



Title	海底地震観測からわかった2011 年東北地方太平洋沖地震の余震分布と応力変化
Author(s)	村井, 芳夫; 東, 龍介; 篠原, 雅直 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 76, 147-158
Issue Date	2013-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.76.147
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/52307
Type	departmental bulletin paper
File Information	76-P147-158.pdf



海底地震観測からわかった 2011 年東北地方太平洋沖地震の 余震分布と応力変化

村井 芳夫・東 龍介

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

篠原 雅尚・町田 祐弥・山田 知朗・中東 和夫・真保 敬・望月 公廣

東京大学地震研究所

日野 亮太・伊藤 喜宏

東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

佐藤 利典

千葉大学大学院理学研究科

塩原 肇

東京大学地震研究所

植平 賢司*

九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

八木原 寛

鹿児島大学大学院理工学研究科

尾鼻 浩一郎・高橋 成実・小平 秀一

海洋研究開発機構

平田 賢治*・対馬 弘晃

気象庁気象研究所

岩崎 貴哉

東京大学地震研究所

(2013 年 1 月 11 日受理)

Aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and stress regime changes revealed by ocean bottom seismographic observation

Yoshio MURAI, Ryosuke AZUMA

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

* 現所属：防災科学技術研究所

Masanao SHINOHARA, Yuya MACHIDA, Tomoaki YAMADA, Kazuo NAKAHIGASHI, Takashi SHINBO,
Kimihiro MOCHIZUKI

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Ryota HINO, Yoshihiro ITO

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of
Science, Tohoku University

Toshinori SATO

Graduate School of Science, Chiba University

Hajime SHIOBARA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Kenji UEHIRA*

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

Hiroshi YAKIWARA

Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

Koichiro OBANA, Narumi TAKAHASHI, Shuichi KODAIRA

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Kenji HIRATA*, Hiroaki TSUSHIMA

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

and

Takaya IWASAKI

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

(Received January 11, 2013)

2011年3月11日に、太平洋プレートと日本列島を乗せた陸側のプレートとの境界で2011年東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震は、日本周辺では観測史上最大のマグニチュード9という巨大地震だった。本震発生後には多数の余震が発生するが、大地震発生のメカニズムを解明するためには、正確な余震分布を調べるのが重要である。全国の6つの大学と海洋研究開発機構、気象庁気象研究所は、本震発生直後から共同で100台以上の海底地震計を用いて余震観測を行った。2011年6月中旬までのデータから、震源域全体で約3か月間の精度の良い震源分布が得られた。余震の震源の深さは、全体的に陸に近づくにつれて深くなっていた。震源分布からは、本震時に大きくすべったプレート境界では余震活動が低いことがわかった。上盤の陸側プレート内では余震活動が活発で、正断層型と横ずれ型が卓越していた。太平洋プレート内の余震も多くが正断層型か横ずれ型だった。このことから、日本海溝付近の太平洋プレート内の深部と上盤の陸側プレート内では、本震の発生によって応力場が圧縮場から伸張場に変化したことが示唆される。

* Present Address: National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

I. は じ め に

東北日本太平洋沖の日本海溝から、太平洋プレートが日本列島を乗せた陸側のプレートの下に沈み込んでいるため、東北日本の太平洋沖ではプレート境界でマグニチュード(M) 7 を超える海溝型の大地震が度々発生してきた。2011 年東北地方太平洋沖地震も海溝型地震だったが、南北の長さ約 480 km, 東西の幅約 150 km という広大な面積の断層がすべったため (例えば, Yagi and Fukahata, 2011), $M9.0$ という日本周辺ではそれまでなかった巨大地震になってしまった。

大地震発生後には多数の余震が発生するが、大地震の破壊がどこまで進展したか、今後の余震活動がどのように推移するかという疑問に答えるためには、正確な余震分布を調べることが重要である。海溝型地震の震源域は陸地から遠く離れた沖合にあるので、そのためには震源域真上の海底に地震計を設置して観測する必要がある。そこで、北海道大学、東北大学、東京大学地震研究所、千葉大学、九州大学、鹿児島大学、海洋研究開発機構と気象庁気象研究所は、本震発生の 4 日後から震源域全体を覆うように共同で海底地震計を設置し、余震観測を開始した (Shinohara et al., 2011)。本稿では、Shinohara et al. (2012) によって 2011 年 6 月中旬までのデータから得られた結果を中心に紹介する。

