

だいち2号で捉えた令和6年能登半島地震に伴う地殻変動 Crustal Deformation of the 2024 Noto Peninsula Earthquake Detected by ALOS-2

測地部 石本正芳・服部晃久¹・三木原香乃²・小門研亮²
Geodetic Department ISHIMOTO Masayoshi, HATTORI Akihisa, MIKIHARA Kano
and KOKADO Kensuke
地理地殻活動研究センター 小林知勝
Geography and Crustal Dynamics Research Center
KOBAYASHI Tomokazu

要 旨

国土地理院は、令和6年能登半島地震の発生後、地震に伴う地殻変動を把握するため、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が運用する陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2) の緊急観測データを用いて解析を実施した。その結果、輪島市西部で約4mの隆起、珠洲市北部で約3mの西向きの変動など、地震に伴い大きな地殻変動が生じたことが明らかとなった。さらに、能登半島北部沿岸のほぼ全域で、陸地が海側に広がる陸化を検出した。

これらの結果は、その後に行われたGNSS測量や現地調査、空中写真等でも確認され妥当性が示されるとともに、地震活動の評価や被災地域の河川管理などに活用された。

1. はじめに

国土地理院は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) (以下「JAXA」という。) が運用する人工衛星「だいち2号」(ALOS-2) (以下「だいち2号」という。) の観測データを用いて、日本全国の定常的な地表の変動、地震や火山活動に伴う地殻変動の把握を行っている。

だいち2号には、合成開口レーダー (SAR) というセンサーが搭載されており、人工衛星から地表に向かって電波を照射し、地表で反射してきた電波を受信することで、地表の観測を行っている。電子基準点等のような地表に観測点が必要な観測手法に比べ、広域かつ面的に観測できる点が大きな特長である。

通常、SARの観測データから地表の変動を計測するためには、異なる2時期に観測されたデータから電波の位相差を精密に求める解析 (SAR干渉解析) を行う。このSAR干渉解析により、観測間に生じた地表の変動を数cm程度の精度で計測することが可能であることから、国土地理院では、国内外の地震や火山活動に伴う地殻変動の把握に活用してきた (上芝ほか, 2016; 本田ほか, 2019; Kobayashi et al., 2023)。

SAR干渉解析は、地表の変動を広域かつ面的に計測する有効な手法であるが、1回の観測では、衛星と地表を結ぶ方向 (衛星視線方向) の距離変化しかわからないため、東西、南北、上下方向のような3次元的な変動を捉えることができない。また、変位勾配が大きな変動、つまり狭い領域でメートル規模の大きな変動が生じた場合、原理的に変動を検出できないという制約もある。

このような干渉SARの欠点を補う解析方法として、東西、上下方向の変動を得る2.5次元解析 (図-1) (Fujiwara et al., 2000) や、局所的なメートル規模の変動を捉えるピクセルオフセット法 (図-2) (Tobita et al., 2001; 小林ほか, 2011) などが考案されてきた。これらの解析手法を活用することで、通常のSAR干渉解析のみでは把握が困難な地殻変動の把握を行っている (Kobayashi, 2014; 国土地理院, 2023; 石本ほか, 2024)。

また、SARは地殻変動の把握以外にも、海岸線の変化や津波等による浸水状況の把握にも活用されている。海岸線の変化を把握する手法の一つが、SAR強度画像を利用したRGB合成画像という解析手法である (図-3)。この手法により、2004年及び2005年のスマトラ島沖地震時の海岸線の変化などの検出に成功した (Tobita et al., 2006; Kobayashi, 2014)。

令和6年 (2024年) 1月1日に発生した令和6年能登半島地震 (以下「能登半島地震」という。) では、地震後にだいち2号の緊急観測が複数回行われたため、これらの緊急観測データと地震前の観測データを用いて解析を行った。通常のSAR干渉解析に加え、これまでに培ってきた2.5次元解析やピクセルオフセット法、RGB合成画像等を用いた解析を行った結果、最大約4mの隆起や、隆起に伴う能登半島北部沿岸の陸化が検出された。

