

Sentinel-1 衛星データの InSAR 解析に基づく 富士山・伊豆大島周辺の地表変位場

福田晴花¹・三井雄太¹

Displacement fields around the Fuji and Izu-Oshima volcanoes based on InSAR analysis of the Sentinel-1 satellite data

HARUKA FUKUDA¹ and YUTA MITSUI¹

Abstract Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) can produce an image of detailed crustal deformation without any surface observation point. A SAR satellite, Sentinel-1, developed by the European Space Agency (ESA) has performed frequent observations of the same regions with C-band microwaves. In the present study, we investigate recent crustal deformations of two volcanic regions in Japan, i.e. Mt. Fuji and Izu-Oshima Island, using data acquired by Sentinel-1. First, a comparison of the InSAR time-series data (more than 20 times a year on average) with the Global Navigation Satellite System (GNSS) time-series data, at the coordinates of each GNSS station, confirmed close similarities between displacement rates (trends) of the InSAR and GNSS data around Mt. Fuji, although the InSAR data tend to include some apparent annual variation. Then, we applied a decomposition method to the InSAR data into two directions: East-West and Up-Down. For Mt. Fuji, the boundary where the direction of the displacement rates is changing, corresponds approximately to the strike of the dike in the subsurface. For Izu-Oshima Island, the data point out a faster deformation in the eastern part of the island, however, whether it is a true signal or not remains to be clarified.

Keywords: InSAR, Sentinel-1, GNSS, volcano, Mt. Fuji, Izu-Oshima Island, dike

はじめに

火山の地下の状態を推定するための測地学的観測として、GNSS（全球測位衛星システム）や水準器を用いた測量、ひずみ・傾斜観測、重力測定などが行われてきた（例、青木, 2016; 風間, 2019）。これらの手法では現地に観測点を設置する必要があり、設置困難な場所においては観測が不可能という根本的な問題があった。

一方、SAR（合成開口レーダー）衛星のデータを用いた InSAR（干渉 SAR）解析手法の発展により、地表観測点なしで広範囲の地表変位を面的に観測することが可能となってきた（例、Massonnet *et al.*, 1993; 古屋, 2006）。

InSARでは、異なった時期におけるマイクロ波の地表散乱データ同士を干渉解析することで、当該期間における地表変位を高い空間分解能で得ることができる。この特性を活かし、火山性地殻変動の観測にも広く用いられてきた（例、小澤ほか, 2003; Takada and Fukushima, 2013）。

日本では、1992年に初の SAR 衛星「ふよう1号」（JERS-1）が打ち上げられた後、2006年に「だいち」（ALOS-1）、2014年に「だいち2号」（ALOS-2）が打ち上げられ、様々な分野で利用されてきた。ALOS-2は、空間分解能がALOS-1よりも高くなったほか、回帰日数がALOS-1の46日から14日へと短くなり、観測頻度が増加した。しかし、国土地理院のGNSS観測網GEONETが1

2021年3月16日受付 2021年5月3日受理。

Received: 16 March 2021 Accepted: 3 May 2021

¹静岡大学理学部地球科学科, 〒422-8529 静岡市駿河区大谷836

¹Faculty of Science, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

E-mail: mit@shizuoka.ac.jp (Y. M.)

日1回の地表変位データを提供している点に比べると、同一地域における観測頻度は非常に低く、GNSSのような時系列解析を行うにはデータが不足気味となる。

この点についてより改善されたのが、ヨーロッパ宇宙機関によって開発されたSentinel-1衛星である。Sentinel-1はSentinel-1AとSentinel-1Bの2機体制となっており、回帰日数が6日とALOS-2よりもさらに短い。Sentinel-1の高頻度な観測データは、干渉解析システムLiCSAR (Lazecký *et al.*, 2020) と時系列解析システムLiCSBAS (Morishita *et al.*, 2020) を通して、面的な地表変位速度データを高い空間分解能で提供する。

本研究では、Sentinel-1データのInSAR時系列解析に基づいて、日本の富士山・伊豆大島(図1)における近年の火山性地殻変動を調査する。これらの火山周辺では、GNSSやひずみ計による観測が定期的に行われており、特に時間的な変化については詳細に調べられてきた(例、原田ほか, 2010; 渡辺, 2012; Mitsui and Kato, 2019)。まず、時間分解能の高いGNSSとInSARの時系列データを比較してInSARの解析精度を確認し、InSARによってのみ得られる面的な地表変位場について議論する。

手法

使用したデータ

本研究では、ヨーロッパ宇宙機関によるSentinel-1衛星のSARデータと国土地理院によるGNSSデータとを使用する。SARデータは、Sentinel-1衛星の観測シーンのう

ち、富士山・伊豆大島周辺のものの上昇軌道・下降軌道双方について取得する(表1)。なお、伊豆大島周辺では上昇軌道のデータがごく最近のもの(2019年中旬以降)しか無いため、下降軌道のデータもそれに合わせてごく最近のもののみ取得した。GNSSデータは、国土地理院によるF3解(中川ほか, 2009)を用いる。期間はSARデータに合わせる。GNSSデータから、アンテナ交換等のオフセットは除去済である。

