

「活断層」は一般の方には「活火山」ほどには馴染のない言葉ですが、二〇一六年四月十四日と十六日に起きた熊本地震によって俄かに流行語大賞並みのマスコミ用語になりました。「活断層」とは地震を引き起こす地中深くの断層が地表にまで線状に顔を出した地球表面の傷で、地震発生とは切り離せない密接な関係があります。地震と聞けばまずその揺れの恐ろしさが頭に浮かびますが、陸上で起きる地震の震央付近では揺れとともに断層が地表を引き裂く現象がしばしば現れます。地震の揺れによる被害に比べれば範囲は限られるものの、断層が現れた地面では人間社会の都合や土地利用などお構いなく段差・傾斜・ずれによって施設・建物・埋設物に抗し難い変形が現れます。地震の揺れや洪水・暴風などに比べて被害にはめったに会わないものの、これが原子力発電所・ダム・鉄道の重要な重要施設の安全に関わってくると大きな議論を呼び起こすこととなります。このような地面の傷は、時間間隔は数百年〜数万年と離れていても、ほぼ同じ位置で繰り返し活動してきたことも知られています。つまり、地面の様子を過去に遡って詳しく調べ、かつて地震を起こしたであろう活断層の位置を決定できれば、あらかじめ対応策を考えることもできます。

活断層の議論は大きくハザード（活断層の認定と活動性）とリスク（活断層の活動が社会に及ぼす危険性）の二種類に分けられますが、専門分野から見ると前者は主に理学が、後者は主に工学が扱っています。皆様ご存知のように、理学は自然科学の視点から現象の解明と真理の追究を目指す学問であるのに対し、工学は科学の応用と技術の開発による社会貢献を目指す学問です。このような学問の基本的スタンスの違いからか、活断層の安全性についての議論がなかなか噛み合わない場面がよく見られます。理学の立場からはハザードを徹底的に明らかにすることが基本であり、それが不十分な段階でリスクの評価はできないとの意見が聞かれます。一方、工学の見方ではハザードの正確な評価は重要ながらも、社会に役立つ技術の有用性とのバランスを認識してリスクを判断するべきとなります。このように専門家の間にも、活断層の認定、活動性の評価、対処の方法等について多様な意見が存在し、社会的にも必ずしも共通認識が確立されていない現状があります。

本書は、二〇一六年熊本地震のように陸地で起きる大きな地震には付きものの活断層について基本的理解を深め、社会の安心・安全との関わりについて考えていただくための一般読者を対象とした本です。ともすると議論のすれ違いになりがちなのこの問題について、理学・工学の両面から光を当て、活断層問題の本質を一般読者に正しく理解していただくことを目指しています。そのため関連三学会（公社）地盤工学会、（一社）日本応用地質学会、（公社）日本地震工学会）が協力して一つの委員会を設立し、気鋭の専門家を執筆者に選び、第1章〜第5章では活断層のハザード・リスクの両面について背景・基礎知識・問題点などを平易に解説しています。また、第6章では議論が先鋭化しがちな原子力発電所に関わる活断層問題に焦点を絞り、サイエンスライターが理学・工学各方面の専門家六人へ共通の設問によるインタビューを行い、意見の相違点と一致点を浮き彫りにしています。さらに

各章のつなぎには、肩ほぐしを兼ねて断層にまつわる一口話をコラムにまとめています。このような工夫を加えた本書によって、自然災害の中では比較的認知度の低かった活断層問題への認識が高まり、我が国の自然災害に対する対応能力がさらに高まっていくことを念じています。

平成二十八年八月

國生剛治

■断層問題に関する理工学合同委員会

國生 剛治 中央大学名誉教授、(公社)地盤工学会
大塚 康範 応用地質(株)顧問、(一社)日本応用地質学会
堀 宗朗 東京大学地震研究所教授、(公社)日本地震工学会
末岡 徹 (株)地圏環境テクノロジー顧問・技師長
谷 和夫 東京海洋大学教授
藤井 幸泰 (公財)深田地質研究所主任研究員

