地殻災害軽減の基礎を担う地質学： 震源断層解明作業への寄与

伊藤谷生

1. はじめに

地殻災害の軽減のために地質学がなさねばならないことは多岐にわたるが、ここでは幾度となく深刻かつ重大な打撃を人間社会に与えてきた地震動災害に焦点をあてる。こう書くと、“では、活断層についてですか”と問われる方も多いであろう。確かに近年、活断層をめぐる社会的な関心が急速に高まっているが、より本質的な対象は地震を引き起こし、地震動災害をもたらす地下の震源断層である。地表で観察あるいは推定される活断層を含む活構造は、震源断層との関連が示されることによってその意味を正確に評価できる。

さて、その震源断層は、無構造の均質な“更地”に形成されているのではなく、地質学的時間スケールで進行する地殻変動によって成長あるいは変革・解体される地殻構造の重要な一要素として存在することに留意しておく必要がある。そして、その地殻構造は、近年、地質学が扱う構造スケールまで地球物理学的手法によってイメージされつつある。地質学は、これらの成果と積極的に連結することによって、震源断層を特定し、地震発生域における形状、運動のセンスとその規模などを解明する基礎作業に大きく寄与しなければならない。本小論では、ようやく軌道に乗りつつあるその作業の実例とそこから導かれる教訓を二つほど紹介するとともに、なお残されている新たな課題の一つにも言及する。

2. 地殻構造のなかでの震源断層： リフト東縁における反転構造の例

内陸ならびに沿岸域において震源断層を抽出するうえで日本列島の地殻変動に深く関与する主要な地質構造を理解しておくことは非常に重要である。具体的には、白亜紀後期に形成された中央構造線、中新世初～中期の日本海拡大に伴うリフト構造、中新世中期の日本列島屈曲をもたらした構造、伊豆弧衝突・千島弧衝突によって形成された構造などが挙げられる。これらの構造を理解することの重要性について、東北日本において形成されたリフト構造を例にとり示す。

図1 東北日本におけるリフト東縁の推定 (Sato, 1994)。黒太線が重力異常急勾配帯。星印は震央位置、数字は発生年。

日本海拡大時に形成されたリフト内ならびにその縁辺の正断層群が、東北日本弧がおよそ3～5 Maから短縮場への変化に伴い反転して逆断層としての運動を開始したことは、中村他 (1990) ならびに中村 (1992) によって指摘された。これを受け、この反転構造の

重要性の議論が広くなされる中で、重力異常急勾配帯と新第三系堆積層の厚さの分布から東北日本における反転構造の大枠を示したのがSato (1994, 1996) である。しかし、先新第三系と新第三系の境界をなす北上山地西縁がかつてのリフト東縁であるとの指摘 (図1) はされたものの、それが活構造として反転運動を直接担っていることが明らかとなったのは2003年の宮城県北部地震とその後の地震観測 (Umino et al., 2003)、反射法地震探査 (Kato et al., 2006) によってであった。そして、1900年、1962年に宮城県北部で、そしてその後2008年に岩手・宮城県境で起こった一連の地震活動が地殻構造の中で正確に位置づけられることとなったのである。

ここで指摘されなければならないのは、2003年宮城県北部地震が起こるまで北上山地西縁ならびにその近傍の活断層を含む活構造は旭山撓曲 (石井他, 1982) と若干の断層をのぞいてほとんどノーマークであったことである。このことは、重力、反射法地震探査などの地殻構造に関する地球物理学的データ、精密かつ稠密な地震観測データ、そして地質学的時間スケールで形成される地質構造の研究成果の結合があって初めて現在進行中の地殻変動を正確に理解する第一歩が踏み出せるという教訓を導く。北上山地西縁から下北半島へ続く想定されるリフト東縁の位置とその構造については未解明の部分が残されている。地表に現れている活構造だけでなく深部にいたるまでの地殻構造解明作

PROFILE

伊藤谷生
(いとう たにお)
帝京平成大学現代ライフ学部教授
専門：地殻構造学、構造地質学

業が急がれなくてはならない。

3. 震源断層とその浅部表現： 別府湾ならびに周辺における 中央構造線関連断層の例

地表に到達した、あるいは地形に変位を与えている断層は地下における震源断層の形状や運動をそのまま表現しているとは限らない。地表は自由表面であり、かつ、また、侵食と堆積の場でもあるからである。地表あるいは浅部における構造と震源断層との関連を明らかにすることの重要性は、中央構造線に関する最近20数年間の研究史がよく示している。

