

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04017

研究課題名(和文)地殻変動における応力の履歴に依存して発現する塑性歪みに関する研究

研究課題名(英文) Study on plastic strain that appears depending on the stress history in crustal deformation

研究代表者

深畑 幸俊 (FUKAHATA, Yuki-toshi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：10313206

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)：地殻変動は、一般に、弾性歪み・粘性歪み・塑性歪みから成ると考えられる。測地観測データは、それら全ての成分を含みその分離が重要な課題となってきた。本研究では、新潟神戸歪み集中帯北部において東北沖地震前後のGNSSデータを解析することで、恐らく世界で初めて、それら各成分を分離して推定することに成功した。東北沖地震前に塑性歪みが発現していたことを示す本研究結果は、日本列島の歪み速度パラドックスを解決するための重要なピースとなる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本列島では活発な地殻変動が生じているが、その原因については分かっていない部分も多い。本研究は、複合的な要因で生じる地殻変動について、弾性・粘性・塑性の3つの成分に分離し推定することによって、その原因の解明に向けて理解を大きく前進させた。特に、これまであまり注目されて来なかった塑性歪み速度を定量的に推定したのは、恐らく世界で初めてである。地震発生やその予測の高度化、あるいは地形形成過程の理解増進などに寄与する基礎的研究と位置付けられる。

研究成果の概要(英文)：Crustal deformation is generally considered to consist of elastic, viscous, and plastic strain. Observed geodetic data contain all of these components, and their separation has been an important issue. In this study, we succeeded in estimating each of these components separately for the first time, by analyzing GNSS data before and after the Tohoku-oki earthquake in the northern part of the Niigata-Kobe tectonic zone. This result that indicates plastic strain appeared before the Tohoku-oki earthquake is an important piece to solve the strain-rate paradox in Japan.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：塑性歪み 非弾性歪み 歪み速度場 GNSS 歪み速度パラドックス 東北地方太平洋沖地震

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地殻の変形様式としては、通常、弾性変形・粘性流動・脆性破壊・塑性流動が考えられている。弾性変形は応力の変化に依存して(弾性)歪みが生じる。粘性流動は、応力の絶対値に依存して(粘性)歪み速度が決まる。脆性破壊と塑性流動は降伏応力を持つ点が特徴であり、降伏応力を越えると破壊や変形(塑性歪み)が生じる。粘性歪みと塑性歪みはまとめて非弾性歪みと呼ばれる。弾性歪みは地震時に解放される一方、非弾性歪みは時間と共に累積し、山地などの地形を形成する。観測される測地データは、これらの歪み成分を全て含み、その分離が重要な課題となっている。このうち、弾性歪みと非弾性歪みの分離については、いくつかの研究でなされてきたが、塑性歪みについては手付かずの状態であった。

ところで、地震活動の分野では、大地震の発生に伴って、stress shadow という現象が起こることが知られている。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震(東北沖地震)の後には東北地方内陸の多くの領域で地震活動が低下した。この現象は、東北沖地震に伴う CFF の変化により説明できる。つまりは、東北沖地震によって応力レベルが降伏応力を下回るようになったことで、地震活動の低下が起きたと考えられる。地震活動は必然的に塑性歪みをソースとする地殻変動を伴う。そこで、地殻変動についても、地震活動の stress shadow と同様な現象が起きているのではないかと発想した。

2. 研究の目的

地殻変動は、応力の変化(弾性歪み)やその絶対値(粘性歪み)に依存して生じると考えられてきた。しかし、地殻変動は、塑性歪みも考え合わせると、応力の変化や絶対値だけでなく、実はその履歴も考慮することが重要と考えられる。本研究の主目的は、地殻変動において応力の履歴に依存して発現する塑性歪みがあることを実証することにある。

3. 研究の方法

Meneses-Gutierrez & Sagiya (2016) にならって、新潟神戸歪み集中帯北部において、東北沖地震前後の GNSS データから歪み速度場を求めることによって、塑性歪み速度の大きさを定量的に推定した。具体的には、まず長波長成分と短波長成分に分けることにより、弾性歪みと非弾性歪みを大まかに分離した。ここまでは、Meneses-Gutierrez & Sagiya (2016) と同じである。本研究では、さらに短波長成分について、地震前の歪み速度と地震後の歪み速度の差を取ることによって塑性歪み速度を求めた。東北沖地震によって、stress shadow と同様の原理により、この地域の応力が降伏応力を下回るようになると考えられるためである。

4. 研究成果

(1) 上記の方法によって、GNSS データを解析したところ、非弾性歪み速度として 6.5×10^{-8} [1/yr]、そのうち塑性歪み速度として 4.0×10^{-8} [1/yr] を得た。但し、局所的な弾性不均質の影響により、短波長成分にも少し弾性変形が含まれることから、その効果を考慮すると、非弾性歪み速度として 6.0×10^{-8} [1/yr]、塑性歪み速度として 3.0×10^{-8} [1/yr] を得た。両者の差が粘性歪み速度であることから、粘性歪み速度も 3.0×10^{-8} [1/yr] となり、今回のケースではほぼ同程度の大きさとなった。このように、弾性歪み速度と非弾性歪み速度を分離し、さらに塑性歪み速度を推定することに、世界で初めて成功した。

