

令和 6 年 4 月 19 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03779

研究課題名(和文) 逐次データ同化手法によるスロー地震域における摩擦特性推定及びすべり発展予測

研究課題名(英文) EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on LSSE faults

研究代表者

平原 和朗 (Hirahara, Kazuro)

香川大学・四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構・客員教授

研究者番号：40165197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：逐次的データ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルター(EnKF)を用いて、豊後水道長期的スロースリップ(LSSE)を対象に、GNSS地殻変動観測データから、LSSE断層域での摩擦特性の推定およびすべり発展予測を逐次的に行う手法開発を行い、双子数値実験によりその性能を確かめ、この成果を国際誌に公表した。

更に、実GNSS観測データへの適用を目指して、国土地理院GNSS観測網(GEONET)データから運動学的逆解析により推定されたLSSE断層面上でのすべり速度データに対してEnKFを適用し、摩擦特性の推定に成功し、LSSEイベントの終了時期の予測といった数か月程度の短期的な予測可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

データ同化手法は気象や海洋分野での事象予測に用いられ多くの成果を挙げている。しかしながら、地震学での適用例はまだ多くない。そこで、豊後水道長期的スロースリップ(LSSE)域を対象に、アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)を用いて、GNSS観測時系列をデータとして、LSSE断層面上での摩擦特性推定とすべりの発展予測を行う手法を開発した。双子数値実験によりその性能を評価し、部分的ではあるが実データを用いて、摩擦特性の推定とすべり発展予測に成功した。LSSE挙動の理解は巨大地震発生予測において重要で、巨大地震発生予測に向けてのEnKFによるLSSEのモニタリングの第一歩と評価できる。

研究成果の概要(英文)：Using a sequential data assimilation method, the Ensemble Kalman Filter (EnKF), we developed a method for estimating frictional properties and monitoring slip evolution on an LSSE fault to confirm the capability with twin numerical experiments. Further, we applied our EnKF method to the slip rate data on the Bungo Channel LSSE fault, which were obtained from the actual GNSS data with a kinematic inversion method. First, we used the data during the whole LSSE cycle, and could successfully estimate the frictional properties. Then we showed that the limited data only during the period up to just after the period with the peak slip rates could resolve the friction properties to forecast the ending period of the LSSE cycle. This is the first result where an EnKF method can estimate the frictional properties and show the short-term predictability of slip evolution for an actual LSSE fault using the slip rate data inverted from actual GNSS observation data at the surface.

研究分野：地震学

キーワード：データ同化 アンサンブルカルマンフィルター 長期的スロースリップ 速度状態摩擦依存則 GNSS すべり発展予測 巨大地震発生

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 国土地理院 GNSS 観測網 (GEONET) による地殻変動観測データの解析による 1997 年豊後水道スロースリップの発見以来、西南日本では、様々な時定数と繰り返し間隔をもつ、長期的・短期的スロースリップイベント (LSSE・SSSE)、更には深部低周波微動、深部・浅部超低周波地震が相次いで発見され、プレート境界における多様な固着状態が明らかにされてきた。また、数値シミュレーションから、巨大地震発生前にこれらのスロー地震群の活動 (発生間隔等) が変化する可能性が指摘され、次期南海トラフ巨大地震を引き起こす応力状態のインジケータ (応力計) として注目されている。シミュレーションの観点からは、これらのスロー地震群のうち、主として GNSS 観測データの解析により明らかにされてきた LSSE に焦点を当てるのが得策と言える。

(2) これまで GNSS 観測データから、プレート境界面におけるすべりの時空間発展を求める逆解析が行われてきたが、物理的条件ではなく時空間的滑らかさ等を拘束条件としているため、運動学的モデルと言える。一方、岩石実験から導かれた速度状態依存摩擦 (RSF) 則を用いて地震サイクルシミュレーション (ECS) が行われている。この ECS では、摩擦パラメータ分布を手作業で与え、地震発生履歴や地殻変動を再現している。これらを再現する摩擦パラメータ分布が分れば、シミュレーションを時間発展させることにより、地震の発生予測に繋がる。しかし、これまで GNSS 観測データ解析と ECS 研究は、全く独立に行われており、両者を融合し予測へと繋がる研究が必要である。大気海洋分野では、データ同化という手法が開発されている。この手法は、数値天気予報や各種の最適化処理に用いられており、観測や実験データを最適化理論を用いてうまく取り込み (同化して) モデルおよびシミュレーション結果を修正するものがある。地震学ではまだデータ同化手法を用いた研究は少ないが、地震学でも運動学的逆解析から脱却し、物理法則に基づく数値シミュレーションと観測データを融合した研究に進むべき時期に来ている。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、逐次データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を用いて、これまで独立に行われてきた GNSS 観測データ解析と岩石実験から得られた RSF 則に従って時間発展させる ECS 研究を融合させ、LSSE 域での摩擦パラメータ分布の推定およびすべりの時空間発展を予測するシステムを構築することである。

