

干渉 SAR 解析による愛媛県千町地すべりの挙動とメカニズム

弘前大学 三井 洸, 道家 涼介
京都大学防災研究所 山崎 新太郎

1. はじめに

ここでの地すべりとは地下水等の影響によって長期間にわたり広範囲の地盤がゆっくりと下方へ動き続ける現象を指す。地すべりによってインフラや住居等の構造物のある箇所に変形が集中することで甚大な被害につながる恐れがある。したがって、地すべり被害の防止および軽減のためには、その挙動とメカニズムを推定し、継続的なモニタリングを実施することが重要である。

本研究では、愛媛県西条市南部に位置する千町(せんじょう)地すべりを対象とする。本地域は人家や農地が点在する生活基盤であり、さらに重要道路と河川が下方にあることから高精度な監視が求められる地域である。当該地域は三波川帯の結晶片岩類を基盤とし、地すべりの規模は長さ約 2.1km, 幅約 1.0km, 標高差は 100~800 m に及ぶ。また、延長 2km にわたって北西へ向かう緩斜面と東側と北側の比高差 200m 以上の急崖から成る。濱岡ほか (2005) によれば、地すべりブロックの下部において変状が著しいとされる。

近年、干渉 SAR 解析を用いて地すべりを検出・モニタリングする事例は増加しており (例えば, Usami et al., 2024 など), 面的な把握が可能な本手法の有用性が示されている。国土地理院 (2025) が全国を対象に実施している ALOS-2/PALSAR-2 を用いた干渉 SAR 時系列解析の結果は、全体として西向きに年間 1 cm 程度の変位を示すが、解析上の地上解像度が 90m であることから、地すべり内部の詳細な変形パターンを議論するには解像度が十分とは言えない。

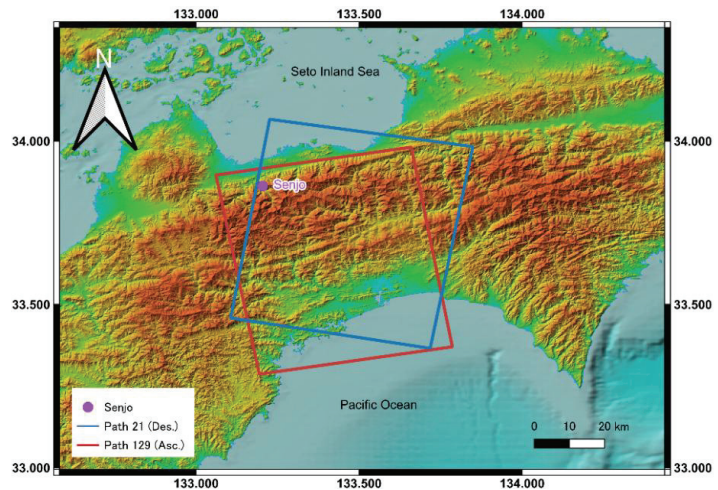


図 1 千町地すべりの位置および解析に使用したデータ。図中の赤枠 (Path129) および青枠 (Path21) は、解析に使用した ALOS-2/PALSAR-2 データの範囲を示す。地理院地図の陰影段彩図を基図に使用。

Behavior and Mechanism of Senjo Landslide in Ehime prefecture inferred from InSAR Analysis by Hiroto Mitsui, Ryosuke Doke and Shintaro Yamasaki

そこで本研究では、ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた干渉 SAR 解析をより高い解像度で実施し、千町地すべりの詳細なモニタリングおよびメカニズムの検討を行うことを目的とする。また、対象地内には京都大学防災研究所による GNSS 観測点が存在するため、データの比較を通じて、手法の有効性についても検証する。

