

小型 SAR 衛星 StriX を用いた能登半島被災地における地表面変状の検出

石田 純平[※] 丹羽 廣海[※]
石丸 元気[※]

概 要

本研究では、令和6年奥能登豪雨により甚大な被害を受けた石川県輪島市町野町の町野川水系を対象に、民間企業が開発・運用する小型SAR衛星StriXのXバンドデータを用いた二時期後方散乱差分解析を実施した。豪雨前後のSARデータを解析し、平野部においては農地の利用変化や土石流による冠水に起因する反射強度の増減を確認した。さらに、斜面部では豪雨前後のUAVレーザー測量から作成した地形図を用いて抽出した234箇所の崩壊地のうち、代表的な4箇所に着目し、解析の有効性を詳細に検討した。特に、相対方位角・局所入射角といった地形量に加え、NDVI・VARIといった植生指標を活用し、SAR解析に適さない条件を抽出するスクリーニング手法の適用性を検証した。その結果、各指標による除外範囲の設定が解析の信頼性を高める上で有効であることが示され、小型SAR衛星による災害初動対応の高度化に資する知見を得た。

Detection of surface deformation in the Noto Peninsula disaster area using the small SAR satellite StriX

Abstract

This study investigated surface deformation in the Machino River basin of Machino Town, Wajima City, Ishikawa Prefecture, which sustained severe damage during the 2024 Noto Peninsula heavy rainfall event. A two-temporal backscatter difference analysis was conducted using X-band SAR data acquired by the small SAR satellite *StriX*, developed and operated by a private company.

In lowland areas, variations in backscatter intensity were detected, reflecting changes in land use, such as agricultural activity and inundation caused by debris flows. In mountainous regions, 234 slope failures were identified using pre- and post-event UAV-based LiDAR-derived terrain data. Four representative sites were examined in detail to verify the applicability of the analysis.

The study further assessed screening techniques that incorporated terrain parameters (relative azimuth and local incidence angle) and vegetation indices (NDVI and VARI) to exclude areas unsuitable for SAR-based analysis. The results demonstrated that applying such exclusion criteria improved the reliability of detection. These findings provide evidence that small SAR satellites can enhance the accuracy and efficiency of rapid damage assessment during the early stages of disaster response.

キーワード：小型SAR衛星、Xバンドレーダ、二時期後
方散乱差分、被災モニタリング

※ 土木本部防災技術部

§1. はじめに

近年、気候変動の影響による豪雨災害の激甚化・頻発化、首都直下地震や南海トラフ地震等の大規模地震の懸念から、災害発生直後における広域の被害状況の迅速な把握が、応急対策の立案や二次災害の抑制にとって極めて重要な課題となっている。特に山間部や交通が遮断された地域では、人的な立ち入りによる現地調査が困難であることから、リモートセンシング技術を用いた広域なモニタリングが有効と考えられる。

衛星搭載型の合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar：以下、SAR）は、可視光では困難な夜間や悪天候下でも観測可能であり、地表面の変化を広域にわたり把握できる観測手法として効果的な活用が目指されている¹⁾。また、近年では、民間企業による小型SAR衛星の開発が進められている。本研究で利用した小型SAR衛星StriXは、株式会社Synspectiveにより開発されたXバンドレーダ搭載のSAR衛星であり、将来的には30機体制のコンステレーションにより日次観測の実現を目指している²⁾。このような高頻度観測が可能な小型SAR衛星は、災害対応の初動段階において重要な情報を提供する手段となりうる。

筆者らは、2024年1月に発生した令和6年能登半島地震および同年9月の奥能登豪雨を対象とし、石川県輪島市町野町の町野川水系牛尾川流域において、小型SAR衛星StriXを用いた災害被害範囲の検出に関する実証的な取り組みを行った。とくに、後方散乱強度の二時期差分解析を中心に、斜面崩壊や土石流の発生状況の把握を試みるとともに、局所的な地形条件や植生の影響を考慮した解析適用性の検討も行っている。