(2) このシステムは、同様にゆっくりしたすべりである余効変動解析にも有効で拡張可能である。既に余効変動解析にはデータ同化手法の一手法であるアジョイント法を用いた解析が試みられているが、本研究では、リアルタイムモニタリングを意識して、逐次データ同化手法である EnKF を用いたシステム構築を行う。本研究では、ゆっくりしたすべりを対象として、摩擦パラメータ推定やすべりの発展予測を行うが、将来的には、急激なすべりである地震発生そのものも対象としたシステムへの発展を考えており、その意味では多様なすべり様式を含む全地震サイクルを解析し、地震発生予測を目指すシステム構築へと繋がる研究の第一歩と言える。

3. 研究の方法

(1) EnKF による双子数値実験

まず、豊後水道域におけるプレート境界面での LSSE のすべり発展を追う基本的枠組みを述べる。プレートの沈み込み (速度: $V_{pl}=6.5\text{cm/年}$) により、傾斜角 15° で沈み込むプレート境界面断層に応力が蓄積され、すべりが発生する。断層面の摩擦は RSF 則 (aging law) に従うとし、断層面での運動方程式は慣性項を S 波放射のみ考えたダンピング項で近似した準動的運動方程式を考えて、時間刻み可変のルンゲクッタ法で数値積分する。プレート境界面 ($100\text{ km} \times 120\text{ km}$) を 3000 個の小断層矩形セル ($2\text{ km} \times 2\text{ km}$) に分割し、各セル毎の変数としてすべり速度 V_i および状態変数 i の時間発展を追うことになる。方程式 (RSF 則) に含まれる摩擦パラメータは A, B, L の 3 変数で、空間に依存する定数である。豊後水道 LSSE に対応するように傾斜したプレート境界面上の南海地震域に対応する固着域の下部に半径 $R=35\text{ km}$ の円形パッチを置き LSSE 発生域とした。この外部では安定すべり (速度強化: $A-B>0$) および内部では速度弱化域 ($A-B<0$) とした。通常、速度弱化域では地震時すべりが発生するが、最初半径 R_c ($BL/(B-A)^2$) 程度の領域 (震源核形成領域) でゆっくりすべりが発生し、その後急速な高速すべりが発生する。ところが速度弱化域の半径 R が R_c 程度だとゆっくりすべりのみ発生することになる。このメカニズムを使って、領域外部では安定すべり、内部で LSSE が発生することになる。豊後水道 LSSE は繰り返し間隔が 7 年、継続時間が 1 年程度であるので、これを再現するように内部の摩擦パラメータを決めることになる。ここでは外部と内部で異なる一定のパラメータ分布を与えている。このように摩擦パラメータ分布を与え、すべり発展をシミュレートし、断層面でのすべりと地表面で観測された地殻変動を結びつける観測行列を用いて、地表での GNSS 観測点での地殻変動観測時系列 (時

間隔 10 日間) を計算し、ノイズを加えてデータとする。このシミュレーションに於いて、固着域が無い場合と実際に近い有る場合の 2 通りを考えている。図 1 に固着域の無い場合での LSSE 断層モデルと合成された観測データの一例を示している。

上記のように数値シミュレーションにより得られた地殻変動にノイズを加えた合成観測データから、EnKF を用いて逐次的に、各小断層セルでの V_i 、 i の時間発展、および LSSE 発生内部領域の $A, B-A, L$ を推定する。ただし、固着域を考えた場合、固着域でのすべり遅れ速度は一定としており、そのすべり遅れ速度も推定する変数に加えることになる。アンサンブル数は 100 とし、時間間隔 10 日ですべり速度・状態変数および摩擦パラメータを EnKF で更新して、予め仮定した真の摩擦パラメータの推定およびすべり発展予測が可能かを調べる双子数値実験を行う。

