

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14377

研究課題名（和文）微小地震への短周期地震波解析手法の適用による地震発生準備過程の解明

研究課題名（英文）Using small earthquakes to reveal the generation process of large earthquakes

研究代表者

吉田 圭佑 (Yoshida, Keisuke)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：20743686

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：地震の発生に、断層上の流体移動や低速すべりなど、揺れを生じない現象が重要な役割を果たしている可能性が考えられている。通常、地球内部での揺れを生じない現象を検出することは困難である。本研究では、大地震発生に先立って生じている可能性があるそれらの非地震性現象を微小地震を用いて調べた。この結果、近年の複数の内陸大地震発生前に顕著な非地震性現象が生じていたことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震の発生の理解のためには、震源付近で進行している現象の全体像の理解が不可欠である。しかしながら、揺れを生じさせない現象を捉えることが非常に難しい。本研究では、微小地震を用いることにより間接的に、大地震震源域で地震発生前に進行していた現象について調べた。それにより、少なくとも数回の大地震の発生前に、流体移動などの現象が生じていることが示された。得られた知見は、地震発生機構の理解のために極めて重要である。本研究で用いられたアプローチを様々な地震に適用することにより、更なる知見がもたらされると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Aseismic processes, including aseismic slip and pore pressure migration, contribute the occurrence of earthquakes. However, aseismic processes are usually difficult to detect because they do not emit observable seismic wave. In this study, I examined aseismic processes prior to large earthquakes by using small earthquakes. The result indicates that aseismic processes prior to the mainshock play important roles in the occurrence of recent large intraplate earthquakes.

研究分野：地震学

キーワード：微小地震 大地震 流体移動 ゆっくりすべり 前震 地震発生メカニズム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震発生過程の一部として、揺れを生じさせないゆっくりとした前駆的滑りが先行する可能性が示唆されてきた。また、地球内部で進行する流体移動や周囲の低速すべりが、地震の発生の引き金となっている可能性についても議論されてきた。それらの低速滑りや流体移動は、揺れを生じさせないため、よほど大規模でない限り検知することができず、一般の地震発理解の妨げとなっていた。

2. 研究の目的

本研究では、大地震発生発生前の震源域の地震活動を詳細に調べることにより、大地震発生前に生じている可能性のある「揺れを生じさせない現象」について情報を得ることを目的とした。先行研究は、地球内部で流体の移動や低速滑りの伝播に伴い微小地震の震源位置が移動することや、それらの地震活動特性、震源過程特性が変化する可能性を示してきた。本研究では、この性質を利用し、前震活動の震源位置の時空間変化、地震活動・震源特性の変化を調べることにより、大地震発生背後で進行する現象について調べた。

3. 研究の方法

近年の高度な地震波形解析手法の適用により震源データの空間分解能を大幅に向上させた上で、その時空間変化を調べる。従来から用いられてきた微小地震活動の震源過程推定手法を改良し、現実的な非対称破壊についても考慮した推定が行えるようにする。震源過程の時空間変化に基づき、地震発生場の応力・強度状態の変化についての情報も得る。

基本的には、近年発生した大地震のうち顕著な前震活動を伴うものに焦点を当てた解析を行った。ただし、比較のために、前震活動を伴わないものや群発地震活動についても調べた。群発地震活動も調べたのは、群発地震と前震活動の類似性がしばしば指摘されてきており、同様の発生機構を持つ場合がある可能性が考えられたためである。

4. 研究成果

前震-本震-余震型の地震活動として、次の2つの地殻内地震系列について詳細に調べた：2017年秋田県大仙で発生したM5.2地震系列と2017年鹿児島湾で発生したM5.3の地震系列である。

