

代表研究者 氏名（所属機関）：宗包浩志（国土地理院）

支援研究者 氏名（所属機関）：桑原將旗、小林知勝、矢来博司、藤原智、小門研亮、石本正芳、三木原香乃、田中もも、服部晃久、雨貝知美（国土地理院）

課題名称：地殻活動に伴う地殻変動とその時空間変化の詳細把握

今年度の成果概要：

緊急観測が行われた3地震（国内2、海外1）について解析を行った。これらの解析結果について報告する。

(1) 石川県能登半島地方の地震活動（最大地震 2023-05-05, Mj6.5）

2023年5月5日に能登半島地方で発生したMj6.5の地震について、ALOS-2（だいち2号）による緊急観測データを用いてSAR干渉解析と2.5次元解析を行った。解析においては気象庁数値予報格子点データを用いた対流圏遅延補正を実施した。解析結果を図1～4に示す。また解析に用いたデータの諸元を表1に示す。

図1のSAR干渉解析から珠洲市北部で最大約20cmの衛星に近づく変動が観測された。図2の拡大図からは珠洲市内の山地等で数cm程度の小規模な地すべり状の変位が多数見られた。また図3の別のSAR干渉解析結果からも珠洲市北部で最大約10cmの衛星に近づく変動が観測された。

これら2つのSAR干渉解析を利用し、2.5次元解析実施した結果を図4に示す。

図4からは珠洲市北部で最大20cmの隆起、最大約10cmの西向きの変動が観測された。

表1. 解析に使用したデータ

| 図番号   | 観測日                      | 観測時間 (JST) | 衛星進行方向 | 電波照射方向 | 観測モード     | 入射角 (中心) | 垂直基線長 |
|-------|--------------------------|------------|--------|--------|-----------|----------|-------|
| 1,2,4 | 2023-04-21<br>2023-05-05 | 23:45 頃    | 北行     | 右      | 高分解能 (3m) | 35.8°    | -74m  |
| 3,4   | 2023-04-09<br>2023-05-07 | 11:56 頃    | 南行     | 右      | 高分解能 (3m) | 36.5°    | -193m |

2023年4月21日～2023年5月5日

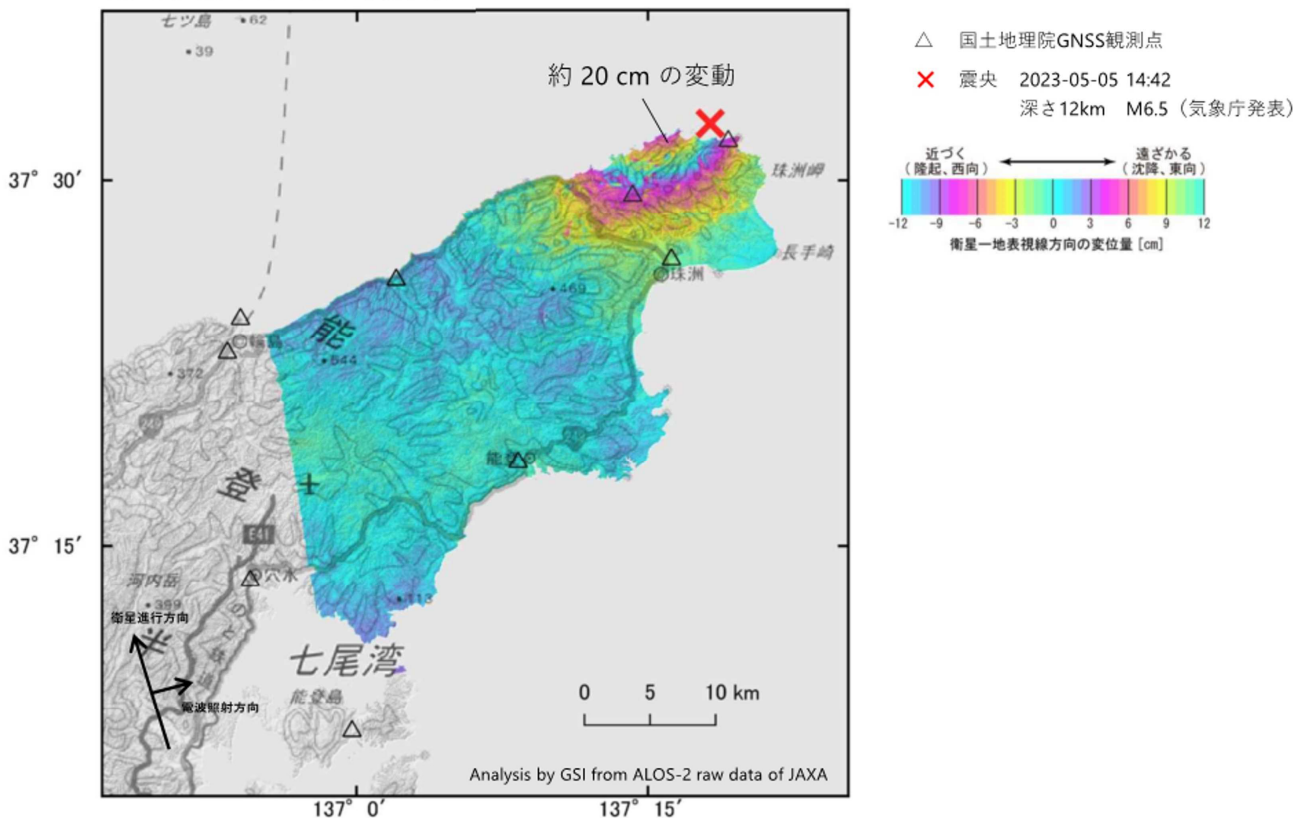


図 1. 能登半島地方の SAR 干渉解析結果(2023 年 4 月 21 日～2023 年 5 月 5 日)

2023年4月21日～2023年5月5日

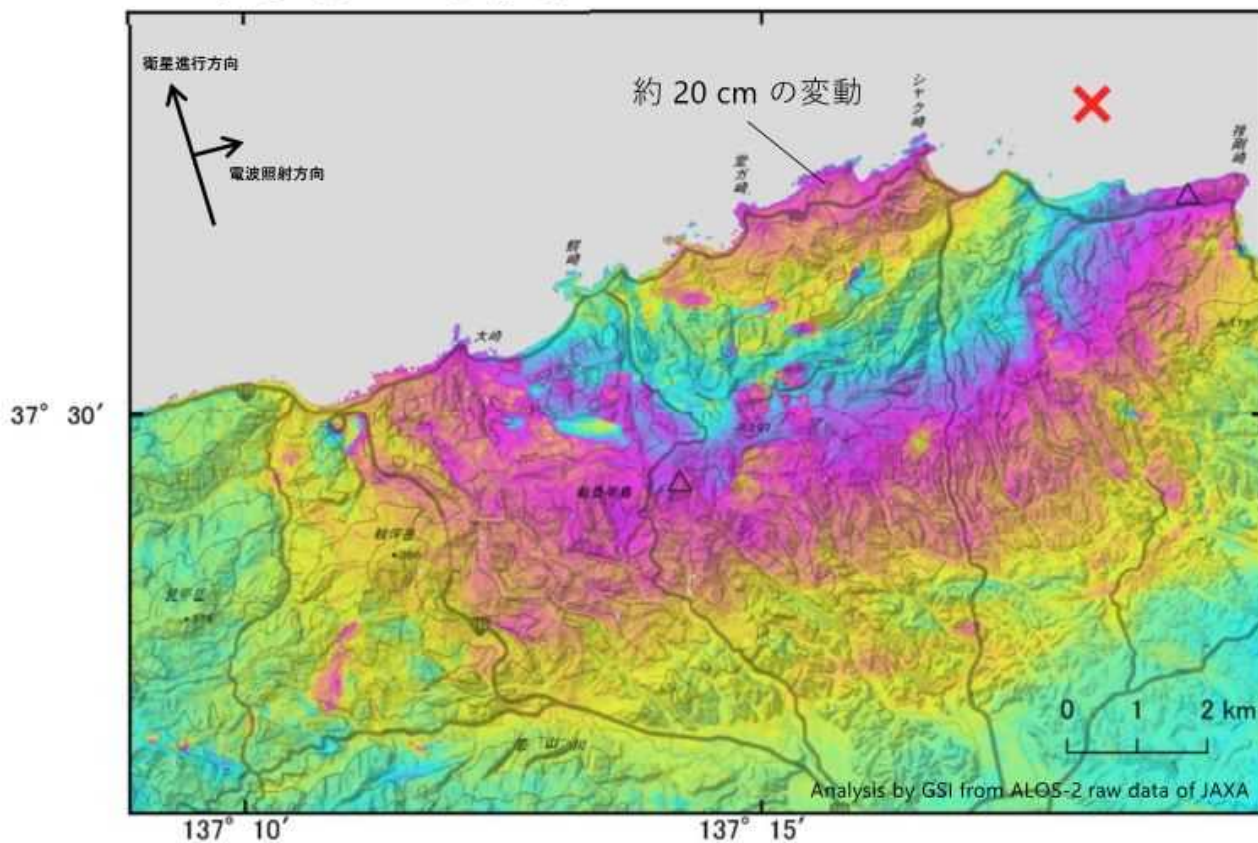


図 2. 拡大図:能登半島地方の SAR 干渉解析結果(2023 年 4 月 21 日～2023 年 5 月 5 日)

2023年4月9日～2023年5月7日

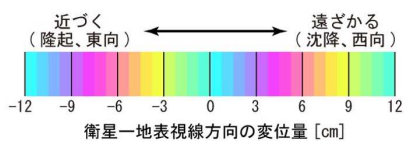
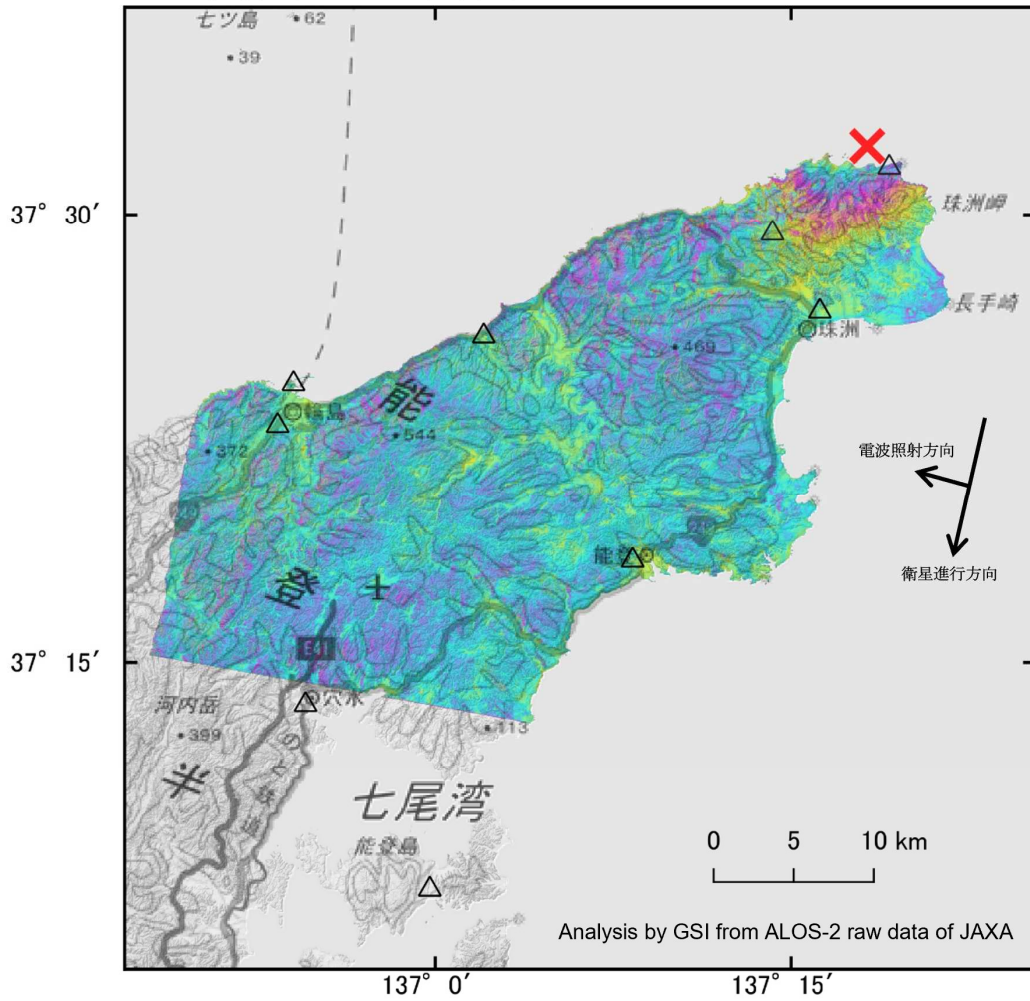
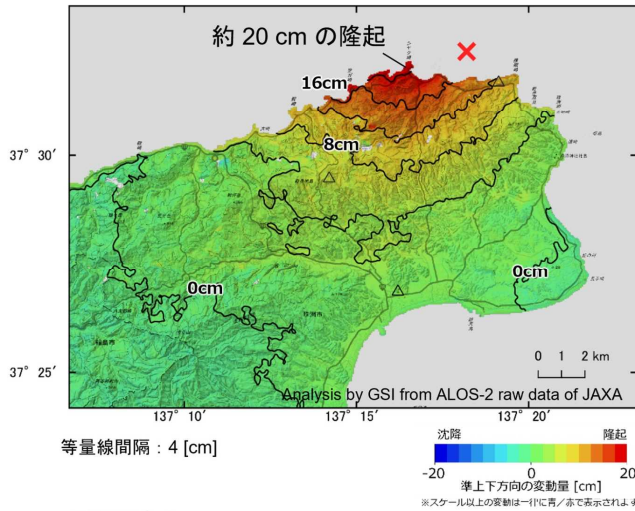


図3. 能登半島地方の SAR 干渉解析結果(2023 年 4 月 9 日～2023 年 5 月 7 日)

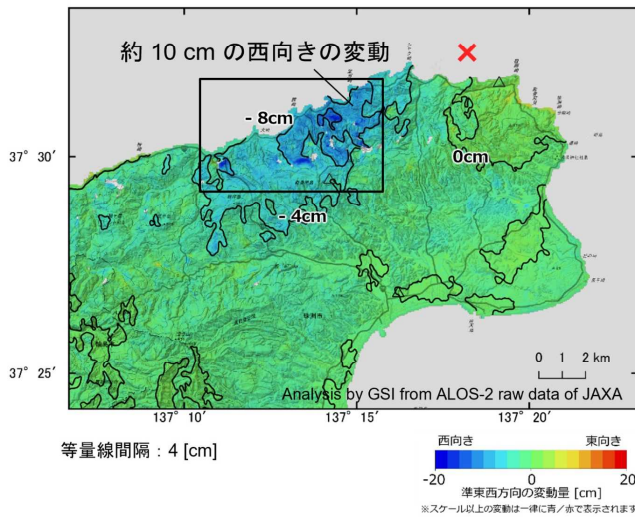
準上下方向



表示範囲



準東西方向



準東西方向 拡大図

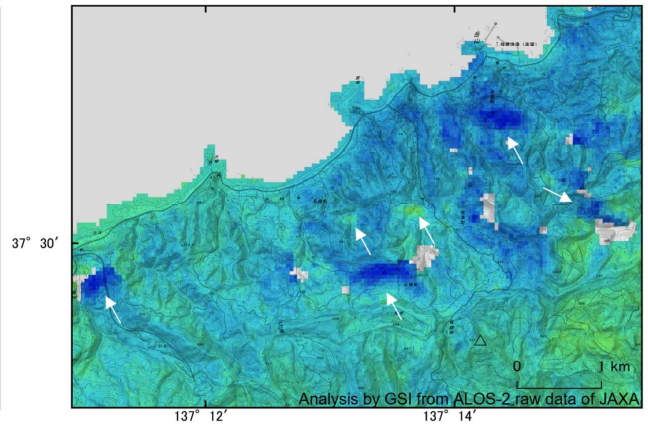


図 4. 能登半島地方の 2.5 次元解析結果

(2) モロッコ王国の地震 (2023-09-08, Mw6.8)

