

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）：桑原将旗、小林知勝、矢来博司、藤原智、佐藤雄大、石本正芳、三木原香乃、市村美沙、古居晴菜、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5地震（国内1、海外4）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 2022-06-19, Mj5.4)

2022年6月19日に能登半島地方で発生したMj5.4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ている。解析に用いたデータの諸元を表1に示す。

解析の結果（図1）、ノイズレベルを超える変動は見られなかった。

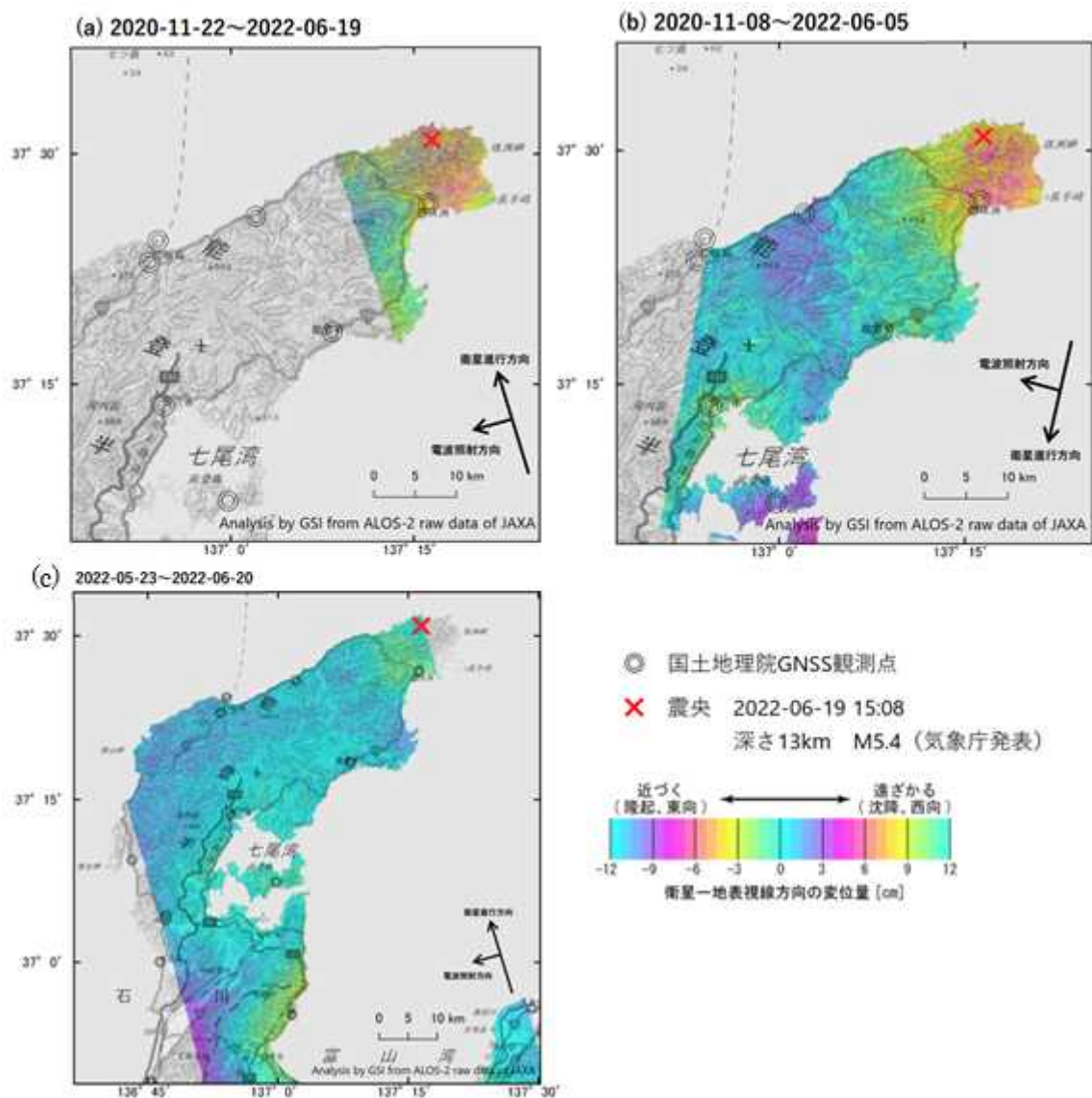


図1. 能登半島地方のSAR干渉解析結果

表 1. 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
1-(a)	2020-11-22 2022-06-19	22:50 頃	北行	左	高分解能 (3m)	55.2°	-109m
1-(b)	2020-11-08 2022-06-05	23:45 頃	南行	右	高分解能 (3m-6m)	36.2°	+159m
1-(c)	2022-05-23 2022-06-20	23:10 頃	北行	左	高分解能 (3m)	32.5°	+129m

(2) アフガニスタンの地震 (2022-06-21, Mw5.9)

2022年6月21日(UTC)にアフガニスタンで Mw5.9 (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用いた。解析結果を図2に示す。また、解析に用いたデータの諸元を表2に示す。最大で 10cm を超える地殻変動を観測した。

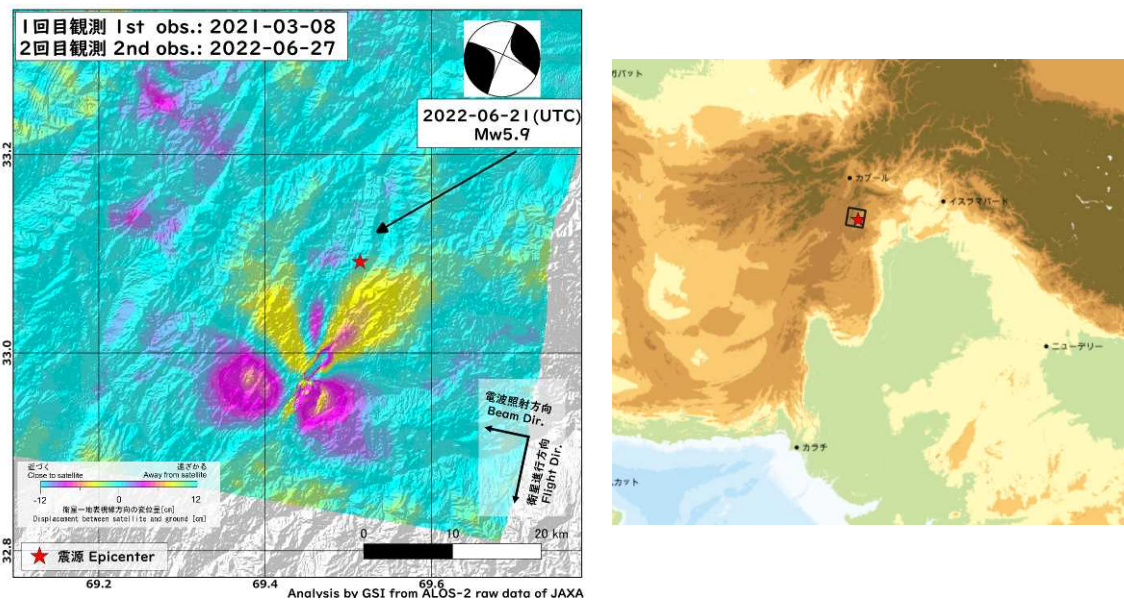


図 2. アフガニスタンの地震の SAR 干渉解析結果と解析範囲

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 (震央付近)	垂直基線長
2	2021-03-08 2022-06-27	7:22 頃	南行	右	高分解能 (10m)	40.0°	-136m

(3) 台湾の地震 (2022-09-17: Mw6.5, 2022-09-18: Mw6.9)

2022年9月17日(UTC)と2022年9月18日(UTC)に台湾でそれぞれ Mw6.5 と Mw6.9 (USGS) の地震が発生した。これら地震について、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用いた。

解析結果を図3、図4に示す。また、解析に用いたデータの諸元を表3に示す。図3は SAR 干渉解析の全体図、図4は図3の高分解能モードの一部を拡大した図である。断層線は Styron et al. (2020) を使用した。図3によると Longitudinal Valley Fault および Central Range Fault に沿って地殻変動

が見られ、断層帯の東側に比べて西側で大きな変動量が観測されたことが分かった。図 4 によると上記の断層帯の近傍の一部で非干渉領域が見られ、地震活動に伴って地表面が変動した可能性があることが分かった。またこれら図から変動域では最大 1m 程度の衛星に近づく変動が観測された。

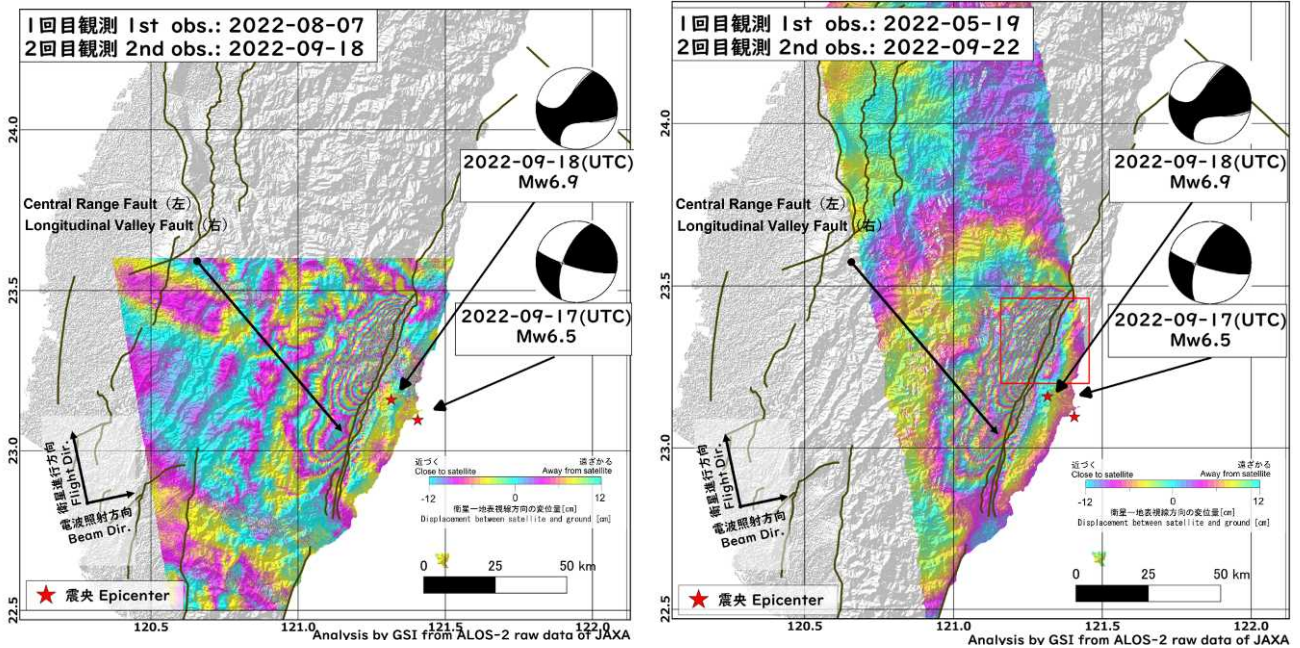


図 3. 台湾の地震の SAR 干渉解析結果(左:広域観測モード, 右:高分解能モード)

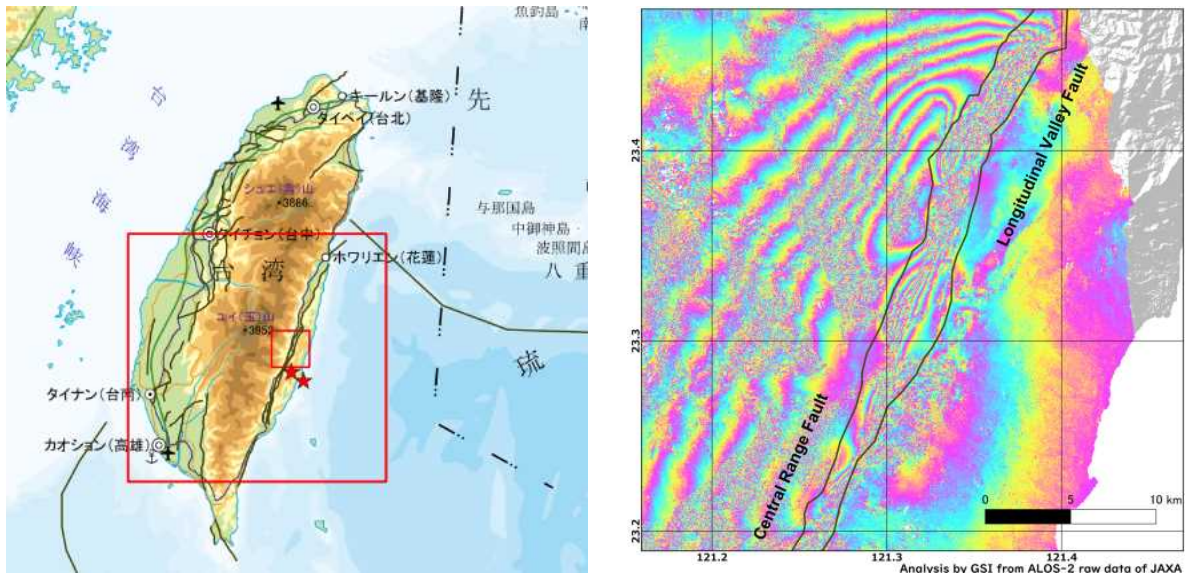


図 4. 台湾の地震の SAR 干渉解析結果(左:解析エリア, 右:高分解能モードの拡大図)

表 3. 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
3	2022-08-07 2022-09-18	16:11 頃	北行	右	広域観測 (350km)	55.1°	-170m
3,4	2022-05-19 2022-09-22	15:57 頃	北行	右	高分解能 (10m)	38.0°	72m

(4) メキシコの地震 (2022-09-19, Mw7.7)

2022年9月19日(UTC)にメキシコでMw7.7(メキシコ地震観測登録センター, CIRES)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用いた。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4に示す。

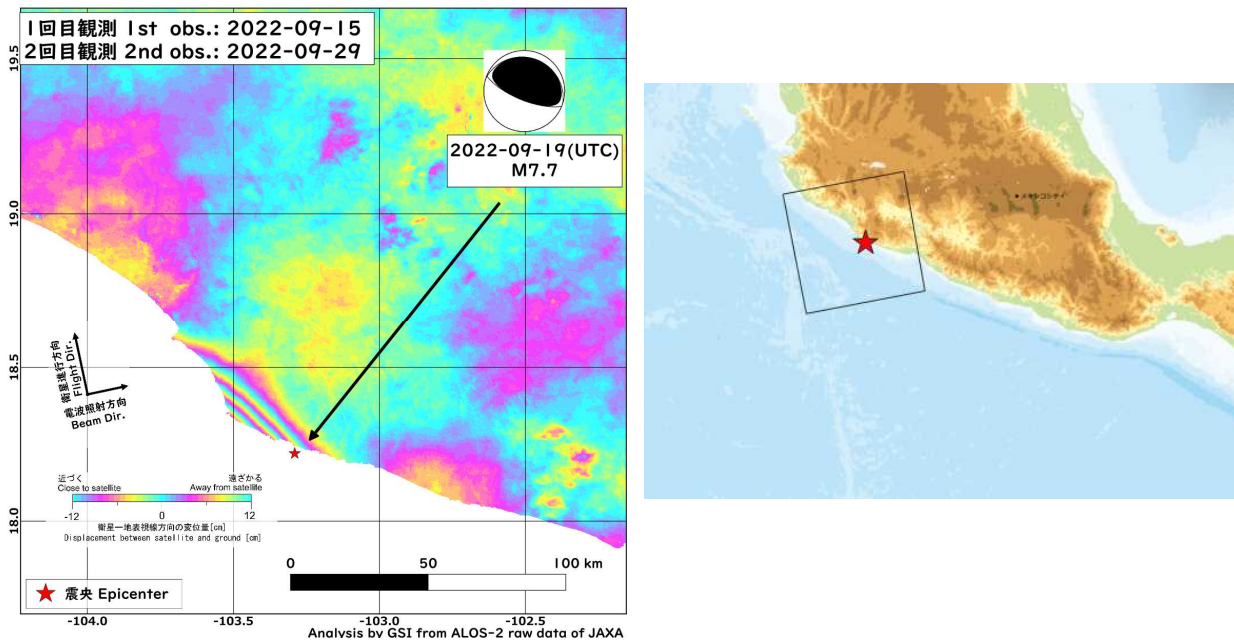


図5. メキシコの地震のSAR干渉解析結果と解析範囲

表4. 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(震央付近)	垂直基線長
5	2022-09-15 2022-09-29	7:00頃	北行	右	広域観測(350km)	43.6°	25m

