

活断層調査の方法と断層活動の特徴

鈴木茂之

岡山大学 自然科学研究科 教授

〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1

1. はじめに

日本列島はアジアの大陸地殻と太平洋の海洋地殻との境界にあります。島弧をなしており、これは両地殻がぶつかり合うことによる地殻変動によって形成されたもので、現在もその活動を続けています。私たちが住む日本列島が変動帯であることを実感するのは地震とそれによる災害でしょう。刻々と発生する地震の情報は気象庁のホームページ「最新の地震活動状況」¹⁾などで知ることができます。

火山噴火は地下深部からゆっくり上昇してきたマグマによって発生します。そのため、地盤の変状観測、地下構造物理探査、火山ガスの組成変化観測などから噴火予知を行うことが出来ます。しかし地震活動には決まった予兆がないため、予知が成功した例はごく少数のようです。中国で1975年に発生した海城地震では、動物の異変な挙動や井戸の水位変動などの前兆が把握されて、発生時の避難が成功しました²⁾。しかしほとんどは前兆となる現象が認識できないうちに突然発生します。地震は地下の岩盤が破壊する際に発生します。大きく破壊すると地盤にずれができ、断層を形成します。地盤が破壊する原因が押す力だけでなく引っ張る力の場合もあります。破壊が既存の断層に沿って起こったり、新たな断層を形成したりします。地震によって地盤が破壊するしかたが多様であるため、これといった予兆があらわれないのでしょうか。現在のところ実効的な地震予知は達成されていません。

地震予知ができると効果的な避難誘導が出来

ますが、建物や人的な被害などの地震災害をどのように少なくするかは別に考える必要があります。どのくらいの確率で、どれだけの強さの地震がくるかを知る必要があります。カナダ楕状地やバルト楕状地など、安定した大陸地殻ではほとんど地震は発生しません。日本のようなプレート境界部の変動帯では地殻に蓄積された歪が活断層となって開放され地震が発生します。1995年には兵庫県南部地震が発生し野島断層が地表に現れました(図1)。活断層の研究は地震防災と直接関わって進められて来ています。ここではどのようにして活断層の調査は行われているか。また、断層活動についてどのようなことが明らかになったかを紹介します。



図1 兵庫県南部地震を発生させた野島断層。水田のずれによって山側が隆起したことがわかる。

2. 活断層調査のはじまり

地震直後に地表面に現れた活断層は、地表面のずれによって見出せますが(図1)、数百年から数千年の間はまったく動かないため、その地表の

痕跡は侵食・堆積の作用や植生によって分からなくなってしまう。しかし空中写真判読技術の向上によって、断層地形として識別できるようになってきました。その判読結果を確かめるために、そこを掘って断層を発掘するトレンチ調査が引き続いて行われるようになりました。発掘によって、さらに断層活動の運動方向などの特徴や、活動した時期の特定、活動周期も解明出来るようになりました。

(1) 断層地形の空中写真判読

断層地形の研究は 1920 年代に始まり、1950 年代からは空中写真を実体視して観察する技術が高まって大きく進展しました³⁾。空中写真は飛行機からほぼ一定間隔で地表の写真をとったもので、今では全世界の空中写真が張り合わされたものが、ネットで見る事が出来ます。立体的に地形を見るためには、同じ場所を撮影した、隣り合った 2 枚の空中写真を用意する必要があります。実体鏡を使って、左側で取った写真を左目で、右側のほうを右目でのぞくと、自分が巨人になって空から両目で地表を見ていることになります。高低差が強調されて地形の起伏が判別しやすくなります。国土地理院ではネット上に「地形判読のためのページ」をもうけています⁴⁾。断層地形は侵食や堆積による地形を切つてずらしていることから判読できます。この方法も国土地理院のホームページのなかに「活断層の見つけ方」として紹介されています⁵⁾。1975 年に地形学・地質学・地震学の専門家による活断層研究会が発足し、空中写真判読の技術を駆使した日本全国の断層地形調査が行われ、1980 年に成果として「日本の活断層」³⁾が出版されたことは画期的でした。

