

地震発生サイクルの数値シミュレーションから期待されるプレート境界面上の固着やすべりの時空間発展

課題責任者

中田 令子 東京大学大学院理学系研究科

著者

中田 令子*¹, 堀 高峰*², 青地 秀雄*^{3,4}, 井出 哲*¹

*¹ 東京大学大学院理学系研究科, *² 海洋研究開発機構海地域地震火山部門地震津波予測研究開発センター, *³ フランス地質調査所, *⁴ ENS-CNRS PSL, France

キーワード: 地震発生サイクル, 階層パッチモデル, 準動的計算, 規模別頻度分布

1. はじめに

本課題では、南海トラフおよび日本海溝を対象として、沈み込むプレート境界面上の固着やすべりの時空間発展の逐次予測に用いる物理モデルである地震発生サイクルの数値シミュレーションを行っている。日本海溝や南海トラフなどの沈み込み帯で発生しているマグニチュード (M)8 以上の巨大地震サイクルにおいて、その周辺で発生している中～大規模地震やスロー地震を準動的な数値シミュレーションで再現し、各イベントの相互作用について時空間的に明らかにすることによって、海溝型大地震の長期評価や発生過程の理解につながる知見を得る。

R5 年度は、R4 年度に引き続き、日本海溝を対象として、2011 年東北地方太平洋沖地震クラスの巨大地震、宮城県沖地震、中～大規模地震、スロー地震をモデル化した計算を実施した。さらに、南海トラフ全域を対象とした計算にも着手した。本稿では、日本海溝北部における M5-8 クラスの地震を対象として、階層構造モデルを適用した結果について報告する。

2. 手法

先行研究 [1, 2, 3] と同様に、プレート境界で発生する地震や非地震性すべりが、プレート相対運動からのずれによって蓄積したすべり欠損を解放するという過程をモデル化する。プレート境界面を構成する各小断層での摩擦は、すべり速度・状態依存摩擦則 [4] に、断層の構成則は Nakatani [5] に従うと仮定した。強度の時間発展則は、slowness (aging) law [4, 6] を用いた。地震波の放射によるエネルギーの減衰は、準動的に近似する項を導入して計算した [7, 8]。すべり応答関数は、均質な半無限弾性媒質中で計算した [9]。太平洋プレートの沈み込み速度は、先行研究と同様に、8.4 cm/year [10] とした。摩擦パラメータ $A(=a\sigma)$ 、 $B(=b\sigma)$ 、 L (特徴的すべり量) は、日本海溝での構造探査にもとづいて設定された 3 次元のプレート境界面 [11] を離散化し、各小断層に、階層構造 [12] を取り入れたモデルで計算した。

2011 年東北沖地震の動的破壊過程の説明に用いられた階層構造モデル [12] に倣って、過去に発生した M=5.6-8.0 の地震を規模別に 4 グループに分け、各グループの地震の震源域をそれぞれ半径 10・20・40・80km の円で近似

した。震源域内部の L を円の半径に比例して変化させることで、空間的に不均質な 4 段階の階層構造を与えた。本研究では、過去およそ 100 年間に発生した 378 個の地震について、震源誤差や地震の繰り返しを考慮し、震源距離の近い複数の地震を 1 つにまとめて扱った。比較のため、グループの組み合わせを変えたモデルでも、同様の計算を行った (図 1)。なお、背景領域は一樣に、すべり速度弱体化かつ大きめの L 値を仮定した。

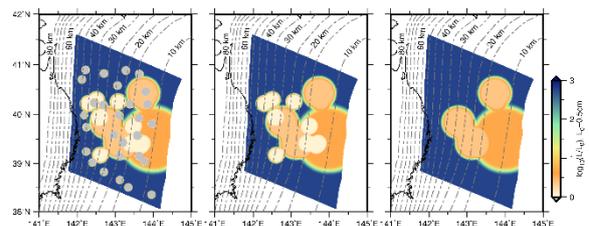


図 1 過去に発生した地震分布を基に仮定した摩擦パラメータ (L) の分布の例。円の半径の違いは、規模の違いを反映している。

3. 結果及び議論

結果の一部は国内外の学会において発表した [i. e., 13, 14]。現在は、国際学術誌へ投稿するために、論文を執筆中である。

4 段階の階層構造を取り入れたところ、300 年分のシミュレーション結果からは、M>8 の固有地震が繰り返し発生している状況が得られた。M>8 地震のサイクル間に発生する中～大地震は、複数パッチの連動破壊による複雑なすべり分布や繰り返し間隔を示したが、海溝寄りのエリアでは、M<7 地震は発生しなかった (図 1-4 : 左)。また、経験的に知られている規模別頻度分布に類似する、ある程度連続的な規模別頻度分布が得られた。

4 階層モデルから小規模グループのパッチを取り除いた 3 階層または 2 階層モデルの場合も、200-300 年間 (3-5 サイクル) を通して、固有地震の規模・頻度分布・すべり分布に、4 階層構造と大きな違いは見られなかった (図 1-4 : 中・右) が、M>8 地震の繰り返し間隔は、階層が少ないほど短く、ばらつきが大きくなっていった。

