

12 - 10 日本海溝におけるプレート間相互作用による東北日本背弧域の震源断層への応力蓄積

Fault stressing in the backarc region of the Northeast Japan arc due the plate-to-plate interaction along the Japan trench

橋間昭徳¹・佐藤比呂志^{2,3}・石山達也³

¹ 海洋研究開発機構・² 静岡大学・³ 東京大学地震研究所

Akinori Hashima¹, Hiroshi Sato^{2,3}, Tatsuya Ishiyama³

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Shizuoka University, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. はじめに

東北日本背弧域には南北走向の逆断層が多く分布し、それらの断層で起こる地震は津波や強震動災害を引き起こしうる。地震調査研究推進本部はこれらの断層上の地震の発生確率を見積もり、公表している。こうした発生確率は数千年に及ぶ平均的なもので、プレート境界過程による応力変化は考慮されていない。また、海底下や深部の伏在断層については詳細な活動履歴が得られないため、地震発生確率の見積もりは困難である。一方、歴史地震記録からは、南海トラフや日本海溝などプレート境界の巨大地震にともなって内陸地震が頻発することが指摘されており、両者の間に力学的な連関があることが示唆される。従って、プレート境界過程による内陸の震源断層に対する力学的な影響を適切な地下構造モデルを用いて見積もることが、数十年スケールの地震発生可能性の評価においても重要である。

現在、プレート境界における巨大地震発生サイクルは宇宙測地技術により精度よく捉えることが可能である。本研究では、日本列島域を含む三次元有限要素モデルを用いて、東北日本の GNSS 観測網によるデータから 2011 年東北沖地震前の定常的なプレート間固着レートと地震時・地震後のすべり分布を求め、東北日本背弧域の震源断層に蓄積される応力を計算した。

2. 有限要素モデルを用いた応力計算

本研究の応力計算の対象となる東北日本背弧域の震源断層形状は、日本海と沿岸域については日本海地震・津波調査プロジェクトにおいて作成した矩形モデル¹⁾を使用し、陸域については新たに作成した矩形モデル²⁾を用いた。いずれも反射法地震探査、重力異常、地質学・変動地形学的資料を総合して求められている。各震源断層のすべり角は、広域応力場³⁾が各断層面に最大剪断応力を及ぼす向きと同じ方向であると仮定して求めた。

著者らは過去の研究において、2011 年東北沖地震時と地震後のすべり分布^{4,5)}およびこれらのすべりによるプレート内の応力変化⁶⁾を求めたので、本研究にはこれらの結果を用いる。本稿では東北沖地震前の解析について述べる。

有限要素モデルは同様に著者らの過去研究^{4,5,6)}のものを用いる。太平洋プレート上面の形状は観測された地震分布に基づく。すべりを与える断層面は 80 km 以浅のプレート境界を 8 × 32 (深さ方向 × 海溝沿い) の小断層面に分割した。断層すべりは、断層面の上面と下面の相対変位として与える。モデル領域の側面と底面には変位固定の境界条件を課した。内部構造は弾性リソスフェア・粘弾性アセノスフェア構造を考える。沈み込む海洋リソスフェアの厚さは 70 km、陸側の弾性リソ

スフェアの厚さを 50 km とした。アセノスフェアの粘性率は標準的な値 1019 Pa s とした。

インバージョン解析に用いるため、各小断層面上の単位すべりによる変位応答を計算する。定常的なプレート間固着（すべり速度欠損）についてもアセノスフェアの粘弾性緩和の影響が無視できないことが近年の研究で指摘されている。本研究では、粘弾性緩和完了後の変位応答を用いて解析を行う。

解析対象とした地殻変動データは、北緯 37° 以北の国土地理院 GNSS 観測網の電子基準点の日々の座標値（F3 解）である。2003 年十勝沖地震の影響を避けるため、1998 年 1 月 1 日から 2002 年 12 月 31 日までの 5 年間のデータが存在する 234 観測点の時系列から定常的な変動速度場を求めた。

インバージョン解析ですべり速度欠損分布を得たら、それを有限要素モデルに入力して定常的なプレート間固着によるプレート内部の応力速度を計算する。

3. 結果・議論

インバージョンにより得られたすべり速度欠損は、日本海溝下では、2011 年東北沖地震のすべり分布に似たパターンで最大 ~10 cm/yr、根室沖から日本海溝-千島海溝会合部にかけて最大 ~14 cm/yr の分布となった。このようなパターンは過去研究と整合的である⁷⁾。このすべり速度欠損分布を用いて 2011 年東北沖地震前の応力速度を計算した。また 2011 年東北沖地震後の応力変化に関しては、地震発生時を基点とし、東北沖地震による応力変化に地震前の応力速度を足し合わせた。同時に、東北地方の震源断層において、求めた応力（速度）が断層のすべり運動に対して促進的であるか抑制的であるかを示す指標となるクーロン応力（速度）を計算した。