2023年9月8日(UTC)にモロッコ王国でMw6.8 (USGS)の地震が発生した。この地震について、ALOS-2 (だいち2号)による緊急観測データを用いて SAR 干渉解析を行った。解析においては Split Spectrum 法 (Gomba et al., 2016) による電離層誤差低減処理を行った。解析結果を図5に示す。また解析に用いたデータの諸元を表2に示す。図5の左上の図はアンラップ前の SAR 干渉解析結果を、右上の図はアンラップ後の結果を示す。

震央周辺に、最大 20cm 程度の衛星に近づく変動が観測された。また、地震波から推定されている、東北東-西南西走向の北傾斜の逆断層と整合的な変動であることがわかった。

表 2. 解析に使用したデータ

| 図番号 | 観測日                      | 観測時間 (UTC) | 衛星進行方向 | 電波照射方向 | 観測モード      | 入射角 (中心) | 垂直基線長 |
|-----|--------------------------|------------|--------|--------|------------|----------|-------|
| 5   | 2023-01-05<br>2023-09-14 | 00:34 頃    | 北行     | 右      | 高分解能 (10m) | 41.2°    | +64m  |

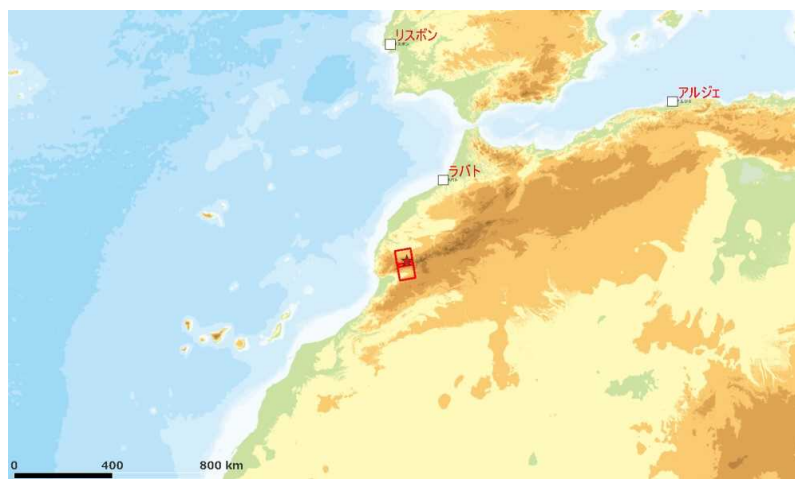
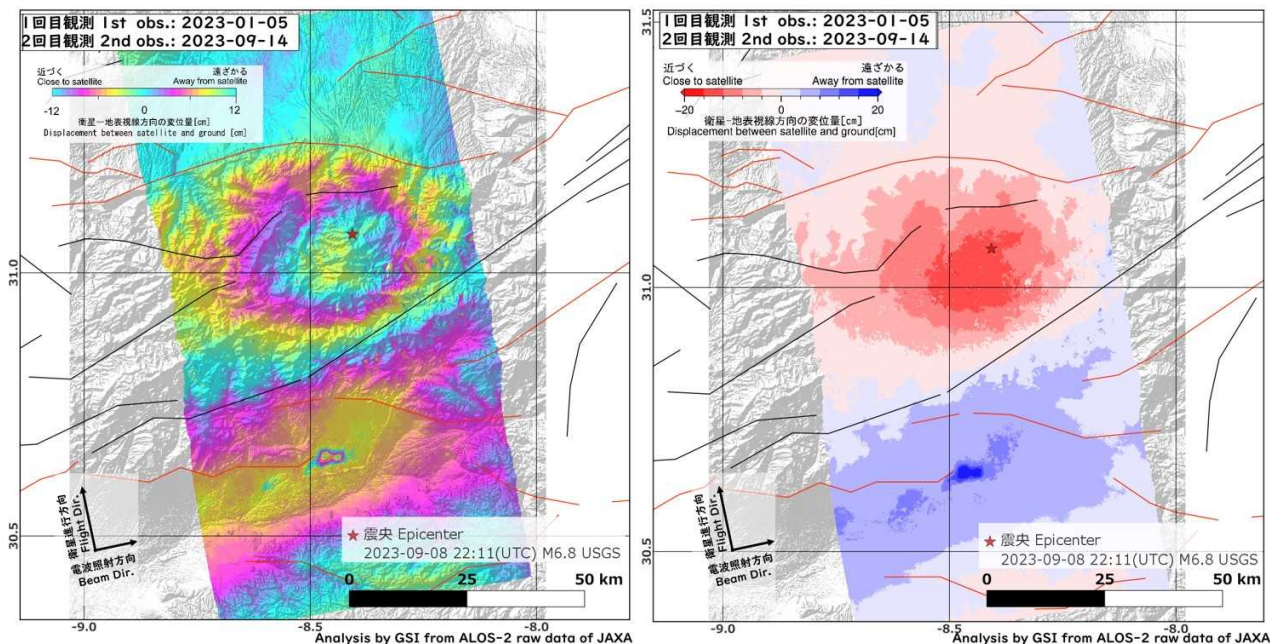


図 5. モロッコ王国の SAR 干渉解析結果(右上の図は左上の図のアンラップ後の図)と解析範囲

### (3) 令和 6 年能登半島地震 (最大地震 2024-01-01, Mj7.6)

2024 年 1 月 1 日 16 時 10 分頃に発生した Mj7.6 の令和 6 年能登半島地震について、ALOS-2 (だいち 2 号) による緊急観測データを用いて SAR 干渉解析、ピクセルオフセット法による解析、及び 2.5 次元解析を行った。解析においては気象庁数値予報格子点データを用いた対流圏遅延補正を実施した。解析結果を図 6~10 に示す。また解析に用いたデータの諸元を表 3 に示す。

SAR 干渉解析では変動が大きな場所で非干渉域となっており、変動量を推定することができなかった (図なし)。そのため、ピクセルオフセット法による解析 (図 6) を実施し、さらにその解析データを利用して 2.5 次元解析 (図 7) を実施した。また、地震前後の SAR 強度画像を用いて RGB 合成画像を作成し、地震後に生じた陸化した地域を抽出した (図 8,9,10)。

図 6 のピクセルオフセット法による解析によると西向き観測では、輪島市西部で最大約 3m (図 6-a)、珠洲市北部で最大約 1m (図 6-a,e) の衛星に近づく変動が見られた。東向き観測では、輪島市西部で最大約 4m (図 6-b,c)、珠洲市北部で最大約 3m (図 6-d,f) の衛星に近づく変動が見られた。

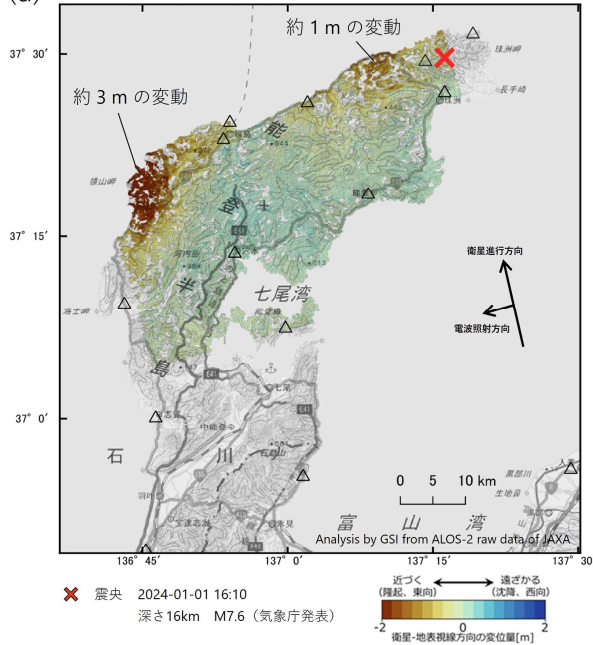
図 7 の 2.5 次元解析によると輪島市西部で最大約 4m の隆起、最大約 2m の西向きの変動が見られた。

図 8 の RGB 合成画像によると、地震に伴う隆起が検出された地域の沿岸では、陸化した地域が見られた。特に約 4m の隆起が検出された輪島市皆月湾周辺では、約 200m の沿岸線の変化が見られた。

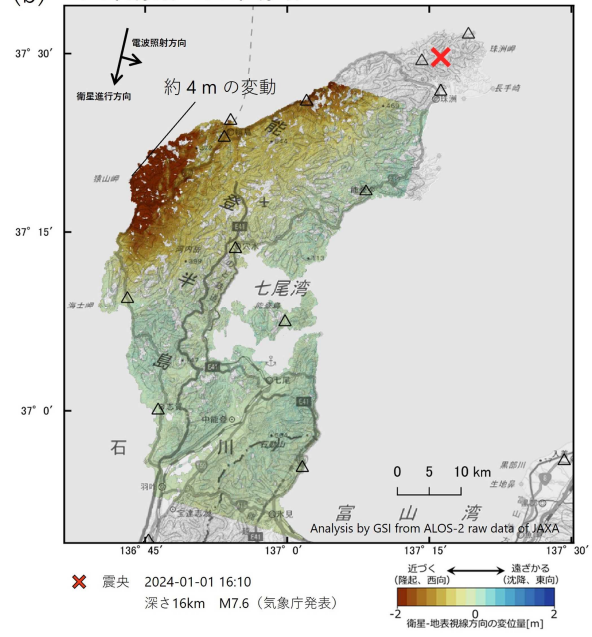
表 3. 解析に使用したデータ

| 図番号   | 観測日                      | 観測時間 (JST) | 衛星進行方向 | 電波照射方向 | 観測モード     | 入射角 (中心) | 垂直基線長 |
|-------|--------------------------|------------|--------|--------|-----------|----------|-------|
| 6-a,7 | 2022-09-26<br>2024-01-01 | 23:10 頃    | 北行     | 左      | 高分解能 (3m) | 32.4°    | -142m |
| 6-b,7 | 2023-06-06<br>2024-01-02 | 12:37 頃    | 南行     | 左      | 高分解能 (3m) | 40.1°    | +124m |
| 6-c,7 | 2023-12-06<br>2024-01-03 | 23:51 頃    | 北行     | 右      | 高分解能 (3m) | 43.0°    | +277m |
| 6-d   | 2023-06-12<br>2024-01-08 | 23:58 頃    | 北行     | 右      | 高分解能 (3m) | 52.9°    | +15m  |
| 6-e,7 | 2021-10-19<br>2024-01-09 | 11:49 頃    | 南行     | 右      | 高分解能 (3m) | 45.8°    | +10m  |
| 6-f,7 | 2023-11-03<br>2024-01-12 | 23:44 頃    | 北行     | 右      | 高分解能 (3m) | 36.2°    | +259m |
| 6-g   | 2023-12-31<br>2024-01-14 | 11:56 頃    | 南行     | 右      | 高分解能 (3m) | 38.5°    | +43m  |
| 6-h,7 | 2023-06-06<br>2024-01-15 | 23:10 頃    | 北行     | 左      | 高分解能 (3m) | 36.3°    | +39m  |

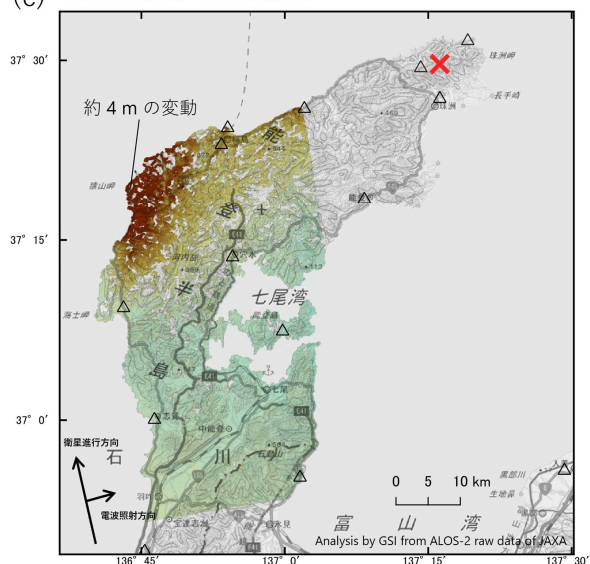
(a) 2022年9月26日～2024年1月1日



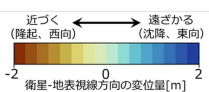
(b) 2023年6月6日～2024年1月2日



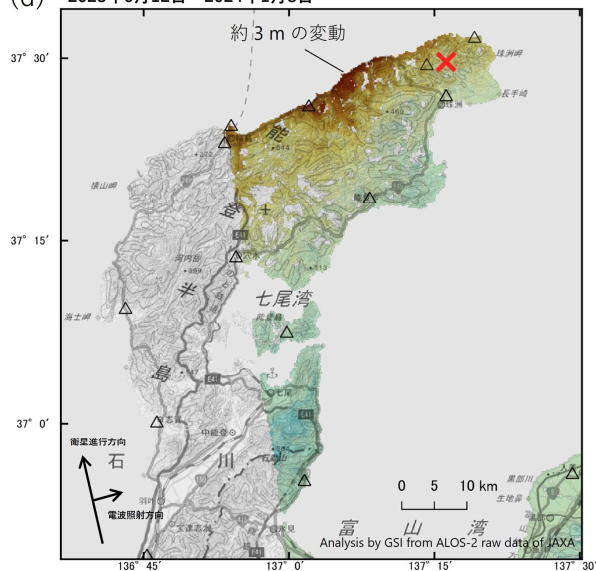
(c) 2023年12月6日～2024年1月3日



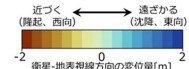
✕ 震央 2024-01-01 16:10  
深さ16km M7.6 (気象庁発表)



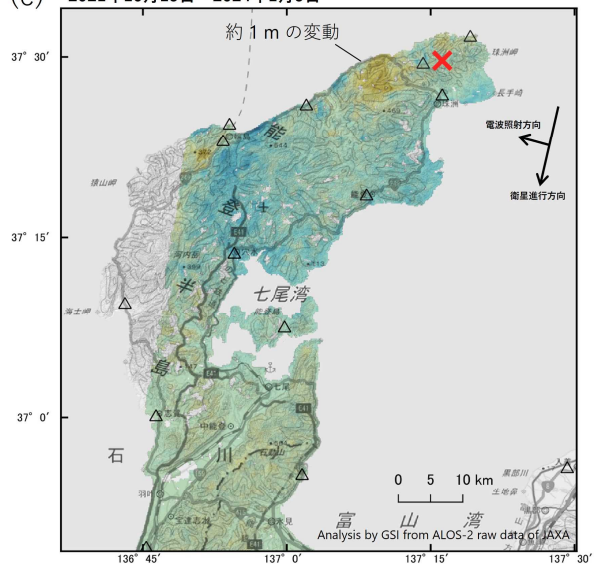
(d) 2023年6月12日～2024年1月8日



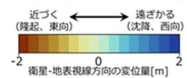
✕ 震央 2024-01-01 16:10  
深さ16km M7.6 (気象庁発表)



