活断層の地質学的意義と地震予知

衣笠善博*・垣見俊弘*

Geological Significance of Active Faults and Earthquake Prediction

Yoshihiro KINUGASA and Toshihiro KAKIMI

I. はじめに

地震予知に対する社会的関心は、ここ10年間の間に急速に高まった。この社会的関心の高まりに支持されて、地震予知の研究及び観測体制は急速な進歩をとげた。このような事情は、活断層の研究についても同様である。とくに、1974年5月伊豆半島沖地震と、1978年1月伊豆大島近海地震に伴って地震断層が生じた事は、活断層に対する社会的関心を高めるとともに、研究を一層進展させるきっかけとなった。また、活断層研究の成果は、地震予知のみならず、原子力施設等重要施設の立地にあたっての耐震安全性の確保という実用的な要請にも生かされることとなっている。

これに対し、地質調査所では既存資料のコンパイルによる200万分の1日本活断層図(垣見ほか 1978)の編集が行なわれた。また、1979年から始まった地震予知第4次5ヶ年計画では、全国にわたって50万分の1活構造図を編集中であり(地質調査所環境地質部地震地質課 1983)、その一部は既に出版された(垣見ほか 1982, 佃ほか 1982, 山崎ほか 1983, 寒川ほか 1983)。また活断層研究会は全国にわたって縮尺20万分の1で活断層分布図を作成し、「日本の活断層一分布図と資料一」という大冊にまとめあげた(活断層研究会 1980)。

しかし一方で、活断層に対する過剰な反応や、その裏がえしとして、過小な反応も出てきた。小論では活断層の持つ地質学的意義を再考するとともに、活断層からの地震予知を3段階に区別する事を提案して批判を仰ぎたい。

II. 活断層の定義と地質学的意義

活断層は多田(1927)によって「極めて近き時代迄地殻変動を繰返した断層であり、今後も尚活動す可き可能性の大なる断層」と定義されている。この定義において、後半には活断層の持つ意義が示されており、前半に活断層認定の規準が示されている。BONILLA(1970)の定義も同様であり、原文のまま引用するなら“An active fault can be defined as one that has moved in the recent past and may move in the near future”と定義している。

これらの定義では「極めて近き時代」あるいは“recent past”の範囲は示されていない。我が国における地質学・地形学分野では、この「極めて近き時代」あるいは“recent past”に対し、第四紀をあてはめて、第四紀に活動した断層をもって活断層としてきた(地質調査所 1978, 活断層研究会 1980など)。しかし、再度定義に立ちもどるなら、活断層の意義は「今後も尚活動す可き可能性」, “may move in the near future,”にある事は明らかである。一方、活断層認定の目やすとされてきた「第四紀」という時代は生層序的に定義されている時代であり、構造発達史の上で定義されたものではない。断層運動は、

* 地質調査所環境地質部

Environmental Geology Department, Geological Survey of Japan

tectonics の基本的な要素の一つであるから、活断層認定の規準も構造発達史のなかで定義されなければならない。

地震すなわち活断層の活動は現在の tectonics のなかで発生している。したがって現在を支配している tectonics が発生してからそれが終焉をとげるまでは同様の事象（断層の活動、地震の発生など）は繰り返すと考えることができる。BONILLA (1970) の“recent past”は、したがって、現在を支配している tectonics の始まりの時期までを指し“near future”は、地質学的には、現在の tectonics が続く限りを指していると解釈される。

活断層の調査研究が進むにつれて、第四紀の間を通じて断層運動の様式に変化がある事が明らかにされてきている。たとえば、紀ノ川中流域における中央構造線の活動は、寒川 (1977) の示したように、第四紀の中頃を境にして、その様式が大きく変化している。すなわち、第四紀の前半における中央構造線の活動は北上りの衝上断層の活動が活発であった。しかし、五条層の堆積期を境としてこの衝上断層の活動は停止し、以後は右横ズレの活動が顕在化した。この右横ズレの活動は現在まで継続している。従って、紀ノ川中流域の衝上断層は、第四紀（の前半）に活動した断層ではあっても、“active”とは言えない。

西南日本内帯においても、第四紀の前半と後半では tectonics に大きな変化が見られる。すなわち、この地域では、中新世から鮮新—更新世に活動した東西性の走向を持つ衝上断層の存在が知られているが、地形学的にはこれらの断層が第四紀の後半に活動した証拠は認められない。一方、第四紀後半になって活動が活発化した断層が福山市西部から岩国市周辺に見られる。これらの断層は北東—南西の走向を持つ右横ズレ断層である（寒川 1980）。

