

SCG062-01

会場:国際会議室

時間:5月27日 10:45-11:00

GPS 稠密観測による日本海東縁ひずみ集中帯の地殻変動 (2)

Crustal deformation of the strain concentration zone along the eastern Japan Sea margin based on dense GPS observation

鷺谷 威^{1*}, 伊藤 武男¹, 松多 信尚¹, 高橋 浩晃², 三浦 哲³, 太田 雄策³, 加藤 照之⁴, 福田 淳一⁴, 竹内 章⁵, 楠本 成寿⁵, 宮崎 真一⁶, 田部井 隆雄⁷, 松島 健⁸, 中尾 茂⁹, 原田 昌武¹⁰, 棚田 俊收¹¹, 小澤 拓¹¹, 河野 裕希¹¹, 奥田 隆¹, 堀川 信一郎¹, 山口 照寛², 一柳 昌義²

Takeshi Sagiya^{1*}, Takeo Ito¹, Nobuhisa Matsuta¹, Hiroaki Takahashi², Satoshi Miura³, Yusaku Ohta³, Teruyuki Kato⁴, Jun'ichi Fukuda⁴, Akira Takeuchi⁵, Shigekazu Kusumoto⁵, Shin'ichi Miyazaki⁶, Takao Tabei⁷, Takeshi Matsushima⁸, Shigeru Nakao⁹, Masatake Harada¹⁰, Toshikazu Tanada¹¹, Taku Ozawa¹¹, Yuhki Kohno¹¹, Takashi OKUDA¹, Shinichiro Horikawa¹, Teruhiro Yamaguchi², Masayoshi Ichiyanagi²

¹名古屋大学, ²北海道大学, ³東北大学, ⁴東京大学地震研究所, ⁵富山大学, ⁶京都大学, ⁷高知大学, ⁸九州大学, ⁹鹿児島大学, ¹⁰神奈川県温泉地学研究所, ¹¹防災科学技術研究所

¹Nagoya University, ²Hokkaido University, ³Tohoku University, ⁴ERI, University of Tokyo, ⁵Toyama University, ⁶Kyoto University, ⁷Kochi University, ⁸Kyushu University, ⁹Kagoshima University, ¹⁰Hot Spring Research Institute, ¹¹NIED

我々は、日本海東縁ひずみ集中帯における地殻変形過程と地震準備過程の解明を目的として、新潟県の上越・中越地域に約 50 箇所の GPS 観測点を設置し、毎年 1?2 ヶ月程度のキャンペーン観測を実施している。2008 年以降 3 度のキャンペーン観測を経て水平地殻変動の様子が明らかになってきた。

対象地域は新潟県糸魚川市から南魚沼市に至る東西約 90km の範囲である。GPS 観測により、この範囲内で約 15mm/年の短縮運動が生じていることが明らかとなった。キャンペーン観測データの速度推定精度は 2mm/年程度であるが、値そのものは GEONET の連続観測点について得られた結果とほぼ整合的であり、地殻変動の議論を行うことが可能である。

観測網内の各地域について詳しく見ると、糸魚川市周辺から高田平野までは顕著な短縮が見られない。高田平野西縁断層は 1751 年に M7 級の地震を起こしたとされる B 級の活断層であるが、現時点においては、GPS で有意な変形が見出せていない。一方、高田平野東縁断層から東側の東頸城丘陵が東地域において主要な短縮変形を賄っている。十日町盆地までの約 30km 間で約 10mm/年の短縮が生じており、平均的な東西短縮ひずみの大きさは 0.3ppm/年に達する。この東頸城丘陵における変形パターンは複雑な様相を呈しており、暫定的な解釈しかできないが、上越市と十日町市の境界付近で顕著なステップ的な変化が生じている、もしくは、観測網の北側と南側で変形集中域がずれているようにも見え、短波長の複雑な変形が生じている可能性もある。

発表では、このデータに基づく暫定的な変形モデルを提示し、ひずみ集中帯の変形プロセスについて議論する。

キーワード: ひずみ集中帯, GPS, 地殻変動, 活断層, 活褶曲

Keywords: Strain concentration zone, GPS, crustal deformation, active faults, active folding

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SCG062-02

会場:国際会議室

時間:5月27日 11:00-11:15

日本海東縁地域のP波とS波トモグラフィー P and S wave tomography in the eastern margin of the Japan Sea

趙大鵬^{1*}, 黄周伝¹, 海野徳仁¹, 長谷川昭¹, 吉田武義¹

Dapeng Zhao^{1*}, Zhouchuan Huang¹, Norihito Umino¹, Akira Hasegawa¹, Takeyoshi Yoshida¹

¹ 東北大学・理

¹Tohoku University

We determined high-resolution images of P and S wave velocity and Poisson's ratio under the Japan Sea off NE Honshu using a large number of arrival-time data from local earthquakes in the crust and the subducting Pacific slab. The data were recorded by the dense seismic networks of JMA, Hi-net and Japanese national universities. Our new data collected from 360 crustal earthquakes under the Japan Sea which are relocated precisely with sP depth-phase data are crucial to make this work possible. Our results show that strong lateral heterogeneities exist in the crust and upper mantle under the eastern margin of the Japan Sea, which may have affected the seismotectonics in the region. The crustal velocity variations under the Japan Sea may reflect the complicated geologic structures which were produced during the opening of the Japan Sea and the present compressional stage of the Honshu arc associated with the collision of the Amur plate with the Okhotsk plate. Low-velocity zones in the mantle wedge are found to extend westward under the Japan Sea, rather than just confined under Honshu Island as suggested by the previous studies. This feature indicates that the back-arc magmatism and tectonics are part of the complex geodynamic system under the broad region including the western Pacific island arcs and the East Asian continental margin. The present study also indicates that high-resolution seismic imaging is feasible for the oceanic regions surrounding a seismic network if we can fully exploit the high-quality waveform data recorded by the seismic network, thus the structure and tectonics under the less-instrumental oceanic regions can be investigated well.

キーワード: 日本海東縁, P波速度, S波速度, トモグラフィー, スラブ

Keywords: Eastern margin of Japan Sea, P-wave velocity, S-wave velocity, tomography, slab

SCG062-03

会場:国際会議室

時間:5月27日 11:15-11:30

東北地方中部のひずみ集中帯における地殻不均質構造と地震活動 Inhomogeneous structure and seismicity in and around the high strain rate zones in the central part of NE Japan

岡田 知己^{1*}, 松澤 暢¹, 海野 徳仁¹, 長谷川 昭¹, 中島 淳一¹, 内田 直希¹, 堀修一郎¹, 河野 俊夫¹, 中山 貴史¹, 平原 聡¹, 高木 涼太¹, 吉田 圭佑¹, 四ヶ所 健太¹, 2008年岩手・宮城内陸地震合同余震観測グループ², 儘田 豊³
Tomomi Okada^{1*}, Toru Matsuzawa¹, Norihito Umino¹, Akira Hasegawa¹, Junichi Nakajima¹, Naoki Uchida¹, Shuichiro Hori¹, Toshio Kono¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Ryota Takagi¹, Keisuke Yoshida¹, Kenta Shikasho¹, Group for the aftershock observations of the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake², Yutaka Mamada³

¹ 東北大・理・予知セ, ² 岩手・宮城内陸地震合同余震観測グループ, ³ 独立行政法人 原子力安全基盤機構
¹RCPEV, Grad. Sch. of Sci. Tohoku Univ., ²GIMNE2008, ³Japan Nuclear Energy Safety Organization

In the central part of Japan, the inhomogeneous distribution of strain rate distribution was reported (e.g. Miura et al., 2004). High strain rate is observed along the backbone range, the forearc region of Miyagi prefecture, and near coast line of the Japan Sea. To understand the origin of these high strain rate zones, we estimate seismic velocity structure of the crust in the central part of Tohoku, NE Japan, and discuss on its relation with seismic activity.

We determined three-dimensional seismic velocity structure and relocated hypocenters simultaneously using the tomography method (Zhao et al., 1991; Zhang and Thurber, 2003). Travel time data used are obtained from the dense seismic network by the temporary seismic stations installed for "Multidisciplinary research project for high strain rate zone" promoted by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan. and the Group for the aftershock observations of the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 (GIMNE) and the Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES). We also used P- and S-wave data from networks of Tohoku University, JMA, Hi-net and other temporary stations during the period from 1997 to 2010.

In the upper crust, distinct low-velocity regions are distributed in the Osaki-plain, Kitakami low-land, Shinjo basin and Shonai plain. In some areas (e.g., in the source region of the 2003 northern Miyagi earthquake), these low-velocity zone are seems to be distributed in the hanging wall of the fault. We also found some low-velocity regions near the active volcanoes (e.g., Kurikoma, Chokai). High seismicity area in the upper crust corresponds with higher velocity areas.

In the lower crust, we found some distinct low velocity areas. These low velocity zones are located just beneath the volcanoes and these high strain rate zones. High seismicity includes the moderate-sized and large earthquakes (e.g., the 2003 northern Miyagi earthquake (M6.4), the 2008 M7.2 Iwate Miyagi Nairiku earthquake, the 1894 M7.0 Shonai earthquake) in the upper crust is just above these low velocity zones. These low-velocity zones in the lower crust are imaged to continuously distributed from the uppermost mantle.

We used data from temporary seismic stations installed for "Multidisciplinary research project for high strain rate zone" promoted by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan. We also used data from the Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES), JMA, Hi-net.

SCG062-04

会場:国際会議室

時間:5月27日 11:30-11:45

屈折法・広角反射法探査による新潟県粟島沖・1964年新潟地震震源域の地震波速度構造

Seismic velocity image off Awa-shima island, Niigata, deduced from the seismic refraction/wide-angle reflection survey

佐藤 壮^{1*}, 野 徹雄¹, 高橋 成実¹, 小平 秀一¹, 金田 義行¹

Takeshi Sato^{1*}, Tetsuo No¹, Narumi Takahashi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda¹

¹ 海洋研究開発機構

¹JAMSTEC

日本海東縁部や東北日本の日本海側の地域では、大陸地殻が日本海拡大による伸張変形とその後の短縮変形を受けており、これらの変形によって褶曲 - 断層帯が発達、集中的に分布し (Sato, 1994), 多くの被害地震 (例えば, 2004 年新潟県中越地震, 2007 年新潟県中越沖地震) が発生している。しかし、これらの地域では、短縮変形が集中するメカニズムや短縮変形によって形成した褶曲 - 断層帯中の活断層、活褶曲と被害地震との関係はよくわかっていない。これらのメカニズムや関係を知るためには、短縮変形をあまり受けていない日本海・大和海盆から短縮変形が集中している日本海東縁部・大陸棚にかけての地殻・最上部マントル構造の全体像を知ることは重要である。日本海東縁部の大和海盆から大陸棚にかけての地殻・最上部マントル構造の全体像を明らかにするために、2010年に1964年新潟地震の震源域と考えられている新潟県粟島沖において屈折法・広角反射法地震探査を実施した。これらの探査は、科学技術振興調整費「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」(文部科学省, 2008)の一環である。本発表では、屈折法・広角反射法地震探査で得られた新潟県粟島沖の大和海盆から1964年新潟地震震源域である粟島南方にかけての地震波速度構造を報告する。

2010年に新潟県粟島沖の大和海盆から佐渡海嶺, 1964年新潟地震の震源域である粟島南方の粟島隆起帯にかけて、海底地震計58台と制御震源としてエアガンアレー (総容量 7,800 cubic inch) を用いた屈折法・広角反射法地震探査を実施した。本探査の測線長は約 300 km であり、探査測線の東南東部で1964年新潟地震の震源域を横切っている。海底地震計で得られたエアガン発振の記録では、堆積層を含めた地殻内、最上部マントルを通過した屈折波だけでなく、地殻、最上部マントル内からの反射波も確認できる。粟島沖の大和海盆から粟島隆起帯にかけての地震波速度構造と反射面形状を求めるために、初動走時を用いたトモグラフィックインバージョン (Zhang et al., 1998) と後続の反射波走時を用いたマッピング法 (Fujie et al., 2006) を行った。

現在求まっている暫定結果は以下の通りである。粟島沖の大和海盆の地殻の厚さは約 18 km であり、この厚さは2009年度の実施された佐渡島北西沖の大和海盆の地殻の厚さと類似し、P波速度約 6 km/s をもつ上・中部地殻が下部地殻に比べて薄くなっている特徴についても類似している。佐渡海嶺下の地殻の厚さは約 24 km と推定され、上部、中部地殻の厚さは大和海盆に比べて厚くなっている。また、佐渡海嶺下の下部地殻の上部のP波速度はまわりに比べて速い速度を示していると推測される。粟島南方の堆積層、上部地殻の上部では、P波速度の水平変化が大きく、地質構造と対応していると考えられる。