本論文では、これらの取り組みを統合し、小型SAR衛星による災害対応への活用可能性を総合的に評価することを目的とする。加えて、後方散乱差分解析の有効性と限界、ならびに解析精度を向上させるためのスクリーニング手法についても考察を行い、今後の実運用への展望を示す。

§2. 解析対象地域および災害概要

本研究の対象地域は、石川県輪島市町野町を流れる町野川水系牛尾川流域である（図1）。本地域は急峻な地形を有し、山地から河川への土砂移動が生じやすい地形的条件にあることから、地震や豪雨による斜面災害リスクが高い。

2024年1月に発生した令和6年能登半島地震では、本流域を含む広域にわたり多数の斜面崩壊が発生し、一部では河道閉塞による土砂ダム（湛水池）が形成さ



図1 実証実験対象地域

れた。これを受けて、当社は国土交通省北陸地方整備局から日本建設業連合会経由で要請を受けてブロック堰堤等の緊急復旧工事を実施した。

その後、同年9月20日からの記録的な集中豪雨（令和6年奥能登豪雨）により、当該地域では再び多数の斜面崩壊や土石流が発生し、土砂ダムの消失や新たな冠水・堆積被害が生じた。

§3. 既往研究と本研究の検証アプローチ

SAR衛星データを用いた土砂災害の被害抽出に関しては、これまでに多くの研究が行われている。単時期の後方散乱強度画像を用いた事例としては、紀伊半島の台風災害において、河道閉塞箇所の抽出と照射角度の影響が報告されている³⁾。また、二時期の強度差分を用いた事例では、熊本地震およびその後の豪雨に対し、土地利用や植生状況に応じた視認性の違いが示されている⁴⁾。

SARはマイクロ波を地表に向けて斜め方向に照射する特性上、地形の影響を受けやすく、観測不能領域（レイオーバやシャドウ）が生じることが知られている⁵⁾。2017年の九州北部豪雨を対象とした研究では、後方散乱差分やコヒーレンス解析とともに、傾斜・方位・局所入射角などとの関係性が整理され、SAR判読におけるスクリーニング指標となる可能性が示唆されている⁶⁾。

しかし、これらの多くはLバンドSAR衛星の事例であり、XバンドSARを用いた二時期後方散乱差分解析の例は少ない。また、植生がSAR信号に与える影響の可視化や定量的検討も十分ではない。

そこで本研究では、令和6年奥能登豪雨を対象に、Xバンド搭載の小型SAR衛星StriXによる二時期後方散乱差分解析を行い、航空写真およびUAV測量による地形判読結果との比較を通じて、地形量（局所入射角・相対方位角）や植生指標（NDVI）を用いたスクリーニングの有効性について検証することとした。

§ 4. 使用データと解析・検証方法

4.1 使用データの概要

本研究で使用した主なデータを表1に一覧として示す。各データの使用目的は以下の通りである。

表1 使用データ一覧

データ	区分	データ取得日	取得方法
SAR画像	豪雨前	2024/5/14	小型SAR衛星StriX (Synspective社)
	豪雨後	2024/9/22	
オルソ画像	豪雨前	2024/4/26	航空写真 (国土地理院)
	豪雨後	2024/9/24	
数値地形 モデル (DTM)	地震前	—	航空レーザー測量
	豪雨前	2024/1/17	UAVレーザー測量 (牛尾川流域のみ)
	豪雨後	2024/9/28	
植生データ	豪雨前	2024/5/4	Sentinel-2 (B04, B08)

(1) SAR画像 (StriX衛星)

豪雨前後に取得された二時期のSAR画像を使用した。それぞれの後方散乱強度画像を作成し、二時期の後方散乱係数の変化を求めた。

(2) 航空写真 (国土地理院)

豪雨前後に撮影された航空オルソ画像を比較対象として使用し、SAR解析結果との整合性を検証した。

(3) 数値地形モデル (航空レーザー測量、UAVレーザー測量)

