

地震予知連絡会
SAR 解析ワーキンググループ
(地震 SAR 解析 WG)

成果報告書
(平成 26 年 5 月～平成 29 年 5 月)

平成 29 年 5 月

地震 SAR 解析 WG 事務局
国土地理院

地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ

(地震 SAR 解析 WG)

成果報告書

(平成 26 年 5 月～平成 29 年 5 月)

目次

1. 地震 SAR 解析 WG の概要	3
1.1. 設置の目的と経緯	3
1.2. 枠組み及び参加機関	3
2. 活動報告	5
2.1. 総括	5
2.2. 地震予知連絡会への報告	7
2.3. 地震調査研究推進本部地震調査委員会での活用	12
2.4. 観測要求	14
2.5. データ取得実績	21
2.6. 会合開催状況	21
2.7. 外部公表実績	22
3. 個別課題研究の成果報告	29
01 国土地理院	30
02 防災科学技術研究所	47
03 気象庁	51
04 京都大学	63
05 北海道大学	73
06 鹿児島大学	76
07 宇宙航空研究開発機構	82
08 産業技術総合研究所	91
09 東北大学	94

1. 地震 SAR 解析 WG の概要

1.1. 設置の目的と経緯

地震予知連絡会は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構（以下、「JAXA」という.）の協力のもと、陸域観測技術衛星 2 号（以下、「だいち 2 号」という.）及び陸域観測技術衛星（以下、「だいち」という.）の観測データを用いた防災利用実証実験を通じ、SAR データの活用等を調査・検討するため、平成 26 年 2 月の第 202 回地震予知連絡会において、「SAR 解析ワーキンググループ（以下、「地震 SAR 解析 WG」という.）」を設置した。

地震 SAR 解析 WG の活動目的は、次のとおりである。

- ① 日本域及び海外を対象とした「だいち 2 号」の SAR データによる詳細な地殻変動・地盤変状・災害状況の把握、及びその手法の高度化に関する調査・検討
- ② 地震発生時や異常な地殻活動が検出された場合における、地殻変動等の把握・解析を通じた地震発生機構の解明、及び災害対応・災害軽減への応用についての SAR データの有効性の調査・検討

地震予知連絡会の事務局を担当する国土地理院は、平成 26 年 4 月に地震 SAR 解析 WG の活動について盛り込んだ「陸域観測技術衛星 2 号に関する国土地理院と宇宙航空研究開発機構の間の協定書」を国土地理院と JAXA の間で締結した。平成 26 年 5 月の第 203 回地震予知連絡会において実験協力者を募集し、平成 26 年 8 月に実験協力者（9 機関）が決定した。平成 26 年 10 月には、「陸域観測技術衛星 2 号に関する国土地理院と宇宙航空研究開発機構の実施計画書」において、だいち 2 号打上げから 3 年間（平成 26 年 5 月 24 日～平成 29 年 5 月 23 日）にわたる実施計画を定め、地震 SAR 解析 WG の活動が本格的に開始した。これまでに平成 28 年熊本地震、平成 27 年に発生したネパールの地震をはじめ、多数の地震において SAR データから地殻変動の詳細が捉えられ、地震予知連絡会において報告と議論が行われている。また、解析結果は、政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会（以下、「地震調査委員会」という.）にも提出され、地震に伴う地殻変動の評価に活用されている。

本報告は、平成 26 年 5 月から平成 29 年 5 月までの 3 ヶ年の実施内容と成果を取りまとめたものである。なお、平成 29 年 2 月の第 214 回地震予知連絡会において、地震 SAR 解析 WG の活動の継続（2 年間）が認められており、地震 SAR 解析 WG の活動は、平成 29 年 5 月以降も継続される。

1.2. 枠組み及び参加機関

地震 SAR 解析 WG 事務局（国土地理院）は、実験協力者の観測要求や成果を取りまとめ、JAXA に報告する役割を担う（図 1）。各年度の実験協力者（代表）及び研究課題を表 1 に示す。

地震発生時には、実験協力者からの観測要求を取りまとめたうえで JAXA に緊急観測の要請を行う。要求が認められ、観測が実施されると、JAXA はだいち 2 号の観測データを実験協力者

に提供する．SAR 干渉解析に必要な地震発生前のデータも合わせて提供する．

JAXA から配信される緊急観測データ以外に，実験協力者は課題研究実施のため，だいち 2 号及びだいちの観測データをそれぞれ年間最大 50 シーンまで無償で取得できる．

実験協力者の成果は地震予知連絡会，地震調査委員会等へ提出され，地震活動の評価，地震研究等に利用される．

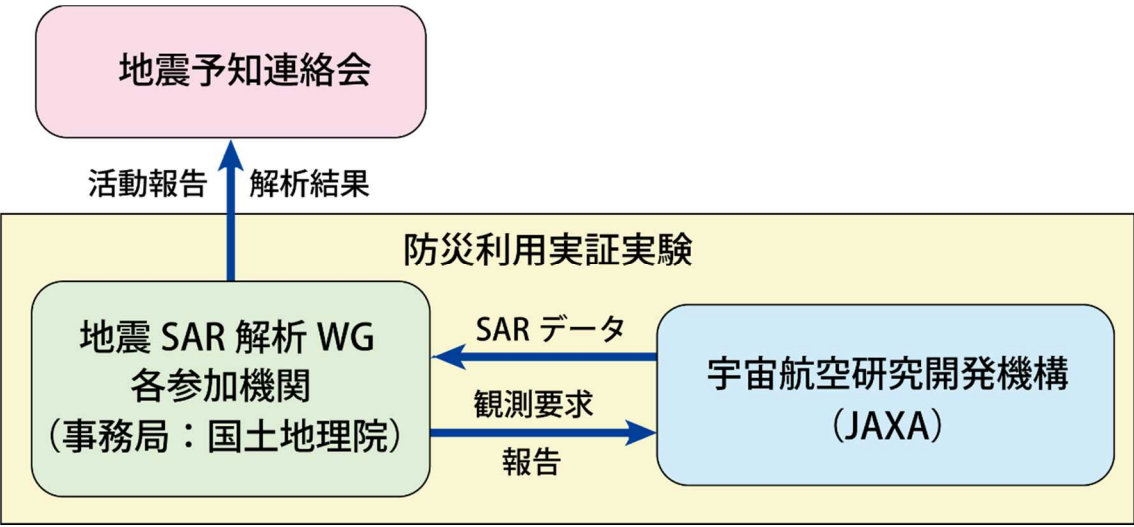


図 1. 地震 SAR 解析 WG の枠組み

表 1. 実験協力者（代表）一覧

管理番号	参加機関	代表研究者	研究課題名
01	国土地理院	矢来 博司	地殻活動に伴う地殻変動とその時空間変化の詳細把握
02	防災科学技術研究所	小澤 拓	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
03	気象庁	中村 浩二	地殻変動の詳細把握
04	京都大学	橋本 学	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
05	北海道大学	古屋 正人	陸域プレート境界周辺の地殻変動様式の解明
06	鹿児島大学	中尾 茂	干渉 SAR 解析を用いた変位速度急変帯の地震発生ポテンシャルの評価に関する研究
07	宇宙航空研究開発機構	夏秋 嶺※	PALSAR-2 と PALSAR の地殻変動検出能力の比較
08	産業技術総合研究所	田中 明子	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
09	東北大学	三浦 哲	SAR 及び GNSS データ解析に基づく奥羽脊梁山脈沿いのひずみ集中機構に関する研究

※ 宇宙航空研究開発機構の研究代表者は、島田政信（平成 26 年度）から夏秋嶺（平成 27～28 年度）に変更

2. 活動報告

2.1. 総括

地震 SAR 解析 WG は、「だいち 2 号」データを用いた防災利用実証実験を通じて活動している。地震 SAR 解析 WG は、原則として、地震予知連絡会の関係機関で構成されており、「だいち 2 号」または「だいち」のデータを用いて地震予知連絡会の活動に貢献する課題研究を実施する。研究は、機関毎に課題を設定して行われ、期間中に 9 課題が実施された（表 1）。

地震 SAR 解析 WG の活動の目的は、下記のとおりである。

- ・ SAR 観測データによる詳細な地盤変動等の把握及びその手法の高度化に関する調査・検討
- ・ 地殻変動等のメカニズム解明
- ・ 災害対応への ALOS-2 データの有効性の調査・検討
- ・ だいち 2 号の解析結果の地震予知連絡会や地震調査委員会等に対する報告

地震 SAR 解析 WG は、地震発生時に JAXA に対して緊急観測を提案することができる。JAXA は、地震 SAR 解析 WG からの提案を受けて観測の可能性を検討し、可能と判断した場合は緊急観測を実施して観測データを実験協力者に提供した。実験協力者は、提供されたデータの解析を実施し、解析結果に基づいて検出された地殻変動に関する議論を電子メールで行った。

実験協力者にアンケート調査を実施したところ、2006 年から 2011 年まで運用された「だいち」から 2014 年に運用を開始した「だいち 2 号」になったことで良くなった点として下記があげられた。

- ・ 空間分解能の向上
- ・ リピートパスの軌道間距離が短くなったことによる干渉性の向上
- ・ 高分解能モードに加えて広域観測モードでも干渉処理が可能
- ・ 左右両方向による観測
- ・ 緊急観測要求の受付時間の短縮

「だいち 2 号」の性能を生かして上記の目的を達成するため、各研究課題を実施した。また、「だいち」の運用中に得られたアーカイブデータを用いた研究課題も併せて実施した。

これらの取組によって得られた結果は、地震予知連絡会及び地震調査委員会において地殻変動の検討及び評価に活用された。平成 28 年熊本地震をはじめ、長野県北部の地震（平成 26 年 11 月 22 日、M6.7）、鳥取県中部の地震（平成 28 年 10 月 21 日、M6.6）、茨城県北部の地震（平成 28 年 12 月 28 日、M6.3）といった内陸の活断層で発生する地震において、地震波形による解析や GNSS 観測網からは把握できない局所的な変動の詳細を捉えた点で地震 SAR 解析 WG の貢献は大きい。地震 SAR 解析 WG の貢献が拡大した原因としては、「だいち 2 号」は、1）回帰日数が短い、2）左右両方向の観測、3）広域観測モードによる高品質な観測データの取得、を達成したことで、「だいち」に比べて地震発生後により迅速かつ詳細に SAR 干渉画像を得ること

が可能となったことが挙げられる。

以上から、地震 SAR 解析 WG の活動による成果は、着実に増加してきたといえる。

今後、「だいち 2 号」等の観測データの利活用を拡大するためには、既に国土地理院や JAXA の課題において成果が得られている 3 次元解析の適用など、詳細な地殻変動の把握とメカニズム解明に寄与する課題を継続する必要がある。また、多数の画像を使用して定常的な変動を検出する干渉 SAR 時系列解析等の手法を適用するためには、だいち 2 号の観測データは十分な蓄積が達成されておらず、今後蓄積が進むデータを活用した課題を実施していく必要がある。また、電離層・対流圏擾乱によって画像に生じるノイズを低減する手法の高度化も課題として上げられる。

だいち 2 号の設計寿命は 5 年間（目標：7 年間）であるため、空白期間なく観測を継続するには、だいち 2 号の後継機である先進レーダ衛星による観測の継続が必須である。先進レーダ衛星へ着実に移行し、観測の空白期間なく運用が継続されることを期待する。

なお、本研究課題を進める上での課題について参加機関にアンケートを実施したところ、下記の意見が上がっているため、今後の改善に期待する。

- ・「だいち 2 号」の観測データのファイルサイズが大きいため、ダウンロードと解凍に時間を要する。
- ・「だいち」の観測データで実施できたフレーム間の接続、ファアー・ニアレンジの画像範囲の拡張ができない。
- ・配布ファイルが 2 重に圧縮されているため、解凍に時間を要する。また、ファイル名が注文番号であるため、ファイルの内容が名称から判断できず、整理しにくい。
- ・観測モードが多様なため同一モードでの撮像数が少なく、時系列解析に有効な画像枚数に達しない。
- ・画像注文サイト（AUIG-2）が Internet Explorer をベースに作成されているため、Windows 以外の OS で注文を行いにくい。また、メンテナンスが高頻度なため、画像注文が可能な期間が制限されている。

2.2. 地震予知連絡会への報告

長野県北部の地震（平成 26 年 11 月 22 日，M6.7）について議論を行った第 205 回地震予知連絡会から，だいち 2 号の観測データを用いた解析結果が報告され，成果に基づいて活発な議論が行われた．地震 SAR 解析 WG が地震予知連絡会へ行った報告は，以下のとおりである．

表 2-1. 第 202 回地震予知連絡会（2014 年 2 月 17 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	——	地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの設置 (案)	事務局

表 2-2. 第 203 回地震予知連絡会（2014 年 5 月 19 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	——	地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ・実験協力者の募集	事務局

表 2-3. 第 204 回地震予知連絡会（2014 年 8 月 22 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	——	地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループ・実験協力者の決定	事務局

表 2-4. 第 205 回地震予知連絡会（2014 年 11 月 28 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	長野県北部の地震 (2014/11/22, M6. 7)	「だいち 2 号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図（暫定）	国土地理院
2	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-5. 第 206 回地震予知連絡会（2015 年 2 月 16 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	長野県北部の地震 (2014/11/22, M6. 7)	「だいち 2 号」合成開口レーダーによる地域変動分布図	国土地理院
2		「だいち 2 号」合成開口レーダーによる地域変動分布図と滑り分布モデル（暫定）	国土地理院
3		「だいち 2 号」干渉画像に基づく 2014 年長野県北部の地震に伴う地表変形の現地調査結果	国土地理院
4	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-6. 第 207 回地震予知連絡会（2015 年 5 月 22 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	ネパールの地震 (2015/4/25, Mw7.8)	2015 年 4 月 25 日ネパールの地震に関する合成開口レーダー（SAR）解析結果	国土地理院
2	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-7. 第 208 回地震予知連絡会（2015 年 8 月 21 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	中国・新疆の地震 (2015/7/3, Mw6.4)	2015 年 7 月 3 日中国・新疆の地震に関する合成開口レーダー解析結果	国土地理院
2	長野県北部の地震 (2014/11/22, M6.7)	2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震（M6.7）の余効変動（2）	国土地理院
3	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-8. 第 209 回地震予知連絡会（2015 年 11 月 27 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	チリの地震 (2015/9/17, Mw8.3)	2015 年 9 月 17 日チリの地震の関する合成開口レーダー解析結果	国土地理院
2	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-9. 第 210 回地震予知連絡会（2016 年 2 月 22 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	タジキスタン共和国 の地震（2015/12/7, Mw7.2）	2015 年 12 月 7 日タジキスタン共和国の地震に関する 合成開口レーダー解析結果	国土地理院
2	台湾の地震 (2016/2/6, Mw6.4)	2016 年 2 月 6 日台湾の地震に関する合成開口レーダー 解析結果	国土地理院
3	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-10. 第 211 回地震予知連絡会（2016 年 5 月 18 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	平成 28 年熊本地震 (2016/4 最大 M7.3)	平成 28 年熊本地震 「だいち 2 号」による地域変動分布図	国土地理院
2		平成 28 年熊本地震 緊急 GNSS 観測による変動量	国土地理院
3		平成 28 年熊本地震 MAI 法による解析結果	国土地理院
4		平成 28 年熊本地震(4 月 14 日 Mj6.5, 4 月 15 日 Mj6.4)の震源断層モデル	国土地理院
5		平成 28 年熊本地震の震源断層モデル（暫定）	国土地理院
6		平成 28 年熊本地震の滑り分布モデル（暫定）	国土地理院
7		平成 28 年熊本地震後「だいち 2 号」による地殻変動分布図	国土地理院
8		ALOS-2/PALSAR-2 による熊本地震に伴う地殻変動	気象庁気象研究所
9		PALSAR-2/InSAR による平成 28 年（2016 年）熊本地震に伴う地殻変動	防災科学技術研究所
10	エクアドルの地震 (2016/4/17, Mw7.8)	2016 年 4 月 17 日エクアドルの地震に関する合成開口レーダー解析結果	国土地理院
11	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-11. 第 212 回地震予知連絡会（2016 年 8 月 22 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	平成 28 年熊本地震 (2016/4 最大 M7.3)	平成 28 年熊本地震 「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果	国土地理院
2		「だいち 2 号」データの解析から求められた 2016 年熊本地震の三次元地殻変動分布	国土地理院
3		「だいち 2 号」データの解析から求められた三次元地殻変動分布と三角点改測による変動ベクトルとの比較	国土地理院
4	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-12. 第 213 回地震予知連絡会（2016 年 11 月 11 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	平成 28 年熊本地震 (2016/4 最大 M7.3)	平成 28 年熊本地震「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果	国土地理院
2		「だいち 2 号」データの解析から求められた 2016 年熊本地震の三次元地殻変動分布	国土地理院
3		「だいち 2 号」データの解析から求められた三次元地殻変動分布と三角点改測による変動ベクトルとの比較	国土地理院
4		SAR 干渉画像から抽出された平成 28 年熊本地震に伴う地表断層	国土地理院
5		SAR 干渉画像から抽出された平成 28 年熊本地震に伴う阿蘇カルデラ北西部の地表断層	国土地理院
6		SAR 画像によって求められた平成 28 年熊本地震に伴う阿蘇谷北西部の大きな水平変位	国土地理院
7	鳥取県中部の地震 (2016/10/21, M6.6)	鳥取県中部の地震「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果	国土地理院
8		干渉 SAR 3 次元解析によって求められた鳥取県中部の地震の地殻変動分布	国土地理院
9		2016 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部の地震による地殻変動について - SAR 干渉解析による地殻変動検出結果 - (暫定)	気象庁気象研究所
10		平成 28 年 (2016 年) 鳥取県の中部に発生した地震に関する情報	産業技術総合研究所
11	イタリア中部の地震 (2016/8/24, Mw6.2)	2016 年 8 月 24 日イタリア中部の地震に関する合成開口レーダー解析結果	国土地理院
12	イタリア中部の地震 (2016/10/26, Mw6.1) (2016/10/30, Mw6.6)	2016 年 10 月イタリア中部の地震に関する SAR 干渉解析結果	国土地理院
13	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

表 2-13. 第 214 回地震予知連絡会（2017 年 2 月 20 日）

番号	地震名	タイトル	機関名
1	茨城県北部の地震 (2016/12/28, M6.3)	平成 28 年(2016 年)12 月 28 日茨城県北部の地震 (Mj6.3)に関する合成開口レーダー解析結果	国土地理院
2		2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震(Mj6.3)と 2011 年 3 月 19 日(Mj6.1)の地震の干渉画像の比較	国土地理院
3		平成 28 年(2016 年)12 月 28 日茨城県北部の地震 (Mj6.3)に関する合成開口レーダー解析結果に基づく 地表変形の現地調査結果	国土地理院
4	ニュージーランドの 地震(2016/11/13, Mw7.8)	2016 年 11 月ニュージーランドの地震に関する SAR 解 析結果	国土地理院
5	——	地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの活動期 間の延長について(案)	事務局
6	——	地震 SAR 解析 WG の活動状況	事務局

2.3. 地震調査研究推進本部地震調査委員会での活用

地震 SAR 解析 WG の取組によって得られた成果は、地震調査委員会に報告され、地震活動の評価に活用された。だいち 2 号の成果に基づく評価文は、以下のとおりである。

表 3-1. 2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震の評価（抜粋）

2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震の評価（抜粋）
GNSS 観測の結果によると、本震の発生に伴って、白馬観測点（長野県）で南東方向に約 29cm 移動、上下方向に約 13cm 沈降するなどの地殻変動が観測された。また、<u>陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」が観測した合成開口レーダー画像の解析結果によると、白馬村を中心とする東西約 30km、南北約 30km の地域に地殻変動の面的な広がりがみられ、特に本震の震央西方の神城（かみしろ）断層沿いに大きな変動がみられる。</u> <u>これらの地殻変動から、すべりを生じた震源断層の長さは約 20km であると推定される。</u> （平成 26 年 12 月 9 日 地震調査研究推進本部 地震調査委員会）

表 3-2. 平成 28 年（2016 年）熊本地震の評価（抜粋）

平成 28 年（2016 年）熊本地震の評価（抜粋）
[地殻変動] GNSS 観測の結果によると、4 月 14 日の M6.5 の地震及び 4 月 15 日の M6.4 の地震の発生に伴って、熊本県内の城南観測点が北北東方向に約 20cm 移動するなどの地殻変動が、また、4 月 16 日の M7.3 の地震の発生に伴って、熊本県内の長陽観測点が南西方向に約 98cm 移動するなどの地殻変動が観測されている。<u>陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」が観測した合成開口レーダー画像の解析結果によると、熊本県熊本地方から阿蘇地方にかけて地殻変動の面的な広がりがみられ、布田川断層帯の布田川区間沿い及び日奈久断層帯の高野－白旗区間沿いに大きな変動がみられる。これらの地殻変動から、すべりを生じた震源断層の長さは約 35km であると推定される。</u> （平成 28 年 5 月 13 日 地震調査研究推進本部 地震調査委員会）

表 3-3. 2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震の評価（抜粋）

2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震の評価（抜粋）
G N S S 観測の結果によると，今回の地震に伴って，鳥取県内の羽合観測点が北北東方向に約 7cm 移動するなどの地殻変動が観測された．また，<u>陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」が観測した合成開口レーダー画像の解析結果によると，M6.6 の地震の震央周辺に地殻変動の面的な広がりがみられた．</u> <u>この地震の発震機構と今回の地震活動の分布、G N S S 観測及び合成開口レーダー画像の解析結果から推定される震源断層は、北北西－南南東方向に延びる長さ約 10km の左横ずれ断層であった。</u> （平成 28 年 11 月 10 日 地震調査研究推進本部 地震調査委員会）

表 3-4. 2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震の評価（抜粋）

2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震の評価（抜粋）
G N S S 観測の結果によると，今回の地震に伴って，茨城県内の里美観測点が西南西方向に，北茨城観測点が東北東方向に，共に約 2cm（暫定値）移動するなどの地殻変動が観測されている．また，<u>陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」が観測した合成開口レーダー画像の解析結果によると，最大約 27cm（暫定値）の沈降または西向き</u>の地殻変動が観測されている． （平成 28 年 12 月 29 日 地震調査研究推進本部 地震調査委員会）

表 3-5. 2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震の評価（抜粋）

2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震の評価（抜粋）
G N S S 観測の結果によると，今回の地震に伴って，茨城県内の里美観測点が西南西方向に約 3cm 移動するなどの地殻変動が観測された．また，<u>陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」が観測した合成開口レーダー画像の解析結果によると，最大約 27cm の沈降または西向き</u>の地殻変動が観測された． <u>この地震の発震機構と今回の地震活動の分布、G N S S 観測及び合成開口レーダー画像の解析結果から推定される震源断層は、北北西－南南東方向に延び、西南西方向に傾斜する長さ約 10km の正断層であった。</u> （平成 29 年 1 月 13 日 地震調査研究推進本部 地震調査委員会）

2.4. 観測要求

地震 SAR 解析 WG は、以下の地震の発生に伴い、JAXA に対して緊急観測要求を提出した。

<国内>

長野県北部の地震（平成 26 年 11 月 22 日，M6.7，表 4-1）

徳島県南部の地震（平成 27 年 2 月 6 日，M5.0，表 4-2）

平成 28 年熊本地震（平成 28 年 4 月，最大 M7.3，表 4-3）

鳥取県中部の地震（平成 28 年 10 月 21 日，M6.6，表 4-4）

茨城県北部の地震（平成 28 年 12 月 28 日，M6.3，表 4-5）

<海外>

パプアニューギニアの地震（平成 27 年 3 月 30 日，Mw7.5，表 4-6）

ネパールの地震（平成 27 年 4 月 25 日，Mw7.8，表 4-7）

マレーシア・ラナウ（ボルネオ島）の地震（平成 27 年 6 月 4 日，Mw6.0，表 4-8）

中国・新疆の地震（平成 27 年 7 月 3 日，Mw6.4，表 4-9）

インドネシア・パプアの地震（平成 27 年 7 月 27 日，Mw7.0，表 4-10）

チリの地震（平成 27 年 9 月 16 日，Mw8.3，表 4-11）

タジキスタンの地震（平成 27 年 12 月 7 日，Mw7.2，表 4-12）

台湾の地震（平成 28 年 2 月 6 日，Mw6.4，表 4-13）

エクアドルの地震（平成 28 年 4 月 17 日，Mw7.8，表 4-14）

イタリア中部の地震（平成 28 年 8 月 24 日，Mw6.2，表 4-15）

韓国南部の地震（平成 28 年 9 月 12 日，Mw5.4，表 4-16）

イタリア中部の地震（平成 28 年 10 月 28 日，Mw6.1，平成 28 年 10 月 30 日，Mw6.6，
表 4-17）

ニュージーランドの地震（平成 28 年 11 月 13 日，Mw7.8，表 4-18）

タジキスタンの地震（平成 28 年 11 月 25 日，Mw6.6，表 4-19）

スマトラの地震（平成 28 年 12 月 7 日，Mw6.5，表 4-20）

表 4-1. 長野県北部の地震（平成 26 年 11 月 22 日，M6.7）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/11/24 11 時 29 分頃	高分解能 3m	南行	右	○
2016/11/25 11 時 49 分頃	高分解能 3m	南行	右	○
2016/11/27 12 時 30 分頃	高分解能 3m	南行	左	○
2016/11/28 23 時 44 分頃	高分解能 3m	北行	右	○
2015/05/29 23 時 40 分頃	高分解能 3m	北行	右	×
2015/06/08 11 時 30 分頃	高分解能 3m	南行	右	×
2015/06/26 23 時 40 分頃	高分解能 3m	北行	右	○

表 4-2. 徳島県南部の地震（平成 27 年 2 月 6 日，M5.0）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/02/07 13 時 12 分頃	高分解能 3m	南行	左	○
2016/02/10 12 時 37 分頃	高分解能 3m	南行	左	○

表 4-3. 平成 28 年熊本地震（平成 28 年 4 月，最大 M7.3）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/04/15 12 時 53 分頃	高分解能 3m	南行	左	○
2016/04/18 0 時 25 分頃	高分解能 3m	北行	右	○
2016/04/18 12 時 18 分頃	高分解能 3m	南行	右	○
2016/04/19 0 時 46 分頃	広域観測 100m	北行	右	○
2016/04/19 23 時 30 分頃	広域観測 100m	北行	左	○
2016/04/20 12 時 59 分頃	高分解能 3m	南行	左	○
2016/04/29 12 時 53 分頃	高分解能 3m	南行	左	○
2016/04/29 23 時 44 分頃	高分解能 3m	北行	左	○
2016/05/01 0 時 4 分頃	高分解能 3m	北行	右	○
2016/05/02 12 時 18 分頃	高分解能 3m	南行	右	○

表 4-4. 鳥取県中部の地震（平成 28 年 10 月 21 日，M6.6）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/10/22 23 時 17 分頃	高分解能 3m	北行	左	○
2016/10/23 12 時 45 分頃	高分解能 3m	南行	左	○
2016/10/24 23 時 58 分頃	高分解能 3m	北行	右	○
2016/10/26 12 時 10 分頃	高分解能 3m	南行	右	○

