

# 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 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター

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

プレート境界すべりの推移予測の妥当性検証と予測の試行に向けて、シミュレーションデータベースに多様性を持たせるために、日本海溝域での地震発生サイクルシミュレーションを実施した。観測とより整合的なシナリオを追加するために、観測から明らかになってきた周期的なスロースリップや重力異常の値から示唆されるプレート境界面上の摩擦特性不均質を反映させたモデルを作成したところ、M9 クラス地震震源域の南北への広がり方が、その周囲でのスロースリップの挙動に影響を与えていることを確認できた。

キーワード：地震発生サイクル, 東北地方太平洋沖地震, スロースリップ

## 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。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 [1] を行い、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。以下では、観測とより整合的なシナリオを追加するために、観測から明らかになってきた周期的なスロースリップや重力異常の値から示唆されるプレート境界面上の摩擦特性不均質を反映させたモデルを作成した。

## 2. 手法

プレート間固着強度の時空間ゆらぎの同化の模擬テストを行うために必要なシミュレーションデータベースを蓄積する。これは、既に構築してある日本海溝地域のモデル [1] 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によって行う。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 [2]。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 [3, 4] に従うと仮定した。強度の時間

発展則には、slowness (aging) law [3, 5] 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 [2] よりも約3分の1小さい値を仮定した [1, 6]。

Nakata et al. [1] では、摩擦パラメータの空間分布は、M7クラスの地震の震源域を円で、M9クラスの地震の震源域を矩形で近似し、周囲よりも不安定な摩擦条件 ( $A-B < 0$ ,  $L$  小) を仮定していた。これらの地震の震源域以外の領域は、一様な分布を仮定していた。

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、観測から明らかになった周期的なスロースリップの周期の空間分布 [7] および、重力異常の分布 [8] で示唆される不均質な摩擦パラメータの分布を、M7クラスの地震の震源域以外の領域に反映させた。モデル1では、 $A-B$  は Nakata et al. [1] 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。M7クラスの地震が発生する条件を与えている場所以外について、スロースリップの周期の短いところで  $L$  を小さくした (図1)。モデル2では浅部の重力異常値  $\Delta GA > -10$  の部分に、地震性すべりを起こしやすい摩擦条件を設定した (図2)。それ以外の

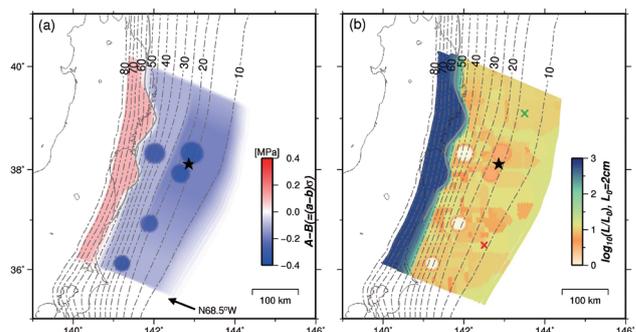


図1 モデル1の摩擦条件。(a) 摩擦パラメータ分布 ( $A-B$ )。 (b) Uchida et al. [7] を参考にした摩擦パラメータ分布 ( $L$ )。図中の赤色と緑色の×印は、図4・図7ですべり速度の時間変化を求めた地点を示す。

部分は、これまでと同様、一様な値にした。

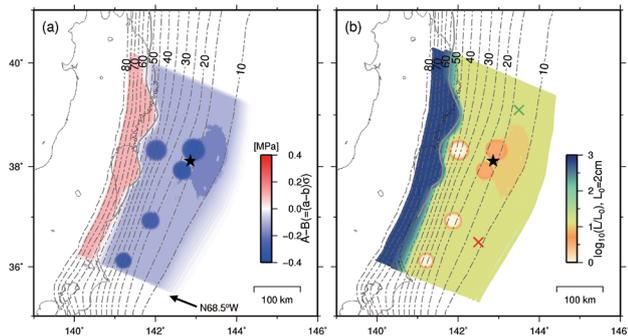


図2 モデル2の摩擦条件。重力異常の観測値 [8] を参考にした摩擦パラメータ分布。(a)A-B。(b)L。

### 3. 結果

モデル1では、Nakata et al. [1] に比べて、M9クラス地震のすべり域が南へ拡がり、規模がM9.2とやや大きくなった(図3)。M9クラスの地震の繰り返し間隔は、Nakata et al. [1] に比べて約40年長くなった(図4)。M9クラス地震発生後約200年間は広域にわたって固着していた(図4(1))が、その後、M9クラス地震震源域の北部(三陸沖浅部)や南部(福島県沖浅部)において、プレートの沈み込み速度より遅いすべり速度のふらつきが見られた(図4(2))。しかし、南部におけるスロースリップの多くは、平均47年間隔で繰り返し発生している福島県沖深部におけるM7クラス地震の余効すべりによるものであった。つまり、観測されたスロースリップ [7] を再現できていない。その後、ややすべり速度の速いスロースリップ(図4(3)、図5)が発生し、再び固着した(図4(4))。その固着がはがれた後、加速しながらM9地震発生に至る様子が見られた(図4(5))。