本稿では、だいち2号の緊急観測データの解析により明らかになった能登半島地震に伴う地殻変動及び能登半島北部沿岸の陸化について報告する。

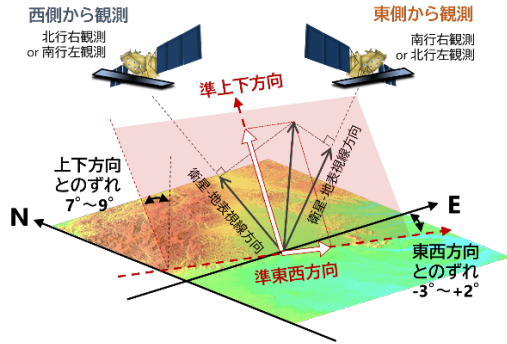


図-1 2.5次元解析の概念図。西側及び東側からの観測により得られた2つの視線方向の変動量から準東西・準上下方向の変動量を求める解析。“準”は、得られる変動の方向が東西・上下方向と完全には一致しないことを示す。

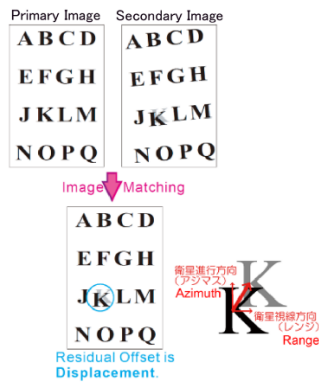


図-2 ピクセルオフセット法の概念図。地震前後の画像の位置合わせを精密に行い、位置合わせ後に残ったずれを変動として計測する手法。

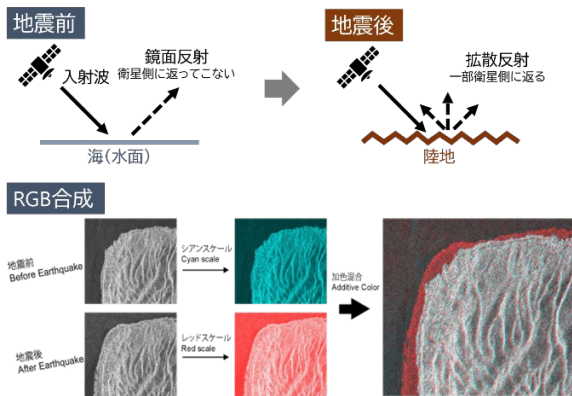


図-3 RGB合成画像による海岸線変化の抽出。地震前に水面だった領域が地震後に陸になるとRGB合成画像では赤色で表示される。

2. だいち2号による緊急観測

だいち2号は、地震等の災害発生時には、遅くとも72時間以内に緊急観測を実施することが可能である。衛星に搭載されたSARの観測間隔は、同じ軌道から観測する必要があるため、人工衛星の回帰日数となり、だいち2号の場合は14日である。つまり、ある地域を観測した直後に、その地域で地震が発生した場合、同じ軌道からの観測は14日後となる。しかし、だいち2号は、電波の照射方向を変えることにより、複数の軌道から同一地域を観測できるため、観測機会が多くなり、最長でも72時間以内での観測を実現している。緊急観測が可能なタイミングは、災害発生場所、発生日時に依存しており、数時間以内に観測できる場合もあれば、翌日、翌々日となる場合もある。

緊急観測は、防災関係機関がJAXAに対して行う要求に応じて実施される。緊急観測の要求があった場合、JAXAは観測の可否を検査し観測可能であれば観測が実施される。ただし、甚大な被害が発生した場合などには、JAXAが自主的に観測を実施する場合もある。

国土地理院は、JAXAが実施する防災利用実証実験の一つである、地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ(以下「地震SAR解析WG」という。)の事務局として、地震が発生した際には、地震SAR解析WGのメンバーの意見を取りまとめ、緊急観測の要求を行っている。緊急観測を要求する際には、観測日時だけでなく、どこを、どの観測モード(高分解能又は広域観測モード)で観測するのか検討を行う必要がある。地震時の地殻変動を把握するため最適と考えられる観測を、国土地理院内で議論した後、地震SAR解析WGメンバーに対して提案し、合意を得た上で緊急観測要求を行っている。

能登半島地震では、地震発生直後から緊急観測要求の検討を行い、1日23時10分頃の高分解能モードの緊急観測要求を行った。当初は、地震時の地殻変動の全体像を把握するため、広域観測モードを第一候補としていたが、地震SAR解析WGメンバーの意見も踏まえ、高分解能モードで要求することとした。

この1回の観測では能登半島全域の地殻変動を捉えられないことから、2日以降の観測要求の検討も行った。しかし、甚大な被害が想定されたことから、JAXAによる自主的な緊急観測が予定され、実施された。そのため、地震SAR解析WGからの緊急観測要求は1日の観測のみであったが、15日までに実施された計8回の緊急観測のデータは地震SAR解析WGに提供された(表-1)。

