北部本州背弧域の地殻構造と震源断層

Crustal structure and earthquake source faults on the backarc side of northern Honshu, Japan

佐藤比呂志* 加藤直子*

Hiroshi Sato and Naoko Kato**

2008年5月30日受付.

2009年10月5日受理.

* 東京大学地震研究所
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

Corresponding author: H. Sato,
satow@eri.u-tokyo.ac.jp

Abstract

The backarc side of northern Honshu is marked by an arc-parallel fold-and-thrust belt. Historical and instrumental records suggest that this belt is the site of frequent, shallow, damaging crustal earthquakes. To improve our estimates of strong ground motions and to evaluate the risk of damaging earthquakes, it is important to identify the locations of seismogenic source faults beneath the thick cover of Neogene sediments in this region. Based on deep seismic reflection profiling and the distribution of aftershocks associated with damaging earthquakes, we assessed the relationship between an earthquake source fault and geological structure at several areas in northern Honshu. Reverse movement along Miocene normal faults is dominant along the fore-arc side of the Miocene backarc rift system. Source faults dip at moderate to high angles, reflecting their origin. On the backarc side, a shallow detachment is developed within upper Miocene mudstone, and thin-skinned tectonics are dominant within the sediment cover. The relationship between the deep-seated source fault in the Niigata sedimentary basin and the sedimentary cover remains a topic of controversy, mainly because of the occurrence of >6 km of sediments within the basin and the possible existence of a ductile mudstone layer within the lower part of the succession. Given the great thickness of the sedimentary cover, deep seismic profiling is required to understand the nature of the source fault.

Keywords: seismogenic source fault, fold and thrust belt, damaging earthquake, northern Honshu

はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、地震による被害の低減を目的とした活断層の調査研究が進展してきた。地震に伴う災害を予測するためには、活断層－震源断層を地質構造の中で評価することが極めて重要である（佐藤ほか, 2001）。強震動の予測にとって重要なパラメーターは多数あるが、震源断層の位置・形状は最も基本的な情報の一つである。一方、活断層のマッピングは変動地形的な調査・研究によって、日本列島全域にわたって1970年代から行われ（活断層研究会編, 1980）、近年ではさらに詳細な地形判読結果が公表されている（例えば、中田・今泉編, 2002）。これらは平面的な情報であるが、強震動予測の必要性から、表層のデータをもとに震源断層が推定されている。カリフォルニア州では、構造地質学者が中心となって作成した三次元の震源断層モデルが提案されているが（Plesch et al., 2007）、国内では断層モデルの構築に地質情報が活用されることは稀である。マグニチュード7程度の大きな地震を起こす断層は、その地域の主要な断層であり、地質構造の形成にも少なからず影響を及ぼしてきた。地下深部の震源断層と地表の活断層－活褶曲のシステムについて明らかにしていくことは、社会から強く要請されて

いると同時に、構造地質学の長年にわたる重要な課題の一つである。

東京大学地震研究所を中心とする研究グループは、震源断層の三次元マッピングを主要な課題として90年代半ばから、反射法地震探査を用いた活断層の深部形状についての研究を行ってきた。ここでは、東北日本背弧域において反射法地震探査を用いて行った研究成果をもとに、現在まで明らかになってきた地質構造と震源断層との関係について紹介する。とくに新潟堆積盆地のように7 kmに及ぶ堆積層の下にある震源断層の推定に際しては、構造地質学的にも多数の未解決の問題を含んでいる。最後にこれらの問題について整理し、今後の課題について述べる。

東北地方中部太平洋側から 奥羽脊梁山脈に見る活断層の深部形状

奥羽脊梁山脈は東北日本の背弧側に位置する二列の島弧に平行な方向の隆起帯の一つであり、東北中部では両端を南北方向の逆断層に境されたポップアップ構造を示す。また、東北日本の日本海沿岸には厚い新第三系の堆積層が分布するfailed riftである堆積盆地が位置している（Fig. 1）。島弧スケールでの東北日本を横断する大規模な地殻構造探査が、地

Fig. 1. Major geological structures of Northern Honshu, Japan, after Sato (1994). Stars represent the epicenters of recent damaging earthquakes. 1: 2003 northern Miyagi Earthquake (Mj6.4; Umino et al., 2003), 2: 2004 Mid-Niigata prefecture Earthquake (Mj6.8; Sakai et al., 2005), 3: 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake (Mj6.8; Hirata et al., 2007).

震予知計画の一環として、1997年に実施された (Iwasaki et al., 2001; Fig. 2). 同時に1896年の陸羽地震の震源域を含めて奥羽脊梁山地を横切る地殻構造探査が97年と98年に実施された (Sato et al., 2002a). この探査は、断層の深部延長を含む地殻内の詳細な構造を深部反射法によって明らかにしようとした探査であり、その後の同様の探査のパイロット的な役割を果たした。陸羽地震の際に活動した千屋断層の深部延長は往復走時で5秒前後まで追跡され、地殻中部ではほぼ水平なデタッチメント断層となっている (Fig. 2b). 相対的に角度が急な部分では断層面反射は軽微であり、反射面のパターンの不連続から断層の形状を推定した。地震発生層の下限付近の往復走時4.5秒前後から東に緩く傾斜した反射面が顕著になっている。千屋断層の深部延長は、地下13 km程度までの地震発生層を中角度で断ち切り、全体としてはthick-skinned テクトニクスの変形様式を示している。

千屋断層の先端部の構造については高分解能反射法地震探査が実施され、深さ1 km程度の浅層のデタッチメントからランプを伴って断層が地表に出現する地表出現衝上断層 (emergent thrust) としての特徴が明らかになった (Fig. 2a: 佐藤・平田, 1998; 佐藤ほか, 2006a; 楮原ほか, 2006). 断層は千屋丘陵を構成する上盤の地層の傾斜と平行で、秋田堆

