

技術文化論叢

第5号

東京工業大学技術構造分析講座

論文

- 深井佑造
長岡半太郎の原爆開発構想 1
—戦時中の日本の原子力開発のもう一つの考え—

資料紹介

- 山崎正勝
旧日本海軍『F研究』資料 27

博士論文梗概（2002年）

- 河村豊
第2次大戦期日本の科学技術動員に関する分析 77
—旧日本海軍の電波兵器開発過程を事例とした—

修士論文梗概（2001年）

- 葉山 雅
言語と世界観の分析 92
—「規約」という観点から—

- 伊藤 詠
電気めっき産業の技術的特質に関する研究 96

- 鈴木秀人
制御技術への状態空間法の導入過程の分析 100

- 山口陽子
Conics における図形的方法 106
-

論文

長岡半太郎の原爆開発構想

一 戦時中の日本の原子力開発のもう一つの考え一

深井佑造

梗概：戦時中の日本における原爆開発は理研の「二号研究」と京都帝国大学の「F研究」が主で、これらの研究は軽水減速の熱中性子利用を基礎としている。所が、長岡半太郎の原爆構想は高速中性子利用である。1939年3月に E. Fermi は米国海軍の代表者に「熱中性子利用の連鎖反応は制御可能で、高速中性子利用では爆弾」と述べた⁽¹⁾。広島市に投下された米国が開発した原爆は高速中性子利用である。米国開発の原爆と長岡構想との相違は、前者が自立連鎖反応（超臨界状態）の物理を基礎としているのに対して、長岡構想は臨界性を明言していない中性子増倍系の連鎖反応で、核分裂反応量の補完のために信管（強力中性子源）を併設するという概念を基にしている。²³⁵U濃縮度も前者の原爆は94%であるのに対して長岡構想は50%を限界と考えている。長岡構想での信管併設は現実には核爆発に対して十分な効果があるとは考えられない。しかし、提案されている長岡構想の動力への応用は、約60年後の現在、日本を含む各国で研究されている加速器原子炉の概念と全く同じである。

§ 1 長岡構想の論文の背景

昭和19年12月12日、雑誌『軍事と技術』に長岡半太郎は「原子核分裂を兵器に利用する批判」を発表した⁽²⁾。これは、当時、敗戦色が濃くなって来た日本で退勢挽回の必須の新兵器として巷に広がった安易な原爆待望論に釘を刺すために、原爆開発不可能を唱えた論文であった。そして、長岡は米軍の広島市への原爆投下が現実の事実であった事を理解するまで、原爆開発不可能論を信じていた。原爆投下の直後、技術院総裁の多田礼吉陸軍中将に呼ばれて、広島市への原爆投下について質問をされた際に、「これは原爆ではない」と答えている⁽³⁾。

『軍事と技術』掲載の長岡論文には、自己の構想を公表する理由として次のように書いている。“……原子核分裂は汎く注意を喚起し、新聞に雑誌に又議院に於てまで宣伝せられ、世間までが彼れ是れ問題に興味を感ずるようになり、余り葉が効き過ぎ、大衆は眩暈（注：幻惑）している感がある”（なお、以降の文で“☆☆☆”の内に示した文章は長岡論文に述べられている部分を再掲した）。これが長岡が憂慮した日本国民の安易な原爆待望論である。ここで、長岡の考えと行動を理解するために、同じ物理学者で原爆待望論者であった田中館愛橘と関連付けて長岡の経歴を簡単に述べる。長岡は田中館よりも7才年下であり、同じ東京帝国大学物理科の卒業生であるが5年後輩である。長岡は昭和12年4月に第1号の文化勲章を、田中館は遅れて昭和19年4月に授賜されているので、研究能力では田中館より優れていた。長岡が1908年にノーベル化学賞を授賞した E. Rutherford の原子核の構造モデルに匹敵する「土星モデル」の提唱者である事は有名である。しかし、貴族院議員への就任では田中館が大正14年10月であったのに反して、長岡は昭和9年2月と遅

れている。この遅れは長岡が政治と軍部嫌いであったが、田中館は古くから軍部に関係し⁽⁴⁾、むしろ政治的な行動が多かった経歴から来ている。こうした二人の経歴と性格から、長岡は田中館を批判する態度があったと言われている⁽⁵⁾。さて、長岡が憂慮した“……新聞に雑誌に又議院に於てまで宣伝せられ、……”の事実とは、新聞の報道では昭和19年3月29日や同年7月9日の朝日新聞の記事等、雑誌の記事では昭和19年1月号や同年2月号の科学雑誌『科学朝日』所載の解説記事等を指していると思われる。“議院に於てまで”は昭和19年2月7日第84回貴族院本会議での田中館議員の発言を指すと考えられる。同じ議員として議会で田中館議員の発言を聞き、持ち前の「田中館を批判する態度」の一環として自己の原爆開発不可能論を公表する気持ちに駆られたと想像される（当時の日本の巷に広がった原爆待望論の実状について、筆者は「[マッチ箱一つ]の行方を追って」という題目で詳細を後日発表する予定にしている）。

それでも、当時の時勢は長岡の科学知識を軍事研究に結び付ける機会を与えた。海軍の肝入りで昭和17年7月8日に発足した『核物理応用研究委員会』には委員として長岡は参加している。そして、昭和18年3月6日に開催された最後の委員会では「米国といえども今次の大戦においては、おそらくは原子力活用を実現することは困難ならん」という結論を下した⁽⁶⁾。この結論も長岡に原爆開発不可能論を信じさせる一つの原因になったと考えられる。

しかし、当時軍関係機関からの依頼による原爆開発の研究は2ヶ所で極秘で進められていた。それらの研究は長岡が所属していた理化学研究所（理研）の陸軍委託「二号研究」⁽⁶⁾と京都帝国大学荒勝文策教授教室の海軍委託「F研究」⁽⁶⁾である。従って、長岡が当時の原爆開発研究の内容に全くの無知であったとは考え難い。公式の計画について、ある程度の研究内容を知っていた上での原爆開発不可能論であれば、科学者としての立場から彼自身の原爆開発に対する科学的な構想があったと考えるのは極めて自然ではないか。そこで、『軍事と技術』の長岡論文「原子核分裂を兵器に利用する批判」の内容を物理的に詳細に検討をすれば、長岡の原爆構想が当時の公式な「二号研究」や「F研究」の構想とは別の一戦時中の日本の原子力開発のもう一つの考えが浮かび上がって来るであろう。さて、彼の論文作成の過程を記した長岡日記の部分には⁽⁶⁾、

昭和19年9月22日、理研……。終日U235に就き調べる。原子エネルギーを実行に

移すは困難多数あり。信管の製作が大難関である。

10月9日、核分裂の批判成る。皆川[理]と之を論じ約2時間を費やす。

とあり、10月12日には出来上がった原稿を『軍事と技術』誌に送付している。ここで、注意すべきは長岡論文の作成に、ウラン連鎖反応の物理に詳しい理研の皆川理副研究員が関与している点である。皆川は実験核物理学の専門家で、サイクロトロンを使用してDイオンを加速し標的Li核やBe核に当て、発生した高速中性子と熱中性子をRhとWに照射して、生成した放射性核種 ^{102}Rh と ^{188}W からの β^+ や β^- 崩壊の半減期を測定するという研究業績がある⁽⁷⁾。又、昭和18年度の日本数学物理学会年会には計数管の問題を発表している⁽⁷⁾。通常実験物理屋は共同研究者との共著が多いのに彼は全部の研究を単独で発表している。謝辞欄では、理研の英文論文には上司である長岡と仁科芳雄に「their kind interests throughout this work」と共通に表しているが、*Phys. Rev.*の2論文では長岡には「his interest and kind encouragement throughout this work」、仁科には「his kind suggestion and

discussion」と分けて謝している。皆川は昭和8年、東京帝国大学物理学科卒業後、理研長岡研究室に助手として就職した独立独歩の真摯な実験物理屋という印象がある。『軍事と技術』に長岡が論文を発表する際に、皆川に核物理学の専門家として相談を持ちかけた理由が納得出来る。又、皆川は玉木英彦と調査して発表した日本数学物理学会誌昭和15年7月号の共著論文「中性子衝撃に依る重い原子核の分裂(II)」に⁽⁹⁾、Halban-Joliot-Kowarski, Flügge, Perrin, Adler, Halban-Joliot-Kowarski-Perrin, Adler-Halbanの論文を参照して、当時のウランの核分裂連鎖反応の研究の現状を詳細に論じて、「然し乍ら……精しい data 及び計算に入って来る種々な data のより正確な値が無ければ chain reaction の起こる可能性を決定する事は出来ない」と述べている。以上に述べた皆川の核物理学の知識が10月9日の長岡との約2時間に亘る議論によって、長岡に受け入れられ彼の論文に影濃く反映されたと考えられる。

従って、発表された長岡論文の内容は科学的には当時としては信頼性の高い内容を基礎にしていると考えてよい。そこで、以下は長岡論文の物理的内容を長岡・皆川の構想と呼ぶことにする。更に、当時の日本の原子核物理研究の主流は、理研の研究員達による多くの論文発表に見られるように⁽⁹⁾、高速中性子による種々の核反応に対する研究であったという背景も無視する事は出来ない。

§ 2 長岡論文の結論

長岡は“敢て卑見を要約すれば”と書いた後、結論を次のように述べている。

“○諸元素に就き核分裂の状況を調べ、これを数値的に測定すること。

即ち²³⁵Uのみに拘泥せぬこと。

○信管の考案製作を急ぎ貯蔵を可能ならしむること。

○同位元素の分離を迅速にする方法を研究すること。

等を主眼として進行せねば、……、空中の樓閣とはこんなものであろうかと存じます”。更に、重ねて“信管を製作するが先決問題であります。これが不可能ならば先の見透しはつきませぬ”と結んでいる。

上に示した第1項目の“核分裂物質として²³⁵U以外の元素”を考慮して研究を進めよという提案は、長岡・皆川の構想に関連する2項目以下の提案とは異質のように感じられる。そこで、ここで第1項目が具体的に何を想定しているのかを考えて見る事にする。長岡の論文に“或は又²³²ThをUと混和して分裂して見たらば、(238)（注：長岡の論文では、(238)は²³⁸Uを(235)は²³⁵Uを示している）も分裂しはしまいかと疑を抱くのである”と述べているので、先ず、第1項目の問題としてThを考えた事は確かである。当時、²³²Thの高速中性子による核分裂は確認されていた。しかし、続いて“トール(注：Th)はウランより原料豊富であるけれども、数百万エレクトロンヴォルトの中性子を打込まねばならぬ故、Rn - Beでは分裂しないかも判らない”と否定的な見解を述べている。この見解にも、皆川が持っている核物理の知識の影が見える。現在では、高速中性子による核分裂効果は²³⁸Uも²³²Thも略同程度である事が判っているが、高速中性子による²³⁸U核分裂発見の方が²³²Thの場合よりも早い。当時、理研ではサイクロトロンを用いて高速中性子による²³²Thの核反応の研究が行われていたという事情から⁽⁹⁾、長岡の論文に

“…… ^{232}Th をUと混和……”という希望的なアイデアが生まれたと思う。実は、彼らが Th の核分裂について“…… $\text{Rn}-\text{Be}$ では分裂しないかも判らない”と書いているのは問題であると思う⁽¹⁰⁾。

第1項目に関しては、 ^{239}Pu の問題を避ける訳には行かない。米国で Pu が生産されて長崎市に原爆として投下された事実は周知の事である。W. Heisenberg はドイツでも1940(昭和15)年夏には C. F. v. Weizsäcker によって ^{239}Pu の生成と核分裂性が理論的に予言されていたと言っている⁽¹¹⁾。平成7年10月2日朝日新聞夕刊「幻の原爆開発」の記事に理研の田島英三の談話として「ウランに中性子が当たる94番目の元素ができ、それが核分裂を起こすことは推定できた」とある⁽¹²⁾。この推定は皆川・玉木の日本数学物理学会誌の2件の共著論文「中性子衝撃に依る重い原子核の分裂」の内容分析から確認出来る⁽¹³⁾。かようにして、 ^{239}Pu の問題は長岡の提案を受けるまでもなく関係研究者の意識にはあった。

日本の話ではないが、この項目に関しては当時のドイツの考えの方は進んでいた。再び、Heisenberg によると⁽¹¹⁾、1942(昭和17)年6月6日のドイツの公式の原子力開発計画(通称U計画)の第2回会議で Heisenberg は ^{231}Pa を原爆の爆薬として考えた事を次のように報告している。「 Pa の必要量を用意する事は実際的ではないが、 Pa を核爆薬として考えた。何故ならば、この原子核は 0.1 MeV 程度の中性子エネルギーにて核分裂を起こし、続いて高速中性子による連鎖反応の可能性を持つからである」。 ^{238}U は半減期 7.038×10^8 年の α 崩壊で ^{231}Th に変換する。そして、 ^{231}Th は半減期 25.52時間の β 崩壊で ^{231}Pa に変換する。即ち、天然U中に ^{231}Pa は ppm のオーダーの微量で存在する。これを化学的に天然Uから取り出す事は原理的には可能であるが、微量のため実際には役に立たない。

さて、2項目以下の提案は長岡・皆川の構想に関連するので、長岡の論文から関係する字句を次章に抜き出す事にする。ここで、注意すべきは次の点である。長岡も皆川も真摯な科学者であるので、当時の科学・技術の知識水準を十分に認識した上で、自己の論旨を展開する事に慎重で次のような形式を採用している。自己の述べた内容に対して、その実現が非常に困難で、又、当時の科学・技術の水準では正確に見通しが得られないと考えられる点に関しては、断定出来ない、又は、否定的な見解を続いて述べるという形式を採用している。そこで、関係するとして引用した文章について、彼らが、その論旨が不確かさを持つと考えて、更に述べた部分を、続けて次の括弧【☆☆☆】内に示した。そのような形で展開されている議論が多い事に注意して、ここでは、括弧【☆☆☆】の字句に囚われる事なく、括弧【☆☆☆】の前段で述べられている内容こそが長岡・皆川の構想を示していると考えた。

§ 3 長岡・皆川の前爆構想

3.1 核爆発エネルギー

長岡論文には“原子核分裂を利用する爆弾は材料少量であっても、激甚なる効果を生ずる点に特徴がある。従って普通の火薬を充填するものより、この形は小にして重量は軽く、その威力は普通弾を超越する”と書かれている。即ち、原爆は小型であるにも拘らず通常の爆弾よりも強烈な爆発威力があるという特徴を述べて、その爆発動作の原理を次のよう

に説いている。“……原子核の転換分裂等の操作には専ら中性子に頼らねばならぬ。……、中性子には正当な速度を与え、処理せんとする原子に当てねばならぬ……、大量の爆薬を要する代わりに原子核に包蔵されるエネルギーを少量の原子群で置換えるが主眼である……”。“……原子核分裂に在っては……、核一つに付、一個の中性子を捕獲して分裂するのである。一塊の原子群を分裂するには少なくとも原子の数だけは中性子を供給せねばならぬ。その数は莫大なものである。……、中性子は空気中に存在しないから、十分な量を特殊な方法により送り出し、原子核が捕獲するように仕向けねばならぬ。【これが大なる難関であって】、……信管の問題と絡んで来る”。

長岡・皆川の構想にある“中性子には正当な速度を与え”とは、彼らが後に述べているように高速中性子利用の事である。熱中性子利用では ^{235}U に熱中性子が吸収されると吸収された割合の内 85%だけが核分裂する。残りの 14%の ^{235}U は分裂しない事は当時の京都帝国大学の荒勝文策研究室でも観測されていた⁽⁶⁾。高速中性子利用では、この割合は93%(表B 1参照)で殆ど核分裂する。従って、彼らの“核一つに付、一個の中性子を捕獲して分裂する”と言う表現は略正しい。そこで“一塊の原子群を分裂するには少なくとも原子の数だけは中性子を供給せねばならぬ”事になる。即ち、この構想では、

$$\text{中性子の必要量} = \text{核分裂するU核の数} = \text{核爆発エネルギー} \quad (1)$$

という方式を示している。高速中性子利用であるから、 ^{235}U と ^{238}U の両原子核が核分裂する(なお、長岡論文では“ウラン”や“U”という語は天然ウランを指している)。

“一塊の原子群”を 1g のUとして、核分裂によって発生する核爆発の威力を計算する。1g のUに含まれる原子核数は 2.5×10^{24} 個であるから、

$$\text{中性子の必要量} = 2.5 \times 10^{24} \text{個} = \text{核分裂エネルギー} : 1.9 \times 10^7 \text{ Kcal} \quad (2)$$

即ち、 1 g のUの核分裂エネルギー量 = TNT換算 : 21 ton (3)

となる。ここで、1回の核分裂によって発生するエネルギーを 200 MeV、TNT火薬換算率を 900 Kcal/KgTNTとした。8月6日の広島市への原爆投下直後、米国大統領 H. S. Truman は「広島に使用した原爆は TNT20kton の威力に相当する」という声明を発表した。声明と(3)式から広島型原爆では約 0.9 Kg のUが核分裂し、

$$\text{広島型原爆の核分裂中性子全数} : N = 2.5 \times 10^{24} \text{個} \quad (4)$$

である事が判る。昭和19年3月29日と同年7月9日の朝日新聞記事には「[マッチ箱1つ]のUで London 市全体を壊滅させる事が出来る」とある。マッチ箱は日本規格家庭並型で $5.6\text{cm} \times 3.6\text{cm} \times 1.8\text{cm} = 36.3\text{cm}^3$ の体積で、長岡論文でも“ウランの如き比重 19に近いもの”とあるので、掌に乗ってしまう[マッチ箱一つ]のUの重さは約 0.7 Kg になり、これは広島市投下の原爆と略同じ爆発威力に相当する。

3.2 “信管”(強力「中性子源」)の問題

中性子の必要量を如何にして得るかという問題に移る。長岡・皆川の構想では中性子を発生する“信管”を必要としている。中性子を得る手段としては、核物理実験で用いられる「中性子源」と「加速器」がある。爆弾に課せられる軽量性からすると、当然、「中性子源」の採用が考えられる。“核の分裂に入用な装置を戦場に於て実験室と同様に整備することは許されない。必ずや簡単な信管に相当するものを案出せねばならぬ、……【原子核の分裂を造作もなく誘導し得ると考えては、錯誤の甚しきものである】”。“【高压高温等によりウラン核の分裂を誘起し得るべしとの考は放棄せねばならぬ】。畢竟分裂を促

す信管を造るには、その際原子に侵入する中性子に都合好き速度を与えねばならぬ故、…、核構造に實質上必要なる要素をこれに適用するように努めねばならぬ”。「中性子源」は“ラドン (Rn) とベリリウム (Be) を用いて中性子を発生せしむる。…。ラドンは五日足らずでその性能を半減する故⁽¹⁴⁾、かゝる信管を使用前に作り貯えて置くことは不可能である。……。次の問題はラドンを発生するラジウムの量である⁽¹⁴⁾。所要のウラン核を分裂せしむるに費やされるラドンは、近時の戦争ではかなりの量を要するであろう。……。大戦前消息通の報ずるところによれば、ドイツには当時約 300グラムのラジウムがあった。若しドイツで原子核を兵器に使用する企図があったとすれば、……、現時ドイツが保有するラジウムは1匁を超えているかも知れない(……)。これ程の分量があれば今記したような信管を使用した兵器用の分裂試験を施行できる【が、その有無は判然としない】”。

これらの考えを基にして、結論に “○信管の考案製作を急ぎ貯蔵を可能ならしむること” を提案している。α崩壊する原子核からのα粒子によるBe(α, n)反応を用いるのは核物理的に合理性がある。そして、(α, n)反応の強さは入射するα粒子の運動エネルギー値に依存する。しかし、この「中性子源」の強度と寿命は両立しない。強度を重要視すれば単位時間あたりにα粒子発生の多い核種を選ばねばならぬ、これはα崩壊の短い半減期の原子核である。即ち、この「中性子源」は寿命が短くなる。現在では、α-emitterとしては²²⁶Ra、²²⁷Ac、²⁴¹Am、²⁴²Cm、²⁰⁹Po(半減期:102年)と自発核分裂(s.f.)の²⁵²Cfが考えられている。長岡の論文に主張されているように、「中性子源」の軽

表1 中性子源の強度(単位:n/s.g) 量性を重視すれば単位重量当たりの発生中性子数が問題になり、これは²⁰⁹Poの場合を除き

反応	半減期	強度
²²⁶ Ra-α	1.6×10 ³ 年	1.30×10 ⁷
²²⁷ Ac-α	21.773年	1.11×10 ⁹
²⁴¹ Am-α	433年	7.33×10 ⁶
²⁴² Cm-α	162.8日	8.48×10 ⁹
²⁵² Cf s.f.	2.64年	2.30×10 ¹²

 表1のようになる⁽¹⁵⁾。この表は長岡が結論で強く主張した当時から見た未来の“信管”の姿である。しかし、現在の核物理実験での中性子源の採用時の判断基準は軽量性にあるのではなく、α-emitterや²⁵²Cfの入手可能性にある。当時は²²⁶Ra以外には入手が出来なかった⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。そこで、長岡論文に書いてある“現時ドイツが保有するラジウムは1匁”が長岡・皆川の構想での「中性子源」の最大限の強度:Sを実現せしめたとすると、Sは次のようになる。

$$S = 1.3 \times 10^{10} \text{ n/s} \quad (5)$$

3.3 中性子増倍媒質系の提案

長岡・皆川の構想では臨界性を明言していない連鎖反応体系で中性子数の増倍を意図している事が次の文章から窺われる。“原子核分裂は……、その材料の多くはウラン系の元素に属し中にもウラン同位元素²³⁵Uが着眼されている。これは速い中性子でも遅い中性子(即ち熱中性子)でも分裂し得る……。而して²³⁸Uは極く速い中性子でなければ分裂しないから、双方を同時に分裂するには、可なり速い中性子を使はねばならない。然し行く行く研究が進めば終に(235)の分裂に伴って発する中性子が(238)に働いて、自ら分裂せしむることも可能ではないか【と樂觀する人もあるが、今は単に想像に過ぎない】。然るにUでは(238)が主体であって、U百分中(238)は99.28を占め(235)は僅かに0.71に過ぎない。……。又(238)をも連鎖的に分裂するに成功すれば、更に偉大なる成果を挙げる…

…”。“……ウランは同位元素の集合体である故、数個のウラン同位元素が連鎖的に分裂可能でなければ、実用にはならない”。“兎も角Uの全同位元素を連鎖的に分裂させる方法を講ぜねば分裂エネルギーの効用を非常に減殺し、能率は悪くなる。この要路にある阻塞を突破するが、研究題目である。【将来の発展はこの障礙が除かれるや否やで決すると思う】”。

長岡論文は、高速中性子利用の ^{235}U と ^{238}U の混合系での臨界性は全く明言しておらず、そして、前節に示したような「中性子源」からの高速中性子の直接照射によっても、それ単独では十分に核分裂反応量が得られそうもないとも考えている事が判る。しかし、この混合系で中性子数の増倍を考えているようなので、強力な「中性子源」による核分裂反応量で補完すれば、こうした混合系でも原爆が出来るのではないかと期待していたと思う。皆川・玉木の論文では、天然Uに対する高速中性子核分裂断面積を 0.1b と示している⁽⁸⁾。現在の核データを、核分裂反応で発生した中性子エネルギー・スペクトルを用いて平均した核分裂断面積を評価すると、付録Bに示したように、 ^{235}U については 1.233b 、 ^{238}U については 0.2996b になる（即ち、天然Uは 0.3033b ）。従って、長岡・皆川の構想で期待しているように、「中性子源」からの高速中性子による ^{235}U と ^{238}U の核分裂によって中性子増倍効果は可能である。

長岡論文が発表された同じ時期、昭和19年11月学術研究会議原子核分科会の席上、彦坂忠義によって「原子核エネルギー利用の一方法に就いて」という論文が発表された⁽¹⁸⁾。彼は「若し同位元素分離をせぬままでウラニウム分裂の連鎖を起させ得るならば、其利便は量り難い。幸い本論の結果では、高速中性子を使ひさへすればそれが出来さうだとの見込みに成った。……、基礎量の測定値が不十分である為に、上の結論も結論だけの価値は高いとは言へぬであらう。ただ著者は全然注目さへされたことの無かった高速中性子法がなかなか有望であること、……を、出来るだけ定量的に示したかったのである」と結んでいる。上の彦坂の結論の最後の記述から、長岡と彦坂との接点はなく、又、彼らの研究のグループ同士も全く交流がなかった事が読み取れる。前半は天然Uの体系でも連鎖反応が実現するという結論であるが、長岡論文の“……ウランを使用する場合には堆積する量を必要とする。これに昼夜間断なく入射して来る宇宙線を遮断するのは容易ではない。……。併し宇宙線がある物質に当たって中性子を誘発しないと云われぬ。然らば自発的爆破を招く虞れもなきにしもあらず、……。大量のウラン鉱を処理している所でこんな椿事が起ったとは、嘗って聞いたことがないからまず安全と看做してよかろう”という記述から、もし、長岡が彦坂の結論を聞いたならば、これは現実には正しくないと指摘したであろう。

彦坂論文は、天然Uの無限大体系で ^{238}U 核分裂を含めた体系全体の核分裂反応量を高速中性子利用では重要な研究項目である ^{238}U の非弾性散乱反応を考慮した計算である。系内の中性子エネルギー・スペクトルは ^{238}U の非弾性散乱反応によって核分裂スペクトルよりも低いエネルギーの中性子の部分が相対的に大きくなる。そして、 ^{238}U の核分裂反応のしきい値：約 1MeV の存在によって、上に示した 0.2996barn の平均核分裂断面積は更に低下する。こうした効果を十分に考慮した論旨の展開である。しかし、高速中性子利用の連鎖反応では体系からの高速中性子の漏れの効果が更に重大な検討項目である。昭和18年度の日本数学物理学学会年会では、彦坂は「U分裂エネルギー利用の問題」という題目で研究発表をしている⁽¹⁹⁾。発表の内容の詳細は伝わっていないが、抜粋として「U

分裂の際生まれる中性子が更に次の分裂をひき起こしてゆく反応の連鎖を考察し、鎖が切れずに続き得るための条件の内、特に容器の大きさの問題を吟味する」という文言が残されている。即ち、彦坂は昭和19年11月学術研究会議の発表の約1年前には、連鎖反応では体系からの中性子漏れの効果：容器の大きさの問題が重要な点である事を十分に理解していた筈である。しかし、1年後の「原子核エネルギー利用の一方法に就いて」の論文で中性子漏れの効果を見捨てる計算をして、「高速中性子を使ひさへすれば それ（注：連鎖反応）が出来さうだとの見込みに成った」という結論を発表するのは、連鎖反応研究についての彼の論理に飛躍があると考えられるであろう。

現在の知識では、無限大の寸法の ^{235}U と ^{238}U の混合系で高速中性子利用により連鎖反応を実現出来る ^{235}U 濃縮度の限界値は、 $5.56 \pm 0.02\%$ である⁽²⁰⁾。

3.4 長岡・皆川の構想での ^{235}U 濃縮度

長岡の論文の結論に、“○同位元素の分離を迅速にする方法を研究すること”と書かれているのは、前節に示したように、中性子増倍媒質系の ^{235}U と ^{238}U の混合系では天然Uの組成では役に立たず、「二号研究」の場合と同様に ^{235}U 濃縮技術の開発が必要と考えているからである。その目標の濃縮度は“若しUの原子量235なるもののみが役に立つという帰結になれば、238からこれを分離する操作は容易ではない。これに要する時間と努力とを考えれば、235のみを利用する計画は実行に移し難い”と述べているように、広島市投下の米国の原爆に使用された94% ^{235}U 濃縮度を考えているのではなく、“こんな信管で易しく(235)のウランが分裂するならば、連鎖的に(238)まで含めて分裂せしむることが可能ではないかと思われるけれども、いかにせん(235)は僅かに140分の1位の量だけ存在するから、その分裂に依って発生する中性子は寡くして(238)を分裂するには不十分であろう。従って、(235)を抽出して(238)と同量位にしたならば、ウランの全同位元素は分裂するのではあるまいか、【(235)の出す中性子のエネルギーが測定されてあれば問題は自ら解決するけれども生憎それが判明しない】”とある。即ち、長岡・皆川の構想での ^{235}U 濃縮度は50%を考えているのが判る。

昭和19年11月17日、東京第二陸軍造兵廠の信氏中將に対して理研の仁科芳雄は次のように答えている⁽⁶⁾。「U235含有率0.7%ト10%トノ間ニハコノ数量（注：臨界量の事）ニ余リ変リハナイガ含有率ガ50%以上トモナレバ大分変ッテ来ルカモ知レン。然シ50%ニスルコトハ相当困難デアルシ、100%ニスルコトハ不可能ダラウ」。即ち、当時関係研究者は ^{235}U 濃縮度50%位までは濃縮可能で限度であるが、米国のような濃縮度94%の ^{235}U は生成不可能と考えていた。長岡・皆川も仁科らの考え方に同調していたと思われる。

§4 長岡・皆川の前爆構想検討

前章に述べた長岡・皆川の前爆構想は、臨界性を問題にせずに ^{235}U と ^{238}U との混合体である核爆薬：中性子増倍媒質に強力なる「中性子源（5式のS）」を併設する方法で、高速中性子利用により短時間にTNT20ktonの爆発威力に相当する(4)式のN個の全中性子数を発生する体系を作るという概念である。「中性子源」は長岡論文によると“その装置をカドミウム（Cd）パラフィン若しくは硼素化合物の如きもので包めば、中性子の脱散

を防ぐことが可能であるから、爆発せしむるときその封包を破れば中性子は逸散する”作用を持っている。原爆で連鎖反応を急速に起こさせるためには効果があると思える瞬間に、核爆薬に中性子を注入して反応を開始させる事が必要であるので、これは十分に考えられた構想である。α粒子は紙一枚でも透過を阻止する事が出来るので、中性子発生の必要のない時はα-emitterとBeを別々に薄い隔壁で隔離させておき、連鎖反応を起こさせたい瞬間に薄い隔壁を破断すれば、原爆を効果的に作動させる事が出来る。

広島型原爆との相違は、強力「中性子源」の併設と中性子増倍媒質は50%²³⁵U濃縮度が限度と考えたという2点である。以下に、この2点の問題を検討する。まず、前者の問題について、長岡・皆川の構想では中性子増倍媒質の臨界性に言及していないので、この体系の臨界状態のK値は1を超える場合から1以下の状態までの広い範囲について検討する事にする。

4.1 K > 1 (超臨界状態) の場合

最初に、超臨界状態の場合を考察する。これは広島型原爆と同じであるから、その特性を特定して、それが強力「中性子源」の併設によって如何に変わるかを検討する。所が、検討に必要な広島型原爆の詳細な特性は現実には公表されていない。そこで、ここでの評価方法は付録Aに説明を与えたAdler-Halbanの連鎖反応の物理的解釈を基にする⁽²¹⁾。更に、臨界計算は中性子エネルギーを1組に縮約した1組近似の拡散方程式を用い、付録Bに説明したように、実測値に一致するように拡散方程式に用いられる核定数を決定する簡便な方法で広島型原爆の必要な特性を求める。不完全な情報源であるが、R. Serber⁽²²⁾、J. Rotblat⁽²³⁾、L. W. McNaught⁽²⁴⁾の著書に掲載されているU原爆の諸特性に関係する数値をまとめて、表2に示した。表中のnは連鎖反応におけるサイクル数である。

表2 U原爆の諸特性

発表者	Serber	Rotblat	McNaught	計算値
K	2	--	2	1.18
n	80	56	80	333
消費量：	1kg	1.25kg	1kg	1kg
原子核数	5×10^{25} 個	3.2×10^{24} 個	--	2.5×10^{24} 個
反応時間	0.8×10^{-6} 秒	0.56×10^{-6} 秒	10^{-6} 秒	2.7×10^{-6} 秒
臨界量：				
無反射体	60kg	49kg	--	48.8kg
U反射体	15kg	18kg	15kg	15kg
装填量	臨界量の2倍	--	25kg	25kg

この検討で最初に注目するのは、原爆の核爆発で連鎖反応が継続している反応時間である。表2の値は爆発後に推定した爆発エネルギー値から逆算した結果である。この方法以外に、発生核分裂エネルギーによって核爆薬体が膨張し低密度になり超臨界値から未臨界値に低下するまでの時間を動力学的に計算する方法も発表されている。Serberの著書にも紹介されているが、具体的に数値を発表しているのは、全米科学アカデミー第3報告の 0.3×10^{-6} 秒である⁽²⁵⁾。以上のように、表2の値を含めて一般に言われているように反

応時間は 10^{-6} 秒と考えるとよい。

更に、基本量としてサイクル時間 λ の値を検討する。ここでは、付録 B に計算値として (B-4) 式の $\lambda = 8 \times 10^{-9}$ 秒を与えた。上の表に引用した殆どの文献にも $\lambda = 10^{-8}$ 秒を示しているため、(B-4) 式の値は妥当である。この検討では臨界量と核爆薬装填量の情報が必要である。無反射体の ^{235}U 金属球 Godiva の実測値：93.9%濃縮度、密度 18.75g/cc、臨界質量 48.8kg の値が得られているが、反射体付きのデータは G. A. Graves, H. C. Paxton の Oralloy 測定値がある⁽²⁶⁾。実際の核爆薬は必ず鉄製容器に収められている筈である。従って、この場合は反射体は Fe になる。Fe 以外に ^{238}U と Be のデータに興味がある。そこで、Be、 ^{238}U 、Fe 反射体付きの値を Oralloy 測定値から次頁の表 3 に掲載した。

表 3 反射体付きの臨界質量値 (unit:kg)

反射体	厚さ:1 inch	2 inch	4 inch	20 cm	無限大
Be	29.2	20.8	14.1	--	--
^{238}U	30.8	23.5	18.4	16.28*	16.1
Fe	36.0	29.3	25.3	--	23.2

*の値は Topsy 体系の測定による。

広島型原爆の詳細構造は公表されていない。従って、ここでは発表されている資料から推測する事にする。Rotblat は表 3 のデータを検討したと思われ、「表でわかるように、ベリリウムの方がウランよりもすぐれた反射体であるが、……、両方の物質を組み合わせたものが使われているようである」と書いている。臨界質量について、McNaught は「……十分な厚さの効果的な中性子反射体におおわれていたとしても、大ざっぱに言って、約 15kg の ^{235}U が必要です」と述べている。この両者の意見と表 3 の値を参照にして、原爆の核爆薬は 4inch 厚の ^{238}U と Be の混合反射体に包まれた ^{235}U 金属球で、その臨界質量を 15kg とする。

反射体として Be と ^{238}U が優れているのは、Be の (n, 2n) 反応、 ^{238}U の高速核分裂反応による。即ち、Fe 反射体のように炉心（核爆薬）から逸出してくる高速中性子を散乱で単に反転させるという効果だけでなく、Be や ^{238}U では反射体内で中性子を増加させて炉心に戻すという付加的な効果がある。更に、続けて McNaught は「実際には、……この臨界値をかなり超えた質量を用意します。たぶん 25kg 位は必要でしょう」と説明している。即ち、この 25kg が原爆に必要な装填量と考えられる⁽²⁷⁾。一般的に装填量と無反射体の臨界質量との関係は、

$$\text{装填量} = \text{無反射体の臨界質量} \times \text{反射体による節約効果} \times \text{装填率} \quad (6)$$