表 4-5. 茨城県北部の地震（平成 28 年 12 月 28 日，M6.3）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/12/29 11 時 42 分頃	高分解能 3m	南行	右	○

表 4-6. パプアニューギニアの地震（平成 27 年 3 月 30 日, Mw7.5）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2015/03/31 10 時 23 分頃	広域観測 100m	南行	右	○
2015/04/05 10 時 30 分頃	広域観測 100m	南行	右	○

表 4-7. ネパールの地震（平成 27 年 4 月 25 日, Mw7.8）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2015/04/28 3 時 9 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2015/04/28 15 時 5 分頃	広域観測 100m	南行	右	○
2015/04/29 15 時 25 分頃	広域観測 100m	南行	右	○
2015/05/03 3 時 16 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2015/05/03 15 時 12 分頃	広域観測 100m	南行	右	○
2015/05/08 15 時 20 分頃	高分解能 3m	南行	右	○
2015/05/17 3 時 17 分頃	広域観測 100m	北行	右	○
2015/05/17 15 時 12 分頃	広域観測 100m	南行	右	○

表 4-8. マレーシア・ラナウ（ボルネオ島）の地震（平成 27 年 6 月 4 日, Mw6.0）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2015/06/18 1 時 20 分頃	高分解能 10m	北行	右	×
2015/06/23 1 時 30 分頃	高分解能 10m	北行	右	○

表 4-9. 中国・新疆の地震（平成 27 年 7 月 3 日, Mw6.4）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2015/07/27 3 時 40 分頃	高分解能 10m	北行	右	○

表 4-10. インドネシア・パプアの地震（平成 27 年 7 月 27 日，Mw7.0）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2015/07/29 11 時 30 分頃	広域観測 100m	南行	右	○

表 4-11. チリの地震（平成 27 年 9 月 16 日，Mw8.3）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2015/09/20 0 時 40 分頃	広域観測 100m	南行	右	○
2015/09/20 14 時 20 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2015/09/25 0 時 50 分頃	広域観測 100m	南行	右	○

表 4-12. タジキスタンの地震（平成 27 年 12 月 7 日，Mw7.2）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2015/12/29 4 時 2 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2016/01/13 16 時 13 分頃	広域観測 100m	南行	右	○

表 4-13. 台湾の地震（平成 28 年 2 月 6 日，Mw6.4）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/02/09 12 時 42 分頃	高分解能 3m	南行	右	○
2016/02/10 1 時 4 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2016/02/14 12 時 47 分頃	広域観測 100m	南行	右	○
2016/02/19 0 時 57 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2016/02/19 12 時 53 分頃	高分解能 3m	南行	右	○

表 4-14. エクアドルの地震（平成 28 年 4 月 17 日，Mw7.8）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/04/30 2 時 4 分頃	広域観測 100m	南行	右	○

表 4-15. イタリア中部の地震（平成 28 年 8 月 24 日, Mw6.2）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/08/25 8 時 0 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2016/08/31 20 時 15 分頃	高分解能 10m	南行	右	○

表 4-16. 韓国南部の地震（平成 28 年 9 月 12 日, Mw5.4）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/09/14 0 時 19 分頃	高分解能 10m	北行	右	○

表 4-17. イタリア中部の地震（平成 28 年 10 月 28 日, Mw6.1, 平成 28 年 10 月 30 日, Mw6.6）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/10/29 7 時 53 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2016/11/03 8 時 6 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2016/11/09 20 時 16 分頃	高分解能 10m	南行	右	○
2016/11/11 7 時 53 分頃	高分解能 10m	北行	右	○

表 4-18. ニュージーランドの地震（平成 28 年 11 月 13 日, Mw7.8）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/11/16 8 時 26 分頃	広域観測 100m	南行	右	○
2016/11/17 21 時 13 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2016/11/21 8 時 33 分頃	高分解能 10m	南行	右	○
2016/11/22 21 時 20 分頃	高分解能 10m	北行	右	○
2016/11/30 8 時 26 分頃	広域観測 100m	南行	右	○
2016/12/01 22 時 13 分頃	広域観測 100m	北行	右	○
2016/12/05 8 時 33 分頃	広域観測 100m	南行	右	○

表 4-19. タジキスタンの地震（平成 28 年 11 月 25 日, Mw6.6）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/12/08 3 時 53 分頃	高分解能 10m	北行	右	○

表 4-20. スマトラの地震（平成 28 年 12 月 7 日, Mw6.5）

観測日時（JST）	観測モード・分解能	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測
2016/12/08 14 時 16 分頃	高分解能 3m	南行	右	×
2016/12/10 2 時 49 分頃	広域観測 100m	北行	右	○
2016/12/13 14 時 23 分頃	高分解能 3m	南行	右	○

2.5. データ取得実績

表 5. AUIG-2 からのデータ取得実績

管理 番号	機関	FY26			FY27			FY28			期間 合計
		ALOS	ALOS-2		ALOS	ALOS-2		ALOS	ALOS-2		
		PSR	PSR-2	計	PSR	PSR-2	計	PSR	PSR-2	計	
01	国土地理院			0	10	20	30		26	26	56
02	防災科学 技術研究所			0			0			0	0
03	気象庁	50	49	99	50	50	100	50	50	100	299
04	京都大学	50		50		22	22	50	39	89	161
05	北海道大学			0			0			0	0
06	鹿児島大学	50	18	68	33	50	83			0	151
07	宇宙航空 研究開発機構			0			0			0	0
08	産業技術 総合研究所	1		1	50	50	100	50	49	99	200
09	東北大学			0			0			0	0
計		151	67	218	143	192	335	150	164	314	867

※ ALOS : だいち, ALOS-2 : だいち 2 号, PSR : PALSAR, PSR-2 : PALSAR-2 を表す.

2.6. 会合開催状況

第 1 回 日時 平成 26 年 11 月 5 日 (水) 12 : 05~12 : 40
 場所 つくばサイエンス・インフォメーションセンター 大会議室
 議題 1. ALOS-2 の状況及び定常運用に向けた準備状況について (JAXA)
 2. 実施計画書の制定 (事務局)
 3. 今後の活動予定 (事務局)

第 2 回 日時 平成 27 年 5 月 25 日 (月) 19:30~20:30
 場所 幕張メッセ国際会議場 102A
 議題 1. ALOS-2 の状況について (JAXA)
 2. 平成 26 年度成果報告
 3. 実施計画書の改訂について (事務局)
 4. 観測要求の状況 (事務局)
 5. 今後の活動予定 (事務局)
 6. ネパールの地震の成果と今後の課題 (国土地理院)

- 第3回 日時 平成28年5月23日（月）18:45～20:15
 場所 幕張メッセ国際会議場 101B
 議題 1. 各機関からの成果報告（国土地理院，防災科学技術研究所，気象庁，京都大学，JAXA）
 2. ALOS-2の運用状況およびJAXAのサポート態勢について（JAXA）
 3. データ提供と成果公開にあたって（事務局）
 4. 今後のスケジュール（事務局）
 5. 取りまとめに向けて（事務局）

- 第4回 日時 平成29年2月15日（水）14:00～16:00
 場所 国土地理院関東地方測量部 地震予知連絡会小会議室
 議題 1. 地震予知連絡会 SAR 解析 WG の概要（事務局）
 2. 各機関からの成果報告（国土地理院，気象庁，京都大学，JAXA）
 3. JAXA からの報告事項（JAXA）
 4. これまでの活動を振り返って（事務局）
 5. 今後のスケジュール（事務局）

2.7. 外部公表実績

国土地理院（表 6-1），防災科学技術研究所（表 6-2），気象庁（表 6-3），京都大学（表 6-4），北海道大学（表 6-5），宇宙航空研究開発機構（表 6-6），産業技術総合研究所（表 6-7），東北大学（表 6-8）が成果の外部公表を行った。

表 6-1. 外部公表実績（国土地理院）

表題	発表先	発表日
長野県北部を震源とする地震に関する情報 だいち2号干渉 SAR による変動の検出について	国土地理院ウェブサイト	2014/11/25
「だいち2号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図（暫定）	第205回地震予知連絡会	2014/11/28
「だいち2号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図	第271回地震調査委員会	2014/12/9
「だいち2号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図と矩形断層モデル（暫定）	第271回地震調査委員会	2014/12/9
「だいち2号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図と滑り分布モデル（暫定）	第271回地震調査委員会	2014/12/9
Crustal deformation derived from the northern Nagano prefecture earthquake detected by InSAR analysis using ALOS-2 data	北淡国際活断層シンポジウム 2015	2015/1/15
「だいち2号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図	第206回地震予知連絡会	2015/2/16
「だいち2号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図と滑り分布モデル	第206回地震予知連絡会	2015/2/16
「だいち2号」SAR 干渉画像に基づく2014年長野県北部の地震に伴う地表変形の現地調査結果	第206回地震予知連絡会	2015/2/16

表題	発表先	発表日
だいち 2 号 SAR 干渉解析により捉えられた平成 26 年（2014 年）長野県北部の地震に伴う地殻変動と地表変形	国土地理院時報第 127 集	2015/3/5
2015 年 4 月 25 日ネパールの地震に伴う地殻変動	国土地理院ウェブサイト	2015/4/30
2015 年 4 月 25 日ネパールの地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 276 回地震調査委員会	2015/5/14
2015 年 4 月 25 日ネパールの地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 207 回地震予知連絡会	2015/5/22
ALOS-2 の SAR 干渉解析で捉えられた長野県北部の地震の地殻変動	日本地球惑星科学連合 2015 年大会	2015/5/24
ALOS-2 データによって検出されたネパールの地震に伴う地殻変動と震源断層モデル	日本地球惑星科学連合 2015 年大会	2015/5/25
Case Study Of Japan: Current situation and challenges in Vertical Reference Frame of Japan	Technical Seminar on Vertical References Frame in Practice	2015/7/27
2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震(M6.7)の余効変動 (2)	第 208 回地震予知連絡会	2015/8/21
2015 年 7 月 3 日中国・新疆の地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 208 回地震予知連絡会	2015/8/21
2015 年 9 月 16 日チリの地震に伴う地殻変動	国土地理院ウェブサイト	2015/9/29
2015 年 9 月 17 日チリの地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 281 回地震調査委員会	2015/10/9
ALOS-2 干渉 SAR による ネパール (Gorkha) 地震に伴う地殻変動の計測	日本測地学会第 124 回講演会	2015/10/14
MAI 法による衛星進行方向の地表変位検出と 面的 3 次元変動場の獲得 -2014 年長野県北部の地震-	日本測地学会第 124 回講演会	2015/10/14
2014 年長野県北部の地震の余効変動	日本地震学会 2015 年度秋季大会	2015/10/26
ALOS-2 干渉 SAR による ネパール (Gorkha) 地震に伴う地殻変動の計測	日本地震学会 2015 年度秋季大会	2015/10/27
ALOS-2 干渉 SAR データから得られたネパール (Gorkha) 地震の震源断層モデル	日本地震学会 2015 年度秋季大会	2015/10/27
2015 年 9 月 17 日チリの地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 209 回地震予知連絡会	2015/11/27
SAR 干渉画像にあらわれた 2014 年長野県北部の地震に伴う地震断層周辺の地表変動	日本活断層学会 2015 年度秋季学術大会	2015/11/27
2014 年長野県北部の地震に伴う地表地震断層周辺の浅部地下構造と地殻変動	日本活断層学会 2015 年度秋季学術大会	2015/11/27
2015 年ネパール地震と干渉 SAR	平成 27 年度京都大学防災研究所一般研究集会	2015/12/2
Detailed Crustal Deformation and fault rupture of the 2015 Gorkha Earthquake, Nepal, revealed from ScanSAR-based interferograms of ALOS-2	Earth, Planets and Space, Vol 67	2015/12/14
Measuring Crustal Deformation Caused by Nepal (Gorkha) Earthquake Using ALOS-2 SAR Interferometry	2015 AGU Fall Meeting	2015/12/17
2015 年 12 月 7 日タジキスタンの地震に伴う地殻変動	国土地理院ウェブサイト	2016/1/15
2015 年 12 月 7 日タジキスタン共和国の地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 210 回地震予知連絡会	2016/2/22
2016 年 2 月 6 日台湾の地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 210 回地震予知連絡会	2016/2/22
2016 年 2 月 6 日台湾の地震に伴う地殻変動	国土地理院ウェブサイト	2016/3/3
平成 28 年熊本地震に関する情報	国土地理院ウェブサイト	2016/4/15
Case study of Japan	Technical Seminar on Reference Frame in Practice	2016/5/1

表題	発表先	発表日
Reconstruction of Geodetic Reference Frame After the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake	FIG Working Week 2017	2016/5/3
平成 28 年熊本地震「だいち 2 号」による地殻変動分布図	第 290 回地震調査委員会	2016/5/13
平成 28 年熊本地震緊急 GNSS 観測による変動量	第 290 回地震調査委員会	2016/5/13
平成 28 年熊本地震後「だいち 2 号」による地殻変動分布図	第 290 回地震調査委員会	2016/5/13
平成 28 年熊本地震に伴う断層近傍の地殻変動	第 290 回地震調査委員会	2016/5/13
平成 28 年熊本地震（4 月 14 日 Mj6.5, 4 月 15 日 Mj6.4）の震源断層モデル	第 290 回地震調査委員会	2016/5/13
平成 28 年熊本地震の震源断層モデル（暫定）	第 290 回地震調査委員会	2016/5/13
平成 28 年熊本地震「だいち 2 号」による地域変動分布図	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
平成 28 年熊本地震 緊急 GNSS 観測による変動量	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
平成 28 年熊本地震 MAI 法による解析結果	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
平成 28 年熊本地震（4 月 14 日 Mj6.5, 4 月 15 日 Mj6.4）の震源断層モデル	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
平成 28 年熊本地震の震源断層モデル（暫定）	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
平成 28 年熊本地震の滑り分布モデル（暫定）	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
平成 28 年熊本地震後「だいち 2 号」による地殻変動分布図	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
2016 年 4 月 17 日エクアドルの地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
災害時に求められる地理空間情報とは？	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/22
だいち 2 号を用いた全国 SAR 干渉解析	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/23
2014 年長野県北部の地震に伴う地表変動に関する SAR 干渉画像の解釈	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/23
平成 28 年（2016 年）熊本地震に伴う地殻変動	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/24
ALOS-2 干渉 SAR データから得られたネパール（Gorkha）地震の震源断層モデル	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/25
SAR 干渉画像による平成 28 年熊本地震で生じた小変位の地表断層群の抽出	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/25
電子基準点で国土を測る - さらに役立つ位置情報インフラを目指して -	第 45 回国土地理院報告会	2016/6/9
平成 28 年（2016 年）熊本地震に伴う地殻変動	国際地質科学連合(IUGS) 環境管理研究委員会・ NPO 日本地質汚染審査 機構 熊本地震国際合同 調査速報シンポジウム	2016/6/25
だいち 2 号を活用した地震に伴う地殻変動の把握 -地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの取組-	写真測量とリモートセンシング, 2016, vol.55, no.3	2016/7/13
The 2016 Kumamoto earthquake sequence	Proceedings of the Japan Academy, Ser. B, Physical and Biological Sciences	2016/8/17
平成 28 年熊本地震 「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果	第 212 回地震予知連絡会	2016/8/22
「だいち 2 号」データの解析から求められた 2016 年熊本地震の三次元地殻変動分布	第 212 回地震予知連絡会	2016/8/22

表題	発表先	発表日
「だいち 2 号」データの解析から求められた三次元地殻変動分布と三角点改測による変動ベクトルとの比較	第 212 回地震予知連絡会	2016/8/22
Small displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry	Earth, Planets and Space, Vol 68	2016/9/26
SAR 解析で捉えられた 2016 年熊本地震の前震の断層滑りの特徴	日本地震学会 2016 年度秋季大会	2016/10/6
ALOS-2 による 2016 年熊本地震に伴う様々な地表変位の詳細な計測	日本地震学会 2016 年度秋季大会	2016/10/7
SAR ピクセルオフセット解析で見る 2016 年熊本地震に伴う大規模変位	日本地震学会 2016 年度秋季大会	2016/10/7
地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの取組	日本測地学会第 126 回講演会	2016/10/19
ALOS-2 の SAR による 2016 年熊本地震に伴う非造構性地表変位の検出	日本測地学会第 126 回講演会	2016/10/19
SAR 解析で捉えられた 2016 年熊本地震の前震の断層滑りの特徴	日本測地学会第 126 回講演会	2016/10/20
2016 年熊本地震 SAR 干渉画像に見られる複雑な位相変化のアンラッピング	日本測地学会第 126 回講演会	2016/10/20
平成 28 年鳥取県中部の地震に関する情報	国土地理院ウェブサイト	2016/10/23
災害対応に地理空間情報が果たす役割	国土交通大学校 地域の防災計画・初動対応研修	2016/10/26
2016 年 10 月イタリア中部の地震に伴う地殻変動	国土地理院ウェブサイト	2016/11/8
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	国土地理院時報第 128 集	2016/11/10
鳥取県中部の地震「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果	第 297 回地震調査委員会	2016/11/10
干渉 SAR3 次元解析によって求められた鳥取県中部の地震の地殻変動分布	第 297 回地震調査委員会	2016/11/10
2016 年 10 月イタリア中部の地震に関する SAR 干渉解析結果	第 297 回地震調査委員会	2016/11/10
平成 28 年熊本地震「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
「だいち 2 号」データの解析から求められた 2016 年熊本地震の三次元地殻変動分布	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
「だいち 2 号」データの解析から求められた三次元地殻変動分布と三角点改測による変動ベクトルとの比較	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
SAR 干渉画像から抽出された平成 28 年熊本地震に伴う地表断層	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
SAR 干渉画像から抽出された平成 28 年熊本地震に伴う阿蘇カルデラ北西部の地表断層	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
SAR 画像によって求められた平成 28 年熊本地震に伴う阿蘇谷北西部の大きな水平変位	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
鳥取県中部の地震「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
干渉 SAR3 次元解析によって求められた鳥取県中部の地震の地殻変動分布	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
2016 年 8 月 24 日イタリア中部の地震に関する合成開口レーダー解析結果	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
2016 年 10 月イタリア中部の地震に関する SAR 干渉解析結果	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto Earthquake foreshocks (Mj 6.5 and Mj 6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR	第 11 回 UJNR 会合(天然資源の開発利用に関する日米会議/地震調査専門部会)	2016/11/16

表題	発表先	発表日
Detailed ground surface displacement and fault ruptures of the 2016 Kumamoto Earthquake revealed by SAR and GNSS data	第 11 回 UJNR 会合(天然資源の開発利用に関する日米会議/地震調査専門部会)	2016/11/16
2016 年 11 月 13 日ニュージーランドの地震に伴う地殻変動	国土地理院ウェブサイト	2016/11/17
干渉 SAR が捉えた小さな地表変位 – 熊本地震を例に –	防災科学技術研究所 土砂災害予測に関する研究集会 – 熊本地震とその周辺 –	2016/12/9
2016 年 11 月ニュージーランドの地震に関する SAR 解析結果	第 298 回地震調査委員会	2016/12/9
Detailed ground surface displacement and fault ruptures of the 2016 Kumamoto Earthquake revealed by SAR and GNSS data	2016 AGU Fall Meeting	2016/12/16
Detection of Ground Surface Deformation Caused by the 2016 Kumamoto Earthquake by InSAR using ALOS-2 Data	Bulletin of the GSI (Vol.64)	2016/12/28
茨城県北部の地震に関する情報	国土地理院ウェブサイト	2016/12/29
茨城県北部の地震「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果	第 299 回地震調査委員会	2016/12/29
Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (Mj6.5 and Mj6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR	Earth, Planets and Space, Vol69	2017/1/3
平成 28 年(2016 年)12 月 28 日茨城県北部の地震(Mj6.3)に関する合成開口レーダー解析結果	第 300 回地震調査委員会	2017/1/13
2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震(Mj6.3)と 2011 年 3 月 19 日 (Mj6.1) の地震の干渉画像の比較	第 300 回地震調査委員会	2017/1/13
平成 28 年 (2016 年) 12 月 28 日茨城県北部の地震 (Mj6.3) に関する合成開口レーダー解析結果に基づく地表変形の現地調査結果	第 300 回地震調査委員会	2017/1/13
地殻変動と測量成果管理	JACIC 情報 115 号	2017/1/27
測る、描く、守る – 国土の変動、衛星で探る –	建通新聞	2017/2/10
平成 28 年(2016 年)12 月 28 日茨城県北部の地震(Mj6.3)に関する合成開口レーダー解析結果	第 214 回地震予知連絡会	2017/2/20
2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震(Mj6.3)と 2011 年 3 月 19 日 (Mj6.1) の地震の干渉画像の比較	第 214 回地震予知連絡会	2017/2/20
平成 28 年(2016 年)12 月 28 日茨城県北部の地震(Mj6.3)に関する合成開口レーダー解析結果に基づく地表変形の現地調査結果	第 214 回地震予知連絡会	2017/2/20
2016 年 11 月ニュージーランドの地震に関する SAR 解析結果	第 214 回地震予知連絡会	2017/2/20
測る、描く、守る – 国土の変動、衛星で探る –	沖縄建通新聞	2017/3/1
GEONET 及び SAR 干渉解析による鳥取県中部の地震に伴う地殻変動	国土地理院時報第 129 集	2017/3/15

表 6-2. 外部公表実績（防災科学技術研究所）

表題	発表先	発表日
PALSAR-2 干渉解析による長野県北部の地震に伴う地殻変動	第 271 回地震調査委員会	2014/12/9
PALSAR-2/InSAR による平成 28 年（2016 年）熊本地震に伴う地殻変動	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18

表 6-3. 外部公表実績（気象庁）

表題	発表先	発表日
InSAR 時系列解析における東海地域の周辺の定常的な地殻変動	日本地震学会 2014 年度秋季大会	2014/11/24
ALOS-2 干渉解析による長野県北部の地震に伴う地殻変動	日本地球惑星科学連合 2015 年大会	2015/5/25
InSAR 時系列解析による紀伊半島地域の定常的な地殻変動	日本地震学会 2015 年度秋季大会	2015/10/26
ALOS-2/PALSAR-2 による熊本地震に伴う地殻変動	第 211 回地震予知連絡会	2016/5/18
ALOS-2/PALSAR-2 による平成 28 年（2016 年）熊本地震の解析	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/25
2016 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部の地震による地殻変動について - SAR 干渉解析による地殻変動検出結果 -（暫定）	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11

表 6-4. 外部公表実績（京都大学）

表題	発表先	発表日
ALOS-2/PALSAR-2 で捉えた地殻変動	平成 26 年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2015/2/23
InSAR と GPS を用いた歪集中帯における地震間地殻変動検出の試み	平成 26 年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2015/2/23
Initial Results of Interferometry of ALOS-2/PALSAR-2	The 2nd Japan-Taiwan Workshop on Crustal Dynamics	2015/4/24
ALOS-2/PALSAR-2 によるネパール地震に伴う地殻・地表面変動	日本地球惑星科学連合 2015 年大会	2015/5/25
Coseismic deformation of the 2014 northern Nagano earthquake detected by ALOS-2/PALSAR-2	IUGG General Assembly 2015	2015/7/1
地球観測衛星「だいち 2 号」で見たネパール地震災害	DPRI Newsletter No.77	2015/8/1
宇宙から見る自然災害 - 人工衛星が捉えたネパール地震による大地の変動 -	京都大学サマースクール	2015/8/20
Line-of-sight displacement from ALOS-2 interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 aftershock	Geophysical Research Letters	2015/8/26
High Resolution Monitoring of Surface Deformation with SAR	French-Japanese Symposium on Earthquakes and Triggered Hazards	2015/9/17
ALOS-2/PALSAR-2 で見たネパール地震	日本自然災害学会第 34 回学術講演会	2015/9/25
ALOS-2/PALSAR-2 で見たネパール地震	日本測地学会第 124 回講演会	2015/10/14
だいち 2 号で捉えた地震・火山噴火	京都大学宇宙総合学研究ユニット宇宙学セミナー	2015/10/23

表題	発表先	発表日
ALOS-2/PALSAR-2 によるネパール地震の地殻変動	日本地震学会 2015 年度 秋季大会	2015/10/27
Observation of the Gorkha, Nepal earthquake of April 25, 2015 with ALOS-2/PALSAR-2	2015 AGU Fall Meeting	2015/12/15
2016 年台湾美濃地震による地表面変動	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/23
「だいち 2 号」合成開口レーダーによる 2016 年熊本地震に伴う地表の断裂の検出	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/25
Results of preliminary analysis of ALOS-2/PALSAR-2 images for the 2016 Norcia, Italy, earthquake	京都大学防災研究所ウェブ サイト	2016/8/30
Observation of Earthquakes with ALOS-2/PALSAR-2: The Meinong, Taiwan, and Kumamoto, Japan, Earthquakes in 2016	CEOS SAR Calibration and Validation Workshop 2016	2016/9/8
ALOS-2/PALSAR-2 で観測された 2016 年熊本地震に伴う地表面変動とコヒーレンス変化	日本自然災害学会第 35 回学術講演会	2016/9/20
2016 年 2 月 6 日台湾美濃地震による地表面変動と被害の関係	日本自然災害学会第 35 回学術講演会	2016/9/21

表 6-5. 外部公表実績（北海道大学）

表題	発表先	発表日
InSAR と GPS を用いた跡津川断層周辺の地殻変動様式の解明	研究集会「地殻ダイナミクス—東北沖地震後の内陸変動の統一的理解—」	2015/9/27
跡津川断層周辺における地震間地殻変動の特徴	日本測地学会第 124 回講演会	2015/10/14
Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, Central Japan, detected by InSAR and GNSS	The 2 nd PI workshop for ALOS2	2015/11/18
Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, Central Japan, detected by InSAR and GNSS	AGU Fall Meeting	2015/12/15
Fault source model for the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 pixel-offset data: evidence for dynamic slip partitioning	Earth, Planets and Space, Vol 68	2016/10/22

表 6-6. 外部公表実績（宇宙航空研究開発機構）

表題	発表先	発表日
「だいち 2 号」によるネパール地震の観測結果について	JAXA ウェブサイト	2015/4/27
「だいち 2 号」によるネパール地震の観測結果について (2)	JAXA ウェブサイト	2015/4/30
「だいち 2 号」によるネパール地震の観測結果について (3)	JAXA ウェブサイト	2015/5/1
「だいち 2 号」によるネパール地震の観測結果について (4)	JAXA ウェブサイト	2015/5/4
2015 年ネパール地震における ALOS-2/ALOS による干渉解析と被害抽出	日本地球惑星科学連合 2015 年大会	2015/5/25
PALSAR-2 の 3 時期コヒーレンス差解析による、ネパール震災被害箇所検出の試み	日本地球惑星科学連合 2015 年大会	2015/5/25
Line-of-sight displacement from ALOS-2 interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 aftershock	Geophysical Research Letters	2015/8/26

表題	発表先	発表日
SAR interferometry using ALOS-2 PALSAR-2 data for the Mw7.8 Gorkha, Nepal earthquake	Earth, Planets and Space, Vol.68	2016/2/1
地球観測衛星による熊本地震の緊急観測対応	日本地球惑星科学連合 2016 年大会	2016/5/25
「だいち 2 号」によるイタリア中部地震の観測結果について	JAXA ウェブサイト	2016/8/25
「だいち 2 号」によるニュージーランド地震の観測結果について	JAXA ウェブサイト	2016/11/17

表 6-7. 外部公表実績（産業技術総合研究所）

表題	発表先	発表日
平成 28 年（2016 年）鳥取県中部に発生した地震に関する情報	第 213 回地震予知連絡会	2016/11/11
「2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震（Mj 6.3）」の現地調査報告	産業技術総合研究所ウェブサイト	2017/1/12

表 6-8. 外部公表実績（東北大学）

表題	発表先	発表日
平成 28 年 12 月 28 日茨城県北部の地震に伴った地殻変動	第 300 回地震調査委員会	2017/1/13

3. 個別課題研究の成果報告

次ページ以降参照.