InSARとGNSSの変位時系列

InSARの時系列解析は、Lazecký *et al.* (2020) と Morishita *et al.* (2020) の手法に従って行う。具体的には、0.001度の空間分解能で干渉解析された多数のInSAR画像データから、NSBASと呼ばれるインバージョン法(López-Quiroz *et al.*, 2009; Doin *et al.*, 2011)に基づいて、変位時系列を最小二乗推定する。植生などの影響で干渉条件が悪かった地点を複数の指標に基づいて抽出し、該当部にマスクをかけることで、精度の高い変位時系列データを算出する。

得られたInSARとGNSSの変位時系列データを、GNSS観測点の位置で比較する。両者は別個に観測・解析されたデータなので、両者に大きな乖離がなければ、結果の信頼性が高いと考えられる。比較に使用するGNSS観測点の位置を図1に示す。なお、InSAR解析でマスクがかけられた地点にあるGNSS観測点は使用しない。InSARは衛星と地表との間の1次元距離変化を測定しているの、GNSSの3次元変位データをSAR衛星の観測角の向

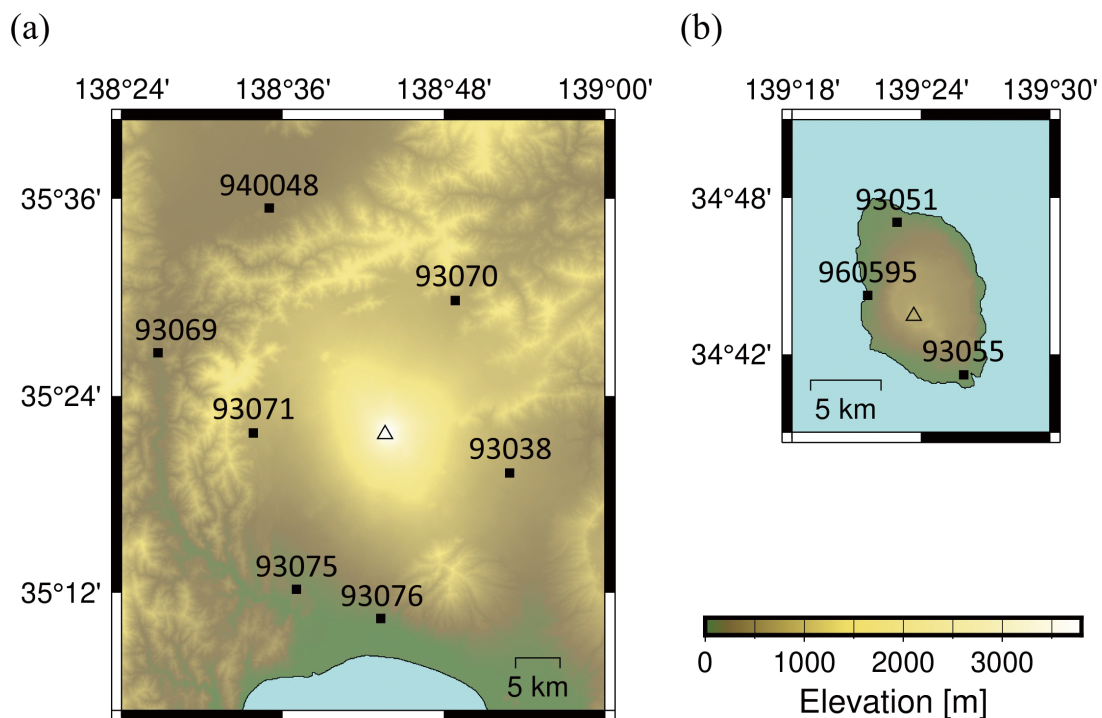


図1 本研究で扱う地域の標高分布と、GNSS観測点(国土地理院GEONET)の位置。四角形のマーカーと数字はGEONETの観測点とその番号、三角形のマーカーは山頂を表す。(a) 富士山。(b) 伊豆大島。

Fig. 1 Elevation distribution and locations of the GNSS stations (GEONET) dealt in this study. Rectangle markers and integers show the stations with their numbers on GEONET, and triangular markers represent mountain summits. (a) Mt. Fuji. (b) Izu-Oshima Island.

表1 富士山・伊豆大島周辺における Sentinel-1 衛星の観測期間，観測回数，干渉ペア数 (InSAR)，上昇軌道・下降軌道ごとに分けて示す。
 Table 1 Observation periods, observation numbers, and numbers of interferometric pairs (InSAR) of the Sentinel-1 satellite around Mt. Fuji and Izu-Oshima Island. The data for ascending and descending orbits are shown separately.