実のところ中央構造線に沿う横ずれ運動が確認されて以来、地表近傍での傾斜が鉛直ないし高角であることもあって中央構造線は深部に至るまで鉛直ないし高角であると信じられてきた。しかし、吉川 (1987) 以来の地震探査の積み重ねによって、中央構造線は40～45°北傾斜で浅部から下部まで地殻全体を切断することが確実となった (Ito et al., 1996; Ito et al., 2009; 伊藤・佐藤, 2010 など)。横ずれ運動に伴う地表

図2 別府湾及び周辺における活断層群と震源断層。活断層群は地震調査研究推進本部地震調査委員会（2005）、震源断層は山北他（2014）による。別府湾内の日出沖断層群、別府湾中央断層、杵築沖断層群は、震源断層である朝見川断層の、“佐賀関半島沖断層群”（仮称）は基盤内での中央構造線の、それぞれの運動に伴って別府湾堆積盆地新期堆積層内に形成された活断層である。震源断層はその構造をわかりやすく表現するために標高0 mにおけるトレースで示した（別府湾内の中央構造線は海面まで延長してある）。点線：反射法地震探査測線〔別府湾は由佐他（1992）、伊予海峡は阿部他（2013）〕。

での変位分配の結果生じる浅部高角断層をもつて震源断層としての中央構造線を評価することはできないのである。なぜなら震源断層の面が北に傾斜しているために、震源は地表で観察される活断層の直下ではなく北方に位置するからである。

中央構造線の活動と密接に関係して形成された別府湾という堆積盆地の場合はもっと複雑である。その別府湾では領家帯、三波川帯の基盤岩類とそれを覆う別府湾の新期堆積物に対して詳細な反射法地震探査が京都大学理学部（1989, 1992）と大分県（1999, 2000）によってなされている。地震調査研究推進本部地震調査委員会（2005）は浅部についての大分県等の調査結果を踏まえて、別府湾ならびに周辺の活断層の

評価を行い、図2に示されるような活断層分布図を公表した。一方、深部にいたるまでの構造については、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2005）に先立って由佐他（1992）が京都大学理学部（1989, 1992）の成果を基に発表し、近年、阿部他（2013）が別府湾の出口にあたる伊予海峡での反射法地震探査の再解析結果を報告している。山北他（2014）は別府湾の形成過程を合理的に説明するために、浅部構造と深部にいたる

までの構造を詳細に対応させ、京都大学理学部（1989, 1992）による別府湾内での稠密な重力調査結果をも用いて、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2005）が示した別府湾の活断層群を、基盤を深部に至るまで切断する断層と別府湾堆積盆地を埋積する新期堆積層内に留まる断層に区分した。その結果、約30°北傾斜の中央構造線とその開放性屈曲セグメントである北西－南東走向、北東傾斜の朝見川断層が連動して右横ずれ・正断層運動をし続けていること、この断層運動に伴って新期堆積物内に多数の断層が発生していることを示した。前者がこの地域の地殻変動を規定して別府湾堆積盆地を形成・成長させる震源断層であり、後者はそれに随伴して堆積盆地新期堆積層内に形成される断層である。

この別府湾の事例が示すように、地球物理学的手法によって表層から地下深部までの構造を解明することによって初めて震源断層とそれに随伴する断層を区分し、当該地域の地殻変動全体を把握することが可能となる。また、そのことによって地表ならびに浅部の構造から得られる活断層データの意義が鮮明になり、それらを正確に活用する道がひらかれるといえよう。

4. 沈み込むプレートの形状と地殻構造・地殻変動:新たな課題

内陸地震とプレート運動との関連を議論する際、従来は“遠地”を走るプレート境界（地

球表面トレース）に注目し、そこに境界条件を設定することがしばしばであった。しかし、日本列島に沈み込むフィリピン海プレートの形状が明らかになるにつれて、中部日本から近畿にかけての地殻構造と地殻変動にフィリピン海プレートの運動が“直下”から直接に関与している可能性が高いことが浮かび上がってきた。

