

P4. 徳島県三好市における干渉 SAR 時系列解析を用いた斜面変位箇所の推定に関する検討

A Study on Estimating Slope Displacement Locations Using Interferometric SAR Time-Series Analysis in Miyoshi City, Tokushima Prefecture

○小池雅哉・野々村敦子（香川大学）

1. はじめに

近年、地震や豪雨により山間部での斜面災害が多発している。被害を未然に防ぐためには、事前対応が必要な箇所を抽出する技術の開発が必要とされている。斜面変位傾向が災害前の予兆になり得ると考えられることから、広域での斜面変状箇所を把握する技術は事前防災対策において有用である。干渉 SAR は地殻変動解析に広く用いられており¹⁾、近年では斜面変動の推定やモニタリングへの応用も進められている²⁾。しかし、急峻な斜面では観測幾何と地形の影響により、干渉 SAR のみでは変位とノイズの区別が困難である。一方、時系列解析では多時期データの組み合わせによりノイズの影響を抑制し、継続的な変位傾向を示す箇所を特定できる³⁾。そこで本研究では、徳島県三好市有瀬地区を対象に ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた干渉 SAR 時系列解析を実施し、山間部における小規模斜面変動への適用可能性を検討した。

2. 対象地

対象地は徳島県三好市有瀬地区である。本地区は中央構造線以南の三波川帯南縁部に位置し、主に泥質片岩が分布する。1960 年（昭和 35 年）に徳島県有瀬地すべり防止区域に指定され対策工事が施工されてきたが、対策工事施工後も変動が継続してきた。2018 年 7 月豪雨以降、対策工事と斜面変動が繰り返されていた箇所もある。

3. 研究手法

本研究では ALOS-2/PALSAR-2 の観測データ（北行軌道右向き照射、分解能 3m）を使用した。差分干渉画像の作成には rinc_gui⁴⁾を使用した。マルチルック処理ではレンジ方向 5、アジマス方向 6 とし、ピクセルサイズは約 10m とした。使用観測データは 2019 年 3 月 16 日、6 月 22 日、12 月 7 日、2020 年 3 月 14 日、6 月 20 日の 5 シーンであり、計 10 の差分干渉画像を作成した。そして、作成した差分干渉画像を用いて時系列解析を実施し平均変位速度および累積変位量を算出した。時系列解析には LiCSBAS パッケージ⁵⁾を適用した。

4. 解析結果

図 1 は干渉 SAR 時系列解析により推定された衛星視線方向（LOS）の平均変位速度を示す。衛星に近づく変位を青色（正）、遠ざかる変位を赤色（負）で示す。北行軌道右側観測より、正の LOS 変位は隆起および西向き成分、負の LOS 変位は沈降および東向き成分の変位に対応する。レイオーバーおよびレーダーシャドウは産業技術総合研究所が公開しているレイオーバー・シャドウマップ⁶⁾を用いて黄色で示し、背景にはマルチルック処理で平均化した強度画像を示した。なお、急斜面で反射位置が逆転して記録される現象（レイオーバー）、電波が届かず観測できない領域（レーダーシャドウ）があること、斜面がアンテナに近い位置に圧縮されて表示される現象（フォアショートニング）が生じると 2 時期の変位が観測できない。今回の衛星観測データでは、反射強度がおよそ 75 dB 以上の領域がレイオーバー箇所と対応する。さらに、フォアショートニングの影響も含まれる可能性がある。そのため、本研究ではこれに対応する変位箇所を検討対象外とした。

中央部に位置する I-3 ブロックでは、有瀬地すべりブロック群の中でも顕著な変位が推定された。上端部（P1 付近）は正の値を示し、隆起や西向き成分を含む変位が推定された一方、中腹部（P2 付近）は負の値を示し、沈降や東向き成分を含む変位が推定された。

時系列で変位傾向を捉えるため、各地点の累積変位量を図 2 に示す。半径 2 km 範囲および約 1 年の期間の時空間フィルターを適用して平滑化された結果を青色、フィルター未適用結果を赤色で示す。