		Fuji	Izu-Oshima
Observation period	Ascending	2015.4.30 ~ 2020.5.3	2019.9.18 ~ 2020.7.14
	Descending	2014.11.25 ~ 2020.6.26	2019.8.19 ~ 2020.7.8
Observation number	Ascending	119	25
	Descending	140	26
Interferometric pair (used)	Ascending	338	68
	Descending	388	70

きに投影する。固定点（富士山ではGEONETの93070観測点，伊豆大島ではGEONETの960595観測点）を設定し，そこからの相対変位としてInSARとGNSSの変位時系列を比較する。

InSARの2.5次元解析

InSARの1次元変位データ（衛星と地表との間の距離変化）について，上昇軌道・下降軌道の異なる観測角ベクトルを組み合わせることで，（準）東-西方向と（準）上-下方向に変換することが可能となる。これを2.5次元解析と呼ぶ（Fujiwara *et al.*, 2000）。図2に模式図を示す。SAR衛星の進行方向がほぼ北-南方向であり，進行方向と垂直の向きにマイクロ波を発射するため，東-西成分と上-下成分の地表変位について近似的に推定でき

る（Wright *et al.*, 2004; Motagh *et al.*, 2017）。

結果と議論

InSARとGNSSの変位時系列

富士山でのInSAR・GNSS変位時系列の比較結果を，SAR衛星の上昇軌道と下降軌道のデータごとに図3と図4に示す。また，伊豆大島での比較結果も，図5に示す。いずれの図も，期間中の平均変位が0となるように相対化した。最小二乗法に基づく線形トレンド（定常変位速度）の推定も行った。

富士山での結果（図3, 4）において，InSARの時系列データにはGNSSに比べて顕著な年周変化が見られた。この原因として，マイクロ波の大気遅延ノイズや，植生

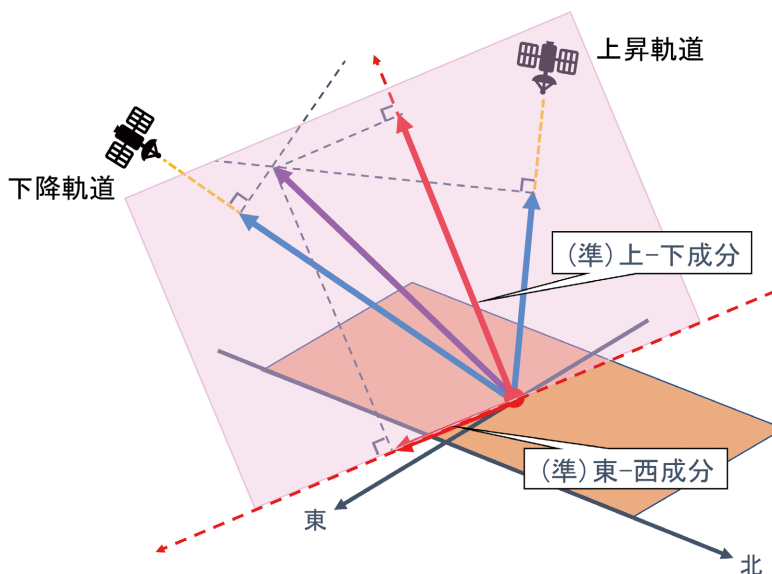


図2 上昇軌道と下降軌道のSAR衛星データに基づく2.5次元解析の模式図。

Fig. 2 Schematic diagram of the 2.5 dimensional analysis based on SAR satellite data of ascending and descending orbits.

や積雪の影響による地表面のマイクロ波散乱特性変化が考えられる。前者については、GACOS (Yu *et al.*, 2018) に基づく補正を行うことで改善される可能性がある。なお、このようなデータに対しては、線形トレンド（定常変位速度）を年周・半年周成分と同時に推定する（例、三井・小長井, 2020）ほうが適切と考えられるが、観測期間が1年弱と短いために年周成分の推定が困難な伊豆大島での結果と条件を揃えるため、単純な線形トレンド推定の値を図3, 4に記載した。

富士山でのInSARとGNSS時系列を線形トレンド（定常変位速度）の観点から見た場合、特に下降軌道（図4）

では平均1.1mm/yrの差しかなく、両者は十分調和的と言える。上昇軌道（図3）の場合も、一部の観測点で若干差が大きいものの、平均値は2.6mm/yrと十分小さい。一方で、観測期間が1年弱と短い伊豆大島での結果（図5）については、InSARとGNSS時系列の線形トレンド（定常変位速度）の差が上昇軌道で平均17mm/yr、下降軌道で平均7.9mm/yrと大きくなってしまっている。

以上より、特に富士山のInSARデータには定常変位速度の観点からは十分な信頼性があるとみなし、定常変位速度を（準）東-西成分と（準）上-下成分に変換する2.5次元解析を行った。伊豆大島についても、定常変位速

