

逐次データ同化によるプレート境界固着・すべりの推移予測実験

課題責任者

堀 高峰 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

著者

中田 令子^{*1}, 有吉 慶介^{*1}, 堀 高峰^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

日本海溝沿いの地域を対象とした、2011年東北地方太平洋沖地震前後のプレート境界面における固着やすべりに関する地震発生サイクルの数値シミュレーションを用いた逐次推移予測において、東北沖地震後の余効すべりの時空間発展に関して、海域における観測や調査等から得られる様々な知見とより整合的なシナリオを追加するために、これらの知見から示唆される東北沖地震震源域の北部および南部における不均質な空間分布を反映させた摩擦パラメータを仮定した計算を多数行っている。本年度は、重力観測から得られる知見を取り込み、すべり速度状態依存摩擦構成則のパラメータの1つである特徴的すべり量に着目してモデルの修正を行った。このような詳細な時空間分布を再現する複雑なモデル構築の際には、入力する摩擦パラメータを大まかに絞り込みつつ、試行錯誤的に入力パラメータを仮定して、細部の調整を行ってきた。そこで、入力する摩擦パラメータをより絞り込むために、巨大地震に伴う余効すべり伝播速度の数値シミュレーションを多数行い、その結果から、余効すべりの発生過程について近似条件を導き出し、すべり速度状態依存摩擦構成則に基づいた理論式の妥当性を評価した。

キーワード：余効すべり，伝播速度，摩擦特性

1. はじめに

将来、地震・津波による大きな被害が発生すると想定されている南海トラフや、2011年東北地方太平洋沖地震（マグニチュード(M)9）後の余震等が懸念される日本海溝を主な対象として、定期的な海陸地殻変動のモニタリングとデータ解析を実施するとともに、巨大地震の発生に向けたプレート境界での固着・すべりの逐次推移予測のための逐次データ同化プログラムの開発を行っている [1]。本課題では、これまでに、逐次推移予測のための準備として、日本海溝沿いの地域を対象とした、東北地方太平洋沖地震前後に関する地震発生サイクルの数値シミュレーション [2] を行い、2011年東北地方太平洋沖地震（マグニチュード(M)9）や、宮城県沖地震などのM7クラス地震の繰り返しを、半定量的に再現できることを示すとともに、得られたシミュレーションデータベースに、粒子フィルタの一種である逐次重点サンプリング（Sequential Importance Sampling; SIS）と呼ばれる逐次データ同化手法を適用し、逐次推移予測の数値実験を行ってきた。

様々な先行研究により、大地震後のプレート境界すべりの推移（時間差を伴う地震発生）には、余効すべりの時空間分布が大きく影響していることがわかっている。先行研究 [2] では、東北地方太平洋沖地震後の余効すべりの継続期間に関して、観測を十分再現できていなかった。従って、本年度は、大地震後のすべりの時空間発展に関して、観測とより整合的なシナリオを追加するために、先行研究 [2] のモデルに、重力観測から示唆されるM9クラスの地震震源域の北部および南部における不均質な空間分布を反映させた摩擦パラメータを仮定した計算を多数行った。しかし、複雑なサイクルを再現するモ

デル構築の際には、試行錯誤的に入力パラメータを仮定することが多い。そこで、入力する摩擦パラメータをより絞り込むために、巨大地震に伴う余効すべり伝播速度の数値シミュレーションを多数行い、理論式の妥当性を評価した。

2. 日本海溝における地震発生サイクルシミュレーション

既に構築してある日本海溝地域のモデル [2] を基に、摩擦パラメータ $A (= a\sigma)$ 、 $B (= b\sigma)$ 、 L （特徴的すべり量）について様々な空間分布を仮定して、地球シミュレータを用いた地震発生サイクルのフォワード計算を行った。フォワード計算では、プレート境界で発生する地震の繰り返しを、プレート相対運動からのずれの蓄積と解放過程としてモデル化する [3]。プレートの相対運動に起因するすべりによって生じる準動的近似でのせん断応力変化と、強度の変化に伴うすべりの時空間変化を計算する。プレート境界面の摩擦は、すべり速度・状態依存摩擦則 [4, 5] に従うと仮定した。強度の時空間発展則には、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を準動的に近似する項（ダンピング係数）は、これまで [3] よりも約3分の1小さい値を仮定した [2, 7]。

Nakata et al. [2] では、摩擦パラメータの空間分布は、繰り返し間隔数十年のM7クラスの地震の震源域を20～24 km の円で、繰り返し間隔500～1000年のM9クラスの地震の震源域を走向方向に約150 kmの矩形で近似し、周囲よりも不安定な摩擦条件 ($A-B = -0.33 \sim -0.18$ MPa, $L = 0.02 \sim 0.2$ m) を仮定していた。これらの地震の震源域以外の領域は、地震発生域よりも安定な条件

