

## 地震発生長期予測のための地形学／地質学的活断層研究の新展開

## Geomorphological/Geological Challenge to the Long-term Seismic Hazard Evaluation of Active Faults

鈴木 康 弘 (すずき やすひろ)  
愛知県立大学助教授 情報科学部地域情報科学科

中 田 高 (なかつ たかし)  
広島大学教授 文学部地理学教室

島 崎 邦 彦 (しまざき くにひこ)  
東京大学教授 地震研究所

## 1. はじめに

「活断層にどう対処するか」という問題に答を出すためには、個々の活断層が発生させる、①地震の規模や、②地震動の特徴、および③今後の地震発生可能性に関する正確な情報が求められることは言うまでもない。しかしながら、現状におけるこれらの推定は、断層の長さ( $L$ )と地震規模( $M$ )、および地震時の変位量( $d$ )と $M$ の間の経験式<sup>1)</sup>と、「一つの活断層が起こす地震の規模と間隔は固有である」という、いわゆる固有地震説(階段モデル)に基づくものであり、概略的な予測にとどまっているのが現状である。地盤の安定性の検討にとっても、それらの推定精度の向上は最優先の課題であろう。

活断層は過去の直下地震の際に地表に現れた地震断層の化石であり、トレンチ調査等の地層掘削調査によって活断層の活動履歴を知り、それによって将来を予測しようという研究が精力的に行われていることは周知のとおりである。しかし、このような調査の目的については必ずしも正しく理解されておらず、ともすれば過去の地震活動の「時期」を知ることにだけに注目が集まっている。トレンチ調査からは、単に断層活動時期だけでなく、断層変位量や変位様式等、過去の地震の具体的な特徴に関する多くの情報を読みとることができる。さらに、活断層の地表におけるトレースの性状や、変位地形の特徴など、掘らなくても把握できる地形学的な特徴からも、そこで発生する地震の特徴を知ることができる。

地震被害軽減策の適正な設計に向けて、地震発生予測を高度化させるための地形学／地質学的研究の動向を紹介する。

## 2. 静的モデルから動的モデルへ

従来の活断層研究は、断層の平面分布という二次元の静的な断層像を提示した<sup>2)</sup>。これに対し、①断層の立体構造を明らかにすることで三次元情報にすること、さらに、②地震時においてどのような変位が起きるかという、いわば動的なモデルを提示しようという研究が進められている。これらの情報が、内陸地震の発生機構の解明や強震動の予測にとって重要な意味を持つためである。

## 2.1 断層の立体構造の推定

いわゆる極浅層・浅層・大深度等をターゲットとした反射法地震探査によって、活断層の地下構造を調べる研究が進められている。それらの多くは、兵庫県南部地震以降に、おもに伏在断層の存否を確認する目的で実施された<sup>3)~6)</sup>。神戸や西宮の市街地においては、地形学的に推定された活撓曲<sup>7), 8)</sup>が追認され、その基部に逆断層が存在することが確認されたことは、地震防災にとって重要な知見である。

また、地表部において複数の活断層として認定されるものが、地下においては合流しているか否かなど、断層帯を構成する複数の断層相互の関係を調べる目的で実施された例<sup>9)</sup>もある。合流しているとすれば、地震発生予測の結論は大きく変わり得るため、これは重要なデータである。

さらに、最近数十万年間の活断層の発達過程 (evolution) を明らかにすることによって、内陸地震の発生機構そのものを明らかにしようという研究も進められている<sup>10)</sup>。ここでは個々の研究成果を紹介することはしないが、断層の立体構造は、強震動予測等に重要な情報を提示することは間違いない。

## 2.2 地震時変位量分布の推定

従来、断層モデルは、スリップ量一定の矩形なものとして与えられてきた。しかしながら、地震時の断層変位量は断層面上で一様ではなく、断層線に沿う変位量分布は、一般に中央部付近で大きく末端に向かって小さくなる傾向が認められる。このような地震発生時における地震断層の変位量分布 (=地震時変位量分布) をあらかじめ予測することができれば、動的モデルに一步近づくことができると考えられる。

一般に、地震時変位量分布は、活断層の累積的な変位量分布と相関がある。地表地震断層はおおむね既存の活断層の断層線と一致して出現し、一地点における地震時変位量は、地震の度に多少の変動はあるものの、地震時変位量分布と累積的な変位量分布とはほぼ同様の傾向を持つ。このことは、活断層の地震時における挙動が長期的にはほぼ一定であることを示している。なお、ここに言う「累積的な変位量分布」とは、形成年代が既知の地形面や地層に生じている累積変位量をそれらの形成年代で

