

## 断層の定義, 考え方

Fault—definition and usage—

田中和広 (たなか かずひろ)

(財)電力中央研究所地質地盤部構造地質グループ研究主幹

井上大栄 (いのうえ だいえい)

(財)電力中央研究所地質地盤部部长

## 1. まえがき

本小特集号は、断層について理学的な側面と土木工学的な側面からとらえ、それぞれの観点から調査法、記載法、評価法等について現在までの知見をまとめるものであり、ここでの目的はこれらの議論に先立ち、「断層」という言葉の定義、使われ方等について整理することである。断層は「だます、失望させる」の意を持つ古フランス語 *faulter* が語源とされ、英語の *fault* は断層以外に「失敗、欠点・障害」の意に用いられている。本来断層という言葉は鉱山用語として「鉱脈が地層の変位により突然見失われ途方にくれる」の意に用いられたように、実務的な記載用語であったようである。その後、地質構造解釈において重要な要素として用いられるようになり、概念としての断層の重要性が強調され、成果は多数の地質図に図示された。また、最近では地震を引き起こす原因として断層の活動が考えられるようになり、一般には目に触れることのない地下深部における断層のダイナミックな活動そのものが問題とされてきている。また、ダムや様々な建設現場において軟弱な、断層の状態そのものが問題となり、これらは破碎帯と呼ばれ、それらの力学的、水理学的な特性が研究課題となっている。

このように概念を示す観点、状態を示す観点、動きを示す観点といったように様々な観点から断層は調査、評価されてきており、それぞれで用語の用いられ方、示す意味などが微妙に異なってきている。このため、ここでは断層という言葉の理学的な定義、分類についてまず述べ、様々な分野での用いられ方について解説する。

## 2. 断層の定義

既に述べたように、断層という用語は、本来鉱山などで用いられた実務的な記載用語であったが、1885年に Rogers により「ひずみにおける転移あるいは変位を伴う亀裂」とされ断層が変位を伴うという概念が生まれた。その後、国際地質学連合により構造地質用語の整理と定義についての検討がなされ、1979年に発行された International Tectonic Lexicon において断層は以下のように再定義された。

A fracture surface of zone in rock along which appreciable displacement has taken place. (岩石中の破碎面ないしゾーンでそれに沿い目に見えるほどの変位が認められるもの。)

「断層」の定義は現在においても基本的には上記の考

え方を踏襲して用いられているが、対象とされる分野によって使われ方が異なっている。

ここでは理学的観点から構造地質要素としての断層の定義と分類について述べる。

## 2.1 定義

断層は本来は構造地質用語であり、「Glossary of Geology」<sup>1)</sup>には「a fracture or a zone of fractures along which there has been displacement of the sides relative to one another parallel to the fracture.」と定義されている。即ち、「それを境として両側で変位が認められる単一割れ目もしくは複数の割れ目ゾーンとされ、変位を持つ面」として定義されることが多い。地質図においては線として示される。跡津川断層といったように固有名詞の一部として用いる際は、断層は概念として用いることが多く、具体的な実体としては後述するように「数条の破碎帯から構成される」といった表現を用いることが一般的である<sup>2)</sup>。複数の割れ目から構成される断層は、各割れ目がなごしの変位を伴っている場合が一般的である。また、花崗岩の様に塊状の岩盤においては両側の変位が確認できないため、断層の認知に混乱をきたすことがあり、特に破碎帯との区別が混乱している。

## 2.2 分類

上記のように理学的な断層を考えたとき、幾何学的、および成因的観点から断層は分類されている。ここでは Billings に従い、一般的な分類を整理する<sup>3)</sup>。