■執筆者一覧 * (ハ)は担当箇所

遠田 晋次 東北大学災害科学国際研究所教授 地震地質学(第1章)
緒方 信一 中央開発(株)ソリューションセンター地質部長 応用地質学(第2章)
粟田 泰夫 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門上級主任研究員 地震地質学(第3章)
小長井一男 横浜国立大学都市イノベーション研究院教授 地震工学(第4章)
谷 和夫 東京海洋大学学術研究院教授 岩盤工学(第5章)
向山 栄 国際航業(株)担当部長 応用地形学(コラム)
添田 孝史 サイエンスライター 主な著書「原発と大津波―警告を葬った人々」岩波新書、二〇一四年(第6章のインタビュー)

はじめに	ii
第1章 地震と活断層	1
1 内陸地殻内地震（直下型地震）	2
2 地表地震断層	7
3 活断層とは	13
4 活断層調査から地震の予測へ	20
5 まとめ	21
第2章 断層の調べ方	25
1 変動地形学調査―地表の形を調べる	26
2 地表地質踏査―野外を歩いて調べる	30
3 化学的調査―化学の力で場所や年代を調べる	34
4 トレンチ調査―掘り出して調べる	35
5 物理探査―大地に聴診器をあてる	38
6 まとめ	44
第3章 断層のずれの予測	47
1 断層のずれの複雑さ	48
2 主断層によるずれの大きさと形状の特徴	51
3 主断層と副断層・ジヨグの密接な関係	57
4 誘発される断層のずれ	63
5 断層のずれの予測と地形・地質学にまつわる不確実性	67
6 まとめ	69
第4章 地震断層が引き起こす災害	71
1 最初に揺れ、次に変形	72
2 変形の及ぶ範囲	77
3 無災害の事例、断層対策が功を奏した事例	81
4 まとめ	86
第5章 断層のずれへの備え	89
1 地面の揺れへの備えとの違い	90

第 1 章

地震と活断層

2	断層のずれへの備えの考え方	94
3	リスクの回避、低減、移転、保有の考え方	101
4	対策の事例	105
5	まとめ	112
第6章 活断層問題の考え方の多様性―原子力発電所を例に		
1	さまざまな専門をもつ有識者へのインタビュ	115
2	インタビュ―内容を振り返って	146
将来展望／おわりに		
		153

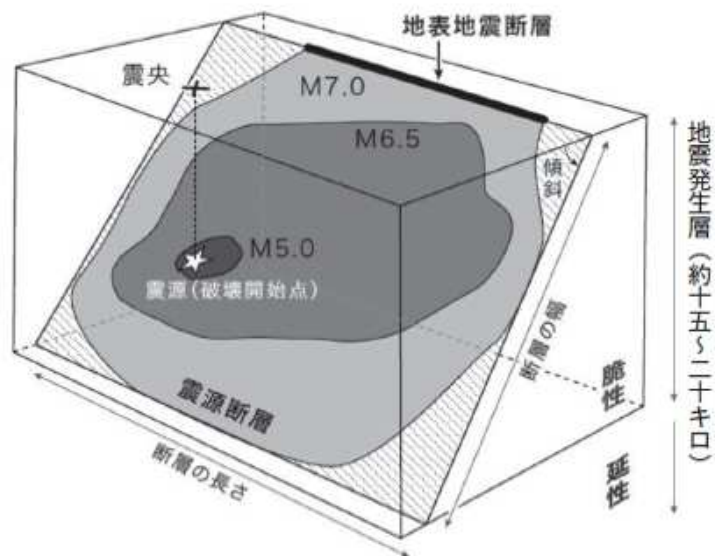


図1 震源断層と地表地震断層との関係

1 内陸地殻内地震 (直下型地震)

