

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03702

研究課題名（和文）地殻変動観測に基づくスロー地震現象の相互作用の解明

研究課題名（英文）Study for the interaction among slow earthquakes based on crustal deformation observation

研究代表者

廣瀬 仁（HIROSE, Hitoshi）

神戸大学・都市安全研究センター・准教授

研究者番号：00465965

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）：地球上の様々なプレート沈み込み帯で発生しているスロー地震の発生メカニズムの理解、および、スロー地震間の相互作用を解明することを目的に、多種多様なスロー地震が発生している西南日本の豊後水道周辺地域を研究対象領域として研究を行った。独自のGNSS観測と国土地理院観測網のデータを統合して解析し、スロー地震のなかで最大規模のスロースリップイベント（SSE）と深部微動の発生の関係について、SSEのすべりが微動領域に伝播すると微動が発生するという結果を得た。この成果は異なるタイプのスロー地震の同期現象の発生メカニズムに制約を与えるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

異なるタイプのスロー地震の同期発生現象はいくつか知られているが、その発生メカニズムはあまり分かっていない。本研究は、その同期現象のうちの一つに、観測的な制約を与えるものである。プレート間断層の挙動は不明な点が多いが、一方で、その断層では南海トラフ地震のような巨大地震も発生することが危惧されている。このような研究の進展によって、プレート間地震の破壊伝播の範囲、言い換えると、地震の規模を支配する要因について手掛かりが得られることが期待される。

研究成果の概要（英文）：To elucidate the generation mechanism of slow earthquakes occurring in various subduction zones on Earth and the interaction between slow earthquakes, we conducted research around the Bungo Channel region in southwestern Japan, where a variety of slow earthquakes occur. We integrated and analyzed data from our own GNSS observations and the Geospatial Information Authority of Japan's GNSS observation network to investigate the relationship between slow slip events (SSEs), the largest type of slow earthquake, and deep tremors. The results showed that tremors occur when SSE slip propagates to the tremor area. This is an important finding for understanding the mechanism of synchronous occurrence of different types of slow earthquakes.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：スロースリップイベント 地殻変動 微動 沈み込み帯 プレート間巨大地震 非地震性すべり GNSS 傾斜

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

西南日本の沈み込み帯において、多種多様な「スロー地震」が見つまっている。例えば数 Hz の周波数に卓越する地震波を放射する微動や、地震波を出さず日～年の時間スケールで断層がすべるスロースリップイベント (SSE) などである。これら「スロー地震」は発生が危惧される南海トラフ巨大地震の震源域の周辺域で発生が確認されており、巨大地震の準備過程などと密接な関連があると考えられている。スロー地震の際立った特徴の一つに同期発生がある。例えば微動と継続時間数日程度の SSE (短期的 SSE) が深さ 30～40 km のプレート境界付近のほぼ同じ場所で同期して発生する現象 (ETS) や、豊後水道下で発生する継続時間約 1 年の SSE (長期的 SSE) の加速期に微動が活発化する活動などが知られている。これらの同期現象にはお互いの相互作用が働いていると考えられるが、具体的なメカニズムは良く分かっていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、GNSS や傾斜等の地殻変動観測データに基づき、長期的 SSE と短期的 SSE それぞれの発生場所 (すべり領域) とその時間変化を正確に追跡し、両者の相互作用の様式を明らかにすることである。短期的 SSE は ETS の一部として発生するので、より検知しやすい微動をその指標とできる。一方、豊後水道で 6～8 年周期で発生している長期的 SSE の地殻変動を、我々のグループ独自の観測点および国土地理院の GNSS 観測点でとらえ、そのすべり過程の時間空間発展を推定する。そのうえで両者の活動の位置的・時間的關係を比較することで、同期メカニズムについての理解を深めることを目的とする。

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生直前の GNSS データに、本震発生に至る直前の加速的な非地震性すべりによると解釈される地殻変動が含まれていた、と主張するフランスのグループの論文 (Bletery and Nocquet, 2023) が出版された。これを受けて、スロー地震と密接に関連する本震前の非地震性すべりの存在の有無を、GNSS とは独立したデータセットである傾斜データにて検証することも目的とした。

