

活断層調査の現状と地震防災への適用の展望

杉山 雄一

工業技術院地質調査所 地震地質部 (〒305 茨城県つくば市東1丁目1-3)

活断層調査の成果を地震防災に有効に適用するための課題として、次の諸点が指摘できる。地震の発生場所予測との関連では、大縮尺詳細活断層図の作成・公開の促進が必要である。発生時期の予測、即ち危険度評価については、ゆらぎの統計的評価を含む再来間隔の高精度化と確率論的な評価の導入により、危険度評価に対する地震防災関係者の信頼を得ることが不可欠である。また、合理的で信頼性の高い地震規模予測のためには、破壊のセグメント、単位変位量、地震モーメントに基づき、連動、続発等の多様な破壊様式を取り込んだ確率論的な地震規模予測を推進する必要がある。これらに加え、今後、動的断層パラメータ取得へ向けた取り組み、活断層分野と防災関連分野との交流・相互フィードバックを促進する必要がある。

Key Words : *active fault, characteristic earthquake, earthquake potential, fault displacement, segment, paleoseismology, probabilistic assessment, recurrence interval, seismic hazard, strip map*

1. はじめに

阪神・淡路大震災を契機として、それまでは極く限られた人々だけに知られていた活断層という言葉が広く社会に知られるようになった。また一時は、“危険な”という意味でのキーワードとして新聞・雑誌等に頻繁に登場しました。日本列島には、長さが20km程度以上あり、マグニチュード7以上の地震を引き起こす可能性のある活断層やその集合体(活断層系、活断層帯)が100本ほど分布する。

活断層調査は、これらの活断層の素性を調べ、その結果を地震発生の予測、更に地震防災に役立たせようとするものである。本論は、このような目的をもつ活断層調査の現状の一端を紹介すると共に、その成果を地震の予測や地震防災に適用する際の問題点や今後の課題について、私見を述べたものである。

本題に入る前に、活断層とは何か、活断層調査によって得ようとしている活断層パラメータにはどのようなものがあるのか、簡単に整理しておく。

(1) 活断層とは

活断層とは、最近の地質時代に繰り返し活動しており、それ故に将来も活動する可能性があると考えられる断層のことである。「最近の地質時代」については、約2百万年前に始まる第四紀(人類紀)とする考え方が一般的である。しかし近年、第四紀のある時期に活動を停止してしまった断層も数多く知

られるようになってきた。そこで、「最近の地質時代」をより短期間に限定する考え方もある。例えば地質調査所では、約15万年前に始まる後期更新世を「最近の地質時代」の一応の目安としている。

(2) 活断層パラメータ

活断層調査により取得を目指している活断層のパラメータには、次のようなものがある。

地震の発生場所の特定に関連するもの

-----活断層の分布・位置

地震の発生時期の予測に関連するもの

-----再来間隔、最新活動時期(又は経過時間)

地震の規模の予測に関連するもの

-----活断層の長さ、単位変位量

発震機構の予測に関連するもの

-----活断層の走向・傾斜、変位方向

時期と規模の予測、及びそれらの妥当性検証に関連するもの-----平均変位速度

なお、地震動特性の予測に関連する、破壊の伝播方向、伝播速度などの動的断層パラメータに関しては、現在の活断層調査では取得が困難である。

以下の本論では、地震予測の3大要素(場所、時期、規模)と対応させて、活断層の分布・位置情報、地震発生危険度評価、地震規模の予測の3つのテーマを選び、活断層調査の現状と地震防災への適用に際しての課題について述べる。

2. 活断層の分布・位置情報

(1) 山地の活断層情報

山地及び丘陵・台地に分布する活断層の分布及び誤差数m～数10m以内の位置に関する情報は、主として空中写真判読を含む地形地質調査により取得されている。日本列島では、これらの地域における活断層の大局的な分布は既に明らかにされており、その情報は活断層研究会(1991)¹⁾などによりまとめられている。

また、精度の高い活断層の位置情報は、幾つかの活断層(阿寺断層, 中央構造線, 野島断層など)については、縮尺2.5万分の1や1万分の1の詳細断層図(ストリップマップ)²⁾などとして、地質調査所から公表されている。

(2) 都市防災と関連する平野部活断層の最近の成果と情報

調査が大きく遅れていた平野部の活断層の分布についても、ここ数年間に、主に反射法探査と詳細地形調査(大縮尺の空中写真判読など)により精力的に研究が進められている。平野部は一般に人口稠密地域であるため、大都市直撃型の地震を引き起こす可能性のある活断層の存否と分布の確認は地震防災上極めて重要である。