●地震と断層

地震とは、数十年〜数万年という長期間にわたって地殻内に蓄えられた歪みが、断層という弱い部分から一気に解放される現象です。

断層を挟んで両側にそれぞれ異なる向きの力が加わると、断層周辺の岩盤が徐々に歪みます。岩盤とはいえ、ゴムのような弾性的な性質を示します。その歪みが断層の強度に打ち勝った瞬間に岩盤が断層面を境に一気にずれ動き、溜めていた歪みが地震動として放出されます。

残念ながら地下の断層運動を直接観察することは不可能です。そのため、地震動(揺れ)の情報を使って、断層の動きを推定します。まずは地震規模であるマグニチュード(M)を求めます。Mは、震源からある一定距離で計測された地震波の最大振幅を用いて決めます。当然、地震規模が大きいと最大振幅も大きくなるため、Mは大きくなります。通常日本で用いられるのは気象庁マグニチュードで、周期五秒以下の地震動記録を用いて算出されます。

Mが1大きくなると、エネルギーは三十二倍大きくなります。Mが2大きくなると約千倍です。兵庫県南部地震(M7.3)の震源断層は、長さ約五十キロメートル、幅約二十キロメートル、平均のずれ約二メートルでした。一方で、東北地方太平洋沖地震(M9.0)は長さ約五〇〇キロメートル、幅約二〇〇キロメートル、平均のずれ約二十メートルでした。東北地方太平洋沖地震はすべてが兵庫県南部地震の約十倍なので、 $10 \times 10 \times 10$ で約千倍のエネルギー放出量となります。

このような数キロメートル〜数百キロメートルに及ぶ断層では、全体が一度に動く(ずれる)わけではありません。最初に変位(ずれ)が生じる部分を震源といいます(図1)。その後、震源から二キロメートル/秒前後の速さですれ(破壊)が断層沿いに伝わっていきます。東北地方太平洋沖地震では断層の長さが五〇〇キロメートルもあるので、断層末端にずれが及ぶまで約三分もかかりました。兵庫県南部地震ではわずか十秒程度です。ずれ動いた断層全体を震源断層といいます。

●断層のタイプ

地震波の解析によって分かるのは、断層の大きさやずれの量だけではありません。震源断層の向き(走向)や傾斜、ずれの向きも推定できます。地震波は観測点に最初に到着するP波(縦波)と後続のS波(横波)に分かれますが、

●日本列島の地震発生場
地震を引き起こすには地殻に弾性的な歪みが蓄積されなければなりません。その原動力がプレート運動です。

プレートテクトニクス理論によると、地球の表面はジグソーパズルのように十数枚の十〜百キロメートル厚のプレート（地殻と最上部マントルからなる岩石圏）によって覆われており、それらの相対運動によって物質の移動や衝突、摩擦が生じ、地震や火山活動が起こります。長期的には、山脈や海溝・海嶺などの大地形が形成されるといえるものです。このプレート間の相対運動は、双方の移動ベクトルの違いによって、収束・発散・横ずれ型の三タイプに分けられます。

日本列島は収束型のプレート境界です。ユーラシアプレートの縁辺部にあり、南からフィリピン海プレート、東から太平洋プレートが沈み込んでいます。全地球スケールの地図では、日本列島そのものが一つのプレート境界周辺の地震帯に含まれます。

日本列島とその周辺部では、これらの三つのプレートの相対運動によってプレート境界地震が発生します（図3）。千島海溝沿い、日本海溝の三陸沖から房総沖で発生する巨大地震は太平洋プレートと陸側のプレートの境界で発生します。また、相模トラフ、南海トラフ、日向灘ではフィリピン海プレートとの沈み込みに伴うプレート間地震が発生します。一九二三年大正関東地震（M7.9）、一九四四年東南海地震（M7.9）、一九四六年南海地震（M8.0）などがその例です。