表-1 緊急観測一覧

観測日時	1回目観測日 (解析ペア)	衛星進行 方向	電波照射 方向	入射角 (中心)
2024年1月1日 23:10	2022年9月26日	北行	左	32.4°
2024年1月2日 12:37	2023年6月6日	南行	左	40.1°
2024年1月3日 23:51	2023年12月6日	北行	右	43.0°
2024年1月8日 23:58	2023年6月12日	北行	右	52.9°
2024年1月9日 11:49	2021年10月19日	南行	右	45.8°
2024年1月12日 23:44	2023年11月3日	北行	右	36.2°
2024年1月14日 11:56	2023年12月31日	南行	右	38.5°
2024年1月15日 23:10	2022年6月6日	北行	左	36.3°

※ 観測モードはいずれも高分解能モード (3 m)

3. だいち2号で捉えた地殻変動

3.1 緊急観測 (1日及び2日) による地殻変動

国土地理院では、だいち2号による緊急観測が実施された場合、速やかに解析を行い関係機関に解析結果を提供するとともに、HP上で公開を行っている。能登半島地震では、1日23時10分頃に実施された最初の緊急観測データを入手できた2日午前1時30分頃から解析を開始した。

図-4は、地震前の令和4年9月26日に取得された観測データと令和6年1月1日の緊急観測データを用いたSAR干渉解析結果である。この結果から、能登半島の北部で砂をまいたようなざらざらとした画像(非干渉)となっていることがわかる。SAR干渉解析は、前述のとおり、数cmの変動が検出できる一方で、変位勾配が大きな変動は非干渉となり、原理的に変動を検出することができない。このことから、能登半島北部では狭い領域でメートル規模の非常に大きな変動が生じたことにより、SAR干渉解析では変動を計測できないものと考えられた。

そこで、メートル規模の変動を検出可能なピクセルオフセット法による解析(以下「ピクセルオフセット解析」という。)を実施した。その結果、能登半島北部の変動も把握でき、特に輪島市西部では地震前に比べ、地表が衛星に約3m近づく変動が検出された(図-5)。さらに、2日12時頃に実施された2回目の緊急観測データについても、ピクセルオフセット解析を実施した結果、輪島市西部では1日の観測で検出された変動を上回る約4mの衛星に近づく変動が検出された(図-6)。

1日と2日の解析結果は、それぞれ東側上空からの観測と西側上空からの観測と異なる方向からの観測であった。そこで2.5次元解析を2日の解析結果が得られた直後に行った。図-7に2.5次元解析で得られた準上下方向及び準東西方向の変動分布を示す。この解析により、輪島市西部で約4mに及ぶ隆起が検出された。この結果は、2日に行われた地震調査研究推進本部地震調査委員会の臨時会に提出され、

地震活動評価に活用された(地震調査委員会, 2024)。

電子基準点等の他の観測機器が設置されていない地域において、地震翌日にこのような広範囲にわたる大きな変動を検出することは、衛星によるSAR観測でなければ困難なものであった。

