

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月23日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17743

研究課題名(和文) データ同化を用いたゆっくりすべりの時空間発展とすべりに伴う地震活動予測手法の開発

研究課題名(英文) Data assimilation for predicting the spatio-temporal evolution of slow fault slip and seismicity

研究代表者

加納 将行 (Kano, Masayuki)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：10739056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、巨大地震発生に影響を与えると考えられる余効すべりとスロースリップ(SSE)発生域の摩擦特性の推定、断層すべりの予測のための「データ同化」手法の開発を行った。2003年十勝沖地震の余効すべりが速度強化域で起きていること、またデータ同化により余効すべりの予測性能が向上すること、をアジョイント法で示した。また、琉球海溝南西部のSSEを対象に、GNSS観測データからSSE発生域の摩擦特性が時間変化している可能性を定性的に示し、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて定量的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、将来起こるであろう巨大地震の予測に向けて重要な、断層すべりの様式を支配する摩擦特性の推定と、断層すべりの予測に向けたデータ同化手法の基盤を開発した。本研究で扱った余効すべりやSSEは巨大地震の発生に関連していると考えられるが、数日～数年程度と時定数の長い断層すべりの予測精度が向上したことは、更なる手法の発展により、巨大地震が発生する可能性のある領域への長期的な応力擾乱をより定量的に評価が可能になる可能性を示唆している。関連して、摩擦特性が時間変化する可能性はこれまでの断層すべりの計算では考慮されておらず、今後その観測事実を考慮したより現実的な数値計算を行う必要があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We aim to develop “data assimilation” methods such as an adjoint method and Markov chain Monte Carlo (MCMC) method for estimating the frictional parameters on the afterslip and slow slip areas and for predicting such slow fault slip. First, we have developed an adjoint method and showed that the afterslip in the 2003 Tokachi-oki earthquake occurred in the velocity-strengthening area and that the proposed method improved the prediction of the spatio-temporal evolution of afterslip. Second, we qualitatively showed that frictional parameters in the slow slip area beneath Yaeyama islands, most southwestern part of Japan, may vary with time, based on the GNSS time series analysis. Then, we quantitatively verified this possibility based on the MCMC method.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：データ同化 スロースリップイベント 余効すべり 摩擦特性 GNSS

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震を含む断層すべりの時空間発展の計算には、一般に弾性体の運動方程式と断層面上の摩擦則が用いられる。これらの物理法則に試行錯誤的に摩擦パラメータを与え数値計算を行うことで、過去の地震の繰り返しが定性的に再現できる(Hori et al. 2004 など)。しかし、この摩擦則は岩石実験から得られた経験則であり、複雑な挙動を示す現実のプレート境界にそのまま適用できるかは明らかにされていない。また物理法則に基づく日々の詳細な観測データの説明には至っていない。一方、GPS などの地殻変動データ解析によって、地震時や地震後の断層すべり分布を求める研究が行われている(Miyazaki et al. 2004) など。しかし、その詳細なすべりの時空間変化を、物理法則を用いて説明する試みは行われていない。そこで、これまでの研究では観測データと物理法則を直接結び付ける「データ同化」に注目し、プレート境界で発生している日スケールのすべりを定量的に評価するための手法開発を行ってきた。

申請者は巨大地震の後に震源域の周囲で発生する余効すべりを対象に、数値天気予報でも用いられるデータ同化の一手法であるアジョイント法による摩擦パラメータの推定手法を開発した(加納・他, 2010)。従来の研究では地震の発生間隔など年スケールの観測を定性的に説明する摩擦パラメータを試行錯誤的に求めていたが、ここで開発した手法を用いることで、日スケールの詳細なすべり速度変化を説明する摩擦パラメータを定量的に評価することが可能になった。さらに、開発した手法を用いて、すべり速度擬似データから、摩擦パラメータがどの程度推定できるか、すべりの発展がどの程度予測できるかを検証し(Kano et al. 2013)、実際に Miyazaki et al. (2004) で推定されたすべり速度分布を用いて 2003 年十勝沖地震の余効すべり発生域の摩擦パラメータの推定を試みた。

しかし申請者が開発した手法は、直接観測できないすべり速度をデータとして用いている。そこで本研究では、(1)直接観測可能な地殻変動データが適用可能なシステムに改良し、余効すべり域の摩擦パラメータ・すべりの時空間発展の推定を行う。また、(2)上記で開発した手法を既存のスロースリップ(以下 SSE)に適用し、プレート境界面のすべり現象の理解と、すべりの予測を試行する。加えて、ゆっくりすべり(余効すべりと SSE を合わせてゆっくりすべりと呼ぶ)の発生に伴って、地震活動度が変化することが知られており、(3)ゆっくりすべりの時空間発展に伴う地震活動度の変化予測手法の構築を行う。以上の研究を通して、巨大地震発生に影響を与えるゆっくりすべりのデータを用いたすべりの時空間発展・地震活動度の予測手法を開発し、将来的に発生するであろう海溝型地震の予測体制の基礎の確立を目指す。

