

資料

SAR 強度画像の比較による 令和6年能登半島地震に伴う海岸線の変化

道家涼介^{*1, a}・安江健一^{*2}

キーワード：令和6年能登半島地震, SAR 強度画像, 地殻変動, 海岸線変化

I. はじめに

2024年1月1日に発生した能登半島地震(気象庁マグニチュード7.6)では、石川県北部能登半島の広域において、衛星測位システム(GNSS)や人工衛星搭載の合成開口レーダー(SAR)の観測により顕著な地殻変動が捉えられた(例えば、福島ほか, 2024; 国土地理院, 2024a, b)。また、能登半島北部の海岸においては、離水ベンチの出現、生物遺骸群集の高度計測から顕著な隆起が生じたことが明らかになっている(石山ほか, 2024a, b, c, d; 宍倉ほか, 2024)。これらの測地学的観測および海岸地形調査のいずれの結果においても、能登半島北西部の輪島市門前町の小崎周辺において、4mを超える隆起を示す地殻変動が明らかとなっている。また、令和6年能登半島地震変動地形調査グループ(2024a, b, c)は地震前後の空中写真および衛星画像の比較から、海岸線の位置の変化を報告している。沿岸海底における活断層の活動により、このような顕著な隆起および海岸線変化が生じるのは稀であり、これらの諸現象を記録することは、能登半島地震の震源域における地形発達を理解することに加えて、類似の海岸地形を有する地域における地震発生メカニズムおよびリスクを評価する上で重要である。

そこで本研究では、能登半島地震前後のSAR強度画像の比較に基づき海岸線の変化を抽出した。航空写真や光学衛星画像では、夜間の観測ができないことに加えて、雲の存在により地表面の観測が困難な場合がある。一方で、SAR観測は時間帯や天候に左右されずにデー

タを取得できるという利点がある。また、簡単な画像処理で前後の変化を表現できることから速報性にも優れている。加えて、広範囲が一度に観測されることから、地表における顕著な変化を概観できる点においても優れている。本研究で得られた令和6年能登半島地震に伴う海岸線の変化は概ね既報(令和6年能登半島地震変動地形調査グループ, 2024a, b, c)と同様であるが、SAR強度画像の活用は、上記の利点から、今後発生しうる災害対応の面でも有用であると考え、ここに資料として報告する。

なお、本研究と類似の解析は、国土地理院(2024c)により実施されており、同院のホームページ内で速報として報告されている。この報告では、本研究と同一のデータを用いているため、その結果に大きな違いが生じることは無いことは明確である。本資料では、筆者らによる処理の方法および結果の記載に加えて、本手法で必ずしも正確に海岸線の変化を捉えられない箇所・事例があることを、現地の状況との比較を通して明らかにしたので、その事も併せて報告する。

II. 使用したデータと処理方法

本研究では、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が運用する陸域観測技術衛星「だいち2号(ALOS-2)」に搭載されているSARセンサー(PALSAR-2)が取得したデータを使用した。地震後の緊急観測で得られたデータと、同一観測条件による直近の観測データのうち、表1に示した2ペアを使用した。データは、JAXAが提供するプロダクトのうちレベル2.1(GeoTIFF形式の後方

2024年3月1日受付。2024年3月8日受理。J-STAGE 早期公開(2024年5月7日)

*1 弘前大学大学院理工学研究科 〒036-8561 弘前市文京町3番地。

*2 富山大学大学院理工学研究科 〒930-8555 富山市五福3190。

*a Corresponding author: r_doke@hirosaki-u.ac.jp

散乱強度画像)を取得し使用した. 同プロダクトの空間解像度は2.5 mとなっている.

