

3次元干渉 SAR 解析により明らかとなった箱根火山大涌谷における地すべり変位

道家涼介^{*1}

Landslide displacement at Owakudani, Hakone volcano, revealed by 3D Interferometric SAR Analysis

by

Ryosuke DOKE^{*1}

1. はじめに

人工衛星搭載の合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar; SAR) データの干渉解析 (以下、干渉 SAR 解析と呼ぶ) による地表面変位の観測は、地震や火山活動に伴う地殻変動を把握する手法として、近年一般的となっている。干渉 SAR 解析が他の地殻変動観測に比べて優れている点として、地表面を面的に観測できることが挙げられる。すなわち、干渉 SAR 解析では、地上の観測点を必要とする他の観測手法では不可能な、高い空間分解能で地表面の変位分布を得ることができる。これにより、既存の観測網では捉えることができなかった局所的な変位の抽出が可能になったことに加え、多数の変位データから地下の断層などの変動源モデルの推定を高度に行えるようになり、地表および地下における様々な現象の解明に貢献してきた。一方で、干渉 SAR 解析で得られる地表面の変位は、衛星視線方向の一次元の変位であり、慣れていない人にとっては、実際の変位をイメージしづらいという問題もある。

この問題を解決する方法の一つとして、2方向から観測された地表面の変位を合成し、直感的に変位方向が理解しやすい準東西成分と準上下成分に分解する手法 (2.5次元解析) が提案されている (Fujiwara *et al.*, 2000)。さらに、現在、日本宇宙航空研究開発機構 (JAXA) により運用されている SAR 衛星である ALOS-2/PALSAR-2 では衛星の左右両方の観測が可能であり、北行軌道、南行軌道でそれぞれ2つの視線方向、合計で4つの視線方向からの観測が可能である。したがって、これらを合成することにより、3次元的な変位を得ることが可能である (Wright, 2004)。ALOS-2/PALSAR-2 は、平常時は衛星進行方向に対し右側を観測しており、左側の観測は災害発生時などの緊急観測の際に実施される場合が多い。神奈川県西部に位置する箱根火山においても、過去に左観測が実施されたのは数えるほどしかない。

この度、2020年10月に、約3年ぶりに ALOS-2/PALSAR-2 による左観測が実施され、箱根火山周辺のデータも取得された。これにより約3年間の箱根火山周辺の3次元変位を得ることができたので、本稿ではその解析結果について報告を行う。なお、本研究の解析結果において、箱根火山最大の噴気地帯である大涌谷周辺で地すべり性の変位が認められたが、その近傍において2021年7月3日に崩壊が生じた。翌7月4日の ALOS-2/PALSAR-2 の観測において強度画像の変化が認められたので、本稿にて合わせて報告する。

2. 使用データおよび解析方法

2.1. 使用データ

本研究で使用したデータを図1および表1に示す。このうち、左観測のデータである Path119 は約3年ぶりに観測が実施された。一方、他の観測条件における観測は、不定期ではあるものの、年に数回実施されている。したがって Path119 の干渉ペアと観測日が近く、同じく観測間隔が約3年になるペアを有する観測条件として、他の3つのペアを抽出した (表1)。

2.2. 干渉 SAR 解析

解析には防災科学技術研究所が開発した SAR 干渉解析ツール RINC (Ozawa *et al.*, 2016) を使用した。解析の際、地上における距離が 25m × 25m のメッシュサイズとなるように、ピクセルの平均化 (マルチルック処理) を行なった。初期干渉画像における地形の影響は、国土地理院の 10mDEM および EGM96 のジオイド高モデルから作成された楕円体高データを用いて地形縞をシミュレートし、差し引いた。また、気象庁メソ数値予報モデル (MSM) を用いた大気遅延補正 (小澤・清水, 2010) および、スプリットスペクトラム法による電離圏遅延の補正 (Gomba *et al.*, 2016) を適用した。

*1 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0032 神奈川県小田原市入生田 586
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 53 巻, 47-53, 2021

