

12-3 長大活断層系の連動性評価と課題

Long-term forecast for multi-segment earthquakes produced by active fault system

国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター活断層・火山研究部門
Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, National Institute of Advanced
Industrial Science and Technology

近藤久雄

Hisao Kondo

1. はじめに

陸域に分布する活断層系の中には、長さが数十 km から数百 km にわたる長大な活断層系があります。これらの活断層系では、別々の区間（断層セグメント）に分かれて活動し、異なる規模の大地震（マグニチュード7以上）を生じることが明らかになりつつあります。特に、隣り合う複数の断層セグメントが同時に活動した場合には、より規模の大きな「連動型地震」が生じるため、地震動や被害分布域の予測にとって重要な課題となってきました。また、現在の活断層帯の長期評価で基本的な概念となっている固有地震モデル¹⁾²⁾では、地震規模が大きな地震ほど発生頻度が小さく、逆に規模が小さな地震ほど頻度が大きいと考えられています。この考え方によれば、連動型地震の発生頻度は相対的に小規模な地震と比較して小さく、複数の地震サイクルの中では稀に生じる現象であることを意味します。これは、数十年にわたる観測期間の地震発生頻度から導出されたグーテンベルグ・リヒター則³⁾と調和するようかのように思えます。しかし、一般に数百年から数千年に一回程度の頻度で大地震を生じる活断層系において、その妥当性を検証するためには、まず過去に生じた古地震イベントが連動型地震であったのかを明らかにし、数百年から数千年間における連動型地震の発生頻度を具体的に解明することが必要です。

しかし、従来の活断層調査によって整備されてきた、トレンチ調査等による過去の活動時期だけからでは、検出された古地震イベントが複数の断層セグメントが同時に連動したかどうかを判別することが困難でした（第1図）。そこで我々は、ずれ量の大きさから過去の連動型地震を判別する評価手法を開発するため、トルコの北アナトリア断層系（陸域で長さ約900km）において、過去の地震に伴うずれ量を三次元的なトレンチ調査から復元してきました。北アナトリア断層系では、地表地震断層を伴う大地震が20世紀に続発的に生じたことが知られています（第2図）。また、豊富な歴史地震の記録が残存し、過去の歴史地震に伴う被害分布や震源断層の特定がなされてきました⁴⁾。

2. 地震時変位量を復元する古地震調査

北アナトリア断層系の中西部に位置する1944年地震に伴い活動した区間では、これまでの固有地震モデルに整合的な結果が得られました。1944年地震（M7.5）は、長さ約180kmの区間で地表地震断層を生じ、計測された中で最大約6mの右横ずれ変位を生じたことが知られています⁵⁾⁶⁾。最大変位を生じた断層セグメントの活断層分布は極めて高い直線性を示しています。この区間のデミル・テペ（Demir Tepe）地点において、三次元的なトレンチ掘削調査を実施し

ました。ここでは、1944年地震時の変位量は約5mであり、微地形や流路堆積物などを基準にした変位復元では、1944年地震を含む過去4回の古地震イベントがいずれも同程度の変位量を伴い、約330年間隔で繰り返されたことが明らかになりました⁷⁾。この結果をまとめた時間—変位ダイアグラムを第3図に示します。歴史記録から推定される各イベントの破壊域は、1944年地震が180km、1668年が600km以上、歴史地震不明、1035年地震が70km以上と推定される⁸⁾ため、地震断層長および連動する破壊域が変化しても、少なくともこの断層セグメントでは固有地震的な活動繰り返しがあったと考えられます。また、この古地震学的データは、複数のセグメントが連動しても、浅部の相対的に大きなすべり域は地震サイクルの中で再現されることも示しています。さらに、地震規模と変位量の関係からは、北アナトリア断層系のような長大な横ずれ断層では、断層セグメントのすべり量がセグメントのサイズ（面積）によって規定されており、70km程度から180km、場合によっては600km以上に連動範囲が変化しても、連動／非連動イベントのいずれでもすべり量が飽和して変化しない場合があることも示唆しています⁷⁾。