大阪平野では、反射法探査と詳細地形調査の結果、大阪市内を南北に縦断する上町断層が堺市、和泉市を経て、岸和田市に達し、断層系の全長は43kmに達する可能性が高いことが明らかにされた(図-1)。また、上町断層は深さ数100mまでの浅層部では、幅300～500m程度の撓曲の形態を取っていることが明らかになった³⁾(図-2)。

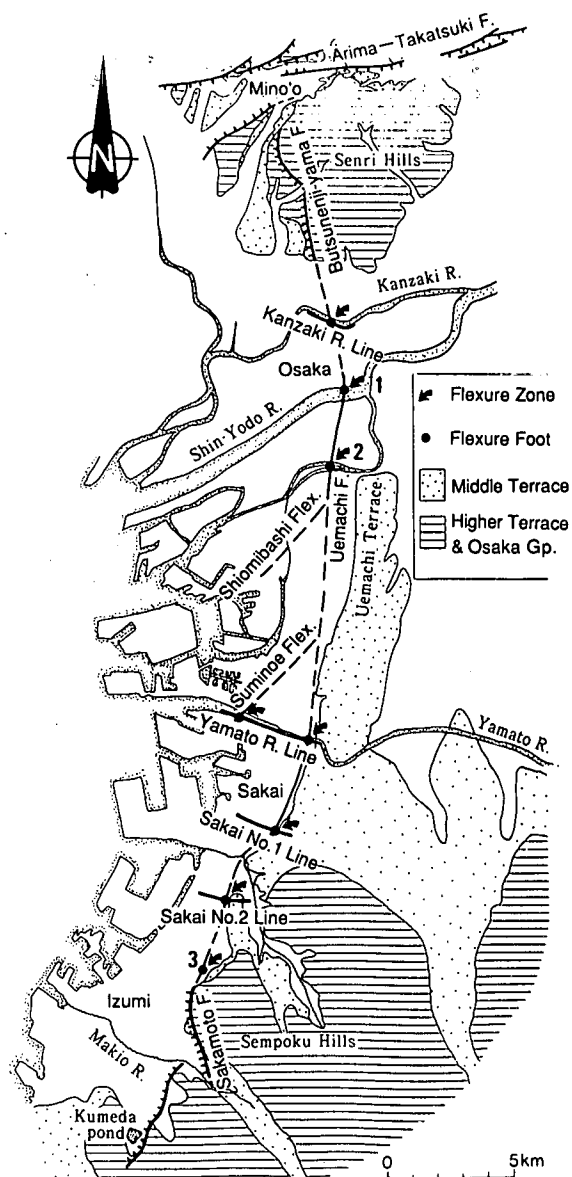


図-1 上町断層系のトレースと反射法弾性波探査の測線位置図³⁾

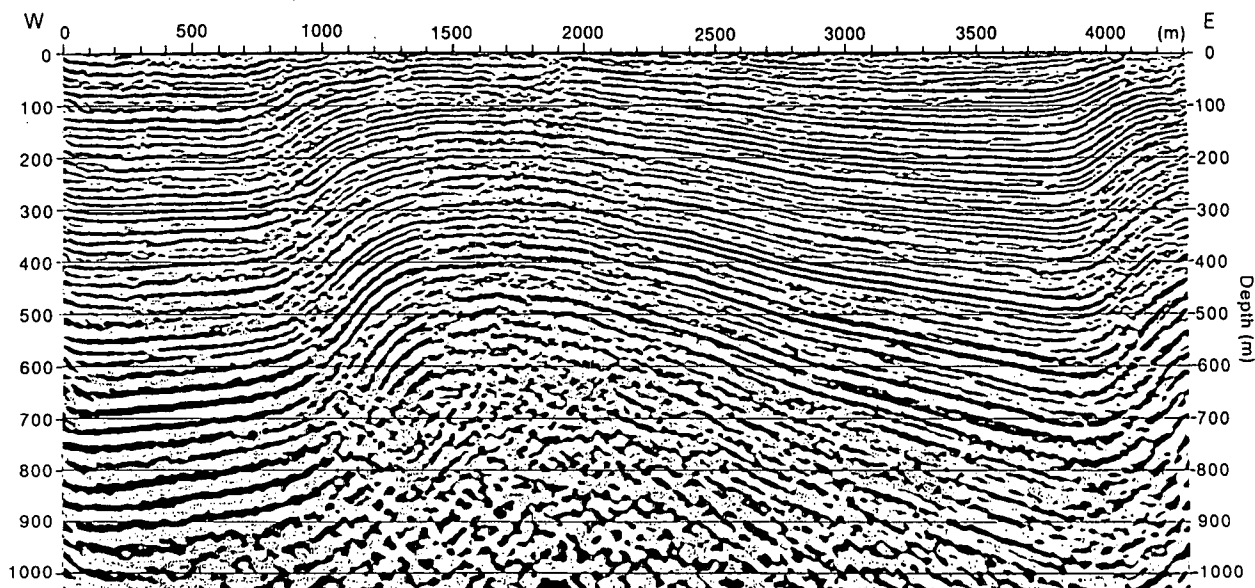


図-2 大和川測線沿いの上町断層系の反射断面³⁾

一方、首都圏の東京、荒川、中川の各低地では、反射法探査やボーリングによって、B級以上の活動度（平均変位速度が10cm/千年以上）の活断層が伏在する可能性は極めて低いことが判明している。更に、現時点では十分なデータが得られていない濃尾平野についても、今年度から調査が開始された。

平野部活断層の詳細位置情報は、2.5万分の1都市圏活断層図⁴⁾として、国土地理院から公表されており、重要な地震防災の基礎資料となっている。同図では、撓曲の傾斜方向を矢印で示し、矢印の長さと網掛けにより撓曲ゾーンを表現する工夫がなされている。

(3) 地震防災への適用

活断層の分布・位置情報は、断層がずれ動く際の変位と強震動の発生源、破碎帯の存在による脆弱な地盤・岩盤地域、伝播地震動の増幅・トラップの発生域などについての重要な1次データである。従って、地震防災関連の各方面において、活断層の分布・位置情報の有用性は極めて高いと考えられる。今後、既刊図の改訂を含め、精度の高い大縮尺の詳細活断層図を社会に提供して行くことが活断層研究者の責務であると考えられる。

3. 地震発生の危険度評価（発生時期の予測）

(1) 地震発生危険度評価の前提