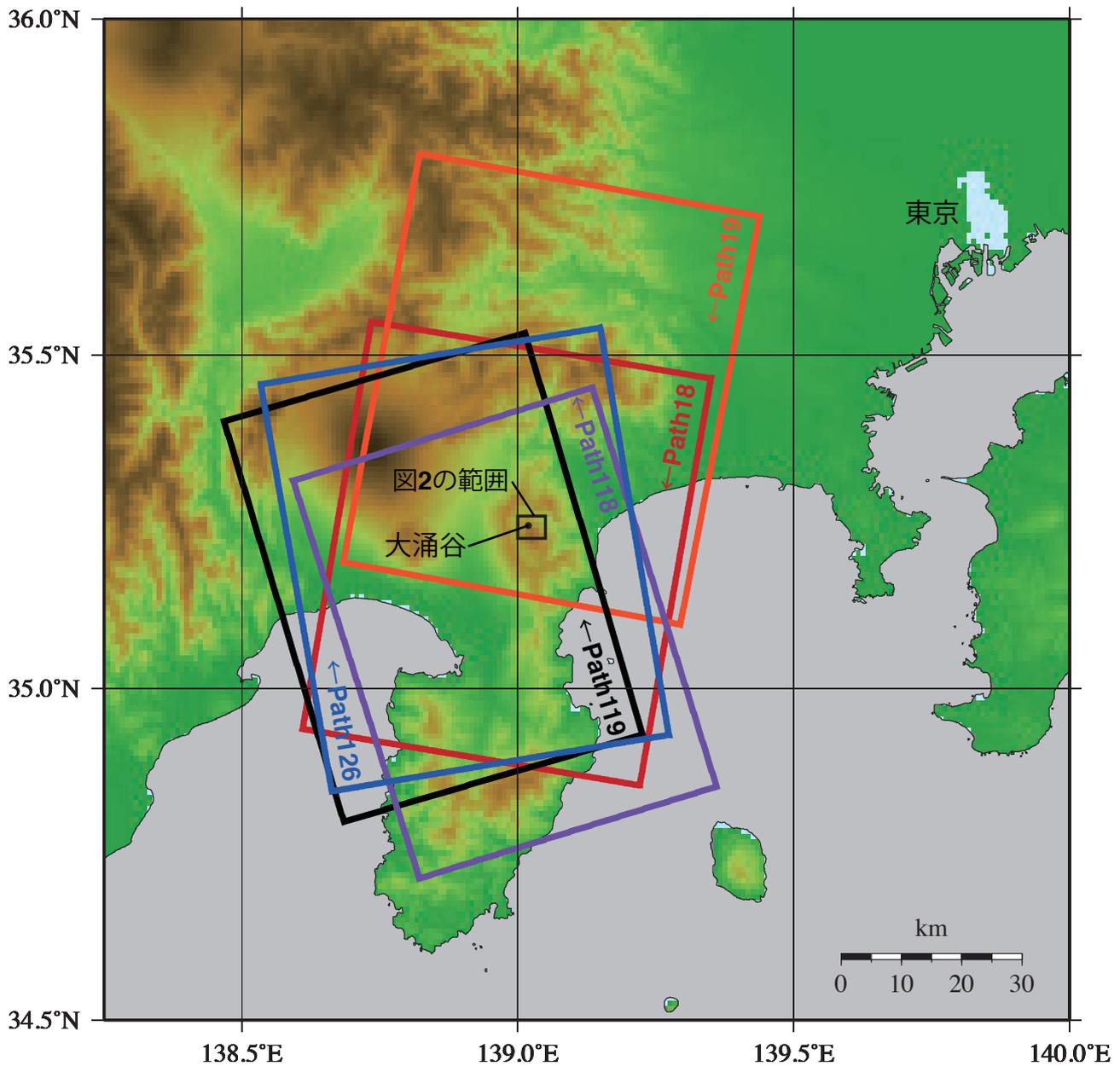


図1 位置図および解析に使用した SAR データ。Path18、19、119、126 は干渉 SAR 解析、Path118 は強度画像の解析に使用した。

表1 干渉 SAR 解析に使用したデータ

Path-Frame	軌道・観測方向	Primary	Secondary	大涌谷付近の入射角	図番号
18-2910	南行軌道・右	2017/09/21	2020/09/17	42.8°	図 2 (a)
19-2910	南行軌道・右	2017/10/24	2020/10/20	32.3°	図 2 (b)
126-700	北行軌道・右	2017/06/23	2020/06/19	43.6°	図 2 (c)
119-730	北行軌道・左	2017/10/20	2020/10/02	44.8°	図 2 (d)