2つの地殻内地震活動の解析により、地震発生機構に関する重要な特徴が見つかった(引用1, 2)：(1)前震活動は時間とともに本震の断層面上を移動していた、(2)本震は前震活動の空白域で発生した、(3)余震活動は本震破壊域の端で活発に生じた、(4)余震活動域も本震破壊域から徐々に広がっていった。これらの特徴は、2つの地震に共通して見られた。また、近年プレート境界で発生した超巨大地震(2011年東北沖地震など)にも、よく似た特徴が報告されていた。これらの共通点は、「プレート境界で発生する地震と地殻内で発生する地震」、「M9規模の地震とM5規模の地震」の発生機構が基本的には共通することを示唆すると考えられ、地震発生機構の理解の上で極めて重要である。これらの特徴のうち、(1)は、本震発生前に断層面上の流体移動やゆっくりすべりが生じ、前震活動と本震を引き起こしたことを示唆する。

2011年東北沖地震後に東北日本内陸域で発生した2つの群発地震の震源分布の時空間変化についても詳細に調べた。前述した前震活動・余震活動の特徴と類似して、これらの群発地震の震源も、明瞭な面構造を深部から浅部へ向かって移動していったことが分かった(引用3, 4, 5)。顕著な地震活動を伴わない地震活動の例として、2019年に山形県沖で発生したM6.7の地震系列についても詳細に調べた。この地震活動の場合についても、余震活動が顕著に深い側から浅い側へ移動していく特徴が見られ、前述した鹿児島湾の地震活動や東北日本の群発地震活動と非常に良く似る。また、これらの地震活動の断層面に働く応力は、2011年東北沖地震以降減少し続けていたことも確かめられた。このことは、これらの地震活動が、地球内部の流体移動に伴う断層強度の低下により生じたことを強く示唆する。

上記の成果は、様々な地震活動(前震、本震、余震、群発地震)の発生に、地球内部での流体移動が重要な役割を果たしていることを示唆する。

微小地震の震源過程の高度化に成功した(引用6, 7)。具体的には、これまでの50年間、対称的な破壊しか扱えなかった手法を、一般的な非対称破壊を考慮できるように発展させた。流体移動により生じたと推定した前述の群発地震活動の震源過程を詳細に調べることにより、地震の震源過程や地震活動に関するパラメータが同期して時間変化していることが明らかになった。その時間変化パターンから、地球内部での流体圧変化の情報が抽出できる可能性を示した(引用4, 8, 9)。このことは、地震発生に重要な役割を果たしていると考えられる流体の挙動についての情報を、微小地震を調べることにより得られることを示しており、地震発理解のために重要な成果であると言える。

<引用文献>

- [1] Yoshida, K., Taira, T., Matsumoto, Y., Saito, T., Emoto, K. & Matsuzawa, T. (2020) Stress Release Process Along an Intraplate Fault Analogous to the Plate Boundary: A Case Study of the 2017 M5.2 Akita-Daisen Earthquake, NE Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 125. doi:10.1029/2020JB019527
- [2] Matsumoto, Y., Yoshida, K., Hasegawa, A. & Matsuzawa, T. (2020) Fault-valve behavior estimated from intensive foreshock and aftershock activity in the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay, Kyushu, southern Japan, earthquake sequence. *Earth Sp. Sci. Open Arch.*, 30. doi:10.1002/essoar.10503222.1
- [3] Yoshida, K. & Hasegawa, A. (2018) Sendai-Okura earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow of NE Japan: Detailed fault structure and hypocenter migration. *Tectonophysics*, 733, 132–147. doi:10.1016/j.tecto.2017.12.031
- [4] Yoshida, K. & Hasegawa, A. (2018) Hypocenter Migration and Seismicity Pattern Change in the Yamagata-Fukushima Border, NE Japan, Caused by Fluid Movement and Pore Pressure Variation. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 5000–5017. doi:10.1029/2018JB015468
- [5] Yoshida, K., Hasegawa, A., Yoshida, T. & Matsuzawa, T. (2019) Heterogeneities in Stress and Strength in Tohoku and Its Relationship with Earthquake Sequences Triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki Earthquake. *Pure Appl. Geophys.* doi:10.1007/s00024-018-2073-9
- [6] Yoshida, K., Saito, T., Emoto, K., Urata, Y. & Sato, D. (2019) Rupture directivity, stress drop, and hypocenter migration of small earthquakes in the Yamagata-Fukushima border swarm triggered by upward pore-pressure migration after the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, 769. doi:10.1016/j.tecto.2019.228184
- [7] Yoshida, K. (2019) Prevalence of asymmetrical rupture in small earthquakes and its effect on the estimation of stress drop: a systematic investigation in inland Japan. *Geosci. Lett.* doi:10.1186/s40562-019-0145-z
- [8] Yoshida, K., Hasegawa, A. & Yoshida, T. (2016) Temporal variation of frictional strength in an earthquake swarm in NE Japan caused by fluid migration. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 5953–5965. doi:10.1002/2016JB013022
- [9] Yoshida, K., Saito, T., Urata, Y., Asano, Y. & Hasegawa, A. (2017) Temporal Changes in Stress Drop, Frictional Strength, and Earthquake Size Distribution in the 2011 Yamagata-Fukushima, NE Japan, Earthquake Swarm, Caused by Fluid Migration. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 10,379–10,397. doi:10.1002/2017JB014334

