

## 12 - 15 海底観測から得られた余震活動の特徴

### Aftershock activity of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake from ocean floor observation

東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

#### 1. はじめに

2011年3月11日午後2時46分頃、東北地方太平洋沖で日本国内観測史上最大のM9.0の巨大地震が発生し、宮城県では震度階最大である震度7を記録したのをはじめ、北海道から関東地方にかけての広範囲で強い揺れが観測された。この地震に伴いM7以上の余震が多数発生したほか、日本の太平洋沿岸で高さ15mを超える津波が観測され、大きな地震動・津波被害をもたらした。余震域の広がりには南北約500kmにわたる極めて大規模なものであり、遠地実体波や津波による解析の結果では、海溝近くで特に大きな滑りが推定されている。今回の巨大地震の震源域はほとんどが海底下であるため、陸上の観測網だけではその全貌を明らかにすることは困難である。そこで、余震分布を高精度で決定し、震源断層の位置、形状を明らかにするために、多数の海底地震計(OBS)を用いた2011年東北地方太平洋地震の余震観測を実施した。ここでは、海底地震データに基づく、本震発生後、約3ヶ月間の余震の正確な震源分布と、それから得られた特徴について、報告する。本観測は、平成22年度および平成23年度科学研究費補助金特別研究促進費を受け、東京大学、北海道大学、東北大学、千葉大学、九州大学、鹿児島大学、海洋研究開発機構、気象研究所が参加し、気象庁の協力も得て実施されたものである。この緊急観測により、震源域に合計100台以上のOBSが展開された。震源域の一部では、地震発生時に、50台程度のOBSが設置され、観測中であった(東海・東南海・南海地震の連動性評価研究)、および「地震・火山噴火予知研究計画」による観測点)。

#### 2. 観測

本震発生後4日目から、計72台のOBSの震源域への設置を開始した。これにより、本震発生以前から震源域直上で観測を行っていたOBSと併せて、120点を超える海底地震観測網が、4月初めに完成し、観測を開始した(第1図)。余震観測のために設置したOBSは、約1ヶ月間の観測を行った後、順次回収された(第1期観測)。回収時に、ほぼ同一地点に新たなOBSを再度設置し、観測を継続すると共に、観測網を広げるために、計65台のOBSを5月初めまでに設置した(第1図)。このOBSも、約1ヶ月間の観測後、6月に回収された(第2期観測)。観測域は、陸上観測網から活発な地震活動が求められている、ほぼ500km x 200kmの領域とし、OBSの設置間隔は約25kmである。使用した音響切離方式自己浮上型海底地震計には、固有周波数4.5Hzの3成分地震計を持つ短期観測型海底地震計を主にして、広帯域海底地震計など、いくつかの種類を用いた<sup>1)</sup>。海底でのOBSの位置は、GPSによる観測船位置および音響測距によった。

#### 3. 解析

解析対象期間は、第1期観測および第2期観測の本震直後(3月15日)から、6月18日までのほぼ3ヶ月間である。観測域が広いことを考慮し、観測域を、北部、中部、南部にわけ、それぞれの地域について解析・震源決定を行った。まず、気象庁一元化震源リストにある解析対象の観測網付近に震央を持つ地震の発震時を元に、OBSデータから、P波およびS波の到着時刻を読み取っ

た。P波については3点以上、S波については1点以上の読み取りができた余震を解析対象とした。震源決定に用いる速度構造は、それぞれの観測網のほぼ中央に存在する構造探査<sup>2),3),4)</sup>の結果から、1次元速度構造をモデル化した。それぞれのOBSについて、堆積層と基盤の境界での変換波(P S波)について、P S - P時間を読み取った。このデータから、観測点補正值の初期値を求めた。その後、震源決定<sup>5)</sup>を行い、走時残差を補正值に加え、再震源決定を行うことを繰り返して、最終的な観測点補正值とした。最終的に求められた観測点補正值を用いて、すべての地震について震源決定を行った。収束した震源のうち、999個が深さ方向の誤差3km以下、水平方向の誤差5km以下に決定された(第2図)。この内、P波の初動極性が6点以上読み取られている余震については、発震機構解も求めた<sup>6)</sup>。なお、求められた余震分布は時空間的に均質ではないことに注意が必要だが、再決定された余震の震源位置は精度が高い。気象庁が陸上データを用いて決定した余震分布と比較すると、陸上データのみでの震源決定では余震の深さ分布のばらつきが大きく、全般にOBSを用いた再決定結果の方が、震源が浅く求まった(第3図)。

