

地殻構造的視点による東北地方太平洋沖地震時すべり量不均質分布の 成因解明

Investigation into the heterogeneous slip distribution of the 2011 Tohoku-oki earthquake by a crustal structural study

(日本地震学会推薦)

代表研究者 東北大学 東 龍介

Tohoku University

Ryosuke AZUMA

The 2011 Tohoku-oki earthquake (M 9.0) caused large tsunami by rupturing the shallow portion of the plate boundary fault with tens meter slip. The amount of the coseismic shallow slip seems to be different between in the off Miyagi and Sanriku though it in the off Sanriku has a large estimation error. Such the heterogeneous extent in the shallow slip may be concerned with along-trench heterogeneity of frontal structure of the overriding plate. To investigate seismic structural variation corresponding to the coseismic slip extent, we analyzed two seismic survey data collected in 2007 and 2014. Seismic structural estimation using airgun-OBS survey data clarified distinctive seismic velocity variation along the Japan Trench, and showed the high velocity layer on the subducting plate spatially that correspond to the large coseismic shallow slip area of the 2011 earthquake. Similar tendency has been found in the Chile subduction zone where has experienced the largest M 9.5 earthquake in 1960 and surrounding slightly smaller earthquakes; where the rigid crust is close to the trench axis induced large tsunami in 1960. Our result and the case study in Chile would reinforce the implication that the frontal of the overriding plate controls an extent of coseismic shallow slip.

研究目的

本研究は、日本海溝のような沈み込み帯で発生する巨大地震の発生メカニズムの理解を最終目標とし、そこに至るひとつのアプローチとして、巨大地震の震源断層となるプレート境界において地震に伴うすべり量が空間的に不均質になる原因がどのようなパラメタに規定されるかを、断層周辺の地震学的構造の特徴に基づいて解明していく。

本研究の背景には、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）がある。この地震は発生前後の海底地形変化（Fujiwara et al., 2012）や海底地測地観測（例えば、Kido et al., 2012）によって、宮城県沖のプレート境界最浅部で 50 m に及ぶすべりが起こったことが発見された世界で初めての地震である。一方、三陸沖の領域は地殻変動観測量の欠如のために議論の余地がある。大半の震源モデルは宮城

県沖に比べやや小さいのではないかと考えられている。

宮城県沖で生じた浅部大すべりはプレート間に分布するスメクタイトの thermal pressurization (TP) により生じたことが、震源断層掘削によって採取した試料を用いた室内実験によって明らかとなった（例えば、Ujiie et al., 2013）が、スメクタイトは沈み込む海洋プレート上に広く分布するため、海溝沿いに場所を問わず TP を起こせる環境があるといえる。したがって、海溝沿いにみられるすべり分布の変化には TP とは別の原因があると考えた。

本研究では、陸側プレート先端部の地殻構造は海溝沿いに变化する（Fig. 1, Tsuru et al. (2002)）ことに注目する。Tsuru et al. によって推定された変形プリズムの大きさの南北変化は、東北沖地震の本震時すべり分布と空間的に対応関係を持つようにみえる

(Fig. 1)。しかし、南北にまばらに分布する Tsuru et al. 測線のみでは、すべり量の空間変化との対応関係を議論するには空間的に高い密度で構造を把握する必要があり、そのためには海溝に沿って連続的な構造変化を得れば良いと考えた。そこで、そのようなジオメトリをもつ探査測線データから海底下構造を推定し、Tsuru et al.の構造変化を空間的に補間することによって浅部すべり分布との対応関係を明らかにする。

研究経過

地震波速度構造の推定には、宮城県沖から日本海溝北端にかけて実施した人工地震波探査3測線（全長約 347 km（2007 年実施）と約 181 km（2 本、2014 年実施）の 3 本（Fig. 1））のデータを用いた。探査では測線沿いに場所を変えながらエアガンを発震して発生させた人工地震波が海底下を伝播したものを海底地震計で観測する。エアガン信号が海底地震計に到達するまでの時間（走時）から、地震波速度構造が推定できる。各測線の南側の領域は東北沖地震の浅部大すべり域と空間的に対応するような位置関係となっている（Fig. 1）。本助成期間の終了までに、2007 年測線に加えて 2014 年測線のうち 1 本の解析をおこなった。