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Keisuke Yoshida, Akira Hasegawa, Takeyoshi Yoshida, Toru Matsuzawa	4. 巻 176
2. 論文標題 Heterogeneities in Stress and Strength in Tohoku and Its Relationship with Earthquake Sequences Triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki Earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Pure and Applied Geophysics	6. 最初と最後の頁 1335-1355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00024-018-2073-9	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 Keisuke Yoshida, Akira Hasegawa	4. 巻 123
2. 論文標題 Hypocenter migration and seismicity pattern change in the 2011 Yamagata-Fukushima border, NE Japan, earthquake swarm caused by fluid movement and pore pressure change	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 5000-5017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JB015468	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 Saito, T., A. Noda, K. Yoshida, Sachiko Tanaka	4. 巻 123
2. 論文標題 Shear Strain Energy Change Caused by the Interplate Coupling Along the Nankai Trough: An Integration Analysis Using Stress Tensor Inversion and Slip-Deficit Inversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 5975-5986
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JB01583	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 Keisuke Yoshida, Tatsuhiko Saito, Yumi Urata, Youichi Asano, Akira Hasegawa	4. 巻 122
2. 論文標題 Temporal Changes in Stress Drop, Frictional Strength, and Earthquake Size Distribution in the 2011 Yamagata-Fukushima, NE Japan, Earthquake Swarm, Caused by Fluid Migration	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 10,379-10,397
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1002/2017JB014334	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 Keisuke Yoshida, Akira Hasegawa	4. 巻 in press
2. 論文標題 Sendai-Okura earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow of NE Japan: Detailed fault structure and hypocenter migration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.12.031	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 Yoshida Keisuke	4. 巻 6
2. 論文標題 Prevalence of asymmetrical rupture in small earthquakes and its effect on the estimation of stress drop: a systematic investigation in inland Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geoscience Letters	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) doi:10.1186/s40562-019-0145-z	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 Yoshida Keisuke, Saito Tatsuhiko, Emoto Kentaro, Urata Yumi, Sato Daisuke	4. 巻 769
2. 論文標題 Rupture directivity, stress drop, and hypocenter migration of small earthquakes in the Yamagata-Fukushima border swarm triggered by upward pore-pressure migration after the 2011 Tohoku-Oki earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 228184 ~ 228184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1016/j.tecto.2019.228184	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 Yoshida Keisuke, Taira Taka'aki, Matsumoto Yoshiaki, Saito Tatsuhiko, Emoto Kentaro, Matsuzawa Toru	4. 巻 125
2. 論文標題 Stress Release Process Along an Intraplate Fault Analogous to the Plate Boundary: A Case Study of the 2017 M 5.2 Akita Daisen Earthquake, NE Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1029/2020JB019527	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 該当する

1. 著者名 Wang Kelin, Brown Lonn, Hu Yan, Yoshida Keisuke, He Jiangheng, Sun Tianhaozhe	4. 巻 124
2. 論文標題 Stable Forearc Stressed by a Weak Megathrust: Mechanical and Geodynamic Implications of Stress Changes Caused by the M = 9 Tohoku Oki Earthquake	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 6179 ~ 6194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1029/2018JB017043	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 該当する

