

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、日本海溝沿いの地域を対象として、地震発生サイクルのシミュレーションデータベースを蓄積するとともに、プレート境界での固着・すべりの逐次推移予測の試行実験に着手した。本報告書では、2011年東北地方太平洋沖地震の本震(M9.0)と、その51時間前に発生した前震(M7.3)のように、M9クラス地震震源域内においてM7クラスの地震が発生した後、観測データに見られる地殻変動から、その後発生するM9クラスの地震に至る過程を見出せるかどうか調べるための数値実験について述べる。

キーワード：地震発生サイクル, 東北地方太平洋沖地震, 前震, 推移予測

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地震発生サイクルの数値シミュレーションを行ってきた。以下では、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]を用いた逐次推移予測の数値実験について報告する。

2011年東北地方太平洋沖地震では、M9.0の地震(本震)の51時間前に本震時のすべり域内でM7.3の地震(前震)が発生した。前震から本震までの期間には、ゆっくりすべりや地震活動度の変化が観測されている[2]。このような過程が地殻変動データとして捉えられる場合、その変動をモニタリングしつつ、あらかじめ計算した様々なシナリオと比較し、各シナリオの尤度を評価することで、その後の推移をどの程度予測できるか、数値実験を行った。

2. シミュレーションデータベース

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、前年度構築した日本海溝地域のモデル[1]を基に、摩擦パラメタ $A(=a\sigma)$ 、 $B(=b\sigma)$ 、 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[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、これまでよりも約3分の1小さい値を仮定した[1, 7]。

推移予測の試行実験には、こうして得られたシミュレーションデータベースのうち、M9クラス地震のすべり域だけでなく、より多くの特徴について観測と整合性のある50シナリオを用いた。これらのシナリオでは、三陸沖南部海溝寄りの地域(M9クラスの地震の震源域内)でM7クラスの地震が発生してからM9クラスの地震が発生するまでの時間差は、2時間~206年である(図1)。各シ

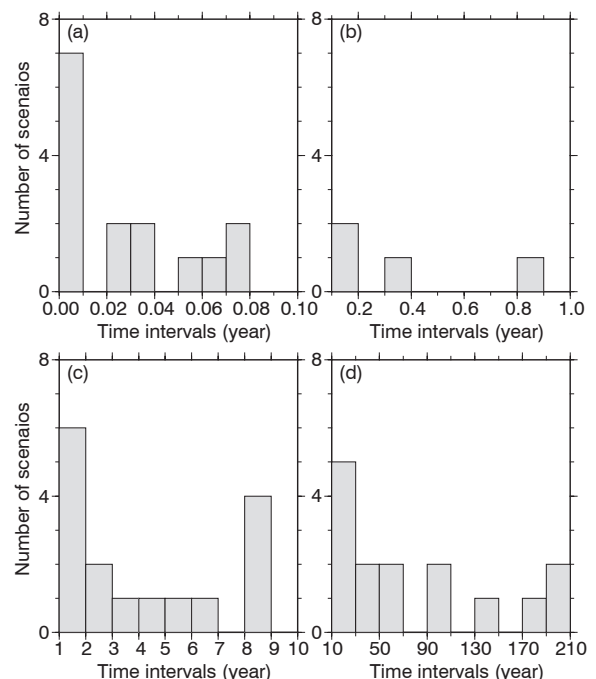


図1 推移予測実験に用いた50シナリオでの、M7クラス地震とM9クラス地震との時間差。

ナリオの期間は M7 クラスの地震が発生する 10 年前から M9 クラスの地震が発生した 10 年後までを用いる。

データ同化に用いる物理値には、シミュレーションで得られたプレート境界面上のすべりから計算した地殻変動の上下動成分を用いる。50 シナリオに対して、陸域 (GEONET) 176 点と海域 (S-net, GPS/A) 96 点の計 272 点 (図 2) の座標値における地殻変動を計算する。地殻変動計算に用いるグリーン関数は、均質・等方な半無限弾性媒質で行った。地震発生サイクルシミュレーションでは、時間刻み幅可変の Runge-Kutta 法 [8] を用いて時間積分をしているため、地殻変動を計算したのち、1 日間隔に線形に補間 (内挿または間引き) した。

