

## 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 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

著者

中田 令子<sup>\*1</sup>, 兵藤 守<sup>\*1</sup>, 堀 高峰<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</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

南海トラフ地震震源域の西端に位置している日向灘では近年、スロー地震や M5~6 の地震が発生するなど、地殻活動が活発である。そこで本年度は、南海トラフおよび日本海溝での地震発生サイクルシミュレーションの先行研究で得られた知見に加えて、新たなモデルで得られた結果をもとに、日向灘において今後起こりうるシナリオについて再検討した。その結果、日向灘地震による南海トラフ地震の誘発の可能性を考えるうえで、プレート境界面の固着状態の把握が重要であることが確認できた。さらに、アンサンブルカルマンフィルターを用いた地殻変動データの逐次同化による、プレート境界すべりと摩擦パラメータ推定手法の妥当性や問題点を洗い出し、改善に必要な知見を得るために、豊後水道長期的スロースリップイベントについて、プレート境界すべりの推移予測の試行実験を行った。その結果、アンサンブル平均だけを見て推移予測をするのではなく、各アンサンブルのばらつき具合も見ることで、得られた結果の信頼性を判断する必要があることがわかった。

**キーワード:** 地震発生サイクルシミュレーション, 南海トラフ地震, 日向灘地震, アンサンブルカルマンフィルター, 豊後水道長期的スロースリップイベント

### 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。

本年度は、引き続き日本海溝や南海トラフを対象とした地震発生サイクルシミュレーションを行った。さらに、アンサンブルカルマンフィルター(Ensemble Kalman Filter; EnKF)と呼ばれるデータ同化手法 [3]を、豊後水道における長期的スロースリップイベント (Long-term Slow Slip Event; L-SSE)に適用し、プレート境界すべりの推移予測の数値実験を行った。

### 2. 地震発生サイクルシミュレーション

地震発生サイクルシミュレーションでは、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 [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。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計算を行った。本報告書では、南海トラフの西端、日向灘を対象とした計算例について報告する。

南海トラフの西端に位置している日向灘では近年、スロー地震や M5~6 の地震が発生するなど、地殻活動が活発である。将来の大地震の震源域となりうる強く固着した領域の端では、応力集中が生じやすい。それまで比較的静穏であった領域で地殻活動が活発になってきたということは、それまで強く固着していた領域で固着がはがれてきていることを示唆していると考えられる。つまり、その付近で大地震発生が近くなっている可能性がある。そこで、日向灘におけるプレート固着の現状や今後起こりうるシナリオについて再検討するために、これまでに南海トラフ [8, 9, 10]や日本海溝 [2]で構築したモデルを参考に、摩擦パラメータの空間分布を仮定して、計算を行い、シミュレーションシナリオの蓄積を行った。

簡単のために、200 年に 1 回の頻度で発生すると考えられている M7.5 以上の地震 (1662 年外所地震や 1968 年日向灘地震)と、一回り規模が小さく繰り返し間隔も短い M7 前後の地震を 1 つずつモデルに組み込んだ (図 1)。日向灘北部と南部の M7 前後の地震を 1 つの不安定パッチで代用した。豊後水道 L-SSE に関しては、パラメータ調整を行わず先行研究の値 [9]をそのまま用いた。日向灘の SSE はモデルに組み込まなかった。

図 2 に得られたシナリオの例を示す。日向灘南部で M6.4 の地震が 69 年間隔で 2 回続けて発生した (図 2(a), (b))。

その7年後、日向灘北部でM > 7の地震が発生した (図2(c))。その4.3年後に日向灘南部で発生したM6.4の地震 (図2(d))は、前回の同場所での同規模の地震から12年しか経過していないことから、北部でのM > 7地震に誘発され、本来のタイミングよりも早く発生したともみなせる。しかし、これらの地震が次の大地震を誘発することはなかった。南海トラフ地震が発生したのは、この86年後である (図2(f))。なお、この南海トラフ地震の22分後に日向灘北部でも、地震性すべりが発生した。先行研究 [9, 10]では、複数サイクルを見ると、日向灘地震が南海トラフ地震を誘発する場合としない場合の両方が得られていたが、今回得られたシナリオのように、複数サイクルを見ても、日向灘北部におけるM > 7の地震が、南海トラフ地震を誘発しない場合もありうる。誘発されるかどうかは、南海トラフ地震震源域の固着状態に影響を受けていると考えられる。