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Keisuke Yoshida, Tatsuhiko Saito, Kentaro Emoto, Yumi Urata
2. 発表標題 Estimation of rupture directivity, fault planes, and stress drop of small- and moderate-sized earthquakes
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 吉田圭佑, 長谷川昭, 野口科子, 笠原敬司
2. 発表標題 北海道函館周辺の深部低周波地震と内陸の繰り返し地震
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 高橋諒, 吉田圭佑, 長谷川昭, 松澤暢
2. 発表標題 2011年東北沖地震後に活発化した茨城県北部の地震活動: 内陸地震の繰り返し
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 吉田圭佑, 長谷川昭, 行竹洋平, 松澤暢
2. 発表標題 2011年東北沖地震後の流体圧変化に伴う内陸の群発地震震源域近傍の速度構造の時間変化
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 吉田圭佑, 平原聡, 中山貴史, 内田直希, 岡田知己, 松澤暢
2. 発表標題 2019年山形沖 M6.7地震の余震の詳細な震源分布とその時空間発展
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 Yoshida Keisuke, Saito Tatsuhiko, Taira Taka'aki, Emoto Kentaro, Matsuzawa Toru
2. 発表標題 Stress release process ongoing along a crustal fault examined through the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen, NE Japan, earthquake
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田圭佑・野田博之・芝崎文一郎・中谷正夫
2. 発表標題 2011年東北沖地震後の流体圧変化により誘発された群発地震活動の発生シミュレーション
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田圭佑・齊藤竜彦・江本賢太郎・松澤暢
2. 発表標題 2017年9月8日に秋田県南部で発生した M5.2 の地震の震源過程・破壊伝播指向性・応力降下量と、東北日本の偏差応力
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本圭晶・吉田圭佑・松澤暢・長谷川昭
2. 発表標題 2017年に鹿児島湾で発生した M 5.3 の地震の前駆的活動及び余震活動にみられる震源の migration とその原因
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Yoshida
2. 発表標題 Detailed view of earthquake swarms in northeastern Japan triggered by fluid migration associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake
3. 学会等名 Yotikyo Precursor Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田圭佑・長谷川昭
2. 発表標題 関東直下フィリピン海プレート上面で発生するプレート境界地震の震源分布の詳細と、繰り返し地震の発生メカニズム
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田圭佑・齊藤竜彦・江本賢太郎,
2. 発表標題 2011年東北沖地震後の間隙水圧変化により生じたと推定される群発地震の発生機構の詳細：破壊伝播指向性と断層面上の強度分布
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Yoshida, Tatsuhiko Saito, Kentaro Emoto
2. 発表標題 Rupture directivities of small- and moderate-sized earthquakes in the Yamagata-Fukushima swarm triggered by the fluid migration after the 2011 Tohoku-Oki earthquake
3. 学会等名 the 10th ACES International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田圭佑、長谷川昭
2. 発表標題 東北沖地震に stress shadowで誘発された群発地震活動の発生機構
3. 学会等名 SSJ 2017 Annual Meeting
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉田圭佑、長谷川昭
2. 発表標題 2011年東北沖地震で誘発された仙台大倉ダム周辺の群発地震活動 - 詳細な震源分布と微細断層構
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keisuke Yoshida, Akira Hasegawa
2. 発表標題 Details of hypocenter migration in the Yamagata-Fukushima border earthquake swarm probably caused by fluid pressure change after the 2011 Tohoku-Oki earthquake
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keisuke Yoshida, Akira Hasegawa, Toru Matsuzawa
2. 発表標題 Heterogeneities of Stress and Strength and its Relationship With Induced Seismic Activities Associated With the Tohoku-Oki Earthquake
3. 学会等名 SSA 2017 Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松本 圭晶, 吉田 圭佑, 松澤 暢, 長谷川 昭
2. 発表標題 鹿児島湾の M 5.3 の地震の前駆的活動及び余震活動の背後にある非地震過程の可能性
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 Keisuke Yoshida
2. 発表標題 Heterogeneities in Stress and Strength in Tohoku and its Relationship with Earthquake Sequences Triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki Earthquake
3. 学会等名 AOGS 2019 Annual Meeting (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

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