## (1) 幾何学的分類

## ① すべりの方向による分類

図-1に断層のジオメトリーを示す。断層は走向と傾斜を有し、面上でのすべりの方向により、走向すべり断層、傾斜すべり断層、斜めすべり断層に区分される。

## ② 断層のパターンによる分類

断層のパターンにより、平行断層、雁行断層、環状断層、放射状断層に区分される (図-2)。

## ③ 傾斜角度による分類

断層の傾斜角度により、45°以上の高角度断層、45°未満の低角度断層に区分される。

## ④ 見かけの運動様式による分類

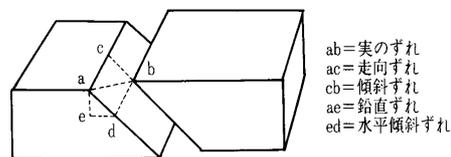


図-1 断層のジオメトリー

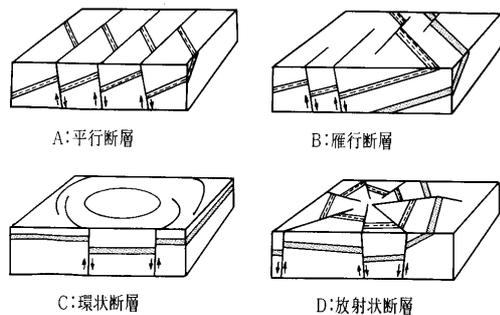


図-2 パターンによる断層の分類

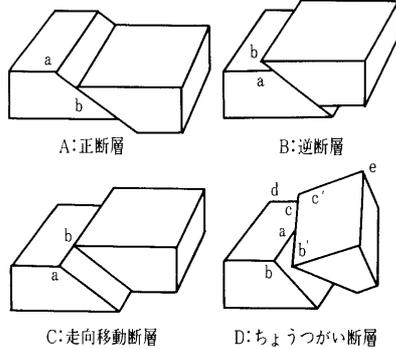


図-3 相対的な運動による断層の分類

断層を挟んだ両側のブロックの相対的な運動様式により、正断層、逆断層、走向移動断層、ちょうつがい断層に区分される(図-3)。

(2) 成因の分類

本来断層の分類はその成因、生成メカニズムを考慮してなされるべきであり、特に生成にかかわった応力の性質による分類が重要である。断層は大きく造構応力により形成されるものと重力により形成されるものとに区分され、前者にはスラスト断層、走向すべり断層等があり、後者には地すべりのすべり面等がある。

3. 断層の状態についての考え方

概念としての断層ではなく、実体としての断層は工学の分野において重要な検討課題となっている。一般に土木の現場においては断層や節理などの構造地質用語は具体的な状態を示す場合に使用される。即ち、まず、岩盤中に周辺の構造とは異なる連続した箇所があると、これを岩盤分離面または地質不連続面と呼び、これらに伴われる軟弱な層の幅、連続性、走向傾斜を計測し、これら全体を称して断層と呼ぶ。また、断層とは区別して破砕帯、シームといった表現をとることがあり、一部では混乱を招いている。このため、ここでは、あくまでも、理学としての断層の定義を踏襲し、なおかつ破砕帯といった断層の状態が問題となるケースも考慮し、なるべく矛盾のない解釈、整理を行うことを目的とし、「断層はその両側で変位の認められる割れ目もしくは割れ目ゾーンであり、一般に破砕帯を伴う事が多い。」と定義する。即ち、断層は走向・傾斜といった三次元パラメーターを有し、破砕帯は幅、強度、透水性などの物理的パラメーターを有する。断層は成因的な意味を本来的に有する概念であり、破砕帯は状態を示すものといえる。現場における地質調査は迅速性が要求されるため、現場において

成因等についての判断がつかない場合、幅10 cm以上の軟弱部ゾーンに対して、記載のための用語として一般に「破砕帯」と呼ぶことがある。この場合、「破砕帯」の中には断層運動に伴うせん断作用により脆弱化したもの以外に、熱水変質作用により軟質化したものなどほかの原因により軟質化したものも含まれる事がある。実態としては、軟質な箇所についてその物性、分布等が明らかとなれば施工上は用語は大きな問題とはならない。しかし、その分布の特徴や連続性などを推定する際には、「破砕帯」がどのようなメカニズムによって形成されたのかについて明らかとすることが重要である。例えば、熱水作用により形成された変質帯であれば、その分布は不規則であり、軟質部も膨縮が著しい事が一般的ということになる。このため、「破砕帯」とされたものは成因などについての詳細な検討により変質帯、風化帯、地すべり等と最終的に記載すべきである。この内、特に断層に伴われる「破砕帯」については単に破砕帯もしくは断層破砕帯と呼ぶのが適当と考える。「破砕帯」が状態を表す限りにおいてはその規模、性状により区分が可能であり、「破砕帯」と同じカテゴリーとして、幅の狭い破砕帯(幅数 cm 程度)や風化・変質した細脈など固い岩盤中の薄い軟弱層をシームと呼ぶ事がある<sup>4)</sup>。シームは英語では clay seam, coal seam と呼ばれ極めて薄い層の意味に用いられており、断層運動による生成といった意味は持たず、この点において現在の用いられ方には問題があることが指摘されている<sup>5)</sup>が、現場での調査の性格上、幅の狭い軟弱部(一般に幅1 cm~10 cm 程度)を記載用語としてシームと呼ぶことが一般的である。成因としては「破砕帯」と同様に様々なものが考えられよう。破砕帯を伴う断層についての存在量として重要なものに破砕幅があり、断層の長さとの正の相関が認められる<sup>6)</sup>。

