

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03795

研究課題名(和文)活断層の「端」と「間」の変形機構の解明

研究課題名(英文)Elucidating the deformation mechanism around and between active faults

研究代表者

福島 洋 (Fukushima, Yo)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：80432417

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)：2011年と2016年に茨城県北部で発生したM6規模の地震の解析から、6年弱という短期間で同一活断層が繰り返して破壊されたことおよび、地震間におそらく2011年東北地方太平洋沖地震(M9)の影響で起こった異常に大きな先発地震の余効変動がその原因であることを示した。レイテ島におけるフィリピン断層では、固着域と非固着域が明確に棲み分けていて、2017年に発生した地震の破壊域は固着域と明確に重なっていることを示した。2016年熊本地震の主破壊を起こした布田川断層の北端では、断層深部構造は無くなっているが、表層部においては根が浅い小断層が主破壊によって受動的に破壊されたことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

茨城県北部の地震の解析からは、極短期間で同一活断層が再活動することを示し、断層破壊域周辺(「端」)が脆性破壊を起こさない流動変形域であることを示唆する結果を得た。フィリピン断層の研究からは、空間的に明瞭に連続する断層面上でも、地震破壊を起こすセグメントと起こさないセグメントが明確に棲み分けていることを示した。2016年熊本地震の解析からは、地震破壊域の「端」の一形態として火山域があり、そこではごく表層でしか脆性破壊を起こさないことを示した。総じて、断層(地震破壊可能な弱面)は地殻内ごく一部のみに存在し、それ以外の領域は地震を起こせない(流動変形または断層クリープ)ことを示唆する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：The two earthquakes in 2011 and 2016 in northern Ibaraki prefecture (M6) were found to have occurred along an identical fault. The postseismic deformation of the first earthquake was anomalously large, probably due to the effect of the 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake. The Philippine fault in the Leyte Island was found to be composed of locked and unlocked (creeping) segments. The locked segment was remarkably identical to the rupture segment of the 2017 earthquake. In the area on the northern edge of the Futagawa fault, the main rupture fault of the 2016 Kumamoto earthquake, secondary-ruptured faults appeared. These ruptures were found to have been triggered by the main rupture.

研究分野：地震測地学

キーワード：InSAR InSAR時系列解析 断層クリープ 地震発生層 副次的断層

1. 研究開始当初の背景

地球は、地震波の伝播や地震時の地殻変動などの短期的プロセスは弾性体でよく近似できる。一方、日本列島のようなプレート辺縁域の地殻は、長期的には不可逆的な非弾性変形、つまり、弾性エネルギーをためない変形をしている。プレート辺縁域内に存在する多くの活断層が、断層運動を通して非弾性変形の一部を担っているが、これらの活断層は連続的ではなく「間」を置いて分布している(図1:東北地方の活断層分布)。これらの活断層が存在しない「間」の部分は、もし本当に活断層がなく地震によるひずみの解消ができないのであれば、ゆっくりとした非弾性変形をしているはずであるが、その実体はよくわかっていない。また、2008年岩手宮城内陸地震(M7.2)のように、それまで知られていなかった活断層で起こる地震もあり、これはすなわち、活断層が存在しないと我々が考えている領域でない場所でも実は活断層が存在している可能性を示している。



一方で、InSAR(衛星合成開口レーダ干渉法)やLiDAR(航空機レーザー)差分解析の手法開発の進展により、面的に高精度な地殻変動の測定が可能となって来ており、上部地殻分散変形域の計測にチャレンジできる状況が整ってきていた。地震等が発生していない平常時の変形をInSAR等で捉えられることは、近年の計測技術の進展をもってしても簡単ではないことは予想されたが、巨大地震余効変動域で地震を発生させた活断層の周囲で顕著な余効変動が発生する事例が発見され(後に、Fukushima et al., 2018として発表)、このような地震発生時の活断層周囲の変形様式に着目することにより、当該課題へのアプローチが可能となってきていた。