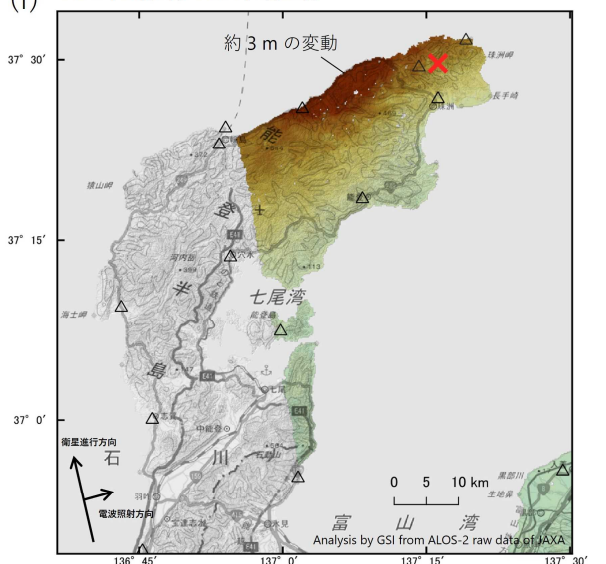
(e) 2021年10月19日～2024年1月9日



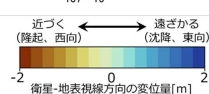
✕ 震央 2024-01-01 16:10  
深さ16km M7.6 (気象庁発表)



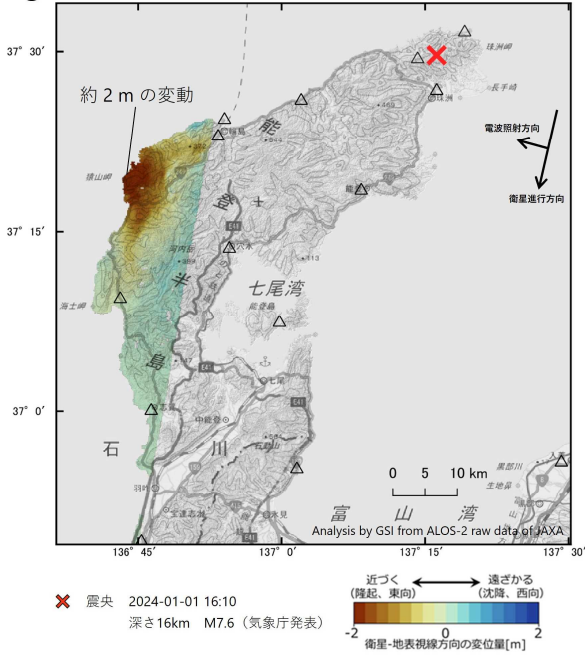
(f) 2023年11月3日～2024年1月12日



✕ 震央 2024-01-01 16:10  
深さ16km M7.6 (気象庁発表)



(g) 2023年12月31日～2024年1月14日



(h) 2022年6月6日～2024年1月15日

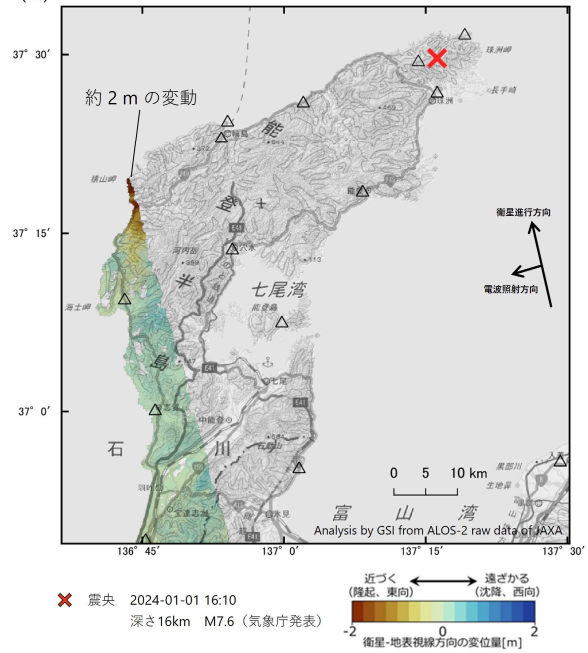
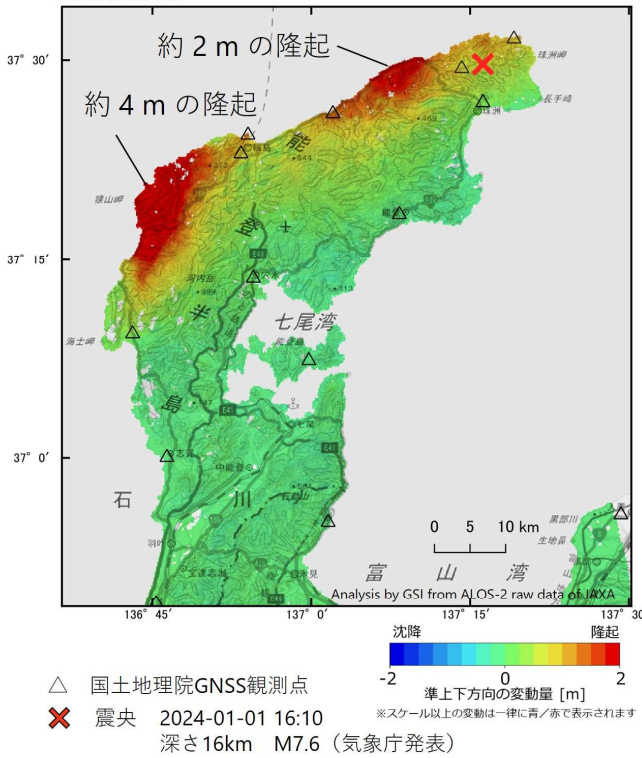


図6. 能登半島地方のピクセルオフセット法による衛星視線方向の変位量

準上下方向



準東西方向

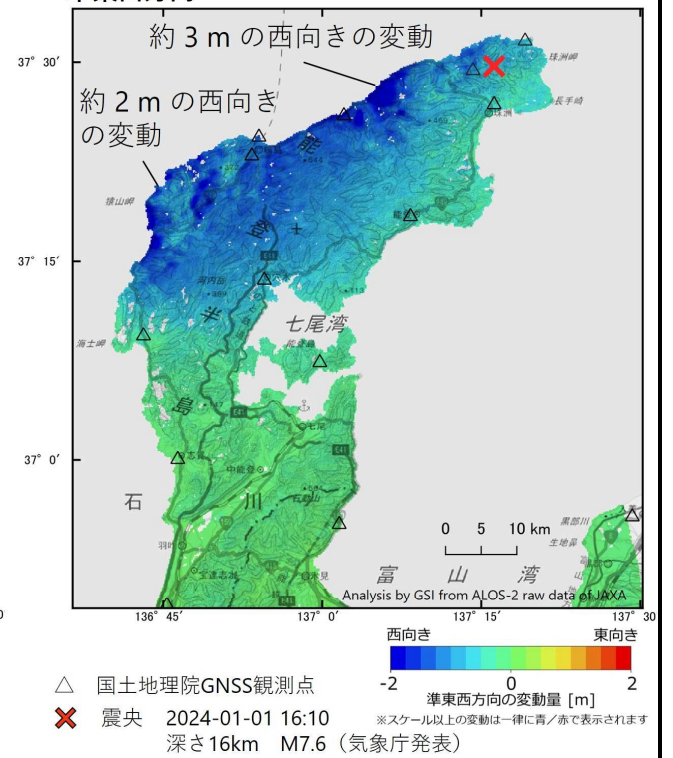


図7. 能登半島地方の2.5次元解析による変動量(1月1日及び2日観測、1月9日及び12日観測、1月3日及び15日観測による2.5次元解析結果を合算して表示)



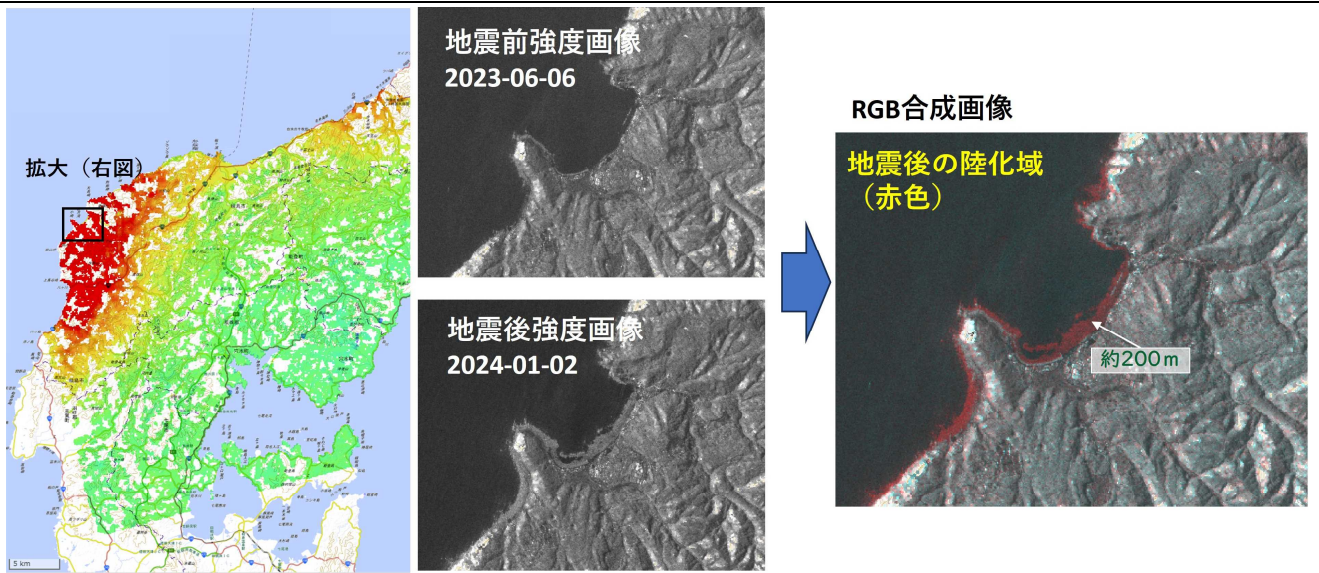


図 8. 能登半島地方の RGB 合成画像



図9. SAR 強度画像で捉えられた沿岸域の陸化域



図 10. RGB 合成画像の位置

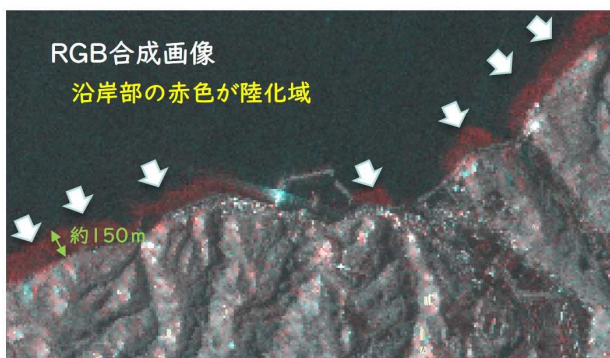
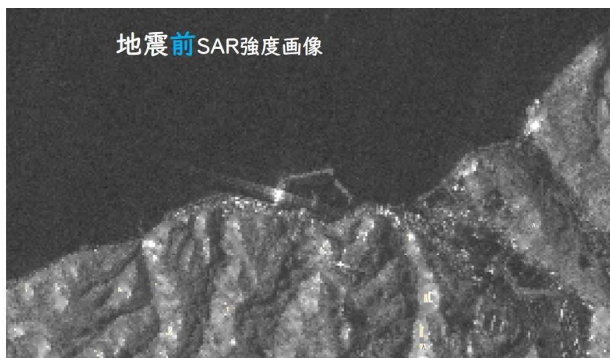


図 10-①. RGB 合成画像-名舟漁港付近



図 10-②. RGB 合成画像-輪島市周辺

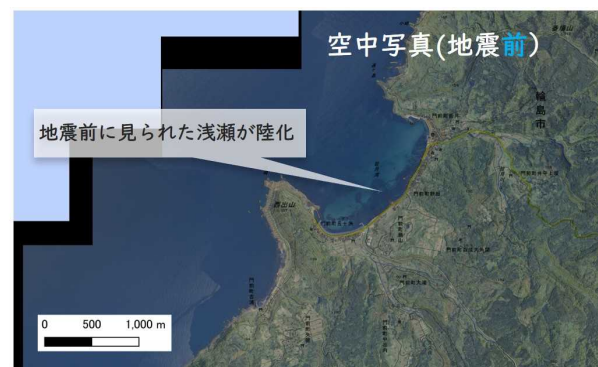
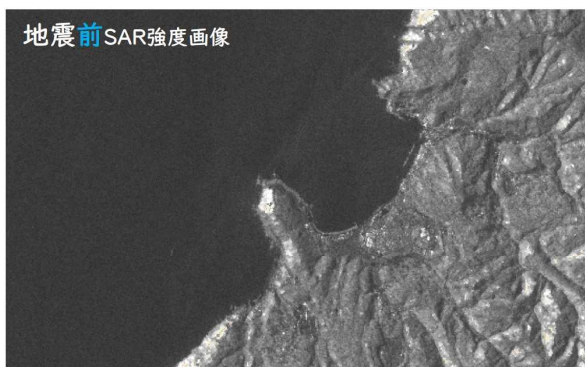


図 10-③. RGB 合成画像-皆月湾周辺

成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：

○学会発表

- ・小林知勝ほか（2023）, SAR による地殻変動解析で明らかにされた 2023 年トルコ・シリア地震の断層破壊の詳細, 日本地震学会 2023 年度秋季大会

○地震予知連絡会

- ・国土地理院（2023）「だいち 2 号」観測データの干渉解析による石川県能登地方の地震（2023 年 5

月 5 日) に伴う地殻変動 (2.5 次元解析), 第 239 回地震予知連絡会資料

- ・国土地理院 (2023) 「だいち 2 号」観測データの干渉解析による石川県能登地方の地震 (2023 年 5 月 5 日) に伴う地殻変動, 第 239 回地震予知連絡会資料
- ・国土地理院 (2023) 2023 年 9 月 8 日モロッコ王国の地震だいち 2 号 SAR 干渉解析結果, 第 241 回地震予知連絡会資料
- ・国土地理院 (2024) 「だいち 2 号」観測データの 2.5 次元解析による令和 6 年能登半島地震 (2024 年 1 月 1 日) に伴う地殻変動, 第 242 回地震予知連絡会資料
- ・国土地理院 (2024) 「だいち 2 号」観測データのピクセルオフセット法による令和 6 年能登半島地震に伴う地殻変動, 第 242 回地震予知連絡会資料
- ・国土地理院 (2024) 「だいち 2 号」観測データの干渉解析による令和 6 年能登半島地震に伴う地殻変動, 第 242 回地震予知連絡会資料
- ・国土地理院 (2024) 「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, 第 242 回地震予知連絡会資料