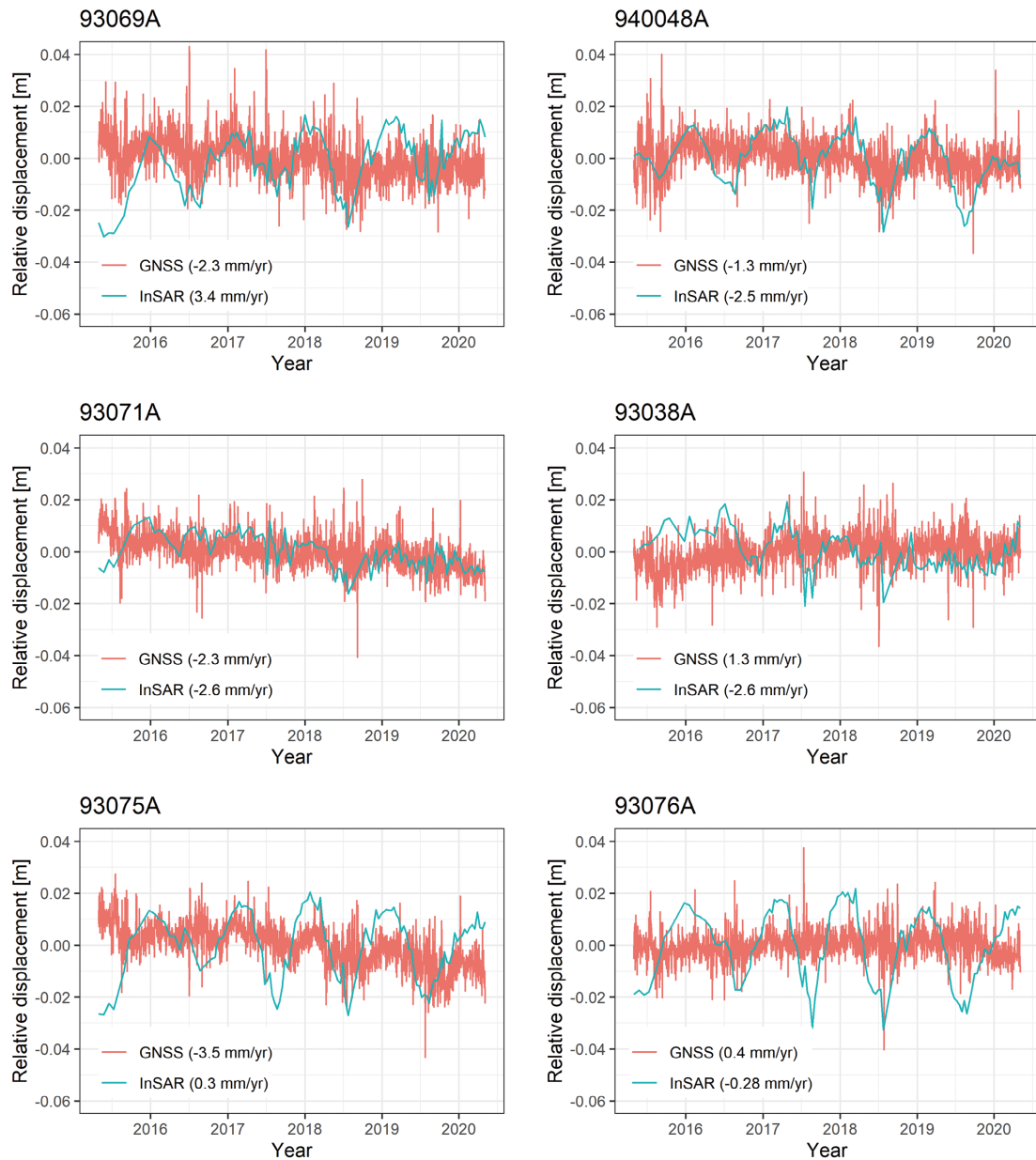


図3 富士山のGNSS観測点位置における変位時系列比較（SAR衛星が上昇軌道の場合）。赤線はGNSS、青線はInSARを表す。定常変位速度の推定値も示す。各グラフ上の数字は、図1の観測点番号に対応する。

Fig. 3 Comparison of the time series at the locations of the GNSS stations (for ascending orbit SAR) around Mt. Fuji. Red and blue lines represent the GNSS and InSAR data, respectively. Estimated steady displacement rates are also shown. The integers over each graph correspond to the GNSS station numbers of Fig. 1.

度の信頼性に疑問は残るが、同様の解析を行った。

InSARの2.5次元解析

富士山・伊豆大島を対象とした定常変位速度の2.5次元解析の結果を、それぞれ図6と図7に示す。背景図は標高(図1)であり、カラーコンターが標高のままになっている部分は、InSARの干渉条件が悪かったためにマスクされている地点を表す。

富士山(図6)の場合、山頂から半径10km程度の範囲ではInSARの干渉条件が悪く、データを得られなかったが、それより遠方の北東部では東向きの動きと隆起が、南

西部では西向きの動きと沈降が見られた。興味深い点として、変位速度の向きが変わる境界がおおよそ北西-南東方向に延びていることがある。これは、Nakamura(1977)が提案した富士山下のダイクと対応している可能性がある。

弾性体力学に基づく予備的な推察(福田, 2021MS)では、Okada(1985)のグリーン関数を使用し、ダイクモデルとして地下17km以深に北東傾斜80度・走向305度・幅11km・長さ45km・開口速度0.06m/yrの開口クラックを設定することで、ある程度InSARデータを説明できるとした。同暫定モデルから計算される地表変位速度の東-