弘瀬他（2007）によれば、フィリピン海プレート上面は伊勢湾の下から敦賀湾の下にかけて北西方向のヒンジをもつ緩やかな尾根状構造を示す（図3）。この尾根状のフィリピン海プレートと日本列島の地殻との関係が最近の二つの深部反射法地震探査で明らかとなった。一つは2006年に行われた比叡の西方から琵琶湖、養老山系を越えて濃尾平野にいたる大大特（大都市大震災軽減化特別プロジェクト）『近江2006』である。そこにはフィリピン海プレートが養老山系の下で下部地殻を構造的に侵食しつつ、西方の地殻全体を引きずり下げていることが明瞭に示されている（佐藤, 2007）。かつて池田（1992）の指摘した琵琶湖周辺から若狭湾にいたる地殻全体の継続的沈降の根拠が明らかにされたのである。もう一つは琵琶湖北端付近の余呉湖から根尾をへて郡上八幡西部に至る『北美濃2009』（伊藤, 2011）である。ここではフィリピン海プレート上面から日本列島地殻のモホまでわずか数kmであり、しかもフィリピン海プレート上面の尾根状構造と調和的にモホ面の形状も上に凸であるように見える。これらのことから、沈みこむフィリピン海プレート上面の構造と運動

図3 近畿～中部日本内帯の構造。TITL：敦賀湾伊勢湾構造線。淡灰色：美濃帯+領家帯。実曲線：フィリピン海プレート上面深度 (km) (弘瀬他, 2007)。「美濃帯+領家帯」中の破線：層理面ならびに片理面 (Kano, 1990)。2006：大大特近江2006測線。2009：北美濃2009測線。MTL：中央構造線。ISTL：糸魚川静岡構造線。ATL：赤石構造線。

が上位の日本列島地殻構造と地殻変動に直接的な影響を与えていることが強く示唆されていると考えるべきであろう。これは遠地に境界条件を設定する従来型とは異なる新たな課題である。

そこで注目されるのは、この尾根状構造のヒンジの上位にあたる上部地殻内には、岡山(1956)によって指摘された敦賀湾から伊勢湾にいたる活断層群のほぼ直線的な配列(敦賀湾伊勢湾構造線)である。加えて、この敦賀湾伊勢湾構造線は中新世の日本列島屈曲時における地殻構造の大変更に伴って内帯側上部地殻に形成されたメガキンのヒンジ(Kano, 1990)にほぼ相当している。敦賀湾伊勢湾構造線を構成する活断層群の性質は一樣ではないが、個々の活断層に特化した手法ではなく全体をある幅を持った構造帯としてとらえ、フィリピン海プレートの沈み込みの形状や歴史、中部・近畿の地殻構造と併せて注意深く研究する必要がある。そうしてこそ上部地殻内の活断層群を正確に評価できるであろう。

5. 終わりに

近年、構造地質学の分野では断層岩の研究が著しく前進しており、断層運動の場(温度・圧力などの物理条件、流体の存否)、発生する摩擦熱、運動のセンスとその履歴などの重要な情報が獲得できるようになりつつある。また、Yamaji (2007) が体系化した多重逆解法による

小断層解析からは断層運動の履歴や応力状態についての情報が得られる。内陸震源断層に対してではないが熊野灘沖では海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」による南海トラフ地震発生帯掘削(2009～2013年度新学術領域『超深度海溝掘削』:代表者=木村学)が国際統合深海掘削計画(IPOD)のプロジェクトとして進められ、大きな成果をあげている(新学術領域『超深度海溝掘削』, 2013)。これらの諸成果が減災プログラムにも効果的に動員できるよう分野間の連携態勢が求められよう。