積盆地の船川層に対比される弥勒層 (臼田ほか, 1976) の泥岩中に形成されている。このように新第三系堆積層の厚い背弧側では新第三系の変形様式は、堆積層中ではthin-skinned テクトニクスによる変形様式が卓越している。

北上低地帯を横切る反射法地震探査が、1999年に石油公団 (現 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構) によって実施された (石油公団, 2001). 取得されたデータの再処理を行い、中新世に形成された西側低下のいくつかの正断層群からなる背弧リフト縁辺域の構造が明らかになった (Kato, N. et al., 2006b; Fig. 2c). いくつかの正断層の中で、最も低角度のものが逆断層として再活動しており、リストリックな形状の正断層の高角部分をショートカットして形成されるfootwall short-cut thrustも見られる。

2003年に発生した宮城県北部地震 (Mj6.4) は類似した背弧リフト縁辺での正断層の逆断層としての再活動を実際に示した。宮城県北部地震を発生させた震源断層は、東北大学の詳細な余震分布 (Umino et al., 2003) と地震後に実施した反射法地震探査の結果 (Kato et al., 2004) を総合すると、北上山地西縁に伸びる重力異常の急変帯下に存在する西側低下の背弧リフトの東縁を限る正断層が、逆断層として反転運動して発生した地震であることが明らかになった。こうした盆地反転については、すでに中村 (1992) によって指摘されていたが、地震後に行われた研究によって地震発生層全体の断層の反転運動であることが明らかになった (Kato et al., 2004). 早くから指摘されていた日本海東縁の反転運動 (Okamura et al., 1995) を含め、東北日本弧ではリフト正断層の逆断層としての反転運動が、基本的な構造運動の様式を支配している。

山形県北西部新庄盆地の地質構造にみる

thin-skinned テクトニクス

新庄盆地は活褶曲が初めて記載された地域で、厚い新第三系が南北方向の軸跡を示す褶曲を形成して分布する (大塚, 1942; 杉村, 1952; 佐藤, 1986; Fig. 3). これらの褶曲に直交する測線で、石油資源開発株式会社によって1982年と83年に反射法地震探査データが取得された。このデータは、パイプロサイズ (IVI Y900) 4台で、スweep長は14秒、周波数は10–55 Hz、発震点で30回の重ね合わせが行われている。受振点間隔25 m、発震点間隔50 m、96チャンネルの探鉱機 (Gus Bus) を使って記録されたものである。これらのデータを再解析した深度断面の一部をFig. 3bに示す。深さ1.5 km以浅では、地表地質や浅層反射から推定される褶曲 (佐藤, 1986; 佐藤ほか, 2006c) と調和的な構造が明瞭である。しかしながら、深さ2 kmの草薙層や古口層などの珪質泥岩や黒色泥岩が分布する層準では、緩傾斜からほぼ水平な反射面が卓越する。したがって、浅部では砂岩主体の褶曲構成層と下位の泥岩層の間には構造的な不連続が想定される。褶曲は西側急傾斜の非対称な形状を示しており、基本的には断層関連褶曲として形成されたと推定されるが (Fig. 3c), 反射断面上で断層を明確に認定することは難しい。変動地形学的には、新庄盆地小国川沿いの褶曲群は東ほど早くから形成さ

Fig. 2. Deep seismic reflection profiles and schematic cross-section across the central part of northern Honshu. (a) Map showing the location of seismic sections A–C in (b) and the geological cross-section X–X' in (c). The thick solid line represents the receiver line of Iwasaki et al. (2001) and Nishisaka et al. (2001). Topography is based on a 250 m DEM provided by the Geographical Survey Institute of Japan. (b) Seismic reflection sections across the Senya Fault (A: Sato et al., 2006a), the Ou Backbone Range (B: Sato et al., 2002a), and the Kitakami Lowland (C: Kato et al., 2006b). (c) Schematic geological cross-section through the central part of northern Honshu. Crustal thickness and geometry of the upper crust are based on the p-wave velocity structures reported by Iwasaki et al. (2001) and Nishisaka et al. (2001). Upper crustal structure around the Japan Sea coast is after Sato et al. (2004); in other volcanic arcs, it was estimated from the seismic sections shown in A–C. Geological data are from the Editorial Committee of the Geology of Tohoku for Civil Engineers (2006) and references therein.

れ、この褶曲を形成した衝上断層群は順次活動領域を西方に広げてきた過程が推定できる (佐藤, 1986; 鈴木, 1988). こうした衝上断層の前方移動は、千屋断層での船川層相当の泥岩層中の浅部デタッチメントのような、草薙層・古口層中の低角衝上断層 (もしくは剪断帯) の前進によって達成された可能性が高い。これらの褶曲—断層運動は、新庄盆地東縁の経壇原断層 (Fig. 3c) の活動とともに進行したと推定され、基本的には基盤を中角度で断ち切る断層から浅部で派生した衝上断層の前進によって、新第三系堆積層に褶曲が構成されている (Fig. 3c). 新庄盆地内のブーグ異常は、前述した南北方向の褶曲にもかかわらず全体としては平坦な値を示し (広島ほか, 1991), 褶曲が主として堆積層内の変形に留まっているという推定と調和的である。thin-skinned テクトニクスとしての新第三系堆積層の変形様式は、山形県北西部の庄内平野東縁の褶曲—衝上断層帯にも見ることができる (加藤ほか, 2006a; Fig. 3c).

横手盆地東縁や新庄盆地東縁などの構造をもとに、震源断層から堆積層にいたる断層形状の概念図を示した (Fig. 4). 厚さ 13 km 程度の地震発生層を断ち切る中角度の逆断層が厚い堆積層中に達し、thick-skinned テクトニクスとしての変形様式を示す。こうした断層の先端部では、厚い堆積層の中で thin-skinned テクトニクスの変形様式を示し、とくに中—上部中新統の女川層—船川層相当層準にデタッチメントを形成し、断層関連褶曲を形成する (Sato et al., 2002b).