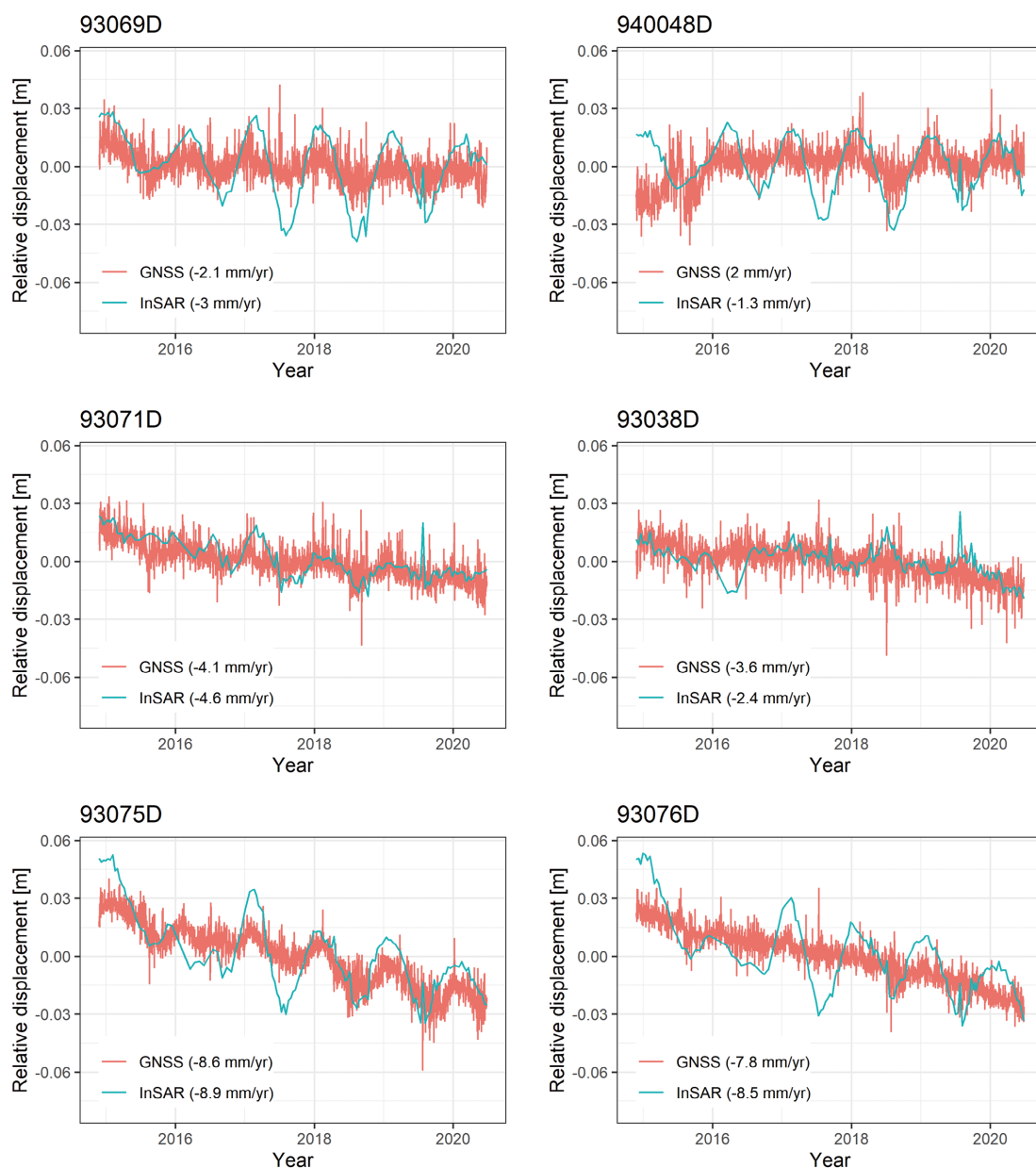


図4 富士山のGNSS観測点位置における変位時系列比較 (SAR衛星が下降軌道の場合)。線や数字の意味は図3と同様。

Fig. 4 Comparison of the time series at the locations of the GNSS stations (for descending orbit SAR) around Mt. Fuji. Explanation for the lines and integers is the same as Fig. 3.