得られた上盤プレート内の応力（速度）場は、東北沖地震前については日本海溝~千島海溝におけるプレート間の固着に対応して圧縮的であり、東北沖地震後は逆に伸張的な応力がアセノスフェアの粘弾性緩和により時間と共に拡大していく。この結果が示すように、上盤プレート内の応力は、プレート境界において固着が回復したとしても、数十年は東北沖地震後の粘弾性緩和が支配的である。ただし、北海道では東北沖地震による影響は限定的であり、その後の千島海溝におけるプレート間の固着と共に圧縮的な応力が増大する。

震源断層のクーロン応力（速度）については、東北沖地震前は、プレート間固着の中心に近く、その影響を最も受けている宮城県を中心にすべり促進的な正のクーロン応力を受ける震源断層が日本海まで広く分布する。このようなパターンは 1900 年以降東北沖地震までの M6.5 以上の上盤プレート内地震の分布と調和的である。東北沖地震直後のクーロン応力分布は東北沖地震前とほぼ真逆のパターンとなり、東北地方の逆断層型地震に対して抑制的になる。実際に東北沖地震後の上盤プレート内での地震活動は沈静化し、逆にこれまで地震活動がほとんど無かったところで例外的に活発化した。2011 年福島県浜通りの地震（M7.0）はそのような地域で起きた地震である。東北沖地震以降は負のクーロン応力が日本海沿岸に向けて広がっていく。一方、北海道から青森にかけてすべり促進的な正のクーロン応力に転ずる震源断層が現れてくる。これは千島海溝におけるプレート間固着の効果だと考えられる。そのような中、2016 年福島県沖地震と 2019 年山形県沖地震という 2 つの M7 地震が発生した。2016 年福島県沖地震は、東北地方に多い逆断層とはタイプが異なる正断層型地震であり、東北沖地震後の応力変化とは整合的な地震であった。一方、2019 年山形県沖地震は逆断層型であり、東北沖地震後のすべり抑制的な応力変化とは整合しない。この地震発生に関しては、広域的な応力変化だけでなく、地殻流体の流入による断層強度の低下といった断層固有の性質が主要な役割を果たした可能性がある⁸⁾。

4. 結語

現在、稠密な GNSS 観測網によりプレート境界過程（巨大地震のすべり／プレート間固着）をかなり正確に拘束できる。そこで、島弧域の構造を取り入れたモデルにプレート境界過程を境界条件として入力すれば、プレート内部の震源断層にかかる応力を計算することができる。計算した応力を用いて力学的な地震活動の評価を行うことができる。

以上の考えをもとに、日本列島域の 3 次元有限要素モデルを用いて 2011 年東北沖地震前の固着、地震発生時と地震後のすべりを求め、東北日本背弧域の応力を求めた。求めた応力場は東北沖地震前は圧縮的であり、地震後は伸張的となる。特に、地震後数十年間は、プレート境界における固着の回復を考慮しても、アセノスフェアの粘弾性緩和の影響により伸張的な応力場が持続する。各震源断層にかかるクーロン応力（速度）は、大局的には観測された地震活動を説明することができた。これは、地震とは震源域に蓄積される応力の解放過程であるという基本的原理に整合する。そのため、プレート内地震活動評価のためのプレート内の応力蓄積のモデル化が急務となる。一方で、2019 年山形県沖地震のように、広域的な応力変化だけでなく断層強度の低下といった断層固有の性質を考慮すべきケースもあった。こういった断層固有の要素をパラメーターとしてモデルに取り入れることができれば、より一般的かつ有用な地震活動評価の力学モデルの信頼性の向上に資するであろう。

参考文献

- 1) 佐藤比呂志, 石山達也, 加藤直子, 野徹雄, 石川正弘, 松原 誠, 越谷 信, 豊島剛志, 小林健太, 小菅正裕 (2021), 断層モデルの構築, 令和 2 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 259-280.
- 2) 佐藤比呂志, 石山達也, 野 徹雄, 加藤直子, 小平秀一, 松原 誠 (2022), 東北日本背弧域での震源断層モデルの構築と実施したリスクコミュニケーション会議, 予知連会報, (本巻).
- 3) Terakawa, T., and Matsu'ura, M. (2010), The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, **29**, TC6008, doi:10.1029/2009TC002626.
- 4) Hashima, A., T. W. Becker, A. M. Freed, H. Sato, and D. A. Okaya (2016), Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku-oki earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, *Earth Planets Space*, **68**:159.
- 5) Freed, A. M., A. Hashima, T. W. Becker, D. A. Okaya, H. Sato, and Y. Hatanaka (2017), Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **459**, 279-290.
- 6) Becker, T. W., A. Hashima, A. M. Freed, and H. Sato (2018), Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **504**, 174-184.
- 7) Hashimoto, C., A. Noda, and M. Matsu'ura (2012), The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity, *Geophys. J. Int.*, **189**, 1-5.
- 8) 佐藤比呂志, 石山達也, 篠原雅尚, 酒井慎一, 橋間昭徳, 野 徹雄, 小平秀一, 佐藤 壯, 松原 誠 (2019), 2019 年山形県沖地震震源域周辺の地殻構造の特徴, 日本地震学会 2019 年度秋季大会, S24-07.