地殻活動に伴う地殻変動とその時空間変化の詳細把握

PI：国土地理院・地理地殻活動研究センター 矢来博司

CI：国土地理院・地理地殻活動研究センター 飛田幹男（H26-27）・

藤原智（H28）・小林知勝・森下遊

CI：国土地理院・測地部 山中雅之（H26-27）・三浦優司（H27）・

山田晋也（H26-27）・攪上泰亮（H27）・上芝晴香（H28-）

1. はじめに

本課題では、地殻活動に伴う地殻変動や地表面変動の詳細な把握を通じて、地震発生メカニズムの解明、地震・地盤被害の把握・軽減に資することを目的とし、国内外で発生した地震について ALOS-2/PALSAR-2 データを利用した SAR 干渉解析等により地殻変動や地表面変動を詳細に把握、震源断層のモデル化を通じて発生メカニズムの解明等を行う。また、地殻変動が大きく地震発生が危惧される地域（新潟県内ひずみ集中帯、御前崎地区など）や、地震後の余効変動が見られる地域について、干渉 SAR 時系列解析等により地殻変動の時空間変化の把握を試みることにしている。

2014 年の ALOS-2（だいち 2 号）の打ち上げ以来、2014 年の長野県北部の地震や平成 28 年（2016 年）熊本地震、2015 年のネパールの地震など、国内外で発生した大規模な地震について、ALOS-2 により観測されたデータを早急に解析し、震源断層モデルの推定を行ってきた。その解析結果や推定された震源断層モデルについては、地震予知連絡会や地震調査委員会に報告を行い、現状評価等に活用された。本稿では、本課題で SAR 干渉解析等により把握した地殻変動と、推定した震源断層モデルについて報告する。

2. 地震に伴う地殻変動の解析

地震 SAR 解析 WG から緊急観測要求を行ったデータについては、全て SAR 干渉解析を行った。解析対象となった地震のうち、地殻変動が検出された地震は表 1 のとおりである。これらの地震のうち、国内で発生した 5 つの地震（2014 年の長野県北部の地震、平成 28 年（2016 年）熊本地震（前震・本震）、2016 年の鳥取県中部の地震および茨城県北部の地震）については全て震源断層モデルの推定を行った。また、海外の地震のうち、2015 年に発生したネパールの地震については震源断層モデルの推定を行った。

2.1 国内の地震

2.1.1 長野県北部の地震（2014/11/22, M6.7）

2014年11月27日に長野県北部で発生した地震（M6.7）について、ALOS-2/PALSAR-2データを用いてSAR干渉解析を行った。解析結果の例を図1に示す。神城断層周辺の東西約30km、南北約30kmの地域で地殻変動を検出した。得られた地殻変動の特徴は地震のメカニズム解（西北西－東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型）とおおむね整合している。

本震震央の西側に地殻変動が大きい領域が見られ、神城断層を挟んで東側は西向・上方に最大約 1m 変動し、西側は東向・下方に最大 20cm 程度変動したことがわかった。この大きな地殻変動を示す領域は南北約 10km にわたっており、その最西部では特に干渉縞の間隔が狭く、変位量が不連続となる境界線を形成している。この境界線は、既知の神城断層の地表トレースとよく一致しており、現地調

査で地表地震断層が報告された場所ともほぼ整合している。地震直後に行われた地表地震断層の調査では、白馬村塩島の北東付近より北方では地表地震断層の存在が報告されていないが、SAR 干渉画像からは数 cm～十数 cm の変位量の北に延びる明瞭な位相不連続の境界線が見られる。この結果に基づき現地調査を行った結果、位相不連続線に沿って地表変形を確認している (<http://www.gsi.go.jp/cais/topic141203.html>)。

SAR 干渉解析及び震源領域周辺の GNSS 連続観測点（以下、GEONET とよぶ）で観測された地殻変動を基に断層面上の滑り分布モデルの構築を行った。断層面は、試行錯誤的に SAR データを良く説明する面を探索し、最終的に、地表から傾斜角 40°で東に傾き下がる断層とその深部延長の深さ 2km において傾斜角 60°で東に傾き下がる断層が結合する屈曲した断層面モデルを用いた。なお、傾斜角が一様な一枚の断層面では SAR データを説明することはできなかった。解析の結果、主に 2 つのセグメントにおける左横ずれを含む逆断層運動が推定された（図 2）。推定された地震モーメントの解放量は 3.7×10^{18} Nm で、これはモーメントマグニチュード 6.3 に相当する（剛性率は 30GPa を仮定）。現地調査によると、神城断層周辺において東側隆起でやや左横ずれを含む地表地震断層が出現している。これは本モデルにおける地表付近の大きな滑りに対応し、その滑り成分は地表で観測された断層運動の成分と調和的である。

これらの SAR 干渉解析の結果や震源断層モデルの推定結果等については、地震予知連絡会や地震調査委員会に報告し、現状評価に活用された。報告した資料は地震予知連絡会報に国土地理院（2015a）としてまとめられている。

表 1. 地殻変動を検出した地震

発生日	発生地（地震名）	地震規模（国内は気象庁 M, 海外は Mw）	震源断層モデル
2014/11/22	長野県北部	M6.7	○
2015/4/25	ネパール	Mw7.8	○
2015/5/12	ネパール（余震）	Mw7.3	○
2015/7/3	中国・新疆	Mw6.4	
2015/9/16	チリ	Mw8.3	
2015/12/7	タジキスタン	Mw7.2	
2016/2/6	台湾南部	Mw6.4	
2016/4/14	平成 28 年（2016 年）熊本地震（前震）	M6.5	○
2016/4/16	平成 28 年（2016 年）熊本地震（本震）	M7.3	○
2016/4/17	エクアドル	Mw7.8	
2016/8/24	イタリア中部	Mw6.2	
2016/10/21	鳥取県中部	M6.6	○
2016/10/26	イタリア中部	Mw6.1	
2016/10/30	イタリア中部	Mw6.6	
2016/11/13	ニュージーランド南島	Mw7.8	
2016/11/25	タジキスタン	Mw6.6	
2016/12/7	スマトラ島	Mw6.5	
2016/12/28	茨城県北部	M6.3	○

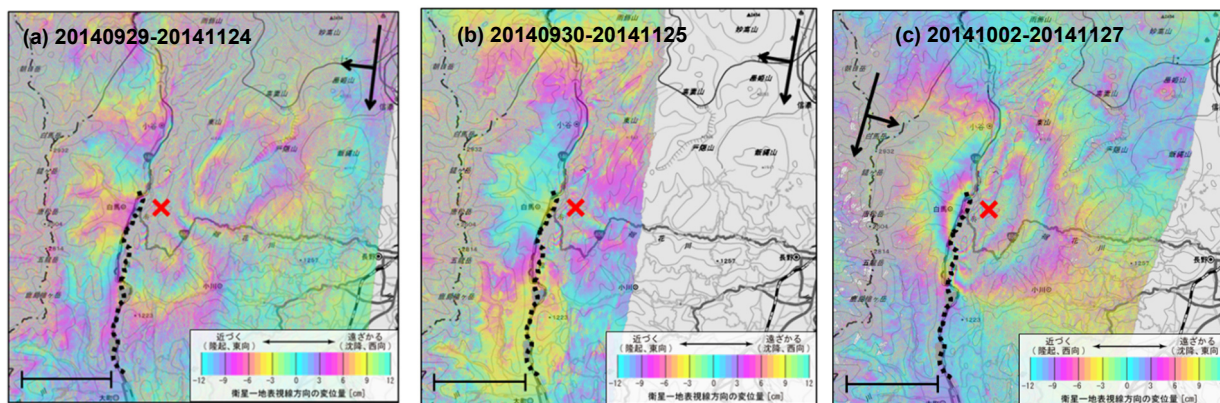


図 1. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられた長野県北部の地震（2014/11/27, M6.7）に伴う地殻変動。赤い×印は本震の震央位置。黒破線は神城断層の地表トレース（都市圏活断層図「白馬岳」（澤ほか，1999），「大町」（東郷ほか，1999）による）。解析に用いたデータの観測日は各図の左上に表示。

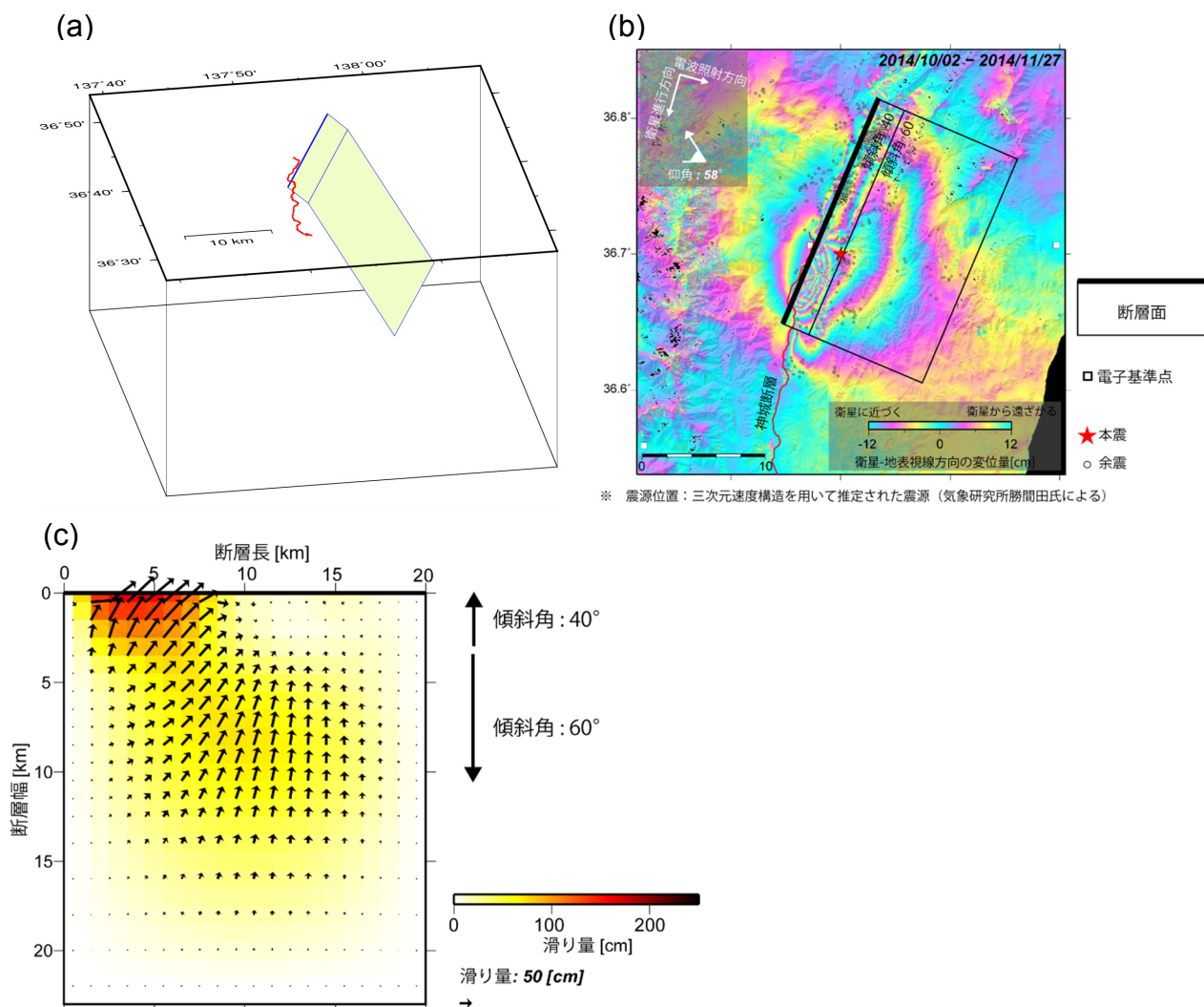


図 2. 長野県北部の地震の震源断層モデル。(a)用いた断層面の形状。(b)断層面モデルの位置。(c)断層面上の滑り分布。

2.1.2 平成 28 年（2016 年）熊本地震

熊本地震では、2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分に M6.5 の前震が発生し、その約 28 時間後の 4 月 16 日 1 時 25 分に M7.3 の本震が発生した。これらの地震について、ALOS-2/PALSAR-2 データを用いて SAR 干渉解析を行った。

前震から本震までの時間間隔が 28 時間と短いため、前震の地殻変動を得ることができるペアは 1 ペアのみであるが、解析の結果、地震に伴う地殻変動が捉えられた（図 3a）。日奈久断層帯の西側において、北部で衛星－地表間の距離短縮、南部で衛星－地表間の距離伸長が見られ、その特徴から、日奈久断層帯に沿ったやや西側に傾斜した高角の断層が右横ずれしたと考えられる。

本震については数多くの観測が行われ、SAR 干渉解析により地震に伴う地殻変動が捉えられた（図 3b）。布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿って最大で 1m を超えるような地殻変動が検出された。また、MAI (Multiple Aperture Interferometry) 法やピクセルオフセット解析により、断層帯のごく近傍までの変動が明らかになった（図 4）。ピクセルオフセット解析を組み合わせ得られた 3 次元変動場（図 4b）からは、布田川断層帯を挟んで南北で変位が不連続となっていることが分かる。また、変位の不連続が布田川断層帯東端でやや北側にシフトしてさらに東側に延びており、布田川断層帯とは別セグメントの断層運動が示唆される。布田川断層帯と日奈久断層帯を境界として右横ずれの水平変動を示しているが、特に布田川断層帯では北側で 2m を超える沈降が見られ、正断層的な動きが生じたと考えられる。このような複雑な地殻変動は、面的に地殻変動を捉えることができる SAR だからこそ明らかにできたことであり、地震像の把握、メカニズムの解明に SAR が重要な役割を果たし得ることを示している。

また、SAR 干渉解析では、震源断層による地殻変動だけでなく、小変位の地表断層や、阿蘇カルデラ内での大規模な水平変位なども多数捉えられており（Fujiwara et al., 2016）、地表変位の把握にも大きく寄与しているといえる。

これら観測された地殻変動に基づき、震源断層モデルの推定を行った（図 5）。布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿って 3 枚の断層面を仮定して推定を行い、布田川断層帯では北西傾斜の断層と東側延長に南東傾斜の断層、日奈久断層帯では北西傾斜の断層が推定された。それぞれ右横ずれ成分を主体とし、布田川断層帯では顕著に正断層成分を含む。推定された滑り量は、布田川断層帯で最も大きく、約 4m となった。断層パラメータから計算されたモーメントマグニチュードは Mw7.1 と、地震波から推定される規模と同程度である。

これらの SAR 干渉解析の結果や震源断層モデルの推定結果等については、地震予知連絡会や地震調査委員会に報告し、現状評価に活用された。報告した資料は地震予知連絡会報に国土地理院(2016c)としてまとめられている。また、関連する研究成果として Fujiwara et al.(2016), Kobayashi(2017), 上芝ほか(2016), 矢来ほか(2016)などがまとめられている。

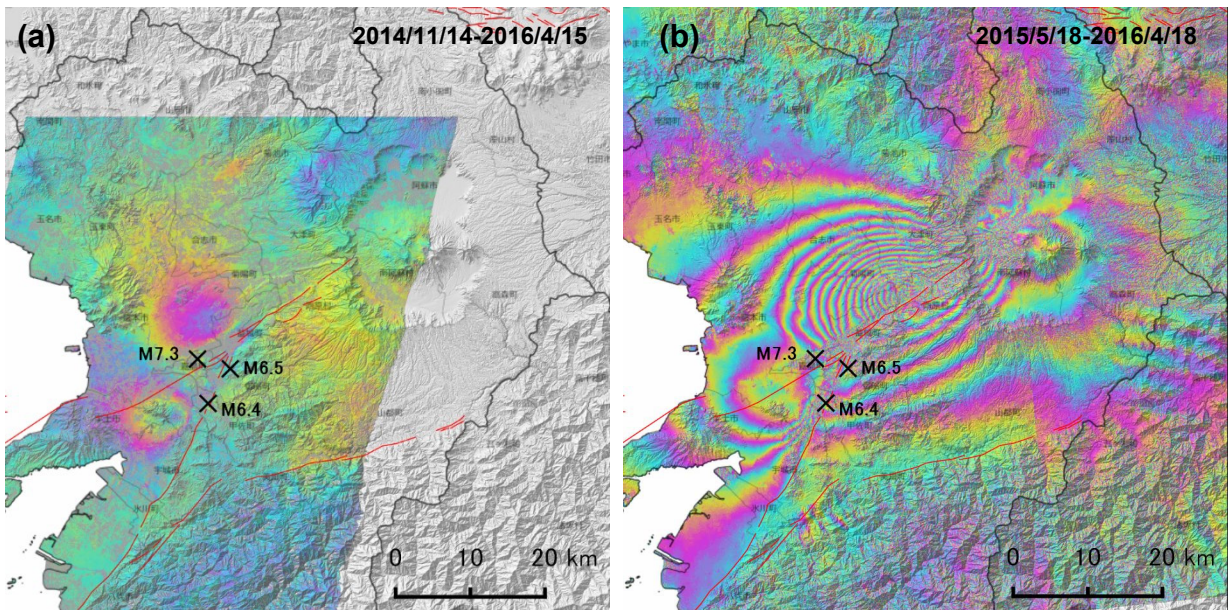


図 3. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられた熊本地震に伴う地殻変動. (a)前震(2016/4/14, M6.5). (b) 本震 (2016/4/16, M7.3). 解析に用いたデータの観測日は各図の左上に表示.

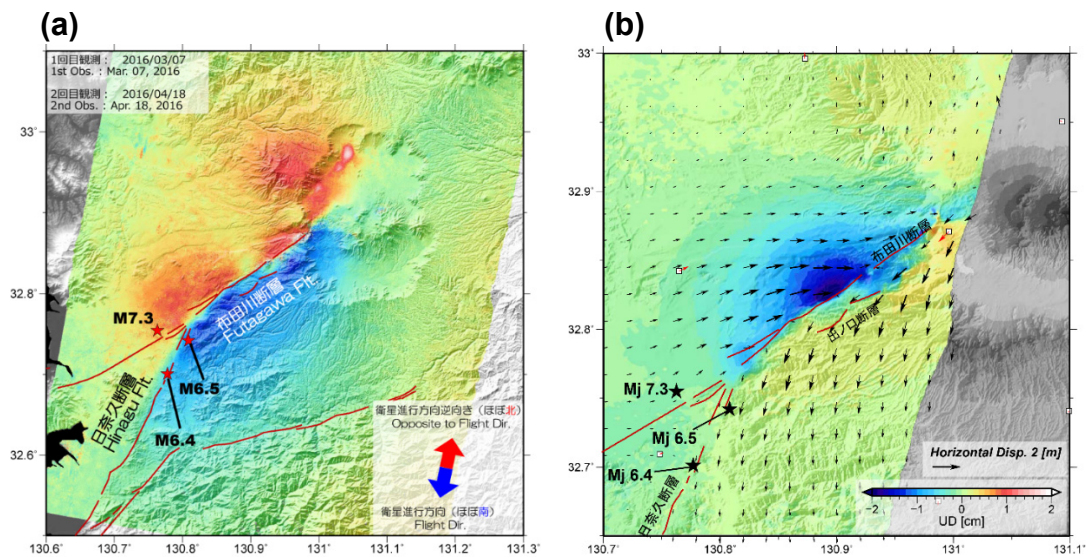


図 4. SAR 干渉解析以外の解析手法で捉えられた地殻変動. (a) MAI(Multiple Aperture Interferometry)法で得られたアジマス方向(準南北方向)の変動量分布. (b) ピクセルオフセット解析を組み合わせ得られた 3 次元変動場.

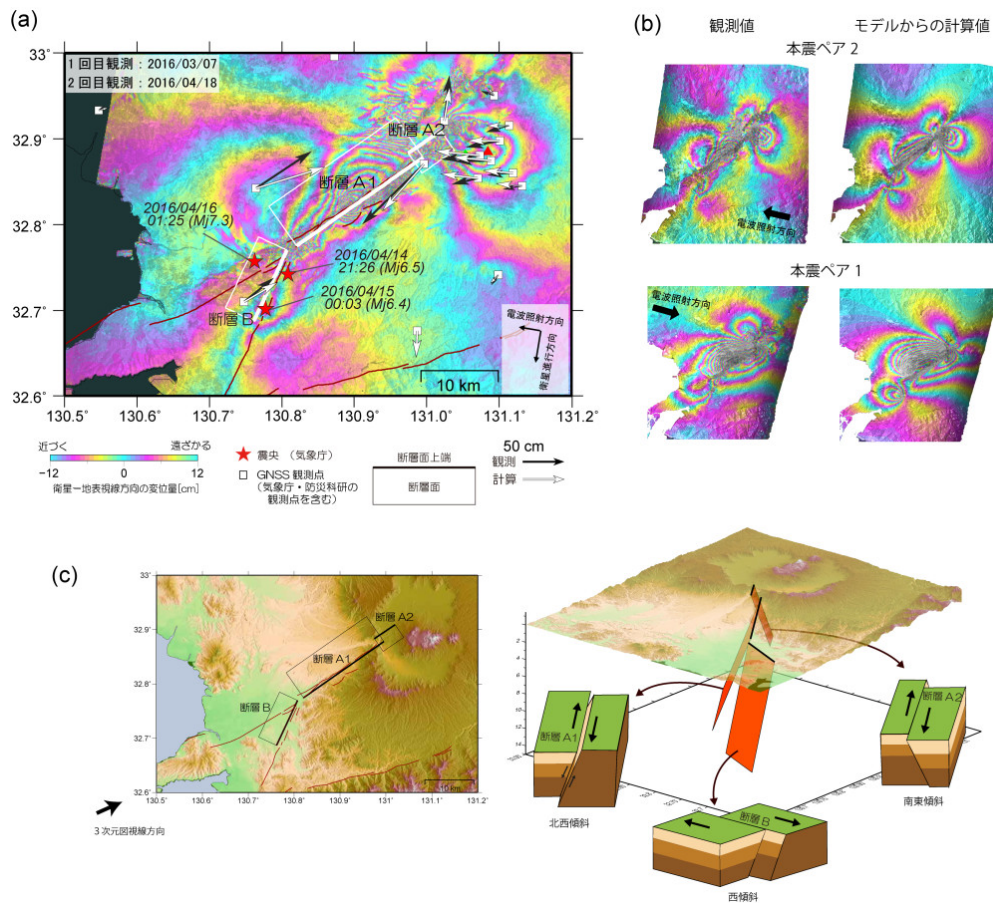


図5. 推定された震源断層モデル. (a)干渉 SAR（観測値）と GNSS（観測値・計算値），(b)干渉 SAR（観測値・計算値），(c)矩形断層モデルの概念図.