以上から、プレート辺縁域の長期的な変形テクトニクスを理解する上で、また、将来的な地震発生ポテンシャルへの示唆を得る上で、(我々が認知している)活断層の「端」や「間」の変形の計測にチャレンジし、その変形メカニズムを解明することに意義があると考えられる状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、上部地殻で活断層の端や活断層間をつなぐ領域の不可逆的な非弾性変形の様式解明を目的とした。具体的には、InSARやLiDARを活用して活断層周囲の変形を捉え、モデリングにより同領域のレオロジー特性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、変形の計測手法として、面的に高精度な検出が可能なInSARを中心的に使うこととした。ただし、重要な手がかりが得られると見込まれた2011年4月11日の福島県浜通りの地震(いわき地震)(M7.0)の余効変動の検出については、ちょうどInSAR解析に必要な衛星観測がなされていない時期に相当していたため、代わりに地震前後に得られたデータを用いたLiDAR差分解析を行うことにした。

InSAR解析については、プレート辺縁域の地殻内地震のうち、顕著な地殻変動を伴う規模の大きな地震について、起震活断層の「端」に着目して変形を抽出し、その変形についてのモデリングを行うとともに、多数のSAR撮像データを使って年間数ミリ程度のわずかな変形を検出するための手法であるInSAR時系列解析の手法開発を行い、活断層周囲の平時の変形検出を試みた。

4. 研究成果

以下、主要な研究成果について述べる。

2011年4月のいわき地震(M7.0)震源域周辺地震後のLiDARデータについて、国土地理院および民間業者が保有しているアーカイブの調査を行ったうえで、データの取得および解析を行った。具体的には、2011年4月26日と2011年5月から6月にかけて計測されたデータを用いて地表変位解析を行ったところ、いわき地震の際にずれが認められた井戸沢断層付近で北東方

向に 20-40cm の水平変位および最大 40cm 程度の沈降があったことが推定された。しかし、データの制約から、変形域全体の变形は捉えられなかったため、このいわき地震の余効変動の变形様式解明には至らなかった。

いわき地震の南側で 2011 年と 2016 年に起こったふたつの M6 級の地震について、ふたつの地震が同一活断層上で起こったらしいこと、2011 年の地震の余効変動が顕著だった可能性があることは研究開始前にわかっていたが、これらのふたつの地震についての解析を進めた。その結果、2011 年の余効変動が日本で起きる地殻内地震には異常に大きいことを見出したとともに、これが 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動に起因するものであることを示唆する解析結果を得た (Fukushima et al., 2018)。

2017 年 7 月にレイテ島を縦断するフィリピン断層上で発生した Mw6.5 の地震とその震源域両端の非地震性すべりの関係に注目し、非地震性すべりを詳細に検出するための InSAR 時系列解析手法を構築し適用するとともに、2017 年の地震の震源域とその地震以前に起こっていた非地震性すべりの関係を明らかにした (Fukushima et al., 2019)。InSAR 時系列解析については、植生に強い L バンドを使用している ALOS-2 (だいち 2 号) のデータを用い、さらに変動シグナル検出のための平滑化処理などを工夫することにより、世界で初めて、レイテ島におけるフィリピン断層の非地震性すべり (断層クリープ) 速度分布を明らかにすることに成功した (図 2)。さらに、2017 年の地震は、断層クリープ解析から断層が固着していたと推定された領域をちょうど震源域として発生していたことおよび、1947 年の地震も同じ区域を震源域として発生していた可能性も示した。さらに後続の研究では、2017 年の地震の最大余震の影響も分離して評価することにより先に得られた結論を裏付けるとともに、断層固着が近傍の地熱活動に起因している可能性も指摘した (Dianala et al., 2020)。