と与えられる。この場合、反射体による節約効果は 0.31、装填率は 1.67 である。Serber は表 2 に示したように、装填率を 2 と考えている。

装填量については、約 60kg という情報もある⁽²⁸⁾。Serber の装填率 2 というのは最大限界値と考えねばならない。広島型原爆は砲弾方式で超臨界状態を作る。これは分離している 2 体の臨界体を通常の爆薬で急速に合体させるという方法である。この 1 体分の臨界体は僅かであっても未臨界状態でなければ味方にとっては危険である。今、装填量を 60kg

とすると、分離されている1個の臨界体質量は30kgになる。表3の実測値を参照にすると、核爆薬を納めた鉄製容器の厚さは1 inchを超える事が出来ないという事になる。これは現実的ではないと考えられよう。即ち、装填量 60kg は根拠が明確ではないと考えている。

ここでは、上に説明した McNaught モデルによる装填量と臨界量を用いて、長岡・皆川の構想を評価するのに必要な原爆特性を計算する。付録BのB. 4節に計算の詳細を説明した。計算結果は表2の「計算値」という欄に示した。即ち、広島型原爆は 2.7×10^{-6} 秒の反応時間で TNT20kton の爆発エネルギーをもって爆発したと考える。そして、長岡・皆川の構想の評価は、これと同じ反応時間と爆発エネルギーを持つ原爆が構想による信管：(5)式の強力「中性子源」の使用によって、どの程度装填量が節約出来るかという問題に帰着する。詳細な計算は付録BのB. 4節に述べたが、ここでは簡単に述べる。連鎖反応の任意の1サイクルで、「中性子源」から核爆薬に注入される中性子数：s は(B-4)式によって、

$$s = 1.04 \times 10^2 \text{ 個} \quad (7)$$

となる((B-13)式)ので、この分による中性子で²³⁵Uは核分裂してエネルギーを発生する。従って、核爆薬自体の連鎖反応による発生中性子量は N/s だけで十分である。これは核爆薬の持つK値を前より低下させる。低いK値は装填量の減少になる。計算の結果、前の必要装填量 25kg は 23.83kg になる。これは、

$$\text{僅か } 4.7\% \text{ の節約} \quad (8)$$

である。結論としては、長岡・皆川の構想の強力「中性子源」は殆ど使用する意義はなかったと考えてよい。

4.2 $K \leq 1$ (超臨界状態以下) の場合

核爆薬の装填量を更に減少させて、臨界質量になった場合：K = 1 の時には、付録Aの(A-3)式によって、²³⁵Uの核分裂量：N' は同じ反応時間内で、

$$N' = 3.5 \times 10^4 \text{ 個} \quad (9)$$

となる。ここで、表2から $n = 333$ を用いた。この値を(4)式と比較すると、全く広島型原爆の核分裂中性子量には及ばない事が分かる。

更に、装填量を減少させて、K < 1 の場合は付録Aの(A-6)式と現実の中性子増倍媒質系の製作の制限条件によって、 $\Delta k = 0.01$ が限度とすると、(A-4)式によって²³⁵Uの核分裂量：N^{*} は同じ反応時間内で、

$$N^* = 1.0 \times 10^4 \text{ 個} \quad (10)$$

となる。これも(9)式と同様に広島型原爆の核分裂中性子量に全く及ばない。

4.3 長岡・皆川の構想における²³⁵U濃縮度の問題

広島型原爆は²³⁵U濃縮度は94%という高濃縮の核爆薬であった。一方、長岡・皆川の構想では最高で50%濃縮度を考えていたようなので、濃縮度による原爆の特性への影響を考察する。考察すべきは次の2点である。

- 装填量の重量性
- ²³⁸Uからの自発核分裂中性子の問題

前者は Paxton-Pruvost の無反射体の球形臨界質量⁽²⁰⁾ から判断した。後者は付録Cの²³⁵Uと²³⁸Uの単位重量当たりの自発核分裂中性子値を各々の濃縮度に応じた各組成量に乗じた値である。濃縮度について各々の値を表4に掲載する。

表4 濃縮度について臨界質量と自発核分裂中性子数

濃縮度 (%)	臨界質量 (kg)	倍率	自発核分裂中性子数 (n/s)
10	3740	76.6	4.48×10^4
20	705	14.4	7.54×10^3
30	350	7.17	3.29×10^3
50	146	3.0	9.90×10^2
93.9	48.8	1.0	1.78×10^2

(6)式によると、装填量は無反射体の臨界質量の 0.52倍であるから、長岡・皆川の構想で最高 50%濃縮度では上の表から約 76kg になろう。しかし、広島型原爆の約 3倍である。

自発核分裂中性子の核爆薬に対する作用は「中性子源」とは本質的に異なる。原爆では超臨界状態になった時点で、中性子源からの中性子が照射され連鎖反応が開始されなければならない。一方、自発核分裂中性子は核爆薬自体から発生しているの、核爆薬を常時照射するという厄介な存在である。現実には連鎖反応系は必ず未臨界状態から超臨界状態に推移して行くようになっている（これは本来の状況で原爆も例外ではない）。もし、原爆で低いK値の状態の時に連鎖反応が起こってしまうと、発生した核分裂エネルギーによって核爆薬本体が膨張し崩れてK値が更に低下して爆発に必要な所定の核分裂エネルギーが原爆内に集積する事が出来なくなる。これが不発弾：fizzle の状態である。Pu 原爆の場合は特に ^{240}Pu からの自発核分裂中性子が深刻な問題である。J. C. Mark によると、核兵器に使用される Pu 核爆薬に含まれる ^{240}Pu の組成は 5.8%以下が必須の条件であるとしている⁽²⁹⁾。Pu 原爆の装填量を 10kg とすると、自発核分裂中性子数は 付録C の値から 5.75×10^5 n/s と計算される。U 原爆では2体のU爆薬臨界体を通常の爆薬で合体させる砲弾型で合体速度は 3×10^4 cm/s である。Pu 原爆で速度 3×10^5 cm/s の爆縮型を必要とするのは、自発核分裂中性子数の大きさによる⁽²⁹⁾。表4の ^{235}U と ^{238}U の混合体系の自発核分裂中性子数は無反射体の場合であるから、装填量への因子 0.52倍を考慮してPu 原爆の 5.75×10^5 n/s を比較すると、全ての場合で低い値になる。従って、低濃縮度のU原爆はPu 原爆のような爆縮型を必要とはしないであろう。1943年4月の Serber の原爆用の教科書には⁽²²⁾、 ^{240}Pu の問題は取り上げられていないが、自発核分裂中性子については ^{238}U 反射体の使用の場合にのみ問題にしている。米国の広島型原爆で濃縮度を94%とした理由は明確ではないが、多分、重量性からの決定であったのでであろう。これらの事実から、米国では低濃縮度の核爆薬は初めから多分考えられていなかったと推察される。

4.4 長岡・皆川の前爆構想の結論

長岡・皆川の前爆構想は広島市に投下された米国開発の前爆と同じ高速中性子利用であるが、核爆薬に信管：強力「中性子源」を併設して所定の核爆発エネルギーを得ようとする概念であった。しかし、この構想は広島型前爆の特性と比較すると、全くと言ってもよい程効果はなく、長岡の論文の最後に強調されている“信管を製作するが、先決問題であります。これが不可能ならば先の見透しはつきませぬ”の意見は前爆開発には全く無意味であったと思われる。

§ 5 長岡・皆川の原子動力源構想

5.1 加速器原子炉との相似性

長岡論文は原子力の動力源への利用について次のように述べている。“若し話を転じて動力の源として原子核のエネルギーを使用し得るやを論ずれば、その用途は多々あるべきを悟る。一例を申せば大なる蒸気汽罐内で分裂を行い、石炭を焚くことを全廃する可能性がある。この場合には蒸気汽罐と信管とは固定して据え付けねばならぬ故、数百噸の信管を備えても差支ない。従って信管にはサイクロトロンを改作簡単化し規定の速度を中性子に与え得る。若しウランを利用すれば(235)に限らず、多量にある(238)も用立つから便利で有効である”。そして、この場合の“信管”のサイクロトロンで用いられる核反応は“中性子を発散せしむるには、重水素原子を互に衝突せしめても可能である(D-D)。或はリチウムと重水素でも行はれる(Li-D)”と述べられている。従って、提案されている長岡・皆川の構想の動力への応用は、約60年後の現在、日本を含む各国で研究されている加速器原子炉(加速器駆動炉)の概念と全く同じである。

ここで、指摘したい点は、長岡論文の最後に強調されている“信管を製作するが、先決問題であります。これが不可能ならば先の見透しはつきませぬ”の意見が加速器原子炉の現在の研究・開発には生きているという事実である。長岡はサイクロトロン加速器を“信管”としたが、戦後は加速器も発達し強力「中性子源」としては「陽子線形加速器」からの1GeVに加速された300 mAの陽子ビームを標的である重い原子核に当てて、標的原子核を核破砕して多くの中性子を発生させるという方法が開発された。発生した中性子は ^{235}U と ^{238}U の混合体系に入射して、ここで倍増されて核分裂反応により混合体系が熱源となる。この点から正に長岡・皆川の構想を源流にしていると言える。そして、中性子倍増混合体系は未臨界状態であり、それは熱中性子利用でも高速中性子利用でもよい。この加速器原子炉の最大の特徴は、通常の原子力発電所に想定されている方が一の反応度事故が絶対に起こらないという点にある。それは倍増体系が常に未臨界状態である点から来ている。現在、加速器原子炉は開発・研究中であり、将来の実用発電源としては未だ多くの課題を背負っている。付録Dに参考用に問題点を説明した。

5.2 その他の動力源への応用

彼らは構想の適用例として原子力潜水艦に言及し、現在も利点として考えられている種々の理由をも推定している。“例えば潜水艦の潜行に電池を用いず、原子核のエネルギーを利用する計画をなされぬでもない。蒸気タービンを原子核のエネルギーによって回転させる方針も考えられる。……、汽罐には分裂した原子の破片が残滓として堆積するから、その除去方法も講じなければならぬが、ジーゼルエンジンと電池とは取外される美点がある。……。たゞこの方法によれば速度が従来より頗る増加し、敵艦を追跡するに有利になるかも判らない。又水上航走と水中航走とに別々の機械を使用し二重な推進を行ふことは止めらるるから、艦内には余裕を生じ、魚雷その他も沢山積載する利便がある”。現在、原子力潜水艦は多くの国で実現したが、それは長岡・皆川の原子動力源構想とは異なり、熱中性子利用の自立した連鎖反応(強力「中性子源」を必要としない)を基にした高濃縮度核燃料の軽水減速炉を動力源としている。

更に、原子力航空機への応用も述べている。“飛行家は核分裂によるエンジンを期待さ

れている。成程数字から見ると、ガソリンを使用せず遠方まで少量の原子を消費して飛行し得るようであるが、……。又長時間の飛行には、絶えず分裂を起さなければならぬ故、適応する中性子を送る装置を設けねばならぬ。これは信管と同種類のものでまだ解決していない”。長岡も開発には消極的であったが、戦後は自立した連鎖反応を基にした原子力航空機への開発・研究は米国で進められた。しかし、乗員や地上の人や物への放射線遮蔽の重い重量の点が解決出来ずに中止された。そこで得られた技術や知識は放射線遮蔽が重要でない宇宙ロケットの開発に向けられた。しかし、これも開発半ばにして計画は放棄された。

§ 6 長岡論文にある通常火薬との混合問題

戦時中、原子力の問題を研究し軍部との関わりのあった研究者は、彼らの関わり方が僅かであっても核爆薬と通常火薬との関連について言及している。むしろ、軍へのPRとして核爆薬と通常火薬との混合問題を取り上げたのではないと思われる。長岡論文も軍関係者が読むと考えられる雑誌への投稿であるから通常火薬との混合を問題にしたのは当然の考えであろう。それは“軍事専門家は一笑に付せらるるかも知れないが、原子分裂を利用するに、従来火薬を無視するは不得策であることを指摘したに過ぎない”と書いて、彼の構想を展開している。

核分裂が発見された直後に、この問題に関連した論文が米国の E. Feenberg と仏国の P. Fafre, C. Magnan, H. Muraour によって発表されている⁽⁹⁰⁾。これは酸化Uと沃化窒素の混合物に熱中性子を照射した結果、核分裂生成物の沃化窒素による減速で発生したエネルギーが部分的な加熱を引き起こし爆発が起こったという報告である。この論文に対して、皆川・玉木は「然し乍ら之は α -粒子等に依っても同様な事が行われるので、local heating と考えれば別に驚くべき事ではない」と述べている⁽⁹⁾。この皆川の知識は長岡論文の内容に反映されている。これは“敢て愚見として一案を披露すれば、従来使用せる火薬と分裂せる原子群とを併用する方法である。假に前に説いた信管が簡単な形で成功したとして、これを装備した分裂すべき原子群を、火薬で充たせる爆弾の中心部に納め、火薬には信管（注：これは通常の爆弾着火用の普通の信管である）を付せず、大砲若くは或る他の機械により打出し、目的物に衝突し、原子分裂が行はれたとすれば分裂によつて生ずる高熱は、火薬をも爆発し、火薬の生ずるガスを激しく熱して著き高圧を与へるにより普通の爆撃に於けるより、幾倍かの破壊区域に拡大して、弾の周辺を破碎するであろうから、その威力の顕著なるを云ふを俟たず、かくして先に論ずる過不及の調節も、単に原子群のみを打込む場合に比し、一段の好成績を挙げると考へる”と云う長岡の文章に表れている。更に、彼は“論者は或は曰はん；分裂すべき原子を一塊となさず、火薬中に平等に混和すれば更に効果を著くするであらうと、これ一理あるやうであるが、原子エネルギーは火薬に比し甚大であるけれども、かくすれば原子の分布は疎散する。信管の発する中性子は、ウラン原子の各々に当たる能はず、原子を悉皆分裂するに至らない。従つて折角の原料を可なり棄てることになるから、不成績に終るだらう”と述べているので、この混合問題は必ずしも得策であるか否かと疑いを持っていたようである。

このような混合問題を軍部に対して当時の核物理研究者が説明した例として、昭和16年

5月23日に平塚にあった第二海軍火薬廠で、京都帝国大学の萩原篤太郎が「超爆裂性原子U235ニ就テ」という講演を行った記録がある。この際、萩原は「又此ノ核分裂現象ヲ利用シテ、《ウラン》ヲ沃度等ノ窒化物ニ混合シテ、之ヲ中性子照射ニヨツテ爆裂サセル研究モ一昨年米国ヤ佛国ニアツタノデアリマスガ、ソノ後ノ経過ハ不明デアリマス」と述べている⁽⁹¹⁾。これは Feenberg と Fafre 等の研究を指している。もう一つの例は、昭和19年11月17日に東京第二陸軍造兵廠の信氏中将が理研の仁科芳雄を訪問して原子力開発の現状を質問した際の間答の中にある⁽⁹⁾。原爆の動作原理についての仁科の説明で臨界量（この場合、10kg：《一〇K》）を基として、この臨界状態になった基本臨界量から発生した中性子によって、基本臨界量に付加する10kg：《一〇K》が核分裂して爆発エネルギーになると述べた。これについて、「問：Uハ基ニナルモノニシテ一〇Kヲ必要トスルモ爆薬トスル場合ハ コノ一〇K（注；付加量）ニ代ッテ一般ノ爆薬ヲ用ヒテハ駄目カ。 答：夫ハ駄目ダ小量ノUデハ連鎖反応ガ止ンデ了フ即チ中性子ハ235Uニ当ラナケレバ他へ逃ゲテシマウノデアル」とある。東京第二陸軍造兵廠の職員は第二海軍火薬廠の萩原講演を聴講しているので、この問題に関して信氏中将は職員からの報告を聞いて知識は持っていた⁽⁹²⁾。そこで、上のような質問になったと思われる。仁科は長岡と異なり、核爆薬と通常火薬との混合体の利点を明確に否定していると理解してよいと思う。

§ 7 おわりに

『軍事と技術』掲載の長岡論文は、当時、日本の巷に広がっていた安易な原爆開発待望論を戒めるといふ動機で発表された。自己の構想を公表する理由として種々の事実を挙げているが、特に“……又議院に於てまで宣伝せられ、……”と述べている部分に注目したい。昭和19年2月7日の貴族院議会で長岡議員は田中館議員の原爆開発推進論の発言を聞いた。その事実が彼の論文中の上の“……又議院に於てまで宣伝せられ、……”であろう。§ 1章に述べたように、長岡と田中館とは研究者として同じ道を歩んで来た。長岡は自分に深く関係している原子力研究分野での、自分より研究能力が劣っていると考えていた田中館の公式の場面での開発推進論の発言に不快感を抱いた。それが一つの動機になって原爆開発不可能論の論文を執筆する事になった事は長岡の当時の日記より明らかである。しかしながら、世間は田中館の原爆開発推進論の方に好意的であった。一例として、1990年10月18日発行の木村一治の著作には「田中館愛橘先生は帝国議会で〈マッチ箱ぐらゐの原子爆弾は東京全体を焼き払うことができる〉と証言した」と書いている⁽⁹³⁾。これと同様の事は20世紀終わり時点でも数多くの出版物にも見受けられる。しかも、木村の本は1993年に英訳出版され、この部分は「Dr. Aikitu Tanakadate, the oldest physicist and the top elder in the Japanesescientific community, testified (it was in 1944, I remember) at the Imperial Congress that an atomic bomb the size of a matchbox could ignite all of Tokyo city.」と翻訳されている⁽⁹³⁾。日本では原爆は実際には開発される事はなかったが、田中館の原爆開発推進論は歴史的には長く日本の人々の記憶には残り、且つ、もしかすると欧米の諸国にも広まる可能性が生まれると考えられるが、これに反して、長岡の原爆開発不可能論は歴史の流れの底に沈んで、人々から振り返られていない。この面での勝負は田中館に軍配が挙がった。

付録 A 連鎖反応の物理

A.1 基本問題

中性子連鎖反応の現象を分かりやすく説明するには、1939年 Adler-Halban が Nature 誌に発表した方法が最適であろう⁽²¹⁾。皆川・玉木の日本数学物理学会誌の解説論文にも Adler-Halban の論文が引用されているし⁽⁸⁾、又、通常の解説書にも Adler-Halban の方法が広く採用されている。そこで、ここで Adler-Halban の方法を基に長岡・皆川の構想を検討するための連鎖反応の物理を説明する。

連鎖反応という言い方は、中性子が²³⁵Uに吸収されて核分裂して、中性子を放出し、その中性子が他の²³⁵Uに吸収され核分裂して再び中性子を放出し、その中性子が又、他の²³⁵Uに吸収され核分裂して再び中性子を放出し、……という具合に、中性子→²³⁵U核分裂→中性子→²³⁵U核分裂→……と鎖のように中性子を媒介にして核分裂反応が連続して繰り返して進行するという現象から来ている。以上は、核分裂反応をする物質として²³⁵Uを例にして説明したが、²³⁹Pu等の核分裂性原子核の場合でも同様である。かように、連鎖反応では一定の間隔をおいて同じ現象が繰り返して起こるので、その間隔をサイクルと呼ぶ事にする。

ここで、連鎖反応の物理を具体的に説明する前に、次の2点の前提条件がある事を注意しておきたい。

[第1条件] 連鎖反応が続いている間は、その物理状態は不変である。実際は、連鎖反応を続けている体系内では核分裂性原子核が消費している筈であるが、その消費量は無視される。

[第2条件] 連鎖反応の開始は、必ず反応系の外からの中性子の注入による。但し、注入された中性子は核分裂性原子核に確実に吸収されて核分裂反応を起こさねばならない。

初めに、²³⁵Uを例にして話を進める。²³⁵Uを含む体系に[第2条件]に従う、外からの確実に核分裂をする1個の中性子が入射して、1個の²³⁵Uが核分裂し幾つかの中性子が発生する。そして、次の²³⁵Uに吸収される中性子の数は2個であると仮定する。これで第1番目のサイクルが終了する。従って、ここまでで、 $1 + 2 = 3$ 個の²³⁵U原子核が消耗する。第1サイクルで発生した2個の中性子の内、1個の中性子によって別の²³⁵Uが核分裂して、次の別の²³⁵Uに吸収される中性子の数は[第1条件]によって同様に2個であるから、第2サイクルが終了した時点では、 $1 + 2 + 4 = 7$ 個の²³⁵U原子核が消耗する。以下同様にして、第3サイクルの終了時には、 $1 + 2 + 4 + 8 = 15$ 個の²³⁵U原子核が消費される。ここで、話を一般化する。核分裂後に次の²³⁵Uに吸収される中性子の数をK個とする。そして、同時に長岡・皆川の構想に従って、各サイクル期間中に常にs個の中性子が連鎖反応系外から供給されて確実に²³⁵Uを核分裂させるとすると、この連鎖反応体系内で消費される²³⁵U原子核、即ち、²³⁵Uを核分裂させる中性子の全数：Nは次式のように表される。

$$N = s + sK + sK^2 + sK^3 + sK^4 + \dots + sK^n \dots \quad (\text{A-1})$$

ここで、nは任意のサイクル数、このKは²³⁵Uが核分裂して発生する平均の中性子の数： ν とは異なり、常に $K < \nu$ である。K値の物理的定義と評価については次節に詳細に述べる事にする。更に、注意すべきは反応中はK値が常に一定に保たれねばならないとい

う点で、これが上の [第1条件] に示された問題である。

実際の実験で、上の2点の前提条件が持つ意味を述べる。まず、[第1条件] が満たされるためには、原爆に装填されるべき核爆薬量は原爆での連鎖反応体系内で消費され核爆発として発生するエネルギーの元になる核分裂性原子核数が無視出来る程の多量でなければならない。これは必然的に原爆の爆発効率が10%以下になり非効率的な爆弾になるという理由に導かれる。次に、[第2条件] について考える。一般に、連鎖反応を起こさせるために、中性子増倍体系を臨界又は超臨界状態にするという事は必要条件であるが十分条件ではない。この状態になった中性子増倍体系でも外部から中性子を注入しない限り連鎖反応は起こらない。原爆でも、連鎖反応の開始前は未臨界状態： $K < 1$ である。そして、その体系のK値を急速に、 $K > 1$ に持っていった瞬間で、確実に核分裂反応を起こさせるように多量の中性子を注入し、極短時間内で多量の核分裂反応を起こさせるという方法が原爆での爆発を成功させる方法である。そして、 ^{235}U 原爆では2体の未臨界状態の中性子増倍体系を通常の爆薬を用いて合体させるという砲弾型、 ^{239}Pu 原爆では密度の低い大きめの未臨界中性子増倍体系を爆薬を用いて爆縮して高密度状態を作るという爆縮型方式を採用して、急速に $K > 1$ の状態にする。

A.2 臨界性の問題

中性子増倍体系での連鎖反応の状況はK値に強く依存する。(A-1)式について、 $K > 1$ (超臨界状態) の場合：これは等比級数であるから次式に変換される。

$$N = s \cdot \frac{K^{n+1} - 1}{K - 1} \quad (\text{A-2})$$

ここで、nは最終のサイクル数で、このサイクルで連鎖反応は終息する。

$K = 1$ (臨界状態) の場合：(A-1)式は次のようになる。

$$N = s \cdot (n + 1) \quad (\text{A-3})$$

$K < 1$ (未臨界状態) の場合：サイクルが無限に続くとすれば(A-1)式は収束し、

$$N = \frac{s}{1 - K} = \frac{s}{\Delta k} \quad (\text{A-4})$$

となる。ここで、 Δk は一般には余剰反応度と言われて、 $\Delta k = K - 1$ で定義されるが、この場合は負の余剰反応度で、

$$\Delta k = 1 - K \quad (\text{A-5})$$

である。又、(A-4)式はK値が1に近づくと無限大になって、(A-3)式との整合性が無くなる。そこで、K値には次式で示される制限条件がある。

$$1 > K \geq n / (n + 1) \quad (\text{A-6})$$

A.3 中性子反応率の平衡関係とK値

任意のサイクル内では、サイクルが始まった段階で1個の中性子による核分裂反応で発生したv個の中性子が、サイクル終了時に次の核分裂反応のためにK個に減少して、その ^{235}U 原子核を核分裂させる。即ち、サイクル内では核分裂反応で(発生)した中性子は連鎖反応体系から系外へ(漏れ)たり、 ^{235}U を含む体系内全ての構成材物質に(吸収)されたりして、その数を減らしてK個になって、次のサイクルで ^{235}U 原子核を核分裂させるという、中性子反応率の平衡関係が成立している。これは次のようなKの定義式で表される。

$$K = \frac{\text{(発生)}}{\text{(吸収)} + \text{(漏れ)}} \quad (\text{A-7})$$

ここで、 Φ を中性子束、 Σ_f を核分裂断面積、 Σ_a を吸収断面積とすると、(発生) は $\nu \Sigma_f \Phi$ 、(吸収) は $\Sigma_a \Phi$ と書ける。一方、(漏れ) は原爆のような高速中性子利用の連鎖反応体系では厳密には中性子輸送理論という厄介な計算法を用いねばならないが、ここでは、その代わりに実測値のデータを基にして、中性子エネルギーを1組にまとめた1組近似の拡散理論を用いるという簡便で実際的な方法を用いる。そこで、(漏れ) は D を拡散係数とすると $-D \nabla^2 \Phi$ と表され、更に、次の式で表される方程式から B が求められる。

$$\nabla^2 \Phi + B^2 \Phi = 0 \quad (\text{A-8})$$

そこで、(A-7)式は $\Phi \neq 0$ によって、 K の定義は次の式に変換される。

$$K = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a + D B^2} \quad (\text{A-9})$$

又は、

$$B^2 = \frac{\nu \Sigma_f / K - \Sigma_a}{D} \quad (\text{A-10})$$

付録 B 原爆連鎖反応体系の物理量

B.1 基礎反応断面積

長岡・皆川の構想を検討するために、1組近似の拡散方程式を使用するが、この際には平均化した基礎反応断面積として $\langle \nu \sigma_f \rangle$ 、 $\langle \sigma_f \rangle$ 、 $\langle \sigma_a \rangle$ 、 $\langle \sigma_{\bullet} \rangle$ の値が必要である。この核データの内、 $\langle \sigma_{\bullet} \rangle$ を除いて他の値は、入射中性子エネルギーについて測定された核データ値を⁽³⁴⁾、次式で示される核分裂スペクトル： $F(E)$

$$F(E) = 0.28 \exp(-E) \sinh(\sqrt{2E}) \quad (E; \text{MeV}) \quad (\text{B-1})$$

を用いて平均化する。 $\langle \sigma_{\bullet} \rangle$ は(A-10)式で $K=1$ とした臨界の場合の計算式により求める。臨界実測値は反射体のない球形²³⁵U金属体系 Godiva のデータ：93.9%濃縮度、密度 18.75 g/cc、臨界質量 49.1 kg(臨界半径： $R_c = 8.54$ cm)、を濃縮度は100%と近似して計算する。Uでは高質量数のため非等方散乱は無視出来るので、

$$D = 1 / 3 \Sigma_s \quad (\text{B-2})$$

と置ける。そして、体系が球形であるから(A-8)式を解いて、

$$B = \pi / (R_c + 0.71 / \Sigma_s) \quad (\text{B-3})$$

を得るので、(A-10)式の臨界方程式は Σ_s のみを未知数とした等式になる。これを数値計算すれば、 $\langle \sigma_{\bullet} \rangle$ の値を得る事が出来る。全ての計算結果を表B 1に示した。

表B 1 ²³⁵Uと²³⁸Uの基礎平均反応断面積

核種	$\langle \nu \sigma_f \rangle$ (barn)	$\langle \sigma_f \rangle$ (barn)	$\langle \sigma_a \rangle$ (barn)	$\langle \sigma_{\bullet} \rangle$ (barn)
²³⁵ U	3.217(3.38)	1.233(1.3)	1.323(1.4)	6.387(6.1)
²³⁸ U	0.820	0.2996	0.3749	---

上の表で括弧内の数値は山室・高橋の著書に掲載されている数値である⁽³⁵⁾。

B.2 サイクル時間の計算

連鎖反応体系内で、あるサイクルが開始されて終了し、次のサイクルが開始されるまでの時間： λ を求める。これは、核分裂で発生した中性子が体系内を構成物質の原子核と衝突しながら飛び回り、最終的には核分裂性原子核：ここでは ^{235}U に吸収されて消滅するまでの時間である。勿論、 ^{235}U に吸収されると直ちに核分裂を起こして次のサイクルのための中性子が発生すると考える。即ち、体系内での中性子の平均自由行程を中性子の運動エネルギーに見合う速度で走る時間がサイクル時間： λ と定義される。ここで考えている連鎖反応体系は ^{235}U 金属であるから、表B1の $\langle\sigma_a\rangle$ 値から平均自由行程は、 $1/\Sigma_a = 15.73\text{ cm}$ と求められる。一方、中性子エネルギーを核分裂スペクトルの平均値：2 MeVとすると、この場合の中性子の運動速度は $1.97 \times 10^9\text{ cm/s}$ になるから、 λ は次のようになる。

$$\lambda = 8 \times 10^{-9}\text{ 秒} \quad (\text{B-4})$$

B.3 反射体付きの場合の計算法

現実の原爆の核爆薬は Godiva の実験のように反射体無しという状態で連鎖反応に入るとは考えられない。即ち、何等かの反射体なり、反射体の機能を兼ねる鉄製の容器に包まれている筈である。そこで、半径R cmの球形の核爆薬体：炉心を完全に包み込むように、厚さT₀ cmの球殻状の反射体が設置されている構造の体系を考える。この構造の連鎖反応の臨界方程式は通常の中等原子炉理論の教科書に与えられている。ここでは、Los Alamos Primer に述べられているように⁽²²⁾、反射体の吸収断面積が無視出来るので、臨界方程式は次式で与えられる。

$$D(1 - BR \cot BR) = D_r(1 + R/T) \quad (\text{B-5})$$

ここで、 $T = T_0 + 0.71/\Sigma_{tr}$ (B-6)

又、Bは(A-10)式、Dは(B-2)式である。反射体の構成物質は炉心と異なり軽い原子核の場合もあるので、中性子との非等方散乱効果を考慮して、拡散係数は

$$D_r = 1/3\Sigma_{tr} \quad (\text{B-7})$$

とする。ここで、 Σ_{tr} は輸送断面積である。

本文の表3には、反射体を ^{238}U 、Be、Feとした場合の球形 ^{235}U 金属炉心の臨界質量（即ち、 $K=1$ ）の実測値を示した⁽²⁶⁾。表3のT₀と臨界半径Rの値を用いる事で(B-5)式から Σ_{tr} が計算出来る。表B2に計算結果を示した。

表B2 各種反射体の Σ_{tr} の計算値

反射体	厚さ(cm)	2.54	5.08	10.16	20	G. & P.
^{238}U		0.349	0.342	0.333	0.313	(0.25)
Be		0.371	0.382	0.412		(~0.25)
Fe		0.285	0.274	0.251		(0.19)

表の最後の欄の括弧内の数字は Graves-Paxton が算定した値⁽²⁶⁾で具体的な算定法は不明であるが、この値は(B-5)式の計算方法の妥当性を示したと考えられる。

B.4 長岡・皆川の構想を評価した計算スキーム

この付録に示した計算式を用いて、本文の長岡・皆川の構想を評価出来る。ここでは、

その計算スキームを説明する。先ず、評価の基準となる広島型原爆の特性を(A-2)と(B-5)式によって導出する。

○ McNaught モデルの広島型原爆の特性の計算

本文で検討したように、核爆薬の臨界質量と装填量を各々 McNaught が提案した値：15 kg(5.75 cm), 25 kg(6.82 cm)とする。ここで括弧内の数字は半径である。更に、反射体の厚さは 4 inch = 10.16 cm とする。表 B 1 に示した ^{235}U の平均反応断面積と臨界性のデータ値を(B-5)式に用いる事によって、先ず、この場合は

$$\Sigma_{lr} = 0.392 \quad (\text{B-8})$$

という値を得る。これと表 B 2 の掲載値と比較すると、反射体に ^{238}U と Be とした場合の中間の値になっているので、予想していたように McNaught が提案した反射体の構成材料は ^{238}U と Be の混合体が最良であるという Rotblat の考えに沿っている事が分かる。以降の計算には(B-8)式の値を用いる。

次に、McNaught が提案した核爆薬の装填量の反応度 K の値を求める。この場合も前と同様に(B-5)式に用いて B を求め、(A-10)式から K 値を計算する。結果は、

$$K = 1.18 \quad (\text{B-9})$$

となる。広島型原爆は長岡・皆川の構想のような「中性子源」は無いので、

$$s = 1 \quad (\text{B-10})$$

である。そこで、本文の(4)式の $N = 2.5 \times 10^{24}$ 個の ^{235}U の全数を消滅させるサイクル数 n は(A-2)式によって求める事が出来る。結果は次のようになる。

$$n = 333 \quad (\text{B-11})$$

1 サイクル時間は(B-4)式で与えられているので、この原爆の全反応時間は、

$$\text{反応時間} = \lambda \cdot n = 2.7 \times 10^{-6} \text{ 秒} \quad (\text{B-12})$$

となる。即ち、核爆薬装填量は 25 kg で ^{238}U と Be から構成された厚さ 4 inch の反射体を持つという McNaught モデルの広島型原爆は 2.7×10^{-6} 秒の反応時間で TNT20kton の爆発威力を示して核爆発する。

○ 長岡・皆川の構想による“強力信管”の効果

本文(5)式の「中性子源」の最大限の強度：S を McNaught モデルの広島型原爆に設置したと仮定すると、核爆薬の装填量がどの程度節約が図れるかを検討する。ここで、 2.7×10^{-6} 秒の反応時間で TNT20kton の爆発威力：(4)式の N 値は上の計算と同じとする。1 サイクル時間は(B-4)式で各サイクル期間中に核爆薬は s 個の中性子照射を常に受けて ^{235}U が核分裂して爆発威力に寄与している。即ち、 s は

$$s = S \cdot \lambda = 1.04 \times 10^2 \text{ 個} \quad (\text{B-13})$$

であるから、前と同様に(A-2)式の左辺は本文の(4)式の N に相当し、(B-11)式の n と(B-13)式を用いて(A-2)式の K 値を計算する。結果は次のようになる。

$$K = 1.16 \quad (\text{B-14})$$

K の値が得られれば(A-10)式から B が解る。こうして(B-5)式の R 以外の数値が与えられる事になるので、この場合の核爆薬の半径 R と装填量が計算出来る。

$$\text{“信管” 効果を考慮した装填量：23.83 kg \quad 半径：6.71 cm} \quad (\text{B-15})$$

これを McNaught の値：25 kg と比較すると、僅か 4.7%の節約にしかない。

付録 C 各原子核の自発核分裂中性子値

核爆薬原子核の自発核分裂で発生する中性子数の基礎データを表Cに掲載する。

表C 各原子核の自発核分裂中性子値

項目	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu
発生核分裂中性子数	1.695	1.960	2.069	2.160
半減期 年	3.5×10^{17}	8.2×10^{15}	5.5×10^{15}	1.2×10^{11}
発生中性子数 n/s.g	2.73×10^{-4}	1.33×10^{-2}	2.08×10^{-2}	9.92×10^{-2}

