

12-3 東北沖地震から 10 年－海域調査から分かったこと・分からないこと－ Tohoku-oki earthquake 10-year after – what we have leaned and what we still don't understand –

海洋研究開発機構 小平 秀一

JAMSTEC Shuichi Kodaira

1. はじめに

海底下を主破壊域とする 2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）の実態解明に向けては調査船や海底観測機器によって得られたデータが決定的な役割を果たしてきた。本小論では地震発生直から開始された緊急航海の成果とその後の海域観測で得られた成果を総括し、これまでに明らかになった東北沖地震の実態と未解決な問題を整理する。なお、海底地殻変動観測に関しては本地震予知連絡会会報において詳細が述べられているので、本小論では言及しない。また、本小論はこれまでに発表された成果のとりまとめであるため、図等は本小論には掲載せず元論文の図番号等を引用することとする。

2. 緊急観測の成果

地震発生直後、2011 年 3 月 14 日から 31 日に海洋研究開発機構の深海調査研究船「かいれい」による緊急航海が実施された。この航海では震源近傍の海溝軸付近で海底地形調査、地下構造探査が実施された。この調査結果に関しては Fujiwara et al (2011)¹⁾、Kodaira et al (2012)²⁾ に詳細は報告されている。ここではその概要をまとめる。

海底地形調査は地震発生前(1999 年, 2004 年)に宮城沖日本海溝軸近傍で実施した測線と同一測線に沿ってデータ取得を行った。このデータを用いて地震発生前と地震発生後の地形データの差分を求めることによって地震時海底変動を評価した。その結果、地震前後の海底地形差分は海溝陸側で顕著であり、海溝海側ではほとんど確認できなかった(Fujiwara et al. (2011)¹⁾ の Fig. 1)。Fujiwara et al (2011)¹⁾ では地震前後の海底地形の比較から地震時海底変動量として水平変位 50-56m, 鉛直変動 7-10m を求めた。地震発生直後の地震探査データも海底地形調査と同一測線上で実施された。この測線上でも地震発生前（1999 年）に地下構造探査データが取得されており、Kodaira et al. (2012)²⁾ では地震前後の地下構造探査データの比較から海溝軸において地震時に成長した堆積層変形構造を明らかにし(Kodaira et al. 2012²⁾ の Fig. 4) , 東北沖地震の断層すべりが海溝軸まで到達したと解釈した。

地震発生の約 1 年後に実施された地球深部探査船「ちきゅう」で実施された IODP JFAST プロジェクトでは、プレート境界からの断層物質の取得、およびプレート境界断層近傍での温度計測に成功した。これらの成果の詳細は Chester et al (2013)³⁾, Ujiie et al. (2013)⁴⁾, Fulton et al. (2013)⁵⁾ によってまとめられている。これによると、プレート境界断層は遠洋性粘土層からなる厚さ数 m の層から成り、取得されたサンプルを用いた高速摩擦実験から排水、非排水条件下で地震時の摩擦係数各々 0.19, 0.03 が求められた。この非排水条件下で得られた値は掘削孔での温度計測から求めた地震時の摩擦係数 (0.08) と同等の値であった。また、Tanikawa et al. (2013)⁶⁾ では取得されたサンプルを用いた水理実験からプレート境界断層物質は断層上下の物資に比べて 3-4 桁低い透水係数を示す

ことを明らかにし、それらの結果から断層すべりが浅部に伝搬に伴い、thermal pressurization によって、すべり摩擦力が急速かつ急激に低下した結果、プレート境界断層浅部で大きなすべりが引き起こされたと解釈した。

3. 海域調査から見えた断層すべりの時空間分布

地震発生から 10 年の間に日本海溝周辺では国内外の研究機関により、海溝軸近傍の巨大断層すべりの時空間分布を明らかにするため、集中的な地球物理・地質学的調査観測が実施されてきた。海底地形調査では、先に述べた主破壊域での差分地形調査に加え、主破壊域の北端、南端部でのデータ取得が進められた。その結果、北緯 37.5°付近、北緯 39.0-39.5°付近の差分地形データからは海溝軸を境界とする地震前後の明瞭な地形偏差は確認されず、海溝陸側で見積もられた地震時地形変動量も差分地形解析の分解能(水平方向 20m, 鉛直方向数 m)を超えるものではなかった(Fujiwara et al. 2017⁷⁾ の Fig.3, Kodaira et al. 2020⁸⁾の Fig.3)。