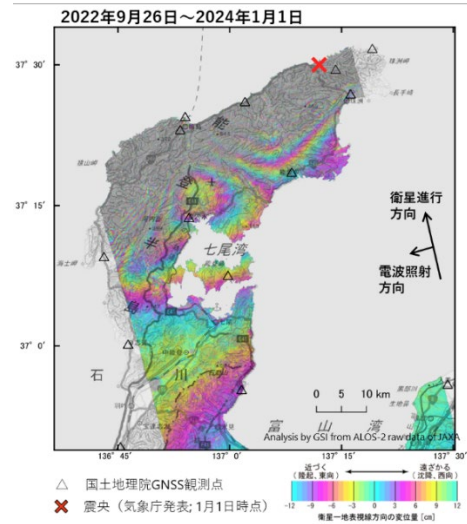


図-4 SAR干渉解析結果(令和4年9月26日~令和6年1月1日)(1月2日公表時点)。

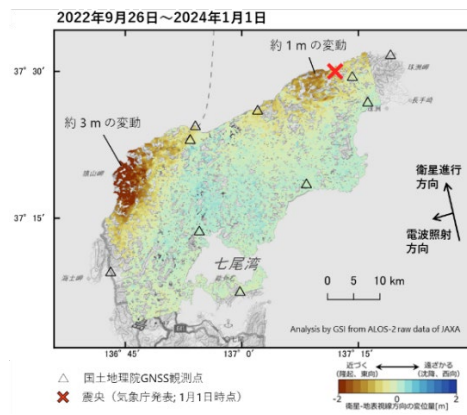


図-5 ピクセルオフセット解析結果(令和4年9月26日~令和6年1月1日)(1月2日公表時点)。

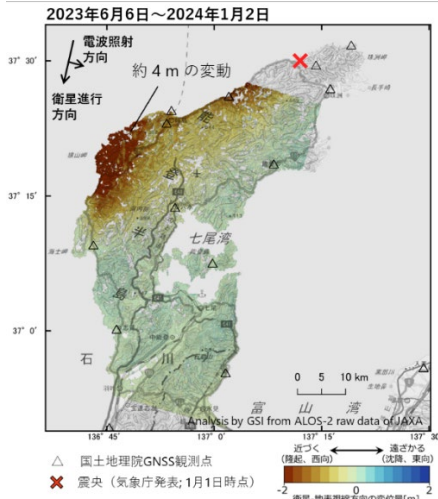


図-6 ピクセルオフセット解析結果（令和4年9月26日～令和6年1月2日）（1月2日公表時点）.

3.2 能登半島全域の地殻変動の把握

前項で述べたとおり、1日及び2日の緊急観測データの解析では、約4mに及ぶ隆起が検出されたものの、観測が能登半島全域をカバーしていなかったため、能登半島全域の地殻変動は把握できなかった。

そこで、1月15日までに実施された計8回の緊急観測についても、SAR干渉解析、ピクセルオフセット解析を実施した。このうち、ピクセルオフセット解析結果を図-8に示す。図-8の左列が西側上空から観測したもの、右列が東側上空から観測したものである。これらの結果から西側及び東側からの観測がそれぞれ能登半島全域をカバーしているため、2.5次元解析により能登半島全域の東西、上下方向の変動量を算出することが可能である。

2.5次元解析は、西側上空からの観測と東側上空からの観測の範囲が重複する地域で計算が可能である。しかしながら、同じ西側あるいは東側であっても、衛星視線方向が異なっているため、計算可能な全ての組み合わせで2.5次元解析を行っても、得られた東西、上下方向の変動量を重ねると、大きな不連続が生じる結果となる。そのため、重なり部分の不連続がなるべく小さくなるような組み合わせとして、西側からの観測は3日、12日、東側からの観測は1日、9日、15日を用いた。まず、西側、東側の解析結果からそれぞれ1枚の画像を作成し、得られた2枚の画像を用いて2.5次元解析を行った。この解析により得られた、能登半島全域における準上下方向、準東西方向の変動分布を図-9に示す。輪島市西部で最大約4mの隆起、最大約2mの西向きの変動が検出され、珠州市北部で最大約2mの隆起、最大約3mの西向きの変動が検出された。

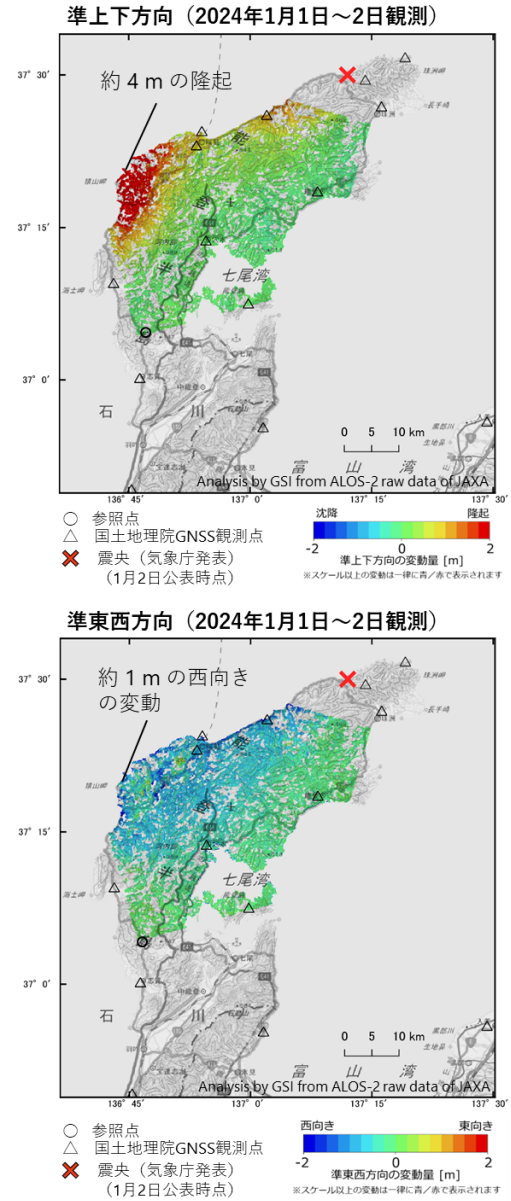


図-7 2.5次元解析結果（令和6年1月1日及び2日の観測データを使用して解析）（1月2日公表時点）.

