ち、その輪が反磁性体であるとする、土星の輪は、土星の磁気の方角とは垂直になるような位置、すなわちまさに実際の輪の位置に集まるはずだと論文の中で推測していた¹⁰。

このように、ファラデーは地球の電磁気作用について折に触れて考察を進めており、とくに電気や磁気のと重力とが本質において同等であり相補的である可能性を念頭に置いていた。このファラデーの理解は、5.3節で論じたモソッティの分子論と極めて親近性がある。モソッティは、電気流体の粒子と物質粒子のあいだには、それぞれ引力や斥力がはたらいっているとして、その組み合わせとバランスによって静電気力や重力の作用を説明していた。ファラデーもまた、電気や磁気のと重力とが、このようにそれぞれの力のバランスの結果として顕在化していると考えていた。そして、それぞれがバランスの上に成り立っていて相互依存적であるとすれば、一方の力に変化を加えることで、他方の力にも何らかの影響が生じるのではないかと期待していたのである。

これについて、例えば6.6節で論じたように、ファラデーは磁気結晶軸の実験を通じて「磁

⁴ *ERE*, 3:26, par. 2242.

⁵ 30 September 1845, *Diary*, 4:290, par. 7718-9.

⁶ 16 October 1845, *Diary*, 4:306, par. 7854; 5 November 1845, *Diary*, 4:314-5. ファラデーは、太陽光による効果を観測することはできなかった。なお、同様の実験はクリスティー (Samuel Hunter Christie, 1784-1865) もおこなっていた。クリスティーは、磁針の振動時間と太陽光、および温度との関係を観察し、太陽光によって磁針の振動時間が短くなる傾向にあると結論づけている。(Christie, "On Magnetic Influence in the Solar Rays," 219-39.)

⁷ 14 November 1845, *Diary*, 4:340, par. 8169-70; *ERE*, 3:79-82, par. 2447-53. なお、ファラデーは新しい発見を期待しつつ、これらのアナロジーに基づく「詩的な考え (poetical ideas)」に取り組んでいることを高揚感を抑えきれずに友人に語っている。(Faraday to Christian Friedrich Schoenbein, 13 November 1845, *Correspondence*, 3:428.)

⁸ *ERE*, 3:80-1, par. 2449.

⁹ 19 November 1845, *Diary*, 4:361, par. 8357.

¹⁰ *ERE*, 3:81, par. 2450.

気を重力そのものと結びつけるという希望¹¹を強めていた。そして、1849年3月19日より重力と電気との関係を探るための実験を開始している。ファラデーは、その結果を発表した論文の冒頭で、光磁気効果の論文を発表したときと同じように、重力と電気などの諸力との関連性について次のように述べている。

私は、自然のあらゆる力は相互依存的で、一つの共通する起源を持っており、一つの根源的な力能の異なる現れであるとする長いあいだの変わらぬ信念から、実験によって重力と電気とのあいだに結びつきが確立され、磁気や化学作用、熱を含むような多くのさまざまな力の現れを共通の関係で結びつける鎖の輪の中へと重力を導き入れる可能性についてしばしば考えてきた¹²。

このように、ファラデーは自然界の諸力が一つの起源を持ち、その形式の違いとして相互のバランスの上に顕在化している可能性を考えていた。そのため、重力に関連する何らかの作用を引き起こすことで、電気や磁気にも何らかの変化が生じるのではないかと強く期待していた。

そしてファラデーは、重力が電気や磁気のような二元的な力に対して何らかの影響を与えることが観測されるとすれば、それは重力の作用を受けている物体が相互に「近づいたり離れたり (*to and fro*)」¹³するときではないかと予想した¹⁴。そこでファラデーは、重力による運動の変化に起因する誘導電流を観測するためのいくつかの実験を試みるが、どの実験でも電流の発生は観測できなかった。ただし、この否定的な結果は、通常の物体では作用が極めて小さいためであるとも考えられた¹⁵。そこで、ファラデーは、さらに大規模な実験を同年の8月25日より実施することにした。

ファラデーはまず、長さ350フィートの銅線で作られた外径2インチ、内径1インチ、長さ4インチのコイルを用意した。そのコイルに銅やビスマスなどのさまざまな物質の心を入れて、図50の右上のように、王立研究所の講堂の天井に設置された高さ36フィートのところにある滑車で釣り上げた。さらにコイル (*n*) から引いた銅線 (*m*) を、図50の左にあるように検流計へとつなぎ、そのコイルを図50右下のクッション (*o*) へと落下させることで誘導電流が生じるかどうかを観測した¹⁶。

¹¹ *ERE*, 3:129, par. 2614.

¹² *ERE*, 3:161, par. 2702.

¹³ 19 March 1849, *Diary*, 5:150, par. 10019.

¹⁴ 19 March 1849, *Diary*, 5:150-2; *ERE*, 3:161, par. 2703. この1849年3月19日の時点で、さまざまな物体やコイルを上昇させたり下降させたりすることで電流が観測される可能性が想定されたが、そのような誘導電流は微弱であろうし、観測は困難であることも予想された。序論の注19でも引用したように、ファラデーはこの日の研究日誌に、有名な次の一節を残している。「まったくこれは夢である。さらにいくつかの実験で調べよう。自然の諸法則との一貫性があるならば、何が真実であっても不思議すぎるということはないし、このような物事においては、実験がそのような一貫性の最もよい確認方法なのである。」(19 March 1849, *Diary*, 5:152, par. 10040.)

¹⁵ *ERE*, 3:162, par. 2704.

¹⁶ 25 August 1849, *Diary*, 5:156, par. 10061-4.

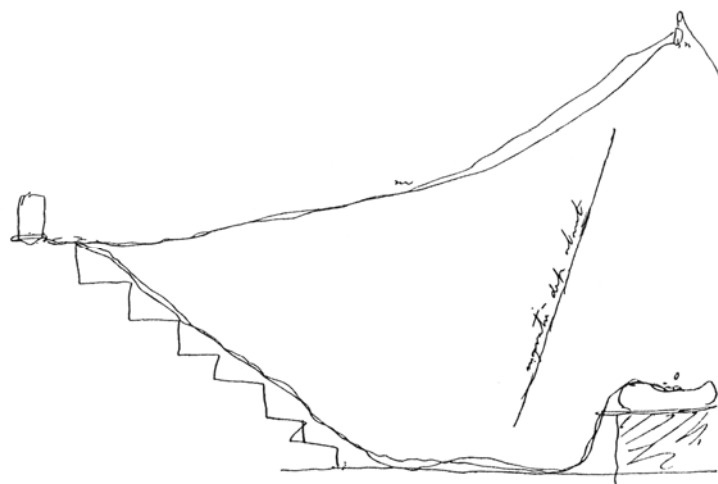


図 50: 王立研究所の講堂でおこなわれたコイルの落下による誘導電流の観測。滑車で釣り上げられたコイル (n) は、左側中央の検流計まで被覆した銅線 (m) でつながれている。そして、コイルを右下にあるクッション (o) まで落下させて実験をおこなった。(30 August 1849, *Diary*, 5:167, par. 10129.)

ファラデーは、コイルの軸を垂直にしながらかクッションへと落下させて急激に運動を止めるなど、さまざまな工夫をおこなったが、結局のところ重力の作用に起因すると考えられる有意な結果は得られなかった¹⁷。また、粒子間にはたらく万有引力を変化させることで何らかの電気が生じる可能性を期待して、特殊な実験装置を用いて、コイルとその内部に挿入した物質との相対的な位置や速度を小刻みに変化させる実験もおこなった。しかし、やはり有意な結果は何も得られなかった¹⁸。

なお、このようにファラデーが重力と電流との関係を予測していたことは、それらの力と粒子や質量との関係についての理論的な考察にも基づいていた。1.3.1 節で引用したように、ファラデーは重力を「物質の粒子あるいは質量のあいだではたらく単純な引力」¹⁹であると定義していた。そして、重力が、質量とともに粒子にも作用する力であるとすれば、それは電気的作用を引き起こす可能性を強く示唆するものであると考えられた。

実際に、ファラデーは、銅製の円筒が落下する場合に円筒内部の粒子に生じているであろう重力による誘導電流の様子を、次の図 51 のように描いている。

¹⁷ 25, 30 August 1849, *Diary*, 5:156-68; *ERE*, 3:162-4, par. 2705-10. 誘導電流は観測されたものの、それはコイルと検流計とを結ぶ銅線でできたループに地磁気が作用したものであると考えられた。そこで、往復の銅線をねじって一本にしたところ、電流は観測されなくなった。(30 August 1849, *Diary*, 5:167, par. 10129-32.)

¹⁸ *ERE*, 3:164-8, par. 2711-6.

¹⁹ *ERCP*, 446.



図 51 : 各粒子の回転による電流と粒子全体の移動による電流の違い。重力の粒子への作用は異なるにせよ、両者は同じ結果として観測されたと考えられた。(30 August 1849, *Diary*, 5:168.)

この図 51 上では、重力の作用によってそれぞれの粒子に回転が生じて全体的に電気の流れが観測される様子が描かれている。それに対して図 51 下では、重力の作用によって粒子全体が実際に移動して電気の流れが観測される様子が描かれている。なお、6.6 節などで論じたようにファラデーは質量を粒子の集合として考えていた。そうすると、図 51 下は重力が質量に対して引き起こしている電気的作用ということになるだろう。ファラデーはこの図 51 の考察について、研究日誌の中でアンペールの理論に言及しながら、粒子でも質量でも結果は同じであると述べている²⁰。すなわち、ファラデーにとってこの 1849 年の実験結果は、重力が粒子に対して作用するという実験的証拠が見出せなかったことを意味していた。

こうして、1849 年におこなわれた実験では、重力と電気のとあいだに何らかの関係を見出そうとする試みは失敗に終わった。しかし、この否定的な結果がファラデーに「信念」を放棄させたわけではなかった。ファラデーはこの重力と電気との関係についての論文を、次のように締めくくっている。

ここが現在の私の試みの終着点である。結果は否定的である。それらの結果は、重力と電気のとあいだに存在するという私の強い予感を揺るがすものではないが、そのような関係が存在するという証拠を何も与えてくれない²¹。

そして、ファラデーはその後も重力についての考察を重ね、1859 年にも滑車を通して互いに結ばれた鉛の玉を上下するなどしてその電気状態が変化する可能性を検討している²²。また、ロンドンのランベスにある弾丸製造塔でも落下実験をおこなったが、結局のところ有意な結果を得ることはできなかった。ファラデーはこの研究結果を論文にまとめたが、その原稿に目を通したストークスからは結果も否定的である上に前提や方法にも疑問があ

²⁰ 30 August 1849, *Diary*, 5:168, par. 10139.

²¹ *ERE*, 3:168, par. 2717.

²² 10 February 1859, *Diary*, 6:334-8.

るとして、投稿を控えるべきだとの忠告を受けている²³。そして、ファラデーがこの論文を雑誌に投稿することはなかった。

結局、ファラデーは、重力についての実験で意味のある結果を得ることができなかった。しかし、ファラデーが想定していた重力と電気の関係性は、ファラデーが自然界の諸力について進めていた理論的な考察と密接な関係を持っていた。そこで次節では、この節で論じてきた重力についてのファラデーの実験内容を踏まえて「力の保存」と「力の変換可能性」というファラデーの理論的な主張を分析し、ファラデーの「力」の概念の核心に迫っていきたい。

9.2. 力の保存と変換可能性

この節では、前節で論じた重力についてのファラデーの実験を踏まえながら、ファラデーの「力」の概念について論じていく。

これまでも何度か指摘してきたように、ファラデーは電磁気現象では、力線がその対象となる物体に先立って存在していると考えていた。そして、この考え方は重力にも同様に成り立つと考えられた。例えば、ファラデーは1855年の論文「磁気哲学のいくつかの点について (On Some Points of Magnetic Philosophy)」において、太陽が地球に重力を及ぼす場合には、太陽の重力は地球がそこになかったとしても「前もって存在している (pre-existed)」²⁴のかどうかという問題を取り上げている。そして、「力をともなわない物体が、そこから離れたところにある物体に力を立ち上げることは、あまりに想像し難い」²⁵として、さらにはそれが「力の創造 (creation of force)」²⁶をとまなうことにもなると考えて、きわめて不合理であると判断していた。ファラデーは、「力の創造や消滅が不可能であることは、物質の創造や消滅が不可能であるのと同じである」²⁷として、自然哲学において「力能の保存 (conservation of power)」が成り立つことは当然であるとしている。そのため、太陽の重力についても、地球の存在に「前もって存在している」はずだと考えたのである。ファラデーはこのことを次のように述べている。

重力によって作用を受けるところに二つめの物体があろうがなかろうが、力能は、太陽のまわりと無限の空間のいたるところに、すなわち太陽のまわりだけでなく、実在

²³ George Gabriel Stokes to Faraday, 6 June 1860, *Correspondence*, 5:687-8.

²⁴ *ERE*, 3:571.

²⁵ *ERE*, 3:572.

²⁶ *Ibid.*

²⁷ *Ibid.* ここでファラデーは、重力を「物質の質量 (あるいは粒子)」(*ERE*, 3:571.) に関連する力としており、いずれにせよ、物質と不可分の力能と考えていた。

するあらゆる物質の粒子のまわりに、つねに存在しているのである²⁸。

この重力についてのファラデーの理解は、ボスコヴィッチ的な原子論に基づくものである。この原子論によると、力能は物質とは不可分であり、むしろ物質そのものとして中心のまわりにつねに存在していると考えられた。そうすると、地球の存在がどうあろうと、太陽の重力は地球の存在とは関係なく「前もって存在している」ことになる。

ファラデーがこのように考えていたことには、原子論というよりも、そもそも力能を物質の存在と同程度（あるいはそれ以上）に本質的と考えるバークリやヒューム、そしてコモン・センス学派の影響を認めることができよう。これは、3.5節で論じたようにデーヴィーの考え方に近く、おそらくファラデーがこのような認識を持つようになった原因にはデーヴィーの影響が少なからず存在していると考えられる。また、ファラデーは、無限や創造に等しいようなことは「創造したもうた主の力能のうちのみ」²⁹あるとしており、宗教的な観点からも「力の創造」には否定的であったと考えられる。

そして、力の創造や消滅があり得ないとすれば、力は保存されることになる。ファラデーは1857年に発表した論文「力の保存について (On the Conservation of Force)」の中で、この力の保存を「力は創造されることも破壊されることもあり得ない」³⁰という原則として定義している。そしてこの原則は、これは物質の不滅性や重力の不変性と同じくらい確かなものであるとされた。

なお、自然界の作用にはそれが及ぼされている時間が限られており、その前後に作用が及ぼされていない状態が存在するものもある。そうすると、その作用には生成や消滅が起こっていると考えることは自然なことであろう。しかしファラデーは、熱や電気、重力などの物理的な形式の力については基本的にこの保存則が成り立ち、消滅していると思われるでも形式が変化しているだけであると考えた³¹。

このように力能の形式が変化することで全体が保存される可能性を仮定すると、自然界の力は「変換可能性」を持つことになる。この「力の保存」と「力の変換可能性」について、ファラデーは次のように述べている。

あらゆる物理的な力に共通の起源があるという可能性を認め、保存の原理をも承認する人は、その原理をすべての力の総和に適用する。力学的な力の量は（利便性のために慣例的な言葉を用いれば）長い時間にわたって変化せず一定のままであるかもしれないが、二つの等しい非弾性の物体の衝突のように、それが失われるようなときにも、その力は熱という形で見出される。熱が（最もありそうなものとして）持続的な力学的作用であると認めたり、あるいは電気のように、熱の流体の作用という別の考

²⁸ *ERE*, 3:574.

²⁹ *ERCP*, 447.

³⁰ *ERCP*, 443.

³¹ *ERCP*, 444-6.

え方を仮定したりするにせよ、その効果がどのような性格を持とうと、力すなわち「作用の原因 (cause of action)」の和が同じであるということを認めることで、保存の原理は保たれるのである³²。

すなわち、6.3 節でも論じたように、ファラデーは自然界の諸力が共通する起源から形式の違いとして顕在化したものだと考えた。そうすると、共通する起源において量が保存していれば、ある形式の力が消滅しても、別の形式の力として生成されるのであれば、全体の量は保存する。そして、この保存の原理は、熱や電気、磁気、化学作用、そして重力の原因にも等しく適用できるはずだと考えられた。

自然界の諸力のあいだに何かしらの関係性があるということは、ファラデーが研究を通じて確かめてきたことである。例えば、ファラデーは電磁誘導では磁気と電流のあいだに関係を見出したし、電気分解においては物質の重さと電気の量とのあいだに比例関係があることを確かめた。そして、光磁気効果では、光と磁気のあいだに関係があることを発見した。また、少なくともファラデーは、王立研究所で働くようになった当初から、さまざまな力が共通する起源を持つと考えていた³³。ファラデーは、すでに 1816 年のシティ・フィロソフィカル・ソサエティの講義において、化学とは物質の凝集力や親和力に基礎を置く分野であるとした上で、これらの化学的な力と重力は同じものである可能性を次のように示唆していた。

凝集の引力と化学親和力とは重力や電氣的な引力と実際に同じものであるということをはっきりと断言するわけではないが、私はそうであろうと信じている³⁴。

そして 1857 年の論文でも、ファラデーはこの化学的な引力について、酸素などの元素はどのような化合や分解を経ても不変であり、分子的な力は物質によって保存されていると説明している³⁵。

しかし、これらのファラデーが研究してきた諸力のあいだの関係性の多くは、一方の力の消滅によって他方の力の生成が生じている現象であるとは必ずしも解釈できない。すなわち、これらの関係性は必ずしも「変換可能性」であったわけではない。このことはファラデー自身も自覚していた。ファラデーは「力の保存」や「力の変換可能性」を「原理」として確信していたものの、その確信に実証的な裏付けがあったわけではなかった。ファラデーはこの「原理」について、1857 年の論文で次のように述べている。

結局のところ、力の保存という原理を否定する人もいるかもしれない。力の科学の最

³² *ERCP*, 461.

³³ Jones, *Life and Letters of Faraday*, 1:212-3.

³⁴ *Ibid.*, 1:213.

³⁵ *ERCP*, 454-5.

