

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04036

研究課題名（和文）1kPa以下の応力変化による地震活動の消長：グローバルからローカルまで

研究課題名（英文）Seismicity modulated by stress changes below 1kPa: From global to local scales

研究代表者

三井 雄太 (Mitsui, Yuta)

静岡大学・理学部・准教授

研究者番号：80717950

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地表変位データ解析のための基礎技術開発を行いながら、地表変位と地震活動との比較研究を進めた。主な成果として、以下の2つがある。(1)2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動・余震活動の時間減衰に違いがあることを見出した。両者をべき乗則でモデル化した上で、単純な摩擦力学から予測される結果とは異なる傾向であることを示した。(2)トンガ海溝沈み込み帯において、地表の非定常変位と深発地震の活動低下とが同時期に生じていたことを発見し、大規模なスローイベントが発生していた可能性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地下の地震活動と地表で観測される変位との関係について、機械学習など情報科学分野の技術を取り入れつつ、解析を進めた。その結果、大きな地震の後に余震がどのように減っていくか、あるいは、プレート沈み込み帯の浅部と深部にどのような繋がりが有り得るかに関して、複数の知見を得た。いずれも、複雑な時間的性質を持つ地震活動の定量的理解を深める上で、1つのカギとなるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we developed fundamental techniques for analyses of surface displacement data and conducted comparative studies of surface displacement and seismicity. The two main results are as follows: (1) We found that there was a difference in the temporal decay of the postseismic deformation and the aftershock activity of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. By modeling both of them following the power law, we showed that their characteristics were different from the results predicted from simple friction dynamics. (2) At the Tonga Trench subduction zone, we found that surface transient displacement and quiescence of deep earthquake seismicity occurred at about the same time, suggesting that a large-scale slow event may have occurred.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地震 GNSS 余効変動 スローイベント 沈み込み帯 摩擦 深発地震 機械学習

## 1. 研究開始当初の背景

ほとんどの非火山性自然地震は、数年から数千年かけて蓄積された応力が断層のせん断破壊(すべり)により解放される現象、とみなせる。このような地震は、必ずしも孤立した場で発生するわけではない。地震が断層上で自発的に発生する直前に外力の擾乱が加われば、「最後の一押し」として地震が誘発されるだろう。このような外力と地震活動との関係は多く研究されてきたが、包括的・定量的な理解には未だ至っていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、グローバルからローカルまでの観測データ解析に基づき、何らかの変化が地震発生場に加わったとき地震の数・発生場所等がどのように変化するか、という観点から、外力と地震活動との関係を解明することを目的とする。

## 3. 研究の方法

全地球航法衛星システム(GNSS)に基づく地表変位データ、地震活動データ等を解析し、両者の対応を探る。既往の解析手法を用いるだけでなく、機械学習など情報科学分野の知見を取り入れた手法開発も同時に進めていく。統計的な議論だけでなく、断層力学の知見にも基づいた考察を行う。

## 4. 研究成果

### (1)

GNSSの時系列データに対して、機械学習技術の導入を進めた。S/N比が大きい地表変位イベントの例として、2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動をテストケースとした。機械学習技術の1つである再帰型ニューラルネットワークを余効変動の時系列データに適用し、余効変動の時空間的発展の特徴を抽出することに初めて成功した。この成果は、Geophysical Research Letters 誌から査読付論文として出版された(Yamaga and Mitsui, 2019)。

### (2)

スパースモデリングによる逆解析技術の導入を進めた。富士山の火山性変動をテストケースとした。2008-2010年頃に見られた膨張の力源の深さ推定に成功し、その後の地震活動との対応関係を議論した。この成果は、Journal of Volcanology and Geothermal Research 誌から査読付論文として出版された(Mitsui and Kato, 2019)。

### (3)

(1)と同じ2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動をテストケースとして、余効変動と地震活動(余震)との時間減衰特性の違いを4桁の時間スケールにわたって比較した。モデルとしてべき乗則を採用し、両者が乖離していたことを発見した。具体的には、地震活動が余効変動より早く収束する傾向が見られた。これは、単純な1枚断層を仮定した従来の摩擦力学モデルから予測される結果とは逆の傾向である。この成果は、Earth, Planets and Space 誌から査読付論文として出版された(Morikami and Mitsui, 2020)。

