

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月13日現在

機関番号：13901

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2014～2018

課題番号：26109003

研究課題名(和文)異なる時空間スケールにおける日本列島の変形場の解明

研究課題名(英文) Resolution of crustal deformation of the Japan Islands in various spatio-temporal scales

研究代表者

鷺谷 威 (Sagiya, Takeshi)

名古屋大学・減災連携研究センター・教授

研究者番号：50362299

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 92,220,000円

研究成果の概要(和文)：日本列島において様々な時間・空間スケールで生じる地殻変動を包括的に理解することを目指し、測地学、地震学、地質学等の多様な観点から地殻の変形過程を調査した。その結果、長期的に累積する非弾性変形が活断層に関連してほぼ普遍的に存在しており、内陸地震の発生や地形の形成に重要な役割を担っていることが分かった。従来は食い違いが指摘されてきた地質学と測地学のデータは総合的な理解が可能であり、両者の知見を統合して日本列島の変形の全体像を明らかにする糸口を掴んだ。

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、従来は調査する手法や対象とするデータによって見えてくる地殻変動の様子が大きく異なり、統一的な描像が得られていなかった。特に、数年から100年程度の期間を扱う測地学と数千年以上の時間スケールを扱う地形学や地質学で変形速度の見積が1桁異なり、災害ポテンシャルを評価する上でも問題となっていた。本研究はこうした従来の問題を解決するとともに、地殻変形を駆動するメカニズムとして重要な非弾性変形の検出に初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：We investigate crustal deformation in the Japan Islands combining geodetic, seismological, and geological approaches in order to understand the deformation processes in various spatio-temporal scales in a comprehensive manner. We find that long-lasting inelastic deformation is going on almost universally associated with active faults, playing an essential role in generation of inland earthquakes and geomorphic features. For a long time, geological and geodetic observations have been considered contradictory each other. But we have proven that these data can be integrated for better understanding of the whole deformation process of the Japan Islands.

研究分野：地殻変動学

キーワード：地殻変動 ひずみ速度パラドックス 非弾性変形 内陸地震 GNSS 山岳熱史 長期変形 散乱構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本列島はプレート境界に位置し、プレート間の相互作用によって活発な地殻変動が絶えず生じている。こうした地殻変動の大部分は南海トラフや日本海溝などのプレート境界で発生する大地震によって解消するが、一部は地質学的時間スケールを通じて累積し、特徴的な永久変形として様々な地形や地質構造を形作る。従って、こうした地殻の変形を定量的に理解することは、日本列島の島弧地殻の発達や変遷、および大地震の繰り返し発生といったダイナミックな姿を理解する上で大変重要である。しかし、日本列島のひずみ速度に関しては、地形・地質データから推定されたひずみ速度に比べて測地的に観測されたひずみ速度が1桁大きい「ひずみ速度パラドックス」が指摘されており、日本列島が様々な時間スケールにおける変形挙動に対して総合的な理解ができていなかった。また、内陸部にひずみ集中帯の存在が指摘されていたものの、その局在化した変形の意味についても統一的な理解がなされていなかった。2011年東北地方太平洋沖地震の前後に地震間変動や余効変動を示す様々な地殻変動観測データが得られたが、それらの解釈も十分に行えていなかった。一方、地質学的な時間スケールにおける山岳隆起については、中部日本の山岳地域でデータが得られていたが、全体的にデータが少なく、特に東北地方では情報が限られていた。

2. 研究の目的

本研究では、測地学、地震学、地質学等の様々な手法を駆使し、知見を統合して、様々な時間スケールにおける日本列島の変形挙動を明らかにし、これまで未解決とされてきた地殻変形に関する様々な疑問に答えるとともに、日本列島の変形を統合的に理解するための新たな枠組みを提示することを目指す。

