

令和元年6月1日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05542

研究課題名(和文)地殻変動と地震活動に基づくスロースリップイベント像の解明

研究課題名(英文) Study on the physical mechanism of slow slip events based on crustal deformation and earthquake activity

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：房総半島沖で数年毎に発生しているスロースリップイベント(SSE)と、それに同期して発生する群発地震活動との関係について調査した。SSEによる応力変化が地震発生を促進していると仮定し、地震の発生している場所での応力変化が負にならないという制約条件を導入した、すべり時間発展のインバージョン解析手法を開発し、すべり領域をよく制約できる可能性が示された。地震活動の群としての性質を調査した。房総SSE期間中に発生する地震群のb値が他の期間に比べて小さいことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GPSなどの地殻変動観測データの解析により、地下で発生する断層すべりを推定しようとする研究は多数行われてきたが、応力変化をその制約条件に使うという研究はほとんどなく、その学術的意義は大きい。またSSE時の群発地震の性質からも応力場についての情報が得られる可能性もある。このような試みによって、すべり領域がより精度良く推定できれば、同じ断層のすべり現象である地震の規模のより良い推定につながる可能性があると考えられ、社会的な意義もある。

研究成果の概要(英文)：We investigated the relationship between slow slip events (SSE) that occur every few years off the Boso Peninsula and accompanying earthquake swarm activity. Assuming that stress changes due to SSE promote the occurrence of earthquakes, we developed an inversion method of time-dependent slip with a constraint that stress changes in places where earthquakes occur are not negative. It is shown that a slip area could be well constrained. The nature of the earthquake activity as a group was investigated. It was found that the b value of earthquakes occurring during Boso SSE periods is smaller than that of other periods.

研究分野：地震学

キーワード：地殻変動 GNSS 傾斜 断層すべり 沈み込み帯 応力変化 グーテンベルグ・リヒター則 b値

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

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯を中心とする世界の様々な場所で、スロースリップイベント (SSE) と呼ばれる現象が観測されてきている。SSE は、主としてプレート境界面上の約 20~40 km の深さで、海溝型巨大地震と同じ低角逆断層型のメカニズムで発生するすべり現象で、その継続時間が数日から数年間と、通常の地震と比較して非常に長いという特徴を持つ。また SSE 自体は地震波を放射せず、その断層運動による地盤の変形が地殻変動観測によって検出される。そのような特徴のため、日本での GNSS (全地球航法衛星システム) 連続観測網 (国土地理院 GEONET) による稠密かつ連続的な地殻変動観測網の構築を契機として、豊後水道 (例えば Hirose et al., 1999) などで世界で初めて検出された。これが世界的に注目され、様々な場所で地殻変動観測の充実が図られ、その活動が徐々に明らかになってきた。

その GEONET により、房総半島沖で SSE の発生が確認されており (例えば, Sagiya, 2004)、1996 年以降研究開始時点で、5 回の SSE による地殻変動が捉えられていた (例えば, Ozawa et al., 2014)。この房総半島 SSE は群発地震活動を伴うという顕著な特徴を持つ。このような SSE と群発地震の同期は世界的に見ても珍しい現象であり、房総以外では、ハワイ島南部沖やニュージーランド北島沖など数か所の報告があるのみである。この SSE と群発地震との関係については、研究代表者らの研究により、房総にて SSE のすべりと地震活動の時間空間的な相関が明らかになっていた (Hirose et al., 2014) が、なぜ SSE と群発地震が時間空間的に同期して発生するのか、メカニズムはよく分かっていない。

2. 研究の目的

本研究は、SSE と群発地震が時間空間的に同期して発生するメカニズムの解明を大きな目標としている。1 つの仮説として、SSE 発生により周囲の媒質に静的応力が再配分され、発生直前の状態にある複数の地震の震源域に「最後のひと押し」が加わることによって破壊応力レベルを超え、それらの地震が群発する、という考え方が提案されている (例えば, Segall et al., 2006)。本研究ではこの立場に立ち、SSE のすべりと群発地震との間を応力変化がつかないでいると仮定し、両者の間の定量的な関係性を明らかにすること、そして、地震活動の情報を地殻変動データ解析の枠組みに同時に組み込み、SSE のすべりの空間分解能の向上に役立つかどうかを検証することを目的とした。

