

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：宮城県沖の場合

課題責任者

中田 令子 東北大学大学院理学研究科

著者

中田 令子*¹, 堀 高峰*², 日野 亮太*¹

*¹ 東北大学大学院理学研究科, *² 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

本課題では、地震発生の原因であるプレート境界での応力蓄積と解放過程に基づく数値シミュレーションを用いて、東北沖地震前後の宮城県沖地震の準備過程について検討した。まず、新たなシナリオを多数追加したところ、先行研究と同様、M9 地震発生後は $M \geq 7$ 宮城県沖地震までの期間が M9 地震以前の平均繰り返し間隔より短いシナリオが多く見られた。さらに、 $M \geq 7$ 宮城県沖地震の準備過程・地震時のすべり伝播・余効すべりに着目して、M9 地震前後での違いを調べた。その結果、M9 地震後の $M \geq 7$ 宮城県沖地震の破壊は *downdip* 側から開始し、余効すべりの *updip* 側への広がりが増えたと対し、M9 地震前には、破壊開始点に共通の傾向はなく、余効すべりは *updip* 側への広がりが増えたと対し、M9 地震の 1 サイクルを通して、宮城県沖地震震源域におけるすべり欠損の蓄積レートが変化していた。M9 地震のすぐ後はすべり欠損の蓄積レートが高い状況であったが、サイクル後半には一定に近づいていた。これは、M9 地震直後には、M9 地震以前の発生間隔をもとにした宮城県沖地震の長期評価を行うことは適切ではないということを示唆している。

キーワード：地震発生サイクル、すべり欠損、余効すべり、破壊開始点、宮城県沖地震

1. はじめに

日本海溝中部の陸寄りに位置している宮城県沖では、1978 年宮城県沖地震 (M7.4) のように、過去に $M > 7$ 海溝型大地震が約 40 年間隔で繰り返し発生し、沿岸地域に被害をもたらしてきた。これらの地震の震源域は、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0 以下、東北沖地震) 時にもすべりを生じている。1978 年のような過去数回分の地震発生履歴に基づく長期評価に加え、2011 年東北沖地震の影響を定性的に踏まえた結果、2022 年 1 月時点では、宮城県沖での M7.4 前後の地震発生確率は 30 年以内に 70~80% 程度となっている [1]。ここで想定されている宮城県沖地震の震源域付近で、2021 年 3 月 20 日・5 月 1 日に M6.9・M6.8 のプレート境界型地震が発生した。この 2 つの地震の震源域は、1978 年の震源域の西側の一部に重なっており [2]、今後の宮城県沖地震震源域周辺に与える影響や、長期評価を考えるうえで注目されている。

本課題の先行研究の一つである Nakata et al. [3] では、地震発生サイクルの数値シミュレーションで得られた 121 シナリオについて、M9 地震発生後、最初の $M > 7$ 宮城県沖地震発生時期を調べた。その結果、M9 地震後には、M9 地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で $M > 7$ 宮城県沖地震が発生するシナリオが多いことを示した。これは、M9 地震の余効すべりが宮城県沖地震単独の場合よりも大きいこと、宮城県沖の陸寄り地域での応力蓄積レートが高くなったためであると考えられる。本課題では、先行研究 [3] と同様の数値シミュレーションを多数行い、東北沖地震前後の宮城県沖地震の準備過程について詳細に検討した。

2. 手法

先行研究 [3] と同様に、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 [4]。プレート境界面の摩擦は、すべり速度・状態依存摩擦則 [5] に、断層の構成則は Nakatani [6] に従うと仮定した。強度の時間発展則は、*slowness (aging) law* [5, 7] 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 [3, 8]。プレートの沈み込み速度は、8.4 cm/year とした [9]。

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 [10] 上に、複数の空間分布を仮定した (例えば図 1)。

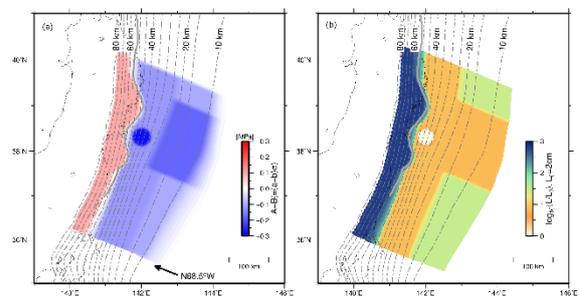


図 1 計算に用いた摩擦分布の例。Nakata et al. [11] のモデルに、Nakata et al. [3] で宮城県沖に仮定した不安定すべり域を加えたもの。摩擦パラメータ (a) $A-B$ (MPa) と (b) 特徴的すべり量 (L)。 (a) に示した矢印は、プレートの沈み込み方向を示す。細点線は沈み込むプレート境界面 [10] の深さ (km) を示す。