### (4)

プレート沈み込み帯深部における地震活動の消長について、グローバルな地震カタログデータと Epidemic-Type-Aftershock-Sequence モデル(ETAS モデル)を用いた調査を行った。その結果、深発地震活動が世界でもっとも活発なトンガ海溝沈み込み帯において、浅部で発生した M8.1 の正断層地震(2009年サモア沖地震)後に深発地震の一時的な活動低下が生じていたことを見出した。同時期を含む期間の地表変位について、トンガ海溝周辺の GNSS 観測点の時系列データを確認したところ、2009年サモア沖地震の震央より 500 km 以上南方の観測点において海溝方向の非正常変位が数年にわたって発生していた。3次元粘弾性シミュレーションを用いて検討したところ、同変位を2009年サモア沖地震に対する標準的な余効変動として解釈することは困難であった。観測点がごく限られているため空間分布についての詳細な議論は不可能であったが、深発地震の活動低下と時期が重なっていることから、沈み込み帯の広域にわたる大規模なスローイベントの発生が示唆された。このスローイベ

ントは 2009 年サモア沖地震の直後から始まり、2013 年の稍深発地震(M7.4)発生頃に収束している。これらのイベント間の静的応力変化はごく小さいはずだが、海洋プレート由来の流体等を介した相互作用の可能性も考えられる。この成果は、Scientific Reports 誌から査読付論文として出版された(Mitsui et al., 2021)。

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yuta Mitsui, Hinako Muramatsu, Yusaku Tanaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Slow deformation event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-020-80728-w	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 三井雄太、渡邊識	4. 巻 73
2. 論文標題 地表変位速度場のソフトクラスタリングに基づく 伊豆半島およびその周辺の地体構造区分	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地震	6. 最初と最後の頁 27~35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4294/zisin.2019-5	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 -
1. 著者名 Shunsuke Morikami, Yuta Mitsui	4. 巻 72
2. 論文標題 Omori-like slow decay ( $p < 1$ ) of postseismic displacement rates following the 2011 Tohoku megathrust earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-020-01162-w	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 Norifumi Yamaga, Yuta Mitsui	4. 巻 46
2. 論文標題 Machine learning approach to characterize the postseismic deformation of the 2011 Tohoku Oki Earthquake based on recurrent neural network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 11886~11892
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL084578	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 -