3. 研究の方法

(1) スロースリップイベントに起因する地殻変動の観測

我々のグループでこれまでに独自に構築してきた豊後水道周辺・日向灘沿岸地域での GNSS 観測点での連続観測を継続するとともに、公開されている国土地理院の GNSS データと合わせて基線解析をすることで座標時系列を得る。

(2) 豊後水道長期的 SSE のすべり過程の解析

GNSS 観測データをもとに、異なる 2 つの時期に豊後水道周辺で発生した SSE のすべり過程を比較する。具体的には 2015～2016 年頃に発生した、より小規模の SSE と、2018～2019 年頃に発生した大規模 SSE である。時間依存のすべり過程の推定には Hirose and Obara (2010), Hirose et al. (2014) にて開発されたインバージョン手法を適用する。

(3) 傾斜データに基づく短期的 SSE すべり分布の推定と、その長期的な活動推移の把握

約 20 年間にわたり蓄積されている防災科学技術研究所 (防災科研) の傾斜データにもとづき、紀伊半島付近で発生する短期的 SSE の地殻変動を検出し、そのすべり分布をなるべく多数の SSE について求める。Hirose and Kimura (2020) の手法を適用する。またこの検出を自動的に行うことのできる機械学習モデルの開発を行う。

(4) 2011 年東北地方太平洋沖地震直前の傾斜変動の検証

Bletery and Nocquet (2023) が依拠している GNSS データとは独立のシステムである防災科研傾斜データに対して、彼らと同様なスタッキング解析を実施し、本震発生の約 2 時間前から始まったとされる地殻変動の有無を調査する。

4. 研究成果

(1) 豊後水道周辺の長期的 SSE と深部微動活動との関係

GNSS 観測データに基づき、2015～2016 年頃および 2018～2019 年頃に豊後水道で発生した 2 つの SSE のすべり域を推定した。2015～2016 年の SSE では、顕著な微動活動が伴わなかったのに対し、2018～2019 年の SSE では明らかな深部微動を伴った。推定されたすべり過程から、前者では SSE のすべり域が足摺岬北西部・豊後水道南部に限定され、微動発生域に達しなかったのに対し、後者では微動発生域まですべりが伝播していた。このことより豊後水道では微動発生域に SSE のすべりが達することによって微動が誘発されることが強く示唆される。また豊後水道西部から宮崎平野沿岸部 SSE 領域へのすべり伝播や、豊後水道西部から足摺岬付近へのすべり伝播など、これまで知られていなかったすべりの伝播経路が確認された (図 1)。この成果について論文を出版した (Hirose et al., 2023)。