地震発生以前のDTM (Digital Terrain Model) を、SAR画像解析における画像への地理情報付与に用いた。また、豪雨前後のUAVレーザー測量による高精度DTMを用い、地形変化による斜面崩壊範囲の抽出および地形パラメータ (斜面方向、局所入射角など) の算出を行った。

(4) 植生データ (Sentinel-2)

欧州宇宙機関のSentinel-2衛星の10mマルチスペクト

ルバンド画像を使用し、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) およびSAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) を算出した。これにより、植生の有無や被覆状態を解析し、SAR解析に適さない範囲のスクリーニングを実施した。

4.2 SAR画像の解析手法

令和6年度奥能登豪雨による被害状況抽出のため、StriX衛星で取得された豪雨発生前後二時期のSAR画像からそれぞれの後方散乱強度画像を作成した。後方散乱強度画像の作成には、SARmap社のENVI SARscapeを用い、画像同士の位置合わせ (コレジストレーション)、スペckルノイズの除去を行い、航空レーザー測量によって作成されたDTMにより地理情報を付与 (ジオコーディング) し、ピクセルごとの後方散乱係数 (マイクロ波の反射強度) をdB単位で出力した。その後、後方散乱係数の変化をRGBカラー合成処理によって可視化するため、前時期画像に R (赤)、後時期画像に G (緑) と B (青) を割り当てて後方散乱差分画像を作成する。二時期において後方散乱係数の変化は表2に示す通りに表現され、これを基に地表面変状の目視判読を行った。図2に後方散乱差分画像と豪雨前後に撮影された航空写真の正射画像を示す。代表的な地表面の変状として、赤丸で囲われた箇所では水田の深水期 (表面は水) から収穫期 (表面は植生) に変化したことによる後方散乱係数の増大が見られる。また、

表2 後方散乱差分結果の色と後方散乱係数の変化

色	前後の後方散乱係数変化
白	前後の被覆変化なし (後方散乱係数高)
黒	前後の被覆変化なし (後方散乱係数低)
シアン	前後で後方散乱係数増大
赤	前後で後方散乱係数低下

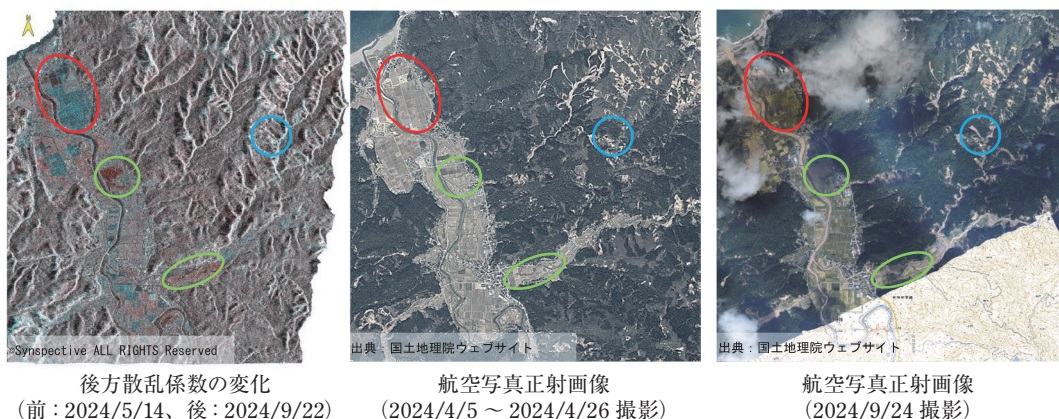


図2 後方散乱差分解析の結果と航空写真正射画像との比較

緑色の丸で囲まれた箇所はいずれも土石流によって流下した土砂が堆積した箇所であり、後時期SAR画像撮像時は降雨が継続している状況であったことから、地表面が平滑に近い状況になり後方散乱係数が低下していたものと推測される。水色の丸で囲まれた箇所では、新たな斜面崩壊が発生しており、植生の消失による後方散乱係数の低下が見られ、この崩壊地の下端部において土砂ダムにより形成されていた湛水湖が消失した箇所では、土砂が露出したことによる後方散乱係数の増大が確認された。これらの詳細は § 5. 解析結果とスクリーニングの検証に記述する。