画像の処理については, GISソフトにより, ノイズ低減のためBOXフィルタ(探査半径3ピクセル)を適用した後に, 地震前の画像を赤色に, 地震後の画像を緑色, 青色に割り当てRGB合成を行った. なお, 合成前のデータは後方散乱強度に基づく単バンドの画像である. 強度画像全体におけるピクセル値のうち, 積算カウント

数で2~98%までの範囲となる値を抽出し, それをRGBの各値の0~255に割り当てることで規格化を行った. 以上の処理の結果として取得されるRGB合成画像上では, 地震後に強度が上昇した箇所は青緑色に, 強度が低下した箇所は赤色に表示されることになる. 海域(水面)は衛星からの電波を反射するため, 後方散乱強度は極めて小さい. 一方で, 陸域は, 地表面のラフネス(粗さ)にも依存するが, 後方散乱が生じる. したがって, 地震

表1 本研究で用いたALOS-2/PALSAR-2データ

Path-Frame 番号	観測日 (日本時間)	観測時間 (日本時間)	衛星進行・ 観測方向	オフナデ ィア角	潮位* (1時間値)
121-0770	2022/9/26	23:10:49	北行軌道	28.7°	-6 cm
	2024/1/1	23:10:50	・左観測		-10 cm
26-2830	2023/6/6	12:37:45	南行軌道	35.1°	+6 cm
	2024/1/2	12:37:47	・左観測		-11 cm

*潮位は, 対象地域における津波や地殻変動による変化を考慮し, 舞鶴の潮位データを記載している.

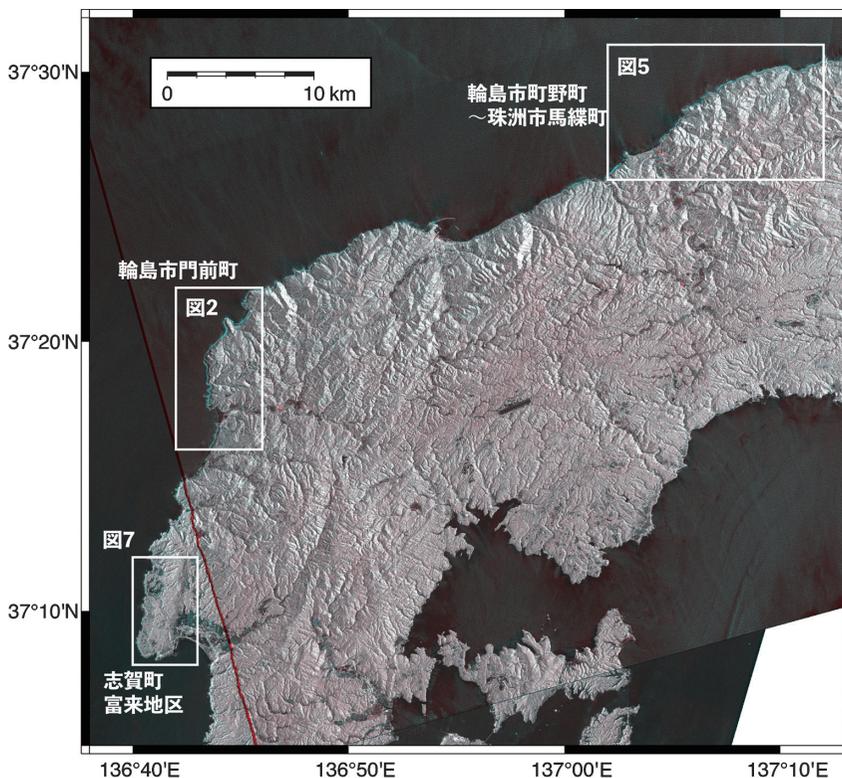


図1 能登半島主部における地震前後のSAR強度画像の差分解析結果と本研究の解析対象地域. 表1に示したデータを使用し, 本文に記載の手順で作成. 図中左手に斜めに入る赤線は, 画像データの境界部におけるノイズであり, 強度変化を示すものではない点に留意されたい.

