

衛星 SAR による積雪期における火山性地殻変動の抽出に関する研究

実施期間 令和 6 年度～令和 7 年度
地理地殻活動研究センター 姫松 裕志 宗包 浩志
地殻変動研究室

1. はじめに

衛星 SAR は高い空間分解能で地殻変動を明らかにする観測手法として広く用いられるようになり、地殻変動の駆動メカニズムの理解やモデリングの推定精度の向上にも貢献してきた。特に火山を対象とした衛星 SAR による地殻変動観測は、地熱地帯や火口周辺といった領域における地殻変動の描像を明らかにすることができる点で優れている。地熱地帯や火口及びその周辺では浅部熱水系をはじめとする地下浅部の圧力変化に伴って空間波長が数キロメートル以下の地殻変動が生じる。SAR による地殻変動観測の結果は高い空間分解能を有していることから、空間波長が小さい地殻変動を検出することも可能である。地殻変動を詳細にモニタリングすることは火山システムにおける圧力環境の推定の高度化に寄与し、火山活動評価の観点からも重要である。

一方、冬季の積雪は従来の SAR 干渉法では非干渉となり、衛星 SAR を用いた積雪期の火山における定常的な地殻変動観測を困難にさせる要因の一つである (Goldstein et al., 1993; Kumar and Venkataraman, 2011)。そのため、積雪期の火山における地殻変動観測は GNSS に頼らざるを得ない状況となる。衛星 SAR で地殻変動の時系列データを作成する場合には、積雪期をまたいだ干渉ペアを用いて SAR 干渉解析に適用し、積雪に伴う非干渉の影響を回避する。L-band SAR のように地表の後方散乱特性の変化に伴う非干渉の影響を受けにくいデータセットを用いると、数箇月の時間基線長であれば干渉性への影響は限定的である。ただし、冬季における SAR による地殻変動観測の時間分解能は格段に低下する。こうした観測頻度の低下は火山活動の評価の精度もまた低下させる。積雪期に火山噴火が発生した場合には融雪型火山泥流といった広域に影響を及ぼす災害を引き起こした事例も報告されている (Pierson et al., 1990)。以上のことから、積雪期においても SAR データを用いた火山における地殻変動が抽出できるように、従来の SAR 干渉法とは異なる解析手法を用いた観測や手法開発の提案が求められている。

2. 研究内容

2.1 研究開発の概要

本研究では火山の地熱地帯を対象として PS-InSAR 法を適用し、冬季の積雪期における火山性地殻変動の検出可能性を検証することを目的とする。積雪期においても地熱地帯では地盤が局所的に露出している箇所があり、Persistent scatterer (PS 点) といった恒久散乱点として抽出することができれば、位相変化量を通年で追跡できる可能性がある。従来の SAR 干渉法のように地殻変動の空間分布を詳細に描くことはできなくとも、地熱地帯を含むある 1 ピクセルの位相変化を通年で追跡することは、火山活動評価の精度を維持する上でも重要である。令和 6 年度は①PS-InSAR による通年の位相変化量の評価、②従来手法による SAR 時系列解析との比較、を実施した。PS-InSAR を火山における地殻変動観測に適用した先行研究事例はあるものの、適用対象は通年で積雪をしない火山に限定されている (Peltier et al., 2010)。

2.2 使用データ・解析手法

本研究では解析事例の対象として北海道の十勝岳を選定した。十勝岳は山頂付近に位置する 62-II 火口と振子沢噴気孔群周辺において噴気が観測されており、最近では局所的な地殻変動が生じていることが報告されている(Tanaka et al., 2018)。冬季には十勝岳周辺の広い範囲で積雪することから、従来の SAR 干渉法では冬季に地殻変動を観測することは困難とされている。解析には 2018–2021 年に Sentinel-1 衛星が Interferometric Width (IW) モードで撮像した SAR データを使用した。Sentinel-1 IW モードにより取得された SAR データの空間分解能はおよそ 3×20 m (レンジ×アジマス) であるが、PS-InSAR では解析結果の精度を向上させるために多くのデータ数と撮像間隔が短いデータを用いることが推奨されている。Sentinel-1 データは近年で定期的に最も頻繁に撮像された SAR のデータセットであり、本研究の目的達成のために適している。PS-InSAR は GAMMA の IPTA モジュールを使用した。