4.3 地形・植生条件によるスクリーニング手法 (SAR 画像解析適用範囲評価)

§ 3. 既往研究と本研究の検証アプローチで前述した通り、SAR画像は観測原理に由来した特徴的なゆがみや地形の倒れこみによる不可視範囲が存在する。また、Xバンドは植生の透過性が低いため、繁茂した林地などでは変状の把握が困難となる。これらを踏まえ、以下のスクリーニングを実施した。

(1) 地形条件に基づくスクリーニング

既往の研究^{1) 4) 6)}では、レイオバやレーダーシャドウによる不可視範囲の抽出のため、相対方位角及び局所入射角を用いたスクリーニングが検証されている。相対方位角とは図3に示す通り、真北を0°とする地理学的な方位ではなく、衛星の軌道方向を考慮し、照射方向に対する斜面の向きを表す。局所入射角とは、図4に示す斜面の法線とマイクロ波の照射方向とのなす角度である。また、オフナディア角は衛星の鉛直直下とレーダ照射方向との間の角度であり、本研究で用いたStriXデータの諸元は表3に示す通りである。

本研究では、斜面の不可視範囲をスクリーニングするため、相対方位角および局所入射角を算出・図示し、解析結果の不確実性が高い範囲（除外範囲）を抽出することとした。除外範囲は既往研究に基づき、検出率が非常に小さくなるとされる、相対方位角 $180^{\circ} \pm 60^{\circ}$ 、局所入射角 $0 \sim 15^{\circ}$ 及び $75 \sim 90^{\circ}$ とした。

(2) 植生条件に基づくスクリーニング

本研究で使用した小型SAR衛星StriXの中心周波数は9.65GHz（Xバンド）であり、植生被覆の高い森林や農地ではレーダは地表に到達せず葉の表面で反射する。このため、Xバンド搭載SAR衛星のSAR画像を用いる場合、元々裸地であった範囲での崩壊より、植生の分布する範囲での崩壊の方が、植生消失箇所抽出による崩壊発生地の特特定が容易である可能性があると考えた。

そこで、崩壊により植生有から植生無となった箇所

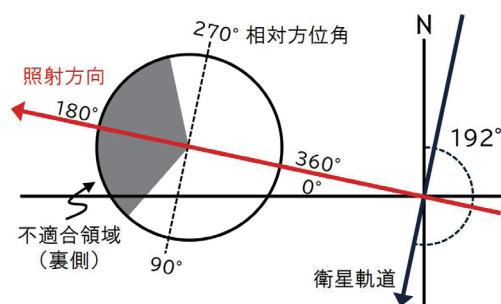


図3 相対方位角

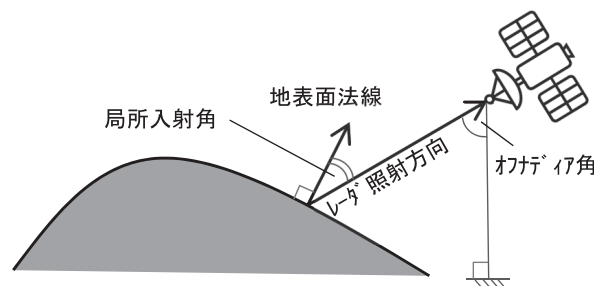


図4 局所入射角

表3 利用したSAR画像の諸元

観測日時	衛星名	観測モード	周波数	オフナディア角	軌道方向	照射方向
2024/5/14 23:49	StriX-1	Stripmap	Xバンド	38.1	南行軌道	右
2024/9/22 18:11	StriX-3			39.7		