これらの摩擦パラメータ分布は、先行研究 [3, 11] で用いたモデルを基に仮定したが、震源域の面積（宮城県沖地震の半径、M9 震源域の走向・dip 方向の広がり）や位置（中心座標、M9 震源域とバックグラウンド領域との遷移幅）、各領域の摩擦パラメータ値などについて、モデルごとに少しずつ異なる。全モデルの共通点は、日本海溝中部の海溝近傍に走向方向に約 100–150 km 長の領域と、その downdip 側の半径 20–30 km の円内部に、摩擦的に不安定な条件を設定したことである。これによって、東北沖地震のような海溝近傍のプレート境界面上で発生する繰り返し間隔数百年以上の M9 クラス巨大地震と、その downdip 側で発生する M7 クラスの宮城県沖地震を再現する。

3. 結果

3.1. M9 地震後の M ≥ 7 宮城県沖地震発生時期

新たに計算した結果から、東北沖タイプの地震の規模・繰り返し間隔・震源域・余効すべりの時空間分布・前震や余震の有無、宮城県沖地震の規模・繰り返し間隔などが異なる 130 以上のシナリオが得られた。これらについて、宮城県沖地震を抽出し、各地震の発生間隔を計算した。その際、先行研究と同様に、東北沖地震と宮城県沖地震の共存が再現できていないシナリオ、つまり海溝近傍で発生する最大地震の規模が M < 8.5 の結果や、宮城県沖地震が M < 7 の結果は、除外した。M9 地震以前の宮城県沖地震の平均繰り返し間隔を計算する際には、M9 地震前に発生した過去 4 回分の M ≥ 7 地震の間隔を扱った。2 章で述べた各モデルの違いに加え、M9 地震の破壊継続時間がやや長い 76 シナリオ（地震波の放射によるエネルギー減衰を準動的に近似するダンピング係数が大きい条件で計算したもの）を含む先行研究 [3] の 121 シナリオについても、同様の基準で結果を見直し、各地震の発生間隔を再計算した。

こうして、M9 地震と M ≥ 7 宮城県沖地震の両方が再現できていた 251 シナリオを選び出し、M9 地震前後の発生間隔を比較した。その結果、先行研究と同様に、M9 クラスの地震が発生した後に宮城県沖で M ≥ 7 地震が起きるまでの時間間隔と、M9 クラスの地震が起きる前の M ≥ 7 宮城県沖地震の平均再来間隔との比は 1 より小さいものが多かった（図 2）。つまり、M9 地震後には、M9 地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で、M ≥ 7 宮城県沖地震が発生するケースが多く見られた。M9 地震前の繰り返し間隔の平均は、56.93 年 \pm 8.135 年、M9 後の宮城県沖地震までの時間平均は 26.41 年 \pm 18.853 年、両者の比の平均は 0.47 であった。

3.2. M9 地震サイクル中の宮城県沖地震発生過程

以下では、M9 クラス地震の 1 サイクルにおける M ≥ 7 宮城県沖地震の発生に関して、多くのシナリオで共通して見られた特徴について、図 1 に示した摩擦モデルを用いて得られた結果を用いて説明する。

先行研究 [3, 11] に近い図 1 に示した摩擦モデルを用いて得られた結果では、M8.93 の地震が 3 回発生し、その間隔は約 620 年と 667 年であった（図 3, 4）。宮城県沖で

は、M7.28–7.39 の地震が繰り返し間隔 44–114 年で発生した。M9 地震とその後の宮城県沖地震の間隔は 27 \cdot 26 \cdot 50 年であった。これは、3.1 章の基準で算出した M9 地震前の宮城県沖地震の平均繰り返し間隔（64 \cdot 64 \cdot 59 年）よりも短くなっており、多くのシナリオと同様の特徴である。