軌道残差の除去を行なったのち、ノイズを低減するため Baran *et al.* (2003) によるフィルタリングを適用した。得られた位相変化について、Minimum Spanning Tree

(MST) 法によるアンラッピングを適用し変位データを得た。その際、明らかな非干渉域を除外するためコヒーレンスの値が 0.01 以下となる箇所についてはマスクを

した。最後に、地理座標への変換（ジオコーディング）を行い、解析結果を得た。

解析結果の作図においては、それぞれの解析結果における基準点の位置を同一にするのに加え、後述するGNSS観測データとの比較のため、GEONET箱根観測点の位置の変位が0となる様に、同地点の変位量を結果全体から差し引いた。また、一部の解析結果にアンラッピングのエラーによると考えられる外れ値が存在したため、それについては、変位の連続性も考慮した上で±12 cmの閾値を設定し、それを超える衛星視線方向の変

位が生じているピクセルをマスクした。ただし、これによりアンラッピングエラーが全て除去できた訳ではないため、一部エラーが残っている結果については図中にアンラッピングエラーである旨を示した。

2.3. 3次元解析

Wright (2004) による手法を参考に、以下の式を用いて、4観測条件（表1）における各解析結果から、最小二乗解として3次元変位成分を推定した。

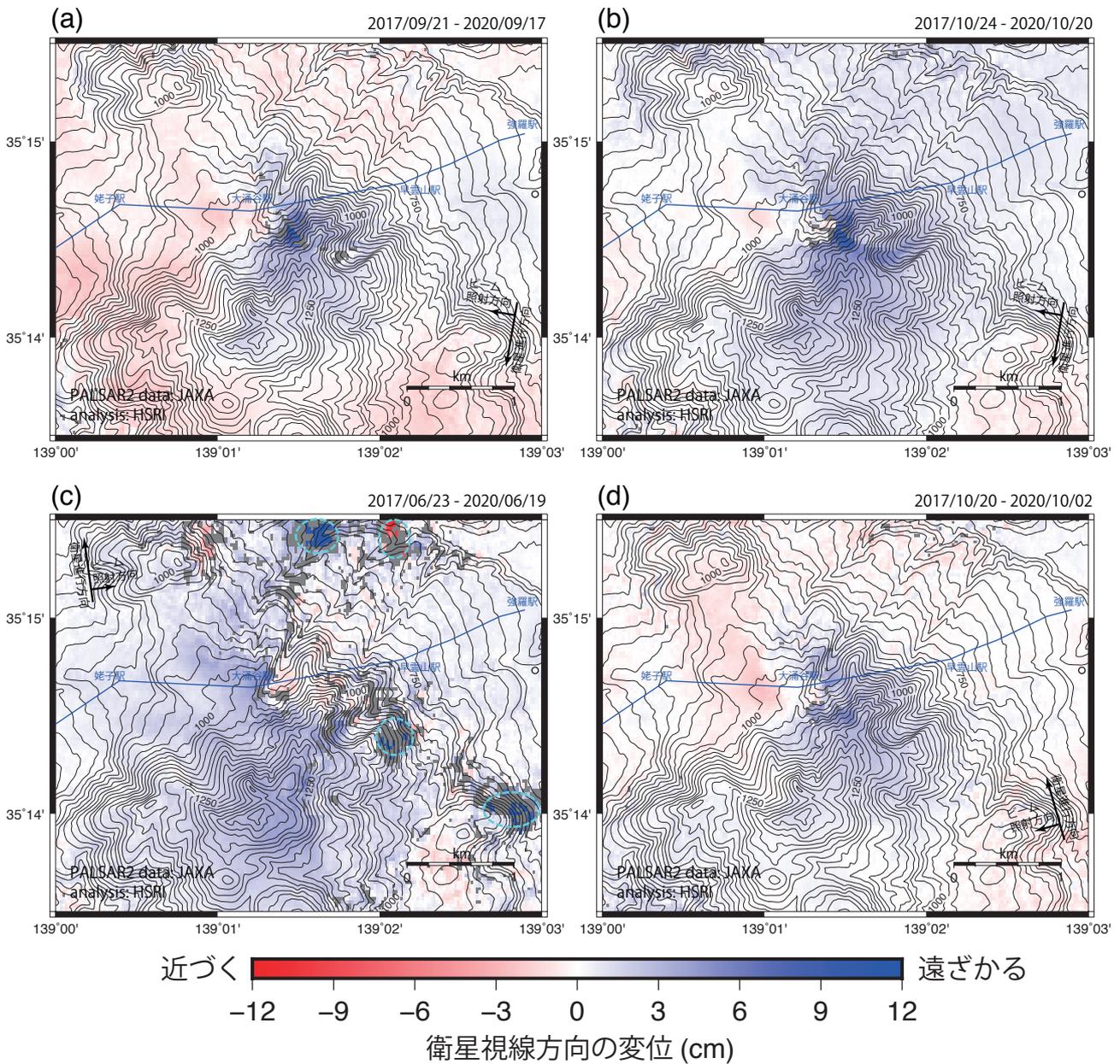