II. 観 測

本震が発生した 2011 年 3 月 11 日には、茨城県沖と宮城県沖で海底地震観測が行われていたが、今回の地震では余震域が広大な領域になったので、地震発生の 4 日後から、震源域全体を覆うように新たに 72 台の海底地震計を設置した。これにより、500 km $\times$ 200 km の領域を約 25 km 間隔で覆うような 121 点の海底地震観測網が完成し、2011 年 3 月末から余震観測を開始した (第 1 期)。余震観測のために設置した 65 台の海底地震計は、約 1 か月間の観測を行った後、4 月と 5 月初めに順次回収された。回収時には、ほぼ同一地点に新規の海底地震計を再設置して観測を継続するとともに、観測網を広げるために計 65 台を 5 月初めまでに設置した (第 2 期)。これらの海底地震計も、約 1 か月間の観測後、77 台が 6 月に回収された。その後は、6 月下旬から 9 月中旬まで本震の震央付近と余震域南部で、海底地震計 58 台による高密度の観測を行った (第 3 期)。第 1 期と第 2 期の観測期間で解析に用いた観測点分布を Figs. 1a, b にそれぞれ示す。また、第 3 期については余震域南部の観測点分布のみを Fig. 1c に示す。

海底地震計はデジタル収録式で、いくつかの種類を用いた。もっとも数が多いものは、固有周波数 4.5Hz の 3 成分地震計センサーを搭載したガラス球を耐圧容器としたものである。また、固有周期 1 秒の地震計センサーを持つ海底地震計も用いた。このタイプの海底地震計は、耐圧容器にガラス球またはチタン球を用いている。さらに、広帯域地震計センサーや加速度計を用いたチタン球型海底地震計も使用した。地震計センサーからの信号は 16 または 24 ビットの分解能で A/D 変換され、ハードディスクなどに記録される。時刻制御には高精度水晶発振子を用いた。使