付録 D 加速器原子炉の特性と問題点

加速器原子炉は長岡・皆川の構想が現代に生きている唯一の開発計画であると考えられる。開発に伴う問題の解説は筆者の専門外の知識を必要としているので、正確で詳細な説明は難しい。そこで、かなり大雑把で正確さを欠くが、以下に説明を加える。正確で詳細さを必要とする向きは、この分野の専門家に聞くこと。

大電流で高エネルギーの荷電粒子：この場合は陽子ビームを得るためには、線形加速器が有用である。特に、標的が小さい場合にはビームを絞る事が重要である。荷電粒子の加速は多数の段で高周波電子管にてエネルギーを与え、高電流のため相互の電気斥力(space charge)によって広がろうとするビームを電磁力によって絞る(bunching)多数のコイルを必要とする。本文に示した 1GeV 陽子 300mA のビームが得られる線形加速器は開発中である。標的となる原子核は核内に多量の中性子を含む重い核がよい。1個の 1GeV 陽子による核破砕反応で発生する中性子数は、Pb:17, W:22, Am:24, U:32, Np:34 であるが、Am, U, Np は発生した中性子によって核分裂反応が生じ、小さな標的が過度に加熱して冷却が困難となり熔融する恐れがあるので、Wが最良と言われている。核分裂、DT核融合反応は発熱反応であるが、核破砕反応は吸熱反応である。ここで必要とする 1GeV 陽子 300mA のビームのエネルギーは 300Mw(=10⁹ V × 0.3A)の入力であるが、この内 200Mw程が標的から発生した中性子に与えられ、残りは標的核から同時に発生する核内からの陽子等に与えられて標的を加熱する事になる。

ビームの陽子数は 300mA の電流値から、 1.88×10^{18} p/s(=300 × 10⁻³ A / 1.6 × 10⁻¹⁹ coulomb)と計算される。この陽子ビームが全てW標的に入射して核破砕によって何程の中性子が発生するのかが専門外の筆者には分からないが、仮に、標的の効率を 10%とすると、発生中性子は $0.1 \times 22 \times 1.88 \times 10^{18} = 4.14 \times 10^{18}$ n/s となり、本文の(5)式の長岡・皆川の構想の「R a 中性子源」より遥かに多量である。この 4.14×10^{18} n/s の中性子が、中性子源を取りまく K=0.98の未臨界²³⁵U-²³⁸Uの混合系に入射したとすれば、混合系内の全中性子数は付録Aの(A-6)式によって、 $4.14 \times 10^{18} / 0.02 = 2.07 \times 10^{20}$ n/s になる。未臨界混合系で1個の中性子によって核分裂反応が1回起こるとすれば(200MeV= 3.2×10^{-11} w·s/fission)、系内で発生する熱出力は約 6600MW(= 3.2×10^{-11} w·s × 2.07×10^{20} n/s)に

なる。1個の中性子によって核分裂反応が1回起こるのは高速中性子の場合の近似であり、熱中性子の場合は $\sigma_f/\sigma_a=0.84$ の因子を考えるべきではあるが、標的核から発生した中性子は高速中性子で未臨界混合系で減速して熱中中子になったとすれば、減速した際のエネルギーは混合系内に蓄積されて熱となるので、概略、熱出力は約 6600MW と考えてもよいと思う。ここで、混合系外への中性子の漏れと核燃料以外の構成材に吸収された中子の割合は $K=0.98$ の未臨界度に含まれていると考えた。更に、この熱で蒸気を作りタービンを回して電力に変換する。この際の効率を 30%とすれば、発電機端電力は 2000Mwe となる。

ここで、一つの問題がある事を示す。核分裂やD T核融合反応は発熱反応であるが、核破砕反応は吸熱反応であるという事実から発電所内の電力消費量が大きくなるのである。核分裂原子力発電所の軽水炉の場合の所内電力消費率は約 4%で、開発中であるが将来開発される可能性のあるD T核融合発電所の予想される所内電力消費率は約 10%である。線形加速器の荷電粒子の加速に使用される高周波電子管への入力電力から荷電粒子の加速エネルギーへの変換効率を考えると、所内電力消費率は約 30%以下は望めそうもない。そこで、少し厳しすぎるが、ここで消費率を 40%とすると、送電端電力は 1200Mwe となる。この値は一般の軽水型原子力発電所と同程度の規模である。即ち、電力を売らなければならない発電所での所内電力消費率が他と比較して大き過ぎるという経済性の問題がある。

更に、付け加えると、本文では反応度事故が絶対に起こらない安全性のあるシステムと述べた。この事は真実であるが、なお、加速器原子炉の発電所には安全系が必要な事を注意しておきたい。それは、未臨界混合系でも核分裂反応が起こるので長期の運転で核分裂生成物:FP や transuranium が蓄積される。本来、核分裂原子力発電所の安全対策とは FP を環境に対して閉じ込めるという事である。そこで、想定している重大事故とは炉心の冷却が失われて、炉心中の FP の崩壊熱によって炉心が破損して放射能を持った FP が環境に放出される事を防ぐのに主眼が置かれている。この事故は当然未臨界混合系を持った加速器原子炉の発電所にも考えられる事故である。そこで、非常用炉心冷却装置 (Emergency Core Cooling System: ECCS) と未臨界混合系を収納する格納容器の設置は当然必要である。

かようにして、現在では経済性の問題を含めて加速器原子炉発電所が一般の軽水型原子力発電所のように商業化される道は遠いと思われる。

参 考 文 献 と 注 釈

- (1) H. D. Smyth "Atomic Energy for Military Purposes", *Rev. Mod. Phys.*, 2-1節, **17**, 351 (1945).
- (2) 長岡半太郎 「原子核分裂を兵器に利用する批判」, 『軍事と技術』, p. 1, 昭和19年12月12日, 軍事工業新聞社発行.
- (3) 板倉聖宣, 木村東作, 八木江里『長岡半太郎伝』, 昭和48年10月30日, 朝日新聞社発行、板倉聖宣 「長岡半太郎」『朝日評伝選10』, 昭和51年4月15日, 朝日新聞社発行.
- (4) 中村清二『田中館愛橘先生』昭和18年4月10日, 中央公論社発行.
- (5) 研究内容の詳細は次の文献を参照のこと、山崎正勝, 深井佑造, 里見志朗「資料解説 東京第二陸軍造兵廠に対する仁科芳雄の報告」『技術文化論叢』, no. 3, p. 53, 2000年5月1日, 東京工業大学技術構造分析講座発行.
- (6) 関連する物理研究の解説は次の文献を参照のこと、深井佑造「旧海軍委託『F研究』における臨界計算法の開発」, 『技術文化論叢』, no. 2, p. 27, 1999年2月20日, 東京工業大学技術構造分析講座発行.
- (7) 発表された皆川理の研究論文は次の通りである。"Neutron-Induced Radioactivity of Tungsten", *Phys. Rev.*, **57**, 1189 (1940). "Long-Lived Radioactivity of Rhodium", *Phys. Rev.*, **60**, 687 (1941). "Long Lived Radioactivity of Rhodium and Tungsten by Neutrons", *Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research*, no. 1168, **42**, 109 (1944). 又、『日本数学物理学会誌』, **17**, no. 5, 昭和18年度年会講演アブストラクト, 「paper no. 22, 計数管の寿命に就て」, 「paper no. 23, 計数管の残留効果に就て」。そして、終戦後皆川は、神戸大学理学部教授になり、乗鞍岳山頂に宇宙線観測所を建設し、宇宙線捕捉のための高空に揚げる気球の飛翔技術を開発した。
- (8) 皆川理, 玉木英彦「中性子衝撃に依る重い原子核の分裂(II)」, 『日本数学物理学会誌』, **14**, 106 (1940).
- (9) 理研のサイクロトロンを使用して得られる高速中性子照射による 仁科芳雄-矢崎為一-江副博雄-木村健二郎-井川正雄の研究論文の発表は次の通りである。*Nature*, **142**, 874 (1938), *Nature*, **144**, 547 (1939), *Nature*, **146**, 24 (1940), *Phys. Rev.*, **57**, 1182 (1940), *Phys. Rev.*, **58**, 660 (1940), *Phys. Rev.*, **59**, 323 (1941), *Phys. Rev.*, **59**, 677 (1941), *Z. Phys.*, **119**, 195 (1941)の8件が、この時期に集中している。
- (10) 深井佑造「原子力開発史上の核データこぼれ話 第3話, 理研グループは²³²Th高速核分裂を発見し損なう」, 『核データニュース』, no. 64, p. 22, 1999年10月, 日本原子力研究所核データセンター発行。又、日本科学技術史学会, 招待講演, 題目は上と同じ, 1999年11月27日。高速中性子によるTh核分裂効果の発見は O. R. Frisch が Ra-Be 中性子源を用いた実験による。実は、それ以前に理研ではサイクロトロンを使用して得られた高速中性子のTh照射により核分裂反応の痕跡を検出していた。しかし、理研の場合には高速中性子のエネルギーが高かったために(n, 2n)反応によって生成した²³¹Thが照射資料に混入して、その放射能のために核分裂の痕跡か否かを判断する事が出来ずに、この核分裂反応の痕跡を見過ぎてしまった。もし、理研でも発生エネルギーが低い Ra-Be 中性子源を用いてさえいたならば、²³¹Thの混入が避

けられるので、核分裂反応を見過ごす事はなかったと思われる。Frisch の Th 核分裂発見から既に数年も経過しているのに、理研の長岡から「Ra-Be 中性子源では Th は核分裂しないかも知れない」という言葉が出るのは、理解に苦しむ問題である。

- (11) W. Heisenberg "Research in Germany on Technical Application of Atomic Energy", *Nature*, no. 4059, 211, Aug. 16 (1947).
- (12) 泊次郎「幻の原爆開発」, 朝日新聞, 平成7年8月21日.
- (13) 深井佑造「原子力開発史 中性子連鎖反応実現への遙かな道」, 日本原子力学会誌, **39**, 546 (1997).
- (14) ラジウム (Ra) とラドン (Rn) の関係は、 ^{226}Ra は 1.60×10^3 年の半減期の α 崩壊によって ^{222}Rn に変換する。 ^{222}Rn の半減期は 3.8235日である。
- (15) 浅田忠一, 大山彰, 倉本昌昭, 法貴四郎, 三島良績監修『原子力ハンドブック』, 昭和51年11月30日, オーム社発行. p. 705, 表25.7に掲載されている各種の中性子源の強度の値は n/s·Ci である。そこで、Ci を重量に変換した。1 g の ^{226}Ra は 1 Ci である。
- (16) 参考文献(4)には、田中館が 5 mg の ^{226}Ra を初めて輸入したと書いてある。
- (17) ^{227}Ac は、 ^{235}U (α 崩壊: 7.038×10^8 年) ^{231}Th (β 崩壊: 25.52時間) ^{231}Pa (α 崩壊: 3.28×10^4 年) ^{227}Ac で生成する自然界に存在する放射性原子核である。又、 ^{226}Ra (n, γ) ^{227}Ra (β 崩壊: 42.2分) ^{227}Ac でも生成する。 ^{241}Am は、 ^{238}U (n, γ) ^{239}U (β 崩壊: 23.5分) ^{239}Np (β 崩壊: 2.35日) ^{239}Pu (n, γ) ^{240}Pu (n, γ) ^{241}Pu (β 崩壊: 14.4年) ^{241}Am で生成する。更に、 ^{242}Cm は、 ^{241}Am (n, γ) ^{242}Am (β 崩壊: 16.0時間) ^{242}Cm で生成し、又、更に、 ^{242}Cm (n, γ) ^{243}Cm (n, γ) ^{244}Cm (n, γ) ^{245}Cm (n, γ) ^{246}Cm (n, γ) ^{247}Cm (n, γ) ^{248}Cm (n, γ) ^{249}Cm (n, γ) ^{250}Cm (n, γ) ^{251}Cm (β 崩壊: 16.8分) ^{251}Bk (β 崩壊: 56分) ^{251}Cf (n, γ) ^{252}Cf の反応で ^{252}Cf が得られる。ここで、(n, γ) は中性子照射による反応、(β 崩壊: $\times \times$) は β 崩壊反応で $\times \times$ は半減期を示す。以上のように、 ^{226}Ra 以外の元素は現在のような原子炉を使用した中性子照射技術が進歩しなければ入手困難である。
- (18) 彦坂忠義「原子核エネルギー利用の一方法に就て」, 『日本原子力学会誌』, **34**, 核分裂連鎖反応制御 50 周年記念特集付録, (1992).
- (19) 彦坂忠義「昭和18年度年会講演アブストラクト, paper no. 36」, 『日本数学物理学会誌』, **17**, no. 5 (1943).
- (20) H. C. Paxton, N. L. Pruvost "Critical Dimensions of Systems Containing ^{235}U , ^{239}Pu , and ^{233}U ", 1986 Revision, LA-10860-MS, July, 1987.
- (21) F. Adler, H. von Halban "Control of the Chain Reaction Involved in Fission of the Uranium Nucleus", *Nature*, **143**, 793, no. 3628 (1939).
- (22) R. Serber (annotated), R. Rhodes (edited) "The Los Alamos Primer, the First Lectures on How to Build an Atomic Bomb", Univ. of Cali. Press (1992).
- (23) J. Rotblat "Nuclear Radiation in Warfare", 小野周監訳『核戦争と放射線』, 1982年12月20日, 東京大学出版会発行. Rotblat は Stockholm International Peace Research Institute での1978年10月12日~16日の Symposium: Nuclear Energy and Nuclear Weapon Proliferation で、厚さ15cmの天然U反射体付の ^{235}U 臨界量は 15kg であると発言している (木村繁訳; 核拡散は防げるか, 昭和55年8月20日, 共立出版社発行)。

- (24) L. W. McNaught "Nuclear Weapons and Their Effects", 河島信樹訳『核兵器』, 昭和60年8月6日, 地人書館発行.
- (25) 山崎正勝, 日野川静枝編著『原爆はこうして開発された』, 資料2 全米アカデミー第3報告, 脚注A3 爆発の効率の計算, 1990年7月25日, 青木書店発行.
- (26) G. A. Graves, H. C. Paxton "Critical Masses of Orally Assemblies", *Nucleonics*, **15**, 90 (1957).
- (27) 装填量 25kg という数値は、鹿島平和研究所訳『核兵器白書—ウ・タント国連事務総長報告』, 昭和43年4月, 鹿島平和研究所発行. にも記載があるとの服部学氏より指摘があった(服部学氏に感謝したい)。
- (28) Stockholm International Peace Research Institute "Armaments and Dis-armament in the Nuclear Age", 1976. 服部学訳『核時代の軍備と軍縮』, 昭和54年7月, 時事通信社発行. (ここに、60 kg という値が *New Scientist*, **67**, no. 961, 7 Aug. 1975. 所載の F. Barnaby の論文から引用されている)。服部学『核兵器と核戦争』, 1982年6月25日, 大月書店発行. 『日本大百科全書 第5巻』, p. 59, 1994年1月1日, 小学館発行. 『長崎大百科事典』, p. 258, 昭和59年8月10日, 長崎新聞社発行.
- (29) J. C. Mark "Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium", *Science & Global Security*, **4**, 111 (1993).
- (30) E. Feeberg "The Detonation of Nitrogen Iodide by Nuclear Fission", *Phys.Rev.*, **55**, 980 (1939).
P. Faure, C. Magnan, H. Muraour "Sur la détonation de l'iodure d'azote sous l'action des fragments nucléaires de l'uranium bombardé par des neutrons", *C. R.*, **209**, 436 (1939).
- (31) 萩原篤太郎「超爆裂性原子“U235”ニ就テ」, 二火廠雑報, 第33号, 昭和16年7月24日, 第二海軍火薬廠. なお、萩原篤太郎の件については、福井崇時「萩原篤太郎が水爆原理発案第一号とされたことの検証及び昭和16年頃の京大荒勝研を例とした日本の原子核研究状況」, 『年報 科学・技術社会』, **10**, 79 (2001). に詳しい。
- (32) 東京第二陸軍造兵廠が理研を訪問をする前に、廠内で事前調査を行い所内報告書「ウラン(U)ニ就テ」を昭和18年4月に発行している。この報告書に萩原の第二海軍火薬廠での講演内容を全文掲載している。当然、東京第二陸軍造兵廠の上官は読んでいたと考えられる。廠内での「ウラン(U)ニ就テ」の報告書作成の際に、萩原講演で説明された「超爆裂性物質」の言葉の中の超を誤って「起爆裂性物質」と書き間違えてしまった。これは日本人にとっては間違える事の多くのある事例である。戦後「ウラン(U)ニ就テ」が米国に渡って英文に翻訳された際に、この書き間違えを、そのまま直訳したために、萩原は世界で最初の水爆原理発案者であるという誤報が一時米国の科学史研究者間に広まってしまった。
- (33) 木村一治『核と共に50年』, 1990年10月18日, 築地書館発行. 英訳本は、Motoharu Kimura with John M. Carpenter "Living with Nuclei, 50 years in the nuclear age, memoirs of a Japanese physicist", *Sasaki Printing and Publishing Co. Ltd.*, Aug. 6, 1993. として刊行されている。
- (34) V. McLane, C. L. Dunford, P. F. Rose "Neutron Cross Sections", Vol. 2, National Nuclear Data Center, BNL, Academic Press.
- (35) 山室信弘, 高橋亮一『原子核エネルギー』, 1987年3月15日, 共立出版社発行.

資料紹介

旧日本海軍『F研究』資料

山崎 正勝

ここに掲載するのは、旧日本海軍が京都帝国大学理学部の荒勝文策に委託した「F研究」に関連した資料で、1945年7月21日に琵琶湖ホテルで行われた海軍との会議で提示された。原資料は、清水栄京都大学名誉教授が保有されており、同教授の許可を得て原資料を起こした。

各頁は、原資料の1頁分に相当する。以下の1)は、京都帝国大学名が入った便箋に書かれた手書きのもので、その他2)以降は謄写版印刷になっている。図は原資料から複写したものを用いた。誤字、略字、旧字で再現できなかったものは、それぞれ()内に記した。判読不明なものには、不明としてある。

原資料にはこの他に

「ウラニウム塩分析結果」

があるが、これは別機関(「一枝廠京都出張所」とある)の分析結果なので今回は割愛した。

これらの資料の科学史的検討については、本誌 No. 3掲載の深井佑造論文「旧海軍委託「F研究」における臨界計算法の開発」および山崎正勝「理研の「ウラニウム爆弾」構想－第二次世界大戦期の日本の核兵器研究－」、『科学史研究』第40号 No. 218, 2001年, 87～96頁を参照していただきたい。本資料の作成に際し、栗原岳史氏の協力を得たことを追記しておきたい。

1) 「U核分裂ノ連鎖反應」	荒勝文策	29
2) 「U235核分裂のChain Reactionの可能性に対する推定」		33
3) 「熱中性子ニ對スルウラニウムノ原子核ノ分裂斷面積及ビ吸収斷面積ニ就イテ」	荒勝研究室	37
4) 「ウラニウム原子核ノ熱中性子捕獲斷面積ノ測定」	荒勝研究室	51
5) 「金属ウラン製造法」	岡田辰三	69

July 1945

荒勝先生ノメモ

U核分裂ノ連鎖反應

今水 1000c.c. 中ニ U_3O_8 m g ヲマゼタルモノガアルトキ、單位体積中ノ原子数ハ夫々

$$n_U = \frac{3mL}{842} \Big/ 1000 + \frac{m}{9} \quad n_H = \frac{111L}{1000 + \frac{m}{9}} \quad n_O = \frac{8}{3}n_U + \frac{1}{2}n_H$$

コレニ thermal neutron ガ 1 個入ルトキ、fission ニヨリ 新生スル neutron ガ吸収ニヨリ 消滅スルモノヨリ 多イコトガ必要條件デアル

$$\therefore n_U \{ \sigma_U^{fiss\theta} (\nu - 1) - \sigma_U^{res\theta} \} - n_H \sigma_H^{ab\theta} \geq 0$$

θ : thermal neutron ヲ示ス.

即チ

$$\frac{3m}{842} \left\{ \sigma_U^{fiss\theta} (\nu - 1) - \sigma_U^{res\theta} \right\} - 111 \sigma_H^{ab\theta} = 0$$

ヨリ必要ナル m が決定スル.

次ニカナル割合ノ U_3O_8 水溶液ノ半径 R ノ球ヲ考ヘルト中心ヨリ r ノ距離ノ neutron density $F(r,t)$ ハ

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\lambda}{3} \Delta(F\bar{v}) + \left\{ (\nu - 1)n_U \sigma_U^{fiss} - n_O \sigma_O^{ab} + n_H \sigma_H^{ab} \left\{ \nu \times 0.85 \frac{n_U \sigma_U^{fiss\theta}}{n_U \sigma_U^{fiss\theta} + n_O \sigma_O^{ab\theta}} - 1 \right\} \right\}$$

但シ、 \bar{v} = fast neutron mean vel.

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{fast neutron mean free path} \\ &= \frac{1}{n_U \sigma_U^{scatt} + n_O \sigma_O^{scatt} + n_H \sigma_H^{scatt}} \end{aligned}$$

之ヲ解イテ、 $\frac{\partial F}{\partial t} \geq 0$ ナルタメニハ

$$R \geq \pi/a$$

ナル結果ヲ得ル.

$$\text{但シ, } a^2 = \frac{3}{\lambda} \left\{ (\nu - 1)n_U \sigma_U^{fiss} - n_O \sigma_O^{ab} + n_H \sigma_H^{ab} \left\{ \nu \times 0.85 \frac{n_U \sigma_U^{fiss\theta}}{n_U \sigma_U^{fiss\theta} + n_O \sigma_O^{ab\theta}} - 1 \right\} \right\}$$

故ニ連鎖反應ヲ起ス極小半径 R_C ハ

$$R_C = \frac{\pi}{a} \quad \text{デアル。}$$

コレヨリ, U_3O_8 ノ極小質量 M kg ハ

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{m}{1000 + \frac{m}{9}} \times 10^{-3}$$

U^{235} ノ percentage ガ増ストキハ,

U^{235} ノミガ fission ヲ起シ, U^{238} ノミガ共鳴吸収ヲナス

ト考ヘ,

$$\sigma_{U,p}^{fiss\theta} = \sigma_U^{fiss\theta} \times \sqrt{\frac{300}{T}} \times \frac{p}{0.7}$$

$$\sigma_{U,p}^{res\theta} = \sigma_U^{res\theta} \times \frac{0.7}{p} \quad p : \text{percentage}$$

トスル

計算ニ用ヒタル各断面積 次ノ如シ.

$$\begin{aligned} \sigma_U^{fiss} &= 0.1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 && \text{Anderson 等} \\ \sigma_O^{ab} &= 0.01 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 && \text{Ladensburg} \\ \sigma_H^{ab} &= 1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 && \text{Fleithmann} \\ \sigma_U^{fiss\theta} &= 2 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 && \text{Anderson} \\ \sigma_O^{ab\theta} &= 0.1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 && \text{Ladensburg} \end{aligned}$$

No. 3

$$\begin{aligned}\sigma_U^{res\theta} &= 1.3 \times 10^{-24} cm^2 && \text{von Halban} \\ \sigma_U^{scatt} &= 6 \times 10^{-24} cm^2 \\ \sigma_O^{scatt} &= 0.6 \times 10^{-24} cm^2 && \text{Ladenburg} \\ \sigma_H^{scatt} &= 2 \times 10^{-24} cm^2 && \text{Ladenburg}\end{aligned}$$

平衡温度 1000°C

$\nu=2.5$ ノトキ U_3O_8 1.2ton
235 10% U_3O_8 20Kg

第一関門式

$$\frac{n_U \nu \sigma^{f\cdot\theta}}{n_U (\sigma^{f\cdot\theta} + \sigma^{res\theta}) + \sigma_H^{ab\theta} n_H} \geq 1$$

U²³⁵ 核分裂の Chain Reaction の可能性に対する推定 ウラン原子核の中性子衝撃に依る核分裂の過程がその際放出される二次中性子によって持続され所謂 Chain Reaction として進行する可能性ありや否やの問題は Flüge(Naturwiss. 27 (1939) 402)、Perrin(C. R. 208 (1939) 1394,1537)、Adler(C. R. 209 (1939) 301) その他の人々に依って理論的に吟味されてゐるが計算の途中に行つてある近似の度合、用ひられてゐる実験値等が區々であるために決定的な判定を下し得ないやうに思はれる。特に、これ等の人達が擴散の微分方程式を解いてゐるが、その方法は數學的には巧妙であってもその際必要な諸假定は實際と可なり離れたものであるために得られた結果がどの程度迄正しいかを定めることが困難である。そこで我々は最も原始的な方法をえらび実験値に極度について Chain reaction の可能性を調べて見ることにする。

先づ、発生される中性子を出来るだけ逃がさないために無限に多量の水中にウラン金属をおくことにする。その際にウランを水中に廣く分布せしめることは徒らに所要量を増すのみであるから金属塊として水中の或る位置におかれてゐるものと考へておく。このウランの量が非常に多量に必要であつて、そのためにウラン塊の占める体積が中性子分布状態に強く影響する結果になるやうであれば、ウラン金属内での中性子擴散の方程式をとく必要が起るのであるが、逆にウランの所要量が少くその中での中性子の分布が一定と見做し得る場合にはウラン原子核の個数のみを問題にすればよい。以下この假定の下に推定を行い、結果から見てこの條件が満足されてゐれば自己矛盾がないと云ふ方法で進む。實際、後に判るやうに純粹に分離された U²³⁵ のみの金属塊に就いてはこの條件が満たされてゐる。

さて、以上の假定の下に現在得られる実験値を用ひて最も直接的に Chain Reaction の可能性しらべることを試みよう。それには 1. 水中の一点 0 に單位の強さの速中性子源をおいた場合の水中における中性子分布状態 と 2. 1 個の中性子が U²³⁵ 核に衝突して分裂を起す確率とその際発生する中性子の個数 とを知らばよい。この二つの測定は U²³⁵ 核を分離することなしに現在の実験室の装置にて行ひ得るものである。以上の測定値を用ひれば水中の 0 点に速中性子源の代りにウラン金属塊をおき中性子にて衝撃した場合に 0 点に於て單位時間に発生する中性子の個数 n_N は次式で与へられる。

$$n_N = \int_{v=0}^{\infty} \int_{r=0}^{r_0} (\nu_0 - 1) \rho_U \sigma_f(v) v \rho_N(r, v) n_N 4\pi r^2 dr dv$$

こゝで r は 0 点からの距離、 $\rho_U(r)$ はウランによる核分裂の断面積、 $\rho_N(r, v)$ は v なる速度の中性子の密度、 ν_0 は一回の核分裂に依つて発生する中性子の個数である。Chain Reaction となる條件は明らかに $n_N \geq 1$ であるから、上式を用ひて

$$\int_{v=0}^{\infty} \int_{r=0}^{r_0} (\nu_0 - 1) \rho_U \sigma_f(v) v \rho_N(r, v) 4\pi r^2 dr dv \geq 1$$

が分裂の持続される條件となる。それ故、以上の諸數値、即ち $\nu_0, \sigma_f(v)$ $\rho(r, v)$ が実験で確かめ得れば何等の假定なしに Chain Reaction が起るため

に要するウラン金属の総量 $n_U (= \frac{4\pi}{3} r_0^3 \rho_U)$ が求められる等である。勿論この場合 r_0 が大きくなって $\rho_N(r, v)$ が強く変化するやうな結果になればこの計算の假定が満されない。その様にならないとすれば $\rho(r, v)$ は $\rho(0, v)$ におきかへてよいから上式は更に簡単に

$$n_U(\nu_0 - 1) \int_{v=0}^{\infty} \sigma_f(v) v \rho(0, v) dv \geq 1$$

となり、所要ウラン核の総数は

$$n_U \geq \frac{1}{(\nu_0 - 1)} \frac{1}{\int \sigma_f(v) v \rho(0, v) dv}$$

で与えられる。

この式中の諸数値 $\sigma_f(v)$, $\rho(0, v)$ を現在の実験に依つて求めることは多少困難であるから、次に稍不確かではあるが、 ρ_f が中性子の速度に逆比例すると云ふ事実を用ひて、(この事実は U^{235} 核の核分裂断面積がおそい中性子に対して非常に大きいことから理論的には推測されてゐる。) 簡単にすれば、即ち

$$\sigma_f(v) = \sigma_{f_0} \frac{v_0}{v}$$

(但し、 v_0 は熱中性子の速度、 σ_{f_0} はその中性子に対する核分裂断面積) とおけば上式は

$$n_U \geq \frac{1}{(\nu_0 - 1)} \frac{1}{\rho(0)} \frac{1}{\sigma_{f_0} v_0}$$

となる。

更に実験と比較する際に起る困難は、実験に於ては中性子の密度 $\rho(0)$ 自身が測定されず中性子による種々の核の Activity の強度が測定されてゐるから、その結果を用ひて ρ の値を推定する必要が起る。そこで我々は Amaldi Fermi(Phys. Rev. 50(1936)899) が水中におかれた中性子源のまわりで種々の物質に惹起される Activity を測定した結果を用ひ、中性子の密度が Activity に比例すると假定し、極めて粗い計算に依つて $\rho(r)$ を推定し次の結果を得た。

r(cm)	1	2.5	3.6	5.4	10.2
$\rho(r) \times 10^9$	5.2	4.4	3.9	3.0	1.0

上表から、 $\rho(r)$ は位數 cm 迄は殆んど常數と見做し得るから、 $\rho(0) \approx 5 \times 10^{-9}$ とおき、Chain Reaction の起るために必要な U^{235} 金属の総量として

$$M_U \geq \frac{1}{\nu_0 - 1} \frac{235}{\sigma_{f_0} v_0 \rho(0) L} \quad (L \text{ は Loschnidts } No.)$$

$$\approx 1.1 \times 10^3 \text{ gr.}$$

(一行不明) $\sigma_{f_0} = 2 \times 10^{-24}$

を得た。但しここで $\nu_0 = 2$ とおき、 σ_{f_0} には熱中性子に依る核分裂の断面積の実験値を用いた。尚、この結果から見て、ウラン金属塊の半径 r_0 は 2.4cm 程度であるから上の表と比べ今迄に用いた簡單化の假定はみたされてゐることが判る。即ち、結論として純粹に分離された U^{235} 用ひて Chain Reaction を起す場合には 1 Kgr. 程度のものであると云ふ結果が得られた。

以上。

熱中性子ニ對スルウラニウムノ
原子核ノ分裂斷面積及ビ
吸収斷面積ニ就イテ

昭和二十年六月二十三日

荒勝研究室

(1)

熱中性子ニ對スル ウラニウム原子核 分裂斷面積
及ビ 吸收斷面積ニツイテ

昭和二十年六月二十三日

荒勝文策

花谷暉一

序論

ウラニウム原子核ノ核分裂ハソノ斷面積熱中性子對シテ最モ大デアルカラソノ値 σ_f^U は純學問的ニ興味アルノミデ無ク應用上ノ見地カラモ核分裂ノ連鎖反應ノ可能不可能ノ問題ニ重要ナ意味ヲ持ツモノデアル。然ルニソノ測定値ハ今日迄只 Anderson, Fermi 等⁽¹⁾ノ値 $2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ガアルノミデコレガ一般ニ信用セシモ種々ノ實驗計畫ニ引用サレテキル^事状態デアル。例ヘバウラニウム原子核分裂毎ノ放出二次中性子ノ値 ν ハ 二次中性子放出斷面積 ($\nu \times \sigma_f^U$) ヲ測定シコレヲコノ値 σ_f^U ニテ除スルコトニヨツテ得テキル。即チ Joliot 等⁽²⁾ハ $\nu \times \sigma_f^U$ ヲ実測シ $(7 \pm 1.4) \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ナル値ヲ得、Anderson 等ノ $\sigma_f^U = 2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ カラ $\nu = 3.5 \pm 0.7$ ヲ得タ如キ類デアル。

更ニ又、 σ_f^U ヲ知ル事ヨリ ウラニウム原子核ノ熱中性子 捕獲斷面積 $\sigma_C^U (= \sigma_f^U + \sigma_a^U)$ ヲ測定スル事ニヨリウラニウム原子核ノ熱中性子吸收斷面積 σ_a^U ガ得ラレル。コノ σ_a^U ハ(核分裂從ツテ中性子放出) ヲ伴ハザル熱中性子吸收ノ量ヲ表ハスモノトシテ重要ナ値デアル。尚コノ値ハ 25volts 附近ノウラニウ

(2)

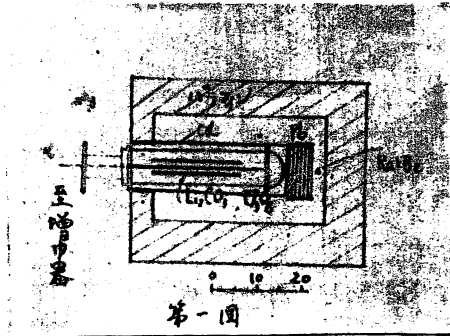
ム U^{238} 原子核ノ熱中性子ニ対スル強イ共鳴吸収ノ吸収帯ノ幅ヲ知ル上ニモ必要ナ量デアアル。カクノ如ク重要ナ意味ヲ有スル量ナルニモ拘ラズ其ノ測定ガ全ツテ限ラレタ少数ノ人々ニヨツテノミ行ハレテキルノデ我々ハコゝニ全ク獨立ニコノ値 σ_f^U ヲ実験測定シタノデアアル。ソノ結果 $\sigma_f^U = (2.9 \pm 0.2) \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ヲ得タ。コレハ Anderson 等ノ測定値 $2.0 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ヲリ少シ大キイ。以下コレニ就キ報告シテ置キタイ。

実験方法

我々ハ當研究室ニ於テ既ニヨク使ヒ慣ラサシ性能ガ知ラレタ型ノ中性子計數管ノ電離槽⁽³⁾ 容器中ニ直径 2.15cm 長さ 20.15 cm 面積 136cm^2 壁ノ厚サ 0.2mm ナル アルミニウム圓筒ニ個作り其ノ内面ニ夫々 66mg ノ Li_2CO_3 ($0.49 \text{mg}/\text{cm}^2$ ノ厚サ) 及ビ 169mg ノ U_3O_8 ($1.24 \text{mg}/\text{cm}^2$ ノ厚サ) ヲ塗布シタルモノヲイオン捕集針ヲ心軸トシテ挿入シ電離槽ヲ作ツタ此ノ電離槽ヲ容積 $30 \text{cm} \times 30 \text{cm} \times 50 \text{cm}$ 、壁ノ厚サ 5cm ノパラフィン函中ニ蔵メテ 50mg Ra+Be 中性子源ヨリ出ル中性子ヲ能率ヨク速シタル中性子雲ニ曝ラシコレニヨル Li^6 ノ破壊並ニ U^{235} ノ分類ヲ比較測定スル事ヲ実行シタノデアアル。(第一図参照) コノ際 Ra+Be 容器ヨリノ γ 線ハ厚サ 5cm ノ鉛塊ニテ遮リコレニヨル計數上ヘノ影響ヲ満足スベキ程度ニ阻止スル事ガ出来タ。サテコノ実験條件ニ於テ Li 電離槽ニヨツテハ $\text{Li}_3^6 + n_0^1 \rightarrow \text{He}_2^4 + \text{H}_1^3$ ナル反應ニテ生ズ α 粒子或ヒハ H_1^3 粒子ニヨル脈

(3)