本研究で適用した PS-InSAR の結果を比較検証するために、ALOS-2/PALSAR-2 データに SAR 時系列解析の一つである Multi-temporal InSAR (MTI) 法を適用した。複数の撮像間隔の SAR 干渉画像を用いて、最小二乗的に各撮像期間における変位速度を推定する手法である。従来手法に従って積雪に伴う非干渉の影響を回避するために、冬季の積雪期を挟む画像ペアを用いて干渉画像を作成し、衛星視線距離変化を推定した。画像ペアの選定に当たって衛星軌道間の垂直基線長や時間基線量のしきい値は設定していない。

3. 解析結果

3.1 検証のための SAR 時系列解析の結果

図-1a に 2018 年から 2021 年までの ALOS-2/PALSAR-2 のデータに SAR 時系列解析を適用した結果を示す。ALOS-2/PALSAR-2 の SAR 時系列解析の結果は、冬季の撮像されたデータを含んでいないため非干渉領域はほとんど認められない。一方、南向きに傾斜する斜面ではフォアショートの影響により東北東–西南西方向に引き伸ばされたような擬似的な視線距離変化の領域も認められる。SAR 時系列解析の結果は以下の三つの特徴が認められた。①62-II 火口から西に位置する前十勝の山頂付近で視線距離変化の伸長、②前十勝の視線距離伸長領域から西の山麓側で視線距離短縮、③62-II 火口南側の南向き斜面で視線距離短縮。62-II 火口南側で認められた視線距離短縮領域は継続的な噴気が認められる振子沢噴気孔群と対応している。今回の解析期間では 2018 年から 2021 年において、前十勝の山頂付近では視線距離伸長量がおおよそ 5 cm、前十勝の山麓側では視線距離短縮量がおおよそ 4 cm、62-II 火口南側では視線距離短縮量がおおよそ 2 cm に達した(図-1)。今回はここで得られた SAR 時系列解析の結果をベンチマークとして、Sentinel-1 データに PS-InSAR を適用した結果との比較を行う。なお本稿では検出された地殻変動の個別の駆動メカニズムと解釈については割愛する。

3.2 積雪期を含む PS-InSAR の結果

図-1b に Sentinel-1 データに PS-InSAR を適用した結果に基づいた 2018 年から 2021 年における衛星視線距離変化の平均速度を示す。62-II 火口西側の前十勝の山頂付近ではおおよそ 300m の範囲にわたって衛星視線距離伸長の領域が認められる(図-2, 図-3)。この結果を ALOS-2/PALSAR-2 の SAR 時系列解析結果に重ねて表示させると、おおむね同程度の視線距離変化の平均速度であった(図-1a)。Sentinel-1 データの非積雪期となる 5 月から 10 月に撮像されたデータを用いて見積もった 2018 年から 2021 年の非積雪期における衛星視線距離変化と比較すると、衛星視線距離変化の時間推移はおおむね同様の推移を示す結果を得ることができた(図-2)。2020 年においては非積雪期に 62-II 火口の南に位置する振子沢噴気孔群を中心とした衛星視線距離短縮が認められた。また、2018 年から 2021 年を通して夏

に衛星視線距離がやや短縮傾向に向くような季節変動も認められる。一方、SAR 時系列解析の結果では明瞭な変動が認められなかった 62-II 火口から離れた領域において、視線距離変化の擾乱も認められた (図 1)。

4. まとめ

令和 6 年度は PS-InSAR を用いた積雪期における火山性地殻変動検出の試行として、十勝岳を対象とした解析を実施した。2018 年から 2021 年に撮像された Sentinel-1 データに PS-InSAR を適用した結果は、活発な噴気が認められる 62-II 火口周辺において積雪期を含む通年の地殻変動を検出した。ALOS-2/PALSAR-2 データに SAR 時系列解析を適用した結果をベンチマークとして Sentinel-1 の非積雪期 (5 月から 10 月) に撮像されたデータに PS-InSAR を適用した結果を検証し、大局的に整合的な傾向の結果を得ることができた。一方、62-II 火口から離れた変動が生じていない領域においても視線距離変化の擾乱が認められ、ALOS-2/PALSAR-2 の SAR 時系列解析の結果と整合しなかった。令和 7 年度は解析に用いる解析結果に対する解析パラメータの依存性や、62-II 火口から離れた非変動域における位相分散が生じる原因についての検証、非変動域における位相変化量の低減手法の検討を行う。