活断層の地震発生危険度評価は、「個々の活断層（厳密には破壊セグメント）はほぼ同じ規模の地震をほぼ一定の間隔で繰り返し発生させる」という前提（固有地震説⁵⁾など）に立っている。この前提を支持する事例に南海トラフ沿いの巨大地震がある。同トラフ沿いでは、史料に欠落がないと判断される中世以降、1361、1498、1605、1707、1854、1944-46年と6回のM8クラスの地震が平均117年、最短90年、最長147年の間隔で発生している。内陸の活断層については、南海トラフ沿いに匹敵するような精度の高いデータは得られていないが、これまでのトレンチ調査や地形地質調査の結果では、上記の前提は大筋で成立している。

(2) 再来間隔

地震発生危険度評価に基本的に必要なパラメータは、再来間隔と最新活動時期である。これらは主に、トレンチ調査などの活断層の活動履歴調査により取得されている。これまでの調査により、A級活断層の再来間隔は千年の桁であり、最も短いもの（長野盆地西縁断層、糸静線中部、丹那断層）で千年弱

（700～800年程度）であることが明らかにされている。

(3) 地震発生危険度評価の実例

ここでは、阪神・淡路大震災後に地質調査所が調査を行った有馬－高槻－六甲断層帯（図・3、表・1）と糸魚川－静岡構造線活断層系（図・4、図・5）の例を紹介する。

a) 野島断層

トレンチ調査の結果、野島断層（北淡セグメント）は1995年の活動の前は西暦紀元後50年頃、さらにその前は紀元前1900～3000年に活動したことが判明した⁶⁾。従って、もし震災前に詳しいトレンチ調査を実施していれば、野島断層は再来間隔2～3千年、経過時間約2千年の、地震発生が切迫した断層であると評価できたと考えられ、地震防災にも何らかの貢献が可能であったと思われる。

b) 有馬－高槻構造線

川西以東の有馬－高槻構造線（高槻セグメント）は約400年前に最新の活動を行い、慶長伏見地震を引き起こしたことが明らかになった⁷⁾。また、その前には紀元前900年頃に活動したことが確認された。この結果、再来間隔は2.5千年、経過時間は400年となり、同構造線が近い将来に活動する可能性は低いと評価された。有馬－高槻構造線に関するこのような評価は速やかに公表され、京阪神地域の人々の同構造線地震に関する不安の解消に貢献した。これは、活断層調査の結果が広い意味での地震防災にうまく適用された例と言えよう。