割った値 (=平均変位速度) とすることが最も適当である。

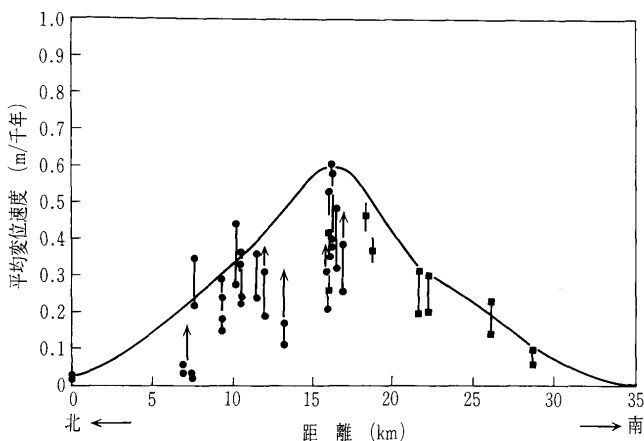
地震時変位量分布を直接明らかにするためには、活断層に沿ってトレンチ調査を少なくとも十箇所程度は行わないといけない。それに対し、平均変位速度については、断層線に沿って綿密な地形調査を行い、変位地形の断面測量をすることによって求めることができ、断層線に沿って連続的な情報を得やすい。

鈴鹿東縁断層を例に、平均変位速度の分布を図一1に示す<sup>11)</sup>。これを得るために、地形測量と大深度反射法地震探査とトレンチ調査とを併用している。その手順は、①地形調査によって断層変位の鉛直成分を計測し、②鉛直平均変位速度の分布図を作成。③大深度反射法地震探査によって断層面の傾きを推定し、④断層面上に沿う実際 (net) の変位速度を計算した (断層面が30度~60度であるため、見かけの鉛直変位のみでは過小評価になる)。さらに、この断層沿いのある地点で行われたトレンチ調査の結果、最新活動時に少なくとも1.2 mのずれが起きたことが確認されている<sup>9)</sup>。この値は、実際には平均変位速度分布のグラフのうちで、ピーク付近で今回は得られているが、このように、地震時変位量の実測値が平均変位速度の分布形のうち、どこで得られたかを考慮することによって、地震時変位量の分布形状を最終的に予測することができる。今後、さらに数地点において掘削調査を行って、地震時変位量が予測どおりかどうか検証すれば精度向上が図れる。

こうして地震時の変位量分布がわかれば、アスペリティやバリアの位置を推定することが可能になる。また、地表付近の変位量が深部での断層変位量と同様であると仮定した場合、地震規模をモーメントで評価することも可能になる。この仮定については別途検討を要するが、このような推定法が将来的に確立されれば、従来の経験式に依る推定を脱却することが可能になるものと思われる。

### 2.3 破壊開始点と伝播方向の推定

前述の検討から、震源断層像がこれまでよりも具体的に推定可能となる。これに加えて、破壊がどこから始まり、どのように伝播するかがわかれば、地震発生段階



図一1 鈴鹿東縁断層の平均変位速度分布<sup>11)</sup>

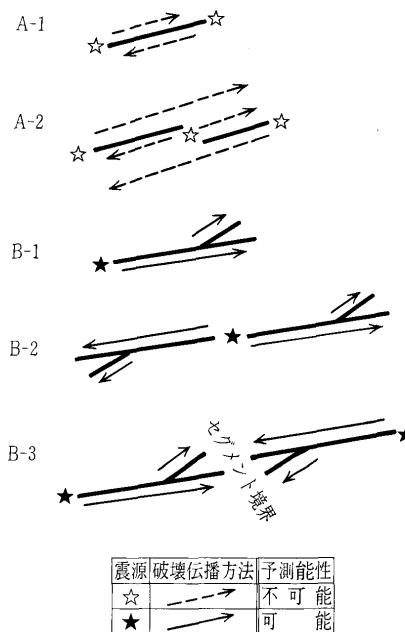
(十数秒間)におけるさらに動的な(瞬間的な)断層モデルを提示することができる。断層伝播方向については、地震動特性と密接に結びつくことから、これがわかれば、被害予測に極めて重要な情報を提示することになる。

これらを推定する方法論が最近議論されている<sup>12),13)</sup>。それによれば、断層線は破壊の結果できた一種の「割れ目」であり、割れ目がどのように進展するかを考察すれば、自ずと断層破壊伝播方向はわかるという(図一2)。