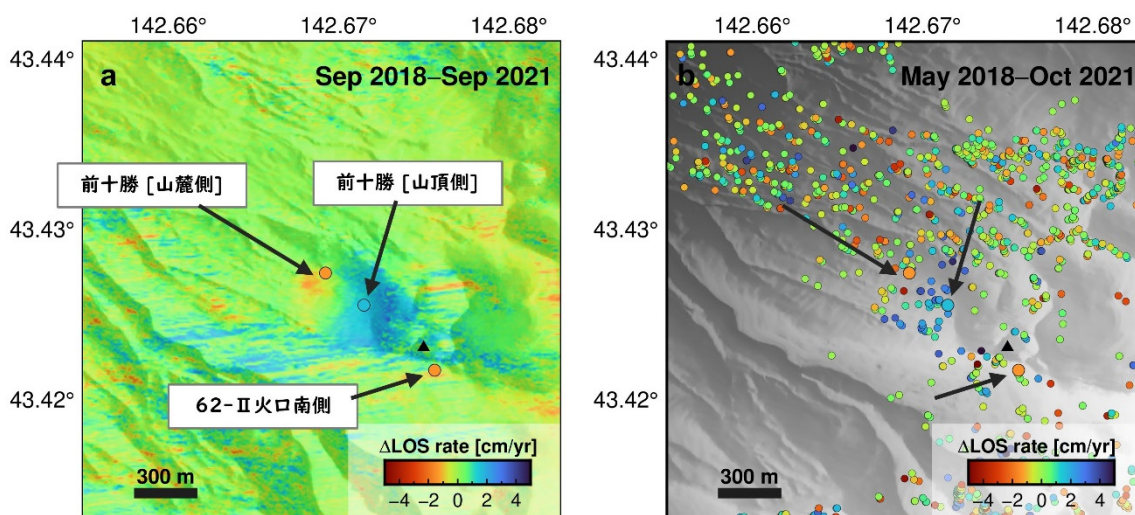


図-1 SAR 時系列解析と PS-InSAR による 2018 年から 2021 年までの視線距離変化の平均速度。(a)ALOS-2/PALSAR-2 による SAR 時系列解析から求めた 2018 年 9 月から 2021 年 9 月までの視線距離変化の平均速度。図-3 で示す PS-InSAR による視線距離変化の時系列の点を重ねてプロットした。(b)PS-InSAR による 2018 年 5 月から 2021 年 10 月までの視線距離変化の平均速度。カラースケールは同様のものを使用している。黒三角は 62-II 火口の位置を示す。