2004 年中越地震地域の地質構造と震源断層

近年、簡便な地震観測機器の充実によって、地震発生直後から稠密な余震観測が行われるようになってきている (例えば, Sakai et al., 2005). こうした多数の観測点での観測によって、震源決定精度や地震波トモグラフィーによる速度構造も極めて空間分解能の高いものになっている (例えば, Kato, A. et al., 2006). しかしながら、これらは地震後に得られる

Fig. 3. Schematic cross-section showing the geological structure beneath the Shonai Plain, Dewa hills, and Shinjo Basin, as well as a seismic section across the Shinjo Basin. (a) Index map showing the location of the geological and seismic sections. Topography is based on a 250 m DEM provided by the Geographical Survey Institute of Japan. (b) Depth-converted seismic section of the central part of the Shinjo Basin (labeled 'B' in (a)). Seismic data were acquired by Japan Petroleum Exploration Co. Ltd. in 1982 and 1983, and were reprocessed by the present authors. Borehole data are after Saga (1992). Ft: Top of the Furukuchi Formation, Kb: base of the Kusanagi Formation. (c) Schematic geological cross-section along the line Y-Y' in (a), based on Kato et al. (2006b), Ozawa et al. (1986), Tsuchiya et al. (1984), Ikebe et al. (1979), and Sato (1986). KDF: Kyodanbara Fault, K: location of the seismic section surveyed by Kato et al. (2006b), B: location of the seismic sections surveyed as part of Shinjo 83 and Shinjo 82, as shown in (b).

Fig. 4. Schematic diagram showing an active-source fault system in northern Honshu, modified from Sato et al. (2002b).

情報であって、地震前にどのような地震が発生するかを予測するためには、地震前から存在する地質構造を手がかりとして推定していかななくてはならない。こうした推定の予測精度を向上させるためには、実際の地震が発生した地域の地質構造と震源断層との関係を理解することが重要なアプローチとなる。こうした背景から、2004 年の中部地震 (Mj6.8) の際に地表地震断層が出現した魚沼市広神で高分解能浅層反射法地震探査を (Kato et al., 2005), 魚野川に沿って深部反射法地震探査を実施した (佐藤ほか, 2006b; Fig. 5)。深部反射では大型パイプロサイズ (IVI Y2400 2 台と同社 HEMI 2 台) 4 台を用い、標準発震ではスイープ周波数は 6–40 Hz、スイ

Fig. 5. Geological map of the Uonuma hills and interpreted depth-converted seismic section. (a) Geological map after Yanagisawa et al. (1986). (b) Seismic section after Sato et al. (2006b). (c) Relationship between the aftershock distribution of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake and geological structure. The cross-sectional view of the aftershock distribution is after Sakai et al. (2005). The numbers '1' and '2' represent the focal mechanisms of the mainshock and largest aftershock, respectively.

ープ長は 20 秒, スタック回数は 30 とした. 受振点間隔は 25 m であるであるが, 発震点間隔は 500 m と標準的な反射法地震探査に比べ粗い. 反射法地震探査断面と地表地質 (柳沢ほか, 1986)・ボーリング (津田, 1992) などによって解釈した断面を示した (Fig. 5b). 地震研究所によって 10 月 24 日から 28 日にかけて観測された余震分布 (Sakai et al., 2005) では, 西に傾斜した面に沿って分布する二つの余震群

が認められ, 西側の余震群は本震に関連し, 東側のものは最大余震に関連している (Fig. 5c). 本震に相当する断層面の浅部延長は, ほぼ Fig. 5b の CMP900–1000 付近の向斜西翼の急傾斜部に推定される断層および CMP1350 付近の六日町断層に延長される. 六日町断層はその東側の水平な反射面が卓越する領域と, 西傾斜の反射面の卓越する領域を境し emergent thrust として現れている. 魚野川沿いの測線の北

Fig. 6. Geological cross-sections through the Nishiyama hills. (a) Geological map of the epicentral area of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake around the Nishiyama hills, simplified from Kobayashi et al. (1991, 1993, 1995, 2002). (b) Thin-skin model based on Japan National Oil Corporation (1999). (c) High-angle fault model based on Imamura (2000) and Kato (1993).

方の広神 2004 測線 (Fig. 5a) で実施した反射法地震探査 (Kato et al., 2005) でもこの断面 (Fig. 5c) と同様に、六日町断層は emergent thrust として現れており、この断層に沿って中越地震に伴う地表変位が報告されている (Maruyama et al., 2005). 地震学的な知見と反射法地震探査の結果から判断して、深さ 15–5 km において高角度 (60°), 浅層部分で低角度 (30°) になると推定される (Sato and Kato, 2005). 浅層部分での断層は必ずしも、高角度の断層と連続している必要はなく、後述するように流動層が介在してもかまわない. こうした全体の構造は東山背斜の下に高角度の震源断層をおき、面積バランスをさせながら上盤側を隆起させることによって、作り出すことができる (Kato et al., 2005; Okamura et al., 2007). 大局的には高角度の断層はリフティングの際に形成された正断層の再活動である可能性が高いが、正断層運動の詳細を復元できるほどの地下情報は得られていない.