第一図



動(蹴り)ヲU電離槽ニヨツテハU核分裂片ニヨル脈動ヲ夫々レ感
度ノ異ル状態ニ調節セル直線型増幅器ヲ用ヒテ計數スルモノデア
ルガ後ニ記ス如ク測定技術ニ注意ト熟練ヲ致ス事ニヨリ熱中性子
ニヨルLi原子核崩壊數 n_f^{Li} 及ビU原子核分裂數 n_f^U ノ比ヲ
信賴シ得ル正確度ヲ求メル事ガ出来熱中性子ニ対スルLi原子核
崩壊斷面積 σ_f^{Li} 、及ビU核分裂斷面積 σ_f^U ノ比ヲ測定スル事ガ
出来タノdealル。

コノ場合ノ照射熱中性子數ヲ N トシLi原子及ビU原子ノ
原子數ヲ n^{Li} 、 n^U トシ試料面積ヲ A トスレバ

$$\begin{aligned} n_f^{Li} &= N \sigma_f^{Li} n^{Li} / A \\ n_f^U &= N \sigma_f^U n^U / A \end{aligned}$$

dealルカラ

$$\frac{\sigma_f^{Li}}{\sigma_f^U} = \frac{n_f^{Li}}{n^{Li}} \bigg/ \frac{n_f^U}{n^U}$$

ガ得ラレル

從ツテ今別ニ σ_f^{Li} ヲ測定シコレヲ知レバ直チニ σ_f^U ガ得ラレルノ

(4)

デアル。

コノ実験ニ於テ最モ注意スベキ点ハ Li 電離槽内 Li 原子崩壊ノ際放出サレル α 粒子並ニ H_1^3 粒子ノ數ト U 電離槽内ノ U 原子核分裂粒子ノ數トヲ同ジ精度デ計數測定スル事デアル。

我々ノ此ノ実験ニ於テハ Li 破壊粒子 α 及ビ H_1^3 粒子ノ測定ノ場合ハ増幅器ノ感度ヲバ相当高メテキルノデアルガ増幅器ノ雑音ヨリ来ル小ナル脈動ニ比シ確然區別シ得ル大ナル脈動トシテ計數スル事ガ出来コレニヨリ熱中性子ニヨル Li 原子崩壊數 n_f^{Li} ヲ精密ニ計測スル事ガ出来タ。又、U 原子核分裂測定ノ場合ハ増幅器ノ感度ハ著シク低下シ 一個ノ α 粒子ニヨル脈動ハブラウン管上ノ零線ニ埋没セラレル程度ニ落シテ測定シタノデアル。コノ際 U カラ出ル多クノ α 粒子ニヨル 高次ノ同次放電ニ基クモノト思ハレル脈動ガ観測サレルガソレヨリハ 遙カニ大ニシテ明カニ區別出来ル。分裂粒子脈動ガ明確ニ観測シ計數サレタ。カクシテ正確ナル σ_f^{Li}/σ_f^U ノ比ヲ得ル事ガ出来タノデアル。

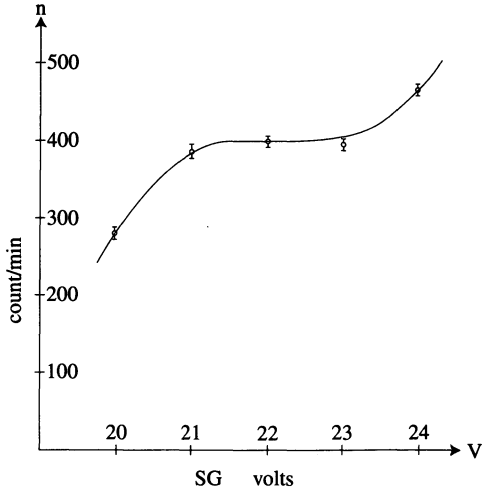
実験値並ニ実験結果

Li 電離槽ノ場合ノ α 或ヒハ H_1^3 粒子脈動數ヲ明確ニ計數スルタメニ増幅器 第一真空管ノ遮蔽格子電圧ヲ変化シ 調整シ増幅器ノ感度ヲ次第ニ上ゲ同ジ中性子強度ノ狀況ニ於テ計數器ニカカリ来ル計數ノ変化ヲ検ベタノデアル。

ソノ毎 10 分計數結果ハ次ノ通りデアル。(第一表 第一図)

(5)

Li⁶ 計數管ノ増幅度ト
中性子計數管能率トノ關係



電離層ノ内面ニ塗布セル Li_2CO_3 並ニ U_3O_8 ノ層ハ其ノ破壊
粒子乃至分裂粒子ノ到程ニ比シ遙カニ薄クコレ等粒子ノ資料中
ニテ止リ 終ルモノハ殆ンド無イ筈デアル。

然シコノ結果ヲ見ルト、増幅度ノ低イ間ハ電離層中惡條件ニ
現ハレ来ル H^3 、或ヒハ α 粒子ノ脈動ハ未ダ充分増幅サレズ
録數器 (八進法眞空管録數器) ニカヽラナイ程度ノモノガアル
事ヲ来シ、ソレガ増幅度ノ上昇ト共ニ次第ニ録數ニ懸リ来リ。
其ノ計數ハ或ル程度増ス事ヲ示ス。然ルニ SG.volts ガ 21V

SG.volt	Cd ナシ	Cd アリ
20	283±22	
21	3915±91	183±6
22	4029±12	205±8
23	4032±22	260±25
24	4817±73	

第 一 表

(6)

カラ 23V ノ間ノ部分デハ粒子ニヨル凡テノ脈動ハ充分増巾セラレ計數ハ残ス所ナク行ハレ一定トナル。コノ間増巾度ハ SG.volt ノ変化ト共ニドンドン高クナリ、脈動ノ大キサハ直線的ニ増加スルガ脈動ノ計數ハ一定トナル。

更ニコレ以上増巾度ヲ高メルト、計數ガ増加スル。コレハ増巾器ノ雑音ガ不要ニ増巾セラレ録數器ニ入ル程度トナルタメデアル。

コノ一定計數領域ノ存在スル事ハ、Li 崩壊ノ際 α 粒子或ハ H^3 粒子ガ増巾器ノ雑音ヨリ充分大キク明確ニ區別サレテキル事ヲ示スモノデアル。コノ事ハ、ソノ時ノオシログラフ写真ヲ観レバ明瞭デアツテ疑フ余地ガ無イ。(添付写真参照)

$Li^6 + n^0 = H^3 + \alpha$ 反應ニ於ケル H^3 ノ到程ハ 5.7cm
 α 粒子ノ到程ハ 1.5cm デアル。然シテ計數管内壁ニ塗布セル Li_2CO_3 層 $0.49mg/cm^2$ ハ其空氣相當厚味ハ約 0.4cm ニ當ルモノト思ワレル。

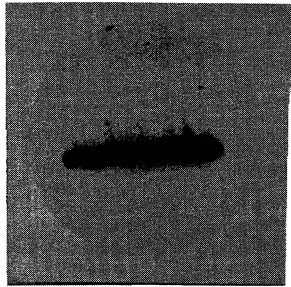
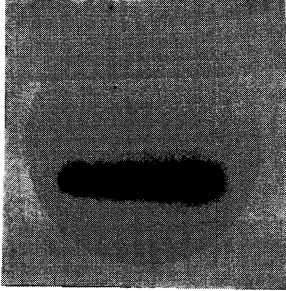
又、U ノ分裂粒子ノ到程ハ約 1.8cm—1.3cm 程度デ、U ヨリ放出サレル α 粒子ノ到程ハ 2.7cm デアル。

一方計數管内壁ニ塗布セル U_3O_8 層 $1.24mg/cm^2$ ノ相當空氣層ノ厚味ハ分裂粒子ニ對シ 0.3cm 程度ト推定セラレル。

(7)

Cd 板有 (増巾器雑音)

Cd 板無 (Li^6 崩壊 H^3, α)



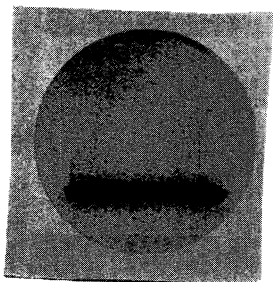
故ニコノ一定計數領域ニ於ケル計數條件ニ於テ電離槽ヲ覆フ Cd (厚サ 1mm) ノ有無ニヨル計數ノ差異ヲ計レバ、熱中性子ニヨル Li 原子核 毎 10 分 崩壊數 n_f^{Li} ガ正確ニ知ラレル。カクテ第一表ノ示ス所ニ從ヒ一定計數領域總計數約 50000 ノ測定ニヨリ 平均每 10 分 ノ計數 $n_f^{Li} = 3778 \pm 36$ ヲ得ル。

次ニ U_3O_8 電離槽ノ場合ハ、ソノ原子ヨリ出ル α 粒子ノ脈動ヲ押ヘルタメニ増巾器ノ感度ヲ充分落シテ、ソノ α 粒子ノ高次ノ同次放電ニヨル相當大キナ脈動モ充分小ニシテ、オシログラフデノ振レガ 1cm 以下ニナル様ニシテ置ク時、電離槽ヲ覆ヘル Cd 板ヲトツテ、U 原子ニ熱中性子ヲ照射スルト、オシログラフデ高サ 4cm 近イ充分大キナ脈動ノミガ増加シテ現レル事ヲ観測シタ。コノ時 1cm 以下ノ振レ (主トシテ α 粒子ノ同時放電ト比較サレル様ナ小ナル振レ) ハ全ク増加ヲ見ナカツタ。即チ總分裂粒子約 500 個ノ計數ニヨリ平均每 10 分 測定ノ結果ハ

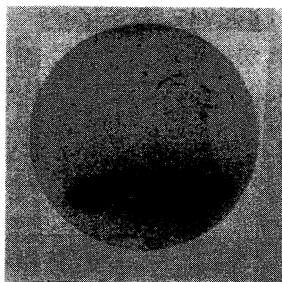
(8)

	-4cm 2cm 以上ノ振レ
Cd 無	53±3
Cd 有	1±0.4

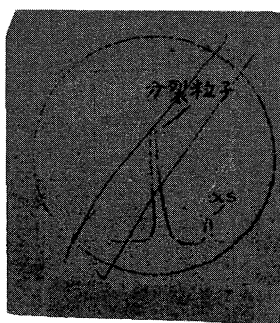
ヲ示シタ。カクテ U 原子核分裂粒子ハ 2cm 以上ノ脈動トシテ明瞭ニ観測スル事ガ出来タ。



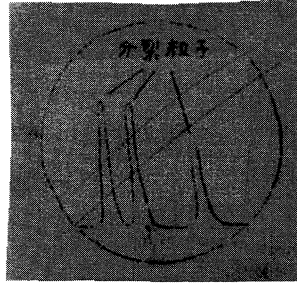
Cd 板有 (U 原子 α 同時放電)



Cd 板無 (U 原子核分裂粒子)



(9)



上ノ結果ヨリ熱中性子ニ対スル毎10分U原子核分裂數ハ

$$n_f^U = 52 \pm 3$$

トナル。更ニ

Li_2CO_3 66mg 中ノ Li 原子數 $n^{\text{Li}} = 1.1 \times 10^{21}$

U_3O_8 167mg 中ノ U 原子數 $n^{\text{U}} = 3.63 \times 10^{21}$

ヨリ 熱中性子ニ対スル Li原子及ビ U原子核分裂断面積ノ比

$$\frac{\sigma_f^{\text{Li}}}{\sigma_f^{\text{U}}} = \frac{n_f^{\text{Li}}}{n_f^{\text{U}}} \cdot \frac{n^{\text{U}}}{n^{\text{Li}}} = 24 \pm 1$$

ヲ得ル

故ニ、別ニ σ_f^{Li} ノ値ヲ知レバ σ_f^{U} ノ値ガ得ラレルワケデア
ル。吾々ハ目下 σ_f^{Li} ノ値ノ測定ヲ別々ニ行ツテキルガ今シバラ
ク諸観測者⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ニヨツテ既ニ略一致シテ得ラレタ

$$\sigma_f^{\text{Li}} = 70 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

ヲ用フレバ

$$\sigma_f^{\text{U}} = (2.9 \pm 0.2) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

ヲ得ル。

(10)

前二吾々が測定セル熱中性子ニ対スルU原子捕獲断面積ノ値

$$\begin{aligned}\sigma_c^U &= \sigma_f^U + \sigma_a^U \\ &= (4.0 \pm 2.1) \times 10^{-24} \text{cm}^2\end{aligned}$$

ヲ用フレバU原子核ノ熱中性子吸収断面積ハ

$$\sigma_a^U = (1.1 \pm 2.1) \times 10^{-24} \text{cm}^2$$

ナル値トナル。

コノ結果ヲ表ニスレバ

σ_c^U	σ_f^U	σ_a^U	観測者
3.2	2	1.2	Anderson, Fermi ⁽¹⁾ 等
		1.3 ± 0.45	Joliot ⁽²⁾ 等
4.0 ± 2.1	2.9 ± 0.2	1.1 ± 2.1	荒勝 等

トナル

吟味

我々ハ此ノ實驗ヨリ

$$\sigma_f^U = (2.9 \pm 0.2) \times 10^{-24} \text{cm}^2$$

ヲ得タノデアルガ、コレハ Anderson 等ノ測定數 $2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ヨリハ少シク大デアル。

コノ我々ノ測定値ヲ用ヒルト、前二 Joliot ノ測定セル

$\nu\sigma_f^U = (7.0 \pm 1.4) \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ヲ借用スレバ每核分裂放出二次中性子數ハ

$$\nu = 2.4 \pm 0.5 \quad \text{トナル。}$$

(11)

コノ値ハ Anderson ノ測定値ヨリ推定セル Joliot ノ値
 $\nu = 3.5 \pm 0.7$ ヨリハ遙ニ少イ
今参考ノタメ他ノ研究者ノ得シ ν ノ測定値ヲ列記スレバ

$$\left. \begin{aligned} \nu &= 2 \quad \text{Anderson 等} \\ &= 2.3 \quad \text{Szilard 等} \end{aligned} \right\}$$

デアル

因ニ前ニ我々ノ測定シタ $\nu \times \sigma_f^U$ ノ値デハ

$$\nu \times \sigma_f^U > (4.8 \pm 3.0) \times 10^{-24} \text{cm}^2$$

ヲ用フレバ ν ノ値ハ

$$\nu > 1.7 \pm 1.0$$

トナル。然シコノ値ハ今日ヨリ批判スレバ実験上測定上ノ諸
困難ヨリ見テ 最小限界値 ト見ルベキデアル。

前ニ当研究室ニ於テ推定セシ ν ノ値 2.6(萩原⁽⁸⁾)
並ニ 2.4(木村、花谷)ハ未ダ測定技術上初期時代ノ推定ニ
ヨルモノデ今日検討吟味ノ用ニ供スル事ハ妥当デナイ。

兎ニ角 ν ノ正確ナル測定ニハ尚更メテ測定スル必要ガアル。

我々ハ新ニ分裂観測用計數管ヲ作製シ強キ
D-D 中性子源ヲ用ヒル事ニヨリ一層精化サレタル測定ヲ準備
シツゝアル。

本研究ニ用ヒタ中性子源ハ畏友故黒田秀博氏ノ好意ニヨルモ
ノデアル。其ノ研究費ハ文部省特別科学研究費並ニ海軍技術研
究所委託研究費ニ負フモノデアル。

(12)

ココニ感謝ノ意ヲ表スル。

又実験技術上多クノ援助ヲ与ヘラレシ助教授理学博士木村毅一氏
並ニ堀重太郎理学士、ニ感謝スル。

文 献

- (1) H. L. Anderson, E. T. Booth, J. R. Dunning, E. Fermi,
Phys. Rev. 55 (1939) 511
- (2) H. Von Hallan, Jr. F. Joliot and L. Kowarski,
Nature. 143 (1939) 470
- (3) K. Kimura and Y. Uemura,
Memoir. Coll. Sc. Kyoto,
Imp. Univ.
- (4) J. R. Dunning, G. B. Pagram, G. A. Fink, D. P. Mithell,
Phys. Rev. 48 (1936) 265
- (5) M. Goldhaber and G. H. Briggs,
Proc. Roy. Soc. 162 (1937) 127
- (6) A. C. G. Mitchell, E. J. Murphy, L. M. Langer and
M. D. Whittaker, Phys. Rev. 49 (1936) 453
- (7) H. L. Anderson and E. Fermi,
Phys. Rev. 55 (1939) 1106
- (8) T. Hagiwara, Memoir. Coll. Sc. Kyoto, Imp.
- (9) Unpublished (1939)

ウラニウム原子核ノ熱中性子
捕獲断面積ノ測定
附 總衝突断面積ノ測定

昭和二十年六月二十三日

荒勝研究室

ウラニウム原子核ノ熱中性子捕獲(吸収並ニ
核分裂ノ和) 断面積ノ測定. 附ソノ總衝突断面積測定

荒勝文策
花谷暉一
木村毅一

昭和二十年六月二十二日
(1945)

序論

ウラニウム原子核ハコレヲ中性子⁽¹⁾, 又ハ重水素核⁽²⁾ ヲ以テ衝擊シ或ハ
 γ 量子⁽³⁾ ヲ照射スル事ニヨツテ所謂分裂現象ヲ起シソノ核ノ核内エネルギー
ノ発散ヲ表ス事ガ明瞭トナツテキル。コノ現象ヲ用ヒエネルギー源ヲ得ントス
ル可能性ヲ検討スル基本的数值ヲ測定スルーツノ過程トシテソノ核分裂断
面積ノ最モ大ナル, 熱中性子ニ対スル捕獲断面積, 分裂断面積ノ測
定ヲ行ツテ見タノデアル。サテコノ現象ノ實用化ノ問題ハ一ニコノ核分裂
ノ連鎖的反應誘発ノ可能性ニアル。コノ現象ノ連鎖的反應ガ可能ナリヤ否
ヤヲ決定スル第一條件トシテハウラニウム原子核ガ種々ノ核反應ニヨリ中性子
ヲ捕獲シ其中コレニヨツテ自ラ分裂スル際ニ分裂スル際ニ分裂過程トシテ新ニ二次的中性
子ヲ放出スルガ其ノ放出中性子数ガ捕獲中性子数 1 ニ対シ 1 ヨリ大
ナルベキ事デアル。従ツテ熱中性子ノ範圍デコノ事ガ成立スルヤ否ヤヲ檢ベルコト
ハ第一必要ナ事柄デアル。所ガコノ條件値タルウラニウム原子核ガ多クノ過
程ニヨリ熱中性子ヲ平均一個捕獲スル毎ニ分裂作業ニヨツテ放出サレル中
性子ノ数ハ $\nu \times \sigma_f^U / (\sigma_f^U + \sigma_a^U)$ デ表サレル。但シ ν ハ核分裂毎
ノ放出ニ時中性子数、 σ_f^U 及ビ σ_a^U ハ夫々熱中性子ニ対スルウ
ラニウム原子核ノ核分裂及ビ吸収ノ断面積デアル。故ニ核分裂連鎖^{用字}

反應ノ第一條件式ハ

$$\nu \times \sigma_f^U / \sigma_f^U + \sigma_a^U > 1 \quad (4)$$

或ハ

$$\nu \times \sigma_f^U / \sigma_C^U > 1$$

デアアル。

但シ $\sigma_C^U = \sigma_f^U + \sigma_a^U$ デアツテ捕獲断面積ト呼ブモノデアアル。實際ハコノ條件式ガ事實成立シテモ核分裂ノ連鎖反應ガ起ルトハ限ラナイ。ソレハ此ノ二次中性子ノエネルギーハ非常ニ大デコレガ熱エネルギーニマデ減速サレル内ニ核分裂ヲ起サズニウラニウム原子ニ吸収サレ或ハ中性子減速物質タル含水素物質中ノ水素原子ニ吸収サレ消滅シコノ放出中性子ガ熱中性子ニナルマデニ1ヨリ小トナル可能性ガアリ更ニ又ソレガ1ヨリ大デアルニシテモソレガウラニウム原子ニ衝ツテ核分裂ヲ起サズニ系外ニ放散シ消滅スル事ガアリ得ルカラデアアル。コレ等ノコトヲ考慮シテ實際核分裂ガ起リ得ルヤ否ヤノ問題ニ対シ合理的の考察及ビ實驗ハ實ニ必要デアアル。(コレ等ノ考察ニ就イテハ Flügge⁽⁵⁾、Perrin⁽⁶⁾ 及ビ Adler⁽⁷⁾ ノ考察計算ガアルガ後 更メテコノ問題ニ就イテ論述シタイ。)

然シ今我々ハ先ヅコノ $\nu \times \sigma_f^U / \sigma_C^U > 1$ ナル第一條件式ノ成立スルヤ否ヤヲ實驗的ニ確メ置ク必要ガアル。

$\nu \times \sigma_f^U$ ノ値 即チ熱中性子ニ対スル(ウラニウム原子核分裂ノ際ノ)二次中性子放出断面積ハ前ニ我々ノ測定シタモノデアリ又他ノ研究者ニヨツテモ測定サレタ値ガアル。即チ

$$\begin{aligned} \nu \times \sigma_f^U &> (4.8 \pm 3.0) \times 10^{-24} \text{cm}^2 && \text{木村花谷}^{(8)} \\ &= 4 \times 10^{-24} \text{cm}^2 && \text{Anderson 等}^{(9)} \\ &= 7 \times 10^{-24} \text{cm}^2 && \text{Joliot 等}^{(4)} \end{aligned}$$

一方 σ_C^U ニ就テハ σ_f^U ト σ_a^U ガ別々ニ測定サレ $\sigma_f^U = 2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$: Anderson, Fermi 等⁽¹⁰⁾

$$\begin{aligned}
\sigma_a^U &= 1.0 \times 10^{-24} \text{cm}^2 \\
&= 1.2 \times 10^{-24} \text{cm}^2 && : \text{Anderson, Fermi 等}^{(11)} \\
&= (1.3 \pm 0.45) \times 10^{-24} \text{cm}^2 && : \text{Joliot, Kowarski 等}^{(12)}
\end{aligned}$$

ガ得ラレテキル。Anderson 及ビ Joliot 等ハ コレ等ノ値ヨリ判断シ $\nu \times \sigma_f^U / \sigma_C^U > 1$
ヲ満足スルモノト推定シコノ現象ノ連鎖的^{母字}反應ノ第一^{母字}條件ハ成立シテキルト言
明シテキル。更ニ別ニ Anderson, Fermi, Szilard⁽¹³⁾ ハ 200Kg ノ U_3O_8
ヲ使用シテ半實用的ナ實驗ヲ進メ、放出二次中性子ガ熱エネルギーニナル
マデノ核分裂ヲ伴ハザル ウラニウム原子ヘノ吸収ニヨリ減少スルコトヲモ含ンダ
測定値 即チ總捕獲過程ニヨリ平均熱中性子一個捕獲スル毎ニ放出
サレル中性子中 ウラニウム原子ト共存スル水素原子ニヨリ減速サレ一部吸収
サレテ後尚 残リトシテ得ラレル熱中性子数ヲ測定シ、ソノ値 1.2 ヲ得タ。
又コレヨリ逆ニ計算ヨリ $\nu \times \sigma_f^U / \sigma_C^U = 1.5$ ナル値ヲ得テキル。

コレ等諸外國ノ人々ノ測定ノ結果ヲ見ルト連鎖反應ノ第一^{母字}條件式
ハ成立セルモノト見ラレル。然ルニ一方 σ_C^U ヲ直接測定シタ多クノ研究者
ノ結果ヲ通覽スルニ

$$\begin{aligned}
\sigma_C^U &= (2 \pm 4) \times 10^{-24} \text{cm}^2 && : \text{Reddemann 等}^{(14)} \\
&= 5 \times 10^{-24} \text{cm}^2 && : \text{Anderson 等}^{(9)} \\
&= 5.9 \times 10^{-24} \text{cm}^2 && : \text{Thomson 等}^{(15)} \\
&= 9.6 \times 10^{-24} \text{cm}^2 && : \text{萩原}^{(16)} \\
&= (11 \pm 3) \times 10^{-24} \text{cm}^2 && : \text{Whittaker 等}^{(17)}
\end{aligned}$$

ノ値ガアル。コレト前記 ノ諸値トヲ組合セルト多クハ第一^{母字}
條件式ト成立ガ不可能デアルト思ハレ原理的ニ核分裂ノ連鎖^{母字}反應ノ可
能性ノ否定サレタ結果トナツテ来ル。

ソコデ我々ハコノ^{熱中子}第一條件ノ成立スルヤ否ヤヲ明確ニスルタメニ更メテ σ_C^U ノ測定ヲ行ツタノデアル。以下報告スル如ク本實驗ニ於テ得タ測定結果ハ

$$\sigma_C^U = (4.0 \pm 2.1) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

トナツタ。コレヲ前ニ吾々ノ得タ

$$\nu \times \sigma_f^U > (4.8 \pm 3.0) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

トヲ使ヘバ

$$\nu \times \sigma_f^U / \sigma_C^U = 1.2$$

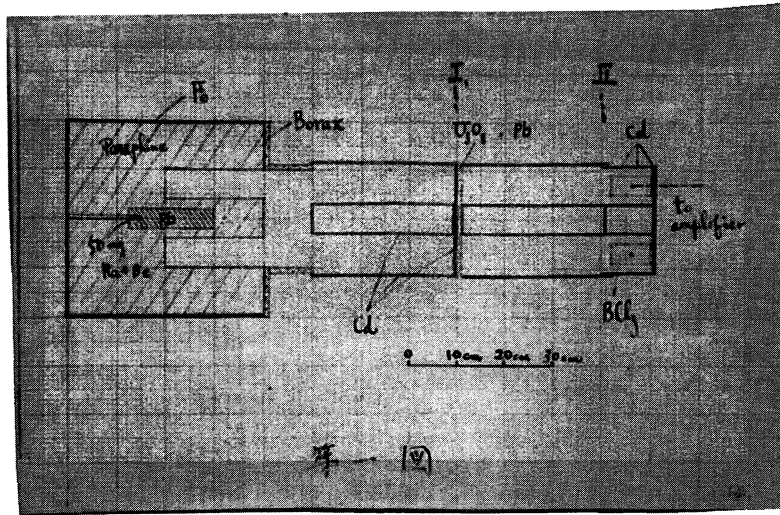
ナル結果トナリ、從ツテ核分裂ノ連鎖^{熱中子}反應ノ第一條件ハ満足成立セル結論ヲ得タノデアル。

猶、コノ σ_C^U ノ測定ニイテ於テハ他ノ多クノ研究者ハ先ヅ熱中性子ニ対スルウラニウム原子ノ總衝突断面^{熱中子}積 σ_{tot}^U ヲ求め更ニ別ニソノ散乱断面^{熱中子}積 σ_{scatt}^U ヲ測定シテ $\sigma_C^U = \sigma_{tot}^U - \sigma_{scatt}^U$ ヲヨリ σ_C^U ヲ得テキルノデアルガ我々ハ光デ σ_{tot}^U ヲ測リ更ニ熱中性子ニ対シテハ散乱ノミ行ヒ吸収ヲ行ハザル鉛⁽²¹⁾⁽²³⁾ニ対スル σ_{tot}^U ヲ測定シ次ニウラニウム及ビ鉛資料ノ位置ヲ變ヘ異ツタ位置ニ於ケルソレゾレノ見掛ケ總衝突断面^{熱中子}積ヲ測定、比較シテ σ_C^U ヲ求めタノデアル。即チ σ_{scatt}^U ノ測定ヨリ推定スル事ヲセズ鉛ヲ仲介シテ直接 σ_C^U ヲ得タ所ニ新シイ試ミガアルト思ハレル。

更ニ σ_{tot}^U ノ値ハ熱中性子ノウラニウム中ノ平均自由行路ヲ決定スルモノトシテ、核分裂ノ連鎖^{熱中子}反應ノ考察ニ重要ナモノデアリ多クノ人々ニヨツテ測定サレタモノデアル。此所ニ得タ値ハソレ等ノ測定ト良ク一致スルモノデアル。

實驗方法

實驗・幾何学的條件ハ第一^{熱中子}図ノ如キモノデアル。即チ半徑 20cm ノパラフィン中性子砲ノ内部ニ蔵メラレタ 50mg



Ba + Be 中性子源ハ大略平衡ナ中性子束ヲ射出スル。コノ中約 10%ハ熱中性子デアル事ハ簡單ナル測定ニヨリ既ニ知ラレル。(此ノ際 Ra ヨリ出ル γ 線ニヨル係数ヘノ影響ハ中性子砲中ノ厚サ 15cm ノ鉛塊ニヨリ殆ンド除カレル。) 熱中性子ノ検出ニハ既ニ前ニ報告セシ通り BCl_3 瓦斯約一気圧ニ封入セル有効体積 848 cm^3 ノドーナツ型 電離槽ニ道線型増幅器ヲ直結使用シタ。中性子砲ノ開口以外ノ前面ハ厚ガ 1cm ノ硼ニテ遮蔽シコレト厚ガ 1mm ノ Cd 板ヲ覆ヘル BCd 電離槽トノ間ハ厚サ 1mm ノ同心円塔ニテ包ミ熱中性子流ガ環状ノ部分ノミヲ通ル如クシテアル。コレ等ノ事ニヨツテ測定ノ幾何学的條件ハ非常ニ良クナツテキル。實驗ニ於テハ BCl_3 電離槽ヲソノ前面カラ中性子砲ノ前面マデ 70cm 離シテ置キ、夫々 1762gr U_3O_8 及ビ 2000gr Pb 試料ヲ厚サ 0.5mm

ノ薄鉄板容器ニ入レ (試料面積共ニ 529cm²) コレヲ必要ニ應ジ電離槽ヨリ 30cm ノ所 (コレヲ I ノ位置ト名付ケル) 及ビ電離槽直前 (II ノ位置ト名付ケル) ニ置イテ 中性子強度ヲ計数スル方法ヲ用ヒタノデアアル。

I ノ位置ニ於テ、U₃O₈ 及ビ Pb 試料ヲ厚サ 1mm Cd 遮蔽板ノ有無ニツイテ熱中性子ヲ照射シ、ソノ透過度ヲ測定スル事カラ熱中性子ニ対スル各試料ノ總衝突断面積ヲ得ル。更ニ II ノ位置ニ於テ、ソノ位置ニ於ケル見掛ノ總衝突断面積ヲ測定シ I ノ位置カラ値ノ変化ヲ知り鉛、熱中性子ニ対シテハ散乱ノミ行ヒ吸収ハ伴ハレザルト云フ事カラ⁽²¹⁾⁽²³⁾ U₃O₈ ニ対スル熱中性子ノ捕獲ノ断面積ノ測定値ヲ得タノデアアル。即チ I ノ位置ニ於テ試料容器ト同ジ薄鉄板注入アルトキノ中性子計数ノ Cel 板ノ有無ノ差ヨリ I ノ位置ニ於ケル熱中性子数強度 N_I ヲ得ル。次ニ U₃O₈ 試料ノアルトキノ中性子計数ノ Cd 遮蔽板有無ノ差ヨリ、試料 U₃O₈ ヲ透過セル熱中性子強度 N_I^U ヲ得ル。同様ニ Pb ノ場合ノ熱中性子強度ヲ N_I^{Pb} トスル。但シ各試料ヲ通過セル後ノ中性子ハ試料容器ノ後方ノ薄鉄板ノ影響ヲ受ケルカラ、コレ等ハ眞ノソノ場合ノ透過熱中性子強度ヲ與ナイ。コレヲ補正スルタメニ I ノ位置ニ薄鉄板 1 枚置キ (計 2 枚) ソノ場合ノ熱中性子強度 N_I^{Fe} ヲ測定スル。コレヨリ、眞ノ各試料透過熱中性子強度ハ

$$N_I^U = \frac{N_I}{N_I^{Fe}} \cdot N_I^U \quad , \quad N_I^{Pb} = \frac{N_I}{N_I^{Fe}} \cdot N_I^{Pb}$$

トナル事明カデアアル。

今、U₃O₈ 及ビ Pb ノ總原子数ヲ知. n^U 、 n^{Pb} トシ試料面積ヲ A トスレバ、U₃O₈ 及ビ Pb ニ対スル熱中性子總衝突断面積 σ_{tot1}^U σ_{tot1}^{Pb}

ハ夫々次ノ式ヨリ得ラレル。

$$\begin{aligned} N_1^U &= N_1 e^{-\sigma_{tot1}^U \times n^U / A}, & \therefore \sigma_{tot1}^U &= \frac{A}{n^U} \log \frac{N_1}{N_1^U} \\ N_1^{Pb} &= N_1 e^{-\sigma_{tot1}^{Pb} \times n^{Pb} / A}, & \therefore \sigma_{tot1}^{Pb} &= \frac{A}{n^{Pb}} \log \frac{N_1}{N_1^{Pb}} \end{aligned}$$

次ニIIノ位置ニ於テ同様ニIIノ位置ニ於ケル見掛ノ總衝突
断面積 $\sigma_{tot2}^U, \sigma_{tot2}^{Pb}$ ガ測定出来ル。

サテ、Pbハ熱中性子ニ対シ散乱ノミ行ヒ、吸収ヲ行ハザルモノト
思ハレル事⁽²¹⁾⁽²³⁾ヨリ上ニ得タ各總衝突断面積ハ次ノ如ク書ク事ガ出来ル。

$$\begin{aligned} \sigma_{tot1}^U &= \sigma_{cap}^U + k_1 \sigma_{scatt}^U, & \sigma_{tot1}^{Pb} &= k_2 \sigma_{scatt}^{Pb} \\ \sigma_{tot2}^U &= \sigma_{cap}^U + k_2 \sigma_{scatt}^U, & \sigma_{tot2}^{Pb} &= k_2 \sigma_{scatt}^{Pb} \end{aligned}$$

但シ σ_{cap}^U ハ熱中性子ニ対スル U_3O_8 原子核ノ示ス捕獲断面積

$\sigma_{scatt}^U, \sigma_{scatt}^{Pb}$ ハ熱中性子ニ対スル U_3O_8 原子及ビPb原子ノ散乱
断面積 k_1, k_2, k ハ夫々、幾何学的條件ニヨツテ決定スル常数デア
ル。上式ヨリ容易ニ

$$\sigma_{cap}^U = \frac{\sigma_{tot1}^{Pb} \sigma_{tot2}^U - \sigma_{tot2}^{Pb} \sigma_{tot1}^U}{\sigma_{tot1}^{Pb} - \sigma_{tot2}^{Pb}}$$

ヲ得ル。又 $\sigma_{tot1}^U, \sigma_{tot1}^{Pb}$ ハIノ位置ノ幾何学的條件ノ良イ事カラ
 $k_1 = 1, k = 1$ デアリ Iノ位置デ測定サレタ總衝突断面積ハ眞ノ總衝
突断面積ト見テヨイ。カクシテ 上記實驗方法ニヨツテ各断面積ガ得ラレル
ノデア
ル。

此ノ實驗デハ比例増幅器ノ電源ニハ十分満足ナ Gingrich 式電圧
安定装置ヲ持ツ交流電源ヲ用イタ。測定中ハ中性子計数電離槽ニ
平衡シテ増幅器ニ附セル α 計数管ニ標準酸化ウラニウムノ α 源ヲ用イテ
常ニ増幅感度ノ一定ヲ保ツ様調整ヲ行フト共ニ上記熱中性子強度
 $N_1, N_1^U, N_1^{Pb}, N_1^{Fe}$ 等ハ常ニ一分毎ニ交互ニ計数シ上記 注意ニモ