図2 干渉 SAR 解析結果。(a) Path18、(b) Path19、(c) Path126、(d) Path119。赤色が衛星に近づく変位、青色が衛星から遠ざかる変位を示す。(c) 中の水色の破線の丸は、アンラッピングエラーが生じている可能性がある場所を示す。図中の青線は箱根ロープウェイの架線および箱根ケーブルカーの線路の位置を示す。白丸は、GEONET 箱根観測点の位置を示す。コンター間隔は 25 m。

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1x} & P_{1y} & P_{1z} \\ P_{2x} & P_{2y} & P_{2z} \\ P_{3x} & P_{3y} & P_{3z} \\ P_{4x} & P_{4y} & P_{4z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}$$

ここで、 L は各観測条件（1～4）での解析結果における衛星視線方向の変位、 P は各観測条件（1～4）における衛星視線方向の単位ベクトル、 U は3次元変位成分である。干渉SAR解析で得られるのは L と P であり、これに基づき3次元変位成分である U をピクセル毎に算出した。

3. 解析結果

3.1. 干渉SAR解析結果

干渉SAR解析結果について図2に示す。解析結果は

赤（負の値）が衛星に近づく変位、青（正の値）が衛星から遠ざかる変位を示している。いずれの解析結果においても、大涌谷周辺から南にかけて衛星から遠ざかる変位が認められる。また、東南東からの衛星視線方向となるPath18およびPath19の解析結果（図2a、b）においては、大涌谷付近で顕著に衛星から遠ざかる変位が認められるが、西南西からの視線方向となるPath126（図2c）では顕著な変位は見られていない。このことから、この付近の変位は単純な沈降ではないと考えられる。