3. 研究の方法

日本列島には GEONET と呼ばれる高密度の GNSS 連続観測網が設置されており、1990年代半ば以降、高密度かつ高精度の地殻変動データが蓄積されている。しかし、その平均的な観測点間隔は20~25km程度であり、内陸の地震発生層の厚さが15km程度であることを考慮すると、空間分解能は不十分と言わざるを得ない。そこで、地殻ひずみの集中が指摘されている山陰地方、長野県北部、新潟県上越・中越地域、奥羽脊梁山脈などにおいて観測点間隔が3~5kmの稠密GNSS観測を実施し、ひずみ集中域におけるひずみの空間分布の特徴を明らかにすることを試みた。新潟、長野県北部、岐阜・富山県境の跡津川断層周辺などでは、2011年東北地方太平洋沖地震の前後で顕著な地殻変動パターンの変化が生じたことを利用し、2011年の地震前後で反転した成分と同じセンスで継続している地殻ひずみ成分の抽出を試みると同時に、その地学的意義について考察した。一方、中部日本の山岳地域は、GNSS等の機器を設置した観測が困難な一方、面的に地殻変動を検出可能な合成開口レーダーでは、険しい地形や冬季の積雪などの悪条件が重なる。そこで、GNSSと合成開口レーダーを組み合わせた解析を実施して、定常的な地殻変動による微弱な信号の検出を試みた。

長期的な地殻ひずみ速度の理解に向けては、測地的に得られる短期的な変形速度を高精度化し空間分解能を向上させるとともに、長期的な変形を表す地質・地形データの精査も必要である。こうした観点から、跡津川断層周辺では、従来あまり注目されてこなかった主断層以外の中小断層に注目し、綿密な地質調査に基づいて、そうした断層をマッピングするとともに、これらの中小断層の広域変形に対する寄与を定量的に見積もることを試みた。一方、地質学的な時間スケールの変形は、対象とする期間中、どこでも一定速度で進行することが暗黙のうちに仮定されているが、こうした仮定の妥当性について検証する目的で新潟および秋田地域における褶曲軸と地形的な稜線のずれの空間分布に着目し、断層活動が時間的に移動している可能性を検討した。さらに、新潟中越地域の活褶曲を示す断層露頭では、層間すべりが生じて地殻浅部のまげ剛性を低下させ、褶曲変形の発達を促進している可能性がある。そこで、地表観察に基づいて層間すべりを仮定し、堆積層におけるまげ剛性率を見積もって塑性変形のし易さを定量的に評価した。

熱年代学的手法を山岳地域の花崗岩サンプルに適用することで、1~100Ma程度の期間の山岳の隆起・削剥史を推定することができる。上下変動に関する情報は島弧の形成・発達史を理解する上で基本的なものであるが、特に東北地方では試料のサンプリングや分析があまり系統的に行われてこなかった。本研究では、東北日本を横断する測線を設定してサンプリングと試料分析を実施し、各地点における隆起・削剥の状況を推定して上下変動の地域性を推定した。

本研究では、地殻変形過程の理解を深めるため、いくつかのモデル計算を実施した。一つは、プレート内の地殻で変形集中が生じて活断層が発達する過程に関するモデルである。プレート内断層を想定した1mm/年という小さい変位速度を境界条件として与え、断層直下の下部地殻における剪断帯と不均質な粘性構造の発達、上部地殻における応力集中とそれらに伴う地震の繰り返し発生を一連の過程として再現することを試みた。また、長期的な地殻ひずみ速度を推定する新たな手法として、西南日本の下に沈み込んだフィリピン海プレートの形状に注目し、その形状から推定した累積の東西短縮量を地殻短縮のプロキシとして評価することを試みた。また、海洋プレートが長期にわたって定常的に沈み込むのに伴い、プレート境界周辺には島弧や海溝といった特徴的な地形が生じる。この仕組みについて定性的な説明を試みた。