拘ラス 起ル 増幅器感度ノ動揺ニヨル影響ヲ避ケル様努力シタ。
 猶、中性子計数ハカ ル一分計数ヲ合セテ十分計数トシテ表ハシタ。カクシ
 テ得ラレル コレラ十分計数值トシテノ各中性子強度ノ平均ハ多クノ回(ママ)
 数ノ測定ニ対シ何レモ 2%以下ノ測定誤差ヲ持ツニ過ギナイ。

実験値

上記 実験方法ニヨツテ得ラレタ、Iノ位置ニ於ケル每十分中性
 子計数ハ第一表ノ如クdealル。

試料	Cd 無	Cd 有	差 (熱中性子)
無シ (Fe 一枚)	1023±4	379±2	644±4 = N_1
U ₃ O ₈	862±3	371±4	491±4 = N_1^{U}
Pb	901±4	364±2	537±5 = N_1^{Pb}
Fe(Fe 計二枚)	993±3	382±2	611±4 = N_1^{Fe}

第一表

熱中性子ニ対スル酸素原子總衝突断面積 $\sigma_{tot}^O = 3.3 \times 10^{-24} cm^2$ ⁽²⁰⁾
トスレバ熱中性子ニ対スルウラニウム原子核總衝突断面積及ビ鉛
原子核ノ總衝突断面積ハ夫々

$$\sigma_{tot}^U = (22.5 \pm 0.5) \times 10^{-24} cm^2$$

$$\sigma_{tot}^{Pb} = (11.4 \pm 0.3) \times 10^{-24} cm^2$$

トナル

コレ等測定結果ヲ他ノ研究者ノ観測値ト比較シテ表ニ示スト次
ノ如シ。

試料	σ_{tot}	σ_{scatt}	σ_{cap}	
U(metal)+	23.1±0.5	12±3	11±3	Whittaker 等 ⁽¹⁷⁾
U(metal)	23.3±0.5			Dunning
U(U ₃ O ₈)	20±2			Goldsmith 等 ⁽¹⁹⁾
U(U ₃ O ₈)	22±3	20±5	2±4	Reddemann 等 ⁽¹⁴⁾
U(U ₃ O ₈)	22.5±0.5	18.5±2.1	4.0±2.1	Arakatsu. Hanatani Kimura.
U(U ₃ O ₈)			3.2	Fermi ⁽¹⁰⁾ 等 ⁽¹¹⁾
U(U ₃ O ₈)			5	Anderson 等 ⁽⁹⁾
U(U ₃ O ₈)			5.9	Michiels 等 ⁽¹⁵⁾
U(U ₃ O ₈)			9.6	Hagiwara ⁽¹⁶⁾
Pb	8.6			Dunning 等 ⁽²⁰⁾
Pb	12.5			Goldhaber 等 ⁽²¹⁾
Pb	9.2			Mitchell 等 ⁽²²⁾
Pb	11.4±0.2			Arakatsu. Hanatani Kimura

上ノ値ヲ用ヒルト各場合ニ於ケル熱中性子強度次ノ如シ。

$$\begin{aligned} \text{照射熱中性子強度} \quad N_1 &= 644 \pm 4 \\ \text{U}_3\text{O}_8 \text{透過熱中性子強度} \quad N_1^U &= \frac{N_1}{N_1^{Fe}} \cdot N_1^U = 510 \pm 6 \\ \text{Pb 透過熱中性子強度} \quad N_1^{Pb} &= \frac{N_1}{N_1^{Fe}} \cdot N_1^{Pb} = 567 \pm 8 \end{aligned}$$

$$\text{又 } \text{U}_3\text{O}_8 \text{ 1762 gr ノ U 原子数 } n^U = 38.5 \times 10^{23}$$

$$\text{U}_3\text{O}_8 \text{ 試料面積} \quad A = 529 \text{ cm}^2$$

ノ値ヨリ熱中性子ニ対スル I ノ位置ニ於ケル U_3O_8 總衝突断面積

σ_{tot1}^U ハ

$$\sigma_{tot1}^U = \frac{A}{n^U} \log \frac{N}{N_1^U} = (31.3 \pm 0.5) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

ヲ得ル。コノ値ハ二年前著者等ガ豫報的ニ測定セシ値

$(41 \pm 5) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ヨリハ著シク精化サレタモノデアル。

$$\text{又 Pb 2000 gr ノ Pb 原子数 } n^{Pb} = 58.6 \times 10^{23}$$

$$\text{Pb 試料面積} \quad A = 529 \text{ cm}^2$$

ノ値ヨリ熱中性子ニ対スル I ノ位置ニ於ケル Pb 總衝突断面積

σ_{tot1}^{Pb} ハ

$$\sigma_{tot1}^{Pb} = \frac{A}{n^{Pb}} \log \frac{N}{N_1^{Pb}} = (11.4 \pm 0.2) \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

トナル

次ニ II ノ位置ニ於テ次ノ如キ毎 10 分計数ヲ得タ。

コレ等ノ値ヨリ II ノ位置ニ於ケル各熱中性子強度 次ノ如シ

$$\begin{aligned} \text{照射熱中性子強度} \quad N_2 &= 651 \pm 6 \\ \text{U}_3\text{O}_8 \text{透過熱中性子強度} \quad N_2^U &= \frac{N_2}{N_2^{Fe}} \cdot N_2^U = 557 \pm 9 \\ \text{Pb 透過熱中性子強度} \quad N_2^{Pb} &= \frac{N_2}{N_2^{Fe}} \cdot N_2^{Pb} = 600 \pm 10 \end{aligned}$$

試料	Cd 無	Cd 有	差 (熱中性子)
無シ (Fe 一枚)	1031±5	380±5	651±6=N ₂
U ₃ O ₈	912±6	371±5	541±8=N ₂ ^U
Pb	951±6	369±5	582±8=N ₁ ^{Pb}
Fe(Fe 計二枚)	1012±6	380±5	632±8=N ₂ ^{Fe}

第二表

コレ等ノ値ヨリ I ノ位置ノ場合ト同様ニシテ II ノ位置ニ於ケル各見掛ノ總衝突断面積

$$\begin{aligned}\sigma_{tot_2}^U &= (21.4 \pm 0.4) \times 10^{-24} \text{cm}^2 \\ \sigma_{tot_2}^{Pb} &= (7.2 \pm 0.2) \times 10^{-24} \text{cm}^2\end{aligned}$$

ヲ得ル。 上ニ得タ各總衝突断面積ヨリ熱中性子ニ対スル U₃O₈ 捕獲断面積 σ_{cap}^U ヲ得ル。 即チ

$$\begin{aligned}\sigma_{cap}^U &= \frac{\sigma_{tot_1}^{Pb} \cdot \sigma_{tot_2}^U - \sigma_{tot_2}^{Pb} \cdot \sigma_{tot_1}^U}{\sigma_1^{Pb} - \sigma_2^{Pb}} \\ &= (4.3 \pm 2.1) \times 10^{-24} \text{cm}^2\end{aligned}$$

コノ値ハ酸素ヲモ含ムモノデアルガ熱中性子ニ対スル酸素原子捕獲断面積 $\sigma_{cap}^O = 0.1 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ⁽²³⁾ トスレバ熱中性子ニ対スルウラニウム原子核捕獲断面積 σ_C^U ハ

$$\sigma_C^U = (4.0 \pm 2.1) \times 10^{-24} \text{cm}^2$$

ヲ得ル。

猶 I ノ位置ニ於ケル總衝突断面積 $\sigma_{tot_1}^U$, $\sigma_{tot_1}^{Pb}$ ハ幾何学的條件カラ眞ノ總衝突断面積ヲ與ヘルモノト思ハレルモノデアルガ

吟味

コノ実験ニオイテ得ラレタ $\sigma_{tot}^U, \sigma_{tot}^{Pb}$ ハ大体他ノ観測値ト一致スルガ、 σ_C^U ノ値、 $(4.0 \pm 2.1) \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ハコレヲ σ_f^U ト σ_a^U ノ和トシテ、 σ_f, σ_a ヲ別々ニ測定シテ得ラレタ他ノ研究者ノ與ヘシ σ_C^U ノ値ヨリ少シ大デ、直接観測サレタ他ノ観測者ノ測定値ヨリハ一般ニ小トナツテキル。

此ノ実験ノ結果前ニ我々ノ観測セル $\nu \times \sigma_f^U = (4.8 \pm 3.0) \times 10^{-23} \text{cm}^2$ ヲ用ヒルト、ウラニウム原子核ノ毎熱中性子捕獲ノ際 放出サレル中性子数

$$\nu \times \sigma_f^U / \sigma_C^U = \frac{4.8}{4.0} = 1.2$$

トナリ更ニ実数均一 U_3O_8 ニタイスル $\sigma_{cap}^U = (4.0 \pm 2.1) \times 10^{-24} \text{cm}^2$ ヲ用ヒテモ尚

$$\nu \times \sigma_f^U / \sigma_{cap}^U = \frac{4.8}{4.3} = 1.1$$

トナル。

故ニ此ノ測定結果ヨリ核分裂連鎖^{反応}ノ第一条件ヲ成立セル事ヲ見タノデアル。然シ更ニコノ新タニ放出サレタ 1,2 個ノ速中性子ガ熱エネルギーマデ減速サレル間ニ 25 volts 所迫デ起ル強イ共鳴吸収(核分裂ヲ伴ハザル)ノ為ニ消滅シ、1 個ヨリ以下ニナレバ事実上連鎖^{反応}ハ起ラナイノデアル。コレガ 1 個以下ニナラナイタメニハ ソノ共鳴吸収帯ヲ通過スルトキソノ 84% 以上ガ無事通過シテ熱エネルギー域ニ達ス必要ガアル。コノ通過度ハ直接実験及ビ 共鳴エネルギー、共鳴吸収断面積ノ大サ 吸収帯

ノ幅等ノ知識ヨリ計算ニヨツテ得ラレルガ、實際多クノ研究者ノ直接測定ノ結果通過度トシテ

(84 ± 3) %	Joliot 等 ⁽¹²⁾
80 %	Anderson 等 ⁽¹³⁾
85 %	Perrin ⁽⁶⁾

ヲ得テキル実状デアアル。コレラノ数值並ニ上ニ我々が得タ結果ヨリ結論トシテ實際上連鎖反応ハ起リ得ナイトハ断言出来ナイ。此ノ事ハ一、前ニ得タ $\nu \times \sigma_f^U$ ノ lower limit ノミヲ與ヘルト思ハレルカラデモアル。從ツテ今後、 $\nu \cdot \sigma_f^U$ ノ精密正確ナル測定ヲ行フト共ニ U ノ共鳴吸収係数散並ニ共鳴ノ幅等、正確ナル知識ヲ得ル事ガ重要トナルモノデアアル。又特ニ必要ナル事柄ハ中性子ノ逐時減速サレルニ当リ U²³⁸ ノ共鳴吸収帯ヲ通過スル狀況ニ関シ立入ツテ研究ヲ行フ事デアアル。

最後ニ本研究ヲ遂行スルニ当リテ海軍技術研究所研究費並ニ文部省特別科学研究費ニ負フ所多カッタ。又、中性子源ハ研究者ノ一人(荒勝)ガ畏友故黒田秀博氏ヨリ受ケン好意ニヨルモノデアアル。尚本研究ノ実験ニ際シテハ理学士堀重太郎氏研究学生高井宗三氏ノ助ケヲ得タ。コゝニコレ等イズレニ對シテモ甚深ノ感謝ヲ表ス次第デアアル。

文 献

- (1) O. Hahn and F. Strassmann,
Naturwiss, 26 (1938) 735
- (2) D. H. T. Gant,
Nature, 144 (1939) 202
- (3) B. Arakatsu, K. Kimura, M. Sonoda, K. Muraoka,
S. Shimizu and A. Uemura,
Prac. Phys-Math. Soc. Japan, 23 (1941) 631
- (4) H. von. Halban. Jr. , Fjoliot and L. Kowarski,
Nature, 143 (1939) 470
- (5) S. Flügge,
Naturwiss, 27 (1939) 402
- (6) F. Perrin, C. R., 208 (1939) 1394, 1573
- (7) M. F. Adler, C. R., 209 (1939) 301
- (8) K. Kimura and T. Hanatani,
unpublished
- (9) H. L. Anderson, E. Fermi and H. B. Hanctein,
Phys. Rev. , 55 (1939) 797
- (10) H. L. Anderson, E. T. Booth, J. R. Dunning, E. Fermi,
G. N. Glasoe and F. G. shack,
Phys. Rev, 55 (1939) 511
- (11) H. L. Anderson and E. Fermi,
Phys. Rev. , 55 (1939) 1106
- (12) H. Von. Halban, Jr. , Fjoliot and L. Kowarski,
Nature, 143 (1939) 680
- (13) H. L. Anderson, E. Fermi and L. Sziland,
Phys. Rev, 56 (1939) 384

- (14) H. Reddemann and H. Boke,
Naturwiss, 27 (1939) 518
- (15) J. L. Michiels, G. Parry and G. P. Jhonson,
Nature, 143 (1939) 760
- (16) T. Hagiwara, Mem. Coll. Sc. Kyoto. Imp Univ. ,
23 (1940)
- (17) M. D. Whittaker, C. A. Darton, W. C. Bright and
F. J. Murphy,
Phy. Rev. , 55 (1939) 793
- (18) B. Arakatsu, K. Kimura and T. Hnatani
unpublished
- (19) H. H. Goldsmith, V. W. Cohen and J. R. Dunning,
Phys. Rev. , 48 (1939) 265
- (20) J. R. Dunning, G. B. Pegiam, G. A. Fink and D. P. Mithell,
Phys. Rev. , 48 (1939) 265
- (21) M. Goldhaber and Brigrgr,
Proc. Rov. Soc. 162 (1939) 127
- (22) A. C. G. Mitchell, E. J. Murphy, L. M. Langer,
Phys. Rev. , 49 (1936) 453
- (23) M. Kikuchi, Proc. Phys-Math. Soc. Japan,
18 (1936) 188

金属ウラン製造法

戦時研究 F研究

昭和20年7月21日

京都帝國大學教授
研究員 岡田辰三

金属ウラン製造法
戦時研究 F研究
京都帝國大學教授 研究員
岡田辰三

(1) 研究目的

邦化ウラン製造原料トシテノ金属ウラン粉末ヲ工業的ニ製造スルニアリ。

(2) 研究成果

ウラン化合物又ハウラン酸化物ヲ原料トナシ、 $5KF \cdot UO_2F_2$ ヲ經テ KUF_5 ヲ温式法ニテ造リ、コノモノノ熔融塩ノ電解ヲ行ヒテ、電流効率 60 ~ 65% 程度ニテ連續的ニウラン金属粉末ノ製造可能ナル事ヲ確メタリ。

(3) 研究ノ詳細

金属ウランヲ得ル為ニコレ迄 UCl_4 、 UO_2 等ヲ Na、Ca、又ハ C 等にて還元ヲ行ヒタルモ、最モ優レタル方法ハ熔融塩ノ電解ト思考シテ次ノ方法ヲ採用セリ。

(イ) 原料 KUF_5 ノ製造

硝酸ウラン $[UO_2(NO_3) \cdot 6H_2O]$ (U 含有量 47.4%) 100gヲ
ヲ 400 cc ノ水ニ溶解シ、之ニ KF 92g (理論値ノ約 1.7 倍)
ヲ 300 cc ノ水ニ溶カシタル液ヲ加へ、 $5KF \cdot 2UO_2F_2$ ヲ沈殿

セシム。

コレヲ濾過冷水ニテ洗滌シタル後、熱水約1立ニテ再ビ溶解セシメタル後、蟻酸200ccヲ加ヘテ太陽光線ニ當テル。還元反應ガ進行スルニ從ツテCO₂ノ気泡ヲ生ジ、反應ハ進ミKUF₅ノ沈殿ヲ生ズ。反應終了後モ、尚液ガ黄色ヲ呈スルナラバ、更ニ蟻酸ヲ添加シテ日光ニ晒シ、全部KUF₅ノ沈殿ハ100℃ニテ乾燥ス。KUF₅ノ取得量ハ92%程度ナリキ。

(ロ) 電解工程

電解槽トシテハ、ペークライトヲ浸マセテ焼成セル黒鉛坩堝ヲ使用ス。大サハ内径6cm、深サ13cm、厚サ1cmノモノデアル。陽極トシテ坩堝ヲ使用シ、陰極トシテハ、モリブデン板ヲ使用シ、陰極ノ電流密度ハ100~150 am/dm²トセリ。電解浴トシテハ、NaCl 200g、CaCl₂ 180g = KUF₅ 30gヲ溶解セリ。電解條件トシテハ、温度770~780℃、電解電圧5V、10Aニテ大体30~45分毎ニ電解シテ陰極ヲ引キ上げ、次ニKUF₅ヲ補充シテ電解ヲ繼續スル工程ヲ取リタリ。

(ハ) 熔剤ト共ニ引キ上げタル陰極ハ冷後、水中ニテ溶剤ヲ溶解シ、比重ニテ酸化物、炭素粉ト分離シ、後5%CH₃COOHニテ洗ヒ再ビ水ニテ洗滌シ、浮遊物ヲ除キ、注意シテ乾燥ス。10A、30分間ニテ毎回6~7grノ金属粉末ヲ得タルニ就キ、電流効率ハ60~65%ナリキ。

(二) 金属粉末ノ純度

試料金属ヲ硝酸ニ溶解シ、 NH_4Cl ト NH_4OH ニテ沈殿セシメ
灼熱 (800~ 900°C ニテ 2時間) 後、 U_3O_8 トシテ秤量セル
結果ハ下表ノ如シ。

	Metal-U 採取量	U_3O_8	U 純度
No.1	0.20470	0.23395	96.9%
No.2	0.31010	0.35480	97.0%
No.3	0.35436	0.35437	99.5%

又、同試料ヲ真空中ニテ秤量シ、後、酸素ニテ酸化シ、真空中
ニテ秤量ナシテソノ酸化物トセシ酸素増量ヨリ試料金属粉末ノ
純度ヲ檢シタルニ、上記化學分析ト試料番号ノ同一ノモノニ
就キ、下記ノ如キ結果ヲ得タリ。

	酸化物ノ色	採取量	脱着量	酸化物中 ノ U	酸素含量 (採取量基準)
No.1	灰綠色	0.0918g	7.19%	0.0772g	9.39%
No.2	//	0.0960g	-4.583%	0.0881g	8.23%
No.3	//	0.0924g	-6.06%	0.0893g	3.36%

(4) 今後ノ方針

今少シ大キナ坩堝ヲ使用シ、瓦斯炉ニテ加熱シ電解ヲ行ヒ、金
属ウランヲ多量ニ造リ、工業的製造ノ指針ヲ得ントス。
且、浴組成並ニ金属粉末ノ純度向上ニ尚一段ノ研究ヲ進メン

トス。

昭和 20 年 7 月 21 日

[完]

博士論文梗概

第2次大戦期日本の科学技術動員に関する分析

—旧日本海軍の電波兵器開発過程を事例とした—

On the Japanese Mobilization of Science and Technology in the World War II

- A Case Study: Japanese naval radar -

河村 豊

Kawamura Yutaka

1. 解説

本論文は、2001年11月に学位認定された学位申請論文「旧日本海軍の電波兵器開発過程を事例とした第2次大戦期日本の科学技術動員に関する分析」を要約したものである。主として同論文の序論および各章の小括を利用した。したがって、詳細な内容に関しては本体の論文およびこの論文作成のために発表された主要論文をご参照いただきたい。

2. 研究の背景

第2次世界大戦中に、電波兵器、核兵器、生物化学兵器など物理学や化学、生物学の知識を応用した各種の新型兵器が開発され、これら新型兵器開発を促進するために、従来までの新技術開発方式とは異なる新しい方式が、日本を含むアメリカ、イギリス、ドイツなどで実施された。例えば、物理学の知識を利用する電波兵器や核兵器などの場合、既知の科学知識を応用するという手法に止まらず、開発に必要な工学的原理を解明する必要から、研究者に特定の基礎研究を実施させる対策が取られ、また短期間に開発する必要から、計画的で大規模な開発体制が組織された。新兵器開発に向けたこうした新しい方式は、兵器開発における科学者動員や戦時研究動員、科学技術動員あるいは戦時研究開発などと表現され、戦時中の兵器開発のあり方を示す特徴として、さらに戦前の科学研究制度を組み替える起源や戦後のプロジェクト型研究開発の起源を知る特徴として近年、注目されてきている。

日本の場合では、戦時中に電波兵器や核兵器を開発するために、物理学者などを動員する特殊な兵器開発方式が取られた。しかし兵器開発そのものの成功には直接にはつながらなかったことや、敗戦後に軍の兵器開発組織が解体されたことなどの理由で、日本の戦時科学研究および技術開発の動員形態には、これまで強い関心は払われてこなかった。一部には戦時期における各種の開発体制、人材養成、工業技術などが戦後復興期の日本に役割を果たした点、戦時中の技術開発のあり方が戦後日本の技術開発や科学技術政策などを形作る歴史的条件となった点、生物化学兵器や原爆などの非人道的兵器とされる技術開発の実態を明らかにする点などの関心から、戦時中の日本における兵器開発について分析が行われている。しかし、これまでの歴史研究では、敗戦直後に連合国側が行った技術調査や開発を担当した旧軍事技術者らの証言資料や見解をもとに、旧日本陸海軍の上層部が非合理的な判断をおこない開発の妨害となったことや、各省庁や陸海軍が縦割り組織に固執して統合的な開発組織を機能させなかったという側面が強調されてきた。したがってこうした議論には、回想録などの資料に頼り過ぎているという実証面での弱点に加え、技術開発能力を高めるためには中央統制型の技術行政組織の設置が唯一の方法であるとの前提を単純に日本に当てはめるなど、分析視点の面でも弱点が存在している。技術開発能力を短期間

に拡大させ、具体的な成果を生み出すための対策は、その国ごとの歴史的な条件や戦時下の人員、物資などの条件で決まるもので、アメリカと単純に比較を行うことや、単なる理想型を探求した議論では歴史分析にはならないだろう。したがって、戦時期の科学研究や技術開発の特徴を評価するためには、まず日本の戦時期における新兵器開発が具体的にどのように実施され、どのような戦時対策が取られたかについて実証的に明らかにすることが必要である。さらにこうした実証分析を踏まえて、戦時中の日本の科学研究や技術開発に関する特徴を議論することが必要となる。

こうした問題意識を基に、本論文では、戦時中の新兵器開発の事例として、旧日本海軍の電波兵器開発、主としてレーダー開発について取り上げた。日本のレーダー開発は陸軍でも行われたが、海軍は当時の同盟国であったドイツでさえ行っていなかったマグネトロン利用のマイクロ波レーダーを開発し、そのために核物理学者を動員した。この点は、新兵器開発に見られる科学者動員の特徴を分析するための典型事例として利用できる。さらに海軍のレーダーに関する新資料を初めて本格的に利用できたことも、この事例を選んだ理由の1つである。新たに発見した資料の内、特に財団法人史料調査会（東京都品川区上大崎）が所蔵してきた旧海軍技術研究所電気研究部関係の技術資料類は、海軍のレーダー資料としては極めて重要な資料群であり、本研究によって初めて公開されたもので、本研究にとっても資料面で不可欠の要素となっている²⁾。

3. 関連する研究史の検討

以下、本研究分野に関わる従来までの研究を検討し、本論文で取り扱う研究課題を示すことにしたい。

(1) 科学技術動員の制度史についての検討

①中央研究機関の考察

戦時中の日本の科学技術動員体制に対する最初の考察は、合衆国科学情報調査団（通称コンプトン調査団）の調査に基づいて行われた³⁾。陸海軍および技術院、大学、その他の研究機関に対し、主として12項目についての研究開発状況を調査した⁴⁾。こうした調査の結果として下された評価は、陸海軍と民間の科学者とを結ぶ適切な研究連絡機関あるいは研究行政機関がなく、技術院はその機関としての機能を果たさず、結果としてその成果もアメリカに比べ見劣りするものであったという⁵⁾。ここで示された内容は、日本の研究開発結果や潜在的能力を評価するものというより、新兵器開発を遂行した研究開発組織の機構そのものへの評価に絞っている。その背景には、個々の兵器に関する技術情報は、合衆国陸軍の調査団⁶⁾、合衆国海軍の調査団⁷⁾、極東空軍の調査団⁸⁾、さらに戦略爆撃調査団⁹⁾、などがそれぞれ調査・収集していることがある。したがって、コンプトン調査団は、研究開発組織、主としてアメリカ合衆国で設置されたOSRDに相当する組織の割り出しとその機能分析を行ったもの評価できる。また、日本の陸海軍部の独自の対応とそれによる科学技術への無理解という日本軍部批判という役目も果たしている¹⁰⁾。しかしこれは、新兵器開発の中心には、軍部研究機関と外部の研究機関とを結ぶ協力機関や中央統制機関の存在が不可欠であったという前提に立った評価でもある。歴史方法論からみれば、研究開発能力の中央統制機関還元論ともいえる。研究開発推進において中央統制機関方式が唯一の制度ではないことは、戦後のアメリカの科学技術政策を見ても今日では明らかとなっている¹¹⁾。それゆえ、当時の日本がどのような独自の体制で新兵器研究開発を行ったのかという実態を明らかにする課題が残っている。

②科学者動員と科学体制化論

1973年に発表された広重徹『科学の社会史—近代日本の科学体制』は、明治以降の近代日本の科学体制を論じ、その中で1930年代から戦時期にかけての、日本学術振興会、や文部省科学研究費、科学動員計画要綱さらに決戦体制化の科学動員などについて総括的に論じ、科学者の側から科学動員の意味を分析している。興味深い分析視角としては、戦前、戦中の科学動員に関して、それまでの大学等の研究体制が合理化・近代化され、戦後の学術体制発足に大きな影響を与えたと論じている部分である¹²⁾。しかし、科学活動が現存の社会体制に全面的に依存し、規定されると唱える「科学の体制化」論は、科学活動の部分を制度面だけの考察から検討した限界として批判する必要がある。

③科学技術動員体制に関する近年の研究成果

1980年代後半以降、戦時中の科学技術動員に関わる新たな資料が公開され、これまで当事者の体験的資料に寄りかかっていた議論が、ようやく実証的な研究に進展することになった。年代順にみると、大淀昇一『宮本武之輔と科学技術行政』（1989年）では、企画院の科学技術動員行政に関わった宮本武之輔を通して、科学技術新体制確立要綱の成立過程を明らかにしている¹³⁾。また、山崎正勝「わが国における第二次世界大戦期科学技術動員」（1994年）および、YAMAZAKI, Masakatsu, “The Mobilization of Science and Technology during the Second World War in Japan”（1995年）では、元技術院総裁であった井上匡四郎の新たに公開された文書を用いて、技術院を中心とした科学技術動員の実施状況を実証的に明らかにしている¹⁴⁾。さらに、永野宏・佐納康治「学術研究会議第1部の戦時研究班」（1997年）では、学術研究会議の中に戦時中に設置された戦時研究班の活動を個別的ではあるが検討している¹⁵⁾。市川浩『第二次世界大戦期における日本の戦時科学技術研究の実態に関する実証的研究』（1999年）¹⁶⁾ および田中浩朗「研究動員会議と「戦時研究」」（1999年）同、「技術院の「科学技術総本部構想」」（2000年）¹⁷⁾では、技術院を中心とした戦時研究の課題や新たに設置された研究動員会議の活動を実証的に明らかにしている。また関連する研究では、河原宏（1975年、1976年）¹⁸⁾ および沢井実（1991年、1994年）¹⁹⁾ もある。しかし、こうした成果にも関わらず、戦時期における科学技術動員で大きな役割を果たしたとみなせる軍部の技術開発さらに研究者動員を含む科学技術動員との関連が検討されていないため、当時の科学技術動員活動全体における技術院、研究動員会議などの活動の意味、役割が不明なままとなっている。戦時中の軍部の技術開発、科学技術動員の実施に関する実証的な研究を行う意義がここにある。

（2）兵器開発史

①開発当事者による技術調査、回想記

日本敗戦時にアメリカを中心とした技術調査団が行った活動と平行して、旧陸海軍の技術系士官らによる技術調査も行われた。例えば、陸軍における航空技術²⁰⁾、化学兵器²¹⁾、海軍における造船技術²²⁾、造機技術²³⁾、電気技術²⁴⁾などの調査記録が残されている。これらの一部は、アメリカ軍の技術調査に関連した回答書、軍人の恩給算定のために作成された資料、また軍事技術の散逸を防ぐことを目的とした資料など、その目的は多岐に渡る。戦時中の資料の多くは焼却されたために、軍事技術に関わる一次資料に準じた価値をもつものもあるが、現場担当者の回想が多く、開発計画全体を見渡す記述や、外部研究者の活動を示す科学技術動員面での記述はきわめて少なく、また記述内容の根拠を示す資料提示に欠けている。

②戦史としての分析

防衛庁による戦史分析の中に兵器開発体制に直接触れた文献がある。防衛庁海上幕僚監部調査部『日本帝国海軍の研究ならびに開発（1925-1945）』（1956年）である²⁵⁾。海軍に限定してあ

るが、海軍技術研究所各研究部、海軍工廠内の各研究部、実験部、海軍技術廠の組織概要や、研究計画や開発研究の一覧、技術開発に関わる組織概要がまとめてある。また、防衛庁防衛研修所戦史室編『戦史叢書』の一部には、兵器開発に関わる考察が行われている部分がある²⁶⁾。ただし、その多くは、軍戦備から見た兵器開発および配備を解説したもので、技術開発の組織構造や実態に関わる分析は行われていない。

③科学者が参加した新兵器開発の歴史

軍部が開発した兵器の中で、特に大学所属の研究者等が基礎研究を通して参加した兵器については、近年になって実証的な研究が行われている。例えば生物兵器²⁷⁾、化学兵器²⁸⁾、原子兵器（原爆）²⁹⁾、電波兵器、あるいはペニシリン³⁰⁾、などの開発に関する実証的な調査・研究については、軍内部における開発過程が部分的ではあるが明らかにされつつある。ただし、これらの研究は、もっぱら開発現場における個別的部分の分析に限定されており、研究開発過程における研究者の動員形態やその運用実態などは、考察の対象とされていない。

(3) 電波兵器開発史

電波兵器は、第2次大戦が始まる直前にイギリスにおいて航空機の早期警戒用の電波装置（いわゆるレーダー）として開発された。日本では、当時の資料が不足していたことから、主として当事者による回想的記述を根拠に、電波兵器開発史が論じられてきた。主要な文献は、陸軍では、佐竹金次の記述および『日本無線史第9巻』³¹⁾、海軍では伊藤庸二、鮫島素直、松井宗明らの記述および『日本無線史第10巻』である³²⁾。さらに当事者等による資料収集活動³³⁾や、関係者等への聞き取り調査による記述がある。中川靖造の著作は多数の関係者らとのインタビューを踏まえて、海軍における電波兵器開発の実情を明らかにすることに成功している³⁴⁾。近年では、新しい資料を利用した研究も行われている。前島正裕は新たに公開された大野茂資料を元に、技術史からの海軍レーダー開発史を再開させた³⁵⁾。横山久幸は、防衛研究所図書館にある資料を縦横に使い、陸海軍のレーダー開発に関わるドイツ技術の影響を示した³⁶⁾。しかし、史料調査会資料などが新たに公開されたことをきっかけに、この分野の実証的な研究をさらに進展させることができる条件が生まれ、電波兵器全体を明らかにできる可能性が生まれた。

以下の項目では、4～5では海軍および政府の科学技術体制、6～9では海軍の電波兵器開発を事例とした科学技術動員の実態、10で全体の結論、という順序で、学位申請論文の第1章から終章までに対応させて、各章の要約を述べてゆく。

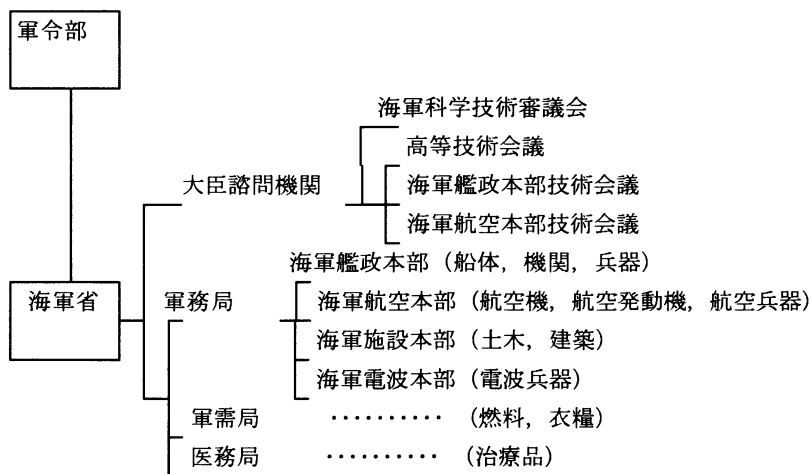
4. 電波兵器部門に見る海軍の科学技術組織の特徴

無線通信装置の開発から始まった海軍の電波兵器開発は、その兵器開発部門（ここでは科学技術実施部門と表した）の中心を、海軍技術研究所電気研究部におき、その兵器行政部門（ここでは科学技術行政部門と表した）を、他の兵器と同様に軍令部、海軍省軍務局におき、電気系技術に関しては主として艦政本部第三部が管轄していたことを分掌規定から確認できる（表1）。

戦時中における電波兵器開発能力の増大対策としては、行政部門として電波兵器開発のみを管轄する電波本部が短期間（1944年4月～45年2月）存在した他は、大きな変化はなかった。実施部門では無線通信部門から切り離された電波兵器のみを担当する電波研究部が海軍技術研究所に置かれたものの、外部研究者を取り込む対策ため人員動員制度などは作られることはなかった。一方、海軍技術研究所電気研究部における研究人材は、大きくは武官と文官に区分けられていた。武官の中では海軍内部で養成された兵科士官、機関科士官と帝国大学工学部で養成され卒

業後任官した技術科士官との違いがあり、後者は将校相当官と呼ばれた。また文官の中では大学や高等工業学校卒業後に海軍に入業して、技手(判任官)や技師(高等官)に採用される者、その他の出身から海軍に入業して実験員から実験工長などとなる工員から構成されていた。武官も文官もいずれも海軍が内部に抱える研究人材ということになる。

表 1) 海軍における科学技術行政組織の系統図 (1944年時点)



このように、制度面から海軍の技術開発組織を見ると、海軍の電波兵器開発組織は、外部に対しては閉鎖的な特徴を持ち、戦時中もこの制度が基本的には変更されることなく維持されていたことが分かった。また、電波兵器開発部門が艦政本部と航空本部とに分かれている点も、制度上において解決されることはなかった。このことから、戦時中に電波兵器開発の能力を急速に高めようとするれば、政府による人員動員制度を利用するか、あるいは既存制度の拡大運用を進めるかのどちらかとなる。