この頃からリニアメントという用語がポピュラーになってきます。リニアメントとはある特徴的な地形が直線的に線状模様をなすものです。断層は線状に分布しますので、活断層はリニアメントとして地形に現れます。しかし川が直線的に流れることがあって線状をなすなど、リニアメントが活断層でない場合がむしろ多いくらいです。硬

さの違う岩石の境界が直線的である場所や、古い動かなくなった断層破砕帯を侵食した地形もリニアメントを形成します。地形から活断層を判別するにはいろいろな場所の地形観察の経験と、その地盤をなす地質の知識が必要です。

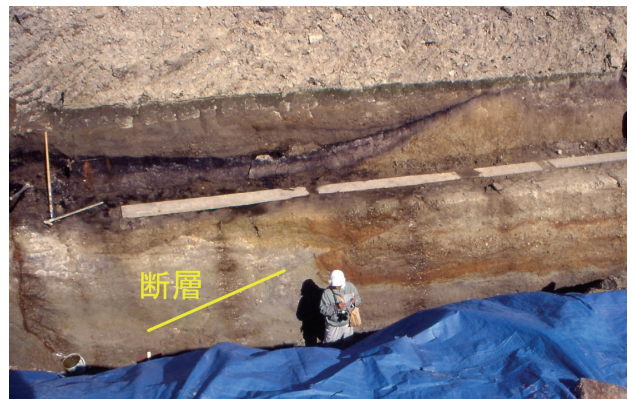


図2 トレンチ調査の例。断層は人物の直上に右上から左下に走っており、茶色い層を切っていることからわかる。

(2) 活断層トレンチ調査

地形判読は活断層の存在を推定するうえでたいへん有効な技術です。この研究の進歩によってどこに活断層があるか明らかになってきました。しかし、前述したように活動していない断層や割れ目によって、活断層であるようなリニアメントが出来るかもしれません。地表の形態だけのデータでは、そこに断層があるという、十分な証明にはなりません。活断層があることを証明するためには、断層露頭を発掘し、さらにその断層が新しい時期(10 万年前以新)に活動しているということを明らかにする必要があります。そのために開発されたのが、活断層トレンチ調査です。活断層発掘調査とも呼ばれるように、幅数 m の細長い溝を掘って断層の有無を確認します(図2)。このような取り組みはスタンフォード大学の大学院生だった Kerry Sieh が、カリフォルニアのサンアンドレアス断層を家族や友人達と人力で掘って観察したことから広まりました⁶⁾。Sieh は掘って見えるようになった断層露頭から、最近 1400 年の間に 9 回の断層イベントを見出しました⁷⁾。こ

れはその活断層の活動時期と活動間隔を明らかにした最初の研究で、活断層の危険度を考える上で極めて重要な成果でした。このような解析を行うには、発掘された断層露頭の地質学的検討が必要で、もっとも重要な作業は断層露頭スケッチです(図3)。

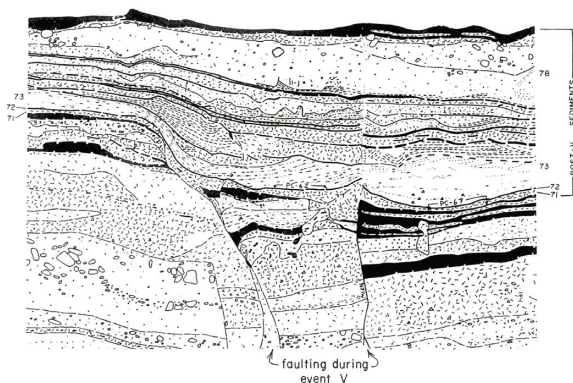


図3 Sieh(1978)⁷⁾によるサンアンドレアス断層発掘によって現れた断層露頭スケッチ。模様の種類によって地層の違いを表現している。断層が地層を切っている。断層を被い変位していない地層は断層活動後に堆積したことを示す。

日本ではトレンチ調査の取り組みが早くも1978年に始まり、その後活断層研究のみならず、原子力安全審査や地震防災のために数多く行われて来ています。

3. 活断層トレンチ調査によってわかる断層の活動様式

泥炭層は後輩湿地の植生が腐植になって出来た地層で、玉砂利からなる礫層は河川で運ばれてきた礫が河原に堆積した地層というように、地層は堆積当時の様子を物語ります。堆積物の特徴をよく観察して、どのように地層を区分するか、それがどうつながっているかを見極めることが必要です。続いて必要なのは地層の年代です。植物遺骸や貝殻など炭素を含む遺物や堆積物からは、炭素同位体年代測定によって年代値を得ることが出来ます。半減期が短いためおよそ3万年より