SCG062-05

会場:国際会議室

時間:5月27日 11:45-12:00

反射法地震探査による1964年新潟地震震源域付近～大和海盆における地殻構造 Preliminary report on multi channel seismic reflection survey around the strain concentration area off Niigata

野 徹雄^{1*}, 高橋 成実¹, 佐藤 壮¹, 小平 秀一¹, 金田 義行¹
Tetsuo No^{1*}, Narumi Takahashi¹, Takeshi Sato¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda¹

¹ 海洋研究開発機構

¹JAMSTEC

新潟県付近では、2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震など相次いで被害地震が発生したが、戦後最も大きな地震は1964年新潟地震(M7.5)である。新潟地震は発生した直後から、様々な観測・研究が実施されてきたが、当時の観測網は現在に比べれば十分ではなく、また震源域のほとんどが海域であったため、調査・観測も限られた。しかし、新潟地震から47年が経過し、調査・観測の技術は大きく向上し、地震発生帯や活断層についての調査・観測による研究が進展している。そこで、新潟地震の震源域付近に関しても改めて最新の観測技術を用いて精査し、新潟地震を発生させた背景となった粟島付近の観測・研究が近年行われてきている(例えば木村・岡村, 2009、篠原・他, 2010や伊藤・他, 2010など)。また、新潟地震震源域より西方に位置する最上トラフと佐渡海嶺の境界域付近においても、1990年代に行われた観測・研究により、将来的に地震を引き起こす可能性がある指摘がなされ(岡村・加藤, 2002)、さらに新潟地震震源域～最上トラフ～佐渡海嶺に至る海域において、2つのひずみ集中帯が南北に分布しているという指摘もあり(例えば Okamura et al., 2007 など)、新潟地震の震源域近傍の地殻構造や新潟沖～酒田沖における地震発生の背景となるテクトニクスを解明することは日本海東縁部・ひずみ集中帯における地震研究上重要な研究テーマの1つである。JAMSTECでは、科学技術振興調整費「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」の受託研究として、2009年～2012年の4ヶ年で能登半島沖～西津軽沖までの日本海東縁で海上地震探査による研究を行っている。2010年度は、2010年8月3日～9月6日までの期間に新潟地震震源域から最上トラフ・佐渡海嶺を横切り、大和海盆に至る海域において、深海調査研究船「かいいい」によるマルチチャンネル反射法地震探査(11測線)、海底地震計による地震探査(1測線)、及び海底地形・重磁力調査を行った。本発表では、反射法地震探査の結果から新潟地震震源域付近～大和海盆における地殻構造イメージングの特徴などを報告する。

本調査での主なデータ取得仕様は、発震間隔 50 m、エアガン総容量 7800 cu.in. (約 128 リットル)、エアガン曳航深度 10m、受振点間隔 12.5 m、ストリーマーカーケーブル曳航深度 12 m、ストリーマーカーケーブルのチャンネル数 444、オフセット 100～5600m、サンプリング間隔 2 ms、記録長は 15 秒である。調査期間中、調査海域周辺の漁業活動による影響や日本海を通過した台風・熱低の影響などがあったが、データの品質は概ね良好であった。

Preliminary な解析結果ではあるが、反射法地震探査による地殻構造イメージングからは、新潟地震震央付近では西傾斜の逆断層によって形成されていることが示唆される2つの背斜が認められ、東側の背斜の裾野が西側の背斜の裾野の下に位置しているようにイメージされている。震源域付近全体では、堆積層内の反射面の連続性はよくないが、西傾斜の逆断層が作用して形成された背斜が多く確認できる。最上トラフは、粟島付近より南側の測線では基盤が西に傾斜しており、粟島付近より北側の測線では大陸棚との境界部付近で基盤が急激に深くなる影響により、東へ傾斜している。また、トラフ内の断層・褶曲による変形構造は鳥海礁より北側では海底まで変位するような断層・褶曲の発達が見られる。それに対して、鳥海礁より南側では最上トラフと大陸棚・佐渡海嶺との境界部では海底まで達する断層・褶曲の発達を確認できるが、トラフの中央部では褶曲より上位に不整合で堆積層中の変形は顕著ではなく、トラフの中央部に限れば鳥海礁より北側の方が新しい活動による断層・褶曲の発達がみられる。佐渡海嶺に関しては、先行研究(例えば岡村・他, 1995 など)でもあるように、非対称な背斜や凸状の基盤構造などの複数の小海嶺によって形成されており、そのうちのいくつかの背斜はインバージョンテクトニクスが作用した結果として生じたものと推定される。また、これらの背斜は西傾斜の逆断層が作用した結果として生じたイメージが多く、佐渡海嶺の南側(向瀬・月山瀬・瓢箪礁付近)では短周期の背斜が多数形成されて海嶺を構成しているが、北側(鎌礁・最上堆付近)では南側と比べると波長が長い背斜によって形成されている。さらに、これらの構造の形成の影響と思われる反射面も基盤下の地殻内に認められる。

キーワード: 日本海東縁, ひずみ集中帯, 反射法地震探査, 1964年新潟地震, 最上トラフ, 佐渡海嶺

Keywords: Eastern margin of the Japan Sea, Strain concentration areas, Seismic reflection survey, 1964 Niigata earthquake, Mogami Trough, Sado Ridge

ひずみ集中帯におけるトモグラフィー解析のための初期モデルの検討 Estimation of a feasible initial velocity model and earthquake locations for seismic tomography in the Niigata region

Enescu Bogdan^{1*}, 武田 哲也¹, 浅野 陽一¹, 小原 一成², 関口 渉次¹
Bogdan Enescu^{1*}, Tetsuya Takeda¹, Youichi Asano¹, Kazushige Obara², Shoji Sekiguchi¹

¹ 防災科学技術研究所, ² 東京大学 地震研究所

¹Nat. Res. Inst. Earth Sci. Disast. Prev., ²ERI, University of Tokyo

Niigata area is part of a broader region, located in the central and north-eastern part of Japan, known for its high strain rates (Sagiya et al., 2000). To have a detailed understanding of the seismotectonic characteristics in the Niigata region, we have installed a dense temporary network of about 300 seismic stations. In a previous study (Enescu et al., 2010) we have obtained a detailed tomographic image of the crustal structure in the region, using the earthquake data recorded during intense observations, as well as previous data recorded by the permanent Hi-net network. The study revealed the undulated surface of the basement rock, hidden under a thick low-velocity layer consisting of thick sediments and volcanic rocks of the Niigata basin. The earthquake locations, inverted together with the velocity structure, became systematically shallower (by more than about 3km), in agreement with results reported in other studies (e.g., Kato et al., 2009). However some earthquakes, especially those that occurred in the off-shore areas, persistently remained located deeper.

In this study we focus on the reliable determination of earthquake locations since they may play a critical role for an accurate imaging of the velocity structure in this complex tectonic region. We use the Joint Hypocenter Determination (JHD) algorithm (Kissling et al., 1994; Shibutani et al., 2005) to invert for the precise earthquake locations, improved 1D velocity model and station corrections. We select only data obtained during intense earthquake observations, from December 2008 to September 2009. We use as a starting 1D model the velocity structure obtained for the region by Shibutani et al. (2005), using the same JHD technique.

The most prominent features of the JHD relocated earthquakes are: a) a shift of the depth location by about 3km in the on-shore Niigata basin region, which includes the aftershock area of the 2004 Mid-Niigata earthquake; b) a shift of up to 10km upwards for the hypocenters that occur in the off-shore regions, in particular those located in the aftershock area of the 2007 Chuetsu-oki earthquake and c) a horizontal shift of up to 3 to 5km in the N65degW average direction for the epicenters in the on-shore Niigata basin region. These results are in agreement with those obtained in several previous studies (e.g., Shibutani et al., 2005; Yukutake et al., 2008; Kato et al., 2009). Although the earthquakes used in this study occurred after December 2008, the fault-like structures in the areas of the 2004 and 2007 Niigata earthquakes can still be recognized from the earthquake hypocenter distribution.

The station corrections pattern shows consistency with the shallow subsurface velocity structure: relatively large positive travel-time residuals in the Niigata basin and negative residuals in the Echigo Mountains to the east.

The obtained 1D velocity model has lower velocities in the upper 7km, compared with the 1D model of Shibutani et al. (2005) and is similar in the deeper part. To further check the reliability of our results, we have considered a different starting 1D velocity model that has significantly lower velocities in the upper layers and performed the JHD inversion. The relocated earthquakes had a similar hypocentral distribution to those obtained by using Shibutani et al. (2005) crustal structure as starting 1D velocity model. Thus, we consider the relocated earthquakes to be robust enough for obtaining a reliable 1D velocity structure.

The relocated earthquakes and the improved 1D velocity model obtained in this study will be used to update our previous tomography results and discuss in more detail the relation between the earthquake activity and velocity structure in the Niigata region.

Keywords: Niigata region, earthquake relocations, velocity structure

SCG062-07

会場:国際会議室

時間:5月27日 12:15-12:30

マルチスケール・マルチモード型反射法地震探査データにおける深部地殻構造イメージングの高精度化 Integrated seismic imaging of crustal structure for multi-scale, multi-mode deep reflection data

阿部 進^{1*}, 佐藤 比呂志², 斉藤 秀雄¹, 白石 和也¹, 岩崎 貴哉², 加藤 直子², 石山 達也²

Susumu Abe^{1*}, Hiroshi Sato², Hideo Saito¹, Kazuya Shiraiishi¹, Takaya Iwasaki², Naoko Kato², Tatsuya Ishiyama²

¹地球科学総合研究所, ²東京大学地震研究所

¹JGI, Inc., ²ERI, University of Tokyo

海陸境界域を含む国内陸域における反射法による深部地殻構造のイメージングでは、不規則な発震点分布、様々な波長を伴う標高及び表層構造の不規則変化、測線の屈曲による反射点の拡散及びアジマス変動、発震及び受振カップリングの空間変動、高いノイズレベル、さらには海陸境界域における受発震区間の欠落等が課題となってきた。しかし、近年の反射法地震探査では、有線テレメトリー方式の陸域及び浅海域における受振システムと独立型データ収録システムの併用による稠密展開を伴う多チャンネル長大測線(測線長 100~250km, 受振点間隔 25~50m)の設定によって、同一測線内の複数の探査対象及び深度に見合った、低重合広角反射法、広域屈折法及び稠密展開反射法の同時取得、海域着底ケーブルを中心とした多成分データ取得によるマルチスケール・マルチモード型調査仕様が実現した。本研究では、従来型の CMP 重合解析のみでは限界があった深部地殻構造プロファイリングについて、以下の多角的なアプローチをマルチスケール型稠密長大展開データに適用することによって、深部反射波列の抽出とイメージングの高精度化について検証を実施した。第一に、屈折法・反射法統合プロファイリングによる速度推定の高精度化を試みた。屈折トモグラフィ解析に関しては、ランダム化初期モデル手法の採用によって、客観指標による速度構造推定と誤差評価が実現し(白石他(2010))、反射波及び屈折波フォワードモデリングを併用した総合的な速度モデル構築が上部地殻領域に達する深度まで可能となった。第二に、広角領域を含む反射法イメージングの改善を目的として、近軸波線理論を前提とした MDRS(Multi-dip Reflection Surface)法を含めた最適化重合処理、さらには短波長不均質を含む MDRS 速度アトリビュートを前提とした重合前深度マイグレーション処理の適用性を検討した。第三に、主に海底着底ケーブルに関する四成分データ(ハイドロフォン+MEMS 三成分)解析を通じて、P-S 変換波プロファイルの構築と V_p/V_s 分布を用いた物性情報抽出(グリーンタフ性状等)の可能性を議論した。本講演では、平成 20 年より実施されている「ひずみ集中帯プロジェクト」の地殻構造探査データを主に参照し、広域地殻構造探査における最近の反射法地震探査技術の寄与を例証する。

キーワード: 反射法, 深部地殻構造探査, 四成分海底着底ケーブル, 屈折トモグラフィ, P-S 変換波, 共通反射面重合法
Keywords: reflection seismology, deep seismic profiling, 4C OBC, refraction tomography, P-S converted wave, common reflection surface method