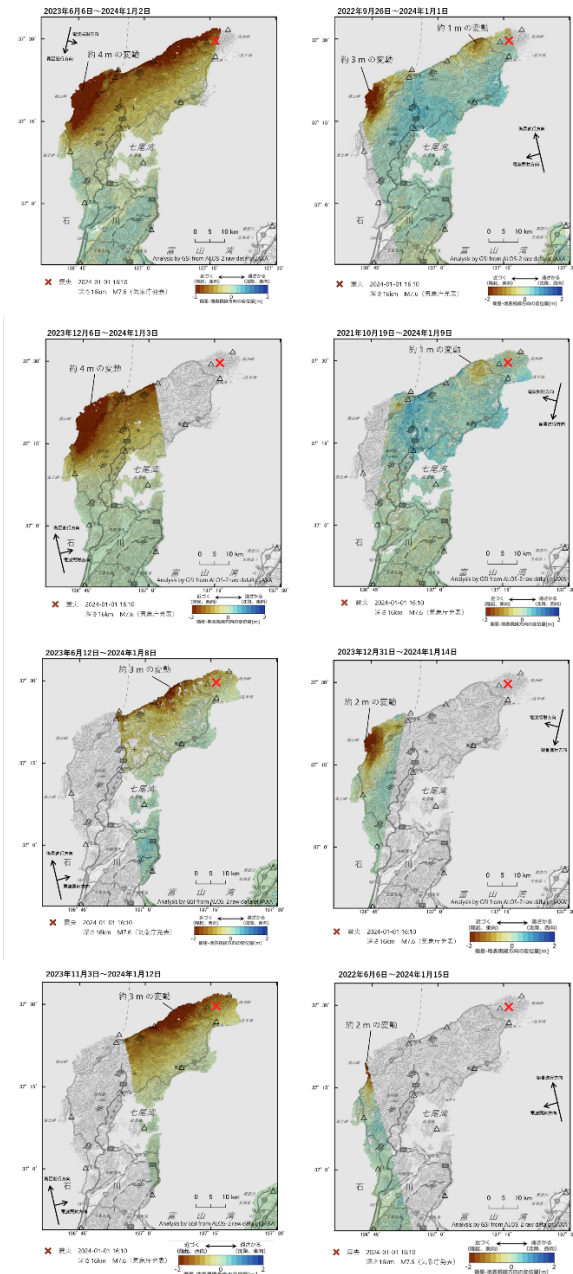


図-8 ピクセルオフセット解析結果。令和6年1月1日～15日までに観測された8観測について精密軌道暦を用いて解析。左列は西側上空からの観測、右列は東側上空からの観測。

表-2に、能登半島地震及び国内で過去に発生した主な地震で測地測量により観測された地殻変動の比較を示す(陸地測量部, 1930; 石原ほか, 1995; 災害教訓の継承に関する専門調査会, 2006; 水藤ほか, 2011; 大滝ほか, 2016)。能登半島地震に伴う地殻変動は、国内で発生した地震で測地測量により検出された地殻変動としては過去最大級であったことがわかる。

