



統合国際深海掘削計画 (IODP)  
— 2003 年から 10 年の成果 —

# 2011 年東北地震の巨大 すべりを理解するための 掘削調査 (Exp. 343)

James Mori

加納 靖之  
小平 秀一

Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST)

James Mori • Yasuyuki Kano • Shuichi  
Kodaira

James Mori : 京都大学防災研究所  
かのう やすゆき : 京都大学防災研究所  
こだいらしゅういち : 独立行政法人海洋研究開発機構

このプロジェクトは 2011 年東北地方太平洋沖地震に緊急に対応して、壊滅的な津波を引き起こした浅部の巨大なすべりについて調査した。プレート境界断層を貫くボアホールにより、応力測定、断層帯のコア資料採取、温度観測などが行われた。その結果は、今回の地震では、非常に摩擦強度の低い遠洋性粘土層の中にある幅の狭い断層帯がすべったことを示している。地震の際、これまでに例を見ない巨大なすべりが起きたのはこのような摩擦特性が影響しているものと思われる。

## 1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震 (M9.0) は日本の長い地震の歴史の中でも最大規模のもので、本州の東北沿岸に重大な被害をもたらした。多くの人命が奪われ (18000 人以上)、経済的打撃も深刻であった (30~40 兆円)。社会的インパクトが非常に大きかっただけに、多くの研究者はこの破壊的地震の実態を説明するための情報や研究によって社会的使命を果たそうと緊急対応体制をとった。統合国際深海掘削計画 (IODP) に関わる研究者たちは地震の直後から、震源断層にいたるボアホールを海底で掘削して調査するプロジェクトの実施に向けての話し合いを始めた。

この地震の重要な特徴の一つは日本海溝付近の沈み込み帯浅部で起きた巨大な断層すべりである。この断層のずれは 40 から 60 メートルにもおよび (e.g. Fujiwara *et al.*, 2011)、これまで世界中で観測されたどの地震よりも大きいものである。これは東北沿岸に甚大な被害をもたらした巨大津波の主な原因でもある。この未曾有の巨大すべりを理解することが掘削プロジェクトの主な科学的目的となった。数ヶ月以内に Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) の最終的なプロポーザルが用意され、IODP へ提出された。そこで述べられたこのプロジェクトの具体的な目標は次の通りである。

1. 掘削孔でのボアホールブレイクアウトから断層の応力場を推定する
2. プレート境界のコア・サンプルを採取してその地質構造を調べるとともに、さまざまな物理的

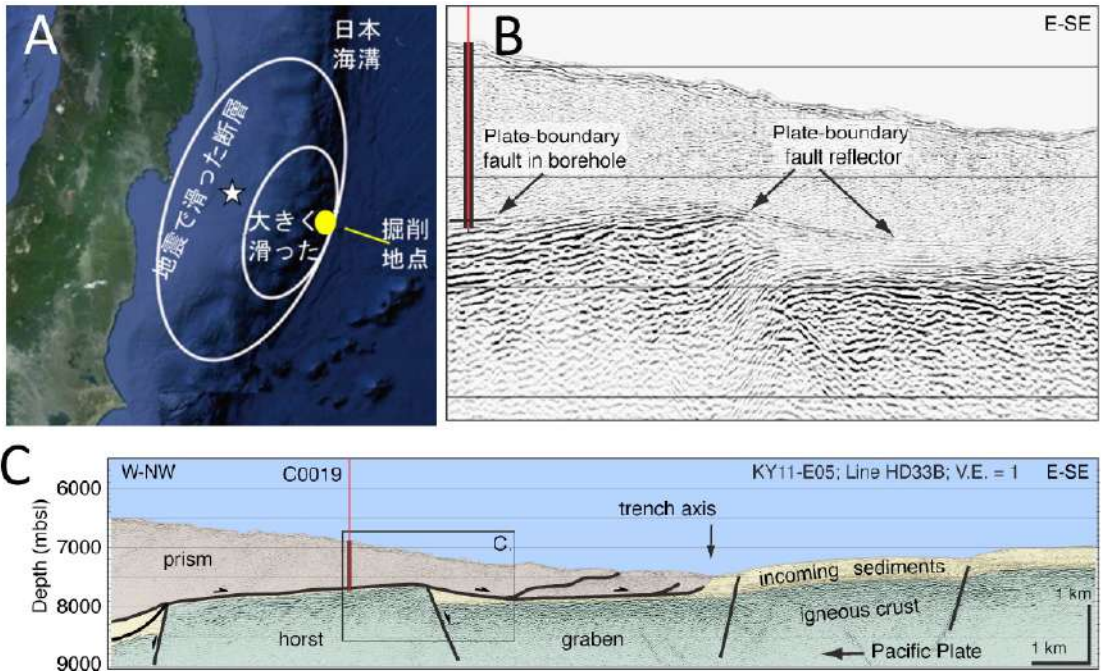


図1 (A) JFASTのボアホールの位置. (B) プレート境界を示す反射データ. (C) 推定される地質構造. 赤の垂直線はボアホールの位置を示す.