4. 破砕帯について

ここでは特に断層運動により形成された破砕帯(断層破砕帯)について解説する。破砕帯は既に述べたように軟弱な層がゾーンとして連続するものであり、このような断層運動に伴うせん断作用により形成された元来の組織構造を失ったものを、断層岩(Cataclastic Rock)<sup>7)</sup>と呼ぶ(図-4)。断層岩は構成する粒子の大きさと固結度、再結晶化の程度によりさらに区分がなされている。このうち、再結晶化が著しいものをマイロナイト、固結

	初生的な結合力を保持している岩石		
	破砕作用が新鉱物生成・再結晶作用より卓越	流動構造のない岩石	流動構造のある岩石
* 断層角礫	微角礫	プロトマイロナイト	マイロナイト片麻岩(ミロナイト片岩)
* 断層カウジ	カタクラサイト	ウルトラマイロナイト	ブラストマイロナイト

\* ボーフィロプラスト、ボーフィロクラストの体積百分率  
\*\* 同平均的粒径

図-4 破砕岩の分類

しているが結晶化は進んでいないものをカタクラサイトと呼ぶ。また、地表付近で形成され元来の粘着力を失った破碎物質のうち、細粒なものを断層ガウジ、粗粒なものを断層角礫と呼ぶ。前者は断層粘土あるいは単に粘土、後者は角礫と呼ぶことがある。これらの組織、構造の違いは、これらが形成された地下深度が異なるためと説明されている(図-5)<sup>9)</sup>。このうち、断層ガウジ、断層角礫は断層内物質 (Intrafault Material)<sup>9)</sup> と呼ばれることがある。一般に断層ガウジや断層角礫は野外の露頭やダムサイトの調査横坑等においては縞状をなし連続して分布し、全体として破碎帯を構成する。このうち、細粒な断層ガウジを主体とするゾーンを細粒粘土化帯 (Clayey Zone)、粗粒な角礫を主体とする断層角礫を主体とするゾーンを角礫化帯 (Brecciated Zone) と呼ぶことがある(図-6)<sup>2)</sup>。細粒粘土化帯は断層沿いの変位により両側の岩石が破壊、擦りつぶされることにより形成され、形成後の風化変質作用により粘土化はさらに加速される場合が多い。角礫化帯を構成する断層角礫は引きちぎられたり、延ばされたりした延性的な変形様式を示すものと、ブロック状を呈し脆性的な変形様式を示すものがあり、これは形成された環境の違いを示すものと考えられている。図-7に不攪乱で採取した断層内物質の断面スケッチを示す<sup>10)</sup>。細粒物質を主体とする細粒粘土化帯は一般に軟質で力学的にも劣るとともに、透水性が小さいことから遮水ゾーンとして地下水流動を規制することがある。また、断層内物質には断層の活動履歴そのものが記録されており、断層の活動性を検討する際に重要な情報を与えてくれる。

断層内物質に関する重要なパラメーターとしては、①破碎帯が形成された温度圧力条件を知る上で重要な破碎組織、②断層が発生してから現在に至るまでの活動の記録を示すとされる破碎物質の粒度分布、表面積、③断層が受けてきた環境変化を知るとともに、トンネル掘削な