(5) トルコ共和国の地震 (2023-02-06: Mw7.7, 2023-02-06: Mw7.6)

2022年2月6日(UTC)にトルコ共和国でそれぞれMw7.7とMw7.6(トルコ防災危機管理庁、AFAD)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干渉解析とピクセルオフセット法による解析を行った。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用いた。解析結果を図6~14に示す。また、解析に用いたデータの諸元を表5に示す。断層線はStyron et al. (2020)を使用した。

東アナトリア断層(East Anatolian Fault)およびチャルダック断層(Çardak Fault)に沿って地殻変動が見られた。この地殻変動は地震のメカニズム(左横ずれ)と整合的となった。SAR干渉解析では、上記の断層の近傍で地震に伴って地表面が変化することが原因と思われる非干渉領域が見られた。ピクセルオフセット法による解析より、東アナトリア断層を挟んで最大で5mを超える変動、チャルダック断層を挟んで最大で4m程度の変動を検出した。

表 5. 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 (震央付近)	垂直基線長
6	2022-04-06 2023-02-08	9:40 頃	南行	右	高分解能 (10m)	31.7°	-435m
7,8	2022-09-10 2023-02-11	21:35 頃	北行	右	広域観測 (350km)	47.4°	-233m
7,8	2022-09-11 2023-02-12	9:25 頃	南行	右	広域観測 (350km)	47.4°	+464m
9,10	2019-09-18 2023-02-15	21:21 頃	北行	右	広域観測 (350km)	44.9°	-16m
11,12	2022-09-16 2023-02-17	9:33 頃	南行	右	広域観測 (350km)	41.5°	-49m
13,14	2022-09-05 2023-02-20	21:28 頃	北行	右	広域観測 (350km)	40.5°	+15m

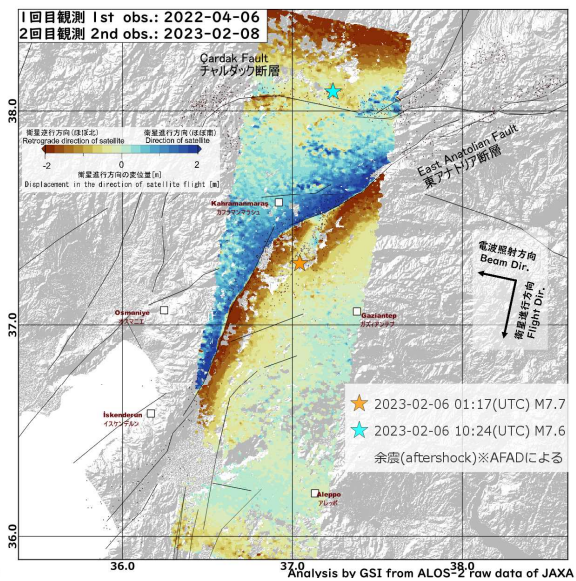
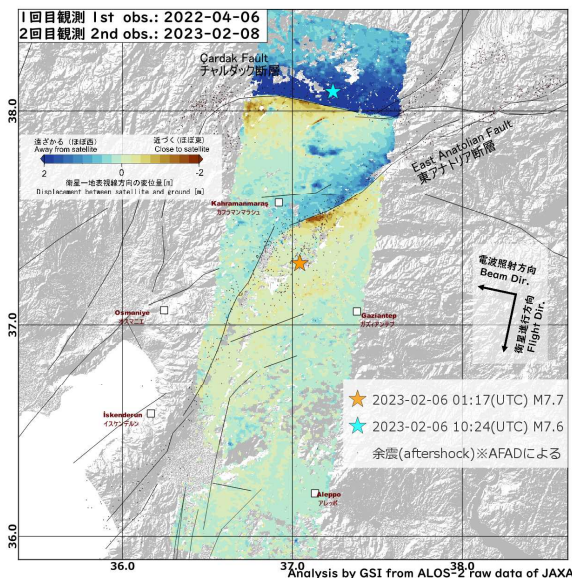
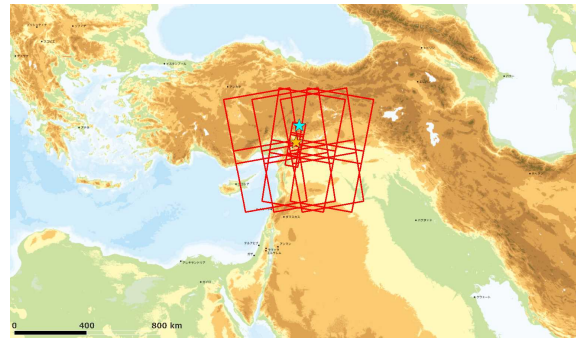
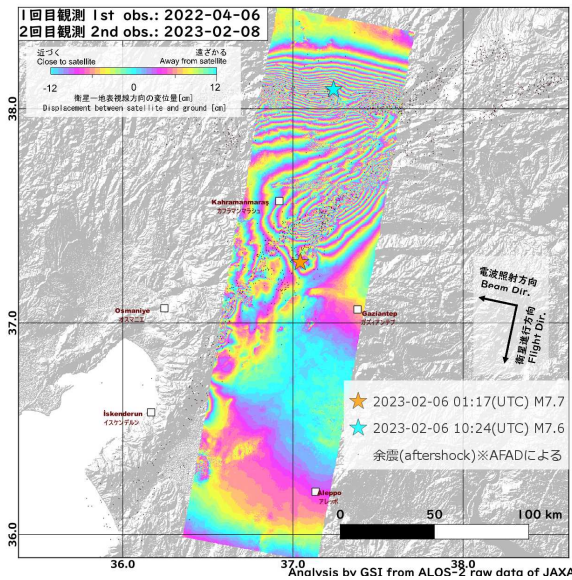


図6. トルコ共和国の地震の SAR 干渉解析とピクセルオフセット法による解析結果と解析範囲(左上:干渉 SAR 解析, 左下:ピクセルオフセット法-衛星視線方向, 右下:ピクセルオフセット法-衛星進行方向)

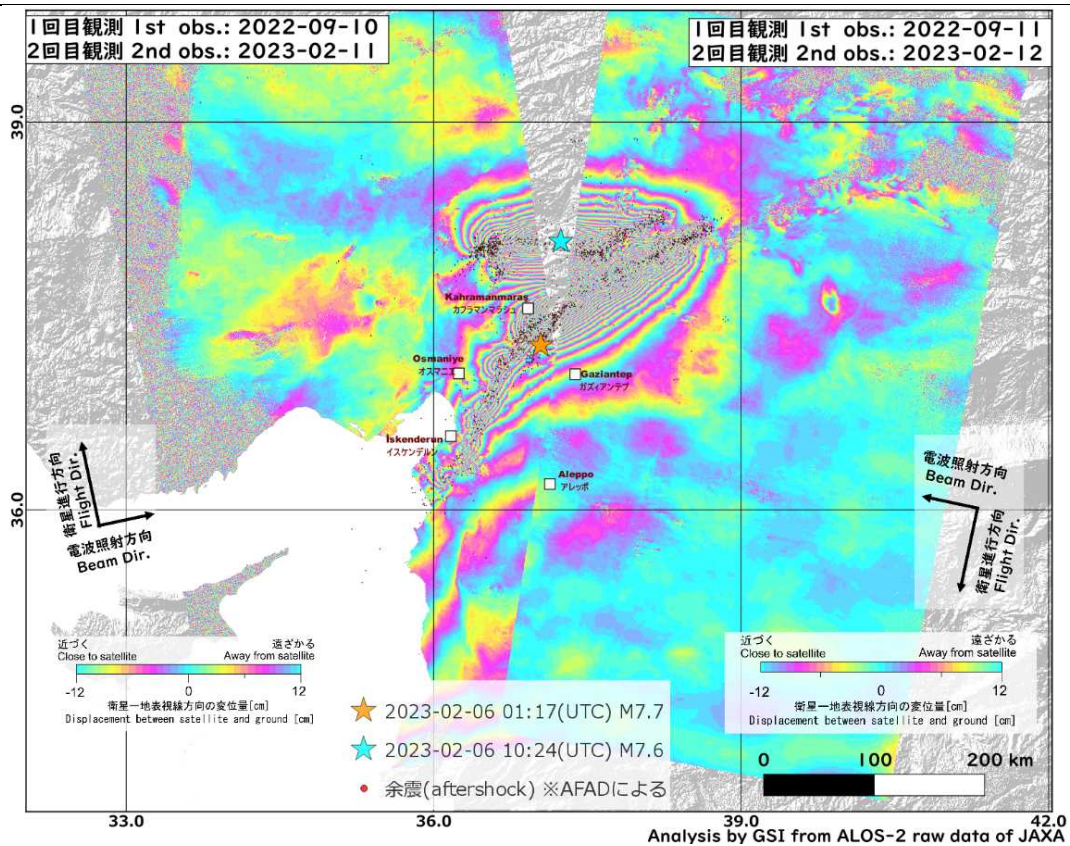


図7.トルコ共和国の地震の SAR 干渉解析結果

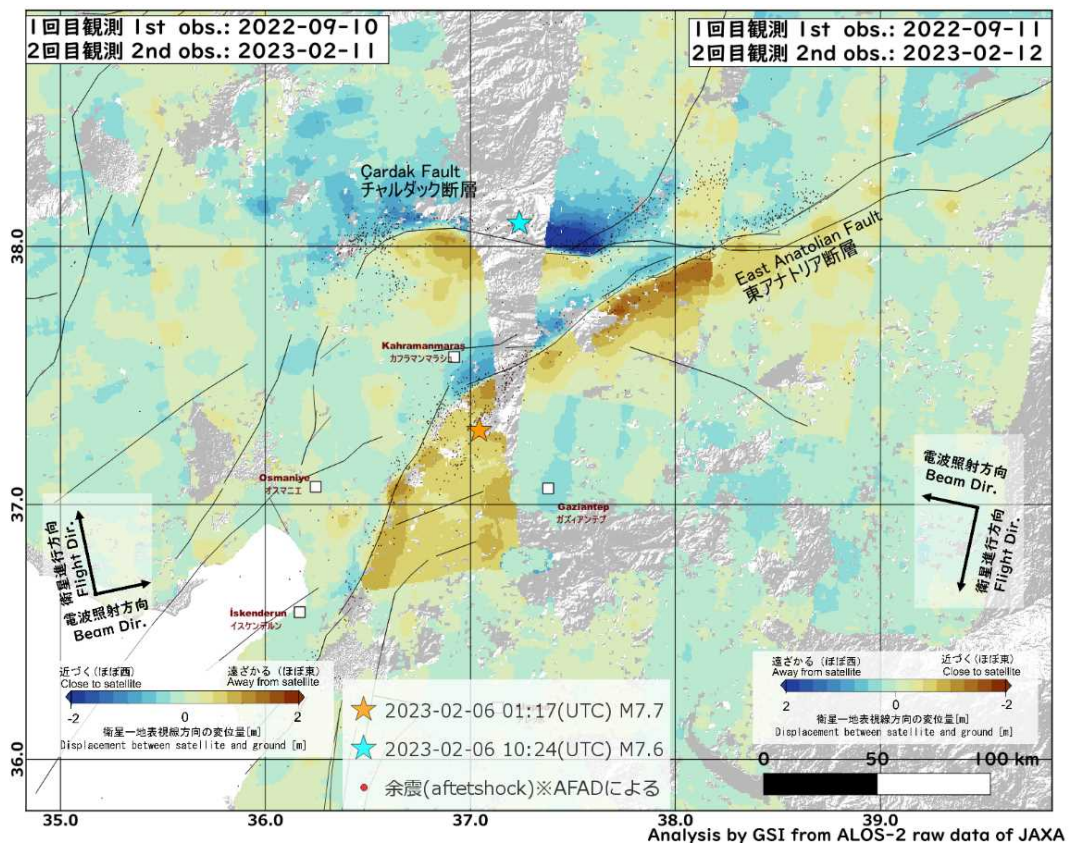


図8.トルコ共和国の地震のピクセルオフセット法による解析結果(衛星視線方向)

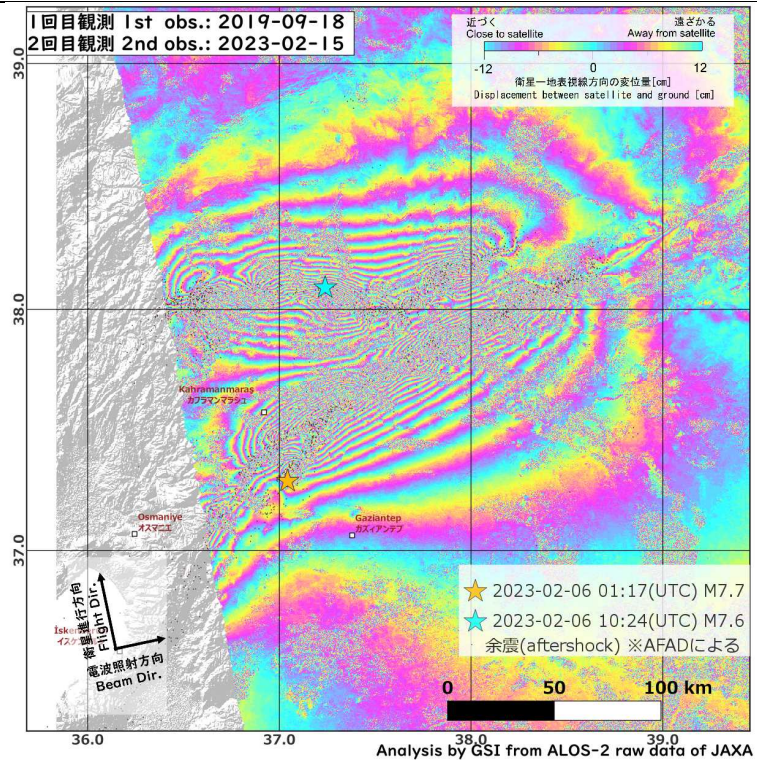


図9.トルコ共和国の地震の SAR 干渉解析結果

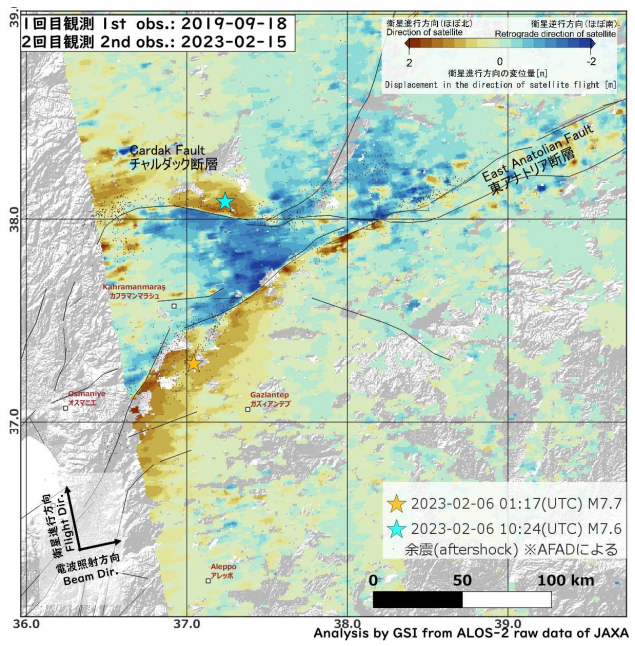
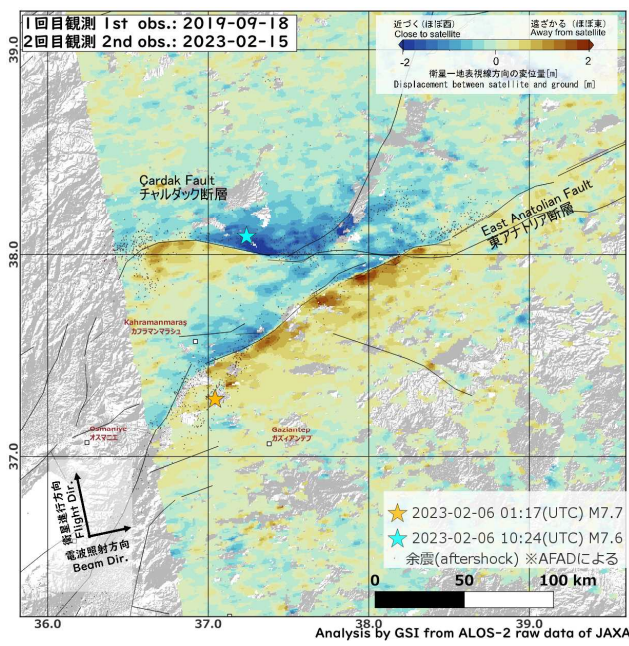


図10.トルコ共和国の地震のピクセルオフセット法による解析結果(左:衛星視線方向, 右:衛星進行方向)