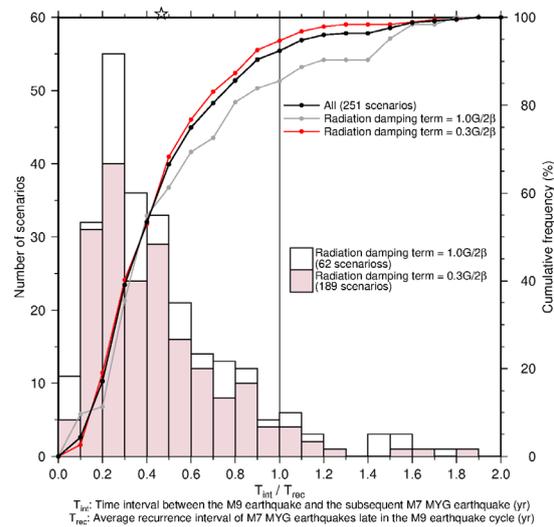


図 2 251 シナリオで得られた、M9 地震後の宮城県沖地震発生時期。横軸は M9 クラスの地震が発生した後に宮城県沖で M ≥ 7 地震が起きるまでの時間間隔 (T_{inc}) と、M9 クラスの地震が起きる前の M ≥ 7 宮城県沖地震の平均再来間隔 (T_{rec}) との比 (T_{inc}/T_{rec})。左の縦軸とヒストグラムで、 $T_{inc}/T_{rec}=0.1$ 毎のシナリオ数を示す。右の縦軸と折れ線グラフで、累積のシナリオ数を%で示す。ヒストグラムの赤色と白色、折れ線グラフの赤色と灰色は、仮定した条件の 1 つ（ダンピング係数）が異なることを意味している。横軸上部の星印は、251 シナリオの平均 (0.47) を示す。

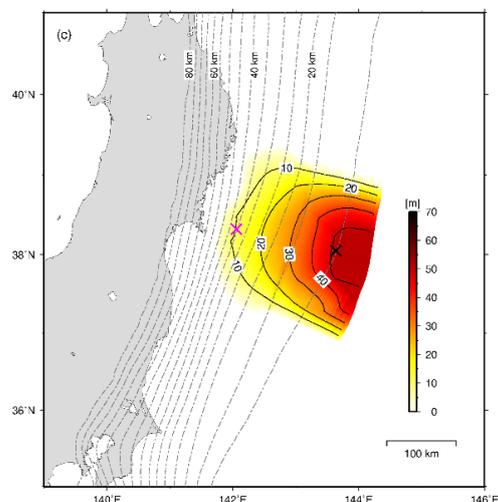


図 3 図 1 を用いて得られた M8.9 地震のすべり分布。

すべり欠損の時間変化からは、M9 地震の 1 サイクルの間に、宮城県沖地震震源域内のすべり欠損レートが変化している様子が見られた (図 4 赤線)。サイクルの前半、つまり M9 地震のすぐ後には、宮城県沖でのすべり欠損蓄積レートは大きいですが、サイクルの後半にかけて、徐々に一定のレートですべり欠損が蓄積していく傾向が、多くのシナリオで見られた。

また、すべり速度の時空間変化からは、M9 地震の前後で、宮城県沖地震の破壊開始点と余効すべりの広がり方

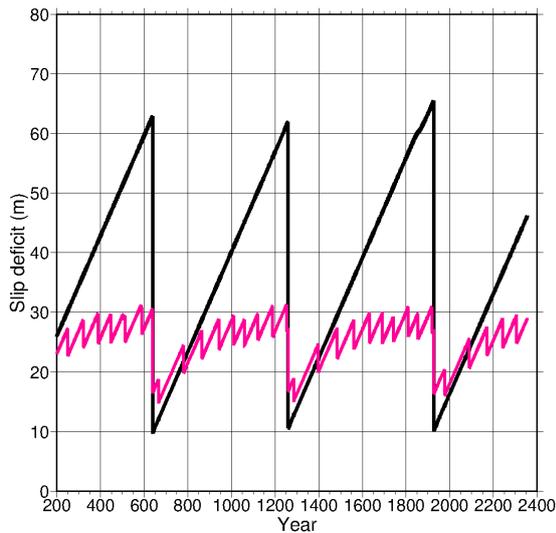


図 4 図 1 の摩擦パラメタモデルを用いて得られた約 2200 年間のすべり欠損の時間変化。黒線は M9 地震震源域内、赤線は宮城県沖地震の震源域内の値を示す (図 3 の黒と赤の×印)。