も細かい部分にその原理を適用しようとしてそれが見出されないとしても、あらゆる物理科学にとってそうであるように、その証拠は私たちの手の届く範囲にあるはずである。その場合、今までになされたものと同等かそれ以上の大きな発見が期待できるだろう。そのような方向性において実直に研究する人が害をなすことはないし、良いことだけであるので、私は、それらの探究に抵抗することはしない。しかし、明らかに不変的な証拠がないままに力の破壊と創造に同意することはやめよう。まさに、自らの学問の完璧さのすべてを天秤にかかった重力の確かさに依拠している化学者のように、物理の哲学者は、力の保存の原理に最も大きな保証と助けを見出すことを期待する。私たちの持つすべては、蒸気機関や電信など、その原理の証拠として申し分なく安全なものである。それは、永久運動や、熱のない火、源泉のない熱、反作用のない作用、原因のない結果、結果のない原因などを、自然の法則の地位から退けることを求めるものである³⁶。

このように、「力の保存」や「力の変換可能性」は、1857年というファラデーの晩年において、これから研究が進められるべき課題であった。例えばこの引用でも言及されているように、ファラデーは、蒸気機関や熱電気の事例から、熱においても力の保存という原理が成立すると考えていた。しかしその一方で、熱容量の異なる物質間で熱が移動する場合や、あるいは潜熱として熱が吸収される場合については、ファラデーは熱の「力」が消滅していると考えていた。そのため、ファラデーはそれらの力の相互関係についても慎重に考察を進めなければいけないと自戒していたのである³⁷。

例えばファラデーは、ジュール（James Prescott Joule, 1818-89）の1850年の論文「熱の力学的同等性について（On the Mechanical Equivalent of Heat）」の査読をおこなった際に、ジュールの結論の一部に異議を唱えている。ジュールは、羽根車による水の攪拌実験において、熱の発生量と仕事として測定される力の量とのあいだにはつねに比例関係が認められるという結論を導き出しており、その結論についてはファラデーも認めていた。しかし、さらにジュールが「力から熱への変換は摩擦によるものであった」として、「力学的な力は熱に、熱は力に、それぞれ変換可能である」と考察を進めて結論づけていたことには論理的な飛躍があるとして訂正を求めたのである³⁸。このことはファラデーが「力の保存」について慎重な態度を取っていたためであると解釈することもできるだろうし、さらにはファラデーが自然現象の「力能」を力学的な「力」とは区別していたためであると解釈することもできる。この「力能」と力学的な「力」との関係は後で改めて論じることにする。

そして、9.1節で論じた重力と電気との関係を見出そうとする実験の内容も、この「力の

³⁶ ERCP, 459-60.

³⁷ ERCP, 453-4.

³⁸ Smith, "Faraday as Referee of Joule's Royal Society Paper," 446-9. このことから、スミスは、ファラデーが必ずしもあらゆる力を変換可能であるとは考えていたわけではなく、この実験は熱の性質を示すものに過ぎないと考えていたと結論づけている。

保存」についての理論的考察と密接に関連していた。1.3.1 節でも論じたように、ファラデーは重力が「距離の二乗に反比例して変化する強さをもって」³⁹はたらく単純な引力であることを認めていた。そして、ファラデーは 1857 年の論文の中で、このように力が「変化する強さ」を持つことは「保存」とは相容れないと結論づけていた。例えばファラデーは、二つの粒子間の距離が 10 倍になると、力が 100 分の 1 になることは、力の「消滅(annihilation)」を示していると述べている⁴⁰。

もちろん、球対称に作用が広がる場合を数学的に考えれば、逆二乗則は「力の保存」と矛盾しないことになるだろう。そして、ファラデー自身も、この距離と面積の定量的な関係をまったく理解していなかったわけではなかった。少なくとも 2 年後のクリスマス講義では、光源とスクリーンとのあいだに四角のカードを置き、そのカードによって作られる影の大きさと遮られる光の強さ、およびそれらと距離との関係のアナロジーから、この逆二乗の法則を説明しているからである⁴¹。

今日的な理解からすると、ファラデーの理解は不十分であったと思われるかもしれない。しかし、ファラデーが力の逆二乗則を「消滅」と考えていたことは、彼が力をあくまで「線」として考えていたことを示唆している。ファラデーは「線」としての力が弱まっていくという定性的なイメージで逆二乗則を理解していたため、逆二乗則と「力の保存」とは相容れないと結論づけていたのである。

ファラデーにとっての重力とは、線として及ぼされる緊張状態であった。このように力を線とみなすことは、4.3 節で論じた快晴の夜空に向けた電気の誘導作用の実験の解釈に顕著であったように、重力以外の力と共通の考え方であった。ファラデーは、1.3.1 節で引用したように、ニュートンが万有引力を「直接的」な作用とみなすことに懐疑的であったことについても、「重力に関してニュートンが力の物理的な線に味方する証拠」⁴²であると考えていた。すなわち、万有引力の作用はあくまで「線」として伝わっており、中心から離れるほど作用が小さくなっているとすれば、それはその力の作用が保存されていないことを意味すると考えられたのである。

しかし、ある何らかの力の「線」が消滅するとしても、その現象が直ちに「力の保存」という原理そのものと本質的に矛盾しているとはみなされなかった。ファラデーはこの問題についての基本認識を次のように述べている。

力の保存とは根本原理である。したがって、特定の力の形式に関する仮定には、力が「増加」したり「減少」したり、あるいはその「方向が変化」したときにも、その力

³⁹ *ERCP*, 446.

⁴⁰ *ERCP*, 447, 463.

⁴¹ Faraday, *A Course of Six Lectures on the Various Forces of Matter*, 46-9.

⁴² Faraday to William Whewell, 29 January 1853, *Correspondence*, 4:481. なお、マクスウェルは重力を線で考えた場合は天体によって線が発散して引力ではなく押し力になるとし、それに対して双極子の場合は、他方の極によって線が収束するとしている。もっとも、マクスウェルは重力の線として考えることが危ういことであると考えているわけではなく、あくまで具体的(embodiment)な議論をおこなったまでであると付け加えている。(James Clerk Maxwell to Faraday, 9 November 1857, *Correspondence*, 5:302-3.)

がどうなるのかということが含まれているべきである。あるいは、その仮定が力を表現する上で半分の資格しかないという点を認めるべきかもしれない。ただ、どちらにせよ、保存という原理には反対すべきではない⁴³。

このように、ある特定の形式における力の増加や減少は、あくまで特定の形式におけることであって、力の保存という原理の反証事例とは考えられなかった。その時点では少なくとも表現としての「半分の資格」は認められるものであり、それは将来的に補完されるはずのものであるとされた。この増加や減少は、重力という自然界の部分的な力のみを対象にして観察すれば事実かもしれないし、重力に限れば、「その力能が停止していたり隠れたりしている」⁴⁴ことは認められた。しかし、このことは、自然界の力を全体として考えた時に力が保存する可能性、すなわちある形式の力が何らかの別の形式に変換されている可能性を示唆していると理解されたのである⁴⁵。

そうすると、ファラデーが物体の落下によって電気が生じるかどうかを、9.1節で論じたような方法で観測していた意図が理解できる。落下によって地球と物体とが接近すると、そのあいだに働く力は距離の逆二乗に比例して強まっていくと考えられる。そのため、ファラデーはその差分が何か別の形式の力の作用として同時的に現れるはずだと考えたのである⁴⁶。この変換可能性について、ファラデーは次のように述べている。

力の保存の原理は、私たちに次のように仮定することを促す。すなわち、A と B が、距離の増加によって互いにより少ししか引力を及ぼさなくなったとき、その内部か外部のどちらかに、その割合に応じて何か他の力能のはたらきが大きくなってくる。そしてまた、それらの距離が 10 から 1 に減少したときには、引力の力能は、今や 100 倍になっているが、それは何か他の力能の形式が同じだけ減少したことによって生み出されたものである⁴⁷。

すなわち、ファラデーの理解によると、二つの物体の距離が接近したり離れたるときには、重力の作用の大きさに変化が生じると考えられる。ファラデーは、その際にその差に相当する力によって電流が生じている可能性を実験的に確かめようとしていたのである。

また、この節の冒頭で論じたように、重力が相互作用する粒子の対が存在して初めて顕在化するとすれば、それは力の創造を意味しているとも考えられた。ファラデーは 1855 年

⁴³ *ERCP*, 449.

⁴⁴ *ERCP*, 449.

⁴⁵ *ERCP*, 447, 449.

⁴⁶ ファラデーは、このような考えを研究日誌にも書きとめている。(10 February 1859, *Diary*, 6:334, par. 15786.)

⁴⁷ *ERCP*, 450.

の論文では、重力が「実在するあらゆる物質の粒子のまわりに、つねに存在している」⁴⁸と述べていた。しかし、1857年の論文では、ファラデーはまったく孤立した粒子というものは考えられず、つねに粒子は他の粒子と関係し合っていると述べている⁴⁹。このことは、いづれにせよファラデーが、あくまで重力を物質粒子（あるいは質量）に帰属させて考えていたことを示している⁵⁰。また、重力を緊張状態として考えていたこともわかる。そして、ファラデーはこの1857年の論文では、とくに作用に対となる粒子を想定しているという意味で、ボスコヴィッチ的な単独の原子というよりも対となって作用を及ぼし合うモソッティ的な分子を想定していたと言える。

結局のところ、ファラデーは、9.1節のように重力についての「力の変換可能性」の実験で有意な結果を得られなかったことを、「力の変換可能性」そのものを否定する結果だとはい解せず、あくまで変換そのものをうまく検出できなかったためだと考えた。もともと、重力だけが「独立して存在し、他の自然の力能とは関係がなく、力の保存則とは関連がない」⁵¹という可能性もあり得た。しかしファラデーは、モソッティが論じたように重力は他の諸力の残余であるかもしれないとしながら、他の諸力とまったく関連がないという可能性は否定していた⁵²。ファラデーは、「力の保存」に関する1857年時点での実験結果の不十分性を次のように嘆いている。

重力とこれらの力の形式とのあいだに一貫性が見られないとするならば、私は、それは自分たちの無知のみによるものだと強く思う。私たちの電流についての観念は、その起源、その状態や動的な誘導、その磁気的な影響、そしてその化学的ないし熱の効果といったものを無視するならば、今やなんと不完全なものであろうか。これらの効果のうちの一つとして、他の効果を顧みないとすれば、私たちの観念はなんと不完全なものであろうか⁵³。

ファラデーにとって、「力の保存」は解決に向けた「途上 (on the way)」にある研究課題であった⁵⁴。そして、ファラデーは最終的にこの課題を解決することはできなかった。しか

⁴⁸ *ERE*, 3:574.

⁴⁹ *ERCP*, 448. 孤立した粒子については、粒子間の距離が無限大になっていく場合は考えられ、これは力の消滅に相当すると考えられた。しかし、このような場合もあくまで粒子間の距離の違いとして理解された。これらのファラデーの重力解釈についての問題は、イギリス南西部の街で司祭をしていたジョーンズ

(Edward Jones, d.1891) から指摘されている。(Edward Jones to Faraday, 4, 15 June 1857, *Correspondence*, 5:243, 246-9.) しかしファラデーは、それについての十分な結論は与えず、この講演報告をあらためて送付した。(Faraday to Edward Jones, 9, 10 June 1857, *Correspondence*, 5:244-6.)

⁵⁰ グッディングは、このことを「彼は明らかに、場を実在物のあいだの実際の、あるいは潜在的ないし可能的な関係の集まりとして意図していた」(Gooding, “Metaphysics versus Measurement,” 27.) と述べている。

⁵¹ *ERCP*, 458.

⁵² *ERCP*, 458.

⁵³ *ERCP*, 457-458. ファラデーはこの引用文に先立って「物理的な力能の源泉となっているものの本質を見ることは、私たちには今のところまだ許されていないが、私たちに提示されたもののさまざまな形式のあいだには、かなりの一貫性が見られる」と述べている。(ERCP, 457.)

⁵⁴ *ERCP*, 461.

し、実験では観測されなかったにせよ、「力の保存」と「力の変換可能性」という考え方は、ファラデーにおける「力」の概念の特徴をよく表していると言える。

そして、これらの特徴は次の四点としてまとめられるだろう。すなわち、①自然界の諸力は共通する起源を持っており、その形式の違いにおいて区別される。②力は創造されることも破壊されることもない。③力は力能として物質に帰属している。④力は緊張状態であり線としてはたらく。そして、①と②から、「力の保存」と「力の変換可能性」が導かれ、②と③から、力線が作用の対象となる物体に先立って存在していることも説明づけられた。

以上で、ファラデーにおける「力」の特徴は整理できた。しかし、これは「力」の特徴であって「力」そのものの説明ではない。そこで次に、そもそもファラデーにとっての「力」とは何であったのかという問題について分析を進めたい。

ファラデーにとっての「力」の定義は、ファラデーとマクスウェルとの書簡のやり取りを通じて、はっきりと示されている。マクスウェルはファラデーの1857年の論文「力の保存について」を読み、ファラデーに宛てて力の定義を次のように伝えていた。

力 (force) とは、ある場所から別の場所へと移動する物体の傾向 (tendency) のことであり、その経路がもたらす「緊張 (tension)」の変化量に依存する⁵⁵。

しかし、ファラデーはマクスウェルの力の定義には満足せず、その定義に対して、改めて自分の定義を次のように伝えている。

私は、「力 (force)」という言葉が貴方が「ある場所から別の場所へと移動する物体の傾向」と定義したようには用いていません。その言葉で私が意味していることは万物の粒子あるいは物質のあらゆる可能な作用の「源泉 (source or sources)」のことであり、よく自然の「力能 (power)」と呼ばれているものです⁵⁶。

この定義からも、ファラデーが「力 (force)」の本質を「力能 (power)」であると考えていたことがわかる。このように、ファラデーの定義する力は、マクスウェルの定義する力とは異質のものであった。

ファラデーは、このマクスウェルの指摘を受けて、1857年の論文の末尾に1858年6月付で、改めて力の定義を追加している。この文章は、序論でも引用した通りである。

「力 (force)」という言葉は、多くの人にとって単純に「ある場所から別の場所へと移動する物体の傾向」という意味で理解されており、それは私が思うに、「力学的な力」

⁵⁵ James Clerk Maxwell to Faraday, 9 November 1857, *Correspondence*, 5:301. この定義は、力学の原理について書かれた同じころの原稿にも見られる。(Maxwell, "Draft on the Principles of Mechanics circa 1857," in *SLP*, 1:512.)

⁵⁶ Faraday to James Clerk Maxwell, 13 November 1857, *Correspondence*, 5:305.

という語句に等しい。その意味に限定している人は、私の議論をととても不明瞭だと思いに違いない。私が「力」という言葉で意味していることは、物理的な作用の「原因 (cause)」である。万物の粒子あるいは物質のあいだのあらゆる可能な変化の源泉のことなのである⁵⁷。

ここで追加された定義は、ほぼ前述のマクスウェルとファラデーの書簡の内容の引き写しであることがわかる。ファラデーは「力」を物理的な作用の「原因」であると定義しており、それは力学的な作用の原因はもちろん、「能動的力能」全般を含むものと考えていた。そして、力は独立した存在であると考えられたが、必ず物質粒子と結びついており、物質粒子なくしては存在しえないものであると考えられた。

ファラデーにとっての力とは、力能によって生み出される緊張状態そのものであり、それは物質粒子を中心として「線」として伝わるものであった。確かに緊張状態は「傾き」や「変化量」として表現することができるが、それはあくまで「表現」に過ぎず、力そのものの「説明」ではなかった。すなわち、力は変化の源泉と位置づけられており、変化そのものではなかった。ファラデーにとって、力学的な運動やその傾向は力能によって生じるものであり、その関係を逆転させて、運動によって力を定義することはできなかった。そのため、マクスウェルのように「力」を「傾向」として定義することには同意できなかったのだと考えられる。

そうすると、ファラデーが「エネルギーの保存」ではなく「力の保存」を考えていたことも理解できる。ファラデーにとって運動は力能による作用の結果として生じるものであり、運動が他の力能へと変換可能というような考え方は因果関係からして受け入れ難かったのであろう。そのため、前述のように、ジュールの出した力学的な力と熱とが相互に変換可能であるという結論にも慎重的であったと考えられる。

ファラデーは、「化学とは可感ではない運動の科学」⁵⁸であると述べていたが、ファラデーにとって運動とは力能の作用の結果として生じるものでしかなく、それがエネルギーという形で保存され、他の力能と等価なものとして扱えるとは考えられなかったのである。この運動と力能との関係については、力を物質そのものであるとみなすファラデーの物質観からしても、そこに変換可能性を想定しにくいことは理解できるだろう。

グッディングは、ファラデーが用いる「力 (force)」という言葉には、①潜在的な作用の原因となる状態（緊張ないし傾向）と、②実際に作用が生じて伝わっている状態、の二つの意味が与えられていると分析し、さらに許容力や潜在力といった能力を意味する「力能 (power)」という言葉とも融合していたと指摘している。その一方で、質量や空間、時間

⁵⁷ ERCP, 460. ファラデーは、この「傾向」という表現を電磁気の研究を始めた1821年当時から用いている。グッディングはこのことから、ファラデーの「力線」や「場」という表現が、この「傾向」の可視化を目的として生み出されたものであったと論じている。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 171-3.)

⁵⁸ Faraday to Benjamin Abbott, 11 August 1812, *Correspondence*, 1:17.