#### ○地震調査委員会

- ・国土地理院 (2023) 「だいち 2 号」観測データの干渉解析による石川県能登地方の地震 (2023 年 5 月 5 日) に伴う地殻変動, 第 385 回地震調査委員会 (臨時会)
- ・国土地理院 (2023) 「だいち 2 号」観測データの干渉解析による石川県能登地方の地震 (2023 年 5 月 5 日) に伴う地殻変動, 第 386 回地震調査委員会
- ・国土地理院 (2023) 「だいち 2 号」観測データの干渉解析による石川県能登地方の地震 (2023 年 5 月 5 日) に伴う地殻変動【確定軌道暦 (精密暦) による結果】, 第 387 回地震調査委員会
- ・国土地理院 (2023) 2023 年 9 月 8 日モロッコ王国の地震 だいち 2 号 SAR 干渉解析結果, 第 391 回地震調査委員会
- ・国土地理院 (2024) 国土地理院 地殻変動情報 (衛星 SAR), 第 394 回地震調査委員会 (臨時会)
- ・国土地理院 (2024) 国土地理院 地殻変動情報 (衛星 SAR), 第 395 回地震調査委員会
- ・国土地理院 (2024) 「だいち 2 号」観測データの 2.5 次元解析による令和 6 年能登半島地震 (2024 年 1 月 1 日) に伴う地殻変動, 第 396 回地震調査委員会
- ・国土地理院 (2024) 「だいち 2 号」観測データのピクセルオフセット法による令和 6 年能登半島地震に伴う地殻変動, 第 396 回地震調査委員会
- ・国土地理院 (2024) 「だいち 2 号」観測データの干渉解析による令和 6 年能登半島地震に伴う地殻変動, 第 396 回地震調査委員会

#### ○Web

- ・国土地理院 (2023) 「だいち 2 号」観測データの干渉解析による石川県能登地方の地震 (2023 年 5 月 5 日) に伴う地殻変動 (2023 年 5 月 8 日発表),  
<https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20230505noto.html>(accessed 5 Mar. 2024)
- ・国土地理院 (2023) 2023 年 9 月 8 日モロッコ王国の地震に伴う地殻変動,  
[https://www.gsi.go.jp/cais/topic20230908\\_Morocco.html](https://www.gsi.go.jp/cais/topic20230908_Morocco.html)(accessed 5 Mar. 2024)
- ・国土地理院 (2024) 「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](https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_insar.html)(accessed 5 Mar. 2024)
- ・国土地理院 (2024) 「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](https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_pwr.html)(accessed 5 Mar. 2024)

**来年度以降の課題・計画：**

引き続き、国内外で大規模な地震が発生した場合、観測されたデータを早急に解析し、地殻変動、地表面変動の詳細な把握を行う。

その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：特になし。

令和5年度地震 SAR 解析 WG 課題別成果報告票 地震-0502

|   |
|---|
| 代表研究者 氏名（所属機関）：小澤 拓（防災科学技術研究所）                        |
| 支援研究者 氏名（所属機関）：                                       |
| 課題名称： 地震に伴う地殻変動の検出を目的とした緊急観測データの解析                    |
| 今年度の成果概要：<br>令和5年度は、地震に関する成果はありません。                   |
| 成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：<br>特になし       |
| 来年度以降の課題・計画：<br>未定                                    |
| その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：<br>特になし |

代表研究者 氏名 (所属機関) : 下山利浩 (地震火山部管理課)  
 支援研究者 氏名 (所属機関) : 瀧山弘明、廣田伸之、森脇健 (以上、地震火山部地震火山技術・調査課)、安藤忍、奥山哲 (以上、気象研究所火山研究部)

課題名称 : 地殻変動の詳細把握

今年度の成果概要 :

以下の地震について、地震 WG 経由で提供された ALOS-2/PALSAR-2 データなどを用いて干渉 SAR 解析等を実施し、地震に伴う地殻変動を検出した。解析した主な地震イベントを表 1 に示す。

表 1. 解析を行った主な地震イベント

| 震央地名       | 発生時刻 (UTC)                 | 緯度         | 経度          | 深さ   | Mw  | 図       |
|------------|----------------------------|------------|-------------|------|-----|---------|
| 能登半島 (珠洲市) | 2023 年 05 月 05 日 05 時 42 分 | N37° 32.3' | E137° 18.2' | 12km | 6.2 | 1       |
| モロッコ       | 2023 年 09 月 08 日 22 時 11 分 | N30° 55.5' | W8° 30.7'   | 23km | 6.9 | 2       |
| アフガニスタン北西部 | 2023 年 10 月 07 日 06 時 41 分 | N34° 15.4' | E61° 55.9'  | 10km | 6.3 | 3       |
| アフガニスタン北西部 | 2023 年 10 月 07 日 07 時 12 分 | N34° 26.2' | E61° 52.8'  | 10km | 6.3 | 3       |
| アフガニスタン北西部 | 2023 年 10 月 11 日 00 時 41 分 | N34° 19.2' | E62° 04.5'  | 10km | 6.3 | 4       |
| アフガニスタン北西部 | 2023 年 10 月 15 日 03 時 36 分 | N34° 35.2' | E62° 09.7'  | 10km | 6.3 | 4       |
| 石川県能登地方    | 2024 年 01 月 01 日 07 時 10 分 | N37° 29.7' | E137° 16.2' | 16km | 7.6 | 5, 6, 7 |

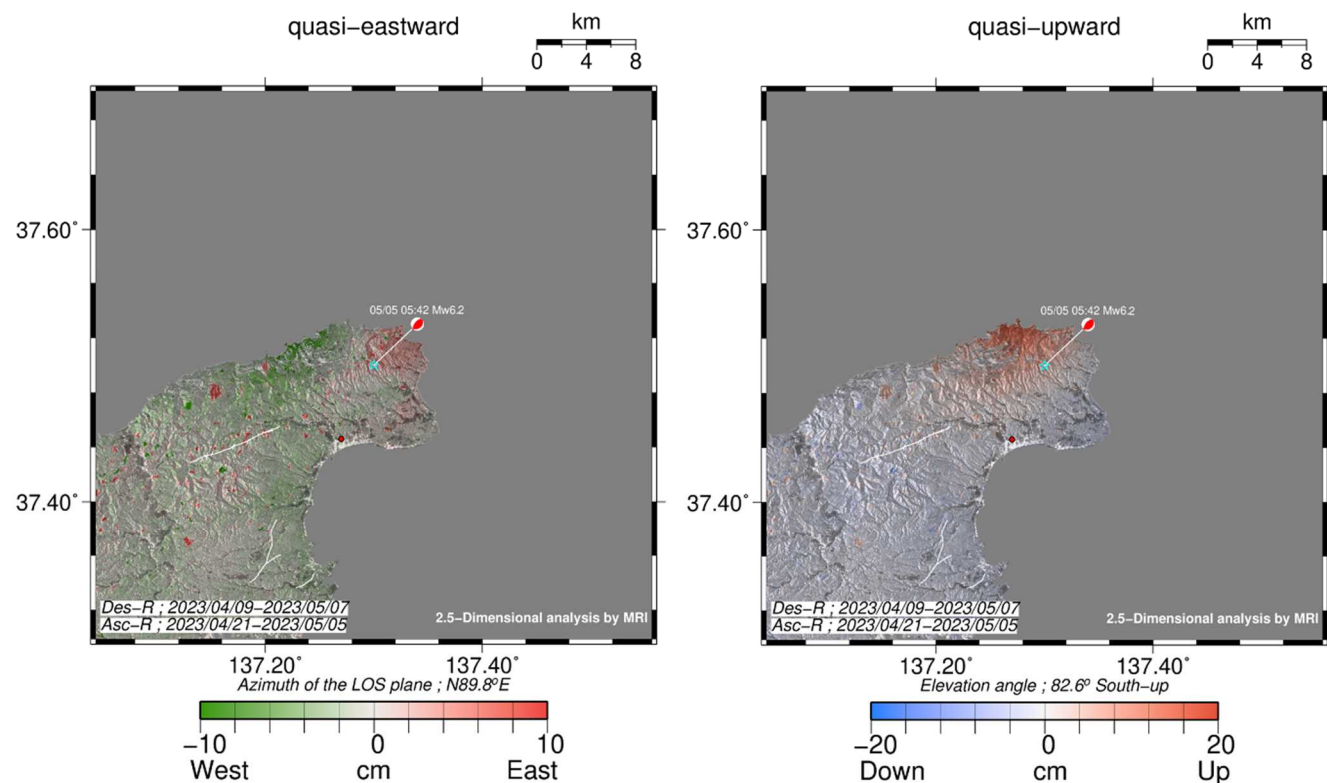


図 1 2023 年 5 月 5 日に能登半島沖で発生した地震の ALOS-2 データを用いた干渉画像から計算された 2.5 次元解析結果 (左: 準東西方向、右: 準上下方向)。図中の星印は震央、震源球は Global CMT を使用した。準東西方向では、震央付近を境にして約 10cm の変位。準上下方向では、震央付近で約 20cm の隆起が検出された。

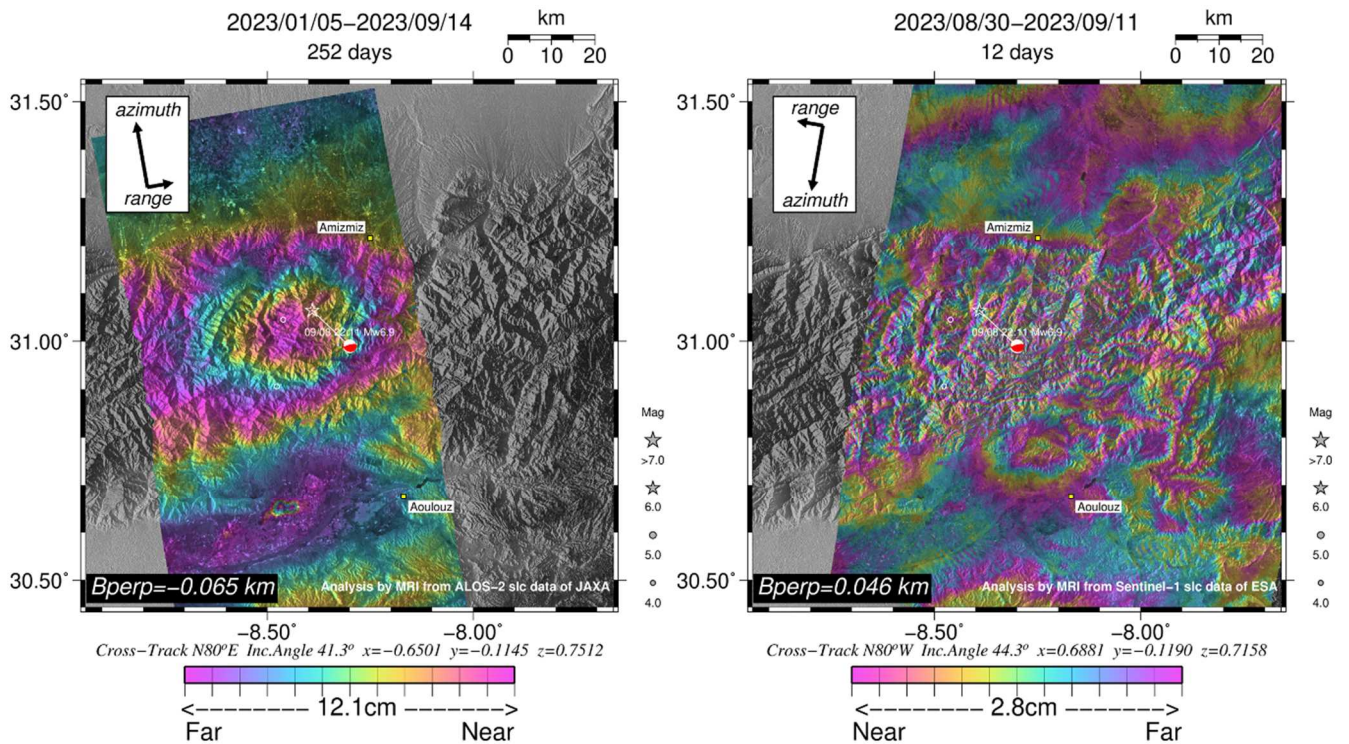


図2 2023年9月8日にモロッコで発生した地震の干渉画像(北行軌道:ALOS-2、南行軌道:Sentinel-1)。図中の星印は震央、震源球はGlobal CMTを使用した。ALOS-2の解析(北行軌道)では、マラケシュの南に位置するアミミズ(北の都市)とアウルズ(南の都市)の間で干渉縞が確認できる。震央と震源球付近で18cm程度の衛星に近づく方向、アウルズの西側で6cm程度の衛星から遠ざかる方向の変化(局所的には20cm程度の変化の場所もある)。Sentinel-1の解析では、大きな地殻変動が期待される場所では、詳細不明である。

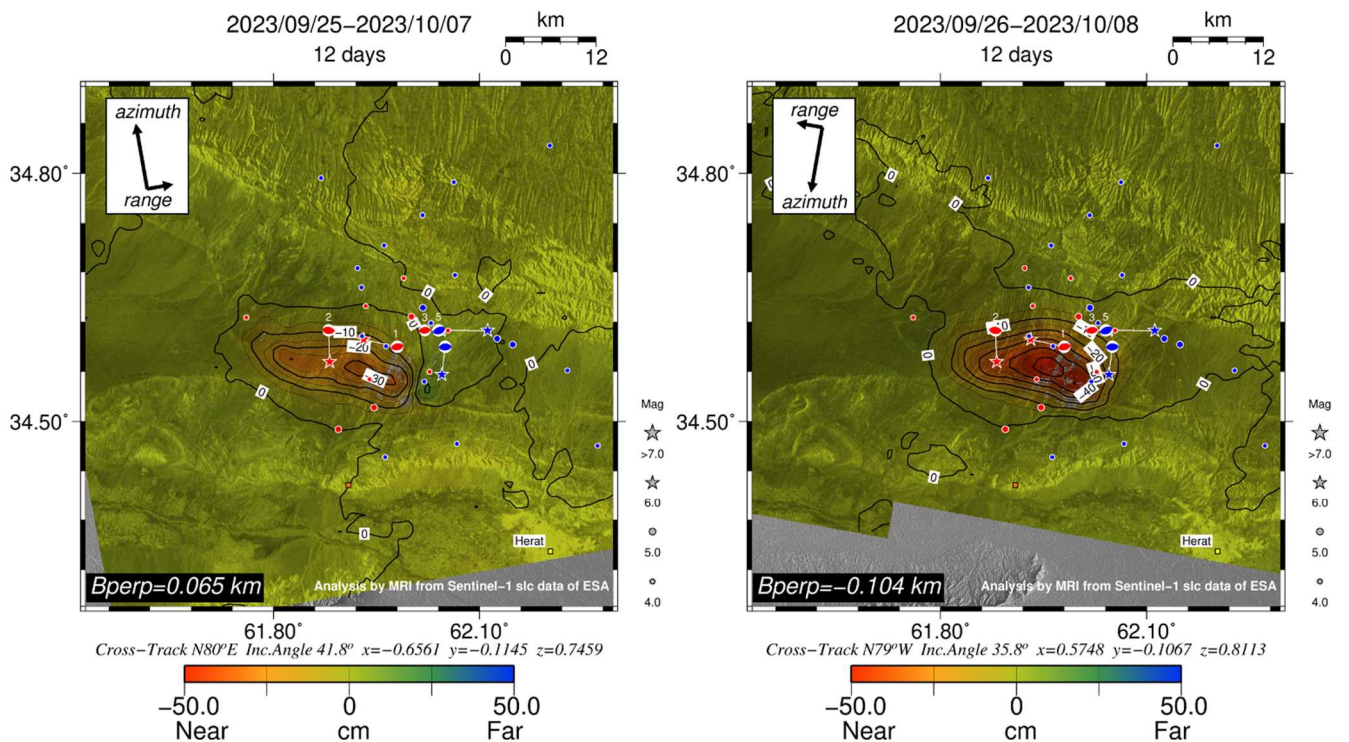


図3 2023年10月8日以前にアフガニスタン西部で発生した地震(赤色)のSentinel-1データを用いた干渉画像(アンラップ済)。図中の星印は震央、震源球はGlobal CMTを使用した。北行軌道では最大約30cm、南行軌道では、最大約55cmの各々衛星視線方向に近づく地殻変動が震央付近で検出された。