今後は、階層数の違いが M>8 地震サイクルの繰り返し

間隔や破壊開始点のばらつきに与える影響等について詳細に検討する。さらに、M>8 地震すべり域内部（浅部）においても、小～中規模地震発生を再現するためにモデルを修正するなどして、理解を深めていく。R5 年度中に、4 階層モデルで 2600 年分の計算を実施した。次年度は、この結果も解析し、長期にわたる M>8 地震サイクルの特徴について明らかにする。

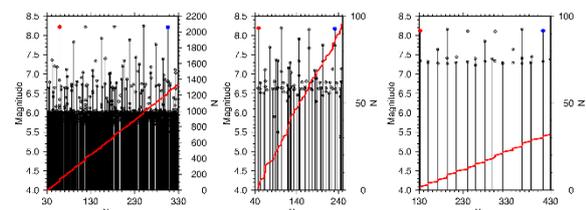


図2 マグニチュードの時間分布。赤線は累積地震数。

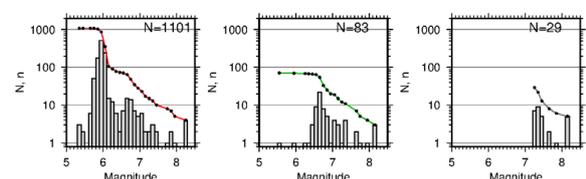


図3 地震の規模別頻度分布。

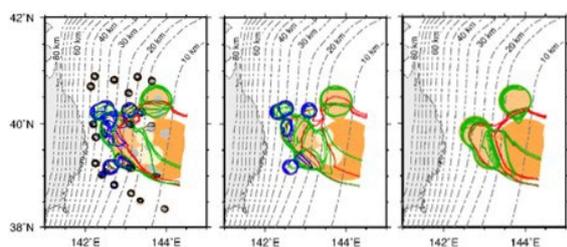


図4 L と地震すべり域(最大すべり量の半値のコンター)。赤・緑・青・黒色の線は規模別。

謝辞

数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータおよび東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムを利用しました。本研究の一部は、JSPS 科研費 Grant Number JP21K04604、JP19H05596、JP21H05206 の助成を受けて行われました。

文献

[1] Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo, and K. Ariyoshi, “Possible scenarios for occurrence of M \sim 7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation”, *Sci. Rep.*, 6, 25704 (2016).
 [2] Nakata, R., T. Hori, S. Miura, and R. Hino, “Presence of interplate channel layer controls of slip during and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake through the frictional characteristics”, *Sci. Rep.*,

11, 6480 (2021).
 [3] Nakata, R., N. Uchida, T. Hori, and R. Hino, “Recurrence intervals for M > 7 Miyagi-ken-Oki earthquakes during an M \sim 9 earthquake cycle”, *PEPS*, 10, 34, 1-16 (2023).
 [4] Dieterich, J. H., “Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations”, *J. Geophys. Res.*, 84(B5), 2161-2168 (1979).
 [5] Nakatani, M., “Conceptual and physical clarification of rate and state friction: Frictional sliding as a thermally activated rheology”, *J. Geophys. Res.*, 106(B7), 13347-13380 (2001).
 [6] Ruina, A., “Slip instability and state variable friction laws”, *J. Geophys. Res.*, 88(B12), 10359-10370 (1983).
 [7] Rice, J. R., “Spatio-temporal complexity of slip on a fault”, *J. Geophys. Res.*, 98(B6), 9885-9907 (1993).
 [8] Thomas, M. Y., N. Lapusta, H. Noda, and J.-P. Avouac, “Quasi-dynamic versus fully dynamic simulations of earthquakes and aseismic slip with and without enhanced coseismic weakening”, *J. Geophys. Res.*, 19, 1986-2004 (2014).
 [9] Hyodo, M., T. Hori, Y. Kaneda, “A possible scenario for earlier occurrence of the next Nankai earthquake due to triggering by an earthquake at Hyuga-nada, off southwest Japan”, *Earth Planets Space*, 68, 6, 1-17 (2016).
 [10] Ohtani M., K. Hirahara, T. Hori, and M. Hyodo, “Observed change in plate coupling close to the rupture initiation area before the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake: Implications from an earthquake cycle model”, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1899-1906 (2014).
 [11] Baba, T., A. Ito, Y. Kaneda, T. Hayakawa, and T. Furumura, “3-D seismic wave velocity structures in the Nankai and Japan Trench subduction zones derived from marine seismic surveys”, *Japan Geoscience Union Meeting*, S111-006 (2006).
 [12] Ide, S. and H. Aochi, “Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake”, *Tectonophysics*, 600, 1-13 (2013).
 [13] Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, and S. Ide, “Applicability of Mutiscale Circular Patch Model in Numerical Simulation of Earthquake Generation Cycle”, *American Geophysical Union Fall Meeting 2023*, T31H-0318, San Francisco, USA (December, 2023).
 [14] 中田令子・堀高峰・青地秀雄・井出哲, マルチスケール円形パッチモデルを用いた地震発生サイクルの数値シミュレーション, 日本地震学会 2023 年秋季大会, S08-07, 横浜 (2023 年 10 月).