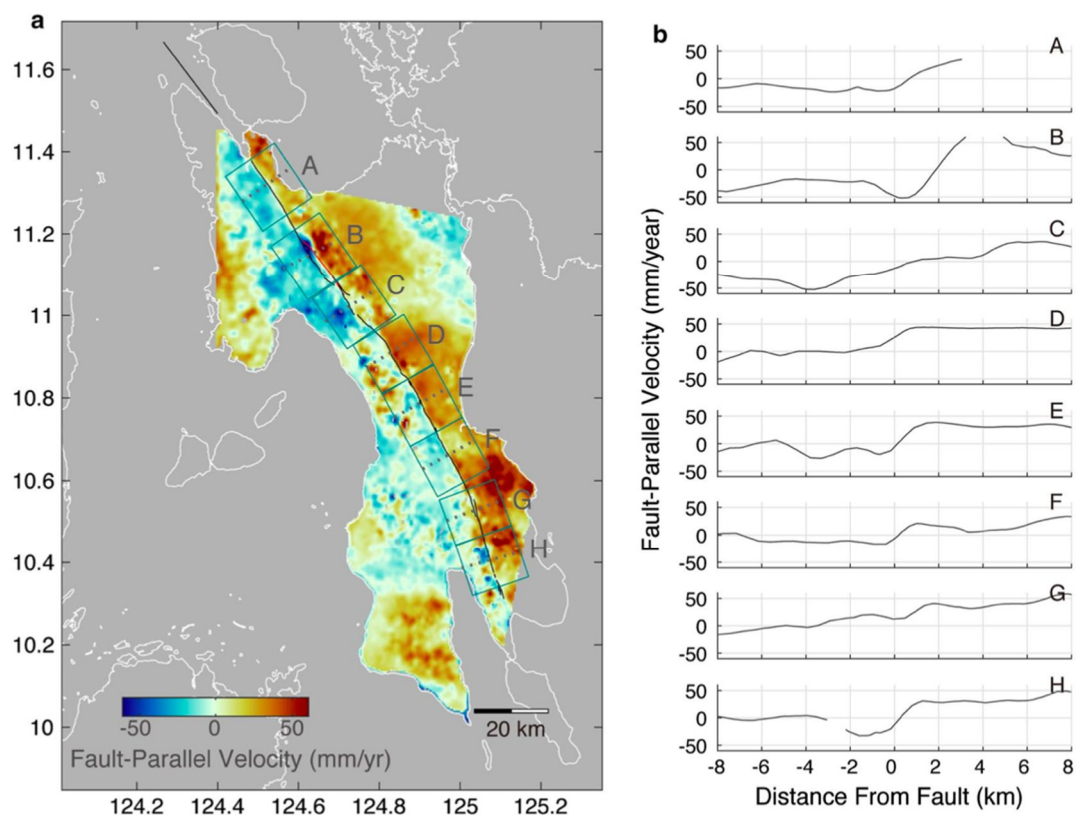


図 2 : (a) 断層走行方向 (N25°W) の速度分布。フィリピン断層 (黒線) をまたいで断層の非地震性すべりに起因する相対的な速度の違いがあることがわかる。(b) a の図における A~H の各ボックスにおける平均的な断層走行方向速度のプロファイル。Fukushima et al., 2019 より。

2016 年 4 月の熊本地震については、無数の副次的断層のすべりが確認されたが、主断層である布田川断層破壊域の北東端の延長域にあたる阿蘇カルデラ内で発生した副次的断層すべりについて、InSAR 解析を用いて詳細な解析を行った (Fukushima et al., 2020; 図 3)。熊本地震主断層による地殻変動の影響を取り除くなどの処理を行い、副次的断層すべりに起因する地殻変動を抽出した後、そのすべり分布を推定したところ、阿蘇カルデラ内の小断層破壊は主断層の布田川断層とは直接つながっておらず、主断層破壊による応力変化により受動的にもたらされた結論づけた。また、破壊が起こった深さは表層を覆う火山堆積物の厚さとほぼ一致すること

も示した。また、本研究の結果から、熊本地震の断層の端にあたる阿蘇カルデラは、深部は脆性破壊を起こさない非弾性変形が卓越する領域であり、火山堆積物で構成される表層部のみが脆性破壊を受動的に起こすと考えられる。このことは、以前から東北地方で提案されていた「活断層が存在せず変形が大きい火山地域」と「活断層が存在し（普段は）変形が小さい非火山領域」のモデルと調和的であり、かつ、精緻化する情報を与えるものである。この阿蘇カルデラ内の副次断層については、トレンチ調査により、過去にも規模の大きな地震により副次的断層すべりを起こしていたことを明らかにした (Ishimura et al., 2021)。