を特定するため、Sentinel-2の10mマルチスペクトルバンドのうち赤（B04）および近赤外（B08）を用いてNDVI（正規化植生指数）を、航空写真のオルソ画像を用いてVARI（可視植生指数）を算出した。両者はオルソ画像による実際の植生状況との比較から、本研究では、NDVIは0.2以下、VARIは0.0以下を裸地とし、除外範囲として抽出した。以下にそれぞれの計算式を記載する。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \quad (\text{式1})$$

$$\text{VARI} = (\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue}) \quad (\text{式2})$$

これらのスクリーニングにより、二時期のSAR画像による後方散乱係数変化の結果が有効に機能する解析適用範囲を定義し、その妥当性を後述の章にて検証する。

§5. 解析結果とスクリーニングの検証

図2で示した後方散乱係数の変化は、二時期での変化が微小な（後方散乱係数の差分が小さい）範囲も抽出している。そこで、現地状況に即した閾値を設定し、前時期と後時期の後方散乱係数の差分が約2.67dB以上になった範囲を寒色（青）、約-1.76dB以下となった範囲を暖色（赤）とし、その結果と航空写真のオル

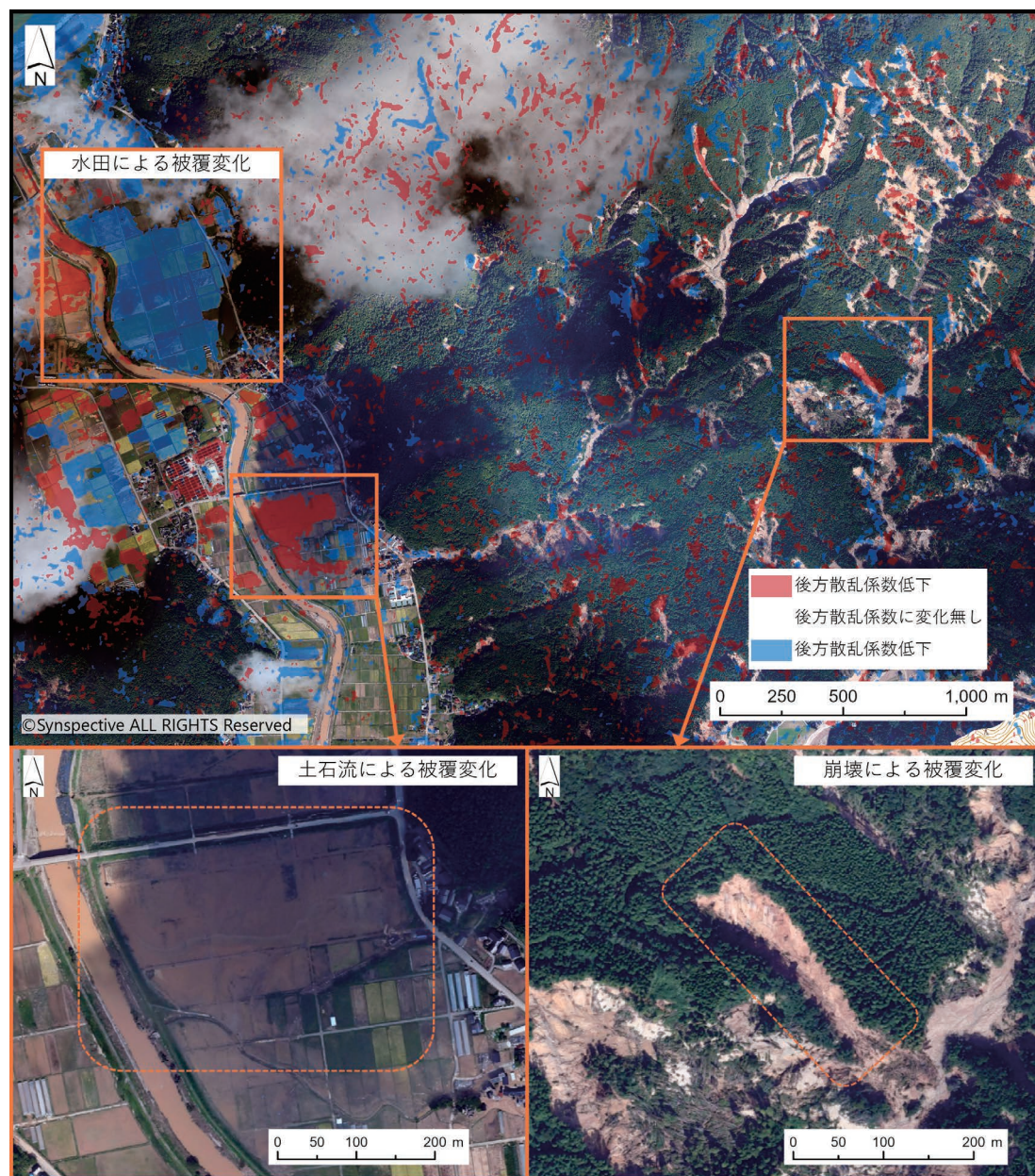


