

東北地方太平洋沖地震を引き起こしたプレート境界断層より以深の応力状態を初めて決定 —海洋底掘削で採取されたコア試料の非弾性ひずみ解析からのアプローチ—

概要

京都大学大学院工学研究科 林為人 教授、高知大学海洋コア総合研究センター 山本裕二 教授、海洋研究開発機構高知コア研究所 廣瀬丈洋 所長らの共同研究グループは、統合国際深海掘削計画（IODP）における地球深部探査船「ちきゅう」の第 343 次研究航海（東北地方太平洋沖地震調査掘削、JFAST と略称）で採取された岩石コア試料¹から、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の震源断層であるプレート境界断層²より以深の地層にかかる応力（物体の内部に生じる力）を計測することに初めて成功しました。その結果、東北地方太平洋沖地震後のプレート境界断層の直上と直下では、差応力（最大水平主応力と最小水平主応力の差）がともに小さく、地震前までに蓄積されていた力がほぼ完全に解放されたことを明らかにしました。

東北地方太平洋沖地震は、海溝軸付近のプレート境界断層に蓄積された応力が解放されたことが一要因で、大きな断層すべりが発生したと考えられています。そして、この大きな断層すべりによって、甚大な被害をもたらした巨大津波が引き起こされました。第 343 次研究航海で行われた掘削同時検層³のデータの解析からプレート境界断層より浅い地層の応力状態⁴は明らかとなっていました。プレート境界断層より深い地層の応力状態はわかっておらず、その解明が待望されていました。本研究によって、掘削コア試料を用いた直接的な計測に基づきプレート境界断層の浅部から深部にいたる震源断層近傍の地震後の応力状態を明らかにすることができました。本成果は、東北地方太平洋沖地震時の 50 m 以上にも及ぶ大きな断層すべりと巨大津波の発生に、蓄積していた応力の完全解放が寄与していたことを強く示唆しています。

本論文は、2022 年 11 月 9 日、国際科学誌「Earth and Planetary Science Letters」にオンライン掲載されました。

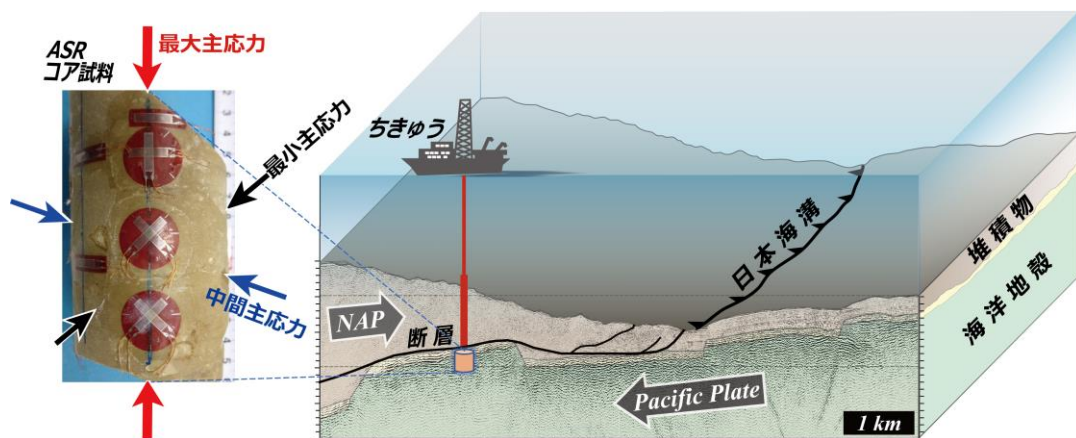


図 1 東北地方太平洋沖地震後の震源断層直下の応力状態。応力計測用の ASR コア試料(左)は海底下深度約 828 m(プレート境界断層の深度より約 8 m 深)から採取されたもので、円柱表面に貼ってある赤茶色のものはひずみ測定用のセンサーである。図中の NAP は北米プレート(North American Plate)の略である。

1. 背景

日本列島は、地球の表層を覆うプレートが沈み込む場所（沈み込み帯）に位置しており、多くの地震等の災害に見舞われています。2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、地震を発生させたプレート境界断層のすべりが日本海溝軸まで及び、陸側の北米プレートが 50 m 以上東南東へ移動するなど、従来の考え方では理解しがたい現象が確認されました。なぜこの大きな断層すべりが発生したかを解明するために、地球深部探査船「ちきゅう」によって、断層すべりの最も大きかった海域で、IODP の第 343 次研究航海「東北地方太平洋沖地震調査掘削（Japan Trench Fast Drilling Project, JFAST）」が行われました。

沈み込み帯での巨大地震は、海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む際にプレート境界断層に蓄積された応力が断層の破壊すべりを引き起こすことによって発生します。一方、断層破壊の原動力である応力は地震の発生とともに、解放されると考えられています。地震時に断層近傍に蓄積された応力が解放される度合いは、断層すべりの様式に大きな影響を及ぼします。JFAST で行われた物理検層により、プレート境界断層より浅い地層の応力状態が判明しましたが、この断層より深い地層中の応力状態を解明することが求められていました。

2. 研究手法・成果

本研究では、IODP の第 343 次研究航海の地球深部探査船「ちきゅう」船上および航海後の陸上研究室において応力計測の作業を行いました。本研究航海で掘削されたサイト C0019 の海底下深度約 177~802 m（プレート境界断層より以浅）からの 3 つのコア試料、同深度 828 m（プレート境界断層より以深）からの 1 つのコア試料を選定し、コアの方位を古地磁気測定⁵より決定したうえ、深海底や陸上の科学掘削において多くの実績を有する非弾性ひずみ回復法（略称 ASR 法）⁶を適用して応力計測を行いました。その結果、以下の成果が得られました。