c) 糸魚川－静岡構造線活断層系

トレンチ調査により、糸静線活断層系中部の牛伏寺断層の最新活動は西暦445～1386年の間であることが判明した⁸⁾。地震史料から、この活動は762年の美濃・飛騨・信濃の地震か841年の松本付近の地震に対応すると考えられる^{8)・9)}。また、最近4回の活動の再来間隔は千年弱（700～800年程度）である。最新活動に伴う単位変位量は 7.5 ± 1.5 m、平均変位速度は 9.4 ± 4.5 m/千年と見積もられ、再来間隔と調和的である。これらのデータから、牛伏寺断層については、次の活動が差し迫っている（経過時間>再来間隔）とする評価が公表された^{9)・10)}。

糸静線活断層系の他の断層（幾何学的セグメント）の危険度評価については、意見が分かれている。松田(1996)¹¹⁾は経験式を用いて、牛伏寺断層の単位変位量に見合うM(8.1)と断層の長さ(91km)を見積もるなどして、糸静線活断層系の3分の2ないし全域が同時に活動するとしている。これに対して奥村・井村(1996)¹⁰⁾は、他の断層の再来間隔は

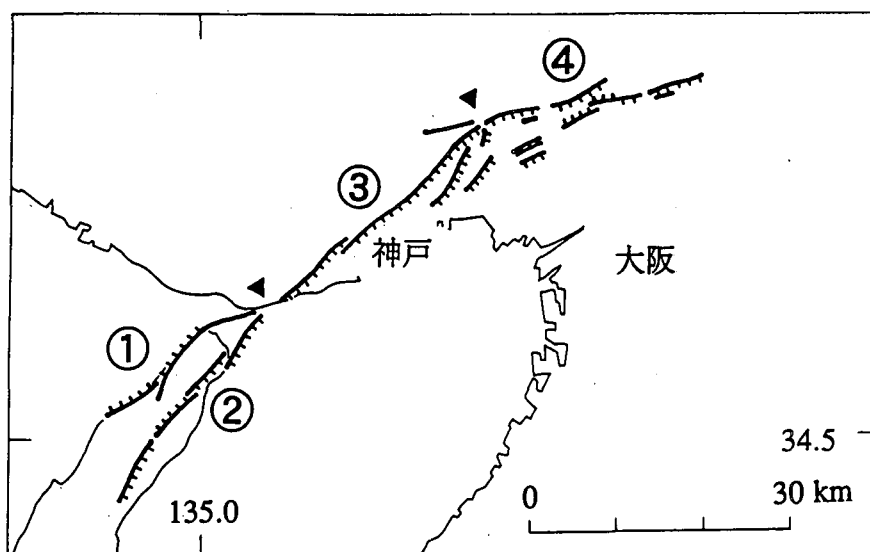


図-3 有馬-高槻-六甲断層帯の主要セグメント区分⁶⁾

表-1 有馬-高槻-六甲断層帯の主要セグメントの断層パラメータ⁶⁾

セグメント	① 北淡	② 東浦	③ 六甲山？	④ 高槻
長さ	20 km	25 km	30 km ?	≥30 km
単位変位量	1.6 m	1.4 m	?	≥3 m
再来間隔	2～2.5 千年	1.4～2.2千年	?	2.5 千年
サイクル I	1995 AD 兵庫県南部Eq	1596 AD 慶長伏見地震	?	1596 AD 慶長伏見地震
サイクル II	約 50 AD	約 200 AD～ 約 600 BC	?	約 900 BC
サイクル III	約 1900 BC～ 約 3000 BC	?	?	?

牛伏寺断層の再来間隔よりも長いことから、最新活動が同時期であっても、次の活動が差し迫っているのは牛伏寺断層周辺に限られるとしている。この問題に決着をつけ、信頼できる評価を確定するためには、再来間隔の精度の向上が必要である。

(4) 地震防災への適用に際しての課題

活断層の地震発生危険度評価は、その結果が地震防災関連の各方面の対応を大きく左右する可能性がある。特に要注意の評価が下された場合の影響・問題は大きい。従って、社会に対して責任ある危険度評価を行う必要があり、そのためには、基礎となる再来間隔と最新活動時期に高い精度が求められる。

従来の地震危険度評価では、古地震学的調査から

求められた再来間隔と共に、平均変位速度を基礎データとし、経験則を使って算出された再来間隔も良く用いられている（例えば松田，1996¹¹⁾）。阿寺断層，中央構造線，有馬-高槻-六甲断層帯などでは、この2つの再来間隔はかなり異なっている。また、再来間隔のゆらぎ（ばらつき）に関するデータは大部分の断層でまだまだ不十分である。