図5 二時期後方散乱差分の結果と航空写真の重ね合わせ

ソ画像を重ね合わせることで、地表面変状と差分解析結果の整合性を確認した。重ね合わせの結果を図5に示す。平野部の寒色領域は、豪雨前の湛水状態から収穫前の落水状態への変化を反映しており、後方散乱係数の増加に対応する。また、町野川と寺地川の合流点付近には、豪雨による冠水を示唆する広範囲の強度低下（暖色）が観測され、航空オルソ画像とも良好に整合していた。斜面部では、新たな斜面崩壊とみられる箇所において、広範な後方散乱係数の低下が認められた。これは、崩壊によって植生が失われ、地表面の粗さが変化したことで後方散乱係数が低下したものと解釈される。

斜面部におけるSAR解析の適用可能性を検証するた

め、豪雨前後に実施されたUAVレーザー測量により作成したDTM（Digital Terrain Model）を用いて、地形判読による崩壊地抽出を行った。その結果、36～16461㎡の大小さまざまな崩壊地234箇所を抽出した。本節では、その中から代表的な4箇所（崩壊①～④）を選定し、後方散乱差分解析の結果と、地形量（相対方位角・局所入射角）および植生指標（NDVI・VARI）との関係について詳細に検討を行った（図6）。

崩壊①は面積7928㎡の南向き斜面であり、豪雨前は密集した樹木により被覆されていたが、SAR解析によって崩壊範囲が明瞭に検出された事例である。注目すべきは、当該範囲内には相対方位角・局所入射角・NDVI・VARIのいずれの指標による除外範囲も分布し

