

時系列干渉 SAR 解析による地盤変動モニタリング

日本工営株式会社 ○西口尚希, 藤原民章, 草谷恭行, 亀田尚志, 坂啓惟

1. はじめに

合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar, 以下, SAR) は、人工衛星等に搭載したアンテナから地表に照射したレーダーの反射波を捉えることで、地表の状態に関する情報を取得する技術である。SAR 解析手法の1つである時系列干渉 SAR 解析 (以下, 干渉 SAR 解析) は、複数の SAR データを統計的に処理することにより、過去の経年的な地表面変動を計測する技術である。

本発表では、徳島県三好市の地すべり地において計測された地盤伸縮計 (以下, 伸縮計) による観測値と、干渉 SAR 解析によって得られた変動量を突合することにより、干渉 SAR 解析の適用性を検証した。さらに、2022 年 12 月に土砂災害が発生した山形県鶴岡市の斎藤地区において、干渉 SAR 解析を実施し、被災前の斜面変動を計測した事例を報告する。

2. 対象地

2.1 徳島県三好市 (干渉 SAR 解析の適用性検証)

干渉 SAR 解析の適用性検証の対象地は徳島県三好市の吹地区と西浦地区である。

吹地区は吉野川水系井ノ内谷川右岸の西向き斜面である。地質は三波川帯に属しており、下位より塩基性片岩、泥質片岩が分布する。昭和 35 年に地すべり防止区域として指定されて以降、地下水排除工等の対策工施工が進められている¹⁾。

西浦地区は吉野川水系井ノ内谷川左岸側の東向き斜面である。地質は三波川帯に属しており、主に泥質片岩が分布している。昭和 36 年に地すべり防止区域として指定された後、昭和 47 年以降に地すべり対策工の施工が進められている²⁾。

2.2 山形県鶴岡市 (解析事例の報告)

山形県鶴岡市の斎藤地区は、鶴岡市西部の荒倉山 (標高 307m) 等からなる丘陵地の西側山麓付近に位置する。「20 万分の 1 地質図幅 (新庄及び西田)」によると、地質は新第三紀中新世前期-中期の酸性火砕岩、泥岩及び砂岩が分布している。なお、現地調査の結果、本地区は今回崩壊した箇所を含め、地山全体の風化が進んでいることが確認されている³⁾。



図1 斎藤地区全景写真⁴⁾に一部加筆

3. 方法

3.1 干渉 SAR 解析手法

干渉 SAR 解析は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 開発の解析ソフトウェア ANATIS を一部改良したものをを用いて、

PSInSAR 手法を基本としたアルゴリズムにより実施した。PSInSAR はノイズの影響が小さいピクセルを統計的に選定した上で、複数時期の SAR 画像を干渉処理することにより、経年的な変動量を計算する手法である。統計処理を行うため、衛星データ数が多いほど、精度が向上する特徴がある。一般的には少なくとも 20 時期以上の SAR 画像が必要とされる。また、PSInSAR は解析アルゴリズムの特性上、線形的な変動傾向の計測を得意としている。

3.2 干渉 SAR 解析の適用性検証

徳島県三好市の吹地区および西浦地区では半自動式の伸縮計による観測が行われており、経年的な変動データが蓄積されている¹⁾²⁾。両地区の伸縮計は地すべり頭部において、不動域と地すべり移動体の境界を跨ぐように設置されている。

干渉 SAR 解析によって得られる変動量は、衛星と地表面を一直線に結ぶ衛星視線方向の 1 次元変動量である。一方で、伸縮計で得られる変動量は、伸縮計の固定点と移動点を一直線に結ぶ方向 (インバー線と平行な方向) の 1 次元変動量である。計測値を比較するためには、変動方向を一致させる必要がある。したがって、干渉 SAR 解析によって得られた変動を、伸縮計の計測方向へ投影変換した上で、計測値を比較・検討した。

3.3 使用したデータ

本研究では、ALOS-2/PALSAR-2 によって取得された SAR データを用いた (表 1)。干渉 SAR 解析の適用性検証のためのグランドトゥルスデータは、伸縮計による観測データを用いた (表 2)。