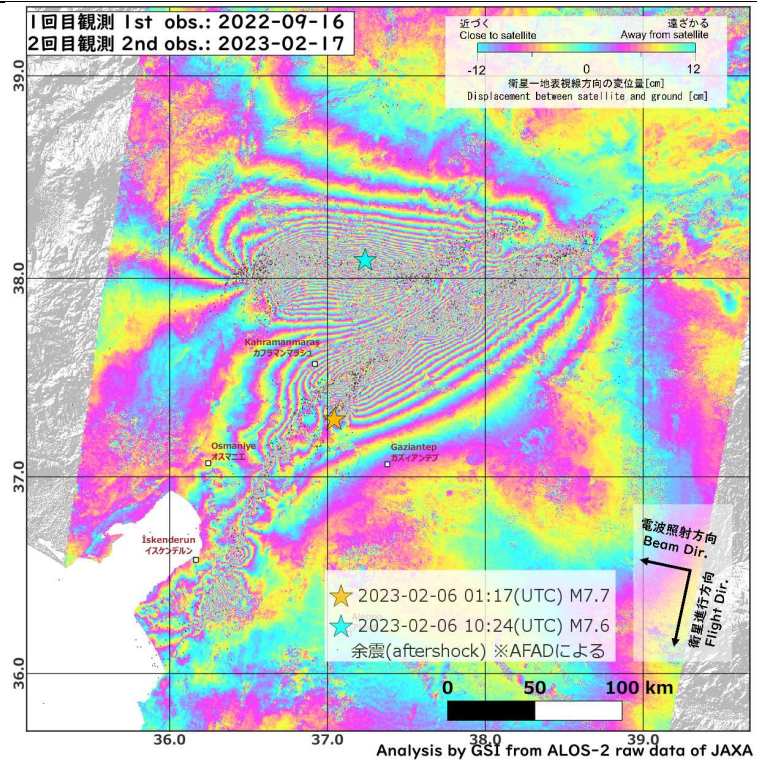


図11.トルコ共和国の地震の SAR 干渉解析結果

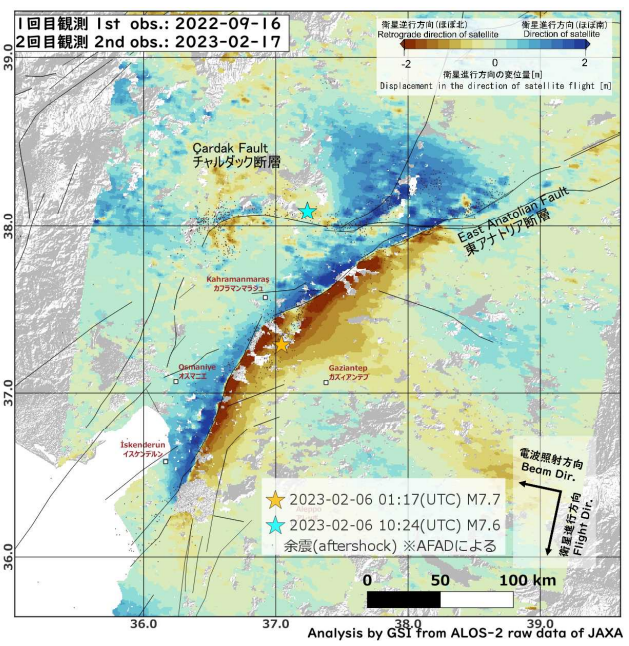
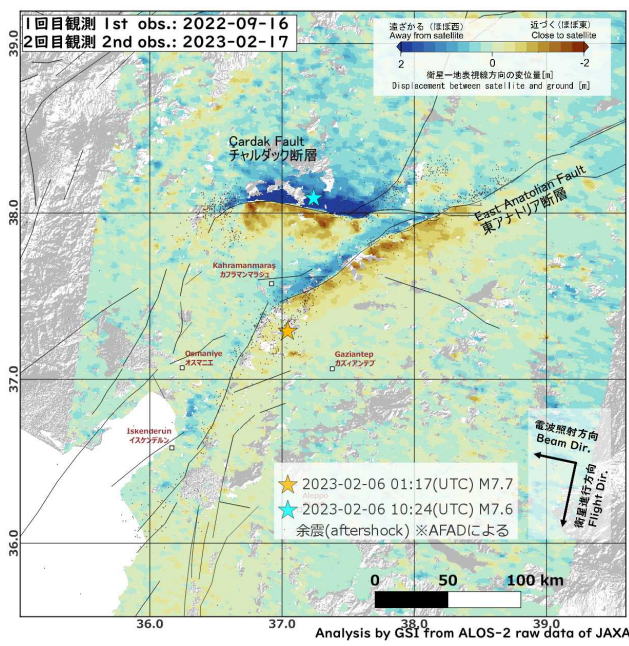


図12.トルコ共和国の地震のピクセルオフセット法による解析結果(左:衛星視線方向, 右:衛星進行方向)

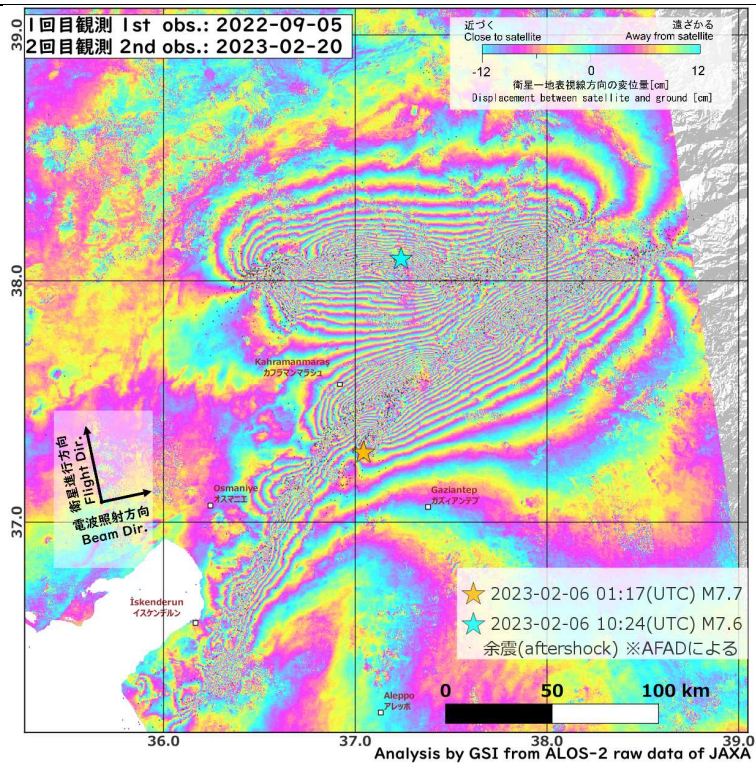


図13. トルコ共和国の地震の SAR 干渉解析結果

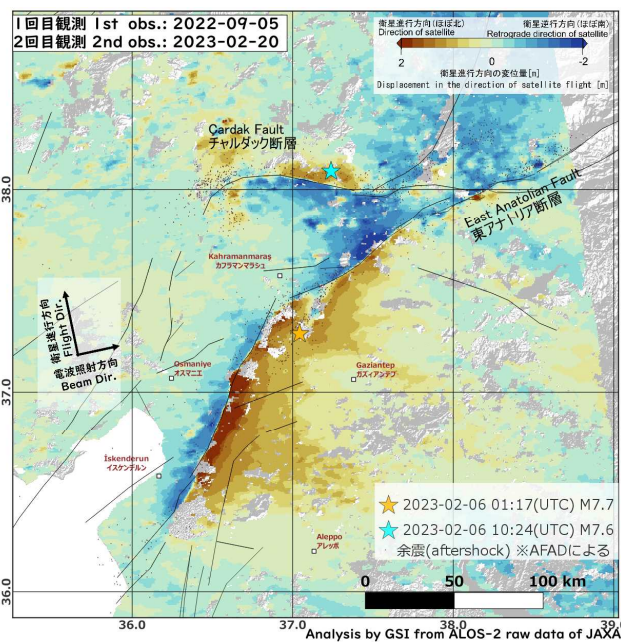
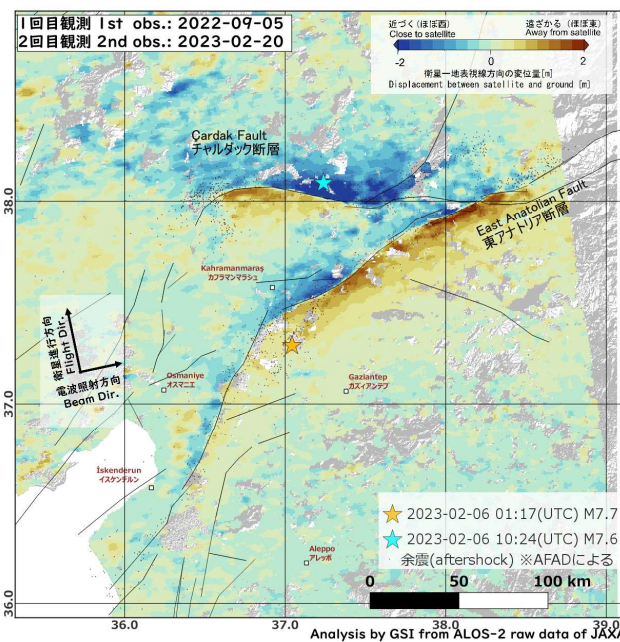


図14. トルコ共和国の地震のピクセルオフセット法による解析結果(左:衛星視線方向, 右:衛星進行方向)

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、松尾功二、安藤亮輔、中埜貴元（2022）、2016年熊本地震の断層終端部における断層運動と地下の密度構造の関係～なぜ断層破壊は阿蘇カルデラ内で止まったのか？～、日本地球惑星科学連合2022年大会

○地震予知連絡会

- ・国土地理院（2022）2022年6月21日アフガニスタンの地震 だいち2号 SAR 干渉解析結果, 第236回地震予知連絡会資料
- ・国土地理院（2022）2022年9月18日台湾の地震 だいち2号 SAR 干渉解析結果, 第237回地震予知連絡会資料
- ・国土地理院（2022）2022年9月19日メキシコの地震 だいち2号 SAR 干渉解析結果, 第237回地震予知連絡会資料
- ・国土地理院（2023）2023年2月6日トルコ共和国の地震 だいち2号 SAR 干渉解析結果, 第238回地震予知連絡会資料

○地震調査委員会

- ・国土地理院（2022）「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（2022年6月19日）の地殻変動, 第374回地震調査委員会（臨時会）
- ・国土地理院（2022）「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（2022年6月19日）の地殻変動, 第375回地震調査委員会
- ・国土地理院（2022）2022年6月21日アフガニスタンの地震 だいち2号 SAR 干渉解析結果, 第375回地震調査委員会
- ・国土地理院（2022）2022年9月18日台湾の地震 だいち2号 SAR 干渉解析結果, 第378回地震調査委員会
- ・国土地理院（2022）2022年9月19日メキシコの地震 だいち2号 SAR 干渉解析結果, 第378回地震調査委員会
- ・国土地理院（2023）2023年2月6日トルコ共和国の地震 だいち2号 SAR 干渉解析結果, 第382回地震調査委員会

○Web

- ・国土地理院（2022）2022年6月21日アフガニスタンの地震に伴う地殻変動,
https://www.gsi.go.jp/cais/topic20220621_afghanistan.html(accessed 10 Mar. 2023)
- ・国土地理院（2022）2022年9月18日台湾の地震に伴う地殻変動,
https://www.gsi.go.jp/cais/topic20220918_taiwan.html(accessed 10 Mar. 2023)
- ・国土地理院（2022）2022年9月19日メキシコの地震に伴う地殻変動,
https://www.gsi.go.jp/cais/topic20220919_Mexico.html(accessed 10 Mar. 2023)
- ・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 10 Mar. 2023)

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4年度地震 SAR 解析 WG 課題別成果報告票 地震-0402

代表研究者 氏名（所属機関）：小澤 拓（防災科学技術研究所 火山防災研究部門）
支援研究者 氏名（所属機関）：姫松 裕志（防災科学技術研究所）
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： 令和4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。）： 特になし
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) : 宮岡一樹 (気象庁地震火山部管理課)

支援研究者 氏名 (所属機関) : 瀧山弘明、吉本昌弘、廣田伸之、岩村公太、森脇健 (以上、気象庁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 :

海外で発生した地震について、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 解析を行い、地震に伴う地殻変動を検出した。表 1 に解析した主な地震イベントを示す。

表 1. 海外で発生した地震解析リスト (震源は USGS による。Mw は GCMT 解を用いた)

震央地名	発生時刻 (UTC)	緯度	経度	深さ	Mw	図
アフガニスタン南東部	2022 年 06 月 21 日 20 時 54 分	N33° 05.5′	E 69° 30.8′	10km	6.2	1, 2
イラン南部	2022 年 07 月 01 日 21 時 32 分	N26° 54.3′	E 55° 14.3′	16km	6.0	3
イラン南部	2022 年 07 月 01 日 23 時 25 分	N26° 53.2′	E 55° 19.2′	10km	6.1	3
フィリピン諸島ルソン	2022 年 07 月 27 日 00 時 43 分	N17° 33.6′	E120° 48.0′	10km	7.1	4
メキシコ、ミチョアカン州	2022 年 09 月 19 日 18 時 05 分	N18° 28.9′	W102° 59.9′	16km	7.7	5
メキシコ、ミチョアカン州	2022 年 09 月 22 日 06 時 16 分	N18° 18.4′	W102° 55.3′	24km	6.7	5
トルコ北西部	2022 年 11 月 23 日 01 時 08 分	N40° 50.1′	E 30° 58.9′	10km	6.1	6
トルコ南部	2023 年 02 月 06 日 01 時 17 分	N37° 10.0′	E 37° 02.5′	24km	7.8	7, 8, 9
トルコ南部	2023 年 02 月 06 日 01 時 28 分	N37° 07.6′	E 36° 56.6′	15km	6.8	7, 8, 9
トルコ南部	2023 年 02 月 06 日 10 時 24 分	N38° 01.4′	E 37° 12.2′	10km	7.7	7, 8, 9

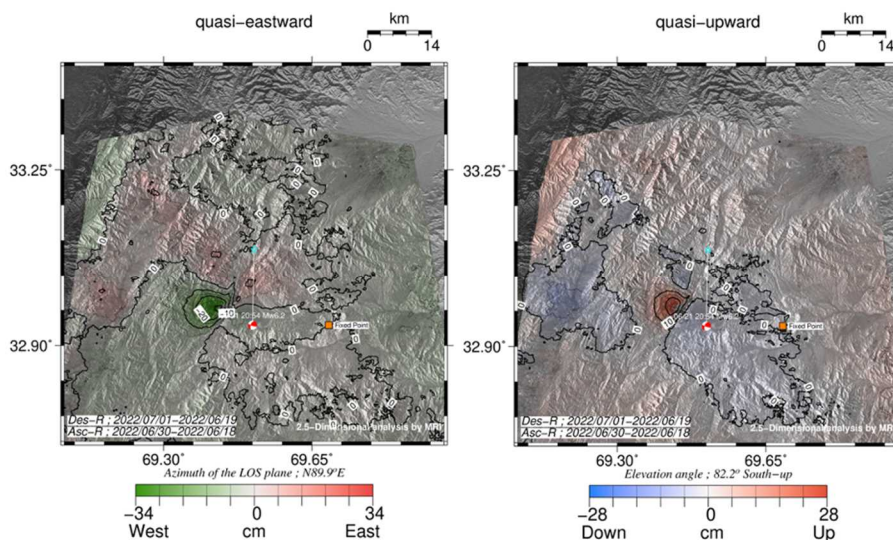


図 1 2022 年 6 月 21 日にアフガニスタン南東部で発生した地震の Sentinel-1 データを用いた干渉画像から計算された 2.5 次元解析結果 (左 : 準東西方向、右 : 準上下方向)。図中の星印は震央、震源球は Global CMT を使用した。