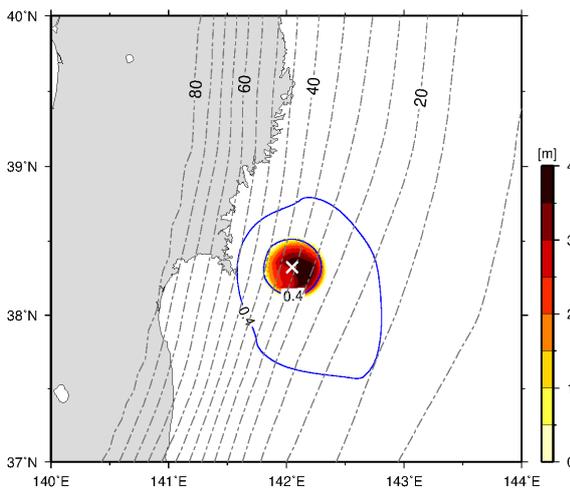


図 5 図 1 の摩擦パラメタモデルを用いて得られた M7.33 宮城県沖地震のすべり分布 (暖色系) とその後 3 年間の余効すべり分布 (青線の内側が 0.4m 以上のすべり域)。M9 地震発生の前 7 年前に発生。

に顕著な違いが見られた (図 5-7)。M9 地震前の宮城県沖地震の破壊開始に共通の特徴は見られなかったが、余効すべりは、震源域の updip 側 (東側) への伝播が顕著であった (図 5 青線, 図 7c 緑色部分)。一方、M9 地震後では、downdip 側から破壊が開始し (図 7d 赤色部分)、余効すべりの updip 側への伝播はほとんど見られなかった (図 6 青線, 図 7f 緑色部分)。これは、宮城県沖地震発生時の updip 側での固着域の広がり方に影響を受けていると考えられる (図 7a, 7d 青色部分)。

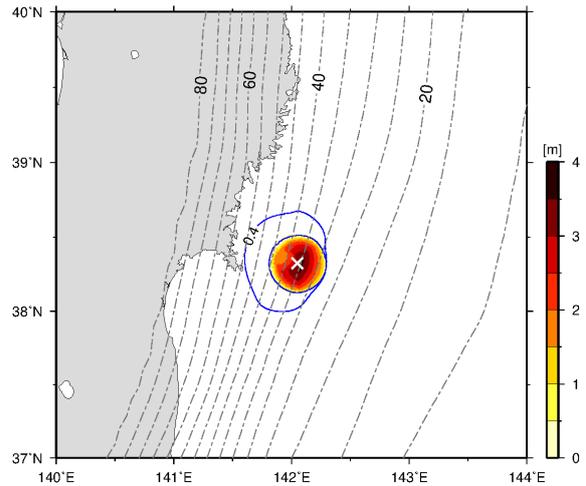


図 6 図 1 の摩擦パラメタモデルを用いて得られた M7.24 宮城県沖地震のすべり分布 (暖色系) とその後 3 年間の余効すべり分布 (青線の内側が 0.4m 以上のすべり域)。M9 地震の 26 年後に発生。

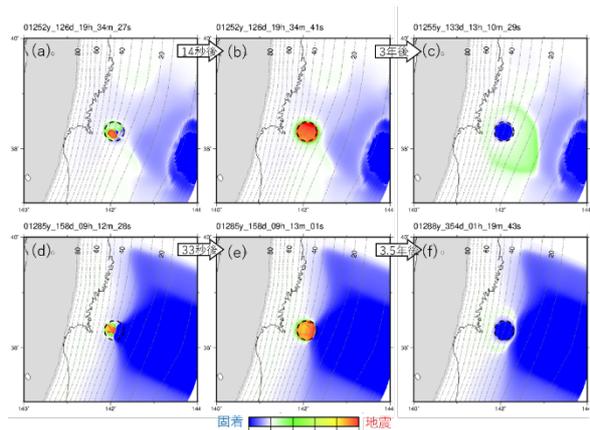


図 7 図 1 の摩擦パラメタモデルを用いて得られたすべり速度の時空間変化。赤色が高速すべり (地震)、緑色がゆっくりすべり (余効すべり)、青色部分は固着していることを示す。上段は M9 地震の 7 年前に発生した M7.33 宮城県沖地震の (a) 破壊開始時、(b) 破壊が震源域全体に広がった時、(c) 地震から約 3 年後。下段は M9 地震の 26 年後に発生した M7.24 宮城県沖地震の (d) 破壊開始時、(e) 破壊が震源域全体に広がった時、(f) 地震から約 3.5 年後。