表1 SAR 画像の諸元

| 軌道/撮影方向 | 観測期間 | 画像枚数 | 対象地区 |
|--------------|------------------------------|------|-----------|
| 南行軌道 西側撮影 | 2014/9/26 から 2022/9/2 まで | 26 枚 | 吹地区 (徳島) |
| 北行軌道 東側撮影 | 2014/10/4 から 2022/3/12 まで | 18 枚 | 西浦地区 (徳島) |
| 南行軌道 西側撮影 | 2014/10/9 から 2022/9/15 まで | 29 枚 | 斎藤地区 (山形) |

表2 伸縮計観測データの諸元

| 検証に使用したデータの取得期間 | 対象地区 |
|---------------------------|-----------|
| 2016/4/1 から 2021/11/30 まで | 吹地区 (徳島) |
| 2014/4/1 から 2021/10/31 まで | 西浦地区 (徳島) |

4. 結果

吹地区・西浦地区における伸縮計と干渉 SAR 解析の変動グラフを図 2 に示す。

吹地区において干渉 SAR と伸縮計の両方のデータが取得されているのは、2016/7/1 から 2021/9/3 の約 5 年間である。同期間の平均変動速度は、伸縮計は 16.2mm/年、干渉 SAR は 19.9mm/年であり、両者は概ね調和的であった。また、2018/3/23 から 2018/9/7 の間に伸縮計において 24.5mm の変動を記録している。同期間の干渉 SAR 解析では、28.8mm を計測しており、変動の加速化傾向も干渉 SAR 解析で捉えていることが確認された。

西浦地区において、干渉 SAR と伸縮計の両方のデータが取得されているのは、2014/10/4 から 2021/6/19 の約 7 年

間である。同期間の平均変動速度は、伸縮計は16.2mm/年、干渉SARは0.0mm/年であり、観測期間全体でみた場合の変動傾向は一致しなかった。特に、2018年7月から9月の期間において、伸縮計で約70mmの変動を記録したが、干渉SAR解析ではその傾向を捉えられていなかった。一方で、2019/3/16以降の変動傾向に着目した場合、伸縮計は8.2mm、干渉SAR解析は4.6mmであり、変動量は一致しないものの、変動傾向は調和的であった。

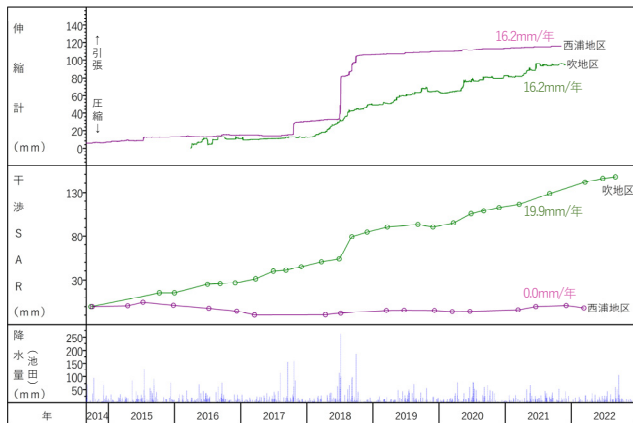


図2 変動グラフ (吹地区・西浦地区)

齋藤地区における干渉SAR解析結果を図3及び図4に示す。

崩壊が発生したAブロックの頭部付近(解析点①)においては、2018/4/5までは一定方向への変動の累積は認められなかったが、同日以降は沈下変動が僅かに累積している。末端部付近(解析点②)においては2018/4/5までは顕著な変動は認められなかったが、同日以降は隆起変動の累積が確認された。なお、解析点①②共に2022/4/28以降は沈下変動が加速している。

崩壊が発生していないBブロックのうち、Aブロックに隣接する範囲(解析点③)は2022/4/28までは顕著な変動は認められなかったが、同日以降は沈下変動が生じている。Bブロックの北西側(解析点④)は、2015年夏頃の一時的な隆起変動を除き、顕著な変動は認められなかった。

5. 考察

干渉SAR解析の適用性検証の結果、吹地区のように緩慢な変動が連続する場合には、干渉SAR解析によりその傾向を捉えられることが確認された。

一方で、西浦地区のように突発的な大変動が発生する場合には、その傾向を干渉SARで捉えられなかったことが確認された。この要因としては、1)西浦地区におけるデータ数は18時期であり、PSInSARで推奨されている20時期よりもやや不足していたこと、2)PSInSARによる計測感度が弱い非線形な大変動が発生したこと、3)位相アンラッピングエラーが発生したこと、等が考えられる。