また、地震前の方が非弾性歪み速度が顕著に速いという本研究の結果は、良く知られた日本列島の歪み速度パラドックスの問題に新たな視点を投げかけることとなった。即ち、これまで地質学的歪み速度(=非弾性歪み速度)と比べて測地的歪み速度が約1桁速いことが問題と

なっていたが、東北沖地震の前は、塑性歪みの存在のために例外的に測地学的歪み速度が速かったのではないかと考えられる。つまり、塑性歪みを考慮すると、両者の差は1桁よりも顕著に小さくなることが帰結される。

得られた成果はEarth, Planets and Space誌に発表した (Fukahata et al., 2020)。

このように、本研究課題で主眼とした観測された測地データからの塑性歪み速度の分離は、極めて順調に成功裡になされた。そこで、以下のように本研究課題の基盤の一部となる研究や密接に関連する研究を併せて行った。

(2) 本研究課題の主要なテーマは、測地データからの塑性歪みの分離であるが、その前段として、GSNN などによって得られた測地データを歪み速度場に変換する必要がある。これまで、その歪み速度場への変換には Shen et al. (1996) の方法が使われることが多かった。上述の Fukahata et al. (2020) も例外ではない。しかし、その方法は、歪み速度場の一様性を仮定する範囲を手動で決める必要がある、同時に得られる変位速度場と歪み速度場が実は数学的に非整合である、推定誤差を適切に求められないなど、根本的な問題をいくつか抱えていることが分かった。そこで、それに代わる新たな方法として、ABIC を用いた基底関数展開に基づく解析法を開発し、日本列島における 2006 年 1 月から 2009 年 12 月の 4 年間の GNSS 速度データに適用して、これまでの研究よりも誤差が少なく且つ解像度が高い結果を得ることに成功した。この研究は論文としてまとめ、Earth, Planets and Space 誌に発表した (Okazaki et al., 2021)。

さらに同手法を 1997 年 1 月からの 3 年間、および 2017 年 10 月からの 3 年間の GNSS データに適用して、時間変化も含めた日本列島の変位速度場・歪み速度場を明らかにし、その成果を地学雑誌に掲載した (深畑ほか, 2022)。また、同論文では、複雑な日本列島の変形をどのように理解すべきかという問題について、剛体近似に基づくプレートテクトニクスを変動帯に適用するのは基本的に無理があること、代わりに島弧単位で変動を理解することが適当であることを指摘した。

(3) 東北沖地震の前に、恐らくは一部プレート境界の固着の剥がれにより、GNSS データの解析から得られる歪み速度が減速していたことが指摘されている。そこで、東北日本において地震時変動を差し引いた上で 19 世紀末から観測が開始された三角測量・三辺測量データを併せて解析することで、その歪み速度の減速の開始時期を調べた。その結果、歪み速度は、GNSS の観測開始前は概ね一様であったことが明らかとなった。この研究は、アメリカ合衆国の国際誌 (JGR) から出版した (Meneses-Gutierrez et al. 2022)。

< 引用文献 >

Fukahata, Y., Meneses-Gutierrez, A. & Sagiya, T., 2020. Detection of Plastic Strain Using GNSS Data of Pre- and Post-seismic Deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Earth Planets Space*, **72**:28, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-1144-1>.

深畑幸俊, 岡崎智久, 西村卓也, 2022. GNSS データに基づく日本列島の歪み速度場と島弧間および島弧内変動, *地学雑誌*, **131**, 479-496, doi:10.5026/jgeography.131.479.

Meneses-Gutierrez, A. & Sagiya, T., 2016. Persistent inelastic deformation in central Japan revealed by GPS observation before and after the Tohoku-oki earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*,

450, 366371, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.06.055>.

Meneses-Gutierrez, A. Segall, P. & Sagiya, T., How Steady is Interseismic Crustal Deformation in Northeast Japan? Evidence From an Integrated Analysis of Centennial Geodetic Data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **127**, e2021JB023100, <https://doi.org/10.1029/2021JB023100>

Okazaki, T., Fukahata, Y. & Nishimura, T., 2021. Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC, *Earth Planets Space*, **73**:153, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01474-5>.

Shen, Z.K., Jackson, D. and Ge, B.X., 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 27957-27980, doi:10.1029/96JB02544.