すなわち、割れ目の形状としてとくに注目すべきはY字型もしくはV字型の割れ目の分岐であり、このような分岐が生じるためには、断層線が分岐する方向に断層破壊が進展する必要がある。そのような単純な発想に基づいて、震源が比較的良好にわかっている近年の地震時における地震断層の分岐形状を見直すと、分岐方向と破壊伝播方向は明らかに一致している。

活断層は地震断層を起源としていることから、当然、同様の原理が適用できる。しかも、活断層にこのような分岐形状が認められるということは、(破壊がYやV字形状を無視して逆に伝わることは考えにくいことから)破壊方向が地震時に一定していることを意味している。したがって明らかな分岐形状をもつ活断層については、破壊伝播方向や破壊開始点を予測することができる可能性が高い。(図一2において、A-1, A-2は、このような分岐形状が無いために、破壊開始点として複数の候補が考えられ判断できない例である。一方、B-1, B-2は、分岐形状に注目して破壊開始点が1箇所が決まる例であり、B-3は、破壊開始点が2箇所あって別々のセグメントに分かれていることが読みとれる例である。)

「日本の活断層(東大出版会)」をベースにした検討は一応行いつつあるが、これまでの調査では、断層線の分岐形状などの詳細は必ずしも明確にされていないため、破壊伝播を精度良く予測するためには、データベースそ



図一2 断層線の分岐形状と破壊開始点・破壊伝播方向<sup>13)</sup>

のもののバージョンアップが必要である。このため、活断層の見直し作業が急ピッチで進められており、活断層の詳細情報の GIS 化も検討されている。

### 3. 地震発生モデルの高度化と確率評価

#### 3.1 リカレンスモデルの検証

すべての活断層に対して固有地震説が成り立つか否かは難しい問題である。とくに、多くの断層線が近接して併走する断層帯や、セグメンテーションを伴う長大な断層系については議論が多い<sup>14)</sup>。また、比較的単純なトレースをもつ活断層についても、発生間隔がばらついている例が多い。このような不規則性をどのように理解すべきであろうか。

リカレンスモデル (図-3) としてはこれまでに、(a) 周期的モデル、(b) 時間予測モデル、(c) ずれの量子予測モデルが提示されている<sup>15),16)</sup>。周期的モデルは、変位量と間隔がいつも一定とするもので、実際に成り立つ例は少ない。時間予測モデルは、「地震は応力が一定の限界に達したときに起こり、地震の発生間隔は先行する地震を起こした断層の変位量に比例する」とするモデルである。これに対し、ずれの量子予測モデルは、「地震発生時の応力ではなく、地震後の残留応力が一定であり、地震後の経過時間の長さがその後起こる地震断層の変位量に比例する」と考える。これらのモデルのどれが正しいかは、今のところ陸域の地震では十分に検証されていないが、中田・島崎<sup>17)</sup>は、別府湾の海底断層の調査結果から、時間予測モデルが有力であるとしている。

トレンチ調査によって、過去の地震の時期のみでなく変位量を明らかにすることによって、このモデルを検証することができれば、最新活動の際の変位量という情報によって、地震発生予測の精度を向上させることが可能になる。

ところで、地層の断面から過去の活動時における変位量を明らかにすることは、種々の理由であり容易ではなく、読みとれるかどうかは断面の性格によることが多い。そのため、多くの地層断面を観察する必要がある。限られた調査範囲において多くの断面を観察するためには、トレンチ調査は有効ではないため、新たな方法として、地層を棒状あるいは板状に引き抜いて観察するという新技術 (geo-slicer) が開発されている<sup>18,19)</sup>。このような調査方法の開発・改良も重要な研究テーマである。