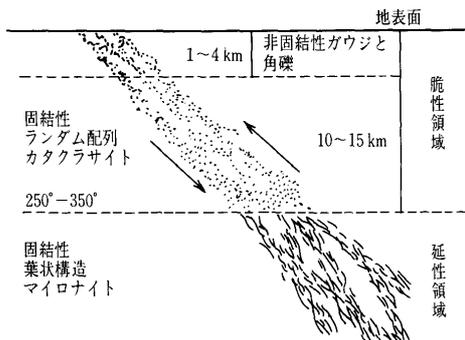


図-5 地表からの深さと破碎岩の特徴との関係

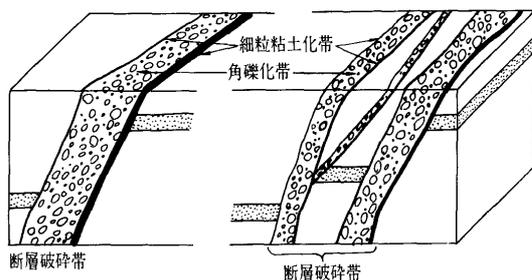


図-6 破碎帯を伴う断層の概念

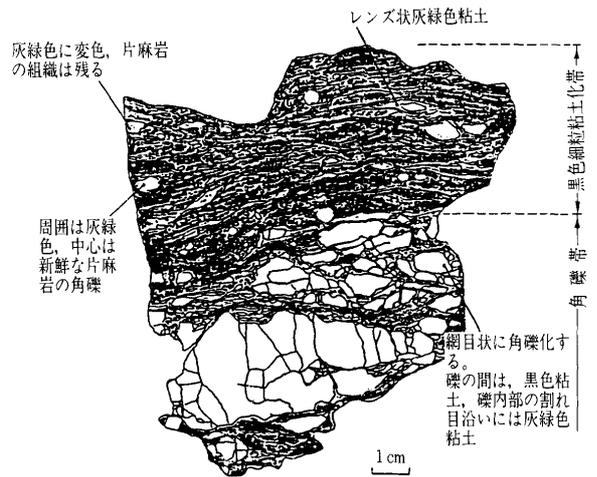


図-7 跡津川断層の断層組織

どにおいて坑道の変形や崩壊などの原因となる膨潤性の鉱物の検討に有効な粘土鉱物組成、④断層活動後の破碎帯内での物質のやり取り、地下水との相互反応などを明らかとし、物質移行の場としての破碎帯の評価に重要な化学組成等が挙げられる。

破碎帯は一般に割れ目が発達しており、周辺の岩盤に比べると低い強度、弾性係数、高い透水係数を有することが多い。このため、構造物を建設しようとする際は基礎岩盤に分布する破碎帯の工学的物性値の把握がサイトの選定や構造物の安定解析や設計等において特に重要である。これらの現地試験は破碎帯の性状を保持したままの状態で行うため、一般に大規模な供試体を使用することとなる。表-1に破碎帯の工学的性質について検討した例を示す<sup>11)</sup>。

### 5. 活動する断層について

我が国の60 km 以浅に発生する地震は断層活動により引き起こされるという考え方は、構造地質用語であった断層の動きそのものも研究の対象とした。特に、1891年の濃尾地震の後に水鳥に出現した断層崖はこの考え方を強く印象づけた。我々は地震発生箇所形成されているであろう断層(震源断層)を直接見ることはできない。しかし、断層は地表まで連続しその変位は直接見ることができる。大地震に伴い、地表に断層が現れたことが史料の上で記録されているものを地震断層と呼ぶ<sup>12)</sup>。震源における断層運動は、連続体における不連続、即ち転位の概念を導入して定式化される。地質学で用いる断層は実際に手に触れることができるものであるが、地震学で用いる断層、断層運動は違った意味で概念的である。しかし、断層運動の変位の方向や速度は地震の観測により決定することが可能である。断層の幾何学を決定するパラメーターは断層のジオメトリーで述べた走向、傾斜、すべり角である。

地表で観察する地震断層と地震を発生させた地下深部の震源断層との関係について見ると、両者が連続するものを主断層、主断層から分岐した分岐断層、明らかに主断層から一定の距離をおいて分布する副断層といった区分がなされている。

表-1 断層破砕帯の工学的諸性質一覧

岩石種	地質年代	断層・破砕帯内物質幅	粘着力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (度)	透水性 (cm/s)	変形性 (kg/cm <sup>2</sup> )	地点
砂岩, 粘板岩	中生代	粘土質 10~15cm	0.25	35	10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-4</sup>	4~10×10 <sup>3</sup>	一つ瀬 黒四 高根第一
花崗閃緑岩	中生代	粘土質 1~30cm 砂質 5~6m	2~3	30~40 40~45	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-6</sup>		
縞状チャート	古生代	角礫質 10~15m 粘土質			10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-6</sup>		
花崗岩	中生代	粘土質 9m	0.5	20	10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-5</sup>	奈川渡	
ホルンフェルス	古生代	角礫質 砂質 粘土質	0.5	20	10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-5</sup>		
砂岩	古生代	角礫質 粘土質			10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-4</sup>	水殿 喜撰山	
粘板岩, チャート	古生代	-			10 <sup>-4</sup>		

## 6. ま と め

断層についての定義や様々な分野における使われ方について解説を行った。筆者らは大学で地質学を学び、地質図作成等において多くの断層を線引きした経験を持つ。現在の職場に就いて最初に驚きととまどいを感じたのは、それまで概念として認識し、地質構造を解釈するため線図してきた断層が現場の調査横坑壁面においては軟質で細粒な物質や多くの割れ目を伴