本申請に関連して、既に 2003 年十勝沖地震の余効すべりデータ解析を行い、また、地表変位擬似観測で余効すべり域の摩擦パラメータが拘束できる、という予察的な結果が得られている。

2. 研究の目的

巨大地震の発生予測のためには、断層の運動と摩擦構成則の理論に実際の観測データを適用して断層すべりの時空間発展を予測する、「データ同化」の手法の確立が重要である。本研究では、その第一歩としてゆっくりすべりと地震活動に焦点をあて、以下の 3 つのステップについて研究を行い、将来起こりうる海溝型地震の予測体制の基礎を確立しようとするものである。まず、(1)地殻変動データから摩擦パラメータを推定するデータ同化システムの開発を進める。構築したシステムを実際の事例に適用し、(2)ゆっくりすべり発生域の摩擦パラメータの推定とそれに基づくすべりの時空間発展の予測を行う。さらに、(3)すべりの時空間発展と地震活動データに基づく地震活動度変化の予測手法の構築を行う。

3. 研究の方法

本研究では、巨大地震発生に影響を与えると考えられるゆっくりすべりのデータを用いたすべりの時空間発展・地震活動度の予測手法の確立に向けて、アジョイント法を中心としたデータ同化手法の開発を行う。開発した手法の妥当性を、数値実験を用いて検証する。また余効すべりや SSE を観測した GNSS データの解析を行う。解析した観測データに開発手法を適用し、すべり発生域の摩擦特性の推定、断層すべりの時空間発展の予測を試みる。

4. 研究成果

(1)プレート境界面のすべり速度をデータとした余効すべり発生域の摩擦特性の推定とすべりの時空間予測手法の確立(Kano et al. 2015)

GNSS データの時間依存インバージョンで得られる、プレート境界面のすべり速度(Miyazaki et al. 2004)をデータとして、境界面上の摩擦特性を推定する手法を開発した。2003 年十勝沖地震後の余効すべりに開発手法を適用し、余効すべり発生域における摩擦特性の空間分布を推定した(図 1)。また、推定した摩擦特性を用いて既にデータが得られている期間の余効すべりの時空間発展の予測を行い、データ同化によってすべりの予測誤差が減少していることが分かった(図 2)。

本研究は GNSS で観測された余効すべりデータから、プレート境界の摩擦特性の空間分布を初めて推定したものであり、今後様々な領域に適用することで、断層すべりの様子を既定しているプレート境界の摩擦特性の推定に貢献するものである。また、GNSS データの同化により断層すべりの予測能力が向上したことは、断層すべりに伴う応力擾乱の時空間発展の推定精度向上に繋がり、巨大地震の発生予測精度向上に貢献できる可能性があると考えられる。

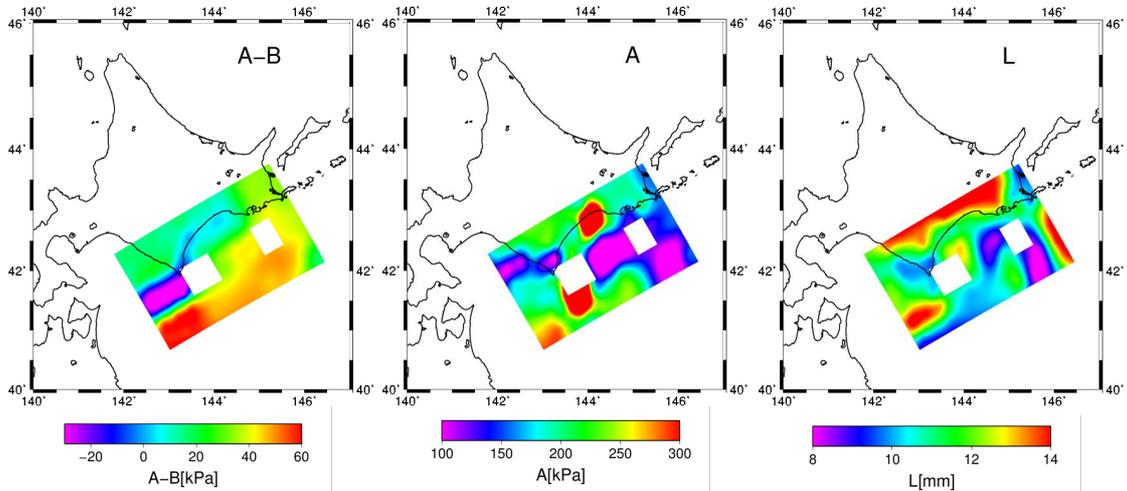


図1 . 2003 年十勝沖地震の余効すべり発生域の摩擦特性の空間分布(Kano et al. 2015, GJI)