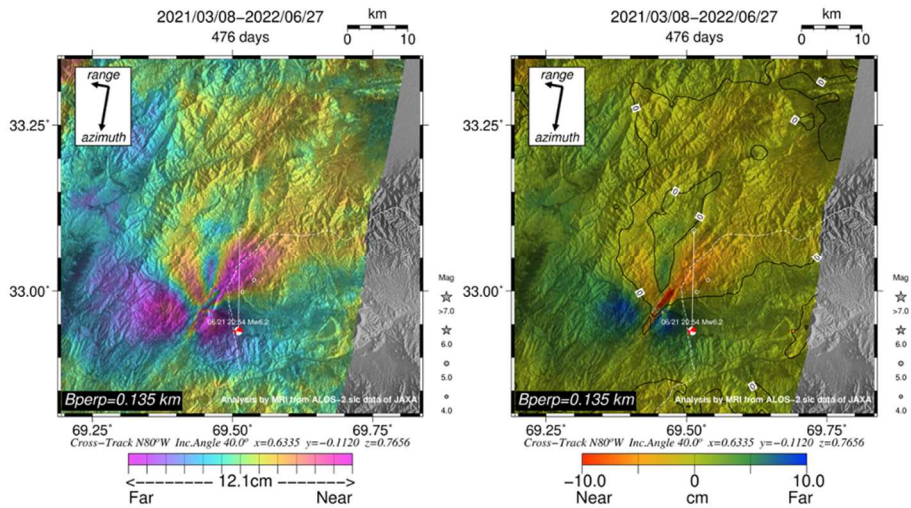


図2 2022年6月21日にアフガニスタン南東部で発生した地震のALOS-2/PALSAR-2データ（パス58）を用いた干渉解析結果（左：干渉画像、右：アンラップ画像）。電離圏遅延補正済み。大気遅延補正なし。基線再推定あり。図中の星印は震央、震源球はGlobal CMTを使用した。

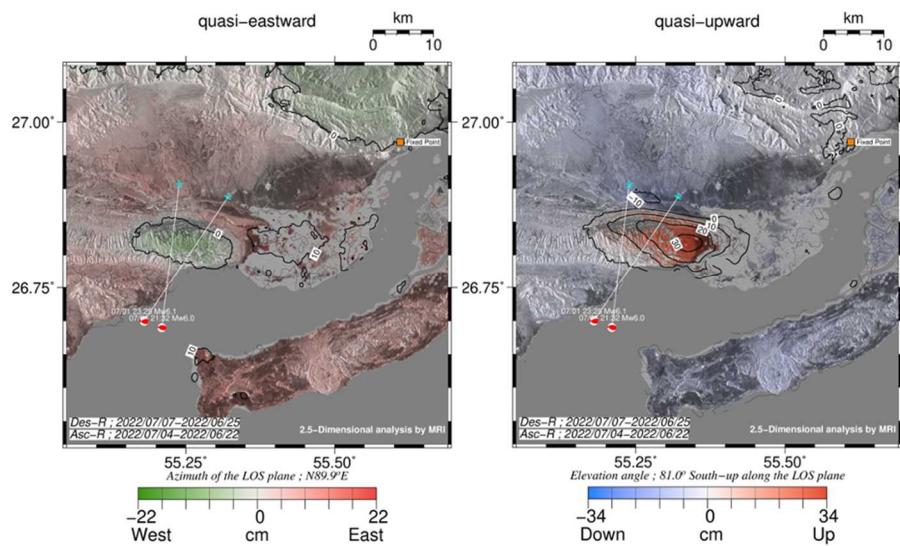


図3 2022年7月1日にイラン南部で発生した地震のSentinel-1データを用いた干渉画像から計算された2.5次元解析結果（左：準東西方向、右：準上下方向）。図中の星印は震央、震源球はGlobal CMTを使用した。

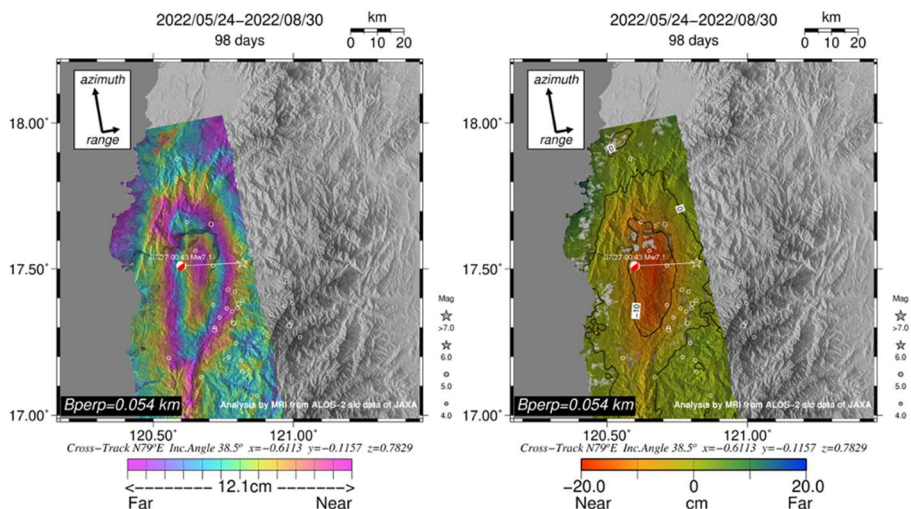


図4 2022年7月27日 フィリピンルソン島で発生した地震の ALOS-2/PALSAR-2 データ (パス 138) を用いた干渉解析結果 (左: 干渉画像、右: アンラップ画像)。電離圏遅延補正済み。大気遅延補正なし。基線再推定あり。図中の星印は震央、震源球は Global CMT を使用した。

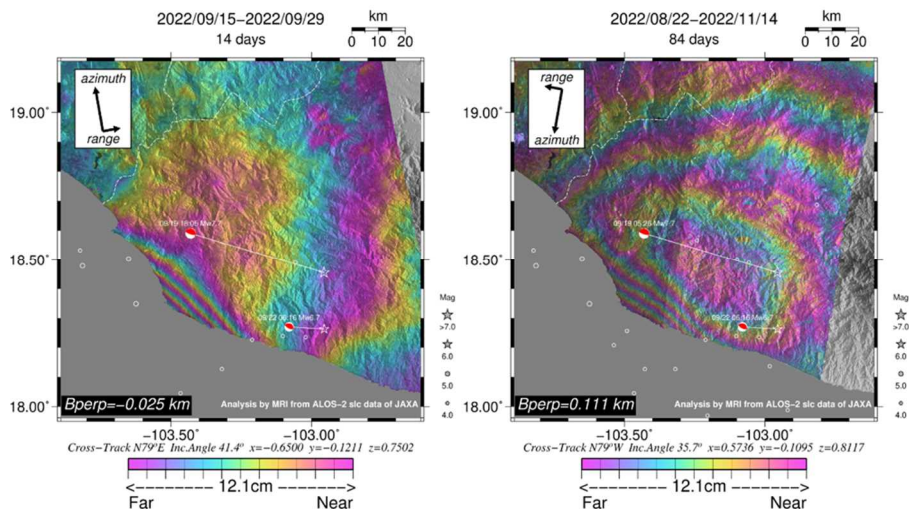


図5 2022年9月19日 メキシコで発生した地震の ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた干渉解析結果 (左: 北行軌道: パス 60、右: 南行軌道: パス 156)。電離圏遅延補正なし。大気遅延補正なし。基線再推定あり。図中の星印は震央、震源球は Global CMT を使用した。

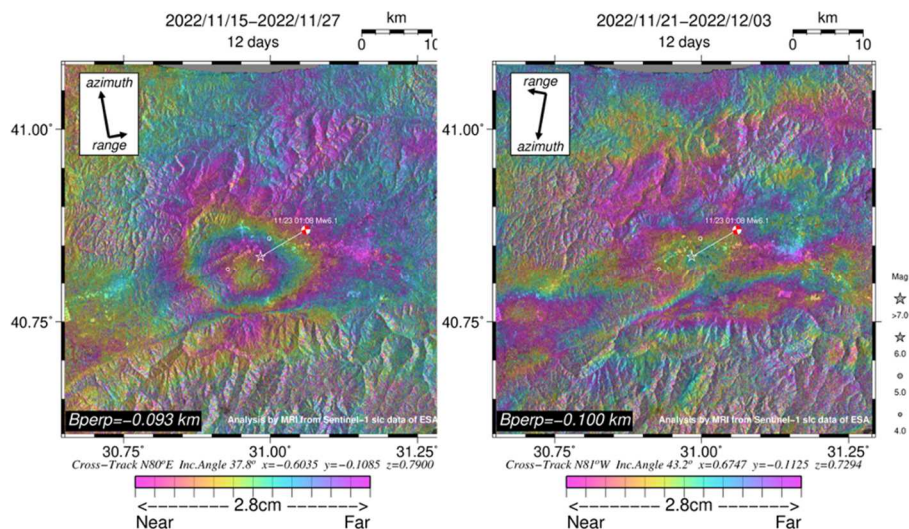


図6 2022年11月23日 トルコ北西部で発生した地震の Sentinel-1 データを用いた干渉解析結果 (左: 北行軌道、右: 南行軌道)。図中の星印は震央、震源球は Global CMT を使用した。

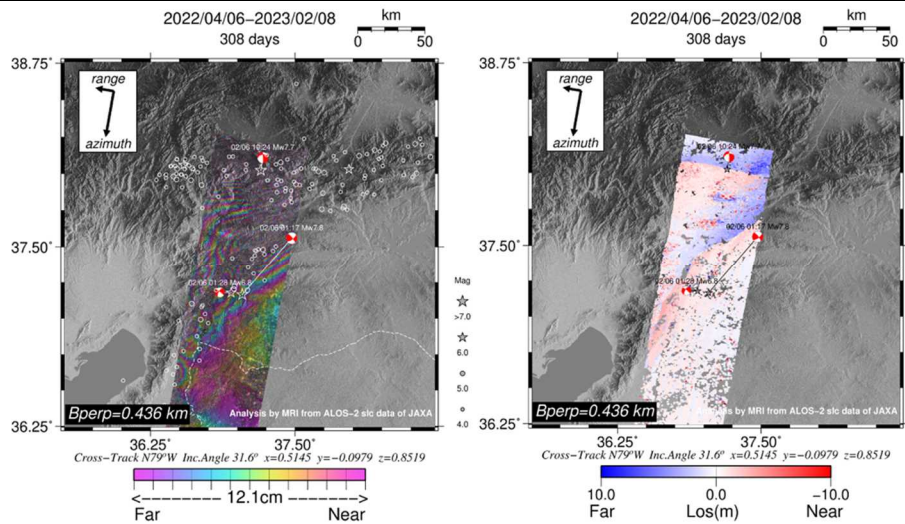


図7 2023年2月6日 トルコ南部で発生した地震のALOS-2/PALSAR-2データ(パス78)を用いた干渉解析(左)とピクセルオフセット解析(右)結果。電離圏遅延補正なし。大気遅延補正あり。基線再推定あり。図中の星印は震央、震源球はGlobal CMTを使用した。

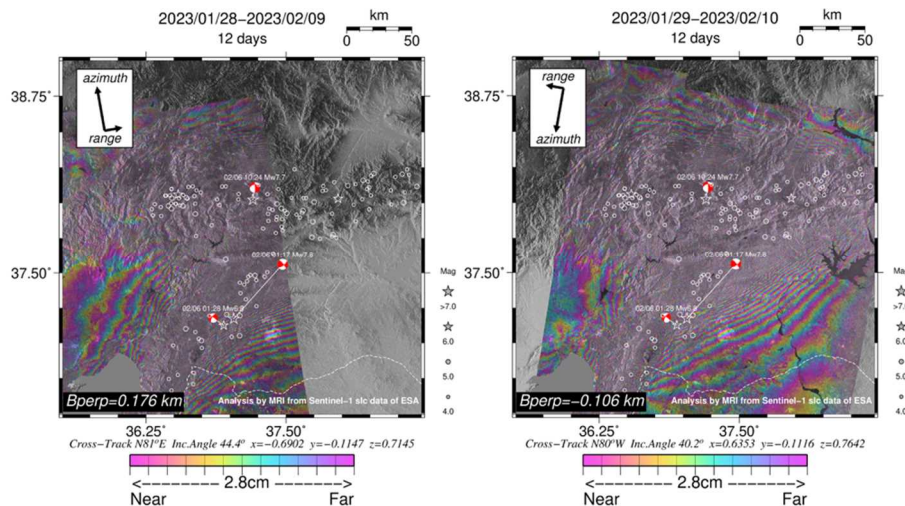


図8 2023年2月6日 トルコ南部で発生した地震のSentinel-1データを用いた干渉解析結果(左:北行軌道、右:南行軌道)。図中の星印は震央、震源球はGlobal CMTを使用した。

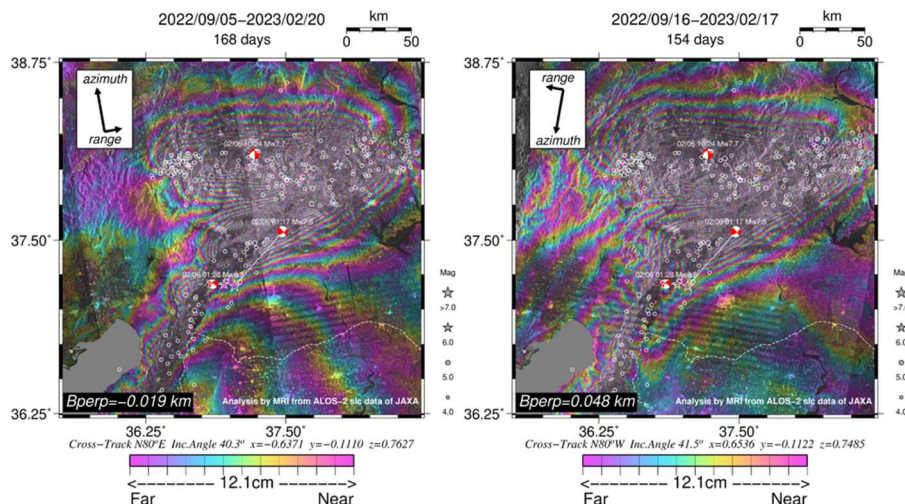


図9 2023年2月6日 トルコ南部で発生した地震のALOS-2/PALSAR-2データを用いた干渉解析結果(左:北行軌道:パス184、右:南行軌道:パス77)。電離圏遅延補正なし。大気遅延補正あり。基線

再推定あり。図中の星印は震央、震源球は Global CMT を使用した。

太平洋側の岬周辺の定常的な地殻変動について、干渉 SAR 時系列解析を実施した。

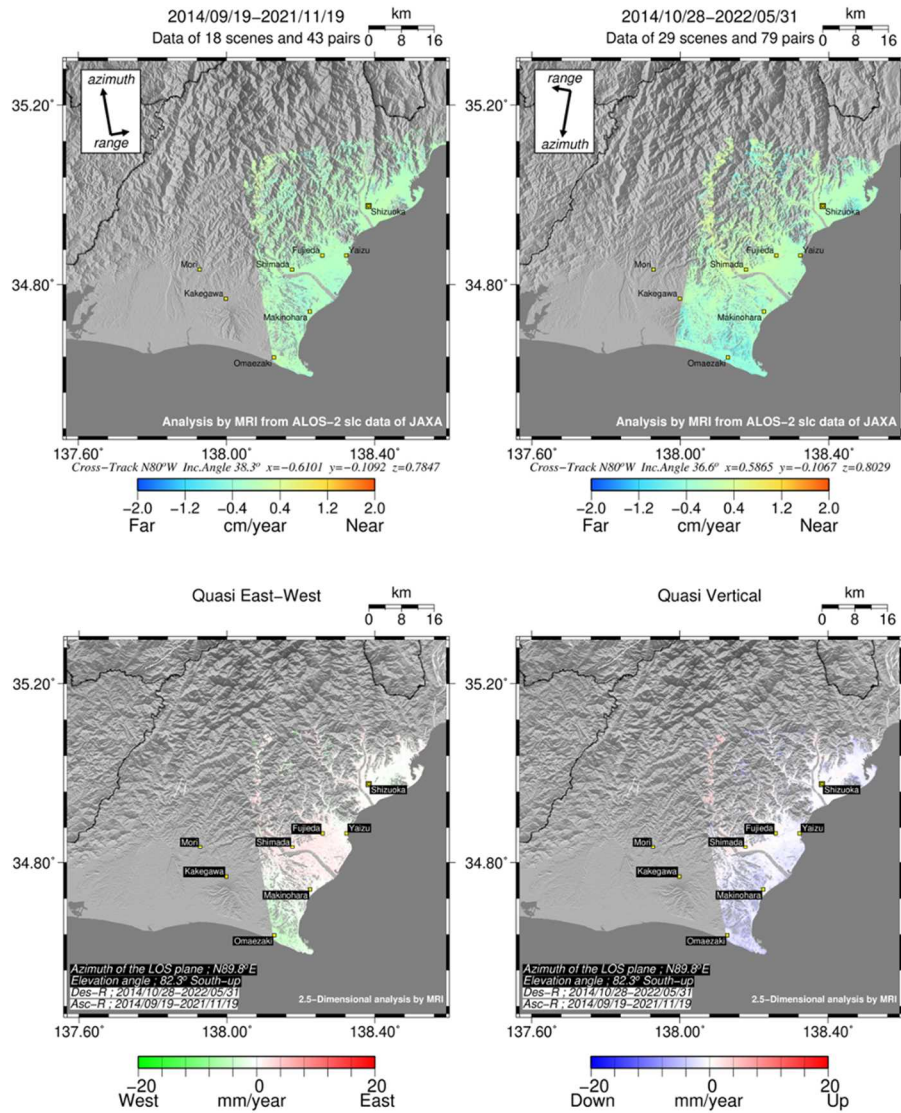
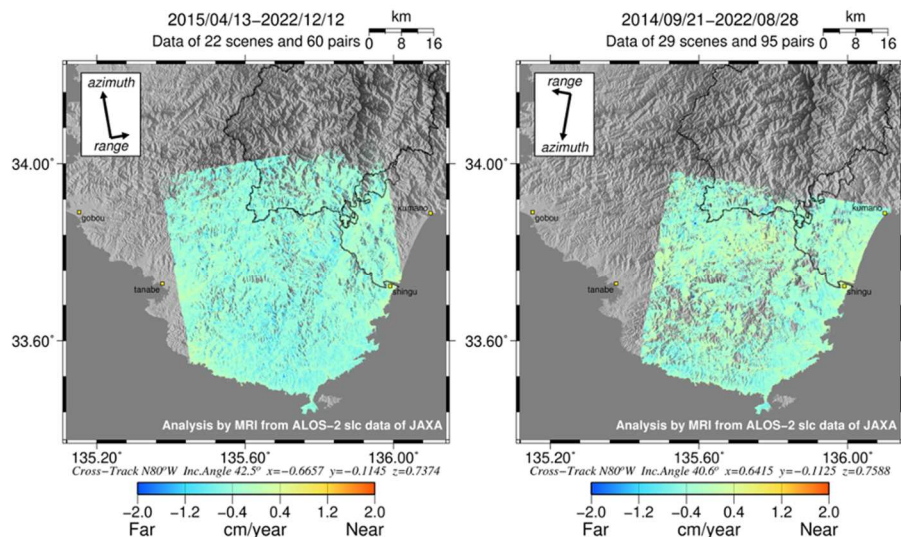