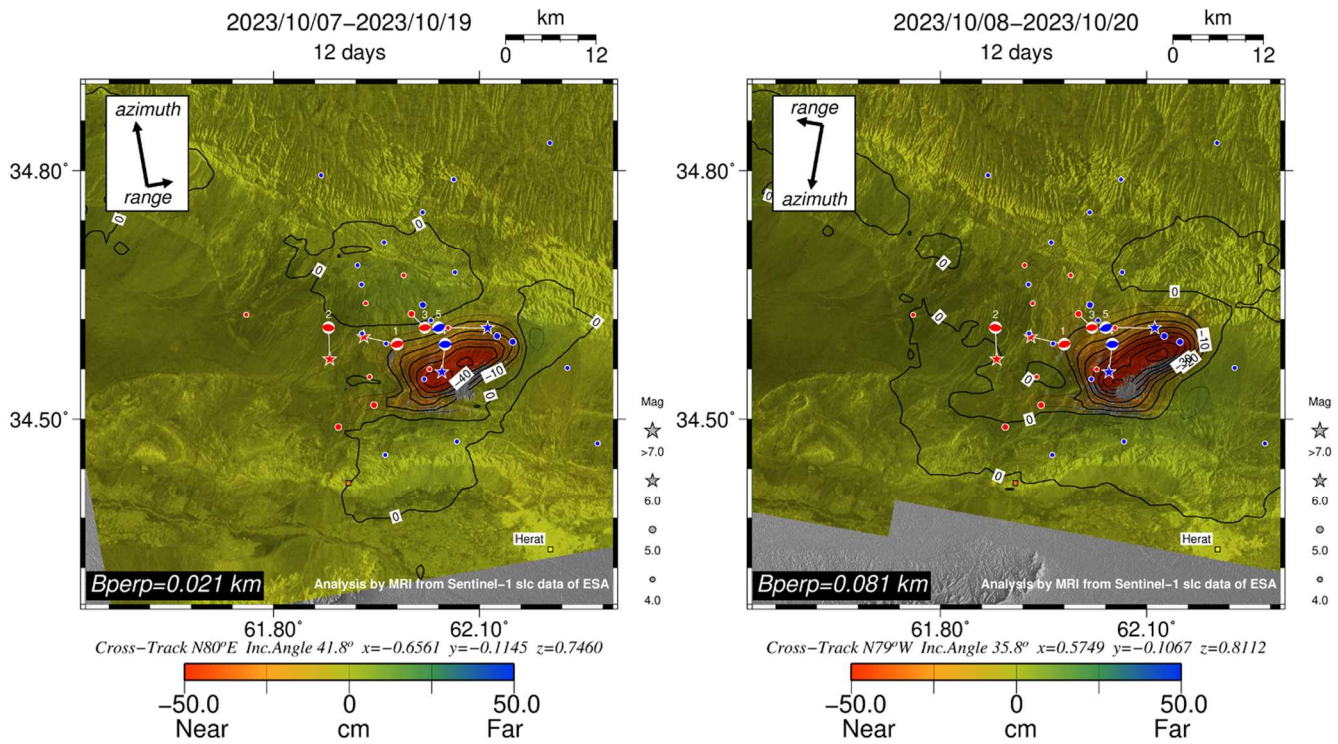


図4 2023年10月8日以降にアフガニスタン西部で発生した地震（青色）の Sentinel-1 データを用いた干渉画像（アンラップ済）。図中の星印は震央、震源球は Global CMT を使用した。北行軌道では最大約 55cm、南行軌道では、最大約 75cm の各々衛星視線方向に近づく地殻変動が震央付近で検出された。

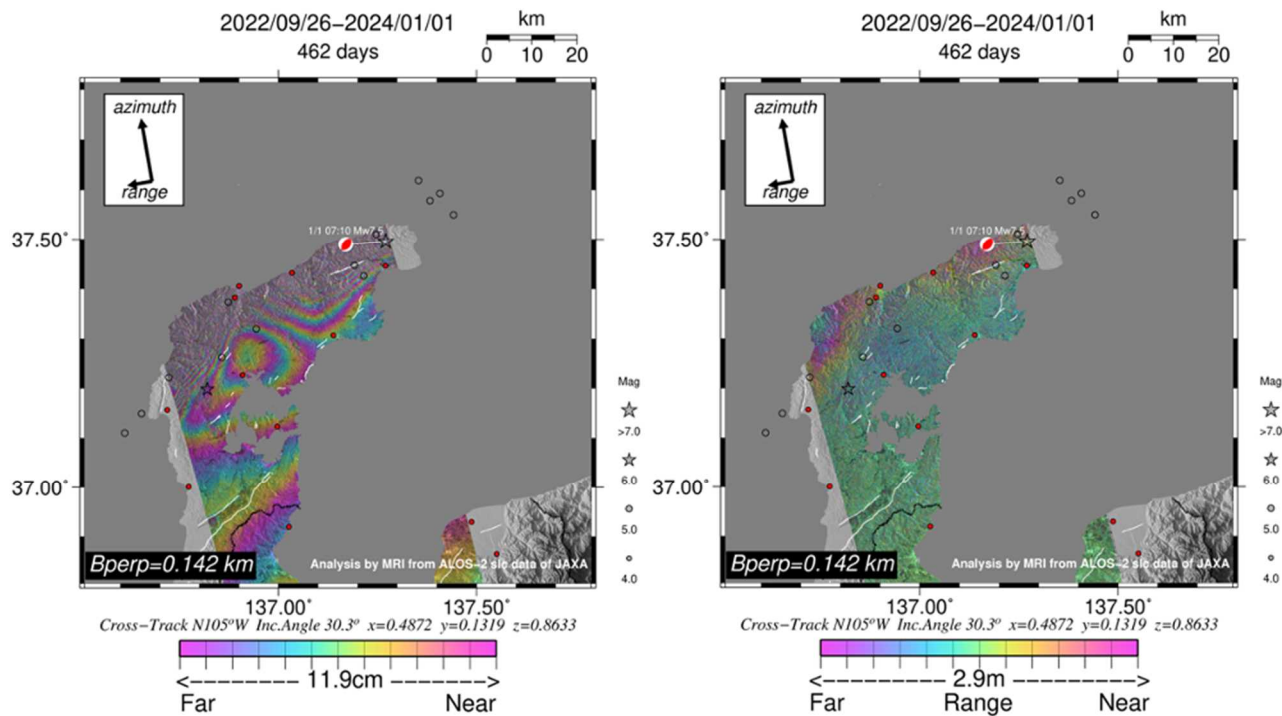


図5 2024年1月1日に石川県能登地方で発生した地震の ALOS-2 データ（パス 121：1/1 撮像分）を用いた干渉画像とピクセルオフセット（レンジ方向）結果。能登半島の北側沿岸部は変動量が大きい  
ため通常の干渉解析では詳細不明であるが、ピクセルオフセット解析では衛星に近づく方向の変化が  
輪島の西域と震源球近傍で確認できる。

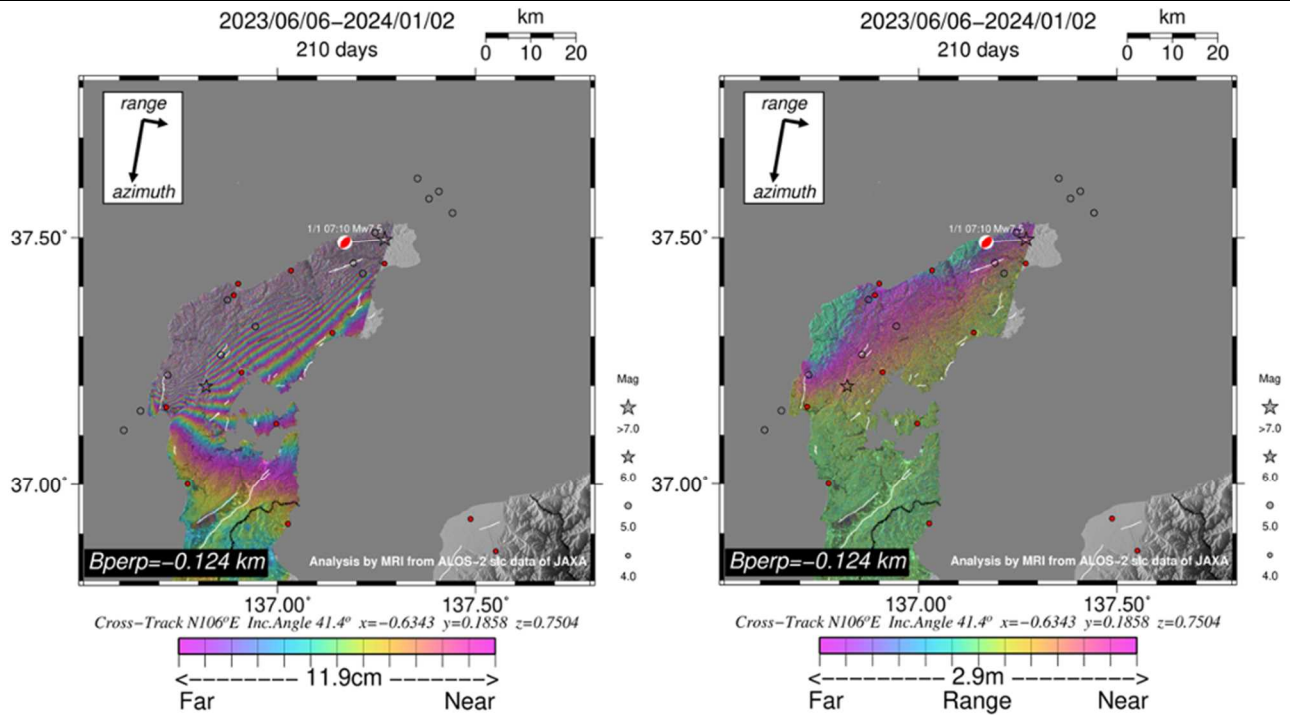


図6 2024年1月1日に石川県能登地方で発生した地震のALOS-2データ（パス121：1/2撮像分）を用いた干渉画像とピクセルオフセット（レンジ方向）結果。能登半島の北側沿岸部は変動量が大きいため通常の干渉解析では詳細不明であるが、ピクセルオフセット解析では衛星に近づく方向の変化が輪島の西域と震源球近傍で確認できる。

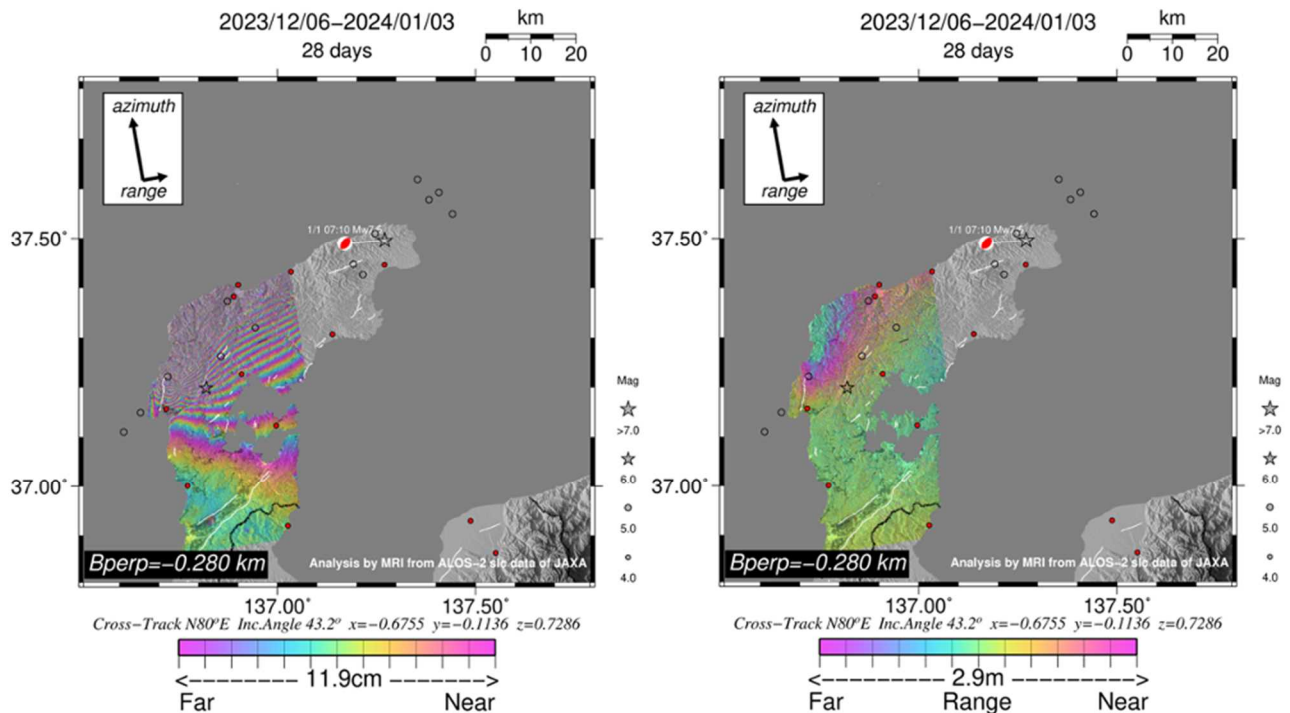


図7 2024年1月1日に石川県能登地方で発生した地震のALOS-2データ（パス121：1/3撮像分）を用いた干渉画像とピクセルオフセット（レンジ方向）結果。能登半島の北側沿岸部は変動量が大きいため通常の干渉解析では詳細不明であるが、ピクセルオフセット解析では衛星に近づく方向の変化が輪島の西域で確認できる。

成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：

- ・ 安藤忍、小林昭夫（2023）干渉 SAR 時系列解析手法を用いた御前崎周辺の定常的な地殻変動，気象研究所報告，71，1-11

**来年度以降の課題・計画：**

- ・ 引き続き規模の大きな地震を中心に解析を行い、地震の全体像解明を実施する。

**その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：**

- ・ 気象庁では頻繁な人事異動により解析経験者が少ないため、引き続き新たな人材に対する研修などのサポートをお願いしたい。

代表研究者 氏名 (所属機関) : 橋本学 (東京電機大学)

支援研究者 氏名 (所属機関) :

課題名称 : ALOS-2/PALSAR-2 を用いた活断層帯周辺の地震前・時・後の地殻変動の研究

今年度の成果概要 :

**2023 年 5 月の能登半島の地震**

2023 年 5 月 5 日に発生した能登半島珠洲市周辺の  $M_{jma}6.5$  の地震に伴う地殻変動を検出するため、衛星解析グループを通じてご提供頂いた PALSAR-2 データを解析した。解析には RINC (Ozawa et al., 2016) を用いて、干渉解析を実施した。その際、大気遅延と電離層遅延補正、さらには GEONET による GNSS 変位場への合わせ込みを行った。大気遅延の補正には、次世代火山プロジェクトによる数値気象モデルを使わせて頂いた。電離層遅延補正には Gomba (2010) の方法を用いた。

使用した画像は、2023 年 4 月 9 日と 5 月 7 日の南行軌道と 2023 年 4 月 21 日と 5 月 5 日の北行軌道の高分解モードのものである。いずれも右観測で取得されたものである。