さらに日本海溝に沿って福島沖から青森沖までの領域において海溝軸に直交する測線で実施された高分解能反射法探査からは、主破壊域近傍では上述の海溝軸での変形構造と同様な構造が確認された。一方で、差分地形から有意な地震時地形変動が確認されなかった領域では海溝軸付近において沈み込む堆積層に変形構造は確認されなかった (Nakamura et al. 2020⁹⁾の Fig.2) 。これら差分地形データ、高分解能反射法探査データから 2011 年東北沖地震による海溝軸まで至る断層すべりは日本海溝中部において特徴的な現象であったと解釈された。

また、ピストンコアによって北緯 40°から 37°の海溝軸近傍で採取された海底堆積物試料からは、今回の地震を含み三層の乱泥流堆積物が確認されており、その特徴と沿岸で得られた津波堆積物の比較によって、その三層は 2011 年東北沖地震、1454 年享徳地震（もしくは 1611 年慶長三陸地震）、869 年貞観地震に対応すると解釈された (Ikehara et al. 2016¹⁰⁾ の Fig. 6)。さらに、これら三層が対になって確認されるのは北緯 38°を中心とした日本海溝中部のみであることが確認された (Ikehara et al. 2018¹¹⁾ の Fig. 1)。これら海底地形、地下構造、海底堆積物のデータから 2011 年東北沖地震で日本海溝中部においてのみ確認された海溝軸まで至る大きな地震時断層すべりは、少なくとも過去 2 回の地震においても海溝軸付近では同様なすべり分布を示した可能性が示唆された。

海溝軸に至る 50m を超える断層すべりが日本海溝中部に限定され、その北部・南部に拡大しなかった要因に関しては様々な議論がされている。Fujie et al. (2020)¹²⁾ では JFAST により海溝軸の地震性滑りを規定した要因である可能性が示唆された遠洋性粘土層の分布を反射法地震探査の記録からマッピングした。これによると、北緯 39°付近の海溝軸では遠洋性粘土層が変形・変質し連続性が途絶えていることが示された (Fujie et al. 2020¹²⁾ の Fig. 1)。また、Moore et al. (2015)¹³⁾ では東北沖地震の断層すべり域南限には海山の沈み込みによる遠洋性粘土層の連続性が途切れていることが指摘されている。これらのことから、Fujie et al. (2020)¹¹⁾ では遠洋性粘土層の不連続が海溝軸近傍の地震性すべりの伝搬を規定した可能性が指摘された。

4. 未解決の問題

上述のように、プレート境界の遠洋性粘土層が海溝軸近傍の地震性滑りの伝搬を規定したことが提案されてきたが、JFAST 試料を用いた最近の研究では、遠洋性粘土層の上層、下層において 10m

を超えるすべりによると見積もられた摩擦発熱の痕跡が確認され (Rabinowitz et al. 2020¹⁴), 遠洋性粘土層が大きな滑りを規定する物質的要因である, という仮説に異論が示された. 今後, 東北沖地震による海溝軸近傍の地震性すべりが確認されなかった領域からのプレート境界断層試料が採取できれば, 地震性滑りを規定した要因に関する議論が進展すると考えられる.

北緯 39.5° 付近の海溝軸近傍では, 地震波データ, 地殻変動データから求めた地震時の断層すべり分布や本稿で述べてきた海底地形, 地下構造などのデータは海溝軸近傍近傍での大きな地震時断層すべりが発生しなかったことを示しているが, 津波データの解析ではこの領域に津波波源が推定されている. この矛盾を説明するためには, プレート境界断層すべり以外の要因で津波が生成されたことを検討する必要がある. その可能性を検討するために, Nakamura et al. (2020)⁹⁾ では北緯 39.5° 付近で高密度に展開された反射法地震探査のデータを解析した. その結果, この領域では海溝陸側斜面に海底地すべりの特徴を示す領域が複数認められた (Nakamura et al. 2020⁹⁾ の Fig. 3). ただし, これらのデータは東北沖地震後に得られたもののみであり, 地震前との比較ができない. そのため, 確認された海底地すべりが 2011 年東北沖地震によって発生したものか判別することはできない. この判別には, 今後, 地すべりを確認した領域から試料採取を行い最近の地すべりであるか確認するとともに, この地すべりの運動によって観測された津波が説明できるか定量的な評価も必要である.