齋藤地区の解析点②において、2018年以降に隆起変動の累積が認められた。2018年は日雨量164.5mm(8/16)、日積雪量56cm(12/8)を記録しており、降雨・降雪共に全解析期間の中で最大であったことを踏まえると、降雨等をきっかけに変動が生じた可能性が考えられる。また、解析点①②③において、2022年4月以降に沈下変動が確認(概ね1.6mm/月前後)されているが、同年8月3日には47.5mm/日の顕著な短時間強雨を記録している。降雨の約4か月前から変動が開始しているため、明確な関係があるとは言えないものの、変動は一部降雨の影響を受けた可能性がある。

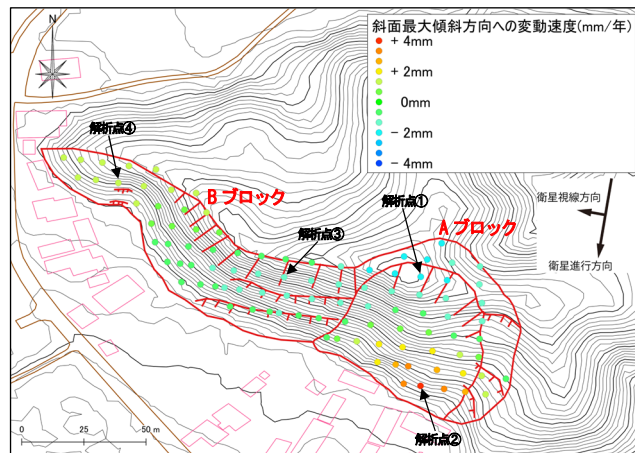


図3 干渉SAR解析結果(齋藤地区)

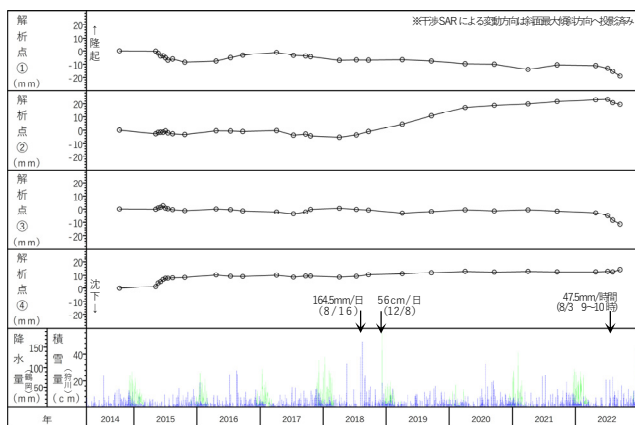


図4 変動グラフ(齋藤地区)

6. まとめと今後の展望

干渉SAR解析の適用性検証の結果から、突発的な大変動は捉えられない可能性があるが、連続する緩慢な変動への適用性があることが判明した。また、崩壊が発生した齋藤地区において干渉SAR解析を実施した結果、崩壊の8か月前から概ね1.6mm/月の沈下変動が発生していた可能性が確認された。本変動は国土交通省砂防部発行の「地すべり防止技術指針及び同解説」における伸縮計の変動種別では、変動C(潜在変動)に相当する。干渉SAR解析は崩壊の予兆を捉えるスクリーニングツールとして活用できる可能性があるため、今後も事例を蓄積し、実務への実装へ向け て尽力する所存である。

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、徳島県西部総合県民局からは伸縮計観測データをご提供いただいた。山形県庄内総合支庁からは齋藤地区における解析事例の学会発表をご快諾頂いた。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 徳島県西部総合県民局(2021): R2 三土吹地すべり三・井川吹地すべり調査業務報告書
- 2) 徳島県西部総合県民局(2021): R2 三土西浦地すべり三・井川西浦地すべり調査業務(2)報告書
- 3) 鶴岡市防災安全課(2023): 令和4年12月31日発生西目地内土砂災害鶴岡市災害対策本部第9回会議資料
- 4) 鶴岡市防災安全課(2023): 令和4年12月31日発生西目地内土砂災害鶴岡市災害対策本部第11回会議資料