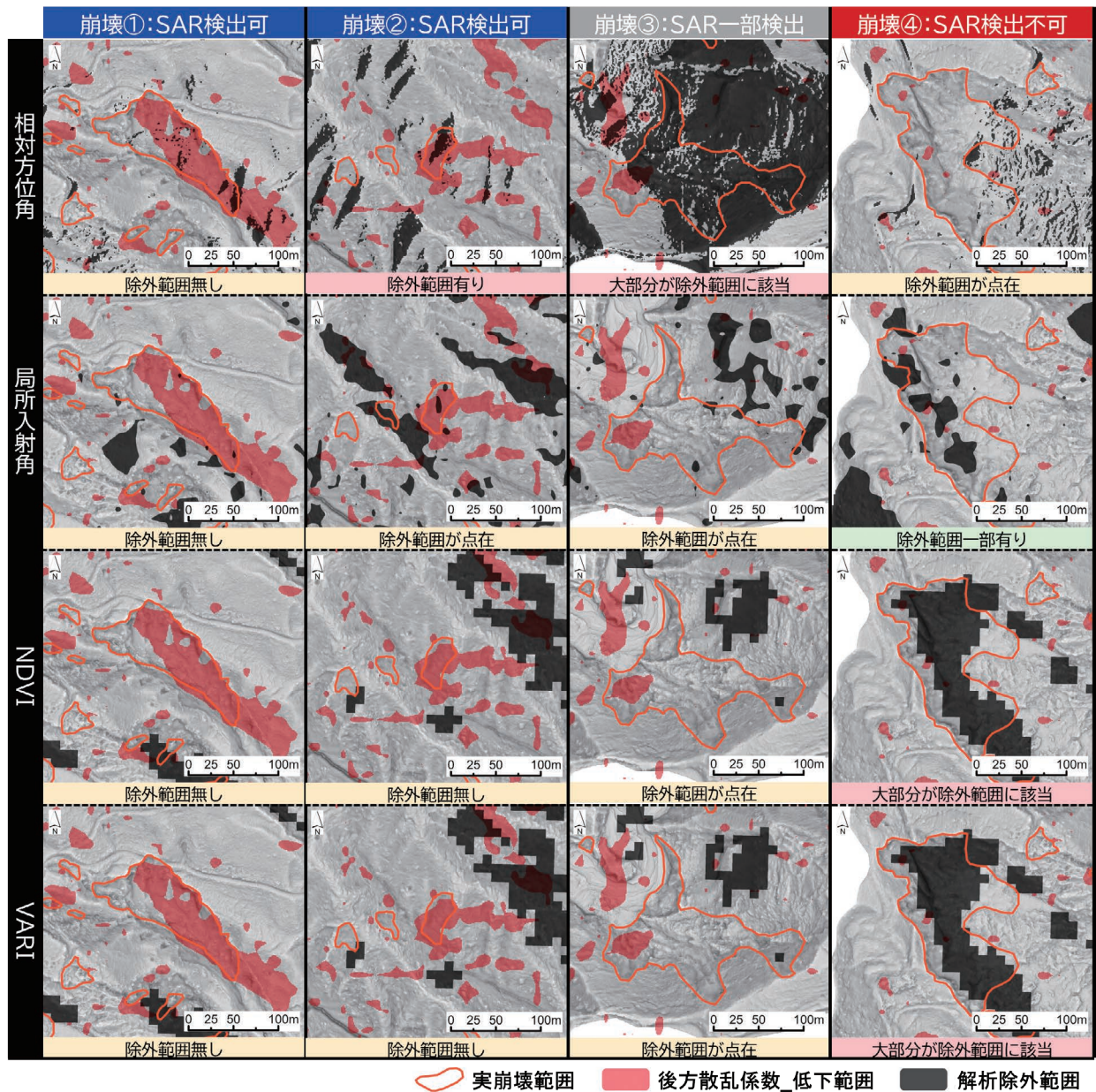


図6 SARによる後方散乱係数低下範囲と各スクリーニング指標の整理

ておらず、スクリーニング指標と検出結果が整合的である点である。

崩壊②は面積1254㎡の南南西向き斜面であり、崩壊①と同様に豪雨前は樹木により被覆されていたが、崩壊範囲内には相対方位角の除外範囲が部分的に分布していた点が崩壊①と異なる。特に、SARにより検出された崩壊範囲には、相対方位角の除外範囲も含まれており、相対方位角のみで除外範囲を決定すると、実際の崩壊位置を見落とす可能性があることが示唆された。

崩壊③は面積13860㎡の西北西向き斜面であり、豪雨前には広範囲が樹木により被覆されており、一部には倒木も認められた。SAR解析では崩壊範囲の一部の

みが検出され、その検出された範囲は地形によるスクリーニングの除外範囲外に該当する部分であった。なお、NDVI・VARIによるスクリーニングでは崩壊範囲は除外範囲となっておらず、地形による検出への影響が大きく表れた事例である。