といった概念はファラデーの体系において根本的ではなく、運動はそれが可感なるものであろうとなかろうと力の「動的」な効果としか考えられていなかったと論じている。そして、ファラデーにおいては静的な作用と動的な作用の違いや潜在的な作用と顕在的な作用との違いが存在しなかったため、二種類の力を足し合わせるような保存則が導かれ、運動との「エネルギー保存則」には至らなかったと結論づけている⁵⁹。

このグッディングの分析について、①と②は結局のところファラデーにおいて同じことであったと考えられる。すなわち、ファラデーは、力というものは緊張状態として伝わっており、それが潜在的であろうと顕在化しようとして、前もってそこに存在していると考えていた。そして、緊張状態は必ず原因をともなうものであり、その原因としての存在が「力能」であったと言える。すなわち、ファラデーにおいて「力 (force)」と「力能 (power)」の意味は区別されていたものの、本質的に融合していた。そして、このファラデーの考え方は、ファラデーが「力学」ではなく物質の力能を探究するデーヴィー的な「化学」に準じて研究を進めていったことの現れであったと考えられる。

この節を締めくくるにあたって、補足的ではあるが生命に関係する力についてのファラデーの研究についても論じておきたい。ファラデーは生命に関係する力については、電気や磁気との関係についていくつかの実験をおこなっているものの、ほとんど考察を進めることはしていない。しかし、ファラデーにおける「力」の概念について総合的に考察する以上、この観点でおこなわれた研究についても言及しておく必要があるだろう。

ファラデーは誘導の研究を始めた当初から、例えば 1833 年には、第 4 章の冒頭で引用したように「運動している電気ないし電流の効果は、第一に熱の発生、第二に磁気、第三に化学的な分解、第四に生理現象、第五に火花であると考えられる」⁶⁰として、電流と生理現象の関係についても言及していた。そして、誘導の理論を発表した 1837 年の論文の冒頭では、ヴォルタ電堆および電気分解の発見以来の 30 年間において「化学と磁気学は相次いで電気学の支配的影響を認めており、無機物の力能と、おそらくは動植物の生命に関するほとんどの力能に依存しているあらゆる効果は、究極的には電気学に従属していることがわかるだろう」⁶¹と述べていた。

このように電気現象と生理現象を結びつけて考えることは、当時の社会で特殊なことではなかった。むしろ 18 世紀以降、電気を体感することはもちろん、電気や磁気の力を治療に用いることも広くおこなわれていた⁶²。とくにファラデーの時代の顕著な例として、1836 年にクロス (Andrew Cross, 1784-1855) が、ガラス瓶に封入したケイ石粉に電流を流すことでダニが発生したと報告し、電気による生命の誕生の可能性として注目を集めている⁶³。ま

⁵⁹ Gooding, "Metaphysics versus Measurement," 11, 14-5, 21. グッディングは、ファラデーがこのように考えていたことについて化学に基礎を置いて学んできたことの影響もあると指摘している。

⁶⁰ *ERE*, 1:78, par. 267.

⁶¹ *ERE*, 1:360, par. 1161.

⁶² Morus, *Frankenstein's Children*, 144-51.

⁶³ このクロスの実験結果をファラデーが認めたとする誤報が掲載されたことに対して、ファラデーは『リ

た 1830 年代の後半には、「動物磁気」を利用した治療法であるメスメリズムが、ロンドン大学の医学教授エリオットソン (John Elliotson, 1791-1868) らによって取り上げられて人々の関心を引いていた⁶⁴。

ファラデーは、これらの社会的動向からは慎重に距離を置こうとしていたが、社会的な関心とは無縁ではいられなかった。ファラデーも、王立協会の委員としてメスメリズムの検証をおこなっていたし、これと同じ時期にはガルヴァーニの動物電気の研究に関心を寄せていた⁶⁵。そして、『電気実験研究』の第 1 巻に収められた誘導現象の研究が一段落した後の 1838 年 9 月には、前述の電流の第四の効果である電気と生理現象の関係を確かめるために電気ウナギ (gymnotus) についての実験をおこなっている⁶⁶。この実験は、電気ウナギを桶の中に入れて生体電気を発生させ、電気ショック、検流計、コイルの中に置いた鉄針の磁化、ヨウ化カリウムの電気分解、熱の発生、電気花火、といったさまざまな角度からその生体電気の特性を調べるものであった。その結果、熱の発生は観測できなかったものの、生体電気からは基本的には一般的な電気と同じ効果が認められた⁶⁷。また、電気ウナギのまわりに生じる電気の誘導の線は、磁石のまわりに生じる磁気の線と同様の形状を示すことも確かめられた⁶⁸。

また、この実験では電気の発生に神経衰弱をとまなう様子も観察されたことから、ファラデーは、電気ウナギやシビレエイ (torpedo) などの電気器官は生命維持に不可欠なものではないとするジョフロア・サンティレール (Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, 1772-1844) の研究結果を引用しながらも、「作用と反作用の原理」からして神経の活力 (energy) と電流とが電気器官の内部で変換されているのではないかと結論づけている⁶⁹。そして、神経の力能には電気などより高度な原理がはたらいている可能性が残されているものの、熱や電磁

テラリー・ガゼット (*Literary Gazette*)』や『タイムズ (*Times*)』の編集者に抗議や確認をおこなったが、この誤報はスイスなどヨーロッパ大陸まで流れた。(Faraday to William Jerdan, 2 March 1837, *Correspondence*, 1:411-412; Faraday to the Editor of Times, 3 March 1837, *Correspondence*, 1:412; Christian Friedrich Schoenbein to Faraday, 9 July 1837, *Correspondence*, 1:439.) ファラデーはこの事態に対して、「クロス氏の虫などについて、おそらく彼自身と不思議好きの大衆の他にそれを信じている人がいるとは思えません」と述べている。

(Faraday to Christian Friedrich Schoenbein, 21 September 1837, *Correspondence*, 1:456.)

⁶⁴ メスメリズムとは、メスマー (Franz Anton Mesmer, 1734-1815) によって革命期のフランスで流行した民間療法であり、革命政府から非実証的であるとして禁じられていた。その後、メスメリズムは何度かイギリスでも流行の兆しを見せるが、エリオットソンが唱導した 1837 年から 1838 年にかけてほどイギリス内に関心を持たれたことはなかった。その理由は、エリオットソンがこの動物磁気によって新しい実験医学を立ち上げようとした姿勢に大きく関係していた。この動物磁気および、それをを用いた治療法であるメスメリック・トランスの検証には王立協会の特別委員があたり、1838 年の夏におこなわれた検証にはファラデーも参加していた。(Faraday to John Elliotson, 9 May 1838, *Correspondence*, 1:498; Winter, “Mesmerism and Popular Culture,” 320-31.)

⁶⁵ Faraday to John Bostock, 15 May 1838, *Correspondence*, 1:502; John Bostock to Faraday, 17 May 1838, *Correspondence*, 1:502. 当時の動向については、次の文献を参照せよ。(Morus, *Frankenstein's Children*, 125-52, 231-55.)

⁶⁶ ファラデーはこの研究が「この物理哲学 (生体哲学: Physical Philosophy) のとても高度な部門についての多大な関心 (surpassing interest) をより顕著に先へと進めること」を助けるものであると述べている。(ERE, 2:1, par. 1749.)

⁶⁷ ERE, 2:5-7, par. 1760-7.

⁶⁸ ERE, 2:12, par. 1784.

⁶⁹ ERE, 2:14-5, par. 1789-90.

気とのアナロジーで考えることができるとした。ファラデーはこれらの考察から次のように述べている。

今のところしかし、私は、神経流体が電気だけであるということを事実によって確信させられたわけではないが、いまだに神経系統における作因 (agent) は無機的な力だろうと考えている。そして、磁気が電気よりも力のより高い関係にあるものと考えてことに理があるならば、神経の力能もさらに高尚な特質を持っており、ただなお実験の範囲内にあるのだと想像することも十分にできるだろう⁷⁰。

ここで、磁気がより高度な関係であるとされたことは、8.1節などで論じたように、磁気の原因となる物理的実在が不明であったためであろう。以上で簡単に概説したが、ファラデーは生命現象についてこれ以上深く立ち入って実験を進めることはなかった。そのため生理現象に関する「力の保存」や「力の変換可能性」については、上記のように神経衰弱に関する「作用と反作用の原理」について言及がなされた程度であった。

この節ではファラデーの「力」の概念について整理しながら総合的に論じてきた。そこで次節では、この節で得られた「力」の概念についての理解を踏まえて、ファラデーにおける「粒子」や「場」の概念についての本論文としての理解を与えたい。

9.3. ファラデーの電磁気学研究における「場」と「粒子」

前節ではファラデーにおける「力」の概念の特徴を整理して、次の四点にまとめた。そして、前節ではこの①と②から導かれる「力の保存」と「力の変換可能性」という二つの「原理」について論じた。

- ① 自然界の諸力は共通する起源を持っており、その形式の違いにおいて区別される。
- ② 力は創造されることも破壊されることもない。
- ③ 力は力能として物質に帰属している。
- ④ 力は緊張状態であり線としてはたらく。

そこでこの節では、③に関して、電磁気の力が帰属している物質であるところの「粒子 (particle)」について、また④に関して、線としては不規則な反磁性体の作用を表現するために補助的に導入された「場 (field)」という概念について、それぞれ本論文の見解を総括しておきたい。なお、議論の順序としては、まずは「力線」に準ずる概念である「場」について論じ、次にそれらの物質的根拠としての「粒子」について論じることとする。

⁷⁰ ERE, 2:16, par. 1791.

「磁場」という概念は、6.5節で論じたように、反磁性体が磁気作用の強い場所から弱い場所へと動こうとする傾向を表現するために導入された。この移動の傾向は、従来のように線で表現するには不規則なものであったため、ファラデーは「場」という空間的な表現を補助的に導入したのである。

トムソンは、1851年に発表した「磁気誘導」についての論文の中で、ファラデーの「磁場」と「力線」の概念を次のように定義している。

定義—そのすべての点に有限の磁力が存在している任意の空間は「磁力の場」と呼ばれる。あるいは「磁気」であることがわかっている場合には、単純に「力の場」ないし「磁場」とも呼ばれる。

定義—「力線」とは、力が通るそれぞれの点において、その力の方向に、磁場を通過して引かれる線のことである。あるいは磁力の方向にそれ自身の各点で接している線のことである⁷¹。

ここでトムソンは、「場」を力が存在している「空間」そのものとして定義しており、「場」にせよ「力線」にせよ物質との関係には言及していない。トムソンがこの定義を記した1851年は、ファラデーが「場」という表現を最初に用いた6年後のことである。ファラデー自身は「場」という表現を便宜的に導入したため、それに対して十分に説明を与えることはなかったし定義することもなかった。そしてトムソンは、このファラデーの「表現」そのものを定義としてまとめたと言えるだろう。

ファラデーは、歴史上はじめて物理学の空間的な作用を論じるために「場」という言葉を用いたが、その概念を明確に定義しているわけではなく、そのような概念をある一時期に突然に形成したわけでもなかった。そのため、ファラデーの電磁気学研究には、場の概念形成史という観点からさまざまな説明がなされてきたが、いつ、何をもって場の概念の成立とみなすかという判断には複数の解釈が存在し、いまだに十分な共通理解が得られていないのが現状である。

科学史・科学哲学の研究者であるナーセシアンが1985年にまとめたところによると、ファラデーの場の概念の形成時期は、1821年から1832年までのあいだとする説と、1845年から1850年のあいだとする説の二つに分かれている⁷²。前者の説はアガシやバークソンに代表され、後者の説はグッディングに代表される。そして、ウィリアムズは1965年の伝記的な研究書では立場が不明瞭であったが、1975年の論文では後者の立場を取っている⁷³。

まず前者の説について、アガシは、物質を考慮せずにその性質や振動などの運動を論じ

⁷¹ W. Thomson, "On the Theory of Magnetic Induction in Crystalline and Non-Crystalline Substances," in *RPEM*, 473.

⁷² Nersessian, "Faraday's Field Concept," 176.

⁷³ ナーセシアンは、ウィリアムズが電磁誘導を論じる際には前者の立場を取り、反磁性体を論じる際には後者の立場を取っていると指摘している。(Ibid.)

ている点をファラデーの場の概念の特徴としている⁷⁴。また、バークソンは、力それ自身が物理的な実体として扱われていることをその特徴にあげている⁷⁵。彼らは、例えばファラデーが1832年に電磁誘導において導線の動きを考察する際に、「その磁気曲線を切る」⁷⁶と表現していることに注目している。そして、このように磁気の線を物質のように表現していることから、ファラデーがこの時期に「場」の概念を想定していたと判断した。ウィリアムズも1965年の著書では、次のようにアガシやバークソンと似たような議論を展開している。なお、この引用での「第2節」とは、4.1節で論じた電磁誘導の研究を報告した節のことである。

力線の独立性は、ファラデーの研究に新しい要素を導入した。それからの30年は、彼は本質的に、電気と磁気の力が空間を伝わる方法、およびこれらの力と不可秤物質の関係という二つのことについて調べていくことになる。物理的実在性を視野に入れたこの根本的に新しい方法は、この『電気実験研究』の第2節で導入されたと行って過言ではない。それまで実際に注目されてきたことと言えば、物質に作用する力の効果であった。それ以降は、物質粒子間や何もない空間を力が伝わる方法の問題が、これまでに大きく姿を現してきたのだ。そして、ファラデーやマクスウェル、アインシュタインによって与えられていった答えから、現代的な場の理論が現われてきたのである⁷⁷。

ただし、これらのアガシやバークソン、ウィリアムズの見解は大雑把なものであり、1975年になってからウィリアムズ自身が、アガシやバークソンの見解に対して次のような批判をおこなっている。

このファラデーの観念の展開を無視したり否定したりすることによって、どちらの著者も歴史的にも技法的にも誤っている。もしファラデーが自分の観念をすでに形成した上で彼のキャリアを始めているとしたら、彼の人生には何のドラマもないことになる。彼の人生を興奮に満ちた活気あるものにしてているものは、これらの観念の進化と、そして素晴らしく豊富な想像力と自分の観念の実験的試行との絶え間ない相互作用である⁷⁸。

このようにウィリアムズは、ファラデーの場の概念は研究の進展とともに形成されてい

⁷⁴ Agassi, *Faraday as a Natural Philosopher*, 5.

⁷⁵ Berkson, *Fields of Force*, 50-1.

⁷⁶ *ERE*, 1:63, par. 217.

⁷⁷ Williams, *Michael Faraday*, 205-6.

⁷⁸ Williams, “Should Philosopher be allowed to write History?” 252. なお、この批判に対してアガシとバークソンは1978年に反論をおこなっている。(Berkson “Reply to L. Pearce Williams,” Agassi, “Williams Dodges Agassi’s Criticism,” and Williams, “Reply to Agassi and Berkson.”)

ったものであり、その歴史的過程を分析すべきであると主張している。これが、1975年以降のウィリアムズの立場である。しかし、そもそも前述のように、ウィリアムズ自身も1965年の著書ではアガシやバークソンと同じような見解を述べていたし、ファラデーの理論がその初期の頃からボスコヴィッチの原子論の影響を受けていたと論じており、ウィリアムズ自身についても歴史的過程についての分析や整理が十分にできているとは言えないだろう。

グッディングは1981年の論文で、これらのバークソンや1965年のウィリアムズの解釈、すなわちファラデーが1832年には電磁誘導の研究を通じて力の物質的原因とは独立に存在する力線の体系を想定し、その後の研究の基礎的な概念を確立していたとする解釈は、その根拠が前提によって歪められているとして次のように批判している。

この解釈は、実験の物理学的な重要性というものが前もって形成された理論的ないし形而上学的な信念によって与えられるものであり、この信念の体系がリサーチプログラムと等価なものであり、実験の役割は科学的推論の演繹的構造によって決められた妥当性を証明するものであると仮定していることで歪められている⁷⁹。

そして、グッディングは科学者が最初から成熟した理論を持っているわけではないとして、ファラデーの実験における認知過程の分析を進めるのであった。

まずグッディングは、そもそも、磁気を曲線によって空間的に表現する方法は、1820年代の地磁気研究で一般におこなわれていたことであると指摘する⁸⁰。そして、「概念を持つ」ことは「行動の枠組み (framework of activity)」が与えられることであると主張して、新しい概念の導入とは以前とは異なる文脈において言葉が用いられることであり、単に類似の手順が講じられることではないと主張する。グッディングはこの観点から、ファラデーが「線」ではなく「点」や「場所」に言及するようになったのが1845年であり、さらに「場」についての記述が体系的な概念として意味を持つようになったのは1850年以降であると結論づけている⁸¹。例えば、グッディングは磁力線の「集中」についてのファラデーの解釈に注目する。ファラデーは磁力線が「集中」することを1820年代の電磁石の実験を通じて意識するようになったが、1850年頃まで、それはあくまで状況描写であり理論的な意味が与えられていたわけではなかった⁸²。そして、1848年から1850年にかけて磁力線と磁場を理論的に関連づけて考察を進めることで、磁力線の「集中」が理論の基礎として意味を持つ

⁷⁹ Gooding, "Final Steps to the Field Theory," 231-2.

⁸⁰ Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 102-7. グッディングは、ファラデーが現象の特性や変化を静的なパターンとしてとらえ、その関係性を三次元的に詳細に表現する能力に優れていた点を評価している。(Gooding, "Mathematics and Method in Faraday's Experiments," 127-8, 130-43, 146-7.)

⁸¹ Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 101, 111-3; Gooding, "Final Steps to the Field Theory," 242-3.

⁸² グッディングは、ファラデーが電磁気現象の「線」やその「集中」について議論している背景には1820年代の電気化学や光線の議論とのアナロジーがあると指摘している。(Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, 98-102, 254-6, 261-2.)

ようになった⁸³。このことから、グッディングは、前述のように「場」が体系的な概念となったのは1850年以降であると結論づけたのである。

さらに、「場」の概念形成についてはトムソンの寄与も指摘されており、その歴史的な評価も分かれている。ファラデーは「場」に十分な定義を与えずに、物質との関係も不明確なままで曖昧な表現として用いていた。その一方で、トムソンは電磁気現象を空間的な作用として数学的に表現し、さらにこの節の最初でも引用したように「場」の概念を明確に空間的な性質として定義している。ウィリアムズは、ファラデーの場の概念形成に対するトムソンの影響を限定的にしか論じていないが、ドーランやバックウォルドは、力の伝搬というアイデアはファラデーではなくトムソンによって与えられたとして、トムソンの貢献を高く評価している⁸⁴。それに対してグッディングは、ファラデーがトムソンと交流する以前から電気と熱や光とのアナロジーを考え、トムソンなどのエーテル理論とはそもそも異なる点原子論に基づいて遠隔的な作用を説明しようとしていたとして、ウィリアムズやドーランの研究の不十分さを指摘している⁸⁵。

以上のように先行研究を整理すると、「場」の概念形成に対するファラデーの歴史的評価については、グッディングの分析が最も確実性が高いように思われる。しかし、それによって十分な歴史的な理解が得られているわけではない。むしろ、どの見解も解釈に誤りがあるとは言い切れず、それ以上の議論を進めるための論点も得られていないのが現状だと言える。

これらの研究者間の意見の相違は、そもそも「場」の概念とは何かという、問題の前提に対して共通理解がなされていないために生じているとも考えられる。バークソンは近代的な場の理論とは「ある物体から距離を隔てた物体に対する作用のすべてが、その中間の作用因によって運ばれることで及ぼされる」⁸⁶という要素を含むものだとしている。そして、ファラデーにとってその「中間の作用因」は力そのものであり、大多数の人々にとってはそれをエーテルであったと論じている。すなわちこのバークソンの解釈によると、エーテルなどの作用の物理的原因を放棄して、力線そのものを物理的実在であるかのように扱った時点で、ファラデーは独自の「場」の概念を形成したことになる。なお、バークソン以外では場の概念そのものについてのきちんとした定義は与えられていない。ナーセシアンも指摘しているように、実際のところ、これらの場の概念の歴史研究においては、場の概

⁸³ Gooding, *Experiment and the Making of Meaning*, chap. 10.