用した海底地震計は、全て音響切り離し方式の自己浮上型である。海底での海底地震計の位置は、GPS による観測船位置および音響測距によって決定した。

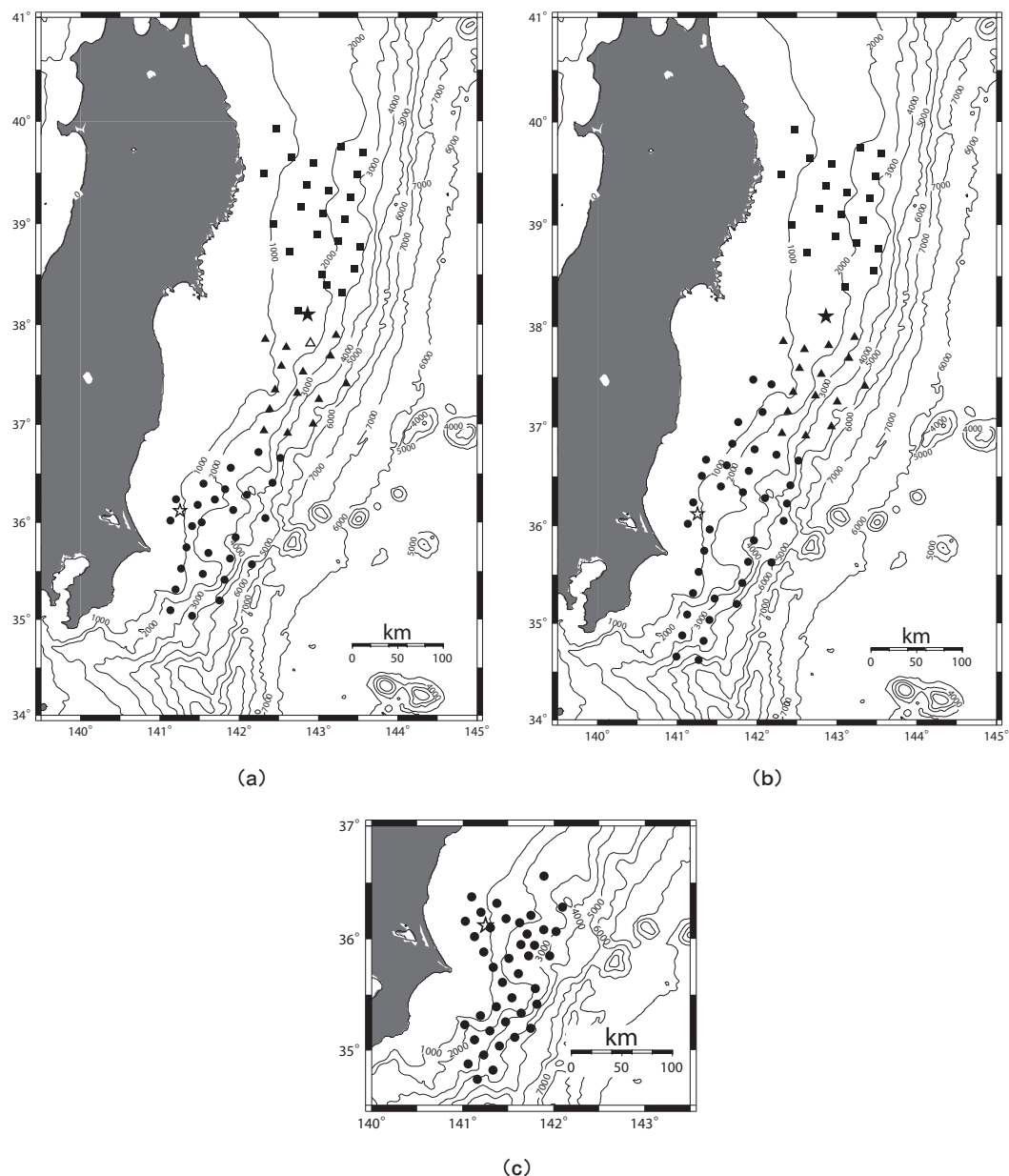


Fig. 1. 海底地震観測点分布. 四角, 三角, 丸はそれぞれ北部, 中部, 南部の解析に用いた観測点で, 白三角は中部, 南部両方の解析に用いた. 黒い星は2011年東北地方太平洋沖地震の本震(2011年3月11日14時46分, $M9.0$), 白い星は最大余震(2011年3月11日15時15分, $M7.6$)の震央をそれぞれ示す. 等深線は水深を示す. (a)2011年3月14日から4月終わりまで(第1期)の観測点分布. (b)4月終わりから6月中旬まで(第2期)の観測点分布. (c)6月下旬から9月中旬まで(第3期)の余震域南部での観測点分布.

III. 震源決定と余震分布

震源決定では、余震が起こった正確な位置の推定を主目的としたため、小さい地震の震源決定は行わず、第 1 期と第 2 期の観測期間で、陸上の観測網から得られた気象庁一元化震源リストから、解析対象の観測網付近に震央を持つ 1908 個の地震の発震時を元に、海底地震計データから、 P 波および S 波の到着時刻を読み取って震源の位置を決め直した。

海底地震観測網は広い領域にわたるので、北部（三陸沖・宮城県沖北部）、中部（宮城県沖南部・福島県沖）、南部（茨城県沖・房総半島沖）の 3 領域に分けて、それぞれで解析を行った。震源域では海底地震計を用いた多くの構造探査が行われているので、北部、中部、南部それぞれの領域で、Takahashi et al. (2004), Miura et al. (2003), Nakahigashi et al. (2012) による結果を元にした 1 次元速度構造を仮定した。また、海底下の堆積層と基盤の境界で P 波から S 波に変換されたと思われる PS 変換波や S 波から P 波に変換されたと思われる SP 変換波に対して読み取った $PS-P$ 時間、 $S-SP$ 時間を使って観測点直下の堆積層の補正も行った。Hirata and Matsu'ura (1987) によるプログラム hypomh を用いて震源決定を行い、最終的には、3 領域それぞれで得られた結果を統合し全体の震源分布を作成することによって、2011 年 3 月 15 日から 6 月 18 日までの期間で 1005 個の精度の良い震源が求められた (Shinohara et al., 2011, 2012)。

ここで、海底地震観測から求められた震源と気象庁一元化震源との比較を行う (Fig. 2)。全体的に、震央の位置の差は比較的小さいが、深さが大きく違っていることがわかる。気象庁一元化震源では深さが約 80 km まで大きくばらついているが、海底地震観測によるほとんどの震源は深さ 60 km より浅く、気象庁一元化震源に比べて浅く決まっている。この傾向は特に中部から南部ではっきりしている。このように、震央の位置（特に深さ）を正しく決めるためには、海底地震観測が重要であることがわかる。

海底地震観測から求められた震源分布を Fig. 3 に示す。余震はいくつかのかたまりになって発生していて、震源の深さが西に向かって深くなっていることがわかる。Fig. 3 には、Yoshida et al. (2011) によって強震動記録から推定された本震時の断層すべり分布も破線のコンターで示されている。本震時の断層すべり分布と比較すると、本震時に大きくすべった宮城県沖のプレート境界では余震活動が低いことがわかる。これは、プレート境界に蓄積されたひずみが本震によってほとんど解放されてしまったことが原因と考えられる。一方、本震時にすべり量が小さかった福島県沖～房総半島沖、プレート境界の深い部分では多数の余震が発生していた。上盤の陸側プレート内では余震活動が活発で、本震発生によって地震活動が活発化したことが示唆される。三陸沖～宮城県沖、茨城県沖では沈み込んだ太平洋プレート内の深い余震も発生していた。日本海溝付近の水深が 3000 m より深い領域では余震が少なかったが、宮城県沖の日本海溝付近では余震活動が見られた。余震域南部の房総半島沖では、日本列島下に沈み込んでいるフィリピン海プレートが構造探査によってイメージされているが (Nakahigashi et al., 2012)、その構造と余震分布を比較すると、フィリピン海プレートと太平洋プレートが接触している領域が余震発生域の南