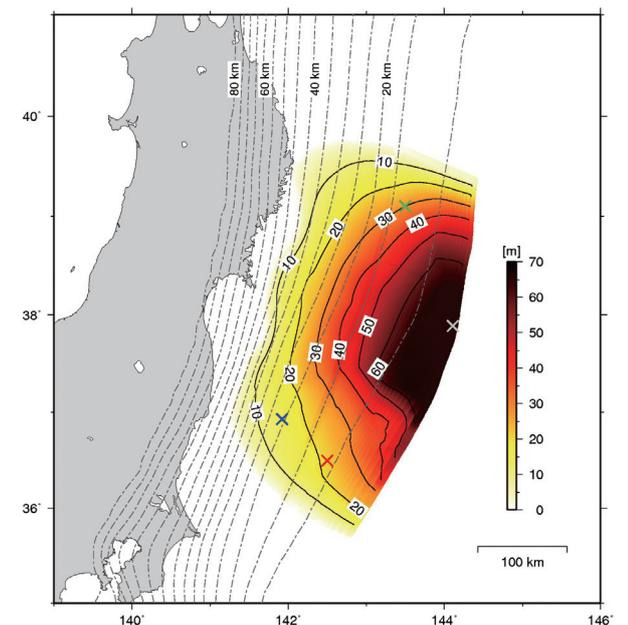


図3 モデル1で得られたT=800年頃のM9.2の地震時すべり分布。図中の青・赤・緑・灰色の×印は、図4ですべり速度の時間変化を求めた地点を示す。

モデル2では、Nakata et al. [1] に比べて、M9クラス地震のすべり域が狭くなり、規模がM<9とやや小さくなった(図6)。繰り返し間隔は約170年短くなった(図7)。