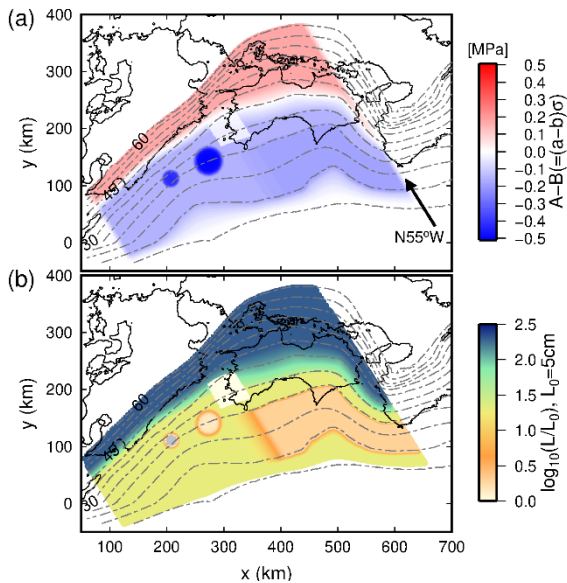


図1 計算に用いた摩擦分布の例。(a)摩擦パラメータA-B (MPa)。(b)特徴的すべり量(L)。細点線は沈み込むプレート境界面 [11]の深さ (km)を示す。

### 3. プレート境界すべり推移予測の試行実験

EnKFを用いた地殻変動データの逐次同化による、プレート境界すべりと摩擦パラメータの推定手法 [3]に対し、計算コードの並列化を行い、処理を高速化するとともに、複雑なプレート境界面形状に適用できるように、応力変化・地表変形応答の計算方法を変更したコード [12]を用いた。この並列化したコードと物理探査に基づく3次元のプレート境界面形状 [11]を利用して、豊後水道で約8年の繰り返し間隔で発生するL-SSEの逐次推移予測を行った。

先行研究 [3]と同様な方法で、真のモデルおよび100個のアンサンブルを作った (図3・4)。真のモデルでのL-SSEの繰り返し間隔は約8.3年である。同化間隔は20日、地殻変動観測点は国土地理院GEONETの豊後水道周辺に設

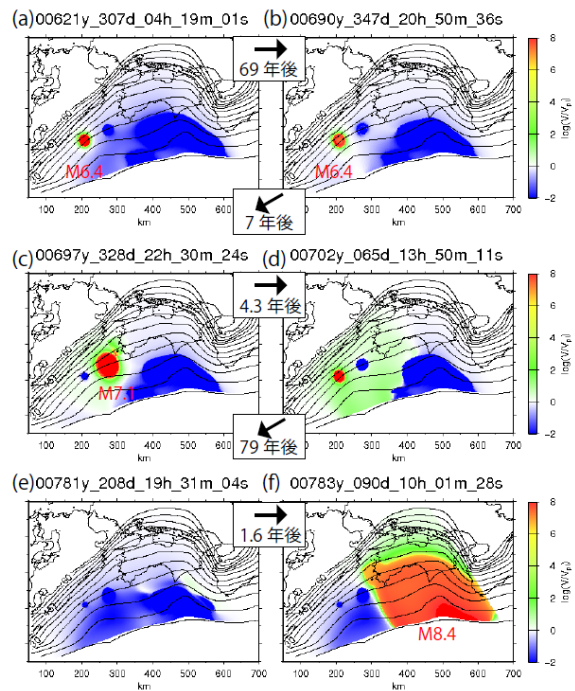


図2 得られたシナリオの例。日向灘北部の地震が南海トラフ地震を誘発しない場合。すべり速度分布のスナップショットを色分けして示す。(a)-(b)日向灘南部でM6.4の地震が69年間隔で発生。(c)(b)の7年後、日向灘北部でM7.4の地震が発生。(d)(c)の4.3年後 (b)の12年後)に日向灘南部でM6.4の地震発生。(e)(f)の1.6年前。(f)(c)の86年後、四国沖でM8.4の南海トラフ地震発生。