1. 著者名 Yuta Mitsui, Takahiro Kato	4. 巻 378
2. 論文標題 Magmatic inflation in 2008-2010 at Mt. Fuji, Japan, inferred from sparsity-promoting L1 inversion of GNSS data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 29 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2019.04.012	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32件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 三井雄太
2. 発表標題 (準)周期的変動を含む測地データのLSTM深層学習：人工データでのテスト
3. 学会等名 日本測地学会第136回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小杉一誠・三井雄太
2. 発表標題 日本列島のGNSS水平ひずみ速度場と地震メカニズム解の比較
3. 学会等名 日本測地学会第136回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三井雄太・上原啓嗣・小杉一誠・松尾功二
2. 発表標題 南海トラフのプレート内地震活動度と長期的スロースリップイベントの時空間的關係
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Mitsui, Keiji Uehara, Issei Kosugi, Koji Matsuo
2. 発表標題 Spatiotemporal relations between intraplate seismicity and large long-term slow slip events along the Nankai Trough
3. 学会等名 Slow Earthquakes WS 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小杉一誠・三井雄太
2. 発表標題 最適化された距離減衰定数を用いた日本列島のひずみ速度場推定
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 Yuta Mitsui, Hinako Muramatsu, Yusaku Tanaka
2. 発表標題 Slow deformation event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench inferred from geodetic and seismological data
3. 学会等名 EGU General Assembly 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Mitsui, Hinako Muramatsu, Yusaku Tanaka
2. 発表標題 Slow deformation event following large intraslab earthquake at the Tonga subduction zone
3. 学会等名 AGU 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Issei Kosugi, Yuta Mitsui
2. 発表標題 Long-term postseismic deformation at the eastern margin of the Japan Sea implied by temporal changes in the strain rates and background seismicity rates
3. 学会等名 AGU 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Norifumi Yamaga, Yuta Mitsui
2. 発表標題 A recurrent neural network approach to characterize the postseismic deformation of the 2011 Tohoku Oki Earthquake
3. 学会等名 AGU 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinichi Oba, Yuta Mitsui
2. 発表標題 A statistical analysis of stick-slip experiments for bridging the scale gap between natural and lab earthquakes
3. 学会等名 AGU 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大庭伸一・三井雄太
2. 発表標題 個別要素法を用いた粉体のせん断に伴う間欠的なイベントの発生条件の検証
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三井雄太・村松雛子・田中優作
2. 発表標題 トンガ海溝における大きなスラブ内地震間のスローイベント
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小杉一誠・三井雄太
2. 発表標題 ひずみ速度推定における距離減衰定数の最適化に関する検討
3. 学会等名 日本測地学会第134回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三井雄太・加納将行
2. 発表標題 東海地方の深部短期スロースリップイベント発生時期における駿河トラフ上盤 - 下盤間のGNSS基線長変化
3. 学会等名 日本測地学会第134回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三井雄太
2. 発表標題 GNSSデータのElastic Netインバージョンに基づく膨張力源の3次元分布推定：2008-2010年富士山膨張イベントの例
3. 学会等名 日本火山学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Yuta Mitsui
2. 発表標題 Omori-like decay of postseismic velocities from early stages of the post-Tohoku EQ: Was it truly caused by 'afterslip'?
3. 学会等名 Slow Earthquakes WS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大庭伸一・三井雄太
2. 発表標題 スティック・スリップ実験の統計的解析：慣性項・ガウジの影響
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小杉一誠・三井雄太
2. 発表標題 面積歪み速度・常時地震活動度の経年変化が示唆する日本海東縁変動帯での長期的余効変動
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三井雄太・渡邊誠
2. 発表標題 GNSSデータのソフトクラスタリングに基づく伊豆半島周辺の変位場の統計的分類
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三井雄太・山佳典史・森上竣介
2. 発表標題 余効変動の特性化に関する2つの萌芽的研究：ニューラルネットワークによる学習・改良大森則
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三井雄太・村松雛子・田中優作
2. 発表標題 GNSS・GRACE・地震活動が示唆するトンガ海溝の非定常スローイベント
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 山佳典史・三井雄太
2. 発表標題 再帰型ニューラルネットワークに基づく2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動の学習・予測
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 Yuta Mitsui, Hinako Muramatsu, Yusaku Tanaka
2. 発表標題 Long-term slow event at the Tonga Trench inferred from GNSS, GRACE, and seismicity
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norifumi Yamaga, Yuta Mitsui
2. 発表標題 Machine learning of postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on recurrent neural network
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinichi Oba, Yuta Mitsui
2. 発表標題 Inertia term governs displacement of stick-slip experiment
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三井雄太・渡邊誠
2. 発表標題 GNSSデータのソフトクラスタリングに基づく伊豆半島基部のブロック境界推定：東海スロースリップ前後で変化はあったか？
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 山佳典史・三井雄太
2. 発表標題 再帰型ニューラルネットワークによる2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動の機械学習
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 大庭伸一・三井雄太
2. 発表標題 スティック・スリップ実験のすべり量を支配する慣性項
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 三井雄太・加藤隆寛
2. 発表標題 GNSSデータのL1インバージョンに基づく2008-2010年富士山膨張イベントの力源深さ推定
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 大庭伸一・三井雄太
2. 発表標題 自然地震のすべり - 長さスケールリング則と室内実験との距離の定量化
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 山佳典史・三井雄太
2. 発表標題 再帰型ニューラルネットワークによる2011年東北沖地震後の余効変動予測の試み
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 三井雄太・森上竣介
2. 発表標題 Slow decay of postseismic deformation compared with aftershocks following the 2011 Tohoku-oki Earthquake
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 岩田孝仁、北村晃寿、小山真人、生田領野、三井雄太、石橋秀巳、川本竜彦、原田賢治、木村浩之、今泉文寿、狩野謙一、池田昌之、藤原治	4. 発行年 2020年
2. 出版社 静岡新聞社	5. 総ページ数 256
3. 書名 静岡の大規模自然災害の科学	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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