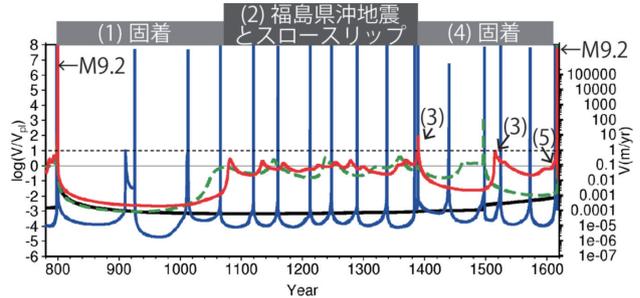


図4 モデル1で得られたM9地震間のすべり速度の時間変化。黒線はM9地震震源域内。青線が福島県沖地震震源域。赤線が福島県沖浅部。緑線が三陸北部浅部。

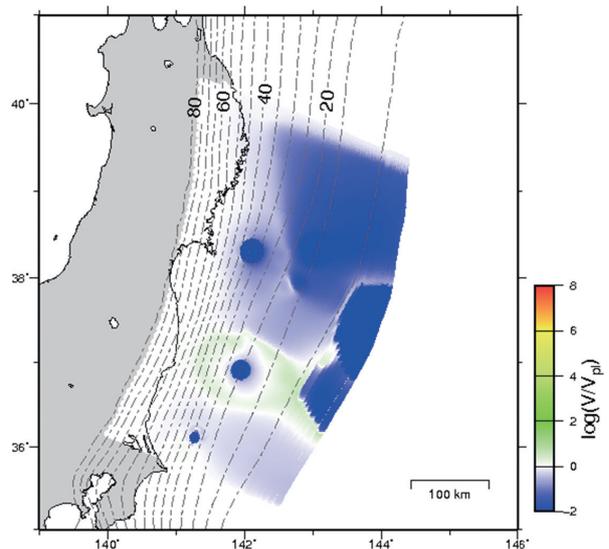


図5 モデル1で得られたT=1530年頃のすべり速度分布。緑色の部分はスロースリップが発生しているエリア、青色の部分は固着していることを示す。

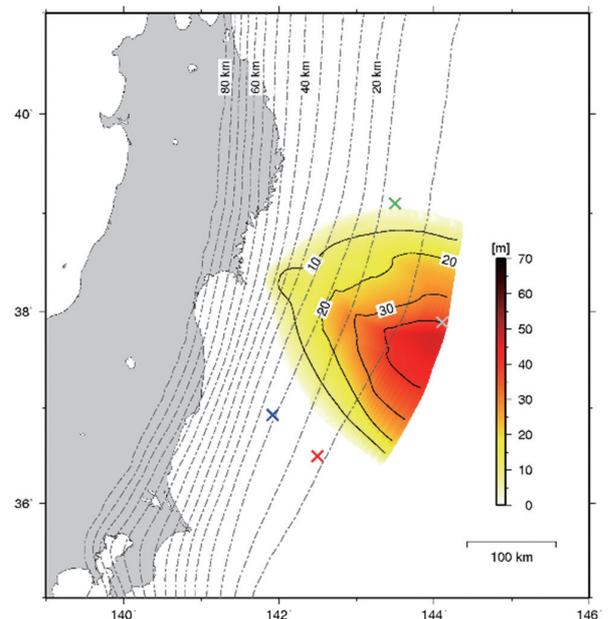


図6 モデル2で得られたT=1100年頃のM8.9の地震時すべり分布。

M9地震後しばらくは、モデル1の場合と同様の変化を示した(図7(1))。しかし、図4(3)と図4(4)のような、規模の大きなスロースリップとそれに伴う100年程度の固着は、このモデルでは見られなかった。

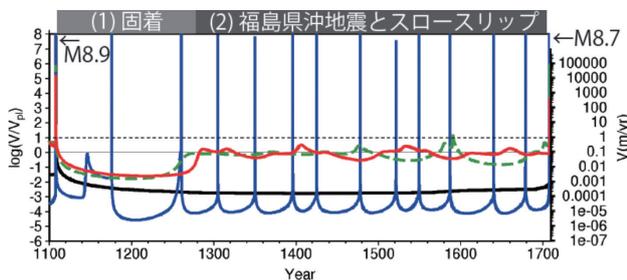


図7 モデル2で得られたM9地震間のすべり速度の時間変化。黒線はM9地震震源域内。青線が福島県沖地震震源域。赤線が福島県沖浅部。緑線が三陸北部浅部。

#### 4. 結論ならびに今後の課題

M9クラス地震震源域周辺で、周期的なスロースリップが発生するためには、M9クラス地震のすべり域をより正確に再現することが重要であることを示唆する結果が得られた。

南海トラフや日本海溝でのプレート境界すべりの推移予測の妥当性検証と予測の試行に向けて、日本海溝地域において地震発生サイクルシミュレーションデータベースの蓄積を行った。現在のシミュレーションで再現している事象の問題点を洗い出して、摩擦条件やモデルパラメタを改善し、南海トラフ地域での試行実験にも反映できる知見を得る必要がある。さらに多くのモデルで計算してシミュレーションデータベースを増やすとともに、多数のシナリオにもとづいた今後の地震発生についての確率評価方法を検討することが、今後の課題である。また、観測に基づく知見とより整合するモデルを得るために、観測データおよび逐次データ同化手法を取り入れながらパラメタ探索範囲を広げて、摩擦パラメタのチューニングを行うことが必要である。

#### 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」の一環として行われました。地震発生サイクルの数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。東北大学の内田准教授からはスロースリップの周期の空間分布データを、東北大学の日野教授からは重力異常分布の空間分布データを提供していただきました。

#### 文献

- [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] 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).
- [7] Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Burgmann, and R. Hino, “Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan”, *Science*, 351, 6272, 488-492, doi:10.1126/science.aad3108 (2016).
- [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).

# Experiment of Forecast for Interplate Slip using Sequential Data Assimilation

Project Representative

Takane Hori R & D Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

Authors

Ryoko Nakata R & D Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

Takane Hori R & D 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 our simulation, we reflected spatial distributions obtained from observation data of slow slips and gravity anomaly to frictional model. In order to understand slow slips around the M~9 source area, it seems to be important to accurately reproduce the spatial extent of M~9 coseismic rupture area.

**Keywords:** Earthquake generation cycle, Tohoku-Oki earthquake, Slow slips

## 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 (SIS; Sequential Importance Sampling).

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 slow slips and gravity anomaly to those of frictional parameters.

## 2. Methods

We conducted numerical simulations of earthquake generation cycles by using realistic three-dimensional (3D) geometry of the subducting Pacific Plate along the Japan Trench [1]. 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. We used a small value for the seismic radiation damping term [6].

In our previous study [1], we approximated the spatial

distributions of frictional parameters for seismic sources with circular patches for M~7 earthquakes, and the M ~ 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.

In this paper, we reflected heterogeneous distribution, which estimated from observed data such as periodic slow slip [7] and gravity anomaly [8] to the surrounding area. For Model 1, we changed model parameters depending on periodicity of slow slip [7]. At both the M~9 area and the surrounding area, we assumed smaller values of characteristic slip distances  $L$  with shorter periods of slow slips (Fig. 1b). Another frictional parameters, A-B remains the same as that of our previous study [1] (Fig. 1a). For Model 2, we assumed unstable frictional condition at the shallow area where the gravity anomaly [8],  $\Delta GA > -10$  (Fig. 2). Frictional parameters of the surrounding area remained uniform.