2.1.3 鳥取県中部の地震（2016/10/21, M6.6）

2016年10月21日に鳥取県中部で発生した M6.6 の地震を対象とし、ALOS-2/PALSAR-2 データを用いて SAR 干渉解析を行った。この地震では北行および南行軌道のそれぞれで左右両方向での観測が行われ、4 方向の SAR 干渉画像（図 6）が得られたことから、3 次元の変動場の推定を行った（図 7）。本震震央の北東側と南西側では隆起、北西側と南東側では沈降となっており、上下成分は震央を中心としてほぼ 4 象限型の分布となっている。この特徴は、鉛直の断層が横ずれ運動した際の理論的な変動分布と調和的である。水平成分は、北東側で北東方向、北西側で南東方向、南西側で南西方向、南東側で北西方向への変位を示していることから、北北西－南南東走向のほぼ鉛直の断層が左横ずれ運動したと考えられる。

SAR 干渉解析と GEONET で得られた地殻変動から震源断層モデルの推定を行った（図 8）。断層面の走向は干渉画像の位相変化分布を参考に調整し、 165° とした。断層面の傾斜は 90° と設定し、断層面上の滑り分布を推定した。推定された滑りは左横ずれで、本震震源より北側のやや浅い側で主要な滑りが見られ、滑りの中心域は深さ約 5km に位置している。推定されたモーメントマグニチュードは約 6.2 となった。

これらの SAR 干渉解析の結果や震源断層モデルの推定結果等については、地震予知連絡会や地震調査委員会に報告し、現状評価に活用された。報告した資料は地震予知連絡会報に国土地理院 (2017a) としてまとめられている。

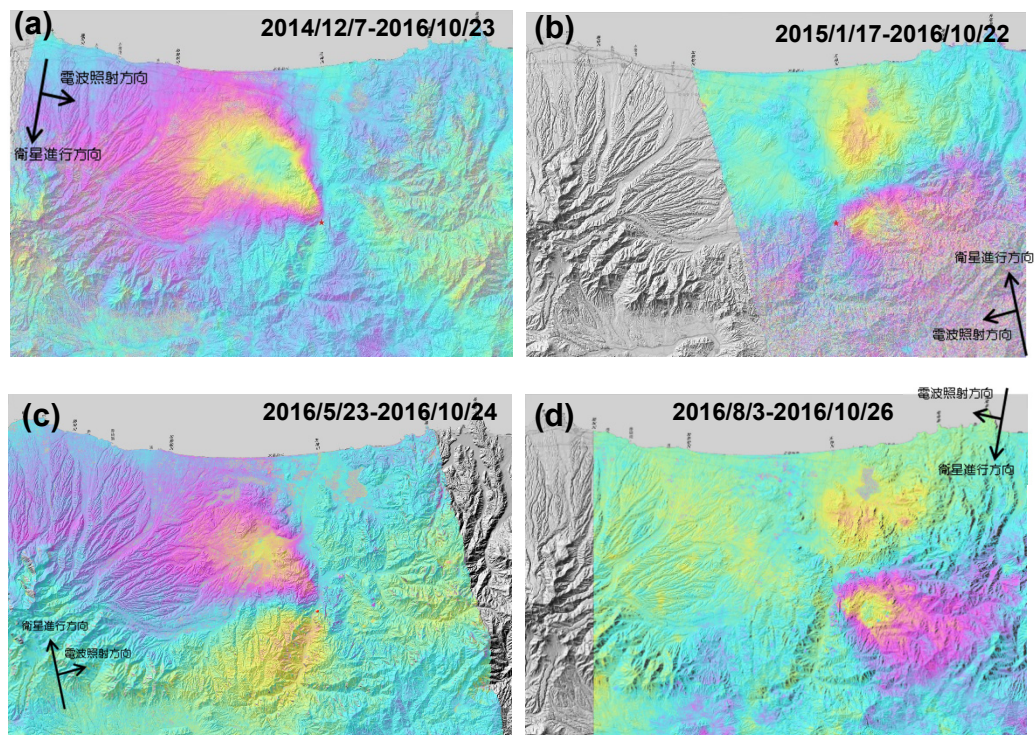


図 6. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられた鳥取県中部の地震（2016/10/21, M6.6）に伴う地殻変動。 (a)南行・左視。 (b)北行・左視。 (c)北行・右視。 (d)南行・右視。 それぞれの観測日は各図の右上に表示。

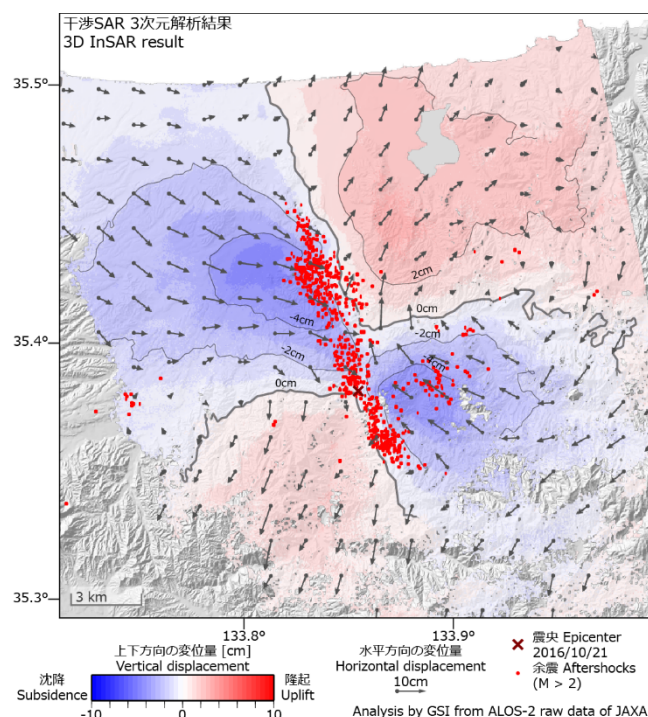


図 7. SAR 干渉解析結果を組み合わせ推定した 3 次元変動場。色は上下変動、矢印は水平変動の向きと大きさを示す。赤の点は余震分布。

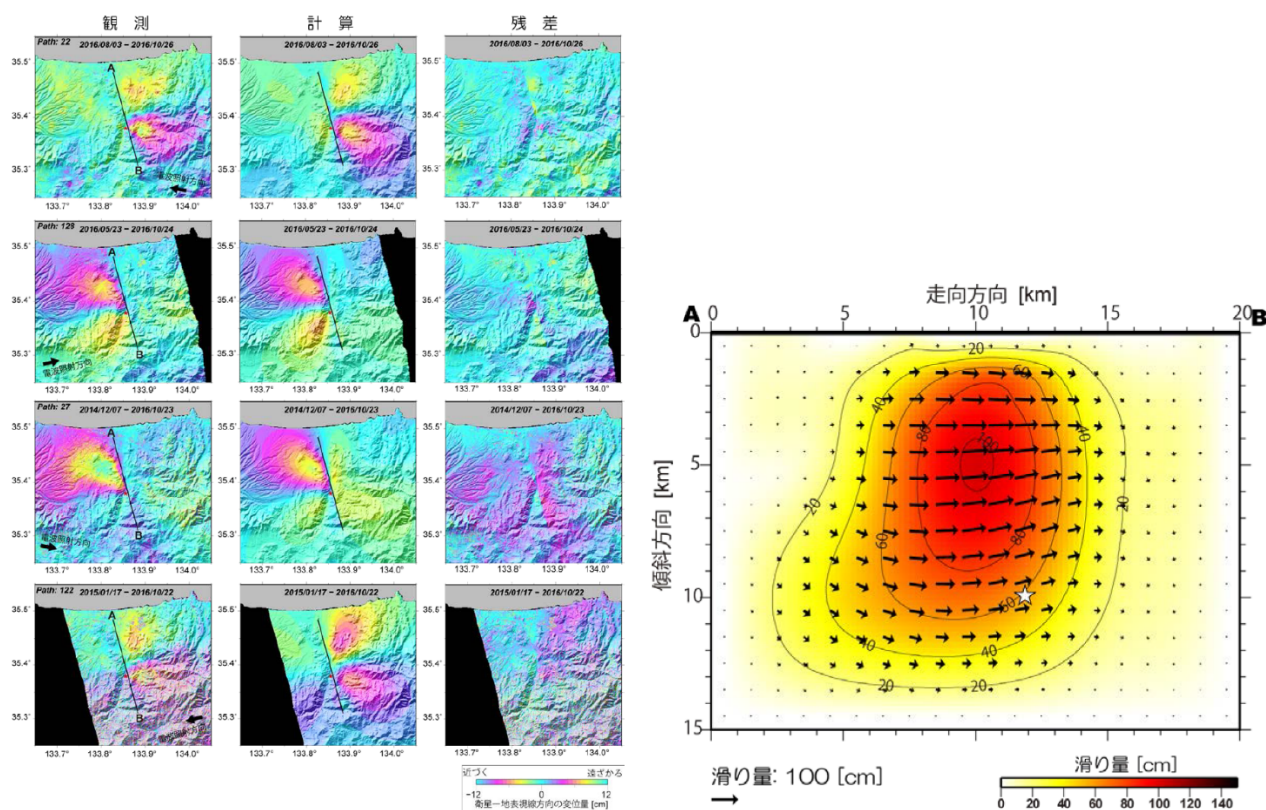


図 8. 推定された震源断層モデル。(左) 観測値と計算値の比較。(右) 断層面上の滑り分布。

2.1.4 茨城県北部の地震 (2016/12/28, M6.3)

2016 年 12 月 28 日に茨城県北部で発生した M6.3 の地震を対象とし、ALOS-2/PALSAR-2 データを用いて SAR 干渉解析を行った。解析の結果、最大約 27cm の衛星－地表間の距離伸長が観測された (図 9)。最大の地殻変動が観測された領域では長さ約 2km の変位の不連続が見られる。

SAR 干渉解析と GEONET で得られた地殻変動に基づき震源断層モデルの推定を行った。矩形断層一様滑りの震源断層モデルを 2 枚のセグメントを仮定して推定を行い、北北西 (北西)－南南東 (南東) 走向の南西傾斜の断層面で、最大変位域の浅部に局所的な滑りが推定された (図 10)。計算されるモーメントマグニチュードは約 5.9 となった。

この地震の震源域の近傍では、2011 年 3 月 19 日に M6.1 の地震が発生しており、その地殻変動が ALOS/PALSAR データを用いた SAR 干渉解析により捉えられている (図 11a)。今回の地震による地殻変動 (図 11b) と比較すると、地殻変動がほぼ同じ領域で観測され、地殻変動の特徴も良く似ていることが分かる。特に、変位の不連続線の位置はほぼ同じ場所で見られ、地表付近ではほぼ同じ位置で滑りが生じたことが示唆される。この比較は、ALOS, ALOS-2 と L-band の SAR による観測が継続的に行われてきたことにより可能になったことであり、継続的な観測の重要性を示しているといえる。

これらの SAR 干渉解析の結果や震源断層モデルの推定結果等については、地震予知連絡会や地震調査委員会に報告し、現状評価に活用された。報告した資料は地震予知連絡会報に今後まとめられる予定である。

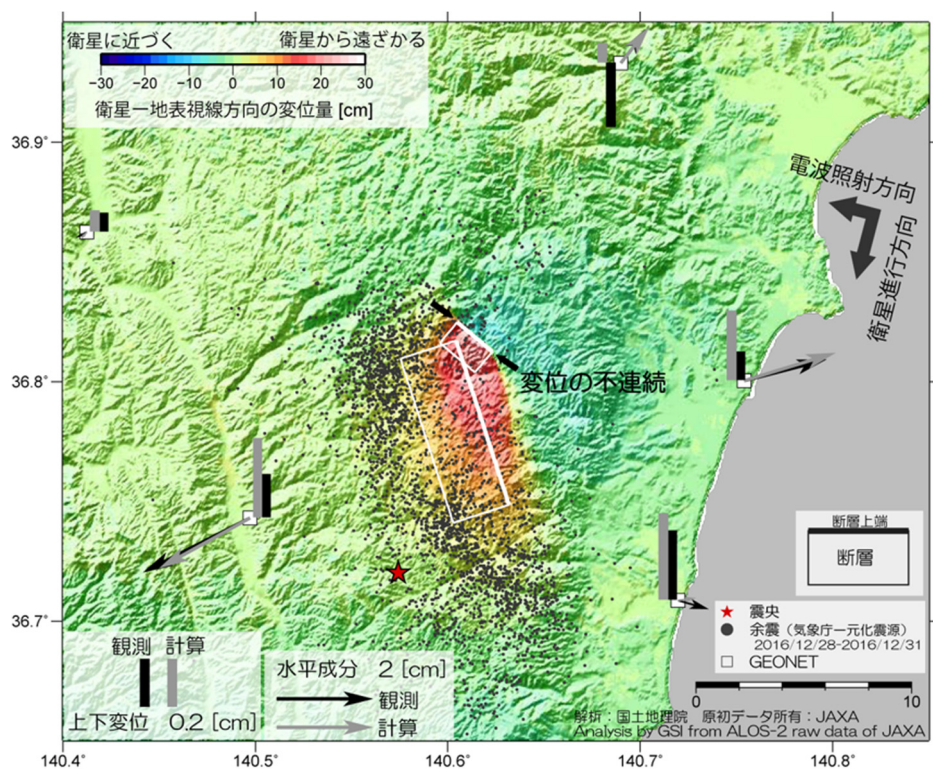


図 9. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられた茨城県北部の地震（2016/12/28, M6.3）に伴う地殻変動。色が 2016/11/17 と 2016/12/29 のデータの SAR 干渉解析で得られた地殻変動を示す。矢印は GNSS 連続観測で得られた地殻変動（黒：観測値，灰色：震源断層モデル（後述）から計算される地殻変動量）。黒点は気象庁一元化震源（期間：12/28～12/31）。

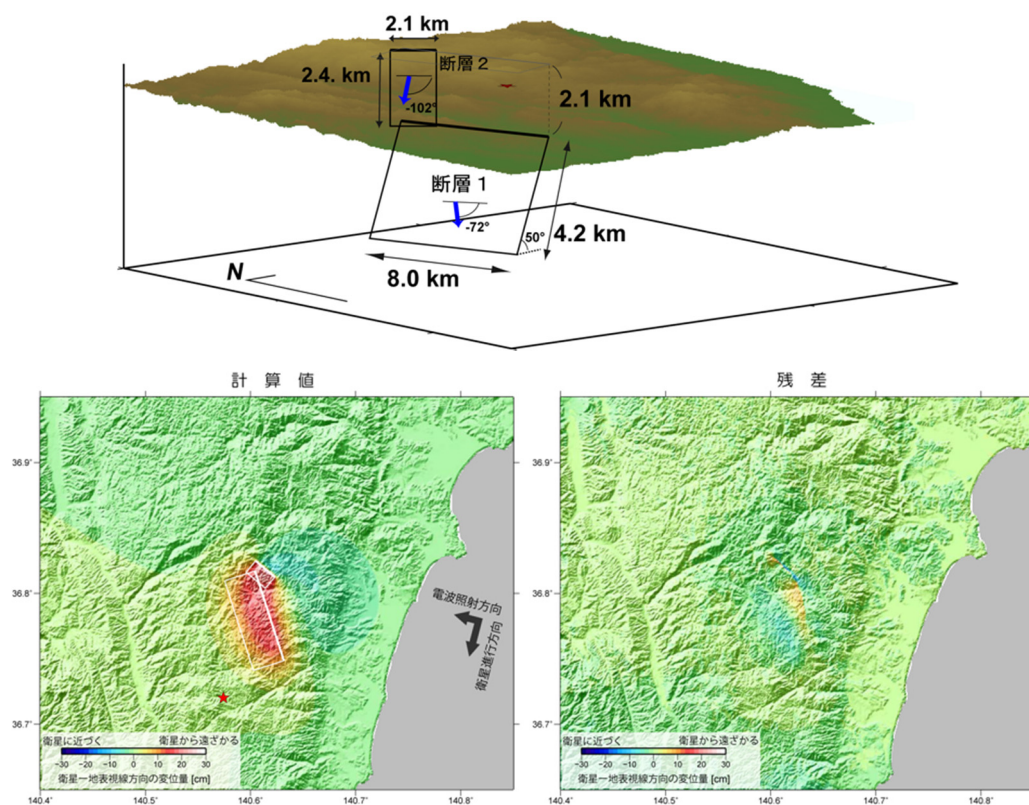


図 10. 推定された震源断層モデル。（上）推定された震源断層の模式図。（下）計算値及び観測値からの残差。

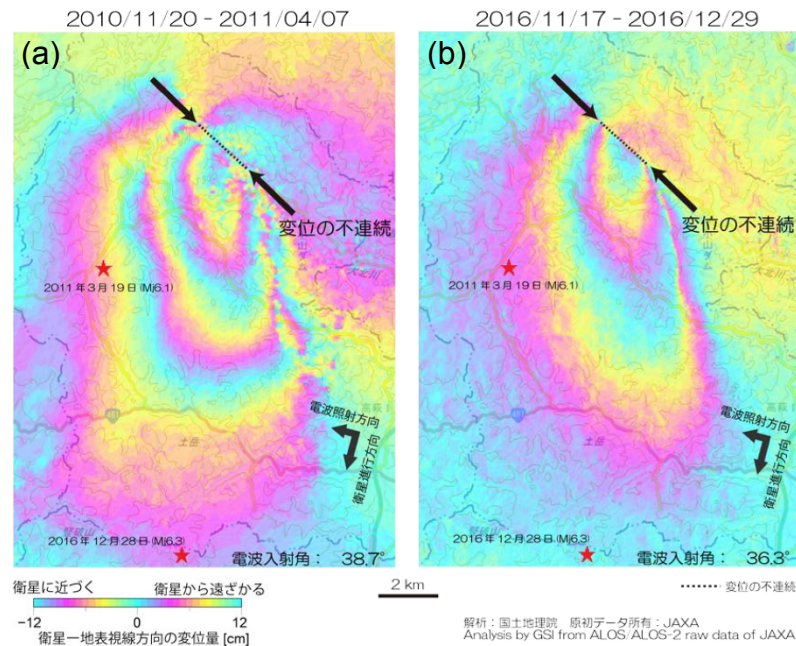


図 11. 2011 年 3 月 19 日の M6.1 の地震に伴う地殻変動（ALOS/PALSAR データの SAR 干渉解析結果）と今回の地震の地殻変動との比較. (a)2011 年 3 月 19 日の M6.1 の地震. (b)2016 年 12 月 28 日の M6.3 の地震.

2.2 海外の地震

2.2.1 ネパールの地震（2015/4/25, Mw7.8）

2015 年 4 月 25 日に発生した本震および 5 月 12 日に発生した最大余震 (Mw7.3) を対象とし、ALOS-2/PALSAR-2 データを用いて SAR 干渉解析を行った。

SAR 干渉解析の結果の例を図 12 に示す。広域に及ぶ地殻変動が ScanSAR-ScanSAR 干渉解析により一度に把握できている。本震に伴い、カトマンズ北方を中心として東西 160km 程度の範囲で 10cm 以上の地殻変動が捉えられた（図 12a）。変動域の南部では衛星に近づく変位、北部では衛星から遠ざかる変位となっている。カトマンズの北方から約 30km 東方にかけての領域が最も地殻変動が大きく、最大で 1.2m 以上の変位となっている。このように大きな地殻変動が見られたものの、地表地震断層の出現は明瞭には認められなかった。最大余震では震央付近で 70cm の変位が捉えられ、本震と同様に変動域の南部では衛星に近づく変位、北部では衛星から遠ざかる変位となっている（図 12b）。また、得られた干渉画像から、断層運動による長空間波長の地殻変動成分を取り除くことで、地震に伴い生じた局所的な地表面変動を検出することができた。図 13 はカトマンズ付近を拡大した図である。局所的な地盤沈下と考えられる変動が検出されている。

SAR 干渉解析で得られた地殻変動から、滑り分布モデルを推定した。その結果、北に傾斜する低角の断層面上で、カトマンズの北東 20-30km の領域の直下に最大 6m 超の滑りが推定された（図 14）。推定された Mw は 7.9 である。また、最大余震の西隣に極端に滑りが欠損している領域が見られることが分かった。

これらの SAR 干渉解析の結果や震源断層モデルの推定結果等については、地震予知連絡会に報告した。報告した資料は地震予知連絡会報に国土地理院（2015b）としてまとめられている。

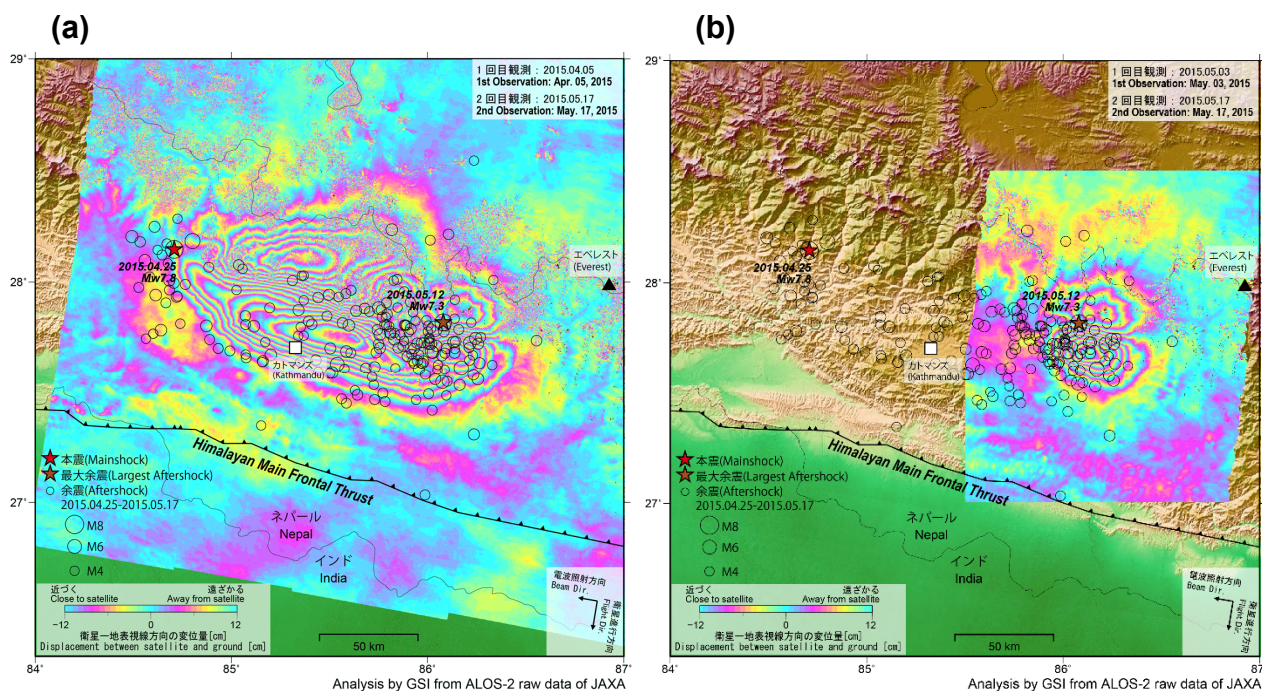


図 12. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられたネパールの地震に伴う地殻変動。赤い星印は本震及び最大余震の震央位置。丸印は余震の震央。 (a) 本震＋余震：2015 年 4 月 5 日と 5 月 17 日のデータの解析結果, (b)余震：2015 年 5 月 3 日と 5 月 17 日のデータの解析結果。

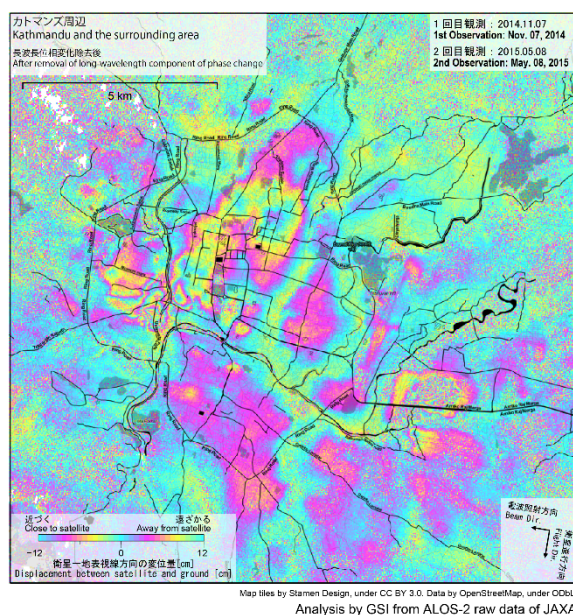


図 13. カトマンズ付近の局所的な地表面変動。2014 年 11 月 7 日と 2015 年 5 月 8 日のデータによる SAR 干渉画像から、長空間波長成分を除去して得られた差分画像。

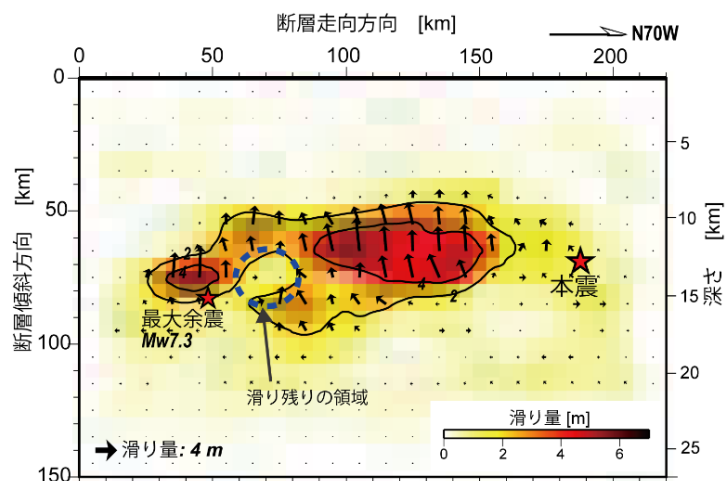


図 14. 推定された震源断層面上の地震時滑り分布。矢印は滑りの方向と大きさ。等値線は 2m 間隔。赤い星印は本震及び最大余震の震源断層面への投影位置。

2.2.2 その他の海外の地震

2015 年のネパールの地震以外の海外の地震については震源断層モデルの推定を行っていないため、SAR 干渉解析により検出された地殻変動について簡単に説明する。

2015 年 7 月 3 日に中国・新疆で発生した Mw6.4 の地震では、30km 程度の空間的広がりを持つ地殻変動が検出された（図 15）。震源域の北側では最大約 10cm の衛星—地表視線方向の距離短縮，南側では最大約 3cm の距離伸長が見られた。得られた地殻変動は地震のメカニズムとも整合的である。

この解析結果については地震予知連絡会報に国土地理院（2016a）としてまとめられている。

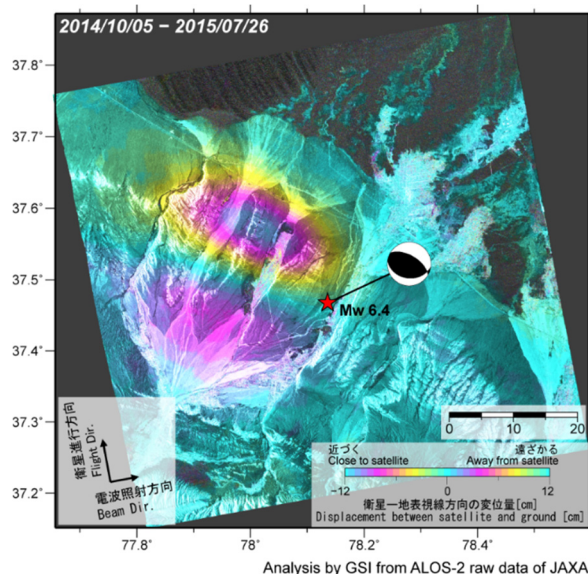


図 15. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられた中国・新疆の地震（2015/7/3, Mw6.4）に伴う地殻変動。赤い星印は本震の震央位置。2014 年 10 月 5 日と 2015 年 7 月 26 日のデータを解析したもの。

2015 年 9 月 16 日にチリで発生した Mw8.3 の地震では、震央の北 50–70km 付近の沿岸部を中心に 1m 以上の変動が検出された。東側上空からの観測では衛星から遠ざかる向き（図 16a），西側上空からの観測では衛星に近づく向き（図 16b）の変動となっており，西向きの変動が支配的であると考えられる。変動の分布から，断層の滑りの中心域は南緯 31° 付近と考えられる。

この解析結果については地震予知連絡会報に国土地理院（2016b）としてまとめられている。

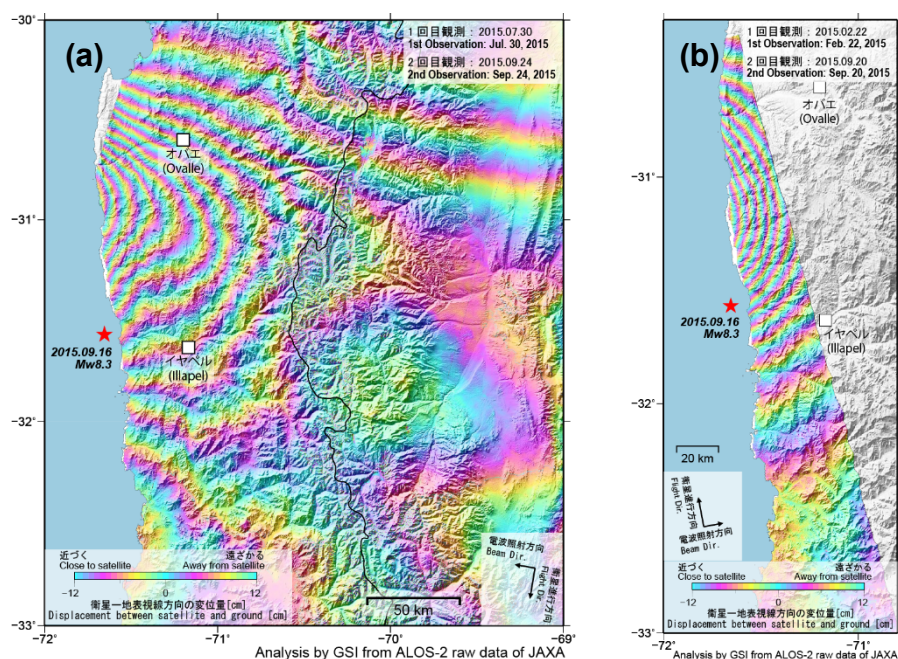


図 16. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられたチリの地震（2015/9/16, Mw8.3）に伴う地殻変動。