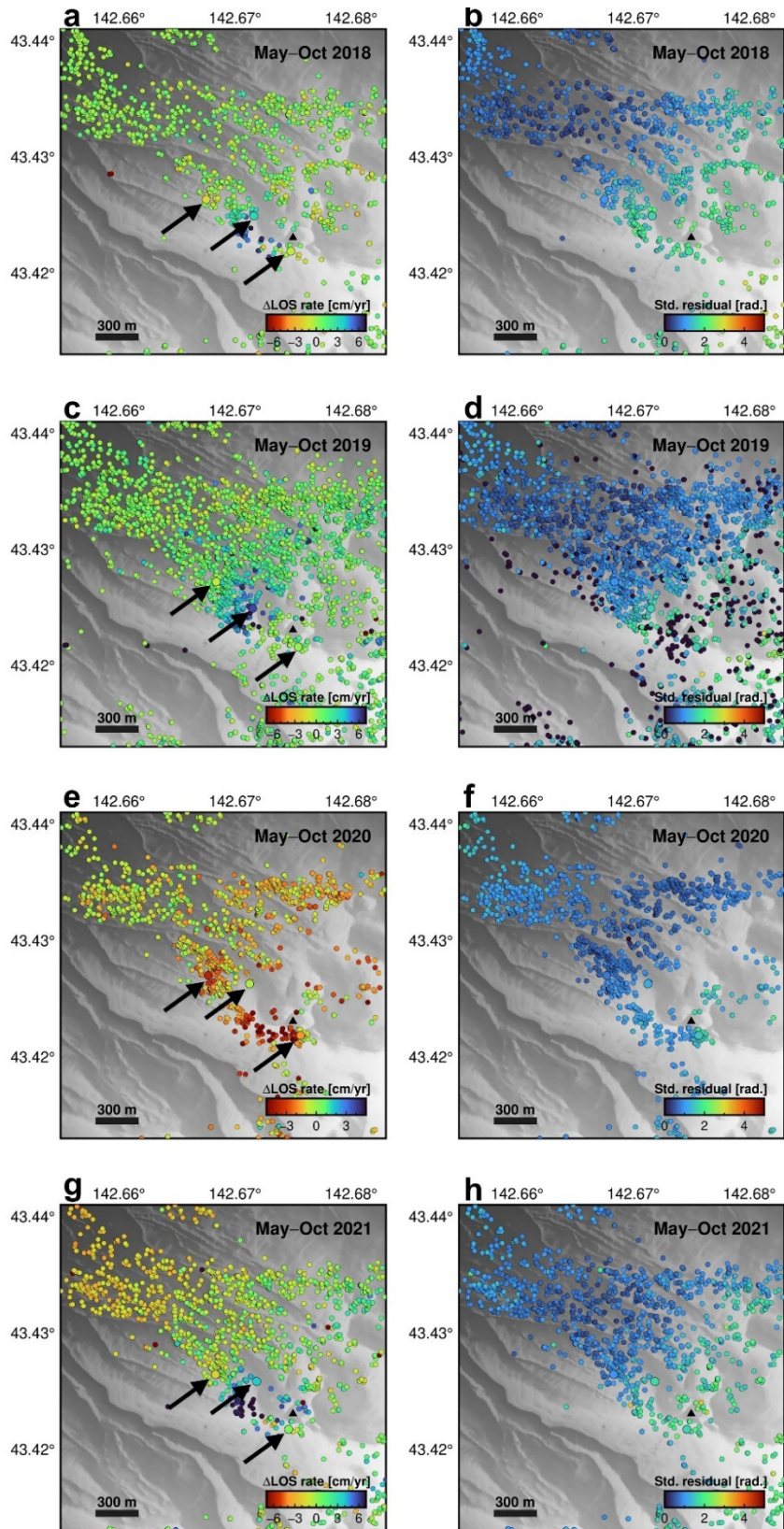


図-2 PS-InSAR による非積雪期における視線距離変化の平均速度。左列は視線距離変化の平均速度、右列は平均速度からの標準偏差を示す。(a-b) 2018 年、(c-d) 2019 年、(e-f) 2020 年、(g-h) 2021 年。図-3 中の視線距離変化の時系列を示す点は黒矢印で示す。