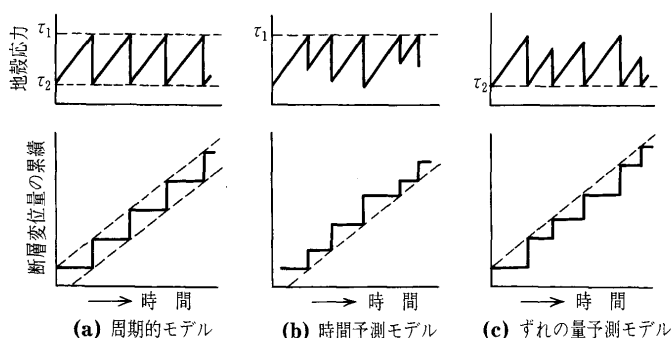


図-3 地震のリカレンスモデル<sup>15)</sup>

#### 3.2 確率評価

1996年に総理府の地震調査研究推進本部地震調査委員会は、糸魚川-静岡構造線活断層系 (糸静線) について、「今後数百年以内に M8 規模の地震が発生する可能性が高い」との見解を発表した<sup>20)</sup>。その根拠は、地質調査所が提出した「少なくとも松本付近の糸静線は最近数千年間にはほぼ千年間隔で地震を繰り返しているが、最新活動からすでに1200年以上経っている可能性が高い」というもの<sup>21)</sup>であった。「千年間隔」と評価されても、従来の例からみると0.5~1.5倍くらいのはらつきはあり得るとの判断から、地震発生時期については「今後数百年以内」という表現になっている。

このような例で見ると、決定論的に表現する限り、現状における長期評価は数百年というタイムスパンでの評価にならざるを得ないが、これに対しては社会的な時間感覚との乖離が問題にされ、地震防災上はあくまで今後数十年間というスパンで、確率論的な表現を使うことが重要であることが指摘された<sup>22)</sup>。

こうした状況を受け、地震調査委員会の下に長期確率評価手法検討委員会が設置され、活断層が引き起こす地震について、確率論的な発生予測を行う指針が示された<sup>23)</sup>。このような研究は以前にもあった<sup>24),25)</sup>が、活断層ごとの活動履歴の判明具合に応じた適正な確率評価方法をまとめていること、およびその事例を多く紹介していることに特徴がある。上述の時間予測モデルに即した計算法も示されている。これによれば、すべての活断層について (精度には問題があるが) 一応の確率評価ができる。

Suzuki and Matsuo<sup>24)</sup>は、ある断層が起こす地震について、設計すべき構造物の耐用年数に相当する地震発生確率を算定した後、地震動の大きさを予測し、地震動期待値という形式で表現することを提唱した。従来から検討されているプレート境界型地震による期待値と比較することによって、新たな設計法ができる可能性を示唆している。確率評価結果が公表された場合、それをどのように地震工学に適用するかが今後の課題である。

### 4. 課題と現状

ここに紹介した先端的研究は、いまだ検討段階である。いずれも地震災害軽減に不可欠な、強震動予測のための重要な基礎資料となることが期待され、平成11年度からの新たな地震予知研究計画の中でもその方向性が示されている<sup>26)</sup>。今後重要なことは、多くの事例を積み上げながら、実用に向けて予測精度を詰めることであろう。

現状において、断層の動的モデルを地震前に予測する方法は少なく、地表付近における活断層の変位量や、その平面形状および立体構造に依存せざるを得ない。しかし一方で、そのような地表付近の現象と地下深部での現象が違うのではないかと、という疑問や批判は避けられない。地表と地下深部とでどのような違いがあるかを検討し、その違いを生じるメカニズムが検討できれば、さらに精度の高い予測が実現可能になると思われる。これ

については、地形学や地質学の方法論の適用できない領域であり、岩石力学や土質力学、地盤工学、地球物理学等、関連分野との連携が望まれる。

地盤工学会から、本稿において紹介することを依頼された内容は、「活断層と地盤」に関連した「地質学から活断層へのアプローチ」である。しかしながら、平均変位速度や断層のトレース形状の検討、さらには活断層の分布調査は主に地形学に立脚している。本稿に述べたような方向性で今後の活断層調査が行われるようになるとすれば、民間調査機関等への地形学的調査手法の技術移転が急務である。

