

現場技術者のための地質構造解釈の基礎知識

加藤 碩一*

The basic knowledge on the interpretation of geological structures for the sake of on-site technicians

Hirokazu KATO*

Abstract

How to understand geological structure is not only one of the classic problems faced in structural geology, but also an everyday task for field technicians. However, quantitative general principles are still not fully established. Local field data is essentially dispersed and one-dimensional, therefore, it is necessary to build an appropriate geological model to produce 3D images of underground structures of interest. On the other hand, geological interpretation must consider the scale of regional structures, by integrating data from regional surveys, such as gravity and seismic experiments. The author hopes to foster mutual understanding and to contribute to the reduction of many types of geological risks. The objective of this report is to try to overcome the discrepancy between geological and technical information on-site from the geological viewpoint.

Keywords: geological structure, structural geology, on-site survey, geological risk, fault, fold, geological cross section

要 旨

地下の地質構造をいかに正しく理解するかは、構造地質学の古典的な課題でもあるが、また現場における現実的な課題でもある。にもかかわらず、今日においても定量的な一般則は確立されていない。各種の局所的な現場情報は、本質的に離散的かつ1次元の情報であり、それらから地下地質構造の三次元像を再現するには当該地域に適用可能な地質モデルの構築が不可避である。一方、重力探査や地震探査など広域調査に基づく大局的な地質解釈では、地質現象の階層性・構造单元などいわゆる場の条件を考慮しなければならない。すなわち、現場で観察または測定される地質構造が広域的な大構造といかなる配置関係にあるかを知らなければならない。いずれにしても両者の知見を活かすことによって、さまざまな地質リスクの削減に寄与しうることが期待される。本論の目的は、筆者のよって立つ地質学サイドから現場におけるサイト詳細調査に基づく局所的な技術情報とその解釈に要する地質情報間の齟齬を埋めようとする試みである。

キーワード：地質構造，構造地質学，現地調査，地質リスク，断層，褶曲，地質断面図

*応用地質（株）エンジニアリング本部

*OYO Corporation Engineering Headquarters

1. はじめに

地下の地質構造を正しく理解するためには、当然正確な地質断面図を作成する必要があるが、地表調査で得られた情報をそのまま地下深部に外挿するだけでは不十分であり、また、地層の層相変化などや地史を無視して数少ないボーリング柱状図を機械的に繋ぐだけではむしろ不正確な断面図となってしまうことは今さら指摘するまでもない。例えば、地表で急傾斜の断層が地下でどのように傾斜を変えていくかは、構造地質学の古典的な課題でもあるが、近年においても定量的な一般則は確立されていない。しかしながら、各地でのデータの蓄積により定性的であるが、各種の模式的な地質構造モデルが得られるようになり、断面図の正確さ・精度をある程度向上させることができるようになった。

1.1 地下情報解釈における齟齬の事例

今は昔であるが、筆者を含む地質研究者らが活断層の調査研究などを通じて地震研究に携わるようになった当初、地震研究者らと全くと言っていいほど情報共有・意見交換ができなかった思いがある。両者の相手分野における基礎的知見の欠如もあったが、それぞれのデータをどう評価すべきか手探り状態だったことが原因でもあった。一例を挙げれば 1/20 万程度の縮尺の地質県図上に引かれた褶曲軸末端に短期的に微小地震の震央が集中するかのように見える場合、地震研究者らはその意味を検討しようとした。しかし地質研究者らは、褶曲軸全般に長期間にわたって線状に震央が集中するなら何らかの意味があり検討に値するが、軸末端にそんな位置的精度がなく（筆の走りに過ぎない）無意味な吟味であることを承知していた。反対に、当時は震源深さの推定精度は今ほどよくなく、地震研究者らはたとえ計算上、地下 2km の地点に微小地震の震源が集中するように見えても、あくまで平均で誤差が著しい可能性もあると承知していたが、地質研究者らはそこがいわゆる先第三系基盤と被覆層との境界であると想定される位置だと数値を過剰に意味づけて、その地震活動と地質構造とを関連させて論じてしまうきらいがあった。

こうした齟齬は、地質研究者らと土木・建築技術者らの間でも往々にして生じており次のように繰り返して指摘されてきたところである。例えば、古くは今から 127 年も前（1888 年）に米国地質調査所第 2 代所長 John Wesley Powell が、「地質図は、専門家のためではなくむしろ一般の人々のものである。人々は、地質学者が地質学の用語や分類、決まり事などを単純かつ明確に表現してくれることを期待している。地質学者は、地質調査の結果を理論物理学者や天文学者・技術者や鉱山技師・熟練した農家や工芸家といった人々みんなに分かりやすい情報を提供する必要がある。」と述べている（意識）。

また、半世紀以上前にも「応用地質調査事務所」（後

に「応用地質株式会社」に名称変更）から発行された『土木地質資料』第 1 巻第 1 号に、コロラド科学会での Beckel 会長演説が紹介されている¹⁾。すなわち「地質の事実を Engineer が理解し、最大限に利用するために、地質の事実を Engineer にどのように提供するかという human problem である。これはそれ自身が問題であり、かつ解決されなければならない問題である。それは、データを提供する方法を通じて、可能な Engineer geologist の発見および訓練から、販売術の心理学に関する調査にまで変化する。この問題の本質は、実証による確信が必要であるといえれば充分である。Geologist と Engineer は異なった考えを持ち、異なった仕事をする。Engineer は具体的な事実や形態で考え、原因から結果へ推論し、目で見て測定できるものに非常に依存している。Geologist は、通常結果から原因へ推論し、そして geology が不正確な科学であることを余りにも意識しすぎている。もし、彼が十分熟練して、賢明で事実を十分観察し、理解しているなら、地質条件やそれらの意味を Engineer に予測し、またできる筈である。彼が、このような予測を正確に続けて行かなければ、彼は実証によって、彼自身と Engineer の間にどんなギャップが横たわっていても、そのギャップに橋がかかるであろう。」とある。

また、40 年近くも前のわが国でも「地質屋の話なんか現場の役に立たない」「地質の話は面白いが実際にはどうもね」「土木の人は地質に理解がない」などの言が紹介され、同様な物言いが日々現場で繰り返されたことが指摘されている²⁾。さらに、ごく最近になってさえも「物理探査は難しくよくわからない。」「物理探査は当たらない。」「土木地質調査に携わる技術者や発注機関の方からよく聞かされる文句である」³⁾と述べられているほどである。

1.2 現場地質情報とその表現における齟齬

既に先人は、「森を見て木を見ない」すなわち「法則をもって新たに観察されたる、またせらるべき事実を推理して当らざることある」、逆に「木を見て森を見ない」すなわち「地質学の理論の概要を知らずして観察せる事実」に幻惑されるはさらに恥ずべきことであります。」⁴⁾とも述べている。言い換えれば、「木」にあたる現実のサイト詳細調査（局所的な地質解釈）で得られる大縮尺の岩盤分類（岩級区分）図・透水性分布図（ルジオンマップ）・岩盤検査図などの地質情報は、言い換えれば「ダムサイトでのボーリング調査や横坑調査で得られる地質情報は、離散的かつ 1 次元の情報であり、それらから空間的な地質構造分布を再現するには、地質図学的な技法とともに、対象地質体に対して、その分布、存在状態と形成過程を合理的に説明することが可能な地質モデルを構築しておくことが必要とされる。」⁵⁾のである。すなわち工学的指標と地質属性（例えば岩相）との関連性の明確化・観察事実と解釈評価との対比の妥当性が要さ

れる。これに対して「森」にあたる地域・広域地質調査（大局的な地質解釈）では、地質現象の階層性・位置づけ（いわゆる「場の条件」）を考慮しなければならない。なぜなら「ある地質構造やその構成単元は一定の広がり」を有しており、そのスケールで調査しなければ共通性や特徴を抽出することはできない。「例えば火山岩分布域内にダム計画がある場合、火山泥流・土石流堆積物、火砕流堆積物、溶岩など、分布が長軸状でかつ岩相が軸方向に変化する地質単元の性状を、ダムサイトの狭い領域内の調査だけで把握することは本質的に不可能である。」⁹⁾からといえる。

近年、両サイドから現場技術の理解・継承や地質学的知見の共有を図るべく幾つもの良書が発行されているが、まだ必ずしも十二分ではない^{6),7),8),9),10),11)}。本論は、それらとなるべく重複を避けつつ、筆者のよって立つ地質学サイドから両サイドの溝を埋めようとする試みである。これによっていわゆる地質リスクの削減（第一義的には、地質的要因（事前調査研究の不備・地質情報の不十分なあるいは誤った解釈）に起因する工事過程における回復不可能な人的損失を防ぐ、あるいは可能な限り低減すること、第二義的には、経済コスト低減（工期順守・短縮、経費削減、既存地質情報（ボーリング・物理探査他の情報）の効率的活用）にいくらかでも貢献できれば幸いである。

2. 地質断面図

いうまでもなく地層・岩石の分布や地下の地質構造は三次元的な空間配置を持つから、平面的な地質図と垂直方向の地質断面図は相補的な役割をもつ。したがって地質図・地質断面図を読めない、あるいは誤読するということが、調査地域の地質が理解できないことになり、各種の土木工事等の計画段階において不可欠な基本的地下情報が致命的に欠落することを意味する。具体的には、例えば各種探査側線の設定に際して既存地質図の断面線以外の場所の地質断面図が必要な場合に、単に既存断面図を平行移動すればいいわけではなく、既存資料を読み解いて新たに作成しなければならないからである。また、沿岸域・陸域における各種物理探査記録を解釈する場合、モデル的ではあっても最新の地質・地球科学的知見を考慮して深部構造をより合理的に（その限界を踏まえて）推測するべきである。さらに重要なことは、それを関係他者、とくに最終決定権限を持つ者に如何に正しく伝え理解してもらうかである。

地質リスク軽減において正確な地質断面図の重要性を強調するために、あえて今となっては歴史的な事例であるが極めて重要な丹那トンネルの例を以下に簡単に紹介する。大正7年（1918）に着工された東海道本線の丹那トンネルは、トンネルが通過する丹那盆地の成因に