2007 年中越沖地震と新潟平野の震源断層についての諸問題

2007 年 7 月 16 日に発生した中越沖地震 (Mj6.8) は、2004 年の中越地震 (Mj6.8) の震源域の西方の近接した地域で発生した. 主要な震源断層としては東傾斜の逆断層と推定されているが、北部で北西傾斜の断層も本震時に活動した可能性が高い (平田ほか, 2008). 北西傾斜の断層は東北日本の内陸活断層で最大級の平均変位速度を有する長岡平野西縁断層帯 (総理府地震調査推進本部地震調査委員会編, 1999) と近接することから、ここではとくに北西傾斜の断層の浅部延長である陸域の構造に注目する. 今回の地震が周辺の震源断層群にどのような影響を与えるかを理解しようとする時に、

基本的な問題は活断層や活褶曲を生み出しているそれらの深部延長の構造が不明なことである. 西山丘陵周辺は古くから石油・天然ガス資源の物理探査や、深さ 6 km を越える深部掘削が行われ、断面図が作成されている (Fig. 6). 西山丘陵を横切る断面としては大きく二つの構造解釈が提案されている. 一つは下部寺泊層中にほぼ水平な断層 (デタッチメント) を推定し、断層関連褶曲として褶曲を説明するものである (Fig. 6b; 石油公団, 1999). この場合、グリーンタフ上面の分布深度の違いは、日本海拡大期に形成された正断層によって生じたものと解釈される. もう一つの解釈では、椎谷層などの砂岩層より下位の泥岩はダイヤピール状の流動変形をして褶曲をつくり、グリーンタフ層準とその下位の岩石中には高角度の逆断層が推定されている (Fig. 6c; 今村, 2000; 加藤, 1993). 指摘されているデタッチメントや、泥岩層の流動変形は、国土地理院が見出した小木ノ城背斜西翼の隆起と調和する (小荒井ほか, 2008). いずれの断面においても、堆積層上部の地層の長さは、基盤上面の地層の長さを上回る. この余剰な堆積層の長さはデタッチメントモデルでは、西方からの水平短縮によって説明され、高角逆断層モデルでは褶曲構成層下部の流動によって説明されることになる. しかし、震源断層の推定にとって重要なより深部の構造については、よく拘束されておらず基本的な構造の捉え方に大きな隔たりを生んでいる. デタッチメント型 (Fig. 6b) であれば、中越沖地震の震源断層とデタッチメントを介して鳥越断層と連続する可能性がある. また高角度断層型 (Fig. 6c) だとすれば、鳥越断層は中越沖地震の震源断層として活動した北西傾斜の断層とは別の断層系と判断される.

Fig. 7. Schematic cross-sections showing two different interpretations of the source fault from the same set of shallow geological data, based on Tozer et al. (2002).

今後の課題について

新潟平野の褶曲の形成メカニズムについては、石油・天然ガスを産出したこともあり、古くから多数の研究がなされてきた。しかしながら、長岡など6kmを越す新第三系の堆積岩の下位の先新第三系（以下基盤岩とよぶ）中の断層運動と褶曲の形成との関係については、多くの不明な点が残されている。つまり、中上部地殻までを含む地質構造形成についてのモデルは構築されておらず、堆積盆地の形成から現在の地質構造の形成までが定量的に説明されていない。これまで、大きく二つの観点から褶曲の形成が考えられてきた。一つは、水平方向からの短縮変形によるもの（例えば、小松, 1990）、もう一つが基盤の垂直な動きによって褶曲が形成されるという考えである（鈴木ほか, 1971, 1974）。新潟地域で観測されている大規模な震源断層は逆断層であり、一般的な応力条件下では逆断層として動きうる角度の上限（lockup angle）は60度である（Sibson and Xie, 1998）。したがって、ほぼ垂直に近い断層が逆断層として活動することは困難であり、後者の考えは成立しない。

残る問題は、thick-skinned か thin-skinned テクトニクスかという問題である（Fig. 7; 例えば, Tozer et al., 2002）。この問題は、厚い堆積層下の基盤中の断層の位置の推定に大きな影響を及ぼすとともに、地質時代に達成された水平短縮量の推定に大きな影響を与える。Fig. 7に示したような thick-skinned テクトニクスによる positive inversion の場合、大局的には褶曲の下に高角度の震源断層が推定できる。thin-skinned テクトニクスを重視する考え方では、堆積層中のランプによって背斜が形成される。この場合、震源断層に相当する主要断層はランプによって形成される背斜の外側に推定される。こうした地下構造の差・形成メカニズムの違いによって、想定される震源断層の位置が大きく異なり、想定される地震による強震動領域も大きく変化する。これらのモデルは必ずしも二者卓越ではなく、二つのメカニズムが組み合わされたモデルを想定することもできる。

イラン南西部にのびるザクロス褶曲帯では流動性の高い岩塩層が地下約8kmに位置し、基盤の断層運動とその上位の堆積層の変形を隔てていることが知られている（例えば、Molinari et al., 2005）。こうした流動性の高い層の存在は、基盤の断層運動と堆積層中の褶曲の形成の関係をより複雑なものにしている。小松（1990）は、新潟平野下の寺泊層などは高压泥岩として高い流動性を有することを指摘し、西山丘陵上の背斜はこうした高压泥岩の側方流動によって形成された可能性を指摘している。新潟平野においても、下部寺泊層などの流動化は、地震を発生させる基盤中の断層運動と、その上に重なる堆積層の変形を複雑にさせている可能性が高い。