本研究では、発震後に最初に観測される初動屈折波の走時に対して二次元波線追跡法（Zelt and Smith, 1992）およびトモグラフィー解析（Fujie et al., 2013）を適用し、測線下の P 波速度分布の推定を試みた。以下に、研究経過の詳細を記す。

<2015 年度>

- 2014 年測線のデータについて、二次元波線追跡法による予備解析をおこなった。その結果を、2007 年測線の先行解析結果と合わせて 2015 年日本地震学会秋季大会（口頭発表 1）と American Geophysical Union Fall Meeting（口頭発表 2）で発表した。

<2016 年度>

- 2007 年測線のトモグラフィー解析を完了した。この結果は現在、学術誌への投稿準備中である。
- 2014 年測線の陸側測線について、トモグラフィーによると詳細な解析に取り組んだ。ここまでの結果については、研究期間外となるが 2017 年 5 月に開催される Japan Geophysical Union-American Geophysical Union Joint Meeting、

および 8 月に開催される Joint Scientific Assembly of the International Association of Geodesy and the International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior にて発表する。

考察

<P 波速度構造の特徴>

推定した P 波速度構造を Fig. 2 に示す。各測線下でのプレート境界の深さ（e.g., Takahashi et al., 2004; Miura et al., 2005）を参考すると、2007 年と 2014 年の両測線とも、プレート境界面よりも浅いところに明瞭な P 波速度差がみとめられ、北緯 39 度を境に南側で高速度、北側で低速度となっている分布が得られた（Fig. 2）。

このうち 2007 年測線の高速度異常域は沈み込んだ海洋プレートの地殻が盛り上がった形状、つまりプレート境界下盤側の構造のようにみえる。しかし、白亜紀層と海洋性地殻の P 波速度値はどちらも 4-5 km/s 程度で似通っているため、それに基づいた解釈が難しい。そこで、屈折波初動にはある震央距離で振幅が小さくなる特徴（シャドウゾーン）がみられたことから、そうした特徴を再現する構造モデルの探索を、理論波形と観測波形の比較によっておこなった。一般的に、屈折波の見え方が不連続の場合、地下構造に速度逆転を起こす場があることが想定される。本測線についても、高速度層の間に低速度層を持つ構造の方が観測したシャドウをよく再現することが確かめられ、当該の高速度異常は陸側プレート内の異常であると断定した。

以上の手続きによって得られた P 波速度構造を日本海溝周辺の一般的な地殻構造（Fig. 2c、例えば、Tsuru et al. (2002)）に基づいて解釈すると、北緯 39 度以北の低速度域（P 波速度 ~ 3 km/s）は陸側プレート先端部を構成する未固結で柔らかい変形プリズムに対応する。一方、南側の高速度域（P 波速度 > 4 km/s）の領域は 2014 年測線固結した白亜紀堆積岩の層やその下に横たわるより高 P 波速度の島弧地殻と解釈できる。つまり、測線南側で高速度のものが分布することは、同じ場において変形プリズムが小さくなっていることを示唆し、変形プリズムの大きさの南北変化（Fig. 1、Tsuru et al., (2002)）と調和的である。したがって、海溝に平行な断面での構造の推定によって、P 波速度の明らかな変化、つまり、変

形プリズムとより高速度の地殻との境界位置をおおまかに把握できたといえる。

＜特徴的構造の空間分布と東北沖地震すべり域との対応関係＞

推定した陸側プレート内 P 波速度の高速度／低速度分布域を 2011 年東北沖地震の本震時すべり分布と比較したところ、プレート境界上に高 P 波速度の分布する領域は大すべりのあった宮城県沖におおむね対応することがわかった (Fig. 3)。一方、三陸沖の浅部すべり分布には海底地殻変動による観測量の欠如のために大きな推定誤差が残るため、プリズム構造の発達したところすべり量が減少すると現段階では強く主張できない。