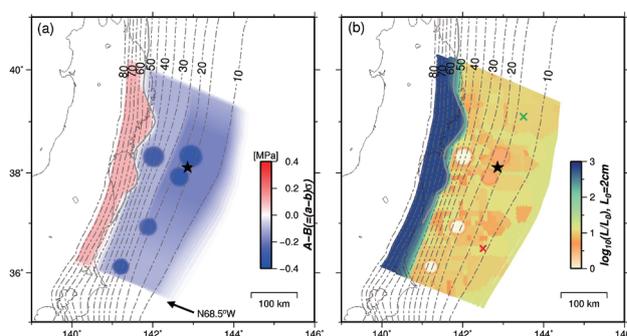


Fig. 1 Frictional parameters assumed in Model 1.

## 3. Results and Discussion

In Model 1, we obtained larger M~9 earthquake than our previous study [1], because coseismic slip extended to north and south. Recurrence interval of M~9 earthquakes was

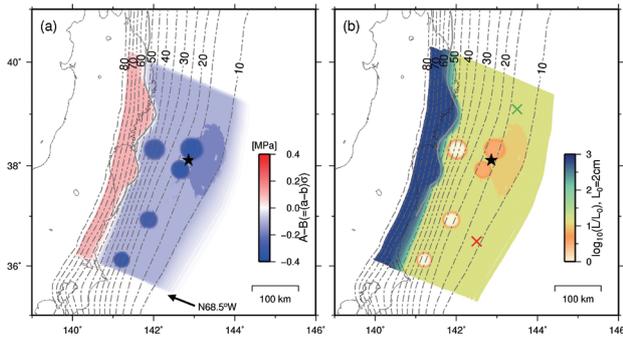


Fig. 2 Frictional parameters assumed in Model 2.

approximately 40 years longer than the previous study [1] (Fig. 3). For 250 years after the M~9 earthquake, shallow area on the plate interface was almost locked (Fig. 3 (1)). After that, fluctuation of slip velocity occurred at the northern and southern area of the M~9 source area (Fig. 3 (2), red and green lines). However, many of these fluctuation at the southern area caused by afterslips of M~7 earthquake at the off-Fukushima. In other words, we could not reproduce the observed slow slips [7] in Model 1. After that, large magnitude of two slow slips occurred and it made the plate interface locked during 100 years (Fig. 3 (3) (4)) before the next M~9 earthquake.

In Model 2, we obtained smaller M~9 earthquakes than our previous study [1]. Recurrence interval of M~9 earthquakes was approximately 170 years shorter than the previous study [1] (Fig. 4). After these M~9 earthquakes, characteristics of time development of slip velocity were nearly the same as that in Model 1. However, slow slip and locked area such as Fig. 3 (3) and (4) before the M~9 earthquake did not appear in Model 2.

Then, in order to understand slow slips around the M~9 source area, it seems to be important to accurately reproduce the spatial extent of M~9 coseismic rupture area.

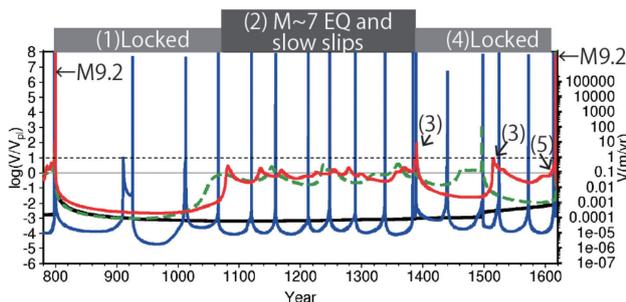


Fig. 3 Time development of slip velocity obtained in Model 1.

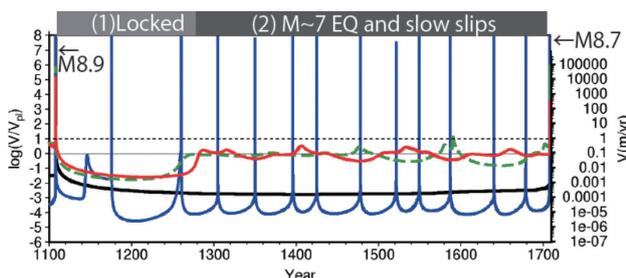


Fig. 4 Time development of slip velocity obtained in Model 2.

## Acknowledgement

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. Computational resources of the Earth Simulator provided by JAMSTEC was used for all simulations. The data of spatial distribution of dominant period of slow slip and gravity anomaly were provided by Dr. N. Uchida and Prof. R. Hino at Tohoku University, respectively.

## 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] 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).
- [7] Uchida, N., T. Inuma, R. M. Nadeau, R. Burgmann, and R. Hino, “Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan”, *Science*, 351, 6272, 488-492, doi:10.1126/science.aad3108 (2016).
- [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).