今後、活断層の危険度評価をより積極的に地震防災に適用して行くためには、ゆらぎの統計的評価を含む再来間隔の一層の高精度化を達成し、危険度評価に対する地震防災関係者の信頼を得ることが不可欠である。また、米国などで実施されている確率論的な地震発生危険度評価をもっと積極的に取り入れる必要があると考える。

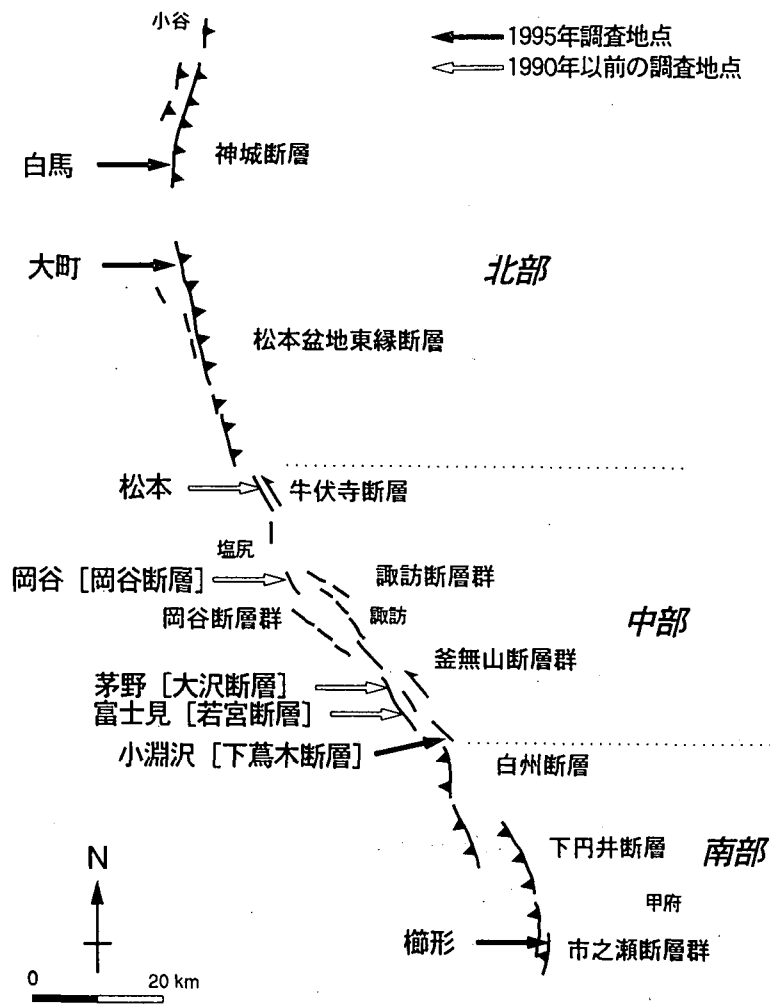


図-4 糸静線活断層系の概要とトレンチ調査地点¹⁰⁾

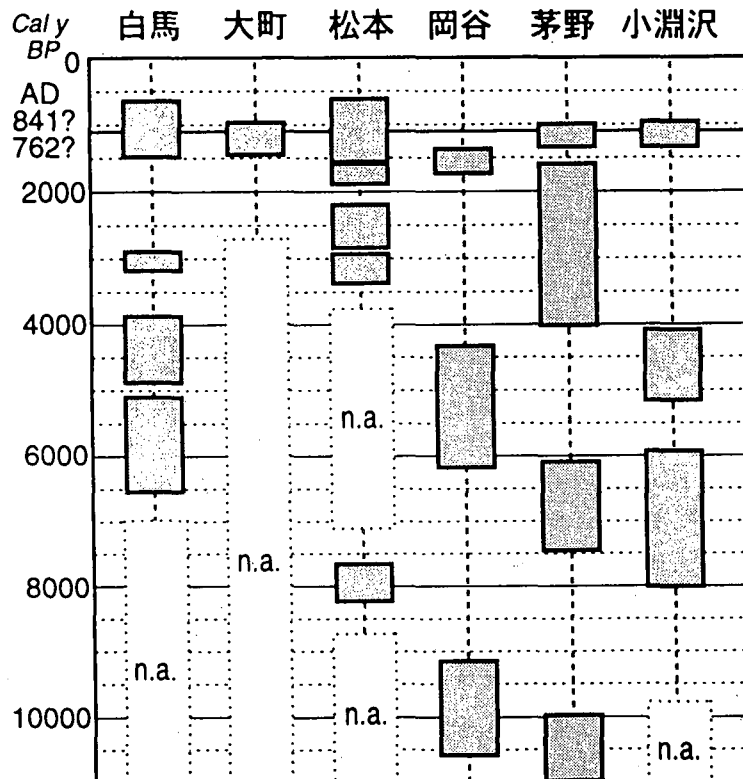


図-5 糸静線活断層系中・北部の活動履歴¹⁰⁾

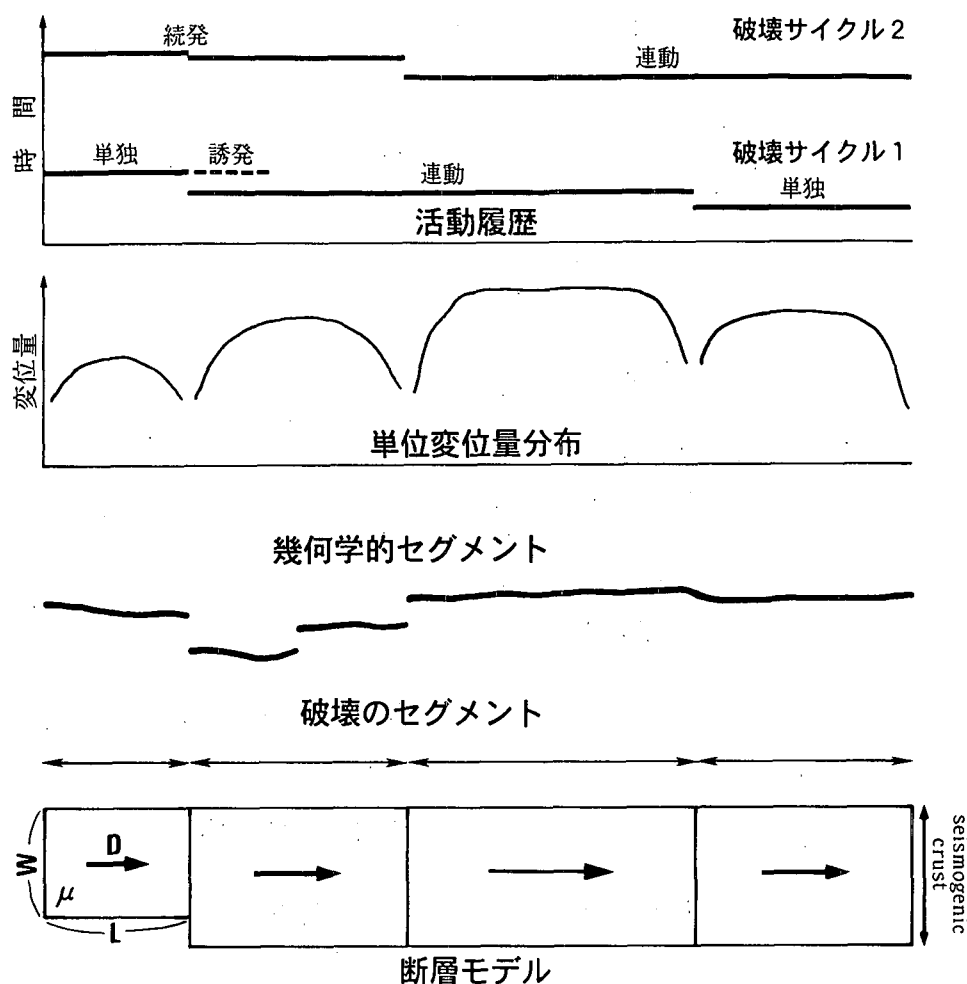


図-6 大規模な活断層系の評価に関する模式概念図

4. 地震規模の予測

(1) 従来の地震規模の予測

活断層の活動により生起される地震の規模は、ずれ動いた断層の長さおよびずれの量（単位変位量）に比例することが経験的に知られている。現在、断層の長さ及び変位量から、地震の規模を予測するのに用いられている代表的な経験式は、松田(1975)¹²⁾ によるマグニチュードと地震断層の長さ及び変位量との関係式である。また、佐藤ほか(1989)¹³⁾ によるマグニチュードと震源断層の長さ及び変位量との関係式も用いられている。従来の地震規模予測における問題点として、大規模な断層系の地震規模予測の際に、単純にその全長を用いたり、データの裏付けのない恣意的な長さを用いている場合が少なくないことが挙げられる。