このように新潟堆積盆地に代表されるように、厚い堆積層に覆われている failed rift である秋田堆積盆地から北部フォッサマグナにいたる地域の、褶曲の形成と基盤岩中の断層運動については、社会的要請にも関わらず多くの未解決の問題が残されている。最も大きな問題は、地下構造の不明にある。新潟平野については資源探査を目的とした様々な物理探査が実施されているものの、地殻中部をターゲットにした探査すら皆無である。これまで述べてきたように、東北日本のアクティブテクトニクスは、既存の断層、とくに日本海形成時に活動した断層系の再活動に大きく支配されている。この時期に形成された断層群のうち、現在の応力状態で最も動かし易い断層面を使ってひずみを解放している。したがって、断層の形成史、どのような断層系で堆積盆地が形成されたのかを明らかにすることは、現在のテクトニクス・震源断層を理解する上で基本的に重要である。このためには、リフティングに伴って形成された傾動ブロックの判定が可能な程度の基盤上面の形状の情報が必要であり、モホ面の形状は pure shear 型か simple shear 型かなどの基本的なリフト形成機構の推定には不可欠である。こうした構造探査の結果に基づいて、盆地形成・解体のモデル化を行い、それらをモデル実験・数値実験によって検討し、地質・岩石情報との相互検討によって、褶曲形成のメカニズムと震源断層との関連を検証してい

く研究が必要になる。

平成 20 年度から 5 カ年計画で文部科学省の「ひずみ集中帯の重点観測調査研究」(代表: 防災科学技術研究所 小原一成) が開始され, その一環として信濃川断層帯から長岡平野西縁断層帯にかけての地殻構造探査が予定されている。このプロジェクトの重要なミッションとして上げられているのが, 東北日本弧背弧域の褶曲一衝上断層帯における震源断層のマッピングである。この目的を達成するためには, 前述した褶曲の形成機構についての多角的なアプローチが重要な課題となっている。

ま と め

地震被害が多発する日本列島では, 震源断層の三次元マッピングが重要な課題となっている。ここでは反射法地震探査を基軸として, 東北地方の中部地域を中心に地質構造と震源断層との関連について実施してきた研究成果をとりまとめた。

- (1) 東北日本中部地域の脊梁山地から北上低地帯においては, とくに中新世の背弧リフト形成期の西傾斜の正断層が, 現在の応力場に対応して逆断層としての反転活動をしている。地震発生層の中でリトリックな形状を示す場合が多い。
- (2) 背弧域の堆積層が厚い地域では, 中部～上部中新統の泥岩層中のデタッチメントによって, 堆積層内では thin-skinned テクトニクスの変形様式を示す。
- (3) 新潟堆積盆地の活褶曲や活断層を評価するためには, 基盤岩中の断層との関係を明らかにする必要があるが, 現状では地下深部の情報不足によって, ユニークな地下構造断面を描くことができない。地殻構造の解明と, 多角的なアプローチによる基盤岩中の断層運動と堆積層中の変形プロセスの解明が, 地震災害軽減の観点からも必要になって来ている。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり, 千葉大学伊藤谷生教授, 東京大学地震研究所 平田 直教授・岩崎貴哉教授には御議論いただいた。地球科学総合研究所(株)川中 卓氏, 阿部 進氏, 井川 猛氏には, 反射法地震探査についてご助言をいただいた。石油資源開発株式会社には, 探鉱データの利用と公表の許可をいただいた。また, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(旧・石油公団)には, 資料の公表についての許可をいただいた。匿名査読者および編集を担当された産業技術総合研究所・活断層地震センター・岡村行信博士には有益な御助言をいただいた。ここで紹介した反射法地震探査断面の取得には, 地震予知研究経費, 文部科学省「平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震に関する緊急研究」経費, 科学研究費(14209004, 15800009, 17540431)を使用した。ここに記して謝意を表す。

文 献

平田 直・佐藤比呂志・加藤愛太郎・酒井慎一(Hirata, N., Sato, H.,

Kato, A. and Sakai, S.), 2008, 2007 年新潟県中越沖地震一震源断層の傾斜方向はなぜ分からなかったかー。科学(Kagaku), **78**, 506-510.

平田 直・佐藤比呂志・酒井慎一・加藤愛太郎(Hirata, N., Sato, H., Sakai, S. and Kato, A.), 2007, 2007 年新潟県中越沖地震の震源断層。科学(Kagaku), **77**, 930-934.

広島俊男・駒沢正夫・大熊茂雄・中塚 正・三品正明・斎藤和男・岡本国徳(Hiroshima, T., Komazawa, M., Okuma, S., Nakatsuka, T., Mishina, M., Saito, K. and Okamoto, K.), 1991, 山形地域重力図(ブーゲー異常)。1: 200,000。重力図 3 (Gravity map of Yamagata district, Bouguer anomalies, 1: 200,000, Gravity map series 3), 地質調査所(Geol. Surv. Japan).

池辺 稔・大沢 穠・井上寛生(Ikebe, Y., Ozawa, A. and Inoue, H.), 1979, 酒田地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の 1 図幅)(Geology of the Sakata Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 42p.

今村哲己(Imamura, T.), 2000, スラスト構造の解釈と評価ー特に岩石物性と応力分布, 運動像からの予測(新潟堆積盆地での解析例を基礎として)。石技誌(Jour. Japan. Assoc. Petrol. Tech.), **65**, 28-39.

Iwasaki, T., Kato, W., Moriya, T., Hasemi, A., Umino, N., Okada, T., Miyashita, K., Mizogami, T., Takeda, T., Sekine, S., Matsushima, T., Tashiro, K. and Miyauchi, H., 2001, Extensional structure in northern Honshu Arc as inferred from seismic refraction/wide-angle reflection profiling. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2329-2332.

楮原京子・今泉俊文・宮内崇裕・佐藤比呂志・内田拓馬・越後智雄・石山達也・松多信尚・岡田真介・池田安隆・戸田 茂・越谷 信・野田 賢・加藤 一・野田克也・三輪敦志・黒澤英樹・小坂英輝・野原 壯(Kagohara, K., Imaizumi, T., Miyauchi, T., Sato, H., Uchida, T., Echigo, T., Ishiyama, T., Matsuta, N., Okada, S., Ikeda, Y., Toda, S., Koshiya, S., Noda, M., Kato, H., Noda, K., Miwa, A., Kurosawa, H., Kosaka, H. and Nohara, T.), 2006, 横手盆地東縁断層帯・千屋断層の形成過程と千屋丘陵の活構造。地学雑(Jour. Geogr.), **115**, 691-714.

