

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：23803

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05050

研究課題名（和文）地震活動度に基づいて断層周辺の応力状態を推定する研究

研究課題名（英文）A study to evaluate stress state in and around a fault zone based on micro seismicity

研究代表者

楠城 一嘉（Nanjo, Kazuyoshi）

静岡県立大学・その他部局等・特任准教授

研究者番号：10549504

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）：目的は、中小規模の地震活動度の変化から、大地震に伴う地下の応力状態の変化が推定できるかを明らかにすることである。応力状態の推定に活用できる複数の手法が提案されているので、本研究ではこれらを網羅的に適用する環境整備をした。成果は、大地震を起こした断層周辺の詳しい応力変化を捉えた事例を示せたことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義 | 応力状態の推定に活用できる複数の手法が提案されてきたが、手法間の比較は積極的には行われなかった。本研究の立場は従来と異なり、複数の手法を併用し互いに補う戦略をとった。この戦略により、丁寧に地震活動を見るチャンスが生まれると考えた。手法間の比較を容易にする研究環境を整備できた点で意義がある。

社会的意義 | 地震が続発する可能性があるかどうかを評価する事例を示せた点で本研究は意義がある。後続の大地震に対して事前の備えを充実させるなど被害の軽減につなげることに資する基礎研究として位置付けられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose is to clarify whether the change of the stress state in the underground caused by the occurrence of large earthquakes can be estimated from the change of the seismicity of small-scale magnitudes. Since several methods that can be utilized for estimating the stress state have been proposed individually, this study has made a research environment to apply them comprehensively. The result was to demonstrate several cases using this environment to reveal detailed stress changes around the fault zone where a large earthquake occurred.

研究分野：防災工学

キーワード：地震 応力 断層 防災工学 地殻変動

1. 研究開始当初の背景

大地震の発生に関連して中小規模の地震活動が変化するという報告は地震学の黎明期からある。そして、大地震前には地震活動が変化する現象も数多く報告されている。更に、地震活動の変化を将来の活動予測に応用する試みも数多くなされている。

地震活動の変化を定量的に評価するには、高精度の地震カタログが存在する事が前提となる。日本では、気象庁が長年この役目を担っており、1923年以降、全国的な地震のカタログが存在する。これは時代により、検知能力や決定精度が異なっているが、日本の地震学の大いなる発展に寄与するものであった。1995年兵庫県南部地震を契機に、全国をより高精度でカバーする高感度微小地震観測網(Hi-net)が展開され(Obara et al., 2005)、日本は世界で最高レベルの地震観測網を保持するに至った。その結果、それまで年間約1万個程度の地震検知数であったが、それ以降の検知数は約10万個と飛躍的に検知数が増加した。1997年には、気象庁・大学等の観測網のデータやHi-netのデータの統一がなされ(いわゆる、一元化地震カタログ)、現在データが蓄積されている。さらに、Hi-net稼働開始から約20年経過し、多くの地震の震源データが蓄積されてきたことを受けて、地震波形データの波形相関を用いて再決定した精度の高い震源カタログ(JUICE)が新たに構築された(Yano et al., 2017)。新時代の地震活動研究を推進する環境が整ったと言える。

地震データの高度化と相まって、地震活動の変化をより高精度で抽出できるようになってきた。その中で、応力状態の推定に活用できるものがある。応力状態に注目するのは、高応力の場所から将来の地震の破壊が開始する報告がしばしばあることによる。本研究チームの実績がある手法は、以下の通りである。

- 地震の規模別頻度分布を特徴づける b 値
- 大地震後に引き続いて発生する小さい地震(余震)の減衰率を表す p 値
- 地震の静穏化を特徴づける Z 値と RTM 法
- すべての地震は余震を伴うことをモデル化した ETAS
- 大地震の震源付近に中小地震が集中するマイグレーション

このような複数の解析手法を適用して、見えない地下の応力状態を確度高くそして詳細に推定できるかが本課題の問いである。

2. 研究の目的

地震活動を解析し(手法 -)、地下の応力状態の推定をすることが本研究の目的である。本研究で注目するのは、大地震後の応力状態の推定である。

2016年熊本地震の研究から、その地震前後で中小規模の地震活動が変化したことが明らかになった(Nanjo et al., 2019)。その変化から、熊本地震を起こした布田川断層と日奈久断層で大局的に応力が減少したが、日奈久断層の中部では応力の増加が示唆された(図1)。今後更に応力が増加する様なことがあれば、その日奈久断層の中部が破壊の起点となり、これまで活動が活発でない日奈久断層の南部に破壊が進展する地震が発生することが示唆された。このように、地震活動度の解析は、大地震によって引き起こされる応力変化を推定できる可能性がある。本研究では、中小規模の地震活動度の変化から、他の大地震でも応力状態の変化が推定できるかを明らかにする。応力状態の推定に活用できる複数の手法(-)が提案されているので、これらを網羅的に適用することで、推定の確度を向上させつつ、詳しい応力状態の変化を捉えられる可能性がある。この研究から、今後、地震が続発する可能性があるかどうかの示唆を得られる可能性がある。