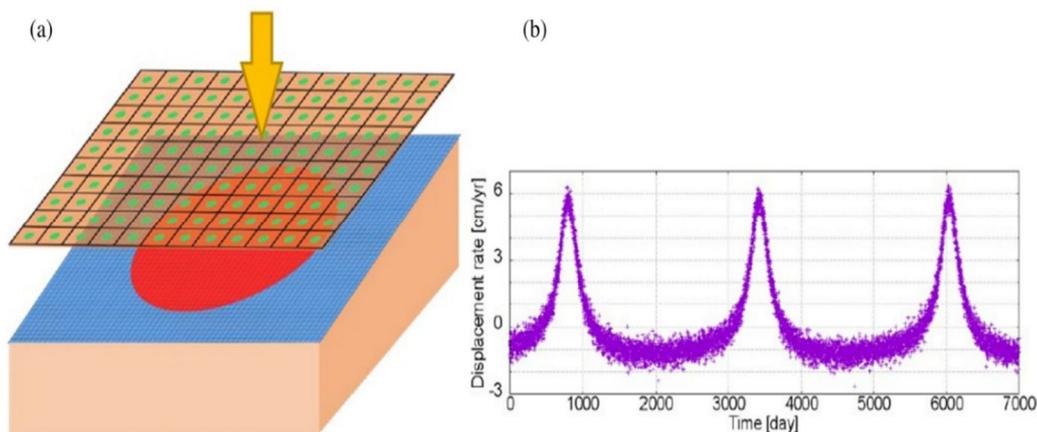


図 1 (a)豊後水道長期的スロースリップ (LSSE) モデルと観測点配置 (固着域の無い場合) 赤い色円パッチ (半径 $R=35\text{km}$) が LSSE 発生域 ($A-B<0$) で青い色領域は安定すべり域 ($A-B>0$) を表す。また、地表での緑円は GNSS 観測点配置を示す。

(b)シミュレーションで得られた地表 GNSS 観測点での地殻変動 (プレート沈み込み方向) にノイズを加えた合成地殻変動観測時系列データ (図 a) での矢印で示した観測点に対応する観測値) 平均繰り返し間隔は 7.17 年で、最大すべり速度は 45cm/年程度となっている。(Hirahara & Nishikiori, 2019)

(2) 実 GNSS 観測データへの適用

2010 年豊後水道 LSSE を対象に、国土地理院の GNSS 観測網 (GEONET) で得られた観測データへの適用を試みた。そのため上記モデルの平面断層ではなく、実 3 次元プレート面形状を考慮した 3 次元モデルを構築した。当初、上記双子数値実験のように地表 GNSS 観測データからの推定を試みたが、パラメータが発散するなどうまくいかなかった。そこで実 GNSS 観測データから運動学的逆解析で求めた断層面上でのすべり速度データに EnKF を適用して、摩擦パラメータ推定およびすべり発展予測を試みた。(藤田、2020)

(3) 走向方向に自発的に分裂発生するスロースリップ域のセグメント化

上記のモデルでは豊後水道域に 1 つの LSSE セグメントを仮定したが、この領域では詳細な解析を行うと 2 つのセグメントに分かれて発生する場合もあることが分かってきた。また、四国中部から日向灘にかけて LSSE がセグメント化されて発生していることも分かってきた。そこで LSSE 域のセグメント化について調べた。3 次元モデルで各パッチに対応する速度弱化域を設定して各セグメントで LSSE を発生させることが可能であるが、まずは一様な摩擦特性を持つ走向方向に長い平面断層モデルから調べることにした。(大畠、2023)

4. 研究成果

(1) EnKF 双子数値実験

図 2 に 2 通りの初期アンサンプルの取り方に応じた、EnKF による逐次推定値の時間発展 (上段からすべり速度 (真値、推定値、残差)、摩擦パラメータ ($A, B-A, L$)) を示す。推定期間は 2 サイクルに渡り、最初の固着した状態から始めている。初期アンサンプルの取り方に依存しているが、ほぼ 1 サイクルで真値に近い値を推定している。最初のサイクルで固着がはがれて (すべり速度の青色部分)、500 日を過ぎたあたりから中心からスロースリップが広がっていく (すべり速度の黄色部分) が、左図では 500 日程度でほぼすべり速度残差がゼロになり、摩擦パラメータもほぼ収束している (図は省略)。このように初期アンサンプル値の取り方によるがノイズを含む地表観測データから 1 サイクルないしは最大すべり速度直前までの限られたデータ期間で摩擦パラメータ推定およびすべり予測が可能であることが分かった。なお、固着域のある場合や、実 GNSS 観測点に対応する観測配置での検討も行っている。