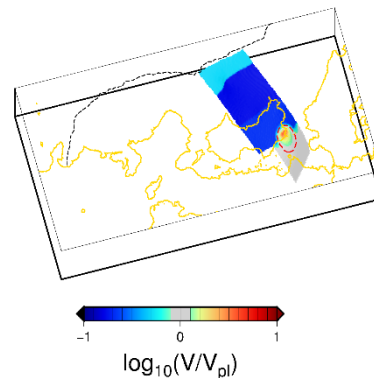


図3 真のモデルでのT=1180日でのすべり速度分布。赤点線で囲った領域ですべり速度が大きく、豊後水道L-SSEが発生していることを示している。

置されている89点である。プレート境界面形状は、2章の地震発生サイクルシミュレーションで用いたものと同じものを用いた。

その結果、各アンサンブルのL-SSEパッチ中心でのすべり速度の推定値は1500日頃まではふらつく (図5、オレンジ線)が、100アンサンブルの平均値は、真値とのずれはほとんど見られなかった (図5、緑線)。同様に、摩擦パラメータの推定結果は、1500日頃には真値に近い値まで収束し、その後のふらつきが小さくなっていった。

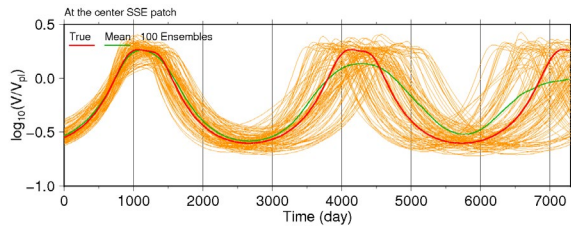


図4 数値実験に用いた豊後水道 L-SSE パッチ中心でのすべり速度の時間変化。赤線は真値、オレンジ線は同化に使用した初期アンサンブル (100 個)、緑線は 100 アンサンブルの平均である。2 回目の L-SSE が始まる (3000 日) 頃から、真値と平均値とのずれが大きくなっている。

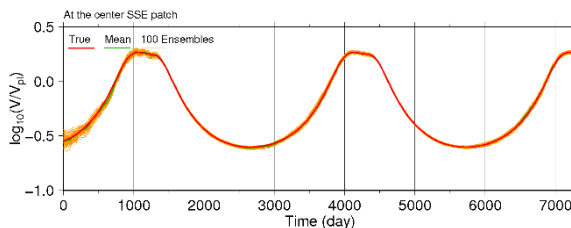


図5 最後 (7300 日) まで同化を行った場合の、豊後水道 L-SSE パッチ中心でのすべり速度の時間変化。赤線は真値、オレンジ線は各アンサンブルの推定値 (100 個)、緑線は 100 アンサンブルの平均である。

そこで、パラメータ推定が収束する前に、地殻変動データとの同化計算を打ち切った場合、その後のすべりの推移予測にどのような違いがみられるのかを確認するための数値実験を行った。データの全期間 7300 日 (20 年間) に対して、途中 (50 日、500 日、1000 日、1500 日、2000 日、3000 日) まで同化を行い、その後は各同化計算打ち切り時点で推定された摩擦パラメータセットのまま、すべりの時間発展を計算した。ただし、各アンサンブルに対するシステムノイズは、全期間同化する場合と同じ大きさで、与え続けた。なお、50 日と 500 日はすべりが加速している時期、1000 日はすべり速度がピークを迎えた時期、1500 日と 2000 日はすべりが減速している時期、3000 日は次の SSE に向けて加速を始めた時期といえる。

その結果、同化期間が短いと、各アンサンブルのふるまいは大きくばらついたが (図 6 (a))、L-SSE を一度経験すると、100 アンサンブルの平均では、L-SSE のすべりの推移予測はかなり真値に近いすべりを推定できるようになっていた (図 6 (b) (c))。ただし、偶然、真値に近い値が推定されているタイミングで、同化計算が打ち切られた場合は、より同化期間が長い場合よりも、アンサンブル平均では良い予測結果が得られていた。

