

# 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\*<sup>1</sup>, 堀 高峰\*<sup>2</sup>, 青地 秀雄\*<sup>3,4</sup>, 井出 哲\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, \*<sup>2</sup> 海洋研究開発機構海域地震火山部門地震津波予測研究開発センター, \*<sup>3</sup> フランス地質調査所, \*<sup>4</sup> 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, 破壊開始点, 前震と余震

## 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。

R6年度は、R5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、南海トラフ全域を対象とした計算を実施した。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、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 ( $V_{pl}$ )は、8.4 cm/year [10]とした。日本海溝での構造探査にもとづいた3次元のプレート境界面 [11]を離散化し、各小断層に摩擦パラメータ  $A(=a\sigma)$ 、 $B(=b\sigma)$ 、 $L$  (特徴的すべり量)を仮定して計算する。すべり速度の初期値は  $0.9V_{pl}$ 、モデル領域外のすべり速度は一律に  $V_{pl}$  の境界条件とした。

$A-B$ は一律にすべり速度弱化とした (図1a)が、 $L$ の値は、2011年東北沖地震の動的破壊過程を説明した階層構造モデル [12]に倣った。まず、気象庁カタログに掲載されている過去およそ100年間に発生したM=5.6-8.0の地震を規模別に4グループに分けたうえで、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。そして、各グループの地震の震源域をそれぞれ半径  $10 \cdot 20 \cdot 40 \cdot 80$  kmの円で近似し、震源域内部の  $L$  を円の半径に比例して変化させた。サイズの異なるパッチが重なっている場合は小さいパッチの  $L$  値を採用することで、空間的に不均質な4段階の階層構造を仮定した (図1b)。背景領域は一律に、大きめの  $L$  値を仮定した。比較のため、最大パッチのみのシングルパッチモデルでも、同様の計算を行った (図1c)。

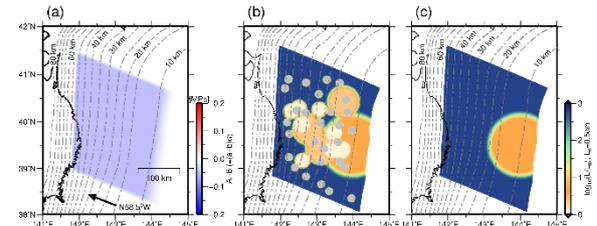


図1 (a)摩擦パラメータ(A-B)の分布。(b)4階層パッチと(c)シングルパッチモデルの摩擦パラメータ(L)の分布。

## 3. 結果および議論

4階層モデルでは、M5-8の地震が繰り返し発生し、2600年分のシミュレーション結果から、M>8地震は43回発生したが、繰り返し間隔は大きくばらついた (図2a)。M6-8では、Gutenberg-Richter則 [13]と呼ばれる経験則に従う規模別頻度分布が得られた (図3a)。43回の内37回では、M>8地震の前に、M6-7の前震が起きていた。また、すべり域の周囲では、余震も多く発生した。M>8地震だけではなく、各M>8地震間に発生する中～大地震も、複数パッチの連動破壊による複雑なすべり分布を示した (図3b)。M>8地震の破壊開始点 (図4a)は、小さいパッチ内部、またはその付近に位置しており、小さい破壊から拡大していくカスケードアップ破壊過程を示していた。一方、シングルパッチモデルでは、2600年間(45サイクル)を通してほぼ等間隔でM>8地震が繰り返し発生した (図2b)。破壊開始点は毎回ほぼ同じで、最大パッチの内部であった (図4b)。4階層モデルでは、このような最大パッチ内部からの破壊開始は見られなかった。

4階層モデルを40サイクル以上の長期間にわたって計算することによって、階層構造がもたらす地震発生サイクルの規則性や多様性だけではなく、経験則に従う小～

大地震の発生頻度、前震と余震、さらには中～大地震の破壊開始過程における階層構造の重要性についても議論できる結果が得られた。

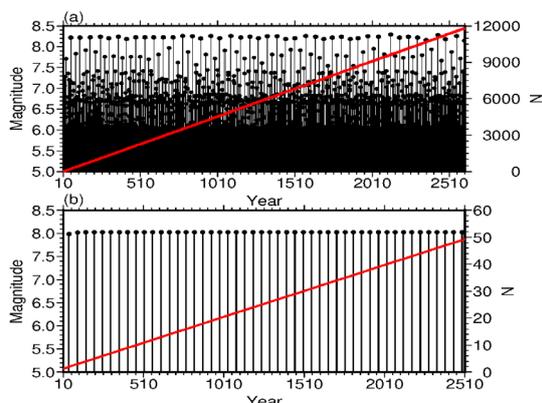


図2 マグニチュードの時間分布。赤線は累積地震数。(a)4階層パッチモデル。(b)シングルパッチモデル。

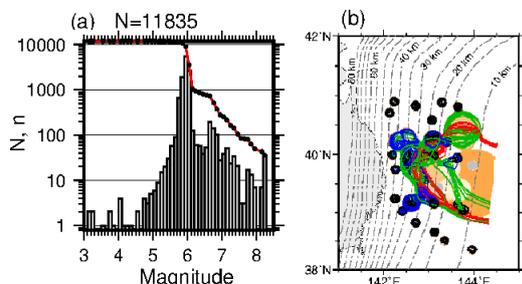


図3 4階層モデルでの(a)2600年分の地震の規模別頻度分布、(b)T=20~920年の地震時すべり分布(最大すべり量の半値のコンター)。赤・緑・青・黒色線は規模別順。

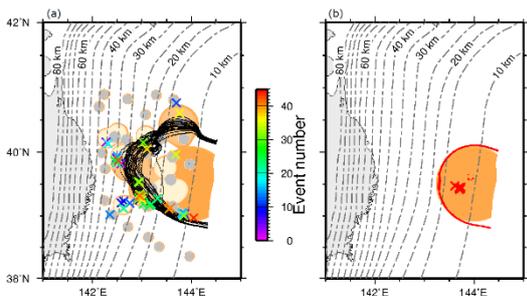


図4 2600年分のM>8地震破壊開始点(X)とすべり分布(コンター)。(a)4階層モデル。(b)シングルパッチモデル。

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、JP24K07985 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<sup>~</sup>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 ~ 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] Gutenberg, B. and C. F. Richter, "Frequency of earthquakes in California", *BSSA*, 34(4), 185-188 (1994).