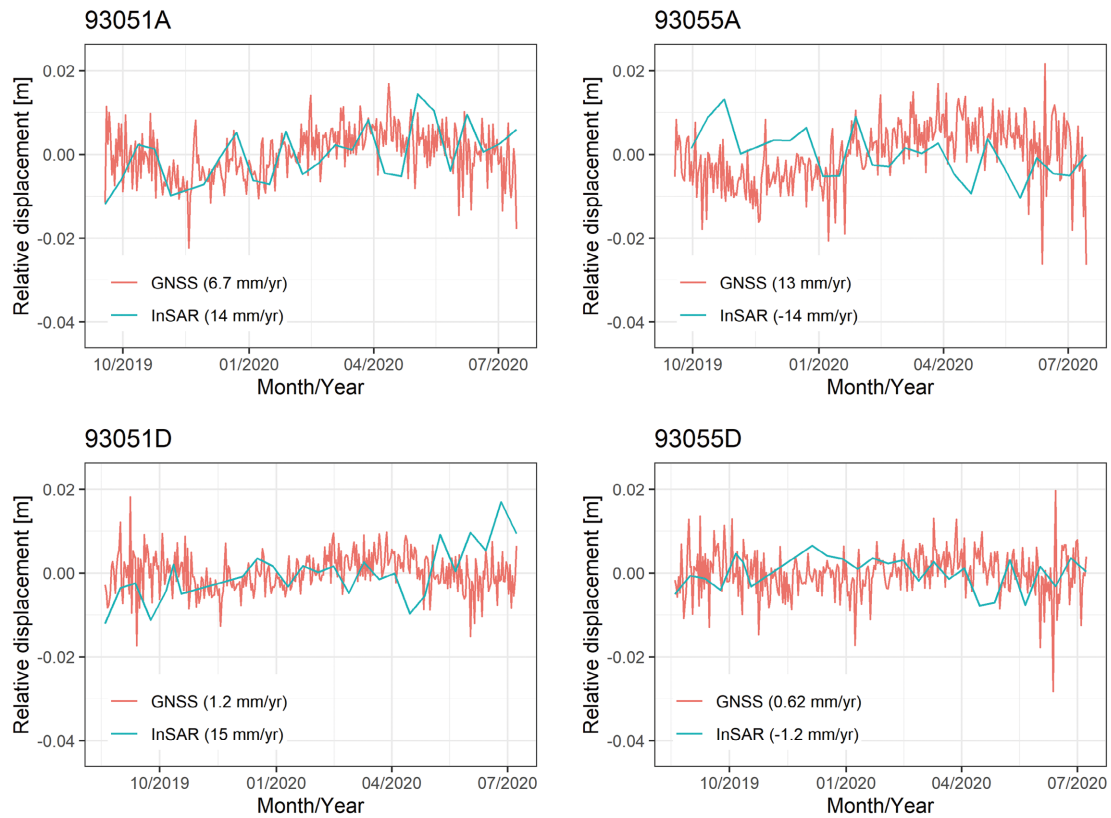


図5 伊豆大島のGNSS観測点位置における変位時系列比較 (SAR衛星が上昇軌道の場合Aと下降軌道の場合D)。線や数字の意味は図3と同様。

Fig. 5 Comparison of the time series at the locations of the GNSS stations (for ascending orbit SAR “A” and descending orbit SAR “D”) around Izu-Oshima Island. Explanation for the lines and integers is the same as Fig. 3.

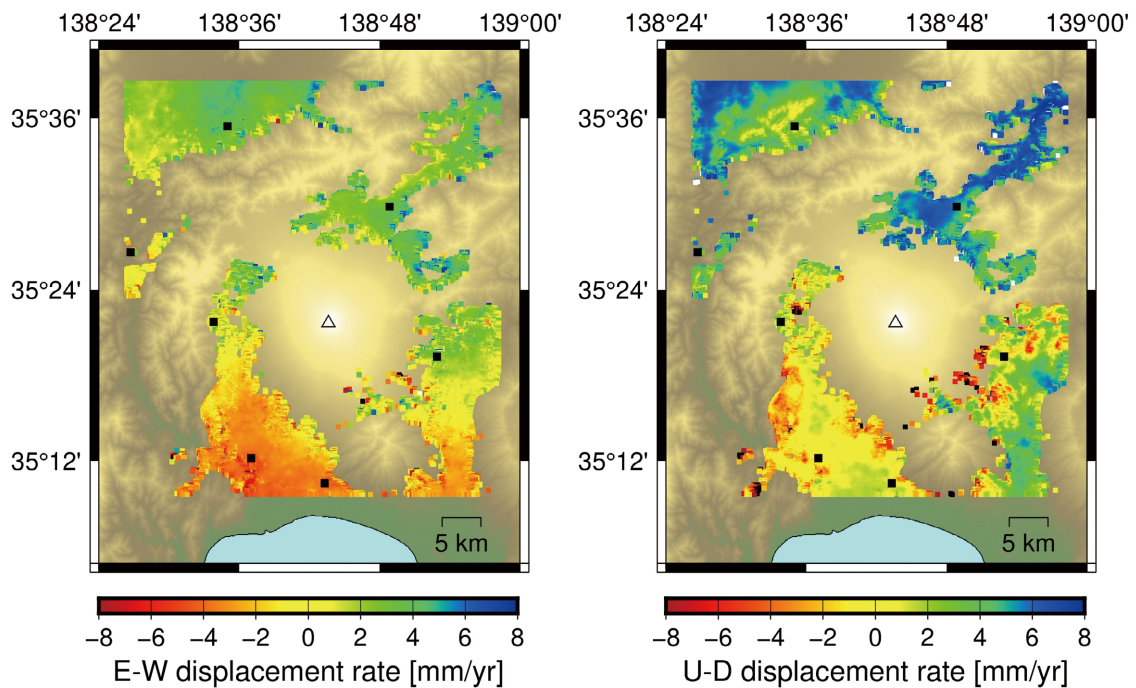


図6 富士山周辺におけるInSAR定常変位速度を2.5次元解析した結果。左図は東-西成分、右図は上-下成分を表す。マーカーの意味は図1と同様。

Fig. 6 Results of the 2.5 dimensional analysis of the steady displacement rates by InSAR around Mt. Fuji. The left and right maps represent the East-West and Up-Down components, respectively. Markers are the same as Fig. 1.