4. 研究成果

1) ひずみ速度パラドックスの解決

ひずみ速度パラドックスについては、池田(1996)が指摘していたように、測地的なひずみ速度の多くはプレート境界の固着による弾性ひずみを反映したものであることが2011年東北沖地震の発生およびそれに関する観測例の分析を通して確認された。一方、地震前後の太平洋岸における上下変動は池田(1996)のモデルでは説明できないが、粘性緩和やプレート間の固着の不均質を考慮することで説明するモデルが複数提示された。さらに、明治以来の100年間の三角測量で東北地方に東西短縮が見られなかったことに関し、明治時代の測量結果が1894年庄内地震の影響でスケール誤差を持っていたという指摘がなされた。

2) ひずみ集中帯の非弾性変形

新潟 神戸ひずみ集中帯における2011年東北沖地震前後の地殻変動パターンの比較から、この地域における東西短縮が地震前後で持続しており、地殻応力によって駆動される非弾性変形であることを明らかにした。この非弾性変形は地質学的に推定されているこの地域の長期的な変形速度と整合的である。さらに、稠密GNSS観測データを用いて、地殻内非弾性変形と地殻浅部の軟らかい堆積層による弾性的な不均質による影響を分離した。この解析を通して、地殻の力学応答が、加える応力変化の時間スケールによって異なる可能性も指摘された。

一方、ひずみ集中帯の散乱構造を地震波のコーダQを用いて調べると、4-8HzのコーダQ値と地表の地殻ひずみ速度に負の相関、上部地殻のS波速度との間に正の相関が見られ、ひずみ集中の原因は上部地殻中における延性変形ではないかと推測される。この結果は測地データの解析とは必ずしも整合しておらず、その意味は引き続き検討する必要がある。

長野県北部地域では、新潟地域と同様に、東北沖地震の余効変動で広域的な東西伸張が起きている間も短縮変形が継続していたことが明らかとなり、地殻下部で東西短縮の非弾性変形が生じていることが示唆される。一方で、2014年長野県北部地震後には地殻変動の加速が見られ、近地の中規模地震の方が力学的に顕著な影響を持つことが示されたが、その仕組みは未解明である。

跡津川断層周辺の測地データからは、横ずれ断層においても東北沖地震前後で局所的な地殻変動が変化していないことが示され、下部地殻内の定常的な地殻変動が上部地殻の活断層を駆動している仕組みが明らかになった。また、GNSS観測と合成開口レーダーのデータを統合解析することにより、日本列島内陸部の活断層に関連する定常的な地殻変動を初めて合成開口レーダーで捉えることに成功した。

また、山陰地方では、20世紀に地震が多発している地域がひずみ集中帯であることを観測から明らかにした。

3) 内陸断層における変形のモデル化

実験で求められた岩石の流動則を用いて内陸断層の変形条件で下部地殻の剪断帯発達過程をモデル化し、変形集中を引き起こす要因について検討した。その結果、応力がひずみ速度のべき乗に比例する、べき乗則クリープと呼ばれる非線形の流動則が支配要因であり、より運動速度の速いプレート境界で支配的である剪断発熱や摩擦発熱の影響は無視できることが分かった。

さらに、変形の累積に伴い断層周辺に応力が集中するとともに、断層直下で粘性が低下する一方、断層から離れた部分では逆に粘性が増加し、変形が断層直下の下部地殻に集中すること、その結果、断層の応力蓄積速度が増加して短い間隔で地震が繰り返すようになる一連の過程を一つの数値モデルで再現し、断層の応力蓄積と周辺の構造発達および剪断帯の形成が互いに関連する力学過程であることを示した。

4) ひずみ集中帯に関する地質学的な検証

新潟および秋田地域において地殻変形場が時間とともに移動する可能性を褶曲軸と地形的な稜線の位置関係から考察した。その結果、断層活動の場は $10^3 \sim 10^4$ 年のスケールで移動していることが分かり、長期的な変形速度を過小評価する要因となることが分かった。

新潟で顕著な褶曲変形を生じている地層の力学的な強度を見積もる目的で層間すべりに着目し、露頭で確認された層間すべりの分布、およびすべり面の摩擦特性を実験的に調べることを通じて、層間すべりが無い場合と比べて地層全体のまげ剛性率が数%まで低下する可能性を指摘した。