#### 4. 結果

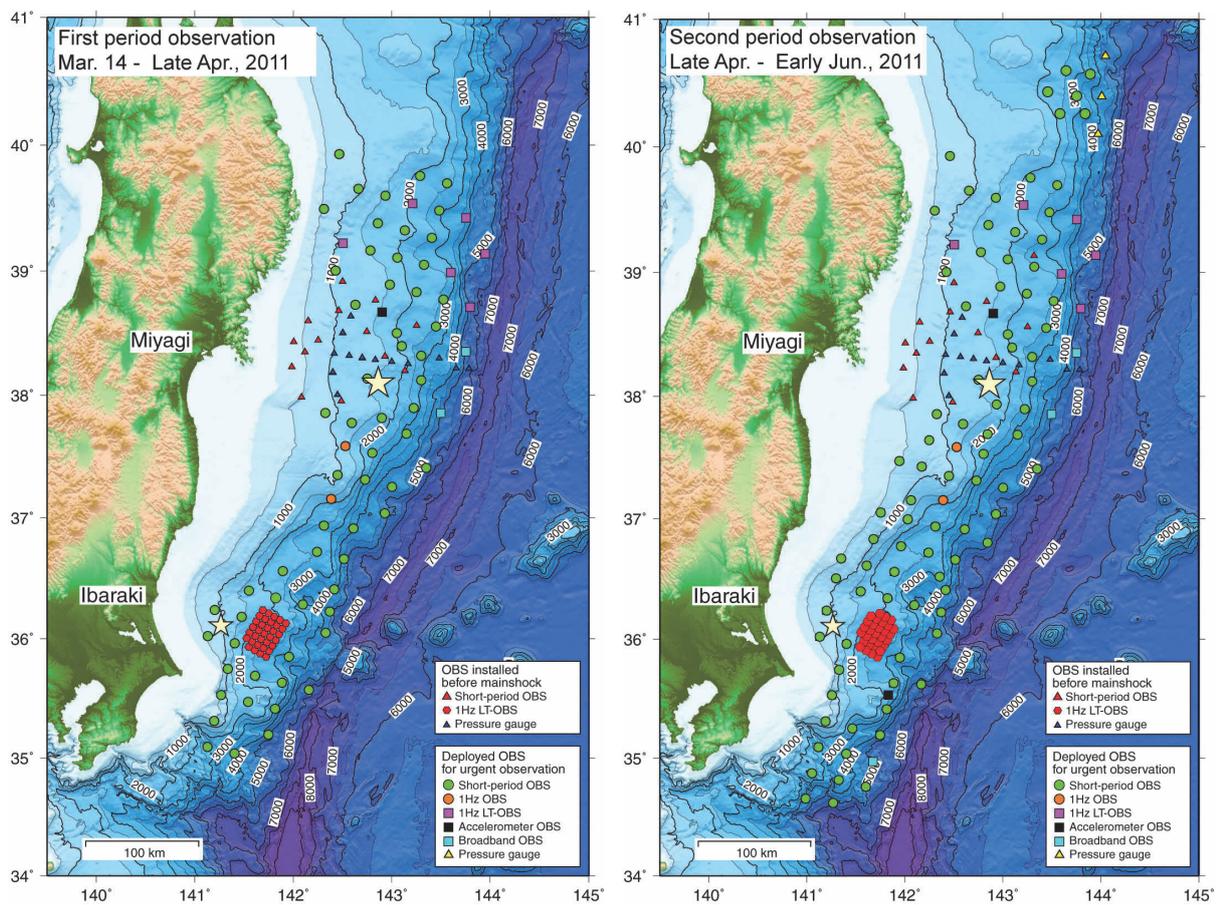
三陸沖及び宮城沖の震源域北部では、陸側プレート内の余震活動は活発である。本震時に大きな滑りが推定されている領域では余震活動が低調であることが指摘されていたが<sup>7)</sup>、プレート境界ではほとんど余震が発生していないことがわかった。また、三陸沖陸側斜面の海溝付近であるプレート境界深度が10kmより浅い部分でも余震活動はほとんど見られない。一方、宮城沖陸側斜面の海溝に近い領域では、海洋プレート内である深さ30km付近に余震活動があることが特徴である。福島沖である震源域中部では、同じく陸側プレート内での余震活動は活発であるが、プレート境界にも多数の余震が発生していた。また、陸側斜面下では、深さ50km程度の深部にも余震活動が見られた。茨城沖及び房総半島沖である震源域南部では、陸側プレート内、およびプレート境界で余震活動が活発である。また、本震30分後に発生したマグニチュード7.7の余震の震源域付近では、余震活動は低調であった。震源域南部の茨城沖では、日本列島の下に沈み込む太平洋プレートに、南から日本列島の下に沈み込むフィリピン海プレートが接触していることが推定されている<sup>4)</sup>。本震直後の余震発生域の南限が、この領域に一致しており、本震時の一連の破壊がこの領域で停止したことが推定される<sup>8)</sup>。発震機構解は、プレート境界付近では、逆断層型(スラスト型)の地震が多いが、正断層型・横ずれ型も見られる。一方、陸側プレート内および太平洋プレート深部で発生した余震は、正断層型・横ずれ型が卓越していることがわかった。