ただし、日本と同じ巨大地震発生帯であるチリ沖では、東北沖と同じような構造／すべり量の関係性が指摘されている。チリ沖では 1960 年チリ地震 (M 9.5) と 2010 年チリ Maule 地震 (M 8.8) が発生しているが、前者のみ浅部大すべりが起こった可能性がある (Fujii and Satake, 2012)。Contreras-Reyes et al. (2010) は、高速破壊を起こせるプレート境界断層の上盤側には古く固化した堆積層や地殻のような高地震波速度の岩体が分布することに着目し、これらの震源域の構造を考察した。それによると、2010 年地震の震源域の付加帯は大きくその陸側にある古い岩体が海溝から離れているために地震時の高速破壊が海溝に広がらなかったと考えられ、逆に 1960 年地震の震源域は付加帯が小さく古い岩体が海溝に近づいて分布するために、断層深部の破壊が海溝まで伝播しやすいと解釈できる。そうしたことを踏まえれば、1960 年地震の際は巨大津波を励起しうるほど大きなすべりがプレート境界最浅部であった可能性があると述べている。

したがって、Tsuru et al. (2002) の成果に基づき本研究によって確認できた宮城県沖での構造的特徴と地震大すべりの対応関係は、Contreras-Reyes et al. (2010) の解釈と整合的する。白亜紀層が海溝から離れて分布する三陸沖についての議論は依然として難しいが、宮城県沖や 1960 年チリ地震震源域に似た構造の場所は、将来に巨大津波を励起しうる大きなすべりが発生する場であるのかもしれない。

本研究期間では、陸側プレートのおおまかな構造の変化から地震時すべりの不均質な分布の成因を検討してきた。今後、より細かいスケールでのプレート境界構造の特徴、例えば、断層間の間隙圧高さ(プ

レート境界の強度にかかわる)の指標となるプレート境界面の反射強度分布の空間変化の有無などについても検討を進めていき、地震学的構造とすべり域の広がりとの対応関係とその仕組みについて究明していく。

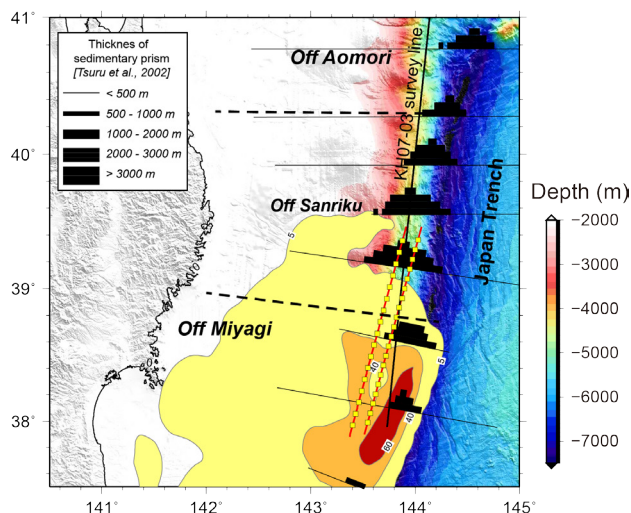


Fig. 1. Map view of study field. Black and Red lines indicate our survey lines. Piled boxes show the sedimentary prism thickness by Tsuru et al. (2002).

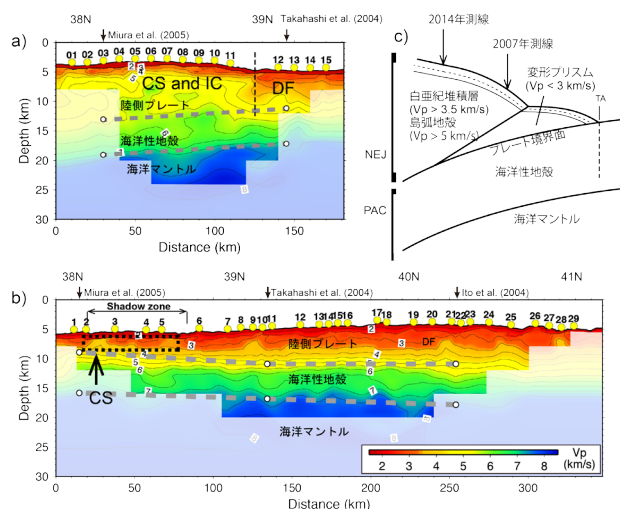


Fig. 2. P-wave velocity structure below the lines surveyed in (a) 2014 and (b) 2007. Masked area is consistent with low resolution. Gray broken lines indicate the plate boundary and oceanic Moho expected from previous seismic studies (Ito et al., 2004; Takahashi et al., 2004; Miura et al., 2005). DF: the deformed prism. CS: the Cretaceous sedimentary layer. IC: the island arc crust. (c) Cartoon of cross section view of the trench axial structure at 38N. At 39N, the prism size becomes 1.5 times larger than 38N.