前に海域だった箇所が隆起により陸化すると、後方散乱強度が上昇し、海岸線沿いで青緑色に表示されることになる。

なお、各観測日時における潮位(表1)については、衛星による取得データという性質上考慮されていない。しかしながら、令和6年能登半島地震による地殻の隆起量は、潮位変化のオーダー(数十cm)よりも有意に大きい。したがって、本解析結果で示す海岸線の位置の変化が顕著な箇所については、その影響は小さいものと考えられる。

III. 結果

RGB合成を行った結果のうち、海岸線の変化が顕著であった3地域について、広域の位置図(図1)に示すとともに、以下にその概要を示す。

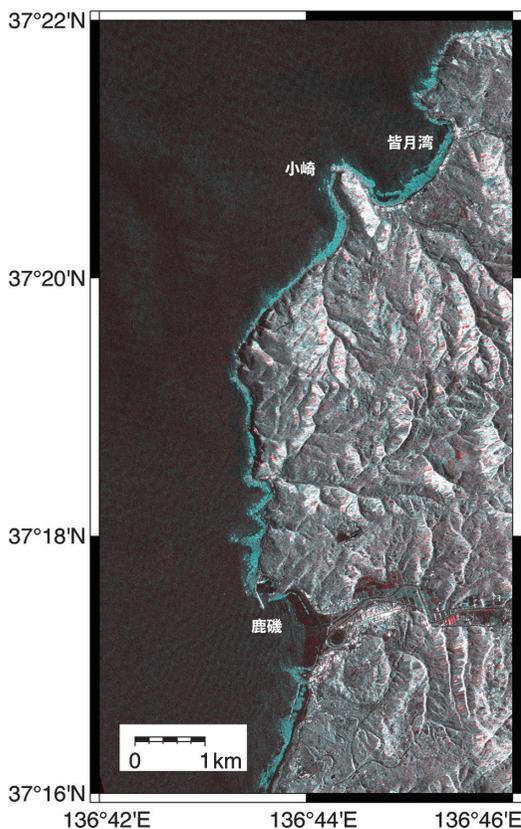


図2 輪島市門前町周辺における地震前後のSAR強度画像の差分解析結果
2022年9月26日と2024年1月1日における強度変化を示す。

1. 輪島市門前町周辺(図2)

本地域は、令和6年能登半島地震による隆起量が最も大きい地域であり、上述した測地学的観測および海岸地形の調査から、その最大隆起量は約4mと推定されている(例えば、国土地理院, 2024b)。当該地域では海岸線に沿って陸化した箇所が連続的に認められ、北部の皆月湾においては、最大で約200mの海岸線の後退が認められる(図2)。これらは、令和6年能登半島地震変動地形調査グループ(2024c)が検出した海岸線の隆起箇所と概ね一致し、現地における状況(図3)とも総合的で



図3 皆月湾周辺における現地の状況(2024年1月4日撮影)

本箇所では、顕著な海岸線の後退が認められた。全体として岩場からなる海岸が形成されているが、写真中程には砂浜が分布する。



図4 輪島市門前町鹿磯における現地の状況(2024年1月3日撮影)

地震前の海岸線位置は、写真右手のテトラポッド付近であった。手前の岩場には赤褐色の藻類が付着しており、地震による離水が確認されている。

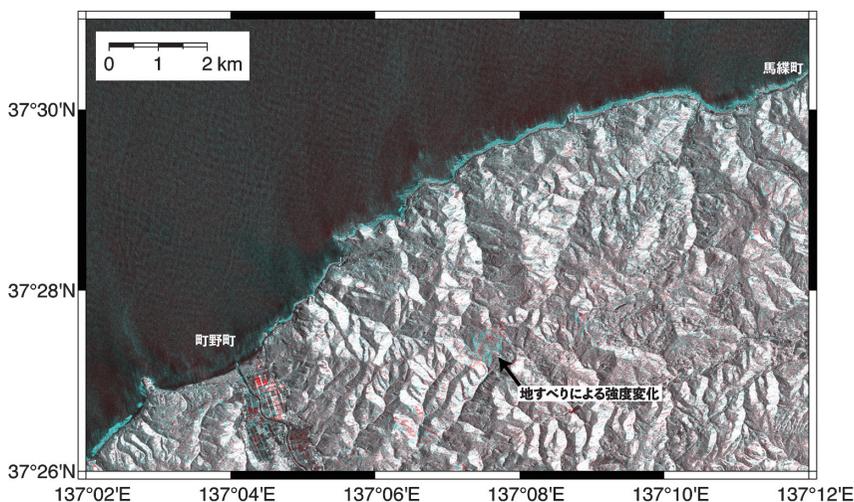


図5 輪島市町野町～珠洲市馬線町における地震前後の SAR 強度画像の差分析結果
2022年9月26日と2024年1月1日における強度変化を示す。



図6 輪島市町野町における現地の状況(2024年2月18日撮影)