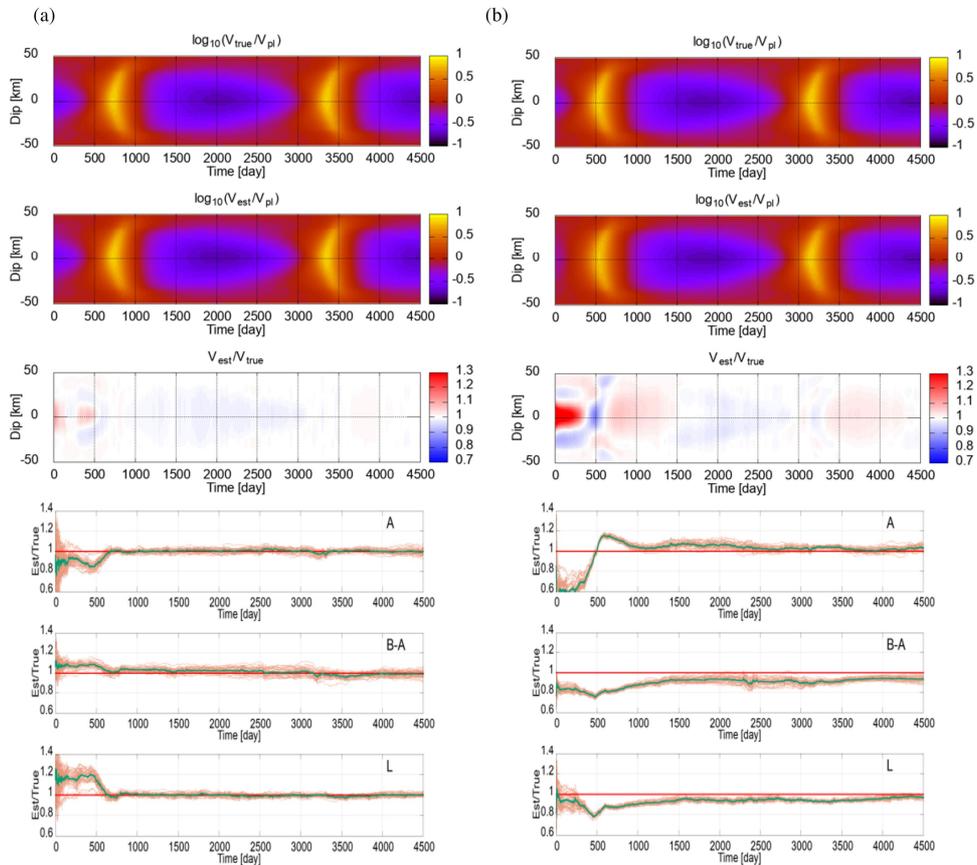


図2 固着域無しモデルでのEnKFによる双子数値実験結果

(a)と(b)は初期アンサンプルの取り方を変えた場合の結果。上段3図は、円の中心を深さ方向に通る中心線に沿ってのすべり速度の時間発展を示す。上から仮定した真値、EnKFにより推定された推定値、それらの残差を示す。横軸は時間(日)、縦軸はdip方向の深さ(km)である。下段3図は、それぞれ摩擦パラメータA, B-A, Lの更新過程の時間発展(真値との比)を示す。橙色と緑色のドットは各アンサンプル値の真値との比およびアンサンプルの平均値を示す。初期アンサンプルの取り方により収束状況が異なるが、LSSEの1サイクルでほぼ真値を求めることに成功している。(Hirahara & Nishikiori, 2019)

(2) 実GNSSデータへの適用

2010年豊後水道LSSEを対象に、国土地理院GNSS観測網(GEONET)による実GNSS地殻変動観測データから運動学的逆解析により求められた、断層面上でのすべり速度をデータとしてEnKFにより円形パッチ内の摩擦パラメータ推定およびすべり発展の予測可能性について調べた。図3に、円形パッチ中心における運動学的逆解析より得られたすべり速度観測値(赤線)と、その解析期間でEnKFで同化された摩擦パラメータ値とすべり速度を用いたそれ以降の期間におけるすべり速度予報値(: 緑線、 : 青線)を示す。また、下図にはLSSE終息期におけるすべり速度の予報値と観測値の空間分布を示している。