赤い星印は本震の震央位置。(a) 南行軌道：2015 年 7 月 30 日と 9 月 24 日のデータの解析結果，(b) 北行軌道：2015 年 2 月 22 日と 9 月 20 日のデータの解析結果。

2015 年 12 月 7 日にタジキスタンで発生した Mw7.2 の地震では，変動の大きな地域が震央から北東方向に延びており，40km 以上に及んでいることが分かった（図 17）。変動の分布から，北東－南西走向の左横ずれ断層運動が生じたと考えられる。北東部では変位の不連続が見られ，地表に断層が現れた可能性がある。

この解析結果については地震予知連絡会報に国土地理院（2016d）としてまとめられている。

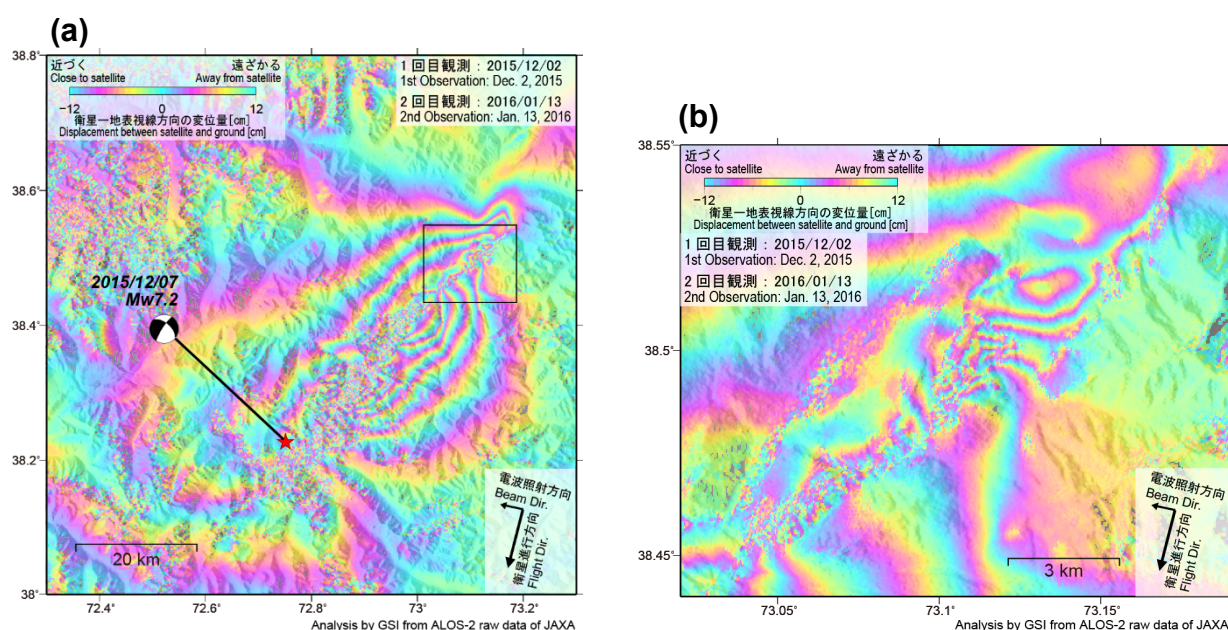


図 17. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられたタジキスタンの地震（2015/12/7, Mw7.2）に伴う地殻変動。赤い星印は本震の震央位置。(a) 2015 年 12 月 2 日と 2016 年 1 月 13 日のデータの解析結果，(b) 北西部の拡大図。

2016年2月6日に台湾南部で発生した Mw6.4 の地震では、西側上空からの観測では震央の西側で衛星—地表視線方向の距離短縮（図 18a），東側上空からの観測では西側で衛星—地表視線方向の距離短縮，その東側では衛星—地表視線方向の距離伸長（図 18b）が捉えられた．これらの観測結果から 2.5 次元解析を行い，準東西方向と準上下方向の変位分布を求めた（図 19）．震源付近で最大約 6cm の沈降及び最大約 10cm の西向きの変動，震源の西側約 20km 付近を中心に最大約 12cm の隆起，最大約 8cm の西向きの変動が見られ，変動の特徴はメカニズム解と概ね整合的である．なお，北緯 22.97°，東経 120.33° 付近を中心とする南北約 10km，東西約 2km の領域では，周囲とは異なる東向きの変動が見られる．

この解析結果については地震予知連絡会報に国土地理院（2016e）としてまとめられている．

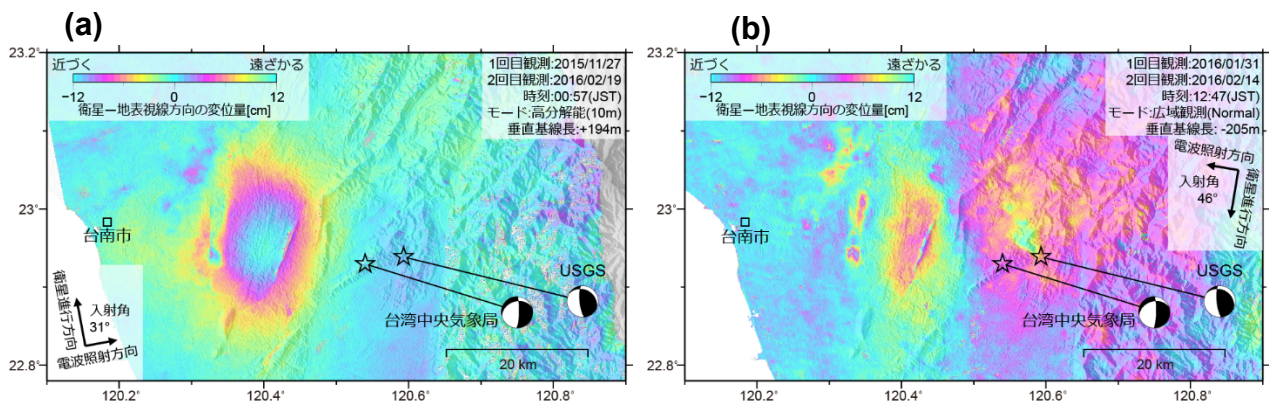


図 18. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられた台湾の地震（2016/2/6, Mw6.4）に伴う地殻変動．星印は本震の震央（USGS および台湾中央気象局によるもの）．(a) 北行軌道：2015 年 11 月 27 日と 2016 年 2 月 19 日のデータの解析結果，(b)南行軌道：2016 年 1 月 31 日と 2 月 14 日のデータの解析結果．

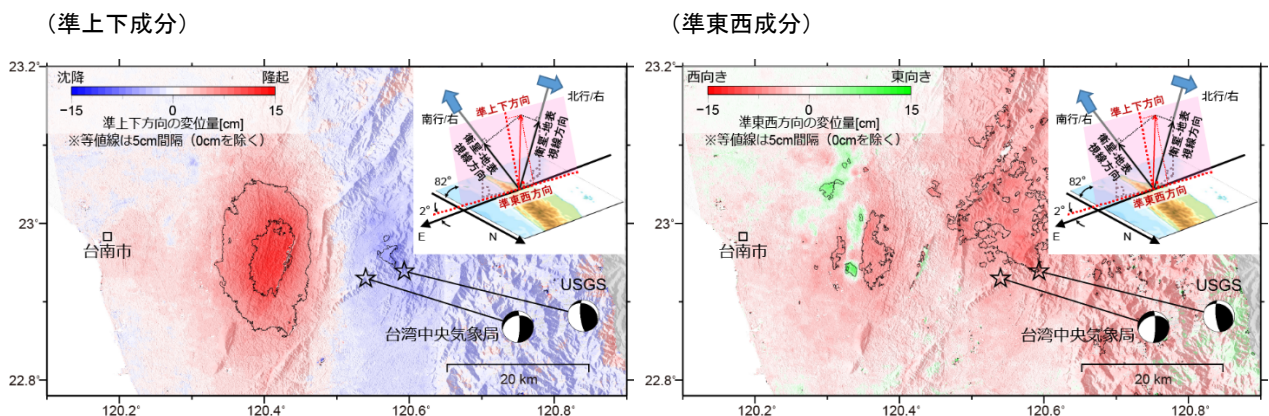


図 19. 2.5 次元解析で得られた準上下成分（左）および準東西成分（右）．

2016 年 4 月 17 日にエクアドルで発生した Mw7.8 の地震では，地殻変動は 100km 以上の広域に及び，震央から約 70km 南に変動の中心が見られ，最大で約 70cm の衛星—地表視線方向の距離伸長が捉えられた（図 20）．地殻変動の特徴は地震のメカニズム解と概ね整合的である．

この解析結果については地震予知連絡会報に国土地理院（2016f）としてまとめられている．

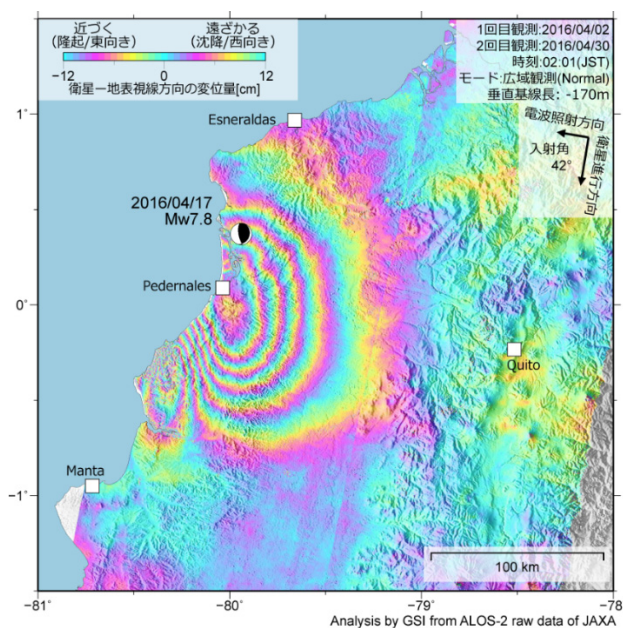


図 20. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられたエクアドルの地震（2016/4/17, Mw7.8）に伴う地殻変動。メカニズム解の表示位置が震央。

イタリア中部では、2016 年 8 月 24 日に Mw6.2, 10 月 26 日に Mw6.1, 10 月 30 日に Mw6.6 の地震が発生するなど、地震が頻発した。これらの地震に伴う地殻変動が捉えられた（図 21）。それぞれの地殻変動は地震のメカニズム解（正断層）と整合的である。8 月 24 日の地震と 10 月 26 日の地震による地殻変動は重複しておらず、それらの間に変動が見られない領域が存在していた。その後、その空白域を埋めるように 10 月 30 日に Mw6.6 の地震が発生した。

この解析結果については地震予知連絡会報に国土地理院（2017b）としてまとめられている。

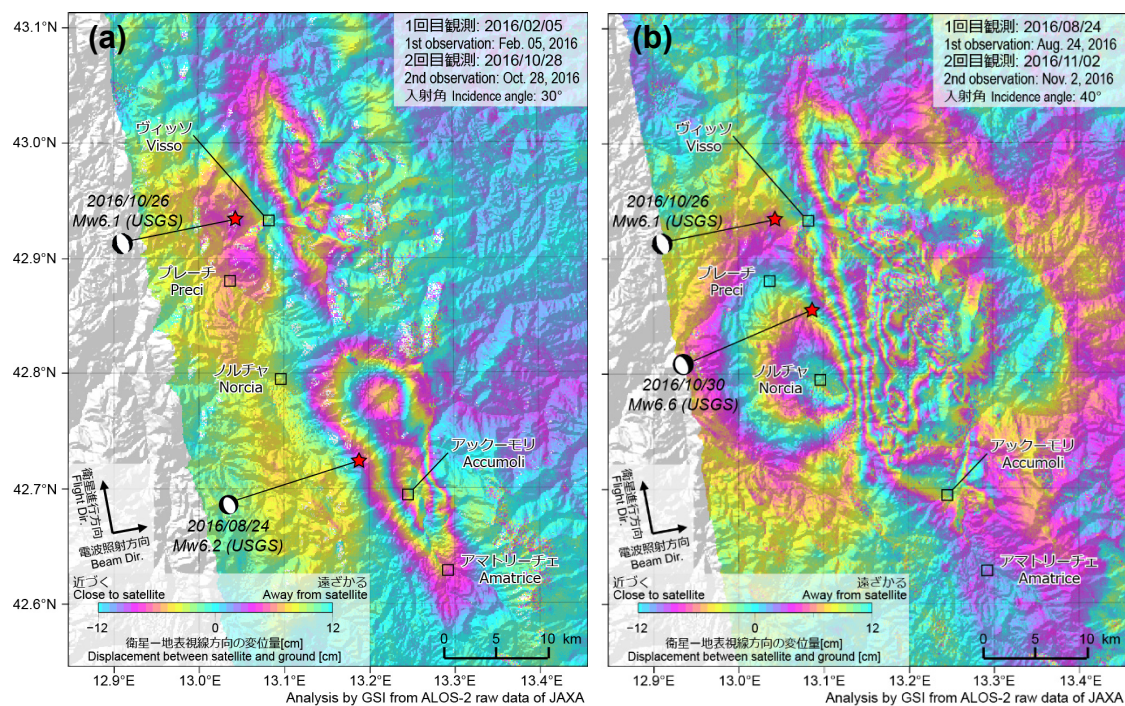


図 21. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられたイタリア中部の地震に伴う地殻変動。(a)南側が 8/24 の地震 (Mw6.2), 北側が 10/26 の地震 (Mw6.1) による地殻変動。(b)10/30 の地震 (Mw6.6) による地殻変動。北部では 10/26 の地震による地殻変動を含む。

2016 年 11 月 13 日にニュージーランド南島で発生した Mw7.8 の地震では、広範囲で非常に大きな地殻変動が捉えられた (図 22a)。この地震に関しては SAR 干渉解析に加え、ピクセルオフセット解析も行い、それらの結果を組み合わせることで地殻変動量の 3 次元成分の面的分布を求めた (図 22b)。

10cm 以上の地殻変動が見られる範囲は南北に 150km 以上の広域に及び、カイクラ以北の沿岸では広い範囲で 1m 以上の隆起が見られた。また、既知の複数の断層に沿って地殻変動の不連続線が明瞭に見られた。ずれ量は最大で約 10m にも及び、地表地震断層が現れたと考えられる。捉えられた地殻変動は非常に複雑に入り組んでおり、今回の地震に伴い複数の断層で複雑な断層運動が生じたことを示唆している。

なお、本報告に掲載しなかったピクセルオフセット解析結果等については、国土地理院の web サイト (<http://www.gsi.go.jp/cais/topic161117-index.html>) に記述しているので、そちらも参照されたい。また、この解析結果については地震予知連絡会報に報告しており、今後地震予知連絡会報にまとめられる予定である。

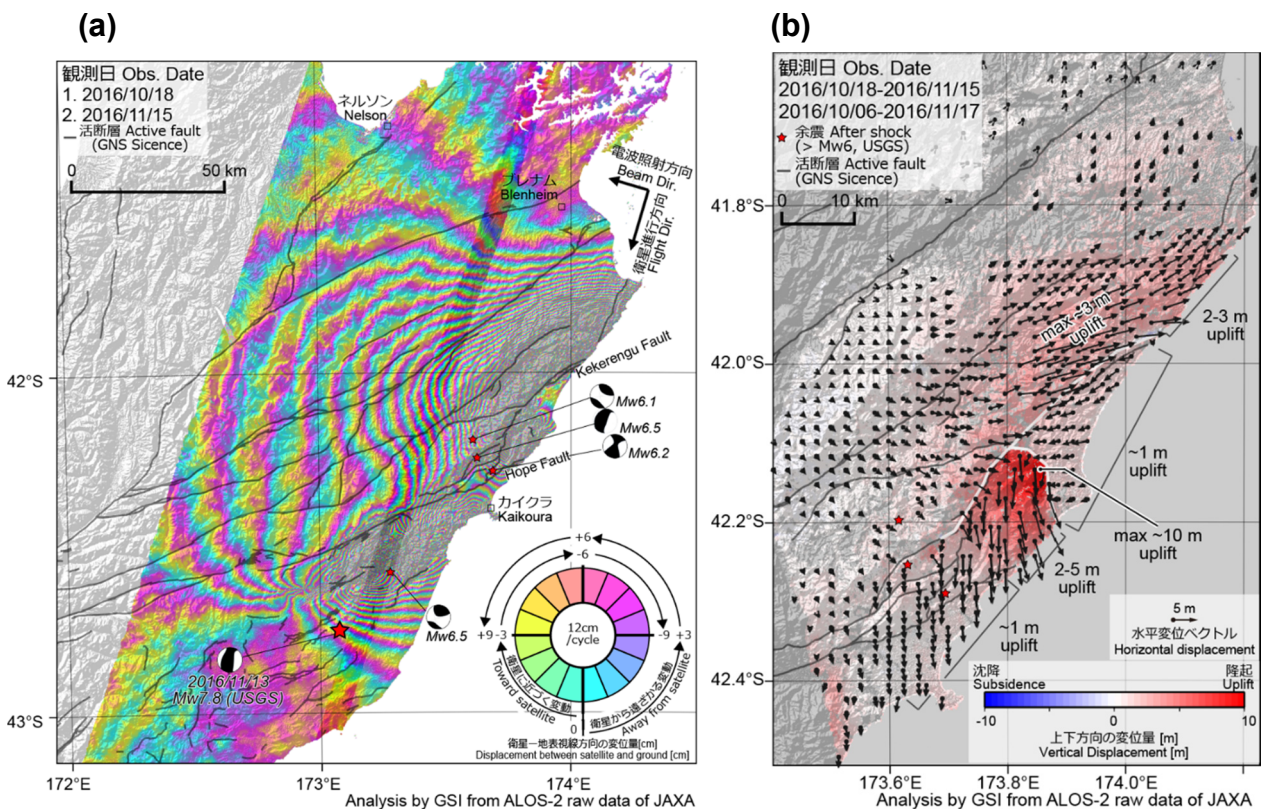


図 22. ALOS-2/PALSAR-2 データの SAR 干渉解析で捉えられたニュージーランド南島の地震 (2016/11/13, Mw7.8)

に伴う地殻変動。星印は本震の震央。(a) 南行軌道：2016 年 10 月 18 日と 11 月 15 日のデータの解析結果。(b) 北行、南行のピクセルオフセット解析結果を組み合わせることで推定した 3 次元の変動場。色は上下変動、矢印が水平変動の向きと大きさを示す。

なお、2016 年 11 月 25 日にタジキスタンで発生した Mw6.6 の地震、12 月 6 日にスマトラ島で発生した Mw6.5 の地震については、SAR 干渉解析により地殻変動を検出したが、詳細な分析は行っていない。

3. まとめ

2014 年の ALOS-2 の打ち上げ以降、2014 年の長野県北部の地震や平成 28 年 (2016 年) 熊本地震、2015 年のネパールの地震など、国内外で発生した大規模な地震について、ALOS-2 により観測されたデータを解析し、震源断層モデルの推定を行った。解析結果や震源断層モデルの推定結果は地震予知連絡会や地震調査委員会に報告し、現状評価に活用された。

熊本地震や 2016 年のニュージーランド南島の地震などでは、非常に複雑な地殻変動を捉え、地震像の把握に SAR 観測が有用であることを示すことができた。ALOS-2 では、ScanSAR を用いた干渉解析がほぼ定常的に行えるようになったことから、2015 年のネパールの地震など地殻変動が広域に及ぶような大規模な地震の場合でも、地殻変動の全貌を迅速に把握することが可能となっており、さらに有用性が向上しているといえる。

なお、本課題の目標の一つである時系列解析については、データ蓄積がまだ不十分な地域も多いことから実施に至らなかった。今後、ALOS-2 による観測が継続的に行われ、データが蓄積された段階で検討を進めたい。

なお、本報告に掲載した地震の解析結果については地震予知連絡会会報に掲載されているほか、主な地震については、国土地理院防災関連ページ (<http://www.gsi.go.jp/bousai.html>) 及び国土地理院地理地殻活動研究センター地殻変動研究室の web サイト (<http://www.gsi.go.jp/cais/crust-index.html>) にも掲載されているので、そちらも参照されたい。

参考文献

- Fujiwara, S., H. Yarai, T. Kobayashi, Y. Morishita, T. Nakano, B. Miyahara, H. Nakai, Y. Miura, H. Ueshiba, Y. Kakiage and H. Une (2016): Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry. *Earth Planets Space*, 68:160, doi:10.1186/s40623-016-0534-x.
- Kobayashi T. (2017): Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (M_j 6.5 and M_j 6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR, *Earth Planets Space*, doi 10.1186/s40623-016-0594-y.
- 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.
- 矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 藤原智, 檜山洋平, 川元智司, 上芝晴香, 三浦優司, 宮原伐折羅 (2016) : 熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル, 国土地理院時報, 128.
- 国土地理院 (2015a) : 関東甲信地方の地殻変動, 地震予知連絡会報, 94, 112-125.
- 国土地理院 (2015b) : ネパールの地震, 地震予知連絡会報, 94, 112-125.
- 国土地理院 (2016a) : 中国・新疆ウイグル自治区の地震, 地震予知連絡会報, 95, 399-400.
- 国土地理院 (2016b) : チリの地震, 地震予知連絡会報, 95, 401-402.
- 国土地理院 (2016c) : 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震, 地震予知連絡会報, 96, 557-589.
- 国土地理院 (2016d) : タジキスタン共和国の地震, 地震予知連絡会報, 96, 450-451.
- 国土地理院 (2016e) : 台湾の地震, 地震予知連絡会報, 96, 452-453.
- 国土地理院 (2016f) : エクアドルの地震, 地震予知連絡会報, 96, 454-455.
- 国土地理院 (2017a) : 中国・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会報, 97, 印刷中.
- 国土地理院 (2017b) : イタリア中部の地震, 地震予知連絡会報, 97, 印刷中.

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

PI：防災科学技術研究所・火山防災研究部門 小澤 拓

CI：防災科学技術研究所・火山防災研究部門 宮城洋介

1. はじめに

国内外で被害が生じる規模の地震が発生し、ALOS-2 による緊急観測が行われた時には、本 WG から提供される緊急観測データを迅速に解析し、地震活動評価等に役立つ情報を得ることを目的とする。

2. 長野県北部の地震

2014 年 11 月 22 日に長野県北部において、気象庁マグニチュード 6.7 の地震が発生した。この地震に関する地殻変動を調査するため、陸域観測技術衛星「だいち 2 号」の PALSAR-2 によって観測された SAR データを用いた干渉解析を実施した。2014 年 10 月 2 日と 2014 年 11 月 27 日の干渉ペアを解析した結果においては、神城断層の東側で衛星-地表間距離が短縮、西側で伸長する変化が求められた（図 1(a)）。東側の地殻変動が大きいことや、本地震のメカニズムが逆断層型であることから、断層面は東傾斜であると考えられる。震央の南西域に地殻変動の集中が見られ、その領域では神城断層に沿った地殻変動ギャップが見られた。また、神城断層に沿う地殻変動ギャップの北延長にも、地殻変動の急勾配が見られた。得られた地殻変動から断層モデルを推定したところ、東傾斜の 2 枚の矩形断層の逆断層すべりで得られた地殻変動をおおよそ説明することができた（図 1(b)）。浅い断層ではほぼ逆断層すべりが求められたが、深い断層については左横ずれ成分が含まれることが特徴の一つである。断層モデルと震源分布と比較したところ、浅い断層周辺部と深い断層の浅部延長付近において余震活動が活発であるように見える。

3. 徳島県南部の地震

2015 年 2 月 6 日に徳島県南部において、気象庁マグニチュード 5.1 の地震が発生した。この地震に関する地殻変動を調査するため、陸域観測技術衛星「だいち 2 号」の PALSAR-2 によって観測された SAR データを用いた干渉解析を実施した。2014 年 11 月 18 日と 2015 年 2 月 10 日の干渉ペアと 2015 年 1 月 10 日と 2015 年 2 月 7 日の干渉ペアを解析したが、地震に伴う有意な地殻変動は検出されなかった（図 2）。

4. 海外の地震

地震 WG を通じて提供されたパプアニューギニアの地震（2015 年 3 月 29 日、Mw7.5、図 3）、ネパール Gorkha 地震（2015 年 4 月 25 日、Mw7.8、図 4）、ボルネオの地震（2015 年 6 月 4 日、Mw6.0、図 5）、タジキスタンの地震（2015 年 12 月 7 日、Mw7.2、図 6）に関する PALSAR-2 データに SAR 干渉解析を適用して地殻変動を検出した。解析結果は地震 WG のメーリングリストで報告した。また、ScanSAR データの画像マッチング処理においては、真値と同程度の相関を持つずれ量がアジマス方向に数ピクセルごとに現れることを発見し（図 7）、地震 WG のメーリングリストにおいて議論を行った。

5. 2016 年熊本地震

熊本県において平成 28 年 4 月 14 日に Mj6.5 の地震（前震）が発生し、さらに 4 月 16 日に Mj7.3 の地震（本震）が発生した。この地震に伴う地殻変動を調査するため、6 軌道から観測された PALSAR-2 データについて SAR 干渉解析を実施した。すべての干渉画像において、布田川断層に沿ったスラントレンジ変化の不連続がみられた。また、日奈久断層と布田川断層の東延長部においては、スラントレンジ変化の急変帯がみられた。特に、布田川断層の東延長部は、阿蘇カルデラに入った付近でその走向が北東に変化しているようにみえることが特徴の一つである。大まかには、東上空から観測された画像を解析した結果においては、布田川断層の北側でスラントレンジの短縮、南側で伸長の変化が見られ、西上空からの観測画像を解析した結果においては、その逆の変化が見られた。これは断層の右横ずれでおよそ説明できる。しかし、南行軌道の右方向視による画像（東上空からの観測）を解析した結果においては、西原村付近で断層をまたいでスラントレンジ短縮変化が見られ、これを説明するためにはより複雑な断層メカニズムを考慮する必要がある。これらのスラントレンジ変化分布を説明する断層モデルを求めたところ、布田川断層と日奈久断層の北端部、布田川断層の東端から北東に伸びる断層の右横ずれと、西原村付近の低角の断層の正断層成分を伴う右横ずれで、得られた地殻変動をおおよそ説明することができた（図 8）。

謝辞.