断層は特に弱い方向の弱面が選択的に破壊する。このため、全く無傷の岩体に新たな断層が発生するのはまれであり、特定の方向に対して常に力が加わるならば、これに対応して最も弱い方向の面が繰り返し活動することとなる。我が国においては第四紀後期(数10万年前~現在)の間ほぼ一定の力が日本列島に加わっていることから、この力によって繰り返し地震が発生している可能性が高い。地質学的に最近活動し、今後も活動して地震を発生させる可能性のある断層を「活断層」と呼ぶ。活動時期については活断層研究会<sup>12)</sup>は地質年代の区切りである200万年以降に動いたとされるものを活断層と呼んだ。地質調査所<sup>13)</sup>は50万分の1「活構造図」の作成において活断層の認定基準として、「おおむね第四紀の後期に反復して活動した内因性の断層」としている。また、建設省<sup>14)</sup>は地質学的に最近とは地殻変動の起こり方やその進行速度などが現在のそれと一連であるとみなせる時代であり、我が国では第四紀の後期を指すとしたうえで、地質時代の第四紀(約200万年前~現在)に地表に変位を生じたことのある断層を「第四紀断層」と呼んだ。以上の見解を踏まえ、将来の活動の可能性といった意味を含ませるために、ここでは第四紀後期に活動した断層を「活断層」と呼ぶ。

活断層は平均変位速度と確実度により分類がなされ、評価が行われる。その結果は最終活動時期、反復性等により整理がなされ、原子力発電所やダムの立地選定および耐震設計などにおいて考慮すべき地震を発生する可能性のある断層の抽出に用いられる<sup>14),15)</sup>。

地震断層と地震との関係については既存資料から検討がなされ、地震断層の長さ(L)や変位量(D)は地震のマグニチュード(M)と対数比例の関係にあることが明らかとされている<sup>16)</sup>。

$$\log L (\text{m}) = 0.6 M - 2.9$$

$$\log D (\text{km}) = 0.6 M - 4.0$$

ただし、L:断層長、D:地震時の断層変位量

このため、この関係式を基に断層から発生する地震の規模に関する推定がなされ、実際に構造物を建設する際の耐震設計に反映されている。

い、数条の破砕帯から構成されていることであった。さらに、その実体の評価が土木の世界においては重要な検討課題となっているということであった。このとまどいこそが、現在の理学的な断層とその状態が問題とされる土木分野における断層との言葉の上での微妙なニュアンスのずれを生じている原因といっても過言ではなからう。しかし、実体としての断層を真に理解するためには、断層やそれらに伴われる破砕帯の生成メカニズム、発達史にまで立ち入る必要があるとともに、逆に理学として断層研究を進めている研究者にとっては実際に物を作るといった立場においてどのような点が重要であり、どのように設計などに反映されていくのかについても意識して研究を進めることが要請されている。

## 参 考 文 献

- 1) Bates and Jackson: Glossary of Geology (3rd ed.), 1987.
- 2) 金折裕司: 蘇る断層-テクトニクスと地震の予知-, 近未来社, 1993.
- 3) Billings, M.: Structural Geology, p. 514, Prentice-Hall Inc., 1961.
- 4) 小島圭二: 割れ目と岩盤, 地質構造の形成, 植村 武・水谷伸治郎編, 岩波講座「地球科学」, No. 9, pp. 257~277, 岩波書店, 1979.
- 5) 木村敏雄: 断層, とくに断層破砕帯の見方, 考え方, 応用地質, 22, pp. 4~16, 1981.
- 6) Ogata, S.: Activity evaluation of fault in the basement terrain, Eng. Geol. 17, pp. 30~33, 1976.
- 7) Higgins, M.: Cataclastic Rocks, Geol. Surv. Prof. Pap., 687 pp., 1971.
- 8) Sibson, H.: Fault rocks and fault mechanism, J. Geol. Soc. London, 133, pp. 191~213, 1977.
- 9) Wu, T.: Mineralogy and Physical nature of clay gouge, Pageoph, 116, pp. 655~689, 1978.
- 10) 緒方正徳・本荘静光: 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価, 応用地質, 22, pp. 67~87, 1981.
- 11) 岡本隆一・緒方正徳・小島圭二: 土木学会編, 新体系土木工学 14「土地質」, pp. 45~100, 1984.
- 12) 活断層研究会: 日本の活断層-分布図と資料, 東京大学出版会, 363p., 1990.
- 13) 地質調査所環境地質部地震地質課: 50万分の1活構造シリーズについて, 地調月報, 34, pp. 27~37, 1983.
- 14) 建設省: ダム建設における第四紀断層の調査と対応に関する指針, 1984.
- 15) 土木学会: 「原子力発電所 地質・地盤の調査法および地盤の耐震安定性の評価手法」, 1985.
- 16) 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, Ser. 2, 28, pp. 269~283, 1975.

(原稿受理 1994.10.8)