で、一様な分布を仮定していた ($A-B = -0.1$ MPa, $L = 0.3$ m)。

本年度は、観測された特徴により近いシナリオを作成するために、観測から示唆されている重力異常の分布 [8] に基づく不均質な摩擦パラメタの分布を、M7 クラスの地震の震源域以外の領域に反映させた。例えば、 $A-B$ は Nakata et al. [2] と同じ条件のままにした上で、 L の分布のみ異なる条件を与えた。これは、M9 地震震源域に比べて、その北部及び南部では、明らかな負の異常が見られる [8, 9]。その重力異常の原因として、プレート境界面上に厚いガウジが広がっていると考えられることと、岩石実験によってガウジの厚さと L に比例関係があると示唆される [10, 11] ことから、M9 地震震源域の北部および南部の重力異常値 $\Delta GA > -20$ の部分で、特徴的すべり量 L が大きいと仮定し、それ以外の部分は、先行研究とほぼ同様な値にした。図 1 の例では、M9 地震震源域で $L = 0.15$ m、北部で 0.45 m、南部で 0.60 m、深部で 0.15 m とした。

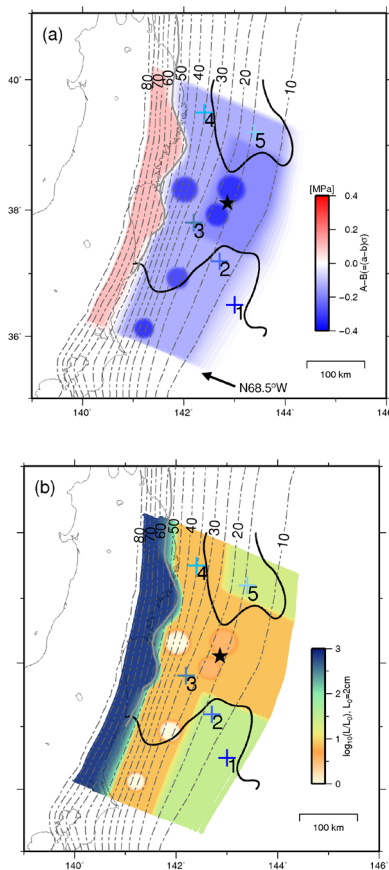


図 1 仮定した摩擦分布の一例。(a) 摩擦パラメタ ($A-B$)。 (b) 特徴的すべり量 (L)。黒太線は偏差重力 $\Delta GA = -20$ mgal [7]。黒星は 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源。細点線は沈み込むプレート境界面の深さ (km) [12] を示す。

その結果、福島県沖浅部で余効すべりが卓越するよう

になり (図 2)、余効すべりが地震後数年間継続する状況を再現することができた (図 3)。しかし、より観測データに合わせるためには、このように試行錯誤的に仮定した摩擦パラメタを多数準備し、それぞれの場合で計算を行わなければならない。

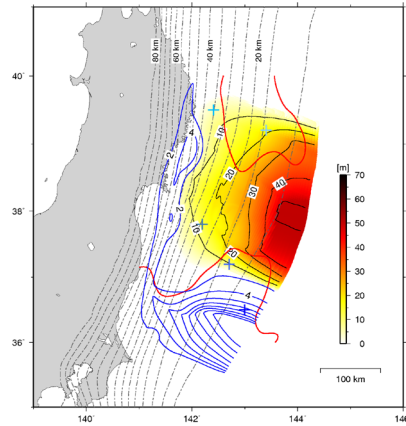


図 2 図 1 の摩擦条件を与えた場合の数値シミュレーション結果。M9 地震時すべり分布 (暖色系: 黒色コンターは 10m 間隔) と、その後 1 年間の余効すべり分布 (青色コンター: 2m 間隔)。

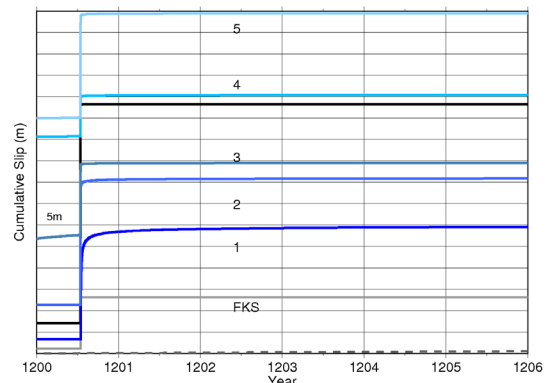


図 3 図 1 に示した点 (1~5) における累積すべりの時間変化 (青系統の線)。M9 地震の 0.5 年前~6 年間。#1 では余効すべりが M9 地震後数年間継続している。黒線は M9 地震震源域内 (図 1★) での累積すべりの時間変化である。