本箇所においては、砂浜が拡大している様子が確認された。

ある。一方、皆月湾内の最南端部において離水域に囲まれた範囲内に黒色で図示された範囲が認められるが(図2)、現地状況に基づけば、これは砂浜が分布する範囲に対応する(図3)。

また、令和6年能登半島地震変動地形調査グループ(2024c)などの結果に基づけば、輪島市門前町鹿磯^{かいそ}周辺では海岸線の隆起が検出されているものの、本解析結果では、同箇所ですでに後方散乱強度の低下が認められる(図2)。これは同箇所が砂浜を形成しており(図4)、粒径の小さな砂からなる砂浜における後方散乱強度が著しく低い(例えば、Wu *et al.*, 2019)と考えられる。皆月湾の事例と合わせて考えると、岩石海岸における陸化範囲は後方散乱強度の増加により適切に捉えられるが、砂浜ではその変化を捉えることが難しいことを

意味していると言える。

2. 輪島市町野町～珠洲市馬線町(図5)

本地域は、能登半島地震による隆起量が大きい地域の一つであり、上述した測地学的観測および海岸地形の調査から、その隆起量は約2mと推定されている(例えば、国土地理院, 2024b)。当該地域においても、海岸線に沿って陸化した箇所が連続的に認められる(図5)。同地域における海岸線の後退距離は概ね50～70m程度と見積もられる。なお、図5の西部に位置する輪島市町野町周辺においては、令和6年能登半島地震変動地形調査グループ(2024c)が海岸線の隆起を検出しているものの、上述した輪島市門前町鹿磯と同様に砂浜が発達することから(図6)、後方散乱強度の上昇は認められておらず、本解析による隆起の検出が困難な地域であると考えられる。

また、本地域の内陸部には、地すべりによると思われる著しい強度変化が認められる(図5)。

3. 志賀町富来地区周辺(図7)

本地域における隆起量は上述した他地域に比べると一桁小さく、20～30cm程度と見積もられているものの(石山ほか, 2024c)、本地域においても海岸線の後退を示す後方散乱強度の上昇が認められる(図7)。一部の砂浜が顕著に広がっている地域や、水深が相対的に深いと考えられる港周辺では、連続性が追えなくなるものの、図7に示した範囲で概ね連続的に陸化範囲が認められる。

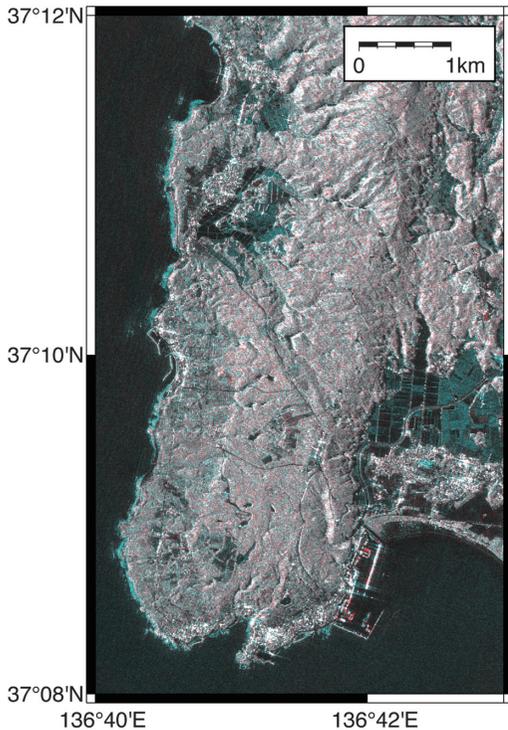


図7 志賀町富来地区周辺における地震前後のSAR強度画像の差分解析結果
2023年6月6日と2024年1月2日における強度変化を示す。

IV. まとめ

本資料では、令和6年能登半島地震に伴う海岸線の変化を、地震前後のSAR強度画像の比較により検出した。抽出された陸化範囲は、他の観測・調査から得られている隆起域と概ね整合する。一方で、砂浜が発達する地域では、周囲に比べて著しく後方散乱強度が小さいため、海岸線の変化を抽出することが難しいことも明らかとなった。本手法により海岸線の変化が抽出されたのは、能登半島において岩石海岸による地形が広域に発達していることが理由として挙げられる。