一方、1942年地震に伴い活動した区間では、地表変位が地震規模に応じて変化したことが明らかになりました。1942年地震(M7.0)は、北アナトリア断層系で最大規模のセグメント境界である約11kmの断層ステップに隣接する断層区間です。この地震に伴い、長さ約50kmの地表地震断層が生じ、最大約3mの右横ずれ変位を生じました⁵⁾。地震断層の東端付近に位置するアイワズ(Ayvaz)地点において、三次元的なトレンチ掘削調査を実施しました。その結果、1942年地震を含めて過去6回の地震時変位量が復元できました(第4図)。これらの変位量は、1942年地震のような約3mのずれ量と1668年地震相当の約6mのずれ量に大別できます。特に、1942年地震時の変位時変位量は旧流路の微地形から2.5mと計測されるのに対して、先行する1668年地震時の変位量はトレンチ壁面に露出した流路堆積物を基準に6.0mと、約2倍もしくはそれ以上に変化したことがわかりました。先述のように、1668年地震は北アナトリア断層系のうち600km以上の断層区間がずれ動いたと推定され、1942年地震震源域に隣接する最大規模のセグメント境界を破壊が乗り越えたと考えられています。すなわち、1942年地震ではセグメント境界を破壊が乗り越えなかったのに対して、1668年地震では幅約11kmのセグメント境界を超えて破壊が進展し、その際の1942年震源断層上でのすべりは、地表で6～8mに達するものであったと考えられます。動的破壊シミュレーションによる検討では、妥当な範囲のパラメーター設定によって、この現象が再現できることが確認されています⁹⁾。

これらの結果から、1668年地震相当の約6mのずれ量が連動イベント、1942年地震の約3mのずれ量が非連動イベントとすれば、その発生割合は4回に1回となります。よって、1942年地震断層のアイワズ地点および断層セグメントにおいては、隣接する周辺セグメントとの連動可能性は25%と試算することができます。この点については、多数の地震サイクルを含む(より長い地質学的時間スケールでの)古地震データを検討することで、改良・高度化、連動確率の算出を図る必要があると考えています。

3. 今後へ向けて

以上の北アナトリア断層系の調査結果から、セグメント境界周辺でずれ量を復元すれば、過

去に連動したかどうかを判別できる可能性、断層セグメントによっては、地震サイクル毎に変位量が変化する場合と変化しない場合があること、などがわかりつつあります。過去の地震時変位量を復元して実測できれば、その大小と断層セグメント面積から経験的に推測されるずれ量との差異をもとに、当該の古地震イベントが連動したものかどうかを判別できます。そのためには、地震時変位量に基づいた検討事例を増加させるとともに、過去の地震時変位量を復元する調査をいかに効率的に実施するかも同時に検討する必要もあります。

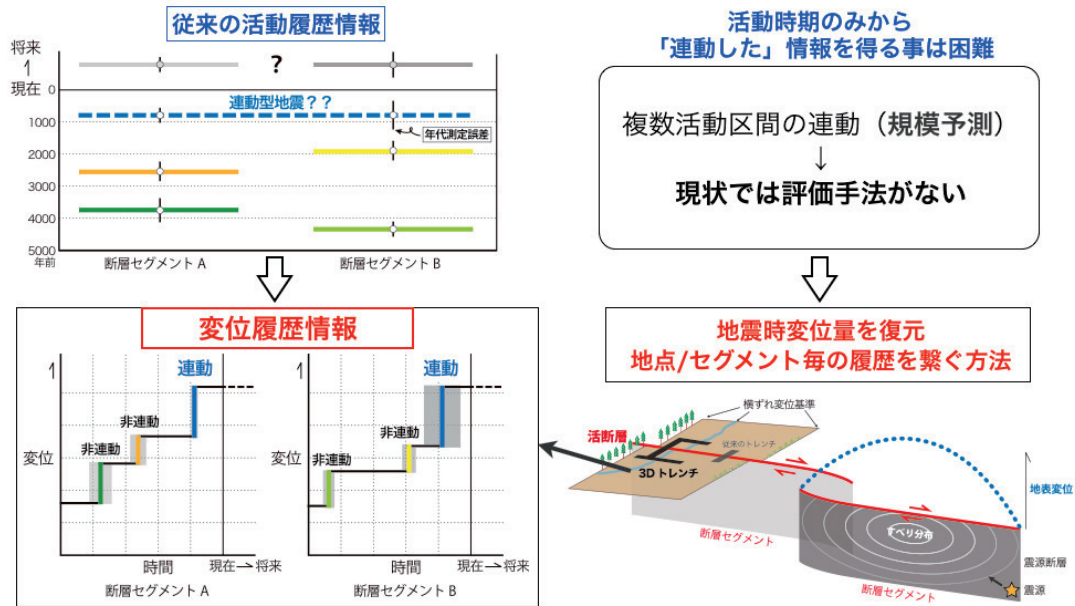
近年では、日本で最も地震発生可能性が高い内陸活断層系の1つである、糸魚川—静岡構造線活断層系において、地震時変位量に基づく連動性評価手法を適用・検証する試みを実施しています。従来は、糸魚川—静岡構造線活断層系の最新活動に伴って、長野県松本市の牛伏寺断層を含む、白馬村の神城断層から山梨県小淵沢の下葛木断層に至る区間が単一の固有地震を生じたと考えられてきました¹⁰⁾。この大地震は西暦841年か762年の歴史地震に対応するとされてきました。しかし、地震時変位量に着目した最近の調査研究によれば、約1200年前の最新活動サイクルでは、いわゆる中部横ずれ断層区間の諏訪湖をセグメント境界として、北側と南側で別々の大地震を生じた可能性が判明しています¹¹⁾。今後、より多数の地点で地震時変位量を復元することにより、過去の連動範囲を詳細に解明でき、長大な活断層系における連動型地震の発生頻度や、連動パターンと地震規模を検討できるものと期待されます。