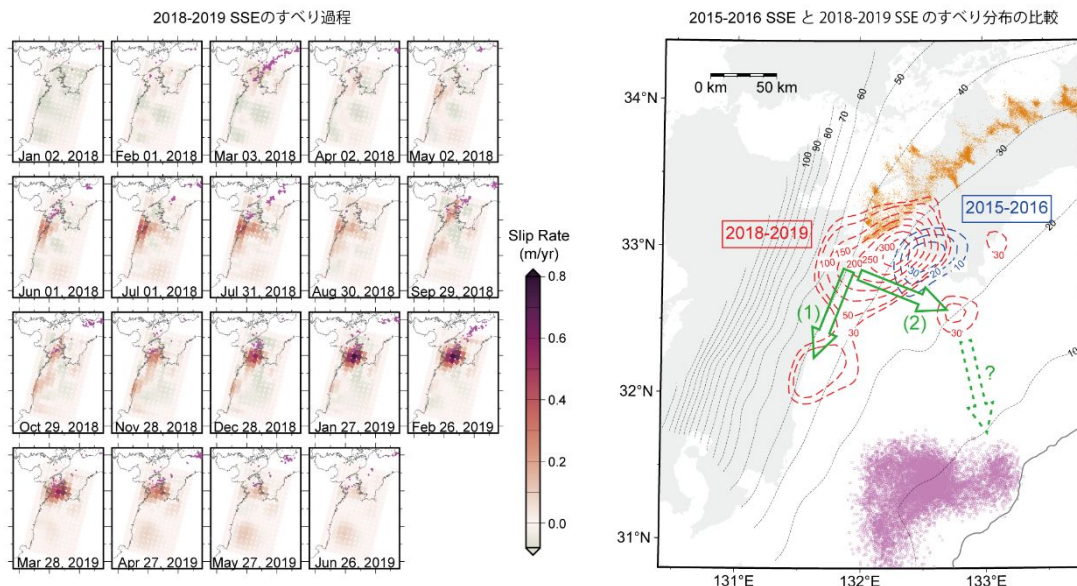


図1(左)GNSSデータから推定した2018-2019豊後水道・日向灘SSEのすべりの時間発展。各フレームの下に表示した日付におけるプレート境界面上のすべり速度を30日ごとにカースケールで示す。紫色の点は当該時間窓に発生した微動の震央(防災科研の微動カタログによる)、(右)2015-2016 SSE(青コンター)および2018-2019 SSE(赤コンター)のすべり分布の比較。橙点は深部微動の震央(防災科研カタログ)、紫丸印は浅部微動の震央(Yamashita et al., 2015, 2021)。緑矢印(実線)は2018-2019 SSE期間中に見られたすべり伝播方向、緑矢印(点線)は、存在するかも知れない、より浅部へのすべり伝播経路。

(2)紀伊半島付近での短期的SSEの長期的な活動推移

防災科研の傾斜記録のデータ解析から、紀伊半島周辺において過去20年弱の間に発生した80個の短期的SSEのすべり分布を求めることに成功した。紀伊半島北部の伊勢湾や志摩半島周辺地域地下のプレート境界において、この活動が数10kmスケールの活動単位(セグメント)におおまかに分かれること、また、それぞれの活動単位で発生間隔が数年の時間スケールで変化するなど長期的にみて特徴的な活動の消長があることがわかった。

(3)傾斜データからSSEによる地殻変動を検知する機械学習モデルの開発

傾斜データから短期的SSEによる地殻変動を自動検知するための機械学習モデルの開発を試みた。地震計の波形データから実体波の到達時刻を読み取るための深層学習手法を参考にした。疑似的な傾斜変動を合成したデータや、Hirose and Kimura (2020)にて検討された四国でのSSEカタログを参照して用意した実データを学習データとして用いた。開発の方向性に関しては手掛かりが得られたが、実用化のためにはさらなる検討や拡張が必要である。

(4)2011年東北地方太平洋沖地震直前の傾斜変動の検証

防災科研の傾斜データにBletery and Nocquet (2023)が提案するスタッキング手法を適用したところ、彼らが主張するような本震発生直前の約2時間前からの加速的な変動は見られなかった。この事実は、もし先駆的なすべりがあったとしても、傾斜スタックデータのノイズレベルである 5×10^{18} Nmの大きさ未満であったことを意味する。この結果は、巨大地震の震源近傍で地震発生に先行するスローなすべり過程に制約を与えるものである。この結果をまとめた論文を投稿した。

<引用文献>

Hirose H. and Obara K., Recurrence behavior of short-term slow slip and correlated non-volcanic tremor episodes in western Shikoku, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2008JB006050, 2010

Hirose H., Matsuzawa T., Kimura T., Kimura H., The Boso slow slip events in 2007 and 2011 as a driving process for the accompanying earthquake swarm, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2778-2785, doi:10.1002/2014GL059791, 2014

Hirose H., and Kimura T., Slip distributions of short-term slow slip events in Shikoku, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, *J. Geophys. Res.*, 125, e2020JB019601. doi:10.1029/2020JB019601, 2020

Bletery Q., and Nocquet J., The precursory phase of large earthquakes, *Science*, 381, 6655, 297-301, doi:10.1126/science.adg2565, 2023

Yamashita Y., Yakiwara H., Asano Y. et al., Migrating tremor off southern Kyushu as

evidence for slow slip of a shallow subduction interface, *Science*, 348, 6235, 676-679, doi: 10.1126/science.aaa4242, 2015

Yamashita Y., Shinohara M., and Yamada T., Shallow tectonic tremor activities in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, based on long-term broadband ocean bottom seismic observations, *Earth Planet Space*, 73, 196, doi:10.1186/s40623-021-01533-x