3. 摩擦特性が及ぼす地震サイクルへの影響評価

2. で述べたように、観測データと調和的な数値モデルを構築するためには、多数の数値シミュレーション結果に基づいて絞り込む必要がある。地震サイクルの発生間隔および規模については、摩擦パラメタ ($B-A = (b-a)$) σ で制約されるが、時間遅れを伴う地震活動履歴については、どの摩擦パラメタ値が鍵となるのか、明らかにされていなかった。また、2. で示されたように、 L が大きいほど余効すべりの継続時間が長くなる理由についても考察する必要がある。

そこで、時間遅れを伴う地震活動が余効すべりによっ

て誘発される場合を考察すべく、1. と同様の計算手法で、過去の研究結果 [13] に基づいて、余効すべり域の摩擦特性が均質となる試行モデルを想定し、その均質摩擦特性について異なる複数のモデルを設定することで、その数値シミュレーション結果から、余効すべりの発生過程について近似条件を導き出し、速度状態依存摩擦構成則に基づいた理論解析を行った。

その過程で、余効すべりの生成域という空間的な広がりやを定量評価する必要があることが分かった。一方で、過去のモデル [13] では、空間分解能が粗いため、定量的な議論をするのに不向きであった。そこで本年度は、地球シミュレータを用いて過去のモデル [13] よりもメッシュサイズを半分にしたモデルおよび理論解析の妥当性を確かめるために追加したモデルの大規模数値計算を多数行った。

上記の計算結果によって、余効すべり生成域の大きさ Δs と L はほぼ比例関係にあることが確かめられた。また、摩擦特性パラメータ値 A 、せん断応力変化量 $\Delta \tau$ を用いた $(\Delta s/L) \exp(\Delta \tau/A)$ が余効すべり伝播速度に比例することを導出した (図 4)。これらの結果を 2. に適用すると、 L が余効すべり伝播速度そのものには影響を及ぼさない一方で、 Δs が L に比例するため、 L が大きいほど継続時間が長くなることを物理的に説明することができる。

上記の理論解析は、数値シミュレーションに基づいた近似条件の発見が無ければ導出できなかったものである。

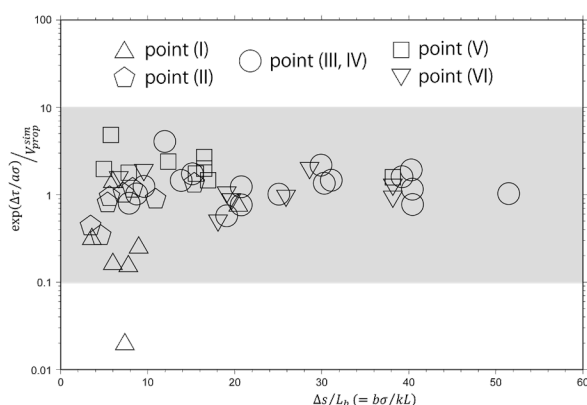


図 4 $\exp(\Delta \tau/a\sigma)$ と数値シミュレーションで得られた伝播速度との比較。灰色は両者の差が 1 桁以内の領域を示す。横軸は、余効すべり生成域 Δs を摩擦特性から期待される破壊核の大きさ L_b で規格化したものである。

謝辞

数値計算には地球シミュレータを使用しました。文部科学省による委託業務「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」、および科研費『新学術研究領域「スロー地震学」課題名「低速変形から高速すべりまでの地球科学的モデル構築」16H06477』の補助を受けて行われました。

