

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、現地に観測機材の整備が困難な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い、数百メートル程度の空間波長を有する地殻変動が生じることもある。SAR による地殻変動観測は、数メートル程度の高い空間分解能で地殻変動の描像を明らかにできるため、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。地殻変動データの精度向上は、火山システムにおける圧力環境推定の高度化にも寄与し、火山活動評価の観点からも重要である。

冬季における積雪は従来の SAR 干渉法では地殻変動由来のシグナルの判読を困難にさせる非干渉を生じさせる要因の一つである(Goldstein et al. 1993; Kumar and Venkataraman, 2011)。積雪した火山を対象とした SAR による地殻変動観測は容易ではないため、GNSS による観測に頼らざるを得ない状況である。冬季に積雪する火山を対象として、衛星 SAR による地殻変動の時系列データを作成する場合には、積雪期をまたいだ画像ペアに SAR 干渉法を適用し、積雪に伴う非干渉の影響を回避する戦略をとることが一般的である。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、時間基線長の増大に伴う干渉性への影響は限定的である。ただし、積雪期における SAR による地殻変動観測の時間分解能は、格段に低下する。積雪期に火山噴火が発生した場合には、融雪型泥流といった広域に影響を及ぼす災害を伴う事例が報告されている(Pierson et al. 1990)。積雪期においても高い空間分解能を有する SAR データを用いて、観測可能範囲が限定的であっても良いので、地殻変動の抽出に向けた、従来の SAR 干渉法とは異なる解析手法の適用可能性の検証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、積雪期においても地熱地帯や火口付近で地盤が局所的に露出している箇所における地殻変動観測を目指して、ピクセル単位で位相変化の追跡を行う手法の適用可能性を検証する。岩盤などの地表面は、長期にわたって散乱特性の変化が小さく、位相が安定した恒久散乱点(Persistent Scatterer: PS 点)として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明らかにすることはできなくとも、単一ピクセルの位相変化を通年で追跡することができれば、火山活動評価に資する情報となり得る。令和 6 年度は、十勝岳を対象として地熱地帯周辺において火山活動に伴う地殻変動を検出できた一方、結果にはばらつきがみられ、解析結果の安定性について課題が残った。令和 7 年度は、PS 点や類似の位相安定候補点を対象として位相最適化処理を適用し、結果の安定性に与える影響を検証した。

2.2 使用データ・解析手法

本研究では、令和6年度に実施した解析結果と位相最適化処理を適用した結果の比較を行い、解析結果の安定性の検証を行う。位相最適化処理は、GAMMA ソフトウェアの IPTA モジュールで抽出した位相安定候補点として採用されたピクセルに適用した。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、定期的かつ頻繁に撮像された SAR のデータセットであり、本研究の目的の検証のために適している。解析事例の対象は、令和6年度と同様に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(Tanaka et al. 2018)。

位相最適化は各画素の位相を時系列として安定に推定する手法である。基準データに位置合わせした SLC 画像群に、位相安定候補点周辺の任意のピクセルを対象として統計的に類似したピクセルを選別する。各複素値を正規化し、各時期間の複素相関行列を推定する。複素相関行列の最大固有ベクトルから参照時期に対する位相の時系列を復元し、ノイズを抑えた位相を得ることが期待できる。参照ピクセルと周辺のピクセルとの類似性は Kolmogorov–Smirnov test で、最大の固有値とその他の固有値の比が 3 以上のピクセルを採用した。位相最適化処理の後には、時間方向の 1 次元の位相アンラッピングを適用し、視線距離変化の時系列を得た。

3. 解析結果

図-1 に GAMMA ソフトウェアの IPTA モジュールで解析した結果と、位相最適化処理を適用して推定した平均変位速度を示す。位相最適化を適用した結果は、周辺ピクセルを考慮しない場合 (PS 点のように扱う場合) と周辺ピクセルを考慮する場合 (Distributed Scatterer (DS 点) のように扱う場合) の結果も比較のために示す。平均変位速度の空間分布を比較すると、位相最適化を適用した結果は、IPTA の結果よりも非変動域における平均変位速度のばらつきが大きくなる傾向を示す (図-1)。非変動域における平均変位速度のヒストグラムでも、位相最適化を適用した結果の方が分散が大きいことがわかる (図-1 右上)。変動域においては、62-II 火口西側の前十勝では IPTA と位相最適化の結果で同様の領域に収縮を示唆する視線距離伸長の変位が認められる。一方、62-II 火口の南に位置する振子沢噴気孔群において、膨張を示唆する視線距離短縮が IPTA の結果よりも位相最適化を適用した結果の方が広い領域で確認される。