関して明瞭な結論が合意されないまま（横山又次郎の「火口説」、鈴木敏の「火山と浸食説」、辻村太郎・脇水鉄五郎の「断層説」が対立）、すなわち地下構造が未詳なまま掘削が開始された。しかし、未予見な吸水膨張性の土質・地質性状と大量の湧水に著しく阻害され、しかも昭和5年（1930）の北伊豆地震における北伊豆（活）断層系の活動によって当時工事中であった南側第3水平坑が横ずれ切断されるなど世界的にみても稀な難工事と化し、大正12年（1923）には掘進不能の事態となった。そこで遅まきながら同年に我が国ではじめて土木分野におけるボーリング調査が実施され、トンネル掘削工事におけるはしりともいえる地質縦断面図が得られ、それに基づく正しい地質解釈（丹那盆地の断層成因説）が行われた。これ以降事前に正確な地質断面図を作成することは、地質リスクの回避や工事コスト低減に不可欠であることが認識されるようになったのである。

2.1 断面線

「断面線」とは、断面図を描く位置を平面図上に示す直線である。大略、地層の走向方向や地質構造の延びの方向（例えば、褶曲軸）に直交する方向にとるのが通例で、地層の層厚や上下関係、地質構造形態や変位量などが把握しやすいためであるが、これは褶曲や断層発達時の地層の変形が平面ひずみ状態であり、体積変化がないことを前提としている。地質学的な変形は一般に有限変形であり、この仮定は厳密に適用できるわけではないが、野外における経験則として、一般に十分に近似できると考えられる。したがって、異なる向きの地殻変動を複数回受けたり、岩石が流動・変成したような地域では、さらなる吟味が必要である⁹⁾。

断面線の両端はもちろん、複数の断面線が記されている場合は、それらの折れ曲がる点ないし交叉する点があれば記号（例えば A-B、A-B-C）を付す。走向は、必ずしも断面線に直交しているとは限らない。断面線と走向が角度 θ で斜交している場合は、実際の（最大）傾斜 δ よりも緩くなる（偽傾斜・見かけの傾斜 **apparent dip**）ことは、地質図学のイロハである。その関係は $\tan\delta' = \tan\delta\cos\theta$ だが、真傾斜と偽傾斜の関係を表す図（定規）を用いれば簡便であるが、いうまでもなくこの場合地層の厚さも見かけ上のもとなる。後述する **balanced cross section** においても断面線が主要な構造方向と直交していない場合には、同種の幾何学的問題が生じる。

2.2 鉛直断面図

地下10km以上もの深部を表現する小縮尺の地質断面図は、一種の概念図と見なすべきである。学術的な議論には有効であるとしても、おもに地震波探査記録を基にした大規模地下構造の解釈図だからである。大縮尺地質断面図においても、比高が1km程度ある5万分の1縮尺の地域の断面図では、地表面からほぼ1km（図上で2cm）の深さまで定性的にはあるが信頼度の高い図が

描けるといえよう。ボーリングその他の物理探査データがある場合はこの限りではないがそれでも数kmの範囲にとどまる。

地域特性に応じた主題別の応用的な地質マッピングは、「第四系のマッピング」「付加複合体のマッピング」「火山のマッピング」「深成岩のマッピング」「変成岩のマッピング」「活断層調査法」「地下資源調査法」「地熱資源調査法」「地質災害調査法」「環境地質調査法」「土木地質調査法」「海洋湖沼調査法」「惑星調査法」とあるが⁷⁾、以下に、幾つかの事例について付記しておく。

(1) トンネル地山地質断面図

5000分の1以上の縮尺では、十分な地震探査を始め各種物理探査記録やボーリング調査結果を踏まえて地質構造解析を行い、地表からトンネル施工基面までの詳細なかつ現実的な断面が要される。特に工事に大きく影響する断層破碎帯や湧水箇所の想定に致命的な齟齬は許されない。この場合も縦横比は必ずしも1:1とは限らない(縦横比が2:1程度が多い)から解釈には留意しなければならない。また、いわゆる通常の地質断面図では、岩相は記されていないから、付随する報告書の記載を精査する必要がある。例えば、トンネル施工に大きく影響する地質要素としては、蛇紋岩や蛇紋岩化作用を受けた塩基性岩類や新第三系の細粒堆積岩類、風化変質して粘土鉱物を多量に含んだ凝灰岩やオリストストロームなどがある。また、異方性の強い地層や旧地すべり堆積物、地下水を胚胎しやすい火山砕屑岩類(グリーンタブほか)等々である。物理探査記録としては、とくに地震探査(弾性波探査)による速度層断面や電気探査による比抵抗分布が重要で、これらは岩盤の物理的性質に依拠するから、かならずしも地質断面とは一致しない(図1)。

(2) 第四紀層の断面図

地層・岩石境界面がきわめて緩い場合、例えば沿岸・平野部の第四紀層分布域地下の断面図も、縦方向が横方向より数倍~数十倍誇張されている場合が多い。表層を第四紀~新第三紀層が分布する海底(地質の)断面図は音波(弾性波)探査によって得られるから縦軸は、音波の到達時間を表していることがほとんどであるので実際の縦横の距離比は、当然1:1ではない。この場合、地層面や断層面相当の速度構造面の傾斜は強調されている場合が多い。

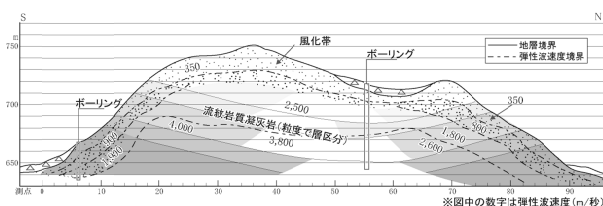


図1 トンネル地質断面図及び速度層断面図事例²⁾

また、第四紀層(特に沖積層)分布域は、一般に人間の住む活動域であるから、人工改変が進み、いわば人工的な地層が最地表部に分布し、以深の自然地層との間にある種の不整合が形成されると見做し、これを「人自不整合: Jinji (人自) unconformity or discontinuity」と呼ぶ向きがある。「人自不整合」は、東日本大震災を契機にその概念の重要性が国外でも認識されつつあり、近い将来国際学術用語として使われるのではないかと思われるので留意されたい。

(3) 火山・火山岩分布地域の断面図

火山体の復元や火山活動史の推定を視野に入れた地質図・地質断面図作成をめざさないと連続性の悪いあいまいな岩相分布図になりがちである。白亜紀中期やそれ以降の付加体を除く地層中には多量の火山岩類(溶岩・貫入岩や降下火砕堆積物・火山砕屑性堆積物などを含む)が含まれるから、元の火山体が浸食され失われている場合の火山岩分布地域のマッピングは、噴火様式、内部構造や岩相変化の理解なしには進みがたい。とくに堆積ユニット・噴火ユニットの認定はかなり専門性が要される。ボーリングデータにしても火砕流堆積物か土石流堆積物かを識別することは難しく経験が要される。また、正断層や地溝の形成・発達を考慮する必要がある(図2)。

活火山や第四紀後期の火山については各々いわば縄張りをもつ火山研究者がいるから、コンタクトするのが近道ではある。既存資料としては、産業技術総合研究所出版の各種火山地質図や地質図類を参照し、またそこから関連資料を探していくのが有効である。

2.3 断層の断面図

地質断面図を描くに際して、断層を始めとした地層の不連続性をいかに正しく推測し、表記するか、またそれらをいかに読み解くかの重要性に鑑みて、以下にやや初歩的めくが今更人に聞きにくい事項をあえておさらいしておこう(補遺1参照)。また、一部上述したように実際には、断層と褶曲は個別独立に発達することは少なく、どちらかの構造変形が進捗すればするほど他方の構造も発生・発達しうるから断面図上で両者が共存するほうが一般的であるが(後述「断層関連褶曲構造」参照)、以下記述の都合上両者を区別して説明し、必要に応じて他方に言及することとする。

さて、地表で測定した断層面の傾斜が地下深くどこまで通用するか、言い換えれば断層は地下にどのように続

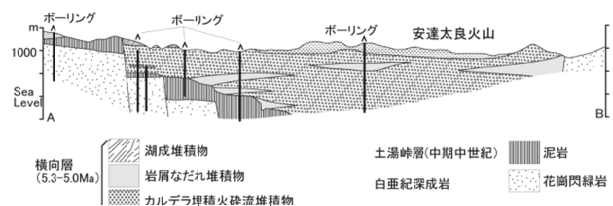


図2 安達太良火山地域(陥没カルデラ)断面図^{7),12)}

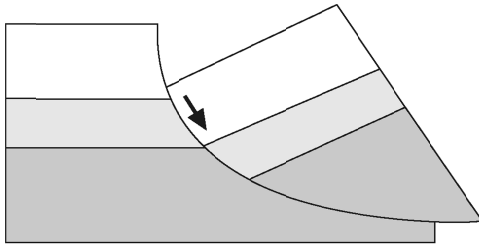


図3 リストリック正断層模式図

いていくかは古典的な問題であるが、現在でも一般解はない。教科書的には、まず純粋せん断 (pure shear) によるアンダーソン型断層区分がある。断層面は、第一近似的には平面とみなせ、正断層面の傾斜はほぼ 60° 以上の高角、逆断層面の傾斜はほぼ 45° 以下の低角 (特に 30° 以下の場合にはスラスト/衝上断層と称される) をなすことが予想されるが、現実には必ずしもそうでないことが多いくらいである。すなわち高角逆断層や低角正断層が存在するし、断層面の傾斜が浅部と深部で異なっていく曲面をなす (リストリック断層) など、いわば「非アンダーソン型断層」といべき断層群がある⁶⁾ (図3)。

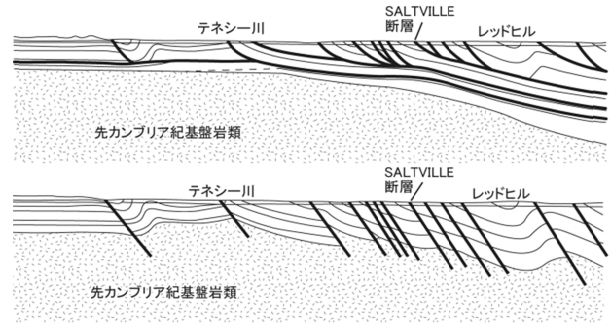
さらに、現地調査でよく遭遇するのが、地すべりによる地表近くの断層面の低角度化である。また、日本列島の内陸盆地縁を画する断層は、基本的に「成長断層 growth fault」とみなせるので、その断面解釈は吟味されるべきである^{6), 13)} が、すでに述べたので、本論では割愛する。