⁸⁴ Williams, *Michael Faraday*, 383-5; Doran, "Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth-Century Britain," 162-79; Buchwald, "William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics," 107. そもそもドーランは、この論文の中でトムソンの理論を中心に分析を進めている。そのことも、トムソンを高く評価する要因として働いていると考えられる。

⁸⁵ Gooding, "Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field." なお、マクスウェルはファラデーの力線の議論を参考にして、線に沿った分極 (\mathbf{H} に対応) と面での分極 (\mathbf{B} に対応) を考えていた。その一方で、トムソンは磁力を接線方向と法線方向に分けて考えており、現代的に考えるとこれは力線の量と強さに対応づけることができる。しかしワイズは、このトムソンの考え方は、ファラデーやマクスウェルのように明確に場の概念と対応づけられるものではなく、遠隔作用的なある点から及ぼされる力という考え方の延長でしかなかったと論じている。(Wise, "Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I," 1981, 67.)

⁸⁶ Berkson, *Fields of Force*, 3.

念について空間に存在する何らかの性質という程度の合意しかなされていないと言える⁸⁷。

このように「場」を「空間に存在する何らかの性質」という程度にしか定義しなければ、場の概念形成史におけるファラデーの貢献については多様な解釈の余地が生じることは避けられない。例えば1.3節で論じたように、遠隔作用説の研究でも、基本的には何らかの空間的な作用によって力が伝わっていると考えられていたし、不可秤のエーテルの存在が仮定されることにより実質的には空間における各点の性質が考えられていたと解釈することもできる。もしエーテルは物質的なものとして想定されていたために場の概念とは異なるというのであれば、ファラデーの力線も物質的な原因とは不可分であり物質そのものであるとすら考えられていた。そのため、少なくとも力線は、場の概念とは異なるということになる。エーテルと力線の等価性は、6.4節で論じたようにファラデー自身も認めていたことである⁸⁸。その一方で、ファラデーが「場 (field)」という言葉を導入した業績は揺るぎのないものであるが、ファラデーがこの「場」に対してどれほど実質的な意味を見出せていたかは疑問の余地がある。少なくとも、ファラデーにおける力線と場との本質的な違いを明確にする論点が与えられなければ、前述の力線の議論との違いがあいまいになってしまうだろう。すなわち、「空間に存在する何らかの性質」という程度の定義では分析が進まないのであれば、「場」を「エーテル」や「力線」と区別するための条件となる物質的原因との関係性を評価する形で、見通しの良い何らかの新しい論点を提示する必要がある。

本論文では、この新しい論点を「表現」と「説明」に求めたい。ここで、本論文としての見解を提示するにあたって、まずは「場」の概念を評価するための重要な基準となる近接作用説と遠隔作用説について整理しておこう。遠隔作用説とは、ニュートン力学の数学的方法を電磁気学研究に応用することで生じた研究の傾向のことであった。そして、5.6節までで明らかになったように、ファラデーについて歴史的に分析する限り、遠隔作用説は近接作用を否定するものではないし、近接作用説も遠隔作用を否定するものではなかった。遠隔作用説は作用が遠隔的にはたらくことを肯定していたわけではなかったし、近接粒子も可感ではない距離では遠隔作用を前提としていたからである。その違いは、曲線的な作用を直線に還元して数学的に表現するか、あるいは連続的な変化として表現するかという、それぞれの学説の標準的な表現方法の違いであったと言える。

なお、連続的で複雑な変化が生じているとすれば、そのような変化が生じる物質的な原因が想定され、その原因に説明を与えることが求められた。ファラデーは、電気については、その原因を近接粒子の分極作用に求めた。しかし、この近接粒子という説明には、空気が希薄になった場合に可感な距離においても遠隔作用になるという本質的な問題があった。そのためファラデーは、力そのものが物質であると解釈することによって、その問題

⁸⁷ Nersessian, "Faraday's Field Concept," 177.

⁸⁸ 力を粒子間の相互作用とみなすか、あるいは単独の粒子だけから周囲の空間に生じている作用とみなすかの違いも、空間的な性質という観点からすると大きな違いである。前述のように、ファラデーは基本的に前者の立場であり、力は粒子間の緊張状態であると考えていた。そうすると、どちらの立場でも力は物質とは不可分ということになるが、ファラデーは前者の立場ということになると、とくにその傾向が強かったと言えるだろう。

を回避しようとした。

このファラデーの研究方針は、磁気についても同様であった。しかし、反磁性体の磁気作用は、原因からの線として表現するには明確な方向性に欠けていた。そのためファラデーは、力線を包含するような曖昧な補助表現として「場」を導入した。また、ファラデーは一般に、作用を論じる際にはその物質的な原因を見出そうとしていたが、磁場については近接粒子の分極作用に帰着させることもできなかった。そのため、ファラデーは「場」という概念を作用の「表現」としても物質的な「説明」としても明確に定義することはできず、「場」は少なくとも物質とは独立なものとして論じられることになった。

そうすると、ファラデーにとって「場」とは、いわば不本意的に空間そのものの性質を表現する概念にならざるを得なかったと言える。そして、このように分析すると、ファラデーが「場」の概念を得たのは1845年のことであると言えるだろう。ナーセシアンは、ファラデー、マクスウェル、ローレンツ (Hendrik Antoon Lorentz, 1853-1928)、そしてアインシュタイン (Albert Einstein, 1879-1955) の事例を踏まえて、場の概念の歴史的な形成段階を①発見的指針 (heuristic guide)、②精緻化的 (elaborational)、③哲学的 (philosophical) の三段階に分け、ファラデーの研究と、マクスウェルの論文「電磁場の動力学的理論」に至るまでの研究が、その第一段階にあったと分析している⁸⁹。そして、ファラデーの「場」の概念は、発見的であり記述的であったと論じている⁹⁰。ファラデーにとっての「場」とは、このように「発見的指針」と解釈できるような、あくまで磁力線の補助的・記述的な表現手段に過ぎなかった。だからこそ逆に、ファラデーは自分自身にとっても特殊な概念を導入しえたと考えることができる。

そして、本人の理解はどうあれ、このように一度導入された表現は、他の研究者によってそれぞれの研究の文脈に応じて解釈されることになる。ファラデーにとっても、トムソンやマクスウェルにとっても、「力線」や「場」は作用の空間的な表現方法であった。しかし、その表現の物理的（ないし、数学的・力学的）な解釈はそれぞれの研究者において異なっていたと言える。

例えば力線に関しては、8.1節で引用したように、ファラデーは1850年の論文では力線を次のように定義していた。

私は「力線」という用語の意味を、(現時点では) 現象の物理的な原因の本質についての観念は何も含まないよう、あるいはそのような観念と結びつけられたり、何らかの形で依存したりするようなことのないよう、ある与えられた場所における力の状態、すなわち強さと方向以上のことを含意しないように制限してほしいと考えている⁹¹。

一方、マクスウェルも、次のように力線を作用の空間的な表現方法として位置づけてい

⁸⁹ Nersessian, *Faraday to Einstein*, 144.

⁹⁰ *Ibid.*, 146.

⁹¹ *ERE*, 3:330, par. 3075.

る。

位置の幾何学は、一つの計算の助けもなく確立された数理科学の一例である。今、ファラデーの力線は電磁気学において、位置の幾何学において線を引く鉛筆が占めているのと同じ場所を占めている。それは、私たちが推論の対象としている事物の厳密な心的イメージを構築する方法を備えているのである⁹²。

このように、表現としての「力線」の位置づけは、ファラデーもマクスウェルも同じであった。しかし、ファラデーは、「力線」として与えられた表現の根拠となる物理的実在性についての説明を求めた。その一方で、トムソンやマクスウェルは、「力線」という表現を参考にしながら、電磁気現象に数学的な表現を与えることを目的とした。そして、曲線的な作用の連続的な変化に対しては、独自の力学的な解釈に基づいた微分方程式が与えられた。このトムソンやマクスウェルの力学的な解釈は物質的なイメージによる説明をともなうものであったが、あくまでそれは理解を促すための仮想的なものであって、現象そのものの物質的な真の原因を説明することが求められたわけではなかった。そして実証主義的な態度によって、原因を探究することは保留とされたのである。

この目的と方法の違いは、9.2節で論じたファラデーとマクスウェルの「力」に対する認識の差にも表れている。ファラデーはあくまで力を物質的な原因に帰属させて「力能」として定義していた。それに対して、マクスウェルは、力を「傾向」や「変化量」として定義しており、物質的な原因とは関係なく空間的に規定される数学的な量として認識していた。

そして、これらの「力線」についてのファラデーとマクスウェルの認識の違いは、「場」についても同様であった。ファラデーにとって「場」は不十分にしか説明され得ないものだったのに対して、トムソンやマクスウェルにとっての「場」とは数学的な空間表現に物理的な意味づけを与えるためのものであり、それでとりあえずは十分だったのである。

このように「場」についての考察を進めると、ファラデーの重要な関心事であったのは、本論文で繰り返し指摘してきたように物質粒子の力能であったことがわかる。クロウフォードもファラデーにおいて「場」とは一つの要因に過ぎないとして「粒子」のはたらきにも注目すべきだと主張している。しかし、このクロウフォードの議論では、粒子や原子は基本的に区別されることはなく、その議論はウィリアムズのようにボスコヴィッチの原子論に注目して展開された従来の議論と本質的に変わらないものであった⁹³。その一方で、本論文では、これまでファラデーの「粒子」の特殊性に注目してきた。そこで、最後にこのファラデーの「粒子」について整理することで、本論文の見解を総括したい。

ファラデーの「粒子」の特殊性は、序論や9.2節で引用したファラデーによる力の定義に

⁹² Maxwell, "Faraday," in *SP*, 2:360.

⁹³ Crawford, "Learning from Experience," 212-5.

表れている。ファラデーは、力を作用の原因と定義し、「万物の粒子ないし物質 (the particles or materials of the universe) のあいだで起こりうるすべての変化の源のことなのである」⁹⁴と述べていた。ここで、「粒子ないし物質」という表現によって「粒子」と「物質」とが併記されていることは、少し考えると奇妙なことである。粒子は一般的に物質であると考えられるだろうし、逆に物質は粒子から構成されていると考えることもできる。そうすると、「物質のあいだで」と記すか、「粒子のあいだで」と記せばよいことになる。その一方で、もしこれが単なる言い換えであったとしても、ファラデーは自分が用いている「粒子」という言葉が特殊であるため、より一般的な「物質」という言葉で言い換える必要があると判断したのであろう。そうすると、いずれにせよ「粒子」には特別な意味が与えられていたと推測できる。

ここでファラデーが「粒子」という言葉に与えていた特別な意味を探るためには、この力の定義にある「物質 (materials)」という言葉に「質料」と理解してみるとよい。これによって、「粒子」と「質量」との区別が少しずつはっきりとしてくる。

1.2節でも論じたように、ニュートンは『プリンキピア』の中で、「質量 (massa)」を「質料の量 (quantitas materiae)」であるとして、物質の密度と大きさの積によって与えられる量であると定義していた⁹⁵。もっとも、このように定義しても、密度とは何であるのかという問題が残されることになる。この密度による力学的な定義に対して、伝統的に「質量 (massa)」は質料の大きさとして「質料の嵩 (massa materiae)」と理解されてきた。すなわち物質の「かたまり」という意味である。前者のように「質量」を密度によって定義した場合には、質点という考え方もあることから、必ずしも大きさを持つ必要はない。しかし、後者のように「質料の嵩」と理解した場合には、「質量」はある一定以上の大きさを持つと考えられる。なぜなら、物質がその性質を得るためにはある一定以上の大きさを持ち、それが質料を質料たらしめている最小単位になっていると考えられるからである。

このように、「質量」がある一定以上の大きさを持つとすると、「質量」を構成している基本要素を想定することができる。そして「粒子」とは、物質の基本要素であると考えられていた。ニュートンは『光学』の中で、粒子について次のように述べていた。

神ははじめに物質を、彼がそれらを形づくった目的に最も資するような、大きさや形、その他の性質、空間的な比率を持つ、固形で、重く、硬く、不可入で、可動な粒子 (particles) として形づくった⁹⁶。

すなわち、ニュートンのこの記述によると、「粒子」は神が最初に創造した物質の基本要素であり、あらゆる物質は「粒子」に還元されることになる。もちろんニュートン自身は、前述のように「質量」を密度によって定義しており、「質量」と「粒子」との大小関係を論

⁹⁴ *ERCP*, 460.

⁹⁵ Koyré and Cohen eds., *Isaac Newton's Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1:39-40.

⁹⁶ Newton, *Opticks*, 375-6.

じているわけではない。しかし、「質量」を「質料の嵩」と考える場合には、「粒子」は「質量」よりも小さな単位であり、「粒子」にはたらく力と「質量」にはたらく力に違いがあることも考えられるようになる。

この「粒子」と「質量」の違いは、ファラデーによる万有引力とそれ以外の力の区別として表れている。ファラデーは、万有引力を「任意の二つ、あるいはすべての物質の粒子ないし質量 (particles or masses of matter) のあいだで、あらゆる可感な距離において、距離の二乗に反比例して変化する強さをもってはたらく単純な引力のことである」⁹⁷と定義し、対象として「粒子」と「質量」の両方を想定していた。その一方で、ファラデーは、電気的な力や化学的な力は「粒子」に対する作用であるとして、対象をより限定的に規定していた⁹⁸。このファラデーの力の対象としての「粒子」と「質量」の区別は、化学と電気の方法についてのデーヴィーの区別に直接的な影響関係を見出すことができ、力の「部分 (part)」的な対象としての「粒子 (particle)」と、力の「全体 (mass)」的な対象としての「質量 (mass)」との区別として理解することができる。3.5 節で論じたように、デーヴィーは、「化学と電気の方法は同じ原因から生み出されるものであり、一方の場合は粒子 (particles) に、もう一方は質量 (masses) に作用するものである」⁹⁹と述べており、さらに、電気化学の作用はその化学と電気の方法が合わさったものであると考えていた。ファラデーはこのデーヴィーの見解を出発点として、「質量」を対象とする静電気現象から、「粒子」を対象とする電流による動的な電磁気現象へと研究を展開していったと言える。すなわち、化学的な効果もともなう電気緊張状態について研究を進めることで、電気的な力も化学的な力も「粒子」に対して作用するとみなすようになった。

このように、力の対象として「粒子」と「質量」を区別する理解は、例えばマクスウェルがエディンバラ大学で学んだハミルトンの議論にも見られる。マクスウェルが記録しているハミルトンの講義の聴講ノートによると、物質の「粒子」のあいだにはたらく力は次のように分類されている。

物質の二つの粒子のあいだにはたらく力については、いくつかの種類がある。

第一の種類は粒子の性質とは独立したものであり、それらの質量 (masses) と互いの距離にだけ依存するものである。この種のものとしては、重力の牽引力と、任意の二つが接することのないように物質の粒子のあいだにはたらく反発力がある。

第二の種類は粒子の性質に依存するものである。この種のものとしては、磁気や電気、化学親和力の牽引力があり、それらはすべて互いに変換可能で、すべての物体に影響する。

第三の種類は同じ物体の粒子のあいだにはたらくものであり、互いから一定の距離を

⁹⁷ ERCP, 446.

⁹⁸ この見解は、例えば 1860 年に出版された講義録『物質のさまざまな力についての六つの講義』の中でも繰り返されている。(Faraday, *A Course of Six Lectures on the Various Forces of Matter*, 120.)

⁹⁹ Davy, "On the Relations of Electrical and Chemical Changes," in *Collected Works*, 6:312.

一定の配置で保つ傾向にある¹⁰⁰。

なお、この第三の力とはいわゆる凝集力のことであり、物体の三態（固体・液体・気体）や弾性などを司る力とされていた。このように、ハミルトンは、力の作用の対象を「粒子」と「質量」によって区別していた。そして、重力の対象としての「質量 (masses)」は、粒子の集合として位置づけられていた。

もっとも、以上のファラデーの「質量 (mass)」についての理解が一般的な理解であったわけではない。ファラデーの「粒子」と「質量」の区別は、物質の力能の対象という観点からすると妥当かもしれないが、力学的な観点から「重さ」や「密度」が物質には普遍的に備わっていると考えた場合には不合理だと思われるだろう。粒子には重さがないと考えることになるからである。

そして、力学においては「重さ」や「密度」が運動を論じる上での本質的な量とされたため、「粒子」と「質量」の大小関係は放棄されて、「質量」は「粒子」との関係によらず普遍的な性質とみなされるようになった。例えばマクスウェルは、質量を、力と運動との関係で物質を考察する場合に必要な量として次のように定義している。

物質の等量を、等しい力が等しく作用する量と定義する。この方法によって見積もられる物質の量は「質量 (Mass)」と称される。私たちは、任意の物体の質量を、それが含んでいる標準ポンドの質量 (mass) の倍数によって見積もることができる¹⁰¹。

すなわち、マクスウェルは質量を「重さ」として物質の量として理解している。このマクスウェルの説明から質量と粒子の関係を推測することは難しいが、その力学的な定義における関係は、次のウィリアム・トムソンの説明の中に表れている。トムソンも質量を、ニュートンの定義に準じて「物質の量」と定義している¹⁰²。そして、万有引力の法則について次のように説明している。

万物における物質のすべての粒子は、他のすべての粒子を牽引しており、その力の方向は、その二つを結ぶ線の方であり、その大きさはそれらの質量の積に正比例し、互いの距離の二乗に反比例する¹⁰³。

¹⁰⁰ Maxwell, "Exercise on the Properties of Matter, for Sir William Hamilton's Metaphysics Class, Edinburgh University, 1848-49," in *SLP*, 1:111. ハミルトンは、空間や時間といった物理量の基本概念を主題として、物質は空間と時間、位置と延長、そして境界を持ち、すなわち幾何学的形態として扱うことができるとしてこのように力の対象の区別を論じている。(Ibid., 1:110-4.)

¹⁰¹ Maxwell, "Lecture on the Properties of Bodies," in *SLP*, 1:435. 具体的な質量標準については『電気磁気論』を参照せよ。Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, 1:3-4.

¹⁰² Thomson and Tait, *Treatise on Natural Philosophy*, 1:220; Thomson and Tait, *Elements of Natural Philosophy*, 56-7.