参考文献

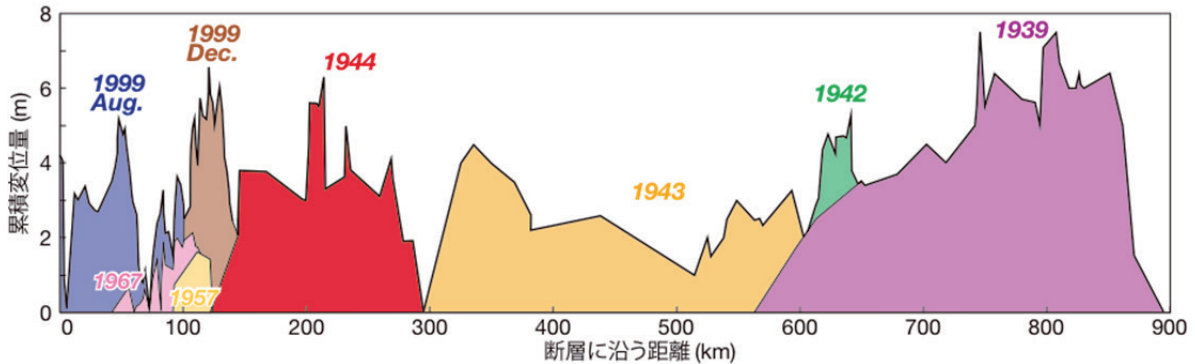
- 1) 松田時彦：活断層からの長期地震予測の現状 - 糸魚川-静岡構造線活断層系を例にして - ，地震第2輯，50，23-33，(1998)
- 2) Schwarz, D. and K. Coppersmith: Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones, *JGR*, 89, 5681-5698, (1984)
- 3) Gutenberg, R., and C.F. Richter: Frequency of earthquakes in California, *BSSA*, 34, 185-188, (1944)
- 4) Ambraseys, N. and C. Finkel: *The seismicity of Turkey and adjacent areas: A Historical Review, 1500-1800*, 240p, Eren Yayincilik, Istanbul, (1995)
- 5) Barka, A.: Slip distribution along the North Anatolian fault associated with large earthquakes of the period 1939-1967, *BSSA*, 86, 1238-1254, (1996)
- 6) Kondo, H., Awata, Y., Emre, Ö., Dogan, A., Özalp, S., Tokay, F., Yildirim, C., Yoshioka, T. and Okumura, K.: Slip Distribution, Fault Geometry, and Fault Segmentation of the 1944 Bolu-Gerede Earthquake Rupture, North Anatolian Fault, Turkey, 95, 1234-1249, (2005)
- 7) Kondo, H., V. Özaksoy, and C. Yıldırım: Slip history of the 1944 Bolu-Gerede earthquake rupture along the North Anatolian fault system: Implications for recurrence behavior of multisegment earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 115, B04316, doi:10.1029/2009JB006413, (2010)
- 8) Ambraseys, N.: Some characteristic features of the Anatolian fault zone, *Tectonophysics* 9, 143-165, (1970)
- 9) Kase, Y., H. Kondo, O. Emre: Dynamic rupture process of the great 1668 Anatolian earthquake, *Geophysical Research Abstracts Vol. 12*, EGU2010-6520, (2010)
- 10) 奥村晃史・井村隆介・今泉俊文・東郷正美・澤 祥・水野清秀・刈谷愛彦・斉藤英二：糸