3.2. 3次元解析結果

3次元解析の結果を図3に示す。なお以下の文中に示す変位量は、解析期間（約3年間）における累積変位量である。

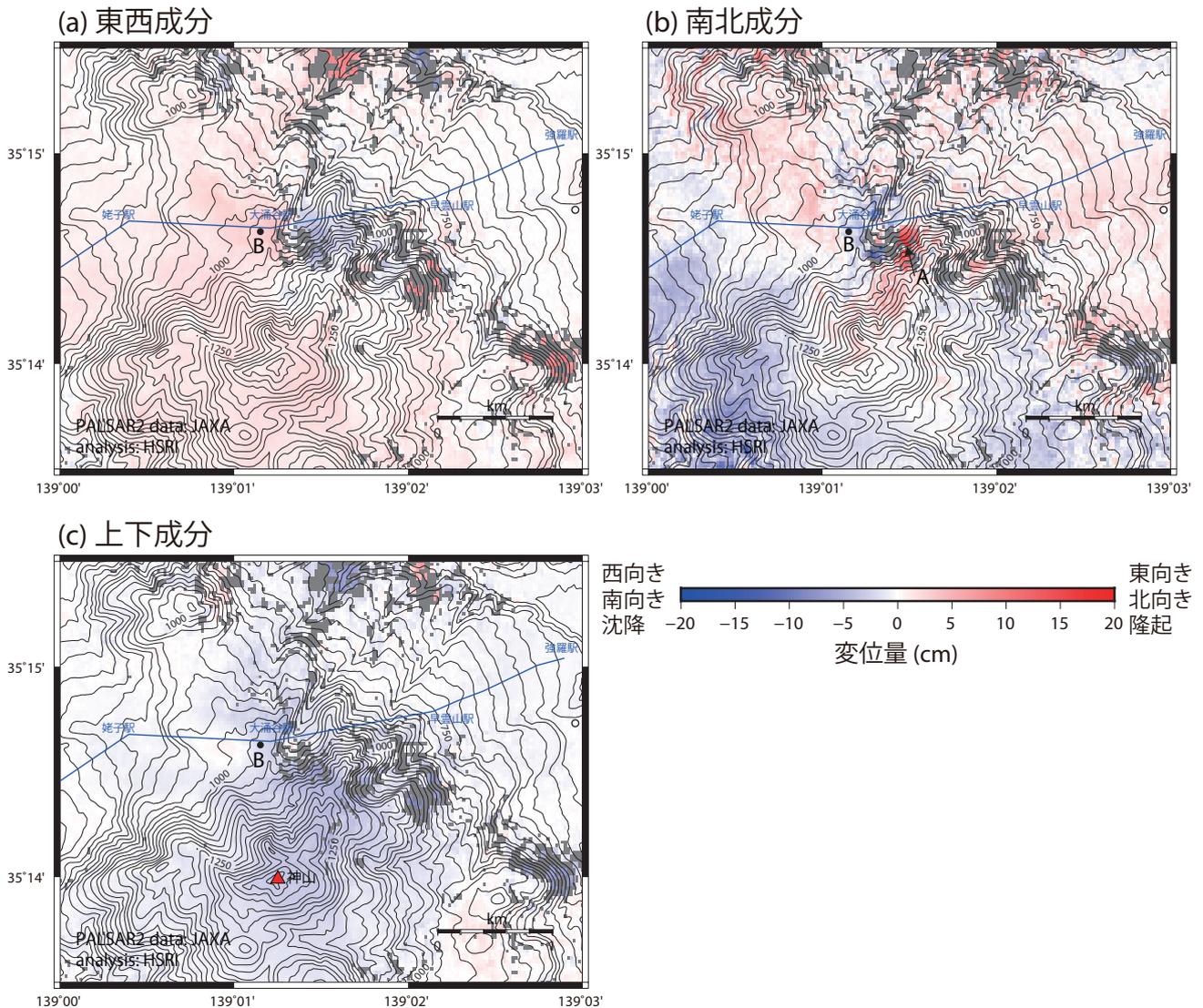


図3 3次元解析結果。(a) 東西成分、(b) 南北成分、(c) 上下成分。赤色は、それぞれ東向き変位、北向き変位、隆起を示す。青色はそれぞれ西向き変位、南向き変位、沈降を示す。図中の青線は箱根ロープウェイの架線および箱根ケーブルカーの線路の位置を示す。白丸は、GEONET箱根観測点の位置を示す。コンター間隔は25 m。

上下変位に着目すると大涌谷周辺から南の神山にかけての地域において、沈降（約 $-5 \sim -3$ cm）が確認された（図3c）。これについては、Doke *et al.* (2021) において示された2015年水蒸気噴火後の収縮と空間的に概ね一致しており、熱水系における収縮を見ているものと考えられる。