図 10 御前崎周辺の定常的な地殻変動 (左上: パス 126、右上: パス 19、左下: 準東西方向、右下: 準鉛直方向)



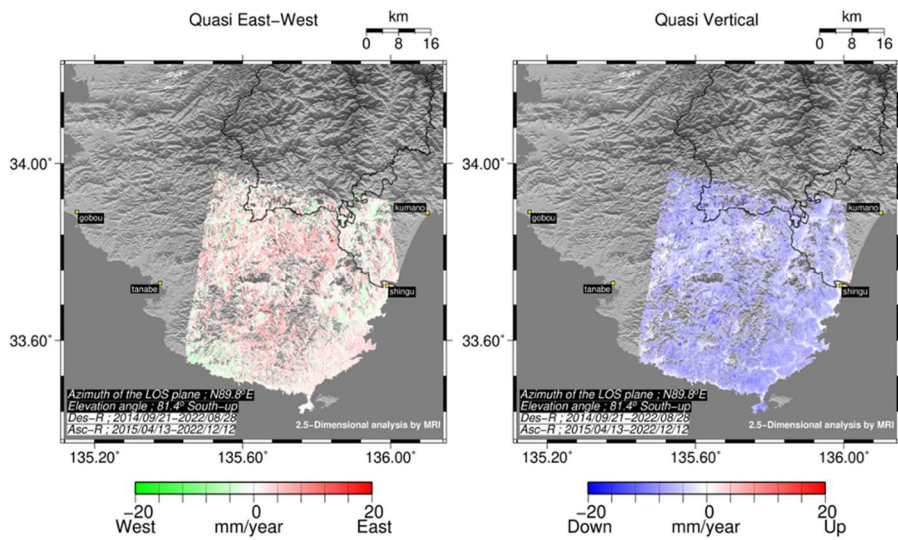


図 11 潮岬周辺の定常的な地殻変動 (左上: パス 128、右上: パス 20、左下: 準東西方向、右下: 準鉛直方向)

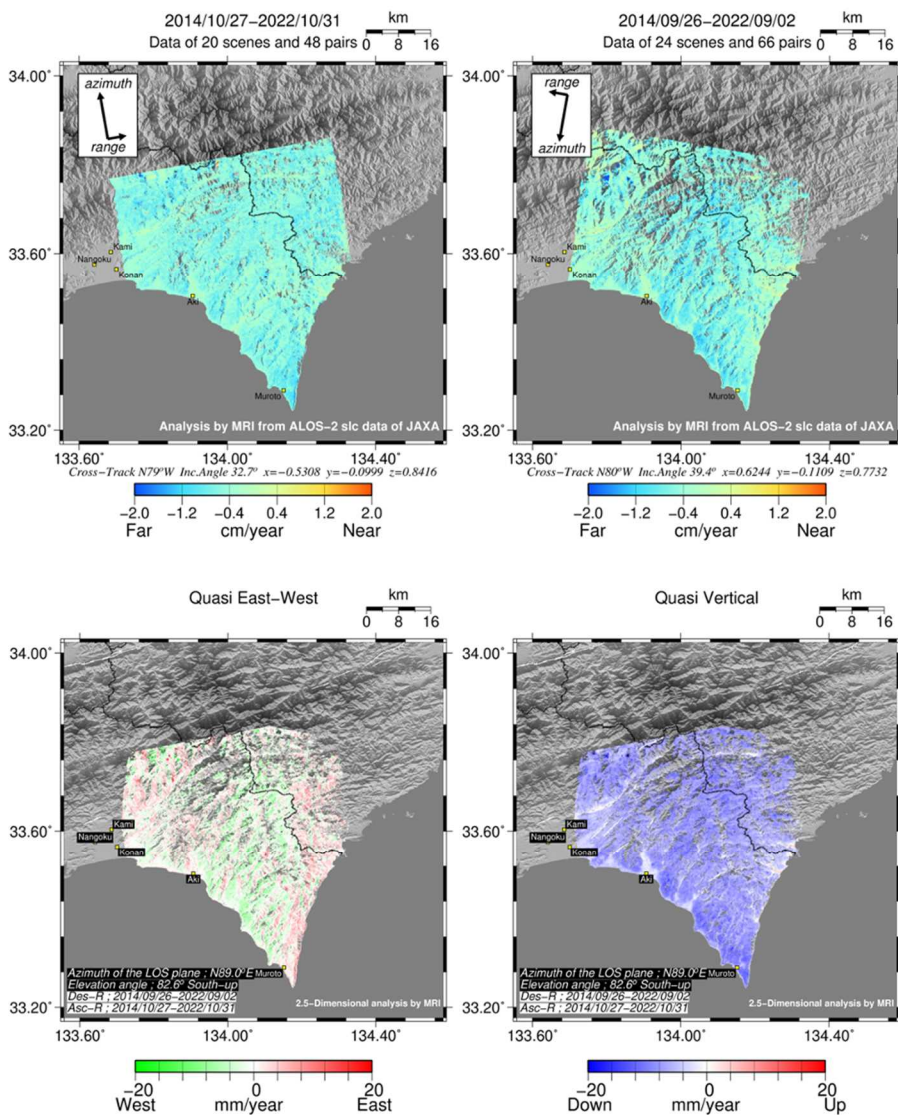


図 12 室戸岬周辺の定常的な地殻変動 (左上: パス 128、右上: パス 21、左下: 準東西方向、右下: 準鉛直方向)

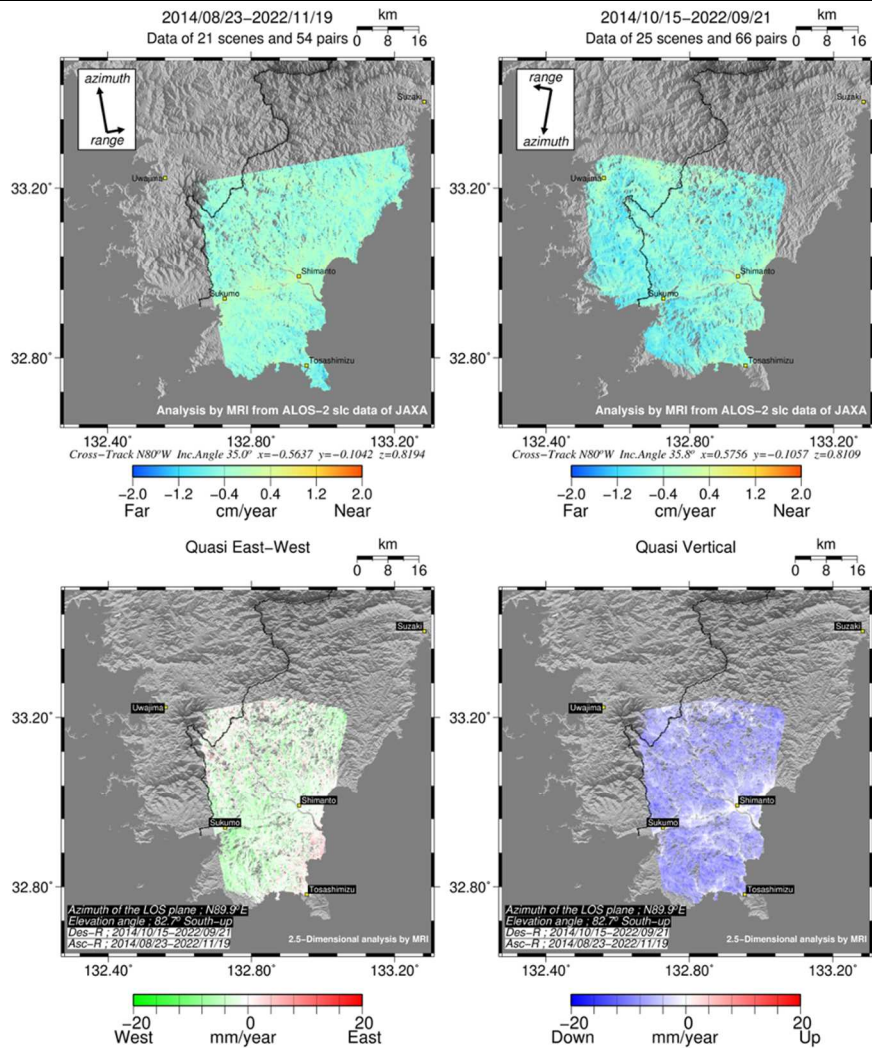


図13 足摺岬周辺の定常的な地殻変動（左上：パス 129、右上：パス 22、左下：準東西方向、右下：準鉛直方向）

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：

- 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 :

(1) 活断層帯周辺の経年的な変動に関する研究

紀伊半島北部の中央構造線断層帯の根来および紀淡海峡-鳴門海峡セグメントは、地震調査委員会により今後30年間の地震発生確率が高いAランクと評価されている。これまでALOSおよびALOS-2を用いて、この地域の経年的な地殻変動を追跡してきた。Yoshida *et al.* (2011) は、中央構造線断層帯の南側に面積膨張・隆起域が存在することを指摘している。また、この地域は活発な微小地震活動でも知られており、これらの関係を理解するためにも詳細な地殻変動を明らかにすることが重要である。

ALOS-1/2の高分解能モードの場合、1つのパスでは紀伊半島北部全体をカバーできないため、パスの境界において位相の不連続が生じる。これを解消するため、GEONETの変位に合わせ込んで連続的な位相変化を得ることを試みた。解析には南行軌道P20-F2930(2014年10月~2020年12月)27シーン、北行軌道P127-F680(2014年8月~2021年5月)15シーン、P128-F670(2014年9月~2020年6月)16シーンを用いた。なお、東京大学地震研究所特定共同研究(B)(課題番号2022-W-08)で取得された画像も一部使用している。解析にはOzawa *et al.* (2016)によるRINCを用い、DEMとしては飛田・他(2005)による国土地理院10mDEHMを、また対流圏遅延の補正のためには、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトによる数値気象データを使わせていただいた。干渉画像に対しては、Gomba *et al.* (2016)の手法による電離層補正を施したが、北行軌道の干渉画像の中には電離層擾乱が異常に大きいものが散見され、補正が十分に施せない場合があった。そのような画像は以後の処理からは除いた。これらの補正の後、干渉ペアの期間に対応するGEONETのF5解による変位に合わせ込み、スタッキングを行い、最終的に東西および上下成分に変換した。この結果を図1に示す。

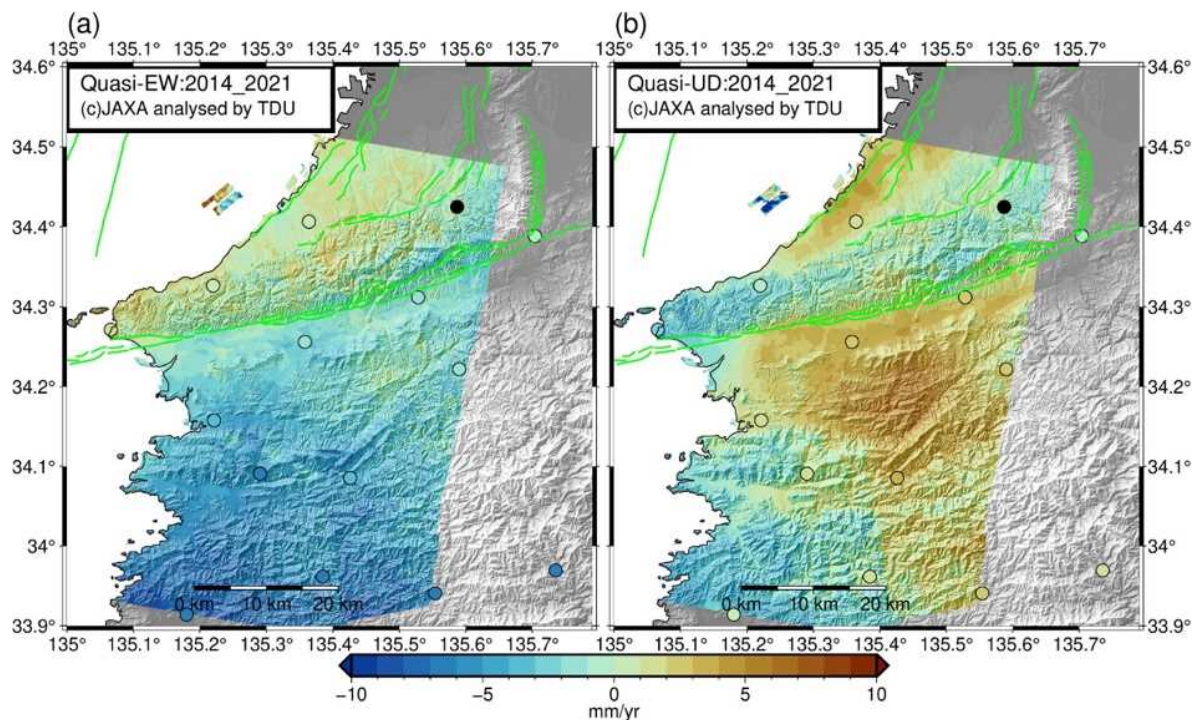


図1. ALOS-2の2014年から2021年の2方向からのスタッキング干渉画像から作成した平均変位速度図。(a)東西成分、(b)上下成分。元の干渉画像をGEONETの変位場に合わせ込みスタッキ

ングしたもの。○は GEONET 観測局の位置を示す。●の GEONET950339 河内長野局を固定。
 GEONET 観測局も干渉画像も、同じカラースケールで描画している。正の値は東向きと隆起。緑
 の実線は産総研活断層データベースによる活断層の地表トレース。

図 1 の範囲では、北行軌道のパスの境界が中央部を縦断しているが、スムーズな変位場が得られている。GEONET 局の変位とも整合している。上下成分に南部に若干の不連続が認められる。この地域は地形が険しいため、アンラップがうまくいかないケースがあるためと考える。東西成分はなめらかに南西に向かって西向きの変位が増加しており、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う変動を捉えている。上下成分では、領域の中央部に 5mm/yr 前後、大阪湾岸に 4mm/yr の隆起が認められる。前者は Yoshida *et al.* (2011) が指摘した隆起と考えられるが、より詳細な空間分布が得られた。後者は地盤沈下の回復と考えられる。

なお、2021 年度に実施した京阪神の地盤変動に関する研究成果を、地球惑星科学連合 2022 年大会にて発表した。

(2) 顕著な地震の地震時変動の検出

2022 年度は世界各地で顕著な地震が相次いで発生し、多くの観測がなされた。その中から解析を行った。いくつかの解析結果を示す。なお、トルコの地震を除いて、アンラップ干渉画像を示す。トルコについては広域観測モードのため、電離層補正等に工夫が必要なため、現時点では補正を施していない干渉画像を示すにとどめる。

a) 2022 年 6 月の能登半島の地震 ($M_{jma}5.4$, 5.0)