5. 政府による科学技術動員体制の概要

1939年から1940年までの時期における科学技術動員体制は、研究の国家管理を目指した企画院方針を通して、主として総動員試験研究令(1939年9月公布)により具体的な実現をみた。第1の特徴は、命令発令者の範囲には文部省が加わらず、またその命令受託者の範囲には陸海軍研究機関および文部省所管機関(大学、附属研究所等)が含まれなかったことである。第2特徴は、試験研究令の内容が、主として不足資源充用のための開発研究や製造能力向上のための機械技術の改良などにあり、いわゆる科学者を動員した基礎研究とはならなかったことである。したがって開発を目的に基礎的研究や学術の振興を行うことは同研究令には含まれなかった。第3の特徴は、軍部による独自の総動員試験研究令施行規則の存在である。この規則によって、鉱工業関係事業法と共に、部外研究組織に対する科学技術上の成果を動員する独自の制度的裏づけを得て、不足資源面における対策として科学審議会などの制度を利用したと考えられる。

1941年から1945年の時期における科学技術動員体制は、大きく2つに区分できる。第1の時期は、新たに成立した科学技術新体制確立要綱(1941年5月公布)により科学技術に関する中央行政機関を中心とした体制が準備された時期である。しかし同要綱で示された技術院の設立

(1942年1月)、科学技術審議会の設置(1942年12月)およびその実質的な活動は遅れ、1942年末頃までは従来型の総動員試験研究令が継続していた。第2の時期が1943年以降である。1943年に入って技術院および科学技術審議会による科学技術動員体制が整ったが、同年夏には文部省に関わって科学研究ノ緊急整備方策要綱(1943年8月閣議決定)が示され、技術院では科学技術動員総合方策確立ニ関スル件(1943年10月閣議決定)され、本来の科学技術新体制確立要綱体制は事実上解体されてしまう。科学技術動員が目指す内容も、不足資源の科学的充用から兵器開発への協力を拡大され、また動員対象もこれまで対象外であった文部省管轄下の大学研究員にまで拡大された。しかし科学者動員の体制は一本化されずに、企画院系の「戦時研究員」、文部省系の「科学研究要員」、陸海軍系の「兼任嘱託」と多層化してしまい、研究および人員面での重複が表面化することになった。

したがって、政府の人員動員体制は、1943年以降に始まった文部省下の戦時研究班の活動の他は、軍部の兵器開発とりわけ、海軍の電波兵器開発に、ほとんど役割を持たなかった。

6. 海軍技術研究所電気研究部における基礎研究活動の概要

ここでは海軍の電波兵器開発における基礎研究能力について考察する。海軍技術研究所電気研究部が1930年代に行なった電波通信に関わる主要な基礎研究は、短波通信研究とマグネトロン研究であった。

第1に、短波通信を実用化するためには、まず短波無線装置本体の開発が不可欠であった。しかし短波の場合、電離層で反射する電波を利用するために、地球物理的な視点に立った電波伝播特性の理解も必要で、ここに電波伝播研究という基礎研究が短波通信技術に不可欠の要素となった。国際的に見ても、電波伝播研究は、1920年代後半から30年代に大きな飛躍を遂げた分野であったが、アメリカ海軍技術研究所を除けば、諸外国における電波伝播研究は軍とのつながりは比較的小さかった。日本の場合、海軍が無線通信分野で中心的役割を担っていたという実績があったことが、海軍技術研究所での電波分野の基礎的研究活動を発展させた。しかし、海軍上層部はたえず電波伝播研究が基礎的研究過ぎるとの考えを持っていた。このことが、早急な短波通信の実用化という方向に無線通信技術全体を駆り立てることとなり、研究内容を臨界周波数測定へ、研究地域を南方地域へと拡大させ、また実用向け伝播図表の作成へと向かわせた。こうした動きは1939年以降から特に顕著に現れている。したがって、電気研究部で行っていた電波伝播研究は海軍組織からの要求を背景に、単なる基礎研究ではなく、つねに実用長距離通信手段を前提とした研究とならざるを得なかった。基礎的な研究であっても実用目的を目指した方向が取られたことから、海軍の短波研究は目的基礎研究に相当する内容を持つことになったと評価したい。

第2に、艦隊通信用の近距離無線通信機開発をきっかけに短波から超短波さらにセンチ波(極超短波)へと、海軍の無線通信研究の範囲がセンチ波研究に拡大した。当初は隊内通信を目指していたが、やがてセンチ波管の1つであるマグネトロンの実用化(1938年8月開発の技研管849管)に成功し、イギリスに比べても約1年も早く、実用的なマイクロ波発振管を手にすることができた。しかし、実用マグネトロンを開発した第1科では、反結合理論と結びつけたマグネトロンの発振理論への関心から、さらに多相振動理論へと進展し、多相高周波工学の研究構想という独自の計画を作り上げた(1939年8月)。この構想は多数の多相送信用マグネトロンを生み出す契機となり、送信用マグネトロンにおける工学的知識の蓄積をもたらしたが、マイクロ波そのものの基礎研究には向かわず、多相高周波の受信方法の困難を未解決のままとしていた。

海軍技術研究所電気研究部でおこなわれたこうした基礎研究は、いずれも海軍内部の研究者が

実施したもので、一部に大学工学部所属の学者、民間企業のエンジニアの協力もあるが、大学理学部所属の科学者が関わることはなかった。海軍内部の研究者を主体とする研究であった。

7. 海軍の電波兵器開発計画の起源について

海軍の電波兵器開発には、1941年から42年では2つの主要開発計画が存在した。レーダー開発と強力マグネトロン開発である。

海外情報からレーダー原理、利用法を入手した海軍軍令部は、大艦隊中心の戦術に合致する、電波を利用した戦艦射撃用の測距装置としてレーダーを評価した。これが軍上層部側が判断した初期のレーダー開発案であった。一方、開発側の海軍技術研究所電気研究部では、すでに開発していたマグネトロンは、海上における電波特性が良好なマイクロ波を作る唯一の発振管と判断した。このことが、マグネトロンを利用したセンチ波レーダー開発を提案する根拠となり、開発計画の訓令「仮称電波探信儀研究実験ノ件訓令」（1941年8月2日付、官房機密第6911号）に結実した。この段階で、外部のエンジニアが協力者として加わるようになったが、大学所属の科学者はまだ参加していない。一方で、いくつかの困難も生じた。1つはマイクロ波の受信機部分の開発が未成熟なまま実用段階の装置を開発使用としたことである。工学原理の面では正しい選択であったかもしれないが、現実的には開発の遅れを引き起こす選択となった。2つにはレーダーの用途として航空機見張りを重視しなかったことである。途中から航空機見張りの必要性が議論されたため、射撃用レーダーと見張用レーダーの同時開発、しかも技術上の問題としては、センチ波レーダーとメートル波レーダーとの同時開発という方針を採用することになった。このことも開発能力の分散を招くことになり、実用化の遅れを引き起こすことになった。結果としては、試製、実験されたセンチ波レーダーは要求精度を満さず、動作も不安定であったため、レーダ自体の評価を低め、開発計画の存続自体を縮小させる原因になった。

センチ波レーダーの開発が縮小させられた時点で、電気研究部では新たな兵器開発構想が登場した。防衛的兵器ではなく、攻撃を重視した画期的な兵器に期待が1942年6月に生まれ、第1科主任の伊藤廉二は、ウラン爆弾と殺人光線という開発構想を提案した。そのうち、殺人光線に関しては、桶型マグネトロンの応用兵器であるため、技術的見通しを持てたが、ウラン爆弾の可能性に関しては、物理学者からの知識導入が必要であった。後者の課題が、海軍の電波開発部門への大学所属の科学者動員のきっかけとなり、1942年7月の物理懇談会設置につながった。

8. 電波兵器開発における科学技術動員の特徴

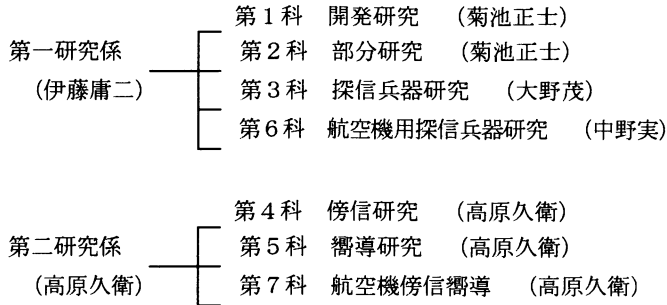
1943年半ば以降、海軍の軍戦備計画の中で、電波兵器が注目されるようになり、電波兵器開発の早急な対応が求められることになった。特に未解明であったレーダー工学やセンチ波工学などの分野で、開発能力を増大するには、外部の研究者を動員することが必要であった。そのため、海軍は海軍技術研究所に電波兵器を専門に担当する電波研究部を設置し、この部署を中心に外部研究者の取り込みを図った。第1科と第2科の主任となった大阪大学理学部教授であった物理学者の菊池正士が、海軍技師に任官して、物理学者らを電波兵器開発に組み入れる役割をになった（表2）。しかし、海軍外部の研究者を動員する新たな制度は準備されなかったため、科学者の動員には、すでにあった嘱託制度や技師登用制度を拡大運用することで対応した。

こうした動員体制には、開発を実行する際にある長短の効果をもたらした。例えば、嘱託制度においては、第1に、開発実施部門での臨機応変な採用が可能であるために、能力のある人材を要求された課題に適切に割り振ることが容易であった。したがって、目的基礎研究に相当する活

動が実施でき、レーダーに関わる研究開発に進展が見られることになった。

表2) レーダー研究開発体制：電波研究部の2研7科体制

時期：1944年1月～1944年11月



カッコ内は各係、各科の主任者名

しかし第2に、軍の研究所における嘱託の地位は極端に低く、またその発言力も高くはなかった。そのために基礎研究と兵器化研究とに大きな情報の壁が作られ、開発力を弱めることになった。同様の問題は技師登用制度でも生じていた。菊池正士ほどの能力をもった研究者であっても、実用化研究の分野に参加するためには、技師という文官ではなく、技術士官という軍人になることを要求されていたからである。この問題は、伊藤庸二も認識しており、未経験の部内研究者が投手となり、有経験の部外研究者が捕手となっていると例えて、克服すべき問題と考えていた。ただし、その解決方法は、「正しい思想、私心の少ない有力な部外者の一部が海軍部内に入り、指導者として立って貰うことが必要である」などと、外部の研究者が海軍技術士官となることでしか解決できないと展望していた。ここに、海軍の科学技術動員体制の特質が現れていると考える。

9. 電波兵器設計・運用における科学技術動員の特徴

旧日本海軍のレーダーについてその実践面における実態を検討すると、実用的兵器としてレーダーが量産化され、また、ある程度の規模で、実戦配備されていることが分かった。電波探知機(レーダー)の生産金額で2004万円(1943年度)、8800万円(1944年度)に増額され、この伸びは、電気兵器総額で0.9%(1941年度)であった電波探知機(レーダー)が28.7%(1944年度)にまで急増したことを示している。陸上設置用レーダーを1台ないし複数台設置した海軍見張所は、少なくとも252カ所を数えることができる(終戦時)。またレーダーオペレーターとして養成された人員は1万2千人、電測士官数は894人と推計できる。さらに、レーダーの設計およびメンテナンス要員として活動した電波技術系の海軍技術士官数では、技術中將から技術少尉までの人数とすると、441人と推定できた(終戦時)。

レーダーの実用化を可能にした一つの要素が、人材面を中心とした拡充対策であった。その中心は、技術士官および電測士官などの内部人材(内部研究者を含む)の増員であり、部外の科学者の動員ではなかった。特に兵器設計では、武官である技術士官が開発作業における権限を持ち、基礎研究で採用した嘱託(外部研究者)は援助者にすぎなかった。すなわちレーダー開発では、外部研究者を開発活動の中心に据える制度を作らず、緊急対策が求められる中であっても、従来型の軍隊組織統制がそのまま維持され、むしろ強化されていた。海軍士官となることが必要であ

った。

一方、レーダー設計への対応に注目すると、戦争後半から急速に開発・配備が行われるために独特な設計方針が採用されたことを確認できた。「戦時標準型レーダー」と呼べるこうしたレーダー設計の登場は、第一に軍上層部の軍戦備計画に起因する。1943年春の軍戦備計画の変更後にレーダーは重要兵器の一つに加わえられ、開発・配備命令が発令された。こうした緊急性のため、開発方針の中心は開発済みレーダーの改良に置かれることになった。また改良方針では、第1に、航空機射撃用レーダーや海上艦船の見張用レーダーなどに対しては高性能化への動きが開発方針となったが、航空機見張用レーダーに対しては、配備計画を重視した対策が開発・改良方針となった。たとえば運搬能力の低下に伴った軽量小型化設計、部品性能および製造能力低下に伴った簡易化設計、実戦使用に伴った安定性化設計などである。こうした軽量小型化、簡易化、安定化を目指して設計されたレーダーの代表的機種が仮称三式一号電波探信儀三型であった。以上のような対策によって、戦時標準型レーダーは、配備面、実戦運用面では、当初の配備予定数に近づくことができた。しかし、連合国側のレーダー対抗兵器の運用が始まるようになると、当初の航空機見張りとしての機能も発揮できなくなった。この点で、簡易型設計で採用された出力低下、使用波長の増大が、かえって実戦運用面での価値を失わせたことになる。

10. 結論

(1) 政府と比較した軍部の科学技術動員の特徴

戦時期に日本が実行した科学技術動員は、大きく区分すると政府と軍部の2系統あった。両者を区別する大きな特徴は、その目指す目標にあった。政府は、不足資源の充填や生産力の拡充という戦時工業力全般に渡る問題を科学技術動員の課題とした。一方軍部は、政府の科学技術動員制度にも関与する一方で、独自に兵器開発の能力拡充を科学技術動員の課題とした。こうした異なる目標から、それぞれの科学技術動員の実施方法にも違いが現れた。

この内、政府の科学技術動員の場合は、日中戦争の始まった1937年以降から戦時体制の整備の1つとして制度が整備され、体制整備の目的を輸入依存していた資源や生産技術を科学技術の振興で補うことにおき、またその手段を総動員試験研究令や科学技術に関わる諮問委員会、中央行政機関、総合研究機関などの設置においた。こうした動きは日本における科学技術政策の1つの起源となったが、その活動実態は、大学所属の科学者を含まず、また基礎的な研究も重視せず、既知の科学的知識を応用する技術者中心の発明促進対策に止まるものであった。1943年に至って、政府は新たに戦時研究員制度を作り、大学所属の科学者も政府の科学技術動員の対象としたが、実施の時期が遅れたこと、技術院、文部省、陸海軍がそれぞれに科学者動員を実施しようとしたことから、不要な重複が表れ、効果を減じる弱点となった。

一方、軍部の科学技術動員では、海軍の科学技術開発組織を通して科学技術動員体制を調べたが、陸海軍の統一的な動員体制が作られることはなく、海軍の場合でも、戦時中に外部の科学者、技術者らを兵器開発に動員するための軍独自の新制度は、1943年2月に設置された海軍科学技術審議会を除いて設置していないことを確認できた。つまり海軍では、兵器開発を推進するための開発能力増進策は、それぞれの開発担当部署に運用を任せしており、このため海軍の科学技術動員の実態は、個別の開発部署の対応においてしか見ることができない特徴を持っていることが分かった。

(2) 海軍電波兵器開発部門に見る科学技術動員方法の特徴

戦時中における軍部の科学技術動員対策では、海軍の電波兵器開発に1つの典型を見ることが

できた。電波兵器が新型の兵器であったことから、既存の組織の拡張に加えて、外部からの研究人材を動員する対策を取らざるを得なかったが要因の1つである。海軍の電波兵器では、開発から設計および製造の一部を海軍技術研究所電気研究部（後に電波研究部）が担当し、製造を主として艦政本部下の海軍工廠、運用は軍令部が担当した。電波兵器が軍戦備の中で重視されるにしたがい、開発能力の拡充策として科学技術動員が実施されることになった。この実施には、上記のような内容の違い、担当組織の違いから、大きく2つの系統に科学技術動員を区別することができた。研究開発に関わる科学技術動員と設計運用面での科学技術動員である。両者の科学技術動員の規模と形態を、主として人材動員に限定して特徴づけてみると、以下ようになる(表3)。

表3から、研究開発部門では、政府および軍上層部が整備した戦時研究員制度は電波兵器開発に直接の機能を持たなかった。戦時研究員制度は戦時中の研究人材の登録運用制度であったが、少なくとも電波兵器に関してはほとんど役割を持たなかったことになる。それに対して、外部研究者の動員として機能した制度は、海軍に従来から存在していた嘱託制度および技師登用制度であった。電波兵器開発に関わった研究者の大多数は海軍嘱託という身分で動員された。嘱託に任命された場合は本来の所属先の地位のまま、海軍の研究施設へ出向したり、所属先で研究課題だけを依託されるなど、その運用には幅があった。また嘱託者の選出は代表的な研究者が行うことが多かった。そのため研究に必要な人材を適材適所に配置することが可能であった。その反面、兵器開発を行う軍研究部における彼らの役割は、置かれた地位から補助的なものと見なされ、電波兵器開発の中心を担うような体制には発展できなかった。

表3) 海軍の電波兵器開発にみる科学技術動員の形態と規模

研究開発部門	←嘱託制度	300人程度 (大学, 公的機関, 民間の研究者)
	←技師登用制度	10人程度 (大学, 公的機関の研究者)
	←戦時研究員制度	(機能せず)
設計運用部門	←技術士官採用制度	500人程度 (無線関係者)
	←技師, 技手採用制度	70人程度 (無線関係者)
	←工具採用制度	500人程度 (無線関係者)
	←予備士官制度	800人程度 (電測士官)

一方、設計運用部門では、主として若手人材の動員が中心であった。開発や設計を担当する部門では、主として技術士官制度（2年現役制度など）が利用され、運用を担当する部門では主として兵科予備士官制度が利用された。どちらも、海軍武官（前者は技術士官、後者は兵科士官）に採用される特徴がある。技術士官制度の場合、外部の研究者、技術者らを採用する手法であったが、年輩者を途中採用することは軍隊組織に混乱を引き起こすことから、新規採用に限定し、大量採用という形態で開発能力を拡大することとなったといえよう。運用者としては、オペレーターを含め、指揮官が必要であるため、レーダーを専門とする兵科士官の採用という方針が取られた。新規の兵器であることと、軍隊の戦争遂行上からは電波兵器が補助的な地位であったことなどから、海軍兵学校出身者ではなく、大学卒業後に兵科士官となった兵科予備士官が、主としてこの分野の人材供給源となった。

以上から、研究開発面では、部外の実績のある研究者を動員する必要から、臨時職員という動員体制で対応したが、設計運用面では、若手人材を供給することに特化し、武官としての体制を取った。このために、年齢構成では研究面で実質的な活動を行う人材に比べ、開発を指導する内部人材が若くなり、また海軍の地位構造でも年齢上の逆転構造が発生することになった。こうした地位・役割と年齢との逆転構造は、電波兵器の開発促進という点で1つの弱点となったと判断したい。

(3) 電波兵器開発方針の特徴

海軍では電波兵器開発体制を整備することに遅れた。これについては、2つの時期に区分して考察することができる。

開戦初期の段階では、軍上層部が艦隊中心の軍戦備計画のなかで、射撃用レーダーの役割に注目し、このために海上における電波特性が良くかつ高分解能のレーダーを開発することが当初の目標となった。また開発実施部門でもそうした要求に応えられる要素技術として、いまだ開発途上にあったマイクロ波技術を開発方針の中心に置こうとしていた点もある。実際には両者が射撃用レーダー開発という点で一致し、このことが用途としての航空機見張り用レーダーの開発を軽視することになり、また技術的には開発が容易であったメートル波レーダー開発についての基礎的研究を軽視する問題を招いたことになる。さらに射撃用レーダーに対する要求は弱く、補助的兵器に止まり、また安定したレーダーが容易には開発できないことから、レーダー開発全体が軽視された。一方で攻撃型兵器への要求が強まり、レーダー開発担当者が新型兵器開発にも関わることとなり、このことがレーダー開発を遅らせる要因に加わった。すなわち、軍上層部の大艦巨砲主義による軍戦備計画と、開発担当部門でのマグネトロン偏重の技術方針との2つが、レーダー開発初期の特徴を構成していたと判断できる。

さらに開戦後期の段階になると、航空機見張り用レーダーの戦術的意味を理解するに伴って、レーダー開発が促進させられた。これは、それまでの戦術方針に基づく軍戦備計画に代わって相手兵器への対抗を目指した軍戦備対策となり、電波兵器に対しても、戦訓として伝わってきた情報をもとに、多機種のレーダー開発が試みられることになった。そのため、一方では高性能のレーダー開発が推進され、研究開発能力の拡大のために、外部研究者の動員が促進され、部分的には目的基礎研究に相当する活動が電波兵器開発の中で行われ、センチ波分野の研究の一部は進展した。これによりアメリカ軍が使用している高性能、多機能な電波兵器の基本性能や構造を模倣しようとする体制は準備できた。他方、真空管の寿命や運搬性能、信頼性などの現実の電子工業の能力を考慮した対策も取られ、メートル波を利用し、簡易化を進めた戦時標準型の電波兵器を開発することができた。軍上層部が防備力強化の方針に転換したことに対応し、航空見張りに特化したレーダー配備が計画された。これが戦時標準型レーダーの登場につながった。

このことにより電波兵器の量産と実戦配備が可能になった。ただし、連合国側の電波兵器との性能格差は広がり、電波戦では一方的な敗北につながった。またレーダー開発における2つの開発方針は、結果としては開発能力の分散化を招くことになった。これがレーダー開発後期の特徴といえる。

(4) 電波兵器開発体制の残したものの

戦時中の海軍の電波兵器開発体制は、戦局を挽回する戦術に結びつくことで比較的大きな規模で整備させたものであった。しかし結果としては、高性能レーダー開発は試作段階に終わり、実用段階に達したレーダーは連合国側のレーダー対抗措置で無意味化されてしまった。敗戦に伴いこうした電波兵器および開発運用体制は単なる遺物となってしまった。しかし、戦後の電子工業

は、戦時中に作り出されたこれら遺物を基礎として再興されることになる。戦時中に大きな規模で電波兵器開発体制を作り上げたことは、この時期の日本の電子工業に関わるレベルを高めたことは否定できない。戦後の電子工業の発展にどのような役割を果たしたかについては、戦後技術史の課題として実証的に考察しなければ確かなことはいえないが、独自に開発したマグネトロンやマイクロ波技術の工学的知識の蓄積や、戦時中に養成された電波関係技術者らの層の厚さは、戦後の電子工業発展の重要な遺産となったといえる。

注と文献

- 1) 主要な発表論文としては以下の5本がある。河村豊・山崎正勝「物理懇談会と旧日本海軍における核および強力マグネトロン開発」『科学史研究』(1998年秋, 37巻 No.207) pp.163-171。河村豊「1930年代のマグネトロン研究と海軍技術研究所 - 伊藤庸二の多相高周波研究構想と実用マグネトロン開発-」『科学史研究』(1999年夏, 第38巻 No.210) pp.71-82。河村豊「レーダー開発計画の決定過程 - 太平洋戦争直前期の旧日本海軍の取り組み-」『科学史研究』(1999年秋, 第38巻 No.211) pp.165-172。河村豊「旧日本海軍における科学技術動員の特徴 - 第2次大戦期のレーダー研究開発を事例に」『科学史研究』(2000年夏, 第39巻 No.214) pp.88-98。河村豊「旧日本海軍における戦時技術対策の特徴 - 第2次大戦期の実用レーダーを事例に-」『科学史研究』(2001年夏, 第40巻 No.218) pp.75-86。
- 2) 財団法人史料調査会が所蔵してきた資料に関して、簡単に説明しておきたい。資料収集の背景は、1945年10月1日に元軍令部第一部長(海軍少将)であった富岡定俊が海軍省内に設置された「作戦関係資料蒐集委員会」で戦史編纂の基礎資料収集を開始したことに基礎を置く。同年12月1日に海軍省が第二復員省に改編された時点で、この委員会は「第二復員省大臣官房史実調査部」となり、富岡はその部長となった。当初は海軍省の一室を使って作業を行っていたが、史実調査部となった1945年12月頃に、旧海軍大学校物理化学講堂(東京都品川区上大崎2丁目)に移った。一方、史実調査部の維持が困難になることを見越して、1946年2月18日に、野口寛の協力を得て「財団法人文化復興史料調査会」(同年2月18日認可)を発足、富岡は史実調査部を退官した同年3月31日に、史料調査会に移り第二復員局史実部の作業を一部分引き継いだ。ここに旧海軍技術研究所で電波兵器開発を担当してきた元海軍技術大佐伊藤庸二が、史料調査会の活動に合流した。史料調査会が所蔵することになる旧海軍技術関係資料は、旧海軍大学校の所蔵図書の一部と伊藤庸二が実家の千葉県御宿の最明寺に秘蔵していた資料類から構成され、その後に寄贈図書などを加えたものである。本論文で利用した資料はそこに含まれる電波技術関係資料で、『統進資料』、『取扱説明書』類、『技術報告誌』などである。
- 3) General Headquarters, United State Army Forces, Pacific, Scientific and Technical Advisory Section, Report on Scientific Intelligence Survey in Japan, September and October 1945, Vol. I~Vol. IV, 1 November 1945. 本論文ではこれを合衆国科学情報調査団報告と略称して用いる。
- 4) 12項目とはレーダー、通信機、無線対抗手段、その他の通信設備、ロケットおよびジェット推進力、誘導ミサイル、赤外線、水中音響、殺人光線、原子爆弾、種々の機器類、化学兵器であるという。市川浩『第二次世界大戦期における日本の戦時科学技術研究の実態に関する実証的研究』p.5。
- 5) 同上 p.53。笹本征男「科学情報調査-コンプトン調査」中山茂他編『通史, 日本の科学技術』第1巻, p.52。
- 6) Japanese Wartime Military electronics and communications, Section I~VI, 1 April 1946.
- 7) Reports of US Naval Technical Mission to Japan, 1945-46.
- 8) Prepared by 2nd and 3rd Operations Analysis Section FEAF and Air Technical Intelligence Group,

FEAF(ATIG Report No.115), Headquarters, Army Air Forces, Washington 25, DC, 1945.

- 9) The United States Strategic Bombing Survey (Pacific), 1945-47.
- 10) NHK取材班『太平洋戦争日本の敗因 電子兵器「カミカゼ」を制す』(角川文庫 1995年)にも表れている。
- 11) Leslie, Stuart W., The Cold War and American Science, the Military-Industrial-Academic Complex at MIT and Stanford, Columbia University Press, 1993.
- 12) 広重徹『科学の社会史』p.169 や p.209 など。
- 13) 大淀昇一『宮本武之輔と科学技術行政』(東海大学出版会 1989年7月), 同『技術官僚の政治参画－日本の科学技術行政の幕開き』(中公新書 1997年10月)。
- 14) 山崎正勝「わが国における第二次世界大戦期科学技術動員－井上匡四郎文書に基づく技術院の展開過程の分析－」および, YAMAZAKI, Masakatsu, "The Mobilization of Science and Technology during the Second World War in Japan - A Historical Study of the Activities of the Technology Board Based upon the Files of Tadashiro Inoue-", HISTORIA SCIENTIARUM.
- 15) 永野宏・佐藤康治「学術研究会議第1部の戦時研究班」『科学史研究』第36巻 No.203 (1997年) pp.162-167.
- 16) 市川浩『第二次世界大戦期における日本の戦時科学技術研究の実態に関する実証的研究』(基盤研究研究C成果報告書 1999年3月)。
- 17) 田中浩朗「研究動員会議と「戦時研究」」(1999年度日本科学史学会年会報告), 田中浩朗「技術院の「科学技術総本部構想」」(2000年度日本科学史学会年会報告)。
- 18) 河原宏「戦時科学・技術政策の思想的背景」『社会科学討究』(第21巻第1号, 1975年5月) pp.1-35.
河原宏「ファシズムの「実験」－「大陸科学院」と「技術の公開」－」『社会科学討究』(第22巻第2号, 1976年12月) pp.95-118.
- 19) 沢井実「科学技術新体制構想の展開と技術院の誕生」『大阪大学経済学』(第41巻2・3号, 1991年12月) pp.367-395. 沢井実「太平洋戦争期科学技術政策の一齣－科学技術審議会の設置とその活動－」『大阪大学経済学』(第44巻第2号, 1994年10月) pp.1-23.
- 20) 第一復員局編『陸軍航空技術沿革史』(1947年5月), 航空工業史編纂委員会編『民間航空機工業史』(1948年4月)。
- 21) 秋山金正「陸軍科学研究所第六陸軍技術研究所に於ける化学兵器研究経過の概要(第一案)」(厚生省引揚援護局史料室, 1955年7月稿), 小柳津政雄「化学戦研究史」(同, 1956年9月稿), 化学兵器関係者編「本邦化学兵器技術史(年表)」(同, 1957年1月稿), 防衛庁『技術研究資料第31号 本邦化学兵器技術史』(1958年3月)。
- 22) 牧野茂編『海軍造船技術概要』(非売品, 1954年10月)。
- 23) 生産技術協会編『旧海軍技術資料』(生産技術協会, 1970年9月)。
- 24) 『海軍電気技術史』(非売品, 1947年10月)。
- 25) 防衛庁海上幕僚監部調査部『日本帝国海軍の研究ならびに開発(1925-1945)』(1956年5月)。
- 26) 防衛庁防衛研修所戦史室編『戦史叢書』(朝雲新聞社)。この内関連する巻は, 第19巻「本土防衛作戦」, 第31巻「海軍軍戦備(1)昭和16年11月まで」, 第88巻「海軍軍戦備(2)開戦以降」, 第95巻「海軍航空概史」などである。
- 27) 常石敬一『消えた細菌戦部隊』(ちくま文庫, 1993年6月), 常石敬一『医学者たちの組織犯罪』(朝日文庫, 1999年9月) 常石敬一『七三一部隊』(講談社現代新書, 1995年7月)。
- 28) 栗屋憲太郎「戦前日本における化学兵器の研究・開発について」同『東京裁判論』(大月書店 1989

- 年). 松野誠也「帝国陸軍化学戦略の研究」(立正大学文学部史学科卒業論文, 1996年1月).
- 29) 常石敬一「理研におけるウラン分離の試み」『日本物理学会誌』(Vol.45.No.11, 1990), 深井祐造「旧海軍委託「F研究」における臨海計算法の開発」『技術文化論叢』(No.2, 1999年2月).
- 30) 角田房子『碧素・日本ペニシリン物語』(原著1978年:内藤記念くすり博物館, 1994年7月).
- 31) 佐竹金次「電波兵器」日本兵器工業会編『陸戦兵器総覧』, 日本無線史編纂委員会編『日本無線史』第9巻陸軍無線史(郵政省電波管理委員会, 1951年3月).
- 32) 伊藤備二「電子兵器の全貌」千藤三千造『機密兵器の全貌』(興洋社, 1952年7月), 鮫島素直『元軍令部通信課長の回想ー日本海軍通信, 電波関係活躍の跡』(非売品, 1981年3月), 松井宗明(元海軍少佐)「日本海軍の電波探信儀研究の概要Ⅰ～Ⅱ」『兵器と技術』(1975年9月号, 10月号), 日本無線史編纂委員会編『日本無線史』第10巻海軍無線史(郵政省電波管理委員会, 1951年9月).
- 33) 防衛庁技術研究所本部技術調査課『技術資料第82号 第二次大戦下における日本陸軍のレーダー開発ー対空電波評定機だ号2型, た号改4型ー』(1978年6月). 同書の編纂に携わった八木和子はさらに資料収集を行っている.
- 34) 中川靖造『エレクトロニクス王国の先駆者たち, 海軍技術研究所』(原版1987年, 光人社, 1997年).
- 35) 前島正裕「旧日本海軍における電波探信儀の開発過程ー大野茂資料を中心にー」『国立科学博物館研究報告』E類(理工学)第20巻(1997年12月) pp.23-37.
- 36) 横山久幸『旧陸海軍の研究開発体制における技術と運用ー日独技術交流と電波兵器の開発ー』(内部資料, 1998年3月) 65p., 横山久幸「陸海軍の遣独視察団に見る技術交流の実態ー日本における初期のレーダー開発との関係においてー」『戦史研究年報』(旧称:防衛研究所戦史部年報)第3号(2000年3月) pp.56-71.

