

令和 2 年 5 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14724

研究課題名(和文)3次元地盤変動モニタリングのためのPS干渉SAR解析と地下逆解析の高度化

研究課題名(英文)Improvements of PSInSAR analysis and inverse analysis of subsurface changes for three-dimensional surface displacement monitoring

研究代表者

石塚 師也 (Ishitsuka, Kazuya)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：90756470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、干渉SAR解析技術の高精度化および、推定された地表変動の解釈技術の高度化を行った。開発した手法は、従来の課題点であった大気の影響により頑強な手法であり、2016年熊本地震前後の地表変動に適用を行い、九重火山および阿蘇火山、熊本地域において、断層運動に伴う広域的な傾向と異なる局所的な地表変動が発生していることを捉えた。変動源の位置および物性の推定を行い、その他の観測データと比較を行ったところ、2016年熊本地震により地殻流体の流動傾向に変化が生じたことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地表変動の高精度なモニタリングと変動要因の推定は、国土強靱化の観点から喫緊の課題である。本研究では、地表変動のモニタリング手法として有効性を示しているPS干渉SAR解析を対象として、より高精度な地表変動の推定を可能とする手法の改良を行った。また、変動源や物性に関するパラメータを推定することで、より詳細に変動メカニズムを考察できることを可能とした。これらの手法は、2016年熊本地震前後の地表変動に適用を行い、大規模地震に伴い、周辺の火山や帯水層に影響を与え、局所的な地表変動が発生したことが示唆された。このような事例やその特徴を示すことにより、地震後の地表変動現象に新たな知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, I improved the accuracy to estimate surface displacements by SAR interferometry. The developed method is robust due to atmospheric effects, which has been known as a major error source. In addition, I also improved the inversion analysis to interpret the estimated surface displacements. The developed methods were applied to the Kumamoto area, Aso and Kuju volcano, located near the epicenter of the 2016 Kumamoto earthquake (Mw 7.0) on April 16, 2016. Based on the estimation of the displacement source and comparison with existing observations, we indicated that the migration pattern of the crustal fluid was altered due to the 2016 Kumamoto earthquake.

研究分野：資源工学、地球物理学

キーワード：PS干渉SAR解析 地表変動モニタリング 地下水 地震後地表変動 2016年熊本地震 阿蘇火山

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

合成開口レーダ (SAR) は、能動的なマイクロ波の送受信により、対象の反射特性を空間的高解像度で検出するレーダである。また、干渉 SAR 解析や PS 干渉 SAR 解析と呼ばれる手法は、人工衛星に搭載された合成開口レーダを用いて特定地域で異なる時刻に取得されたデータを用いて、ミリメートルからセンチメートル精度で観測期間の面的な地表変動を検出することができる手法である。この手法により、広域における地表変動を周期的かつ空間的に密に検出することが可能となることが期待される。さらには、検出された地表変動を基に、地盤や地殻の物性などの情報の常時把握とその将来予測の可能性が期待される。しかしながら、SAR の観測においては、高精度な地表変動観測が難しい観測条件が存在する。また、現時点では干渉 SAR 解析や PS 干渉 SAR 解析の地表変動から地殻や地盤の情報の定量的な把握技術は確立していない。

### 2. 研究の目的

本研究では、PS 干渉 SAR 解析および干渉 SAR 解析の有効性を一層高めることを目的として、(1)PS 干渉 SAR 解析の高精度化および頑強性の向上を目指した手法開発、(2)逆解析を応用した地殻・地盤物性の定量的な推定手法の開発を行う。また、熊本地域や阿蘇火山、九重火山などを対象として、2016 年熊本地震に伴う地表変動傾向の変化の検出と地殻や地盤物性の変化の推定および地表変動メカニズムの考察を行い、PS 干渉 SAR 解析および干渉 SAR 解析を用いた地表変動モニタリングの有効性を示す。

### 3. 研究の方法

上記の研究の目的を達成するため、PS 干渉 SAR 解析および干渉 SAR 解析手法の改良を行い、実データへ適用を行った。適用対象は、2016 年 4 月 16 日に本震 (Mw 7.0) が発生した 2016 年熊本地震に伴う地表変動を対象とした。先行研究により、地震に伴う地殻応力や物性の変化に伴い、地表変動が発生することが知られているが、観測事例の限られた地表変動メカニズムが存在する。また、このような地殻応力や物性の変化は、火山活動や地下水位変化に影響を与えるため、地表変動のモニタリングを行い、変動メカニズムを推定することは重要である。