能登半島先端部珠洲市を中心とした地域において 2018 年頃から群発地震が発生している。2022 年 6 月 19~20 日に相次いで M5 級の地震が発生したので、ALOS-2 の緊急観測が実施された。地震前後約 1 ヶ月に、能登半島先端部において約 5cm の視線距離短縮の変動が得られた (図 2 左)。2 つのフレームをつなげて解析した。電離層補正・対流圏遅延の補正も行った。富山湾岸にも視線距離短縮が認められるが、原因は不明である。

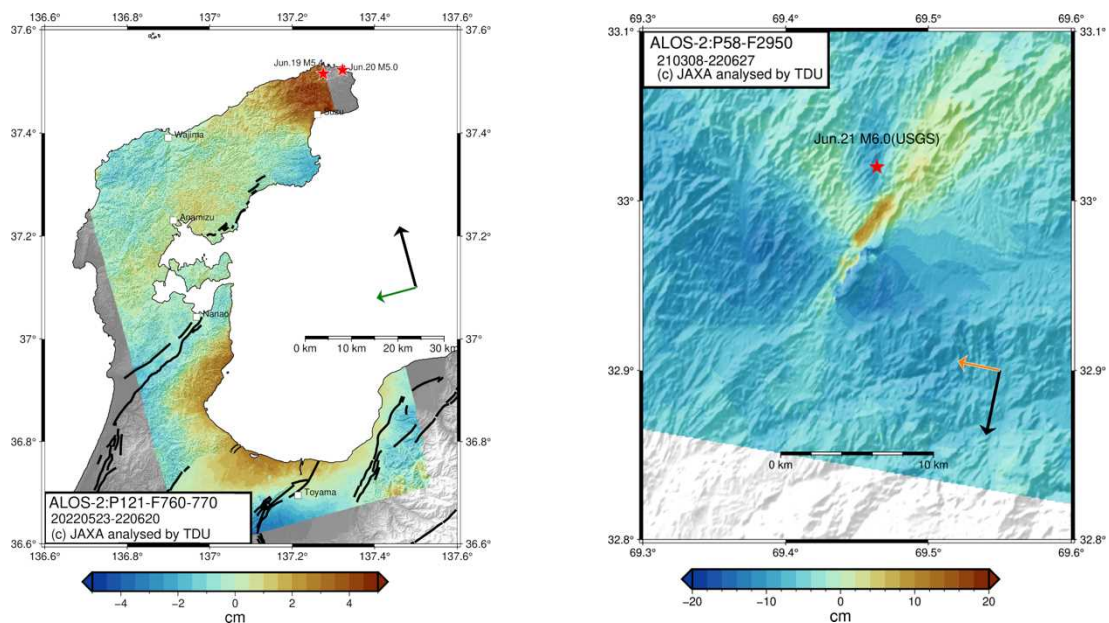


図 2. (左) 2022 年 6 月の能登半島地震前後 ALOS-2 干渉画像。黒実線は活断層の地表トレース。(右) 2022 年 6 月のアフガニスタンの地震前後の ALOS-2 干渉画像。正の値は視線方向短縮を示す (以下、同じ)。

b) 2022年6月21日のアフガニスタンの地震 (Mw6.0)

2022年6月21日にアフガニスタン南東部パキスタン国境付近深さ4km(USGS)において、Mw6.0の地震が発生し、現地に被害をもたらした。2021年3月と2022年6月27日のALOS-2画像の解析により、図2(右)のような変位場が得られた。最大10cm程度の視線距離短縮が幅2km以下、長さ約5kmの帯状領域に集中している。また、周辺には視線距離伸長の領域も認められる。なお、Styron *et al.*(2020)によるGEM Global Active Fault Databaseには、この地震近傍に活断層は認められていない。

c) 2022年7月27日フィリピン・ルソン島の地震 (Mw7.0)

2022年7月27日フィリピン・ルソン島北部の深さ33.7km(USGS)でMw7.0の地震が発生した。震源域をカバーするALOS-2の高分解能モードの観測は8月30日に行われた。5月24日の画像と干渉処理を行い、視線距離変化を得た(図3(左))。震央(星印)の西側に最大8cm程度の視線距離短縮が認められる。この変動は、約40kmの長軸を持つ楕円形の領域をなしている。USGSのCMT解は逆断層成分が優位なので、この変動は南北走向の逆断層運動に伴う隆起ないしは西への変位と考えられる。顕著な不連続は認められないので、地表地震断層は現れていないと推定される。

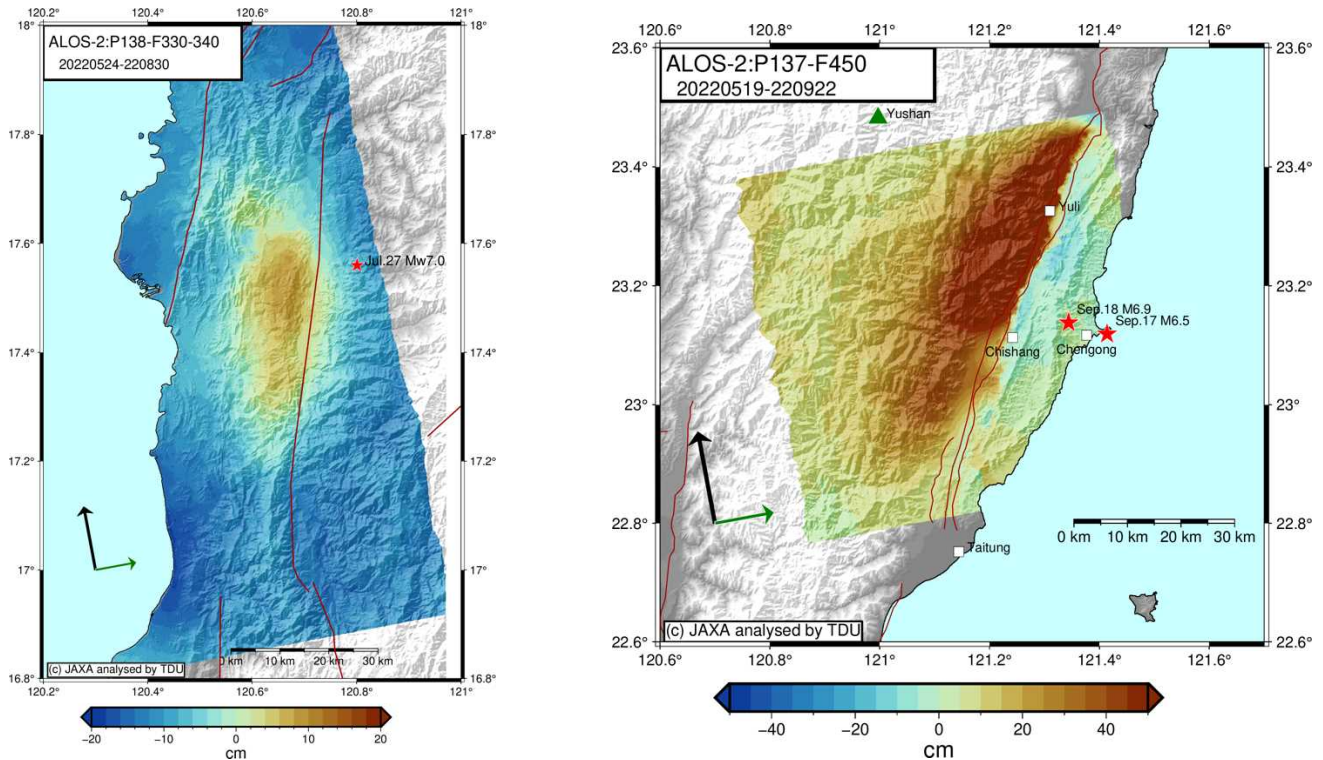


図3. (左) 2022年7月27日のフィリピンルソン島の地震前後のALOS-2干渉画像(P138-F330-340)。(右) 2022年9月17~18日の台湾南東部の地震前後のALOS-2干渉画像(P137-F450)。赤実線はStyron *et al.*(2020)による活断層のトレース。

d) 2022年9月17~18日の台湾東部の地震 (Mw6.5, 6.9)

2022年9月17~18日に台湾東部においてMw6.5および6.9の地震が発生した(いずれも深さ10km(USGS))。地震前後のALOS-2の緊急観測データを用いて、地震変動を検出した(図3(右))。この地域では、フィリピン海プレートがユーラシア・プレートに衝上している。また、東の海岸山脈と西の中央山脈の間には、花東縦谷とよばれる地溝帯がある。この地溝帯の東側、海岸山脈の麓にはLongitudinal Valley Faultと呼ばれる断層帯があり、この断層がクリープしていることで知られている。しかし、今回の地震による地殻変動は、西側の中央山脈側に北北東-南南西に約60kmの大きい視線距離短縮領域が認められるのに対して、海岸山脈側の変動は小さい。視線距離短縮の領域の拡がりのスケ

ールから判断し、中央山脈下に延びる西側の断層が逆断層運動を行なったと推定される。

e) 2023年2月6日のトルコの地震 (Mw7.8, 7.5)

2023年2月6日、トルコ南東部シリア国境付近を震源とする Mw7.8 と 7.5 の地震が発生し (いずれも深さは 10km(USGS)), 両国に甚大な被害をもたらした。これを受けて、ALOS-2 の緊急観測が複数のパスにおいて実施され、多くのデータが取得された。ここでは、震源域全域をカバーする広域観測モードの代表的な 2 パスの解析結果を示す。

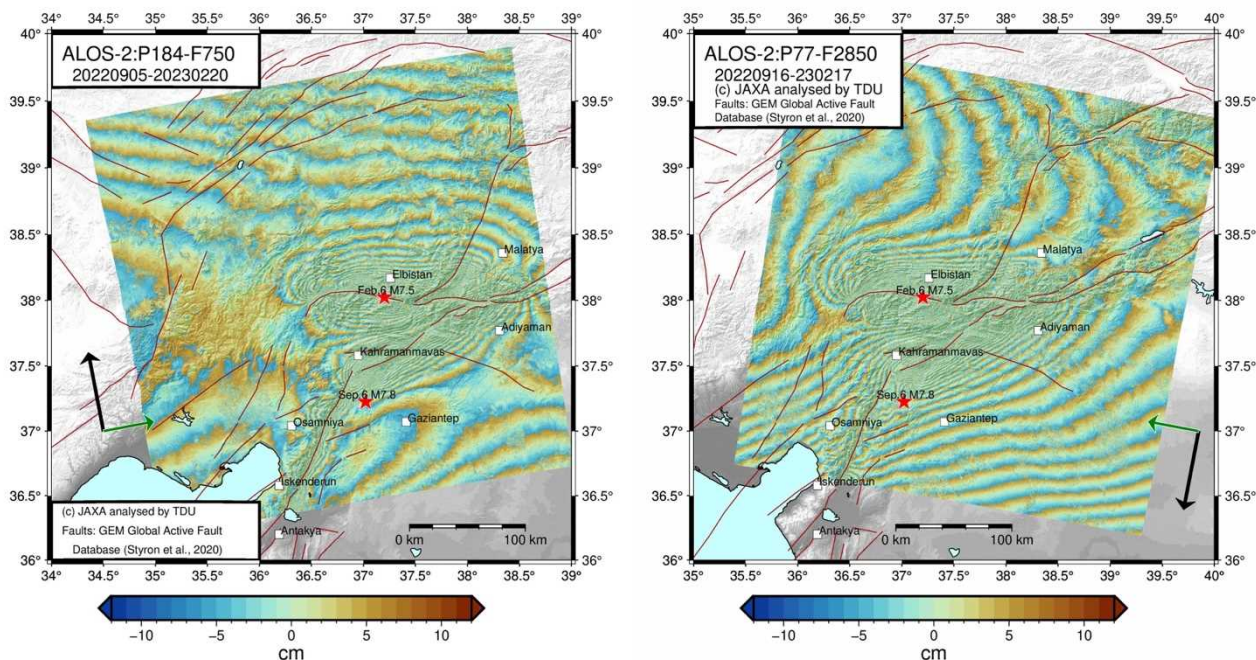


図4. 2023年2月6日トルコ南東部の地震前後のALOS-2干渉画像。(左)北行軌道の干渉画像(P184-F750)。2022年9月5日と2023年2月20日のペア。(右)南行軌道の干渉画像(P77-F2850)。2022年9月16日と2023年2月17日のペア。赤実線はStyron *et al.*(2020)による活断層の地表トレース。

いずれの画像も連続的な位相変化が得られ、サブスワス間の境界での不連続は見られない。いずれの画像の背景に、非常に大きいトレンドが見られるが、単純なトレンドではないので低減には慎重を要する。現在検討中である。両画像ともに中央部に地震時変動を示す混んだ干渉縞が見られる。いずれも東アナトリア断層系の既存の断層に沿っており、2つ以上の断層が活動したことが明らかである。南側の Mw7.8 の地震に伴う干渉縞は、震央付近で交差する長さ約 200km の東北東-西南西走向の断層と長さ 100+km の北北東-南南西走向の断層の運動で生じたと考えられる。一方、北側の Mw7.5 の地震による干渉縞は、長さ約 200km の東西走向の断層の運動と推定される。ピクセルオフセット解析を実施したところ、これらの断層を挟んで最大 4m 程度のずれが生じていることがわかった。

参考文献

- Yoshida A. *et al.*, 2011, *Tectonophysics*, 510,124-131.
- 飛田幹男・他, 2005, *地理院時報*, 106, 37-49.
- Ozawa, T. *et al.*, 2016, *EPS*, 68:186, DOI 10.1186/s40623-016-0563-5.
- Gomba, G. *et al.*, 2016, *TGRS*, 54, 1446-1461.
- Styron, R., *et al.*, 2020, *Earthquake Spectra*, 36, 1_suppl, doi:10.1177/8755293020944182

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。）：

橋本学，2014～2021年の京阪神および奈良盆地の地盤変動，地球惑星科学連合2022年大会，SGD01-06，幕張メッセ（ハイブリッド），2022年5月26日

橋本学，ALOS-2で見る紀伊半島北部の隆起，2022年度東京大学地震研究所共同利用（研究集会：課題番号2022-W-08）「高頻度SAR観測時代の幕開け」，東京大学地震研究所，2022年12月5日．

来年度以降の課題・計画：

今年度に引き続き，InSAR を用いて活断層帯周辺の経年的な地殻変動の検出を試みる．また，顕著な地震が発生した場合は，これに伴う地殻変動検出も行う．

来年度における関連研究成果の発表予定は，以下の通りです．

橋本学，InSAR で検出した紀伊半島北部の隆起，地球惑星科学連合 2023 年大会，2023 年 5 月 23 日（発表予定），幕張メッセ．

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：

防災インターフェースによる広域観測モードのデータ提供について，再考いただきたい．フルアパチャーモードで2偏波観測の場合，1観測あたり50～100GBのファイルとなり，ダウンロードが困難を極めます．スワス毎ないしは偏波毎などの分割提供をお願いしたい．

令和4年度地震 SAR 解析 WG 課題別成果報告票 地震-0405

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 地球惑星ダイナミクス分野）

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 地球惑星ダイナミクス分野）

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：

令和4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。）：

特になし

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（鹿児島大学理工学研究科）

支援研究者 氏名（所属機関）：

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：

鹿児島県と宮崎県・熊本県県境付近に GNSS の変位速度により示されている東西成分の変位速度急変帯の空間分布を推定するために、ALOS と Sentinel-1 のデータを用いて、Morishita et al.(2020)により開発された LiCSBAS を用いて SBAS 解析を行った。ALOS の干渉画像については AIST のデータベースを使用し、2007 年 2 月から 2011 年 4 月 3 日まで、Sentinel-1 については COMET-LiCS Sentinel-1 InSAR portal を使用し、2015 年 5 月から 2021 年 11 月までのデータを使用した。

図に NS 成分を小さいとして EW と UD 成分の変位速度に分解した空間分布を示す。GNSS に認められている EW 成分の急変は認められていない。LOS の変位分布に比べ、EW と UD 成分に分解した変位速度の空間分布の方が EW 成分については空間的に滑らかとなっている。