大涌谷周辺では以下に示す顕著な変位が認められた。大涌谷の東に位置し北東方向に流下する大涌沢の南東側斜面においては、顕著な北向きの変位が認められる（図3bのA地点）。東西方向の変位（図3a）と合わせると、北北西方向に水平変位していると考えられる（最大で約17 cm）。これは斜面の傾斜方向に概ね等しく、地すべり性の変位を見ているものと考えられる。なお、同地点の変位は、Doke *et al.* (2021) による干渉SAR時系列解析の結果、2015年以降定常的に進行していることが明らかとなっている。

また、大涌谷の駅舎付近では、南東方向への変位が見られる（最大で約6 cm）。これは、温泉地学研究所が大涌谷に設置しているGNSS観測点（図3のB地点）の

平常時の変位の方向（図4）と概ね調和的であり、大涌沢方向への変位を示唆するものである。

4. 2021年7月3日の崩壊に伴うSAR強度画像の変化
干渉SAR解析により地すべり性の変位が認められたA地点付近において、2021年7月3日に崩壊が発生し（写真1）、大涌沢にある温泉供給施設（蒸気井）が被害を受けた。この時、箱根のアメダス観測点では、7月1日～3日の間の雨量が、800 mmを超えており、この雨により崩壊が生じたものである。

この崩壊が生じた翌日の7月4日にALOS-2/PALSAR-2により北行軌道・左観測(Path118-Frame740)の条件によるデータが取得された(Path118によるデータの取得範囲は図1を参照)。直近の比較対象となる同一観測条件によるデータは、2020年10月11日に取得されたものである。また、この観測による大涌谷付近における入射角は約 37.5° であった。このデータに対して、強度の変化を見るために、SAR強度画像のRGB合成を行なった（図5）。図5においては、Rに2020年10月