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 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Okazaki Tomohisa, Fukahata Yukitoshi, Nishimura Takuya	4. 巻 73
2. 論文標題 Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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） 10.1186/s40623-021-01474-5	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 Meneses Gutierrez Angela, Segall Paul, Sagiya Takeshi	4. 巻 127
2. 論文標題 How Steady is Interseismic Crustal Deformation in Northeast Japan? Evidence From an Integrated Analysis of Centennial Geodetic Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	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） 10.1029/2021JB023100	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 Sagiya Takeshi, Meneses-Gutierrez Angela	4. 巻 50
2. 論文標題 Geodetic and Geological Deformation of the Island Arc in Northeast Japan Revealed by the 2011 Tohoku Earthquake	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annual Review of Earth and Planetary Sciences	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1146/annurev-earth-032320-074429	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 Fukahata Yukitoshi, Meneses-Gutierrez Angela, Sagiya Takeshi	4. 巻 72
2. 論文標題 Detection of plastic strain using GNSS data of pre- and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-1144-1	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 深畑幸俊, 岡崎智久, 西村卓也	4. 巻 131
2. 論文標題 GNSSデータに基づく日本列島の歪み速度場と島弧間および島弧内変動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 479 ~ 496
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.131.479	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18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 深畑幸俊, 岡崎智久
2. 発表標題 日本列島の変形運動を理解するための枠組み: 島弧間変動と島弧内変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Lizarazo, S. C. & Sagiya, T.
2. 発表標題 Subsidence in NW Colombia explained by a viscoelastic earthquake cycle model
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 Bai, A. & Sagiya, T.
2. 発表標題 Toward a quantitative analysis of inelastic crustal deformation: performance evaluation of elastic prediction method
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 Meneses-Gutierrez, A., Sagiya, T. & Segall, P.
2 . 発表標題 How steady is interseismic crustal deformation in the late stage of the earthquake cycle? Evidence from a century of geodetic data in Northeast Japan
3 . 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Meneses-Gutierrez, A., Sagiya, T. & Segall, P.
2 . 発表標題 How steady is interseismic crustal deformation in Northeast Japan? Evidence from an integrated analysis of centennial geodetic data
3 . 学会等名 Regional Disaster Mitigation Research Workshop
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Meneses-Gutierrez, A., Sagiya, T., Miura, S., & Ohzono, M.
2 . 発表標題 A Universal Feature of Postseismic Transient Found in Inland and Interplate Earthquakes
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 Yukitoshi Fukahata, Angela Meneses-Gutierrez, and Takeshi Sagiya
2 . 発表標題 Detection of Plastic Strain Using GNSS Data of Pre- and Post-Seismic Deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake
3 . 学会等名 EGU General Assembly 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukitoshi Fukahata, Angela Meneses-Gutierrez, and Takeshi Sagiya
2. 発表標題 Separation of Plastic, Viscous, and Elastic Strains From Observed GNSS Data in the Niigata-Kobe Tectonic Zone
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 Angela Meneses-Gutierrez, Paul Segall, and Takeshi Sagiya
2. 発表標題 Horizontal deformation in NE Japan from triangulation, trilateration, and GPS from 1890 to 2010
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 Angela Meneses-Gutierrez, Paul Segall, and Takeshi Sagiya
2. 発表標題 How steady is crustal deformation in Northeast Japan? Evidence from an integrated analysis of centennial geodetic data
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 Angela Meneses-Gutierrez, Paul Segall, and Takeshi Sagiya
2. 発表標題 Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010
3. 学会等名 日本地震学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深畑幸俊、Meneses Angela、鷺谷威
2. 発表標題 応力の履歴に依存して発現する塑性歪みについて：2011年東北沖地震前後のGNSSデータからの推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深畑幸俊、Meneses Angela、鷺谷威
2. 発表標題 Detection of Plastic Strain Using GNSS Data of Pre- and Post-seismic Deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukitoshi Fukahata , Meneses-Gutierrez Angela , Sagiya Takeshi
2. 発表標題 Detection of plastic strain using GNSS data of pre- and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake
3. 学会等名 11th ACES (APEC Cooperation for Earthquake Science) International Workshop（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 深畑幸俊，岡崎智久，西村卓也
2. 発表標題 ABICを用いた基底関数展開に基づくGNSSデータの解析による日本列島の歪み速度場
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Meneses-Gutierrez, A., Sagiya, T., Miura, S., Ozone, M.
2. 発表標題 A universal feature of postseismic transient found in inland and interplate earthquakes
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Meneses-Gutierrez, A., Sagiya, T., Miura, S., Ozone, M.
2. 発表標題 A universal feature of postseismic deformation found in inland and mega thrust earthquakes
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Meneses-Gutierrez, A., Sagiya, T., Miura, S., Ozone, M.
2. 発表標題 A universal feature of postseismic transient found in inland and interplate earthquakes
3. 学会等名 地震研共同利用B研究集会「プレートの沈み込みと島弧変動のダイナミクス」
4. 発表年 2023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
研究 分担者	鷺谷 威 (SAGIYA Takeshi) (50362299)	名古屋大学・減災連携研究センター・教授 (13901)	

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	Meneses-Gutiérrez z Angela (Meneses- Gutiérrez Angela DelValle) (MENESES-GUTIERREZ Angela) (90846099)	名古屋大学・高等研究院（減災連携）・特任助教 (13901)	

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			
米国	Stanford University			