断層」といいます。

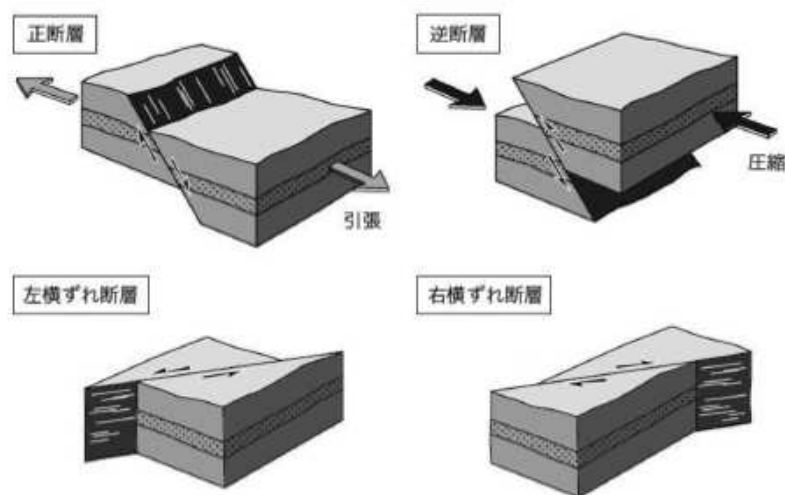


図2 断層のタイプ

P波の最初の動き（初動）に震源での断層の動きが反映されています。P波の初動を多数の観測点で調べることによって、震源での運動が推定できます。さらに、余震や地表での断層の分布、地殻変動などでも震源断層が推定されます。

そのように解明された震源断層は、断層にかかる力（応力）とそれに対応するずれの向きによって、正断層、逆断層、横ずれ断層の大きく三つに分類されます（図2）。

正断層、逆断層は岩盤のずれ動く方向はともに上ですが、正断層は地殻が水平方向に引っ張られる場合（引張場）、逆断層は圧縮される場合（圧縮場）に生じます。したがって、岩盤の水平移動に着目すると、正断層では断層を挟んで地面が引き伸ばされ、逆断層では短縮されます。横ずれ断層は、断層面を境に岩盤が水平方向にずれ動きます。断層を挟んで向かい側の岩盤が左側に移動する場合を「左横ずれ断層」、逆に右側に移動する場合を「右横ずれ断層」といいます。

●地震断層出現の仕組みと頻度
この地震発生層の下部、すなわち深さ十〜十五キロメートルあたりでは岩盤の強度が最大になり、弾性的な歪みを最も溜めています。そのような場所でひとたび大きな断層運動(ずれ)が発生すると、その動きは浅部まで伝わりやすくなります。

2 地表地震断層

●内陸地殻内地震
一方、いわゆる「直下型地震」は陸域で発生し、震源が浅いため震度7の激震域を伴うことが多く、局地的に甚大な被害をもたらします。正確には、内陸地殻内地震といえます(図3)。
内陸地震は震源の深さがそろって二十キロメートルよりも浅いことが特徴です。この深さ二十キロメートルまでを地震発生層と呼び、地殻を構成する岩石が脆性的に破壊される範囲に相当します。地下に広く分布する花崗岩に含まれる石英は三〇〇度、斜長石は約四五〇度を超えると、水飴のようにゆっくり流れはじめます(これを延性という)。この三〇〇度から四五〇度は深さ十〜十五キロメートルで到達します。二十キロメートル以上の深さでは完全に延性変形し、地震が発生しなくなるわけです。一方で、日本列島の幅は三〇〇キロメートルにも及びます。地震発生層、すなわち地殻は不安定な薄いガラス板のようなものです。