跡津川断層周辺では、主断層外の中小断層の分布を詳細に調べるとともに、それらの広域変形に対する寄与を定量的に見積もった。その結果、こうした主断層外の変形が測地的な変位速度と地質学的な変位速度の食い違いを説明する可能性のあることが分かった。

5) 長期的な地殻ひずみ速度の新たな推定法

西南日本の下に沈み込んだフィリピン海プレートの形状に注目してその変形から東西短縮速度を見積もった。その結果は、中部日本において 5.6×10^{-8} /年と、測地的な値と地質学的な値の中間的な値となり、地殻ひずみを評価する独立した指標として使用できる可能性が示された。

6) 熱年代学から見た奥羽山脈の隆起・削剥史

本研究では、日本列島全体について熱年代のデータベースを構築するとともに、従来データの少なかった東北日本で熱年代学的なサンプリングと試料分析を行った。その結果、前弧側の熱年代が50Ma以上と大変古いのに対し、奥羽脊梁山脈は1~3Ma、日本海側でも3~5Maと若い年代が得られ、隆起・削剥史に顕著な地域性のあることが明らかとなった。

また、奥羽脊梁山脈周辺の熱年代の詳細な分布を検討したところ、山麓から山頂にかけて年代が若返っており、山脈両側の断層運動によるポップアップ型の隆起よりもマグマ貫入によるドーム状の隆起の方がより整合的であると推定した。

7) 定常沈み込みに伴うリソスフェア変形の解釈

プレートの定常沈み込みに伴って島弧・海溝や外縁隆起帯が形成するというモデルが提示されていたが、なぜそうなるかについての適切な説明がなされていない。物理的考察に基づいてそうした地形形成に必然性があることを示した。

このように 様々な研究を通して日本島弧の地殻変形の様々な側面を明らかにすることができ、変形過程の理解が多いに進んだ。地殻の非弾性変形の詳細な分布やその構成関係、地殻の水平変動と上下変動の統一的な理解などはまだ不十分な点であり、今後の研究を通して研究が進むことを期待したい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 56 件)(すべて査読有り)