魚川— 静岡構造線活断層系北部の最近の活動—神城断層・松本盆地東縁断層トレンチ発掘調査—地震第2輯,50,35-51, (1998)

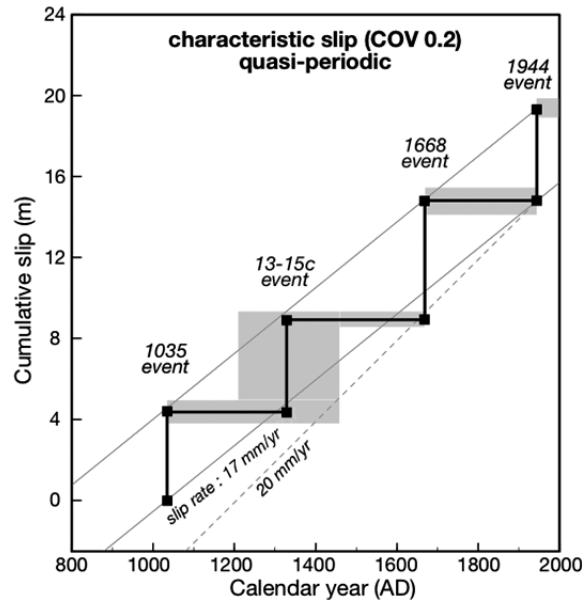
- 11) 近藤久雄・谷口薫・杉戸信彦：糸魚川-静岡構造線活断層系の最新活動に伴う新たな古地震像.日本地球惑星科学連合 2014 年大会,SSS34-14, (2014)



第1図 古地震調査により復元された地震時変位量に基づく連動性評価の模式図
 Fig1 Schematic diagrams associated with paleoseismological reconstruction of past multi-segment earthquakes produced by active fault system.

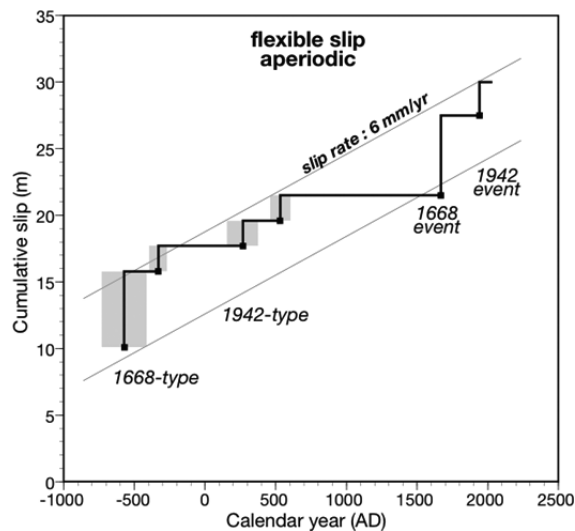


第2図 北アナトリア断層系で生じた20世紀の大地震に伴う変位量分布
 Barka (1996), Kondo *et al.* (2005)を基に一部改変。
 Fig2 Slip distribution due to surface rupturing earthquakes occurred in the 20th century along the North Anatolian fault system, Turkey. Modified from Barka (1996) and Kondo *et al.* (2005).



第3図 1944年地震断層デミル・テペ地点における時間—変位ダイアグラム
 4回の古地震イベントはいずれも連動型地震と考えられ、地震断層長（連動範囲）がそれぞれ異なると見られるが、この地点で同程度の地震時変位が繰り返されている。
 Kondo *et al.* (2010)を引用。

Fig3 Time-slip diagram on the 1944 Bolu-Gerede earthquake, M7.5, on the North Anatolian fault system. Reconstructed paleo-slips associated with the most recent four earthquakes exhibit nearly the same amount with quasi-periodic recurrence interval. After Kondo *et al.* (2010).



第4図 1942年地震断層アイワズ地点における時間—変位ダイアグラム
 6回の古地震イベントのうち、地震時変位量は1942年タイプの約3mと1668年タイプの約6mのイベントに大別され、後者が連動時の地震時変位と考えられる。

Fig4 Time-slip diagram on the 1942 Erbaa-Niksar earthquake, M7.0, on the North Anatolian fault system. Reconstructed paleo-slips associated with the most recent six earthquakes do not

indicate characteristic slip. The amount of slips is likely to be bimodal and flexible through seismic cycles. The smaller slips correspond to the 1942 type earthquake, and the larger slips seem to be the 1668 type of multi-segment earthquakes.