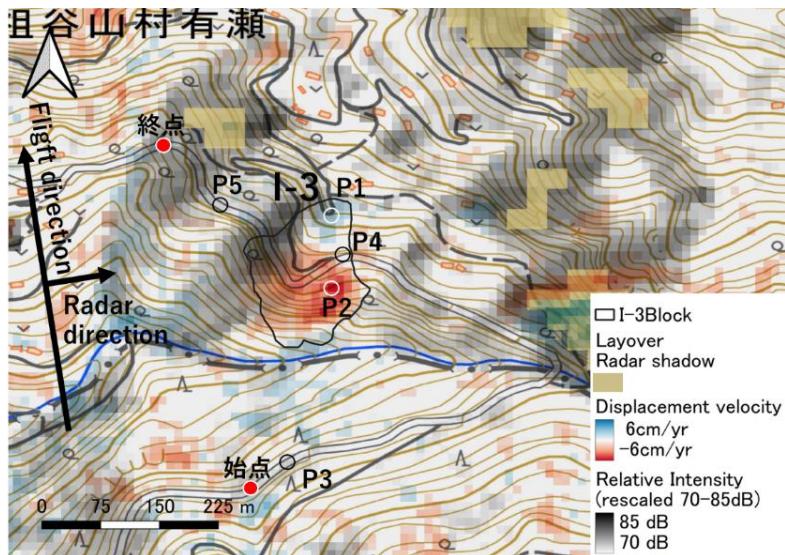


図1 有瀬地区における平均変位速度（干渉 SAR 時系列解析）

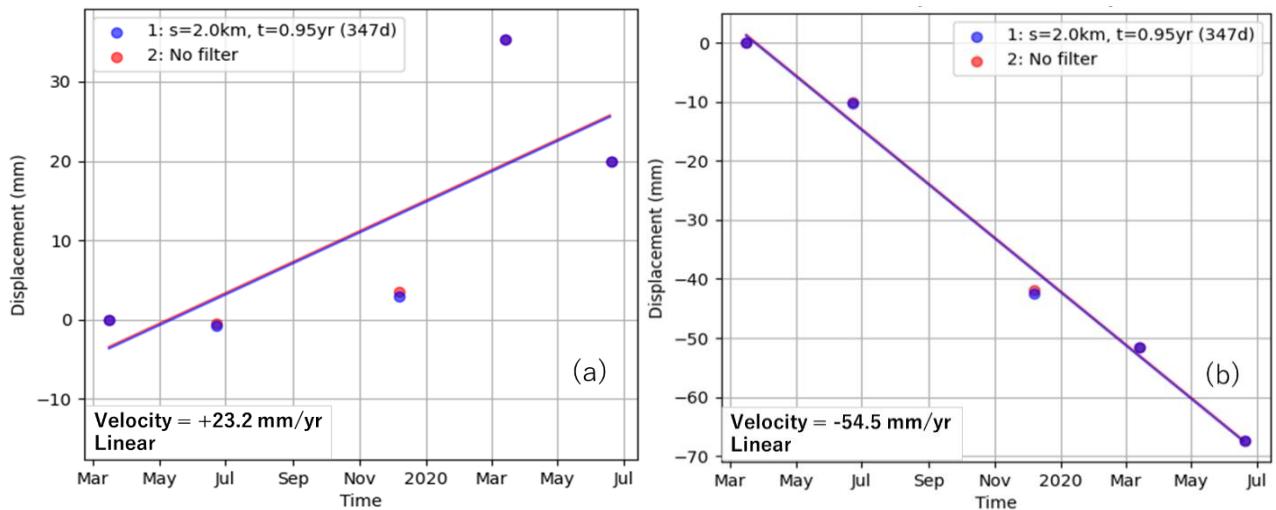


図2 累積変位量 (a) P1 地点, (b) P2 地点

P2 では一貫して負の変位傾向を示し、隣接する複数のピクセルでも同様の傾向が見られた。それに対して P1 では、全体として正の変位傾向を示すが各時期で変位方向にばらつきが見られ、隣接する複数のピクセルでも同様の傾向が見られた。

5. 現地調査

2024年9月12日に図1に示す始点から終点までの道路沿い、同年11月28日にはP1周辺で現地調査を行った。調査では、道路亀裂、擁壁、ガードレール等の人工構造物に着目し、変状の有無や変位量を確認した。

P3 および P4 で顕著な変状が確認された。P3 では道路に沿った方向に亀裂、ガードレールの傾き、最大約 17 cm の沈下が見られた（図3）。P4 では I-3 ブロック中腹部の擁壁において、地すべり活動に起因すると考えられるずれが確認され、中央部で約 80 cm のずれが見られた（図4）。しかし、干渉 SAR 時系列解析結果では P3, P4 ともに顕著な変位は推定されなかった。

一方、P5 では道路に亀裂は見られたものの開口には至らず、構造物の変形も小規模であったため、周辺と比べて変位は小さいと判断した（図5）。干渉 SAR 時系列解析結果でも平均変位速度が 3.5mm/yr と小さな値を示した。