#### 4. まとめ

プレート境界すべりの推移予測の試行に向けて、南海トラフにおいて地震発生サイクルシミュレーションを行った。先行研究で得られた知見をもとに、新たなモデルで

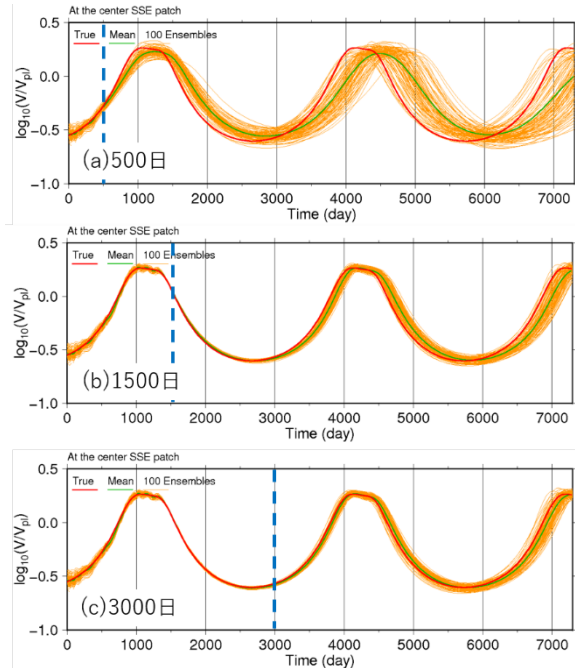


図6 途中まで同化計算を行った場合の、豊後水道 L-SSE パッチ中心でのすべり速度の時間変化。赤線は真値、オレンジ線は各アンサンブル (100 個)、緑線は 100 アンサンブルの平均である。青点線は、同化計算を打ち切った時間を示す。(a) 500 日、(b) 1500 日、(c) 3000 日。

シナリオの蓄積を行った。南海トラフでは、得られた結果をもとに、日向灘におけるプレート固着の現状や今後起こりうるシナリオについて再検討した結果、日向灘の地震が南海トラフ地震を誘発するかどうかは、南海トラフ地震震源域とその周辺での固着状態に関係していることが本研究でも確認できた。今後は、豊後水道や日向灘における L-SSE もモデルに組み込み、それぞれのイベントとの関係についても検討することが必要である。

地殻変動データの逐次同化による、プレート境界すべりと摩擦パラメータの推定の妥当性や問題点を洗い出し、改善に必要な知見を得るために、プレート境界すべりの推移予測の試行実験を行った。まずは、簡単なモデルとして、豊後水道における L-SSE のみで、地震発生サイクルシミュレーションを行い、アンサンブルを用意した。アンサンブル平均だけを見て推移予測の良否を判断するのではなく、各アンサンブルのばらつき具合も見ることで、得られた結果が偶然なのか信頼できるものなのかを、判断する必要がある。今後は、初期アンサンブルのばらつきを大きくすること、初期アンサンブルの数を増やすことなどが課題である。

日本海溝や南海トラフでの地震発生サイクルシミュレーションモデルを改善し、地震・測地観測や構造探査等から得られる知見を定量的に説明してプレート境界地震の発生過程の理解を深めていくとともに、逐次同化に適用するシミュレーションモデルを、複雑にしていく。これまで蓄積してきた様々な多数のシナリオに対して、逐次デ

ータ同化手法を適用し、推移予測の試行をすることが、本課題の目標である。

## 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大型計算機システムを使用しました。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 (2014).
- [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] Hirahara, K., and K. Nishikiori, “Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments”, *Geophys. J. Int.*, 219, 2074-2096 (2019).
- [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] Nakata, R., M. Hyodo, and T. Hori, “Numerical simulation of afterslips and slow slip events that occurred in the same area in Hyuga-nada of southwest Japan”, *Geophys. J. Int.*, 190, 1213-1220 (2012).
- [9] Nakata, R., M. Hyodo, and T. Hori, “Possible slip history scenarios for the Hyuga-nada region and Bungo Channel and their relationship with Nankai earthquakes in southwest Japan based on numerical simulations”, *J. Geophys. Res.*, 119, 4787-4801 (2014).
- [10] Hyodo, M., T. Hori, and 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 Planet Space*, 68,6 (2016).