#### 参 考 文 献

- 1) 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2, Vol. 28, pp. 369~383, 1975.
- 2) 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，448 p., 1991.
- 3) 兵庫県立人と自然の博物館：阪神・淡路大震災と六甲変動，106 p., 1997.
- 4) 神戸市：阪神・淡路大震災と神戸の地盤・活断層，33 p., 1998.
- 5) 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・卜部厚志・阿蘇弘生・是石康則・江尻寿延：兵庫県芦屋市における芦屋川測線の反射法地震探査，地質調査所月報，Vol. 47, pp. 79~94, 1996.
- 6) 杉山雄一・寒川 旭：大阪平野に伏在する上町断層の反射法弾性波探査，平成7年度活断層調査概要報告書，工業技術院地質調査所，pp. 57~62, 1996.
- 7) 鈴木康弘・渡辺満久・吾妻 崇・岡田篤正：六甲-淡路活断層系と1995年兵庫県南部地震の地震断層—変動地形学的・古地震学的研究と課題—，地理学評論，Vol. 69, pp. 469~482, 1996.
- 8) 渡辺満久・鈴木康弘・岡田篤正：神戸・芦屋・西宮市街地の活断層と兵庫県南部地震に伴う震災の帯，地形，18, pp. 223~232, 1997.
- 9) 三重県活断層調査委員会：鈴鹿東縁断層の構造と古地震活動，地球惑星合同大会予稿集，p. 53, 1997.
- 10) 佐藤比呂志・今泉俊文・池田安隆・三ヶ田均・C. Orgren・戸田 茂・堤 浩之・越谷 信・野田 堅・東郷正美・伊藤谷生・宮内崇裕・河村知徳・鈴木啓文・石丸恒存・酒井隆太郎・杉山 登・井川 猛：Evolution of the active Senya fault, northern Honshu, Japan, 日本地震学会講演予稿集，1997-No. 2, p. 117, 1997.
- 11) 鈴木康弘・三重県活断層調査委員会ほか・大学合同変動地形測量グループ：変位速度分布とモーメントマグニチュードによる鈴鹿東縁断層帯の評価，地球惑星合同大会予稿集，p. 53, 1997.
- 12) Shimazaki, K., T. Nakata and Y. Suzuki: Branching Fault Trace as an Indicator of Rupture Propagation, Proceedings of AGU, 1997.
- 13) 中田 高・島崎邦彦・鈴木康弘・佃 栄吉：活断層はどこから割れ始めるのか？—活断層の分岐形状と破壊伝播方向—，地学雑誌，Vol. 107, pp. 512~528, 1998.
- 14) 松田時彦：活断層からの長期地震予測の現状—糸魚川—静岡構造線活断層系を例にして—，地震2, Vol. 50, 別冊，pp. 23~33, 1998.
- 15) Shimazaki, K. and T. Nakata: Time-predictable recurrence model for large earthquakes, Geophys. Res. Lett., Vol. 7, pp. 279~282, 1980.
- 16) 島崎邦彦：講座 地震発生のメカニズムと予測 4. 繰り返す地震，土と基礎，Vol. 46, No. 2, pp. 51~56, 1998.
- 17) 中田 高・島崎邦彦：海底の地震の巣を探る，科学，Vol. 62, pp. 593~599, 1993.
- 18) 中田 高・島崎邦彦：活断層研究のための地層抜き取り装置 (Geo-slicer)，地学雑誌，Vol. 106, pp. 59~69, 1997.
- 19) 原口 強・島崎邦彦・小島圭二・中田 高：地層抜き取り装置による軟弱地盤における定方位連続地層採取方法，土と基礎，Vol. 46, No. 2, pp. 24~26, 1998.
- 20) 地震調査研究推進本部：糸魚川—静岡構造線活断層系の調査結果と評価について，地震調査委員会報告集—1995年7月~1996年12月—，pp. 501~510, 1997.
- 21) 奥村晃史・井村隆介・今泉俊文・東郷正美・澤 祥・水野清秀・荻谷愛彦・齊藤英二：糸魚川—静岡構造線活断層系北部の最近の断層活動—神城・松本盆地東縁断層トレンチ発掘調査—，地震2, Vol. 50, 別冊，pp. 35~51, 1998.
- 22) 廣井 脩：長期評価をどう受け取るか，国際ワークショップ「長期的な大地震の活動を探る—防災への活用—」予稿集，pp. 60~61, 1997.
- 23) 地震調査研究推進本部：(試案) 長期的な地震発生確率の評価手法及びその適用例について (地震調査委員会報告)，71 p., 1998.
- 24) Suzuki, Y. and M. Matsuo: A probabilistic estimation of the expected acceleration of earthquake motion by inland active faults and its application to earthquake engineering, "Application of Statistics and Probability—Civil Engineering Reliability and Risk Analysis", M. Lemaire et al. Eds., (Balkema Press), pp. 635~641, 1995.
- 25) 隈元 崇：活断層のトレンチ調査結果を用いて推定した日本の内陸地震の長期危険度評価，地震2, Vol. 50, 別冊，pp. 53~71, 1998.
- 26) 活断層研究グループ・中田 高・島崎邦彦・鈴木康弘・佐藤比呂志・隈元 崇：活断層研究にもとづく大地震発生モデル，月刊地球，号外，No. 20, pp. 136~141, 1998.  
(原稿受理 1998.9.7)