修士論文梗概

2000年度提出修士論文一覧

- 土淵庄太郎 日本の技術移転機関^{*1}
葉山雅 言語と世界観の分析－「規約」という観点から
伊藤詠 電気めっき産業の技術的特質に関する研究
鈴木秀人 制御技術への状態空間法の導入過程の分析
山口陽子 *Conics* における図形的方法

*1 原稿未提出のため、本号には梗概の掲載をしていません。

言語と世界観の分析 - 「規約」という観点から

葉山 雅 指導教官: 葉谷敏晴

1 はじめに

本論文は、言語相対論的認識論についてその根拠と妥当性を明らかにしようとするものである。このため特に、言語相対主義的な見解を 20 世紀前半の科学方法論・認識論において提出した、ポーランドの論理哲学者 Kazimierz Ajdukiewicz(1890-1963)¹ による「根源的規約主義 (Radical Conventionalism)」なる立場をとりあげ、分析を行なった。

「言語相対主義」については、一般には言語学・文化人類学における「サピア=ウォーフの仮説 (the Sapir-Whorf Hypothesis)」が広く知られる。Sapir, E. (1884-1939) は 1920 年代頃より言語相対主義を表明しているが、この立場は Sapir より指導を受けた Whorf, B.L. (1897-1941) によって 1930 年代に発展をみた。Whorf は、アメリカ・インディアンの一部族であるホビ族の言語の研究を通じて、そこに印欧語文化とは異質な形で世界把握が認められることを示そうとしている。世界観が言語の選択に依存して決定されるとする言語相対主義は 1930 年代から 1940 年代にかけて強い影響力を持ったが、その見解は必ずしも経験的には裏付けられないものである。一方、Ajdukiewicz による「根源的規約主義」の中心的な論拠は Whorf の研究とほぼ同時期にあたる 1929 年から 1934 年頃にかけて形成されており、これは「言語相対主義」の主張を科学的言語について厳密な形式において導出したものとなっている。すなわち、根源的規約主義においては、科学的言語の概念を明確に定義した上で「世界観が言語の選択に依存して決定される」ことが定理として導かれ、言語の選択が科学的知識に本質的な影響を及ぼすということが示された。つまり、言語相対論的認識論は言語学・文化人類学・科学論などにおいては観察から知られ経験的に立証されるべきものとして扱われるが、根源的規約主義ではこれに理論的な定式化を与える試みがなされたのである。

またこの論文では、政治的理由により埋もれてしまった Ajdukiewicz の業績に対して、正当な位置づけを与えることをも目的とした。

Ajdukiewicz は、「ポーランド学派」の中心メンバーであり、ポーランドにおける 20 世紀の代表的な論理哲学者であった。ポーランド学派とは、Lwów 大学および Wazawa 大学を拠点とし、事実上の活動の時期を第 1 次世界大戦終了から第 2 次世界大戦勃発までの間とする、論理学者、哲学者、数学者らの総称であり、Lwów-Warszawa 学派 (the Lwów-Warszawa School) ともよばれる²。Ajdukiewicz の業績は、論理学また認識論のみならず科学方法論、存在論、倫理学など広い分野にわたっており、また彼はすぐれた学者であるのみならず、すぐれた教師でもあったと伝えられる。

しかし、Ajdukiewicz の業績は旧社会主義圏外においてはほとんど知られておらず、また共産圏崩

¹ Ajdukiewicz は 1890 年に当時オーストリア領であった Tarnopol に生まれた。Lwów 大学にて、哲学を Twardowski に、論理を Lukasiewicz に、数学を Sierpiński に師事し、1912 年に Ph.D. を得ている。1913 年には Göttingen 大学にて、Hilbert や Husserl に学び、その 1 年後より兵役に従事、1920 年に学究生活に戻った。1921 年には Twardowski の娘である Maria Twardowska と結婚している。Lwów 大学、Warszawa 大学で教授を勤めたが、第 2 次大戦勃発後もポーランドにとどまり戦中はドイツの占領下において公的な学究活動の停止を余儀なくされた。戦後は 1945 年より Poznań 大学で科学方法論の講座を持ち、1948 年から 1952 年にかけては同大学の学長であった。1953 年には雑誌 *Studia Logica* の創刊に参加、また 1955 年には Warszawa 大学に移り 1961 年の引退まで論理の講座を持った。1963 年に突然の心臓麻痺により Warszawa にて没する。

² 代表的指導者としては、Ajdukiewicz の他に、Leśniewski、Lukasiewicz、Kotarbinski、Tarski らがいる。主な業績としては、Lukasiewicz による多値論理学や様相論理学の体系、Leśniewski の「存在論」と名付けられた述語論理体系、Tarski の真理論などが知られる。

壊後のポーランドにおいても Ajdukiewicz についての研究は積極的になされていない。これは、20 世紀のポーランド哲学がポーランド国家の苛酷な政治的運命の影響下に置かれたことによる。第 2 次世界大戦によってポーランドの文化は壊滅的な打撃を受け、戦後ポーランド国内に存命していたのは Ajdukiewicz や Kotarbiński などのわずかな人々であった。さらに 1948 年には共産党支配の確立によって Marx 主義が政治当局の認める唯一の公的哲学とされるようになり、そのためポーランド学派の伝統は糾弾され Ajdukiewicz の「根源的規約主義」も弾圧の対象となった。そしてベルリンの壁崩壊後の今日では、ポーランドの若い世代は西側文化の流入を受けて欧米流の科学哲学に傾倒する風潮にあるため、Ajdukiewicz の哲学は忘れ去られようとしている。しかしながら、例えば本論文で扱う Ajdukiewicz の「根源的規約主義」は、Kuhn のパラダイム論を Kuhn とは異なった観点からおよそ 30 年前に先取りしたものにあたっており³、またその異なる観点ゆえに Kuhn とは別の意味で射程の広いものとなっている。したがって、このまま Ajdukiewicz の業績を埋没させることは哲学史上の損失であると考えられよう⁴。

2 根源的規約主義

以下に、Ajdukiewicz が根源的規約主義のテーゼを提出する際に依拠した論拠についての分析を簡潔にまとめる。

2.1 認識論

Ajdukiewicz の言語に関わる認識論において、根源的規約主義を導く上で重要である特徴は次の通りである。

1. 言語の認知的役割が強調されている
2. 言語を使用するひとは「特定の経験を動機として特定の文章を受容する」ものとされる
3. 判断内容は文章として表現される

特徴 1 により言語表現を使用することとその意味を理解することの間には密接な関係があるものとみなされたので、Ajdukiewicz においては表現の意味を言語を使用する行為と独立に定義することは避けられ、「言語表現を使用する」ことは「その言語において表現の意味を特定する様式 (meaning-specification, 以下では「意味の特定様式」と記述する) に則る」ことであるととらえられた。このことは、特徴 2 の要請とあわせて「意味の規則」として定式化された：

型 L の状況において種類 B の文章を受容しうる状態にあるひとのみが、言語 S の語と表現とを、S の意味の特定様式によってそれらと対応している意味において用いることができる。

このような意味規則はそれが定められるところの言語に固有のものであり、言語表現の意味を間主観的な見地から人間の思考と言語、そして世界との関係の上に位置づける規約である。また逆に、言語におけるそのような規約の正当性は、実際にその言語を使用するひとが何らかの性質を示すという事実によって説明されるべきものとなっている。

³ Ajdukiewicz の根源的規約主義は 1934 年に発表され、Kuhn が初めて彼のパラダイム論を論じた *The Structure of Scientific Revolutions* は 1962 年に出版された。

⁴ 現在、ポーランド学派についての組織的な研究はポーランド本国ではなされておらず、日本及びイタリアにて行われているのみである。Ajdukiewicz についての研究は今回 Web で検索したところ全く見当たらなかった。したがって本論文には先行研究が存在しない。

また特徴3により、意味規則によって受容の定められる文章の集合には、文章の意味であるところの判断内容の集合が対応するものとされた。さらに Ajdukiewicz は科学的知識は判断内容に属するものと考えており、そのため文章の集合は科学的知識を表現しうるとされた。

2.2 言語理論

Ajdukiewicz の言語理論は、認識論において定式化された意味規則が変動しない理想的な言語を想定した上で展開された。その特徴としては、

1. 言語はその意味規則によって関係づけられた文章の公理的システムである
2. 言語表現どうしが同義であるならば、各々は言語の意味規則によるシステム内で同じ構造において同じ位置を占めている

ということがあげられる。特に、異なる言語間で言語表現どうしの意味が同一であること、すなわち「翻訳」については厳密には次のように説明される：

表現 A' が言語 S から言語 S' への表現 A の翻訳であり、さらに S において A が A_1, A_2, \dots, A_n と直接的な意味の関係をもち、 A_1, A_2, \dots, A_n が S' への翻訳 A_1', A_2', \dots, A_n' を持つならば、 S' において表現 A' は、 S において A が A_1, A_2, \dots, A_n と持つ直接的な意味の関係と同じように、 A_1', A_2', \dots, A_n' と直接的な意味の関係をもち、

ここでは、ある言語の表現が他の言語の表現の翻訳であるためには各々のシステムにおいて各々の表現の関係している構造が一致していることが要請されている。また、さらにこのことから、閉じていて連結している言語（その表現の語彙が、片方の集合に含まれるとの表現とも、もう片方の集合の表現が直接的に意味が関係しないような二つの集合に分けられない言語で、かつ、他の語彙を加えても、その語彙がもとからある言語表現と直接的な意味を持たない言語）については、同一の概念枠（閉じていて連結している言語に現われる全ての表現に対応する意味が構成するシステム）を持つものどうしのみが翻訳可能であり、翻訳不可能な言語の概念枠どうしはまったく重なりを持たないことが定理として導かれる。したがって、根源的規約主義における翻訳不可能性の概念は、言語表現の意味が言語全体の概念枠の構造に依存しているという点において、全体主義的な立場と関わりを持つということが示唆されよう。

2.3 根源的規約主義

根源的規約主義は、上にみた認識論と言語理論にもとづく。まず科学的言語は、意味規則によって系統づけられた文章のシステムであると想定される。この意味規則は言語に固有であるので、言語のシステムはそれが備える意味規則によって区別されている。つまり、根源的規約主義における科学的言語は、それが備える「意味規則」なる規約という観点から相対的にとらえられた。また Ajdukiewicz の認識論に基づいて、科学的世界観は科学的言語を構成する文章の意味にあたる判断内容から成ると理解された。したがって根源的規約主義においては、科学的世界観はそれに対応する言語に固有の意味規則を変更すること、すなわち言語を変更することによって変更されるものとされる。そしてさらに Ajdukiewicz による同義性の解釈を導入することによって、変更された世界観は以前のそれと共通の要素を持たず、その場合には対応する言語どうしが翻訳不可能であることが導かれた⁵。すなわ

⁵ ここで根源的規約主義についての問題をひとつ提起しておきたい。それは、根源的規約主義の言語理論においては、あるひとつの言語が異なる意味の特定様式を備えた状態へと変化していくという事象を説明できないということである。これはなぜならば、そのような場合には、言語の「変化」の前と後とで何らかの同一性が保持されていなければならないが、根源的規約主義の言語理論においては、二つの言語はその意味の特定様式が異なるならば、それは同一ではないとみなされるからである。こ

ち,Ajdukiewicz が提出した言語モデルにおいては「世界観が言語の選択に依存して決定される」ことが定理として導出される。また Ajdukiewicz は、こうした言語の変更の例を実際に科学の歴史上に見出せることをも指摘している。

3 今後の展望

今後は、以上の検討でえられた、言語を規約という観点からとらえる議論への見地をもとに、言語に関する哲学への理解を深めたい。現代において特に Ajdukiewicz を研究することの意義としては、主に以下の二つがあげられる。

まずひとつは,Ajdukiewicz の科学論における貢献である。彼が根源的規約主義において提出した言語モデルにおいては「翻訳不可能な言語に対応する概念枠どうしは全く重なりを持たない」ことが導出されるが、このことは Kuhn の科学論に対応させて考えるならば、「異なるパラダイム間に共通の評価基準が存在しない」ことを表現している。したがって,Ajdukiewicz の根源的規約主義は、科学社会的見地から観察される通訳不可能性の概念に対して、論理的な見地からその論理的表現と必然性を与えるものである。根源的規約主義は Kuhn のパラダイム論よりもおよそ 30 年前に発表された立場であるが、今日の科学論のもとでの再検討を要する見解を提出しているといえよう。

もうひとつの意義は,Wittgenstein の私的言語問題において Ajdukiewicz に非常に類似した言語観がみられるということに存する。デカルト以来の近代哲学においては、「すべての知識と説明の出発点は、自分自身の存在と自分自身の心の状態を直接的に知ることにある」ということが暗黙の了解になっていたが、このような観点は、自己の感覚を内的な直示によって名づけることを認め、したがって私的言語の可能性を示唆するものである。20 世紀に至るまで近代哲学が敷衍したこの認識論上の前提に対して哲学史上初めての異議を唱え、私的言語の不可能性を主張したのが Wittgenstein であった。Wittgenstein によれば、言語を理解するとは言語をどのように使用するかを知ることであり、そのような能力は外的な基準によって、すなわち、人々がどのような行動をするかによって測られるという。つまり、ひとが言語表現を使用する能力について、そのひとの行動という側面からの基準を想定している点において,Ajdukiewicz と Wittgenstein は共通している。したがって,Ajdukiewicz の言語理論と Wittgenstein の言語ゲームの理論とはその議論のスタイルや目的は異なっているが、その言語観の本質的な性質の一致ゆえ、これらを比較することによって私的言語問題についての新たな見解を得られることが期待される。

参考文献

- [1] Ajdukiewicz, K. [1931]: On the Meaning of Expressions, in *The Scientific World-Perspectives and other Essays 1931-1963*, Giedymin, J.(ed.), Reidel, pp1-34.
- [2] Ajdukiewicz, K. [1934]: Language and Meaning, in *The Scientific World-Perspectives and other Essays 1931-1963*, Giedymin, J.(ed.), Reidel, pp35-66.
- [3] Ajdukiewicz, K. [1934]: The World-Picture and the Conceptual Apparatus, in *The Scientific World-Perspectives and other Essays 1931-1963*, Giedymin, J.(ed.), Reidel, pp.67-89.
- [4] Ajdukiewicz, K. [1935]: The Scientific World-Perspective, in *The Scientific World-Perspectives and other Essays 1931-1963*, Giedymin, J.(ed.), Reidel, pp.111-117.

の問題をどう扱うべきかについては今後の課題としたい。

電気めっき産業の技術的特質に関する研究

伊藤 詠

日本における電気めっき産業は、明治初期の手工業的な生産方式に始まる歴史の長い産業であり、昭和40年代を境とした急速な機械化・自動化を経て、現在もあらゆる製造業の基盤技術・基盤産業として重要な役割を担っている。その一方で電気めっき専門業者の大部分が中小零細企業であるが、そこには日本で独自に発達した技術も多く内在し、技術的にも納期や単価の面からも海外諸国では不可能とされるめっき加工もある。しかし現在の長期化する経済の閉塞状況において、典型的な下請受注型産業でもあるめっき産業は、発注元である大手メーカー等の競争力低下を受け、産業規模としては縮小する傾向にある。しかしこれに対する社会的関心は低く、めっき産業の持つ技術的な特性やその歴史の変遷に関する研究も十分ではない。現在、機械化・自動化が進んだ実際のめっき工場においては、めっき液の発達もさることながら、その作業工程や生産設備が、実際の生産状況や工場規模などの構造を規定している側面があると考えられる。そこで本研究ではめっき製品の生産工程を主眼に置き、その発展過程を実地調査を行った結果も交えて検討し、その技術的特質を分析した。同時に日本における中小企業技術の一例としてめっき技術を捉え、今後の電気めっき産業における技術発展の可能性についても検討した。

古代の装飾めっきに始まり、第2次大戦に至るまで、めっき作業は基本的に手作業による工程で行われていた。江戸期までは主に職人による金・銀の装飾めっきが主流であり、水銀アマルガムめっき法、あるいは焼着法といった技法によるもので、それらは多くが鍍金師、鍍師などの職人たちの手によって秘伝として伝えられ、独占されてきたものだった⁽¹⁾。1955(安政2)年、薩摩藩主島津斉彬によって電気めっき技術が初めて日本に紹介されたが⁽²⁾、明治初期まではそれらの鍍師、鍍金師などの職人たちが中心となって、現在まで続くめっき産業の基盤となったのである。特に江戸職人の集中していた東京では、日本で最も最初にめっき業者の組合が明治22年に結成されており、現在でもめっき専門業者が最も多いのが東京である。

日本において最初にニッケルめっきを行ったのは、明治20年に設立された宮川電鍍工場である。創業者・宮川由多加(1865-1904)は三河国の出身で、代々庄屋という裕福な家庭に生まれ、後に東京帝国大学の医科に入学する。初めは医者を目指したが、薬剤を学びながら化学を専攻するようになり、ここで電気めっき技術を研究し、その将来性に着眼すると共に、日本に近代的めっき工場がないことから、本格的な電気めっき工場設立を考えたという。宮川は独力で電気めっき技術の研究・実験を続け、明治20年、東京下谷区竹町に「宮川電鍍工場」を創業。後に神田区和泉町に工場を移転し、明治25年頃から本格的に事業化する。これが我が国最初のめっき工場組織である⁽³⁾。ニッケルめっきの登場こそがめっき技術を単なる「職人芸」から「工業技術」へと転換させる端緒となった。事実、一時は100人を越えるまでに大きくなった宮川の工場は、当時としては大工場の部類に属していたと思われる。こういっためっき技術の工業化が進む一方で、弟子を数名抱えるだけのような「職人」たちがめっき業者の大多数を占めていた。これらの業者は昭和初期まで小規模な工場で「徒弟制度」的な操業を続けており、ここから独立した専門業者たちが増

えることで、現在まで続くような大多数の中小めっき工場の元になっていったと考えられる⁽⁴⁾。昭和初期におけるクロムめっきの工業化を経て、めっき技術はその応用範囲を広げ工業技術として普及していったが、中小工場を中心とした産業であり、設備の近代化は進まず、労働環境も良くなかった⁽⁵⁾。これはめっき需要がそれほど大きくなかったこともあるだろうが、バフ研磨工程や各種前処理工程、めっき工程、液管理などにおいて人手や熟練技術に頼る比重が大きかったこと、これに伴って量産性が低かったことも原因であったと思われる。少なくとも第2次大戦中を通して、中小めっき工場の大半が手作業で工程をこなしており、機械化されている部分のごくわずかであった。めっき産業における本格的な機械化は戦後の新しいめっき技術の登場・普及を待たなければならなかったのである。

戦後のニッケル資材不足を契機として始まった光沢めっき浴の開発と普及は、後に電気めっき工場における工程全体をも改変させるほどの重要性を持っていた。まずそれまでめっき面光沢を出すために必要とされていためっき後のバフ研磨工程を省略化もしくは廃止することを可能にした。さらに光沢めっき浴の普及に必要な要素として、濾過器やめっき槽、整流器、電解研磨と界面活性剤などめっき工程各部に影響のある技術的進歩が促された。さらに昭和30年代以降の経済復興とそれに続く高度経済成長の時代にあつて、めっき産業もまた急増した需要に対応すべく、生産合理化と製品の量産化体制を必要とした。

こうして自動めっき装置が登場し、昭和30年代後半から40年代にかけて普及して行くが、このような自動めっき装置を可能にしたのも、前出の光沢めっき技術とそれによって促された他の周辺技術改良が前提となつてのことであつた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

その一方で、生産性や前処理工程不全の問題から中小めっき工場では必ずしも完全自動化には進まず、工程の柔軟性を残し、多品種少量生産に対応できるような、現在の中小めっき専門家の生産システムが形成されていった⁽⁸⁾。

現在、めっき専門家はその大部分が中小企業である。ここでいう中小企業とは、「中小企業基本法」（平成11年改定）に定める中小企業の定義によるもので、製造業においては「資本金・3億円」「従業員数・300人」となっている。この定義に沿って考えた場合、例えば全国鍍金工業組合が平成11年末に調査した電気めっき関連事業社の企業数2201社のうち、99%にあたる2180社が中小企業である。しかも大企業である残りの21社は基本的にめっき専門家ではなく、めっき内製ラインを持つ企業である。内訳としても、従業員100人以下の事業所が全体の97%、10人以下の小規模事業所が全体の55%を占める⁽⁹⁾。このことからめっき専門家は中小企業性、すなわち小規模性という特徴を持つと言える。

江戸時代から続く職人的な装飾めっき生産体制を母胎として発生しためっき産業は、ニッケルめっき、クロムめっきといった工業用めっき技術へとその重点を変換しつつ、実際には第2次大戦頃までの間、根強い徒弟制度と少人数による手作業工程を中心とする小規模な生産体制を持つ中小めっき専門家が大多数であつた。そしてこの時代の中小めっき専門家において最も職人的な熟練を必要としていたのがバフ研磨工程であつた。そのため研磨の外注化と、その後の光沢めっき技術の登場と普及は研磨工程の省略化を促し、結果としてめっき工場から旧来の徒弟制度を廃することになった。さらにめっき工程自動化の起因となり、現在のような量産可能なめっき製造ラインへとつながつたのである。

しかし一方でめっき専門家は今だその大多数が中小工場である。量産化や合理化が必ず

しも事業規模の拡大に向かわなかったのはなぜか。

まずめっき工業は基本的に自己の製品を持たず、他の製造業で生産された製品上に委託によりめっきを加工するという業態である。製品に対しては多くの場合2次・3次加工業種であり、下請生産的な業務が多い。製品を持たないため、発注先からの単価による制約を受けるが、一方で過剰に在庫を持つ不安は少なく、大きな資金が不要で代金の回収が早いという部分もある。さらに比較的小規模であっても量産性があり、需要の変化に対応しやすいという側面も持っている。

近年、製造業のニーズの変化に伴って、電気めっき生産体制にも様々な要求が成されるようになってきた。そのため中小めっき業者においては少品種多量生産型の大型装置は重要視されなくなり、多品種少量生産に対応できる、半自動式か処理工程を自由に選択できるキャリア型の自動装置へと移行しつつある。同時に、品質保証への対応として、めっき浴の流動・浴温の精密制御、電流、めっき時間などのめっき諸条件の制御、めっき浴組成の自動分析・自動補給、めっき膜厚等検査の自動化、検査結果の自動統計処理などの技術が登場してきた⁽¹⁰⁾。

めっきは加工コストが安く、加工要求に対する即応性、柔軟性があり、めっき金属種類、被めっき製品素地やその形状・大きさ、その他諸条件によって極めて多様な応用範囲が存在している。こうした多様性ゆえに大工場においてすべてのめっき製造を行うにはコストの面から困難が伴い、中小めっき業者においては、その得意分野、独自技術がそれぞれ存在している。こうしためっき技術の特質は、工業集積地帯に集中していた中小めっき工場と結びつき、古くから都市型産業として発展してきたが、戦後の急速な需要増加や高い地価に伴う工場面積の小ささ、さらに労働力不足という問題に対し、光沢めっきやそれに続く小型自動装置など工程を効率化することで対応し、限られた小規模な生産体制の中でも量産化と省力化を実現する方向で技術発展をしてきた。しかしこれらのめっき装置の自動化・量産化は必ずしも一様に進行したわけではなく、金めっきをはじめとする一部の装飾めっき技術のように自動化されなかったもの、あるいはクロムめっきのように中小規模での生産性からむしろ半自動化にとどまったようなものなど、それぞれの工場の業態や使用めっき浴、製品の目的などに合わせて多様に進行してきた⁽¹¹⁾。

さらに環境問題においては、資本の必要な大型処理施設の必要性に対して、例えば東京都における京浜島めっき団地や城南協同処理センターのような低金利・長期の政府資金援助を受けた工業団地など、世界でもあまり例のない協同化事業など独自の方法で対応してきた。都市部に集中するめっき業者にとって、排水処理設備の設置は資金の問題と共に、工場敷地の問題から困難であり、こうした合同事業はめっき業者がその生産体制を維持するためには大きな意義があった⁽¹²⁾。

こうして日本におけるめっき技術は、中小企業という規模に適應する形態を持って発展してきたといえる。それは単にめっき液の進歩のみならず、装置の進歩や環境問題など他の社会的な影響を受けながらも、柔軟な生産体制を維持することを前提にした生産システムや産業構造が形成されてきたためである。しかし同時に、めっき業者の環境問題対策における協業・合同化や近年の労働力不足といった側面は、中小企業であるめっき業者が個別に対処していく限界を示したものとも言える。まためっき工場における環境対策、工場敷地、人手不足、毒物劇物管理等の様々な制約は、小規模めっき工場の新規参入を阻

害し、業界全体として拡大を望めない状況にある。さらに現在、需要の構造的な変化によって、これまで大部分のめっき専門者が手がけてきた基本的なめっき種別は今後も受注が困難になると予想される。これは外観・装飾性を求められためっき技術から、より一歩進んで機械的・電氣的性質などを付与する「機能めっき」技術への本格的な転換が求められているものと考えることができる。しかしこうした状況は、個々のめっき専門家による対応のみでは限界がある。

今後、中小めっき工場は独自技術の開発に重点を置きつつ、柔軟な方向転換を必要とされる。生産の合理化、新技術の開発・導入と共に、協業・合同化事業などによる新技術開発とあらたな需要の喚起も必要とされるであろう。その際には電気めっき産業の発展過程において、中小企業によって培われてきた多様性、柔軟性を持つ生産システムが、新たな技術の普及を促進させるのに有効性を持つものと考えられる。

(1) 東京都鍍金工業組合『東京都鍍金工業組合八十年史』東京都鍍金工業組合, 1971年, 9-23頁.

(2) 高浜二郎『メッキ語源考』鍍金研究所, 1957年, 12頁.

(3) 日本鍍金材料協同組合『鍍金の世界』, No. 378 (1999年), 94頁

(4) 『東京都鍍金工業組合八十年史』, p. 99-101

(5) 電気鍍金研究会『石田武男先生追悼集』電気鍍金研究会, 1991年, 19頁.

(6) 『東京都鍍金工業組合八十年史』, p. 187-408

(7) 全国鍍金工業組合連合会『全鍍連30年史』全国鍍金工業組合連合会, 1978年, 40-118頁.

(8) 聞き取り調査等による

(9) 全国鍍金工業組合連合会『平成12年度全鍍連要覧』, p. 19 (2000) 全国鍍金工業組合連合会

(10) 中小企業研究所『中小企業のための技術動向分析(表面処理) 第2分冊』中小企業研究所(中小企業事業団・中小企業大学校) 1988年 p. 1 -2

(11) 聞き取り調査等による

(12) 『全鍍連30年史』, p. 100

制御技術への状態空間法の導入過程の分析

An Analysis on Introducing Process of the State-Space method to Control Technology

木本研究室 鈴木秀人

指導教官 木本忠昭

This dissertation analyzes the development process of the control theory based on the state-space concept in control technology. Between the researchers of the Control Engineering classifying control theory in *Classical* and *Modern* is accepted. However, an interpretation of modern control is various, and is not in agreement. It is thought that the disagreement of these views originates in the fact whose introductory process of the state space method to control technology was not clear. In order to solve the essence of this historical process, the author tried to build the history of control as development process of engineering technique drawn from technology and there.

第1章 研究背景と研究目的

「制御」は、今日に至るまでその理論的解明や技術において成果を挙げた。その制御を分類する方法の中に、制御(理論)を古典と現代に分類する仕方がある。しかし、それぞれの規定相互の区別に関しては様々な見解があり、制御工学の研究者の間においてさへ一致していない。特に現代制御理論に関する解釈の違いは顕著である。周波数を言語としてブロック線図や伝達関数によって制御対象を記述する古典制御理論は、第2次世界大戦後から1950年代にかけて成熟期を迎えた。見解の不一致には、古典制御理論に相次いで出現した状態空間法と制御技術の接触過程が明らかになっていないことが影響を与えていると考えられる。

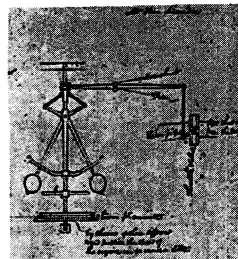
制御史の先行研究では、古代から18世紀末までにおける技術中の「フィードバック制御」に着目した Otto Mayr の研究¹⁾と、Stuart Bennet による18世紀末から1955年頃までの制御技術とそこから導かれた手法の発達過程を扱った研究²⁾が代表的である。今日の状態空間法と制御技術の関係を取り上げた史的記述の殆どは、Bennet の研究²⁾で引用された Alistair MacFarlane の見解³⁾と Michael Athans の見解⁴⁾に基づいている。彼らは、制御技術と状態空間法の接点として飛翔体制御とデジタル計算機の登場を指摘しつつも、飛翔体技術に関する具体的な技術要求がどこに生じたのか、デジタル計算機が如何にして制御技術に取込まれたかまでは明らかにしていない。本研究は、技術とそこから形成される工学的手法の発達過程として先行研究の不明確な点を明らかにしながら制御史を構築する中において、制御技術と状態空間法の関係とその技術的特性を解明することを目的とする。そこから現代制御理論の歴史的分析にまで踏み込んで、制御技術へ導入された状態空間法の歴史的意義を考察する。

論文は6章から構成される。まず第2章においては、フィードバック制御方式が技術の如何なるところから出現して発達を遂げたのかを概観し、一般的なフィードバックシステムに対して応用可能な制御手法として形成されるまでを明らかにする。第3章においては、古典制御理論の限界を克服する努力に対して状態空間手法がどのような経過から影響を与える存在となり、結果として如何なる手法が形成されて実技術の中で成果を挙げたのかを明らかにする。第4章では、現代制御理論の出現経緯を解明し、状態空間法との位置関係を考察する。第5章では、制御技術への状態空間法の導入が制御工学全体に与えた影響を考察するために、その後の制御研究の展開を明らかにして、制御技術への状態空間法の導入の史的意義を考察する。

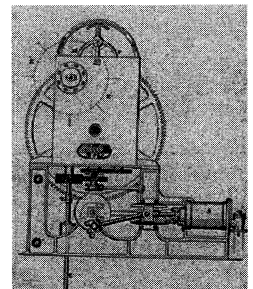
第2章 古典制御理論と制御技術

2.1 フィードバック制御を必要とした技術問題

近代的なフィードバック制御技術は、蒸気機関の定速回転技術としてリフトテングから発展したガバナから始まった。その調整メカニズムには、今日「ネガティブ・フィードバック(Negative Feedback)」と呼ばれる、設定値と制御システムからの出力差をとって、その値を制御システムへの入力とする制御原理が用いられていた。19世紀中頃には、同様な原理を有する制御装置が蒸気船の操舵機関に採用され、サーボ(servo)動力と呼ばれるようになった。やがてサーボ動力は魚雷や砲塔の旋回機構、20世紀に入ってからは航空機のオートパイロットの中に見られるようになった。これらサーボ動力を採用したシステムの多くが、最大値と最小値の二値動作—リレー式—の制御動作をしていた。



(a) Wattのガバナ



(b) Grayの操舵機関

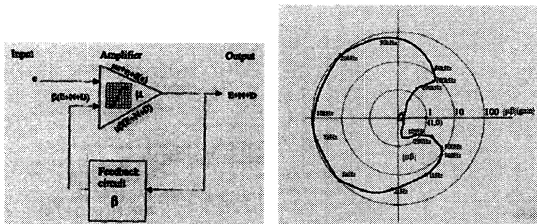
図1 初期における制御問題の解決技術

ガバナは蒸気機関のみならず、幅広い原動機の回転制御装置として広く普及した。1840年頃にイギリスの物理学者 George Biddell Airy が、ガバナの安定性解析で、微分方程式と制御問題を結合したのを皮切りに、制御問題の理論研究が進み、1866年にJames Clerk Maxwellが、ガバナの運動を表現した3次までの微分方程式が安定である条件を示したことによって今日的な理論解析の突破口が開かれた。n次までの拡張は Edward Jhon Routh によって達成され、同様の判別方法が、独立して1895年に Adolf Hurwitz によっても示された。

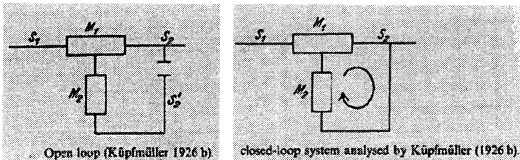
2.2 古典制御理論=周波数応答手法の成立

次に制御の理論的手法が発達したのは通信技術の領域であった。20世紀になると電話の普及が始まった。長距離音声伝送の問題点は、信号のひずみと減衰であった。ひずみという非線

形特性を改善するために 1927 年にベル研究所の Harold Black が、出力信号の一部を取り出して入力側に戻す仕組みを有する「フィードバック増幅器」を発明した。この増幅器を含むシステムの安定性解析からナイキスト線図とボード線図が生まれた⁵。この周波数応答手法は、1940 年代になるとレーダー対空射撃システムにおけるフィードバックシステムの解析／設計に応用された。その中において微分方程式で表現されたシステムを周波数領域の言語に翻訳する手法が検討され始めた。MIT の Albert C.Hall は、レーダー装置のアンテナの回転が不安定になる問題の解析にナイキスト線図を応用し、その研究から伝達関数を導いた。また、ドイツの技術者 Karl Kùpfmüller が 1928 年に「ブロック線図」の原型を発表し⁶、1944 年には、アメリカ GE 社の Seymour W.Herwald も、これと独立してブロック線図を導入した。こうしてフィードバックを含む一般的な制御システムを表現する手法として今日の古典制御理論の骨格が完成した。



(a) ブラッグのフィードバック増幅器 (b) ナイキストの解析手法



(c) キュプフミュラーが用いたブロック線図

図 2 古典制御理論の手法の出現

2. 3 古典制御理論の適用と限界

第二次世界大戦が終結すると、古典制御理論を各種分野に応用する試みが始まった。その代表的分野の中に、デジタル計算機と航空機があった。制御技術と計算機技術の結びつきは、古典制御理論が確立する以前に始まっていた。レーダー対空射撃システムの中で制御演算を実行する装置が予測機であったが、この予測機内部における演算処理を電子素子によるデジタル計算機に置き換えれば、将来的にデジタル計算機を組み込んだフィードバック制御が可能であることを MIT の Perry Orson Crawford が提案した⁷。サンプル値システムを古典制御理論に取り込むための z 変換手法の原型は、予測機の動的試験器の解析から形成された。1950 年代に入るとデジタル計算機の商用普及が始まった。当初はデータ収集やオフライン処理のみの使用であったが、1959 年に、アメリカのテキサコ社が所有するポート・アーサー精油所における精留塔の計算機制御でループが閉じられることによって、始めて本格的なデジタル計算機・フィードバック制御が実現された。

一方、古典制御理論は、1940 年代末頃から航空機の安定性補償装置(姿勢)と自動操縦装置(方向)の解析に利用されるようになった。1940 年代における航空機の翼形状やエンジン配置のような構造上の変化がこのような装置を航空機に必須のものとした。例えば、ボーイング B-47 に採用される XB-47 ヨーダンバの設計解析に際して周波数応答手法が応用されたのが最初

の例の 1 つであった⁸。また、アメリカの航空技術者 Walter W.Evans は、航空機の制御系設計問題に関連したところから根軌跡図を 1948 年に提案した。この手法は、ブラックのフィードバック増幅器の発明からナイキストによる安定性解析に始まった周波数領域における制御システム解析／設計手法の延長路線に区切りをつけた一応の最終的到達点となった。

1940 年代における爆撃機を中心とする急速な大型化が、機体の制御に必要とされる力を急増させた。制御動作が装置を構成する動力や材料の性能の上限で実行される場面が頻繁に出現するようになり、制御システムの非線形性は一層強まるばかりであった。また、精密な制御を実現しようとするれば制御則計算が複雑化した。このような事態に対して 1 入力 1 出力の線形システムのみを対象とする古典制御理論は、対応できなかった。つまり古典制御理論は限界点に突き当たった。

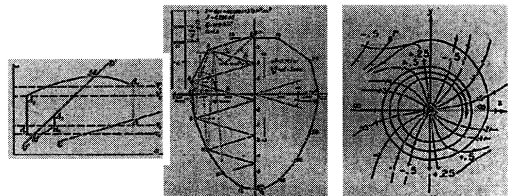
表 1 アメリカにみた爆撃機の大型高性能化

形式名称	YB-9	B-17B	B-25	B-29	B-36A	XB-47	B-52H
最高速度(km/h)	303	470	518	575	555	930	1,017
作戦高度(m)	4,389	7,504	9,144	10,241	11,918	12,497	14,539
搭載兵器量(kg)	906	2,177	1,814	9,072	32,659	9,979	22,680
翼長(m)	23.44	31.67	20.63	43.07	70.10	35.36	56.39
全長(m)	15.73	20.45	16.49	30.18	49.38	32.80	47.55
自重(kg)	3793	12543	7824	33793	61244	34473	78354
総重量(kg)	6056	17235	12953	61235	141067	74843	221353
機関(馬力×個)	600×2	1200×4	1700×2	2300×4	3250×6	3750lb×6	17000lb×8
導入年次	1931	1939	1940	1943	1947	1947	1962

第 3 章 飛翔体制御への要求と状態空間法の導入過程

3. 1 負荷の急変動と制御過程の最適性

プロペラ回転の安定化のための制御技術が、Watt 以来のガバナであった。しかし、空中における制御対象の特性変動の幅と変動速度が水上とは比較にならない程に激しかったにもかかわらず、航空機のような飛翔体が制御入力に利用可能なエネルギーは船舶より著しく制約された。この事情に対する研究者側の対応を支えたものは、突然の大きい外乱に対しては、利用可能な最大値を制御入力に用いることで最適な制御成績が達成される(速やかな現状回復、新たな平衡状態への到達)という技術的直感であった。



W.ホルト(1904) D.J.カルマン(1944) A.A.アンドロフ(1937)

図 3 位相面の工学的利用の変遷

Herbert K.Weiss は、非線形制御問題を解析するために適した手法を探す中で、D.J.Kalman や A.A.Andronov らがその工学的有効性を提示していた位置—速度を座標軸とする位相面に辿りついた。彼のリレー要素を含んだ非線形制御システムの位相面解析に関する研究成果は 1946 年に発表された⁹。Donald McDonald が取扱ったのは簡単な純慣性システムのみであったが¹⁰、リレーサーボ機構を位相平面で解析する中で、始めて最短時間制御問題に一つの明確な解答が与えられたので

あった。しかも彼が提案した手法は、新しい動力源や材料を必要としなかった。位置と速度を座標軸にとる位相平面を用いた最短時間リレー制御の問題は、1950年代前半に盛んに研究された。