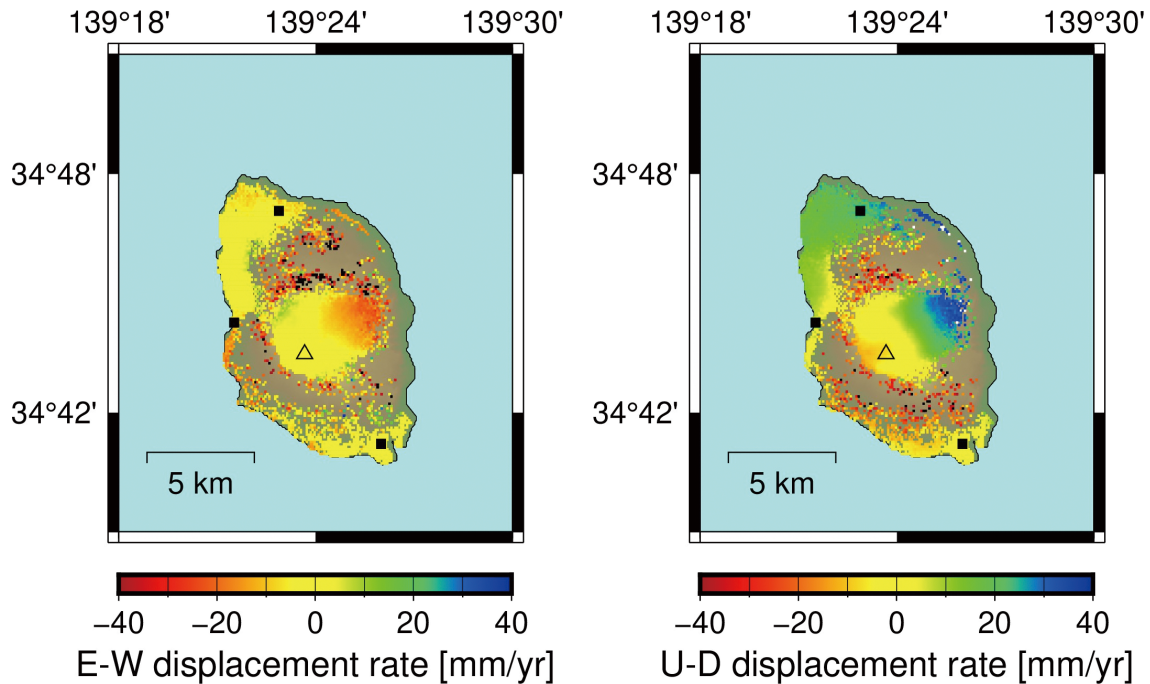


図7 伊豆大島周辺におけるInSAR定常変位速度を2.5次元解析した結果。左図は東-西成分, 右図は上-下成分を表す。マーカーの意味は図1と同様。

Fig. 7 Results of the 2.5 dimensional analysis of the steady displacement rates by InSAR around Izu-Oshima Island. The left and right maps represent the East-West and Up-Down components, respectively. Markers are the same as Fig. 1.

西成分, 上-下成分を付録に示す。ただし, 観測期間中に2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動が生じているため, 正確にはデータを「定常変位速度」とみなし得ない点や, 観測領域の南側に駿河トラフのプレート沈み込み境界・箱根火山など別の変動要因が存在する点が, 大きな問題である。より定量的なモデル化については, 今後の課題となる。

伊豆大島(図7)の場合, 数十mm/yrもの動きを表すような結果が, 島の東部で見られた。この東部のデータは, 他の地点よりも遥かに高速な西向きの動きと隆起を表している。しかし, 伊豆大島を対象とした測地学的な先行研究(例: Furuya, 2005; 高木ほか, 2010; 渡辺, 2012)では, このような東部での局所的な動きを引き起こすような力源は推定されていない。GNSS観測点から離れていることもあり, この東部のデータが本当の地表変位を表すシグナルか何らかのノイズであるかについては, 本研究では判断がつかなかった。さらに観測期間を延ばし, 同様の現象が再発するかを確認する必要があると考える。

まとめ

富士山・伊豆大島を対象として, SAR衛星Sentinel-1のデータを用いたInSAR解析を行った。InSAR時系列データをGNSS観測点の位置でGNSS時系列データと比較したところ, 富士山では大きな乖離が無かった。2.5次元解析に基づき, (準)東-西, (準)上-下成分の面的な地表変位速度を推定した。富士山では, 変位速度の向きが変わる境界が, 地下のダイクの走向とおよそ対応してい