解析で用いた PALSAR データの一部は防災利用実証実験地震 WG のデータサーバーから入手したものである。また、PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有している PALSAR データも使用した。PIXEL の共有データは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものである。PALSAR データの所有権は JAXA および経済産業省にある。

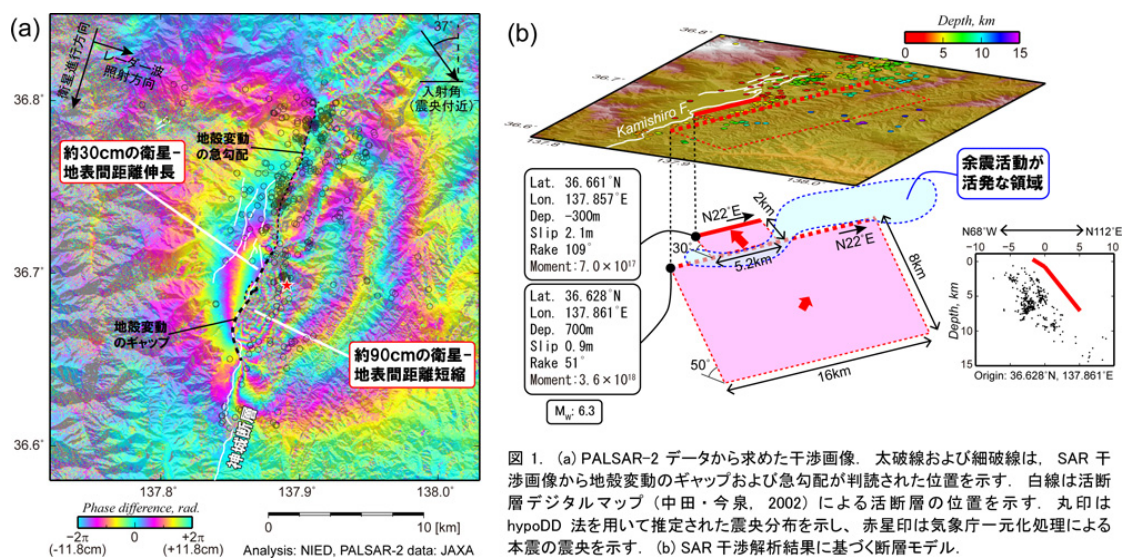


図 1. (a) PALSAR-2 データから求めた干渉画像。太破線および細破線は、SAR 干渉画像から地殻変動のギャップおよび急勾配が判読された位置を示す。白線は活断層デジタルマップ（中田・今泉, 2002）による活断層の位置を示す。丸印は hypoDD 法を用いて推定された震央分布を示し、赤星印は気象庁一元化処理による本震の震央を示す。 (b) SAR 干渉解析結果に基づく断層モデル。

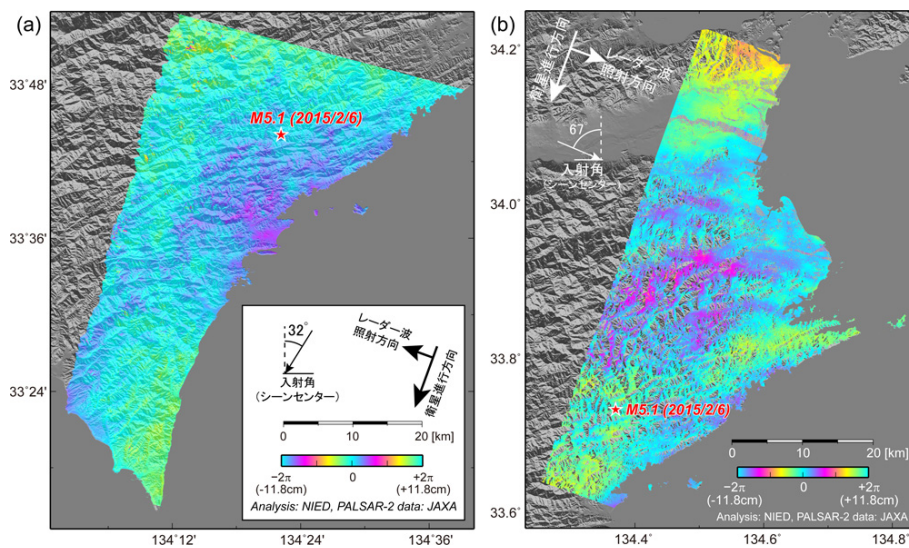


図 2. 徳島県南部の地震に関する PALSAR-2 の干渉画像

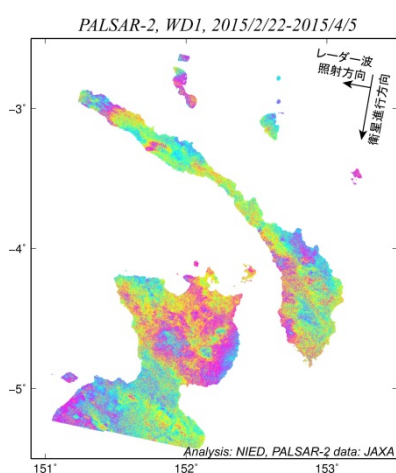


図 3. パプアニューギニアの地震に関する SAR 干渉解析結果

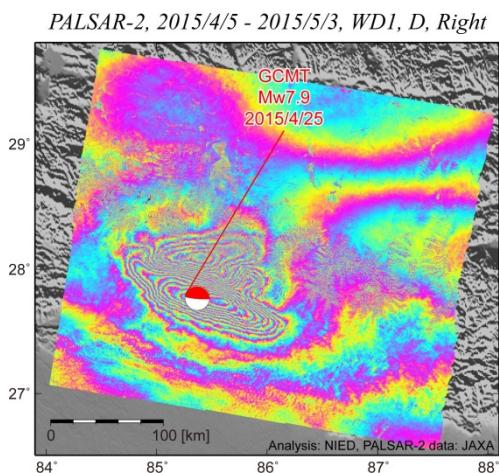


図 4. ネパール Gorkha 地震に関する SAR 干渉解析結果

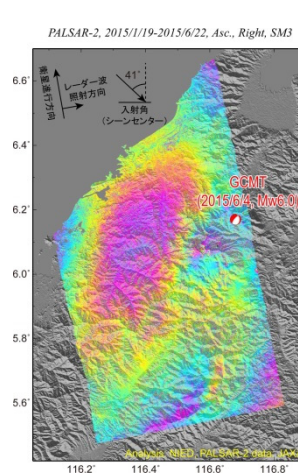


図 5. ボルネオの地震に関する SAR 干渉解析結果

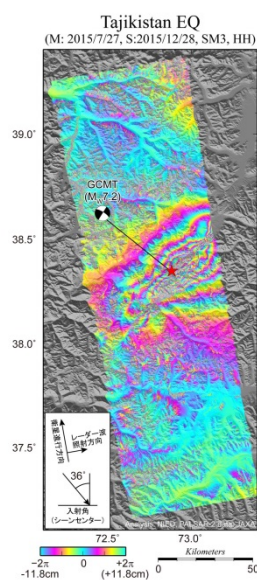


図 6.タジキスタンの地震に関する SAR 干渉解析結果

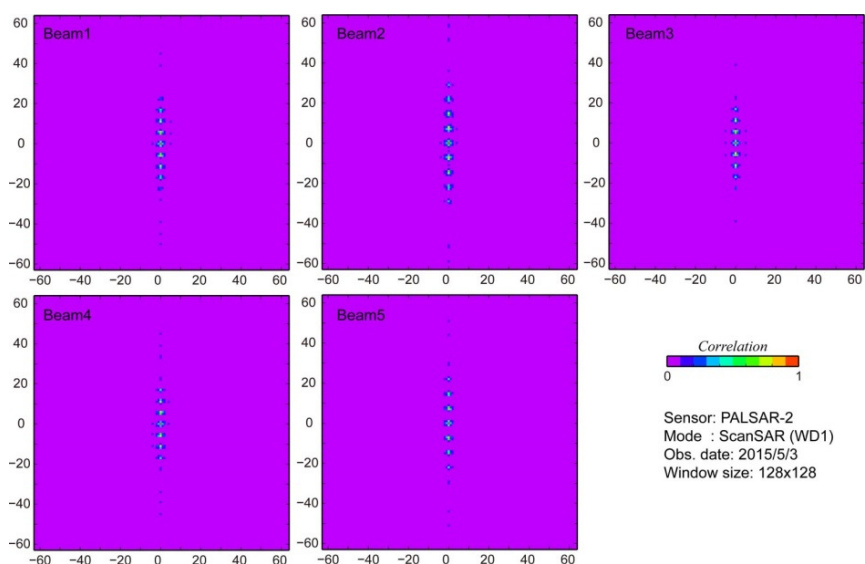


図 7.ScanSAR データの画像マッチング時における、ずれ量に対する相関値の分布。横軸はレンジ方向、縦軸はアジマス方向のずれ量。

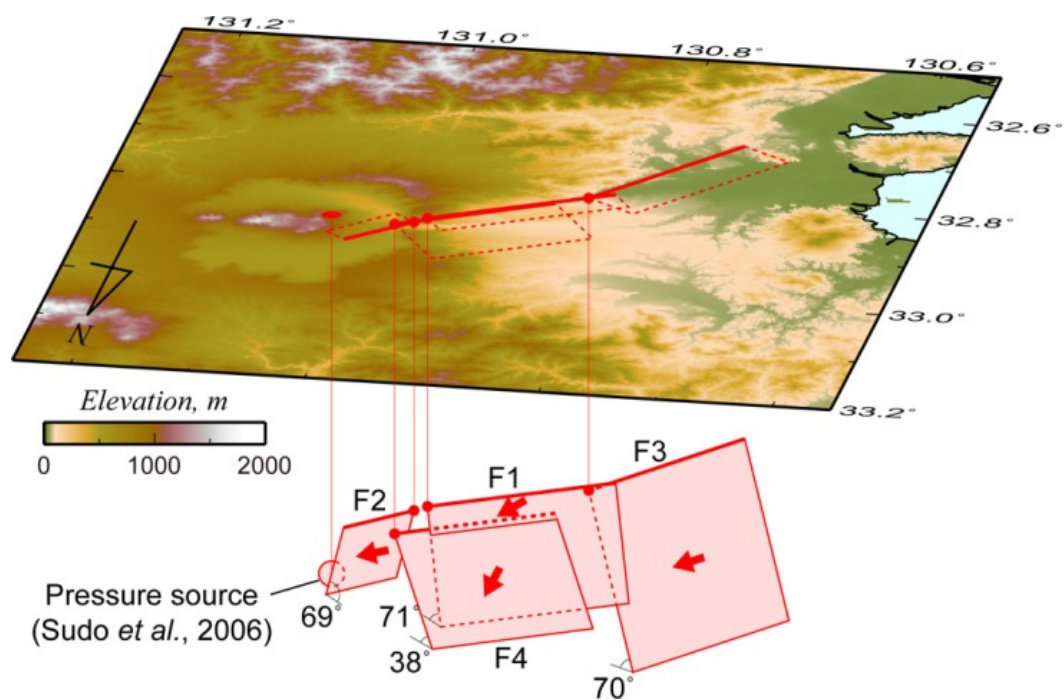


図 8.PALSAR-2 の SAR 干渉解析結果から推定した断層モデル。

地殻変動の詳細把握

PI：気象庁・地震火山部管理課	吉田康宏（H26）・中村浩二（H27-28）
CI：気象庁・地震火山部地震予知情報課	迫田浩司（H26-27）・露木貴裕（H28）・ 木村久夫（H28）
CI：気象庁・地震火山部火山課	鬼澤真也（H26-27）・木村一洋（H28）・ 三浦優司（H26）・兒玉篤郎（H27-28）・ 鎌田林太郎（H28）
CI：気象研究所・地震津波研究部	安藤忍
CI：気象研究所・火山研究部	奥山哲（H28）

1. はじめに

本課題の目的は、「地震に伴う地殻変動の把握による地震発生メカニズムの解明」及び「南海トラフ周辺の地域の長期的な地殻変動の把握」である。地震に伴う地殻変動を検出するため、地震発生時に実施された PALSAR-2 の緊急観測データを解析した。さらに、検出された地殻変動と地震波形データから推定されたモデルの比較等を行った。また、南海トラフ周辺の地域の長期的な地殻変動の把握のため、紀伊半島周辺における PALSAR データの時系列解析を行った。これらの結果について報告する。

2. 成果

2-1. 大規模地震に伴う地殻変動

大規模な地震が発生した際に緊急観測等により取得された PALSAR-2 データについて、SAR 干渉解析を行い、地殻変動の検出を行った。また、近地強震波形データを用いた震源過程解析結果から予想される干渉パターンとの比較等を行った。

○2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震（Mw6.2）

神城断層の位置する震源以南の西側の領域では、位相の不連続線が得られる結果となった（図 1）。この領域では、地震波を用いた震源過程解析でも神城断層に沿った地表付近での大きなすべりが求められ、SAR 干渉解析と一致する結果となっている。また、震源より東側の領域でも衛星に近づく方向の位相変化が検出された。

○2015 年 4 月 25 日、5 月 12 日ネパールの地震（Mw7.9, 7.2）

4 月 25 日の地震では、震央の東側に大きな地殻変動が検出された（図 2a）。この特徴は、地震波を用いた震源過程解析結果とも整合的である。5 月 12 日の地震では、4 月の地震で動いた断層の東側で地殻変動が見られた（図 2b）。

○2015 年 7 月 3 日中国、シンチアンウイグル自治区南部の地震（Mw6.4）

震央の西側に地殻変動が検出された（図 3）。変位の分布は、CMT 解と整合的であった。

○2015 年 9 月 17 日チリ中部沿岸の地震（Mw8.3）

SAR 干渉解析結果から、震央の北側に変動の中心が見られる（図 4）。この特徴は、地震波を用いた震源過程解析結果とも整合的である。

○2015 年 12 月 7 日タジキスタンの地震（Mw7.2）

震央の北東側に地殻変動が検出された（図 5）。変化のパターンから、北東－南西走向の左横ずれ断層が動いたと考えられる。なお、震央に近い変動域などの複数の領域で、干渉性が低くなっており、積雪や地震に伴う斜面崩壊の影響が考えられる。

○2016 年 2 月 5 日台湾付近の地震（Mw6.4）

震央の西側に地殻変動が検出された（図 6）。変位の分布は、CMT 解と整合的であった。

○2016 年 4 月 2 日アラスカ半島の地震（Mw6.2）

本震を挟む PALSAR-2 データを使った差分干渉解析を行い、南行軌道において震央からセントロイド位置付近にかけて最大約 40cm の衛星視線方向短縮の位相変化が検出された（図 7）。

○平成 28 年（2016 年）熊本地震（Mw7.0）

14 日 Mw6.2 と 15 日 Mw6.0 の地震を挟んだ観測ペアによる解析では、震源域の南西部で最大約 12cm の衛星視線方向伸張、北西部で最大約 9cm の衛星視線方向短縮の位相変化が検出された（図 8a）。断層モデルは、傾斜角度がより低角の方が干渉縞パターンと整合することがわかった。

また、これらの地震と 16 日の Mw7.0 の地震を挟んだ観測ペアによる解析結果では、布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿って、右横ずれ断層に伴う地殻変動が顕著に検出された（図 8b）。また、断層帯と考えられる位相不連続線は、阿蘇山山体の北西側まで及んでいることが分かった。布田川断層帯の東部分と日奈久断層帯の途中までは急激な位相変化が見られた。

16 日の地震のみを挟んだ観測ペアによる解析結果からは、布田川断層帯の北側で、最大約 200cm 以上の衛星視線方向伸張、南側で最大約 48cm の衛星視線方向短縮の位相変化が検出された（図 8c,e）。

14 日と 16 日の地震について地震波を用いた震源過程解析を行ったところ、14 日の地震では破壊開始点周辺で最大 0.5m 程度のすべりが、16 日の地震では布田川断層の深部に最大約 9m の大きなすべりが求められた（図 8f）。これらの結果から地表の地殻変動量を推定したところ、概ね SAR 干渉解析結果と整合することがわかった。

また、16 日の地震以降の余効変動を調べるため、16 日と 30 日の観測を用いて SAR 干渉解析を行い、布田川断層に沿った領域に最大約 4cm の衛星視線方向伸張の位相変化が検出された（図 8d）。

○2016 年 4 月 17 日エクアドルの地震（Mw7.8）

震央付近に向かって、衛星視線方向伸張の位相変化が見られた。（図 9）。変位の分布は、CMT 解と整合的であった。

○2016 年 8 月 24 日、10 月 27 日、30 日イタリア中部の地震（Mw6.2, 6.1, 6.6）

8 月 24 日の地震について、SAR 干渉解析及び 2.5 次元解析を行い、準上下方向で震央の東側に大きな沈降成分が検出された。ただし、準東西成分のパターンは複雑で断層面はわからなかった（図 10a,b）。

10月26日の地震では、8月24日の地震の北側で地殻変動が検出された（図10c）。

10月30日の地震に伴う地殻変動の範囲は、8月24日と10月26日の地震で生じた地殻変動の間を埋めるように検出された（図10d）。さらに10月26日と30日の地震を挟む観測ペアで2.5次元解析を行い、準上下方向では震央の東側で最大120cmを超える沈降成分が検出され、準東西方向では震央の10km東を境に東西方向に変動が確認された（図10e）。この地震について、地震波を用いた震源過程解析の結果と比較したところ、西下がりの正断層とした方が整合的であることがわかった（図10f）。

○2016年10月21日鳥取県中部の地震（Mw6.2）

複数の観測ペアについて各々SAR干渉解析を行い、さらに、2.5次元解析を実施した（図11）。これによれば、震央の北西側で準東向き、南東側で準西向きの変動が顕著なこと、また、震央の北東及び南西側で準上向き、北西及び南東側で準下向きの変動成分が顕著であることが分かった。これは、メカニズムや余震分布から推定される北北西－南南東方向の左横ずれ断層と整合的である。

○2016年11月13日ニュージーランド、南島の地震（Mw7.8）

震央の北東方向、CMT解のセントロイド近傍で最大約3.5m以上の短縮が検出された（図12）。また、11月14日の余震の震央付近でも、1.5m以上の伸長が検出された。変動の中心は非干渉となっており、変動が非常に大きいと推定される。

○2016年11月25日中国シンチヤン南部の地震（Mw6.6）

2.5次元解析を行い、東西方向を主体とした右横ずれ断層であることがわかった（図13）。

○2016年12月1日ペルー南部の地震（Mw6.2）

本震を挟むPALSAR-2データを使った差分干渉解析を行い、南行軌道において約14cmの衛星視線方向伸長の位相変化が検出され、地震メカニズムの正断層解と整合した結果が得られた（図14）。

○2016年12月7日インドネシア、スマトラ北部の地震（Mw6.5）

SAR干渉解析を行い、震央周辺の地殻変動を検出した（図15）。2.5次元解析も行ったが、非干渉領域が広く、変動源の詳細を捉えるには至らなかった。

○2016年12月25日チリ南部の地震（Mw7.6）

本震を挟むペアをPALSAR-2データを使った差分干渉解析を行い、南行軌道において地震に伴うと思われる位相変化が検出された（図16）。また、USGSが推定した断層滑りモデルからシミュレートされた干渉縞と大局的には調和的な結果が得られた。

○2016年12月28日茨城県北部の地震（Mw5.9）

SAR干渉解析を行い、震央の北東側に地殻変動域を検出した（図17a）。位相の不連続線も確認でき、断層が地表に現れていることがわかった。2.5次元解析の結果から、断層面は西下がりとわかった（図17b）。

2-2. 南海トラフ周辺の地域の長期的な地殻変動

PALSAR データを用いた PS-InSAR 解析および SBAS 解析により、紀伊半島周辺の定常的な地殻変動検出を目的として InSAR 時系列解析を行った (図 18a)。その結果、沿岸部で衛星視線方向のわずかな伸張が検出されたのに対し、内陸部でほとんど変化がないことが分かった (図 18b)。また、PALSAR-2 データを用いた約 1 年間の差分干渉解析では、ノイズレベルを超える位相変化は検出されなかった (図 18c)。

謝辞

本解析で用いた PALSAR-2 データの一部は、国土地理院が中心となって進めている防災利用実証実験 (地震 WG) に基づいて観測・提供されたものである。また、一部は PIXEL で共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものである。PALSAR-2 に関する原初データの所有権は JAXA にある。なお解析には、防災科学技術研究所の小澤拓氏により開発された RINC を使用させていただいた。なお、干渉画像の処理過程においては、国土地理院発行の数値地図 10m メッシュ (標高) または、CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information of the Consultative Group for International Agricultural Research) から提供された SRTM4.1 を元にした DEHM を使用し、地図の描画には GMT を用いた。関係者各位には、ここに記してお礼申し上げます。

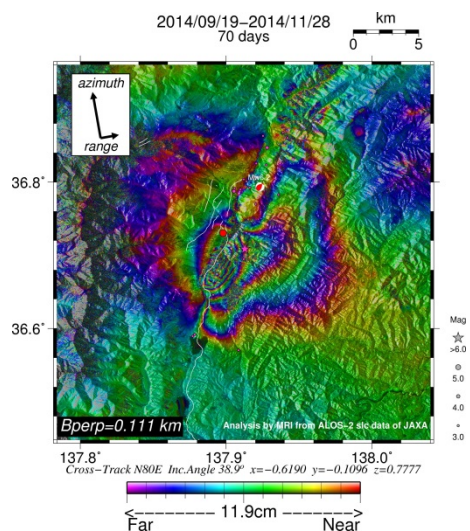


図 1. 2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震 (Mw6.2) の SAR 干渉解析結果