性質を測定する. このプロジェクト以前には, 最近の地震で数十メートルも動いた断層を直接目にした例は皆無である.

3. 断層の温度異常を測定し, 地震の際の動的摩擦レベルを推定する. 温度測定は地震直後に行う必要があり, JFAST がすばやく対応したのもこれが主な理由である.

プロポーザルは IODP の評価委員会によって科学的, 技術的, その他さまざまな見地から評価され, 2012 年 2 月に最終的に承認された. IODP 第 343 次研究航海は 2012 年 4 月 1 日, 地震の 13 ヶ月後, いよいよ海へこぎ出した.

ボアホールを掘削する場所は仙台の東 220 キロメートルの沖合で, 地震の際に巨大すべりが起きた地点である. 断層の位置は海底から 800 ~ 1000 メートル下と推定された.

## 2. 航海中の活動

第 343 次研究航海は海洋研究開発機構 (JAM-

STEC) の地球深部探査船「ちきゅう」によって行われた. 「ちきゅう」はこのプロジェクトで行うような非常に深い海底での掘削作業が可能な唯一の船である. 2012 年 4 月 1 日から 5 月 24 日までの約 2 ヶ月間で数本のボアホールを掘削し, 掘削同時検層 (LWD), 温度計の設置, コア・サンプルの採取などを行うというのが当初の計画であった. しかし, 「ちきゅう」にとっても水深 6900 メートルの海底を掘削するのは初めてのことであり, 克服すべき技術的難題がいろいろあった. たとえば非常に長いケーシング・パイプの重さや強度, それを船上で操作する作業の難しさなどである. これらについては慎重な計画とともに新しい機械も必要だった. そうした機械や電子機器をこれほどの深海で操作した経験は誰にもなかったため, はじめの 1 ヶ月は問題の連発だった. しかし最終的には技術的困難を克服してプレート境界のコア・サンプル採取と断層帯への温度計設置に成功した. 同時に科学掘削におけるいくつかの世界記録が樹



図2 2012年7月7日に設置された温度計を吊り下げるためのウェルヘッド。海底は水深6900メートル。写真提供はJAMSTEC。

立された。たとえば、海面下ドリルパイプの長さは最長（7740メートル）、海面下コア・サンプル取得の深度は最深（7734メートル）である。

2012年4～5月の研究航海では技術的問題と悪天候が相俟って、予定されていたすべての科学的調査を行う時間的余裕がなかった。コア・サンプルを採取するための時間はきわめて限られた上、最終的にはこの航海中での温度計の設置は断念せざるを得なかった。

しかし、その後7月になって再度挑戦の機会が

与えられた（343T次研究航海）。この追加航海では、前回の海底掘削で得た知識、経験からほとんど問題なく、ボアホールを掘削して温度計を設置することができた。一方、温度計の回収はJAMSTECの船「かいいい」に積載された無人探査機「かいこう」を使って、2013年2月に行われる予定になっていた。「かいこう」は水深7000メートルで作業のできる世界でも数台しかない無人探査機のひとつであるが、この時は悪天候などのため温度計の回収はできなかった。その後、2013年4月、「かいいい」による再度の航海が行われて温度計の回収に成功した。

### 3. 断層帯の構造

コア試料、LWD（掘削同時検層）および物理特性の計測から、プレート境界断層帯が同定された（Chester *et al.*, 2013）。この断層は、より浅部あるいは深部の堆積層とは明らかに構造の異なる薄い遠洋性粘土層内に存在している。断層帯全体のコアは回収できていないが、回収できた部分と回収できなかった部分の量から、断層帯全体の厚さは5 m以内と推定された。これは、南海トラフなど、これまでに観測されているものと比べて、単純で薄いプレート境界断層である。東北地方太平洋沖地震の際のすべり面は回収できていないと考えられるが、回収されたコアの構造と物理特性は、断層帯全体の特性を表すとみなされる。遠洋性粘土からなるこの単純な構成の断層帯が、2011年東北地方太平洋沖地震の大すべりの原因となった可能性がある。