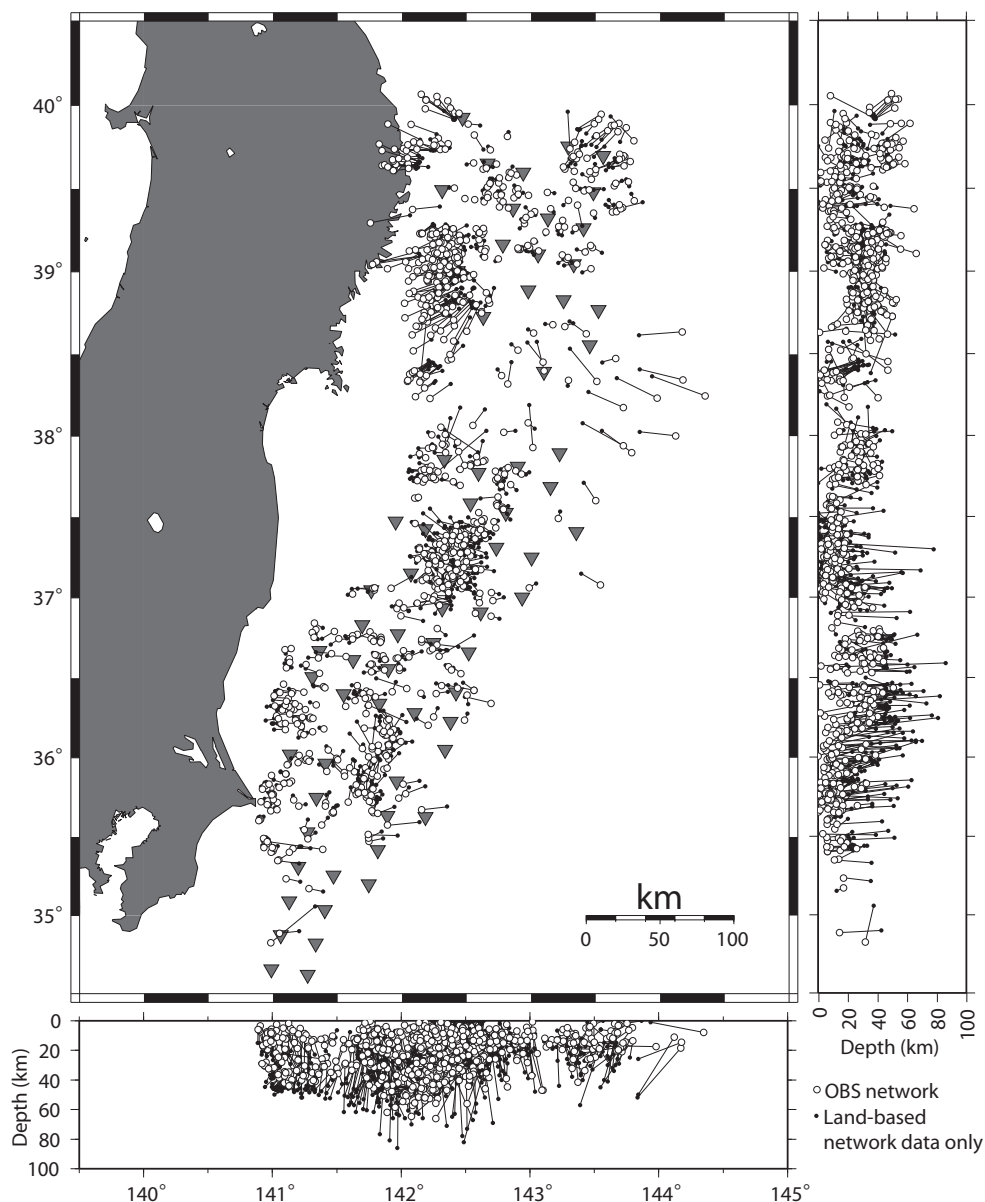


Fig. 2. 海底地震観測から求められた2011年3月15日から6月18日までの震源（白丸）と気象庁一元化震源（黒丸）との比較。逆三角は4月終わりから6月中旬まで（第2期）の解析に用いた海底地震観測点を示す。

限になっていることがわかった。本震による破壊が宮城県沖の震源（破壊開始点）から南に伝播したこと（例えば, Honda et al., 2011; Suzuki et al., 2011; Yagi and Fukahata, 2011; Yoshida et al., 2011）を考慮すれば、本震による破壊の進展はこのプレート接触領域で停止したものと考えられる（Shinohara et al., 2011）。