¹⁰³ Thomson and Tait, *Treatise on Natural Philosophy*, 2:9.

すなわち、トムソンにおいては、力の対象としての粒子と質量についてのファラデーのような区別は存在していなかった。実際にトムソンは、粒子は質量を持ち、その質量は慣性に依存すると述べている¹⁰⁴。そして、物体の質量を連続的なものとして扱うにせよ、それぞれの質点は粒子に対応していると述べ、さらに、この関係は電気の場合でも同じであるとしている¹⁰⁵。すなわち、トムソンにおいて、力学的に「質点≒粒子」とみなされるようになり、「粒子」は力学的な定義としての「質量」を持つことになったのである。

本論文では、「質量」と「粒子」の関係について、ファラデーの見解とトムソンやマクスウェルの見解の、どちらがどれほど一般的であったのかを検証する資料を持ち合わせていない。それは、時代区分はもちろん、研究者のコミュニティーや研究対象となる学問分野によっても変化する問題であろう。ただし、少なくともファラデーの「質量」と「粒子」の区別には根拠がなかったわけではないし、重さを持った物体の運動を研究対象とする力学的な観点ではなく、物質の力能を研究対象とする化学的な観点から考察を進める場合には、ファラデーの区別には物質観との整合性も備わっていた。そして、このファラデーの「質量」と「粒子」の区別は、次のようにファラデーやトムソンの研究について論じた 19 世紀末から 20 世紀初頭の文献でも言及されている。

トムソンより一世代後の物理学者であり電気工学者でもあったトンプソン (Silvanus P. Thompson, 1851-1916) は、1898 年にファラデーの伝記を出版し、さらに 1910 年にはトムソンの伝記を出版した。トンプソンは、この 1910 年に出版したトムソンの伝記の最後でトムソンの研究業績をまとめるにあたり、当時の物理学で想定されていた物質の構造を次の五段階で分類している。

- (1) エーテル (ether) : 空間を占めるもの (plenum)
- (2) 電子 (electron) : おそらく二種類からなる、エーテル中の網状組織 (plexus) として理解される
- (3) 原子 (atom) : エーテル中の電子の複合体
- (4) 分子 (molecule) : 特定の原子の集まり
- (5) 質量 (mass) : 分子の集まり¹⁰⁶

その上でトンプソンは、「私たちの力学的な観念や言葉は、すべて質量やそれらの運動から引き出される」¹⁰⁷として、その一方で「化学的な観念や言葉は、ほとんどが分子やそれらを構成する原子から引き出される」¹⁰⁸としている。すなわち、「質量」は力学の対象であり、「質量」よりも小さな「原子」や「分子」は化学の対象であった。そして、トンプソンは、トムソンがこれらの区別を物質とエネルギーという観点から一元的に説明しようとし

¹⁰⁴ Ibid., 2:9-10.

¹⁰⁵ Ibid., 2:61-2; Thomson and Tait, *Elements of Natural Philosophy*, 191-2.

¹⁰⁶ Thompson, *Life of Lord Kelvin*, 2:1084.

¹⁰⁷ Ibid., 2:1084-5.

¹⁰⁸ Ibid., 2:1085.

たとまとめている¹⁰⁹。

このトムソンの区分に従うと、トムソンは「力学的な観念」を「質量」よりも微小な領域へと適用することで、物質とエネルギーの関係についての研究を進めていったと言える。その一方で、ファラデーの「粒子」とは(2)の電子から(4)の分子までを包含する概念であったと解釈できる。そして、9.2節でも論じたように、ファラデーは物質粒子の力能に関心を持ち、あくまで「粒子」についての「化学的な観念」に基づいて電磁気学研究を進めたと言える。そのため、作用を(1)のエーテルに帰着させることも基本的には回避され、それによって「力線」や「場」といった表現に対して独特な物理的意味が与えられていったと言えるだろう。

なお、トムソンが1898年に出版したファラデーの伝記の中では、1.3.1節で論じた万有引力の物質的根拠の問題に関連させながら、ファラデーの近接粒子の「近接」の問題について論じた次のティンダルの見解が引用されている。

ファラデーはそれと同じ困難を彼の近接粒子の中には見ていない。質量 (masses: かたまり) から粒子 (particles) へと概念を移行していくときに、私たちは単純に大きさや距離を減じるが、その概念の性質を変えることはない。可感な距離を隔てた作用を心に抱くことには何にせよ困難を覚えるし、それは可感ではない距離を隔てた作用を心に抱こうとするときにも付きまどっている。電気や磁気の効果は近接粒子の介在によってうまくはたらくかどうかという点についての研究は、形而上学的な困難から距離を置いてはなお、まったく物理的な関心事である。ファラデーは、その課題に実験的に取り組んだのである¹¹⁰。

ここでティンダルは、ファラデーが万有引力の議論と「同じ困難を見ていない」と述べているが、ファラデーは、ヘアの指摘もあって、近接粒子という理論に遠隔作用の問題が内在していることを意識するようになった。これは、本論文で繰り返し論じてきた通りである。しかし、ファラデーはこの問題によって近接粒子という説明を放棄することはなかった。そもそもファラデーは、可感ではない距離においては遠隔作用を認めるというコモン・センス学派的な物質観を前提として近接粒子の理論を想定していたまでであった。トムソンやティンダルの見解からもわかるように、ファラデーにとっては、質量から粒子へと概念を移行するとそれらの性質は変化するものだったのである。

なお、1850年代以降では、ファラデーは電気の誘導現象について論じる機会があっても、近接粒子の理論についてさらに考察を深めていくことはなかった。1855年から1856年にかけて、ファラデーは自身の誘導の理論について、ベルリン科学アカデミーの教授リース

¹⁰⁹ このトムソンの試みは、エーテルや渦原子といった考え方を通じておこなわれ、最終的に成功することはなかった。1896年に在職五十周年講演の中で、トムソン自身が自分の50年にわたる電磁気学研究を「失敗」であったと述懐している。(Ibid., 2:1072-3.)

¹¹⁰ Tyndall, *Faraday as a Discoverer*, 68; Thompson, *Michael Faraday: His Life and Work*, 157.

(Peter T. Riess, 1804-83) と議論を交わしているが、ヘアとの議論に言及しながら自分の理論は限定的なものであると述べるにとどまっている¹¹¹。それ以外の場合では、例えば 1850 年代には電気の誘導現象について電信会社 (Electric Telegraph Company) に技術指導をおこなっており、とくに電線を被覆するためのグッタペルカ (天然ゴム) の電気特性について王立研究所の講義で取り上げている。そのような講義で誘導現象を論じる際にも、近接粒子という考え方が改めて問題にされることはなく、グッタペルカの電气的影響が、力線や場によって記述的に論じられるのみであった¹¹²。

こうして、物質粒子の力能に原因を求めることで現象の説明を与えようとするファラデーの「化学的」な研究方法では、電磁気現象に対して十分な説明を与えることはできなかった。しかしその過程では、「力線」や「場」といった、物理学的に重要な概念ないし表現方法が生み出されていったのである。

第4章の議論で明らかにしたように、ファラデーの電気化学研究は、電気現象全体の理論的な考察を進める上で極めて重要な意味を持っていた。電気分解の考察から展開された誘導についての説明は、粒子の移動を付随的とみなすことで電気現象一般へと拡張されていった。すなわち、ファラデーの電気理論は電気化学の研究に基礎づけられていたのである。

もし、現在の「物理学」という学問分野の内容からファラデーの電気研究を評価した場合には、一般に「化学」という分野の内容として扱われがちな電気分解の研究は、傍流や通過点のようにみなされてしまうかもしれない。例えば科学史家ギリスピーは、場の物理学という観点からファラデーの電磁気学研究について論じる際に、ファラデーの電気分解の研究を「ファラデー独特の才気あふれる脱線」¹¹³と位置づけている。しかし、ファラデーの特徴的な概念であった「力線」や「場」は、電気化学の研究内容に大きな影響を受けることで展開された概念であり、その逆ではないと言える。例えばアガシやバークソンは、ファラデーが場の概念を応用して電気分解の研究をおこなったかのように概念先行的に論じたが、ウィリアムズはその見解について影響関係が逆であると批判し、むしろ電気分解の研究によって遠隔作用説を否定するようになり、場の概念を導くきっかけが与えられたと反論している¹¹⁴。本論文の分析で明らかになったように、電気化学の研究はファラデーの電磁気学研究に理論的な基礎を与える重要なものであった。電気化学の研究がなければ、その後にファラデーが進めていった電磁気現象全体についての理論化は不可能であるか、まったく異なる展開になったと考えられるだろう。

ファラデーは、つねに現象を左右する物質粒子の作用について考察を続けていた。これは、ファラデーが「力学」ではなく「化学」に学問的基礎を置いていたためであったと言える。そして、作用を粒子に帰着できない場合には、十分にその現象を説明できていない

¹¹¹ Faraday and Riess, "On the Action of Non-conducting Bodies in Electric Induction," 2, 11.

¹¹² Faraday, "On Electric Induction: Associated Cases of Current and Static Effects," 345-55; Faraday, "Remarks on Static Induction," 470-5.

¹¹³ Gillispie, *Edge of Objectivity*, 447.

¹¹⁴ Williams, "Should Philosopher be allowed to write History?" 251.

と考えられた。そのため、とくに磁気現象においては、磁力線の物理的实在性が重要な論点となり、磁場については十分な定義を与えることができなかつたのだと言える。

しかし、この見解は、場の概念形成におけるファラデーの研究の重要性について否定的な評価を与えるものではない。とくに実証主義的な観点からすると、物理学研究において求められるのは、作用の物質的な原因の説明ではなく、作用の数学的関係の表現方法を開拓することであつた。ファラデーは化学を基礎としていたからこそ、電磁気学という力学と化学の中間領域において、従来 of 力学的な遠隔作用説では与えられなかつた新しい表現方法を開拓することができたのである。

結論 電磁気学の形成とファラデー

分光や陰極線の研究で知られる物理学者クルックス (William Crookes, 1832-1919) は、ファラデーが 1859 年末から 1860 年始めにかけておこなったクリスマス講義「物質のさまざまな力について (On the Various Forces of Matter)」の講義録を出版するにあたって、その編集を担当した。そして、この講義録の序文もクルックス自身が執筆しており、その文章を次のように書き始めている。

「物質」と「力」は、どちらが最初のものでしょうか。私たちがこの疑問について考えようとするならば、力なしの物質というものも、物質なしの力というものも、考えることが不可能だということに気づかねばなりません。神は、地球を構成する諸元素を創造なさったときに、物質が物質に作用するときに解放されてあらわになる、ある種の驚くべき諸力を創造なさったのです¹。

ここでクルックスが述べているように、力と物質とは不可分な存在である。そして、本論文で論じてきたファラデーの電磁気学研究においても、力と物質とは不可分な存在として扱われていたことが改めて確かめられた。

本論文では、ファラデーの電磁気学研究における「力」と「粒子」の関係についての分析を進めてきた。ファラデーの研究対象であった「力」にせよ「粒子」にせよ、その個別の存在を感覚でとらえることはできない。そのため、とくに電磁気の誘導現象については、その作用を表現することにも、その原因を説明することにも、困難をとまなうことになった。本論文では、この過程を歴史的に分析し、次の九項目としてまとめられる結論を得た。

① 遠隔作用説と近接作用説の限界

本論文ではまず、遠隔作用説と近接作用説との違いを整理し、それぞれの学説の限界を明らかにした。まず、電気の誘導作用の原因を「説明」する場合には、一般にその原因となる物質的な存在が想定された。これがいわゆる近接作用説であり、その物質的な原因として、例えばギルバートやデュフェはエフルウィウムの存在を想定し、フランクリンはアトモスフィアが存在を想定していた。しかし、このような物質的な存在を仮定しても、それが物体の表面付近にとどまる理由や継続的に放出される理由は不明であったし、その原因が可感ではないため、その理由の検証も不可能であった。そして、この感覚による検証の限界が近接作用説の限界となっていた。

そうすると、このような物質的な原因を問わずに、ニュートン力学の数学的方法を応用して現象を数学的に「表現」しようとする研究が進められた。これが、エピヌス、キャヴ

¹ Faraday, *A Course of Six Lectures on the Various Forces of Matter*, vii.

エンディシュ、クーロン、ポアソンらによって進められた遠隔作用説である。ニュートンは、可感ではない原因の仮説を避けて、可感な運動の数学的な諸原理の確立を目指した。そして、これが遠隔作用説の方法論的な基礎となった。そのため、遠隔作用説とは作用の数学的な表現方法ということになり、作用の原因を説明するものではなかった。そもそも遠隔作用説でも媒体の存在が否定されていたわけではなく、「遠隔」作用そのものも認められていたわけではなかった。その一方で、遠隔作用説の数学的な表現上の制約として、直線的かつ即時的な作用が想定されていた。この制約ゆえに複雑な曲線的な作用（さらには動的な作用）を表現することが難しく、これが遠隔作用説の限界となっていた。

このように、近接作用説と遠隔作用説にはそれぞれの限界が存在し、電磁気現象の研究を進めるためにはそれらの限界を何らかの形で克服していくことが必要であった。ファラデーは、まずこの近接作用説の限界については、そもそも原因が可感ではない現象を対象とする学問分野である化学に基づき、実在する粒子の力能という観点から現象を説明しようとした。また、遠隔作用説の限界については、従来の数学的な表現を避け、力線によって作用の曲線的な配置を表現しようとした。ティンダルやヘアにとっては、このファラデーの表現や説明には曖昧で理解しがたい点があるように思えたし、より一般的に不可秤流体やエーテルを想定すればよいようにも思えた。確かに、従来の近接作用説や遠隔作用説の観点からすれば、ファラデーの議論は不十分と判断されたかもしれない。ウィリアム・トムソンも、当初はファラデーの研究に対して否定的な評価を与えていた。しかし、ファラデーは、これらの観点とは異なり独自に化学という新しい分野から研究を進めたのであり、そのことによって同時代の多くの研究者からは十分な評価が得られなかったにせよ、それらの限界を克服していく可能性を開くことができたのである。

② 物質の性質と可感性

近接作用説と遠隔作用説の限界が生じた原因は、そもそも前述のように作用の原因が可感ではなかったためである。そこで本論文では、18世紀から19世紀にかけての感覚論を踏まえて物質の性質と可感性について論じ、それがどのように物理学や化学の研究方法と関連していたのかを明らかにした。

18世紀のイギリス経験論において、物質の性質については可感性という観点から考察が進められた。その標準的な理解として、物質の性質は力学的な運動に還元されると考えられていた。そして、その運動が可感な場合は一次性質に分類され、その運動が可感ではない場合は二次性質に分類された。また、二次性質のふるまいを一次性質によって説明する上では、力能 (power) の作用を知ることが必要であると考えられた。この力能は物質に帰属し、一次性質と二次性質とともに複雑観念を形成していると考えられていた。

この力能の作用を研究することが電磁気学や化学の目的であり、すなわちファラデーの研究対象になっていた。ロビソンは、物理学は可感ではない運動を扱う分野であり、力学や天文学とは対照的であると位置づけている。そして、電磁気現象には可感な運動と可感

ではない運動があり、前者は力学的方法によって研究できるとした。その一方で、ファラデーは力学ではなく化学に学問的な基礎と研究関心を持っていた。そこで、電磁気現象についても、後者の可感ではない運動についての研究を積極的に進めていくことになった。また、コモン・センス学派の一般的な理解として、物質的な説明の限界を超えるために、力を本質としたボスコヴィッチ的な原子論が想定されていた。このボスコヴィッチの原子は、集合体 (mass) として可感になるものであり、それよりも微小な可感ではない領域では、力が複雑に変化することが想定されていた。すなわち、物質の質量 (mass) に対する一次性質の力学的作用と、それより微小な領域に対する二次性質の化学的・電磁気学的な作用は、可感性という観点から区別されていた。

その一方で、遠隔作用説においても、作用の原因として「分子」を想定して物理現象を説明することがおこなわれた。この方法は「力学的＝分子論的」方法として物理学研究のモデルとなったが、やはり前述の遠隔作用説の限界を内在するとともに、作用の原因となる「分子」も可感ではなかったため実証性に問題があった。そこで、物質的な原因の説明を排除し、関係性のみを議論の対象とする「分析的＝実証主義的」方法が有力になっていった。

このように、物質の性質と可感性との関係を考察することで、物質の力能についてのファラデーの研究関心と学問分野との関係が明らかになった。また、当時の実証主義的な方法の特徴もこの物質の性質と可感性との関係で説明できることが示された。

③ 力学的方法とアナロジーの展開

この「分析的＝実証主義的」方法は、近接作用説と遠隔作用説の対立を解消するための方法論として重要な役割を果たした。第 2 章で論じたように、この実証主義的な方法は、原因を問わないという意味において、「説明」のあり方そのものに対する認識の刷新を迫るものであった。また、関係性を厳密に記述するために数学が重視され、力学を支える数学的方法が一般化される一方で相対化され、アナロジーを活用する数学的研究の基礎が準備されることになった。この実証主義の議論にも表れているように、ある研究方法における力学の位置づけは、その学問的な方法の特徴づけるための重要な指針であった。そこで本論文では、学問の分類と力学との関係について整理し、とくに力学との関係において物理学の特徴を示した。そして、実証主義の議論と学問分類の議論を関連づけることで、ウィリアム・トムソンやマクスウェルにおいてアナロジーの重要性が高まっていった歴史的背景を明らかにした。

19 世紀前半のイギリスにおける代表的な学問分類は、ヒューエルによって与えられた。ヒューエルは、力学の目的を、機械 (物質) 的な原因による力 (近接作用) によって運動の因果関係を説明することと考えたが、それとともに遠隔的な中心力は許容していた。そのことから、とくに 19 世紀の「力学的モデル」は「機械的モデル」であるとともに「分子論的モデル」であるということにもなっていた。また、アンペールによって、原因や力

を議論から排除するために、「運動学」という分類も導入された。

その一方で、ヒューエルは、物理学を「形式」ではなく物質的な「原因」を対象とする学問として位置づけ、さらに二次性質を扱う「二次的力学的」科学と、極性を扱う電磁気学などの「分析的＝力学的」科学に分類した。そして、物理的側面を考察しないというコントやフーリエの実証主義の立場は不十分であると批判し、「形式」を考える上でも、物理的原因の存在を前提とすることが求められた。この傾向は、物質的原因を想定するトムソンやマクスウェルの力学的モデルや物理的アナロジーという方法にも表れていくことになる。18世紀までにもアナロジーという方法は重視されてきたが、とくに「関係性」に注目する実証主義の誕生により、19世紀におけるアナロジーにはそれまでとは質の異なる特別な重要性が与えられた。それまでの観念を分類するためのアナロジーに加えて、作用の法則性を数学的に類推するためのアナロジーの重要性が高まったのである。