3. 研究の方法

これまでの地震活動の研究は、各研究者がそれぞれの思想のもと、個別に個性を発揮して実施してきたため、手法間の比較は積極的には行われなかった。本研究の立場は従来と異なり、完璧な手法は無いと言う立場をとる。つまり、複数の手法(-)を併用し互いに補う戦略をとる。むしろこの戦略により、丁寧に地震活動を見るチャンスが生まれると考えている。これは、本研究の独自性であり、手法間の比較を容易にする研究環境を整備する点で意義がある。この種の研究への批判は、地殻変動の対応が十分に議論できていないことである。そこで本研究では、断層運動による地殻の変形をモデル化できるクーロン応力(Toda et al., 2005)などを援用して、地殻変動のデータを活用する。

4. 研究成果

中小規模の地震活動に基づく複数の手法を網羅的に適用できる研究環境を整備し、応力状態の推定の確度を向上させ詳しい応力変化を捉えた事例((1)~(5))を示せたことが研究成果である。

る。

- (1) 2019年カリフォルニアのリッジレスト地震(マグニチュード $M6.4$ と 34 時間後の $M7.1$)前後の地震活動を手法 A 、 B 、 C を用いて精査した(Nanjo, 2020, Nature Communications)。 $M6.4$ の地震前の 10 年と $M6.4$ の地震と $M7.1$ の地震の間の時期において、それぞれの来たる $M6.4$ の地震、 $M7.1$ の地震の震源周辺 5-10km に局在した顕著な応力増加を見出した。後者については、 $M6.4$ の地震によるクーロン応力変化が $M7.1$ の地震を促進するセンスであり余震の減衰も悪く、地震活動の空間集中化もこの場所だけで顕著であった。
- (2) 手法 A と B の b 値と p 値を 2016 年の熊本地震と適用して、本震の起きる布田川断層では、応力が本震の発生直前に緩和したことが分かった(Nanjo et al., 2022, Tectonophysics)。さらに、ゆっくりした滑り(断層に沿って瞬時に滑る通常地震と異なるゆっくりした滑り)が同断層で直前に起きる前駆滑りの可能性が示唆された。
- (3) 手法 C の b 値を用いて 2021 年の宮城県沖合で起きた地震を事例として解析した(Nanjo and Yoshida, 2021, Earth, Planets and Space)。これは、宮城県沖のプレート境界を断層とする $M6.9$ の地震に引き続き $M6.8$ の地震が隣接して続発した事例で、両地震が発生する前の応力状態は他地域と比べて高めであると推定された。また、 $M6.9$ の地震の断層付近では応力がより強くかかっていたために、先行して $M6.9$ の地震が起きた可能性が示唆された。
- (4) 長野県周辺の活断層群周辺で起きる地震活動を事例として解析した(Nanjo et al., 2023, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会)。手法 A の ETAS を用いて、東北地方太平洋沖地震の地殻変動により、数百キロメートルも離れた長野県周辺の活断層群であっても、その断層群で起きる中小地震の活動度が変化し応力状態が変化したことが示唆された。
- (5) 2023 年 2 月に大地震が起きたトルコの東アナトリア断層を事例として解析した(Nanjo et al., 2023, IUGG2023)。手法 A の b 値と手法 B の ETAS に加えクーロン応力変化を用いて地震活動の変化を捉え、大地震を起こした断層周辺の応力状態を推定した。その結果、応力が増加し地震が起きやすい状態となっていた地域において、本震やその後の大きめの余震が起きたことが分かった。また応力が減少し地震の起きづらい状態となった地域では、実際に低調な地震活動であったことも分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Nanjo K.Z., Izutsu J., Orihara Y., Kamogawa M.	4. 巻 822
2. 論文標題 Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffic-light system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 229175 ~ 229175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2021.229175	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 Nanjo K. Z., Yoshida A.	4. 巻 73
2. 論文標題 Changes in the b value in and around the focal areas of the M6.9 and M6.8 earthquakes off the coast of Miyagi prefecture, Japan, in 2021	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01511-3	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 Nanjo K. Z.	4. 巻 11
2. 論文標題 Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3082
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-16867-5	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 Nanjo K. Z.	4. 巻 177
2. 論文標題 Capability of Tokai Strainmeter Network to Detect and Locate a Slow Slip: First Results	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Pure and Applied Geophysics	6. 最初と最後の頁 2701 ~ 2718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00024-019-02367-1	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 楠城一嘉	4. 巻 105
2. 論文標題 b 値にもとづく大地震発生予測のモデルのレビュー	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地震予知連絡会会報	6. 最初と最後の頁 489 ~ 492
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 Nanjo K. Z.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Predicting the unpredictable	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 35 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21820/23987073.2020.6.35	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 楠城一嘉	4. 巻 -