- 1) Nishimura, T., M. Sato, and T. Sagiya (2014) *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **42**, 653-674.
- 2) Takada, Y. and Y. Fukushima (2014) *J. Disaster Res.*, **9**, 373-380.
- 3) Shikakura, Y., Y. Fukahata & K. Hirahara (2014) *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **119**, 502-518.
- 4) Fukahata, Y., Y. Yagi, and L. Rivera (2014) *Geophys. J. Int.*, **196**, 552-559.
- 5) Funning, G., Y. Fukahata, et al. (2014) *Geophys. J. Int.*, **196**, 1564-1579.
- 6) Hamling, I.J. et al. (Y. Fukahata 5人中5人目) (2014) *Geophys. J. Int.*, **197**, 33-49.
- 7) Hashima, A., Y. Fukahata, C. Hashimoto. & M. Matsu'ura (2014) *Pure Appl. Geophys.*, **171**, 1669-1693.
- 8) Tsuji, S., Y. Hiramatsu, et al. (2014) *Earth Planets Space*, **66**:97.
- 9) Mizukami, T., H. Yokoyama, Y. Hiramatsu, et al. (2014) *Earth Planet. Sci. Lett.*, **401**, 148-158.
- 10) 大坪誠, 宮川歩夢, 他(2014) *地質学雑誌*, **120**, 423-433.
- 11) Yamagiwa, S., S. Miyazaki, K. Hirahara & Y. Fukahata (2015) *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 66-73.
- 12) Jiang, G., X. Xu, G. Chen, Y. Liu, Y. Fukahata, et al. (2015) *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, 1855-1873.
- 13) Yagi, Y., R. Okuwaki, B. Enescu, & Y. Fukahata (2015) *Earth Planets Space*, **67**:100.
- 14) Watanabe, Y., and T. Tagami (2015) *Carbonates and Evaporites*, **32**, 117-122.
- 15) Urano, S., Y. Hiramatsu, et al. (2015) *Earth Planets Space*, **67**:101.
- 16) Sagiya, T. (2015) *Int. Assoc. Geodesy Symposia*, **145**, doi:10.1007/1345_2015_189.
- 17) Otsubo, M., and A. Miyakawa (2016) *Quaternary Int.*, **397**, 563-572.
- 18) Hamada M., Y. Hiramatsu, et al. (2016) *Tectonophysics*, **670**, 38-47, 2016.
- 19) Fukahata, Y., & Matsu'ura, M. (2016) *Geophys. J. Int.*, **204**, 825-840.
- 20) Ichimura, T., R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, & Y. Fukahata, (2016) *Geophys. J. Int.*, **206**, 114-129.
- 21) Takada, Y., K. Katsumata, H. Katao, M. Kosuga, Y. Iio, T. Sagiya, et al. (2016) *Tectonophysics*, **682**, 134-146.
- 22) Meneses-Gutierrez, A. and T. Sagiya (2016) *Earth Planet. Sci. Lett.*, **450**, 366-371.
- 23) Hiramatsu, Y., et al. (2016) *Earth Planets Space*, **67**:52.
- 24) Iidaka, Y., Y. Hiramatsu, et al. (2016) *Earth Planets Space*, **68**:164.
- 25) Matsumoto, N., Y. Hiramatsu, A. Sawada (2016) *Earth Planets Space*, **68**:167.
- 26) Fukahata Y., & Hashimoto M. (2016) *Earth Planets Space*, **68**:204.
- 27) Wada, S., A. Sawada, Y. Hiramatsu et al. (2017) *Earth Planets Space*, **69**:15.
- 28) Zhang, X., and T. Sagiya (2017) *Earth Planets Space*, **69**:82.
- 29) Nishimura, T., Y. Takada (2017) *Earth Planets Space*, **69**:85.
- 30) Iio, Y., I. Yoneda, M. Sawada, T. Miura, H. Katao, Y. Takada, et al. (2017) *Earth Planets Space*, **69**:144.
- 31) Otsubo, M., Utsunomiya, M., Miyakawa, A. (2017) *Quaternary Int.*, **456**, 117-124.
- 32) Sueoka, S., T. Tagami, B. P. Kohn (2017) *Earth Planet Space*, **69**:79.
- 33) Shindoh, T., T. Mishima, Y. Watanabe, S. Ohsawa, T. Tagami (2017) *J. Cave Karst Studies*, **79**, 100-112.
- 34) Sueoka, S., Y. Ikeda, K. Kano, H. Tsutsumi, T. Tagami et al. (2017) *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **122**, 6787-6810.
- 35) Dojo, M. and Y. Hiramatsu (2017) *Earth Planets Space*, **69**:76.
- 36) Fukahata, Y., & Matsu'ura, M. (2018) *Pure Appl. Geophys.*, **175**, 549-558.
- 37) Yamazaki, T., T. Kobayashi, T. Wright, & Y. Fukahata (2018) *J. Volcanol. Geotherm.*