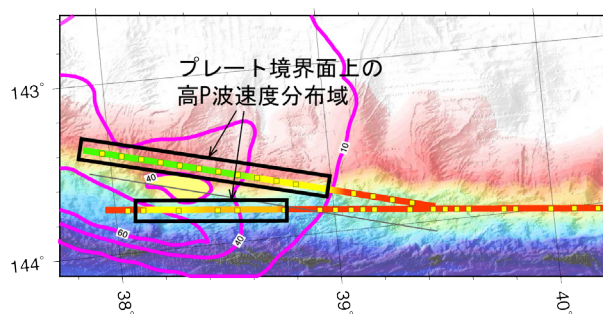


Fig. 3. Comparison of distribution of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Iinuma et al., 2012) and obtained velocity variation above the plate boundary. Color variation corresponds to the legend of P-wave velocity in Fig. 2.

参考文献

- Contreras-Reyes, E., E. R. Flueh, and I. Grevemeyer (2010), Tectonic control on sediment accretion and subduction off south central Chile: Implication for coseismic rupture processes of the 1960 and 2010 megathrust earthquakes, *Tectonics*, 29, TC0618, doi:10.1029/2010TC002734.
- Fujiwara, T., S. Kodaira, T. No, Y. Kaiho, N. Takahashi, and Y. Kaneda (2011), The 2011 Tohoku-oki Earthquake: Displacement Reaching the Trench, *Science*, 334, doi:10.1126/science.1211554.
- Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura (2012), Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 117, in press, doi:10.1029/2012JB009186.
- Ito, A., G. Fujie, T. Tsuru, S. Kodaira, A. Nakanishi, and Y. Kaneda (2004), Fault plane geometry in the source region of the 1994 Sanriku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 223, 163–175, doi:10.1016/j.epsl.2004.04.007.
- Kido, Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino, and Y. Ito (2011), Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L24303, doi:10.1029/2011GL050057.
- Miura, S., N. Takahashi, A. Nakanishi, T. Tsuru, S. Kodaira, and Y. Kaneda (2005), Structural characteristics off Miyagi forearc region, the Japan Trench seismogenic zone, deduced from a wide-angle reflection and refraction study, *Tectonophysics*, 407, 165–188, doi:10.1016/j.tecto.2005.08.001.
- Takahashi, N., S. Kodaira, T. Tsuru, J. 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, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02350.x.
- Tsuru, T., J. Park, S. Miura, S. Kodaira, Y. Kido, and T. Hayashi (2002), Along-arc structural variation of the plate boundary at the Japan Trench margin: Implication of interplate coupling, *J. Geophys. Res.*, 107, B12, 2357, doi:10.1029/2001JB001664.
- Ujiie, K., H. Tanaka, T. Saito, A. Tsutsumi, J. J. Mori, S. Toczko, and Expedition 343 and 343T Scientists (2013), Low Coseismic Shear Stress on the Tohoku-Oki Megathrust Determined from Laboratory Experiments, *Science*, 342, 1211–1214.

研究の発表

口頭発表

- 東龍介, 日野亮太, 太田雄策, 望月公廣, 村井芳夫, 伊藤喜宏, 八木原寛, 佐藤利典, 篠原雅尚 (2015), 人工地震探査で推定した 2011 年東北沖地震最大すべり域周辺の地殻構造, 日本地震学会 2015 年秋季大会, 10 月, 神戸.
- Azuma, R., R. Hino, Y. Ohta, K. Mochizuki, Y. Murai, Y. Ito, H. Yakiwara, T. Sato, M. Shinohara (2015), Vp structure in the largest slip area of the 2011 Tohoku-oki earthquake by airgun-ocean bottom seismometer surveys, American Geophysical Union Fall Meeting, December, San Francisco.

誌上発表

該当なし