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Hirose Hitoshi、Matsushima Takeshi、Tabei Takao、Nishimura Takuya	4. 巻 75
2. 論文標題 Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, southwest Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-023-01833-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 廣瀬仁	4. 巻 27
2. 論文標題 statsmodels を用いた GNSS 座標時系列データのスムージング	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 神戸大学都市安全研究センター研究報告	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Okada Yutaro、Nishimura Takuya、Tabei Takao、Matsushima Takeshi、Hirose Hitoshi	4. 巻 74
2. 論文標題 Development of a detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01576-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 副島庸平、廣瀬仁	4. 巻 25
2. 論文標題 紀伊半島北部における短期的スロースリップイベントのすべり領域の傾斜データによる制約 -すべり領域と微動発生領域の空間的比較-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 神戸大学都市安全研究センター研究報告	6. 最初と最後の頁 9-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Okada Yutaro, Nishimura Takuya	4. 巻 50
2. 論文標題 Systematic Detection of Short Term Slow Slip Events in Southcentral Alaska	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023GL104901	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 廣瀬仁, 比嘉友香, 藤井春水, 木村武志
2. 発表標題 傾斜データに基づく SSE 検出のための機械学習手法の開発
3. 学会等名 学術変革領域「Slow-to-Fast地震学」(B03 班) Slow-to-Fast地震のモデリングと予測 2023 年度研究集会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 廣瀬仁, 加藤愛太郎, 木村武志
2. 発表標題 2011年東北地方太平洋沖地震直前の傾斜変動再訪: スタッキングによる検証
3. 学会等名 日本地震学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoka Higa, Hitoshi Hirose, Takeshi Kimura
2. 発表標題 Development of a machine learning model to detect short-term SSEs from tilt records
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirose H, Matsushima T, Tabei T, Nishimura T
2. 発表標題 Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 比嘉友香, 廣瀬仁, 木村武志
2. 発表標題 傾斜データに基づく短期的スロースリップイベント検出のための機械学習手法の開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ukawa T, Hirose H
2. 発表標題 Stress changes caused by Boso slow slip events inferred from seismicity data
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chujo N, Hirose H, Kimura T
2. 発表標題 Changes in long-term activity patterns of interplate slip from short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula, Japan
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirose H, Chujo N, Kimura T
2. 発表標題 Periodic changes in activity pattern of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula, Japan
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬仁
2. 発表標題 スロー地震の用語について: 測地学的見地から
3. 学会等名 スロー地震に関する用語整頓のためのワークショップ, (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣瀬仁, 松島健, 田部井隆雄, 西村卓也
2. 発表標題 Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada
3. 学会等名 学術変革領域「Slow-to-Fast地震学」B03班集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoya Chujo, Hitoshi Hirose, Takeshi Kimura
2. 発表標題 The moment release rate of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula based on NIED Hi-net tilt data (2002-2020)
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Hirose, Takeshi Matsushima, Takao Tabei, Takuya Nishimura
2. 発表標題 Slow slip events in the Bungo Channel and Hyuganada areas from 2018 to 2019 detected by a GNSS observation network
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sawako Teshiba, Hitoshi Hirose
2. 発表標題 A comparison of the source areas in Hyuganada among afterslip of two interplate earthquakes in 1996 and successive slow slip events
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 Hitoshi Hirose, Takeshi Matsushima, Takao Tabei, Takuya Nishimura
2. 発表標題 Slow slip events in the Bungo Channel and Hyuganada areas from May 2018 to June 2019 detected by a GNSS observation network
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 Development of the detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone
2. 発表標題 Yutaro Okada, Takuya Nishimura, Takao Tabei, Takeshi Matsushima, Hitoshi Hirose
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 Naoya Chujo, Hitoshi Hirose, Takeshi Kimura
2. 発表標題 The moment release rate of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula from 2002 to 2015 based on NIED Hi-net tilt data
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Hitoshi Hirose's Webpage http://www2.kobe-u.ac.jp/~zhirose1/

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 Shin'ichi) (00334285)	京都大学・理学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	西村 卓也 (NISHIMURA Takuya) (90370808)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	

	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
研究協力者	木村 武志 (KIMURA Takeshi)	国立研究開発法人防災科学技術研究所 (82102)	

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
---------	---------