解析結果を図 1 に示す。これらは GEONET 能都 (960574) を基準としたアンラップされた視線距離変化の図である。能登半島先付近 (GEONET 珠洲 (950253) の北あたり) に 10cm 前後の衛星に向かう変位が検出された。これは他機関で迅速に公開された結果と調和的な結果であり、能登半島先端部に隆起が生じたことが推定される。

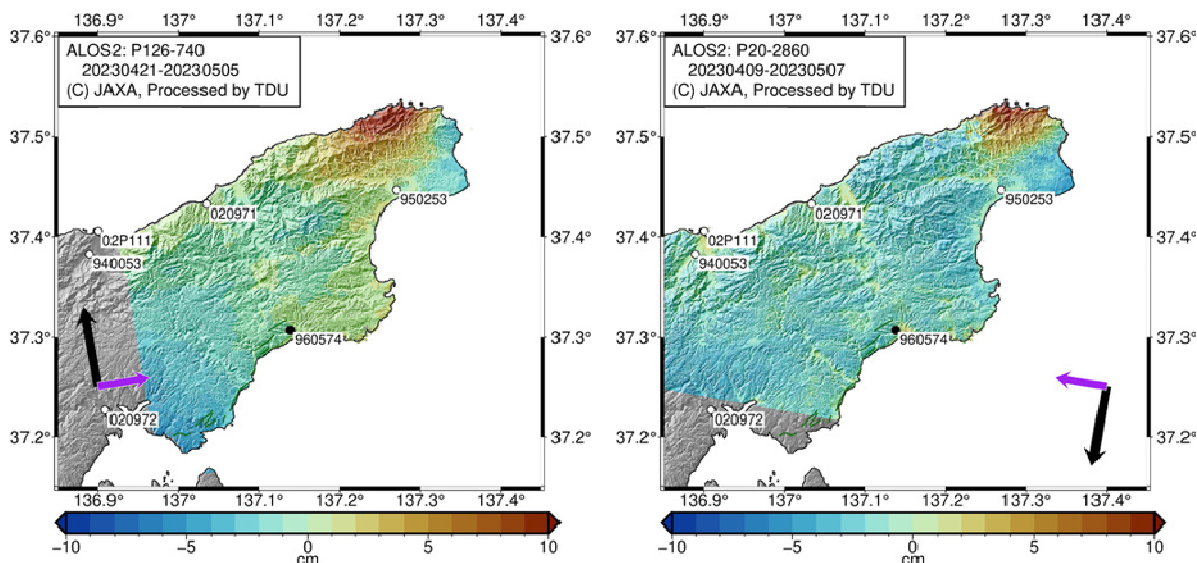


図 1. 2023 年 5 月の能登半島地震前後 ALOS-2 干渉画像。GEONET 能都 (960574, ●) を基準とした視線距離変化。正 (負) の値が衛星に向かう (から遠ざかる) 変位を示す。○は GEONET 観測点を示す。干渉画像の範囲にある観測点の変位を用いて、補正している。

参考文献

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 Trans. Geosci. Remote Sens. 54, 1446–1461.

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 Space 68:186, doi:10.1186/s40623-016-0563-5

成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：

特になし

来年度以降の課題・計画：

なし

その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：

特になし

令和5年度地震 SAR 解析 WG 課題別成果報告票 地震-0505

代表研究者 氏名（所属機関）：古屋正人（北海道大学大学院 理学研究院 地球惑星科学部門）

支援研究者 氏名（所属機関）：

高田 陽一郎（北海道大学大学院 理学研究院 地球惑星科学部門）

課題名称：陸域プレート境界周辺の地殻変動様式の解明

今年度の成果概要：

成果なし

成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：

成果なし

来年度以降の課題・計画：

未定

その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：

特になし

代表研究者 氏名 (所属機関) : 中尾 茂 (鹿児島大学)

支援研究者 氏名 (所属機関) : なし

課題名称 : 干渉 SAR 解析を用いた変位急変帯の地震発生ポテンシャルの評価に関する研究

今年度の成果概要 :

国土地理院の GEONET の観測データによると鹿児島県と宮崎県の県境付近を境として、東西方向の変位が、東方向から西方向へ変化している。Bird et al. (2003)、Nishimura et al. (2004)、Nishimura et al. (2018)では、琉球弧の北端あるいはブロック境界としてモデル化されている。しかし、境界とされる付近に境界を示すような明瞭な地震活動はなく、また、地表断層なども見つかっていないため、GEONET 観測点の変位から境界の場所を推定するしかない。GEONET 観測点の観測間隔は10数kmであるため、明確な境界の場所は推定できていない。

InSAR 解析を用いた地殻変動解析では、空間的に密な地殻変動分布を得ることができる。解析対象領域で期待される変動は東西方向の変動であるため、InSAR 解析において変動を解析できる方向であると考えられる。しかし、解析対象領域では、GEONET 観測点の変動は年間1~2cmと求められており、実際の解析では、InSAR 解析のノイズ減の除去が重要となる。

今回は、InSAR 解析ソフトウェア—rinc (小澤、2022) および rinc\_gui (奥山、2022) を使用し、電離層の影響、大気伝搬遅延量の補正を行い、InSAR 画像を求めた。InSAR 画像はリファレンス撮像後、3回の撮像データをターゲットとして使用した。2007年2月から2011年4月の期間で61枚のInSAR 画像を計算した。電離層の影響の推定は、SLC 画像にバンドパスフィルターを掛け高周波と低周波の SLC 画像を作成し、それぞれの InSAR 画像を作成し、それらから電離層による遅延量を計算する (Gomba et al., 2016)。大気による伝搬遅延量は、気象庁数値解析データを用いて遅延量を計算した (小澤、2022)。

時系列解析を行う際に、得られた InSAR 画像から基線長が 1200m を超える画像を削除した。その結果、2008年5月から2008年8月の期間のデータがなくなったので、時系列解析は2008年8月10日から2011年4月3日までの期間で行った。各期間で求められた LOS の変位画像を図1に示す。夏の期間に LOS の増大が見られる。これは、InSAR 画像においても同じ傾向がみられ、今回行った大気伝搬遅延量の補正をさらに改善する必要があることがわかった。さらに、rinc のマニュアル (小澤、

2022) にある手順に従い、ローパスの空間フィルター及びハイパスの時間フィルターを掛けるなどの処理を行い、この期間の積算 LOS 変位を得た。最大、最小で -0.9m、0.6m であり、1年間で約 30 cm の変位となった。これは GNSS の結果の約 10 倍であり、電離層、大気伝搬遅延以外の影響がある可能性があり、さらなる検討が必要である。

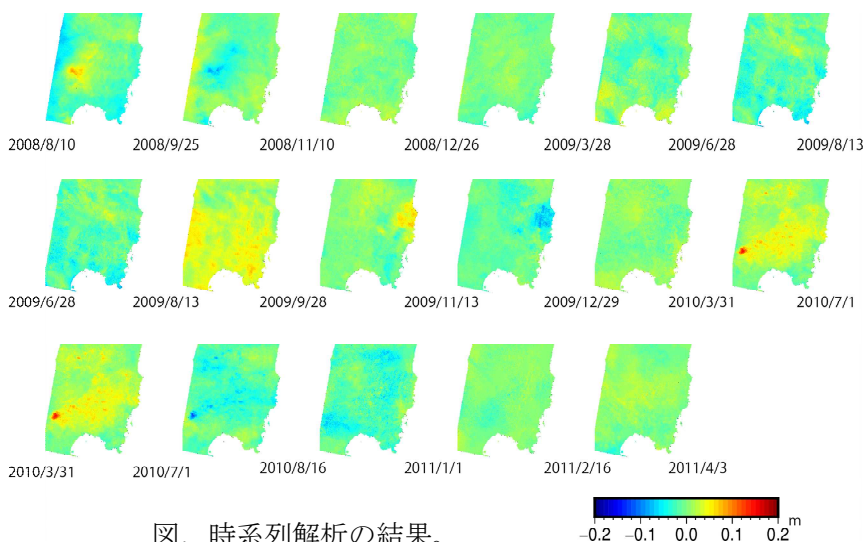


図. 時系列解析の結果。

成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：

なし

来年度以降の課題・計画：

InSAR 解析において、各画像のノイズを極力低減し、2024 年度と同様に時系列解析を行う。電離層や大気の伝搬遅延量の推定方法はほかにもある。小澤(2022)による解析ソフトウェア rinc では、Wegmüller et al. (2018)の方法も実装されている。また、大気伝搬遅延量の推定では、次世代火山プロジェクトで作成している数値気象データを使用できる。

電離層により遅延量は、Gomba et al. (2016)と Wegmüller et al. (2018)の比較検討を行う。電離層のモデルは、全球モデルが GNSS データを用いてもとめられており、レイトレーシングを行い、電離層による遅延量を計算し、上記2つの方法により求めた遅延量と比較検討をおこなう。

大気伝搬遅延量の推定では、上記の気象モデルの違いを検討する。GNSS により大気伝搬遅延量が求められている。上記気象モデルを用いて計算した遅延量と比較検討を行う。

最後に、2024 年度は下降軌道により観測されたデータのみを使ったが、上昇軌道により観測されたデータについても解析を行う。

その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：

なし



代表研究者 氏名 (所属機関) : 大木 真人 (宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター)

支援研究者 氏名 (所属機関) : 田殿 武雄、柳谷 一輝  
(宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター)

課題名称 : Lバンド合成開口レーダによる地殻変動検出

今年度の成果概要 :

1. 概要

本年度中に発生した地震について、PALSAR-2 データの干渉 SAR 等の処理により、地震に伴う地殻変動量や被害域の推定を行った。このうち、2023 年 5 月 5 日の能登地方の地震や、2. に示す 2024 年能登半島地震および 3. に示す 2023 年 9 月のモロッコ地震について、顕著な地殻変動や、被害が確認された。

2023 年 12 月 3 日のフィリピン・ミンダナオ島地震、2023 年 12 月 18 日の中国甘粛省地震については、解析を実施したものの顕著な地殻変動は検出されなかった。

2. 2024 年能登半島地震の解析結果

2024 年 1 月 1 日 16 時 10 分の能登半島地震 (M7.6) について、1 月 1 日 23 時 10 分の最初の観測データを皮切りに、1 月までに 16 回の観測が行われた (その後も観測は継続中)。

図 1(a)、(b)はそれぞれ 1 月 1 日 (昇交・左観測) および 2 日 (降交・左観測) のデータを用いた干渉画像で、能登半島北西部から北部にかけて干渉性が失われており、大きな変位勾配や、土砂崩壊等の発生が示唆される。能登半島西部の輪島市・志賀町の境界付近では、干渉縞の不連続が見られ、地表に表出したずれが捉えられていると考えられる。

図 2(a)、(b)は 1 月 15 日までの観測データによる複数方向のピクセルオフセットによる変動量を用いて、3 次元解析により分離した上下方向と東西方向の変動量である。干渉画像では非干渉であった輪島市周辺において、最大約 4.3 m の隆起と、最大約 2.8 m の西向変動が検出された。

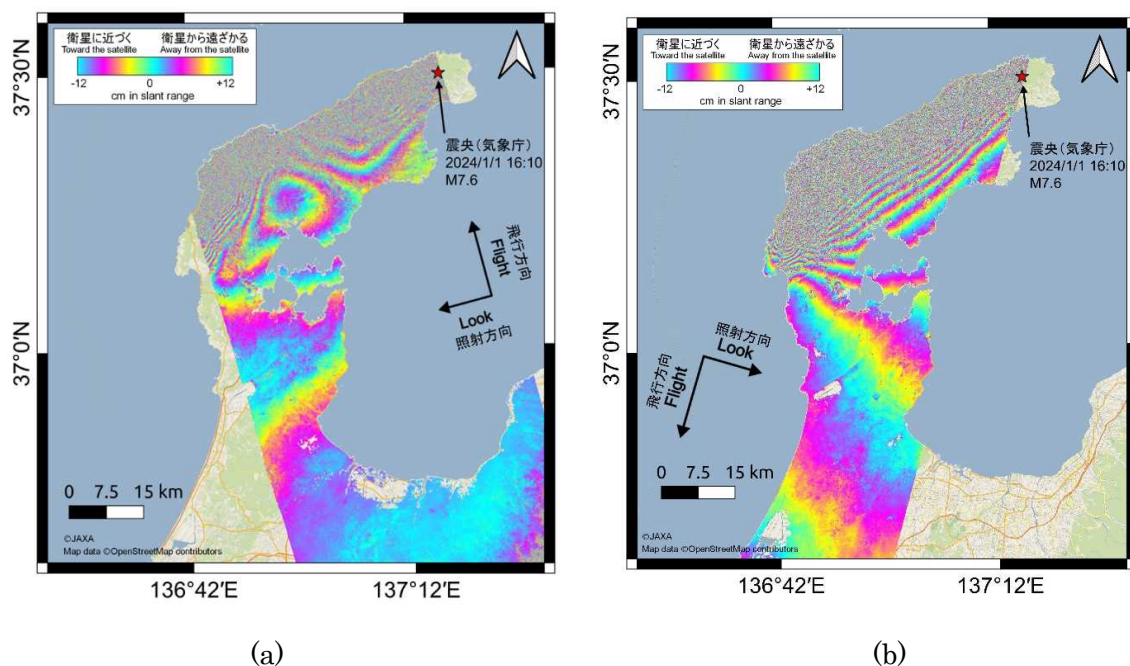


図 1 能登半島地震による地殻変動図。(a) 2024 年 1 月 1 日と 2022 年 9 月 26 日のデータによる干渉 (昇交・左観測)、(b) 2024 年 1 月 2 日と 2023 年 6 月 6 日のデータによる干渉 (降交・左観測)。

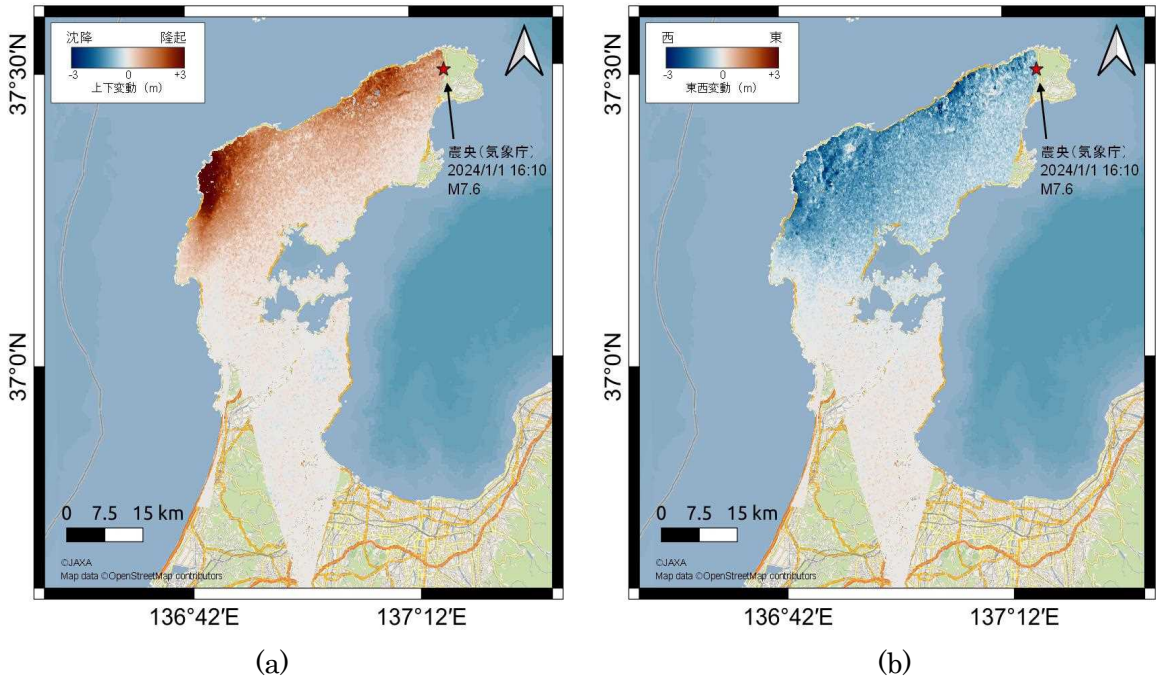


図2 複数方向のピクセルオフセットによる地殻変動の3次元解析結果。(a) 上下成分、(b)東西成分。

なお、データ配布事業者との協議の下、これらの緊急観測データとアーカイブデータの一部は Web で公開しており、非商用目的に限りオープンフリーデータとして利用可能である。