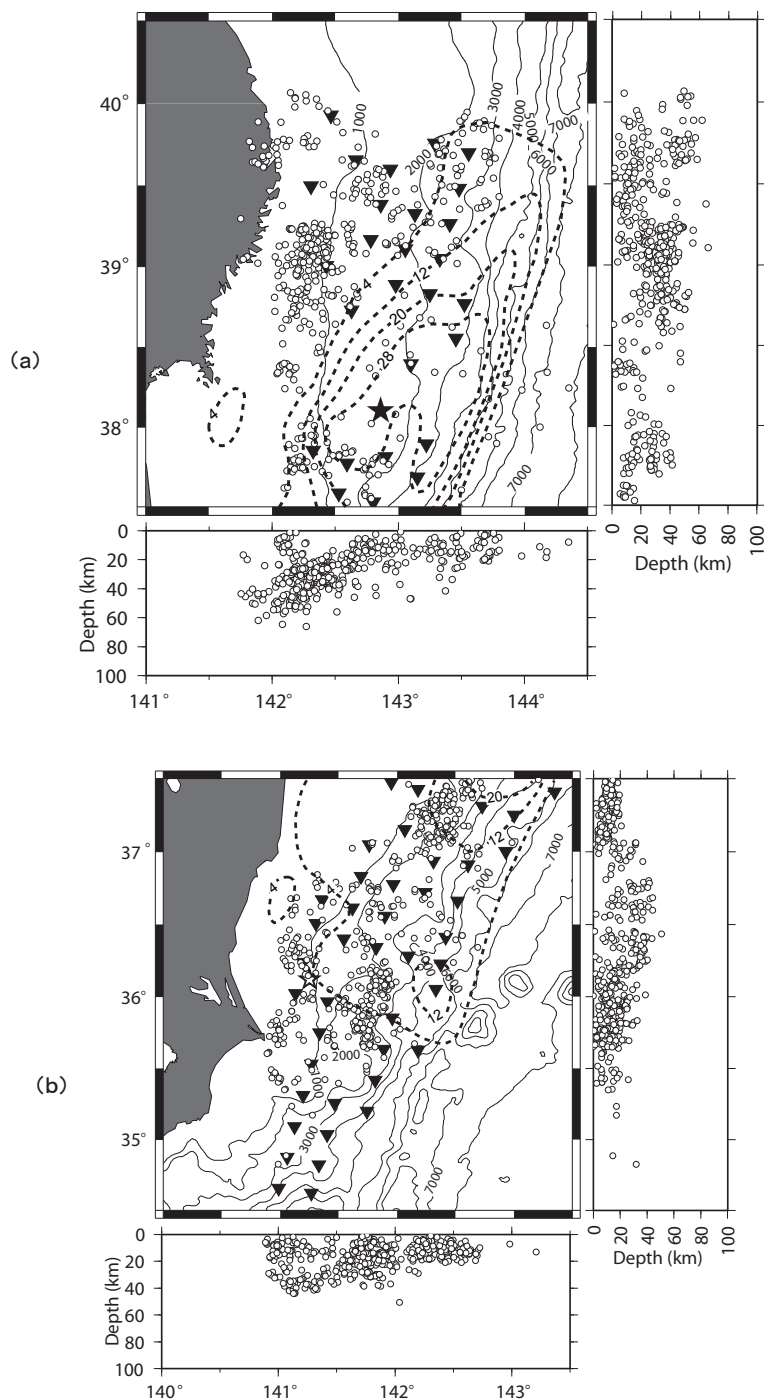


Fig. 3. 海底地震観測から求められた 2011 年 3 月 15 日から 6 月 18 日までの震源 (白丸) と, Yoshida *et al.* (2011) によって強震動記録から推定された本震時の断層すべり分布 (破線のコンター) との比較. 逆三角は 4 月終わりから 6 月中旬まで (第 2 期) の解析に用いた海底地震観測点を示す. 実線の等深線は水深を示す. (a) 余震域北部 (北緯 37.5 度以北) の震源分布. (b) 余震域南部 (北緯 37.5 度以南) の震源分布.

IV. 東北地方太平洋沖地震発生による応力変化

次に, Reasenberg and Oppenheimer (1985) によるプログラムを用いて, 海底地震計で記録された P 波初動極性から震源メカニズム解を決定し, 121 個の解が得られた (Fig. 4). 海底地震計を用いた構造探査や長期の海底地震観測によって, 沈み込む太平洋プレートの形状が推定されてきており, 余震の震源位置は海底地震観測によって精度良く求められているので, 発生場所によって余震を上盤の陸側プレート内, プレート境界, 太平洋プレート内の地震に分類し, それぞれの領域に分けて示している. Fig. 4 には, 防災科学技術研究所の F-net データを用いて自動決定された震源メカニズム解 (福山・他, 1998) で, 海底地震観測から震源が求められた余震に対応する 31 個も薄い色で示されている. その際, F-net データによるメカニズム解は, 海底地震観測から求められた震源位置に基づいて分類した.