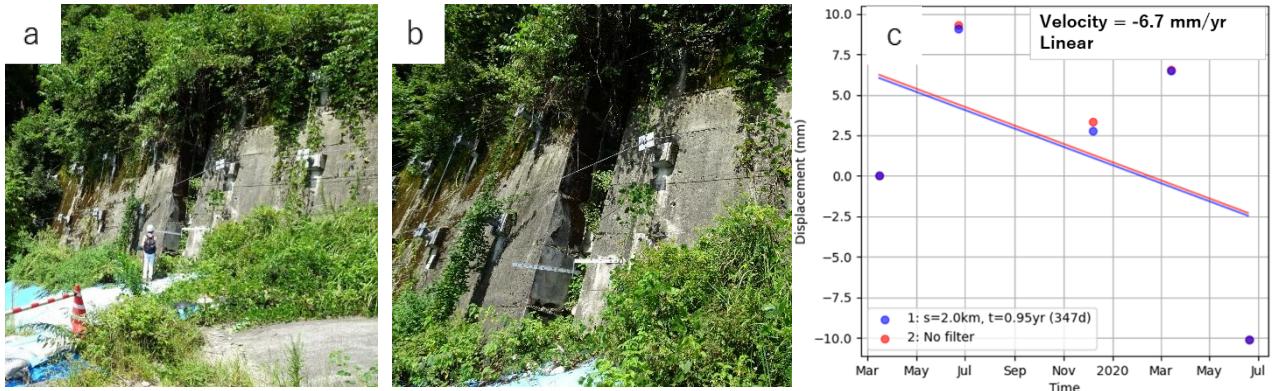


図4 P4 地点 (a:コンクリート擁壁, b:擁壁のずれの拡大図, c:累積変位量)

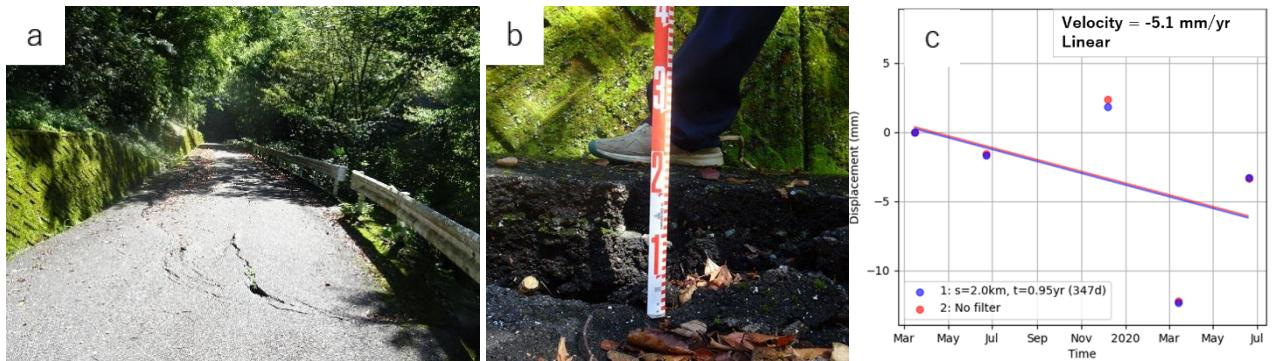


図3 P3 地点 (a:舗装道路の亀裂, b:約 17cm の沈下, c:累積変位量)

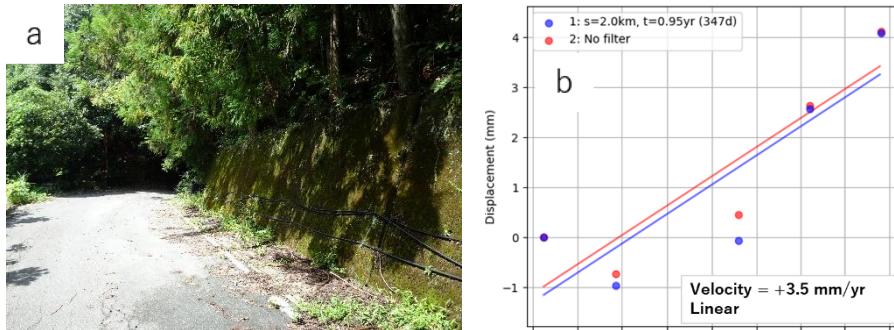


図5 P5 地点 (a:道路の変状程度, b:累積変位量)

6. 考察

P1 地点では各時期で変位方向にばらつきが見られた。この要因の一つに LOS 方向に対する 3 次元変位成分の比率の違いが考えられる。LOS 方向への投影では、沈下および東向き変位が衛星から遠ざかる変位、隆起および西向き変位が近づく変位となる。3 次元変位を LOS 変位に変換する式を(1)に示す。ここで、N, E, U はそれぞれ南北、東西、上下方向の変位量（北、東、上を正）であり、LOS 変位は正が衛星に近づく方向、負が遠ざかる方向を表す。本研究の観測条件 ($\theta = 40.87^\circ$, $\alpha = 350.38^\circ$) では、各方向成分に+10cm の変位を与えた場合、東西変位は-6.7cm, 南北変位は+1.1cm, 上下変位は+7.3cm の LOS 変位に換算される。したがって、3 次元変位成分の比率の違いが累積変位量の符号のばらつきに影響した可能性がある。さらに、I-3 ブロックでは様々な対策工事が実施されているため解析期間中に P1 付近で行われた工事の影響も考えられる。

$$LOS = -N \sin \theta \sin \alpha - E \sin \theta \cos \alpha + U \cos \theta \quad (1)$$