- Res., **349**, 128-145.
- 38) Takada, Y., T. Sagiya, and T. Nishimura (2018) *Earth Planets Space*, **70**:32.
 - 39) Otsubo, M., Miyakawa, A., Imanishi, K. (2018) *Earth Planets Space*, **70**:51.
 - 40) Tsukahara, K., and Y. Takada (2018) *Earth Planets Space*, **70**:52.
 - 41) Hasegawa, W., Y. Watanabe, H. Matsuoka, S. Ohsawa, B. Burahmantyo, K. A. Maryunani, T. Tagami (2018) *J. Cave Karst Studies*, **80**, 19-27.
 - 42) Daiku, M., Y. Hiramatsu et al. (2018) *Tectonophys.*, **722**, 314-323.
 - 43) Iio, Y., R. H. Sibson, T. Takeshita, T. Sagiya, et al. (2018) *Earth Planets Space*, **70**:97
 - 44) Meneses-Gutierrez, A., T. Sagiya, S. Sekine (2018) *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**, 6072-6085.
 - 45) Sagiya, T., N. Matta, Y. Ohta (2018) *Earth Planets Space*, **70**:120.
 - 46) Zhang, X., T. Sagiya (2018) *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**, 9269-9285.
 - 47) Kumagai, K., and T. Sagiya (2018) *Earth Planets Space*, **70**:186.
 - 48) Fukushima, Y., S. Toda, S. Miura, et al. (2018) *Nature Geoscience*, **11**, 777-781.
 - 49) Otsubo M., Naruse H., Miyakawa A. (2018) *Progress Earth Planet. Sci.*, **5**:59,
 - 50) Okuwaki, R., A. Kasahara, Y. Yagi, S. Hirano, & Y. Fukahata (2019) *Geophys. J. Int.*, **216**, 1529-1537.
 - 51) Fukahata, Y. (2019) *Progress Earth Planet. Sci.*, **6**:4.
 - 52) Tagami T. (2019) Application of fission-track thermochronology to understand fault zones. in "Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology" ed. by Malsa, M.G. and Fitzgelard, P.G., Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment.
 - 53) Fukuda S., Sueoka S., Hasebe N., Tamura A., Arai S. and Tagami T. (2019) *J. Asian Earth Sci.*:X, doi:10.1016/j.jaesx.2019.100005.
 - 54) Dojo, M. and Y. Hiramatsu (2019) *Earth Planets Space*, **71**:32.
 - 55) 鷺谷威, 大坪誠 (2019) 日本列島の地殻ひずみ速度：測地学的データと地質・地形学的データの統一的理解, *地学雑誌*, 受理 (2019.2.26)
 - 56) 岩田貴樹, 吉田圭佑, 深畑幸俊 (2019) 地震学的データを用いた応力インバージョン, *地学雑誌*, 受理

〔学会発表〕(計 63 件)(うち基調講演, 招待講演 14 件)

〔図書〕(計 1 件)

- 1) 鳥海光弘・入船徹男・岩森光・ウォリスサイモン・小平秀一・小宮剛・阪口秀・鷺谷威・末次大輔・中川貴司・宮本英昭(編), 図説地球科学の事典, 朝倉書店, 248pp.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 深畑 幸俊

ローマ字氏名: Fukahata Yukitoshi

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 防災研究所

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 10313206

研究分担者氏名: 三浦 哲

ローマ字氏名: Miura Satoshi

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 理学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 70181849

研究分担者氏名: 大坪 誠

ローマ字氏名: Otsubo Makoto

所属研究機関名: 国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：地質調査総合センター
職名：主任研究員
研究者番号(8桁)：70443174

研究分担者氏名：田上高広
ローマ字氏名：Tagami Takahiro
所属研究機関名：京都大学
部局名：理学研究科
職名：教授
研究者番号(8桁)：80202159

研究分担者氏名：平松良浩
ローマ字氏名：Hiramatsu Yoshihiro
所属研究機関名：金沢大学
部局名：地球社会基盤学系
職名：教授
研究者番号(8桁)：80283092

研究分担者氏名：高田陽一郎
ローマ字氏名：Takada Youichiro
所属研究機関名：北海道大学
部局名：理学研究院
職名：准教授
研究者番号(8桁)：80466458

研究分担者氏名：太田雄策(2014年度, 2015年から研究協力者)
ローマ字氏名：Ohta Yusaku
所属研究機関名：東北大学
部局名：理学研究科
職名：准教授
研究者番号(8桁)：50451513

(2)研究協力者

研究協力者氏名：末岡 茂
ローマ字氏名：Sueoka Shigeru
研究協力者氏名：宮川歩夢
ローマ字氏名：Miyakawa Ayumu
研究協力者氏名：吉田武義
ローマ字氏名：Yoshida Takeyoshi
研究協力者氏名：市原美恵
ローマ字氏名：Ichihara Mie
研究協力者氏名：相澤広記
ローマ字氏名：Aizawa Koki

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、研究者個人に帰属されます。