前述のように、活断層であるか否かは、その地域の tectonics との関連において評価されるものであり本来全国的“統一規準”という見方でとらえるべきものではない。地質調査所環境地質部地震地質課 (1983) は活断層認定の基準を「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。これは、全国にわたって第四紀の中期と後期の間に tectonics に変化があったと考えているためではない。たかだか10数万年の第四紀後期の間に大幅な tectonics の変化があったとする積極的な証拠がないことから第四紀後期の tectonics は現在のそれと同一であると見なすことができるからである。“recent past”を短くとることにより、活断層でないものまで活断層と認定してしまう危険は少なくなるが、逆に活断層を見逃す危険性が生じる。しかし、活動の“周期”が10数万年以上という活断層を見逃したとしても、そのような活断層が地震予知や地震災害のアセスメントに与える影響は無視できる程度に小さい。

III. 活断層と地震予知

活断層が注目をあびているのは、地震の発生が活断層の活動そのものに他ならないからであり、地震予知および地震災害の軽減という社会的な観点からも活断層の調査研究に対する期待は大きい。

活断層の調査研究が地震予知にはたす役割は以下にのべるように3つの段階に分けることができる。ある段階のためのデータをもとに別の段階の議論をし、その結果、活断層のはたす役割を過小評価したり、過大評価した例のあることに注意を喚起しておきたい。

1) 時間に依存しない地震予知と活断層

一般に、地震予知には時、場所および規模の3要素が必要とされ、どの1つが欠けても予知とは言えないとされている。しかし、3要素そろった予知の前段階としては、特に困難な“時”をさておいて、他の2つの要素を明らかにすることがまず必要である。特に、地震予知の効率的な推進をはかるためには、予想される地震の場所と規模をあらかじめ明らかにしておくことが不可欠といえよう。

地震災害軽減の観点から行なわれる耐震設計に必要な諸パラメータは時を特定した地震予知が不可欠というわけではなく、地震発生場所と規模が特定できれば、それらから導かれる諸パラメータと建造物それ自体の重要性とにより工学的に行なわれる。

現在の地震学の知識によれば、地震の発生する場所は活断層の存在場所そのものであり、規模は経験則から導びかれる。地震のマグニチュード M と断層の長さ L (km) については、TOCHER (1958) が世界中の地震断層のデータを使って $\log L = 1.02M - 5.76$ という経験式を導びいた。松田 (1975) は日本の内陸に発生した地震について同様に $\log L = 0.6M - 2.9$ という関係式を導びいた。

マグニチュード M と、その地震の際の断層の変位量 D (m) の間の経験式は、世界の地震断層のデータを使った IIDA (1965) によって $\log D = 0.55M - 3.71$ と導びかれた。日本の内陸部の地震断層については松田 (1975) によって $\log D = 0.6M - 4.0$ と求められた。

これらの経験式に従うなら、断層の長さ、あるいは1回の地震による変位量が特定できれば、その断層から発生する地震の規模が予想される。

2) 再来周期からの地震予知と活断層

前節では“時”が特定できなくても、予知には役立つ事をのべたが、“時”を明らかにする努力は必要であるし、社会的な要請も強い。

“時”を明らかにするための方法には、前兆現象の検出による方法と、再来周期を利用する方法がある。前兆現象による予知については次節でのべることとし、ここでは再来周期についてのべる。

活断層が繰返して活動をするものである事はその定義から明瞭であり、活断層が地質学的意義を持つゆえんである。しかし地震発生の“時”を予測するためには断層活動の時間的な規則性が明らかでなければならない。

WALLACE (1970) はサンアンドレアス断層の調査から断層運動の活動周期の推定を試みた。サンアンドレアス断層の活動周期を実証的に示したのは SIEH (1978) である。彼は南カリフォルニアの Pallet Creek におけるトレンチ調査によって、同断層の活動の平均的な間隔が160年である事を明らかにした。また、同地域は1857年の Fort Tejon 地震 ($M = 8\frac{1}{4}+$) で活動をしていることから今後数10年の間に Fort Tejon 地震と同程度の地震が発生し得る事を明らかにした。この Pallet Creek における成果は、調査地点の地質の条件に恵まれた事もあるが、特筆すべきものであり、日本における活断層研究に大きなインパクトを与え、その後日本においてもトレンチ調査が活発に行なわれるようになった (YAMAZAKI et al. 1982)。