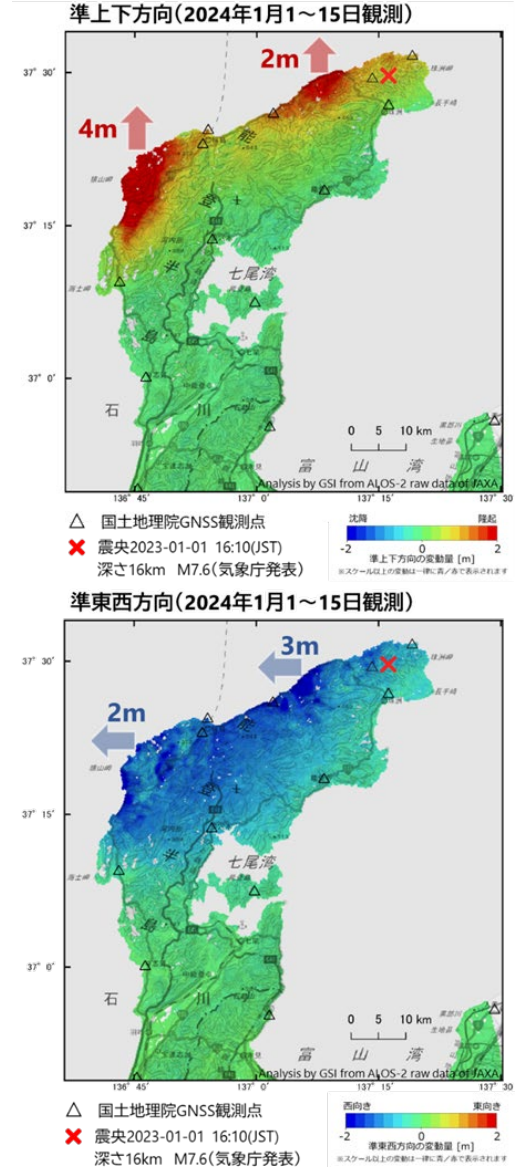


図-9 2.5次元解析結果による能登半島全域の地殻変動。上段、準上下方向、下段、準東西方向の変動量。

表-2 令和6年能登半島地震及び過去の主な地震に伴う測地測量により観測された地殻変動

地震 (発生年月日)	マグニ チュード	最大変動量	
		上下	水平
大正関東地震 1923年9月1日	M7.9	約2m 隆起	約3m
兵庫県南部地震 1995年1月17日	M7.3	約0.3m 沈降	約1m
東北地方太平洋沖 地震 2011年3月11日	M9.0	約1.2m 沈降	約5m
熊本地震 2016年4月16日	M7.3	約2m 沈降	約2m
能登半島地震 2024年1月1日	M7.6	約4m 隆起	約3m

3.3 GNSS 観測等との比較

前項までに述べたピクセルオフセット解析により得られた地殻変動量は、1月20日～21日に現地で実施したGNSS観測や電子基準点の観測によっても確認された。図-10は、現地で実施したGNSS観測及びGNSS連続観測点によって得られた地震前後の変動量とピクセルオフセット解析による変動量を比較したものである。ピクセルオフセット解析の計測精度は数十cm程度であるので、計測精度内で一致していることがわかる。

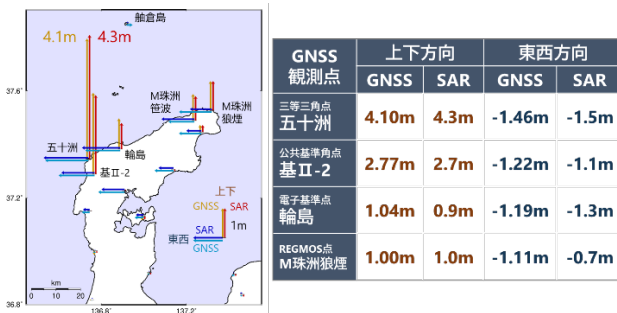


図-10 2.5次元解析結果（SAR）とGNSSの比較。左図は、右表の上下・東西方向の値を矢印で表示したもの。赤色及び黄色の矢印はそれぞれSARとGNSSの上下方向の変動量、青色及び水色の矢印はそれぞれSARとGNSSの東西方向の変動量。

4. だいち2号で捉えた沿岸部の陸化

能登半島で生じた最大約4mにも及ぶ隆起は、能登半島北部沿岸のほぼ全域で陸化をもたらした。この広域にわたる陸化もだいち2号の観測により明らかとなった。

だいち2号の観測により捉えられた隆起量が非常に大きなものであったため、この結果を裏付ける対象や方法を検討した。現地でのGNSSの観測や現地調査を即時に行うことができないことから、だいち2号の強度画像を用いたRGB合成画像により海岸線の変化の検出を試みた。

図-11は、RGB合成画像より赤色の領域を抽出し、その領域を水面から陸地に変化した陸化域として示したものである。この結果から、能登半島北部の海岸線がほぼ全てにおいて陸化したことがわかった。また、最も隆起の大きかった皆月湾周辺では、海岸線が約200m海側に移動したことが確認された。この陸化は、地震前後に撮影された空中写真でも確認された（図-12）。