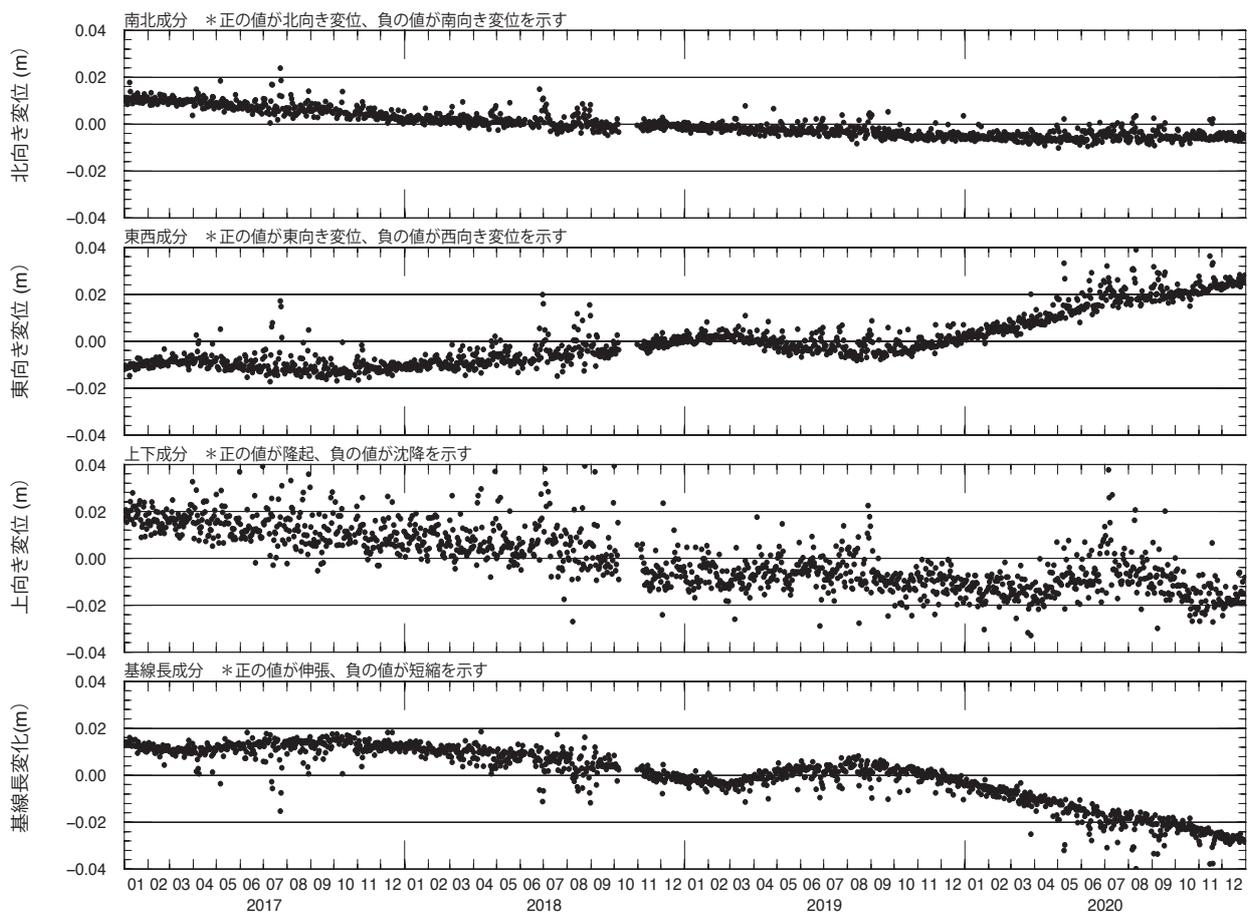


図4 GEONET 箱根観測点（図2、3における白丸の位置）に対する大涌谷観測点（図3、B地点）の変位時系列グラフ（2017年1月1日～2020年12月31日）。2017年3～10月や2019年の3～8月にかけて火山性の地殻変動（例えば、道家ほか、2019）が認められるが、平常時は南東方向への変位が認められている。



写真1 2021年7月3日に大涌谷で発生した崩壊の様子（2021年7月7日宮下雄次氏撮影）。平時の地表面は硫黄により白色～黄色を呈するが、写真右上から中央にかけて茶色になっている箇所は滑落崖もしくは崩積土の堆積が見られる。