#### 5. まとめ

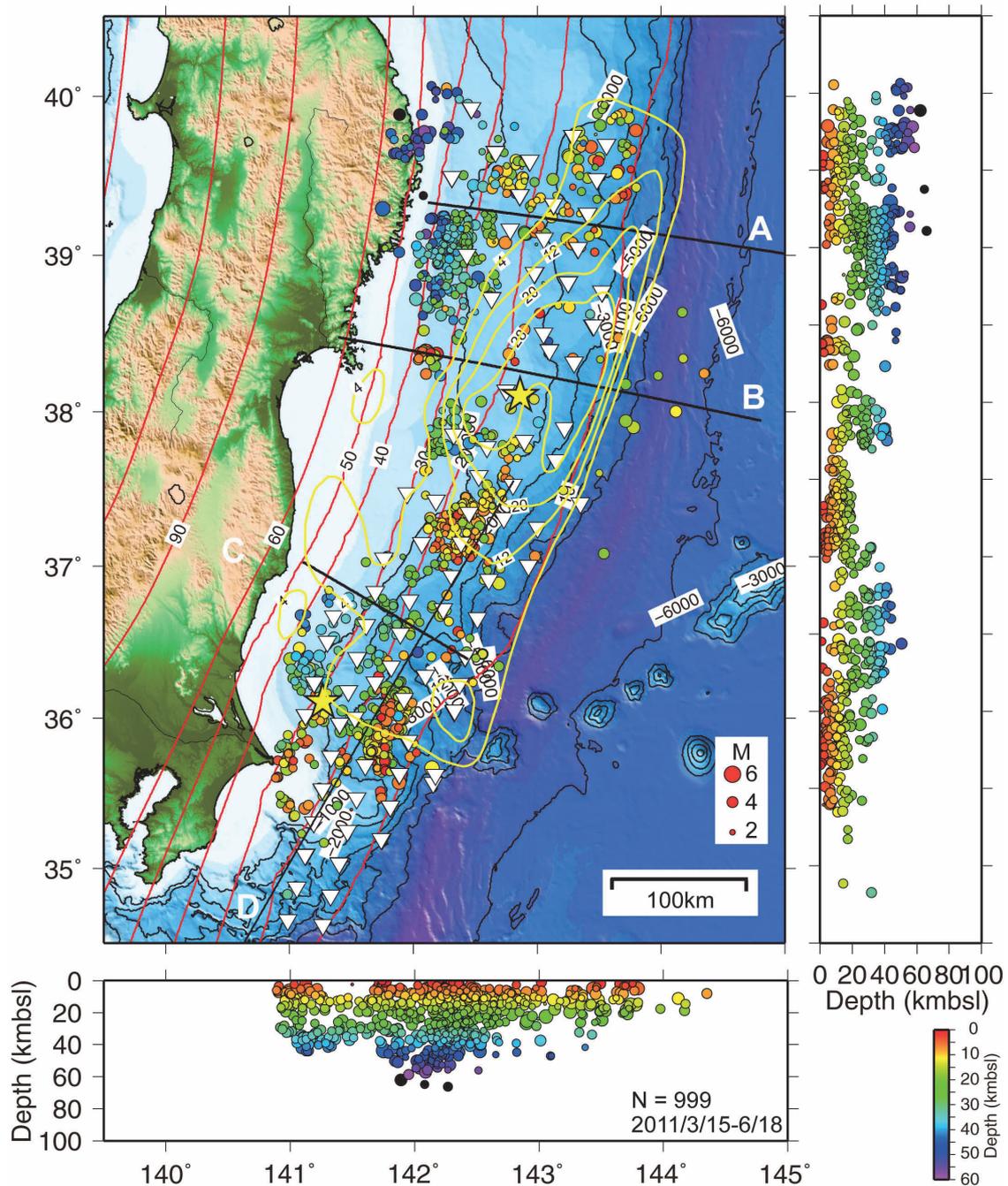
- 2011年東北地方太平洋沖地震の正確な余震分布を求めるために、計100台以上の海底地震計を用いた海底余震観測を実施した。
- 本震発生直後の3月15日から6月18日までのほぼ3ヶ月間において、海底地震データによる余震の再震源決定を行い、震源域ほぼ全体にわたって、陸側プレート内の余震活動は活発であった。
- 本震時に大きな滑りが推定されているプレート境界では、余震活動はほとんどない一方、震源域南部では、プレート境界においても余震活動が活発であった。
- 余震分布からは、本震の破壊が、太平洋プレートとフィリピン海プレートが接触している領域で停止したことが推定される。
- 陸側プレート内、太平洋プレート深部で発生した余震は、正断層型・横ずれ型が卓越している。