4. 議論

本シミュレーションの多くの結果から、宮城県沖地震の繰り返し間隔は、M9 地震サイクルの後半では、比較的一定であることから、これまでの長期評価のように、過去数回分の発生間隔に基づいて見積もることは適切であると言える。しかし、サイクルの前半、特にM9 地震直後には、M9 地震以前の履歴を基に長期評価を行うことは適切ではないことを示唆している。

M9 地震前後に見られた破壊開始点に関する特徴は、2005 年宮城県沖地震や 2011 年東北沖地震後の Mw3.5-5 地震について得られた観測的知見と調和的であると言える [12, 13]。また、M9 地震の前に発生した宮城県沖地震の非地震性すべりが東に広がっていた点も、2005 年の観測的知見と調和的である [14, 15]。

M9 地震前後で見られた宮城県沖地震の繰り返し間隔・破壊過程・余効すべり分布の違いは、宮城県沖地震震源域の updip 側、つまり M9 地震震源域の固着がどの程度はかかっているかに起因すると考えられる。今後の宮城県沖地震の発生時期を議論するには、2021 年 3 月・5 月の地震の余効すべりが updip 側でどのようになっているかを観測から明らかにしたうえで、本シミュレーション結果と照らし合わせた議論をする必要がある。

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 の助成を受けて行われました。

文献

- [1] Headquarters for Earthquake Research Promotion, “Evaluation of occurrence potentials of subduction-zone earthquakes”, Available at <https://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran.pdf> (Japanese) (2022).
- [2] Headquarters for Earthquake Research Promotion, “Evaluation of Seismic Activities for May 2021”, Available at https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismicity_annual/major_act_2021/ (Japanese) (2021).
- [3] Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo, and K. Ariyoshi, “Possible scenarios for occurrence of M⁷ interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation”, *Scientific Reports*, 6, 25704 (2016).
- [4] Rice, J. R., “Spatio-temporal complexity of slip on a fault”, *J. Geophys. Res.*, 98 (B6), 9885-9907 (1993).
- [5] Dieterich, J. H., “Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations”, *J. Geophys. Res.*, 84(B5), 2161-2168 (1979).
- [6] 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).
- [7] Ruina, A., “Slip instability and state variable friction laws”, *J. Geophys. Res.*, 88(B12), 10359-10370 (1983).
- [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] 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).
- [10] 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).
- [11] 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”, *Scientific Reports*, 11, 6480 (2021).
- [12] Yaginuma T. et al., “Coseismic Slip Distribution of the 2005 Miyagi-Oki (M7.2) Earthquake Estimated by Inversion of Strong-motion and Teleseismic Waveforms -Its Relation with the 1978 Miyagi-Oki Earthquake (M7.4)-”, *Zisin*, 2, 60, 43-53 (2007).
- [13] Yoshida, K., N. Uchida, H. Kubo, R. Takagi, and S. Xu “Prevalence of updip rupture propagation in interplate earthquakes along the Japan trench”, *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 578, 117306 (2022).
- [14] Hino, R. et al., “Aftershock Distribution of the 2005 Miyagi-oki Earthquake (M 7.2) Revealed by Ocean Bottom Seismological Observation: Preliminary Results”, *Zisin*, 2, 59, 297-308 (2007).
- [15] Uchida, N., T. Matsuzawa, S. Miura, S. Hirahara, and A. Hasegawa, “Interplate Quasi-Static Slip off Miyagi and Fukushima Prefectures Estimated from Small Repeating Earthquake Data”, *Zisin*, 2, 59, 287-295 (2007).