また、準備したデータセット、とくに地震活動 (震源カタログ) の性質を調査する過程において、当初想定していなかったことが分かってきた。ある地震群 (例えば、ある地域において、ある期間に発生したすべての地震) に対してかなり普遍的に成り立つ経験的な関係としてグーテンベルグ・リヒター則というものがあることが知られている。これは、地震群の規模 (マグニチュード) 別頻度分布の図を描いた時に、地震のマグニチュードとその個数の常用対数との間に直線的な関係が成り立つというものである (Gutenberg and Richter, 1944)。そしてその直線の傾きは「b 値」と呼ばれるが、この値はある程度広い空間範囲かつある程度長い期間を取った場合、地域や時代にほとんどよらず 1 前後の値をとる。しかしながら、例えば 2011 年東北地方太平洋沖地震に先立つ 10 年間程度の b 値が時間とともに低下していく (Nanjo et al., 2012) など、b~1 から外れる地震群があることも知られている。そして房総半島 SSE に伴って発生している群発地震もそのような例外のひとつである可能性が出てきた。そこで本研究では、その b 値を詳しく調べ、b 値変化と関係があると指摘されている、地震発生領域での応力状態などについて考察することを、研究の進展とともに目的に加えた。これは上記の目標に大きく資するものである。

3. 研究の方法

(1) SSE による応力変化と地震活動との定量的関係の調査

房総半島周辺地域に存在する国土地理院 GEONET および防災科学技術研究所高感度地震観測網 (NIED Hi-net) の既存の地殻変動観測データ (変位および傾斜) をもとに推定されている、2007、2011、2014 年の各 SSE でのすべり時空間発展 (例えば, Hirose et al., 2014) を入力データとし、そのすべりによる応力変化を地下の任意の場所において計算するためのプログラムを作成する。SSE に伴う群発地震が発生している領域を複数選び、作成したプログラムを用いてその場所での応力変化を時間の関数として計算する。それぞれの領域で、計算された応力変化と発生した地震数とを時間軸上で比較し、両者の関係を調べる。

(2) 地震活動データを利用した地殻変動インバージョンの拡張

Hirose et al. (2014) などで開発した、地殻変動観測データから SSE のすべり時空間発展を推定するインバージョン解析手法を拡張し、任意の場所での応力変化に対して制約条件を設けられるように改良する。これは、群発地震発生場所において、地震発生を促進するような応力変化があった場合に正の値をとる CFS (Coulomb Failure Stress) という指標が必ず 0 以上になるという制約条件を新たに加えて、地殻変動データのインバージョン解析を行いすべり時空間発展を推定しようとするものである。拡張された手法の性質を評価するため、合成データを作成してインバージョン解析を行う。

(3) SSE に伴う群発地震の b 値の調査

気象庁・文部科学省が協力してデータを処理した「一元化処理震源カタログ」(日本周辺で発生した地震の発震時・震源位置・マグニチュードなどのリスト)を利用し、房総半島 SSE の期間中にそのすべり域付近で群発地震が発生している空間領域を設定し、それに含まれる地震のマグニチュード別の頻度分布を調べる。これを過去のなるべく多くの SSE に対して行う。またこれらと対比するため、SSE の発生していない時期(イベントとイベントの間という意味で「イベント間」とよぶ)に、同じ空間領域で発生する地震のマグニチュード別頻度分布を調べる。得られたそれぞれの頻度分布に対して、最尤法によって b 値を求める(宇津, 1965)。これらのデータ解析により、房総半島 SSE のすべり域付近で発生する地震の b 値が時期によって変化するのかどうかについて調べる。