## 参 考 文 献

- 1) 金沢敏彦・篠原雅尚・塩原肇, 海底地震観測の最近の進展 – 海底地震観測システムと海底における自然地震観測の進展について –, 地震 2, 61, S55-S68, 2009.
- 2) Takahashi, N., S. Kodaira, T. Tsuru, J.-O. Park, Y. Kaneda, K. Suyehiro, H. Kinoshita, S. Abe, M. Nishino, and R. Hino, Seismic structure and seismogenesis off Sanriku region, northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, 159, 129-145, 2004..
- 3) Miura, S., S. Kodaira, A. Nakanishi, T. Tsuru, N. Takahashi, N. Hirata, and Y. Kaneda, Structural characteristics controlling the seismicity of southern Japan Trench fore-arc region, revealed by ocean bottom seismographic data, *Tectonophysics*, 363, 79–102, 2003.
- 4) Nakahigashi et al., in preparation
- 5) Hirata, N. and M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 47, 50–61, 1987.
- 6) Reasenber, P. A. and D. Oppenheimer, 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, 1985.
- 7) Asano, Y., T. Saito, Y. Ito, K. Shiomi, H. Hirose, T. Matsumoto, S. Aoi, S. Hori, and S. Sekiguchi, Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 669-673, 2011.
- 8) 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, Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, 63, 835-840, 2011.
- 9) Yoshida, Y., H. Ueno, D. Muto, and S. Aoki 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, 2011.