#### (1) PS 干渉 SAR 解析の手法開発

PS 干渉 SAR 解析を用いて、高精度な地表変動の推定が難しい条件として、観測時の水蒸気量の変化などの気象条件と、対象地域の地表被覆に依存するノイズ量の増加の 2 点が挙げられる。特に観測時の水蒸気量の変化は、推定結果に大きな誤差を生じる原因となるため、これらの影響に頑強な手法を検討する。

#### (2) 逆解析を応用した地殻・地盤物性の定量的な推定と地表変動現象の解釈

地表変動のメカニズム解明に寄与するため、地表変動データを用いて逆解析により地殻および地盤物性の推定を行う解析フローを提案する。また、2016 年熊本地震後の地表変動に適用を行い、手法の特徴および有効性を示す。

### 4. 研究成果

(1) PS 干渉 SAR 解析および干渉 SAR 解析の推定精度を上げる方法として、(i)大気中の水蒸気量の変化の時空間的な統計量を用いてフィルタリングを行う方法、および(ii)気象データから物理的なメカニズムを基に大気中の水蒸気量の変化を取り除く手法が考えられる。これらの手法の効果について、それぞれを独立で用いた場合および、両方を用いた場合について、検討を行った。気象データを用いた場合、誤差が減少した場合も見られたが、効果が表れないデータも見られた。誤差を減少した場合のみにおいて気象データを用い、その後フィルタリングを適用する場合が最も誤差が減少するケースが多いことが示された。

(2)阿蘇火山を対象とした解析では、2016 年 4 月 18 日から 2017 年 6 月 12 日間に取得されたデータを用いて干渉 SAR 解析を行い、カルデラ北西部の半径 3km の範囲において、年間約 7cm の沈下が発生していることを検出した (図 1)。解析範囲には、国土地理院が運用する GNSS 観測網 (GEONET) が 3 点あったため、1 点を基準点として地表変動量の比較を行ったところ、0.86 cm、0.74 cm の RMSE で地表変動を推定できていることが分かった。2016 年熊本地震前には、このような地表変動は発生していなかったことから、2016 年熊本地震に伴って発生した地表変動と考えられる。大規模な地震後に地表変動が継続して発生することは知られているが、地震発生に伴う応力変化によるものや震源断層の予効滑りに起因するものであることが多い。しかしながら、本研究で捉えられた地表変動は、2016 年熊本地震に伴う応力分布や震源断層の分布とは相関が小さく、これらのメカニズムでは説明できないことが分かった。そのため、変動源の位置とその地質学的特徴について理解を深めるため、圧力源の形状や地下の不均質性を考慮した場合の変動源位置について検討を行った。その結果、圧力源の形状により数 100 m の誤差はあるものの、地下浅部の弾性係数の小さい層の存在を考慮することで、より深部に変動源が存在していることが分かった。これにより、マグネトテルリク法で推定された低比抵抗域と一致する可能性が高く、低比抵抗域に対応する深部の地殻流体の流動もしくはマグマだまりの変形により地表変動が発生していることを示唆された。特に、2016 年熊本地震後に阿蘇火山の山麓で地下水位の上昇が観測されていることから、地殻流体の流動に伴う地表変動である蓋然性が高いと考えられる。大規模な地震の後に火山活動が活発化することが起こる場合があるが、そのメカニズムは不

明点も多い。本研究で捉えられた地表変動は、大規模な地震が火山に及ぼす影響を捉えた貴重な事例であると考えている。また、本研究では、地質学的に想定される地殻の不均質性を考慮し、変動源位置の推定を行うことで、地下物性の範囲を推定でき、地表変動現象の解釈に役立つことを示した。