(2) 破壊単位と単位変位量に基づく地震規模の予測

最近の活断層調査により、長大な断層系は幾つかの破壊のセグメントから構成され、同セグメントは一つの破壊サイクルの中で単独で活動する場合もあれば、幾つかが連動又は続発して破壊する場合もあることが分かってきた（表・1、図・6）。また逆に、地表では連続性が途切れる複数の断層が、活動履歴の一致や変位量分布の連続性から、一つの破壊のセグメントを形成していると考えられる場合もあることが分かってきた¹⁴⁾など。

これらの調査結果から、精度の高い地震規模予測のためには、破壊のセグメントを認識し、それぞれのセグメントから生起される地震の規模を決定することが本質的に重要であると考えられる（図・6）。破壊のセグメントは多くの場合、幾何学的セグメントと一致すると考えられるが、上述のように、複数

の幾何学的セグメントが一つの破壊セグメントを構成する場合や、逆に一つの幾何学的セグメントが複数の破壊のセグメントに分かれるケースもある。従って、破壊のセグメントの認識には、単位変位量と活動履歴の詳細な解明が不可欠である。

また、破壊のセグメントが単独で破壊する場合と連動あるいは続発して破壊する場合とで、地震の規模に違いが生じるか否かについては、まだ十分な検証ができていない。しかし、有馬-高槻-六甲断層帯の調査結果では、単独破壊の場合と連動破壊の場合とで単位変位量はほぼ同じである⁷⁾。

このことから、破壊のセグメントに基づく地震規模の予測では、セグメントの長さや単位変位量から地震モーメントやモーメントマグニチュードを推定するのが合理的である。この際に必要な破壊のセグメントの幅は、地殻地震の発生層の厚さと断層面の傾斜（反射断面などから推定）から見積もり可能である。従って、破壊のセグメントに基づく地震規模予測では、断層系のできるだけ多くの地点で単位変位量のデータを取得することが重要になる。

(3) 地震規模の予測の実例：糸静線活断層系

国の地震調査委員会は、今後数百年以内に、牛伏寺断層を含む糸静線の活動により、M8程度（ $7\frac{1}{2}$ ～ $8\frac{1}{2}$ ）の地震が発生する可能性が高いとする地震規模予測を公表した。この予測は、白馬-小淵沢間の6地点ではほぼ同じ時代（約1200年前）の最新活動が認められ、このうち松本（牛伏寺断層）と茅野（釜無山断層群）では各々、 $7.5 \pm 1.5\text{m}$ 、約6mの単位変位量が求められていること^{10, 15)}に基づく。しかし、活動履歴のデータからは、近い将来の活動は牛伏寺断層付近に限られると予測され、上の地震規模予測とは矛盾する。筆者は、約35km離れた2地点の単位変位量がほぼ一致し、平均変位速度、再来間隔とも調和することから、松本以外の地点の活動履歴データの方に問題（活動イベントの欠落や見落とし）がある可能性が高いと考えている。

いずれにせよ糸静線では、活動履歴に関する情報は南部を除いて比較的豊富に得られているが、単位変位量のデータに乏しく、(2)で述べた破壊単位と単位変位量に基づく地震規模の予測には至っていない。地震調査委員会の見解が公表されたとはいえ、より精度の高い地震規模予測のため、単位変位量データの取得と活動履歴の再検討を今後も継続する必要があると考えている。

(4) 地震防災への適用に際しての課題

地震規模の予測は地震被害の想定や構造物の安全

設計などに欠くことができない。今後、これらに一層貢献するためには、断層(系)の全長に大きく依存した地震規模予測から抜け出して、破壊のセグメント、単位変位量、地震モーメントに基づく、より精度の高い地震規模予測を推進する必要があると考える。これに伴い、セグメントの単独、連動、続発などの多様な破壊様式を取り込んだ確率論的な地震規模予測を導入する必要があるだろう。なお、米国ではこのような地震規模予測が既に行われている¹⁶⁾。