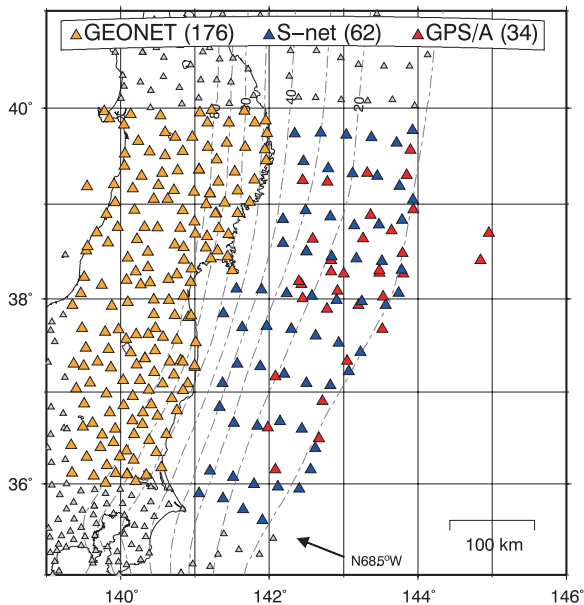


図 2 地殻変動観測点分布。黄三角が GEONET、青三角が S-net、赤三角が GPS/A 観測点の位置を示す。

3. 逐次推移予測の試行実験

同化手法は、南海トラフ地震を対象として、地殻変動観測の実データと地震発生サイクルシミュレーションで得られた M8 クラスの地震発生に至る多数のシナリオを用いて行ってきた、プレート境界での固着・すべりの推移予測の試行実験 [9] に使用したものと同一ものを適用する。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て、観測データとシミュレーションデータとの残差二乗和にもとづいて各シナリオの尤度 L を以下の式で計算する。

$$L = (1/\sqrt{2\pi}\sigma)^M \exp\left(-1/2\sigma^2 \sum_{k=1}^M \|d_k^{obs} - d_k^{sim}\|^2\right) \quad (1)$$

ここで、 σ は観測データとシミュレーションデータの残差の標準偏差、 M は観測点数である。 d_k は観測点 k での地殻変動であるが、上付き添字の obs は観測データ、 sim はシミュレーションデータであることを意味している。

観測データ (真のシナリオ) は、50 シナリオのうちの

1 つを用いる。観測データ長は 1 年間とした。これはシミュレーションデータ長 (20 年以上) より短いため、シミュレーションデータに対して 1 時刻ステップずつ観測データをずらしていき、残差が最小になるときの尤度を、そのシナリオの尤度とする。本年度は、真のシナリオとして、前年度構築したモデル [1] で得られたシナリオを用いる。このとき、M7 クラス地震と M9 クラス地震の時間差は 13 日である。

尤度計算は、M7 地震による変動を含むかどうか、海域／陸域観測点を使うかどうかで、6 通りの試行実験を行った。今回は、真のシナリオとして M7 地震発生から M9 地震発生までの時間差が 13 日の場合を用いたので、M9 クラス地震発生直前の 1 年間 (M9 クラス地震震源域内で M7 クラスの地震発生を含む期間; 期間 1) と、M9 クラス地震発生 5～6 年前 (M9 クラス地震震源域内で M7 クラスの地震が発生していない期間; 期間 2) の 2 通りで結果を比較した。なお、全ての場合で、真のシナリオが最も尤度が高くなる (残差が最小になる) ことを確認した。

その結果、期間 1 の観測データで海域観測点のみを用いた場合、M9 クラスの地震の発生時期のばらつきは小さかった (図 3)。期間 1 で陸域観測点のみの場合 (図 4) や観測点分布に関わらず期間 2 のデータで尤度を計算した場合、高尤度シナリオでも M9 クラスの地震発生時期