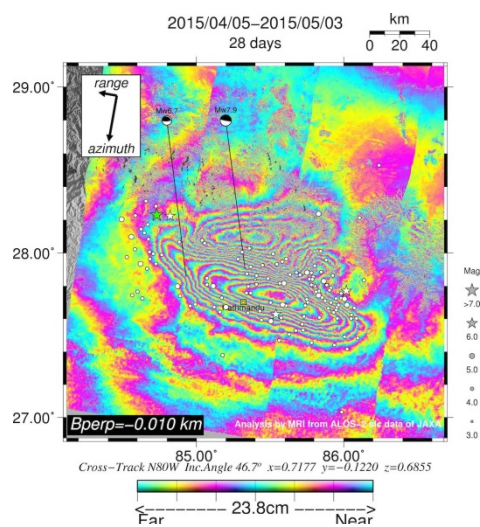


図 2a. 2015 年 4 月 25 日に発生したネパールの地震 (Mw7.9) の SAR 干渉解析結果

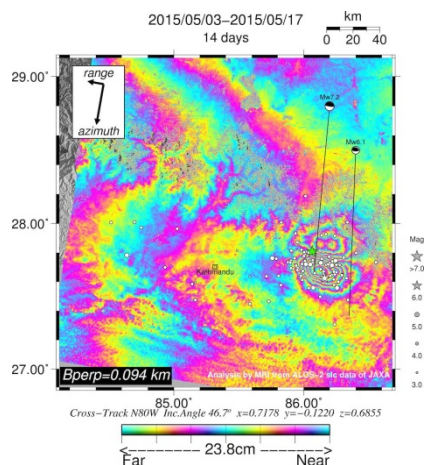


図 2b. 2015 年 5 月 12 日に発生したネパールの地震 (Mw7.2) の SAR 干渉解析結果

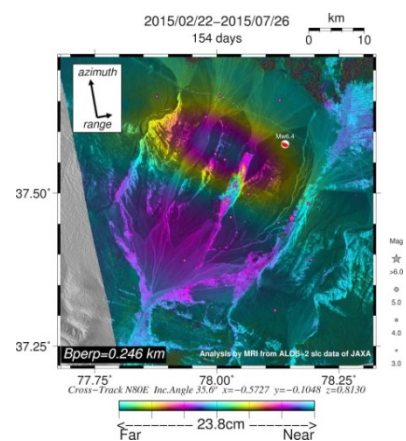


図 3. 2015 年 7 月 3 日に発生した中国、シンチアンウイグル自治区南部の地震 (Mw6.4) の SAR 干渉解析結果

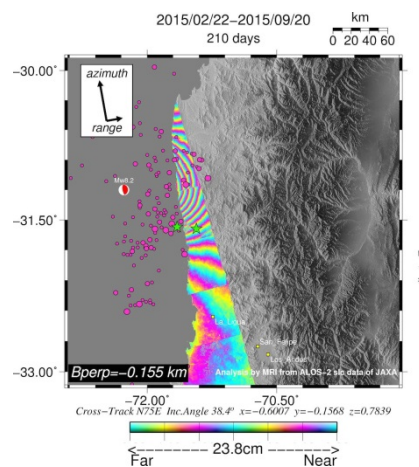


図 4. 2015 年 9 月 17 日に発生したチリ中部沿岸の地震 (Mw8.3) の SAR 干渉解析結果

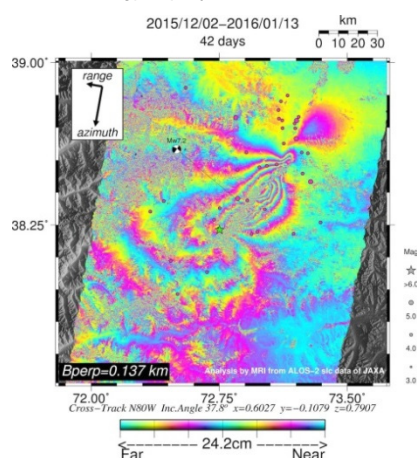


図 5. 2015 年 12 月 7 日に発生したタジキスタンの地震 (Mw7.2) の SAR 干渉解析結果

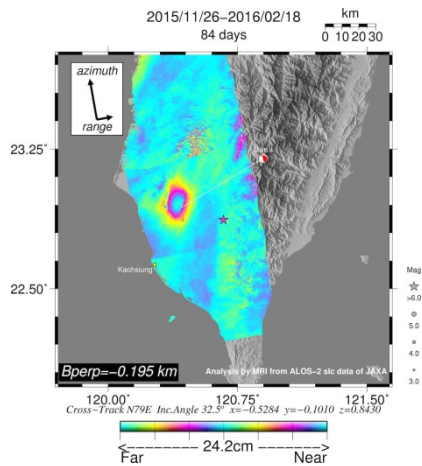


図 6. 2016 年 2 月 5 日発生した台湾付近の地震 (Mw6.4) の SAR 干渉解析結果

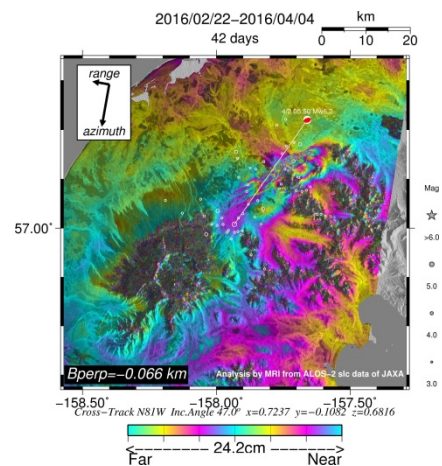


図 7. 2016 年 4 月 2 日発生したアラスカ半島の地震 (Mw6.2) の SAR 干渉解析結果

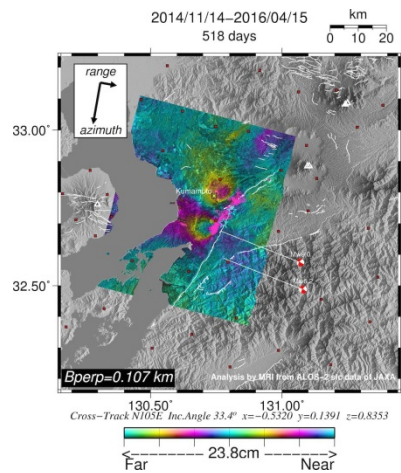


図 8a. 2016 年熊本地震 (4/14 Mw6.2, 4/15 Mw6.0) の SAR 干渉解析結果

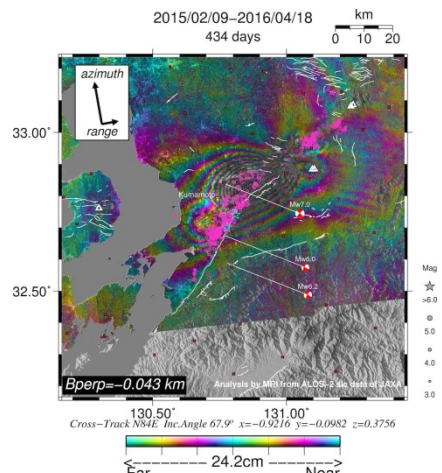


図 8b. 2016 年熊本地震 (4/14 Mw6.2, 4/15 Mw6.0 及び 4/16 Mw7.0) の SAR 干渉解析結果

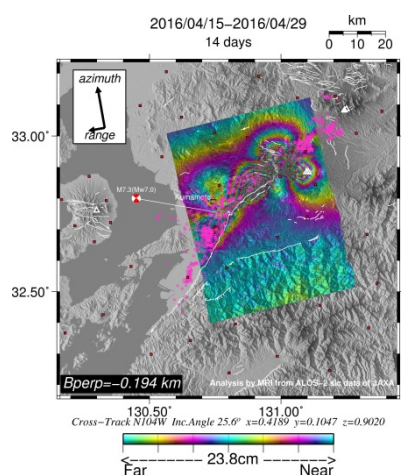


図 8c. 2016 年熊本地震 (4/16 Mw7.0) の SAR 干渉解析結果

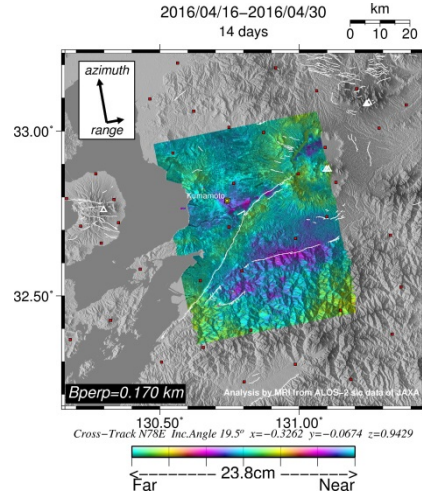


図 8d. 2016 年熊本地震 (4/16 Mw7.0) 以降の SAR 干渉解析結果

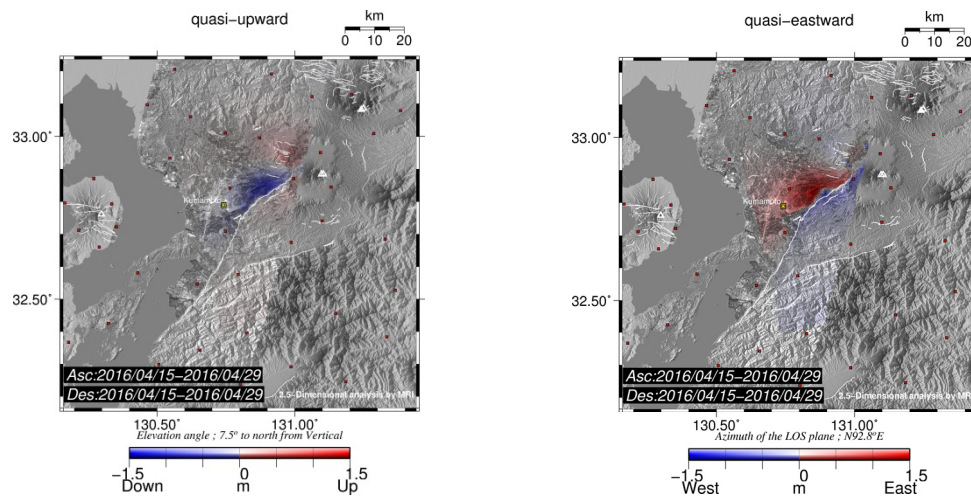


図 8e. 熊本地震（4/16 Mw7.0）の 2.5 次元解析結果（左：準上下成分，右：準東西成分）

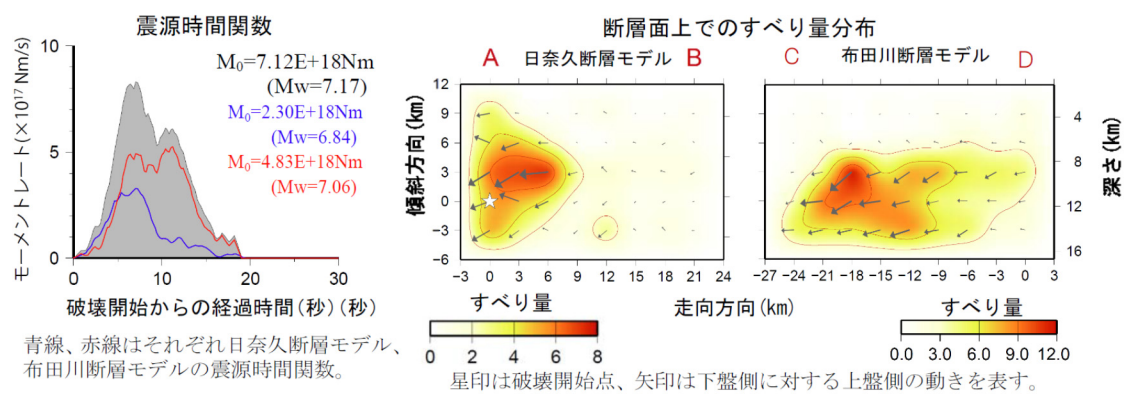


図 8f. 2016 年熊本地震の震源過程解析結果 4/16 (Mw7.0)

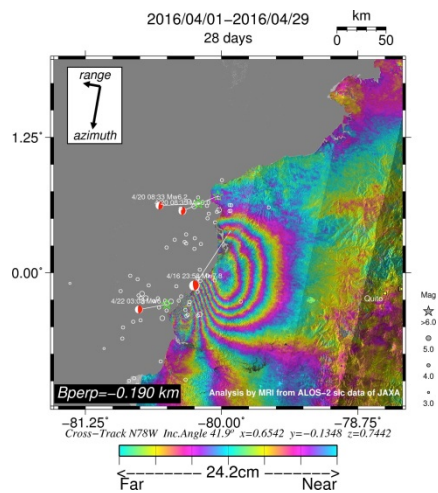


図 9. 2016 年 4 月 17 日に発生したエクアドルの地震 (Mw7.8) の SAR 干渉解析結果

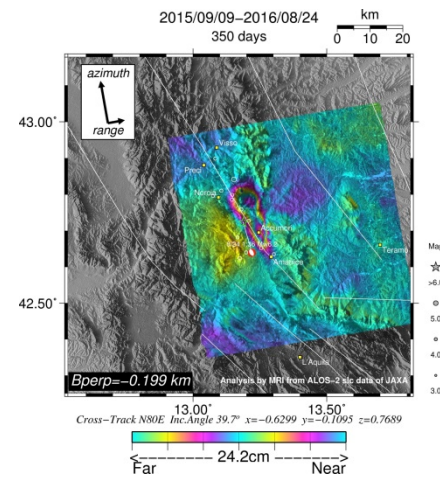


図 10a. イタリア中部の地震 (8/24 Mw6.2) の SAR 干渉解析結果

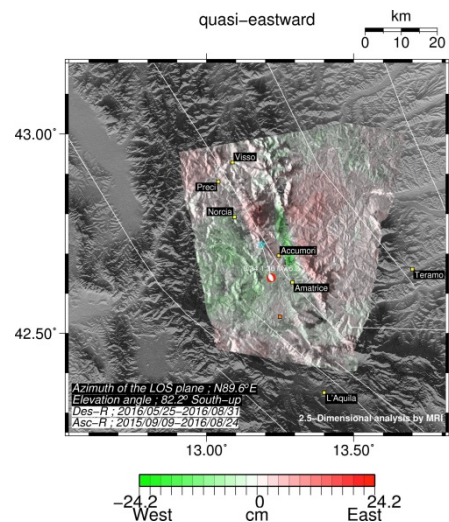
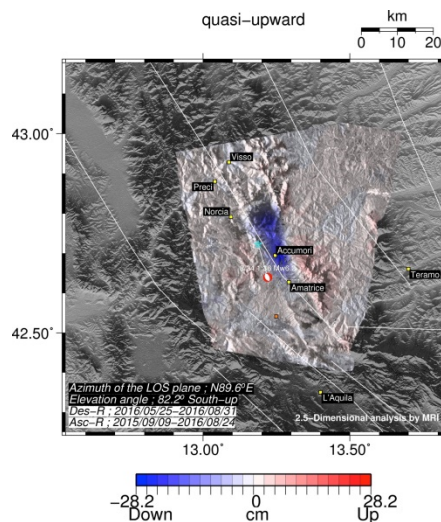


図 10b. イタリア中部の地震 (8/24 Mw6.2) の 2.5 次元解析結果 (左: 準上下成分, 右: 準東西成分)

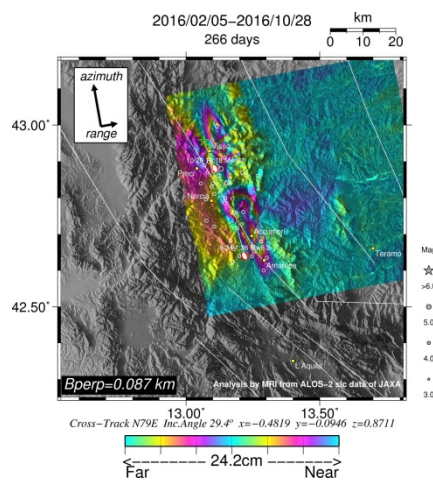


図 10c. イタリア中部の地震 (8/24 Mw6.2, 10/27 Mw6.1) の SAR 干渉解析結果

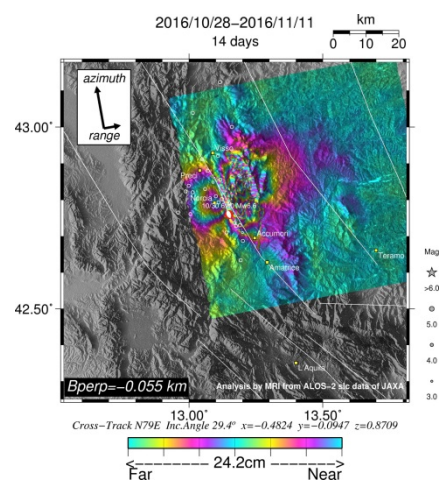


図 10d. イタリア中部の地震 (10/30 Mw6.6) の SAR 干渉解析結果

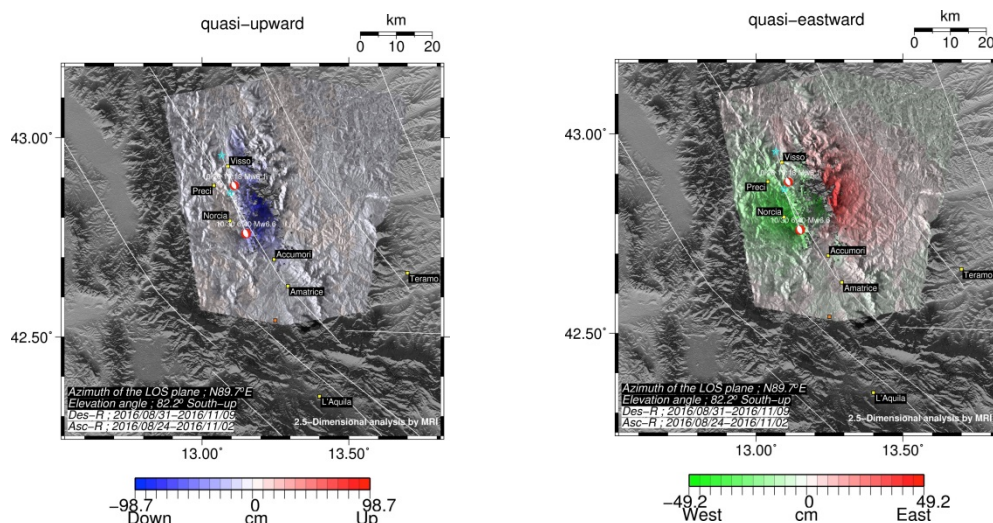


図 10e. イタリア中部の地震 (10/27 Mw6.1, 10/30 Mw6.6) の 2.5 次元解析結果

(左：準上下成分，右：準東西成分)

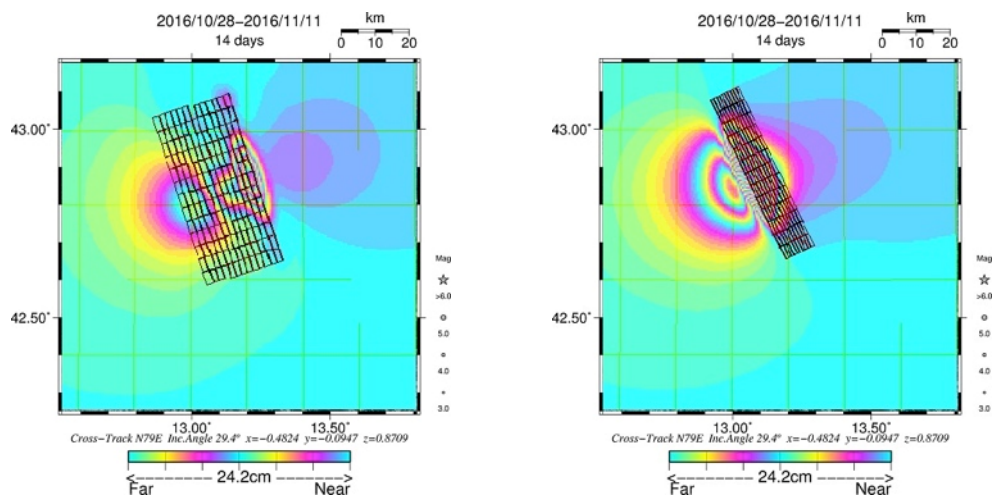


図 10f. イタリア中部の地震 (10/30 Mw6.6) の震源過程解析結果から算出した SAR 干渉画像推定値

(左：西下がりの断層，右：東下がりの断層)

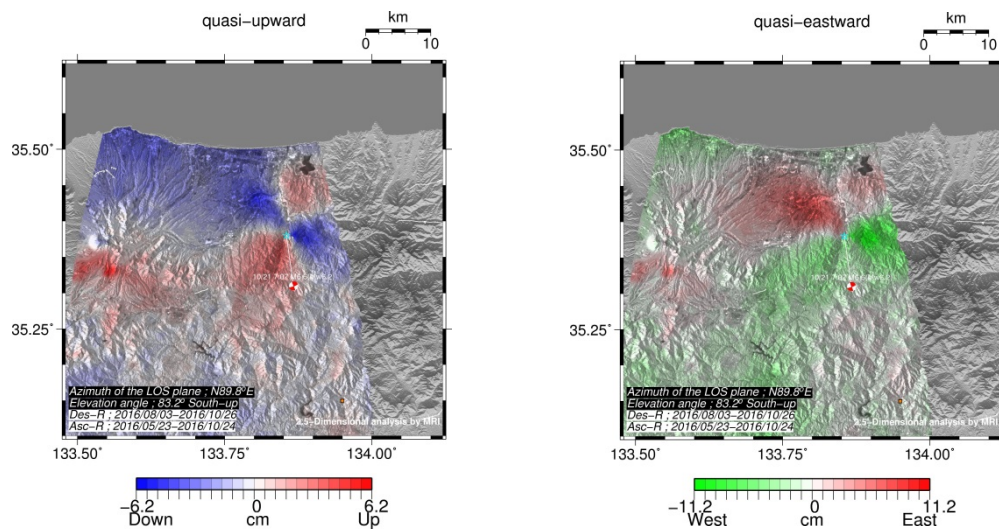


図 11. 2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震 (Mw6.2) の 2.5 次元解析結果

(左：準上下成分，右：準東西成分)

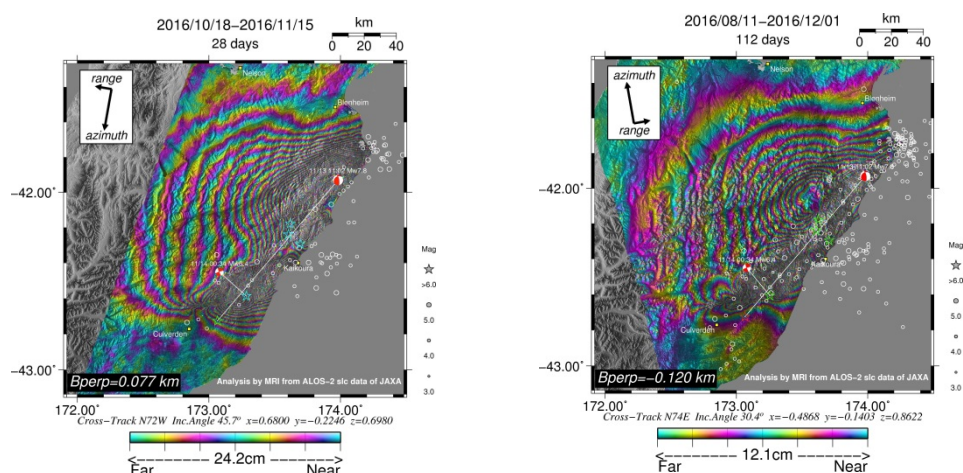


図 12. 2016 年 11 月 13 日に発生したニュージーランド、南島の地震 (Mw7.8) の SAR 干渉解析結果
(左：南行軌道, 右：北行軌道)

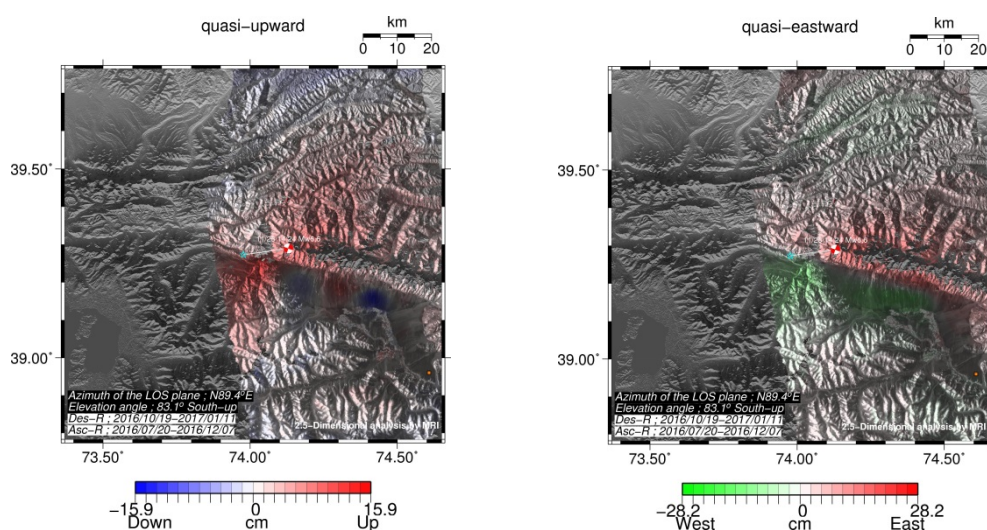


図 13. 2016 年 11 月 25 日中国シンチヤン南部の地震 (Mw6.6) の 2.5 次元解析結果
(左：準上下成分, 右：準東西成分)

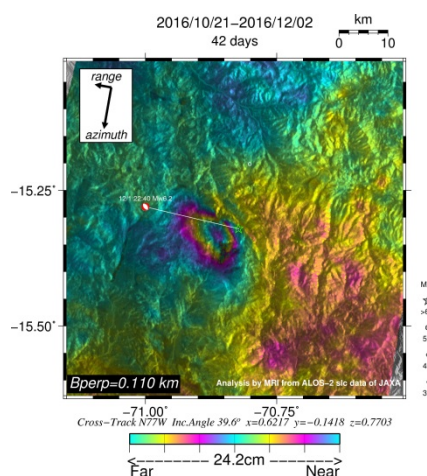


図 14. 2016 年 12 月 1 日に発生したペルー南部の地震 (Mw6.2) の SAR 干渉解析結果

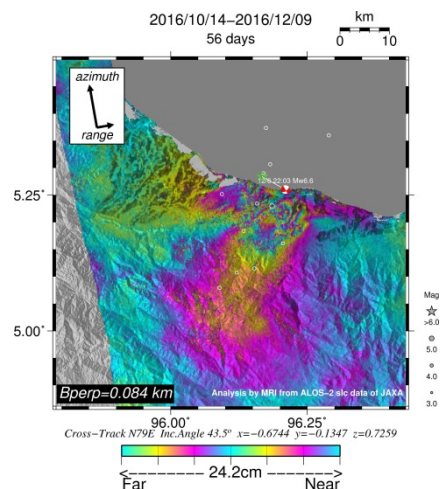


図 15. 2016 年 12 月 7 日に発生したインドネシア、スマトラの地震 (Mw6.5) の SAR 干渉解析結果

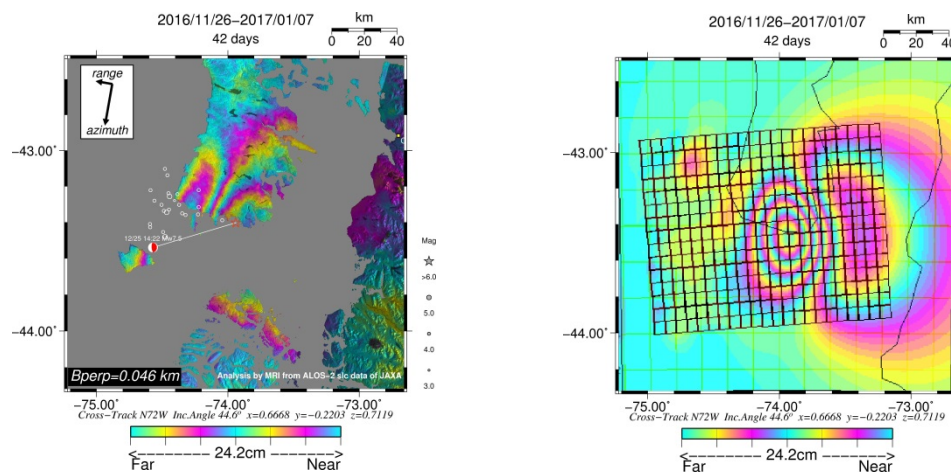


図 16. 2016 年 12 月 25 日に発生したチリ南部の地震 (Mw7.6) の SAR 干渉解析結果及び USGS の断層すべりモデルから求めたシミュレーション結果

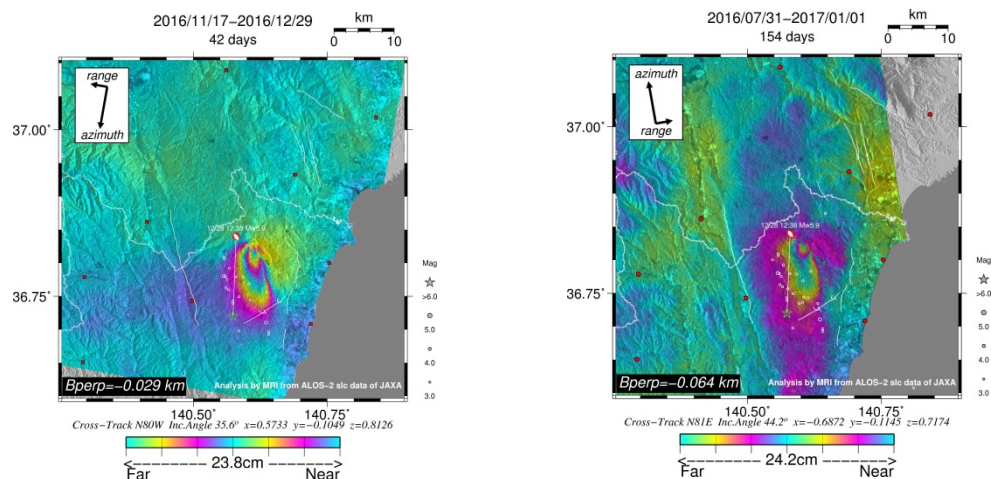


図 17a. 2016 年 12 月 28 日に発生した茨城県北部の地震 (Mw5.9) の SAR 干渉解析結果
(左：南行軌道，右：北行軌道)

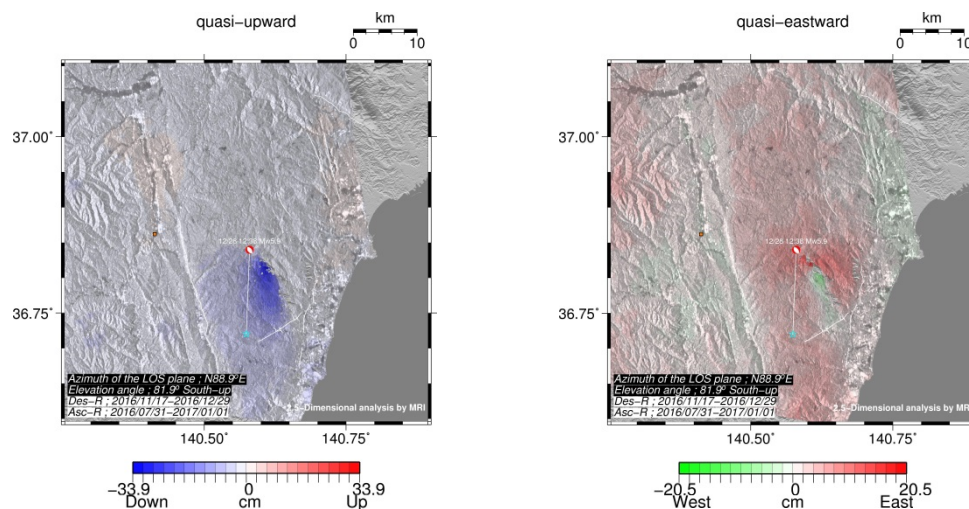


図 17b. 2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震 (Mw5.9) の 2.5 次元解析結果
(左：準上下成分，右：準東西成分)