謝辞 本原稿は、2名の査読者のコメントにより改善されました。また、本研究では、JAXAが運用するALOS-2/PALSAR-2が取得したデータを使用しました。ここに記して感謝申し上げます。なお、原初データ

の所有権はJAXAにあります。

引用文献

- 福島 洋・石村大輔・高橋直也 (2024) 令和6年能登半島地震 (M7.6) のSAR画像解析による地盤変動の特徴. https://yofuku.github.io/files/column_20240109_2024Noto.html, 2024年2月19日参照。
- 石山達也・松多信尚・立石 良・安江健一 (2024a) 令和6年能登半島地震 (M7.6) で生じた海岸隆起【速報】. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/20465/>, 2024年2月19日参照。
- 石山達也・廣内大助・松多信尚・立石 良・安江健一 (2024b) 令和6年能登半島地震 (M7.6) で生じた海岸隆起【速報その2】. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/20465/>, 2024年2月19日参照。
- 石山達也・廣内大助・松多信尚・立石 良・安江健一 (2024c) 令和6年能登半島地震 (M7.6) で生じた海岸隆起【速報その3】. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/20465/>, 2024年2月19日参照。
- 石山達也・立石 良・安江健一 (2024d) 令和6年能登半島地震 (M7.6) で生じた海岸隆起【速報その4】. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/20465/>, 2024年2月19日参照。
- 国土地理院 (2024a) 令和6年能登半島地震に伴う地殻変動 (第5報). https://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_20240101noto_5.html, 2024年2月19日参照。
- 国土地理院 (2024b) 「だいち2号」観測データの解析による令和6年能登半島地震に伴う地殻変動 (2024年1月19日更新). https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_insar.html, 2024年2月19日参照。
- 国土地理院 (2024c) 「だいち2号」観測データの解析による令和6年能登半島地震に伴う海岸線の変化 (2024年1月11日更新). https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_pwr.html, 2024年2月19日参照。
- 令和6年能登半島地震変動地形調査グループ (2024a) 令和6年能登半島地震による海岸地形変化の検討結果 (第一報). http://disaster.ajg.or.jp/files/202401_Noto002.pdf, 2024年2月19日参照。
- 令和6年能登半島地震変動地形調査グループ (2024b) 令和6年能登半島地震による海岸地形変化の検討結果 (第二報). http://disaster.ajg.or.jp/files/202401_Noto004-2.pdf, 2024年2月19日参照。
- 令和6年能登半島地震変動地形調査グループ (2024c) 令和6年能登半島地震による海岸地形変化の検討結果 (第三報). http://disaster.ajg.or.jp/files/202401_Noto008.pdf, 2024年2月19日参照。
- 穴倉正展・行谷佑一・越後智雄 (2024) 第四報 2024年能登半島地震の緊急調査報告 (海岸の隆起調査). <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/noto2024/noto2024-04.html>, 2024年2月19日参照。
- Wu, L., Tajima, Y., Yamanaka, Y., Shimozono, T. and Sato, S. (2019) Study on characteristics of SAR imagery around the coast for shoreline detection. *Coastal Engineering Journal*, 61, 152-170.

(著者の貢献)

道家涼介: SAR強度画像の解析, 考察, 論文執筆を担当. 安江健一: 現地調査, 写真撮影, 考察を担当.

Coastline changes associated with the 2024 Noto Peninsula Earthquake based on comparison of SAR intensity images

Ryosuke Doke*^{1, a} and Ken-ichi Yasue*²

Keywords : 2024 Noto Peninsula Earthquake, SAR intensity images, crustal deformation, coastline changes

*1 Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 3 Bunkyochō, Hirosaki, 036-8561, Japan.

*2 Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama, 930-8555, Japan.

*a Corresponding author : r_doke@hirosaki-u.ac.jp