- [11] Baba, T, Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uhira, “The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model”, *Phys. Earth Planet Inter.*, 132, 59-73 (2002).
- [12] 兵藤守・堀高峰、「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」平成30年度成果報告書、3-9-④ (2019).

# Experiment of Forecast for Interplate Slip using Sequential Data Assimilation

## Project Representative

Takane Hori R&D Center for Earthquake and Tsunami Forecasting, Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## Authors

Ryoko Nakata <sup>\*1</sup>, Mamoru Hyodo <sup>\*1</sup>, Takane Hori <sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup>R&D Center for Earthquake and Tsunami Forecasting, Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In the Hyuga-nada region, which is located at the western end of the source region of the Nankai Trough earthquake, crustal activities have been active in recent years. Therefore, based on the results of numerical simulation of earthquake generation cycles, we investigated the possible scenarios around the Hyuga-nada. Then, we suggested that it is important to observe area and strength of the locking condition on the plate interface in considering the possibility of the Nankai Trough earthquake being triggered by the Hyuga-nada earthquake. Furthermore, we adopted a data assimilation method using the ensemble Kalman filter for crustal deformation data of the long-term slow slip events beneath the Bungo channel to estimate slip evolution on the plate interface. Numerical experiments showed that it is necessary to estimate the reliability of the obtained results by using not only the ensemble average, but also the variation of each ensemble.

**Keywords** : Earthquake generation cycle simulation, Nankai Trough earthquake, Hyuga-nada earthquake, Ensemble Kalman Filter, Long-term slow slip event

## 1. Introduction

We are developing a program for data assimilation method to estimating slip evolution on the subducting plate interface along the Nankai Trough and the Japan Trench [1]. As part of this study, we have conducted numerical simulations of earthquake generation cycles along the Japan Trench [2]. By using these simulation results, we have also conducted sequential assimilation of crustal deformation data due to slip on the plate interface, which adopted a data assimilation method. In this year, we conducted additional numerical simulation of earthquake generation cycle along the Japan Trench and the Nankai Trough. Furthermore, numerical experiments of data assimilation using Ensemble Kalman Filter (EnKF) [3] were conducted on the crustal displacement of long-term slow slip events (L-SSEs) beneath the Bungo channel along the Nankai Trough.

## 2. Numerical simulation of earthquake generation cycle along the Nankai Trough

Based on our previous study [1], we conducted numerical simulations of earthquake generation cycles along the Nankai Trough. 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 as an approximated mathematical model for large-scale frictional behavior on the plate interface [5]. 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.

In the Hyuga-nada region, which is located at the western end of the source region of the Nankai Trough earthquake, crustal activities have been active in recent years, such as long-term slow slip events, shallow very-low-frequency earthquakes, shallow low-frequency tremors, and M 5~6 earthquakes. Therefore, in addition to the knowledge obtained in our previous studies of numerical simulation of the earthquake generation cycle along the Nankai Trough and the Japan Trench, based on the results obtained by the new model, we re-examined the possible scenarios in the Hyuga-nada. Frictional parameters were assumed based on our previous studies along the Nankai Trough [8, 9, 10]. We used realistic three-dimensional (3D) geometry of the subducting Philippine Sea Plate [11].