(3)九重火山を対象とした解析では、2016年熊本地震前のデータとして、2014年8月28日から2016年2月25日に取得された5データを用いた。また、2016年熊本地震後の地表変動を推定するためのデータとして、2016年4月18日から2016年11月14日に取得された10データを用いた。解析手法は、Small Baseline Subset Analysis (SBAS)法を用いた。解析結果とGNSS観測点との比較を行ったところ、地震前に取得されたデータのRMSEは0.92 cm、地震後に取得されたデータのRMSEは0.53 cmであり、その整合性が確認できたと考える。2016年熊本地震前と地震後では、硫黄山山頂周辺のみにおいて、沈下が発生していることが分かった。硫黄山は、1995年の水蒸気爆発でも知られており、現在でも噴煙を出し続けており、1日約2、3個の微小地震が観測されている。一方、2016年熊本地震直後の期間である2016年4月18日から2016年6月13日のペアでは、硫黄山山頂とその周辺も含めた範囲で約4cmの隆起が確認された。変動源の位置を逆解析により推定を行ったところ、2016年熊本地震前・地震後でそれぞれ0.4 km、0.3 kmの深さであることが分かった。これは既往の研究で水蒸気だまりの位置と概ね一致しており、水蒸気だまりからの水蒸気の放出によって沈下が生じていると考えられる。また、体積変化量は、2016年熊本地震前・地震後でそれぞれ73 m<sup>3</sup>および71 m<sup>3</sup>と推定された。これは、2003年の既往研究と比べて約1/5に減少していると推定された。一方、2016年熊本地震直後の隆起の変動源は、深さ約1 kmに位置することが分かった、また、体積変化量も増加していることが分かった。

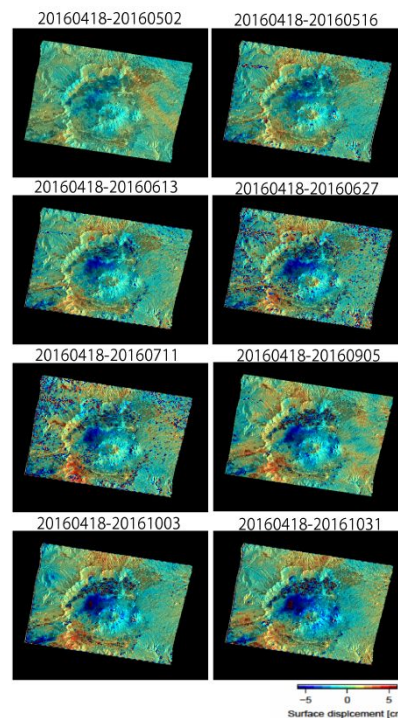


図 1 阿蘇火山における地表変動の推定結果

(4)熊本地域では、我が国でも有数の地下水の活用および保全に成功している地域である。一方、2016年熊本地震後は、それ以前の期間と比べて、地下水位の変化が大きいことが報告されており、地表変動にも地下水位の影響が現れていることが推測される。本解析では、2016年4月18日から2017年11月13日に取得されたデータを用いて、PS干渉SAR解析を行った。また、2007年1月7日から2011年3月5日に取得されたデータを用いた解析結果との比較を行った。解析の結果、2016年熊本地震後の約1年間の期間には、熊本地域の複数箇所において、2007年1月7日から2011年3月5日間の期間には確認できなかった地表変動を検出した。顕著な地表変動は、震源断層周辺で発生していたが、震源断層から一定程度離れた箇所でも地表変動が発生していることが分かった。このPS干渉SAR解析で推定された地表変動と現地観測された地下水位データを比較したところ、一部の地域では、地下水位変化と地表変動の傾向は相関性があり、地下水位変化に起因して地表変動が発生したことが示唆された。また、地表変動と地下水位の相関がある箇所では、これらのデータを統合し、圧縮率および空隙率の空間分布の推定を行った。推定された地下物性は、従来知られている帯水層の地質分布と整合的であり、特に火砕流堆積物で構成される地域と沖積層で構成される地域の物性の違いを表していると考えられる。さらに、熊本平野と台地の境界には、降雨の影響と考えられる季節性地表変動が大きい地域が複数あり、これらの地域では圧縮率が周辺の帯水層とは異なることが推定された。一方で、地下水位変化と地表変動の傾向が一致しない地域もあった。このような地域は、周囲と異なる水理地質構造がある、もしくは他の地表変動発生メカニズムがある可能性が考えられる。

<引用文献>

Wataru Yamada, Kazuya Ishitsuka, Toru Mogi, Mitsuru Utsugi (2019) Surface displacements of Aso volcano after the 2016 Kumamoto earthquake based on SAR interferometry; implications for dynamic triggering of earthquake-volcano interactions, *Geophysical Journal International*, 218, 755-761.