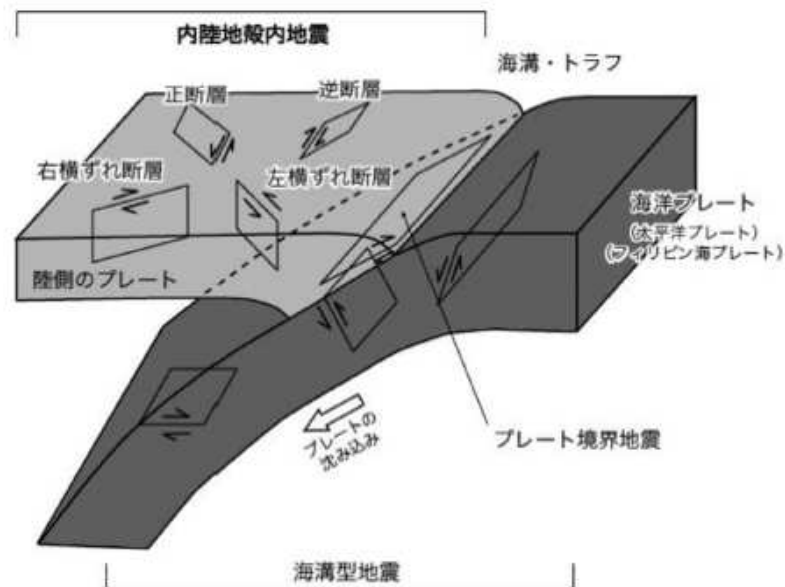
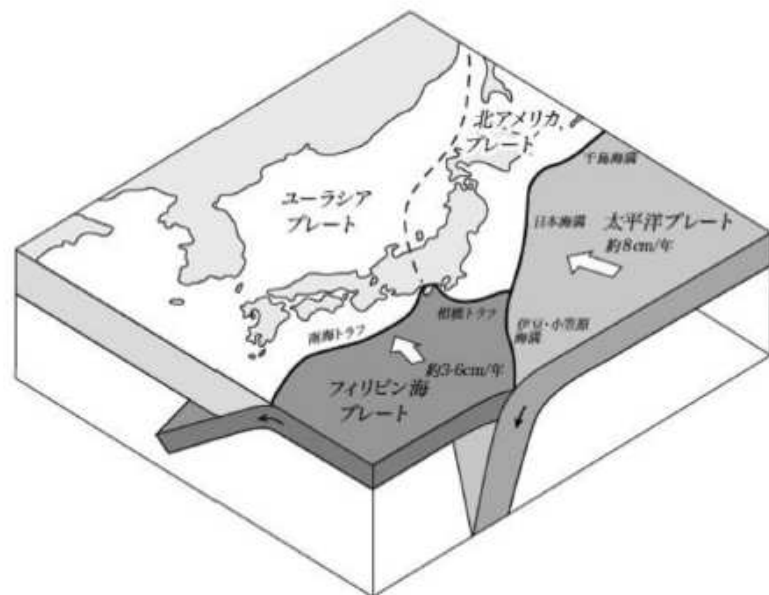