In our previous studies [9, 10], we obtained several scenarios in which a  $M \geq 7.5$  Hyuga-nada earthquake triggered a  $M > 8$  Nankai Trough earthquake. In the frictional model, we added a smaller unstable patch, which represented  $M \sim 7$  earthquake with recurrence interval of 30~40 years in the Hyuga-nada region. Then, we investigated relationship among three types of events; the  $M > 8$  earthquake (Nankai earthquake),  $M \geq 7.5$  earthquake, and  $M \sim 7$  earthquake. As a result, there are scenarios in which  $M > 7$  Hyuga-nada earthquake triggered  $M \sim 7$  earthquake. These earthquakes did not trigger a Nankai earthquake, but the  $M > 8$  Nankai earthquake that occurred more than 80 years later triggered a  $M > 7$  Hyuga-nada earthquake. It can be said that M

> 7 earthquake in the northern part of Hyuga-nada do not necessarily trigger a  $M > 8$  Nankai earthquake.

### 3. Numerical experiment of estimating slip evolution

In order to identify the validity and problems of a data assimilation method for estimating slip evolution and frictional parameters on the plate interface by using crustal deformation data, and to obtain the knowledge necessary for improvement, numerical experiments were carried out for a simple model of the Bungo channel L-SSEs. We adopted an estimation method of sequential assimilation by using EnKF [3]. Based on the method for plane fault model, the calculation code had parallelized to speed up the calculation process and improved the calculation of stress change and surface deformation response to apply complex plate geometry [12].

Using the parallelized code and the same 3D plate geometry as Section 2 [11], we estimated slip evolution and frictional parameters on the plate interface using crustal deformation data obtained by L-SSEs occurring with recurrence interval of about 8 years in the Bungo Channel. A true model and 100 ensembles were calculated in the same method as in the previous study [3]. The recurrence interval of L-SSEs in the true model is approximately 8.3 years. The data period of each ensemble is 20 years, the assimilation interval is 20 days, and the observational Global Navigation Satellite System (GNSS) stations of crustal deformation were 89 GNSS Earth Observation Network System (GEONET) stations located around the Bungo channel.

Assimilation was performed up to the shorter periods than the entire data period, and thereafter the time evolution of slip was calculated by using frictional parameters estimated at each termination time of assimilation. As a result, after the first L-SSE, each ensemble showed similar slip evolution. However, when the assimilation was terminated at the timing when the average values of frictional parameters close to the true value were estimated, the ensemble average gave a better estimation of slip evolution than when the assimilation period was longer. It is necessary to judge the reliability of the obtained results by using not only the average of all ensembles, but also the difference among each ensemble.

### 4. Conclusion

Along the Nankai Trough, we conducted numerical simulation of earthquake generation cycles in the Hyuga-nada, and numerical experiments of estimating slip evolution and frictional parameters on the plate interface using a data assimilation method for the Bungo channel L-SSEs. We should improve both the forward simulation and the assimilation methods to adopt more realistic and complex scenarios including both  $M > 7$  earthquakes and slow earthquakes. Then we will apply the sequential data assimilation method to various scenarios that we have accumulated so far and estimate slip evolution on the plate interface.

### Acknowledgement

Computational resources of the Earth Simulator and DA system 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 MEXT.

### References

- [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 (2014).
- [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] Hirahara, K., and K. Nishikiori, "Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments", *Geophys. J. Int.*, 219, 2074-2096 (2019).
- [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] Nakata, R., M. Hyodo, and T. Hori, "Numerical simulation of afterslips and slow slip events that occurred in the same area in Hyuga-nada of southwest Japan", *Geophys. J. Int.*, 190, 1213-1220 (2012).
- [9] Nakata, R., M. Hyodo, and T. Hori, "Possible slip history scenarios for the Hyuga-nada region and Bungo Channel and their relationship with Nankai earthquakes in southwest Japan based on numerical simulations", *J. Geophys. Res.*, 119, 4787-4801 (2014).
- [10] Hyodo, M., T. Hori, and Y. Kaneda, "A possible scenario for earlier occurrence of the nest Nankai earthquake due to triggering by an earthquake at Hyuga-nada, off southwest Japan", *Earth Planet Space*, 68,6 (2016).
- [11] Baba, T, Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uhira, "The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model", *Phys. Earth Planet Inter.*, 132, 59-73 (2002).
- [12] Hyodo, M., and T. Hori, Annual report of "Research project for compound disaster mitigation on the great earthquakes and tsunamis around the Nankai trough region", 3-9-④ (2019).