文献

- [1] Hori, T., M. Hyodo, R. Nakata, S. Miyazaki, and Y. Kaneda, "A forecasting procedure for plate boundary earthquakes based on sequential data assimilation", *Oceanography*, 27, 2, 94-102, doi: 10.5670/oceanog.2014.44 (2014).
- [2] Nakata, R., Hori, T., Hyodo, M., and Ariyoshi, K., "Possible scenarios for occurrence of M~7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation", *Scientific Reports*, 6, 25704, doi:10.1038/srep25704 (2016).
- [3] Rice, J. R., "Spatio-temporal complexity of slip on a fault", *J. Geophys. Res.*, 98(B6), 9885-9907 (1993).
- [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] 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, doi:10.1002/2013JB010615 (2014).
- [8] Hino, R., S. Kodaira, T. Kanamatsu, M. Shinohara, and Y. Ito, "Along-strike segmentation of Japan Trench and its relevance to co- and postseismic slip of the 2011 Tohoku Earthquake", *JpGU, SSS04-27* (2017).
- [9] Bassett, D., D. T. Sandwell, Y. Fialko and A. B. Watts, "Upper-plate controls on co-seismic slip in the 2011 magnitude 9.0 Tohoku-oki earthquake", *Nature*, 531, doi:10.1038/nature16945 (2016).
- [10] Marone, C., "Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting", *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1998. 26:643-96 (1998).
- [11] Marone, C., and B. Kilgore, "Scaling of the critical slip distance for seismic faulting with shear strain in fault zones", *Nature*, 362, 618-621 (1993).
- [12] 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).
- [13] Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, "The key frictional parameters controlling spatial variations in the speed of postseismic-slip propagation on a subduction plate boundary", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 256, 136-146 (2007).

Experiment of Forecast for Interplate Slip using Sequential Data Assimilation

Project Representative

Takane Hori Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

Authors

Ryoko Nakata*¹, Keisuke Ariyoshi *¹, Takane Hori*¹

*¹Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

To adopt a data assimilation method for crustal displacement data obtained from numerical simulation, we conducted additional numerical simulations of earthquake generation cycles along the Japan Trench. To improve the reproducibility of afterslip propagation in our simulation, we reflected heterogeneity of spatial distributions obtained from observation data of gravity anomaly to frictional model. Furthermore, in order to narrow down the frictional parameters to be input, numerical experiments were conducted on the propagation velocity of the afterslip following a large earthquake, and the validity of the theoretical formula was evaluated.

Keywords : Afterslip, propagation velocity, frictional properties

1. Introduction

We are developing a program for data assimilation method to be aimed at slip on the subducting plate interface along the Nankai Trough and Japan Trench. As part of this study, we have conducted numerical simulations of earthquake generation cycles along the Japan Trench [1]. By using these simulation data base, we have also conducted sequential assimilation of crustal deformation data due to slip on the plate interface, which adopted a data assimilation method.

Here, we conducted additional numerical simulation of earthquake generation cycle along the Japan Trench. To improve the reproducibility of our simulation, we reflected spatial distributions obtained from observation data of gravity anomaly to those of frictional parameters. Furthermore, in order to narrow down the frictional parameters to be input, numerical experiments were conducted on the propagation velocity of the afterslip following a large earthquake, and the validity of the theoretical formula was evaluated.

2. Earthquake cycle simulation along the Japan Trench

Based on our previous study [1], we conducted numerical simulations of earthquake generation cycles by using realistic three-dimensional (3D) geometry of the subducting Pacific Plate along the Japan Trench. Seismic and aseismic events were modeled to represent the release of slip deficit or backslip that accumulates during interseismic period [2]. Such space-time variations in slip velocity are assumed to be an unstable slip with a frictional interface. We used a rate- and

state-dependent friction law as an approximated mathematical model for large-scale frictional behavior on the plate interface [3]. We used a fault constitutive law [4] that determines the slip rate for a given stress and a value of strength. In addition, we used an aging law [3, 5], which can be considered as an evolution law for strength change, which varies depending on the prior slip history.

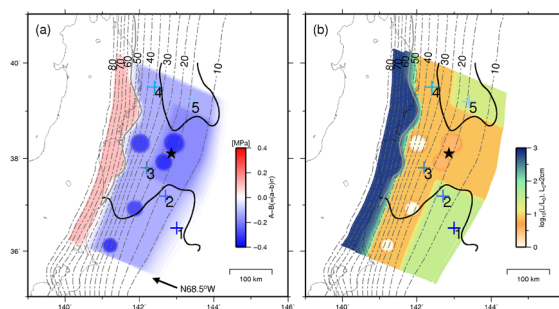


Fig. 1 Frictional parameters assumed in this study.

In our previous study [1], we approximated the spatial distributions of frictional parameters for seismic sources with circular patches for $M \sim 7$ earthquakes, and the $M \sim 9$ coseismic rupture area with a rectangle region. These area were assumed to be more unstable condition than the surrounding area. We assumed uniform frictional condition for the surrounding area. Here, we reflected heterogeneous distribution, which estimated from observed data of gravity anomaly [6] to the surrounding area. For example, we assumed larger value of L at the southern and northern area of

M~9 source area where the gravity anomaly, $\Delta GA > -20$ than those of M-9 source area (Fig. 1). Another frictional parameters, A-B remains the same as that of our previous study. As a result, we obtained that afterslip dominated at Fukushima-Oki region (Fig. 2), and longer duration of afterslip than our previous study (Fig. 3).