さて、こうした個々の断層の断面形態問題のほかに、広域造構応力場に対応して形成された地質過程に位置づけられる断層 (群) の深部構造問題がある。いわゆる大構造 (したがって小縮尺のやや模式的な地質断面図) が対象である。20 世紀半ば頃には、深部での断層断面について厚膜仮説 thick skinned hypothesis と薄膜仮説 thin skinned hypothesis の対立があった^{14), 15)}。前者は、地表部を含め被覆層内で急傾斜を示す個々の主要断層がいわゆる基盤まで、そのまま直線 (平板) 状に外挿されて到達するというモデルである (もちろんより十分な深部では消失していく)。後者では、特に多くのスラストが地下で低角度化し (すなわち、断層面が曲面化し)、基盤と被覆層とを構造的に境するデコルマ d é collement (地下5~6kmあるいはそれ以深に想定することが多い) に発達する層断層 bedding-plane fault に収れんしていくというモデルである。深部ボーリングの実施によって、基盤に達するまでに何回も繰り返し同じ地層 (被覆層) が出現し、これを説明するには後者が有効であるとなった (図4)。

後により詳細な構造解釈が、後述するデュープレックスやデコルマンの議論に発展していくことになる⁸⁾。

(1) 断層表現の確実度

地質図に線状に表示されている断層 (線) は、どの程度信頼できるであろうか。現実的には、例えば5万分の1

図4 “薄膜仮説” (上) と“厚膜仮説” (下) による模式断面図例 (北米・テネシー周辺)¹⁵⁾ (簡略化)

縮尺図で、ほぼ1km (図上で2cm) ごとに断層露頭があり、断層面を測定できそれらを繋いで得られたような断層線はかなりその通過位置が信頼できるが、一般にはそこまでの精確さはない。また、ある場合には、数種類の太さの実線で、(時には、変位量の大小を含めて) 確実度を表示する場合があるが、凡例や説明書を熟読すべきである。明確な分類基準についてとりたてて説明がない場合には、使用目的にもよるが、必要以上に信用してはならない。人工衛星画像や航空写真などから、リニアメントを抽出し記述する場合に断層・非断層 (例えば、異なる岩相境界) を線の太さで区分する場合は、予察的な使用に留めておくべきである。とくにこれらの断層線等の端部は、いわば筆の走りとも称される不確実さを持つから注意を要する。言い換えれば、工事位置が地質図に描かれている断層端部から100m離れているから、断層の延長はないと即断することはできない。

いわゆる基盤岩 (先新第三系) に発達する断層を新期の (第四系など) の被覆層が覆っており、地表で直接的に断層トレースを確認できない場合、伏在断層として破線で示すことがある。この場合も他の情報 (ボーリングデータや物探データ、明確な微地形データなど) が十分にある確実度の高いものから、推定伏在断層とでも称すべき確実度の低いものまで様々で、かつ調査者のポテンシャルによる定性的な区分でしかないから予察時の参考程度 (例えば当該地域には東西性の断層が卓越する可能性があるという程度の予測) に留めておくべきである。

また、想定断層線を境にして、その両側の地層隔離が明瞭に大きいのが、断層露頭が確認できない場合、鎖線 (または細破線) で推定断層を示す場合があるが、その評価には上述と同様な問題がある。活断層の確実度については、上述の地質断層の確実度区分とは、やや異なるがすでに述べたのでここでは割愛する。必用に応じて参照されたい^{13), 16)}。(補遺1参照)

(2) 断層破碎帯の幅と断層の規模・落差間の関係

一般に大規模で変位量の大きい断層ほどその破碎物ないしカタクレサイト化した岩石の幅も広いと想定される。また、断層のタイプによっても差異があるといわれる。例えば、実際の露頭観察から10km程度の変位量を持

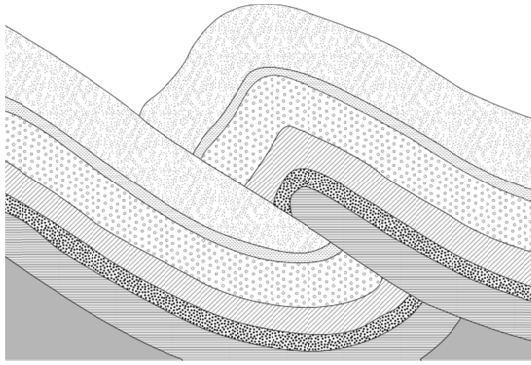


図5 ブレイクスラスト模式断面図¹⁴⁾

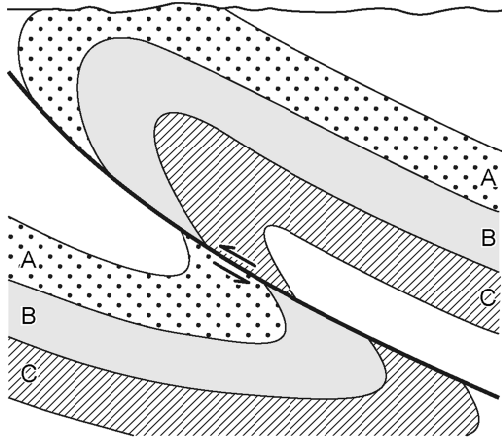


図6 図5を修正した模式断面図¹⁴⁾

つ横ずれ断層では、数10cm程度の幅を持つガウジ帯と数m以上のカタクレサイト帯を生じ、衝上断層では相対的にそれらは狭いことが経験的に指摘されている⁸⁾。また、断層変位量Dと破碎帯の幅Tは、正の相関 ($D=aT^b$) があることが指摘されているが、両対数グラフ上での相関で、いまだ実用的な段階には達していないし、かりに平均的な予測ができたとしても現実には目安でしかなく、同じ断層でも断層帯幅は定常的ではない。しかし、定性的に地質学的な推測がまったく役に立たないわけでもなく、現場における経験を重ねて再検討することも重要である。今日では工法が進歩し、多少の地質学的不確実さを無視して工事を進捗できる場合もあるが、逆に現場経験に培われた経験則が失われることが懸念される(補遺2参照)。

(3) 古典的な断層と褶曲の幾何学

褶曲過程が進捗すると地層(構成岩石)が破断し断層(スラスト)が発達する場合や、逆に層面断層が発達してスラスト形成から上盤側に背斜構造が生じる場合などがある。これらは、最近では後述するように「断層関連褶曲構造」として、体系化されつつあるが、その濫觴はすでに19~20世紀に部分的に提示されており、新旧の術語(概念)の対比を吟味すべきである。以下、幾つかの事例を挙げる。

a) ブレイクスラスト break thrust

19世紀終わりに提示された概念(Willis, B. U.S.Geol.Surv.13th Ann. Rept. Pt.2, 1893¹⁴⁾に再録)

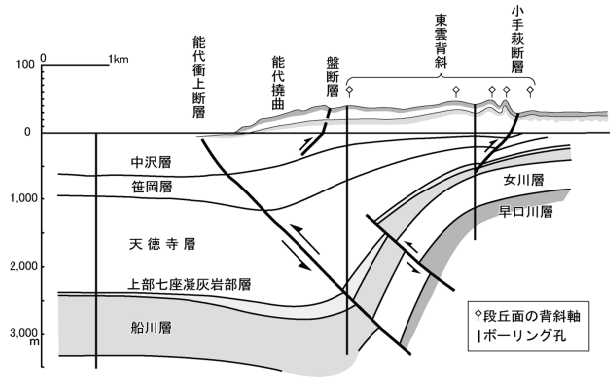


図7 能代衝上断層群の模式断面図¹⁷⁾

で、背斜構造が進展しても、それに関与する全体の地層が十分にコンピーテントであると傾倒や伸長変形が発達しにくく、引っ張り破断によって前翼部に既存裂罅を利用して発達するスラストになると想定され、これをブレイクスラストと称した(図5)。しかし、その後ボーリングデータや岩石物性の情報が集積されると、層面に垂直な破断による断層形成機構の困難さやスラストによる地層(を構成する岩石)の引きずり(drag)を無視できないなどから、否定的な見解が生じ、図6のような引きずりを考慮した断面図が想定されるようになった。いずれにしても適切な位置での十分な数のボーリングデータに見られる地層の繰り返しの解釈によって決すべきであろう。

b) 軸面スラスト axial-plane fault

結果的に褶曲軸面に沿って発達する高角逆断層 high-angle reverse fault を称する。例えばタイトな背斜軸部深部では、応力集中によってコンピーテントな部分で断層が生じ、背斜上部の引っ張り破断領域に進行し、さらに隣接する同様にタイトな向斜軸部に伸長し、場合によってはそれらの破碎部に鉱床が胚胎するので探鉱の指針ともなりうる。

c) バックスラスト(逆向き衝上断層) back-thrust

主断層が明確な場合、断層発達に関する地質学的な知見があればある程度予測が可能ながある。例えば、主断層である逆断層の上盤側に副断層が発達する場合がある。米代川(秋田県)右岸における能代衝上断層群の模式断面図¹⁷⁾において主断層である能代衝上断層(群)の上盤に発達する主断層面と反対方向に傾斜した副断層群である「小手萩断層」や「盤断層」などが相当する(図7)。

構造地質学では、きわめて古典的な知見で、Cloosの一連の粘土モデル実験で知られ、「アンチセティック断層 antithetic fault」と命名されたものである(図8)。

最近いわれる「バックスラスト」と称されているものとはほぼ同義である。その後も、Linkによるdiagonal-shear faultsの実験結果などでも見直せば、主断層に伴う断層群や上盤側の高まりなどが既に提示されていることは明らかである¹⁴⁾。