なお、ファラデーもまた電気学研究におけるアナロジーの重要性を指摘していたが、トムソンやマクスウェルのように現象の形式を研究の第一の目的としていたわけではない。確かに諸力の関係性を意識していたものの、ファラデーの目的はあくまで現象の原因を物質の力能に求めていくことにあった。その意味では、ファラデーの研究は「実証主義」的ではなく、あくまで化学的な関心に基づく従来の自然哲学であったと言える。ただし、結論①で得られたように、ファラデーの研究は化学に基礎を置くことで従来の近接作用説や遠隔作用説の限界を克服していく方向性を持っており、トムソンやマクスウェルの実証主義的なアナロジー研究に応用されることで、その克服がさらに進められていったのである。

④ イギリス経験論とデーヴィーの影響

第3章では、ファラデーの電磁気学研究の基礎となった直接的な要因の分析を進めた。とくに第2章までで明らかになったイギリス経験論における物質観や学問分類における力学的方法との関係に注目しながら、デーヴィーの「力」と「粒子」の議論の特徴を示した。

ファラデーは、とくに化学について自発的に学び、トマス・トムソンの物質観に強い共感を覚えていた。そして、化学では可感ではない運動を扱うという認識を持ち、可感ではない微小領域においては遠隔作用を前提とすることになった。この認識は、イギリス経験論のとくにコモン・センス学派の物質観や学問観の影響として理解できるが、このような考え方についてファラデーに大きな影響を与えたのが化学者デーヴィーの存在であったと考えられる。デーヴィーの電気分解の説明は、極からの遠隔作用を考えているとはいえ、粒子間を連続的に伝わる作用を考えていた。また、ニュートン的な中心力を持つ粒子を仮定していたが、固い粒子ではなく、力を本質とするボスコヴィッチ的な原子を想定していた。そのため、化学作用も物質の力能によって生じると考えていた。また、化学親和力は粒子に対する選択的作用であるとして、「粒子」に働く力と「質量／かたまり」に働く力を区別していた。さらに、エーテルなどの不可秤流体の存在にも批判的であった。これらのデーヴィーの考え方は、その特徴がファラデーの考え方にも同じように認められることか

ら、ファラデーの基本認識に多大な影響を与えたと考えられる。

このように、第3章では、1820年代までにファラデーの電磁気学研究に対して直接的な影響を与えたと考えられる要因を整理した。そして、第4章以降で、これらの要因とファラデーの理論との関連性を示した。

⑤ 誘導理論の形成過程における、粒子と力線の意味づけの変化

第4、5章では、ファラデーの誘導現象の研究過程についての分析を進めた。とくに本論文では、「力」と「粒子」との関係が研究の進展とともに変化していく過程を明らかにした。

そもそもファラデーの1820年代の研究は、デーヴィーやアンペールなど同時代の研究を踏まえたものであり、作用も円形や直線といった幾何学的な形状を基調としていた。そのため数学的な方法についても、1830年代にそうであったほど否定的なわけではなかった。その一方で、当初から物質の力能を物質そのものとは独立した存在として考える傾向も持ち合わせていた。

ファラデーは、1830年代に入ると電気緊張状態の研究を精力的に進めていった。ファラデーは電気緊張状態が電流の動的な作用であり化学作用とも関係するため「粒子」に対する作用であると考えた。そして、1831年に進めた電磁誘導の考察を通じて、磁気の線を物質とは独立した存在であると認識するようになり、作用を表現するための手段であった磁気曲線を、作用を説明するための作用の原因そのものとして扱うようにさえた。また、電磁回転や電磁誘導の因果関係はアンペールの「電気動力学」では説明できなかったため、ファラデーは数学的方法に対して極めて懐疑的になっていった。

さらにファラデーは、電磁誘導の研究に続いて1832年からは電気分解の研究にも取り組み、デーヴィーよりもさらに近接作用的な理論を展開した。その作用は電極からの外部的な力ではなく、物質の内部的な化学親和力の変化によるとされた。この電気分解の考え方を基礎とすることで、遠隔作用ではなく「粒子」による近接作用がファラデーの説明原理になっていった。また、粒子は電気分解の法則によって重さとも関係づけられ、粒子は引力の対象であることにもなって粒子と原子を区別する重要性がファラデーの中で薄れていった。もっとも、このように化学親和力と電気の力能とを同一のものと考えことや、化学的な性質の違いに関係なく重さだけを電気の量に関連づけることは、例えばドルトンの原子説を擁護するベルセリウスのような化学者からすると根拠不十分であると考えられた。この電気分解のファラデーの法則は、あくまで力を本質とする彼の物質観を前提としたものであった。そのため、ファラデーは、これ以降もこの法則を理論的にきちんと実証することはできなかった。しかし、この電気分解の研究によって彼の物質観が深められたことが、後のモソッティの分子論や「力の保存」の擁護へと結びついていくことになった。

静電誘導や放電については、作用が曲線的であることは自覚されていたが、当初はその形状が近接粒子という考え方によって説明づけられていたわけではなかった。電気分解や放電は粒子の移動をとまなう現象であり、分極と作用の形状との関係について整合性のあ

る理解は得られていなかったのである。その一方で、誘導の作用は物体間の緊張状態であるとみなされ、電荷は分極によって生じると考えられるようになった。これは、引力・斥力理論との本質的な相違点でもあった。また、緊張の線は作用を表現する方法に過ぎないと考えられたため、その物質的な根拠を求める必要があった。そして、粒子の移動が付随的な結果とみなされ、曲線的な作用を粒子の分極と結びつけることが誘導の「原理」として理解されるようになったのである。

本論文では、上記の過程を通じて、力線はあくまで表現手段であり、その作用を説明するためには物質的な根拠が求められていたことを示し、改めてファラデーにおける遠隔作用説批判の意味を考察した。すなわち、ファラデーに関する歴史的分析によると、遠隔作用説は近接作用を否定するものではないし、近接作用説も遠隔作用を否定するものではないことを明らかにした。その違いは、直線的な作用を基本とするか、それとも曲線的な作用を基本とするかという、それぞれの学説における標準的な表現方法と物理的原因に対する態度の違いであった。遠隔作用説は、作用の原因と対象のあいだの力を直線作用に帰する数学的な「表現」方法であり、近接作用説は作用の原因となる物質を探究する「説明」方法であったと言える。

ただし、ファラデーの近接粒子の理論は遠隔作用を許すという本質的な矛盾を内在していた。この矛盾は、物質の性質の可感性の問題に由来し、トマス・トムソンなどの従来のコモン・センス学派の物質観にも同じように存在するものであったが、ファラデーの場合とはとくに空気の希薄化と電気との関係についての考察が求められたため、この矛盾が顕在化することになったのである。

このように本論文では、ファラデーの研究が進展するにつれて、ファラデーの「力」と「粒子」についての理解が変化していく過程を明らかにし、そこには本質的な矛盾が内在していたことを示した。そして、この本質的な矛盾がファラデーの物質観に起因していたことも明らかにした。

⑥ モソッティの分子論の影響

さらに本論文では、先行研究ではほとんど注目されてこなかったモソッティの分子論に注目して、その理論がファラデーの理論形成に影響を与えていたことを明らかにした。ファラデーは誘導の理論を発表する前年に突然「分子」という言葉を用いるようになったが、そこにはモソッティの分子論の影響があったと考えられる。モソッティの分子論はエピヌスの理論に基づいており「遠隔作用説」的である。このことから、ファラデーは誘導の理論を発表する直前まで「遠隔作用説」を否定していたわけではないことがわかる。また、モソッティの理論では、対となる原子が想定されており、この点がボスコヴィッチの原子論と異なる特徴でもあった。

また、ファラデーは、電磁誘導と電池の電流発生過程の研究から、作用の配置は現象に先立って定まっているという認識を得るようになった。そして、前述の近接粒子に内在す

る問題もあった。そのため、力線は「表現」であるはずだったが、独立した存在であるかのように扱われるようになった。このように扱くと、遠隔作用説と近接作用説の対立図式から解放される可能性があったからである。このファラデーの力線についての考え方に理論的な基礎を与えたのが、ボスコヴィッチの原子論であった。しかし、ファラデーがボスコヴィッチの原子論だけを直接的に重視していた歴史的根拠は乏しい。そのため本論文では、むしろ前述のようにコモン・センス学派の物質観をファラデーが共有していたことが重要であり、場合に応じてボスコヴィッチやモソッティの名前に言及していたと判断できることを示した。さらに、ボスコヴィッチよりもモソッティの方が、ファラデーへの影響が認められることも示した。それに加えて、力線は物質的な中心を持つ力であり、空間的な性質としての場の概念とは異なることも確認した。

⑦ 場の概念形成

ファラデーは、光磁気効果の研究を通じて反磁性体のふるまいに注目し、線としては不規則な作用を表現するために「場」という表現を導入した。そこで本論文では、改めて「力線」と「場」と「粒子」との関係を分析し、「場」は便宜的な手段に過ぎず、「力線」の補助的な表現方法として導入された概念であったことを示した。

ファラデーは、磁力線そのものは観念的な存在であるとしながら「物理的実在」とみなすようになり、磁力線を電気力線と同じように空間におけるボスコヴィッチ的な力の分布として理解する可能性を考えていた。さらに、磁石における磁極の存在を磁力線の状態として解釈し、磁極の存在そのものは磁気作用の本質ではないと考えた。その一方で、電気的な緊張状態とのアナロジーを踏まえて、磁気も電気と同様の原理で粒子の作用として説明されるようになった。こうして、電気と磁気の相互作用が粒子に媒介されながらも直接的な作用とみなされていたように、光磁気効果も磁気と光の直接的な相互作用であるという理解がもたらされた。もちろん、この直接的な相互作用であるという解釈は、自然界の諸力が共通の起源を持つ異なる形式の現れであるとする確信にもよっていた。

さらに、ファラデーの「力線」と「場」の議論を分析することによって、ファラデーはつねに作用の物質的な原因を求めていたことが明らかになった。これは、現象の説明を物質の力能に求めるデーヴィー的な化学を研究方法の基礎としていたためであると考えられる。それに対して、トムソンやマクスウェルは、物質的な原因を自由に想定することで理解を促しながら「力線」や「場」を表現しようとした。これが力学的モデルであり物理的アナロジーであった。トムソンやマクスウェルの目的は、運動の傾向や変化量などの数学的関係を「表現」することであり、これはファラデーとマクスウェルの「力」に対する認識の差となって表れていた。

これらの考察から、ファラデーにとって「場」とは便宜的に導入された不十分な概念であったことがわかる。これが、ファラデーが「場」の「表現」においても「説明」においても明確な定義を与えていない理由であった。力線を場の概念の萌芽とみなす従来の見解

はまったくの誤りであるとは言えないだろうが、力線は物質に帰属する線であり、あくまで物質の力能の空間的な作用を表現するものであって、空間そのものの性質を表現するものではない。そうすると、ファラデーにおいて「場」の概念が導入されたのは反磁性体の特殊なふるまいを表現するためであって、それは1845年のことであったと結論づけられる。

⑧ アナロジーと力学的モデルを通じた、ファラデーの研究に対する評価

第7、8章では、ファラデーの電磁気学研究をより客観的に理解するために、ウィリアム・トムソンとマクスウェルによる「力線」や「場」の解釈を分析した。

トムソンは、フーリエの熱伝導の研究やストークスの弾性固体論を応用して電磁気現象の作用を数学的に表現していった。熱と電気のアナロジーを考えた場合、近接粒子や分極、力線というファラデーの考え方は、フーリエの流束として表現されうるものであった。また、流束と弾性固体の「ひずみ」は、物理現象としては異質だが、アナロジーとしては等価であるとみなされた。このことからわかるように、トムソンの議論は数学的なアナロジーに過ぎず、物質的な原因そのものを解明しようとするものではなかった。そのため、例えばトムソンは、流れのアナロジーを物理的実体の直接的な関係とみなすことには反対していた。「力学的＝運動学的表現」という言葉に表れているように、トムソンは、あくまで実証主義的に原因の説明を保留とし、その作用の構造の数学的関係を表現しようとしたのである。

その一方で、トムソンは現象の理解には力学的モデルが不可欠であると考えていた。力学的モデルとは、物質的な原因を想定して数学的・力学的な関係性を説明するものである。このことから、トムソンは、関係性を記述するだけでは物質的根拠がなく説明として不十分だと判断していたことがわかる。そして、このように力学的説明にこだわったことがファラデーとは相容れない点であり、このトムソンの解釈と比較することによってファラデーの考え方の特徴も明らかになる。なお、トムソンは電磁気学の体系的な議論を展開することはなく、場の概念の一般化には至らなかった。それを進めたのはマクスウェルであった。

マクスウェルは、物理的仮説・概念を排除し、関係性のみに注目するための手段として「物理的アナロジー」を利用した。マクスウェルは、電気力線を流体管モデルで、磁力線を分子渦モデルでそれぞれ表現している。そして、物理的な理論は、数学的理論の解が求められた後の考察対象であるとして、あくまで数学的関係性を表現することを研究の目的とした。そのため、電磁場の理論を展開するにあたっては、物理的アナロジーや力学的モデルは放棄されることになった。力学的モデルによる説明は電磁気学的な説明ではないため、「動力的理論」としては、その数学的な表現だけが求められたのである。

トムソンとマクスウェルの研究を比較すると、どちらも数学的関係性や力学を重視しているが、それぞれの展開は異なっていたことがわかる。この相違は、トムソンとマクスウェルの学問分野における力学の位置づけの違いとして説明できる。トムソンは機械学とし

て、マクスウェルは数学として力学を位置づけていた。

ファラデーは現象の物質的原因を求めたが、そのことは結果的にファラデーの研究の限界にもなった。それに対して、トムソンやマクスウェルはそもそも物質的原因を問わないという実証主義的な立場から研究を進め、その議論の前提としての困難を補うためにモデルやアナロジーという方法を導入した。しかし、トムソンの力学的方法では電磁気現象に対して十分な表現と体系的な理論を与えることができず、それはモデルやアナロジーを放棄したマクスウェルによって与えられることになった。

このように本論文では、ファラデーの電磁気学研究をトムソンやマクスウェルの解釈を通じて分析することで、ファラデーの研究方法と数学的・力学的方法との関係をより明確化し、ファラデーの理論の「表現」としての可能性と「説明」としての可能性が異なっていたことを明らかにした。

⑨ ファラデーの電磁気学研究における力と粒子の関係

以上のように本論文では、ファラデーの電磁気学研究についての分析をさまざまな観点から進めた。そして、それらの結果を総合することで、ファラデーの電磁気学研究における「力」と「粒子」の性質が明らかになった。

ファラデーは、自然界の諸力には「力の保存」と「変換可能性」という原理が存在すると考えていた。これは、ファラデーが「力」の特徴を次のように理解していたことによる。

- ① 自然界の諸力は共通する起源を持っており、その形式の違いにおいて区別される。
- ② 力は創造されることも破壊されることもない。
- ③ 力は力能として物質に帰属している。
- ④ 力は緊張状態であり、線としてはたらく。

ファラデーは、力は物質と同じように創造されたり消滅したりすることはないと考えていた。そして、物質と力能を不可分なものとして、力を物質そのものであると考えていた。この物質観からすると、力学的な運動と力能とは変換可能ではなく、エネルギー保存則は想定されえないことになる。また、力とは緊張状態であり、潜在的であろうと顕在的であろうと前もって存在していると考えられた。そして、このように力を緊張状態として考えるならば、力は粒子間作用として考えられることになる。これは、ボスコヴィッチ的というよりもモソッティ的な理解であった。そして、このファラデーの理解は、電磁気だけでなく、万有引力の解釈や実験とも密接に結びついていた。

このように、力は物質と結びつけて考えられていたため、物質粒子もまた力との関係で理解されていた。そのため、ファラデーにおける「粒子」は「質量」と区別されることになった。このファラデーの理解は、力学的には不合理であろう。例えばウィリアム・トムソンは質量を力学的に定義して、「質点≒粒子」とみなしていた。すなわち、粒子（原子・

分子)とは、化学において物質の構造を説明するための基本要素であり、質量とは、力学において物質の運動を説明するための基本要素であった。そして、ファラデーの「力」と「粒子」の概念は、「力能」を本質とする化学的な基本認によって成立していたと言える。

以上の議論より、ファラデーの電磁気学研究が、力学と化学という二つの学問分野の間領域において展開されていった過程が明らかになった。それは端的に言って、ファラデーが、電磁気現象を「力」と「粒子」の関係として理論化しようと試みていたからであり、この「力」と「粒子」という研究テーマがそれぞれ「力学」と「化学」という既存の学問分野と結びついていたからであった。なお、力学的な研究において「力」はあくまで運動の原因として扱われたのに対して、ファラデーは「力」を物質的な変化を生み出す原因として扱っていた。すなわち、ファラデーにおける「力(force)」とは、化学的な「力能(power)」と不可分な概念であった。そして、このファラデーの化学的な理解は、物質の性質についてのイギリス経験論的な「常識(コモン・センス)」を共有することで形成されたものであった。これらのファラデーの理解が、数学を基礎とするニュートン力学的な遠隔作用説やアンペールの理論に対する批判的な態度につながり、端的に「力」についてのファラデーとマクスウェルの定義の違いとして表れたのである。

電磁気の作用は曲線的かつ動的に変化するものであり、従来のニュートン力学の数学的方法によって表現しきれないほど単純なものではなかった。そして、原子論や分子論といった従来の化学的な概念や方法でも、その作用を十分に説明することはできなかった。そのため、ファラデーは「力線」や「場」という新しい表現方法を導入しながら、作用を理論的に把握するための試行錯誤を繰り返していったのである。

このファラデーの表現方法は、現象に対して記述的であり、理論としては曖昧で漠然としたところがあった。そのため、他の研究者たちから必ずしも十分に評価されたわけではなかった。しかし、根本的に新しい作用を研究していくためには、既存の方法では限界があり、このような新しい表現方法を開拓していくことが重要であった。さらに、マクスウェルも指摘していたように、ファラデーの表現方法は数学的な形式によっても翻訳可能であった。ファラデーの「力線」や「場」は数学的な記号によって表現されていたわけではなかったが、19世紀になって微分方程式を用いた研究が進むことで、数学的な表現の可能性も開けたのである。そして、このような新しい学問分野のあいだでの翻訳は、アナロジーや力学的モデルを意識的に用いることで進められ、定着していった。

こうして、ファラデーによって研究がすすめられた電磁気学は、力学とも化学とも独立した、新しい物理学の一分野を形成していくことになった。ファラデーの研究は、化学の側からその基礎を整えていくものであり、結果的には力学の側から数学的な基礎を整えていくための準備にもなった。そうすると、ファラデーの学問的な貢献とは、電磁気学や化学の分野での現象や法則性の発見などによって数多くの重要な業績を上げたことだけでなく、むしろそれ以上に、電磁気学という新しい学問分野そのものの形成に必要となる方

法を開拓したことにあっただと言える。ここに、ファラデーの独自性があったと言えるだろうし、その歴史的な形成過程は本論文で明らかにしてきたとおりである。もちろん、これらのファラデーの貢献は、それ以降の物理学の発展との関係において評価することもできる。しかし、その任は本論文の範囲を超えるものであるし、現時点では他の既存の研究に委ねるとともに今後の課題としたい。

資料一覽

1. 未刊行資料

Cambridge University Library

1. Add. 7655. James Clerk Maxwell's notebooks.
2. Add. 7342. William Thomson's notebooks.

2. 刊行資料

2.1 定期刊行物

1. *Annales de chimie et de physique*, Paris, 1820, 1824, 1835.
2. *Annals of Philosophy*, London, 1813-26.
3. *Athenaeum*, London, 1828-1921.
4. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1785-88.
5. *Journal des savans*, Paris, 1821.
6. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, Paris, 1826, 1827, 1829.
7. *Mémoires de la classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut de France*, Paris, 1811.
8. *Nouveau bulletin des sciences, par la Société Philomatique de Paris*, Paris, 1813.
9. *Philosophical Magazine*, London, 1798-.
10. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, London, 1665-.
11. *Proceedings of the Royal Institution*, London, 1854, 1858.
12. *Proceedings of the Royal Society of London*, London, 1856.
13. *Quarterly Journal of Science, Literature, and Art*, London: Royal Institution, 1816-30.
14. *Quarterly Review*, London, 1809-1906.
15. *Reports of the British Association for the Advancement of Science*, London, 1831-.
16. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Cambridge, 1821-1928.