SCG062-08

会場:国際会議室

時間:5月27日 12:30-12:45

ひずみ集中帯地殻構造探査:2010年東山-三島測線

Crustal structure of the fold-and-thrust belt, Chuetsu, central Japan: result of 2010 Higashiyama-Mishima seismic survey

佐藤 比呂志^{1*}, 阿部 進², 河合 展夫³, 斉藤 秀雄², 加藤 直子¹, 石山 達也¹, 岩崎 貴哉¹, 白石 和也², 稲葉 充³

Hiroshi Sato^{1*}, Susumu Abe², Nobuo Kawai³, Hideo Saito², Naoko Kato¹, Tatsuya Ishiyama¹, Takaya Iwasaki¹, Kazuya Shiraiishi², Misturu Inaba³

¹ 東京大学地震研究所, ²(株)地球科学総合研究所, ³石油資源開発(株)

¹Earthquake Research Institute, Univ. Tok., ²JGI, Inc., ³Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

はじめに:文部科学省が実施している「ひずみ集中帯の重点観測・研究」の一環として、新潟地域を中心に地殻構造探査を実施してきた。このプロジェクトでは、2012年まで新潟地域の計5測線について地殻構造探査を実施する予定である。探査の目的は、厚い(7km)堆積層の下に位置する震源断層の位置・形状を明らかにすることと、褶曲断層帯の形成をもたらした短縮変形が集中するメカニズムを明らかにすることである。2010年には、2007年中越沖地震震源域北部を横断する三島-東山測線で海陸統合地殻構造探査を実施した。

2010年東山-三島測線: 2007年中越沖地震震源域北部の東頸城丘陵には新第三系の堆積岩が分布し、北北東走向の軸跡を示す短波長の褶曲が卓越する。背斜軸部では中越沖地震に伴う地殻変動が見られ堆積層中の断層活動が推定されている[1]。また、丘陵の東縁には年1mmを越える平均変位速度を示す鳥越断層が分布する。これらの断層群と中越沖地震の震源断層との関係を明らかにすることは、地震の長期予測の観点からも重要な課題である。2010年の測線は、出雲崎から東へ東頸城丘陵・長岡市・東山丘陵を横断し、新潟-福島県境の越後山地に至る陸上延長55kmの区間に50m間隔で受振器を設置した。また、出雲崎から沖合に25m間隔で受振器が装着されている海底ケーブルを6km区間渡って展開した。海域では3020 cu. inchのエアガン、陸上では大型パイロサイズ4台を用いて発震を行った。海域での発震作業は海岸から15kmの沖合まで実施し、測線長は70kmとなる。この他、約7km間隔でダイナマイト(100, 200 kg)、パイロサイズ・エアガンの集中発震点を配置した。発震は総計2040チャンネルの固定展開で収録された。実験は、2010年6月に実施した。

反射断面と速度構造: 得られた反射法地震探査断面は、CMP重合法により越後平野横断区間でも良好であり、堆積層の変形構造のイメージが得られた。とくにエアガンの稠密発震による効果により、東頸城丘陵区間のイメージが向上した。長大オフセットによって得られた発震記録をもとに、屈折波トモグラフィ解析によって測線中央部で地下15km程度までの速度構造が明らかになった。先第三系のほぼ上面に相当するP波速度5.4km/sより大きな弾性波速度を示す領域は、測線西端では10kmの深さとなり、東部の越後山地では地表近傍に位置する。この間の V_p 5.4km/sの等速度線は緩やかに西に向かってほぼ単調に深度を増大させる。この構造は褶曲構造をなす堆積層とは対照的である。

地質学的な解釈: 測線の沖合では、海洋研究開発機構が2007年中越沖地震の直後に反射法地震探査を実施した[1]。東山-三島測線とは直接延長しないものの、両者の測線は主要な構造と直交しているため、この測線に投影して考察する。また、この測線周辺には資源調査に関連したボーリングが多数実施されており、これらの結果も考慮して地質構造を検討した。中越沖地震の震源域には東傾斜のスラストの存在が反射法地震探査から明らかになっており、この断層を震源断層として中越沖地震が発生した。測線の西端部は速度構造の上からは、先第三系基盤が最も低下した領域となっている。東頸城丘陵には西傾斜のスラストが形成されとくに丘陵東部には翼間角度がタイトな褶曲が分布する。反射法地震探査断面やボーリング結果から判断して、下部寺泊層にデタッチメントが形成されている。東頸城丘陵西部ではほぼ3kmほどの深度となる。これらの褶曲は東傾斜の主要スラストから分岐する西傾斜のスラストの運動によって形成されたもので、測線では最も大きな短縮変形を示している。鳥越断層の深部は寺泊層中のデタッチメントを経て、主要スラストから分岐する西傾斜の断層と連続可能性が高い。東山丘陵の西縁には悠久山断層などの活断層が知られているが、ここでは地下3kmほどの深さに伏在する東傾斜のスラストに伴って大規模なウェッジ構造が形成されている。悠久山断層などの地表近傍の断層は、二次的なもので主要な断層の変位を代表していない。中越沖地震を発生させた主要な東傾斜の断層は、新第三系下部層の層厚の変化から推定して、中新世の非対象リフトとしての新潟堆積盆地の形成に主要な役割を果たした断層である。その後、鮮新世以降の短縮変形により東傾斜の主要断層の反転により、スラストの先端部にひずみが集中し、今日の地質構造を形成するに至った。これらの断層系は2008年、2009年に実施した北方の構造と大きく異なり、中越沖地震震源域がより北方に延びなかったことと調和する。

[1] Nishimura et al., *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13301, doi:10.1029/2008GL034337 (2008).

[2] No, T., et al., *Earth Planets Space*, 61, 1111-1115 (2009).

キーワード: 褶曲衝上断層帯, 震源断層, 地殻構造, 反射法地震探査, 新潟平野, 2007 年中越沖地震

Keywords: fold-and-thrust belt, source fault, crustal structure, seismic reflection profiling, Niigata basin, 2007 Chuetsu-oki earthquake

SCG062-09

会場:国際会議室

時間:5月27日 14:15-14:30

新潟平野東縁悠久山地域における反射法地震探査

Seismic reflection profiling across the Yukuzyuzan fault in the eastern margin of Niigata basin, central Japan

加藤 直子^{1*}, 佐藤 比呂志¹, 石山 達也¹, 阿部 進², 越谷 信³, 戸田 茂⁴, 蔵下 英司¹, 石川 達也⁴, 森岡麻衣⁴, 黒崎紗永香⁵, 高松直史⁵, 小池太郎⁶, 齊藤 秀雄²

Naoko Kato^{1*}, Hiroshi Sato¹, Tatsuya Ishiyama¹, Susumu Abe², Shin Koshiya³, Shigeru Toda⁴, Eiji Kurashimo¹, Tatsuya Ishikawa⁴, Mai Morioka⁴, Saeka Kurosaki⁵, Naoshi Takamatsu⁵, Taro Koike⁶, Hideo Saito²

¹ 東京大学地震研究所, ² (株)地球科学総合研究所, ³ 岩手大学工学部, ⁴ 愛知教育大学教育学部, ⁵ 東北大学理学部, ⁶ (株)ジオシス

¹ERI, Univ.of Tokyo, ²JGI, Inc., ³Civil and Envir. Eng., Iwate Univ., ⁴Aichi University of Education, ⁵Inst.Min.Petr.Econ.Geol., Tohoku Univ., ⁶Geosys, Inc.

文部科学省プロジェクト「ひずみ集中帯の重点的観測・研究」の一環として、東山-三島測線において震源断層のイメージングを目的とした地殻構造探査が実施された(佐藤ほか, 2011)。この探査は、上部地殻全体の大まかな構造のイメージングに焦点を当てているため浅層部の地質構造に対しては分解能が低い。このため活断層が分布する長岡市悠久山周辺において浅層部の詳細な地質構造を明らかにするために高分解能反射法・屈折法地震探査を行った。長岡市東部の新潟平野東縁に位置する悠久山地域には活断層である悠久山断層(活断層研究会, 1980)、鉢伏断層(吾妻ほか, 1995)が分布する。吉岡(1989)は悠久山断層を露頭での観察から層面すべり断層であるとしている。

高分解能反射法・屈折法地震探査を行った期間は2010年10月下旬から11月初旬で測線長は5.7kmである。震源は中型のパイロサイズ1台を使用した。受振点間隔は10mで計575チャンネルの固定展開でデータを取得した。受振システムはJGIMS2000を用いた。悠久山周辺の一部区間(2.4km)ではMS2000の間にデジタルテレメトリーシステムJGIGDAPS-4を展開した。発震点間隔は10m、スイープ周波数は8-100Hz、標準スイープ回数は5回である。屈折法地震探査は測線上13点においてスイープ周波数は8-60Hz、標準スイープ回数は30回で発震した。レコーディングのサンプリング間隔は2msecで記録長は4secとした。得られたデータに関して反射法地震探査は共通反射点重合処理法により、屈折法地震探査は屈折法走時トモグラフィー法(Zelt and Barton, 1998)により解析を行った。

反射法では約1km、屈折法では測線中央部で深さ約0.8kmまでのイメージが得られた。測線西端部(長岡市土合地区)では西傾斜の反射面が卓越していることから、主断層は東傾斜で伏在していると考えられる。これは大深度探査の結果と調和的であり、大深度探査でからは深度約3kmにデタッチメントが存在することが明らかになっている。高分解能反射法断面では、西端で深さ800m以浅の堆積層は背斜軸に向かって薄化する成長層を構成しており、成長層には地表近傍の堆積層も参加している。したがってこの背斜の西翼を回転させるような主断層の活動は第四紀後期に及んでいる。悠久山周辺には背斜が形成され、軸部には東に約30度傾斜した逆断層が存在する。この断層は反射面の不連続や、屈折トモグラフィーによる速度の逆転によって示唆される。この断層はそのまま地表には到達せず、先端部で楔状断層(wedge thrust)を形成している。大局的な構造は、より深い(約3km)東傾斜の断層とその断層の運動に伴う断層関連褶曲の形成であり、高分解能反射法断面でイメージングされたスラストは断層関連褶曲システムの中では、二次的な変位をまかっている。

SCG062-10

会場:国際会議室

時間:5月27日 14:30-14:45

断層変位地形とボーリングコアの解析に基づく越後平野南東縁の活構造 Active faults along the southeastern margin of the Echigo Plain based on tectonic geomorphology and borehole data

堤 浩之^{1*}, 石山 達也², 鈴木 毅彦³, 廣内 大助⁴, 今泉 俊文⁵, 鎌滝 孝信⁶, 阿部 恒平⁷

Hiroyuki Tsutsumi^{1*}, Tatsuya Ishiyama², Takehiko Suzuki³, Daisuke Hirouchi⁴, Toshifumi Imaizumi⁵, Takanobu Kamataki⁶, Abe Kohei⁷

¹ 京都大学, ² 東京大学地震研究所, ³ 首都大学東京, ⁴ 信州大学, ⁵ 東北大学, ⁶ 応用地質株式会社, ⁷ 株式会社エム・ティ・ブレン

¹Kyoto University, ²ERI, University of Tokyo, ³Tokyo Metropolitan University, ⁴Shinshu University, ⁵Tohoku University, ⁶OYO Corporation, ⁷M. T. brain Co, Ltd.