前十勝と振子沢噴気孔群周辺の視線距離変化の時系列は、前十勝では継続的な視線距離伸長(収縮)がみられ、振子沢噴気孔群では 2020 年に視線距離短縮(膨張)が確認できる (図-2)。非変動域では解析期間を通して変位の平均がおおむねゼロ付近で推移しており、標準偏差は 0.055 m 程度であった。しかし、得られた標準偏差は Sentinel-1 が使用しているマイクロ波の波長と同程度であることから、位相最適化の恩恵を受けることができていない、と解釈することができる。

IPTA と位相最適化を適用した視線距離変化の時系列を比較すると、前十勝における視線距離伸長は、解析期間を通しておおむね整合するように時間推移を示している (図-3)。一方で、振子沢噴気孔群においては 2020 年に膨張するような結果を示したが、視線距離変化の振幅は 2 倍程度の差異がみられた。位相最適化による結果が示す 2020 年における視線距離変化速度は、非積雪期のデータのみを用いた IPTA の結果と比較しても大きいことがわかる。IPTA と位相最適化の結果に差異が生じた要因として、位相最適化の前提となる位相安定の一貫性が積雪や融雪による散乱特性の変化により損なわ

れ、ノイズの影響を受けやすくなったことが挙げられる。今回使用した Sentinel-1 データの空間分解能がおおよそ 3×20 m (レンジ×アジマス) であり、さらに複数のピクセルを使用した DS 点として扱う解析により、解析期間を通して位相が安定したピクセルとして扱う前提が成立しにくい可能性がある。位相最適化による解析では、解析結果のパラメータの依存性は相対的に低いと考えられる一方で、安定した結果を得るために空間的平滑化といった追加処理が必要であることが示唆される。

4. まとめ

令和 7 年度は、SAR データを用いた積雪期における火山性地殻変動の抽出を目的として、解析結果の安定化を目指して位相最適化処理による結果の差異について検証を行った。位相最適化により、解析結果の安定化を期待したが、必ずしも解析結果の安定化につながるとは限らないことを確認した。今回の積雪期を含む解析や解析対象、使用した SAR データの空間分解能などの特徴による差異を網羅できていないが、位相最適化が解析結果の安定化を保証するものではないことを示唆する結果を得た。特に非変動域の分散の増加や振幅の不整合がみられたことから、解析結果を更に慎重に精査する必要がある。

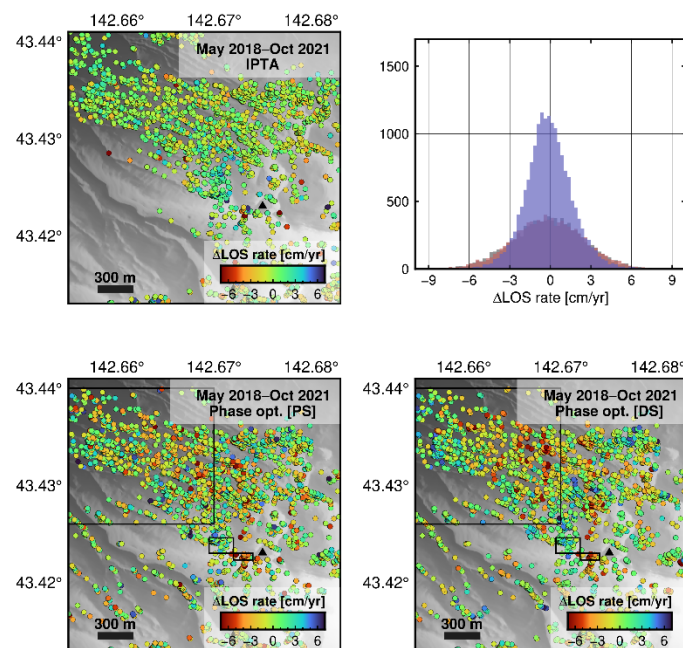


図-1 2018 年 5 月から 2021 年 10 月における視線距離変化の平均速度。(左上) IPTA の結果。正の値は視線距離伸長を示す。(右上) 非変動域における視線距離変化の平均速度のヒストグラム。青は IPTA、赤は位相最適化(PS)、灰色は位相最適化(DS)の結果。(左下) 位相最適化(PS)の結果。(右下) 位相最適化(DS)の結果。黒枠は変位速度計算に用いた解析領域、左上から非変動域の変位速度、前十勝における変位、振子沢噴気孔群における変位。黒三角は 62-II 火口を示す。