Kato, A., Sakai, S., Hirata, N., Kurashimo, E., Iidaka, T., Iwasaki, T. and Kanazawa, T., 2006, Imaging the seismic structure and stress field in the source region of 2004 mid-Niigata Prefecture earthquake; structural zones of weakness and seismogenic stress concentration by ductile flow. *Jour. Geophys. Res.*, **111**, B8, B08308.

加藤邦弘(Kato, K.), 1993, 基礎試推「三島」, 最近の我が国の石油開発, 石油技術協会創立 60 周年記念[Recent Development Oil Exploration in Japan, 60th Anniversary of the Japanese Association of Petroleum Technology]*. 石油技術協会(Japan. Assoc. Petrol. Technol.), 105-108

Kato, N., Echigo, T., Sato, H., Tateishi, M., Sakai, S., Ogino, S., Toda, S., Koshiya, S., Ito, T., Toyoshima, T., Imaizumi, T., Kato, H. and Abe, S., 2005, Geologic fault model based on the high-resolution seismic reflection profile and aftershock distribution associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake (M6.8), central Japan. *Earth Planet. Space*, **57**, 447-452.

Kato, N., Sato, H., Imaizumi, T., Ikeda, Y., Okada, S., Kagohara, K., Kawanaka, T. and Kasahara, K., 2004, Seismic reflection profiling across the source fault of the 2003 Northern Miyagi earthquake (Mj 6.4), NE Japan: basin inversion of Miocene back-arc rift. *Earth Planets Space*, **56**, 1255-1261.

加藤直子・佐藤比呂志・今泉俊文・越谷 信・戸田 茂・荻野スミ子・越後智雄・木村治夫・楮原京子・森下信人・小林 勉・高橋就一・梅津洋輔・水本匡起・吉田明弘・小池太郎・佐藤 良(Kato, N., Sato, H., Imaizumi, T., Koshiya, S., Toda, S., Ogino, S., Echigo, T., Kimura, H., Kagohara, K., Morishita, N., Kobayashi, T., Takahashi, S., Umetsu, Y., Mizumoto, T., Yoshida, A., Koike, T. and Sato, R.), 2006a, 庄内平野東縁活断層系松山断層における反射法地震探査。活断層研究(Active Fault Res.), **26**, 87-93.

Kato, N., Sato, H. and Umino, N., 2006b, Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 2011-2022.

活断層研究会編(The Research Group for Active Faults, ed.), 1980, 日本の活断層ー分布と資料[Active Faults in Japan, distribution map and the related materials]*. 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press),