図-11 RGB合成画像から判読した沿岸の陸化域。

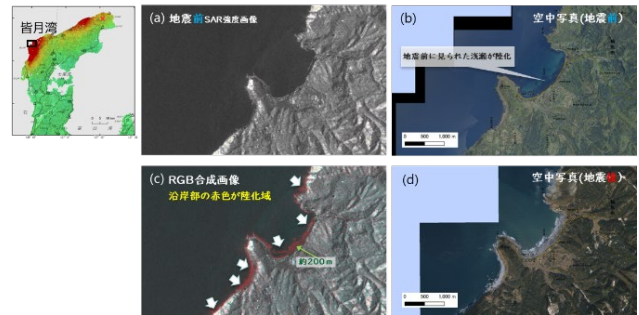


図-12 地震前の強度画像及びRGB合成画像の皆月湾周辺の拡大図。(a)地震前の強度画像、(b)地震前の空中写真、(c)RGB合成画像、(d)地震後の空中写真。

5. 解析結果の提供と活用

前項までに述べただいち2号による地殻変動や陸化の情報は、関係機関に提供され、地震活動の評価や被災地域の河川管理などにも活用された。

地震翌日の1月2日に行われた地震調査委員会の臨時会に、1日及び2日の緊急観測データを用いた、干渉解析結果、ピクセルオフセット解析結果及び2.5次元解析結果を報告した。地震活動の評価文に2.5次元解析結果が使用されるなど、地震活動評価に活用された（地震調査委員会、2024）。

また、国土交通省内に共有するため、解析結果が得られた際には、企画部防災推進室（現防災・地理空間情報企画センター）を通じて統合災害情報システム（DiMAPS）に随時掲載した。従来の地震時の対応では、主に解析結果を画像として提供していたが、今回の地震では、国土交通省の関係部署等の要請に基づき2.5次元解析結果の数値データの提供も行った。提供先は、水管理・国土保全局、港湾局、海上保安庁、国土技術政策総合研究所等である。このデータは、河川・河川構造物の変化の確認・検討、港湾における地盤の傾向把握等に活用された。

さらに、測量成果を改定する際に作成される座標及び標高の補正パラメータにおける活用可能性についても検討した（高木ほか、2024）。補正パラメータの検討には、これまで述べてきた解析結果とは別に、

緊急観測の8観測データのうち7観測データを用いて3次元解析 (Morishita and Kobayashi, 2022) を行い、その結果得られた3次元変動場を用いた。現在は検討段階であり、3次元解析の精度等に課題があることから、補正パラメータの作成への活用には至っていない。しかし、SARの解析結果が活用できれば、補正パラメータ作成に要する期間が大幅に短縮されると期待されるため、今後も引き続き検討を行う必要がある。

6. まとめ

令和6年能登半島地震では、他の観測技術や現地調査では地震発生直後に把握することが困難であった能登半島全域の地殻変動や能登半島北部の沿岸部の陸化を明らかにした。これらの結果は、地震活動の評価や被災地域の河川管理などに活用された。

一方で、能登半島全域の地殻変動を得るのに、複数回の観測を要した他、測量成果を改定する際に作成される補正パラメータへの活用は実現していないなどの課題もあった。令和6年7月1日に打ち上げられただいち2号の後継機であるだいち4号(ALOS-4)では、観測幅がだいち2号の50 kmから200 kmに拡大する(図-13)。仮に、だいち4号の観測が能登半島地震において実施されていた場合、1日と2日の観測で能登半島全域をカバーでき、より迅速に能登半島全域の地殻変動が把握できた可能性がある。また、被災地全域を複数回様々な方向から観測可能となれば、高い精度で3次元解析結果が得られると

期待される。

今後は、だいち2号に加えだいち4号の観測データを活用することで、より迅速かつ高い精度で地殻変動を把握し、減災や復旧・復興に貢献するための取組を継続して行う予定である。



図-13 だいち2号とだいち4号の観測幅の比較(イメージ)。

謝辞

解析に使用しただいち2号のデータは、だいち2号に関する国土地理院とJAXAの間の協定及び地震SAR解析WGの活動に基づき提供されました。ここで使用しただいち2号の原初データの所有権は、JAXAにあります。数値気象モデルは「電子基準点等観測データ及び数値予報格子点データの交換に関する細部取り決め協議書」に基づき、気象庁から提供されました。

(公開日：令和6年12月27日)