松田 (1978) は断層の活動周期 R と最後の活動時期からの経過期間 t によって活断層を要注意断層とそうでないものに区別する手順を示した。ある断層が最後に活動してから経過期間 t が活動周期 R に近い場合は次の活動時期がせまっている事になり、その断層は要注意断層ということが言える。逆に、ある断層が最後に活動してからまだあまり時が経過していないような場合 ($t < R$) は、人間生活の時間尺度で、近い将来に再び活動する可能性は少ないと言える。

この松田の考え方にもとづき、WESNOUSKY らは北海道と九州を除く全国の活断層の再来周期と最終活動時期から地震危険度マップを作成した (WESNOUSKY et al. 1983)。このような広域の地震危険度の分布図は、地震災害軽減のための対策を立てるにあたってのきわめて重要な判断材料である。

3) 前兆現象による地震予知と活断層

地震発生の“時”を予知する事は地震予知研究の最大の課題であり、多くの観測・研究がなされている。それらの観測の多くはある地域を対象とし、その地域およびその周辺に観測点を配置し、地域内に発生する前兆現象を捕捉する事をめざしている。

前述のように、活断層の運動は震源過程の地表への現われと見なせるから、活断層に対するある種の観測は、予想される震源過程そのものを監視していることとなる。たとえば、測量のうち、活断層をまたいで行なわれるものはこれに相当する。阿寺断層、富士川断層等をまたいで光波測量がくり返し行なわれている。地質調査所では北武断層、延命寺断層や中央構造線等の近傍にはりめぐらされた測点網のくり返し三角測量を行っている (KAKIMI et al. 1981 など)。アメリカにおいて地震予知のために行なわれて

いる測定の大部分は、日本でしかに行なわれているような広域地殻歪を求めるためというより、断層の変位運動を検出する事を目的とした測定である。

地震の前兆現象の一つに地下水や地下ガスの地球化学的な変化がある。地球化学的観測には、自然地震の観測と同様に、ある地域内における前兆現象を検出するために行なわれるものの他に、特定の活断層に注目して行なわれている。たとえば、富士川断層、姫ノ湯断層などに対してラドンの放出量の経時的な変化の観測が行なわれている（加藤ほか 1980など）。

活断層の直上あるいは直近で行なわれる観測は、対象とした活断層そのものから発生する地震の前兆現象を捕捉することを期待して行なわれているが、さらに別の効果を生むことがある。KINUGASA (1981) は北武断層をまたいで設けられた菱形基線網のくり返し観測のデータを解析し、断層周辺の地殻歪の推移と観測期間中に南関東で発生した地震との間に相関がある事、またその歪の量は断層をまたがないで行なわれる測定から求められる歪の量に比べて極めて大きい事を指摘した。その原因について KINUGASA (1981) は断層破砕帯が存在する事の影響を考えた。すなわち、断層破砕帯の存在により、その地点が地震予知観測上の「ツボ」となっている可能性が考えられる。

地震予知観測の「ツボ」については、バリエーモデル (DAS and AKI 1977, AKI 1979 など) やアスペリティーモデル (金森 1980) などによって理論的な考察が加えられる必要があるが、実用的には、断層破砕帯、とくに活断層のそれが「ツボ」の形成に関与している事が予想される。

IV. 地震地質学……まとめにかえて

以上のように活断層は現在の tectonics のなかでとらえる必要があり、tectonics の背景ぬきにしては活断層の持つ地質学的意義を明らかにすることはできない。筆者らが活断層調査の結果を、活断層分布という形ではなく、常に活構造図としてまとめてきたのはこのためである。

活断層を地質構造発達史のなかに位置付けることによって、個々の活断層の分布や性状からは必ずしも明確となし得ないような、地震活動の理解や、その将来予測への道が開けてくる可能性がある。たとえば、東北地方の日本海岸に沿って断続する長大な活断層系は、地質構造との関連において幾つかのセグメントに分かれ、それぞれは第四紀の初め頃から発達してきた逆断層ブロックの境界断層として位置付けることが可能である。そして、この地域の歴史地震の震央や規模は、個々の活断層の位置や長さよりは、単位ブロックのディメンション（長さ×幅）に対応していると見られることが明らかになってきている（栗田 1983）。この場合、単位ブロックの認定が、当該地域における第四紀構造運動の理解なしにできないことはいうまでもない。