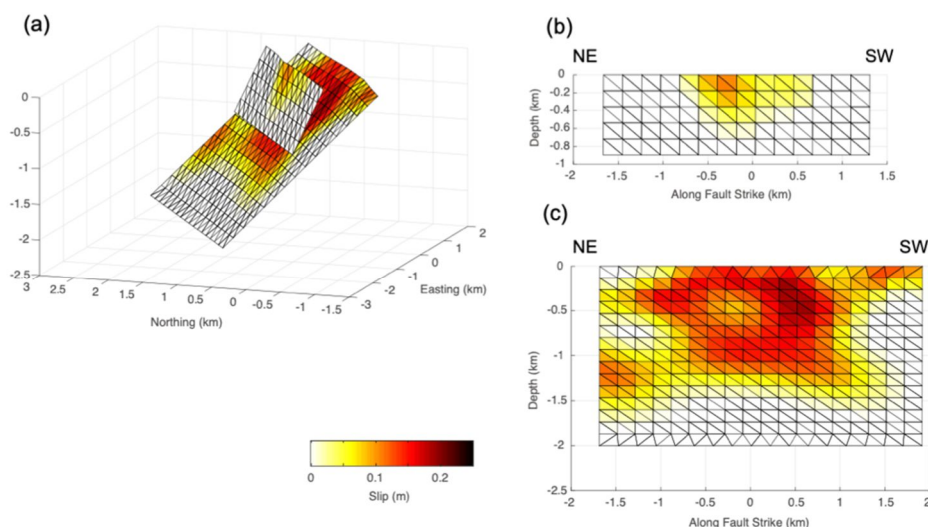
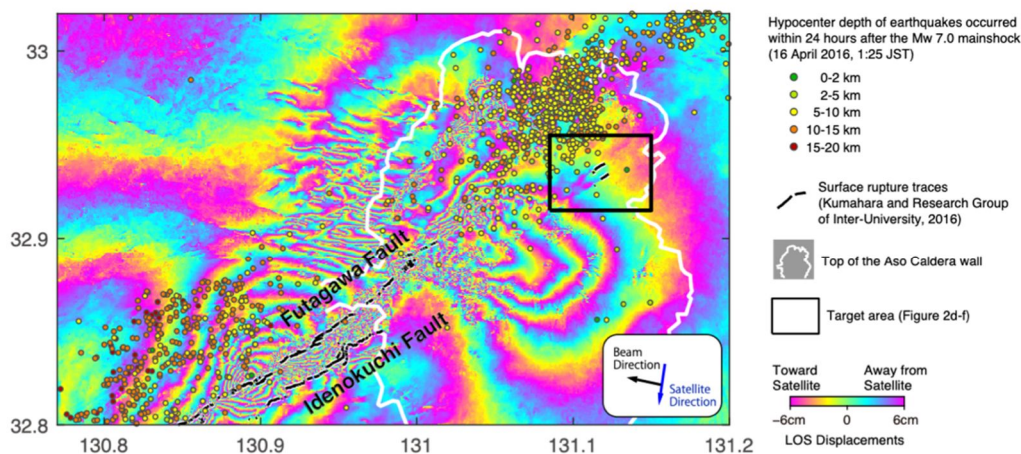


図 3 : (上) 2016 年熊本地震に伴う地殻変動を示す InSAR 画像。四角が研究対象とした小断層が位置する領域。断層運動による変形パターンの乱れが確認できる。(下) 断層すべりインバージョン結果。(a) 斜め方向を視点とした図。(b) 北側の断層のすべり分布。(c) 南側の断層のすべり分布。Fukushima et al. (2020)の図をもとに作成。

InSAR 時系列解析による変動シグナル検出精度向上に関して、Morishita et al. (2020) が開発した LiCSBAS という解析ソフトウェアを用いて Sentinel-1 データを用いた解析を試行し、Sentinel-1 データは都市部では ALOS-2 データよりも高精度の結果が得られることおよび、森林部では非干渉性によりシグナルの抽出が困難であることが確認された。