図3 コア17のプレート境界断層帯の写真。

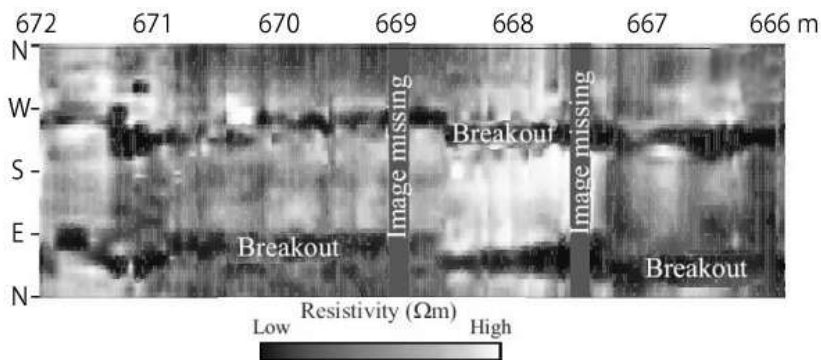


図4 LWDの比抵抗イメージに見られるボアホールブレイクアウト。水平方向の濃い色の帯が低比抵抗の領域で、孔壁の亀裂と推定される。Lin *et al.* (2013)による。

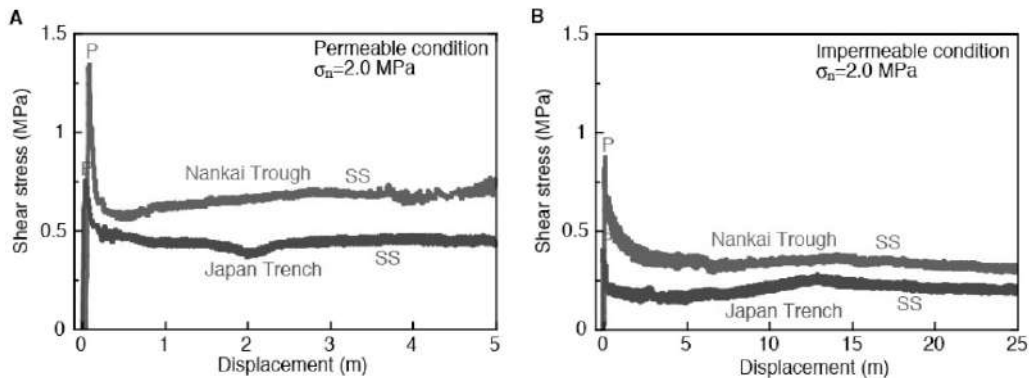


図5 日本海溝で取得したコアサンプルによる強度特性の実験結果。(A) 排水条件下における結果。(B) 非排水条件下における結果。Ujii *et al.* (2013) による。

#### 4. 応力とボアホールブレイクアウト

掘削孔壁の圧縮性破壊（ボアホールブレイクアウト）の解析から応力状態を推定した。ボアホールブレイクアウトによる亀裂は、LWDの孔壁の比抵抗イメージにより観察される（図4）。亀裂の方向と幅から応力の方向と大きさを推定することができる。このような解析の結果、水平応力はほぼ0であり、地震時に逆断層型の応力状態から正断層型の応力場に変化したことがわかった。これは、東北地方太平洋沖地震の際にそれまでに蓄積されていた応力のほぼすべてが解放されたことを示唆する。これは、東北地方太平洋沖地震はほぼすべての応力を解放したという Hasegawa *et al.* (2011) の観測結果を裏づけるものである (Lin *et al.*, 2013)。

#### 5. 室内実験による摩擦特性の把握

JFASTの主たる目的のひとつが地震時の摩擦レベルの推定である。その為、摩擦強度の決定のため、プレート境界断層から採取された試料を用いて、高速摩擦試験を行った。透水、不透水の両条件下において得られたせん断摩擦強度は、それぞれ 1.32 MPa と 0.22 MPa であった。摩擦係数に換算するとそれぞれ 0.19 と 0.03 となる。この結果は、南海トラフなどの他の沈み込み帯と比較して、断層が非常に低い摩擦のもとですべったことを示している。日本海溝のプレート境界断層を構成する物質がもつ非常に小さな摩擦強度は、断層物質が主に粘土鉱物（スメクタイト）を多く含むことに起因する。実験試料の微細構造の観察からは、断層すべり過程には流体の存在が重要であり、これは thermal pressurization 効果（高速すべり