4. 研究成果

上記の研究の方法(1)~(3)のそれぞれについて、成果を述べる。

(1) 断層すべりの時空間変化を入力とし、地下の任意の場所での応力変化を時間の関数として求めることができるプログラムを作成した(廣瀬・松澤, 2018)。これを用いて、2007, 2011, 2014 年の各 SSE における応力変化を計算した。その応力変化を評価した場所は、これら 3 回の SSE を通して群発地震がクラスターの的に集中して発生した 3 か所を選んだ。この 3 か所は震源分布からプレート境界の深さに位置すると仮定し、応力を評価する面はプレート境界面とした。この計算結果と、地震の累積個数を時間の関数として表示し比較した。

その結果、地震が活発に発生している場所においても、計算された応力が正に変化する場合と負に変化する場合との両方のケースがあった。また、地震活動が活発化するタイミングと応力変化についても、応力変化の極大時に対応するケースや、応力変化速度が大きくなったタイミングが地震活動の活発化に関連するよう見えるケースなど、多様なケースが見られた。これらの結果から、応力は地震活動の活発化を引き起こす重要な要因の一つであることは間違いないが、応力以外にも重要な要因がある可能性が示唆された(Hirose et al., 2018, JpGU)。

(2) 地殻変動観測データから SSE のすべり時空間発展を推定するインバージョン解析手法(Hirose et al., 2014)をもとに、(1)のような応力変化計算ルーチン、および、そこで計算された応力変化指標である CFS が非負となるような制約条件付きのインバージョン手法を開発した。この手法の特徴を評価するため、水平な平面断層の上にすべり領域を設定し、その周囲の部分に地震が発生している(CFS = 0 の制約を設定する)領域を仮定した。地表に GPS 観測点を配置して合成データを作成し、そのインバージョンですべり領域がどの程度制約されるかを見た。その結果、観測点分布が相対的に好条件の場合、CFS の制約条件を加えることで、すべり域の「染み出し」を多少抑えることができることが確認された(例えば, Tanaka and Hirose, 2017, AGU)。

(3) 2002, 2007, 2011, 2014 の 4 回の SSE 時およびそれらの「イベント間」での b 値を推定したところ、少なくとも 2007, 2011, 2014 の 3 回の SSE 時に、イベント間と比較して有意に b 値が低下することが確認された。この b 値の低下がどの場所での地震活動に対応しているものかを調べるために、空間領域をさらに北と南に 2 分して同様に b 値を推定した。その結果、特に北部の地震活動に対応して b 値が低下することが分かった(Noda and Hirose, 2019, JpGU)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

廣瀬仁、松澤孝紀、スロースリップイベントによる応力時間変化の計算: 房総半島スロースリップイベントへの適用と地震活動との対比、神戸大学都市安全研究センター研究報告、査読無し、22、2018、20-25、

http://www.rcuss.kobe-u.ac.jp/publication/Year2018/pdfEach22/22_02.pdf

田村和華子、木村武志、廣瀬仁、傾斜データを用いたスロースリップイベントのすべりのインバージョン、神戸大学都市安全研究センター研究報告、査読無し、21、2017、16-26、

http://www.rcuss.kobe-u.ac.jp/publication/Year2017/pdfEach21/21_02.pdf

竹内里紗、廣瀬仁、松島健、田部井隆雄、西村卓也、GNSS 観測による豊後水道周辺でのプレート間すべりの分解能、神戸大学都市安全研究センター研究報告、査読無し、20、2016、9-17、

http://www.rcuss.kobe-u.ac.jp/publication/Year2016/pdfEach20/20_02.pdf

[学会発表](計 19 件)

Hitoshi Hirose, Takeshi Matsushima, Takao Tabei, Takuya Nishimura, A small slow slip event in Bungo Channel from December 2015 to March 2016 detected by a GNSS observation network, AGU Fall Meeting 2018, Washington, D.C., USA, 10-14 December 2018

Wakako Tamura, Takeshi Kimura, Hitoshi Hirose, Slip distributions based on tilt change data for short-term slow slip events in western Shikoku, southwest Japan, AGU Fall Meeting 2018, Washington, D.C., USA, 10-14 December 2018

廣瀬仁、松島健、田部井隆雄、西村卓也、豊後水道 GNSS 観測網で捉えた 2015 年 12 月~2016 年 3 月頃の小規模なスロースリップイベント、日本地震学会 2018 年秋季大会、福島県郡山市、