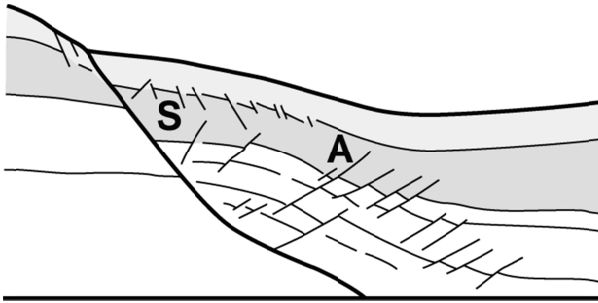


図 8 アンチセティック断層 (A) とシンセティック断層 (S) (Cloos, H. Einführung in die Geologie. Gebrüder Borntraeger, Berlin.1936, 503p. の粘土モデル実験による)

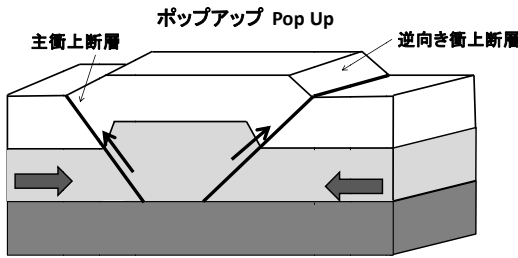


図 9 ポップアップ^{18),19)}

一般に主逆断層の傾斜が $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ より低角になると(衝上断層)バックスラストが出現し、変形帯の幅(主断層とバックスラスト間の距離=図9のポップアップの幅)が拡大する。一方、主逆断層の傾斜が 60° より高角になると(高角逆断層)、バックスラストは出現しにくく、地表部では断層撓曲崖の低下側(下盤側)に主断層に並走する小規模な逆断層群や半波長程度の褶曲が形成される場合がある。アンチセティックな副断層が主断層と同程度に発達すると、その間の上盤の一部が上方に押し出されるようになり、背斜状隆起を呈する場合がある。この部分を「ポップアップ pop up」ともいうようになってきた¹⁹⁾。

なお、バックスラストが発達しない場合でも、逆断層上盤上面は背斜状の低い高まり(ふくらみ)を呈することがあり、従来 **swell** とか **bulge** と称されてきた。

逆に主断層に並走するような同センスの副断層を「シンセティック断層」と称する(図8)。現地と同様な副断層群が発達することが容易に予想されるから留意すべきである。

d) バックリムスラスト back-limb thrust

水平方向の広域圧縮応力場で、層面に沿ってスラストが発達し、その上盤側に分岐的にシンセティックに発達し、さらに後退的に(主断層から離れる方向に)次々に生じていくスラスト²⁰⁾。上述のアンチセティックに発達するバックスラストとは意味が異なるから注意されたい。むしろオーバーステップ(後述)に近い(図10)。

e) 水平断層

いわゆる造山帯の基本的な大構造としての水平に近

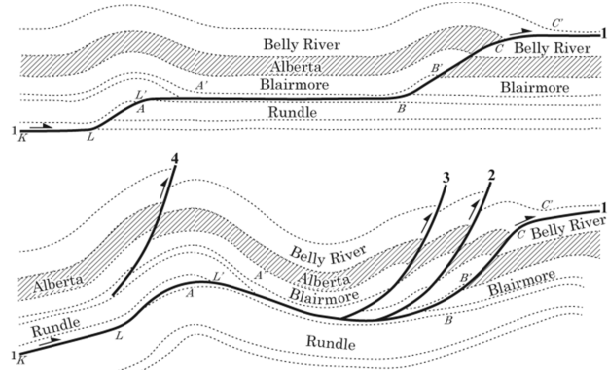


図 10 バックリムスラストの形成過程²⁰⁾

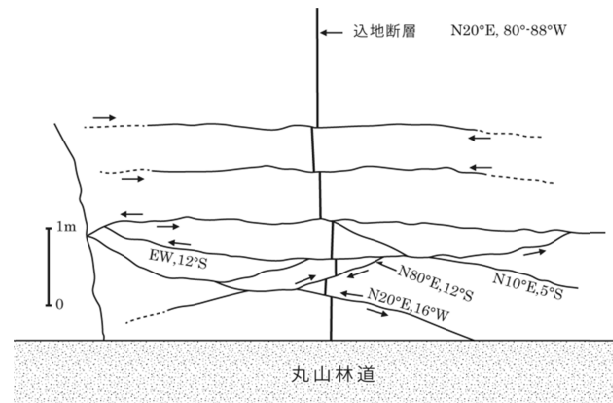


図 11 込地断層路頭スケッチ(長野県生坂村丸山)²¹⁾

い押しかぶせ断層(overthrust)については、類書⁸⁾を参照されたく割愛する。ここでは、変位が小規模な露頭規模での水平ずれ断層の事例を紹介する(図11)。北部フォッサマグナに広く分布する新第三紀層は強く褶曲・断層変形を受けている。南北性の込地向斜もその一つで、中新世中期の別所層から同末期の込地層までの堆積岩層を褶曲変形させている。褶曲軸面は垂直に近く、一部込地断層(いわゆる軸面断層)に移化する。これを切る水平ないし極めて緩傾斜の小断層群が発達する。ボーリングデータでは確認しにくく、適切な露頭断面がないと気づきにくいので周囲の地表調査結果と合わせて吟味する必要がある。なお、古くは「走向移動断層(横ずれ断層) strike-slip fault」を変位が水平方向(横方向)に生ずることから「水平断層」とも称したから、古い文献を読む場合は留意されたい。

2.4 同斜・単斜・等斜の断面図

初歩的であるが、上述の術語の定義に正誤や混同があり、誤解を生じているので以下に整理しておく。

(1) 同斜(構造) homocline / homoclinal structure

一般に「…同斜構造[homocline structure; すべての地層が同じ方向にほぼ同じ角度で傾斜している構造]と幾何学的形状(地層の様な傾斜)に依拠して説明されている²²⁾。「広域にわたって様な傾斜を示す構造は、同斜(homocline)といわれる。同斜そのものは褶曲ではないが、大規模な褶曲翼の一部であることもある。」⁶⁾とも説明されている。傾動地塊においても現れる²³⁾。

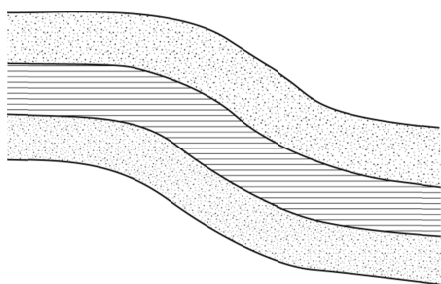


図 12 単斜構造模式図

中国では、「均斜 homocline」という場合もあるが²⁴⁾、日本語では使わない。

(2) 単斜 (構造) monocline / monoclinical flexure / monoclinical structure (撓曲)

「水平もしくは低角度で一様に傾斜している地層が、一部分で撓曲して1方向に傾斜している構造」²²⁾という端的に幾何学的形状に依拠した説明が良い(図12)。あえて繰り返すと「水平面を基準にしたとき、広範な水平または緩傾斜層のなかに局部的に急傾斜部のあるような構造を、単斜(monocline)あるいは撓曲(flexure または monoclinical flexure)という。…これらはヒンジはあっても、冠 crest がないかまたは不明瞭な褶曲とみることでもできるが、一般には、広域的な構造や深部の断層(群)の活動を反映した構造に用いられ、褶曲とは呼ばれていない。」から、「単斜しゅう曲(monoclinical fold)」²³⁾(注:「単斜」「monoclinical flexure, monoclinical fold」と混用)、「単斜とう曲(monoclinical flexure)」「uniclinal」などの用語は紛らわしく使うべきではない。また、構成する地層に着目してあえて「単斜層 monocline」^{24),25),26)}と記すのも適切ではない。

したがって、「広い範囲において、緩やかに同じ方向に傾斜するか、ほぼ水平な地層が、局部的に同じ方向に急斜する構造をいう。」²⁷⁾とあるのは、「同斜」と「単斜」の説明を混在しているものである。また、「単斜構造(monoclinical structure)」「地層が、ある広がりわたって、おおむね同一方向に傾斜している地質構造をいう」²⁸⁾とあるのは「同斜(構造)」の説明であり、「単斜構造」の説明としては誤りである。

これが形成される要因として地下に断層を想定する場合、「(単斜を)撓曲といわれている褶曲の一種」「断層にそって上盤がすべり落ちるときに上に重なった地層が重力の力だけでたわむ曲がり方です。これが実は本当の単斜(monocline)」⁸⁾と説明しているが、基盤中の逆断層や正断層、さらに両者が混在する場合も想定されるから成因と絡めないで、最初に述べたように幾何学的形状のみに定義を限定すべきであろう。ちなみに、地下の断層が活断層の場合、「活撓曲」とも称され「変動地形」の一種でもある。

(3) 等斜 isoclinal / isocline(等斜構造)・isoclinal fold(等斜褶曲)

isoclinal は、形容詞で「等傾斜の」「等伏角の」「等斜褶曲の」²⁶⁾とある。「等斜褶曲 isoclinal fold」とは、両翼が同方向で等しく傾斜している褶曲である。したがって等斜褶曲の片側の翼の地層は逆転している。この用語は、「等斜褶曲 isoclinal fold」^{22),23),26)}、「同斜褶曲 isoclinal fold」^{28),29),30)}、「等斜褶皺 isocline」²⁴⁾と混用表記されるから使うべきではない。さらに、「isocline(注:等斜構造=等斜褶曲)の語は isoclinal line(等伏角線)と同義に用いられることもある」²³⁾と指摘されているからでもある。ちなみに、『地学辞典』³¹⁾で「単斜皺曲 monoclinical folds」「凡ての地層が平行に或る一方に傾く皺曲(斜褶曲の一種)。同斜皺曲とも云ふ」とあるのは isoclinal fold の説明であるから誤った混用表記である。

(4) 定義・使用の混乱の経緯

「(monocline は) Powell, J.W. (1873), Geikie, A. (1882), Suess, E. (1883) などにより用いられた。しかし, monoclinical の語は 1847 年, Rogers, W.B., Rogers, H.D. により傾斜方向が同一であることを示す言葉としてすでに用いられていたため, 地層がすべて同じ方向にほぼ同じ角度で傾斜する同斜構造(homocline)や等斜褶曲(isoclinal fold)と混同して用いられている例が多い。イギリスでは Darwin, Ch. (1846) の用いた uniline の語が使われることもある。」²⁷⁾と説明されている。また、「褶曲構造の記載において、日本人だけがとくに注意すべきことは、同斜(homocline)と単斜(monocline, monoclinical flexure)の混同である。…明治時代の先生が同斜を英語で monocline と誤記したので、その弟子(後人も稀に)が同斜のことを日本語で単斜とよび、英語で monocline と書いたから、外国人には理解されなかった。」³²⁾ともある。最近でも指摘されているが⁸⁾、依然として、例えば JOGMEC(石油天然ガス・金属鉱物資源機構)の『石油・天然ガス用語辞典』(1986, 2010年の電子化版でも)で「単斜構造 monoclinical structure 地層が、ある広がりわたって、おおむね同一方向に傾斜している地質構造をいう。」と「同斜」と混同説明されている。