古い年代は測定できませんが、活動間隔が数百年から1万年の活断層が多いため、たいへん有効な年代測定法です。日本では火山活動が活発なおかげで、火山灰層も年代決定に有効です。始良 Tn テフラは 24000~25000 年前の年代を示す広域火山灰として良く知られています。鹿児島湾北部の始良カルデラが噴出源で、その周辺にシラス台地を形成したほか、分布は東北地方にまで広がっています。専門家による火山灰の鉱物組成、火山ガラスの化学組成、火山ガラスの屈折率の分析によって同定することが出来ます。阿蘇 4 テフラは 9~8 万年前の噴火によるため、炭素同位体年代測定が出来ない古い地層の年代決定に有効です。

地震防災のために、活断層の最新活動時期と活動間隔を求めます。これは地震を起こす時期が迫っている活断層を見出して、対策をとるためです。断層は周期的に活動しますが、その活動間隔は断層によって個性があります。そのためそれぞれの断層において調査する必要があります。図4は最新の断層活動時期を推定する方法を模式的に示したものです。

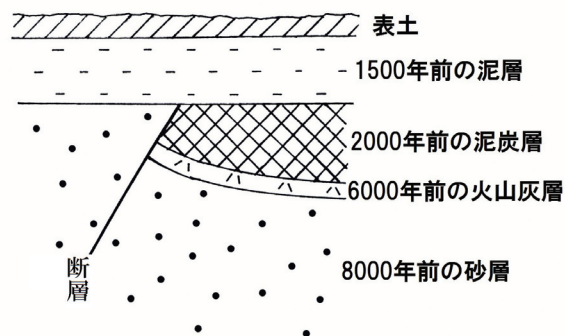


図4 断層の最新活動を推定する方法。断層がどの地層までを切っているかを判別する。

図4の断層は8000年前、6000年前、2000年前の地層を切っていますが、1500年前の地層を切っておらず、被われています。断層の活動は2000年前の地層が堆積した後、1500年前の地層が堆積する前におこったことがわかります。断層の先端がいつの年代の地層に被われているか見出すこ

とによって、その断層の最新活動年代を知ることが出来ます。

続いて防災上知りたいのは、いつごろ断層が活動するかということです。そのためには何年おきに活動しているかを求める必要があります。図5のような断層露頭は、活断層トレンチでよく認められます。このような分岐した断層によって活動間隔を得ることが出来ます。断層が分岐していることから、断層の本体（深い部分）は繰り返し活動していて、新しい活動ごとに末端部（浅い部分）が分岐して伸びていくことを示しています。図5中の地層の年代が、たとえばA層；1500年前、B層；2000年前、C層；6000年前、D層；8000年前、E層9000年前、F層；1万年前、G層1万5千年前とすると、断層①は1500～2000年前、断層②は8000～9000年前の活動となり、およそ6000～7500年の間隔があることが分かります。またたとえば、1万年の間に5回の断層イベントがあることがわかれば、約2000年おきに活動しているということがわかります。