「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」の平成22年度陸域活構造調査の一環として、越後平野南東縁、長岡市街地の東方の活構造調査を行った。空中写真判読と現地調査に基づいて活断層/活褶曲をマッピングした。さらに、河成段丘面の年代を明らかにし、変位速度を算出するためのボーリング調査を行った。

越後平野西縁とは異なり、東縁では断層の分布が断続的で変位地形も不明瞭である。その中で、長岡市街地東方の長岡市浦瀬町から横枕町にかけての約10kmの区間では、越後平野と東山丘陵の境界に沿って、西落ちの断層変位地形が分布する(堤ほか, 2001)。この断層変位地形は、第四紀後期の数段の河成段丘面や扇状地面を西落ちに撓曲変形させる。西片貝町周辺では、数万年前に離水した段丘面が約20m西落ちに緩やかに撓曲変形している。千代栄町周辺では、平野と丘陵の地形境界から約1km平野側で、最低位段丘が北西方向に撓みこみ沖積面下に没する。地表踏査で断層は確認できないが、地形面の変形に調和的に、魚沼層・御山層・段丘礫層が西傾斜しているのは確認できる。この地形境界断層の東には、河成段丘面や魚沼層を東落ちに変位させる悠久山断層が分布する。吾妻ほか(1995)は、悠久山断層を地形境界断層の活動に付随する二次的な逆断層であると説明した。しかし、個々の断層トレースが短く雁行していることから、東傾斜の逆断層の上盤側に生じた flexural-slip 断層である可能性もある。ただし、基盤の魚沼層の構造と断層の関係は露頭で確認できていない。

ボーリング掘削は、西片貝町から千代栄町にいたる北北西走向の測線に沿う6ヶ所で行った。全ての地点で、段丘礫層とその上位のローム層(フラッドロームと風成ローム)を貫通し、基盤の魚沼層に達するように掘削した。魚沼層と段丘礫層の境界の高度に着目すると、平野と丘陵の境界に位置する変動崖を挟んで、その東側が西側に比べて約35m高い。また、平野側に張り出した変動崖を挟んでも同様に、東側が約13m高くなっており、地形学的に認められた西側低下の変動崖と調和的な地質データが得られた。今後ローム層の火山灰分析や放射性炭素年代測定により段丘面の形成年代を明らかにし、越後平野南西縁に分布する活断層の変位速度を算出する予定である。

キーワード: 越後平野, 長岡市, 断層変位地形, 変位速度, ボーリング調査

Keywords: Echigo Plain, Nagaoka City, tectonic landform, fault slip rate, borehole survey

SCG062-11

会場:国際会議室

時間:5月27日 14:45-15:00

東北日本南部の活構造 Active tectonics of the southern Northeast Japan

石山 達也^{1*}, 廣内 大助², 堤 浩之³, 鈴木 毅彦⁵, 丸島 直史⁴, 越後 智雄⁶, 今泉 俊文⁴, 佐藤 比呂志¹, 加藤 直子¹
Tatsuya Ishiyama^{1*}, Daisuke Hirouchi², Hiroyuki Tsutsumi³, Takehiko Suzuki⁵, Naofumi Marushima⁴, Tomoo Echigo⁶, Toshifumi Imaizumi⁴, Hiroshi Sato¹, Naoko Kato¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 信州大学, ³ 京都大学, ⁴ 東北大学, ⁵ 首都大学東京, ⁶ 財団法人地域地盤環境研究所

¹ERI, University of Tokyo, ²Shinshu University, ³Kyoto University, ⁴Tohoku University, ⁵Tokyo Metropolitan University, ⁶Geo-Research Institute

島弧に分布する活断層の分布, 長期的なひずみ速度や構造は島弧のジオダイナミクスを規定する最も重要なパラメータのひとつである。東北日本はユーラシア大陸縁辺のプレート間相互作用に伴い形成された島弧であり, 特に日本海拡大期以降の地殻変動については沈み込む太平洋プレートが原動力であるとされる。また, 島弧横断方向の第四紀後期の上下地殻変動については, 河成段丘面の比高を用いた隆起速度の推定による議論がなされている(例えば田力・池田, 2005)が, その原因や活断層の寄与に関しては議論の余地がある。近年, ひずみ集中帯プロジェクトを中心とした精力的な地殻構造調査(佐藤ほか, 2009; 佐藤ほか, 2010; Kato et al., 2010; 佐藤ほか, 本大会, など)により, 長期間地殻変動に重要な寄与をする活断層の浅部から深部にかけての構造が明らかになりつつある。さらに, 変動地形学・第四紀地質学による活構造の理解についての進展と第四系層序データの蓄積により, 新たな活構造の抽出やひずみ速度の推定が可能になってきた。本発表では, 上記の観点から東北日本南部の活構造について近年の研究成果を中心に紹介する。(1) 背弧褶曲衝上断層帯: 日本海東縁部の背弧域には顕著な活褶曲が分布する。これらのうち, 東頸城丘陵に分布する活褶曲の大部分は, 大局的には上部地殻を中角度で断ち切る西傾斜の逆断層およびこれから派生する断層の上盤側に生じる断層関連褶曲であり, 西傾斜の逆断層は日本海拡大時に形成された半地溝を規定する正断層の再活動であることが明確となった(Kato et al., 2010; 佐藤ほか, 本大会など)。角田-弥彦断層の上下平均変位速度が3 mm/yr など, これらの逆断層は非常に活動的である(石山ほか, 2009)。一方で, 当地域の逆断層は顕著な広域沈降運動のために伏在するもの(角田-弥彦断層や越後平野東縁部の活構造)が多いほか, 伏在背斜の層面すべり断層(高田平野東縁断層帯)や, デタッチメント褶曲に起因する断層(鳥越断層の一部)など, 上記の断層運動と上盤側に厚く分布する新第三系・第四系の物性に支配された活構造が多く見られる。(2) 背弧沈降帯・隆起帯: 越後平野および高田平野は顕著な沈降帯をなし, 佐渡海峡を含めると東西幅50 kmにおよぶ。新潟平野の沈降速度は年間3 mm程度に達する。高田平野縁辺には活断層の上盤側に最終間氷期の海成段丘面が標高数十 mに分布するのに対し, 平野下では-70 mに達しており(廣内ほか, 2010), ここでも沈降運動が卓越する。これに対して, 越後山地は東西幅50 km程度の隆起帯をなし, 河成段丘面の高度分布から推定した第四紀後期における隆起速度分布は0.5 mm/yr とほぼ一定で箱形状を呈する(山田・鈴木, 2008; 丸島, 2010MS)。越後山地両縁部に存在する逆断層によって隆起速度分布を説明することは難しい。一方, 越後山地東縁部には西傾斜の逆断層である会津盆地西縁断層帯が存在する。東北日本南部の地形的配列のうち最も背弧側に位置する, 越後山地や飯豊山地, 出羽丘陵といった背弧側の山地・丘陵は, いずれも東西幅50 km程度の, 低起伏かつ箱形の地形的高所をなし, より起伏が大きく平均標高の高いほぼ火山フロント沿いの脊梁山地と対照的な地形的特徴をもつ。また, これらの背弧側の山地・丘陵には, 脊梁部に比べて非常に短縮量の大きい褶曲衝上断層帯が発達しており, 会津盆地西縁断層帯を含みその多くは現在も活動的である。(3) 奥羽脊梁山地: 脊梁山地の両縁部には逆断層が分布し, 福島盆地・郡山盆地西縁部の逆断層はいずれも反転・再活動した正断層である。福島盆地西縁の逆断層は活動的であるのに対し, 郡山盆地西縁では不明確ながら断片の変位地形が分布するとの考えもある(田力ほか, 2010)。(4) 前弧隆起帯: 阿武隈山地内部は段丘の発達が乏しいが, 山地東縁部から太平洋岸にかけては河成・海成段丘面が分布し, その高度分布から約0.3 mm/yrの隆起速度が推定される(Suzuki, 1989; 丸島, 2010MS)。山地東麓部に分布する双葉断層はほぼ垂直な断層面を持つ横ずれ成分卓越の断層であり, 上下平均変位速度は0.1 mm/yr ないしはそれ以下と非常に小さく(推本, 2005), 上記のような阿武隈山地および常磐海岸の隆起を説明することは難しい。

キーワード: 活構造, 変動地形, 活断層, 第四紀, 反射法地震探査, 東北日本南部

Keywords: Active tectonics, Tectonic Geomorphology, Active fault, Quaternary, Seismic reflection profiling, Southern Northeast Japan

SCG062-12

会場:国際会議室

時間:5月27日 15:00-15:15

新潟県地域の浅部・深部統合地盤モデル

Integrated velocity model of shallow and deep subsurface structure in Niigata region for strong-motion evaluation

森川 信之^{1*}, 先名重樹¹, 大井昌弘¹, 藤原広行¹

Nobuyuki Morikawa^{1*}, Shigeki Senna¹, Masahiro Ooi¹, Hiroyuki Fujiwara¹

¹ 防災科研

¹ NIED

1. はじめに

多くの強震動予測では、地震基盤から工学的基盤までの深部地盤と工学的基盤以浅の浅部地盤を個別にモデル化および計算が行われている。しかしながら、地震ハザード・リスク評価において重要な周期1秒前後の地震動に関して、浅部と深部の接続部付近の構造の影響を受ける場合が多い。従って、両者を統合した地盤モデルを構築することが強震動予測の高度化には不可欠である。防災科学技術研究所では、日本海東縁部のひずみ集中帯に位置する新潟県地域を対象とした浅部・深部統合地盤モデルの作成と高度化に関する検討を進めている。

2. 初期モデルの作成

深部地盤モデルは、地震調査研究推進本部の「全国地震動予測地図」のために作成された「全国深部地盤構造モデル」を用いる。当モデルでは、地質構造を基本として作成された初期モデルに対して、主に周期1秒以上の長周期を対象として、強震観測点において観測された地震動記録のH/Vスペクトル比による修正が行われている。また、本検討の対象である新潟県地域については、2004年新潟県中越地震の余震を対象とした地震動シミュレーションによる修正も加えられている。

浅部地盤モデルの作成にあたり、新潟県および県内の市町村等が所有するボーリングデータをできる限り収集した。新潟県内の約10,000本のボーリングデータをもとに、微地形区分も用いて、約250mメッシュごとに地質を基本とした柱状モデルを作成した。なお、この段階では、強震動予測に必要な物性値はN値との経験的な関係式より与えており、地震動記録による修正が行われた深部地盤と異なり、妥当性の検証がされていない。

以上の個別に作成した浅部と深部それぞれの地盤モデルを合わせることにより、浅部・深部統合地盤の初期モデルとする。

3. モデルの高度化

上記の初期モデルを出発点として、広帯域(周期0.1から10秒)の地震動を再現できるような浅部・深部統合地盤モデルへの改良を行う。そのため、平野部において高密度に微動観測を実施し、それにより得られるH/Vスペクトル比やレイリー波の位相速度の分散曲線を用いたモデルの高度化について、手法の確立そのものも含めて検討を進めている。

キーワード: 統合地盤モデル, 強震動, ボーリングデータ, 微動観測

Keywords: Integrated structure model, strong-motion, borehole data, microtremor measurements

1751年高田地震による被害分布と震源域の再検討

Re-examination of the damage distribution and the source area of the 1751 Takada Earthquake

矢田 俊文¹, 卜部 厚志², 西山 昭仁^{3*}, 佐竹 健治³

Toshifumi Yata¹, Atsushi Urabe², Akihito Nishiyama^{3*}, Kenji Satake³

¹新潟大学人文学部, ²新潟大学災害復興科学センター, ³東京大学地震研究所

¹Faculty of Humanities, Niigata Univ., ²NHDR, Niigata Univ., ³ERI, Univ. of Tokyo

寛延四年四月二十六日(グレゴリオ暦:1751年5月21日)の丑刻(午前1~3時頃)に越後国西部(新潟県西部)で発生した地震によって、高田平野西縁に位置する高田城下をはじめとして、西側の山間部や日本海沿岸部で大きな被害が生じた。宇佐美(2003)によると、この地震の震央は高田平野北西部に想定されており、規模(M)は7.0~7.4と推定されている。

本研究では、地震被害が記された文献史料(地震史料)に基づいて検討を進める。まず最初に、現存する地震史料には様々な種類のものが混在しているため、その中から被害報告に基づく記載内容で、同時期に成立した信頼性の高いものだけを選び出す。次に、村落や町の総家数と倒壊家屋数の双方が記載されている史料のみを用いて、被害発生場所ごとに確実度の高い家屋倒壊率(全壊率)を求めていく。最後に、それらの家屋倒壊率から場所ごとの震度を推定し、その分布に基づいて1751年高田地震の震源域の再検討を行う。その際に、宇佐美(1986)の「歴史地震のための震度表」に基づいて、家屋倒壊率81~100%を震度7、同71~80%を震度6、同1~70%を震度5+, 同0%を震度5-, として震度に置き換えている。

村落や町での家屋倒壊率とそこから推定した震度だけではなく、当時の村落や町が立地した地盤条件の影響も加えて、信頼性の高い地震史料がある地域ごとに震源域を検討すると以下ようになる。

(a) 現在の越前市柿崎区地域にあたる岩手組十五ヶ村では、地盤条件の良い段丘上に位置する竹直村(越前市吉川区竹直)での家屋倒壊率は2% [震度5+]であり、地盤条件の悪い沖積平野に位置する他の村落では13~58% [震度5+]である。地盤条件の良い場所での家屋倒壊率が低いことから、岩手組地域は震源域でないと考える。