(LOS: 視線方向変位量, N: 南北変位量, E: 東西変位量, U: 上下変位量, α : 進行方位角, θ : 入射角)

P2 および周辺の複数ピクセルでは一貫して負の変位傾向を示した。このことから、P2 では P1 と異なり衛星に近づく方向の変位は小さく、継続的に遠ざかる方向の変位が卓越していた可能性がある。

P3 では最大約 17 cm の沈下や道路の亀裂が確認されたが、干渉 SAR 時系列解析では変位方向のばらつきが見られ、変位量も小さく推定された。この原因として LOS 変換における 3 次元成分の相殺が考えられる。しかし、亀裂方向から推測される変位方向（北西）は衛星軌道方向とほぼ平行であり、式(1)より水平変位の影響は小さいと考えられる。本来であれば沈下成分が LOS 変位として大きく換算されるはずであるが、解析結果では明瞭な変位は示されなかった。このことから、観測期間中には顕著な沈下が進行していなかった、あるいは変位が局所的で SAR の空間分解能では検出が困難であった可能性がある。その結果、推定値としては変位方向のばらつきや小さな変位として現れたと考えられる。

P4 では P1 と同様に変位方向にばらつきが見られたが、推定された変位の方向が異なる。これは、約 10m のピクセル内に上端部と中腹部の各ブロックが異なる動きをしていたことが要因と考えられる。

現地調査において変位が小さいと判断した P5 では、他地点と比較して小さな平均変位速度が推定された。このことから、干渉 SAR 時系列解析は変位の大小を識別できている可能性が示唆される。

7. まとめ

本研究により、徳島県三好市有瀬地区の I-3 ブロックでは、上端部 (P1) と中腹部 (P2) で異なる変位傾向が推定された。特に P1 では累積変位量に観測時期ごとのばらつきが見られ、対策工事や 3 次元変位成分(N, E, U)の比率の違いが要因と考えられる。一方、P2 では一貫して沈下もしくは東向きの変位が示され、継続的に同方向への斜面変位が反映されている可能性が高い。また、現地調査で把握が困難な斜面全体の緩慢な変位や地すべり活動の兆候について、干渉 SAR 時系列解析により把握できる可能性が示された。以上より、ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた干渉 SAR 時系列解析は、山間部地すべりの変位特性を把握するうえで一定の有効性が示唆された。ただし、対策工事などの人的要因や、3 次元変位成分の比率の違い、観測幾何の影響を考慮する必要がある。

今後は、施工履歴や地上観測データとの比較検証に加え、他地域での検証を行い、時系列解析で得られる推定変位箇所の発生条件や地形的特性を明らかにしていく。

謝辞

高知女子大学名誉教授大村誠先生、地研の宮地修一様には、本研究を進めるにあたり貴重なご助言を賜った。ここに記して深く感謝申し上げる。干渉 SAR 解析には防災科学研究所の小澤拓氏らが開発した RINC を使用しました。また、時系列解析にはオープンソースの LiCSBAS パッケージを使用しました。本研究で用いた PALSAR-2 データは、PIXEL において共有されているもので、JAXA との共同研究契約に基づき提供されました。また、本研究は東京大学地震研究所共同利用（2024-B-02）の支援を受けました。

参考文献

- 1) 矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 山田晋也, 三浦優司, 和田弘人, 仲井博之, 山中雅之, 搶上泰亮, 上芝晴香: だいち 2 号の干渉 SAR による火山活動モニタリング, 写真測量とリモートセンシング, 55巻1号 p.6-11, 2016.
- 2) 當麻央介, 斎藤仁: D-InSAR を用いた南アルプスにおける活動性地すべりの時系列解析—諸子沢地すべりを事例に—, 日本地理学会発表要旨集, 2025s, p.948, 2025.
- 3) 北川源四郎: 4-4 時系列データの解析, 東京大学 数理・情報教育研究センター「数理・データサイエンス・AI 教育強化拠点コンソーシアム」, 2020.
- 4) Ozawa,T., Fujita,E. and Ueda,H. : Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano, Earth,Planets and Space, 68, 186, 2016.
- 5) Morishita,Y., Lazecky,M., Wright,T.J., Weiss,J.R., Elliott,J.R. and Hooper,A. : LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor, Remote Sens, 12(3), 424, 2020.
- 6) 産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター地理空間サービス研究チーム: ALOS-2 (日本域) 及び Sentinel-1 (全球) のレイオーバー・シャドウマップ, 2022 年 7 月.