地形学等の関連分野でも、混乱が見られる。「単斜を同斜の意味に使用することは本来の定義からすれば誤りである。」³³⁾と指摘されているにもかかわらず、「単斜谷 homoclinical valley」「等斜谷 homoclinical valley」「単斜谷 monoclinical valley」「等斜尾根 homoclinical ridge」「同斜山稜 homoclinical ridge)」「単斜尾根 monoclinical ridge」「単斜山稜 monoclinical ridge」などの用例がみられる³²⁾。

2.5 褶曲の断面図

大縮尺、特に露頭規模ないしそれ以下の小スケールの褶曲ではその断面形態が直視(ないし正確に復元)できるので精密な幾何学的分類は有効であるが、中・大規模の褶曲では、きわめて困難で精度がかなり劣るので、その地質断面の形状を正確に描くことは難しい。逆に衛星画像レベルのスケールで表現される巨大な褶曲構造で

は、幾何学的分類が有効となる場合がある。いずれにしても、基本的な構造地質学的知見を踏まえておけばその褶曲断面解釈に著しい齟齬をきたすことは避けられる。

(1) 古典的褶曲断面の幾何学的作図法

褶曲を構成する地層境界を円弧で近似するバスク図法や傾斜の異なる隣接 2 点間を結ぶ直線の中点における垂線を境にその両側をそれぞれの傾斜の直線で近似する垂直二等分線法である。詳細は他書^{34),35)}に譲るが、いずれにしても実態に即した断面図とは言えず、地層の傾斜がきわめて緩い場合の地表付近の断面図としてある程度の有効性はあるが、概念的な模式図にすぎないからボーリングや各種物探情報で補正する参考材料に留めておくべきである。

また、極めて基礎的なことだが、あまり理解されていないのであえて述べると、一般に、背斜部では凸な方向に層序的上位(地質時代がより新しい地層)を呈し、向斜部では逆に凸な方向に層序的下位を呈する。しかし、褶曲後にさらに他の変形を受けると必ずしもこのようにならない場合がある。したがって、褶曲の空間的な向き・配置に関係なく凸な方向が層序的上位を示す構造を背斜とし、その逆を向斜と定義する。単に褶曲の凸な方向が空間的に上を向く場合をアンチフォーム、逆に下向きの場合をシンフォームと称して区別する。したがってシンフォーム背斜、アンチフォーム向斜が存在しうる。例えば、ジュラ紀の付加コンプレックスからなる美濃-丹波帯では、従来背斜・向斜と解されていた構造がアンチフォーム・シンフォームであることが明らかになってきた³⁶⁾。特に付加体地域での地表地質調査結果とボーリング結果との解釈上留意すべきである(図13)。

(2) 活褶曲帯の断面図

日本列島で短波長(数100m~数km程度)の活褶曲が密に発達する地域としては、北海道の天塩・石狩低地帯、東北の羽越地域及び中央部のフォッサマグナ地域などが知られており、いずれもきわめて厚い新第三紀~第四紀層が先新第三系基盤上(不整合面を介して)の被覆層として分布する。東北日本地域の広域構造応力場は、中新世の日本海拡大に伴う伸張テクトニクスから鮮新

世以降第四紀の東西性の圧縮テクトニクスの変換し、上述の変形している被覆層と(新たな変形に抗して)未変形な基盤間の著しい力学的異方性を反映し、活褶曲の深部構造を規定している。すなわち、両者間の力学的な decouple を反映して、それらの境界部に水平ないしそれに近い緩傾斜の断層面(切断面)を持ついわゆる detachment 断層が存在する可能性が高い。つまり、これらの活褶曲は「根なし」(デコルマン褶曲 décollement fold / デタッチメント褶曲 detachment fold)であるといえよう。もともとヨーロッパ大陸の安定地域に見られる被覆層・基盤の対立概念(デコルマン構造)とは、時代論的には異なるが(詳細は後述)、著しい物性の不連続面としては共通する⁹⁾。従って、「褶曲に参加している地層の厚さは、褶曲の波長と同程度以上にはなりえない」³⁷⁾とすれば、当該地域の地質断面では、深さ数100m~数km程度の箇所に複数の detachment 断層が発達する可能性が高いので、物理探査記録の解析に際しては留意すべきである。

2.6 断層関連褶曲構造(fault-related folding (folds))の断面図

古典的な構造地質学では、断層と褶曲は巨視的にはまったく異なるカテゴリー(前者は不連続的変形、後者は連続的変形)として扱われたが、ある系に属する地層群の構造変形が進捗すると、変形条件に対応した各地層・岩石の物性は当然異なるから、あるものは破断し、あるものは曲がったり流動したり、あるいはそれらが複合した断層・褶曲構造が併存して、系全体で新たな地質構造を呈することは理の当然であると考えられるようになった。すなわち、多くの褶曲は、その変形の進行、変位量の増加や隣接する断層との間の歪みの蓄積に伴って断層と直接連関する。それだけに従来の単なる地表踏査だけからではその正確な地質断面を把握することはより難しくなった。しかし、各種物探データの蓄積などによって、構造解釈に資するいくつかのモデル化が可能となった。それらを理解しておくことは、不可欠であるので以下に紹介しておく。まず関連術語の説明を簡単に整理しておこう。

(1) フラット(断層) flat (fault)・ランプ(断層) ramp (fault)

スラスト(低角逆断層・衝上断層)群が複合して発達する場合、上下盤の層理面などの基準面に平行な断層面をフラットと称する。フラットが発達するのは相対的に延性(ないしインコンピート)な岩層(例えば泥岩層や蒸発岩類層などで、glide zone / glide horizon とも称された)である。一方、上記基準面を横切ってそれらに斜交して(一般に30°程度)発達する傾斜断層をランプと称する。ランプが発達するのは相対的に脆性(ないしインコンピート)な岩層(例えば砂岩層や石灰岩層など)である。それらが交互に現れて(連続して)階段状の形

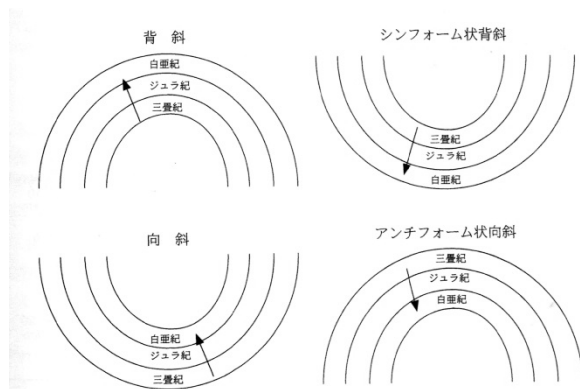


図13 背斜・向斜構造の模式図^{7),36)}

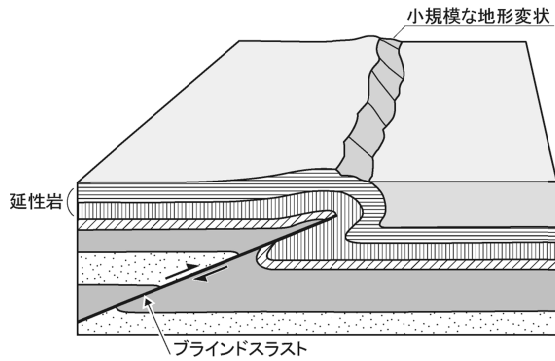


図14 ブラインド衝上断層 (スラスト) ³⁹⁾

態を示す場合、フラット-ランプ-フラット (後述) と称する。

これらの構造発達プロセスは、すでに 20 世紀初期から認識されており ³⁸⁾、フラットは層面スラスト bedding-plane thrust, ランプは diagonal fault, フラット-ランプ-フラットは step-bedding-plane thrust と称された断層とほぼ同義であるといえよう ¹⁴⁾。

(2) ブラインド衝上断層 (スラスト) blind thrust

最上位のフラットが非常に長く連続してから消滅する場合など、断層面が直接地表面に現れず、その存在が確認されがたく、世界中で 20 例ほど報告されているに過ぎない ^{18),39),40)}。ブラインドネスの程度によってさまざまな幾何学形状を呈する ³⁹⁾ (図 14)。

(3) デコルマン褶曲 décollement fold / デタッチメント褶曲 detachment fold

ヨーロッパで進展した古典的な構造地質学では、不整合で接する結晶質岩石からなる基盤 crystalline basement (先カンブリア系) と被覆層 sedimentary cover (主に古生代及びそれ以降の非変成堆積岩) からなる系では、前者は新期の造構作用に対してほとんど反応せず、被覆層は基盤との不整合面で引き剥がされ、基盤と無関係に激しく変位・変形し、もとの不整合面の位置に切断面・剥離面 detachment surface が生じ、これに起因する構造をデコルマ・デコルマン décollement と称した ^{9),40)}。フランス語に依拠して「デコルマン」と発音表記されるべきだが ⁸⁾、「デコルマ」と慣用表記されることが多くなった。デタッチメントは英語に依拠する。(図 15)

20 世紀後期から、この概念が拡張されてきた (例えば、不整合面だけでなく、インコンピーテントな層準で発達する断層:フラット。さらに、付加体では付加プリズム底面にあたる沈み込み帯境界を指す)。スラストがそれ自身さらなる断層変形を進めることなく、層理面にほぼ平行で平板状の大規模な水平変位を有するすべり帯 (デコルマ (ン)・デタッチメント) の上方の地層に変形を与えて続く時、形成される箱型褶曲をデコルマン褶曲/ デタッチメント褶曲と称するようになった。後述するデュプレックスに関する用語で言い換えれば、

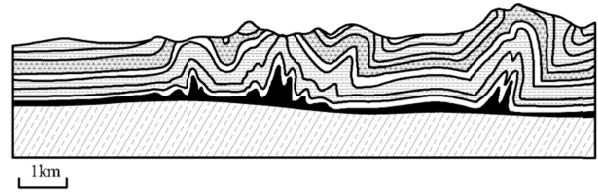


図 15 古典的デコルマン構造例 (基盤岩直上の黒色層は三畳紀の岩塩層、上位に重なる地層群はジュラ系～白亜系下部 (Buxtorf, A. 1916 Naturf. Gesell. Basel Verb., 4, 239-245.))