(b) 今町(越前市直江津・他)では、地盤条件の良い砂丘上に位置する坂井町での家屋倒壊率は5% [震度5+]、砂丘斜面に位置する横町は45% [震度5+]であり、地盤条件の悪い氾濫原に位置する中町は83% [震度7]となっている。地盤条件が良い場所で家屋倒壊率が低いから、今町地域は震源域でないと考える。

(c) 長浜村(越前市長浜)は地盤条件の良い海岸低地に位置しており、山崩れによる被害が少なく家屋全壊率は43% [震度5+]である。長浜村の周辺や名立小泊村など海岸沿いの村落の多くは山崩れによって大きな被害を蒙っているが、長浜村など地盤条件の良い場所では家屋倒壊率はあまり高くないため、海岸沿いは震源域でないと考える。

(d) 越前市西部を南北に流れる桑取川下流部では、地盤条件の良い河成段丘上に位置する花立村・中桑取村・下綱子村で家屋倒壊率0% [震度5-]、山寺村で5% [震度5+]であることから、この地域は震源域でないと考える。

(e) 桑取川中流部では、地盤条件の悪い地すべり崩壊堆積物(崩壊斜面)上に位置している村落で家屋倒壊率が高く、小池村・東吉尾村で100%、西吉尾村で91%、横山村で58%となっている。しかし、これらには山崩れによる土砂の下敷きとなった家屋も含まれており、山崩れの影響が大きいことから、この地域は震源域でないと考える。

(f) 桑取川上流部は地盤条件が良く、家屋倒壊率は土口村で26% [震度5+]、皆口村・横畑村で40% [震度5+]となっている。桑取川沿いで地盤条件の良い下流部と上流部の被害を比較すると、下流部の村落では家屋倒壊率0~5%であるのに対し、上流部の村落では26~40%となっており、下流部と比較して上流部の倒壊率が高くなっている。また、桑取川と高田平野の間に位置する山地では、中ノ俣村で家屋倒壊率20% [震度5+]、上綱子村で53% [震度5+]となっており、地盤条件が良いにも拘わらず家屋倒壊率は高くなっている。このように、桑取川上流部の皆口村・横畑村地域や東側の山地にある中ノ俣村・上綱子村地域で、地盤条件が良いにも拘わらず家屋倒壊率が高いことから、この地域が震源域に近接していると考えられる。

(g) 高田平野西縁部に位置する高田城下の町屋地区は、地盤条件の良い河成段丘上に位置しているにも拘わらず、家屋倒壊率は71% [震度6]と高くなっている。

以上のことから考察すると、桑取川上流部に位置する皆口村・横畑村地域、その東側の山地に位置する中ノ俣村・上綱子村地域、及び高田城下の町屋地区が震源域に近いと考えられる。

謝辞: 本研究は、文部科学省の研究プロジェクト「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」の一環として実施されたものです。

キーワード: 高田地震, 地震史料, 家屋倒壊率, 地盤条件

Keywords: Takada Earthquake, historical records of earthquake, collapse ratio of houses, ground condition

SCG062-14

会場:国際会議室

時間:5月27日 15:30-15:45

ひずみ集中帯の「近世以降の地震活動に関する観測記録等の収集と解析」の中間成果報告

The midterm report of the systematic historical earthquake study along the west coast of the Sea of Japan.

松浦 律子^{1*}, 古村 美津子¹, 関根 真弓¹, 岩佐 幸治¹, 鈴木 保典¹

Ritsuko S. Matsu'ura^{1*}, Mitsuko Furumura¹, Mayumi Sekine¹, Koji Iwasa¹, Yasunori Suzuki¹

¹ 地震予知総合研究振興会

¹ADEP

ひずみ集中帯に発生する地震像を明らかにするため、我々は、江戸時代以降明治・大正・昭和・平成に発生したこの地域の地震に関する資料を収集・解析し、長期評価の精度向上に役立つよう、地震活動の履歴を詳細に検討してきた。糸魚川-静岡構造線までの主として東北～北信越地域の日本海東縁側のひずみ集中帯では、江戸時代以降でも50個近い被害地震が知られており、地震被害への配慮が必要な地域である。現在半分以上の地震について解析ができた。この地域では海岸沿いに隆起痕跡が見られるが、地震は必ずしも東傾斜で陸側隆起のものだけが発生する訳ではない。奥尻島、飛島、粟島などに関しても島の隆起を起こす断層面をもつ地震だけが発生している訳ではない。一般に内陸の被害地震は再来間隔が数千年以上である場合が多いが、男鹿半島では1810年と1939年に震源が同じではないものの、M6.8～6.9とほぼ同規模の地震が発生している。ひずみ集中帯の変形は、二つの男鹿地震のように、東西方向には限られた幅の中にM6.8～7程度の地震が複数発生して、全体として $V_p=6\text{km/s}$ 層が東西方向に縮むことによって、表面の大きい変形分が地下でも賄われているのではないだろうか。

このように考えると、断層面の傾斜方向は二通り考える必要があるが、ひずみ集中帯の中での一連のM7程度の既知の震源域分布から、この地域で次に地震被害に注意すべき場所を従来よりは絞り込んでいけるだろう。

本研究は文部科学省からの委託研究によって実施されました。

キーワード: ひずみ集中帯, 歴史地震, 男鹿地震

Keywords: the concentrated deformation zone, historical earthquake, Oga earthquake

九州の地体構造と地震断層 Tectonic structure and seismic faults in Kyushu

山北 聡^{1*}

Satoshi Yamakita^{1*}

¹ 宮崎大学教育文化学部

¹ Fac. Educ. & Cult., Univ. Miyazaki

日本の内陸地震断層の多くは、古い起源を有する断層や褶曲軸面などの、既存の弱面を利用して活動しているものである。九州における地震断層もこの観点から考察しうるだろう。ここでは、九州の震源断層となりうる断層のいくつかに関し、地体構造との関係について議論する。

北部九州の北北西-南南東走向の断層

警固断層・西山断層などの断層群は、いわゆる「筑豊型構造」を形成する断層群と同じ走向をもち、一部トレスも一致する。この筑豊型断層群は、正断層成分をもち、中期中新世の日本海の拡大に伴う西南日本弧の時計回り回転の際に、西南日本弧・琉球弧間の湾曲部の外弧側における展張場において形成されたものと考えられる。現在の断層は、この断層もしくは断層集中帯を弱面として利用して活動しているものであろう。

別府-島原地溝帯南縁断層群

別府-島原地溝帯の南縁を画する断層（大分-熊本線）は、「長崎三角地帯」の南縁を画するものでもあり、四国以東の中央構造線の延長部と考えることができる。ただし、この場合の中央構造線は、現在活動している断層帯としての中央構造線であって、白亜紀に形成された西南日本内帯と外帯を画する地体構造境界断層としての中央構造線ではない。地体構造境界としての中央構造線は、佐田岬半島および佐賀関半島北側の海底下を通過した後、走向を変えて佐賀関半島の三波川変成岩類と上部白亜系大野川層群（和泉層群の西方延長）との境界をなす佐志生断層へつながり、さらに再度走向を変え白杵-八代構造線に連続する。このような湾曲したトレスを有するに至ったのは、三波川変成岩類の上昇により、その分布中軸部に背斜が、またその南側に向斜が形成され、三波川変成岩類の隆起軸がもともとの中央構造線のトレスに対し時計回りに斜交し、かつ九州では相対的に隆起量が小さく、三波川変成岩類が全面的に地表に露出するには至らなかったことによる。別府-島原地溝帯南縁断層群は、このうち背斜北翼の北傾斜の部分を利用し、これを地表へショートカットさせる形で活動しているものである。この、新たな中央構造線断層系の形成は、佐志生断層の最終活動時期が漸新世であることから、中新世以降と考えられる。おそらく、中期中新世の西南日本弧回転時の外弧側展張域における「長崎三角地帯」の沈降の際に生じたものであろう。

日奈久断層

日奈久断層は、秩父累帯（九州での秩父累帯には、四国以東で見られる北部秩父帯は基本的に存在せず、黒瀬川帯と南部秩父帯のみからなる）の構造に対し反時計回りに30°程度斜交した走向を有する。これと同様の斜交関係を有する断層群は、九州-関東山地の黒瀬川帯・南部秩父帯・北部四万十帯北部に、数十-百km程度の間隔で存在し、いずれも北西側下降および左横ずれの隔離を示す。この断層群は、白亜紀前期を中心として活動した黒瀬川帯北縁に沿う左横すべり断層に伴って、これから派生して副次的に形成されたもので、前弧スリパーとしての黒瀬川帯・南部秩父帯を沈み込み帯に沿う方向に伸長させる結果をもたらしたものである。これらの断層群の一部は、その後再活動しており（最も顕著な例は、紀伊半島東部の五力所-安楽島-神島断層）、その際断層が北東側へ延長され北部秩父帯・三波川帯にも変位を及ぼしている。五力所-安楽島-神島断層の場合、その再活動は、中期中新世に西南日本弧が回転して伊豆弧と衝突したことにより、その東端部が湾曲した際、その外弧側での伸長を実現させるためのものであったと考えられる。日奈久断層の場合も、西南日本弧・琉球弧間の湾曲部に位置しており、琉球弧のトレンドを維持している天草とこれに対し40°ほど時計回りに回転した九州本体との間の変位を実現するため、この時再活動したと考えられよう。現在の日奈久断層は、この時に北東側へ延長された分も含めて活性化された断層面が、新たなテクトニクス配置の下でさらに再活動しているものであろう。

阿久根断層（仮称）

1997年の鹿児島県北西部地震の震源断層となったもので、東西ないし、西北西-東南東の走向を持つ左横すべり断層であるが、その位置は、西南日本弧と琉球弧の境界の湾曲部における内弧側での短縮変形の表現としてのメガキンクの軸

面とほぼ一致している。おそらく、これを弱面として利用して活動しているもので、琵琶湖北東の柳ヶ瀬断層と同様の起源を持つものと考えられる。

以上、4つの例を取り上げたが、これらの断層は様々な時期に形成された異なる起源を有するものであるが、これらに共通する点として、中期中新世の日本海拡大・西南日本弧回転という一大変動時にその一翼を担ったということがある。この時期に活性化された構造は、その後の異なるテクトニクス下においても、条件さえ整えば再活動する潜在的可能性をもっているのかもしれない。

キーワード: 九州, 地震断層, 地体構造

Keywords: Kyushu, seismogenic fault, tectonic structure

九州内陸の地震活動と応力場

Stress field in seismogenic zone of Kyushu, Japan inferred from seismic activity and focal mechanisms

松本 聡^{1*}, 千蔵 ひろみ³, 大倉 敬宏², 清水 洋¹, 宮崎 真大³, 井上 寛之², 吉川 慎², 安部 祐希², 正木 喜啓⁴, 植平 賢司¹
Satoshi Matsumoto^{1*}, Hiromi Chikura³, Takahiro Ohkura², Hiroshi Shimizu¹, Masahiro Miyazaki³, Hiroyuki Inoue², Shin Yoshikawa², Yuki Abe², Yoshihiro Masaki⁴, Kenji Uehira¹

¹九州大学・地震火山センター, ²京都大学・理学研究科火山研究センター, ³九州大学大学院理学府, ⁴京都大学大学院理学研究科

¹SEVO, Kyushu University, ²AVL, Kyoto University, ³Graduate School of Science, Kyushu Univ., ⁴Graduate School of Science, Kyoto Univ.

In the upper crust of Kyushu district, Japan, an area with high seismic activity is found in the middle part. This area is called Beppu-Shimabara graben (B-S area) because of existence many normal faults in this region. Many active volcanoes exist (i.e. Unzen, Aso, Kuju, Beppu), and historical large earthquakes occurred in this region. However, it is not always confirmed whether this region behave as a graben formation or not from other evidence. The major mechanism of earthquakes in the Kyushu district is strike slip type. Generally, extensional (minimum principal) stress is in north-south direction in Kyushu. On the other hand, microearthquakes normal faulting also occurs in B-S area. Basic question is why seismic activity is high and stress field changes in B-S area.

Recently, Nakao et al. (2005) estimated spatial distribution of strain rate field in Kyushu area from GPS data. The area in which higher strain rate dominates not in extension but share is found in Beppu-Shimabara graben. This can explain high seismic activity in this region. They also revealed notable contraction in east-west appear around Aso volcano. High strain rate can be seen around Aso volcano.