2. データおよび解析方法

本研究では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が運用する ALOS-2/PALSAR-2 の観測データの内、千町地すべり周辺を撮像した Descending 右観測の Path21 と Ascending 右観測の Path129 のデータを使用した。いずれも高分解能モード (分解能 3 m) で取得されたものである (図 1)。これらの観測データについて、2014 年の観測開始から 2025 年 3 月までのデータを取得し、観測日の間隔が 1 年以内の干渉ペアをとり、RINC (Ozawa et al., 2016) を用いて差分干渉解析を実施した。解析はグラウンドレンジが約 10m となるようにピクセルの平均化処理を行い実施した。また、国土地理院の 10 m DEM から作成された楕円体高モデルを使用し地形縞をシミュレートし、初期干渉画像から差し引くことにより初期干渉画像を得た。加えて、数値気象モデル (WRF) を用いた大気遅延補正、Split-Spectrum 法 (Gomba et al., 2016) による電離層遅延補正を適用した。時系列解析には、LiCSBAS (Morishita et al., 2020) を用い、気象などに起因するノイズと考えられる 1 年未満の短周期の変動成分および空間波長 2 km 以上変動を除去するフィルタを適用することで、当該期間の変位速度分布および変位の時間変化を抽出した。

3. 解析結果

図 2 に Ascending 右観測 (以下, Asc.) および Descending 右観測 (以下, Des.) の干渉 SAR 時系列解析結果を示す。両軌道において、地すべりブロック全体、特に下部において明瞭な変位が検出された。衛星視線方向 (Line of Sight : LOS) の変位速度分布を見ると、Asc. では暖色系 (衛星に近づく方向の変位速度) が卓越して分布している。一方、Des. では寒色系 (衛星から遠ざかる方向の変位速度) が分布する傾向が認められた。この結果は、各図の破線範囲に示す地すべり土塊全体が西向きに変位していることを示唆するものである。

図 3 に 2.5 次元解析の結果を示す。準東西成分においては、地すべり全体が青色 (西向き) の変動を示し、その速度は広範囲で 10 mm/yr を超えていることが明らかとなった。これも地すべりが定常的に西側へ滑動していることを示している。一方、準上下成分においては、上部 (東側) の急斜面域周辺を中心として青色 (沈降) の傾向が卓越していることが確認された。これに対し、地すべり末端部付近では相対的に隆起または水平移動が起きていると考えられる。以上の結果から地すべりは西方への土塊の移動、そして末端部の大変形を示していると推定される。