現代の活断層研究の流れとして、個々の活断層に対するトレンチ調査等による古地震の発掘や、再来周期の解明、あるいは破砕帯物質の研究などがあることは、マスコミに採り上げられることもあって、比較的一般に知られているようである。しかし、もう一つの流れとして、活断層の地域性や構造発達史のなかでの位置付け等についての地道な研究もあることを強調しておきたい。

このような分野は seismotectonics と呼ばれ、筆者らはその邦訳として「地震地質学」という言葉を使っている。拙文がこの「地震地質学」の目ざすところを理解していただくための一助になれば幸いである。

引用文献

- AKI, K. (1979) : Characterization of barriers on an earthquake fault. *Jour. Geophys. Res.*, **84**, B11., 6140-6148.
栗田泰夫 (1983) : 東北地方、日本海沿岸の活断層と地震の発生様式—北由利衝上断層系を例にして—。地震学会講演予稿集, 1983, 2, 95.
BONILLA, M. G. (1970) : Surface faulting and related effects. in WIEGEL, R. L., ed. :

- Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 47-74.
- 地質調査所 (1978) : 活断層について. 地質調査所, 7p.
- 地質調査所環境地質部地震地質課 (1983) : 50万分の1活構造図シリーズについて. 地質調査所月報, 34, 27-37.
- DAS, S. and AKI, K. (1977) : Fault planes with barriers : A versatile earthquake model. *Jour. Geophys. Res.*, 82, 36, 5648-5670.
- IIDA, K. (1965) : Earthquake magnitude, earthquake fault, and source dimensions. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, 13, 2, 115-132.
- 垣見俊弘・衣笠善博・加藤碩一 (1978) : 日本活断層図. 1 : 2,000,000 地質編集図18, 地質調査所.
- KAKIMI, T., KINUGASA, Y. and ONO, K. (1981) : Active faults in Japan : present state of studies and problems. *U. S. Geological Survey Open-File Report*, 82-180, 98-114.
- 垣見俊弘・山崎晴雄・寒川 旭・杉山雄一・下川浩一・岡 重文 (1982) : 活構造図「東京」. 1 : 500,000活構造図8, 地質調査所.
- 金森博雄 (1980) : 地震活動と地震予知—南カリフォルニアの例—. 地震予知シンポジウム (1980), 163-174.
- 加藤 完・永田松三・伊藤吉助 (1980) : α トラック法による活断層周辺のラドン濃度の変動測定. 地震Ⅱ, 33, 289-301.
- 活断層研究会 (1980) : 日本の活断層—分布図と資料. 東大出版会, 363p.
- KINUGASA, Y. (1981) : Crustal strain on and around an active fault—an example from the survey on the Kitakake fault—. *Jour. Geod. Soc. Japan*, 27, 309-311.
- 松田時彦 (1975) : 活断層から発生する地震の規模と周期について. 地震, 28, 369-283.
- (1978) : 地震の痕. 浅田 敏編著「地震予知の方法」, 第3章, 東京大学出版会, 29-54.
- 寒川 旭 (1977) : 紀ノ川中流域の地形発達と地殻変動. 地理学評論, 50, 578-595.
- (1980) : 西南日本中央部の第四紀における地殻運動と地形発達. 西村嘉助先生退官記念地理学論文集, 60-65.
- ・杉山雄一・衣笠善博 (1983) : 活構造図「京都」. 1 : 500,000活構造図11, 地質調査所.
- SIEH, K. E. (1978) : Prehistoric large earthquakes produced by slip on the San Andreas fault at Palmett Creek, California. *Jour. Geophys. Res.*, 83, B8, 3907-3939.
- 多田文男 (1927) : 活断層の二種類. 地理学評論, 3, 980-983.
- TOCHER, D. (1958) : Earthquake energy and ground breakage, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 48, 2, 147-153.
- 佃 栄吉・寒川 旭・衣笠善博 (1982) : 活構造図「高知」. 1 : 500,000活構造図13, 地質調査所.
- WALLACE, R. E. (1970) : Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 10, 2875-2890.
- WESNOUSKY, S. G., SCHOLZ, C. H., 島崎邦彦・松田時彦 (1983) : 活断層と歴史地震のデータを総合した地震危険度マップ. 地震学会講演予稿集, 1983, 2, 160.
- 山崎晴雄・栗田泰夫・下川浩一・衣笠善博 (1983) : 活構造図「秋田」. 1 : 500,000活構造図6, 地質調査所.
- YAMAZAKI, H., TSUKUDA, E. and KINUGASA, Y. (1982) : Excavation survey of active fault. 天然資源の開発利用に関する日米会議地震予知技術専門部会第3回合同部会会議録, 133-149.