ることがわかった。

謝辞

本論文は, 静岡大学理学部地球科学科に提出した第1著者の卒業論文(福田, 2021MS)の内容を再構成したものである。森下 遊氏(国土地理院)には, 解析手法について多くのご助言をいただきました。木下陽平氏(筑波大学), 石橋秀巳氏(静岡大学)からは, 原稿を改善するために有益なコメントをいただきました。英文に関しては, Julien Legrand氏(静岡大学)に校閲いただきました。これらの方に感謝いたします。

引用文献

- 青木陽介 (2016), 火山における地殻変動研究の最近の発展. 火山, 61, 311-344.
- Doin M. P., Lodge F., Guillaso S., Jolivet R., Lasserre C., Ducret G., Grandin R., Pathier E. & Pinel V. (2011), Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. *Proceedings of the Fringe 2011 Workshop*.
- Fujiwara S., Nishimura T., Murakami M., Nakagawa H., Tobita M. & Rosen P. A. (2000), 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophysical*

- Research Letters*, **27**, 2049–2052.
- 福田晴花 (2021MS), Sentinel-1 衛星を用いた InSAR データの 2.5 次元解析に基づく近年の面的地表変位: 桜島・富士山・伊豆大島火山の例. 静岡大学理学部地球科学科卒業研究, 56p.
- Furuya M. (2005), Quasi-static thermoelastic deformation in an elastic half-space: theory and application to InSAR observations at Izu-Oshima volcano, Japan. *Geophysical Journal International*, **161**, 230–242.
- 古屋正人 (2006), 地殻変動観測の新潮流 InSAR. 測地学会誌, **52**, 225–243.
- 原田昌武・細野耕司・小林昭夫・行竹洋平・吉田明夫 (2010), 富士山及び箱根火山の膨張歪と低周波地震活動. *火山*, **55**, 193–199.
- 風間卓仁 (2019), 日本の火山地域における重力観測の現状と陸水擾乱問題. *火山*, **64**, 189–212.
- Lazecký M., Spaans K., González P. J., Maghsoudi Y., Morishita Y., Albino F., Elliott J., Greenall N., Hatton E., Hooper A., Juncu D., McDougall A., Walters R. J., Watson C. S., Weiss J. R. & Wright T. J. (2020), LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity. *Remote Sensing*, **12**, 2430.
- López-Quiroz P., Doin M. P., Tupin F., Briole P. & Nicolas J. M. (2009), Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, **69**, 1–15.
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K. & Rabaute T. (1993), The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**, 138–142.
- Mitsui Y. & Kato T. (2019), Magmatic inflation in 2008–2010 at Mt. Fuji, Japan, inferred from sparsity-promoting L1 inversion of GNSS data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **378**, 29–34.
- 三井雄太・小長井駿 (2020), 大規模火山噴火 (VEI 4 以上) に伴う質量移動を衛星重力データから検出する試み. 静岡大学地球科学研究報告, **47**, 51–57.
- Morishita Y., Lazecký M., Wright T. J., Weiss J. R., Elliott J. R. & Hooper A. (2020), LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing*, **12**, 424.
- Motagh M., Shamshiri R., Haghighi M. H., Wetzel H. U., Akbari B., Nahavandchi H., Roessner S. & Arabi S. (2017), Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology*, **218**, 134–151.
- 中川弘之・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下知真子・川元智司・畑中雄樹・宗包浩志・石本正芳・湯通堂亨・石倉信広・菅原安弘 (2009), GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) ルーチン解析システムの構築について. 国土地理院時報, **118**, 1–8.
- Nakamura K. (1977), Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation — principle and proposal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **2**, 1–16.
- Okada Y. (1985), Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**, 1135–1154.
- 小澤 拓・宗包浩志・矢来博司・村上 亮 (2003), JERS-1 の干渉 SAR により検出された霧島火山群・硫黄山周辺の局所的な地殻変動. *火山*, **48**, 507–512.
- Takada Y. & Fukushima Y. (2013), Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan. *Nature Geoscience*, **6**, 637–641.
- 高木朗充・福井敬一・山里 平・藤原健治・加治屋秋実 (2010), 噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定. 気象研究所研究報告, **61**, 1–11.
- 渡辺秀文 (2012), 伊豆大島火山のマグマ供給システムと噴火予測. 日本惑星科学会誌, **21**, 198–205.
- Wright T. J., Parsons B. E., & Lu Z. (2004), Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters*, **31**, L01607.
- Yu C., Li Z., Penna N. T., & Crippa P. (2018), Generic atmospheric correction model for Interferometric Synthetic Aperture Radar observations. *Journal of Geophysical Research*, **123**, 9202–9222.

付録 富士山周辺における弾性体中の暫定的ダイクモデルから計算された変位速度（福田, 2021MS）。左図は東-西成分, 右図は上-下成分を表す。マーカーの意味は図1と同様。

Appendix Calculated displacement rates from the tentative dike model in an elastic body around Mt. Fuji (Fukuda, 2021MS). The left and right maps represent the East-West and Up-Down components, respectively. Markers are the same as Fig. 1.