崩壊④は面積16461㎡の東南東向き斜面であり、豪雨以前に能登半島地震による崩壊が発生し、地表面は裸地化していた。斜面方位や傾斜といった地形条件からは、SARによる観測が可能であると想定されるが、実際のSAR解析では後方散乱係数の低下が検出されなかった。検証の結果、相対方位角および局所入射角の除外範囲は崩壊範囲の一部にしか分布しておらず、むしろNDVIおよびVARIによる植生指標の除外範囲が崩

壊範囲の大部分を占めていたことから、植生条件が解析結果に大きく影響を与えた事例である。

図6に示すように、崩壊のSAR検出可否と各種スクリーニング指標の除外範囲の重なりを視覚的に比較することで、各指標の妥当性と解析精度への寄与が明らかとなった。崩壊①のようにすべての指標で除外範囲が存在しない場合には検出が可能であり、崩壊④のように地形指標の条件を満たしていても植生指標によって解析精度が低下する例が確認された。また、崩壊②のように相対方位角の除外範囲が一部に分布していたにもかかわらず、除外範囲外での検出が可能であったことから、除外範囲といえども解析可能な領域が一定程度存在することも示唆される。

このように、後方散乱差分解析において、単に強度差の有無を判読するだけではなく、地形量・植生状況に応じたスクリーニング指標の適用が、SAR解析の精度向上に寄与することが確認された。とくに植生条件については、今後さらなる検討が必要であり、スクリーニング指標の精緻化による判読精度向上が期待される。

§6. まとめ

本研究では、令和6年奥能登豪雨による土砂災害を対象に、小型SAR衛星StriXによるXバンドデータを用いた後方散乱差分解析を行い、被害範囲の抽出およびその精度向上に向けた検討を行った。

平野部においては、後方散乱係数の増大や低下が実際の地表変化（水田の利用や冠水）と対応しており、SAR解析の有効性が確認された。斜面部では、代表的な4箇所の崩壊斜面を対象に、相対方位角・局所入射角・NDVI・VARIの各種指標を用いたスクリーニングの有効性を検証した。

その結果、各指標の条件が良好な場合には崩壊が明瞭に検出される一方、指標によっては除外範囲内でも解析可能な事例が存在することが明らかとなり、指標の活用には柔軟な判断が必要であることが示された。また、植生の影響は特に顕著であり、解析精度に与える影響が大きいことが確認された。

今後は、スクリーニング指標の定量的な精度検証や新たな地形・植生指標の導入を進めるとともに、観測頻度の高い衛星コンステレーションの整備により、実運用への展開が期待される。

参 考 文 献

- 1) 鈴木大和ら：合成開口レーダ（SAR）画像による土砂災害判読の手引き、国土技術政策総合研究所資

料、No. 1110、2020

- 2) 和智明日香ら：小型SAR衛星Strixのコンステレーションと災害への取り組み、日本リモートセンシング学会誌、Vol. 44、No. 3、pp. 208～212、2024
- 3) 林真一郎ら：紀伊半島台風12号災害を事例とした人工衛星高分解能SAR画像の判読による河道閉塞箇所探索手法の確立、砂防学会誌、Vol. 66、No. 3、pp. 32～39、2013
- 4) 山下久美子ら：二時期SAR強度画像を用いた土砂移動箇所判読精度の検証－平成29年7月九州北部豪雨の事例－、砂防学会誌、Vol. 71、No. 6、pp. 21～27、2019
- 5) 松尾優：合成開口レーダ映像法における前方圧縮とレイオーバー現象の一検証、日本リモートセンシング学会誌、Vol. 13、No. 3、pp. 53～59、1993
- 6) 田淵太雅ら：PALSAR-2データを用いた斜面崩壊に伴う地形変化箇所の定量的抽出方法の検討とその特徴分析、土木学会論文集F3（土木情報学）、Vol. 77、No. 2、pp. II_68～II_77、2021

ひとこと

現場の安全確保と迅速な復旧に貢献するため、衛星データを一つの可能性と捉え、実用化に向けた技術として現場に活かせる形へ育てていきたいと考えています。



石田 純平