この制御問題の研究者にとっては、二次システムにしか対応できないという位相平面の制約が、より高度な制御の実現を阻んでいると思われた。Richard E. Bellman は1954年に発表したダイナミック・プログラミング(Dynamic Programming: 動的計画法)の研究中で、「状態変数」と「状態概念」を導入していた¹¹。1955年には、Rudolf Emil Kalman が位相空間上の非線形関数を部分線形と見なすことから、ベクトル行列型の連立一次微分方程式を最適リレー制御問題に導入した¹²。Richard E. Bellman は、制御に対応させてダイナミック・プログラミングの意義を思索していった時に、位相面/空間において解析が盛んに行なわれていた最適リレー制御問題とのアナロジーに辿り着いた。1956年にBellmanは、アメリカではDonald McDonaldに始まるリレーの最適切換えタイミング問題が、バンパー制御問題*に一般化され、ダイナミック・プログラミングによって解答が与えられることを示したのである。同時にダイナミック・プログラミングで導入された「状態(変数)」概念が、始めて制御問題に取り込まれることになった。制御対象となるシステムはベクトル行列型の線形微分方程式で与えられた。同年、ソヴィエトの数学者L.S. Pontryaginらのグループが、最大原理を制御問題に導入されることによって、リレーの最適切換えタイミング問題は、位相面(空間)のようなトポロジ的手法に頼ること無くn次元システムまで一般化して解くことが可能になった。

結局この問題の原点に存在した航空機の負荷急変動時における最短時間回復という制御技術上の問題は、対象を航空機に限定しない、一般的な最適制御問題への解法を導いた。

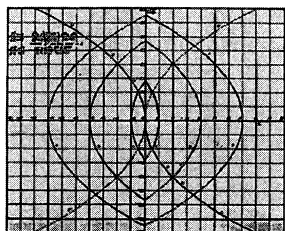


図4 マクドナルドの用いた位相面解析法

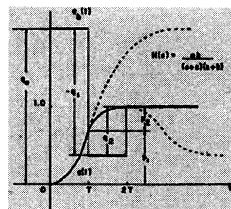
3.2 エンジンの効率化と多変数同時制御問題

飛翔体には、全般的な制御特性の向上が望まれていた。そのような背景下で、1948年には、エンジンの特性を支配する独立変数を複数選択し、これらの変数間の相互干渉を抑制しながら制御を行なう可能性が提示された¹³。

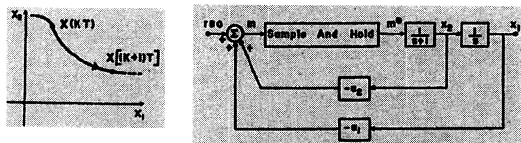
1954年にはサンプル値制御手法の特性に関する研究の延長線上で、サンプル値システムを、ステップ(階段状)入力に対して有限時間で目標値に誤差0で収束する有限時間整定応答(デッド・ビート: dead-beat)問題としてシミュレーション的に取扱えることが提示された¹⁴。Kalman はこれと、最適リレー制御の共通問題性を発見した¹⁵。この結果、リレー制御手法の研究における諸概念・成果を、サンプル値制御手法に直接援用することが可能となった。

* 制御入力 u が +1 または -1 に限定され(つまり最大値とその反転した値)、その切換えて制御を行なう方式をバンパー制御という。

状態空間法は、ここからサンプル値多変数制御問題に導入された。設計された制御システムを実機導入するためには、サンプル時間刻間の制御対象の振舞いに関しても最適性を保証する制御手法が必要であった。Kalman は、目標に到達するまでの全ての瞬間における最適性を保証するサンプル値制御システムが状態概念の導入によって設計可能であることを提示した。Kalman が古典制御的な周波数領域の言語で示されていた有限整定応答問題を状態概念で捉え直したときに始めて、状態をフィードバックして制御するという本格的な発想が生まれた。この手法は、最適レギュレータ(レギュレータ: 目標値 $r \equiv 0$)として、状態概念に基づく制御手法を構成する要素の一つとなった。多変数同時制御を実現するために決定的な役割を果たしたのは、Kalman が1960年のIFAC総会で発表した状態概念に基づく制御システムの根本特性として、可制御性・可観測性を定めた研究¹⁶であった。



(a) 有限時間整定問題の説明図



(b) 状態遷移と状態フィードバック概念の例示

図5 R. E. カルマンによる状態空間に至る制御研究

現実の制御システムでは、状態変数が全て観測可能であるとは限らないことが直ぐに理解された。David Luenberger は、この不具合を克服するために状態を推定する装置、即ち「オブザーバ(観測器)」を着想し、1964年にその手法原理を発表した。オブザーバが導入されたことによって、制御システムの状態を全て観測する必要がなくなった。Kalman や Luenberger の研究が発表された当時は、リアルタイムでオブザーバ機構の計算処理をこなすことが可能な小型高性能計算機が存在していなかった。それを実現するマイクロプロセッサの出現は1970年代まで待たねばならなかったのである。

3.3 観測精度の向上と制御問題

フィードバック制御は、センサからの情報を前提として成立する技術であった。状態空間法が制御問題に導入されたことによって、制御と観測(計測)の間に存在していた等価性が、Kalman より双対原理として明示された。それにもなつて多変数制御とディジタル計算機の利用に適した制御手法の特性は、双対な位置にある観測(計測)手法として展開した。

状態空間概念と制御問題が接触を始めたばかりの1957年には、ソヴィエトでスプートニク1号の打上げられていた。状態空間法に基づく観測手法の技術的要求もまた、制御手法と同様に飛翔体と関わる場所に存在していた。宇宙船の任意時間における状態を見積る(推定する)手法が開発される必要性があったのである。アメリカ航空宇宙局(NASA)のグループがその研究を進めていた最中の1960年には、Kalman が、自身で開発した最

適レギュレータと双対原理から、やはり状態を推定する手法一後に Kalman フィルターと呼ばれるようになる一を導いていた¹⁷。信号は、白色信号が加えられた線形動的システムの出力であるとされた。問題の定式化を変えず、旧来の時間域におけるウィナーフィルターの拡張としてフィルタリング問題を定式化した。この研究に並行して、技術側からフィルター問題に関するウィナーのものを含む従来手法の拡張が要求されていた。結果として Kalman フィルターで採用された時間域での状態推定アルゴリズムは、C-5A 輸送機やサターンVロケットに搭載が検討され、アポロ計画における宇宙船の航法システムにも応用された。また、ジェット推進研究所(JPL)の Kalman フィルターの研究成果は、1971年に打上げられた火星探査衛星マリーナ9号の航法装置に組み込まれた。

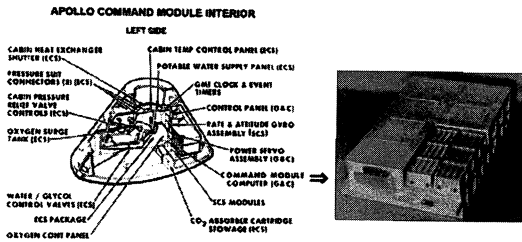


図6 アポロ指令船に搭載された小型計算機

3. 4 新たな制御手法としての状態空間法

飛翔体制御に関わる技術問題から始まり、古典制御理論の限界点を克服しようとする試みを通して導かれたこれらの手法には、はっきりとした一つの共通点が存在していた。それが制御対象のシステムを1階の連立常微分方程式(状態方程式)で与える状態空間法の使用であった。状態空間法の基盤は、従来のような「周波数」概念ではなく、「状態」という時間域の概念であった。古典制御理論では克服不可能であった問題は、この状態空間法の手を借りることにより始めて解決手法が産出された。制御要求が個別に出現したにもかかわらず、一連の状態空間法に基づく制御手法の相互関係は密接であった。宇宙船の位置や姿勢などの推定問題に貢献した Kalman フィルターは、可制御性・可観測性という状態空間表現された制御システムの特性理解と、その状態空間法による最適レギュレータの導入無しには出現し得ない技術であった。そして可制御性・可観測性という概念は、最適リレーサーボ制御の切り替え問題と、サンプル値制御手法における有限時間整定問題との共通性が認識されることなしには到達し得ないものであった。同時に多変数制御問題へ解が与えられることもなかった。さらに最適リレーサーボ制御問題は、状態空間概念を導入することなしに経路の最適化問題に対して一般的な解を与えることが不可能であった。その状態空間概念は、リレーサーボ制御問題が位置一速度を座標軸に取った位相面を用いて解析を行なうという準備段階があって始めて制御に導入されたのであった。そして、この状態空間法の背後に存在する制御技術側の特徴に着目すると、前節までに取上げた幾つかの状態空間法に基づく制御手法は、結局リレーサーボ制御という一つの制御方式に辿り着いた。状態空間法を制御技術に導入させる直接的なモメントは、制御技術自身の中に存在していた。

第4章 状態空間法と「現代制御理論」

4. 1 「現代制御」概念の出現

1950年代における先進の周波数応答法、即ち古典制御理論が成果を挙げるに従って明らかになった限界点に対して解決法を与えた制御手法は、ベクトル行列表示された状態方程式に基いていた。最適レギュレータなどの状態空間法に基いた制御手法は、当時の「先進」よりも前に飛出したために、既存の制御理論の中での位置が不明確になってしまった。

現代制御(理論)は、制御技術へ導入された状態空間法に基づく制御理論が、IFACという制御研究者の国際的なコミュニケーションの場を介して普及し、その有効性が評価されたことに影響を受けて、新たに制御を分類しようとする動きが(アメリカを中心とする)研究者内部で始まったことから1964年頃までに出現した。それはまさに状態空間法の絶頂期であった。同時に、従来の手法を総称する古典制御(理論)という名称もこのとき始めて出現した。そして1965年までには制御理論を古典と現代に類別することが専門研究者間で一般に普及するようになった。

4. 2 「現代制御」解釈の食い違い

1964年のアメリカ航空宇宙エレクトロニクス会議に出現した最初の「現代制御」の解釈は「1959年以降の状態空間法に基づく制御手法。制御対象は線形・非線形」であったのに対し、同年にJulius Touが提示した「現代制御理論」は「状態方程式と最適制御」であり、現代制御の導入当初から既に解釈の食い違いが生じていた。制御の専門研究者の間において、この「現代制御」解釈を巡る食い違いが議論されることは無かった。書物タイトルに「現代制御」を含むものは多いが、その実、自動制御の便覧や辞典に「現代制御」という項目は、今日に至ってもなお存在していない。例えば最近では、須田信英監修による『自動制御用語辞典』(朝倉書店、2000年)には「現代制御」という項目はない。

4. 3 状態空間法と「現代制御」の概念

第3章まで明らかにした状態空間法に基づく制御手法と、現代制御(理論)に対する既存解釈と照合すると、「現代制御」の概念規定は、「1959年以降」といった年代では規定されず、また「Kalman」といった特定個人名を当てはめることも的確ではないことが分かる。

第5章 状態空間法の制史上の意義

5. 1 状態空間法と古典制御技術との関係

数学的な観点から見れば、古典制御理論における伝達関数表現を全て状態空間手法の中に取り込むことが可能であるように思われた。古典制御理論における伝達関数は、制御システムの内部構造をブラックボックス化するものであった。そのブラックボックスにメスを入れて内部構造を明らかにすることを実現した状態空間法は、制御の理論的研究が根源的なところに到達したことを専門家に感じさせた。こうした背景下で、専門家の中に状態空間法、特に最適制御手法を万能視する見解が出現した。

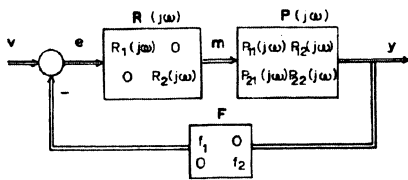


図7 逆ナイキスト法(INA法)のシステム表現

状態空間法の有効性を疑問視する見解は大学などの研究者や現場の技術者の中に常に存在してきた。こうした反動力を受けて、1960年代末頃からイギリスの大学研究者の間で周波数領域における多変数制御システムの設計・解析手法の開発が始まった。しかし初期における古典制御理論拡張の試みから産出された一連の制御システムの設計・解析手法は、状態空間法に基づく制御手法に対する根本的なブレイクスルーにはなり得ないという認識が広まった。この強い反動力の出現には、制御技術への状態空間法の導入が古典制御理論とは独立したところから始まり、状態空間法の導入過程には従来の古典制御理論の手法を置換えようとする姿勢(=淘汰)が常に潜在しており、そのことが反動力を産出したのである。この状態空間法に対する反動力が、周波数領域で多変数問題を取扱い可能とする制御手法の開発動機に強い影響を与えた。

5.2 古典制御理論の適合性

状態空間に基づいた制御手法を有効に機能させるためには、状態方程式が制御対象の特性を正確に表現していることが必要とされたが、多くの場合における状態方程式で記述された制御システムは、実のところ現実世界の極めて荒い近似を与えるに過ぎなかった。つまり「制御対象のモデルが正確に得られていれば」という現代制御理論の有効性の前提は、最初から成立しない場合が多かった。そこで今度は、モデル化誤差を許容する設計手法という観点からLQG制御手法の限界点を超越する試みが始まった。モデル化の誤差を許容する程度は「ロバスト性(Robustness)」と呼ばれ、やがてロバスト制御問題が制御研究者の関心を集めるようになった。George Zamesが提案したノルムは H_{∞} ノルムと呼ばれ、この周波数領域における指標に基づいて制御システムのロバスト性の評価を行なう(小さいほど良い)設計手法は、今日 H_{∞} 制御(エイチ・インフィニティ又はエイチ・無限大制御)と呼ばれるようになった。これらの研究は、古典制御理論における経験と直感を活かした設計手法を合理的に基礎付けようとするものであった。John Doyleは、これらの研究が切り開いた制御システムの設計手法を「ポスト・モダン制御理論」と呼んだ。研究が始まったばかりの頃は「 H_{∞} 制御はLQG制御とは本質的に異なる新しい方法で、LQGよりも優れている」という見解が多数を占めていた。しかし、1988年には、 H_{∞} 制御を状態空間法で取扱う方が設計アルゴリズムとしての見通しが良いことが示されて、 H_{∞} 制御はLQG制御を一つの極限に含むことが理解されるようになった。こうして周波数領域手法の利点(設計に経験と直感が活用可能)と状態空間法の利点(制御システムの表現が計算機処理向き)を併せ持った制御システムの設計手法が出現することによって、制御研究は再び新たな発達段階に突入した。実は、制御対象となるシステムの伝達関数表現は、その状態方程式表現と完全に交換可能ではなかった。伝達関数表現されたシステムの「隣り」が、状態方程式表現では必ずしも「隣り」になるとは限らなかったのである。制御手法を現場に導入するときの感覚的微妙調整が有効であるためには、このことが非常に重要であった。結局のところ、状態空

間法は古典制御理論を完全に克服して、これを淘汰することはできなかった。つまり状態概念は、古典制御理論の有効性の全てを包含した万能の制御手法を提供することはできず、部分的な優位性の提示にとどまった。状態空間法は、古典制御理論に内包された工学的設計問題における有効性(経験と直感)を浮彫りにし、その周波数領域における古典制御理論を更に発達させようとするモーメントとしての重要な役割を果たした。

5.3 状態空間法の制御史上における意義

Doyleがポストモダン制御という言葉を造語した1990年頃には、そこに至るプロセスが「古典制御理論の再発見」、「制御理論のルネサンス」と呼ばれ、更に古典制御理論と現代制御理論を物理学における量子力学と古典的なニュートン力学になぞらえた見解も出現した¹⁸。制御の専門家が歴史的な表現を好む傾向にあるのは、制御手法を分類するための形容句に「古典」や「現代」が選択されたことが影響している。古典/現代の分類出現以前における状態空間法の制御技術への導入が、制御手法の新たな分類形成の動機となったことを考えれば、状態空間法とその背後にある制御技術が、制御理論に関する今日的な歴史認識を生み出した根元であることが理解される。

状態空間法が制御技術に導入されなければ、現代制御理論は出現しなかったことは第4章において明らかにした経緯からも確かである。そして第3章で検討した通り、パンパーン制御と呼ばれるリレー形式の動作を含んだ制御技術とそれに対する研究努力が払われること無しに、状態空間法は制御技術へ導入されることは無かった。言い換えれば、制御問題におけるリレー動作は、情報の世界における「ビット」の世界観を制御技術の中に具現化する役割を担っていたのである。状態空間法は、古典制御理論の完全克服を目指して導入が始まったにも関わらず、結果として提示できた有効性が、適用可能前提が多いLQG制御手法のように制御の対象となる技術領域全体の一部分に対応するものに過ぎなかった。しかしその部分的ゆえの不完全さこそが、制御研究者をロバスト制御手法のような次世代の制御システム設計/解析手法の開発に着手させるモーメントになった。

第6章 結論

本研究では、状態空間法の制御技術への導入過程と、これに基づいた理論的手法の展開の史的分析を試みた。これまでの第2章から第5章に至る議論から以下のように結論する。

1. 状態空間法の起源は1956年である

1940年代を中心として急速に進んだ航空機技術の構造変化(大型化や推進動力の変化)と性能変化(高速化)は、制御に必要なエネルギーと使用できるエネルギーの間に矛盾を生じさせた。この矛盾が新しい制御手法の検討を促した。手法開発の方向性は、対象の制御に要する力が、制御入力として利用可能な力よりはるかに大きい場合は、利用可能な力の最大値を制御入力に用いることで最良な制御成績が達成されるという従来からの技術的直感から規定された。こうしてリレー動作(パンパーン制御)方式による最短時間制御問題が提起された。やがてBellmanがダイナミック・プログラミングと、最適リレーサーボ制御手法との類似性を発見し、自らの手法によって最適リレーサーボ制御問題がパンパーン制御問題として解けることを1956年に提示した。このとき「状態(State)」という術語と概念は、初めて工学的見地から制御問題に導入された。それまで制御研究者の中で図式手法の延長線上に捉えられていた位相空間法は、新たに状態空間法として捉え直され始めた。それ故に1956年は、現代制御理論では無く制御工学における状態空間法の起源として位置づけられる。

位相面(空間)解析法は、状態空間法の母体として重要な役割を果たした。

2. 状態空間法は現代制御理論の産出起源の一つである

状態空間法と現代制御理論は同時に出現したのではない。「現代制御」という術語が文献の中で最初に登場したのは1964年であり、この年には既に制御研究者内部で理論的手法を「古典」と「現代」に分けて捉える気配が出現していた。しかし現代制御理論という概念規定に年代区分を含ませることは適切ではなく「線形システムを対象とした状態概念に基づく制御手法」が現代制御を構成する手法的な必須要素である。現代制御を構成する要素は、理論的手法に限定されるものではない。さらにその発達は、時代毎の技術的実現手段の到達水準にも依存しているが、制御技術に状態空間法が導入されなければ現代制御とそれに対応する古典制御という分類、特に工学理論的な分類は今日的な形では出現しなかった。その意味において状態空間法は、制御理論の今日的な史的枠組みを形成した母体といえる。

3. 状態空間法は制御理論の全体的発展を推進した

可制御性・可観測性に基礎づけられた多変数制御問題へのアプローチは、最適レギュレータという状態フィードバック制御手法を与え、やがてオブザーバ等の支援手法と共に、1入力1出力の伝達関数では不可能であった精密制御を実現した。これら一連の制御手法は全て状態空間概念に基づいて制御技術の中で形成されて、成果を産出した。一方でこのような状態空間法の難点が、やがて逆ナイキスト配列法などの古典制御理論の延長線上にある周波数域制御手法の拡張を導いた。古典制御理論の有効性の再確認と状態空間法を基礎とする現代制御理論の有効性に関する限界認識は、今日における古典と現代の共存共栄の状況を産出し、1990年には、周波数域における制御手法として開発が始まった H_∞ 制御を介して両者は初めて有機的に結びついた。結局、古典制御と現代制御の橋渡しをしたのもやはり状態空間法であった。このように状態空間法は、制御理論の全体的発展を促進するモーメントとしての役割を果たした。

参考文献

- 1) Otto Mayr, *The Origin of Feedback Control* (MIT Press, 1970)
- 2) Stuart Bennett, *A History of Control Engineering 1800-1930* (Peter Peregrinus, 1979 邦訳: 古田勝久/山北昌毅監訳『制御工学の歴史』コロナ社 1998年)および *A History of Control Engineering 1930-1955* (Peter Peregrinus, 1993)
- 3) Alistair MacFarlane, "The Development of Frequency-Response Methods in Automatic Control", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 24 (1979), pp. 250-265
- 4) Michael Athans, "Perspectives in Modern Control Theory", *Science, Technology, and the Modern Navy, Thirtieth Anniversary 1946-1976*, edited by Edward I. Solkowitz, Department of the Navy, Office of Naval Research, 1976, p. 142-154
- 5) David A. Mindell, "Opening Black's Box Rethinking Feedback's Myth of Origin", *Technology and Culture*, Vol. 41 (2000), pp. 414-421
- 6) C.C. Bisell, "Karl Küpfmüller: a German contributor to the early development of linear systems theory", *International Journal of Control*, vol. 44 (1997), pp. 977-989
- 7) Perry Orson Crawford, "Automatic Control by Arithmetical Operations", MIT M.S. thesis
- 8) Malcolm J. Abzug & E. Eugene Larrabee *Airplane Stability and Control* (Cambridge university press, 1997)
- 9) Herbert K. Weiss, "Analysis of Relay Servomechanisms", *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 12 (1946), pp. 364-376
- 10) Donald McDonald, "Nonlinear Techniques for Improving Servo Performance", *Proceedings, National Electronics Conference*, Chicago, III, Vol. 6 (1950), pp. 400-21
- 11) R. E. Bellman, "Dynamic Programming and a New Formalism in the Calculus of Variations", *Proceedings of N.A.S.*, Vol. 40 (1954), pp. 231-235 と "The Theory of Dynamic Programming", *Bull. Amer. Math. Soc.*, Vol. 60 (1954), pp. 503-516 から「状態変数」という術語が導入されている
- 12) Rudolf Emil Kalman, "Analysis and Design Principles of Second and Higher Order Saturating Servomechanisms", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 74 (1955), Pt. II, pp. 294-310
- 13) Aaron S. Boksenbom & Richard Hood, "General Algebraic Method Applied to Control Analysis of Complex Engine Types", NACA Report 980, 1948
- 14) Arthur R. Bergen & Jhon R. Ragazzini, "Sampled-Data Processing Techniques for Feedback Control Systems", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 73 (1954), pt. II, pp. 236-47
- 15) 14) Discussion by R. E. Kalman
- 16) R. E. Kalman, "On the General Theory of Control Systems", *Proceedings of the 1th. IFAC conference*, 1960, pp. 481-492
- 17) R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol. 82 (1960), pp. 35-45
- 18) 高橋安人/臼井支朗『自動制御論』オーム社 1990年や木村英紀「LQGから H_∞ へ」『計測と制御』第29巻第2号 (1990) pp. 111-119 など
- 20) Klaus Röntrop, *Entwicklung der modernen Regelungstechnik*, R. Oldenbourg Verlag, München, 1971
- 21) Rudlf C. Oldenbourg & Hans Sartorius, *The Dynamics of Automatic Control* (English) ASME, New York, 1948
- 22) Charles Stark Draper, "Flight Control", *Journal of the Royal Aeronautical Society*, Vol. 59 (1955), pp. 451-477

Conics における図形的方法

山崎研究室 99M42315 山口陽子

1. Netzの主張と本研究における方法

現代の数学(幾何学)の証明は、言明だけで命題の内容が理解でき、読み手が図示できるように記述されている。一般には理解の際に図が不可欠ではない。しかしギリシア数学の命題では必ずしもこのことが当てはまらない。「図がテキストを構成している」命題もあり、その場合はテキストのみからは図を起こすことができない。そして実際の証明の横に描かれた図には、特に言及されておらず性質を特定できない点も存在しているのである。Reviel Netzはその著書 *The Shaping of Deduction in Greek Mathematics*⁽¹⁾の中で、そのような命題について、「テキストの中に図を読み込んでいる」⁽²⁾と述べ、「文字付きの図」⁽³⁾とテキストの依存関係を指摘している。

Netzはまた、命題の言明における定型表現(古代ギリシアにおけるホメロスなどの叙事詩に見られるような、ある決まった表現)の存在も指摘している⁽⁴⁾。Conicsに限らず、ギリシア数学のテキストでは、ある決まった図形や状態を表す為に定型表現を利用している。彼はこれらの反復使用されている定型表現の存在も、ギリシア数学を特徴付ける要素の一つとしている。

Netzは、ギリシア数学史の研究に古典文献学や言語学、認知科学といった今までにない視点を持ち込むことにより、テキストと図の依存関係と定型表現の使用という新たな枠組みを打ち出した。そして、この枠組みを以ってギリシア数学における演繹的推論の形成を論じている。ギリシア数学は、幾何学的思考による「文字付きの図」と言語による「定型表現」という2つの認識のための道具を持ち、それが演繹的推論を形成した、というのが彼の主張である。さらに彼は、活字印刷記号を認識のための道具として持つ現代数学と、ギリシア数学との相違を、この道具の相違に由来させている。このNetzの試みと主張は、ほぼ成功しているように見受けられる。

ここで注目したいのは、ギリシア数学の持つ演繹体系である。ギリシア数学は個々の命題の証明に関しても演繹的に証明を行っているが、ある書物の中でも演繹的な構成をもって命題が並んでいる。この書物内での命題間の連続性を考慮すると、それぞれの命題がどのように理解されるのか、その前出命題との依存関係も含めて検討されるべきであろう。「言明によって特定されていない」ような文字がギリシア人の思考の中でどのように理解されていたのかを、個々の命題間及び命題内の言明における、前出の事項や命題への依存関係からも検討する必要があると思われる。個々において特定されていないような文字が、演繹的に並んでいる命題同士の関係において前出の命題や言明を読み込むことや定型表現の利用により、実はほとんど特定されるというのであれば、それらの文字は図以外のものによって特定されていると考えられる。つまり、Netzの「文字付きの図とテキストの依存関係」という主張は成り立たないのではなからうか。

(1) Reviel Netz, *The Shaping of Deduction in Greek Mathematics*. (Cambridge : Cambridge University Press, 1999)以下, SDGM と略記。

(2) SDGM,p.23

(3) SDGM,p.15 Aristotle の頃には既に文字付きの図があった。

(4) SDGM,Chap 4

従って本研究では、Netzの主張のうち特に「文字付きの図とテキストの依存関係」の構造に関して、個別の文字の特定のされ方ではなく、命題及び言明間の前出命題との依存関係という観点から焦点をあてることを目指す。そして、この観点からもNetzが主張しているようなテキストと図の依存関係が成立しているかどうかをConics, 1~3を対象に検討した。

2. Conics, 1~3の分類

Netzの主張を元に、Conics, 1~3の図における文字の特定のされ方を分類する。分類基準を以下のように設定する。

1. 不特定な文字が含まれている命題

ここでの「不特定な文字」とは、その命題における言明を通じて全く明確にされず、突然現れるような文字のことである。そのような文字を含んでいる命題を、ここに分類。

(a). 図を読み込むことにより理解される命題.

命題の言明を通して検討しても、あるいはその命題以前に証明された命題を利用しても、テキストに図を読み込まなくては文字を特定できない命題をこのように分類。

(b). 前出の命題を読み込むことにより理解される命題.

Conicsは、前出の命題と内容的に連続している場合が多い。前出命題との依存関係を検討するという意味からもこのような分類を行う。このような命題は更に2つに分けることができる。

i. 前出の命題と同様の事柄が仮定されていることが明示されている命題.

明らかに前出の命題を仮定している旨がテキストの中で述べられているような命題を分類。

ii. 明示されていないが、前出の命題との関連性が指摘されうる命題.

前出の命題を仮定しているとは述べていないが、その関連性からテキストを省略していると考えられ、その結果文字が特定されていないと考えられる命題をここに分類。Conicsでは基本的にアルファベット順に図に名前を付けていくため、類似の命題においては途中までの基本的な作図が一致することが多い。ここではその基本的な作図が一致するものに関して、関連性を認めることとした。またこの分類においては、斎藤憲の「ギリシア数学の tool box の復元」による利用命題（命題がどの命題の証明に用いられているか）の索引も参考にした⁽⁵⁾。

2. 不特定な文字が含まれていない命題

Conicsの中には、現代の数学と同様にテキストのみから文字が特定され、理解できるような命題も存在する。Conicsにおけるテキストはいくつかの部分に分けることができるので、それらを読み込んでいるか否かにより、更に2つに分類する。

(a) テキストを読み込むことにより理解される命題.

命題の内容を一般的な表現で述べている箇所では触れられているものの、具体的な図形に即して述べている箇所においては表れず、不特定と判断されるような点が存在する命題を分類。

(b) 個別の設定のみから理解される命題.

具体的な図形に即して述べている箇所に沿って作図を行うことができ、不特定な点が全く含まれないような命題を分類。

(5) この索引は2002年1月現在 <http://www.hs.cias.osakafu-u.ac.jp/~ksaito/> の Index of Propositions used in the Conics でも参照できる。

分類の結果は付属の表ようになる。

3. *Conics*の分類結果の検討と考察

分類結果から見出すことが出来る、*Conics*, 1~3それぞれの巻ごとの特徴について考察する。

1巻は、1 (b) i・ii に分類されるような前出の命題との関連性がある命題が少ない。これは「前出」の命題がまだ少ないこと、今後の議論の基盤となるような命題が多いことが原因であると考えられる。1巻は個々の命題の証明が長めであるが、内容の複雑さから長いというのと同時に、読み手への配慮もあってか証明が丁寧に著されているという印象を受ける。また、1巻末と2巻末にはある作図を「要請する」ような命題（「問題」）が存在する。そして、問題であるためかその言明の構造が崩れていることが多く、ほとんどが1 (b) に分類される

2巻は背理法が多用されており、ほとんど2 (a) に分類されている。背理法により仮定された図は、実際には存在しないような図形を仮定しており、テキストによって文字を特定しなくては読み手に理解されにくいことから、ここに分類される命題が多いと考えられる。その図は概念的な、証明のための「イデア的な図」であると考えられる。

3巻では、命題間の連続性が目につく。特に命題1~16は、命題16の証明を目指して明らかな連続性を持っている。1・2巻においてもある命題の証明を目指した構成になっている部分はあるが、「前出命題の仮定」を多用し明らかな連続性を示しているのは3巻に入ってからである。

しかし1巻~3巻を通し、1 (a) 不特定の文字を含み、図を読み込むことにより理解される命題の割合は大きく変化していない。これは、扱っている命題や議論（巻）の進み具合等によらず、テキストに図を読み込まなくては理解できないような命題が存在しているということの表れであると考えられる。前出の命題との依存関係などを読み込んでもおこなうような命題が存在しているということは、図なしには理解できないテキストの存在を明解に示すものである。この点において、Netzの主張が裏付けられたということになる。

以上より、*Conics* においては命題間の関係によって特定されるような文字も多く存在している。しかしそれでも、テキストに図を読み込まなくては理解されないような命題が存在することが確認された。さらにそのような命題は、他の分類に入る命題の割合は大きくなばらつきがあるにも関わらず、巻が異なってもやはり一定の割合で存在している。この結果はNetzの主張を裏付けるものである。

しかし一方で、彼の著書における例示にはやや疑問が残る結果となった。

例 *Conics*, 1巻命題11より 「LはKを通りDEに平行な直線上にある……。」

Netzは、Lが線分FGにあるような特殊な点であることは図から理解されるとし、テキストに図を読み込んでいる例として挙げている⁽⁶⁾が、これは不適切ではなからうか。テキストの前半では「任意の直線が円錐切片からその径へひかれる」と述べられており、そのことから、そのような直線が径（ここではFG）へ引かれていることが理解される。これにより、あらかじめ径FGに対して線分が引かれることが明示され、その結果「Lは線分FG上にあるような、特殊な点」ではなく、FG上に取られるべくして取られた点であると言える。したがってこのLは、完全特定されているとして、本研究では2 (a) に分類した。ここには、命題内部でのテキストの間における前出命題との依存関係が表れている、と考えられる。

(6) SDGM,p.23

			1巻	1巻計	2巻	2巻計	3巻	3巻計
1,不特定な文字が含まれている命題	(a)図を読み込むことにより理解される命題		6,7,13,16,2 2,38,45	8	8,20,32,37, 40	5	16,19,20,23, 24,33,41	7
	(b)-i 主に(1)一般的な表明において、前出の命題と同様の事項が仮定されている			0	2,14,21,43	4	2,3,6,7,8,9,10,1 1,12,14,21, 25,26,29,35, 36,38,40,46,47, 48,49,50	23
	「問題」として著されている命題	53,57		2	44	1		0
	(b)-ii 明示されていないが、前出の命題との関連性	40,46,47		3		0	13,15,17,22, 29,32,43	7
	「問題」として著されている命題	52,54,55, 56,58,59, 60		7	4,45,46,47, 48,49,50,5 1,52,53	10		0
2,不特定な文字が含まれていない命題	(a) (1)一般的な表明を(2)具体化に読み込むことにより理解される命題		11,12,14, 15,18,24, 30,35,44, 48,49,51	12	11,16,24, 33,35	5	27,28,37,39, 54,55,56	7
	背理法が使用されている命題	33		1		0		0
	(b)具体化のみから理解される命題		1,2,3,4,5,8, 10,19,20, 21,23,25, 27,28,29, 34,36,37, 39,41,42, 43,50	23	1,10,12,13, 15,17,18, 19,22,23, 25,26,27, 28,30,31, 33	17	1,4,5,30,31,34, 44,45,51,52,53	11
	背理法が使用されている命題	1,9,17,31,3 2		4	3,5,6,7,9,29 34,36,38,3 9,41,42	12		0

『技術文化論叢』編集要綱

発行趣旨

今日の科学・技術の発展はきわめて急速であり、社会における科学・技術のあり方や先端技術の方向性如何が環境問題や人間性にかかわるものとして論議をよんでいる。他方、技術開発をめぐる国際的競争はますます激化しており、ここでも先進国間、南北間での技術移転や国際協力問題は国際的な課題となっている。東京工業大学大学院社会理工学研究科は「科学技術と人間社会のインターフェイスに位置する文化や科学技術を対象とする学問領域を切り開くために」設置された。

『技術文化論叢』は、こうした状況の下で、科学や技術の本質、それらの発展の仕方や社会的関係などを歴史的に、哲学的・方法的、あるいはひろく社会科学的に論議する研究誌として公刊するものである。

発行主体

東京工業大学大学院社会理工学研究科経営工学専攻技術構造分析講座で発行の運営を行う。

編集組織

上記技術構造分析講座を中心として編集委員会を構成するが、適宜必要に応じて東京工業大学内の構成員が加わることも妨げない。編集委員は、1年任期とする。再任を妨げない。

発行回数

原則として年1回とする。

投稿資格

本学で研究・教育に携わる者とするが、編集委員会が必要あるいは適切と判断した場合は、この限りではない。

審査

投稿論文の掲載の可否は審査を経て決定するものとする。論文審査は、編集委員もしくは、編集委員会が必要と判断した場合は、別に適切な審査員を選んで行う。

掲載投稿の種類

論文、寄書、資料紹介、修士論文・博士論文概要等とする。

原稿の提出時期及び方法等については別に定める

技術文化論叢 第5号

2002年4月1日発行

編集：技術文化論叢編集委員会

(江上生子 岡田大士 梶 雅範* 野澤 聡 水沢 光*：編集委員長)

発行：東京工業大学大学院 社会理工学研究科 経営工学専攻 技術構造分析講座

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

FAX: 03-5734-2844