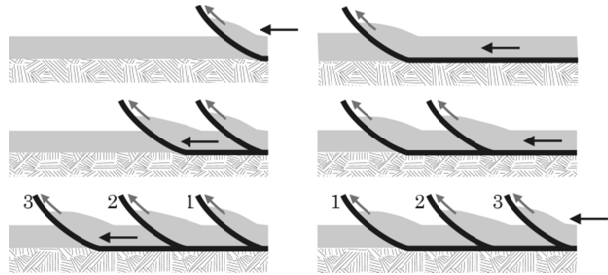


図 16 順序内スラスト (左) と順序外スラスト (右). 数字の順に断層形成 ¹⁸⁾

衝上断層運動で、フローア衝上断層やルーフ衝上断層は、層理面にほぼ平行で大規模な水平変位を有するすべり帯 (デコルマ) として機能し、その上盤側にナップを形成していく。この場合、断層の上下で非調和な構造を形成する。例としては、ジュラ山脈の中生代層に典型的に発達する (ここではデタッチメントは中期三畳紀の蒸発岩類上に生じている ⁴¹⁾)。

(4) 衝上順序 thrust sequence

造山帯前縁部に位置する (褶曲) 衝上断層帯 (fold-and-)thrust belt に発達する断層の衝上順序については次の 2 通りがあるとされる。

a) 順序 (内) 衝上断層 (順序 (内) スラスト) in-sequence thrust

例えば北米コルディレラやアパラチア造山帯前縁に典型的に発達する褶曲・スラスト帯では、新しいスラストは古いスラストの前縁 (下盤側) に発生し、すなわち造山帯中心部から前縁部に向けて発達し、その断層運動によって古い断層部を持ち上げていく。この順序を forward sequence, ピギーバック (おんぶ) (型) piggy back (type) と称し、それらの順序に従うものを順序 (内) 衝上断層 (順序 (内) スラスト) と呼ぶ ¹⁸⁾。(図 16)

b) 順序 (外) 衝上断層 (順序 (外) スラスト) out of sequence thrust

新たな衝上断層が、古い衝上断層の上盤側に形成される、すなわち前面でなく後側 (後背地・造山帯中心部側) に発達し、古いスラストを切る場合もあり、これはオーバーステップ (型) overstep (type) と称され、順序外衝上断層 (順序外スラスト) と呼ぶ ^{18), 41), 42)}。

(5) 覆瓦状構造 imbricate structure

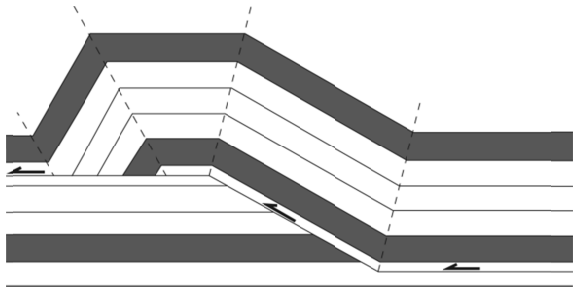


図 17 断層折れ曲がり褶曲⁴³⁾

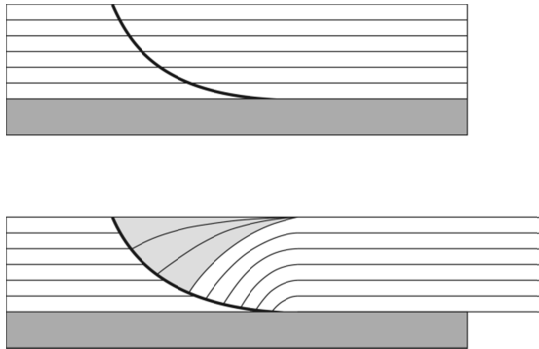


図 18 ロールオーバー背斜

同方向に傾斜したスラスト群の発達によってあたかも瓦をずらして積み重ねたかのような構造が形成される場合、これを**覆瓦状構造**と称する。近年、海洋プレートの沈み込み帯（プレート収束域）で形成される付加体の構造にも適用されるようになった。これらの断層過程が進行し上方に発散し下方では 1 つの断層に収れんとすると、いわゆる**覆瓦ファン（構造） imbricate fan (structure)**をなす。逆に上方に向かって 1 つに収束する場合は**デュプレックス（構造） duplex (structure)**（後述）という。

(6) **断層折れ曲がり褶曲 fault-bend folding (fold)**

非平面的な断層に沿う変位によって生ずる褶曲である。断層は一義的には平面で近似されるが、大規模な断層面は、実際には非一様な平面・曲面やその集合からなることが多い。断層に沿って地層が変位移動する時、断層面が折れ曲がっていることで必然的に地層に形成される褶曲をいう^{41), 43)}。引張り断層（引張り造構応力場）でもスラスト（圧縮造構応力場）の場合でも生じうる（図 17）。

前者の場合、リストラック断層は、上盤側にロールオーバー背斜 rollover anticline を形成する⁴¹⁾（図 18）。

後者の場合、地層に平行なフラットの部分と、地層を斜めに切り上がるランプの部分、さらにその先の上位のフラットの部分とに区分される。なお、この**フラット-ランプ-フラット**をなすスラストは、平面的であった断層が後で折れ曲がったものではないことに留意されたい。ランプの上側を地層が移動していくと、幾何学的な制約から、衝上断層の上側に頂部の平らな背斜構造が形成される。これは**ランプ背斜 ramp anticline**とよばれ、

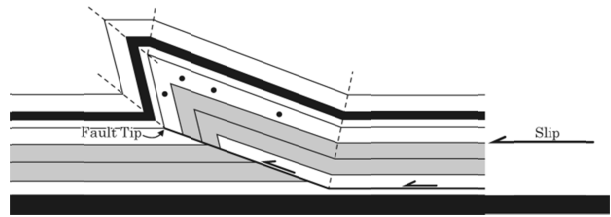


図 19 断層伝播褶曲⁴³⁾

典型的な断層折れ曲がり褶曲とされる^{43),44)}。

(7) **断層伝播褶曲 fault-propagation folding (fold) / tip-line fold**

地層に平行なデコルマ面（フラット）の先端部から地層を斜めに切断するランプが形成されようとする時にその部分が座屈をはじめ。そして、これからランプに成長していこうとする先端部分に、キック褶曲状の幅が狭いヒンジ部をもつ褶曲が形成される。ランプの先端部 **fault tip** がさらに前方に伝播していくのに伴って、この褶曲が成長していく。その結果、フラットからランプに移行する部分の上盤側に開いた 1 向斜が、ランプの前方と上盤側にキック褶曲状の 1 向斜と 2 つの小規模な背斜が重なった 1 背斜が形成される。見かけ上、しばしば単斜 monocline（前述）の形状を呈する^{40),42),45)}（図 19）。

(8) **デュプレックス duplex / デュプレックス構造 duplex structure / デュプレックス付加 duplex accretion**

デュプレックスは、もともと北アメリカの典型的な二階建て集合住宅を意味し、一戸に全体としては 1 つの屋根と 1 つの床があり、部屋の中で上下二階になっている。断層の種類を問わず主断層の生長過程で、その屈曲部（ランプ）に新たな断層面を生じて、周囲を断層で境されたレンズ状ブロック（ホース horse）を生ずる。この過程で形成された二重三重の断層によって囲まれたホースの覆瓦状に積み重なった構造（フラット（低位）-ランプ-フラット（高位）の形態を呈する）をいう^{46),47)}。

短縮デュプレックス contractional duplex の成長過程の模式は、以下の様である。

初期段階：上盤の地層が少し衝上した後、低位のフラットのスラストがまっすぐ前方に延び、新たなランプを形成。この時、最初のランプとそれに続いた高位のフラットの一部は活動を停止し、新たに生じたスラストの上盤の一部として移動する。

第 1 段階：新たなランプ背斜の形成で、古いランプ背斜の一部は消滅する。

第 2 段階：次々に新たなランプ背斜が前方に形成され積み重なっていく。

第 3 段階：高位のスラストをルーフ衝上断層 roof thrust、低位のスラストをフローア衝上断層 floor thrust という。

デュプレックスは衝上断層に伴う**衝上デュプレ**

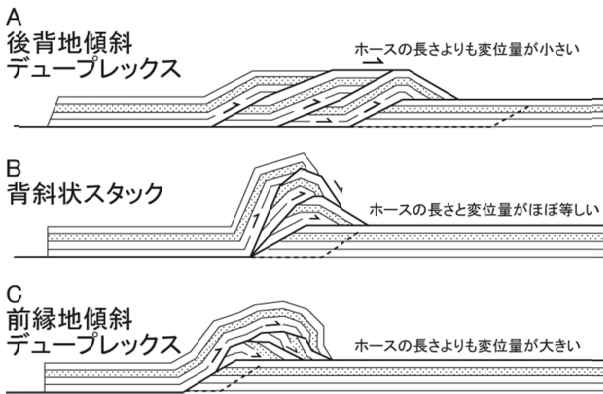


図 20 3種のデュプレックス^{48),49)}

ックス **thrust duplex** がよく知られており、単に「デュプレックス」というとこれを指すことが多い。3つのタイプが想定されている(図20)。露頭規模の事例として鳴門市中山の採石場跡で、60°程度東傾斜で東上位の砂岩泥岩互層中に観察されるデュプレックスの写真が紹介されている⁴⁹⁾。また、正断層に伴う**伸張デュプレックス extensional duplex**^{49),50),51)}も知られるようになった。いずれにしてもデュプレックスの認定には、ループ衝上断層の存在が重要で、これが不詳だとスラストが上方で発散するタイプの覆瓦ファンと識別しがたく、単に「覆瓦状構造」と称される。