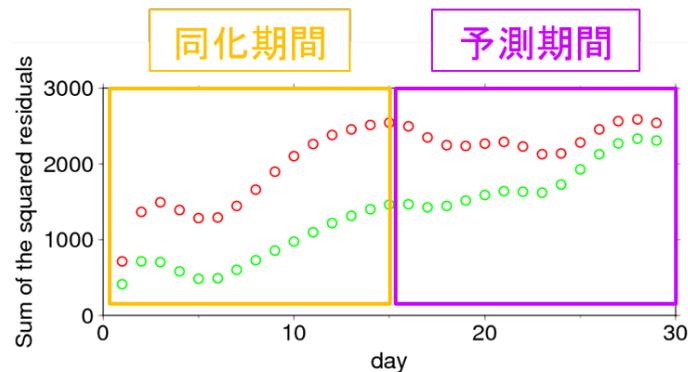


図2 . 観測されたすべり速度と計算値の残差の時間変化。赤丸がデータ同化を行わない場合、緑丸がデータ同化を行う場合、を示している(Kano et al. 2015, GJI を改変)。

(2)時間依存インバージョンを用いた SSE 発生域のすべり速度の時空間発展の推定(Kano et al. 2018)

(1)で開発した手法をスロースリップイベント(SSE)に適用することを念頭に、琉球海溝南部・八重山諸島付近のプレート境界で約半年周期で繰り返し発生している SSE の解析を行った。八重山諸島では国土地理院による GNSS 観測点 8 点に加えて、2010 年以降 SSE 発生域直上付近を中心に京都大学で 4 点の GNSS 観測を行っている。本課題では、2010 年 3 月～2013 年 2 月に観測されたデータに対し、Fukuda et al. (2008)で開発された時空間インバージョン手法(Monte Carlo Mixture Kalman Filter, MCMKF)を適用し、断層すべりの時空間発展を推定した。解析期間中に 5 回の SSE が発生したが、すべての SSE が西表島北西部の深さ 40-60 km のプレート境界の同じ場所で、最大すべり 7-9 cm、モーメントマグニチュード 6.6-6.8 で同様のすべり分布であることが分かった(図3)。一方、SSE の時間発展をみると、すべりの継続時間、最大すべり速度、最大すべり速度に達するまでのすべりの加速の振る舞いが、SSE 毎に異なっていた(図4)。このことは摩擦特性が時間変化している可能性を示唆している。また、SSE 発生域は超低周波地震・低周波地震発生域の深部側に相補的に位置しており、琉球海溝南西部では深さ毎に異なる断層すべり現象が発生していると考えられる。

本課題で得られた成果は、プレート境界の摩擦特性が時間変化する可能性を観測データから始めて示唆したものであり、そのような時間変化を起こす物理メカニズムの解明が今後期待される。

(3)SSE 発生域の摩擦特性推定手法の開発

(2)で示唆された摩擦特性の時間変化の検証を、データ同化を用いた実施した。(1)で用いた断層すべりの時空間発展を計算するモデルを、(2)で観測された GNSS データに同化し、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を用いて摩擦特性の推定を行った。その結果、SSE ごと、また 1 つの SSE の期間内でも摩擦特性が時間変化しているという予察的な成果が得られた。現時点では、1 つのばねブロックを用いたシンプルな系でのみ計算を行っているため、今後自由度の高い断層モデルを用いて更なる検証を行う必要がある。