Spatio-temporal Distribution of Slip on the Plate Interface Expected from Numerical Simulation of Earthquake Generation Cycles along the Japan Trench

Project Representative

Ryoko Nakata Graduate School of Science, Tohoku University

Authors

Ryoko Nakata ^{*1}, Takane Hori ^{*2}, Ryota Hino ^{*1}

^{*1}Graduate School of Science, Tohoku University, ^{*2}Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

In order to evaluate long-term probability of seismic activity off Miyagi Prefecture along the Japan Trench, we conducted numerical simulations of earthquake generation cycles based on the friction law that represents the process of stress accumulation and release on the plate interface. Years to decades of quiescent period after a M~9 earthquake, a M>7 earthquake occurred at the downdip edge of the M~9 source. The M>7 rupture initiated from the downdip part and propagated to the updip. The following afterslip did not propagate much to the updip side. On the other hand, at the later stage of a M~9 earthquake cycle, a M>7 afterslip widely propagated to the updip. Recurrence intervals of the M>7 earthquakes tended to be less constant in the early stage compared to the later stage of the M~9 earthquake cycle. These characteristics were related to the extent of the locked area on the updip side.

Keywords : earthquake cycle, slip deficit, afterslip distribution, rupture initiation, Miyagi-ken-Oki earthquake

1. Introduction

In the middle segment of the Japan Trench, M~9 and M>7 interplate earthquakes have occurred at the updip and downdip side on the subducting Pacific Plate, respectively. At the updip side, the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mj9.0) occurred. The downdip edge of the coseismic source area of the Tohoku-Oki earthquake is located off the east coast of Miyagi Prefecture, where Mj7.1–7.4 earthquakes have occurred with recurrence intervals of approximately 30–40 years, in 1897, 1936, 1978, and 2005. The source regions of the past Miyagi-ken-Oki earthquakes ruptured again during the Tohoku-Oki earthquake. As a result of qualitatively considering the impact of the 2011 Tohoku-Oki earthquake in addition to the long-term evaluation based on this history, as of January 2022, the probability of an earthquake around M7.4 off Miyagi Prefecture is 70–80 % within 30 years [1].

Nakata et al. [2] suggested that the time interval between the M~9 earthquake and the subsequent M>7 Miyagi-ken-Oki earthquake was equal to or shorter than the average recurrence interval during the later stage of the M~9 earthquake cycle because of the high stress rate due to the large afterslip of the M~9 earthquake based on numerical simulations. In order to evaluate long-term probability of seismic activity in the middle segment, it is necessary to understand the basic physical process of preparation for the Miyagi-ken-Oki earthquake throughout M~9 earthquake cycles. Here, we investigated in detail spatial and temporal characteristics of slips on the plate interface off Miyagi Prefecture common to multiple cycles of M~9 earthquakes.

2. Method of earthquake generation cycle simulation

Based on our previous studies along the Japan Trench [2, 3],

we conducted numerical simulations of earthquake generation cycles along the Japan Trench based on stress accumulation and release processes on the plate interface. Seismic and aseismic events were modeled to represent the release of slip deficit or backslip that accumulates during interseismic period [4]. 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 [5] as an approximated mathematical model for large-scale frictional behavior on the plate interface. We used a fault constitutive law [6] that determines the slip rate for a given stress and a value of strength. In addition, we used an aging law [5, 7], which can be considered as an evolution law for strength change, which varies depending on the prior slip history. We used the realistic three-dimensional geometry of the subducting Pacific Plate [8].

3. Results

We performed calculations using numerical simulations over an extensive period (approximately 2200 years). At the shallow part of the middle segment of the Japan Trench, time development of slip deficit showed three large changes of >50 m caused by M~9 earthquakes with time intervals of approximately 620 and 667 years.

Time development of slip deficit in the center of the MYG patch at the downdip part of the middle segment showed many earthquakes occurred there. The slip deficit rate was not constant throughout a M~9 earthquake cycle. The slip deficit rate was large after the M~9 earthquake (the early stage of the M~9 earthquake cycle), but it became low and almost constant as the next M~9 earthquake approached (at the later stage of the M~9 earthquake cycle). The time development of the slip deficit rate

at the MYG patch seems to be related to the recurrence interval, not the slip amount during the MYG earthquakes.

During 2200 years, $M=7.28-7.39$ earthquakes repeatedly occurred in the patch with time intervals of approximately 44–114 years. The fluctuation of magnitude is not so noticeable, but fluctuation of recurrence interval in the MYG patch was large during an early stage of the $M\sim 9$ earthquake cycle. The time intervals between each $M\sim 9$ earthquake and the immediately following $M>7$ earthquake in the MYG patch were 26–50 years, it was shorter than recurrence intervals between rupture of the MYG patch only during a $M\sim 9$ cycle. Furthermore, the next MYG earthquake had the longest time interval from the previous one. At the later stage of the $M\sim 9$ earthquake cycle, the average recurrence interval of the four $M>7$ earthquakes in the MYG patch that occurred before the $M\sim 9$ earthquake was relatively constant (approximately 59–64 years).