プレート境界の余震の多くは逆断層型で, 本震前の地震と同じタイプだった (例えば, Hasegawa et al., 2011). 正断層型と横ずれ型も見られるが, プレート境界から震源までの距離が 5km より短い余震をプレート境界の地震として分類しているのので, これらはプレート境界そのものではなく近傍で発生した地震の可能性がある. 上盤の陸側プレート内の余震は正断層型と横ずれ型が卓越していたが, 本震前の地震の多くは逆断層型だった (例えば, Hasegawa et al., 2011). 本震後, 陸上での地震観測からも陸側プレート内で正断層型や横ずれ型の地震発生が報告されていて (Asano et al., 2011), 本震時のプレート境界での大きなすべりによって応力場が

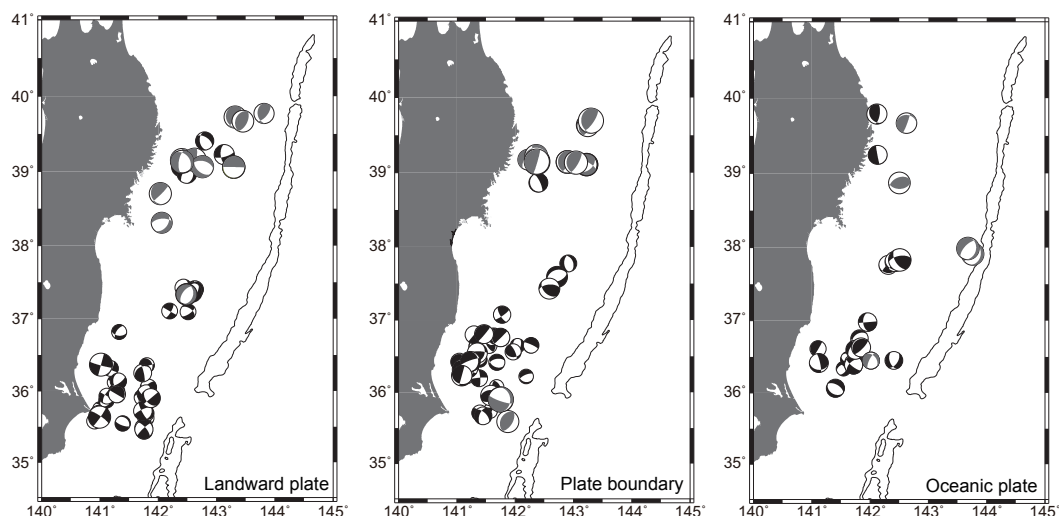


Fig. 4. 海底地震計で記録された P 波初動極性から決定された震源メカニズム解. 発生場所によって余震を上盤の陸側プレート内, プレート境界, 太平洋プレート内の地震に分類し, それぞれの領域に分けて示している. その際, 海底地震観測によって得られた地震波速度構造や震源分布から推定されたプレート境界から, 震源までの距離が 5 km より短い余震をプレート境界の地震として分類した. F-net データから決定された震源メカニズム解も薄い色で示す. これらは, 海底地震観測から求められた震源位置に基づいて分類した.

圧縮場から伸張場に変化したと考えられる (Hasegawa et al., 2011; Kato et al., 2011; Imanishi et al., 2012; Yoshida et al., 2012). 本震発生前, 日本海溝の陸側斜面下の太平洋プレート内で発生する浅い地震は正断層型, 深い地震は逆断層型で, この地震活動は太平洋プレートの折れ曲りによって説明できると考えられた (古賀・他, 2012). 一方, 太平洋プレート内の余震の多くは正断層型か横ずれ型だった. また, 海洋研究開発機構は, 本震後日本海溝東側で海底地震観測を行い, 日本海溝の海側斜面下の太平洋プレート内で発生する地震が深さ約 40 km まで正断層型になっていることを発見した (Obana et al., 2012). 日本海溝付近の深さ約 40 km は二重浅発地震面の下面に対応する (Shinohara et al., 2005; Gamage et al., 2009; 水野・他, 2009; 古賀・他, 2012). これらのことから, 本震発生によって日本海溝付近の太平洋プレート内では深部まで伸張場になってしまったと考えられる. 以上のように, 2011 年東北地方太平洋沖地震が発生した結果, 震源域内および周辺海域の応力場が変化することがわかった (Fig. 5).