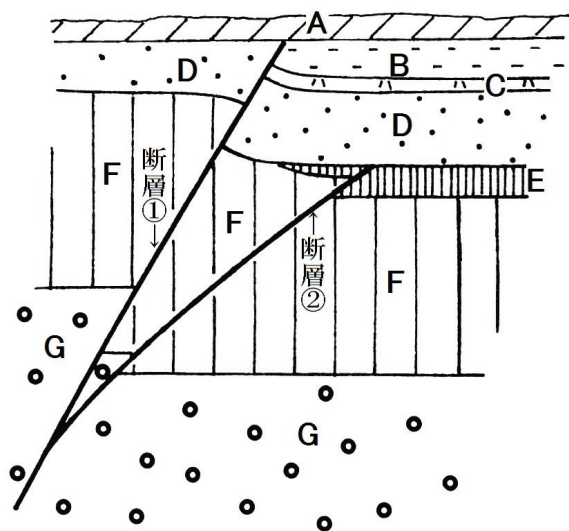


図5 断層が繰り返し活動する様子を模式的に示した図。断層は分岐しながら繰り返し活動している。

伊豆半島の付け根を南北に走る丹那断層は、ちょうどそこを東海道本線のトンネルを工事していた1930年に活動しました。貫通したばかりの

トンネルは食い違って塞がってしまい、断層周辺を掘りなおすことになりました。この活断層は2回のトレンチ調査によって、およそ6300年の間に9回断層活動があったことから、およそ700年ごとに活動することがわかりました⁸⁾。丹那断層は活断層のなかでは活動間隔が短いものです。新幹線で丹那トンネルを抜ける時は、丹那断層が動かないか心配になりますが、最新の活動が約80年前で、活動間隔がおよそ700年ですので、すぐに活動する可能性は低いと考えられます。

4. 活断層トレンチ調査の流れ

Siehが行った初めてでかつ大規模な活断層トレンチ調査には、十分な研究費がなかったそうですが、家族や友人の協力によって達成することができました。効率良くトレンチ調査を行うには、掘削に重機を利用したり、土地を調査中借りたりするなど、相応の金額の予算とマネージメントの労力が必要です。そのためトレンチ調査は熟達した専門家からなる地質コンサルタント会社が請け負い主力となって行っています。発注者は活断層を学術的に研究している研究機関、防災を担当する自治体、活断層の危険度を得る必要がある電力会社などです。以下のような工程で調査が行われます。

① 発掘地点の決定：大スケールの空中写真を用いた判読によって、断層地形を精査します。発掘地点は沖積層や火山灰層などの新しい地層が被覆する場所が、図5の例でしめしたように活動履歴を得るのに有利です。候補地周辺を精密に地表地質調査し、断層位置をより詳しく検討し発掘地点を決定します。掘削が可能な場所であるかどうかあわせて確認します。

② 調査地の利用許可を得るなど掘削準備：沖積層堆積場が有効なため、水田が発掘地になるケースが多くあります。所有者と交渉して調査の間その土地を借ります。重機の搬入路の確保なども重要です。掘削前にボーリング調査や物理探査を行って、より確かな地点を絞り込む作業を行うこ

ともあります。

③ トレンチ掘削：活断層が現れるかどうか緊張する作業です。熟達した地形判読者によっても位置がずれていることがあります。出ない場合は掘削をどの方向に移動するかなどの判断が必要です。礫質な地層であれば断層面は不明瞭になり判別できないことがあります。断層面以外の断層変位を示す変状も確認します。

④ トレンチ発掘露頭の詳細スケッチ（活断層露頭スケッチ）：大スケールで正確なスケッチを行います。写真撮影では正確な形を記録することができますが、それだけでは地層の構成物が何であるかを記録することが出来ません。また色調が同じであるために、写真では泥と火山灰の違いを区別できず、地層境界や断層面が見えないことがよくあります。スケッチの場合、堆積物が何で出来ているか（礫や砂などの碎屑物か有機物、火山灰など）、碎屑物のサイズ（礫サイズから粘土サイズ）、それらのサイズの淘汰度（淘汰度の良い、サイズの揃ったものは水流などによる篩い分けの影響を受けている）などをもとに地層を識別し追跡します。断層はその地層を切るものです。後から堆積した地層が前の地層を侵食して切ることがよくありますので、その判定ができないといけません。スケッチ作成者には高度な地質学的能力が要求されます。

⑤ 年代測定用試料の採取および分析：断層の活動時期を知るためには上述したように地層の年代を知る必要があります。断層を被う地層や断層に切られた地層を選びます。その中で有機物が多い部分や植物遺骸を選んで採取します。採取した試料は専門の分析会社あるいは専門の研究者に依頼します。活断層露頭の地層剥ぎ取り標本をとることもあります。

⑥ 断層活動履歴の総合解析：活断層露頭スケッチと得られた地層の年代値によって最新の活動年代、活動間隔、変位する方向、変位量などを出来るだけ明らかにします。場所によって地形的環境が違えば、被覆する堆積層に違いがありますの