Immediately before and after the $M\sim 9$ earthquake, the rupture initiation points and the coseismic/afterslip distributions of the $M>7$ MYG earthquake were different. At the later stage of a $M\sim 9$ earthquake cycle, that is before the $M\sim 9$ earthquake, a rupture of the MYG earthquake initiated from somewhere within the patch, and propagated over the source area. Then, afterslip widely propagated to the updip. On the other hand, after a $M\sim 9$ earthquake, the rupture of the MYG earthquake initiated from the downdip part of the source of the earthquake. The coseismic slip distributed slightly narrow at the updip side. Similarly, the following afterslip did not propagate much to the updip side.

4. Discussions

There are differences between the rupture initiation point and afterslip distribution immediately before and after the $M\sim 9$ earthquake in our results. These characteristics in the early and final stage of $M\sim 9$ earthquake cycle in this study is consistent to observational features. For example, in the final stage of the 2011 Tohoku-Oki earthquake cycle, the 2005 rupture propagated from the hypocenter to the downdip side and finally ruptured the southeastern part of the source area of the 1978 earthquake [9]. Aseismic slip propagated to the eastern side [10]. After the Tohoku-Oki earthquake, among $Mw3.5-5$ interplate earthquakes occurred from August 2016 to December 2019 along the Japan Trench, most earthquake ruptures propagated updip [11].

As reported by Nakata et al. [2], in our new results, the time interval between the $M\sim 9$ earthquake and the subsequent $M>7$ MYG earthquake was shorter than the average recurrence interval during the later stage of the $M\sim 9$ earthquake cycle. The time interval and magnitude of earthquakes occurred in the MYG at the final stage of the $M\sim 9$ earthquake cycle were not constant for every cycle. From characteristics that are common to all cycles in these simulations, it can be said that recurrence interval and magnitude of MYG earthquake in the latter half of the $M9$ cycle is rather characteristic. So it is reasonable to rely on the history of the past several times as in the long-term evaluation.

However, in the early stage of the $M9$ earthquake cycle, long-term evaluation based on the past history is not suitable, and the long-term evaluation should be based on the aseismic slip on the updip side of the MYG source.

Acknowledgement

Computational resources of the Earth Simulator provided by JAMSTEC and of Cyberscience Center, Tohoku University were used for all simulations. This work was supported partly by JSPS KAKENHI (Grant Numbers JP21K04604, and JP19H05596).

References

- [1] Headquarters for Earthquake Research Promotion. Evaluation of occurrence potentials of subduction-zone earthquakes. Available at <https://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran.pdf> (Japanese) (2022).
- [2] 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", *Scientific Reports*, 6, 25704 (2016).
- [3] 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", *Scientific Reports*, 11, 6480 (2021).
- [4] Rice, J. R., "Spatio-temporal complexity of slip on a fault", *J. Geophys. Res.*, 98 (B6), 9885-9907 (1993).
- [5] Dieterich, J. H., "Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations", *J. Geophys. Res.*, 84(B5), 2161-2168 (1979).
- [6] 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).
- [7] Ruina, A., "Slip instability and state variable friction laws", *J. Geophys. Res.* 88(B12), 10359-10370 (1983).
- [8] 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", *JpGU Meeting*, S111-006 (2006).
- [9] Yaginuma T. et al. "Coseismic Slip Distribution of the 2005 Miyagi-Oki ($M7.2$) Earthquake Estimated by Inversion of Strong-motion and Teleseismic Waveforms -Its Relation with the 1978 Miyagi-Oki Earthquake ($M7.4$)-", *Zisin*, 2, 60, 43–53 (2007).
- [10] Hino, R. et al., "Aftershock Distribution of the 2005 Miyagi-oki Earthquake ($M 7.2$) Revealed by Ocean Bottom Seismological Observation: Preliminary Results", *Zisin*, 2, 59, 297–308 (2007).
- [11] Yoshida, K., N. Uchida, H. Kubo, R. Takagi, and S. Xu, "Prevalence of updip rupture propagation in interplate earthquakes along the Japan trench", *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 578, 117306 (2022).