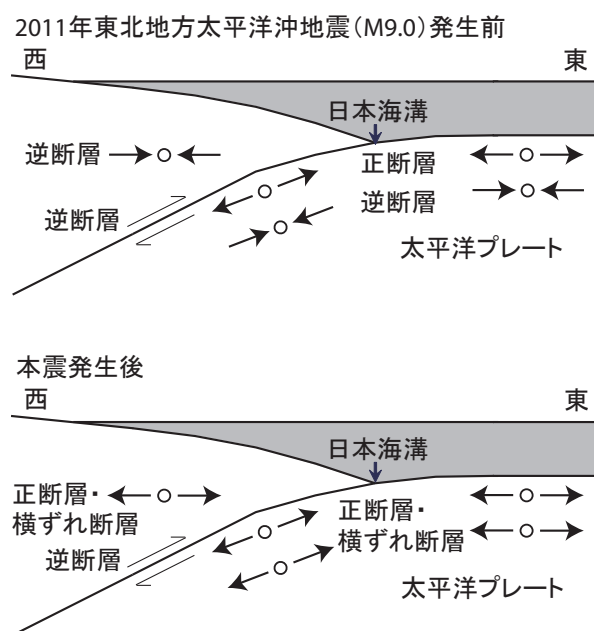


Fig. 5. 2011 年東北地方太平洋沖地震の本震発生前後の震源域内および周辺海域の応力場の変化を示した概念図. 白丸と矢印は, 上盤の陸側プレート内と太平洋プレート内の震源と地震を発生させた応力の向きをそれぞれ示す. プレート境界では, 細い矢印の向きに断層すべりが生じる逆断層型の地震が発生している.

V. お わ り に

Shinohara et al. (2011, 2012) は, 2011 年東北地方太平洋沖地震発生直後から震源域全体を覆うように海底地震計を設置して余震観測を開始した. 約 70 台の海底地震計データを解析するこ

とによって、3月15日から6月18日までの期間で1005個の精度の良い震源が得られた。余震の震源の深さは、全体的に陸に近づくにつれて深くなっていた。震源分布からは、本震時に大きくすべった宮城県沖のプレート境界では余震活動が低いことがわかった。これは、プレート境界に蓄積されたひずみが本震によってほとんど解放されてしまったことが原因と考えられる。一方、本震時にすべり量が小さかった福島県沖～房総半島沖、プレート境界の深い部分では多数の余震が発生していた。上盤の陸側プレート内では余震活動が活発で、正断層型と横ずれ型が卓越していた。本震前の地震の多くは逆断層型だったことから、本震の発生によって応力場が圧縮場から伸張場に変化し、地震活動が活発化したことが示唆される。三陸沖～宮城県沖、茨城県沖では沈み込んだ太平洋プレート内の深い余震も発生していた。太平洋プレート内の余震も多くが正断層型か横ずれ型だった。本震発生前、日本海溝付近の太平洋プレート内では、浅い地震は正断層型、深い地震は逆断層型だったことから、本震の発生によって日本海溝付近の太平洋プレート内では深部まで伸張場になってしまったと考えられる。日本海溝付近の水深が3000 mより深い領域では余震が少なかったが、宮城県沖の日本海溝付近では余震活動が見られた。

以上のように、余震が発生している場所の地震活動や応力場を正しく把握するためには、震源位置を精度良く決定する必要がある。海溝型地震の場合には震源域が陸地から遠く離れているので海底地震観測が必要になる。 $M9.0$ という巨大地震発生による影響は長期間続くと予想され、この後も海底地震観測が重要になってくる。本稿で紹介した第3期の余震観測の後には、約40台の海底地震計を用いた観測が2012年10月中旬まで続けられ、今後は防災科学技術研究所によってケーブル式海底地震観測網が構築される予定になっている（金沢・他、2012；植平・他、2012）。地震発生後の断層強度回復過程の実態を解明するためには、これらのデータを活用して地震活動や応力場のモニタリングを継続することが必要である。特に、日本海溝の海側斜面下の太平洋プレート内では、前節で述べた応力場を反映して、2012年12月7日に三陸沖で $M7.4$ の正断層型地震が発生し、さらに大きい正断層型地震が発生すると大きな津波が引き起こされるので防災上も重要である。

謝辞 本稿で紹介した著者の研究では、気象庁一元化震源カタログデータと防災科学技術研究所 F-net Project による広帯域地震波形を用いたメカニズム解析結果を利用した。研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（特別研究促進費）「2011年東北地方太平洋沖地震に関する総合調査」の援助を受けた。図の作成には、Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1991)を使用した。

文 献

- Asano, Y., T. Saito, Y. Ito, K. Shiomi, H. Hirose, T. Matsumoto, S. Aoi, S. Hori, and S. Sekiguchi, 2011. Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 669-673.
- 福山英一・石田瑞穂・D. S. Dreger・川井啓廉, 1998. オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震2, **51**, 149-156.