LSSE発生初期解析期間までのデータ同化(緑線)では、LSSEの終息時期を予測することはできないが、LSSEのすべり速度最大時期()までを含む解析期間のデータ同化では、終息時期を予測できることが分かる。ここでは摩擦パラメータの更新時系列を示していないが、データ同化期間以降はその変動が少なくほぼ収束値を得ている。このように、EnKFによる実データのデータ同化によりLSSEの最盛期までのデータで、LSSEの終息時期の予報と言った短期的予測が可能であることが示された。もちろん、実データでは真の摩擦パラメータ値が不明なので、予めLSSEの発生間隔や継続時間を再現する複数の摩擦パラメータ値を用意することが重要であり、現在ではこれを試行錯誤的に行っており、適切な初期アンサンプル設定が重要である。また、LSSEは発生間隔7年程度で複数回発生しており、1パッチモデルで2つのLSSEサイクルに適用したが、うまく同化できないことも分かった。

しかしながら、地表観測データから運動学的逆解析によられた断層面上でのすべり速度を観測データとしているとは言え、実観測データに基づいてEnKFにより摩擦パラメータ推定およびすべりの発展予測を行った、初めての研究として大きな成果と言える。(藤田, 2020)

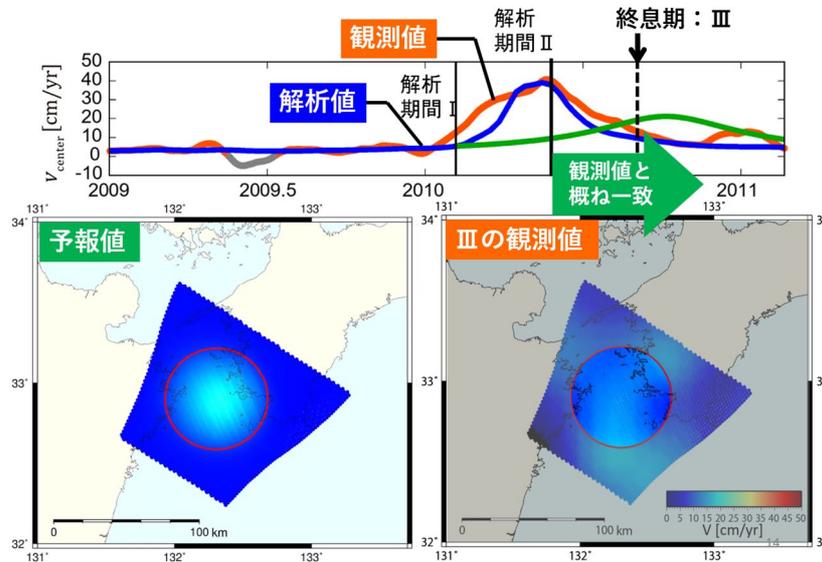


図3 実GNSS地表観測データから運動学的逆解析により得られた断層面上でのすべり速度を同化したすべりの発展予測可能性

上図：円形パッチの中心でのすべり速度発展図(2009年 - 2011年) 赤線：運動学的逆解析により得られたすべり速度で EnKF の観測値 緑線：解析期間 までの期間に同化された摩擦パラメータ値やすべり速度を用いて予報したすべり速度発展 青線：解析期間 までの期間に同化された摩擦パラメータ値やすべり速度を用いた予報したすべり速度発展

下図：LSSE 終息期 におけるすべり速度予報値と観測値の空間分布 (藤田、2020)

(3) 走向方向に自発的に分裂発生するスロースリップ域のセグメント化

これまでの研究で EnKF による逐次データ同化では初期アンサンブル値の設定が重要で、複数の数値シミュレーションによりある程度観測を説明する初期モデル構築が必要である。また LSSE は単独パッチで発生しておらず、3 次元的に複数のパッチを設定して、実際に発生している LSSE 群をある程度説明できるモデル初期モデルが必要である。

3 次元モデルでパッチを設定して調べたが複雑な挙動をするので、一様な摩擦特性をもつ平面モデルから調べたところ、パッチを設定していないのにも関わらず、LSSE が自発的にセグメント化して発生するという現象が得られた。これまでこういった現象は報告されてはいるが、詳しく調べられていない。そこで、一様速度弱化域の摩擦パラメータから決められる震源核形成サイズ h^* を変えて、LSSE セグメントの分裂数、走向方向のサイズ、LSSE 間の伝播距離、繰り返し発生間隔、最大すべり速度等の関係を調べた。これらの LSSE の特徴は概ねプレート沈み込み方向の幅と震源核形成サイズ h^* により説明されることが分かった。更に、均質平面断層面上で起こる LSSE セグメンテーションの性質を詳細に調べたところ、LSSE のセグメント数は概ね h^* に反比例するが、摩擦パラメータの比 A/B、有効法線応力にも依存し、また LSSE の伝播方向は摩擦パラメータの組み合わせによって双方向や単方向など様々な向きをとることが分かった。これら LSSE セグメントのサイズおよび個数、伝播方向は、LSSE 以浅の地震発生領域の固着状態にも依存し、また近隣で地震が発生するなど外部から強い応力擾乱を受けると変化する。EnKF の適用時には、これら周囲の実際の状況を反映したモデルが必要である。