On the other hand, information about stress field is also important to understand deformation of the crust. Elastic and anelastic feature of crust could be inferred from both of stress and strain field. We performed stress tensor inversion by using polarity data of first motion at direct P wave arrival. The data were obtained at stations operated by NIED, JMA and Kyushu University. In addition, we deployed more than 40 temporal seismic stations around the graben in order to determine the stress field. Directions of principal stresses are obtained at spatially distributed grid points every 20 km interval. At each grid point, we collected polarity data of events occurred nearer than 10 km apart from grid point and carried out the stress tensor inversion. The minimum axes of the principal stress are generally oriented in NNW-SSE direction. The maximum axes are almost in WSW-ENE direction. The stress rates are greater than 0.75 at most of the point, implying the maximum stress is close to the moderate principal value. The maximum stresses in Beppu-Shimabara graben incline toward vertical direction while those have direction in east-west at most of points. It implies normal faulting would dominantly occur in Beppu-Shimabara graben. In addition, the minimum axes in the graben rotate counterclockwise. This stress field change requires a mechanism either relaxing the stress in east west direction or vertically loading in this region. Strain rate field by GPS observation also show the similar pattern and support the existence of the relaxing mechanism. This could be interpreted by existence a 'weak body' in the crust. The area would be contracted by regional stress field. This could explain the strain rate distribution. And stress in east-west could be relaxed so that second principal stress in vertical direction would be maximum one. On the other hand, this stress relaxation implies another important suggestion about strength of medium in B-S area. Only a medium with weak shear strength leads seismic activity into high under the condition of the low horizontal stress. Therefore, the crustal material in the B-S area would be easily fractured due to weak strength.

キーワード: 別府島原, 応力場, ひずみ集中

Keywords: Beppu Shimabara, Stress field, Focal mechanism

北部九州における中新世の伸張及び短縮テクトニクス Miocene extensional and contractional tectonics in the northern part of Kyushu

尾崎 正紀^{1*}

Masanori Ozaki^{1*}

¹産総研 地質調査総合センター

¹AIST, GSJ

九州北部、特に福岡県付近には北西方向の断層が多く発達している。そして、この地域の北西方向の断層を特徴づけるものとしては、筑豊型構造(松下, 1949)と呼ばれるハーフグラベンが発達するとされてきた。ところが、実際には南北方向や北西方向の横ずれ断層・逆断層も多く発達しており、筑豊型構造の一部は横ずれ断層及び逆断層からなる。本地域は、伸張テクトニクスから短縮テクトニクスへの変遷が認められ、本地域のこれらの断層の形成史を明らかにすることはアクティブテクトニクスを考える上でも重要である。以下、本地域の主要な地質構造である中新世の2つの構造について、それらの特徴と形成時期に関する検討結果を述べる。

1. 北西方向の正断層によるハーフグラベン構造

北西方向の正断層群によって形成されたハーフグラベンで、福岡県から山口県西部にかけてよく発達する。福智山断層、二島断層、高倉断層、小倉断層(北部側部分のみ)によって代表される。本地域で最も変位の大きな断層群で、垂直変位は最大1,000?3,000mに達する。多くは筑豊型構造に一致する。地表の主断層の傾斜は80-60度程度であるが、炭田のデータからはリトリック正断層と見なされるデータもある。圧縮応力による断層によって、これらのハーフグラベン構造は複雑に変形しているが、後述のように単純なインバージョンではない。

筑豊型構造の主な活動時期については、古第三系堆積時の構造と考えられてきた(松下, 1971など)。しかし、(1)ハーフグラベンの主断層沿いに、期待される堆積システム(崖錐・土石流・扇状地・デルタファン堆積物の存在、向斜沿いの層厚の増大、堆積場の移動)が系統的に認められない一方で、顕著なドレイプ向斜を伴う、(2)現在基盤が露出する地塁地域にも古第三系が分布し、かつ炭層の成熟度から地層が厚く堆積していたと推定される(三木, 1996)、(3)炭質解析から求められる堆積盆の中心と堆積時のハーフグラベンから期待される中心とが不一致しない(鈴木・尾崎, 2010)、(4)山口県北西部の日置層群(上部漸新統?下部中新統下部)の分布地域では、日本海の背弧形成に伴って形成された東西方向のハーフグラベン構造(十楽-貝川断層など)や川尻層(中部中新統最下部)を北西方向のハーフグラベンが切る(尾崎ほか, 2006)など、古第三系堆積後の構造を示すデータが多い。更に最近明らかになってきた西南日本内帯の太平洋側の古第三系の分布(松原ほか, 2009など)との連続性や、芦屋層群の沖合方向は南東方向(尾崎ほか, 1993)で始新世末以降に北部九州の堆積域は日本海側に移ったとされることが否定されるため、北部九州に分布する古第三系も当時の西南日本弧(陸弧)における連続した前弧海盆の堆積物の一部である可能性が高く、他の地域に認められない筑豊型構造を古第三紀の特殊性と結びつける必要はない。

以上のことから、本地域の正断層によるハーフグラベンは始新世?漸新世の堆積盆形成時の地質構造ではなく、芦屋層群堆積後、恐らく中期中新世初頭頃に形成された可能性が高い。

ハーフグラベンの形成は、地域的かつ短期的な伸張場で形成された可能性が高く、特に様でない西南日本弧の形成を理解するのに重要な構造である可能性がある。なお、上記のハーフグラベン形成時の堆積物が認められないが、これは、後期漸新世以降は背弧形成時期に伴い本地域は隆起域であったこと、またフィリピン海プレート(四国海盆)の沈み込みの影響も加わり、削剥されたためと推定される。

2. 南北?北西方向の横ずれ及び逆断層

北部九州には南北?北西方向の左横ずれ断層及び逆断層が広範囲に発達する。本地域では小倉-田川断層(北部を除く)や熊ヶ畑断層などで代表され、これらの断層の横ずれ変位は数km、垂直変位は数百mに達すると推定される。ドレイプ向斜を伴うが、断層の傾斜を反映してとの距離は小さい。また、主断層沿いには一部逆転層を伴うこともある。

北西方向のハーフグラベン構造に強く変位を与えているが、単純なインバージョンでなく、ハーフグラベン構造を切り、部分的に屈曲させている。また、福智山断層や二島断層などで見られるように、横ずれ断層などがハーフグラベンの主断層の断層面と重複(正断層面の一部を利用)していることも多く、ハーフグラベン内に主断層から派生する西北西-東北東方向の正断層やハーフグラベン構造の短縮による北西方向の逆断層?横ずれ断層が副次的によく発達する。

本断層群は、中期中新世?後期中新世にかけて、北西?南東?南北方向の圧縮場で形成されたと考えられる。また、警固断層、西山断層、福智山断層、小倉東断層などの活断層は、これら横ずれ及び逆断層の一部を利用して再活動していると推定される。

キーワード: 北部九州, 中新世, 伸張テクトニクス, 短縮テクトニクス, ハーフグラベン, 筑豊型構造
Keywords: north Kyushu, Miocene, extensional tectonics, contractional tectonics, half graben, Chikuho-type structure

宮崎平野および九州外帯山地の第四紀テクトニクス Quaternary tectonics of Miyazaki Plain and Kyushu Mountain, southern Japan

長岡 信治^{1*}

Shinji Nagaoka^{1*}

¹ 長崎大学

¹Nagasaki Univ.

本発表では、宮崎平野および九州外帯山地の形成過程を周辺のテクトニクスと関連づけて論じる。1) 2-1Ma: 宮崎層群の堆積域で隆起が始まり、前弧海盆の中心は、北東側の宮崎沖堆積盆から現在の日向海盆の位置に移動したと推定される(岡村, 1998; 2008)。この隆起の原因のひとつは、沈み込んだ九州パラオ海嶺が宮崎平野下に位置するようになり、アイソスタシーによって隆起を引き起こしたことが考えられる。また、宮崎層群の変形から、3.3Ma以降の沖縄トラフの拡大やそれに伴う九州パラオ海嶺をピボット軸とした南九州の反時計回り回転運動、沈み込むスラブの傾斜増大など(Tokushige & Fabbri, 1996; Kodama et al., 1995; 鳥井・尾田, 2001; Yamaji, 2003)も宮崎層群の堆積盆の隆起と関係していると推定される。2) 1Ma-350ka: 宮崎平野の第四系下部の仮屋層は、1Ma頃から南側の鰐塚山地から砂礫が宮崎平野に供給され、鰐塚山地を含む九州外帯山地が隆起を始めたことを表している。仮屋層の堆積盆地は断層盆地ではなく、北東-南西を軸とする基盤の緩やかな単褶曲による曲降盆地である。これらの堆積盆は、北西-南東方向の圧縮応力場によるものか、または、鰐塚山地のブロックが相対的に東へ動いてきた pull-apart basin と考えられる。このことは、1Ma-500ka に沖縄トラフ拡大や鹿児島地溝形成による鰐塚山地ブロックが反時計回りに回転、または、東方へ移動したことを示唆する。3) 350?150ka: 高位段丘群が示すように、500-350ka 以降は宮崎平野で段丘形成が顕著となる。この著しい段丘形成の始まりは、九州山地や鰐塚山地の上昇域が東側に及び、宮崎平野そのものが本格的な隆起を開始したことを示している。こうした隆起は、800-600ka にフィリピン海プレートの沈み込み方向が、NNW 方向から WNW 方向に変化したこと(Seno, 1985; 岡村, 1988)やアムールプレート(Zonenshain & Savostin, 1981)に属する西南日本内帯の東進(木村ほか, 1986)により、中央構造線は顕著な右横ずれ運動を開始し(Sangawa, 1978; Okada, 1980)、九州山地東部から宮崎平野、日向海盆、豊後水道にかけてのゾーンで、西進する西南日本外帯の前弧スリバーが、交差する琉球弧北端に遮られ圧縮を受けたこと(Kimura, 1996; 木村, 2002)が原因と考えられる。その結果、宮崎平野を含む西南日本外帯は東から著しい東西圧縮を受けた(千田, 1992)。九州山地北西縁の布田川-日奈久断層系もこの時期活動的になり、九州山地の隆起とその北の熊本平野・八代海の沈降が対照的に顕著になってきたことを示している。日向海盆は2Maから沈降を始め、600ka以後は、その沈降速度が1m/kaから2-1.5m/kaへと加速した(岡村, 1998)。4) 150-0ka: MIS5eの三財原段丘の旧汀線高度(長岡, 1986; 長岡・町田, 2001)とMIS1の下田島I段丘の旧汀線高度(前空・長岡, 1988; 長岡ほか, 1991a; 前空, 1992; 長岡・町田, 2001)から、少なくとも最近13万年間は宮崎平野南東部海側、大淀川下流部から日南海岸を隆起の中心とし、北方向へ傾動する隆起が卓越している(長岡, 1986; 長岡ほか, 1991a; 長岡・町田, 2001)。三財原段丘や下田島I段丘の旧汀線の高度から(長岡, 1986; 長岡ほか, 1991a;b)、130ka?現在の隆起量は平野中南部で110-100m、北部で50-40m、隆起速度はそれぞれ1m/ka、0.5m/kaである。最近10年間のGPSの垂直方向データ(国土地理院, 2010)は、宮崎平野南部で、最大で1-3cm/10yrの隆起を示している。現在もこの隆起は引き続いていると考えられる。これは、平野南部の日向灘沖合におけるドーム状隆起(Nakada et al., 2002)の結果と考えられる。こうした平野中部から日南海岸にかけての北または北西に傾動を伴う加速度的な隆起は非地震性の曲隆と考えられる(長岡ほか, 1991a; 前空, 1992)、その原因については、日向海盆南側において、軽い大陸地殻を持つ九州パラオ海嶺が平野南部から日南海岸の下に沈み込み、それによるアイソスタティックな浮力が生じていることが原因と考えられている(長岡ほか, 1991b)。また、宮崎市沖にある-100mgalを超える大きな負の重力から推定される地殻内部の浮力の大きな物質、例えば蛇紋岩ダイアピアなどの上昇によるドーム状隆起の可能性も指摘されている(Nakada et al., 2002)。このように宮崎平野および九州・鰐塚山地の350ka以降の隆起は、前弧スリバーによる曲隆、九州パラオ海嶺の沈み込みや地殻内部の軽い物質の浮力による平野南部の急激なドーム状隆起が重畳したものと考えられる。一方、最近10年間のGPSの水平方向データは、鰐塚山ブロックが宮崎平野に対し相対的に年間5cm以上も南東へ動くような変動を示している。この動きは現在沖縄トラフの拡大が進行しつつあることを示していると考えられる。