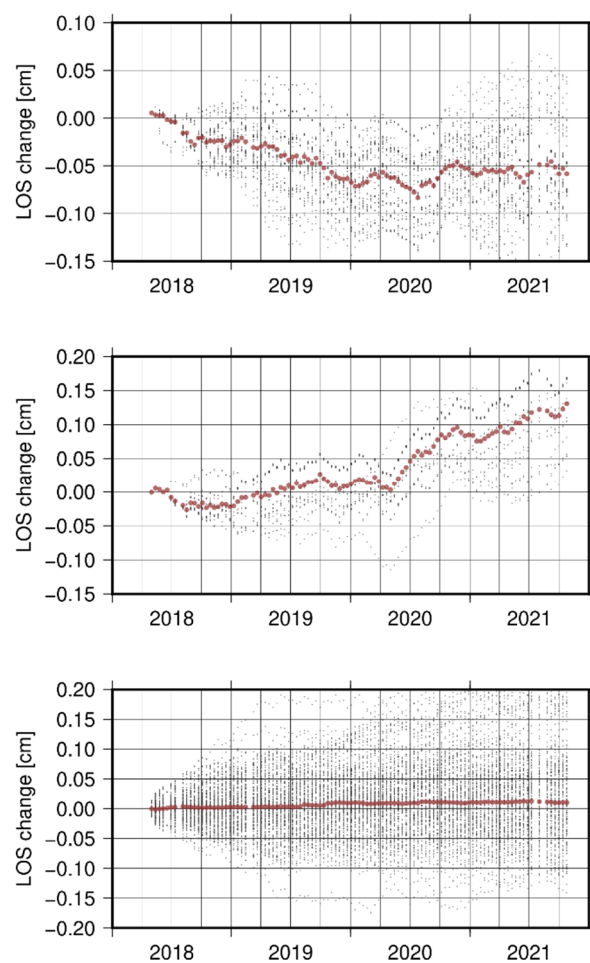


図-2 位相最適化(DS)適用後の視線距離変化の時系列。上から前十勝，振子沢噴気孔群，非変動域。黒点は解析範囲（図-1 参照）に含まれるピクセルの視線距離変化の時系列。赤点は各エポックにおける視線距離変化の平均を示す。

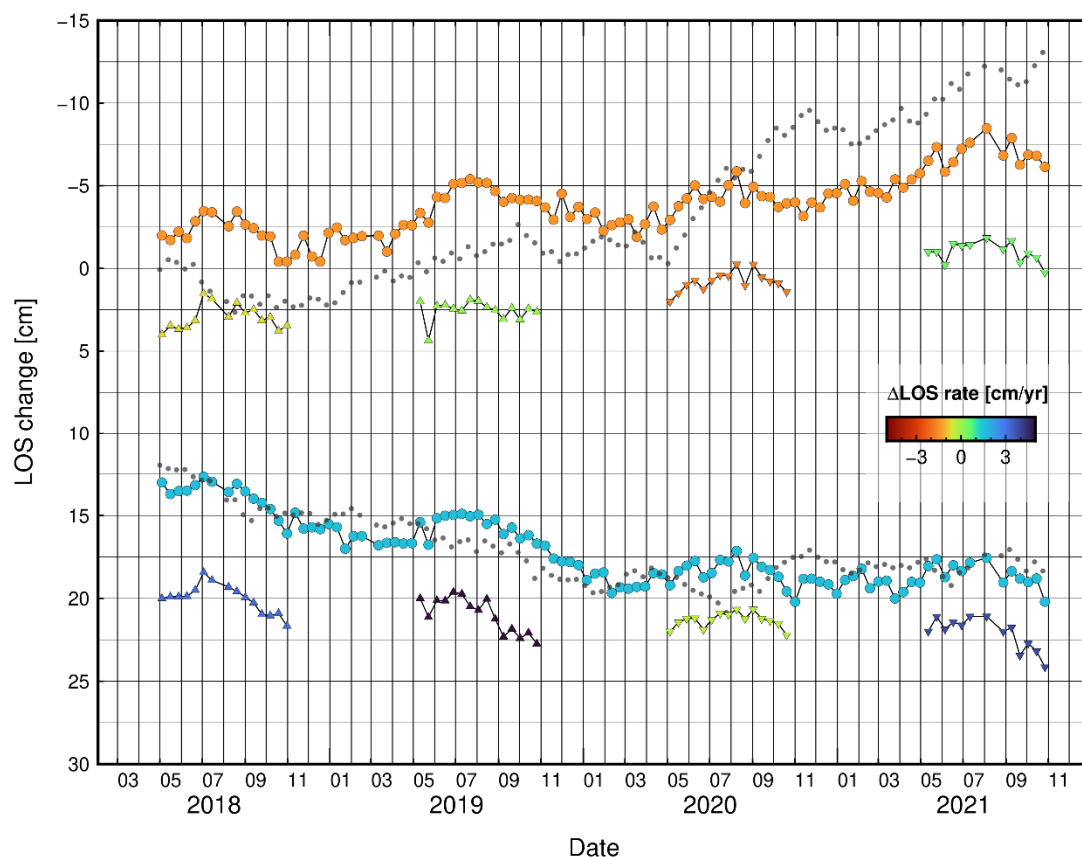


図-3 IPTA と位相最適化の結果による視線距離変化時系列の比較. 色付きの記号は IPTA による結果, 黒丸は位相最適化(DS)の結果. IPTA の結果の色は, 解析期間における視線距離変化の平均速度を示す.

参考文献

- Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B., & 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., & 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
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C., & 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., & 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