で、一つの活断層に対して数箇所の発掘調査が望まれます。これらのデータによっていつごろ断層活動が再来するかなど、この活断層にどう身構えるか検討されます。

⑦ トレンチ調査の後片付け、報告書提出：掘削したトレンチを埋め戻し、原状に戻します。活断層露頭を保存するために博物館が建設される場合もあります。総合解析結果を柱とする、空中写真判読図、活断層露頭スケッチ、試料分析結果などを含む報告書一式を発注者に提出します。

4. 地震の強さの予測

地震防災上、どのくらい強い地震が発生するかという予測は重要です。地震の強さは、個々の活断層によって違いますが、活断層の長さによっておおよそ推測することが出来ます。大きいエネルギーを発生する、すなわちより強い地震を発生する断層ほど、破壊が大きく、断層も長くなるという関係が得られています⁹⁾。この断層の長さは地震断層が地表に現れた部分の長さです。規模の小さい断層は地表にまで達しません。地表を変位させ断層地形をなすのは、おおよそマグニチュード7以上の規模の断層のようです。日本全国の活断層の長さは「新編日本の活断層」¹⁰⁾に掲載されています。これは空中写真判読によって求められたものです。原子力安全審査では、断層の長さはたいへん重要で、空中写真判読に加えて、地表地質調査とトレンチ調査に基づいた詳細な検討が求められています。

5. 活断層調査の現状

神戸を中心に大被害をもたらした「1995年兵庫県南部地震」は活断層調査を全国に広げました。これによって日本全国の活断層の発生確率や発生する地震の強さの予測がなされました。政府も地震調査研究推進本部¹¹⁾をもうけて地震防災の研究が推進されています。しかし宮城県沖でのプレート境界断層が活動する可能性が大きいことは予測されていましたが、発生した「2011年東北

地方太平洋沖地震」の規模がマグニチュード9に達したことは、予測を越えていました。個々の事例にまで検討を深めていくと、専門家内でも活断層かどうか見解が一致しないことがあります。明瞭な証拠が見つからず、判定が困難な断層も残されています。活断層研究が始まって40年程度、本格的に活断層発掘調査が行われるようになって30年ほどしか経っていませんので、さらに発展させなければならない分野でしょう。地形の判読から野外地質調査・断層露頭スケッチができる能力を持った若手をたくさん育てる必要があります。このようなスキルを磨くには実地での長い訓練が必要です。しかし調査に時間がかかり論文を短時間に多数書けないためか、野外地質調査を行っている研究室は激減しています。今後の地震防災を進めるうえでこの現状は深刻でしょう。

6. 謝辞

この小論の内容の大半は地質コンサルタント会社の活断層専門家の方々からのご教示に基づいています。ここに謝辞を申し上げる次第です。また講演を勧めて下さった岡山大学教授西垣誠先生と講演や原稿編集などでお世話をしてくださった岡山大学環境管理センターの皆さんには厚くお礼申し上げます。

7. 引用文献

- 1) 気象庁；<http://www.seisvol.kishou.go.jp/>
- 2) 蔣凡編著，力武常次監修，杉充胤訳「海城地震—予知成功のレポート」共立出版，149p，1979年
- 3) 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，1980年
- 4) 国土地理院；http://www1.gsi.go.jp/geowww/Photo_reading/handoku2.html
- 5) 国土地理院；<http://www1.gsi.go.jp/geowww/bousai/about-activefault.html>
- 6) 松田時彦，「丹那断層を掘るまでの話」，月刊地球，第6巻，第3号，1984年，165-170頁
- 7) Sieh, K. E., “Pre-historic large earthquakes produced by slip on the San Andreas Fault at Pallet Creek, California”. Jour. Geophys. Res., 83, B8, 3907-3939 (1978)
- 8) 東郷正美「1982年丹那断層（名賀地区）トレンチ調査」，活断層研究，第3号，1986年，44-51
- 9) 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，第28巻，1975年，269-283
- 10) 活断層研究会「新編日本の活断層—分布図と資料—」，東京大学出版会，437p，1991年
- 11) 地震調査研究推進本部 <http://www.jishin.go.jp>