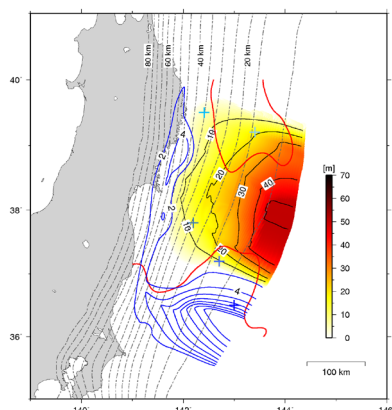


Fig. 2 Spatial distribution of coseismic (warm color) slip and afterslip (blue) obtained using frictional parameters shown in Figure 1..

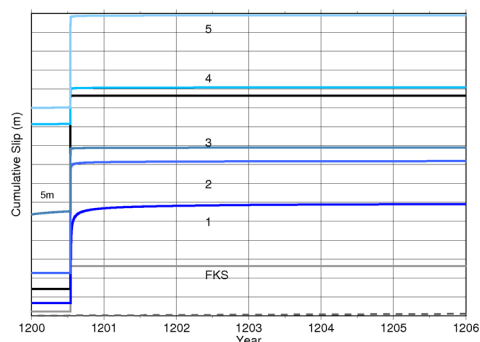


Fig. 3 Time development of cumulative slip obtained in this study.

3. Effect of frictional properties on earthquake cycle

To understand the reason why the larger value of L makes the longer duration time of afterslip, we set up simplified model with homogeneous frictional property in the afterslip region on the basis of previous study [7]. In this study, we revised original model [7] by dividing mesh size twice in order to introduce the process zone of afterslip (Δs).

Our simulation results show that Δs is proportional to L and that the propagation speed of afterslip is proportional to $(\Delta s/L)\exp(\Delta\tau/A)$ (Fig. 4). This means that the afterslip propagation speed is independent of L , which means that the duration time of afterslip is expected to be proportional to L .

We could find this analytical solution owing to approximation based on numerical simulation results by Earth Simulator.

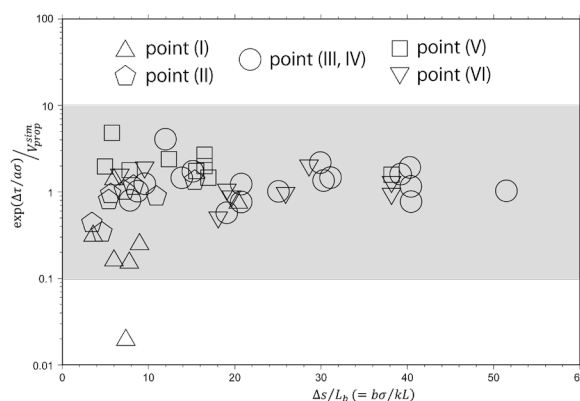


Fig. 4 Comparison of afterslip propagation speed between analytical solution ($=\exp(\Delta\tau/A)$) and simulated results.

Acknowledgement

Computational resources of the Earth Simulator provided by JAMSTEC was used for all simulations. This work was supported partly by the project “Research project for compound disaster mitigation on the great earthquakes and tsunamis around the Nankai trough region” of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan and by JSPS KAKENHI (Grant Number JP16H06477).

References

- [1] Nakata, R., Hori, T., Hyodo, M., and Ariyoshi, K., “Possible scenarios for occurrence of M~7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation”, *Scientific Reports*, 6, 25704, doi:10.1038/srep25704 (2016).
- [2] Rice, J. R., “Spatio-temporal complexity of slip on a fault”, *J. Geophys. Res.*, 98(B6), 9885-9907 (1993).
- [3] Dieterich, J. H., “Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations”, *J. Geophys. Res.*, 84, B5, 2161-2168 (1979).
- [4] 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).
- [5] Ruina, A., “Slip instability and state variable friction laws”, *J. Geophys. Res.*, 88(B12), 10359-10370 (1983).
- [6] Hino, R., S. Kodaira, T. Kanamatsu, M. Shinohara, and Y. Ito, “Along-strike segmentation of Japan Trench and its relevance to co- and postseismic slip of the 2011 Tohoku Earthquake”, *JpGU, SSS04-27* (2017).
- [7] Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, “The key frictional parameters controlling spatial variations in the speed of postseismic-slip propagation on a subduction plate boundary”, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 256, 136-146 (2007).