三村祐介, 石塚師也, 小田義也, 窪田健二 ALOS-2 データを用いた 2016 年熊本地震前後の九重山の地表変動の推定, 物理探査, 印刷中.

Kazuya Ishitsuka, Takeshi Tsuji (2019) Mapping surface displacements and aquifer characteristics around the Kumamoto plain, Japan, using persistent scatterer interferometry, IGARSS 2019, TUP2.PS.3, Yokohama, July.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wataru Yamada, Kazuya Ishitsuka, Toru Mogi, Mitsuru Utsugi	4. 巻 218
2. 論文標題 Surface displacements of Aso volcano after the 2016 Kumamoto earthquake based on SAR interferometry: Implications for dynamic triggering of earthquake-volcano interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 755-761
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggz187	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 Ishitsuka Kazuya, Matsuoka Toshifumi, Nishimura Takuya, Tsuji Takeshi, ElGharbawi Tamer	4. 巻 69:81
2. 論文標題 Ground uplift related to permeability enhancement following the 2011 Tohoku earthquake in the Kanto Plain, Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-017-0666-7	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 三村祐介、石塚師也、小田義也、窪田健二	4. 巻 出版中
2. 論文標題 ALOS-2データを用いた2016年熊本地震前後の九重山の地表変動の推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 出版中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） in press	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 Kazuya Ishitsuka, Shinichiro Iso, Kyosuke Onishi, Toshifumi Matsuoka	4. 巻 9365184
2. 論文標題 Object detection in ground-penetrating radar images using a deep convolutional neural network and image set preparation by migration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Geophysics	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） 10.1155/2018/9365184	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 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 0件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Kazuya Ishitsuka
2. 発表標題 Surface displacement around the Kumamoto plain before and after the 2016 Kumamoto earthquake
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Ishitsuka
2. 発表標題 Surface displacement around the Kumamoto area using persistent scatterer interferometry
3. 学会等名 The 13th SEGJ international symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Ishitsuka, Takeshi Tsuji
2. 発表標題 Surface displacements and groundwater level changes around the Kumamoto plain, Japan, associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence
3. 学会等名 2018 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Yamada, Kazuya Ishitsuka, Toru Mogi
2. 発表標題 Surface displacement and the source depth of Aso volcano due to the 2016 Kumamoto earthquake using interferometric SAR analysis
3. 学会等名 2018 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Yamada, Kazuya Ishitsuka, Toru Mogi
2. 発表標題 Surface displacements around Mt. Aso associated with the 2016 Kumamoto earthquake using interferometric SAR analysis
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ishitsuka Kazuya, Matsuoka Toshifumi, Tsuji Takeshi
2. 発表標題 Post-seismic displacement around the Kanto plain, Japan after the 2011 Tohoku earthquake: implications for the subsurface structure
3. 学会等名 EGU General Assembly Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤井幸泰, 石塚師也, 金子 誠, 高橋 亨, 松岡俊文
2. 発表標題 干渉SAR解析を用いた白山南西斜面の地表変動量の推定と地すべりブロックの特定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石塚師也, 藤井幸泰, 金子 誠, 高橋 亨, 松岡俊文
2. 発表標題 干渉SAR解析を用いた白山南西部斜面における近年の地すべり地表変動の検出
3. 学会等名 物理探査学会第136回学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤井幸泰, 石塚師也, 金子 誠, 高橋 亨, 松岡俊文
2. 発表標題 空中写真判読・現地踏査および干渉SAR解析を用いた白山甚之助谷地すべりの構造について
3. 学会等名 日本地質学会第124年学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三村祐介, 石塚師也, 小田義也
2. 発表標題 干渉SAR解析を用いた2016年熊本地震前後の九重山の地表変動の推定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuya Ishitsuka, Takeshi Tsuji
2. 発表標題 Mapping surface displacements and aquifer characteristics around the Kumamoto plain, Japan, using persistent scatterer interferometry
3. 学会等名 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石塚師也、辻健
2. 発表標題 PS干渉SAR解析を用いた熊本平野における地表変動の推定と地下水位との比較
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaro Shigemitsu, Kazuya Ishitsuka, Weiren Lin
2. 発表標題 Monitoring surface displacements after the 2018 Northern Osaka earthquake using InSAR analysis
3. 学会等名 2019 AGU fall meeting (国際学会)
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
--	---------------------------	-----------------------	----