参考文献

- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M. and Rosen, A, P. (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters* 27, 2049–2052. doi: 10.1029/1999GL011291
- 本田昌樹, 岩田昭雄, 山下達也, 林京之介, 桑原将旗, 酒井和紀, 宗包浩志, 住谷勝樹, 堤隆司, 加古孝範, 齋田宏明, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊 (2019) : 平成30年北海道胆振東部地震におけるSAR干渉解析及び基準点復旧測量, *国土地理院時報*, 132, 41–49. doi: 10.57499/JOURNAL_132_08
- 石原正男, 阿部義昭, 辻宏道, 畑中雄樹, 斎田諒, 吉村愛一郎, 鷲谷威 (1995) : 測地測量が捉えた兵庫県南部地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 83, 15–23.
- 石本正芳, 三木原香乃, 市村美沙, 古居晴菜, 服部晃久, 雨貝知美, 佐藤雄大, 小門研亮, 小林知勝 (2024) : 干渉SAR時系列解析による全国変動分布図の公開とその活用, *国土地理院時報*, 137, 13–20. doi: 10.57499/JOURNAL_137_03
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2024) : 令和6年能登半島地震に関する情報, https://www.jishin.go.jp/main/oshirase/20240101_noto.html (Accessed 17 Sep. 2024).
- 小林知勝, 飛田幹男, 村上亮 (2011) : 局所的大変位を伴う地殻変動計測のためのピクセルオフセット解析, *測地学会誌*, 第57巻, 第2号, 71–81. doi:10.11366/sokuchi.57.71
- Kobayashi, T. (2014): Remarkable ground uplift and reverse fault ruptures for the 2013 Bohol earthquake (Mw 7.1), Philippines, revealed by SAR pixel offset analysis, *Geosci. Lett.*, 1:7. doi:10.1186/2196-4092-1-7
- Kobayashi T., Munekane, H., Kuwahara, M. and Furui, H. (2023): Insights on the 2023 Kahramanmaraş Earthquake, Turkey, from InSAR: fault locations, rupture styles and induced deformation, *Geophysical Journal International*, 236

(2), 1068–1088. doi:10.1093/gji/ggad464

国土地理院 (2023) : 2023 年 2 月 6 日トルコ共和国の地震に伴う地殻変動,

https://www.gsi.go.jp/cais/topic20230206_Turkey.html (Accessed 17 Sep. 2024).

内閣府中央防災会議災害教訓の継承に関する専門調査会 (2006) : 1891 濃尾地震報告書.

日本陸軍参謀本部陸地測量部 (1930) : 大正十二年関東震災地垂直変動要図.

Morishita, Y. and Kobayashi, T. (2022): Three-dimensional deformation and its uncertainty derived by integrating multiple SAR data analysis methods, *Earth Planets Space*, 74, 16. doi: 10.1186/s40623-022-01571-z

大滝修, 井上武久, 植田勲, 山下達也, 山口和典, 白井宏樹, 鈴木啓, 三木原香乃 (2016) : 熊本地震に伴う基準点成果の改定, *国土地理院時報*, 128, 177–187. doi:10.57499/JOURNAL_128_29

水藤尚, 西村卓也, 小沢慎三郎, 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司 (2011) : GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル, *国土地理院時報*, 122, 29–37.

高木悠, 石本正芳, 小林知勝, 宗包浩志 (2024) : 衛星 SAR 解析結果を用いた座標・標高補正パラメータ作成の試み, *国土地理院時報*, 138, 75–81. doi: 10.57499/JOURNAL_138_11

Tobita, M., Murakami, M., Nakagawa, H., Yarai, H., Fujiwara, S. and Rosen, P. A. (2001): 3-D surface deformation of the 2000 Usu Eruption measured by matching of SAR images, *Geophys. Res. Lett.*, 28(22), 4291–4294.

doi: 10.1029/2001GL013329

Tobita, M., H. Suito, T. Imakiire, M. Kato, S. Fujiwara, and M. Murakami (2006): Outline of vertical displacement of the 2004 and 2005 Sumatra earthquakes revealed by satellite radar imagery, *Earth Planets Space*, 58, e1–e4.

doi:10.1186/BF03351906

上芝晴香, 三浦優司, 宮原伐折羅, 仲井博之, 本田昌樹, 攪上泰亮, 山下達也, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊 (2016) : だいち 2 号 SAR 干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出, *国土地理院時報*, 128, 139–146. doi: 10.57499/JOURNAL_128_25