図3 日本列島を取り巻くプレートと生じる地震のタイプ

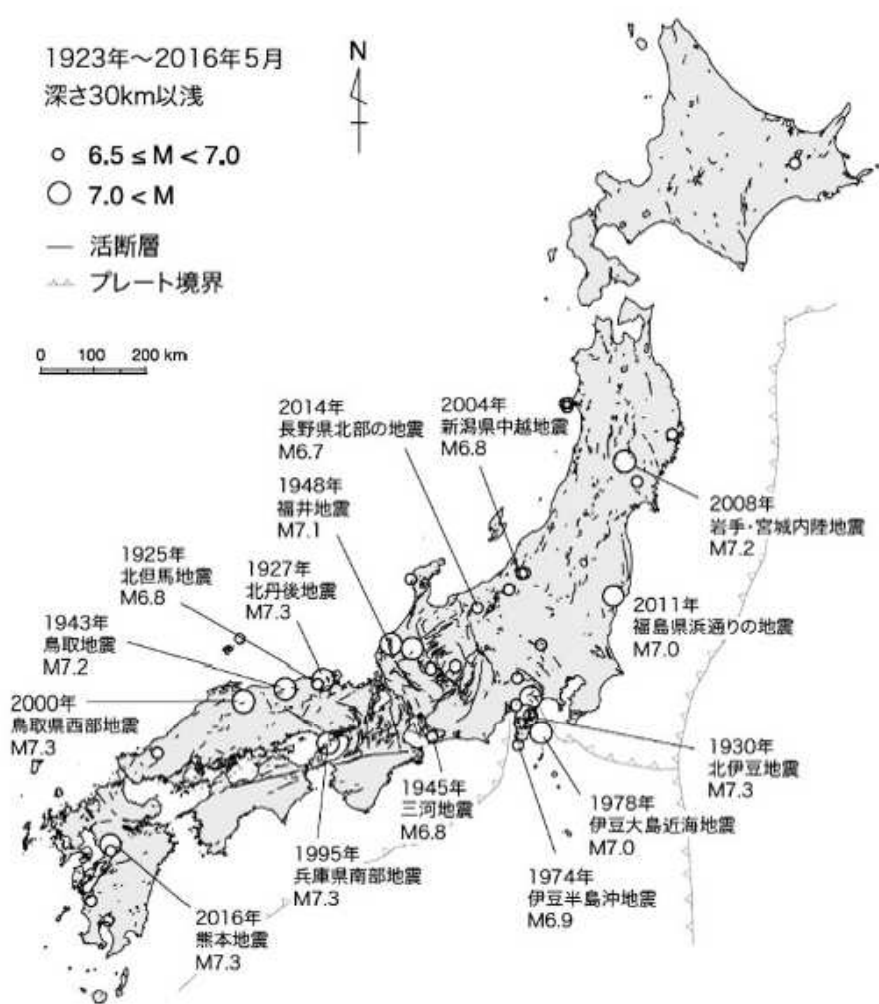


図4 M 6.5 以上の内陸地震と活断層
地震名を記したものは地震断層が出現した地震

ここで、深さ十五キロメートルで M 5.0 の地震が発生したと仮定しましょう。M 5.0 の断層の長さはせいぜい二キロメートル程度です。そのため、地表でその断層の動きを直接見ることはできません。次に、M 7.0 の地震が深さ十五キロメートルで起こったと仮定しましょう。M 7.0 の地震の震源断層の長さは二十キロメートルにもなりません。地震発生層の厚さ以上になり、震源断層とそれが地表に顔を出すこととなります。これを地表地震断層といいます（以下、地震断層）。

図4には、一九二三年以降二〇一六年五月までに陸域で発生した M 6.5 以上のすべての地震をプロットしました。三十五個の内陸地震のうち、十五個で地震断層が観察されています。したがって、M 6.5 以上で約四十パーセントとなり、M 7.0 以上では地震数十二に対して地震断層出現例は九なので、約八十パーセントとなります。ちなみに、M 7.0 以上の地震は年間に〇・一個発生するので、おおよそ十年に一度です。ですから、日本で地震断層が出現する頻度は十年弱に一度くらいということになります。

ひとことに地震断層といっても、必ずしも断層面そのものが出現するわけではありません。岩盤が直接露出しているなど条件が良いと、断層面そのものが出現し、条線（断層のずれ方向のひっかき傷）なども観察される場合がありますが、多くは数十センチメートル〜数メートルの比高の崖として出現します。崖の比高そのものが上下の食い違い（ずれ量）となります。横ずれ断層の場合は、地震断層を横切る人工物や沢などの横ずれも確認できます。また、横ずれ変位主体の断層であっても、地表での断層分布や堆積層の厚さなどによって、局所的な地面の隆起や沈降などが見られることがあります。一方で、ずれの程度と軟弱な堆積物の厚さによっては、断層が明瞭に地表を切らず、傾きや撓み（撓