2.2 書籍・論文

1. Aepinus, Franz U. T. *Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi*. Petropoli: Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae, 1759.
2. Ampère, André-Marie. *Correspondance du Grand Ampère*. ed. L. De Launay, 3 vols. Paris: Gauthier Villars, 1936-43.

3. ———. *Essai sur la philosophie des sciences, ou exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*. Paris: Bachelier, 1834. Reprint, Bruxelles: Culuture et Civilisation, 1966.
4. ———. “Mémoire présenté à l'Académie royale des sciences, le 2 octobre 1820 où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courants électriques.” *Annales de chimie et de physique* **15** (1820): 59-75.
5. ———. “Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience, dans lequel se trouvent réunis les Mémoires que M. Ampère a communiqués à l'Académie royale des Sciences, dans les séances des 4 et 26 décembre 1820, 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 septembre et 21 novembre 1825.” *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France* **6** (1827): 175-387.
6. ———. “Note by M. Ampère on Heat and Light Considered as the Result of Vibratory Motion.” *Philosophical Magazine* **7** (1835; translated from *Annales de chimie et de physique* **58** (1835): 434-44): 342-9.
7. ———. “Suite du mémoire sur l'action mutuelle entre deux courants électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimans.” *Annales de chimie et de physique* **15** (1820): 170-218.
8. Arago, Dominique F. J. “L'Action que les corps aimantés et ceux qui ne le sont pas exercent les uns sur les autres.” *Annales de chimie et de physique* **28** (1825): 325-6.
9. Babbage, Charles. *Passage from the Life of a Philosopher*. London: Longman, Green, Longman, Roberts, & Green, 1864. Reprint, London: William Pickering, 1994.
10. Babbage, Charles, and John F. W. Herschel. “Account of the Repetition of M. Arago's Experiments on the Magnetism Manifested by Various Substances during the Act of Rotation.” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **115** (1825): 467-96.
11. Bentley, Richard. *The Works of Richard Bentley, D.D.* ed. Alexander Dyce, 3 vols. London: Francis Macpherson, 1838. Reprint, New York: AMS Press, 1966.
12. Berzelius, Jön Jacob. *Jac Berzelius Bref.* ed. H. G. Söderbaum, vol. 2. Uppsala: Almqvist & Wiksell, 1912.
13. ———. *Jahres-Bericht über die Fortschritte der physischen Wissenschaften*. vol. 15. translated by F. Wöhler from Swedish, Tübingen: Heinrich Laupp, 1836.
14. Biot, Jean B. “Sur l'aimantation imprimée aux métaux par l'électricité en mouvement.” *Journal des savans* (April 1821): 221-35.
15. Cavendish, Henry. “An Attempt to explain Some of the Principal Phaenomena of Electricity, by Means of an Elastic Fluid.” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **61** (1771): 584-677.
16. ———. *Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish*, ed. James C. Maxwell, 2 vols.

- Cambridge: Cambridge University Press, 1879. Revised, Joseph Larmor ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1921.
17. Christie, Samuel Hunter. "On Magnetic Influence in the Solar Ray." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **116** (1826): 219-39.
 18. Comte, Auguste. *Cours de philosophie positive*. 6 vols. Paris: Bachelier, 1830-1842.
 19. ———. "Plan des travaux scientifiques nécessaires pour réorganiser la société." in *Appendice général du système de politique positive*. Paris: E. Thunot, 1854, 4:47-136.
 20. Condillac, Etienne Bonnot. *La logique, ou les premiers développements de l'art de penser*. Paris: L'Esprit et de Bure, 1780.
 21. Coulomb, Charles. A. "Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme, construction & usage d'une balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal, d'avoir une force de réaction de torsion proportionnelle à l'angle de torsion." *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* (1785): 569-77.
 22. ———. "Troisième mémoire sur l'électricité et le magnétisme. de la quantité d'électricité qu'un corps isolé perd dans un temps donné, soit par le contact de l'air plus ou moins humide, soit le long des soutiens plus ou moins idio-électrique." *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* (1785): 612-38.
 23. ———. "Quatrième mémoire sur l'électricité. où l'on démontre deux principales du fluide électrique." *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* (1786): 67-77.
 24. ———. "Cinquième mémoire sur l'électricité. de la manière dont le fluide électrique se partage entre deux corps conducteurs mis en contact, & de la distribution de ce fluide sur les différentes parties de la surface de ces corps." *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* (1787): 421-67.
 25. ———. "Sixième mémoire sur l'électricité. suite des recherches sur la distribution du fluide électrique entre plusieurs corps conducteurs: détermination de la densité électrique dans les différens points de la surface de ces corps." *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* (1788): 617-705.
 26. Daniell, John F. *An Introduction to the Study of Chemical Philosophy*. London: John W. Parker, 1839; 2nd ed., 1843.
 27. Davy, Humphry. *The Collected Works of Sir Humphry Davy, Bart. LL.D., F.R.S.* ed. John Davy, 9 vols. London: Smith Elder, 1839-40.
 28. Earnshaw, Samuel. "On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether." *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* **7** (1839): 97-112.
 29. Ellicott, John. "Several Essays towards Discovering the Laws of Electricity." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **45** (1748): 195-224.
 30. Faraday, Michael. "The Bakerian Lecture: on the Manufacture of Glass for Optical Purposes."

- Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **120** (1830): 1-57.
31. ———. *Chemical Manipulation: being Instructions to Students in Chemistry*. London: W. Phillips, 1827; Reprint, New York: John Wiley, 1974.
 32. ———. *The Correspondence of Michael Faraday*. ed. Frank A. J. L. James, 6 vols. London: IEE, IET, 1991-2012.
 33. ———. *A Course of Six Lectures on the Various Forces of Matter, and their Relations to Each Other*. New York: Harper & Brothers, 1860.
 34. ———. “On Electric Induction: Associated Cases of Current and Static Effects.” *Proceedings of the Royal Institution* **1** (1854): 345-55.
 35. ———. *Experimental Researches in Chemistry and Physics*. London: Richard Taylor and William Francis, 1859. Reprint, Bruxelles: Culture et Civilisation, 1969.
 36. ———. *Experimental Researches in Electricity*. 3 vols. London: Richard and John Edward Taylor, 1839-55. Reprint, Bruxelles: Culture et Civilisation, 1969.
 37. ———. *Faraday’s Diary*. ed. Thomas Martin, 7 vols. London: G. Bell and Sons, 1932-6.
 38. ———. “Historical Sketch of Electro-magnetism.” *Annals of Philosophy*, New Series **2** (1821): 105-200, 274-290, **3** (1822): 107-121.
 39. ———. “Remarks on Static Induction.” *Proceedings of the Royal Institution* **2** (1858): 470-5.
 40. ———. *Some Observations on the Means of Obtaining Knowledge, and on the Facilities Afforded by the Constitution of the City Philosophical Society*. London: Effingham Wilson, 1817.
 41. Faraday, Michael, and Peter T. Riess, “On the Action of Non-conducting Bodies in Electric Induction.” *Philosophical Magazine* **11** (1856): 1-17.
 42. Fourier, J. B. Joseph. *Théorie analytique de la chaleur*. Paris: Firmin Didot, 1822.
 43. Franklin, Benjamin. *Experiments and Observations on Electricity, Made at Philadelphia in America*. London: 1751. Reprinted in I. Bernard Cohen ed. *Benjamin Franklin’s Experiments*. Cambridge: Harvard University Press, 1941, 162-435.
 44. Fresnel, Augustin J. “Elementary View of the Undulatory Theory of Light.” *Quarterly Journal of Science, Literature, and Art* **23** (1827): 127-40, 441-54; **24** (1827): 113-35, 431-48; **25** (1828): 198-215; **26** (1828): 168-91, 389-407; **27** (1829): 159-65.
 45. Gilbert, William. *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure physiologia noua, plurimis & argumentis, & experimentis demonstrata*. London: Excvdebat P. Short, 1600.
 46. Green, George. *An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism*. Nottingham: Hamilton, Adams & Co., 1828. Reprint, N. M. Ferrers ed., *Mathematical Papers of George Green*, London: Macmillan, 1871; Reprint, 1-82. New York: Chelsea, 1970.

47. Hamilton, William. *Discussions on Philosophy and Literature: Education and University Reform*. 3rd ed., Edinburgh: William Blackwood, 1866.
48. ———. *Lectures on Logic*. 2nd ed., Edinburgh: William Blackwood, 1866. Reprint, Stuttgart: Friedrich Frommann, 1969.
49. Hamilton, William Rowan. *The Mathematical Papers of Sir William Rowan Hamilton*. eds. H. Halberstam, and R. E. Ingramvol, vol. 3. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.
50. Harris, William Snow. “On Some Elementary Laws of Electricity.” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **124** (1834): 213-45.
51. ———. *Rudimentary Magnetism: Being a Concise Exposition of the General Principle of Magnetical Science and the Purposes to which it has been applied*. London: J. Weale, 1850. 2nd ed., revised and enlarged by Henry M. Noad, London: Lockwood, 1972.
52. Herschel, John F. W. *A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*. London: Longman, 1830. Reprint, New York: Johnson Reprint, 1966.
53. Kelland, Phillip. “On the Present State of our Theoretical and Experimental Knowledge of the Laws of Conduction of Heat.” *Reports of the British Association for the Advancement of Science* **11** (1841): 1-25.
54. ———. *Theory of Heat*. Cambridge: J.J. Deighton, 1837.
55. Locke, John. *An Essay Concerning Human Understanding*. London, 1690. Reprint, London: Penguin, 1997.
56. Marcet, Jane. *Conversations on Chemistry*. London: 1806. Reprint, Bristol: Thoemmes Press, 2004.
57. Maxwell, James Clerk. *An Elementary Treatise on Electricity*. Oxford: Clarendon Press, 1881.
58. ———. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. 3rd ed., Oxford: Clarendon Press, 1891. Reprint, New York: Dover, 1954.
59. ———. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*. 3 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
60. ———. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. ed. W. D. Niven, 2 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1890. Reprint, New York: Dover, 2003.
61. Mossotti, Ottaviano F. “On the Forces which Regulate the Internal Constitution of Bodies.” in Richard Taylor, ed. *Scientific Memoirs: Selected from the Transactions of Foreign Academies of Science and Learned Societies, and from Foreign Journals*. 1:448-69. London: 1837. Reprint, New York: Johnson Reprint, 1966.
62. Newton, Isaac. *Correspondence of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, vol. 3, 1961.
63. ———. *Opticks: or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. 3rd ed., London: William and John Innys, 1721.

64. Ørsted, Hans Christian. *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*. eds. Karen Jelved, Andrew D. Jackson, and Old Knudsen, Princeton: Princeton University Press, 1998.
65. Poisson, Siméon D. “Extrait d’un mémoire sur la théorie du magnétisme.” *Annales de chimie et de physique* **25** (1824): 113-37.
66. ———. “Mémoire sur la distribution de l’électricité à la surface des corps conducteurs.” *Mémoires de la classe des sciences mathématiques et physiques de l’Institut de France* (1811): 1-92.
67. ———. “Mémoire sur la théorie du magnétisme.” *Mémoires de l’Académie Royale des Sciences de l’Institut de France* **5** (1821-2, published in 1826): 247-338.
68. ———. “Mémoire sur l’équilibre et le mouvement des corps élastiques.” *Mémoires de l’Académie Royale des Sciences de l’Institut de France* **8** (1825, published in 1829): 357-570.
69. ———. “Remarque sur une équation qui se présente dans la théorie des attractions des sphéroïdes.” *Nouveau bulletin des sciences, par la Société Philomatique de Paris* **3** (1813): 388-92.
70. Priestley, Joseph. *The History and Present State of Electricity: with Original Elements*. 3rd ed., 2 vols. London: C. Bathurst and T. Lowndes, 1775. Reprint, New York: Johnson Reprint, 1966.
71. Reid, Thomas. “An Abstract of the *Inquiry* (undated).” in *An Inquiry into the Human Mind on the Principles of Common Sense*. ed. Derek R. Brookes, 257-64. Edingburgh: Edingburgh University Press, 1997.
72. ———. *Essays on the Active Powers of Man*. Edinburgh: John Bell, 1788.
73. Robison, John. *A System of Mechanical Philosophy*. 4 vols. Edinburgh: John Murray, 1822.
74. Shelley, Mary W. *Frankenstein, or, the Modern Prometheus*. London: 1818. Reprint, London: Penguin, 2003.
75. Somerville, Mary. *On the Connexion of the Physical Sciences*. 5th ed., London: John Murrey, 1840. Reprint, Boston: Adamant Media, 2005.
76. Stokes, George G. “On the Constitution of the Luminiferous Aether.” *Philosophical Magazine* **32** (1848): 343-9.
77. ———. “On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids.” *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* **8** (1845): 287-319.
78. Thomson, Thomas. *A System of Chemistry*, 3rd ed., 4 vols. Edinburgh: Bell & Broadfore, 1807.
79. Thomson, William. “Dynamical Illustrations of the Magnetic and the Helicoidal Rotatory Effects of Transparent Bodies on Polarized Light.” *Proceedings of the Royal Society of London* **8** (1856): 150-8.
80. ———. *Mathematical and Physical Papers*. 6 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1882-1911.

81. ———. *Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*. Baltimore: Johns Hopkins University, 1884; republish, Robert Kargon, and Peter Achinstein, ed. *Kelvin's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics*. Cambridge: MIT Press, 1987: 7-263.
82. ———. *Popular Lectures and Addresses*. 3 vols. London: Macmillan, 1889-94.
83. ———. *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*. London: Macmillan, 1872, 2nd ed., 1884.
84. Thomson, William and George G. Stokes. *The Correspondence between Sir George Gabriel Stokes and Sir William Thomson, Baron Kelvin of Largs, 1846-1869*. ed. David W. Wilson, 2 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
85. Thomson, William and Peter G. Tait. *The Elements of Natural Philosophy*. Cambridge, 1872; Oxford, 1873, 2nd ed., 1879. Reprint, New York: Prometheus, 2002.
86. ———. *Sketch of Elementary Dynamics*. Edinburgh: Maclachlan & Stewart, 1863.
87. ———. *Treatise on Natural Philosophy*. Oxford: Clarendon Press, 1867, 2nd ed., 2 vols. Cambridge: Cambridge University Press, 1879-83.
88. Tyndall, John. *Faraday as a Discoverer*. London: Longmans Green, 1868.
89. Watts, Isaac. *The Improvement of the Mind or a Supplement, to which is Added, a Discourse on the Education of Children and Youth*. London: J. Walker, 1809.
90. Wheatstone, Charles. "An Account of Some Experiments to Measure the Velocity of Electricity and the Duration of Electric Light." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **124** (1834): 583-91.
91. Whewell, William. *Astronomy and General Physics Considered with Reference to Natural Theology*. London: William Pickering, 1833. Reprint, Bristol: Thoemmes Press, 2001.
92. ———. *An Elementary Treatise on Mechanics: Designed for the Use of Students in the University*, 5th ed., Cambridge: J.J. Deighton, 1836.
93. ———. *First Principle of Mechanics*. Cambridge: J.J. Deighton, 1832.
94. ———. *History of the Inductive Sciences*, 3rd ed., 3 vols. London: J.W. Parker, 1857. Reprint, Bristol: Thoemmes Press, 2001.
95. ———. "On the Connexion of the Physical Sciences, By Mrs Somerville." *Quarterly Review* **51** (1834):54-68.
96. ———. *The Philosophy of the Inductive Sciences*. 2nd ed., 2 vols. London: J.W. Parker, 1847. Reprint, London: Frank Cass, 1967.

2.3 事典

1. *Encyclopaedia Britannica*. 3rd edition, eds. Andrew Bell, and Colin Macfarquhar, Edinburgh: Bell & Macfarquhar, 1797.
2. *Supplement to Third Edition of the Encyclopaedia Britannica*. Edinburgh: Thomson Bonar,

- 1801.
3. *Encyclopaedia Britannica*, 9th edition, eds. T. Spencer Baynes, and W. Robertson Smith, Edinburgh: A & C Black, 1875-89.
 4. D'Alembert, Jean Le Lond. and Donis Diderot eds., *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. 35 vols. Paris: Briasson, David l'aîne, le Breton, Durand, 1751-72.
 5. Enfield, William. *The New Encyclopædia: or, Circle of Knowledge and Science, Digested, in a Concise and Popular Manner, in Distinct Treatises, Elucidating not only the First Principles of Knowledge, for the Instruction of Youth, But Embracing Early Modern Discovery, that is Worthy the Attention of the Philosopher or Man of Science*, London: Thomas Tegg, 1809.