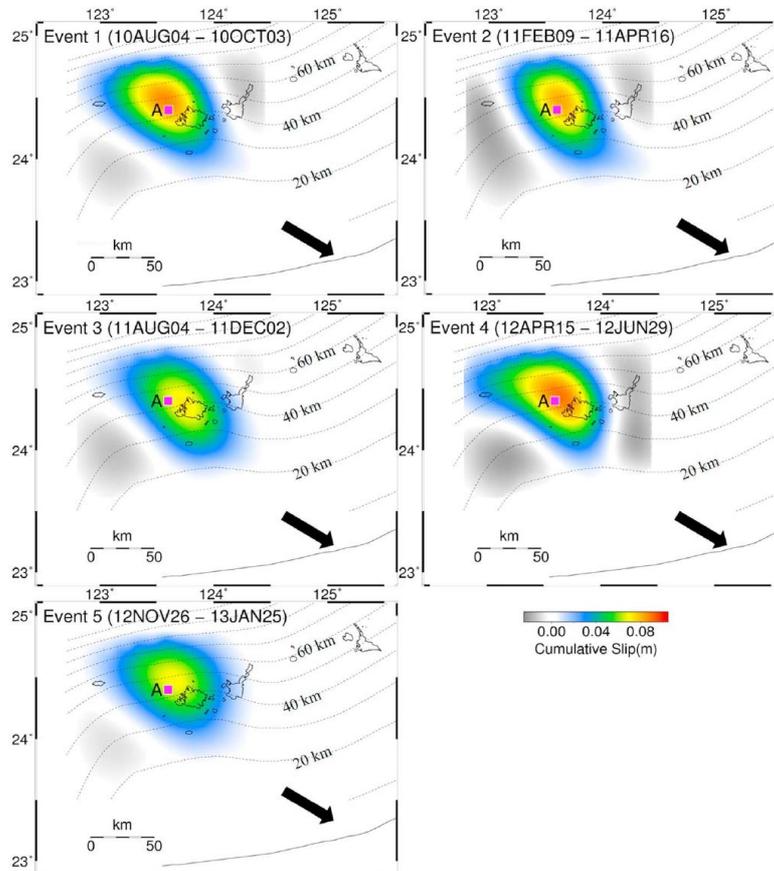


図3 . 5回のSSEのすべり分布 (Kano et al. 2018, JGR)

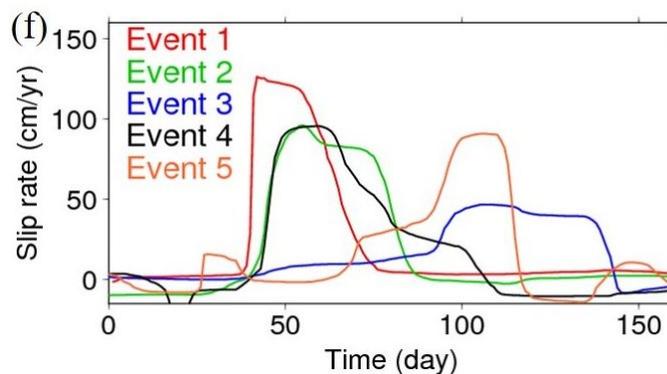


図4 . 5回のSSEのすべり速度の時間変化 (Kano et al. 2018, JGR)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Masayuki Kano, Jun'ichi Fukuda, Shin'ichi Miyazaki, and Mamoru Nakamura, Spatio-temporal Evolution of Recurrent Slow Slip Events Along the Southern Ryukyu Subduction Zone, Japan, From 2010 to 2013. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 査読有, 123, 2018, <https://doi.org/10.1029/2018JB016072>.

Masayuki Kano, Shin'ichi Miyazaki, Yoichi Ishikawa, Yoshihisa Hiyoshi, Kosuke Ito, and Kazuro Hirahara, Real data assimilation for optimization of frictional parameters and prediction of afterslip in the 2003 Tokachi-oki earthquake inferred from slip velocity by an adjoint method, *Geophysical Journal International*, 査読有, 203, 646-663, 2015, doi:10.1093/gji/ggv289.

[学会発表](計14件)

加納将行・宮崎真一・平原和朗、SSE発生域の摩擦特性の推定に向けて、第一回固体地球科学データ同化に関する研究会、2019。

Masayuki Kano, Jun'ichi Fukuda, Shin'ichi Miyazaki, Mamoru Nakamura, Temporal variation of SSEs in the southern Ryukyu subduction zone: Implications for frictional parameters on the fault, *Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018*, 2018.

Masayuki Kano, Jun'ichi Fukuda, Shin'ichi Miyazaki, Mamoru Nakamura, Spatio-temporal evolution of recurrent slow slip events from 2010 to 2013 along the Ryukyu Trench, southwestern Japan, IAG-IASPEI 2017, 2017.

Masayuki Kano, Jun'ichi Fukuda, Shin'ichi Miyazaki, Mamoru Nakamura, Comparison of the spatio-temporal evolution of slow slip events in the Yaeyama Islands, southwestern Japan, JpGU-AGU 2016, 2016.

Masayuki Kano, Shin'ichi Miyazaki, Yoichi Ishikawa, Yoshihisa Hiyoshi, Kosuke Ito, Kazuro Hirahara, Real Data Assimilation for Optimal Estimation of Frictional Parameters and Prediction of Afterslip in the 2003 Tokachi-oki Earthquake by an Adjoint Method, Asia Oceania Geosci. Soc., 12th Annual General Meeting, 2015.

加納将行・鈴木皓博・長尾大道・駒木文保、プレート沈み込み帯における摩擦特性のデータ駆動型空間モデリング、日本地球惑星科学連合大会 2015 年大会、2015.

〔その他〕

ホームページ等

<https://eos.org/research-spotlights/unraveling-the-origin-of-slow-earthquakes>

<https://www.nationalgeographic.com/science/2019/02/earthquake- lasted-50-days-no-one-felt-it-heres-why/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者：なし

(2)研究協力者：なし

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。