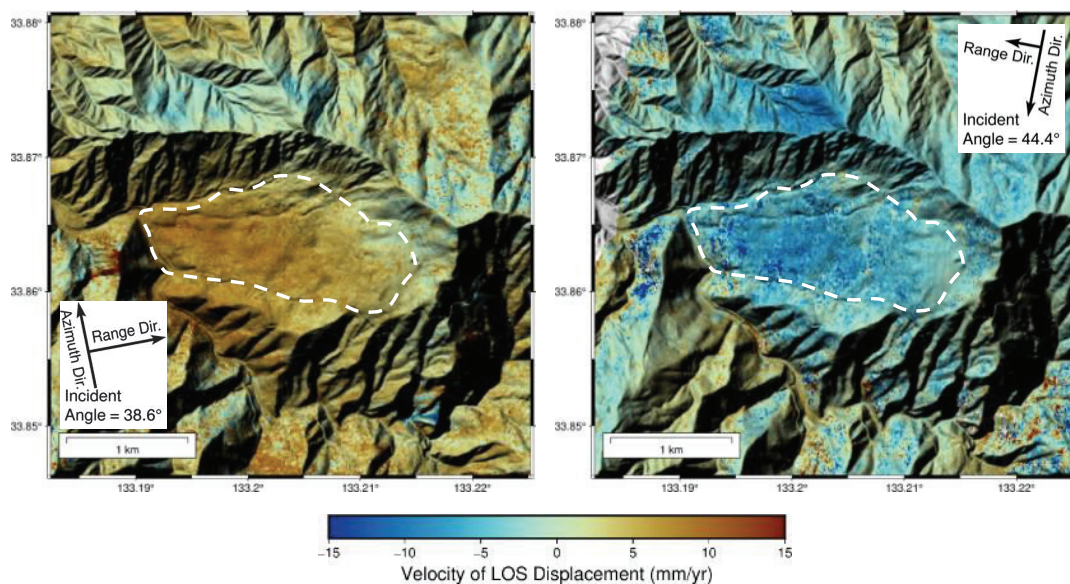


図2 千町地すべりを対象とした干渉 SAR 時系列解析結果（2015/10~2025/03）と地すべりの範囲（破線）。左が Asc., 右が Des. 正の値（暖色系）が衛星に近づく方向，負の値（寒色系）が衛星から遠ざかる方向の変位速度を表す。国土地理院の陰影起伏図を基図に使用。

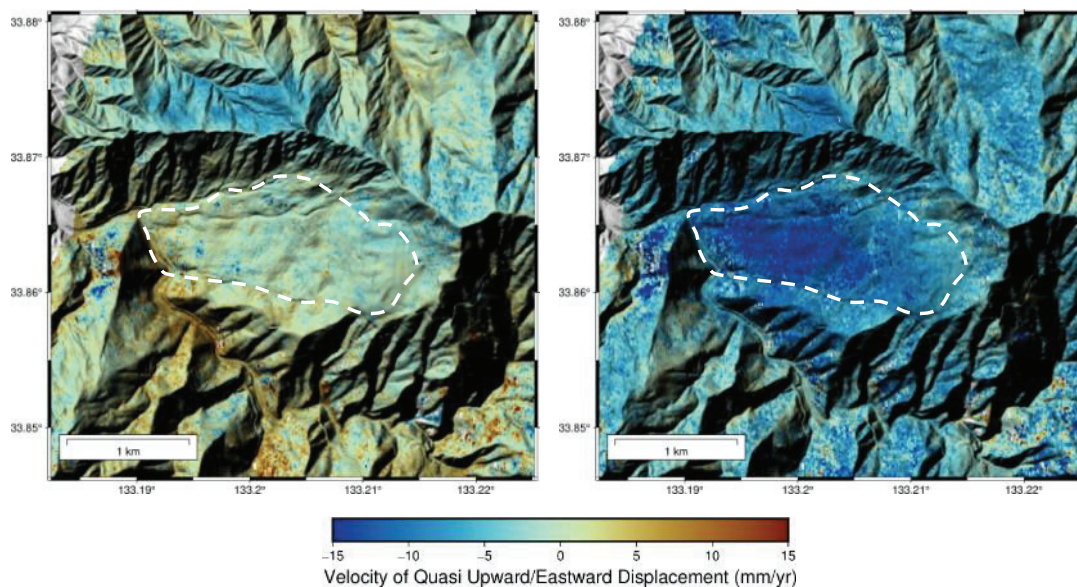


図3 2.5次元解析による準上下成分（左）および準東西成分（右）の変位速度図と地すべりの範囲（破線）。各図において，正の値（暖色系）は上向き方向および東向き方向，負の値（寒色系）は下向きおよび西向き方向の変位速度を示す。

4. 考察

4.1 GNSS 観測データとの比較検証

本解析手法の妥当性を検証するため、京都大学防災研究所が地すべり地内 2 地点 (G-1, G-2) に設置した GNSS 観測点のデータ

(2024 年 1 月～) と比較を行った。GNSS 観測から得られた東西成分 (ΔEW) の変位速度は、G-1 地点で -10.92 mm/yr 、G-2 地点で -13.25 mm/yr (いずれも西向き) であった。これに対し、同地点における干渉 SAR 解析の準東西成分 (ΔQEW) は、G-1 地点で -13.02 mm/yr 、G-2 地点で -16.01 mm/yr といずれも西向きの変位を示した。SAR 解析値は GNSS 計測値と比較して若干大きめの値を示しているものの、変動の方向およびオーダーは極めて良く整合している。このことから、本研究で適用した時系列干渉 SAR 解析は、千町地すべりの定常的な挙動を高い精度で捉えていることが確認された。