参考文献

- 1) Fujiwara, Kodaira, No, Kaiho, Takahashi, Kaneda, (2011), **334**. 1240-1240. The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis, *Science*
- 2) Kodaira, No, Nakamura, Fujiwara, Kaiho, Miura, Takahashi, Kaneda, Taira, (2012), *Nature Geoscience*, **5**. 646–650. Coseismic fault rupture at the trench axis during the 2011 Tohoku-oki earthquake
- 3) Chester, Rowe, Ujiie, Kirkpatrick, Regalla, Remitti, Moore, Toy, Wolfson-Schwehr, Bose, Kameda, Mori, Brodsky, Eguchi, Toczko, Expedition 343 and 343T Scientists, (2013), *Science*, **342**. 1208-1211. Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki earthquake
- 4) Ujiie, Tanaka, Saito, Tsutsumi, Mori, Kameda, Brodsky, Chester, Eguchi, Toczko, Expedition 343 and 343T Scientists, (2013), *Science*, **342**. 1211-1214, Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments.
- 5) Fulton, Brodsky, Kano, Mori, Chester, Ishikawa, Harris, Lin, Eguchi, Toczko, Expedition 343, 343T, and KR13-08 Scientists, (2013), *Science*, **342**. 1214-1217 Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements
- 6) Tanikawa, Hirose, Mukoyoshi, Tadaï, & Lin, (2013). Fluid transport properties in sediments and their role in large slip near the surface of the plate boundary fault in the Japan Trench. *Earth and Planetary Science Letters*, **382**, 150-160.
- 7) Fujiwara, Ferreira, Bachmann, Strasser, Wefer, Sun, Kanamatsu, Kodaira, (2017), *Geophys. Res. Lett.* **44**. 23, Seafloor displacement after the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the northern Japan trench examined by repeated bathymetric surveys

- 8) Kodaira, Fujiwara, Fujie, Nakamura, Kanamatsu, (2020), *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **48**. 321-343, Large Coseismic Slip to the Trench During the 2011 Tohoku-Oki Earthquake
- 9) Nakamura, Fujiwara, Kodaira, Miura, Obana, (2020), *Scientific Reports*, *10*(1), 1-9, Correlation of frontal prism structures and slope failures near the trench axis with shallow megathrust slip at the Japan Trench
- 10) Ikehara, Kanamatsu, Nagahashi, Strasser, Fink, Usami, Irino, Wefer, (2016), *Earth Planet. Sci. Lett.*, **445**. 48–56, Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments deposited in the Japan Trench over the past 1500 years
- 11) Ikehara, Usami, Kanamatsu, Arai, Yamaguchi, Fukuchi, (2018), *Geological Society, London, Special Publications*, **456**. 75-89, Spatial variability in sediment lithology and sedimentary processes along the Japan Trench: use of deep-sea turbidite records to reconstruct past large earthquakes
- 12) Fujie, Kodaira, Nakamura, Morgan, Dannowski, Thorwart, Grevemeyer, Miura, (2020), *Geology*, **48**. 614-619, Spatial variations of incoming sediments at the northeastern Japan arc and their implications for megathrust earthquakes
- 13) Moore, Plank, Chester, Polissar, Savage, (2015), *Geosphere*, **11**. 533-541 The plate boundary thrust of the 2011 great Tohoku earthquake: Oceanographic provenance and controls on slip propagation
- 14) Rabinowitz, Savage, Polissar, Rowe, Kirkpatrick, (2020), *Nature communications*, *11*(1), 1-9, Earthquake slip surfaces identified by biomarker thermal maturity within the 2011 Tohoku-Oki earthquake fault zone