### 3. モロッコ地震の解析結果

2023年9月8日のモロッコ地震 (M6.8) について、図3に2023年9月14日 (昇交・右観測) のデータによる地殻変動図を示す。画像北西端を基準とすると、震源域周辺で24cm程度の近づく変位が見られる。また、震源から南に45kmの地点 (Oulad Berhil、ウル・ベルイル) において局所的な遠ざかる変位 (周囲に対して20cm程度) が検出された。

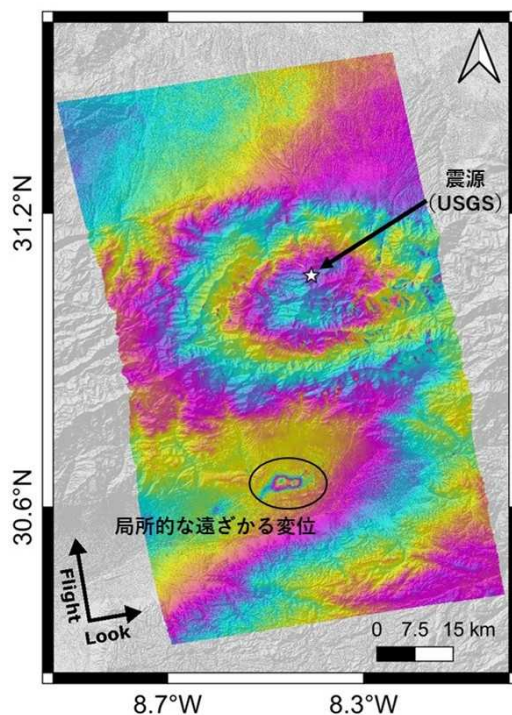


図3 2023年9月14日と2023年1月5日のデータによる、2023年モロッコ地震に伴う地殻変動。

#### 4. まとめ

能登半島地震の事例にみられるように、異なる感度を持つ解析手法を相補的に組み合わせる（干渉 SAR、ピクセルオフセット等）こと、複数方向の変位量を組み合わせた成分分離（2.5 次元、3 次元解析）を行うことが地震に伴う地殻・地盤変動の把握に有効であった。これらの解析は、断層モデリング等を通して本地震のメカニズムの解明に貢献することが期待される。

成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：

##### 学会・研究会発表

- 柳谷一輝，大木真人，田殿武雄，「ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた令和 6 年能登半島地震による 3 次元変動推定の試み」，「高頻度 SAR 観測による地殻・地表変動研究（2021-B-03）」2023 年度研究集会，東京大学地震研究所，2024 年 2 月

##### Web 掲載

- 「だいち 2 号」による令和 6 年能登半島地震の観測結果について、2024 年 1 月 10 日（1 月 11 日、17 日、24 日更新）  
[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/library/disaster/dis\\_pal2\\_noto\\_earthquake\\_20240110\\_j.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/library/disaster/dis_pal2_noto_earthquake_20240110_j.htm)
- ALOS シリーズ Open and Free データ（2024 年 1 月 5 日能登半島地震に関する ALOS-2/PALSAR-2 L1.1/L2.1 プロダクトの公開、1 月 12 日、1 月 19 日更新）  
[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/alos\\_open\\_and\\_free\\_j.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/alos_open_and_free_j.htm)

##### 来年度以降の課題・計画：

地震やその被害の発生状況に応じて PALSAR-2 データの解析を行い、必要に応じて WG 参加機関と共有する。また、それらの解析ノウハウや解析結果をもとに、必要に応じて JAXA の活動（ALOS-2 による緊急観測、ALOS-4 運用の検討等）に対し助言を行う。

その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：  
解析結果や現地取得データ（あれば）などの、可能な範囲での共有。

令和5年度地震 SAR 解析 WG 課題別成果報告票 地震-0508

|   |
|---|
| 代表研究者 氏名（所属機関）：田中 明子（産業技術総合研究所）                       |
| 支援研究者 氏名（所属機関）：                                       |
| 課題名称：合成開口レーダを用いた地震活動に伴う地殻変動のモニタリング                    |
| 今年度の成果概要：<br>令和 5 年度は、地震に関する成果はありません。                 |
| 成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：<br>特になし       |
| 来年度以降の課題・計画：<br>未定                                    |
| その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：<br>特になし |

代表研究者 氏名（所属機関）：福島 洋（東北大学災害科学国際研究所）

支援研究者 氏名（所属機関）：三浦 哲（東北大学大学院理学研究科）  
太田雄策（東北大学大学院理学研究科）

課題名称：活断層周囲のひずみ場推定手法開発および地震に伴う地盤変状抽出に関する研究

今年度の成果概要：

活断層周囲のひずみ場推定手法開発に関しては、国土地理院の GEONET 電子基準点およびソフトバンク独自基準点の GNSS データから推定された対流圏遅延量を用いた InSAR の対流圏遅延ノイズ補正に取り組んだ。四国の中央構造線を含む領域について、GEONET で推定された対流圏遅延量を用いると 30%ものノイズ削減効果があることが実証された（図1、2）。

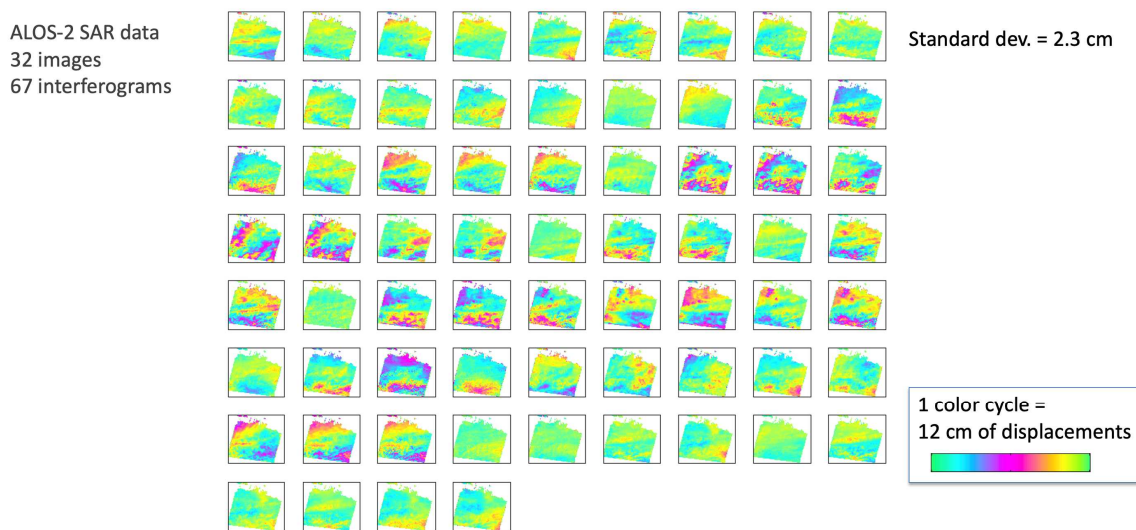


図1：中央構造線を含む領域の ALOS-2 干渉画像（電離圏遅延補正済み）

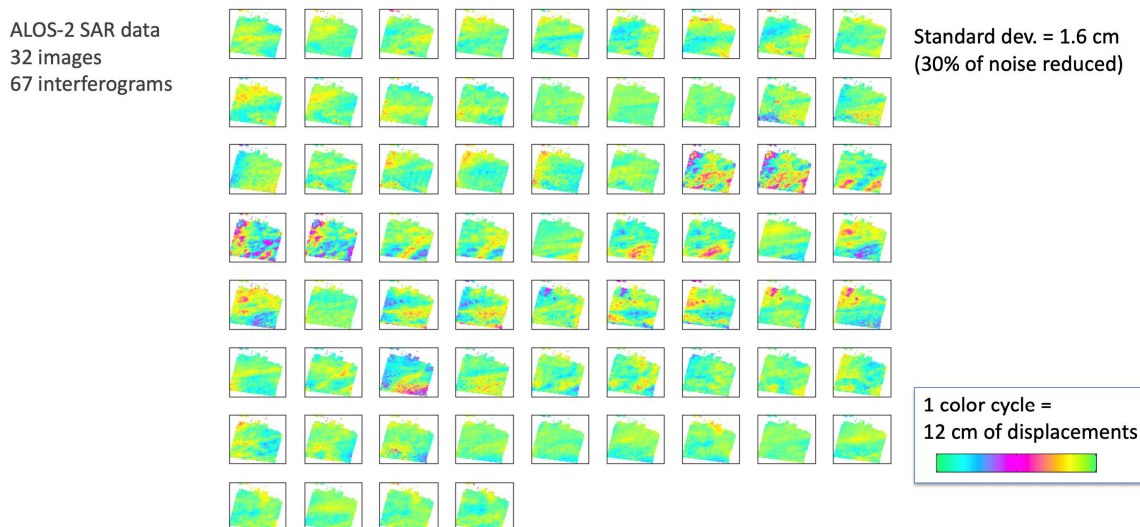


図2：図1の干渉画像に対し、GNSSによる大気遅延推定結果を用いて対流圏補正を施した結果

地震に伴う地盤変動に関しては、2022年福島県沖地震に伴う仙台市宅地造成地の谷埋め盛土の沈降について ALOS-2 データと Sentinel-1 データを用いた解析を進め、複数の造成地の一部の盛土部分について、地震時の沈下およびその後のゆっくりとした沈下が起きていることを明らかにした。典型的には、地震時沈下量は数 cm で、地震後には半年から一年程度かけて数 mm 程度の沈下が起きている。

さらに、2024年1月1日に発生した能登半島地震について ALOS-2 の緊急観測データを用いた解析を実施し、地震に伴う顕著な地殻変動を検出した(図3)。また、検出された変動について、地震 SAR 解析 WG の他メンバーとのメール議論も行った。

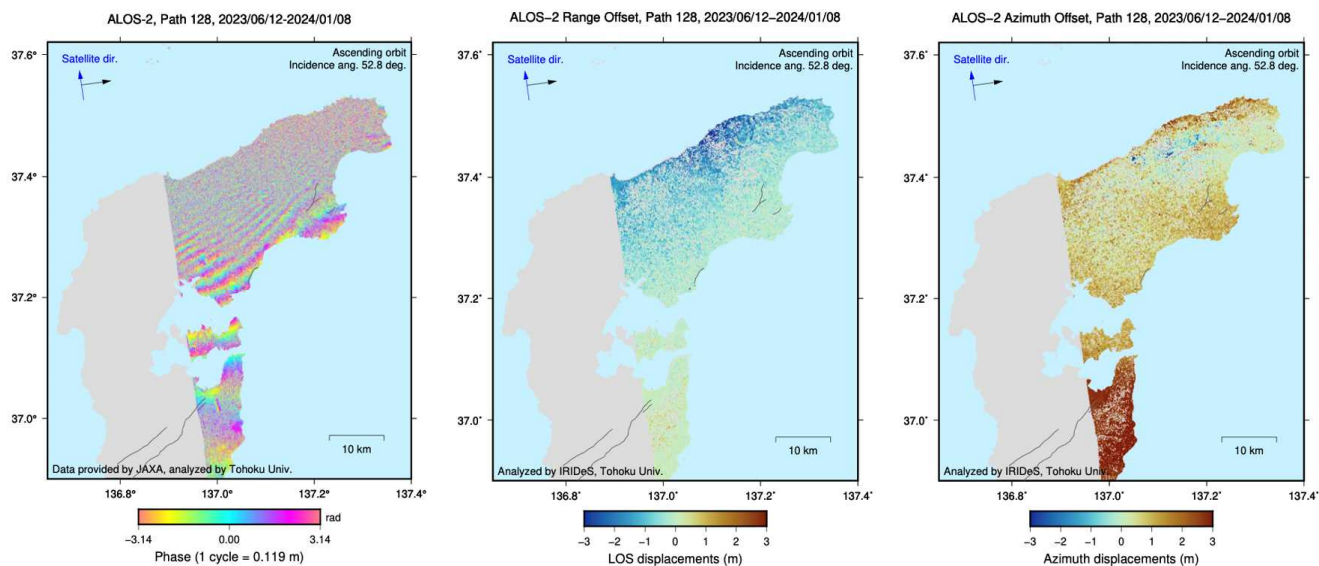


図3：能登半島地震に伴う変動の検出例。(左)干渉画像。(中・右)ピクセルオフセット解析により得られたレンジ方向およびアジマス方向の変動量。

成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：

宮嶋愛菜, 福島洋（2023）：InSAR 時系列解析と GNSS 観測を用いた宅地地盤変動の検出, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会

Sardila Nurulhikmah Sailellah, Yo Fukushima（2023）：Comparison of the GNSS tropospheric delays from different processing tools for InSAR correction, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会

Yo Fukushima（2023）：Challenges in using Artificial Intelligence on InSAR in the Japanese context, American Geophysical Union Fall Meeting 2023

来年度以降の課題・計画：

活断層周囲のひずみ場の検知レベル向上のため、引き続きノイズ軽減手法に取り組むとともに、InSAR 時系列解析結果と GNSS 変動時系列を融合させ、面的なひずみ分布マップを作成するための手法開発を行う。2024 年 1 月能登半島地震の変動について詳細な解析を実施する。

その他希望する支援（研修・サポート・ソフトウェア等）、地震 SAR 解析 WG への要望：

特になし

代表研究者 氏名 (所属機関) : 島田政信 (東京電機大学)

支援研究者 氏名 (所属機関) : 木戸洋斗、吉永誓也 (東京電機大学、理工研究科、修士)