3. バランス断面(法) balanced cross section (BCS)

バランス断面法は、古くから提示され⁵²⁾、その後体系的に整理された断層関連褶曲理論⁴³⁾に基づいて地質断面を解析する方法で、断層の折れ曲がりや変位量の変化を定量的に解析することにより、断層形状と断層運動に伴って形成される褶曲構造との関係を論理的に表現できる。BCSは圧縮造構応力場での典型的な大規模変形構造であるナップ(テクトニクス)分野では、短縮量(最小値)をより正確に推測したり、未確認だった新たな変形構造の発見につながり、その有効性が支持された。その後、伸張造構応力場でも適用され成功を納めた^{53),54)}。さらに、北米コルディレラで適用されて成功し^{55),56)}、構造地質学の教科書等でも広く紹介されるようになった^{57),58),59)}。

3.1 バランス断面法の基本的な考え方

褶曲が断層運動によって形成されたもので、断層変位をゼロに戻すと褶曲した地層も変形前の自然な形の地層に復元できるとするもので、変形様式としては、層平行スリップ **layer-parallel slip**・フレキシユラル・スリップ **flexural slip**・傾斜せん断 **inclined shear** があるが、基本的には層平行スリップと傾斜せん断を考慮すればよい。

(1) 層平行スリップの原理

上盤と下盤の2層で構成された地層(系)の上盤に圧

縮力が作用して変形する場合、上盤が完全な剛体の場合は上盤と下盤の間に隙間が形成される。しかし、通常は上盤の地層にはそのような隙間を保持するだけの強度がない。そのため、何らかの内部変形(地層の流動変形など)が生じて隙間が解消される。上盤が変形する場合は、層理面に平行な滑りを上盤全体に仮定することにより上盤を変形させると考える。水平方向に重ねた紙の束を断層面に沿って横方向に変形させるとイメージすればよい。この場合、地層の長さや厚さは変化しないので地層の断面積も一定である。ただし、逆断層の傾斜角度 θ が大きくなれば(注： $\theta < 30^\circ$ の場合、スラストと称されることが多い)、元々の地表面に乗り上げることができなくなるので、 $\theta > 30^\circ$ では単純な断層折れ曲がり褶曲は存在しないことが示唆される⁶⁰⁾。

断層傾斜角度が比較的大きい場合の変形様式は、**layer-parallel slip**による変形の場合、褶曲構造と断層との関係により、断層面に沿って上盤の地層全体が変形しながら移動する断層折れ曲がり褶曲、断層の先端位置が移動しながらその先端位置の変位を固定して上盤が移動する断層伝播褶曲、水平断層の先端位置が移動しながら内部で流動的な変形が生じて褶曲が形成されるデタッチメント褶曲の3種類の変形様式がある(前述)。

(2) 傾斜せん断の原理

傾斜せん断によって上盤が変形する場合、上盤の中に多数の高角平行な滑り面を仮定する方法であり、鉛直方向に紙の束を重ね、断層面に沿って横方向に移動させるとイメージすればよい。

さて、BCSは有効な断面図作成法であるが、万能で完全無欠というわけではない。ある程度以下に述べる経験則に依拠した仮定(厳密には自然界で成り立つ保障はない)に基づくから、他の手法と同様絶えざる吟味が要されることは言うまでもない。

- a) 平面歪：変形において褶曲軸や断層(衝上断層や正断層)の走向に平行な方向の歪みはゼロとしている。
- b) 変形による体積変化はないとする。例えば褶曲では、普通体積変化(dilatation)が形の変化(distortion)に比べて無視できるほど小さいので、褶曲層は非圧縮性媒質として扱われる。この仮定によって褶曲軸や断層の走向に直交する断面線での断面図内で地層の動きをすべて把握できることになる。変形前後における断面図である区域の面積は同じで、かつ各層準を表す線(地層の長さ)も変化しない。
- c) 褶曲は平行褶曲である。褶曲面の層厚が一定で、褶曲前平行であった層は、褶曲後も平行性を保っている。特に経験則の強い仮定である。例えば、褶曲軸がブランチしていたり、断面を横切る横滑り断層が存在したり、また変成帯のようにこれらの仮定が成り立ちえないと考えられる地域では、BCSを適用すべきではない。

3.2 BCS 作成手順

- (1) 断面線の位置決定：褶曲軸や断層の走向に直交する断面線を設定する。また、一般に断層線沿いの変位量が中央付近で最大になり両端部に向かって減少するが、この場合は最大変位を示す中央部を通すべきである。
- (2) 断面図の両端部を層面すべりのない所に設定する。具体的には、背斜/向斜のヒンジ部（曲率の極大部）か、褶曲帯から相当距離離れていて変形の影響が無視できると考えられる地点に設定する。
- (3) 断面図両端の間で、全層準において地層の長さが一定であるようにする（line length balancing）。キルビメーター（曲線計）等で曲線部の長さを計測してチェックする。実際には、浸食された地層も考慮して、試行錯誤的に改善する。
- (4) 変形前の状態に戻した時、過不足なく合理的に元の層序断面図に復元できるか否か確認する。層序断面図にも後で形成された断層を書き入れ、変形前後で断層に囲まれた部分の面積が変化していないかプランニメーター（面積計）などで確認する（area balancing）。

バランス断面法に基づく解析ソフトは元来、石油資源探査を目的として開発されたもので高価であることと、一般の地質構造評価のツールとしてオーバースペックでもあり、あまり一般には普及していない。そこで、地質構造や断層に関する専門知識を有していない技術者でも使える簡易なバランス断面法のツール開発も行われるようになった⁶¹⁾。今後さらなる発展が期待される。

4. 終わりに

いろいろ紹介したが、「定説というものはない」⁸⁾に等しいから、直接には見えない地下の地質を推測するには、柔軟にかつ広範な知見・経験に基づいて謙虚に可能な限り合理的な解釈を積み重ねていくことに尽きる。

4.1 補遺 1

いまだに誤解する向きがあるが、地質図等に示された断層線を表す実線の太さは、断層破碎帯の幅を表しているわけではない。例えば、1 万分の 1 縮尺の図で 1mm 幅の断層線が描かれていても、印刷の都合であって、実際に $1\text{mm} \times 10000 = 10\text{m}$ 幅の断層破碎帯が存在するわけではない。あくまで模式的な表現に過ぎない。地質学的には、断層の走向傾斜、最大落差、活動時期、広域地殻変動や造構応力場との関係などが重要であるが、土木工事においてはむしろトンネルなどの工事方向と断層方向との位置関係と共に断層面の性状（断層破碎帯・断層角礫岩や断層粘土の性状や厚さ）が工事の難度に直結する重要問題である。しかしながら例えば、既存の 1/5 万地質図幅では、調査者の専門的調査能力や関心の如何に

よって、断層面の性状や周辺の小断層・節理についてはほとんど記載しない場合もあるが、もちろんそれらが当該地域に存在しないことを意味しているのではない。必要に応じた精査が要請される。

4.2 補遺 2

一例として、昭和初期に鐵道工學會から刊行された『鐵道地質學』の「第七章 工事と断層」を現在の用語で読み直し、かつ補足要約して紹介する⁶²⁾。

(1) 薄い断層粘土を挟む断層

一般に 10cm 内外の粘土を挟むが、両側の盤には著しい破碎が見られない場合は、地表地質調査でもボーリングでも気づきにくく、既存地質図では記載されていないことも多い。この場合でも断層の走向と工事方向の位置関係が重要である。例えば、「(断層の) 走向が隧道の方向と直角に近くして傾斜緩なる場合は其の下盤より掘進する場合は落盤或は崩壊の危険を有する…断層の存在に気がつかないと云ふ事が最も危険である。」と指摘している点は留意すべきである。当然と言えば当然であるが、工事現場経験に乏しい地質研究者には思い至らない観点である。また、断層面の傾斜がほぼ垂直な場合でも、片側の盤の破碎が著しい場合は、地質学的意味はあまり斟酌されないが、切払後に断層面を境として崩壊する可能性があることも指摘している。粘土が薄くても両側の盤に破碎が著しい場合の危険性はいうまでもない。一方、断層の走向がトンネル方向と平行ないしそれに近い場合は偏圧を生じ、上盤が沁りくることがあるからである。

(2) 断層粘土の厚さが 30cm 以上となった場合

30cm というのはおそらく一尺程度という目安で、厳密な定量値ではない。経験的にほとんど直立に近いものが多く、崩壊は少ないが、これは断層粘土がこの程度まで厚ければ安全ということではなく、(1)と違って発見されやすく適切な対処がなされやすいためである。一方、湧水の原因となる場合が非常に多い。また、次の(3)も同様であるが、厚い断層粘土は複数回の断層活動に起因して形成される場合があり、地質学的に興味あるだけでなく、その広がりなどを推測する際、その内部構造（例えば、鏡肌 slicken side を持つ小岩塊・礫が不規則に存在する場合は、鏡肌を生じた断層面が後の断層運動に因って破壊された可能性がある）にも留意すべきである。断層の活動年代を、断層破碎物から直接測定しようという試みもあるが、いまだ実用段階には至っていない。

(3) 断層粘土がきわめて厚く且つ破碎帯を伴う場合

断層運動を起因するのは極めて大きな自然事象であるから、岩質の硬軟は関係しない。すなわち、堅い岩石でも激しい亀裂を生じうる。間隙の多い破碎帯は掘削工事にとっていうまでもなく不良である。逆に軟弱な岩石では急激な風化による粘土化で、断層位置すら不明瞭となることもある。このように破碎帯の定量的記載法は地