一様摩擦特性モデルで自発的に LSSE がセグメント化して発生するのは非常に興味深い現象であるが、実際の LSSE 発生状況を説明するのに、パッチ設定とどのように組み合わせていき、データ同化の初期モデルを構成するかは、今後の問題として残されている。(大島、2022)

参考文献

Hirahara, Kazuro, and Kento Nishikiori. Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments. *Geophysical Journal International* 219, no. 3, 2074-2096, 2019.

藤田萌実、アンサンブルカルマンフィルタによる断層摩擦パラメータ及びすべり発展の推定 - 豊後水道長期的 SSE への適用 -、地球惑星科学専攻(地球物理学分野)修士論文、2020

大島敬就、摩擦特性が一様な断層におけるスロースリップの自発的な分裂に関する数値実験、地球惑星科学専攻(地球物理学分野)修士論文、2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kazuro Hirahara and Kento Nishikiori	4. 巻 219
2. 論文標題 Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 2074 2096
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggz415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Nishikiori, K., M. Ohtani, K. Hirahara
2. 発表標題 Spontaneous segmentation of slow slip events on a planar uniform fault -Implication from numerical simulations-
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大島 敬就・宮崎 真一・平原 和朗
2. 発表標題 摩擦特性が一樣な走向方向に長い断層における長期的スロースリップのシミュレーション ～分裂発生について～
3. 学会等名 日本地震学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大島 敬就・宮崎 真一・平原 和朗
2. 発表標題 What controls along-strike variations in Long term SSE recurrence intervals in the Western Nankai Subduction Zone?
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fujita M., T. Nishimura, K. Hirahara, M. Hyodo, S. Miyazaki
2. 発表標題 Ensemble Kalman Filter estimation of frictional parameters and slip evolution on L-SSE faults : application to the Bungo Channel L-SSE fault
3. 学会等名 Online JpGU - AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平原和朗
2. 発表標題 深部長期的のスロースリップと長期固着域を含む南海トラフ地震サイクルシミュレーション：離散セルモデル
3. 学会等名 日本地震学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuro Hirahara
2. 発表標題 EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on a LSSE fault and the changing slip deficit rate on a megathrust fault
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuro Hirahara
2. 発表標題 EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on LSSE faults and the megathrust slip deficit rate
3. 学会等名 IUGG(International Union of Geodesy and Geophysics)2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田萌実・西村卓也・平原和朗・兵藤守・宮崎真一
2. 発表標題 GNSSデータを用いたアンサンブルカルマンフィルタによる豊後水道長期的SSEのすべり発展推定に向けた数値実験
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田萌実・西村卓也・平原和朗・兵藤守・宮崎真一
2. 発表標題 GNSSデータを用いたアンサンブルカルマンフィルタによる豊後水道長期的SSEのすべり発展推定に向けた数値実験
3. 学会等名 日本測地学会第132回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirahara, K. and K. Nishikiori
2. 発表標題 EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on a LSSE fault -numerical experiments
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会、幕張
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirahara, K. and K. Nishikiori
2. 発表標題 EnKF Estimation of Frictional Properties and Slip Evolution on a LSSE Fault-Numerical Experiments-
3. 学会等名 10th ACES International Workshop, Awaji (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平原和朗・錦織健人
2. 発表標題 EnKFによるLSSE発生域の摩擦特性およびすべり発展推定に関する数値実験 - 固着域の影響
3. 学会等名 日本地震学会2018 年度秋季大会、郡山
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirahara, K. and K. Nishikiori
2. 発表標題 EnKF Estimation of Frictional Properties and Slip Evolution on a LSSE Fault with a locked megathrust fault zone -Numerical Experiments-
3. 学会等名 AGU 2018 Fall Meeting, Washington, D.C., U.S.A (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	宮崎 真一 (Miyazaki Shinichi) (00334285)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------