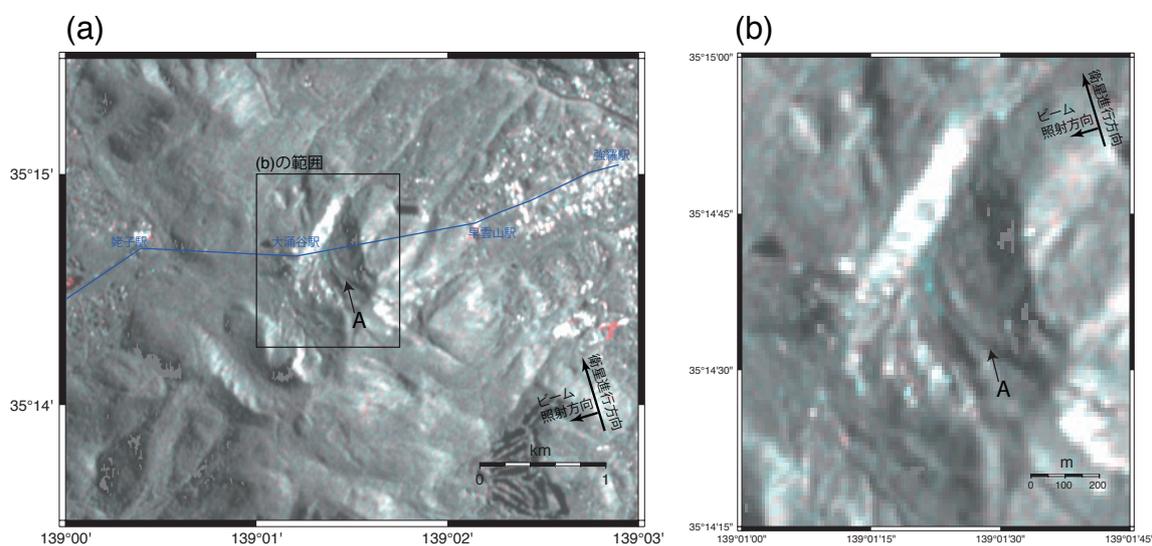


図5 SAR強度画像の変化。2020年10月11日と2021年7月4日のSAR強度画像の比較で、赤は強度が低下した場所、青は強度が上昇した場所を示す。(b)は(a)内の黒四角の範囲（大涌谷周辺）を拡大したものである。

11日の強度画像を、GおよびBに2021年7月4日のSAR強度画像を割り当てた。したがって、赤色は強度が低下した場所、青色は強度が上昇した場所を示す。大涌谷内において、一部の場所で強度の上昇が認められる。強度の上昇が認められた箇所は、A地点の下流に位置し

ており、崩積土の堆積範囲（写真1）と概ね調和的である。これは、比較的平らな場所に、土砂が堆積したことにより、強度が上昇したものと考えられる。

5. まとめ

本報告では、箱根火山大涌谷周辺を対象として、干渉 SAR の 3次元解析を実施した結果を報告した。その結果、大涌谷周辺では地すべり性の変位が検出された。加えて、2021年7月3日に発生した崩壊に伴い SAR 強度画像の変化が認められた。こうした一連の SAR データを用いた解析は、大涌沢のような観測点のない場所において、局所的な地すべりなどの地変を把握するのに有効であると考えられる。

謝辞

神奈川県温泉地学研究所の宮下雄次専門研究員には、7月3日に発生した大涌谷の崩壊の現地の写真を提供していただきました。同研究所の藤松淳火山対策調整官には、粗稿を読んでいただき有益なコメントをいただきました。また、2名の査読者による丁寧な査読により、本稿は改善されました。ALOS-2/PALSAR-2による観測データは火山噴火予知連絡会衛星解析グループを通して JAXA から提供されたものです。データの所有権は JAXA にあります。解析には、防災科学技術研究所の小澤拓氏が開発した SAR 干渉解析ツール (RINC) を使用しました。また、解析の際、気象研究所の奥山哲氏が開発した GUI ツール (rinc_gui) を使用しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

Baran I, Stewart MP, Kampes BM, Perski Z, Lilly P (2003) A modification to the Goldstein radar interferogram filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 (9):2114-2118. doi:10.1109/tgrs.2003.817212

道家涼介・原田昌武・板寺一洋・加藤照之 (2019) GNSS 観測による箱根火山 2019 年群発地震活動に

伴う地殻変動, 神奈川県温泉地学研究所報告, 51, 1-9.

- Doke R, Mannen K, Itadera K (2021) Observing posteruptive deflation of hydrothermal system using InSAR time series analysis: An application of ALOS - 2/PALSAR - 2 data on the 2015 phreatic eruption of Hakone volcano, Japan. *Geophysical Research Letters* 48 (19):e2021GL094880. doi:10.1029/2021gl094880
- Fujiwara S, Nishimura T, Murakami M, Nakagawa H, Tobita M, Rosen PA (2000) 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters* 27 (14):2049-2052. doi:10.1029/1999gl011291
- Gomba G, Parizzi A, De Zan F, Eineder M, Bamler R (2016) Toward Operational Compensation of Ionospheric Effects in SAR Interferograms: The Split-Spectrum Method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54 (3):1446-1461. doi:10.1109/tgrs.2015.2481079
- Ozawa T, Fujita E, Ueda H (2016) Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano. *Earth, Planets and Space* 68 (1). doi:10.1186/s40623-016-0563-5
- 小澤 拓・清水慎吾 (2010) 数値気象モデルを用いた SAR 干渉解析における大気遅延誤差の軽減, 測地学会誌, 56, 137-147.
- Wright TJ (2004) Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters* 31 (1). doi:10.1029/2003gl018827