キーワード: 第四紀, テクトニクス, 隆起, 宮崎

Keywords: Quaternary, tectonics, uplift, Miyazaki

SCG062-19

会場:国際会議室

時間:5月27日 17:00-17:15

別府 - 島原地溝帯の形成過程とアクティブテクトニクス Formative process of the Beppu-Simabara Graben and its active tectonics

伊藤 谷生^{1*}, 佐藤 比呂志², 竹村 恵二³, 長岡 信治⁴, 早川 信¹, 井川 猛⁸, 山北 聡¹¹, 工藤 健⁶, 今泉 俊文⁵, 石山 達也², 堤 浩之³, 武田 哲也⁷, 荒井 良祐¹⁰, 阿部 進⁹

Tanio Ito^{1*}, Hiroshi Sato², Keiji Takemura³, Shinji Nagaoka⁴, Makoto Hayakawa¹, Takeshi Ikawa⁸, Satoshi Yamakita¹¹, Takeshi Kudo⁶, Toshifumi Imaizumi⁵, Tatsuya Ishiyama², Hiroyuki Tsutsumi³, Tetsuya Takeda⁷, Ryoyu Arai¹⁰, Susumu Abe⁹

¹ 千葉大学, ² 東京大学, ³ 京都大学, ⁴ 長崎大学, ⁵ 東北大学, ⁶ 中部大学, ⁷ 防災科学技術研究所, ⁸ 阪神コンサルタンツ, ⁹ 地球科学総合研究所, ¹⁰ 川崎地質, ¹¹ 宮崎大学

¹ Chiba University, ² University of Tokyo, ³ Kyoto University, ⁴ Nagasaki University, ⁵ Tohoku University, ⁶ Chubu University, ⁷ NIED, ⁸ Hanshin Consultants, ⁹ JGI, ¹⁰ Kawasaki Geological Engineering, ¹¹ Miyazaki University

別府 - 島原地溝帯は日本列島で数少ない伸長テクトニクスの場合として、またその南縁が「長崎三角地」の長辺をなすものとして、古くから注目を集めて来たが、その地殻構造上の実体については明確ではなかった。これに対するブレークスルーは、別府 - 島原地溝帯の東端の別府湾内で1980年代後半から1990年代初頭、京大理学部附属地球物理学研究施設が行った反射法地震探査ならびに詳細な重力探査の諸成果によってもたらされた(由佐ら, 1992)。この成果から、別府湾の堆積盆は、日本列島地殻構造を内帯・外帯に分かつ中央構造線上盤に形成された半地溝の右ずれ運動によって形成されたというモデルが示された(山北・伊藤, 1999)。次の飛躍は、2009年、産総研の統括の下で行われた雲仙断層群に関する調査の一環としての詳細な島原湾海上地震探査によって生まれた。別府 - 島原地溝帯の西端に位置する島原湾の堆積盆も別府湾同様、半地溝の構造を示すことが明瞭となっている(早川ら, 2010)。これら両端の堆積盆構造から推定される別府 - 島原地溝帯の基本的テクトニクスは、NW 走向・NE 傾斜の *releasing bend* を有する ENE ないし NE 走向・北傾斜の主断層の右横ずれ運動と考えられるが、形成・成長過程を理解する上でいくつかの重要な未解明事項がある。

第1に、主断層は別府湾ならびに九州主部では中央構造線と一致する。しかし、中央構造線がその走向を反時計回りに回転させ日奈久断層となるため主断層は熊本付近で中央構造線から分離し、方向を曲げることなく南西方に延長され、島原湾に入る。島原湾での主断層が地体構造上どのような位置を占めるかは不明である。

第2に、主断層に直交する断面では堆積盆中に *roll-over* 構造が確認されるので主断層のすくなくとも一部が *listric* な構造を有していることは確実であるが、地下深部までの全体構造は不明である。

第3に、別府湾奥で *releasing bend* を形成する別府西断層(朝見川断層など)はさらに E - W 方向の西方断層群(万年山断層 - 水縄断層など)へと接続している。この西方断層群は線状重力異常帯を示す松山 - 伊万里線(「長崎三角地」の北辺)と対応しているとも考えられるが、そもそも「長崎三角地」の実体は何であり、それは別府 - 島原地溝帯といかなる関係を有するのか、これも確定的な回答を持ち合わせていない。

一般的に言って、アクティブテクトニクスは対象とする構造の形成・成長過程の現時点における表現であるから、形成・成長過程にかかわるこれらの諸点の解明抜きには本質に迫ることはできない。幸い近年、北九州地方では、地質学的データや重力データに加えて、地震学的、変動地形学的、測地学的データなどが新たに急速に集積しつつある。このアドバンテージを活かし、これらの新データを踏まえて形成・成長過程を議論するとともに、アクティブテクトニクスについて様々な角度から検討を加える。

キーワード: 別府 - 島原地溝帯, 半地溝, 伸長テクトニクス, 中央構造線, 九州

Keywords: Beppu-Shimabara Graben, half graben, extension tectonics, Median Tectonics Line, Kyushu

九州東部の地殻構造 ~ 南九州における地殻変形の構造的要因 ~

Detailed seismological structure of eastern Kyushu - Structural inference on left-lateral motion in southernmost Kyushu-

大津 啓^{1*}, 岩崎 貴哉¹, 加藤 愛太郎¹, 宮町 宏樹²
Hiromu Otsu^{1*}, Takaya Iwasaki¹, Aitaro Kato¹, Hiroki Miyamachi²

¹ 東大・地震研, ² 鹿児島大学大学院理工学研究科

¹ERI, The University of Tokyo, ²Kagoshima university

1. 緒言

九州地方には、フィリピン海プレートが沈み込み、複雑な地質環境下にある。九州北部は、伸張応力場に支配された地域で、別府 - 島原地溝帯は、多数の東西方向の正断層が発達しており、半地溝の形状をしている。その九州中部は、北東 - 南西方向の走行を持つ付加帯の帯状構造によって特徴づけられる。九州南部の構造は、沈み込む九州 - パラオ海嶺や東西方向に背弧拡大する沖縄トラフの影響を受けていると考えられる。古地磁気の解析 (Kodama et al, 1995) によれば、この地域の東部において左横ずれ運動が起きていることが提唱された。この運動は、最近の GPS ネットワークの解析 (Wallace et al, 2009) によって裏付けられた。

九州の地殻・上部マントル構造については、不明の点が多く残されている。別府 - 島原地溝帯について言えば、この地溝帯内の詳細な地震波速度構造やその南縁に位置する大分 - 熊本構造線の詳細な位置や深部までの形状といった基本的な情報についてすらまだ明らかにされておらず、東から別府湾まで続く中央構造線 (MTL) (遊佐・他, 1992) と九州地方との接合関係も不明である。また、九州南部の左横ずれ運動帯に関しては、左横ずれに関する力学的なモデルは提唱されているが、なぜ現在の位置で左横ずれ運動が起きているのか、その地構造的要因がわかっていない。

2. 1994年、1996年制御震源地震探査

1994年及び1996年に、九州東部を南北に縦断する測線で制御震源地震探査が行われた。このデータに基づいて速度構造モデルが提出されているが (田代・他, 1999; 安藤・他, 2002)、走時解析にとどまり、上記の問題点・視点に立った解析・解釈はなされていなかった。本研究では、まずこれらの制御震源データを再解析し、測線下にある主要な地質構造線の深部構造について新たな知見を得ることを試みた。具体的には、初動走時トモグラフィ、初動及び広角反射波の走時・振幅データについて波線追跡法/asymptotic ray theory によって求めた構造モデルを構築した。更に、深部の P 波及び S 波構造を求めため、九州地方東部に焦点を当てた制御震源・自然地震統合トモグラフィを行い、地殻深部及び上部マントル構造を求めた。

3. 構造モデルとその解釈

まず、地殻上部の特徴を述べる。測線北部には、別府 - 島原地溝帯の火山堆積物に対応する $3.2\sim 5.1\text{km/s}$ の層が深さ $2\sim 3\text{km}$ まで存在する。大分 - 熊本構造線を境として、その南側の三波川帯の速度は、 5.4km/s と速い。また、OKTL の浅部形状は高角北傾斜であることがわかった。三波川帯の南には、 5.4km/s の秩父帯が続き、その南で日向コンプレックスに対応する $3.9\sim 5.8\text{km/s}$ の層が、厚さ 6.5km で約 15° に北傾斜していることがわかった。この速度境界が NTL と考えられる。その南側では表層から $5.3\sim 5.8\text{km/s}$ の高速度の物質が深さ 3.7km/s まで達している。この領域は測線近傍の尾鈴山に花こう閃緑斑岩が貫入しているためと考えられる。この領域は V_p/V_s が小さく、上記の解釈と調和的である。その南側では $3.3\sim 5.8\text{km/s}$ の低速度の層が南端まで続いている。

広角反射波を加えた波線追跡法、振幅計算によって深部構造を求めた。測線北部では、約 25° で北傾斜する反射面の存在することがわかった。初動解析から、この反射面の直上に OKTL と考えられる速度境界が求められており、この反射面は OKTL の深部延長と考えられる。本研究の測線の東側の別府湾で反射法地震探査が行われ、MTL が約 30° で北傾斜していることが報告されている。この結果は、本研究の結果と良く一致することから、求められた低角北傾斜反射面は MTL の西方延長だと考えられる。

測線南部において制御震源初動走時データから約 45° に高角北傾斜する構造を求められた。更に、広角反射波の解析から、その深部延長に約 20° に低角北傾斜の反射面を求めた。これらは、ほぼ地表から深さ 25km にわたって存在する大規模な構造境界と解釈される。更に自然地震トモグラフィで求めた速度構造及び V_p/V_s 構造は、この北傾斜反射面の存在を強く支持するものであった。求めたモデルと地震分布の関係性を見ると、北傾斜構造の高角部の下部から低角部の上部に沿って地震が起きていることがわかる。NIED によるこの北傾斜構造に沿う $M>3$ の地震のメカニズムを調べると、左横ずれのメカニズムが卓越している。この北傾斜構造の位置は、さらに北傾斜構造は、Kodama et al, (1995) による古地磁気の解析や Wallace et al, (2009) による GPS の解析から求められた左横ずれ帯の位置とほぼ一致する。この構造に沿った地震活動と考え合わせ、左横ずれ運動はこの北傾斜構造に沿って進行している可能性がある。

プレート間固着とブロック回転の同時推定による九州地方の地殻変動モデリング Kinematic Modeling of Crustal Deformation in Kyushu Island Based on Inter-plate Coupling and Block Rotation

三浦 哲^{1*}, 宮尾佳世¹, ローラ・ウォレス²
Satoshi Miura^{1*}, Kayo Miyao¹, Laura Wallace²

¹ 東北大学・地震・噴火予知研究観測センター, ² 地質・原子核科学研究所 (NZ)

¹ RCPEV, Tohoku University, ² GNS Science, New Zealand

西南日本では、フィリピン海プレート (PHS) が陸側のアムールプレート (AMR) の下に斜めに沈み込んでおり、紀伊半島から四国の沖合では、M8クラスの南海・東南海地震が繰り返し発生している。一方、1900年以降に発生した南西諸島沖合のプレート境界地震としては、1901年 (M7.5)、1938年 (M7.7) の2例のみと低調であり、島弧に沿った方向で地震活動の特徴が大きく異なっている。また、背弧側では沖縄トラフの拡大が進行しており、複雑なテクトニクス場を形成している。GEONETで観測される西南日本の変位速度場は一様ではなく、中国・四国地方ではPHSの沈み込みによる地殻変動が支配的であるのに対し、九州地方では北部・中部・南部で様子が全く異なっている。中部は北部に対して西方へ、南部は南東へそれぞれ移動している。また、南部は6Ma以降、複数のブロックに分かれながら約30度反時計回りに回転したという古地磁気学研究もある。以上のように西南日本の地殻変動は、PHS-AMUの相互作用だけでは説明が困難であり、陸域の地殻をいくつかのブロックに分割したうえで、それらの回転運動と相互作用を加味したモデリングが不可欠である。