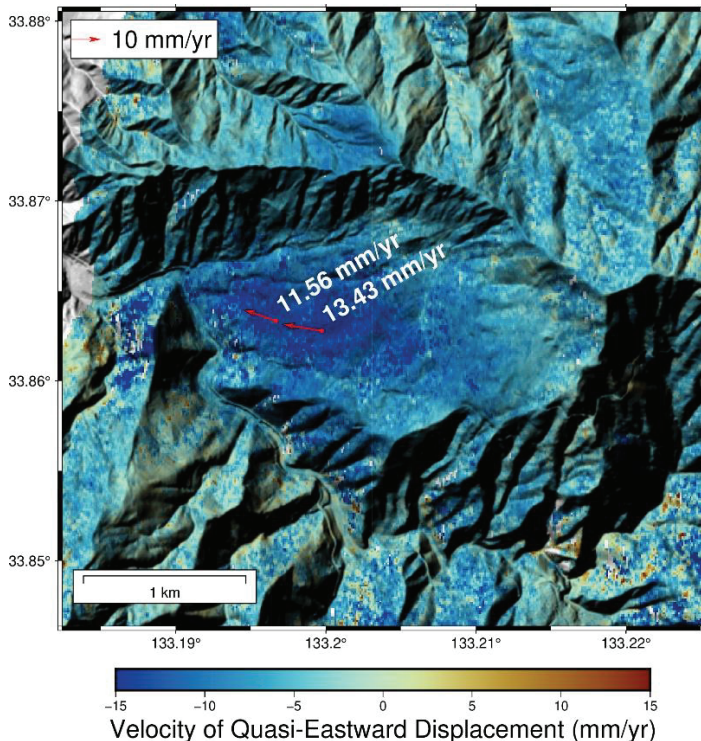


図4 図3に示した2.5次元解析の準東西成分の変位速度図にGNSS観測点の観測期間(2024/01/30~2025/09/19)における変位速度ベクトルをプロットした。

4.2 降水量と地すべり変位の相関

変位の時系列変化と降水量との関係に着目すると、2016年頃までは比較的緩やかな変動であったが、2017年夏頃から変位が加速する傾向が見られた。特に2018年秋以降、変位の傾き(速度)が顕著に増大し、その加速傾向は2022年頃まで継続していることが確認された。この時期は、2018年7月の西日本豪雨(平成30年7月豪雨)を含む複数の豪雨イベントが発生した時期と重なる。国土交通省四国地方整備局(2019)によれば、有瀬地すべりにおいても、西日本豪雨後に変位が加速した報告があることから、千町地すべりにおいても、台風や豪雨などの大きな降水イベントがトリガーとなり、地下水位の上昇や間隙水圧の変化を通じて地すべり活動が活発化・加速した可能性が高いと考えられる。これは、突発的な降雨だけでなく、降雨イベントの累積的な影響が地すべりの長期的挙動に影響を与えていることを示唆している。

4.3 変形集中箇所と現地状況の対応

準東西成分の変位速度を東西方向に空間微分することにより変位勾配(ひずみ)の分布を得た(図5)。この結果によれば、変形が集中しているエリアが地すべりブロックの縁辺部、特に地すべり下部に分布している。

現地調査において、干渉 SAR 解析で大きな変位勾配が確認された箇所の状況を確認したところ(図6)、南側のブロックの上端付近では道路のアスファルトに変形(起伏)が、ブロックの下端付近ではコンクリート水路に圧縮によるものとみられる亀裂の変状が確認された。これらの現地で確認された変状位置は、干渉 SAR 解析によって抽出された変形集中箇所と空間的によく一致している。このことは、干渉 SAR 解析が地すべりブロック内部の局所的な応力集中や境界を詳細に可視化できており、本解析手法がブロック境界や局所的な活動度の特定に有効であると言える。