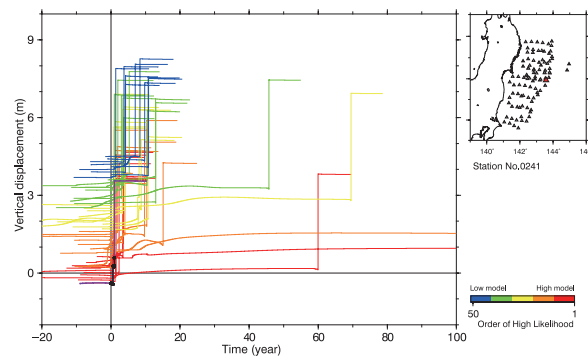


図 3 期間 1 の観測データで、海域観測点のみを使用した場合。右上の地図に赤い三角で示した位置での地殻変動。紫線は真のシナリオを示し、 $T=0 \sim 1$ 年に紫線に上書きしている黒線は観測データを示す。赤から青色の線は 50 シナリオを尤度の高い順に色分けしてある。縦軸の正の方向に大きくステップしている部分が M9 クラスの地震による変動である。

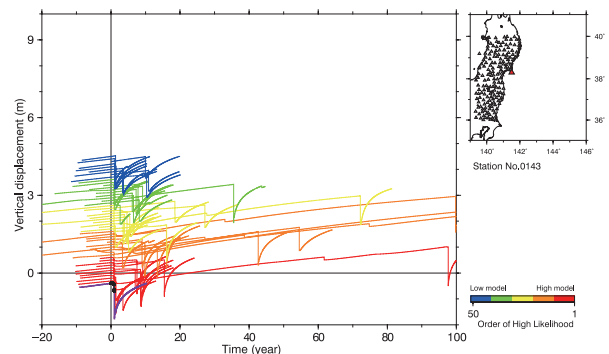


図 4 期間 1 の観測データで、陸域観測点のみを使用した結果。色は図 3 と同じ。M9 クラス地震震源域から遠い陸域観測点では、M9 クラス地震による負の小さなステップとその余効変動が捉えられている。

がばらついていた。

従って、M7クラスの地震とその余効変動による観測データの変化が、その後のM9クラス地震の発生時期の予測には重要であることを示唆する結果が得られた。また、高尤度になりやすいシナリオと、低尤度になりやすいシナリオには、M7クラスの地震が発生した時のすべり速度分布（M9クラスの地震の震源域になるエリアの固着状態）に違いが見られた。低尤度になりやすいシナリオでは、海溝沿い浅部で広範囲に固着域が残っていた。

4. 結論ならびに今後の課題

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進めるとともに、推移予測の試行実験に着手した。今後も引き続きシナリオ蓄積を進めるとともに、様々な条件で同様の計算を行い、同化手法や予測の問題点を洗い出して、推移予測手法を改善する必要がある。

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。地殻変動計算には、国土地理院のGEONET、防災科学技術研究所のS-netおよび海上保安庁と東北大学によるGPS/A海底地殻変動観測点の座標値を使用させていただきました。

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] Ando, R. and Imanishi, K., “Possibility of Mw 9.0 mainshock triggered by diffusional propagation of after-slip from Mw 7.3 foreshock”, *Earth Planets Space*, 63, 767-771 (2011).
- [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] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. in *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing* (Vol. 1 of Fortran Numerical Recipes). Cambridge University Press (1996).
- [9] Hori, T., M. Hyodo, S. Miyazaki, and Y. Kaneda, “Numerical forecasting of the time interval between successive M8 earthquakes along the Nankai Trough, southwest Japan, using ocean bottom cable network data”, *Mar. Geophys. Res.*, 35, 285-294, doi:10.1007/s11001-014-9226-8 (2014).

Numerical Test of a Forecasting Procedure for Plate Boundary Earthquakes along the Japan Trench

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

The M7.3 earthquake was observed 51 h before the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake near its hypocenter. To investigate possibility of forecasting $M \sim 9$ mainshock from crustal displacements due to a $M > 7$ earthquake and its afterslip near the mainshock hypocenter, we adopted a data assimilation method for crustal displacement data obtained from numerical simulations of earthquake generation cycles along the Japan Trench. We used 50 scenarios, which successfully reproduced important characteristics such as the coseismic slip distribution of the Tohoku-Oki mainshock, and a $M > 7$ earthquake near the mainshock area. We calculated crustal deformations on onshore and offshore area for each scenario. Then, we evaluated likelihood based on a method of data assimilation. We examined what scenario is expected before and after the $M > 7$ occurrence depending on the preparation level of the mainshock.