課題名称 : 時系列干渉 SAR 解析を用いた地盤・地殻変動の検出、地震災害時の干渉画像の作成

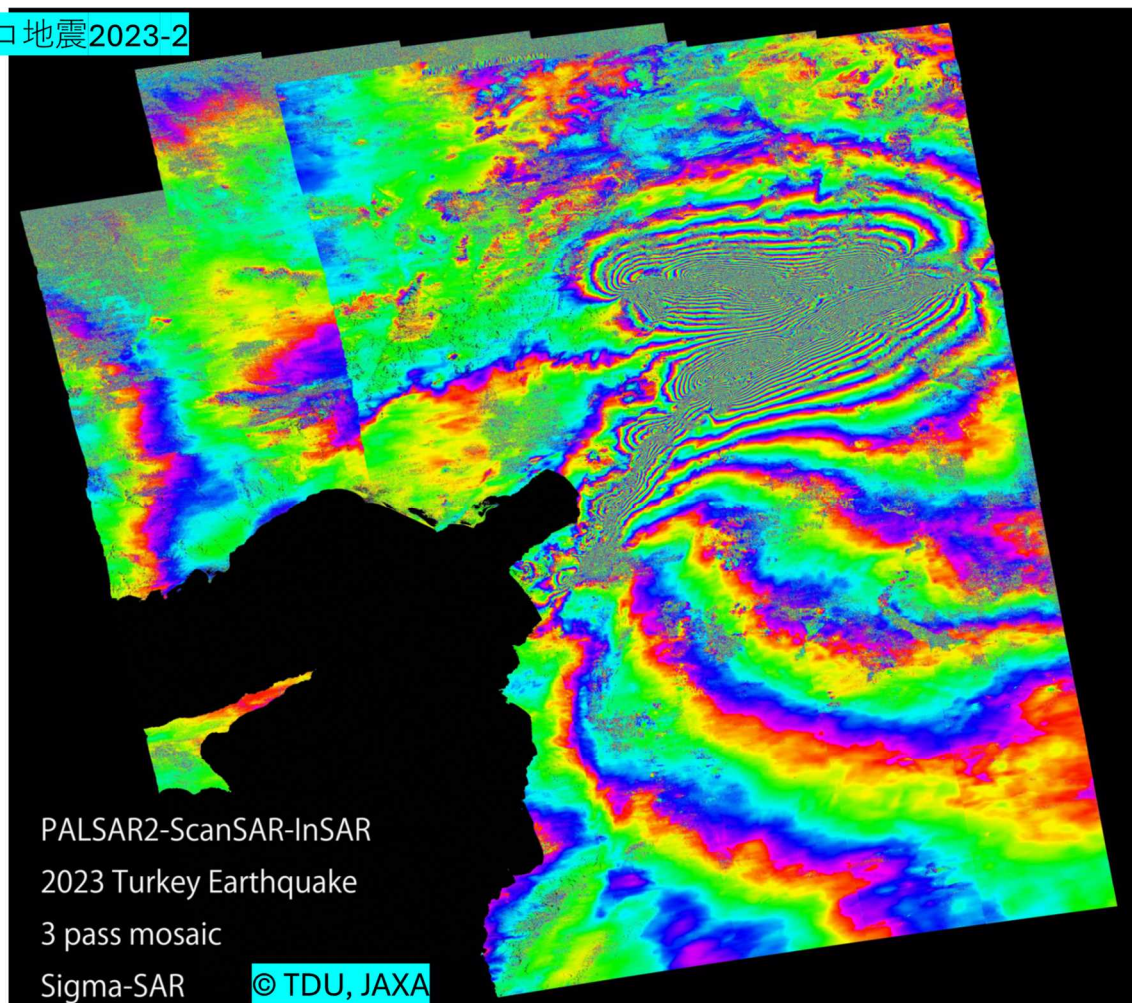
今年度の成果概要 :

埼玉県解析対象としていたが、昨年度ほぼ目的を達成し、かつ、埼玉の変動は大きくないために、場所を変更して研究を実施した。以下、実施内容を箇条書きにする。

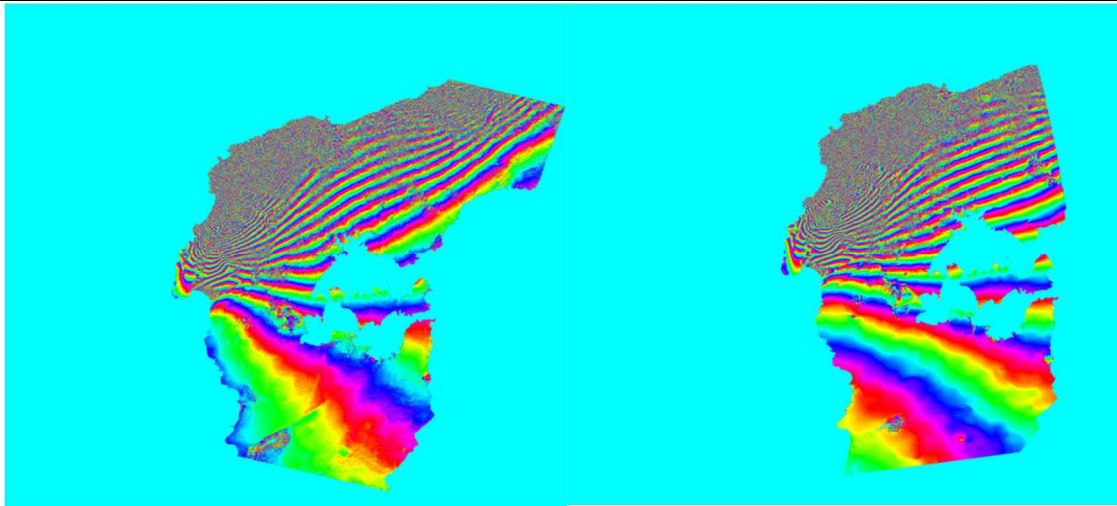
- 1) 高速道路の地盤沈下状況の解析 (東北自動車道、深沼地区) (時系列干渉解析)
- 2) 神戸ポートアイランドの地盤沈下状況の把握 (時系列干渉解析)
- 3) ニュージーランドのカンタベリー地震の解析 (アンラップの精度向上と 2.5 次元解析)
- 4) トルコ地震の解析 (ScanSAR 干渉とモザイク処理)
- 5) 能登半島地震の解析 (2023/5、2024/1 の地震)
- 6) その他、国内のいくつかの場所における地滑りや地盤沈下の解析 (時系列解析を中心として)
- 7) 水害域の抽出 (パキスタン水害、2019 年台風 19 号に伴う埼玉県内の水害域の抽出)
- 8) 解析ソフトウェア (Sigma-SAR) の機能強化と精度向上

以下に、いくつかの解析事例を添付する。

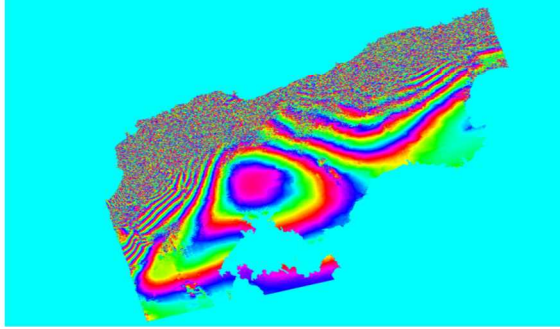
トルコ地震2023-2



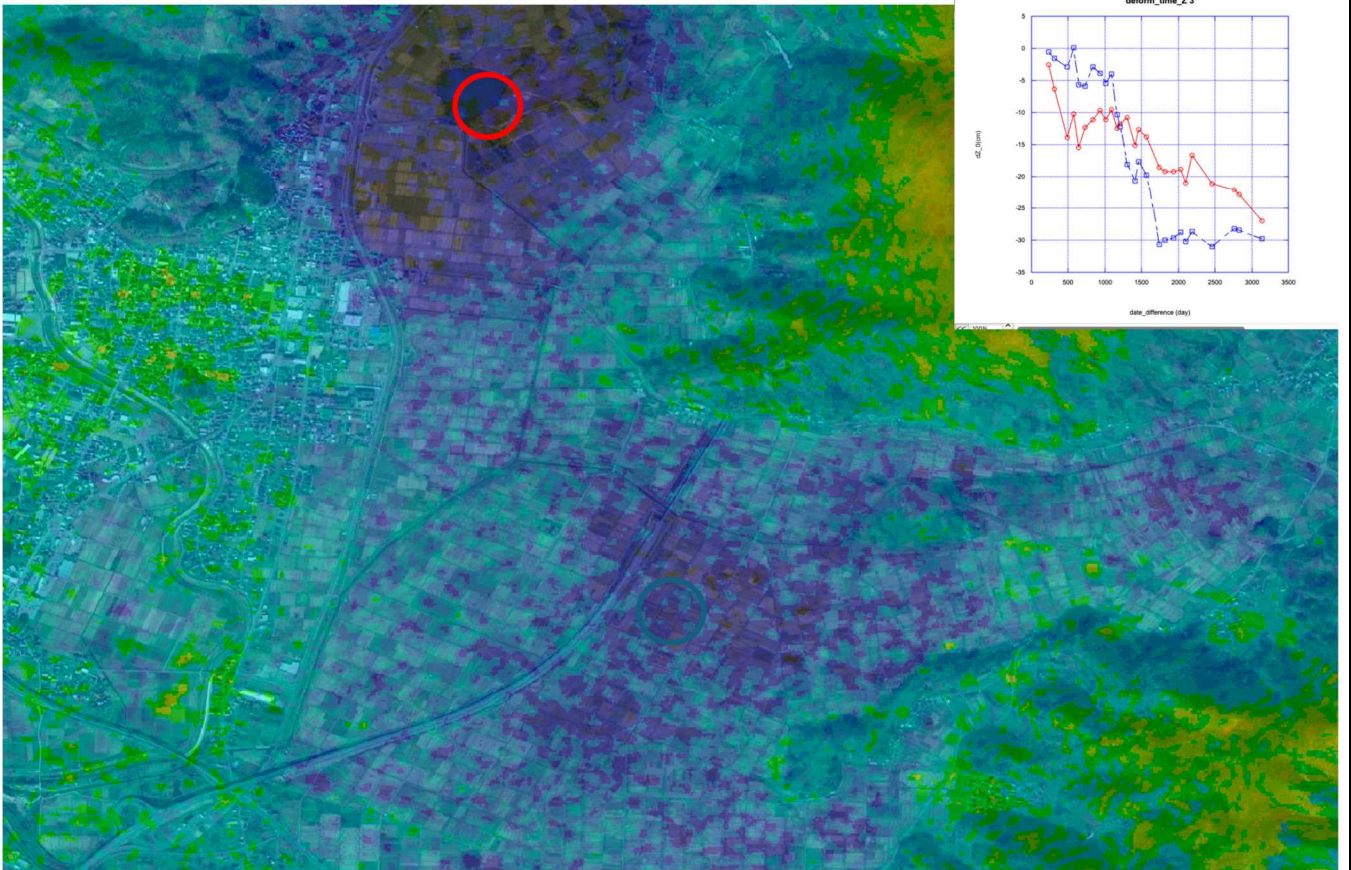




能登半島地震-2024



© TDU, JAXA



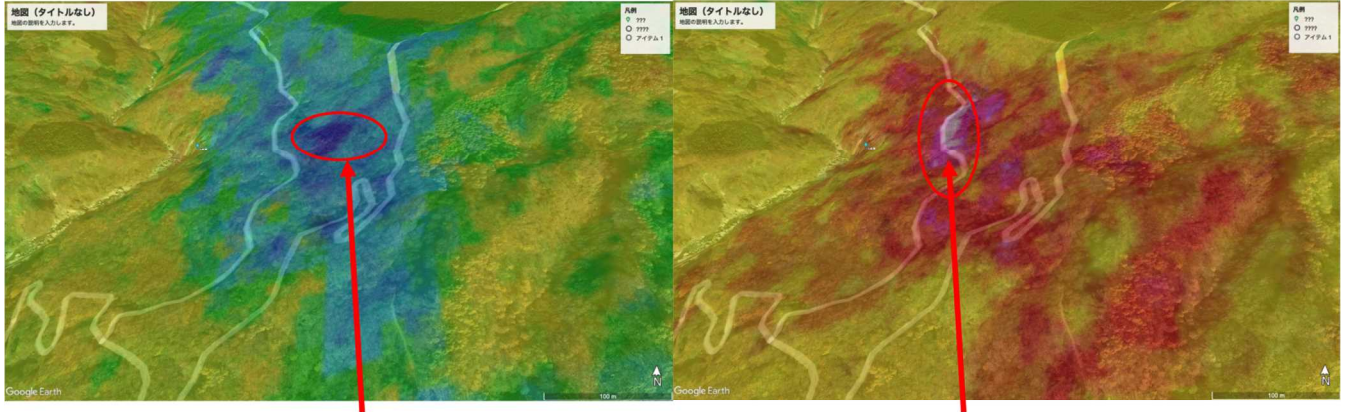
長沼

赤はまだ沈降中、青は沈降が止まる

©TDU,JAXA,シグマサー

水平変動

垂直変動



最大変動箇所

最大変動箇所

長野県地滑り事例

signa-sar

© TDU, JAXA

**成果発表の状況（今年度の予知連や学会を含めた成果発表の状況をお書き下さい。）：**

（1）木戸洋斗、島田政信,” 多偏波の時系列合成開口レーダ(SAR)を用いた洪水域の高精度な抽出の研究”, 東京大学地震研究所 特定共同研究 (B) 課題「高頻度 SAR 観測による地殻・地表変動研究 (2021-B-03)」2023 年度研究集会, 2024 年 2 月 22 日

（2）吉永誓也、島田政信,” ALOS-2/PALSAR-2 を用いた令和 6 年能登半島地震の地殻変動の抽出”, 東京大学地震研究所 特定共同研究 (B) 課題「高頻度 SAR 観測による地殻・地表変動研究 (2021-B-03)」2023 年度研究集会, 2024 年 2 月 21 日

（3）木戸洋斗、島田政信,” 水域検出における 2 偏波 SAR の擬似エントロピーの活用について”, (一社)日本リモートセンシング学会 第 75 回 (令和 5 年度秋季) 学術講演会 (仙台), 2023 年 11 月 22 日 p99-100

（4）吉永誓也、島田政信,” 高周波域のアンラップ精度の向上とその応用 : ALOS-2/PALSAR-2 を用いた 2016 年北カンタベリー地震の地殻変動の抽出”, (一社)日本リモートセンシング学会 第 75 回 (令和 5 年度秋季) 学術講演会 (仙台), 2023 年 11 月 21 日, pp.7-10

（5）木戸洋斗、島田政信,” SAR を用いた 2019 年台風 19 号に伴う埼玉県都幾川周辺の洪水域の抽出”, (一社)日本リモートセンシング学会 第 74 回 (令和 5 年度春季) 学術講演会 (船橋), 2023 年 6 月 2 日 p13-14

（6）吉永誓也、島田政信,” 2016 年北カンタベリー地震におけるマールボロ地方の地殻変動の抽出”, (一社)日本リモートセンシング学会 第 74 回 (令和 5 年度春季) 学術講演会 (船橋), 2023 年 6 月 2 日, pp.7-8

（7）木戸洋斗、島田政信,” SAR を用いた 2019 年台風 19 号に伴う埼玉県都幾川周辺の洪水域の抽出”, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会 (幕張), 2023 年 5 月 24 日

（8）吉永誓也、島田政信,” 2016 年北カンタベリー地震におけるマールボロ地方の地殻変動の抽出”, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会 (幕張), 2023 年 5 月 24 日

（9）島田政信, “合成開口レーダによる高精度な地球観測の原理と実際”, 東京電機大学出版, 2023 年 11 月 12 日、ISBN978-4501-335502, pp520

**来年度以降の課題・計画：**

- 1) 埼玉県を観測した ALOS-2, ALOS の 2023-24 年のデータ (未入手分のみ) を入手し 2014 年～2024 年の時系列解析を行う。
- 2) 随時、解析機能を付加する。
- 3) 災害時の解析研究を実施する。
- 4) 地震 WG への希望は、ALOS-2 の即時データは主として、GPS 軌道が使用されるが精度の点で難点がある。画像解析は繰り返し繰り返し実施されるので、軌道データも都度都度アップデートされ、精密軌道に改訂していただきたい。

**その他希望する支援 (研修・サポート・ソフトウェア等)、地震 SAR 解析 WG への要望：**

国内の時系列データの提供を今年度と同様に行っていただけますと幸いです。