2. 論文標題 小さな地震が大地震を探るカギ? カリフォルニアの直下型大地震の解析から異常をとらえ、防災につなげる	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 academist journal	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) 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 Nanjo Kazuyoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Changes in stress state and seismicity pattern responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ESSOAr	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) 10.1002/essoar.10504871.1	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 長尾年恭, 楠城一嘉, 鴨川仁, 井筒潤
2. 発表標題 地震災害予測のための地球観測データのデジタルアースへの適用 -地震活動度解析の高度化と可視化-
3. 学会等名 問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究拠点 2021年度成果報告会, 中部大学中部高等学術研究所国際GISセンター
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楠城一嘉
2. 発表標題 自然地震の地震活動解析について
3. 学会等名 研究集会「地震活動の統計モデルと物理的意味」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Z. Nanjo, J. Izutsu, Y. Orihara, M. Kamogawa
2. 発表標題 The 2016 Kumamoto earthquake sequence implying the possible improvement of the Foreshock Traffic-Light System
3. 学会等名 日本地震予知学会 第8回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楠城一嘉
2. 発表標題 統計科学的手法を用いて地震活動を評価する研究
3. 学会等名 統計物理と統計科学のセミナー 統計数理研究所(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Z. Nanjo and Y. Yukutake
2. 発表標題 A preliminary study on low-frequency earthquakes at Mt. Fuji, Japan, using the matched filter method
3. 学会等名 AGU 2021 Fall Meeting, New Orleans, LA and virtual (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楠城一嘉, 行竹洋平, 野田洋一
2. 発表標題 Matched Filter法を用いて富士山の低周波地震を検知する研究: 序報
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 楠城一嘉, 有吉慶介, 高橋成実, 矢田修一郎, 山本揚二郎, 堀高峰
2. 発表標題 DONETの観測に基づく地震カタログを品質評価する研究: 序報
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 楠城一嘉, 行竹洋平
2. 発表標題 富士山直下で起きる低周波地震の研究の序報: Matched Filter法を用いた地震カタログの作成とカタログの性能評価
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 楠城 一嘉, 井筒潤, 織原義明, 鴨川仁
2. 発表標題 2016年熊本地震前後の地震活動のパターンについて
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 K. Z. Nanjo, Y. Yukutake
2. 発表標題 A study on detection of low-frequency earthquakes at Mt. Fuji and data quality evaluation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Z. Nanjo
2. 発表標題 Changes in stress state associated with the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楠城一嘉
2. 発表標題 b 値にもとづく大地震発生予測のモデルのレビュー
3. 学会等名 第229回地震 予知連絡会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuyoshi Nanjo
2. 発表標題 Changes in stress state and seismicity pattern responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 楠城一嘉	4. 発行年 2022年
2. 出版社 成山堂書店	5. 総ページ数 120
3. 書名 地震と火山と防災のはなし	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>熊本地震の本震前に本震発生の兆候を示す特徴があったことを発見 https://www.u-shizuoka-ken.ac.jp/news/20221223-1/ 2021年3月と5月に続けて起きた宮城県沖の地震 https://www.global-center.jp/media/2021114-133151-692.pdf 直下型大地震の研究結果が『Nature Communications』に掲載 https://www.u-shizuoka-ken.ac.jp/news/20200617-1/</p>
--

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	鴨川 仁 (Kamogawa Masashi) (00329111)	静岡県立大学・その他部局等・特任准教授 (23803)	

6. 研究組織（つづき）

	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	井筒 潤 (Izutsu Jun) (90362433)	中部大学・工学部・教授 (33910)	

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