- 363p.
建設技術者のための東北地方の地質編集委員会編 (Editorial Committee of Civil Engineering Geologic Map of Tohoku), 2006, 建設技術者のための東北地方の地質 [Civil Engineering Geologic Map of Tohoku, scale 1: 200,000]*. 東北建設協会 (Japan Institute of Construction Engineering), 407p.
- 小荒井衛・宇根 寛・西村卓也・矢来博司・飛田幹男・佐藤 浩 (Koarai, M., Une, H., Nishimura, T., Yara, H., Tobita, M. and Sato, H. P.), 2008, SAR 干渉画像で捉えた「2007 年 (平成 19 年) 新潟県中越沖地震」による地盤変状と活褶曲の成長. 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **116**, 602-614 (本特集号).
- 小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫 (Kobayashi, I., Tateishi, M., Yoshioka, T. and Shimazu, M.), 1991, 長岡地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) (Geology of the Nagaoka Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 132p.
- 小林巖雄・立石雅昭・植村 武 (Kobayashi, I., Tateishi, M. and Uemura, T.), 1993, 出雲崎地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) (Geology of the Izumozaki Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 91p.
- 小林巖雄・立石雅昭・吉村尚久・上田哲郎・加藤碩一 (Kobayashi, I., Tateishi, M., Yoshimura, T., Ueda, T. and Kato, H.), 1995, 柏崎地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) (Geology of the Kashiwazaki Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 102p.
- 小林巖雄・立石雅昭・小松原琢 (Kobayashi, I., Tateishi, M. and Komatsubara, T.), 2002, 三条地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) (Geology of the Sanjo Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000), 産業技術総合研究所地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST), 98p.
- 小松直幹 (Komatsu, N.), 1990, 新潟油田地域の褶曲一形態と形成過程. 地質学論集 (Mem. Geol. Soc. Japan), no. 34, 149-154.
- Maruyama, T., Fusejima, Y., Yoshioka, T., Awata, Y. and Matsu'ura, T., 2005, Characteristics of the surface rupture associated with 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, central Japan and their seismotectonic implications. *Earth Planets Space*, **57**, 521-526.
- Molinaro, M., Leturmy, P., Guezou, J. C., Frizon de Lamotte, D. and Eshraghi, S. A., 2005, The structure and kinematics of the south-eastern Zagros fold thrust belt, Iran: From thin-skinned to thick-skinned tectonics. *Tectonics*, **24**, TC3007, doi: 10.1029/2004TC001633.
- 中村光一 (Nakamura, K.), 1992, 反転テクトニクス (inversion tectonics) とその地質構造表現. 構造地質 (Struct. Geol.), no.38, 3-45.
- 中田 高・今泉俊文編 (Nakata, T. and Imaizumi, T., eds.), 2002, 活断層詳細デジタルマップ (Digital Active Fault Map of Japan). 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 60p, DVD-ROM [シリアル番号 DAFM2173].
- 西坂弘正・篠原雅尚・佐藤利典・日野亮太・望月公廣・笠原順三 (Nishisaka, H., Shinohara, M., Sato, T., Hino, R., Mochizuki, K. and Kasahara, J.), 2001, 海底地震計と制御震源を用いた北部大和海域. 秋田沖日本海東縁部海陸境界域の地震波速度構造. 地震第 2 輯 (Jour. Seismol. Soc. Japan, Ser. 2), **54**, 365-379.
- Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri, R. and Satoh, M., 1995, Rifting and basin inversion in the eastern margin of the Japan Sea. *Island Arc*, **4**, 166-181.
- Okamura, Y., Ishiyama, T. and Yanagisawa, Y., 2007, Fault-related folds above the source fault of the 2004 mid-Niigata Prefecture earthquake, in a fold-and-thrust belt caused by basin inversion along the eastern margin of the Japan Sea. *Jour. Geophys. Res.*, **112**, B03S08, doi: 10.1029/2006JB004320.
- 大塚弥之助 (Otsuka, Y.), 1942, 活動している褶曲構造. 地震 (Jour. Seismol. Soc. Japan), **14**, 46 - 63.
- 大沢 纈・片平忠実・土谷信之 (Ozawa, A., Katahira, T., and Tsuchiya, N.), 1986, 清川地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) (Geology of the Kiyokawa Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 61p.
- Plesch, A., Shaw, J. H., Benson, C., Bryant, W. A., Carena, S., Cooke, M., Dolan, J., Fuis, G., Gath, E., Grant, L., Hauksson, E., Jordan, T., Kamberling, M., Legg, M., Lindvall, S., Magistrale, H., Nicholson, C., Niemi, N., Oskin, M., Perry, S., Planansky, G., Rockwell, T., Shearer, P., Sorlien, C., Stüss, M. P., Suppe, J., Treiman, J. and Yeats, R., 2007, Community Fault Model (CFM) for Southern California. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **97**, 1793-1802, doi: 10.1785/0120050211.
- 佐賀 肇 (Saga, H.), 1992, 秋田一山形地域, 改訂版「日本の石油・天然ガス資源」[Petroleum and Natural Gas Resources of Japan, Revised ed.]*. 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会 (Japan Natural Gas Association and Japan Offshore Petroleum Development Association), 53-80.
- Sakai, S., Hirata, N., Kato, A., Kurashimo, E., Iwasaki, T. and Kanazawa, T., 2005, Multi-fault system of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake and its aftershocks. *Earth Planets Space*, **57**, 417-422.
- 佐藤比呂志 (Sato, H.), 1986, 東北地方中部地域 (酒田一古川間) の新生代地質構造発達史 (第 I・II 部). 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告 (Cont. Inst. Geol. Paleont., Tohoku Univ.), no. 88, 89, 1-32, 1-45.
- Sato, H., 1994, The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **99**, 22261-22274.
- 佐藤比呂志・平田 直 (Sato, H. and Hirata, N.), 1998, 活断層の深部構造と日本列島の成立. 科学 (Kagaku), **68**, 63-71.
- Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T., Matsubara, M. and Ikawa, T., 2002a, Deep Seismic Reflection Profiling across the Ou Backbone Range, Northern Honshu Island, Japan. *Tectonophysics*, **355**, 41-52.
- Sato, H., Hirata, N. and Iwasaki, T., 2002b, Deep geometry of active faults in Northern Honshu, Japan. In Fujinawa, Y. and Yoshida, A., eds., *Seismotectonics in Convergent Plate Boundary*, Terra Scientific Pub. Tokyo, 201-208.
- 佐藤比呂志・池田安隆・今泉俊文・三ヶ田均・戸田 茂・堤 浩之・越谷 信・野田 賢・伊藤谷生・宮内崇裕・八木浩司・東郷正美・岩崎貴哉・坂 守・平田 直・松多信尚・河村知徳・石丸恒存・井川 猛・千屋 96 反射法地震探査グループ (Sato, H., Ikeda, Y., Imaizumi, T., Mikata, H., Toda, S., Tsutsumi, H., Koshiya, S., Noda, K., Ito, T., Miyauchi, T., Yagi, K., Togo, M., Iwasaki, T., Saka, M., Hirata, N., Matsuta, N., Kawamura, T., Ishimaru, K., Ikawa, T. and Senya 96 Seismic profiling group), 2006a, 千屋断層 (花岡) を横断する浅層反射法地震探査: データ取得と処理について. 地震研彙報 (Bull. Earthq. Res. Inst.), **81**, 97-106.
- 佐藤比呂志・伊藤谷生・池田安隆・平田 直・今泉俊文・井川 猛 (Sato, H., Ito, T., Ikeda, Y., Hirata, N., Imaizumi, T. and Ikawa, T.), 2001, 活断層一震源断層システムのイメージングの意義と現状. 地学雑 (Jour. Geogr.), **110**, 838-848.
- Sato, H. and Kato, N., 2005, Relationship between the geologic structure and source fault of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake, central Japan. *Earth Planet Space*, **57**, 453-457.
- 佐藤比呂志・加藤直子・須田茂幸・川中 卓 (Sato, H., Kato, N., Suda, S. and Kawanaka, T.), 2006b, 反射法地震探査による中越地震震源域周辺の地質構造. 月刊地球号外 (Chikyū Monthly, Extra ed.), **53**, 117-124.
- 佐藤比呂志・八木浩司・池田安隆・今泉俊文・荻野スミ子・宮内崇裕・戸田 茂・平野信一・松多尚信・越後智雄・田力正好・井川猛・酒井隆太郎・新庄 97 反射法地震探査グループ (Sato, H., Yagi, K., Ikeda, Y., Imaizumi, T., Ogino, S., Miyauchi, T., Toda, S., Hirano, S., Matsuta, N., Echigo, T., Tajikara, M., Ikawa, T., Sakai, R. and Shinjo 97 Seismic profiling group), 2006c, 新庄盆地東部活褶曲群を横切る反射法地震探査. 地震研彙報 (Bull. Earthq. Res. Inst.), **81**, 157-170.
- 佐藤比呂志・吉田武義・岩崎貴哉・佐藤時幸・池田安隆・海野徳仁 (Sato, H., Yoshida, T., Iwasaki, T., Sato, T., Ikeda, Y. and Umino, N.), 2004, 後期新生代における東北日本中部背弧域の地殻構造発達一最近の地殻構造探査を中心として一. 石技誌 (Jour. Japan. Assoc. Petrol. Technol.), **69**, 145-154.
- 石油公団 (Japan National Oil Corporation), 1999, 平成 10 年度国内石油・天然ガス基礎調査, 陸上基礎物理探査「西山・中央油帯」調査報告書 [Report on Basic Geophysical Exploration in Onshore Area "Nishiyama-chuo Oil Field"]*. 61p.
- 石油公団 (Japan National Oil Corporation), 2001, 平成 11 年度国内石油・天然ガス基礎調査・基礎物理探査「水沢」調査報告書 [Report on Basic Geophysical Exploration in Onshore Area "Mizusawa"]*. 86p.