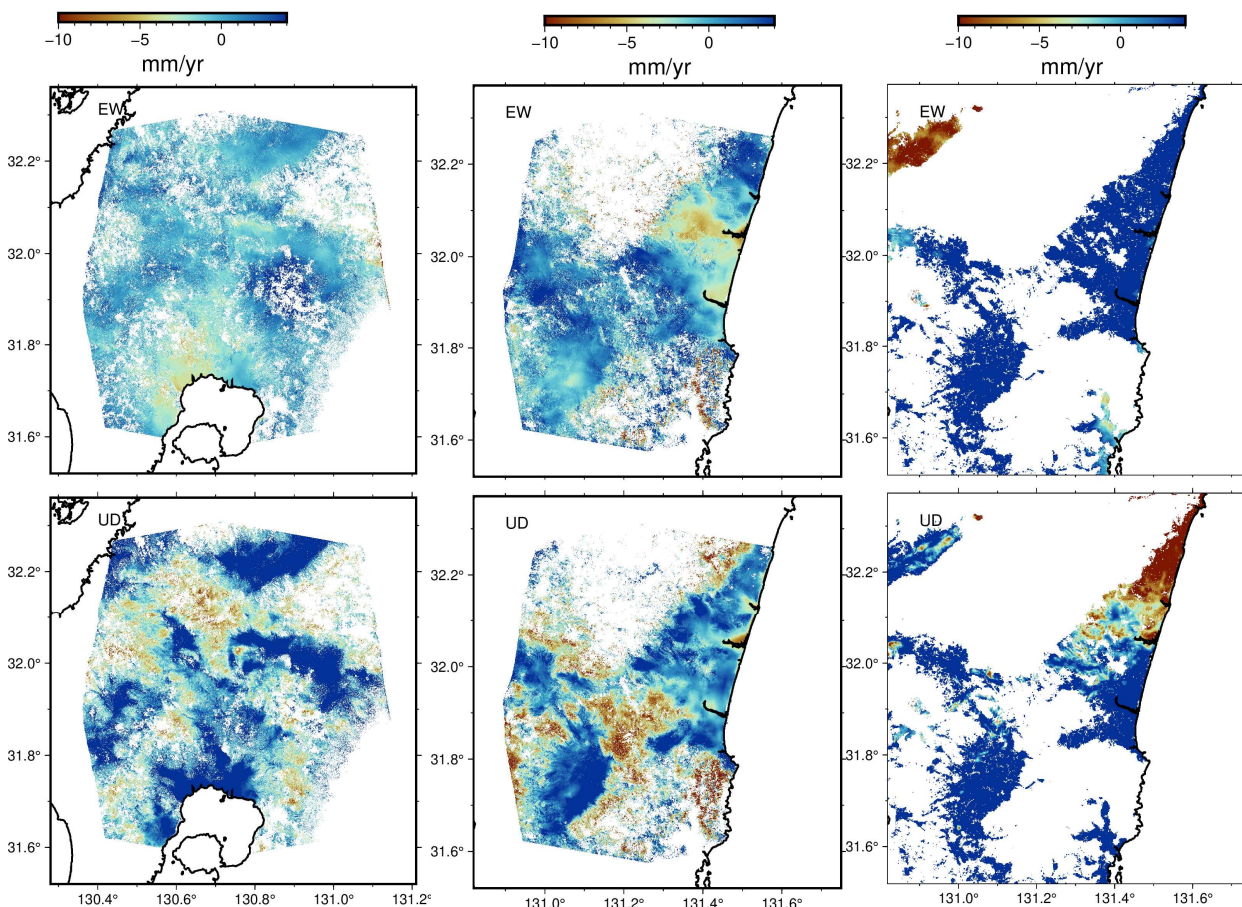


図. 左と中央は ALOS データにより求めた EW と UD の変位速度。右は Sentinel-1 データを使って求めた EW と UD の変位速度。

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：

引き続き、GNSS の解析で求められている鹿児島県と宮崎県・熊本県県境付近に認められる東西変位速度の急変帯の空間分布を把握し、同領域の地震発生の可能性について検討する。

来年度は ALOS-2 のデータの解析をすすめ、Morishita et al. (2020)による LiCSBAS を使用し、SBAS 解析を進める。LiCSBAS で使用できる ALOS-2 の InSAR 画像のデータベースは公表されておらず、ALOS-2 の InSAR 画像を小澤による rinc ソフトウェアにより、観測間隔の比較的短く、干渉している InSAR 画像を作成し、LiCSBAS を使って解析をする。

さらに、GNSS の変位速度を使っての時系列解析についても行うため、Agram et al. (2012)による GIAN-T を使用し、変位急変帯の空間分布の推定を試みる。

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：

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:

【概要】

本年度中に発生した規模の大きい地震について、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。また、解析結果について Web での情報発信を行った。具体例として、以下に 2023 年トルコ南東部で発生した地震について解析結果を示す。

【トルコ地震の解析結果】

2023 年 2 月 6 日 10 時 17 分頃(日本時間)にトルコ南東部で M7.8(USGS)の地震が発生し、19 時 24 分頃にもその北側で M7.5 の地震が発生した。表 1 および図 1 に 2 月 22 日までの今回の観測範囲と観測諸元をそれぞれ示す。

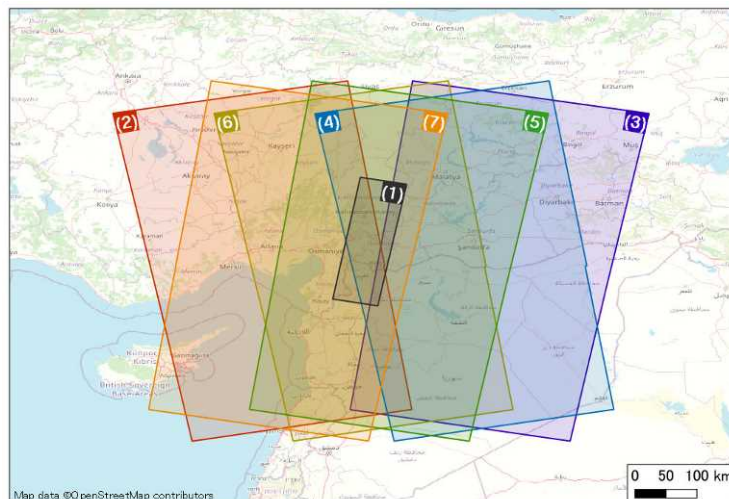


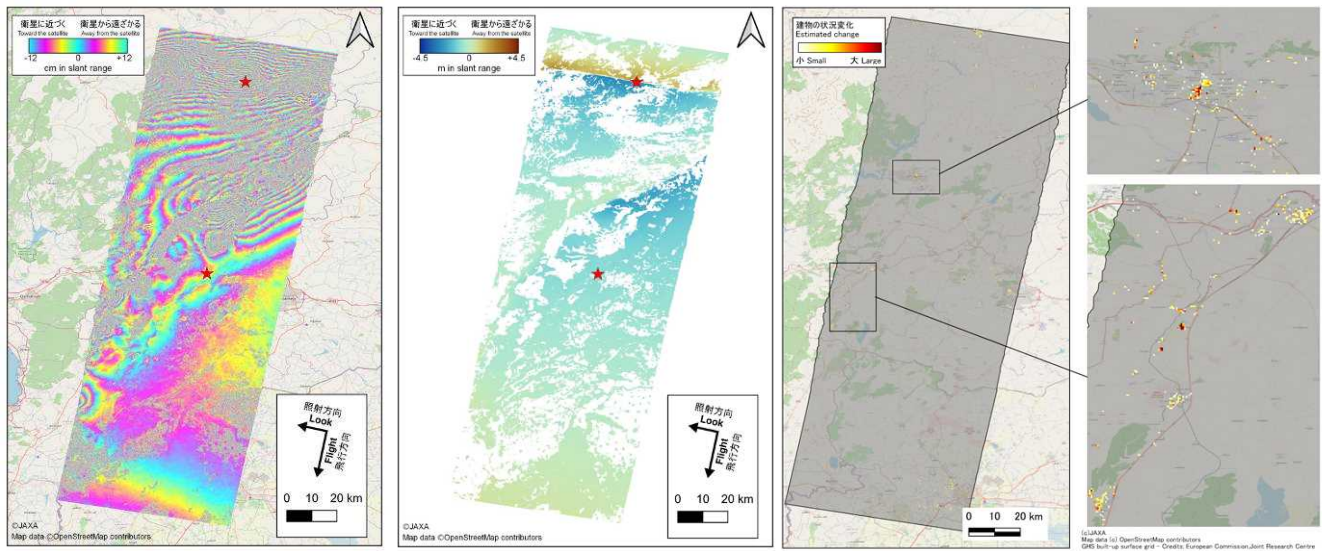
図 1 2023 年トルコ地震の ALOS-2 観測範囲(2 月 22 日まで)

表 1 2023 年トルコ地震の ALOS-2 観測諸元(2 月 22 日まで)

	観測日時(日本時間)	パス番号	観測モード	ビーム番号	軌道・観測方向
(1)	2 月 8 日 18 時 40 分	78	高分解能 10m	F2-5	降交・右
(2)	2 月 12 日 6 時 35 分	185	ScanSAR	W2	昇交・右
(3)	2 月 12 日 18 時 26 分	76	ScanSAR	W2	降交・右
(4)	2 月 16 日 6 時 21 分	183	ScanSAR	W2	昇交・右
(5)	2 月 17 日 18 時 32 分	77	ScanSAR	W2	降交・右
(6)	2 月 21 日 6 時 28 分	184	ScanSAR	W2	昇交・右
(7)	2 月 22 日 18 時 39 分	78	ScanSAR	W2	降交・右

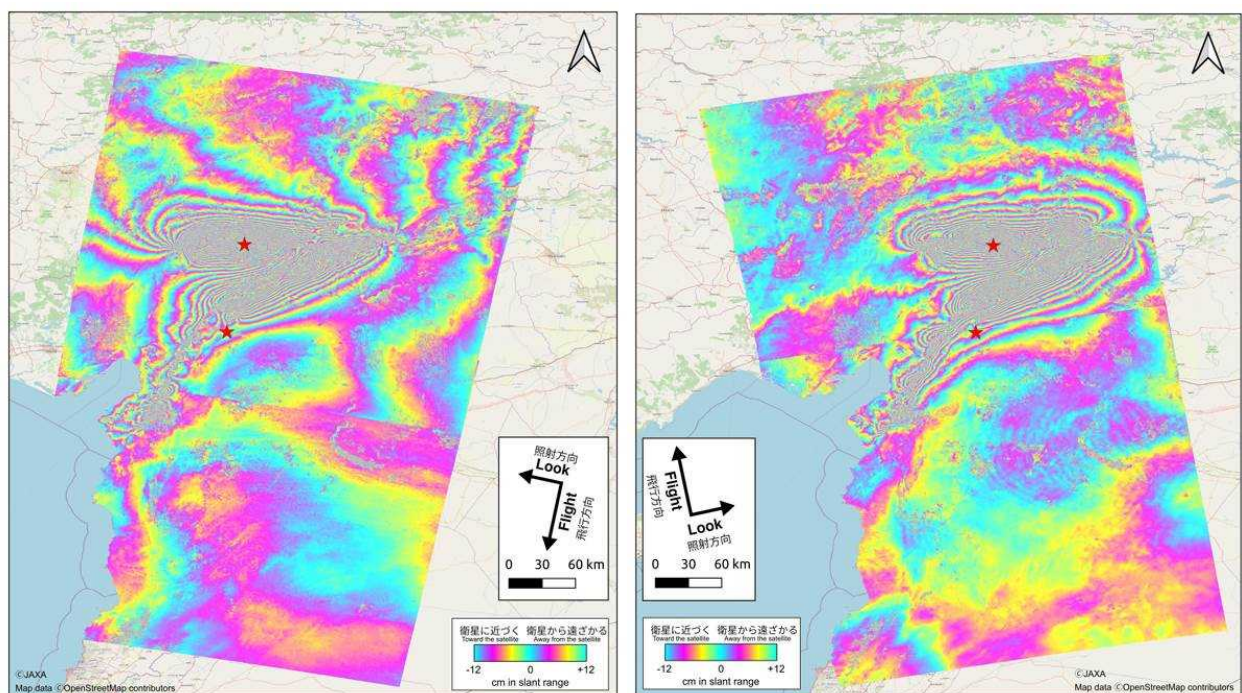
図 2 は、2022 年 4 月 6 日(地震前)と 2023 年 2 月 8 日(地震後)の高分解能 10m モードデータを用いた解析結果を示す。図 2(a)は差分干渉画像で、およそ西向き観測で、二ヶ所の震源域(図中の赤色のマーカー)で顕著な地殻変動が見られた。図 2(b)はバンド分割法を用いた差分干渉 SAR 解析(Difference of Split-band

Interferograms)の結果で、図 2(a)と同じデータであるがより大きな変動が検出できており、北側で最大 2m 程度の衛星から遠ざかる変位、南側で最大 2.5m 程度の衛星に近づく変位が検出された。図 2(c)は、過去画像を前述のものに加え 2021 年 4 月 7 日観測分も使用し、干渉 SAR コヒーレンスの平時との差による建物の変化(被害)を自動推定したもの。濃い赤色の領域は建物の状態が大きく変化したことを表す。



(a) (b) (c)
 図 2 2023 年 2 月 8 日および地震前の過去の ALOS-2 高分解能モードデータの解析結果。

図 3(a)は、2022 年 9 月 16 日(地震前)と 2023 年 2 月 17 日(地震後)の降交軌道の ScanSAR データによる差分干渉画像、図 2(b)は 2022 年 9 月 6 日(地震前)と 2023 年 2 月 21 日(地震後)の昇交軌道の ScanSAR データによる観測データを用いた差分干渉画像。地震による変動域全体をよく捉えており、断層周辺で最大約 4m 程度の視線方向の変位が検出された。これらの干渉画像には、電離層遅延等によると見られる長波長ノイズが画像全体に残存しており、定量的な変動量の検出には更なる解析が必要である。



(a) (b)

図 3 (a)2023 年 2 月 17 日の降交軌道、および(b)2023 年 2 月 21 日の昇交軌道の ALOS-2 ScanSAR データによる差分干渉画像。

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。）：

[Web 掲載]2023 年トルコ南東部で発生した地震の観測、2023 年 2 月 9 日(2 月 14 日、15 日、22 日、3 月 2 日更新)

<https://earth.jaxa.jp/ja/earthview/2023/02/14/7381/index.html>

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：
特になし。

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：

衛星解析グループを通じてご提供頂いた PALSAR-2 データなどを使用し、ISCE (InSAR Scientific Computing Environment, <https://github.com/isce-framework/isce2/>) を用いて SAR 干渉解析を実施した。他機関で迅速に公開された結果と調和的な結果は得られた。

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。）：

知見を用いて、ポスター発表：

Zhen Liu, Paul Lundgren (Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology) , Akiko Tanaka, Mapping tectonic and anthropogenic processes in California using ALOS-2 InSAR, AGU Fall Meeting 2022, 2022/12/13

を行った。

来年度以降の課題・計画：

衛星搭載の SAR データを用いて、地表変動を捉えることのできる可能性のある事例についての解析を行う。アーカイブデータを利用し、時系列解析にも取り組む。また、LiCSAR (Sentinel-1 自動干渉解析システム, <https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>) および 時系列解析パッケージである LiCSBAS (<https://github.com/yumorishita/LiCSBAS/>) なども活用し、Sentinel-1a のデータを相補的に利用する。

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：

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 (東北大学理学研究科)

太田雄策 (東北大学理学研究科)

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 :

本年度は、主として大気遅延補正のための手法評価および地震に伴う地盤変動に関する研究に取り組んだ。大気遅延補正については、解析ツール RINC で採用されている計算アルゴリズムおよび気象庁のメソ数値予報モデル (MSM) を用いた補正項と、Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) による補正項を比較し、それらの有効性についての比較をまとめた。その結果は、Saillellah and Fukushima (2023, Earth Planets and Space) として公表された。

地震に伴う地盤変動に関しては、2011 年東北地方太平洋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 データを用いた解析を進め、論文にまとめた (宮嶋ほか, 2022, 自然災害科学)。さらに、2022 年 3 月の福島県沖地震などでの沈降も ALOS-2 データを用いて検出した。これらにより、谷埋め盛土には強震によって沈降しやすい場所があることが明らかとなった。

さらに、2023 年 2 月 6 日にトルコ南東部で発生した地震について 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。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。

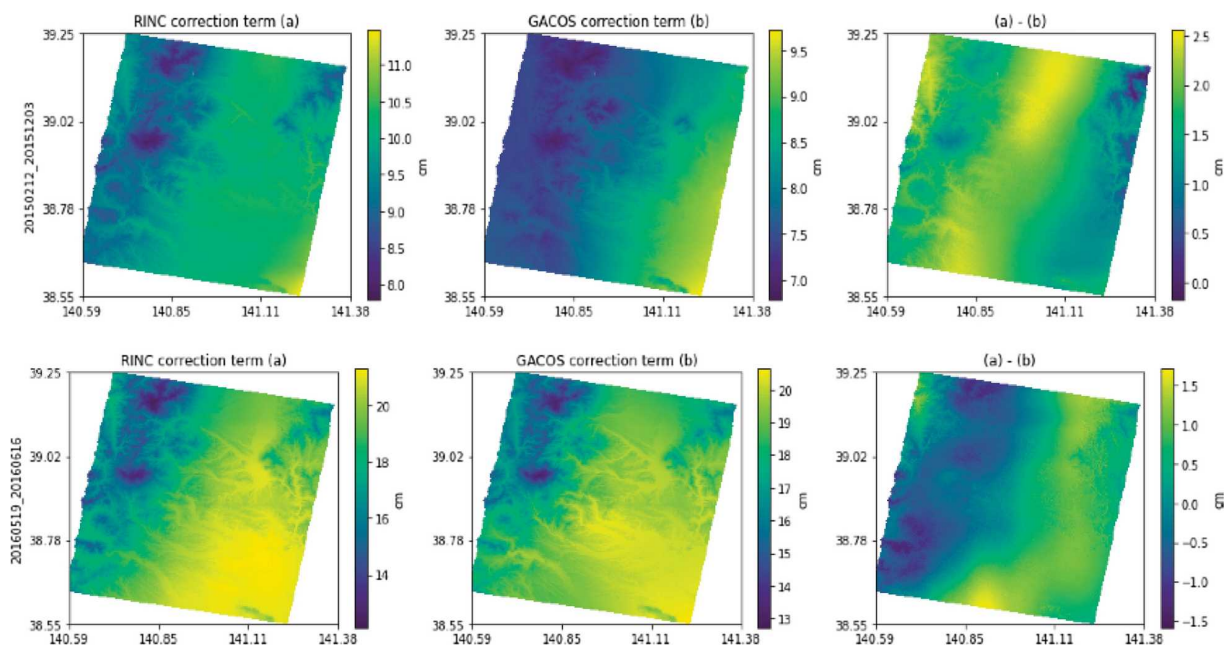


図 : RINC および GACOS を用いた大気遅延補正項の比較 (Saillellah and Fukushima, 2023 より)

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, 中埜 貴元, 藤原 智, InSARを用いた2011年東北地方太平洋沖地震時における宅地造成地での変動検出とその発生背景の考察, 日本地球惑星科学連合 2022年大会, 幕張メッセ, 2022.