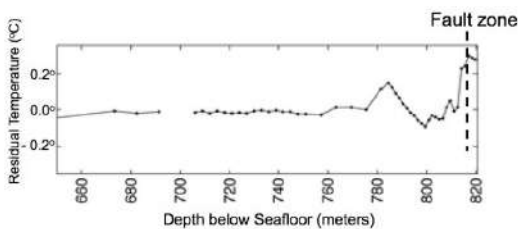


図6 2013年12月6日のボアホール温度プロファイル。断層帯上に約0.3度の温度異常がみられる。

により発生した摩擦熱により断層中の水が膨張することで引き起こされる剪断応力の低下現象)による低摩擦状態が、測定された小さな摩擦強度の一因となったことを示唆する (Ujiie *et al.*, 2013)。

## 6. 孔内温度計測による摩擦状態の推定

地震時の断層のすべりによって発生した摩擦熱を測定するために実施した温度計測により、断層帯上における微小な温度異常が記録された。この温度異常は、東北地方太平洋沖地震の18か月後に温度計を設置して以降、ボアホール掘削の影響が無視できるほど小さくなった、約4か月間のデータにはっきりとあらわれている。このとき断層帯の温度は、地温勾配よりも約0.3度高かった(図6)。これは地震時に発生した摩擦熱によるものであると推定し、このデータの解析から、地震時の断層上の摩擦係数は0.08であることがわかった。また、平均せん断応力は0.54 MPaと推定された (Fulton *et al.*, 2013)。この値は室内実験から得られたものにはほぼ一致している。室内実験とは別の手法でありながら、それと同一の結果であり、東北地方太平洋沖地震をひきおこした断層が低摩擦であることを裏づけている。

## 7. まとめ

JFASTは社会的に激しいインパクトを与えた自然災害に素早く対応したプロジェクトとして高く評価されている。6900メートルの深海で掘削を行うという技術的挑戦は成功して、ボアホールを使った応力測定、プレート境界からの貴重なコ

ア・サンプルの採取、ユニークな温度測定などを可能にした。調査の結果から2011年東北地震の巨大なすべりは、スメクタイトの多い遠洋堆積物で構成される単純で薄い断層帯で起きたことがわかった。断層物質の岩石実験と断層の温度測定の結果は、地震の際の摩擦のレベルが非常に低かったことを示している。薄い断層帯、摩擦レベルの低さ、地震の際の完全な応力開放は今回の地震の発生メカニズムを考えるうえで重要な要素であり、これらが巨大なすべりを引き起こす要因になったものと思われる。

## 参考文献

- [1] Chester, F. M., Rowe, C., Ujiie, K., Kirkpatrick, J., Regalla, C., Remitti, F., Moore, J. C., Toy, V., Wolfson-Schwehr, M., Bose, S., Kameda, J., Mori, J. J., Brodsky, E. E., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343 and 343T Scientists (2013): Structure and composition of the plate-boundary slip-zone for the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Science*, 342, 1208-1211, doi: 10. 1126/science. 1243719.
- [2] Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N. and Kaneda, Y. (2011): The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis, *Science*, 334, 1240, doi:10. 1126/science. 1211554.
- [3] Fulton, P. M., Brodsky, E. E., Kano, Y., Mori, J., Chester, F., Ishikawa, T., Harris, R. N., Lin, W., Eguchi, N., Toczko, W. and Exp. 343/343T and KR13-08 Scientists (2013): Low Coseismic Friction on the Tohoku-oki Fault Determined from Temperature Measurements, *Science*, 342, 1215-1217, doi: 10. 1126/science. 1243641.
- [4] Hasegawa, A., Yoshida, K. and Okada, T. (2011): Nearly complete stress drop in the 2011 Mw9. 0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Earth, Planets, and Space*, 63, 703-708.
- [5] Lin, W., Conin, M., Moore, J. C., Chester, F. M., Nakamura, Y., Mori, J. J., Anderson, L., Brodsky, E. E., Eguchi, N. and Expedition 343 Scientists (2013): Stress State in the Largest Displacement Area of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 339, 687-690, doi:10. 1126/science. 1229379.
- [6] Ujiie, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J. J., Kameda, J., Brodsky, E. E., Chester, F. M., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343 and 343T Scientists (2013): Low coseismic shear stress on the Tohoku 1 megathrust determined from laboratory experiments, *Science*, 342, 1211-1214, doi: 10. 1126/science. 1243485.