- Sibson, R. H. and Xie, G., 1998, Dip range for intracontinental reverse fault ruptures: truth not stranger than friction? *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **88**, 1014-1022.
- 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会編 (Earthquake Research Committee Headquarters for Earthquake Research Promotion Prime Minister's Office, Government of Japan), 1999, 日本の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—追補版 (*Seismic Activity in Japan -Regional perspectives on the characteristics of destructive earthquakes-*). 395p.
- 杉村 新 (Sugimura, A.), 1952, 褶曲運動による地表の変形について. 地震研彙報 (*Bull. Earthq. Res. Inst.*), **30**, 163-178.
- 鈴木康弘 (Suzuki, Y.), 1988, 新庄盆地・山形盆地の活構造と盆地発達過程. 地理評 (*Geogr. Rev. Japan*), **61A**, 332-349.
- 鈴木尉元・三梨 昂・影山邦夫・島田忠夫・宮下美智夫・小玉喜三郎 (Suzuki, Y., Mitsunashi, T., Kageyama, K., Shimada, T., Miyashita, M. and Kodama, K.), 1971, 新潟第三系堆積盆地に発達する褶曲の形成機構について. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **77**, 301-305.
- 鈴木尉元・三梨 昂・影山 邦夫・島田忠夫・宮下美智夫・小玉喜三郎 (Suzuki, Y., Mitsunashi, T., Kageyama, K., Shimada, T., Miyashita, M. and Kodama, K.), 1974, 新潟第三系堆積盆地に発達する褶曲の形成機構について. 地調報告 (*Rep. Geol. Surv. Japan*), **250-2**, 53-78.
- 土谷信之・大沢 穠・池辺 穰 (Tsuchiya, N., Ozawa, A. and Ikebe, Y.), 1984, 鶴岡地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) (*Geology of the Tsuruoka Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000*), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 77p.
- 津田宗茂 (Tsuda, M.), 1992, 新潟—長野地域, 改訂版「日本の石油・天然ガス資源」 [*Niigata-Nagano district, Petroleum and natural gas resources of Japan, Revised ed.*]*. 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会 (Japan Natural Gas Association and Japan Offshore Petroleum Development Association), 81-127.
- Tozer, R. S. J., Butler, R. W. H. and Corrado, S., 2002, Comparing thin- and thick-skinned thrust tectonic models of the Central Apennines, Italy. *EGU Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.*, **1**, 181-194.
- Umino, N., Okada, T., Nakajima, J., Hori, S., Kono, T., Nakayama, T., Uchida, N., Shimizu, J., Suganomata, J., Gamage, S., Hasegawa, A. and 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.
- 白田雅郎・白石建雄・岩山勝男・秋山義人・井上 武・乗富一雄 (Usuta, M., Shiraishi, T., Iwayama, K., Akiyama, Y., Inoue, T. and Noritomi, K.), 1976, 5 万分の 1 総合地質図幅説明書「六郷」 (*Geological map of Rokugo, 1: 50,000*). 秋田県 (Akita Pref.), 70p.
- 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一 (Yanagisawa, Y., Kobayashi, I., Takeuchi, K., Tateishi, M., Chihara, K. and Kato, T.), 1986, 小千谷地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) (*Geology of the Ogiya Districts. Quadrangle Ser. scale 1: 50,000*), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 177p.

* English translation from the original written in Japanese

(要 旨)

佐藤比呂志・加藤直子, 2010, 北部本州背弧域の地殻構造と震源断層. 地質雑, **116**, 592—601. (Sato, H. and Kato, N., 2010, Crustal structure and earthquake source faults on the backarc side of northern Honshu, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **116**, 592—601.)

北部本州の背弧域は島弧方向に平行な褶曲-衝上断層帯によって特徴づけられ, しばしば浅い地殻内被害地震が発生してきた. 厚い新第三系堆積層の下での震源断層の存在を明らかにすることは, 強震動予測や被害地震のリスクを評価する上で重要である. 深部反射法地震探査や余震観測データをもとに, 東北地方中部で震源断層と地殻構造の関係について検討を加えた. 前弧域では中新世の正断層が, 現在の応力場に対応して逆断層として反転活動をしている. これらの震源断層は, 断層の起源を反映し地震発生層の中で高角度の形状を示す場合が多い. 背弧域の堆積層が厚い地域では, 中新統の泥岩層中にデタッチメントが発達し, thin-skinned テクトニクスの変形様式を示す. 新潟堆積盆地では厚さ 6 km 以上の堆積層に隔てられ, 基盤岩中の震源断層と活断層・活褶曲との関連については不明な点が多い. 今後, 深部地震探査による解明が必要である.