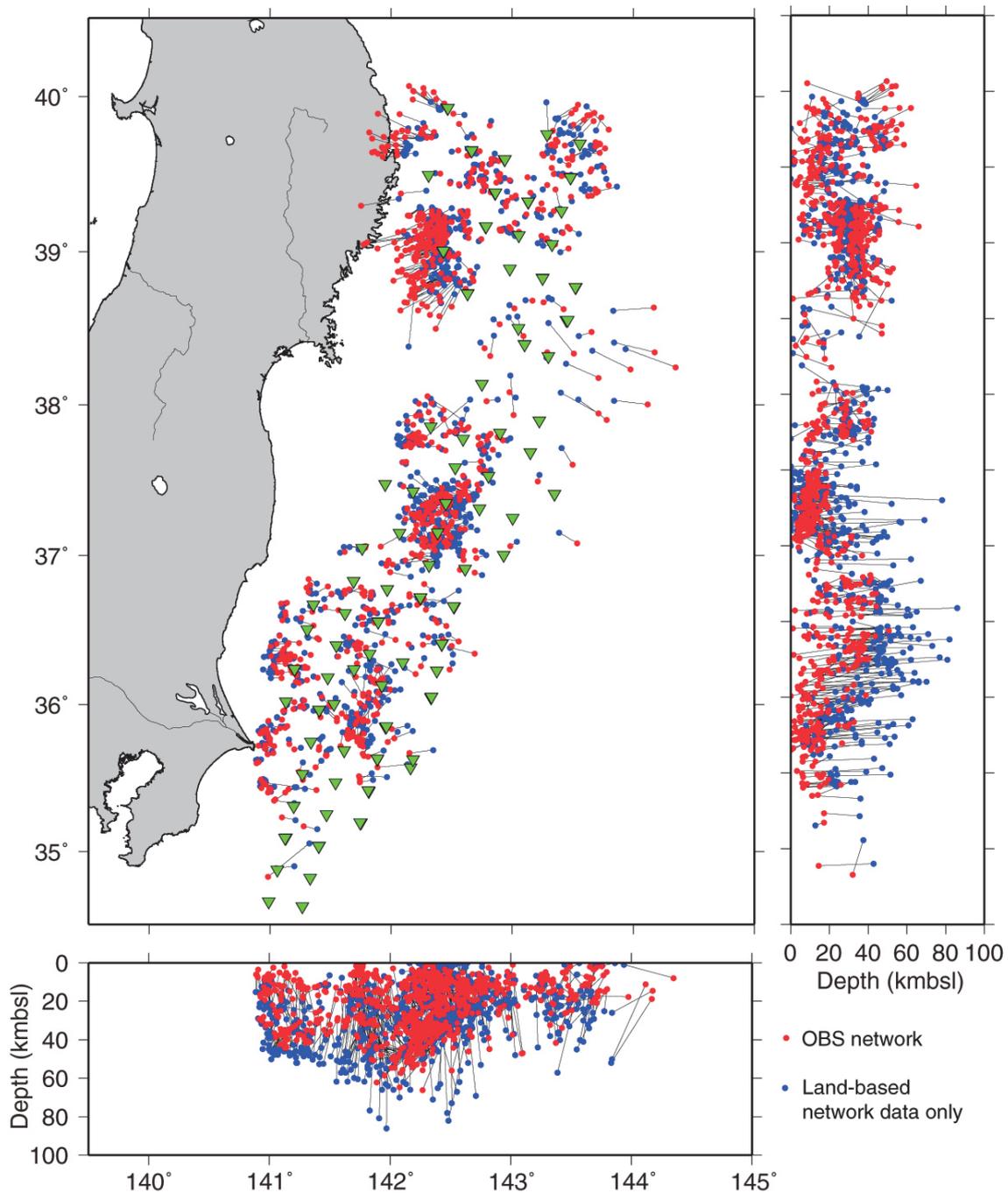


第1図 第1期および第2期の海底地震計観測点分布  
 Fig. 1 Distribution of ocean bottom seismometers for the aftershock observation for the first period (left) and the second period (right).



第2図 海底地震計データによる余震の震源分布. 計999個の余震が, 誤差深さ方向3km以下, 水平方向5km以下で再震源決定された. 解析期間は, 2011年3月15日から6月18日である. 黄色のコンターは, 強震記録から推定された本震時の滑り量分布<sup>9)</sup>である. 赤色のコンターは, 以前の海底観測から推定されているプレート境界深さである. 逆三角は, 解析に用いたOBSの位置であり. 黒線は以前行われた速度構造探査測線を示す.

Fig. 2 Total of 999 aftershocks were located with errors of less than 3km in depth and less than 5km in horizontal distance from March 15th to June 18th, 2011. Yellow contours indicate slip during the mainshock using strong-motion data<sup>9)</sup>. Red contours indicate depths of surface of the subducting Pacific plate. Inverted triangles denote positions of OBSs for the re-locations and black lines indicate profiles for existing seismic surveys.



第3図 OBSによる再決定された震源（赤）と、気象庁一元化震源（青）との比較。対応する地震を線で結んである。逆三角は、OBSの設置位置。

Fig. 3 Comparison between hypocenters by the OBS networks (red circles) and those determined by the JMA (blue circles) using land station data only. The inverted green triangles indicate positions of the pop-up type OBSs.