- Gamage, S. S. N., N. Umino, A. Hasegawa, and S. H. Kirby, 2009. Offshore double-planed shallow seismic zone in the NE Japan forearc region revealed by *sP* depth recorded by regional networks, *Geophys. J. Int.*, **78**, 195-214.
- Hasegawa, A., K. Yoshida, and T. Okada, 2011. Nearly complete stress drop in the 2011 *Mw* 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 703-707.
- Hirata, N. and M. Matsu'ura, 1987. Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 50-61.
- Honda, R., Y. Yukutake, H. Ito, M. Harada, T. Aketagawa, A. Yoshida, S. Sakai, S. Nakagawa, N. Hirata, K. Obara, and H. Kimura, 2011. A complex rupture image of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake revealed by the MeSO-net, *Earth Planets Space*, **63**, 583-588.
- Imanishi, K., R. Ando, and Y. Kuwahara, 2012. Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09306, doi:10.1029/2012GL051491.
- 金沢敏彦・功刀卓・野口伸一・関口渉次・汐見勝彦・青井真・岡田義光・篠原雅尚・山田知朗, 2012. 日本海溝海底地震津波観測網について, 日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会予稿集, HDS26-06.
- Kato, A., S. Sakai, and K. Obara, 2011. A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, *Earth Planets Space*, **63**, 745-748.
- 古賀祥子・伊藤喜宏・日野亮太・篠原雅尚・海野徳仁, 2012. 日本海溝周辺における太平洋プレート内の地震発生機構, 地震 2, **64**, 75-90.
- Miura, S., S. Kodaira, A. Nakanishi, T. Tsuru, N. Takahashi, N. Hirata, and Y. Kaneda, 2003. Structural characteristics controlling the seismicity of southern Japan Trench fore-arc region, revealed by ocean bottom seismographic data, *Tectonophysics*, **363**, 79-102.
- 水野真理子・佐藤利典・篠原雅尚・望月公廣・山田知朗・金沢敏彦, 2009. 長期観測型海底地震計を用いた茨城沖における海溝外縁部の自然地震活動, 地震 2, **62**, 19-23.
- Nakahigashi, K., M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, R. Hino, T. Sato, K. Uehira, Y. Ito, Y. Murai, and T. Kanazawa, 2012. *P*-wave velocity structure in the southernmost source region of the 2011 Tohoku earthquakes, off the Boso Peninsula, deduced by an ocean bottom seismographic survey, *Earth Planets Space*, **64**, 1149-1156.
- Obana, K., G. Fujie, T. Takahashi, Y. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Kodaira, N. Takahashi, Y. Kaneda, and M. Shinohara, 2012. Normal-faulting earthquakes beneath the outer slope of the Japan Trench after the 2011 Tohoku earthquake: Implications for the stress regime in the incoming Pacific plate, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L00G24 doi:10.1029/2012GL050399.
- Reasenber, P. A. and D. Oppenheimer, 1985. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, *Open-File Report 85-739*, Department of the Interior, United States Geological Survey.
- Shinohara, M., R. Hino, T. Yoshizawa, M. Nishino, T. Sato, and K. Suyehiro, 2005. Hypocenter distribution of plate boundary zone off Fukushima, Japan, derived from ocean bottom seismometer data, *Earth Planets Space*, **57**, 93-105.
- Shinohara, M., T. Yamada, K. Nakahigashi, S. Sakai, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Ito, R. Azuma, Y. Kaiho, T. No, H. Shiobara, R. Hino, Y. Murai, H. Yakiwara, T. Sato, Y. Machida, T. Shinbo, T. Isse, H. Miyamachi, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaneda, K. Hirata, S. Yoshikawa, K. Obara, T. Iwasaki, and N. Hirata, 2011. Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, **63**, 835-840.
- Shinohara, M., Y. Machida, T. Yamada, K. Nakahigashi, T. Shinbo, K. Mochizuki, Y. Murai, R. Hino, Y. Ito, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Yakiwara, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, K. Hirata, H. Tsushima, and T. Iwasaki, 2012. Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake revealed by an ocean-bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, **64**, 1137-1148.

- Suzuki, W., S. Aoi, H. Sekiguchi, and T. Kunugi, 2011. Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki megathrust earthquake ($M9.0$) inverted from strong-motion data, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G16, doi:10.1029/2011GL049136.
- Takahashi, N., S. Kodaira, T. Tsuru, J.-O. Park, Y. Kaneda, K. Suyehiro, H. Kinoshita, S. Abe, M. Nishino, and R. Hino, 2004. Seismic structure and seismogenesis off Sanriku region, northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, **159**, 129-145.
- 植平賢司・金沢敏彦・野口伸一・功刀卓・汐見勝彦・青井真・関口渉次・松本拓己・岡田義光・篠原雅尚・山田知朗, 2012. 日本海溝海底地震津波観測網の概要, 日本地震学会 2012 年度秋季大会講演予稿集, D11-09.
- Wessel, P. and W.H.F Smith, 1991. Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, **72**, 441.
- Yagi, Y. and Y. Fukahata, 2011. Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L19307, doi:10.1029/2011GL048701.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Okada, T. Iinuma, Y. Ito, and Y. Asano, 2012. Stress before and after the 2011 great Tohoku-oki earthquake and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L03302, doi:10.1029/2011GL049729.
- Yoshida, Y., H. Ueno, D. Muto, and S. Aoki, 2011. Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data, *Earth Planets Space*, **63**, 565-569.