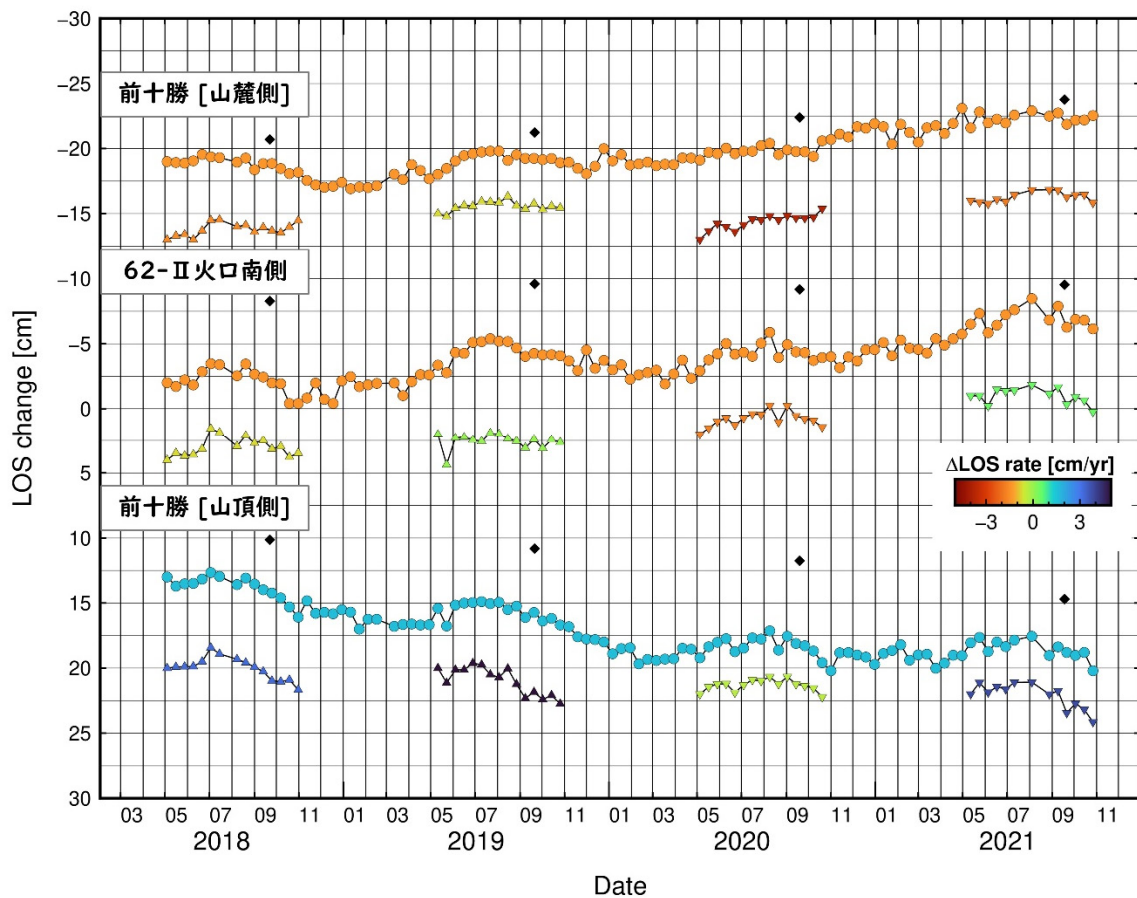


図-3 PS-InSAR による十勝岳 62-II 火口周辺の視線距離変化の時系列。各点の位置は図-2 中黒矢印で示す。色は各解析期間における視線距離変化の平均速度を示す。ひし形は ALOS-2/PALSAR-2 データに SAR 時系列解析を適用した結果、丸は 2018-2021 年に撮像された Sentinel-1 データに PS-InSAR を適用した結果、三角は 2018-2021 年の 5 月から 10 月に撮像された Sentinel-1 データに PS-InSAR を適用した結果を示す。

謝辞

本研究で使用しただいち 2 号の原初データの所有権は、JAXA にある。これらのデータは、だいち 2 号に関する国土地理院と JAXA の間の協定に基づき提供された。

参考文献

- Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B. and Frolich, R. M. (1993): Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream. *Science*, 262(5139), 1525–1530. doi: 10.1126/science.262.5139.1525
- Kumar, V. and Venkataraman, G. (2011): SAR interferometric coherence analysis for snow cover mapping in the western Himalayan region. *International Journal of Digital Earth*, 4(1), 78–90. doi: 10.1080/17538940903521591
- Peltier, A., Bianchi, M., Kaminski, E., Komorowski, J.-C., Rucci, A. and Staudacher, T. (2010): PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise. *Geophysical Research Letters*, 37(12). doi: 10.1029/2010gl043846
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C. and Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice

by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4), 17–66.

doi: 10.1016/0377-0273(90)90082-q

Tanaka, R., Hashimoto, T., Matsushima, N. and Tsuneo Ishido. (2018): Contention between supply of hydrothermal fluid and conduit obstruction: inferences from numerical simulations. *Earth Planets and Space*, 70(1). doi: 10.1186/s40623-018-0840-6