3. 研究書・研究論文

3.1 欧語文献

1. Agassi, Joseph. *Faraday as a Natural Philosopher*. Chicago: University of Chicago Press, 1971.
2. ———. “Williams Dodges Agassi’s Criticism.” *British Journal for the Philosophy of Science* **29** (1978): 248-52.
3. Albury, William R. *The Logic of Condillac and the Structure of French Chemical and Biological Theory, 1780-1801*. Ph.D. diss., Princeton University, 1972.
4. Anderson, S. J. Ronald. “The Whewell-Faraday Exchange on the Application of the Concepts of Momentum and Inertia to Electromagnetic Phenomena.” *Studies in History and Philosophy of Science* **25** (1994): 577-94.
5. Arnold, D. H. “The Mécanique Physique of Siméon Denis Poisson: the Evolution and Isolation in France of His Approach to Physical Theory (1800-1840).” *Archive for History of Exact Science* **28**, no. 3 (1983): 243-87; **28**, no. 4 (1983): 289-367; **29**, no. 3 (1984): 37-94; **29**, no. 4 (1984): 287-307.
6. Bahar, Saba. “Jane Marcet and the Limits to Public Science.” *British Journal for the History of Science* **34** (2001): 29-49.
7. Ben-Chaim, Michael. “The Empiric Experience and the Practice of Autonomy.” *Studies in History and Philosophy of Science* **23**, no. 4 (1992): 533-55.
8. Berkson, William. *Fields of Force: the Development of a World View from Faraday to Einstein*. London: Routledge, 1974.
9. ———. “Reply to L. Pearce Williams.” *British Journal for the Philosophy of Science* **29** (1978): 243-8.

10. Berman, Morris. *Social change and Scientific Organization: The Royal Institution, 1799-1844*. Ithaca: Cornell University Press, 1978.
11. Black, Max. *Models and Metaphors: Studies in Language and Philosophy*. Ithaca: Cornell University Press, 1962.
12. Bowers, Brian, and Lenore Symons eds. *Curiosity Perfectly Satisfied: Faraday's Travels in Europe 1813-1815*. London: Peter Peregrine, 1991.
13. Brenni, Paolo. "Mechanical and Hydraulic Models for Illustrating Electromagnetic Phenomena." *Nuncius* **19** (2004): 629-57.
14. Buchwald, Jed Z. "William Thomson and the Mathematization of Faraday's Electrostatics." *Historical Studies in the Physical Sciences* **8** (1977): 101-36.
15. Campbell, Lewis, and William Garnett. *The Life of James Clerk Maxwell: with a Selection from His Correspondence and Occasional Writings and a Sketch of His Contributions to Science*. London: Macmillan, 1882.
16. Caneva, Kenneth L. "Ampère, the Etherians, and Oersted Connexion." *British Journal for the History of Science* **13**, no. 44 (1980): 121-38.
17. ———. "Physics and Naturphilosophie: a Reconnaissance." *History of Science* **35** (1997): 35-106.
18. Cannon, Susan F. *Science in Culture: the Early Victorian Period*. New York: Science History Publications, 1978.
19. Cantor, Geoffrey. *Michael Faraday: Sandemanian and Scientist*. London: Macmillan, 1991.
20. Cat, Jordi. "On Understanding: Maxwell on the Methods of Illustration and Scientific Metaphor." *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **32**, no. 3 (2001): 395-441.
21. Crawford, Elspeth. "Learning from Experience." in *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*. eds. David Gooding and Frank A. J. L. James, 211-27. New York: Stockton Press, 1985.
22. Crosland, Maurice, and Crosbie Smith. "Transmission of Physics from France to Britain: 1800-1840." *Historical Studies in the Physical Sciences* **9** (1978): 1-61.
23. Debus, Allen G. *The Chemical Philosophy: Paracelsian Science and Medicine in the Sixteenth and Seventeenth Centuries*. 2 vols. New York: Science History Pub., 1977.
24. Doncel, Manuel G. "Reconsidering Faraday: the Process of Conversion to His Magnetic Curves." *Physis* **33** (1996): 53-84.
25. Doran, Giusti Barbara. "Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth-Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature." *Historical Studies in the Physical Sciences* **6** (1975): 133-260.
26. Duhem, Pierre. *Théorie physique, son objet, sa structure*. Paris: Chevalier et Rivière, 1906.
27. Einstein, Albert. "Autobiographical Note." *Philosopher-Scientist*. New York: Tudor, 1951, 1-95.

28. Fox, Robert. "The Rise and Fall of Laplacian Physics," *Historical Studies in the Physical Sciences* **4** (1974): 89-136.
29. Friedman, Robert M. "The Creation of a New Science: Joseph Fourier's Analytical Theory of Heat." *Historical Studies in the Physical Sciences* **8** (1977): 73-99.
30. Gillispie, Charles C. *The Edge of Objectivity*. Princeton: Princeton University Press, 1960.
31. Gillmor, C. Stewart. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-century France*. Princeton: Princeton University Press, 1971.
32. Gladstone, John H. *Michael Faraday*. London: Macmillan, 1874.
33. Gooding, David, and Frank A. J. L. James eds. *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*. Basingstoke: Macmillan, 1985.
34. Gooding, David. "Conceptual and Experimental Bases of Faraday's Denial of Electrostatic Action at a Distance." *Studies in History and Philosophy of Science* **9** (1978): 117-49.
35. ———. "Empiricism in Practice: Teleology, Economy, and Observation in Faraday's Physics." *ISIS* **73** (1982), 46-67.
36. ———. *Experiment and the Making of Meaning: Human Agency in Scientific Observation and Experiment*. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1990.
37. ———. "Faraday, Thomson, and the Concept of the Magnetic Field." *British Journal for the History of Science* **13** (1980): 91-120.
38. ———. "Final Steps to the Field Theory: Faraday's Study of Magnetic Phenomena, 1845-1850." *Historical Studies in the Physical Sciences* **11** (1981): 231-75.
39. ———. "'He who proves, discovers': John Herschel, William Pepys and the Faraday Effect." *Notes and Records of the Royal Society of London* **39** (1985): 229-44.
40. ———. "Mathematics and Method in Faraday's Experiments." *Physis* **29** (1992): 121-47.
41. ———. "Metaphysics versus Measurement: the Conversion and Conservation of Force in Faraday's Physics." *Annals of Science* **37** (1980): 1-29.
42. Graves, Robert P. *Life of Sir William Rowan Hamilton*. 3 vols. Dublin: Hodges, Figgis, 1882-9.
43. Greenway, Frank, ed. *Archives of Royal Institution of Great Britain in Facsimile: Minutes of Managers' Meetings 1799-1900*. 14 vols. Yorkshire: Scolar Press, 1971.
44. Guralnick, Stanley M. "The Contexts of Faraday's Electrochemical Laws." *ISIS* **70** (1970): 59-75.
45. Hare, Edward. "Michael Faraday's Loss of Memory." *Proceedings of the Royal Institution of Great Britain* **49** (1976): 33-52.
46. Harman, Peter. M. "Edinburgh Philosophy and Cambridge Physics: the Natural Philosophy of James Clerk Maxwell." in Peter M. Harman, ed. *Wranglers and Physicist*. 202-24. Manchester: Manchester University Press, 1985.
47. ———. "Mathematics and Reality in Maxwell's Dynamical Physics." in *Kelvin's Baltimore*

- Lectures and Modern Theoretical Physics*. ed. Robert Kargon, and Peter Achinstein, 267-97. Cambridge: MIT Press, 1987.
48. ———. *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
 49. Hartley, Harold. *Humphry Davy*. London: Thomas Nelson and Sons. 1966.
 50. Hashimoto, Takehiko. “Ampère vs. Biot: Two Mathematizing Routes to Electromagnetic Theory.” *Historia Scientiarum* **24** (1983): 29-51.
 51. Heilbron, John L. *Electricity in the 17th and 18th Centuries: a Study in Early Modern Physics*. Berkley: University of California Press, 1979.
 52. Heimann, Peter M. “Faraday’s Theories of Matter and Electricity.” *British Journal for the History of Science* **5**, no. 19 (1971): 235-57.
 53. Herivel, John. “Aspects of French Theoretical Physics in the Nineteenth Century.” *British Journal for the History of Science* **3**, no. 10 (1966): 109-32.
 54. ———. *Joseph Fourier: the Man and the Physicist*. Oxford: Clarendon Press, 1975.
 55. Hesse, Mary B. *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. London: T. Nelson, 1961.
 56. ———. *Models and Analogies in Science*. 2nd ed., Indiana: University of Notre Dame Press, 1970.
 57. Hofmann, James R. *André-Marie Ampère: Enlightenment and Electrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
 58. Home, Roderick W. “Aepinus, the Tourmaline Crystal, and the Theory of Electricity and Magnetism.” *ISIS* **67** (1976): 21-30.
 59. ———. *Electricity and Experimental Physics in Eighteen-century Europe*. Hampshire: Variorum, 1992.
 60. ———. “Introduction.” in *Aepinus’s Essay on the Theory of Electricity and Magnetism*. Introductory monograph and notes by R. W. Home, translated by P. J. Conner, Princeton: Princeton University Press, 1979.
 61. James, Frank A. J. L. “The Tales of Benjamin Abbott: a Source for the Early Life of Michael Faraday.” *British Journal for the History of Science* **25** (1992): 229-40.
 62. Jones, Henry Bence. *The Life and Letters of Faraday*. London: Longmans Green, 1870.
 63. Jungnickel, Christa, and Russell McCormach. *Cavendish: the Experimental Life*. Pennsylvania: Bucknell, 2001.
 64. Kargon, Robert. “Model and Analogy in Victorian Science: Maxwell’s Critique of the French Physicist.” *Journal of the History of Ideas* **30** (1969): 423-36.
 65. Knight, David. *Humphry Davy: Science & Power*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

66. ———. “Davy and Faraday: Fathers and Sons.” in *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*. eds. David Gooding and Frank A. J. L. James, 33-49. New York: Stockton Press, 1985.
67. ———. “Steps towards a Dynamical Chemistry,” *Ambix* **14** (1967): 179-97.
68. Knudsen, Ole. “The Faraday Effect and Physical Theory, 1845-1873.” *Archive for History of Exact Science* **15** (1976): 235-81.
69. ———. “Mathematics and Physical Reality in William Thomson’s Electro Magnetic Theory.” in Peter M. Harman, ed. *Wranglers and Physicist*, 149-79. Manchester: Manchester University Press, 1985.
70. Koyré, Alexandre, and I. Bernard Cohen, eds. *Isaac Newton’s Philosophiae naturalis principia mathematica*. 2 vols. Cambridge: Harvard University Press, 1972.
71. Kusakawa, Sachiko. “Bacon’s Classification of Knowledge.” in *The Cambridge Companion to Bacon*. ed. Markku Peletonen, 47-74. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
72. Lakoff, George, and Mark Johnson. *Metaphors We Live By*. Chicago: University of Chicago Press, 1980.
73. Levere, Trevor H. *Affinity and Matter: Elements of Chemical Philosophy 1800-1865*. Oxford: Clarendon Press, 1971.
74. ———. “Faraday, Matter, and Natural Theology: Reflections on an Unpublished Manuscript.” *British Journal for the History of Science* **4**, no. 14 (1968): 95-107.
75. McCormach, Russell. “Henry Cavendish: A Study of Rational Empiricism in Eighteenth-Century Natural Philosophy.” *ISIS* **60** (1969): 293-306.
76. Miller, David Phillip. “Between Hostile Camps: Sir Humphry Davy’s Presidency of the Royal Society of London, 1820-1827.” *British Journal for the History of Science* **16** (1983): 1-47.
77. Morus, Iwan Rhys. “Currents from the Underworld: Electricity and the Technology of Display in Early Victorian England.” *ISIS* **84** (1993): 50-69.
78. ———. “Different Experimental Lives: Michael Faraday and William Sturgeon.” *History of Science* **30** (1992): 1-28.
79. ———. *Frankenstein’s Children: Electricity, Exhibition, and Experiment in Early-nineteenth-century London*. Princeton: Princeton University Press, 1998.
80. Nersessian, Nancy J. “Faraday’s Field Concept.” in *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*. eds. David Gooding and Frank A. J. L. James, 175-87. New York: Stockton Press, 1985.
81. ———. *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1984.
82. Olson, Richard. “The Reception of Boscovich’s Idea in Scotland.” *ISIS* **60** (1969): 91-103.
83. ———. *Scottish Philosophy and British Physics 1750-1880*. Princeton: Princeton University

- Press, 1975.
84. Siegel, Daniel M. *Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory: Molecular Vortices, Displacement Current, and Light*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
 85. ———. "Mechanical Image and Reality in Maxwell's Electromagnetic Theory." in *Wranglers and Physicists: Studies on Cambridge Physics in the Nineteenth Century*. ed. Peter M. Harman, 180-201. Manchester: Manchester University Press: 1985.
 86. Silliman, Robert H. "Fresnel and the Emergence of Physics as a Discipline." *Historical Studies in the Physical Sciences* **4** (1974), 137-62.
 87. Smith, Crosbie. "Faraday as Referee of Joule's Royal Society Paper "On the Mechanical Equivalent of Heat"." *ISIS* **67** (1976): 444-9.
 88. ———. "'Mechanical Philosophy' and the Emergence of Physics in Britain: 1800-1850." *Annals of Science* **33** (1976): 3-29.
 89. ———. *The Science of Energy: a Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain*. Chicago: University of Chicago Press, 1998.
 90. Smith, Crosbie, and M. Norton Wise. *Energy and Empire: a Biographical Study of Lord Kelvin*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
 91. Spencer, J. Brookes. "Boscovich's Theory and its Relation to Faraday's Research: An Analytic Approach." *Archive for History of Exact Science* **4** (1967): 184-202.
 92. Sutton, Mike A. "J. F. Daniell and the Boscovichean Atom." *Studies in History and Philosophy of Science* **4**, no. 1 (1971): 277-92.
 93. Thompson, Silvanus P. *The Life of Lord Kelvin*. 2 vols. New York: Chelsea, 1910, 2nd ed., 1976.
 94. ———. *Michael Faraday: His Life and Work*, New York: Macmillan, 1898.
 95. Westfall, Richard. *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
 96. Whittaker, Edmund T. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. 2 vols. London: T. Nelson, 1951-3.
 97. Williams, L. Pearce. "Boscovich and the British Chemist." in *Roger Joseph Boscovich S.J., F.R.S., 1711-1787*. ed. Lancelot L. Whyte, 153-167. London: George Allen & Unwin, 1961.
 98. ———. "Faraday and Ampère: A Critical Dialogue." in *Faraday Rediscovered: Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791-1867*. eds. David Gooding and Frank A. J. L. James, 83-104. New York: Stockton Press, 1985.
 99. ———. *Michael Faraday: a Biography*. London: Chapman and Hall, 1965.
 100. ———. "Reply to Agassi and Berkson." *British Journal for the Philosophy of Science* **29** (1978): 252.
 101. ———. "Should Philosophers be allowed to write History?" *British Journal for the History of Science* **26** (1975): 241-53.

102. ———. “What were Ampère’s Earliest Discoveries in Electrodynamics?” *ISIS* **74** (1983): 492-508.
103. ———. “Why Ampère did not Discover Electromagnetic Induction.” *American Journal of Physics* **54**, no. 4 (1986): 306-11.
104. Wilson, David B. *Kelvin and Stokes: a Comparative Study in Victorian Physics*. Bristol: Adam Hilger, 1987.
105. Winter, Alison. “Mesmerism and Popular Culture in Early Victorian England.” *History of Science* **32** (1994): 317-43.
106. Wise, M. Norton. *The Flow Analogy to Electricity and Magnetism: Kelvin and Maxwell*. Ph. D. diss., Princeton University, 1977.
107. ———. “The Flow Analogy to Electricity and Magnetism, Part I: William Thomson’s Reformulation of Action at a Distance.” *Archive for History of Exact Sciences* **25** (1981): 19-70.
108. ———. “William Thomson’s Mathematical Route to Energy Conservation: A Case Study of the Role of Mathematics in Concept Formation.” *Historical Studies in the Physical Sciences* **10** (1980): 49-83.
109. Yeo, Richard. *Defining Science: William Whewell, Natural Knowledge, and Public Debate in Early Victorian Britain*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

3.2 邦語文献

1. アリストテレス『形而上学』出隆訳、全2巻、東京：岩波書店、1961.
2. 清水幾太郎『オーギュスト・コント：社会学とは何か』東京：岩波書店、1978.
3. 辻哲夫、恒藤敏彦、広重徹「電磁場の理論の成立（1）」『科学史研究』**34** (1955): 5-11.
4. ———. 「電磁場の理論の成立（2）」『科学史研究』**34** (1955): 18-27.
5. 戸田剛文『バークリ：観念論・科学・常識』東京：法政大学出版会、2007.
6. 長尾伸一『トマス・リード：実在論・幾何学・ユートピア』名古屋：名古屋大学出版会、2004.
7. 夏目賢一「「磁気流体」という概念と言葉との関係」『UTCP 研究論集』**3** (2005): 71-88.
8. 本田毅彦『大英帝国の大事典作り』東京：講談社、2005.
9. 山口裕之『コンディヤックの思想：哲学と科学のはざままで』東京：勁草書房、2002.
10. 山本義隆『古典力学の形成：ニュートンからラグランジュへ』東京：日本評論社、1997.
11. ———. 『磁力と重力の発見』全3巻、東京：みすず書房、2003.
12. 吉澤剛「19世紀渦理論とその自然観」『科学技術史』**3** (1999): 51-85.

4. その他、辞書・事典

1. *Dictionary of National Biography: from the Earliest Times to 1900* (DNB). 22 vols. London: Oxford University Press, 1973.
2. *Dictionary of Scientific Biography* (DSB). 16 vols. New York: Scribner, 1970-80.
3. *Oxford English Dictionary* (OED). 2nd ed. CD-ROM, version 3.1. New York: Oxford University Press, 2004.
4. 文部省、日本物理学会編『学術用語集、物理学編（増訂版）』東京：培風館、1990.