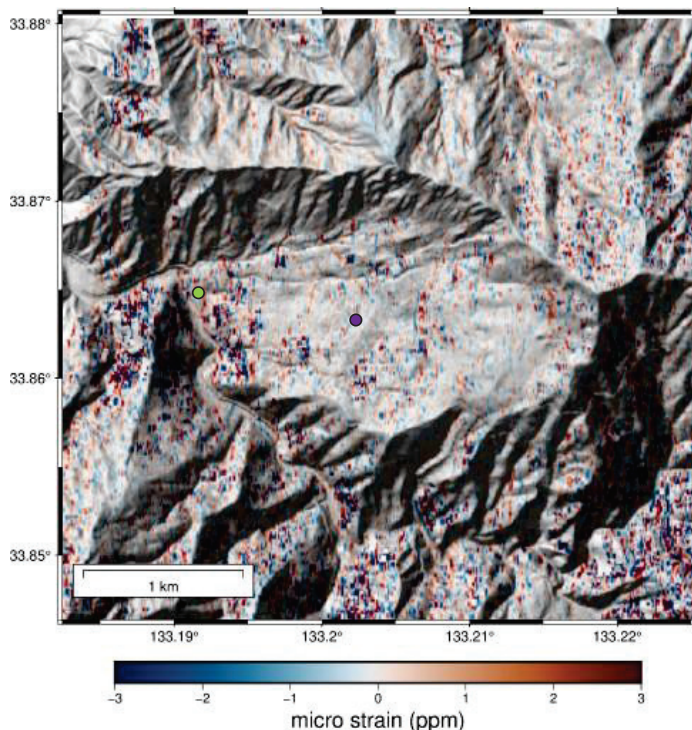


図5 準東西成分における東西方向の変位勾配。値が0から離れる(赤青が濃くなる)ほど変形が集中していることを示す。



図6 変形集中箇所。ブロック上端における道路の起伏(左、図5の黄緑の地点)と下端部の水路の亀裂(右、図5の紫の地点)。



5. まとめ

本研究では、ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた時系列干渉 SAR 解析を実施し、千町地すべりの詳細な挙動を明らかにした。本地域は全体として年間 10 mm を超える速度で西向きに変位しており、その傾向は GNSS 観測結果と整合的である。また、抽出された変形集中箇所は、現地調査で確認された道路や水路の変状位置と明瞭に対応しており、本手法の有効性が実証された。今後は変形・非変形箇所の詳細比較や地下すべり面のモデル化を進める予定である。

6. 謝辞

本研究で用いた PALSAR-2 データは PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と PIXEL との共同研究契約に基づき JAXA から提供されたものである。PALSAR-2 データの所有権は JAXA にある。また、本研究は公益財団法人前田工学記念財団の研究助成 (土木分野) および東京大学地震研究所共同利用 (2024-B-02) の援助をうけた。

7. 引用文献

- 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
- 濱岡浩・池田仁和・細沼紀康・中司龍明 (2005) 愛媛県の地すべり, 地すべり技術,32(1), 3-14.
- 国土交通省四国地方整備局 (2019) 平成 30 年 7 月豪雨土砂災害対応の記録 <https://www.skr.mlit.go.jp/sabo/magazine/7gatugouusaigaitaiou.pdf> (2025 年 12 月 10 日参照)
- 国土地理院 (2025) 地理院地図. <https://maps.gsi.go.jp> (2025 年 11 月 17 日参照)
- Morishita Y, Lazecky 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(3), 424. doi:10.3390/rs12030424
- 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. doi:10.1186/s40623-016-0563-5
- Usami S, Ishimaru S, Tadono T (2024) Advantages of High-Temporal L-Band SAR Observations for Estimating Active Landslide Dynamics: A Case Study of the Kounai Landslide in Sobetsu Town, Hokkaido, Japan. *Remote Sensing*, 16(15), 2687. doi:10.3390/rs16152687