質学的にも岩盤工学的にも十分でなく、今後も重要な検討課題である。

参 考 文 献

基本的な教科書・参考書・事典(辞典)類

- 2) 陶山国男, 羽田忍. :現場技術者のためのやさしい地質学. 築地書館. 1978, p. 130. (現場情報と地質情報の関係を平易に解説)
- 4) 本間不二男訳. 構造地質学講話(Daly, R. A. 1926, "Our Mobile Earth" Charles Scribner's Sons). 古今書院. 1927, p. 344. (古典的な構造地質学解説書)
- 6) 垣見俊弘, 加藤碩一. 地質構造の解析-理論と実際-. 愛智出版. 1994, p. 271. (基礎的先駆的な構造地質学教科書)
- 7) 加藤碩一, 脇田浩二総編集. 地質学ハンドブック. 朝倉書店. 2001, p. 696. (総括的な地球科学及びその研究手法の紹介)
- 8) 佐藤正. 地質・土木技術者のための地質構造解析 20講. 近未来社. 2003, p. 398. (現場経験に基づく構造地質学解説書)
- 9) 脇田浩二, 井上誠共編. 実務に役立つ地質図の知識. オーム社. 2006, p. 234. (現場技術者向けの地質図解説書)
- 10) 土木地質の達人編集委員会編. 土木地質 達人の知恵. オーム社. 2009, p. 181. (建設事業に関わる地質調査・解析における留意点やノウハウ紹介書)
- 11) ダム工学会編. 総説 岩盤の地質調査と評価 現場技術者必携 ダムのボーリング調査技術の体系と展開. 古今書院. 2012, p. 529. (地質工学的観点からの現場調査のレビュー)
- 13) 加藤碩一. 地震と活断層の科学. 朝倉書店, 1989, p.280. (国内外の活断層の先駆的なレビュー)
- 14) Badgley, P. C. Structural and Tectonic, Principles. Happer & Row, New York, Evanston & London, and John Weatherhill, Inc., Tokyo. 1965, p. 521. (今に通用する古典的な構造地質学の名著)
- 19) 狩野謙一, 村田明広. 構造地質学. 朝倉書店. 1998, p. 298. (基本的に解明な構造地質学の良書)
- 22) 坂幸恭監訳. オックスフォード地球科学辞典. 朝倉書店, 2004, p.724. (原書は, Allaby, A.; Allaby, M. ed. A Dctionary of Earth Sciences, second edition, Oxford University Press. 1998)
- 23) 木村敏雄, 竹内均, 片山信夫, 森本良平. 新版地学辞典. 古今書院. 1975, p. 799.
- 24) 中國科學院編譯出版委員会名詞室編訂. 綜合地質名詞. 科学出版社. 1957, p. 244.
- 25) 小林康昭, 勝貝健. 増補版 土木和英辞典. 近代図書. 1989, p. 482.
- 26) 小林康昭編. 土木英和辞典. 近代図書. 1996, p. 477.
- 27) 町田貞, 井口正男, 貝塚爽平, 佐藤正, 榎根勇, 小野有五. 地形学辞典. 二宮書店. 1981, p. 767.
- 28) 石油公団編. 石油用語辞典(増補改訂版). ペトロ・ビジネス・サービス. 1986, p. 581.
- 29) 佐藤傳藏. 岩石地質学. 六盟館. 1923, p. 396.
- 30) 佐藤傳藏. 増訂改版 岩石地質学. 星文館. 1925, p. 534.
- 31) 渡邊貫編. 地学辞典. 古今書院. 1935, p. 1726.
- 32) 鈴木隆介. 建設技術者のための地形図読図入門(第3巻 段丘・丘陵・山地). 古今書院. 2000, p. 555-942.
- 33) 堆積学研究会編. 堆積学辞典. 朝倉書店. 1998, p. 470.
- 34) 藤田和夫, 池辺穰, 杉村新, 児島丈児, 宮田隆夫. 地質図の書き方と読み方(増補・再訂). 古今書院. 1984, p.194. (基本的な地質図解説書)
- 35) 高安克己, 大西郁夫. 地学ハンドブックシリーズ 1 地質図学. 地学団体研究会. 1985, p. 160. (基本的な地質図学解説書)
- 57) Suppe, J. Principles of Structural Geology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1985, p. 537. (近年の代表的構造地質学教科書の1つ)
- 58) Ragan, D. M. Structural Geology, An Introduction to Geometrical Techniques. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York. 1985, p. 393. (同上)
- 59) Ramsay, J. G.; Huber, M. I. The Techniques of Modern Structural Geology, Vol. 2, Folds and Fractures. Academic Press, London. 1986, p. 700. (同上)

主題別論文

- 5) 稲垣富士. 土木地質調査法(加藤碩一・脇田浩二総編集『地質学ハンドブック』). 朝倉書店. 2001, p. 547-571.
- 12) 山元孝弘. 猪苗代地域の後期中新世-鮮新世カルデラ火山群. 地調月報. vol. 45, p. 135-155.
- 16) 加藤碩一. 地質事象における「活」の諸問題. 応用地質技術年報. 2014, no. 33, p.39-58.
- 36) 木村克己. 丹波帯ジュラ紀付加コンプレックスのスラスト系と運動像. 地質学論集. 2000, no. 55, p. 181 - 202.
- 37) 池田安隆. 日本の活褶曲帯の形成メカニズムとその起源. 活断層研究. 2002, vol. 22, p. 67-70.
- 38) Chamberlin, R. T.; Miller, W. Z. Low-angle faulting. Jour. Geol. 1918, vol. 26, p. 1-44. (低角断層)
- 39) Dunne, W. M.; Ferrill, D. A. Blind thrust systems. Geology. 1988, vol. 16, p. 33-36. (ブラインド・スラスト)
- 40) Thompson, R. I. In "Thrust and nappe tectonics" (McClay, K. R.; Price, N. J. eds.), Spec. Publs. Geol.

- Soc. Lond, 9, Blackwell, Oxford. 1981, p. 449-462. (スラスト)
- 41) Jamison, W. R. Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Jour. Struct. Geol.*, 1987, vol. 9, p. 207-219. (スラストと褶曲)
- 42) 木村克己. 付加体の out-of-sequence thrust. *地質学論集*. 1998, no. 50, p. 131-146.
- 43) Suppe, J. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *Amer. Jour. Sci.* 1983, vol. 283, p. 684-721. (断層折れ曲がり褶曲)
- 44) Rowland, S. M.; Duebendorfer, E. M.; Schieflebein, I. M. Structural analysis and synthesis: a laboratory course in structural geology (3ed.). Wiley-Blackwell. 2007, p. 301. (実験構造地質学)
- 45) Suppe, J.; Chang, Y. L. Kink method applied to structural interpretation of seismic sections, western Taiwan. *Petrol. Geol. of Taiwan*. 1983, vol. 19, p. 29-49. (キンク)
- 46) Carreras, J.; Druguet, E.; Griera, A. Shear zone - related folds. *Jour. Struct. Geol.*, 2005, vol.27, p.1229-1251. (せん断帯の褶曲)
- 47) Boyer, S. E.; Elliot, D. Thrust systems. *Bull. Am. Assoc. Petr. Geol.* 1982, vol. 66, p. 1196-1230. (スラスト)
- 48) Mitra, G.; Boyer, S. E. Energy balance and deformation mechanisms of duplexes. *Jour. Struct. Geol.* 1986, vol. 8, p. 291-304. (デュプレックス)
- 50) Park, R. G. Geological structures and moving plates. Blackie. 1988, p. 337. (大構造)
- 51) 竹下徹. 三波川帯の伸張デュプレックス. 日本地質学会構造地質部会編. 「日本の地質構造百選」. 朝倉書店. 2012, p. 33.
- 52) Dahlstrom, C. D. A.; Balanced cross sections. *Can. Jour. Earth Sci.*, 1969, vol. 6, p.743-757. (バランス断面)
- 53) Gibbs, A. D. Balanced cross-section constructions from seismic sections in areas of extensional tectonics. *Jour. Struct. Geol.* 1983, vol. 5, p. 153-160. (バランス断面)
- 54) Coward, M.P.; Gibbs, A. D. Structural interpretation with emphasis on extension tectonics. *JAPEC Course Notes*, 1986, no. 49, p. 362. (伸長テクトニクス)
- 55) Cowan, D. S. Structural styles in Mesozoic and Cenozoic melanges in the western Cordillera of North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1985, vol. 96, p. 451-462. (メランジ)
- 56) Woodward, N. B.; Boyer, S. E.; Suppe, J. An outline of balanced cross-sections. In “Studies in Geology” , 2nd edn. University of Tennessee, Department of Geological Science. 1985, p. 170. (バランス断面)
- 60) 玉川哲也, 松岡俊文, 田村八州夫. 単純剪断変形が存在する時の断層折れ曲がり褶曲構造に対する幾何学的検討. *情報地質*.vol. 9, p. 3-11. (バランス断面法の検討)
- 61) 塩崎功, 今井久, 山下亮. バランス断面法による地質構造変遷の推定ツール. *ハザマ研究年報*. 2011, 1-6. (バランス断面法とその解析ソフトの紹介)
- 事例・研究例論文**
- 15) Rodgers, J. The Folds and Faults of the Appalachian Valley and Ridge Province. *Southeastern Mineral Symposium*, 1950, Kentucky Geol. Survey. 1953, Ser. 9, Spec. Pub. 1, p.1 50-166.(ref. 17) (褶曲と断層)
- 17) 大沢穠, 池辺穰, 平山次郎, 栗田泰夫, 高安泰助. 能代地域の地質 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅) . 地質調査所. 1984, p. 91.
- 18) Butler, R. W. H. The terminology of structures in thrust belts. *Jour. Struct. Geol.* 1982, vol. 4, p. 239-245. (スラスト用語)
- 20) Douglas, R. J. W. Callum Creek, Langford Creek and Gap Map-Areas, Alberta. *Geol. Surv. Can. Mem.*, 1950, p. 255. (地域地質構造事例)
- 21) Kato, H. Folds of Miocene Formations in Higashi-Chikuma District, Nagano Prefecture, Central Japan. *Bull. Geol. Survey Japan*. 1979, vol. 30, p. 71-130. (地域地質構造事例)
- 49) 村田明広, 福田佳代. 徳島県, 和泉層群中の衝上デュプレックスと伸張デュプレックス. *自然科学研究 徳島大学ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部*. 2012, vol. 26, p. 31-37.
- その他**
- 1) 近藤達敏 訳. Beckel, E. B. Presidential Address Delivered Before the Colorado Scientific Society, 1950. *土木地質資料*. 1961, vol. 1, p. 10-22.
- 3) 斎藤秀樹. 土木地質調査における物理探査の活用を. *応用地質*. 2015, vol. 55, p. 277.
- 62) 廣田孝一. 鉄道地質学 (鉄道工学講座分冊 1) . 鉄道工学会. 1942, p. 255.