文献

- 阿部 進・新色隆二・猪野 滋 (2013) 多重反射波の予測及び抑制処理の最適化. 物理探査学会学術講演会講演論文集, 128, 114-116.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川 昭 (2007), Double-Difference Tomography法による西南日本の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定. 地震2, 60, 1-20.
- 池田安隆 (1992) 下部地殻の変形とそれに起因する地表変形: 近畿三角帯の第四紀テクトニクス試論. 月刊地球, 14, 137-144.
- 石井武政・柳沢幸久・山口昇一・寒川旭・松野久也 (1982) 松島地域の地質, 地域地質報告 (5万分の1図幅). 地質調査所.
- 伊藤谷生 (2011) 2008～2010年度科学研究費補助金『基盤研究S』研究成果報告書. <https://kaken.nii.ac.jp/pdf/2010/seika/jsps/12501/20224016seika.pdf>
- 伊藤谷生・佐藤比呂志 (2010) 西南日本における海溝—島弧—縁海系の地殻構造—南海トラフから大和海盆北縁まで—. 地学雑誌, 19, 235-244.
- Ito, T., Ikawa, T., Yamakita, S. and Maeda, T. (1996): Gently N-dipping Median Tectonic Line (MTL) revealed by recent seismic reflection studies, southwest Japan. Tectonophysics, 264, 51-63.
- Ito, T., Kojima, Y., Kodaira, S., Sato, H., Kaneda, Y., Iwasaki, T., Kurashimo, E., Tsumura, N., Fujiwara, N., Miyauchi, T., Hirata, N., Harder, S., Miller, K., Murata, A., Yamakita, S., Onishi, M., Abe, S., Sato, T. and Ikawa, T. (2009): Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated seismic experiment Southwest Japan 2002. Tectonophysics, 472, 124-134.

- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2005) 別府一万山断層帯の評価. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_beppu/
- Kano, K., Kosaka, K., Murata, A., & Yanai, S., 1990: Intra-arc deformations with vertical rotation axes: the case of the pre-Middle Miocene terranes of Southwest Japan. *Tectonophysics*, 176, 333-354.
- Kato, N., Sato, H., and Umino, N. (2006) Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan, *Journal of Structural Geology*, 28, 2011-2022.
- 京都大学理学部 (1989) 昭和63年度別府湾地質構造探査報告書.
- 京都大学理学部 (1992) 平成2年度豊後水道地質構造探査報告書.
- 中村光一・石原文実・駒沢正夫 (1990) 金華山沖海底地質図 1:200,000. 海底地質図33, 地質調査所.
- 中村光一 (1992) 反転テクトニクスとその地質表現. 構造地質, 38, 2-45.
- 岡山俊雄 (1956) 柳ヶ瀬断層と敦賀湾伊勢湾線. 駿台史学, 7, 75-101.
- 大分県 (1999) : 平成10年度地震関係基礎調査交付金別府一万山断層帯に関する調査成果報告書.
- 大分県 (2000) : 平成11年度地震関係基礎調査交付金別府一万山断層帯に関する調査成果報告書.
- Sato, H. (1994) The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *Journal of Geophysical Research*, 99, 22261-22274.
- 佐藤比呂志 (1996) 日本列島のインバージョンテクトニクス. 活断層研究, 15, 128-132.
- 佐藤比呂志・平田直・岩崎貴哉・瀧澤一起・伊藤潔・梅田康弘・伊藤谷生・笠原敬司・加藤直子 (2007) 大深度弾性波探査 3.1.3. 近畿地殻構造探査 (近江測線). 大都市大震災軽減化特別プロジェクト1 地震動 (強い揺れ) の予測「大都市圏地殻構造調査研究」(平成18年度) 成果報告書, 87-214.
- 新学術領域『超深度海溝掘削』(2014) ニュースレター No.4. <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantro~/index.html>
- Umino, N., Okada, T., Nakajima, J., Hori, S., Kono, T., Nakayama, T., Uchida, N., Shimizu, J., Suganomata, J., Gamage, S., Hasegawa, A., Asano, Y. (2003) Hypocenter and focal mechanism distributions of aftershocks of July 26 2003 M6.4 northern Miyagi, NE Japan, earthquake revealed by temporary seismic observation. *Earth Planets Space* 55, 719-730.
- Yamaji, A. (2007) *An Introduction to Tectonophysics: Theoretical Aspects of Structural Geology*. Terrapub, Tokyo, 400p
- 山北 聡・工藤 健・伊藤谷生 (2014) 重力から見た別府湾ならびに周辺の地下構造. 日本地球惑星科学連合大会予稿集, SCG68-09.
- 吉川宗治・岩崎好規・井川猛・黒田 徹・横田 裕 (1987) 紀伊半島西部地域における中央構造線の反射波構造. 地震学会講演予稿集, 昭和62年度春季大会, 319.
- 由佐悠紀・竹村恵二・北岡豪一・神山孝吉・堀江正治・中川一郎・小林芳正・久保寺章・須藤靖明・井川猛・浅田正陽 (1992) 反射法地震探査と重力測定による別府湾の地下構造. 地震, 2輯45 (2), 199-212.