2018年10月9-11日

Hitoshi Hirose, Takeshi Matsushima, Takao Tabei, Takuya Nishimura, A small slow slip event in Bungo Channel from December 2015 to March 2016 detected by a GNSS observation network, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018, 福岡市, 2018年9月21-23日

Wakako Tamura, Takeshi Kimura, Hitoshi Hirose, Slip distributions based on tilt change data for short-term slow slip events in western Shikoku, southwest Japan, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018, 福岡市, 2018年9月21-23日

Hitoshi Hirose, Kouta Nakano, Takanori Matsuzawa, A comparison of the stress evolutions due to Boso slow slip events and the accompanying earthquake swarms, JpGU Meeting 2018, 千葉市, 2018年5月20-24日

Wakako Tamura, Hitoshi Hirose, Takeshi Kimura, Slip inversion based on tilt change data for short-term slow slip events in western Shikoku, southwest Japan, JpGU Meeting 2018, 千葉市, 2018年5月20-24日

廣瀬仁, スロー地震研究: 地震学・測地学をまたぐ, 平原和朗先生退職記念研究集会「夢のある話を」, 京都市, 2018年3月19-20日

廣瀬仁, 地殻変動観測によるスロー地震, 新学術領域「スロー地震学」C02 班研究会「スロー地震の物理4」, 神戸市, 2018年3月15-16日

Taku Tanaka, Hitoshi Hirose, A stress-constrained geodetic inversion method for spatiotemporal slip of a slow slip event with earthquake swarm, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, LA, USA; 11-15 December, 2017

中東和夫, 蔵下英司, 松島健, 手繰佳子, 宮町凜太郎, 渡邊早姫, 廣瀬仁, 豊後水道水ノ子島での地震観測, 日本地震学会2017年度秋季大会, 鹿児島市, 2017年10月25-27日

Taku Tanaka, Hitoshi Hirose, A stress-constrained geodetic inversion method for spatiotemporal slip of a slow slip event with earthquake swarm, Joint Workshop on Slow Earthquakes 2017, 松山市, 2017年9月19-21日

Wakako Tamura, Takeshi Kimura, Hitoshi Hirose, Slip inversion for a slow slip event based on tilt change data, Joint Workshop on Slow Earthquakes 2017, 松山市, 2017年9月19-21日

Takuya Nishimura, Takeshi Matsushima, Takao Tabei, Hitoshi Hirose, Short-term SSEs detected by GEONET and a new GNSS array from western Shikoku to the Ryukyu Islands, Joint Workshop on Slow Earthquakes 2017, 松山市, 2017年9月19-21日

Taku Tanaka, Hitoshi Hirose, A stress-constrained geodetic inversion method for spatiotemporal slip of a slow slip event with earthquake swarm, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 千葉市, 2017年5月20-25日

廣瀬仁, 宮崎真一, 松島健, 田部井隆雄, 山崎健一, 西村卓也, スロースリップイベントのすべり域制約のためのGNSS観測計画, 新学術領域「スロー地震学」観測班集会, 東京都文京区, 2017年1月13日

Rie Kurisu, Hitoshi Hirose, Takuya Nishimura, Spatial variation in Earth structure inferred by GNSS seasonal deformations due to snow loads in northeast Japan, AGU Fall Meeting 2016, San Francisco, CA, USA; 12-16 December, 2016

栗栖理恵, 廣瀬仁, 西村卓也, GNSS年周地殻変動と積雪荷重の対比から見る地盤構造の地域性, JpGU Meeting 2016, 千葉市, 2016年5月22日~26日

Kazushige Obara, Ryota Takagi, Yusuke Yamashita, Youichi Asano, Takanori Matsuzawa, Sachiko Tanaka, Hitoshi Hirose, Takuto Maeda, Interaction between slow earthquakes in and around Bungo channel, Nankai subduction zone, JpGU Meeting 2016, 千葉市, 2016年5月22日~26日

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.kobe-u.ac.jp/~zhirose1/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：松澤孝紀

ローマ字氏名：MATSUZAWA, Takanori

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。