宮嶋 愛菜, 福島 洋, 中埜 貴元, 藤原 智, InSARを用いた2011年東北地方太平洋沖地震時における宅地造成地での変動検出とその発生背景の考察, 第41回日本自然災害学会学術講演会, 立命館大学草津キャンパス, 2022.

Miyajima, A., and Y. Fukushima, Deformation of reclaimed valleys in Sendai city during the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected by InSAR and its background factors, アメリカ地球物理学連合 2022年秋季大会, シカゴ, 2022.

Sailellah, S., and Y. Fukushima, Comparison of tropospheric delay correction methods of InSAR analysis using a mesoscale meteorological model: A case study from Japan, アメリカ地球物理学連合 2022年秋季大会, シカゴ, 2022.

Sailellah, S. N., & Fukushima, Y. (2023). Comparison of tropospheric delay correction methods for InSAR analysis using a mesoscale meteorological model: a case study from Japan. *Earth, Planets and Space*, 75(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01773-z>

宮嶋愛菜・福島洋・中埜貴元・藤原智. (2022). InSARを用いた2011年東北地方太平洋沖地震時における宅地造成地での変動検出とその発生背景の考察. *自然災害科学*, 41(特別号), 19- 35. https://www.jsnds.org/ssk/ssk_41_s_019.pdf

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。有馬高槻断層帯周辺での 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予備的解析を行う。地震に伴う谷埋め盛土の変動に関して、InSAR 時系列解析を行うとともに GNSS 変動との比較・検証を行う。2023年2月トルコ南東部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：

地震 WG から取得したデータを用いた解析結果を公開する際に、毎回書類を提出し審査を受ける必要がありますが、公開のルールを事前に決めておき、申請書類提出と審査のプロセスを無くしていただくことを希望します。

緊急観測のデータは、防災インターフェースを通して取得する仕組みになっておりますが、同インターフェースを利用しての 2023 年 2 月トルコ南東部の地震のデータのダウンロードがかなり困難でした。具体的には、ダウンロードが開始できない状況と、ダウンロードを開始しても途中でエラーとなり止まってしまう状況が多々発生しました。アクセスが集中するので難しいことは理解しておりますが、緊急観測データの解析は緊急的に実施し WG としての活動に貢献したいと思っているところなので、対応策をご検討いただきたいと思います。

代表研究者 氏名 (所属機関) : 島田政信 (東京電機大学 理工学部 建築・都市環境学系)

支援研究者 氏名 (所属機関) : 小坏裕也、矢部杜夫、木戸洋斗、吉永誓也、高野哲平 (東京電機大学理工学部)

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

今年度の成果概要 :

二時期のデータを用いる SAR 差分干渉解析は、地震に伴う地殻変動の検出には有効であるが、地震後の余効変動や地震間の変動などのゆっくりとした長期的な変動を捉えることは困難である。そこで、長期的な変動を把握することを目的として、時系列解析手法の検討を行った。

Sigma-SAR V.700 に位相保証型の時系列干渉機能を付加し、ALOS-2 の 2015 年から 2020 年までのデータを昇交、降交軌道を、尺取り虫的に干渉処理し、アンラップ、位相加算、大気補正、電離層補正 (2 次曲面補正)、さらには 2.5 次元解析をすることで、2015 年から当該年までの積算準上下、準東西移動成分を抽出した。データの校正方法として、GNSS 点を利用する方法としない方法を用いた。GNSS を使用する場合には、長崎県五島列島にある福江局を基準とし、埼玉県内に設置された GNSS と SAR の誤差が最小二乗的に最小になるように位相の校正を行う場合と埼玉県内の GNSS のみを使用する場合の 2 種類を実施した。解析に使用したデータは、埼玉東が昇交軌道が 18 シーン、降交軌道が 23 シーン、埼玉西が昇交軌道が 11 シーン、降交軌道が 15 シーンである。また、解析の対象場所は、年度当初の計画書で記述した埼玉県 (西と東のシーン) である。埼玉県は、東西に長く、西半分は丘陵地から山岳地に向かう地形、東半分はほぼ平地で真ん中を利根川などの河川が流れ込む地形となっている。全期間を通して、干渉性を保った領域 (位相変動が 0.5 ラジアン以内) のみを処理対象とした。その結果を図 1、図 2 に福江を基準とした場合、と図 3 と図 4 に埼玉県内に存在する GNSS を使用した場合を示す。

図 1 : 埼玉県の東半分 : ほぼ平野であり、利根川を境として埼玉県、茨城県、栃木県が隣り合う。久喜、五霞、幸手などの北東部では沈降が有名である。本解析では解析全期間が長かったことからか、干渉が良好な場所は圏央道、圏央道のインターチェンジ (IC)、その他、内陸部であり、全体としては、6 年間で約 4cm 隆起している、また、東西方向の運動もほぼ 5cm 西に移動していることを確認できる。

図 2 : 埼玉県の西半分 : 上で記述したように、山岳地帯の干渉は良好でない。平地の干渉性は高く、福江局を基準にすると、GNSS で得られる関東平野の動きと同様なものを得る。埼玉県西部の隆起もほぼ 4 cm で、西への移動も 5cm でほぼ同様である。GNSS と調和的な動きをすることから、面的にほぼ同様な変動をとらえたものと思われる。

図 3 と図 4 に埼玉県内の全ての GNSS を用いて位相校正をした結果を示す。上限変動はほぼなしかやや隆起傾向か、東西成分としてはやや東への移動が見られる。その中であって、埼玉県東では圏央道の五霞 IC (赤丸 A) では相対的に数 cm の沈降が、さらに越谷ニュータウン (赤丸 B) でも沈降が確認された。埼玉県西では秩父の武甲山 (赤丸 C) が 6 年間で約 15cm 沈降している。これは、セメント削り出しに伴う地盤沈下に関連していると思われる。

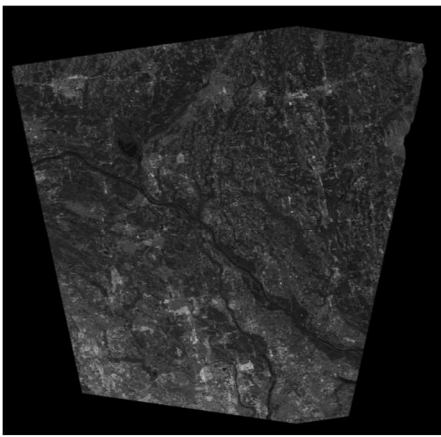
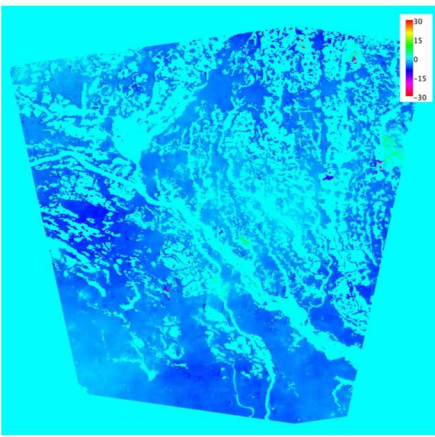
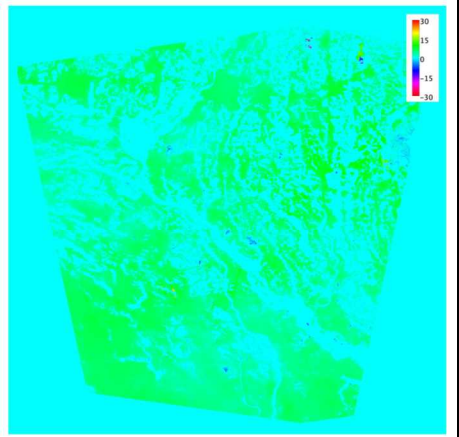


図1 a)埼玉東



b) 東西成分



c) 上下成分

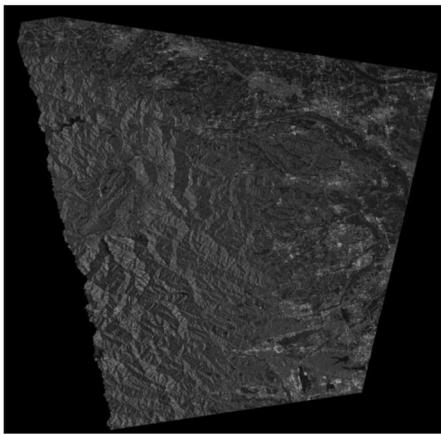
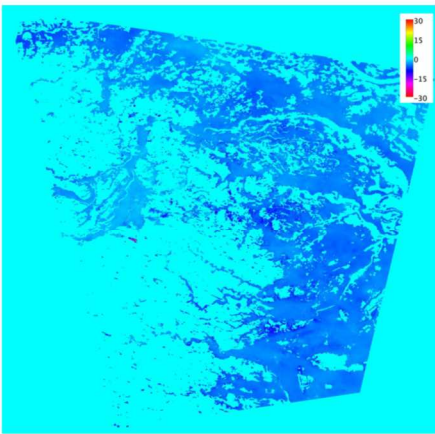
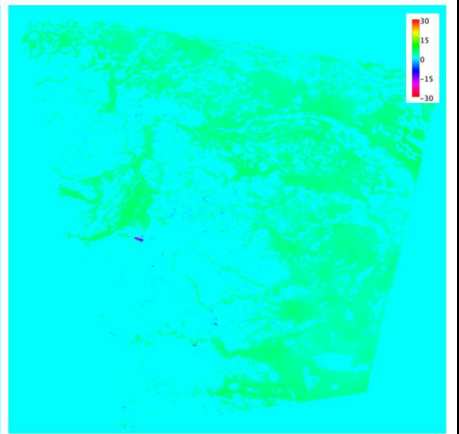


図 2 a)埼玉西



b) 東西成分



c) 上下成分

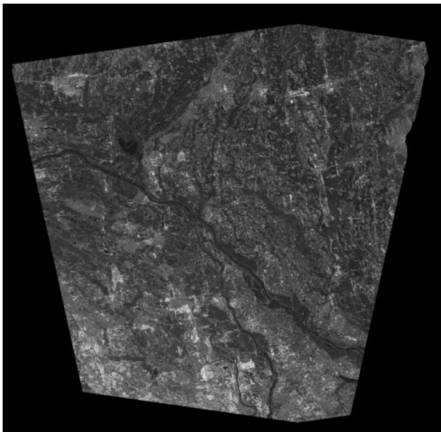
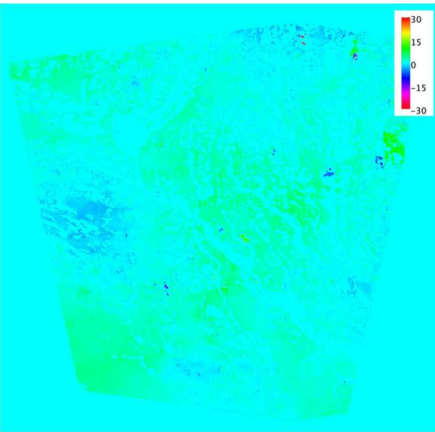
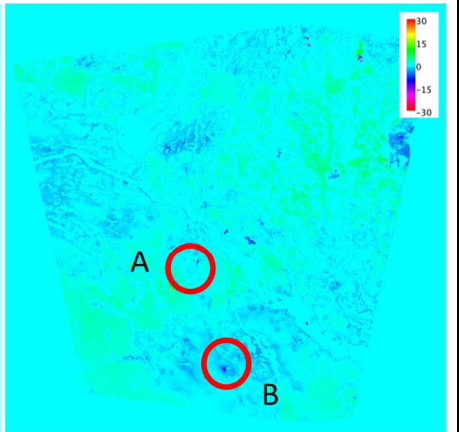


図 3 a)埼玉東 振幅画像



b)埼玉東 東西成分



c)埼玉東 上下成分

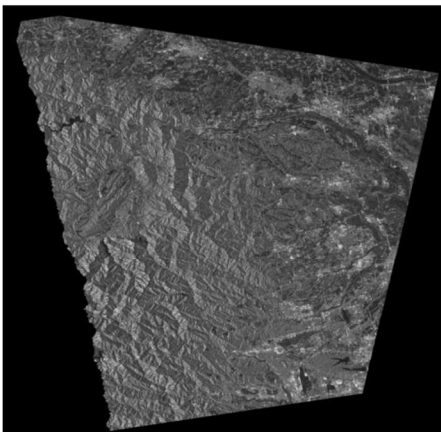
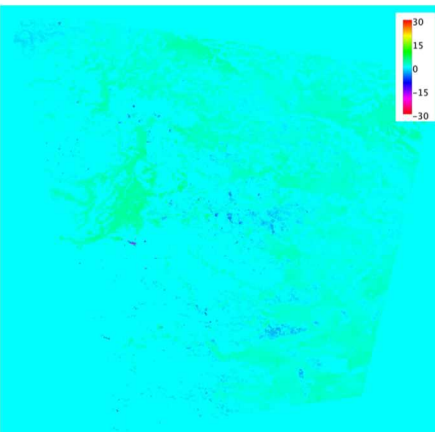
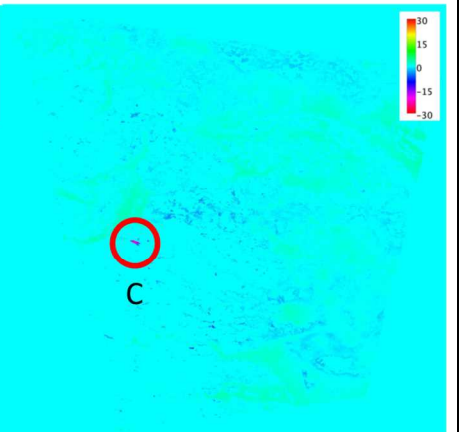


図 4 a)埼玉西 振幅画像



b)埼玉西 東西成分



c)埼玉西 上下成分

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。）：

以下の学会で本研究に関連した成果の発表を行った。

1. 小坏裕也，島田政信，“時系列干渉 SAR 解析を用いた埼玉県北東部における地表面変動の抽出”，2022年度 東京大学地震研究所共同利用（研究集会：課題番号 2022-W-08）2022. 12 月 5, 6 日
2. 小坏裕也，島田政信，“時系列干渉 SAR 解析を用いた埼玉県北東部における地表面変動の抽出” 日本リモートセンシング学会第 73 回秋季大会 2022. 11 月 29, 30 日
3. 小坏裕也，島田政信，“時系列干渉 SAR 解析を用いた埼玉県における地表面変動箇所の抽出” JpGU2022, 5 月 25 日，幕張

来年度以降の課題・計画：

本年と同様に、埼玉県内の時系列解析を継続するとともに、周辺の県に展開する。現時点で県は特定できないが、千葉、東京、茨城、栃木、群馬などが候補である。

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：