本研究では、McCaffrey [2002] による逆解析プログラム DEFNODE を用いて、仮定したプレートおよびブロック境界形状に基づいたプレート間カップリングと、ブロック回転運動のパラメータを同時に推定することを試みる。本研究では、大分-熊本構造線を中央構造線 (MTL) の延長と考え、西南日本を内弧と外弧に分割した。内弧では、別府湾から島原半島に至るブロック境界 (BSG) を設定して、BSGとMTLで囲まれる小領域をSHIMブロック、それ以外の内弧をSWJPブロックとした。また外弧については、Bird [2003] による沖縄マイクロプレートの北縁で二分し、その北側をMKSKブロック、その南側は鹿児島地溝を境界として西側をSATSブロック、東側をOHSUの各ブロックに分割した。また、Birdの沖縄マイクロプレートのうち種子島以南の南西諸島部分をOKNWブロックとし、これら全てのブロックのAMRに対する相対運動のオイラー極と、これらのブロック・プレート境界におけるカップリング率を同時に求めた。また、沈み込むPHSの形状は、Nakajima and Hasegawa [2007] によるモデルを用いた。

逆解析に用いるデータは、東経135度以西のGEONETによる水平速度場 (1998.1~2002.12)、地質断層の変位速度 (産総研データベースより) と、琉球弧で発生した主な地震のCMT解によるすべりベクトルである。逆解析により得られた結果は以下のように要約できる。1944、1946年の東南海・南海地震の地震時すべり域である四国沖から近畿・東海にかけてのプレート境界ではほぼ一様に強く固着しているのに対し、豊後水道・日向灘周辺では固着率は低くなっている。南西諸島沿いでは全体的にカップリングは弱いものの、種子島周辺では固着が周囲よりも若干強い領域が見られる。この領域では地震活動が高く、辺縁部で相似地震の発生割合が多い。Obara and Hirose [2006] によって四国・紀伊半島下で見出された非火山性深部低周波微動は、カップリング率が0.5程度の領域に分布している。推定されたブロック間の相対運動については、中央構造線を挟んで約5mm/yrの右横ずれ (地質学的に推定された平均的すべり速度とほぼ同程度) が見られ、前弧域のスリパー運動が捉えられたと考えられる。別府-島原地溝帯では年間8mm程度の拡大傾向が見られる。先行研究ともあわせて考えると、ここは拡大を続ける沖縄トラフの延長と考えられ、九州の地殻変動を規定する大きな要因になっている。

Bird [2003] による沖縄マイクロプレートの北縁には、活断層などのようなブロック境界に対応する明確な証拠はないが、地質学的には北薩・宮崎などの屈曲構造が知られている (例えば杉山 [1989])。地震活動も帯状に高くなっており、西側では1997年に鹿児島県北西部地震 (M6.4) が発生している。この一帯では、GPSによる水平変動から計算されるせん断歪も明らかに大きくなっており (Wallace et al. [2009])、歪集中帯を形成している。

キーワード: プレート間固着, ブロック回転, 九州, GPS, 地殻変動

Keywords: plate coupling, block rotation, Kyushu Island, GPS, crustal deformation

SCG062-22

会場:国際会議室

時間:5月27日 17:45-18:00

南九州の活火山の深部構造 Deep structure of active volcanoes in southern Kyushu

小林 哲夫^{1*}

Tetsuo Kobayashi^{1*}

¹ 鹿児島大学

¹ Kagoshima University

南九州の活火山・カルデラの多くは鹿児島地溝にそって分布している。そのうち最も新しいカルデラである鬼界カルデラを例に、活火山・カルデラ系の深部構造を考察する。具体的には大規模噴火に付随して発生した様々な地学現象（地震に伴う諸現象・小規模噴火）の地質学的な証拠をもとに、カルデラ噴火の推移を検討し、さらにカルデラの地下深部（地殻下部まで）の構造を考察した。

鬼界カルデラの最新の大規模噴火（アカホヤ噴火）は完新世（7.3 cal ka BP）に発生しており、噴出物から様々な地質現象が読み取れる。アカホヤ噴火はまずプリニー式噴火で始まり、次いで火砕流噴火が発生し、アカホヤ火山灰（K-Ah）が日本全域に拡散したことが知られていた。その前兆現象を詳しく調べた結果、以下の点が明らかになった。1）アカホヤ噴火の直前まで8000年以上の長期にわたり、安山岩質マグマのブルカノ式噴火が断続的に発生していた。2）数100年前には旧山体の地すべり崩壊が発生し、3）約100年前には脱ガスした溶岩が噴出した、4）噴火の最中には南九州一帯に影響を及ぼす巨大地震が発生し、5）噴火終了後にも南九州を中心に大規模な地震が発生した。

以上のことから、1）カルデラ噴火の前に長期の休止期が存在するとは限らない、2）噴火前には珪長質マグマ溜りと他組成のマグマ溜りが共存していた、3）珪長質マグマの生産には、苦鉄質（玄武岩質）マグマの存在が不可欠であり、4）噴火の引き金としてカルデラを取り巻く地殻応力の役割が無視できないこと等が推定された。

類似例として始良カルデラをあげることができる。カルデラの南縁に位置する桜島火山は現在も活発な活動を続けているが、この現象は鬼界カルデラのアカホヤ噴火に先行した長期にわたるブルカノ式噴火の活動と酷似している。Kamo (1989) は桜島火山の主マグマ溜りは始良カルデラの中心付近の5 km以深に存在し、そこから桜島直下の浅いマグマ溜りに移動し噴火するというモデルを提示した。しかし鬼界カルデラのモデルを考慮すると、主マグマ溜りには珪長質のマグマが蓄積中で、安山岩質マグマは主マグマ溜りの周囲をすり抜け噴出していると考えべきである。

上記した2例をもとにカルデラ火山の深部では、中心部に珪長質なマグマ溜りが存在し、それを下方から包含するように安山岩質マグマがあり、さらにその下位には地殻起源のマグマの熱源となっている玄武岩質マグマが大規模に存在しているというモデルが考えられる。このような地下構造はカルデラ火山のみならず、中新世以降に活動的であった火山活動地域にも適用できるモデルと考えられる。

キーワード: 活火山, カルデラ, 地殻

Keywords: active volcano, caldera, crust

地震波速度構造から見た沖縄トラフのリフティング Rifting crustal structure in the Okinawa Trough

西澤 あずさ^{1*}, 金田 謙太郎¹, 堀内 大嗣¹, 泉 紀明¹, 及川 光弘¹

Azusa Nishizawa^{1*}, Kentaro Kaneda¹, Daishi Horiuchi¹, Noriaki Izumi¹, Mitsuhiro Oikawa¹

¹ 海上保安庁

¹ Japan Coast Guard

南西諸島域の背弧海盆-島弧-海溝系では、南西諸島（琉球）海溝において南東からフィリピン海プレートが5-7 cm/yearで沈み込むことにより背弧海盆である沖縄トラフが初期のリフティング段階にあると考えられている。一方、沖縄トラフの水深は北から南にかけて深くなることから、リフティング段階は南北方向に変化し、南部で最も進行していると推定されている。地殻の地震波速度構造の変化からリフティング過程を定量的に示すことを目標として、北から南にかけてトラフ軸に沿う測線とそれにほぼ直交する測線を設定しマルチチャンネル反射法および屈折法探査を実施しているが、これまで得られている結果について報告する。

地震学的構造探査としての仕様は以下の通りである：測量船「昭洋」及び「拓洋」を用いて、屈折法探査のための海底地震計（OBS）を、ほぼ5 km毎に設置し、制御震源として総容量98.4 liter (6,000 inch³)のnon-tuned airgun arrayを使用した。ショット間隔は200mである。マルチチャンネル反射法地震探査では、240 channel、全長3,000 mのハイドロフォンストリーマーを使用し、制御震源として総容量17.1 liter (1,050 inch³)の3-airgun clusterを50 m間隔でショットした。全体を通して、モホ面からの反射波（PmP）および地殻内からの反射波が多数のOBSにおいて確認できた。一方、最上部マントルを伝播した屈折波（Pn）は沖縄トラフの南部では観測されたが、北部ではほとんど検出できなかった。走時解析ではトモグラフィックインバージョン、2次元波線追跡法によるフォワードモデリングを併用し、観測された信号の振幅情報は理論記象と比較することにより、速度構造モデルを推定した。

沖縄トラフの軸に沿う速度構造モデルの特徴は以下の通りである；地殻構造は全体的に水平方向に大きく変化して不均質であるが、トラフ下の地殻の厚さは北部のおよそ23 kmから南部の八重山地溝や宮古海底地溝下の10 km程度と、北から南に向かって大局的に薄くなっている。地殻内反射波の同定により、トラフ下の地殻は、上部（P波速度6 km/s以下）、中部（6.0-6.5 km/s）、下部（6.5-7 km/s）の3層から成り、地殻の薄化は主に下部地殻によることがわかった。

一方、沖縄トラフの軸に直交する測線から求められている暫定的な速度構造モデルにおいても南西諸島前弧から背弧域にかけて中部地殻が存在し、南西諸島弧の地殻構造を特徴付けていると考えられる。地殻構造の変化は、沖縄トラフの中央域よりもトラフ西端域の上部および中部地殻において非常に大きく、また下部地殻の厚さが最も薄くなっている場所は必ずしもトラフ中心部に対応していないようである。

キーワード: 沖縄トラフ, 地震波速度構造, リフティング

Keywords: Okinawa Trough, crustal structure, rifting

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SCG062-24

会場:国際会議室

時間:5月27日 18:15-18:30

ヒクランギ沈み込み帯 (ニューゼーランド) のテクトニクス解明のための地震観測と構造調査

Seismic observation and survey for elucidating tectonics of the Hikurangi subduction zone

望月 公廣^{1*}, 山田 知朗¹, 篠原 雅尚¹, 佐藤 比呂志¹, 岩崎 貴哉¹, Stuart Henrys², Rupert Sutherland²

Kimihiro Mochizuki^{1*}, Tomoaki Yamada¹, Masanao Shinohara¹, Hiroshi Sato¹, Takaya Iwasaki¹, Stuart Henrys², Rupert Sutherland²

¹ 東京大学地震研究所, ²GNS Science, Avalon

¹Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo, ²GNS Science, Avalon

ニューゼーランド北島の東方沖合に位置するヒクランギ沈み込み帯では、年間 ~ 4.3 cmの速さで太平洋プレートがオーストラリア・プレート下に沈み込んでいる。これにともなって、これまでにM7程度の地震が発生してきた。沈み込みは北側で急であり、南側では緩やかとなる。最近のGPS観測からヒクランギ・トラフに沿ったプレート間固着の強度分布が求められ、北島の北側2/3程度の領域ではトラフ軸直交方向に固着幅が狭く、それよりも南側では急激に固着幅が広くなり、首都ウェリントンを超えてさらに背弧側まで固着している結果が示されている。このような固着強度の急激な変化は、例えば境界面の温度といった単独のパラメータの変化では説明することは難しい。また、この固着域より深部の固着強度遷移領域と考えられる場所では、固着域縁辺部に沿うようにスロースリップの発生も観測されている。内陸に目を向けると、陸域中部で拡大軸に平行な走向を持つ背弧拡大が起こっており、それに伴う回転変動が見られる。このようなテクトニック・セッティングは四国から九州にかけての西南日本の沈み込み帯によく似ている。これらの相似な沈み込み帯についての比較研究は、沈み込み帯におけるテクトニクスの解明のために重要な課題である。

このヒクランギ沈み込み帯の沈み込み構造を明らかにするために、2001年には北島中部のトラフ軸に直行した ~ 350 km長の測線上で海陸統合屈折・広角反射法および反射法調査(NIGHT project)が行われた。この結果から、沈み込むプレート内の正断層地震や、プレート境界周辺域の間隙水圧とプレート境界面の逆断層地震との関係が議論されている。さらに北島南端部において、2009年9月から2010年4月にかけて陸域に50台の3成分地震計を展開して地震観測を行い、また2010年3月には長さ ~ 360 kmの測線上の海域部分に東京大学地震研究所の海底地震計20台を展開し、エアガン発震による海陸統合屈折・広角反射法調査および反射法調査(SAHKE)を行った。各観測点では良好なデータが得られており、現在解析を進めているところである。東側海域に展開した海底地震計のデータから、トラフ軸から固着域を含む領域で沈み込むプレートの地殻構造までを見ることができ、今後、陸域のデータと合わせて、固着域からスロースリップ発生域までの構造を明らかにする。

キーワード: 構造調査, ヒクランギ沈み込み帯, 背弧拡大, プレート境界面

Keywords: Seismic survey, Hikurangi subduction zone, Back-arc opening, Plate interface