Keywords: Earthquake generation cycle, Tohoku-Oki earthquake, Foreshock, forecasting

1. Introduction

We are developing a program for data assimilation method to be aimed at slip on the subducting plate interface. Here, we briefly report on sequential assimilation of crustal deformation data due to slip on the plate interface using numerical simulations of earthquake generation cycles along the Japan Trench [1].

The M9.0 Tohoku-Oki earthquake occurred along the Japan Trench, on 2011. The M7.3 earthquake was observed 51 h before the Tohoku-Oki earthquake near its hypocenter. After the M7.3 earthquake, slow slips were observed [2]. To investigate possibility of forecasting $M \sim 9$ mainshock from crustal displacements due to a $M > 7$ earthquake and its afterslip near the mainshock hypocenter, we conducted numerical simulations of earthquake generation cycles, and adopted a data assimilation method.

2. Crustal displacements obtained from numerical simulations

In preparation for sequential assimilation of crustal deformation data due to slip on the plate interface, 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 [3]. 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 [4]. We used a fault constitutive law [5] that determines the slip rate for a given stress and a value of strength. In addition, we used an aging law [4, 6], 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 [7]. Differential equations for slip rate and strength were solved with an adaptive time step fifth-order Runge–Kutta algorithm [8].

Now, we obtained 50 scenarios, which successfully reproduced important characteristics such as the coseismic slip and afterslip distribution of the M9 earthquake, and a $M > 7$ earthquake near the M9 hypocenter. Time period of each scenario was prepared from 10 years before foreshocks to 10 years after $M \sim 9$ earthquakes. For those scenarios, time interval between the $M > 7$ earthquake and the mainshock were different from each scenario, 1 day to 200 years. We calculated crustal deformations at 272 points on onshore and offshore area for each scenario, assuming elastic, homogeneous, and isotropic half space. Then we interpolate linearly to one day sampling data after calculations of crustal deformation from simulation data with an adaptive time step. One of these deformation data set is alternatively used as that of synthetic observations.

3. Numerical tests based on data assimilation

We evaluated likelihood by SIS (Sequential Importance Sampling), a method of data assimilation. The method used in this study was based on our previous study along the Nankai Trough [9]. We searched time shift with minimum residuals between observation data and the simulation data for each

scenario. Residuals were calculated before and/or after the $M > 7$ occurrence depending on the preparation level of the mainshock using offshore and/or onshore stations.

Here, we used a scenario obtained from Nakata et al [1] as the true scenario. Then, time interval between the foreshock and the M~9 earthquake of the true scenario was 13 days. Time span of observation data is one year immediately before the M~9 earthquake (including the foreshock), or 5-6 years before the M~9 earthquake (also before the foreshock). From now, we call the former as period 1 and the latter as period 2.

In all cases of test conditions, the true scenario showed the minimum residuals (= maximum likelihood). In the case of period 1 with offshore data, occurrence time of M~9 earthquake in all scenarios was not varied so much. On the other hand, in the case of period2 with offshore data, occurrence time of M~9 earthquake varied even in high likelihood scenarios. Scenarios with low likelihood showed wide distributions of locked area near the coming M~9 source area when a M~7 earthquake occur.

It is suggested that information from offshore stations, displacement data due to the foreshock, and the preparation level near the mainshock area are important to forecast M ~ 9 mainshock along the Japan Trench. We will investigate with various conditions such as sampling interval of displacement data, time span of observation data, number of stations, vertical and horizontal components, and the true scenario.

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.

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] Ando, R. and Imanishi, K., “Possibility of Mw 9.0 mainshock triggered by diffusional propagation of after-slip from Mw 7.3 foreshock”, *Earth Planets Space*, 63, 767-771 (2011).
- [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] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. in *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing* (Vol. 1 of Fortran Numerical Recipes). Cambridge University Press (1996).
- [9] Hori, T., M. Hyodo, S. Miyazaki, and Y. Kaneda, “Numerical forecasting of the time interval between successive M8 earthquakes along the Nankai Trough, southwest Japan, using ocean bottom cable network data”, *Mar. Geophys. Res.*, 35, 285-294, doi:10.1007/s11001-014-9226-8 (2014).