5. 終わりに

以上、本稿では、活断層調査の現状と主な成果を地震の予測及び地震防災への適用という点に注目して紹介した。ここで紹介した内容は、活断層調査の有効性を強調しすぎたきらいもあるので、最後に現在の活断層調査では対応が困難な例も指摘しておきたい。それは、兵庫県南部地震の際に大規模な被害の原因となった神戸側の破壊である。神戸側の地表に断層が出現したとの説もあるが、その変位量はセグメント規模から推定される変位量（1.5～3m）に遠く及ばない。従って、神戸側の破壊は、恐らく400年前の慶長伏見地震の際に固有の活動を終えた破壊セグメントが、隣接する野島断層の活動に誘発されて、再来間隔に比べて相当に短い経過時間のうちに再活動したものと考えられる。この活動は、野島断層の活動とは異なり、たとえ地震前に詳細な活断層調査が行われ、各種の静的断層パラメーターが取得されていても予測は不可能であつたろう。

活断層調査の成果を地震防災により有効に役立たせるためには、確率論的な地震発生予測の導入、動的断層パラメーターの取得を目指した活断層研究への取り組み（果たしてできるか）などと並んで、活断層分野と防災関連分野との交流、情報交換、相互フィードバックを促進する必要があると考える。現状はこれらが少なすぎると感じている。

謝辞：著者に本論文公表の機会を与えて下さった岐阜大学工学部土木工学科の杉戸真太先生と土木学会地震工学委員会の皆様に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1)活断層研究会編：新編日本の活断層，東大出版会，437p., 1991.
- 2)佃 栄吉他：2.5万分の1阿寺断層ストリップマップ，地質調査所，1993.
- 3)杉山雄一他：大阪・上町断層の反射法弾性波探査，物理探査学会第96回講演会論文集，pp.98-102, 1997.
- 4)国土地理院：2.5万分の1都市圏活断層図（全45図），日本地図センター，1996.
- 5)Schwartz, D.P. and Coppersmith, K.J. : Seismic hazards: new trends in analysis using geologic data, *Active Tectonics*, National Academic Press, pp.215-230, 1986.
- 6)栗田泰夫他：有馬－高槻－六甲断層帯の古地震調査，兵庫県南部地震の長期予測は可能であったか？地震学会シンポジウム「大地震の長期予測はどこまで可能か？」予稿集，1-5, 1997.
- 7)寒川 旭・杉山雄一：有馬－高槻構造線活断層系のトレンチ調査，地震予知連会報，56，pp.557-565, 1996.
- 8)奥村晃史他：糸魚川－静岡構造線活断層系の最近の断層活動－牛伏寺断層・松本市並柳地区トレンチ発掘調査，地震2，46，pp.425-438, 1994.
- 9)地震調査研究推進本部 地震調査委員会：糸魚川－静岡構造線活断層系の調査結果と評価について，科学技術庁，10p., 1996.
- 10)奥村晃史・井村隆介：糸魚川－静岡構造線活断層系の活動履歴調査，第11回地質調査所研究講演会資料「兵庫県南部地震の地質学的背景」，日本産業技術振興協会，pp.56-59, 1996.
- 11)松田時彦：「要注意断層」の再検討，活断層研究，No.14，pp.1-8, 1996.
- 12)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2，28，pp.269-283, 1975.
- 13)佐藤良輔他：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，390p., 1989.
- 14)鈴木康弘他：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，地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，p.53, 1997.
- 15)糸静線活断層系発掘調査研究グループ：糸静線活断層系中部，若宮，大沢断層の性格と第四紀後期における活動－富士見，茅野における発掘調査，地震研彙報，63，pp.349-408, 1988.
- 16)Working Group on California Earthquake Probabilities: Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, pp.379-439, 1995.

PRESENT STATE OF ACTIVE FAULT RESEARCH AND PERSPECTIVE ON ITS APPLICATION TO SEISMIC HAZARD PREVENTION

Yuichi SUGIYAMA (Geological Survey of Japan)

We can point out the following matters to utilize the results of active fault research for seismic hazard prevention. To inform the public of places where earthquakes will occur, and where surface ruptures and strong ground motions may be generated, we must promote the publication of large-scale active tectonic maps showing precise locations of active faults and geological conditions of their surrounding areas. Regarding an evaluation of recurrence times of earthquakes, we must gain a public confidence in it through an effort to obtain recurrence intervals with as sufficient accuracy as possible to statistically evaluate their fluctuations, and through a practical application of probabilistic seismic risk assessments. For a rational and reliable estimation of magnitude of earthquakes, we must promote a probabilistic evaluation based on rupture segments, specific displacements and earthquake moments, and applicable to a great variety of rupturing processes including single, multiple and successive ones. In addition, informational exchanges and mutual feedbacks between the field of active fault research and that of seismic hazard prevention are necessary as well as a challenge to obtain dynamic fault parameters through active fault research.