- 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の震源断層であるプレート境界断層より深い地層にかかる応力を計測することに初めて成功しました。その結果、東北地震後におけるプレート境界断層（海底下深度 820 m 付近）の直上（同深度約 802 m）と直下（同深度約 828 m）の地層は、ともに正断層型の応力状態⁷になっており、最大水平主応力と最小水平主応力の差は 1 MPa 未満と小さく、地震発生前に蓄積された水平方向のテクトニック応力⁸が地震時にほぼ完全に解放されたことが明らかになりました。
- プレート境界断層の直上と直下の掘削コア試料を用いて ASR 法により計測した東北地震後における最大水平主応力の値は、断層の上下を跨いでほぼ等しいことが判明しました。また、プレート境界断層以深の最大水平主応力方向は、既往の掘削同時検層（LWD）の解析による断層以浅の同主応力方向とも一致しました。これらのデータより、プレート境界断層の直上にある前縁付加体堆積物からなる地層と直下にある遠洋性堆積物の地層中の応力状態は、ほぼ同様であることが判明しました。
- 海底下深度約 177 m で計測された斜面堆積物の地層中にかかる応力の状態は、“stress state at rest”という重力以外の応力起源が存在しない“休息”状態になっており、太平洋プレートの沈み込みによる影響が認められていないことがわかりました。この応力状態は、50 m 以上にも及ぶ巨大な地震時の断層すべりにより、浅部地層の応力が完全に解放された結果であると考えられます。

3. 波及効果、今後の予定

本研究の成果は、プレートの沈み込み帯で発生した巨大な地震と津波の震源断層に関する新たな知見となります。世界の沈み込み帯で発生する巨大地震、とりわけ、我が国において危惧されている南海トラフ沈み込み帯を震源とする南海地震は今世紀にも発生するとされており、その関連研究にも適用できると考えられます。今後本研究グループは、沈み込み帯の地震断層やその物理的特性を解明する研究を行い、学術的に社会的に価値のある研究成果を引き続き創出していきたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)『東北巨大地震断層近傍の応力状態：「ちきゅう」による日本海溝掘削からのアプローチ』（課題番号：25287134、2013～2016 年度）、科学研究費補助金基盤研究(A)『熊本地震時における震源断層の摩擦熱定量評価と特異な温度構造の解明』（課題番号：19H00717、2019～2023 年度予定）の支援を受け、京都大学、高知大学、海洋研究開発機構が共同で実施しました。

<用語解説>

- ¹ 岩石コア試料：掘削により採取された円柱状の岩石試料のこと。
- ² プレート境界断層：プレートは地球の全表層を覆う、10 数枚の板状の硬い岩盤のこと。プレート同士が接するプレート境界では断層となり、繰り返し地震を起こす。東北地方太平洋沖地震の震源断層である太平洋プレートと北米プレートの境界断層は、西北西方向に約 5° で傾斜する緩傾斜の断層であります。
- ³ 掘削同時検層：地質の特性や断層を把握するため、ドリルパイプの先端近くに物理計測センサーを搭載し、掘削と同時に孔内で各種計測を行うことです。LWD（Logging While Drilling）とも呼ばれています。
- ⁴ プレート境界断層より浅い地層の応力状態：独立行政法人海洋研究開発機構の過去のプレスリリース（2013 年 2 月 8 日、地球深部探査船「ちきゅう」の掘削調査により明らかにされた東北地方太平洋沖地震震源域の応力状態変化）を参照してください。
- ⁵ 古地磁気測定：地層ができるときに記録された過去の地磁気の情報、磁気測定により明らかにすることができ、地理的な北に対する地層の方位を推定することができます。
- ⁶ 非弾性ひずみ回復法(ASR 法)：岩石コア試料は掘削により地層から切り離された後に、応力解放による時間遅延効果のある非弾性ひずみが数日～数週間発生します。コア試料を用いて、この非弾性ひずみを測定することにより、解放される前の応力を評価することができます。
- ⁷ 正断層型の応力状態：3 つの主応力のうち、主として重力起源である鉛直方向の主応力が最大となる応力状態であります。このような応力状態によって断層が発生する場合、正断層ができます。
- ⁸ テクトニック応力：地層中の応力は主として、地球重力による応力とプレート間の力学的相互作用による応力からなっており、後者はテクトニック応力と言います。

<研究者のコメント>

2011 年 3 月 11 日に発生したマグニチュード 9 の東北地方太平洋沖地震および巨大津波は、莫大な被害をもたらしました。この地震と津波を引き起こしたプレート境界断層のすべりは 50 m 以上にも及んでおり、有史以来の最大規模であるため、その発生メカニズムには多くの学術的“謎”が秘められていました。我々の研究グループは、その震源断層のすべりを起こす応力の地震時の変化特性を一部解明したことで、学術的発展に寄与すると共に地震による被害の低減に繋がることを願っています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Three-dimensional stress state above and below the plate boundary fault after the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake (2011 年に発生したマグニチュード 9 の東北地震後におけるプレート境界断層の上下両側の三次元応力状態)

著 者：Weiren Lin, Yuhji Yamamoto, and Takehiro Hirose

掲 載 誌：Earth and Planetary Science Letters DOI : <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117888>