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 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yo Fukushima, Manabu Hashimoto, Masatoshi Miyazawa, Naoki Uchida, Taka'aki Taira	4. 巻 71
2. 論文標題 Surface creep rate distribution along the Philippine fault, Leyte Island, and possible repeating of Mw-6.5 earthquakes on an isolated locked patch	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth Planets and Space	6. 最初と最後の頁 118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1096-5	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 該当する
1. 著者名 Yo Fukushima, Shinji Toda, Satoshi Miura, Daisuke Ishimura, Jun'ichi Fukuda, Tomotsugu Demachi, Kenji Tachibana	4. 巻 11
2. 論文標題 Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-0ki earthquake	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 777-781
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41561-018-0201-x	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 Yo Fukushima, Daisuke Ishimura	4. 巻 72
2. 論文標題 Characteristics of secondary-ruptured faults in the Aso Caldera triggered by the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth Planets and Space	6. 最初と最後の頁 175
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01306-y	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 Daisuke Ishimura, Hiroyuki Tsutsumi, Shinji Toda, Yo Fukushima, Yasuhiro Kumahara, Naoya Takahashi, Toshihiko Ichihara, Keita Takada	4. 巻 73
2. 論文標題 Repeated triggered ruptures on a distributed secondary fault system: an example from the 2016 Kumamoto earthquake, southwest Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth Planets and Space	6. 最初と最後の頁 39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01371-x	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 John Dale B. Dianala, Romain Jolivet, Marion Y. Thomas, Yo Fukushima, Barry Parsons, Richard Walker	4. 巻 125
2. 論文標題 The Relationship Between Seismic and Aseismic Slip on the Philippine Fault on Leyte Island: Bayesian Modeling of Fault Slip and Geothermal Subsidence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2020JB020052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB020052	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 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 福島 洋、石村 大輔
2. 発表標題 2016年熊本地震の副次的断層すべりによるInSAR地表変位とすべり分布
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 Yo Fukushima, Manabu Hashimoto
2. 発表標題 Complementary occurrence of fault creep and an Mw 6.5 earthquake along the Philippine Fault on Leyte Island revealed by ALOS and ALOS-2 SAR interferometry
3. 学会等名 第39回地球科学・リモートセンシング国際シンポジウム 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福島 洋, 橋本 学, 宮澤理稔, 内田直希, 平 貴昭
2. 発表標題 レイテ島におけるフィリピン断層のクリープ分布と孤立固着域でのMw ~ 6.5の繰り返し地震の可能性
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 福島 洋, 橋本 学, 宮澤理稔, 内田直希, 平 貴昭
2. 発表標題 レイテ島におけるフィリピン断層クリーブ速度と孤立固着域におけるMw~6.5の地震の繰り返し発生の可能性
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 Yo Fukushima, Manabu Hashimoto, Masatoshi Miyazawa, Naoki Uchida, and Taka 'aki Taira
2. 発表標題 Mw 6.5 Repeater Along a Creeping Section of the Philippine Fault?
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nematollah Ghayournajarkar, and Yo Fukushima
2. 発表標題 ALOS-2 observation of the 2017 Sefidsang earthquake, northeastern Iran: a blind shallow-dipping thrust event near the Eastern Kopeh Dagh
3. 学会等名 Japan Geosciences Union Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nematollah Ghayournajarkar, and Yo Fukushima
2. 発表標題 Joint analysis of the ALOS-2 and Sentinel-1A data on the 2017 Sefid Sang earthquake, Northeastern Iran
3. 学会等名 Geodetic Society of Japan 132nd Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福島 洋、遠田晋次、三浦哲、石村大輔、太田雄策、出町知嗣、立花憲司
2. 発表標題 Extremely early recurrence of an M6 intraplate earthquake observed after the 2011 Tohoku-oki earthquake
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福島 洋・橋本 学
2. 発表標題 Spatial variation of creep rate of the Philippine fault on Leyte Island and its relation with the 6 July 2017 earthquake (Mw 6.5) revealed by SAR interferometry
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 Yo Fukushima and Manabu Hashimoto
2. 発表標題 Relation between the spatial variation of creep rate and the 2017 Mw 6.5 Ormoc earthquake along the Philippine fault on Leyte Island
3. 学会等名 19th General Assembly of WEGENER (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福島 洋・石村大輔
2. 発表標題 2016年熊本地震時に出現した阿蘇カルデラ内地表地震断層のInSAR解析
3. 学会等名 日本測地学会第130回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yo Fukushima
2. 発表標題 Ups and downs in Osaka metropolitan area, Japan, detected by LiCSBAS InSAR time-series analysis
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合-アメリカ物理学連合同2020年大会 (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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