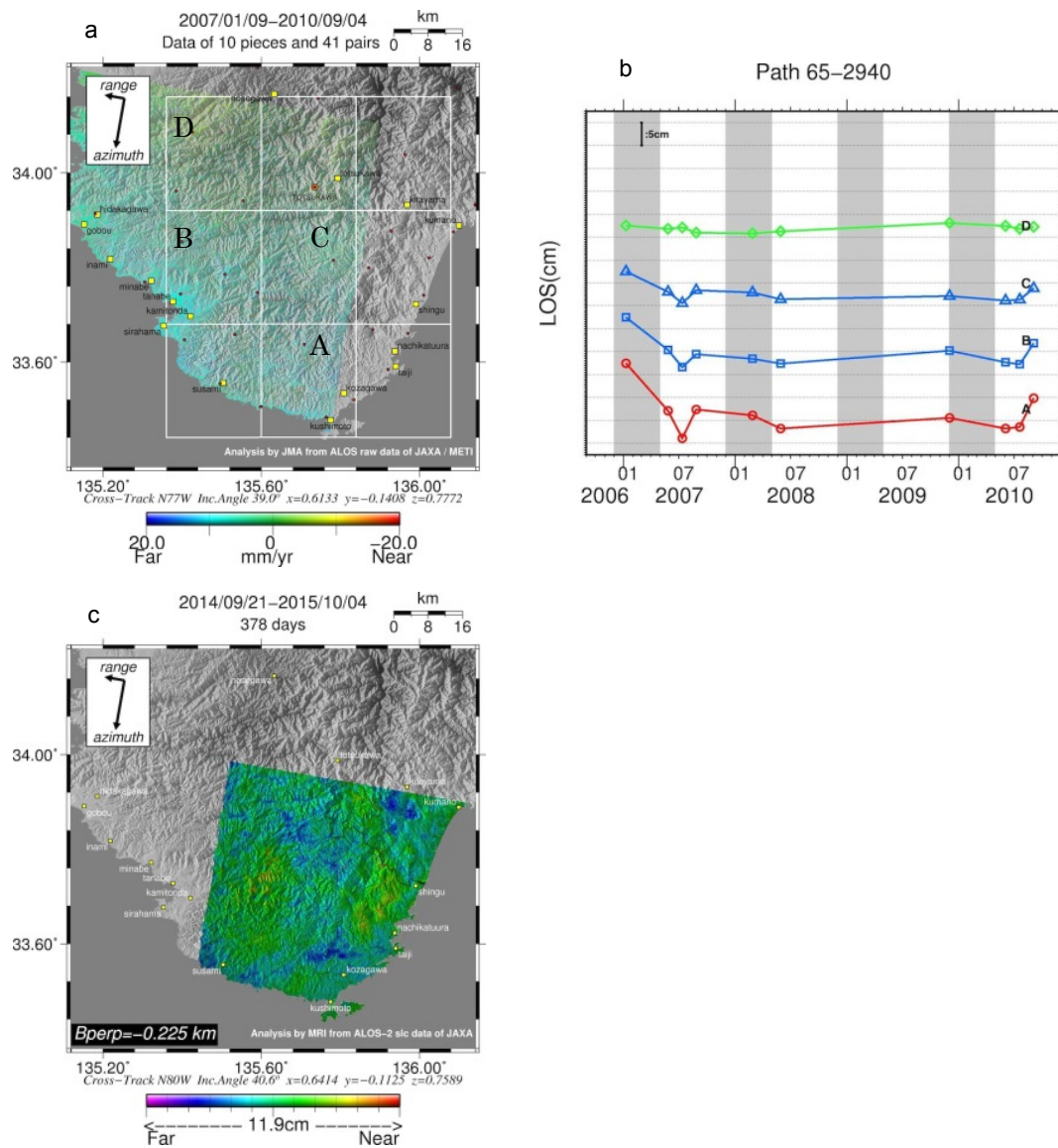


図 18. 紀伊半島周辺の InSAR 時系列解析 (PALSAR-1) と差分干渉解析 (PALSAR-2) の一例
(a : 平均変動速度、b : 図 a の各領域における時系列変化、c : PALSAR-2 差分干渉画像)

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

PI：京都大学・防災研究所 橋本 学

CI：京都大学・防災研究所 高田陽一郎※

(※平成 28 年 3 月まで)

1. はじめに

主として活断層帯で発生する地震の地震前・地震時・地震後変動を観測し、その発生過程のモデル化を図ることを目的として、ALOS-2/PALSAR-2 他の合成開口レーダー画像を収集し、解析した。合成開口レーダーの特性を活かして、内陸部の活断層帯、特に中央構造線、山陰地方などのすべり欠損速度の比較的大きい断層帯周辺の変動を、時系列解析やスタッキング等の手法を用いて、高分解能で明らかにすることを試みた。しかし、ALOS-2/PALSAR-2 の同一パス・フレームでの観測画像の蓄積が必ずしも十分でなかったために、結局観測回数の多い京阪神の有馬・高槻断層帯および六甲断層帯、これと同一パスの中央構造線断層帯をターゲットとして、スタッキング解析を行うに留まった。

また、これらの活断層帯に限らず、大地震発生時には干渉解析等を用いて地震時地殻変動を検出する。コヒーレンスや強度変化を解析し、大変形領域の検出も行なった。また、余効変動の検出も試みた。これらの観測結果から、ディスロケーション・モデルを用いてモデル化を行なった。

なお、解析ソフトウェアは Gamma Remote Sensing 社の Gamma® (ver.20141211)、2 パス干渉法に用いる DEM は ASTER-GDEM ver. 2、あるいは小澤拓氏・飛田幹男氏が開発し Pixel から提供されている Geoid 高を考慮した SRTM を用いた。

2. 活断層周辺の経年的な地殻変動の把握

これまでの我々の ALOS/PALSAR 画像等を用いた解析の結果、京阪神の有馬・高槻断層帯や紀伊半島の中央構造線断層帯周辺において、興味深い変動が検出された(橋本, 2014; Hashimoto, 2016, 橋本, 2016)。しかし、ALOS/PALSAR が運用停止された 2011 年 4 月以降は少なくとも L バンドでの観測がなされていないので、それらの変動がその後どのように推移したかが注目される場所である。このため、ALOS-2/PALSAR-2 画像を用いて 2014 年 8 月以降の変動の検出を試みた。しかしながら、ALOS-2/PALSAR-2 の初期の観測は多くの観測モードに対して、マスターとなる観測データを取得するために、一つのパス・フレームにおいて固定されたビームでの観測間隔はかなり不規則で、回数も最大で 8 回であった(表 1)。表 1 に使用したパス・フレームについて観測日と垂直基線長を示す。しかし、電離層擾乱や対流圏擾乱の影響が大きいと見られる画像が散見され、結局スタッキングに使えた干渉画像は少ないものとなった。なお、ScanSAR モードの観測は 2015 年 2 月までの画像の干渉処理が難しいことと、観測回数が少ないことから、使用しなかった。

解析は、P21 と P127 については、2 つのフレームの画像を Gamma® のコマンド SLC_concat を用いて連結し、干渉処理を行った。すべてフラットニングし、アンラップした後、標高の二次関数を観測位相にフィッティングして、トレンドと標高依存誤差を除去した。ALOS-2/PALSAR-2 は L バンドのマイクロ波を使用しているため、特に電離層擾乱と考えられる擾乱が日によって大きい。また、雷雲や重力波などの対流圏擾乱による影響もよく見られる。そのため、目視により大気擾乱が大きいと認められる干渉画像を除いて、スタッキングした。

なお、同じ北行軌道の観測である P127 と P128 では、電離層擾乱の発現の様相が異なる。P127 に

は顕著な電離層擾乱が認められるペアが多かったが、P128 は少なかった。両者の観測では入射角が異なる。また、観測時間帯が P128 の方が 400 秒ほど遅いことも影響しているのかもしれない。今後電離層擾乱の低減のためにも検討すべきテーマと考える。

図 1 に 3 パスのスタッキング干渉画像を示す。なお、入射角は P127 と P21 が 32° 、P128 が 43° である。P21 は 6 ペア、P127 は 2 ペア、P128 は 3 ペアのスタッキングに留まる。いずれの画像でも、山間地でやや大きい視線距離伸長が認められる。P21 については独立な 7 ペアの干渉画像のうち、対流圏擾乱が大きいと思われる 1 ペアを除いたが、その他にもやや擾乱が顕著なものがあるため、特に山間地での視線距離伸長が目立つ。また、大阪平野南部に顕著な変動が見られるが、スタッキングに用いたペアのマスター画像を 2015 年 3 月の画像に統一したため、この画像に含まれる大気擾乱が増幅されているものと考えられる。これ以外の平野部では、ほぼ 0 の変動が得られている。また、大阪湾岸の埋立て地の沈下も検出されている。図 2 は、これらの北行軌道の干渉画像と南行軌道の干渉画像から得られた疑似上下変動である。カラー・スケールを変更しているので、図 1 と異なる印象を与えるが、全体的に $\pm 10\text{mm/yr}$ の範囲に収まっており、観測回数に鑑みて、精度限界に近い解析結果が得られたものと考えられる。大阪湾岸の埋立て地では 10mm/yr を越える沈降が観測されている。これは、ALOS/PALSAR などによる結果と調和的である。一方、ALOS/PALSAR で検出された有馬・高槻断層帯付近の局所的な沈降は、P21 と P127 の合成では、断層に沿って沈降が認められるが、P21 と P128 の合成では認められないので、結論は留保したい。一方、京都盆地南部で見られた隆起は、両方の画像に認められず、変動が終息した可能性が示唆される。しかし、このような時系列解析に使用可能な ALOS-2/PALSAR-2 画像が十分蓄積されたといえない現状において、結論は時期尚早と考える。十分な観測データの蓄積を待ちたい。

表 1. 本解析に用いた近畿地方の ALOS-2/PALSAR-2 画像の観測日と垂直基線長

P127-F680-690		P128-F680		P21-F2910-2920	
観測日	Bperp(m)	観測日	Bperp(m)	観測日	Bperp(m)
2014/08/13	0	2015/04/13	0	2015/03/27	0
2015/02/25	332	2015/12/21	-116	2015/09/11	-369
2015/06/03	58	2016/03/28	-308	2015/11/20	-205
2016/06/01	186	2016/07/04	-267	2016/02/26	93
2016/11/02	220	2016/08/29	-354	2016/06/03	-305
				2016/08/12	-325
				2016/10/21	-246
				2016/11/04	-353

3. 大地震発生時の地殻変動・コヒーレンス変化等の検出

2014 年 8 月以降に発生した顕著な地震について、ALOS-2/PALSAR-2 の観測画像を解析し、地震時変動を検出した。また、一部の地震についてはコヒーレンス変化を調べ、被害との関係も検討した。さらに、断層運動の推定も複数の地震について行った。紙面の関係で、2016 年に発生した顕著な地震から、2 月 6 日台湾美濃地震、4 月の熊本地震、8 月 24 日イタリア中部地震の解析結果を示す。また、鳥取県中部の地震後の変動を検出する試みを行ったので、合わせて報告する。

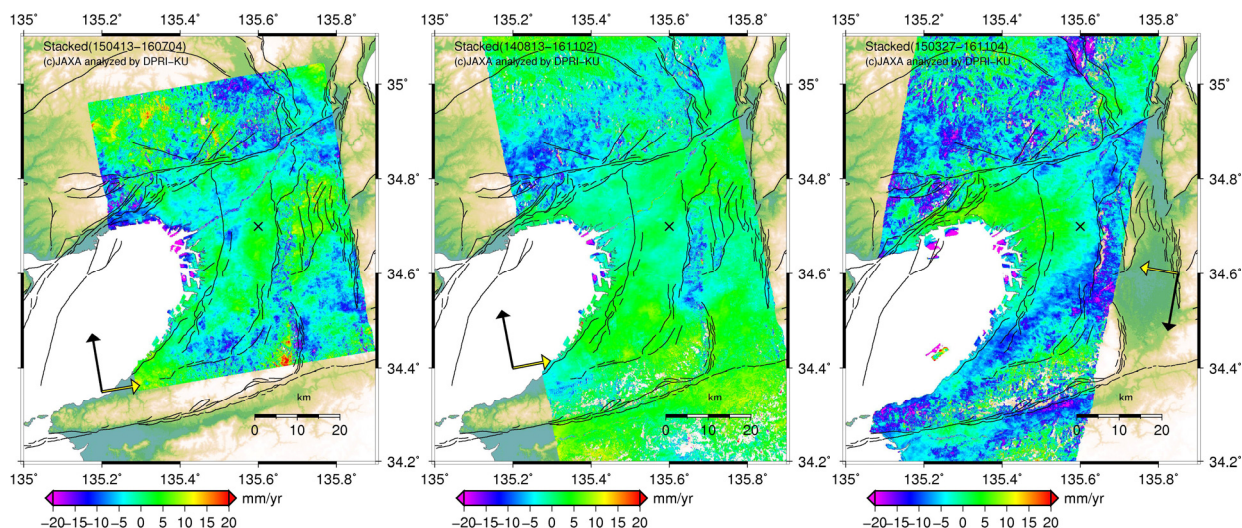


図 1. 有馬・高槻断層帯，六甲断層帯，および中央構造線断層帯（和泉山脈）をカバーする ALOS-2/PALSAR-2 の 3 パスのスタッキング干渉画像。 (左) P128-F680 (北行)，(中) P127-F670-680 (北行)，(右) P21-F2910-2920 (南行)。
視線距離変化は，衛星に近づく（から遠ざかる）センスの変動を正（負）としている。

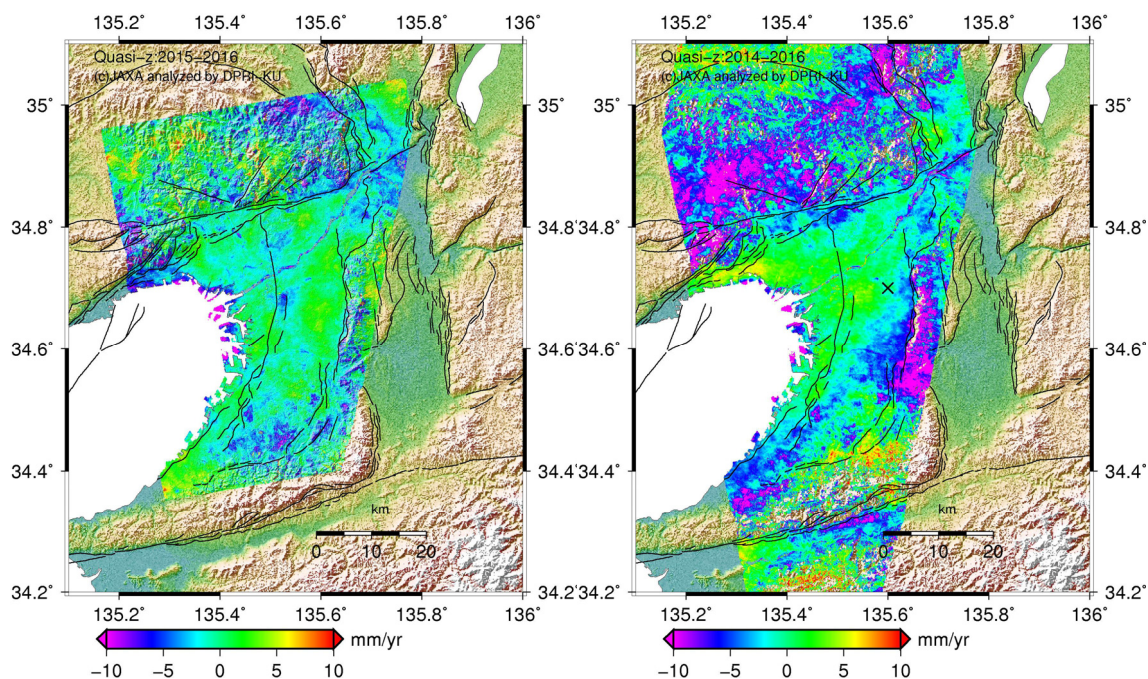


図 2. 図 1 の北行および南行軌道のスタック干渉画像から作成した疑似上下変動。 (左) P128 と P21，(右) P127 と P21。カラー・スケールを ± 10 mm/yr にして示した。隆起（沈降）が正（負）である。

3.1. 2016 年 2 月 6 日台湾美濃地震 (Mw6.6)

この地震は，台湾南部高雄市北部の台湾中央山脈の西側山麓直下，深さ約 15km で発生した。CMT 解や GPS 観測結果などに基づいて，低角の断層面上の逆断層成分を伴った横ずれ運動と推定されている。ALOS-2/PALSAR-2 観測は，地震発生後の 2 月 14 日に南行軌道から ScanSAR で，2 月 18 日に北行軌道から Strip-map モードの観測がなされている。これらの画像の干渉処理を行い，トレンドと地形依存誤差の除去した後，疑似東西および上下成分に変換した (図 3)。その結果，震央の西側に約 15km 付近を中心とする南北約 20km、東西約 15km の楕円形の隆起域が見いだされた。最大隆起量は，約 12cm である (図 5)。この隆起は，深さ 10km 前後の直下に低角の断層を仮定し，上盤側が

20cm 程度南方向にずれる運動により、概ね説明可能である。

隆起域の西側に、東向きに最大約 15cm 移動した帯状の領域が見つかった。さらにその北西にも約 13cm 東向きに移動した地域が認められた (図 4)。台南市内には、その他にも複数の変位の大きいスポットが認められる。この帯状の東向きの変動域の東西端では、変位に不連続が認められる (図 4, 5)。実際現地では、西側境界に沿って開口亀裂が、東側境界付近では圧縮破壊の痕跡が認められた。この変動は、定性的には浅部の低角の断層面で、上盤が東方向にずれる運動で説明可能であるが、深部の断層運動との関係などは不明であるため、今後、地質構造の情報なども取り入れて、さらに検討が必要である。なお、震央付近には大きなすべりが求まらないことから、破壊は西方向に伝播したと推定される。このため、ディレクティビティにより、台南市で震度が大きくなったことが考えられる。

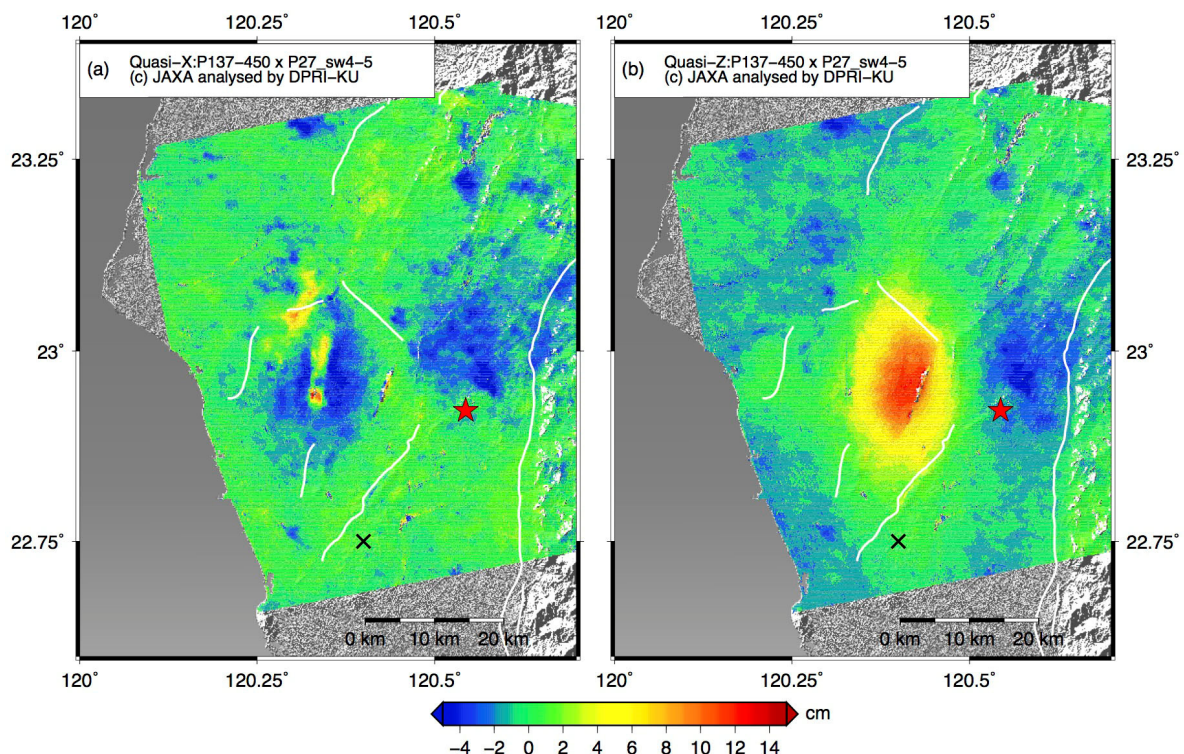


図 3. 台湾美濃地震を挟む期間の ALOS-2/PALSAR-2 干渉画像から作成した地表面変動の(左)疑似東西成分と(右)疑似上下成分。東向き(西向き)および隆起(沈降)が正(負)である。☆印は震央。×は、変位の変換処理に際して基準とした地点。白い実線は、活断層の地表トレース(台湾国立成功大学景國恩助教より提供)。

3.2. 2016 年 4 月熊本地震(本震 Mw7.0)

2016 年 4 月 14 日に熊本地方で Mw6.2 (M_j 6.5) の地震が発生した。益城町において震度 7 が観測され、大きな被害が発生した。これを受けて、翌 15 日に ALOS-2/PALSAR-2 の観測が、南行軌道から行われた。ところが、16 日未明に Mw7.0 (M_j 7.3) の地震が発生し、二度目の震度 7 が観測され、益城町、西原村、南阿蘇村に甚大な被害が生じた。その後、連日 ALOS-2/PALSAR-2 の観測がなされている。ここでは、Strip-map モードの画像を用いた解析結果を報告する。

使用した画像は、いずれも南行軌道からの観測で、P23-F2950-2960(入射角 36.2° , 右観測)と P28-F2920-2930(入射角 32.4° , 左観測)である。各フレームの境界が震源域を横切るように位置するので、Gamma の SLC_concat コマンドを用いて連結して干渉処理を行った。その結果が、図 6 の干渉画像及び図 7 ピクセル・オフセット(P28 のみ)である。いずれもフレーム境界で位相あるい

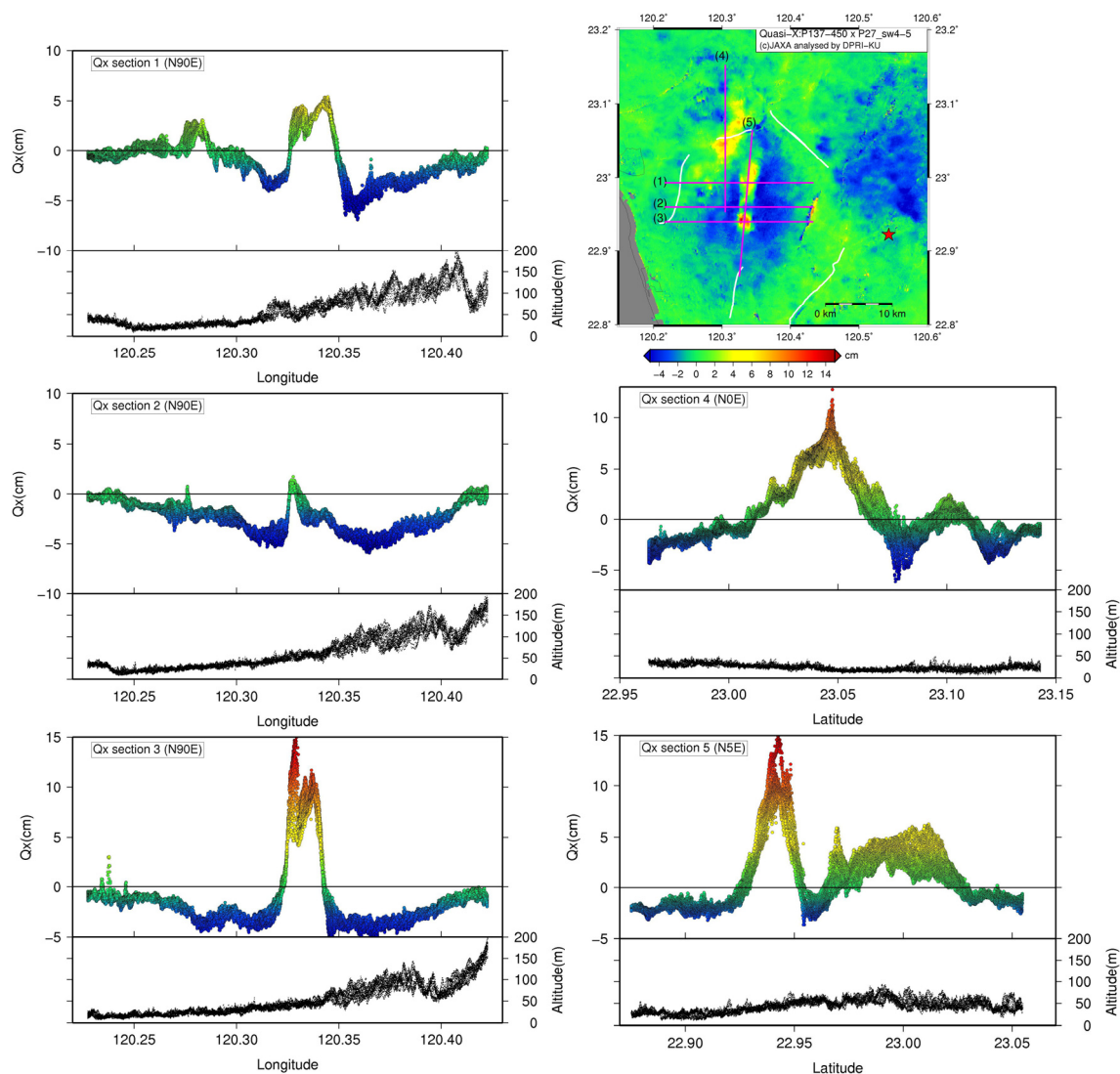


図 4. 5 本の測線に沿った疑似東西成分のプロファイル。各プロファイルの下に地形断面を示す。右上に、プロファイルを取った測線を示す。

はオフセットの不連続が認められない。他機関の解析結果と同様の地殻変動が得られている。なお、アジマス・オフセット（図 7 右）にレンジ方向の縞模様が認められるので、電離層擾乱の影響があるものと考えられる。

図 8 に、コヒーレンスを示す。2014 年 11 月 14 日と 2016 年 4 月 15 日のペア（P28）のコヒーレンスは、全体的に低い（図 8（左））。観測間隔が 17 ヶ月あるため、主として森林などの植生の変化や山岳地域の急勾配等のため、コヒーレンスが低い。4 月 14 日の $M_j6.5$ から 15 日 00 時の $M_j6.4$ の震央の北西側もコヒーレンスが低い。この地域は地形もなだらかで植生も多くないため、地震により生じた変化と考えるのが妥当であろう。コヒーレンスの低下は、主に $M_j5.8$ の地震の震央より西側に集中していることから、被害は益城町から西側で発生したと考えられる。

一方、2016 年 4 月 15 日と 29 日のペア（P28）は、観測間隔が 14 日であるため全体的にコヒーレンスが高い（図 8（右））。しかし、布田川断層に沿って 0.7 以下の低コヒーレンスの領域が認められる。この低コヒーレンス領域は、益城町から阿蘇カルデラ内にまで延びていて、阿蘇カルデラ内で北部カルデラと中央火口丘方向の 2 方向に分かれている。いずれの地域も顕著な土砂災害や地盤変動が生じているところで、その結果がコヒーレンスの低下として捉えられていると考えられる。益城町付近のコヒーレンスの低下は、図 8（左）のケースと比べて面積が小さい。前震と本震において被害

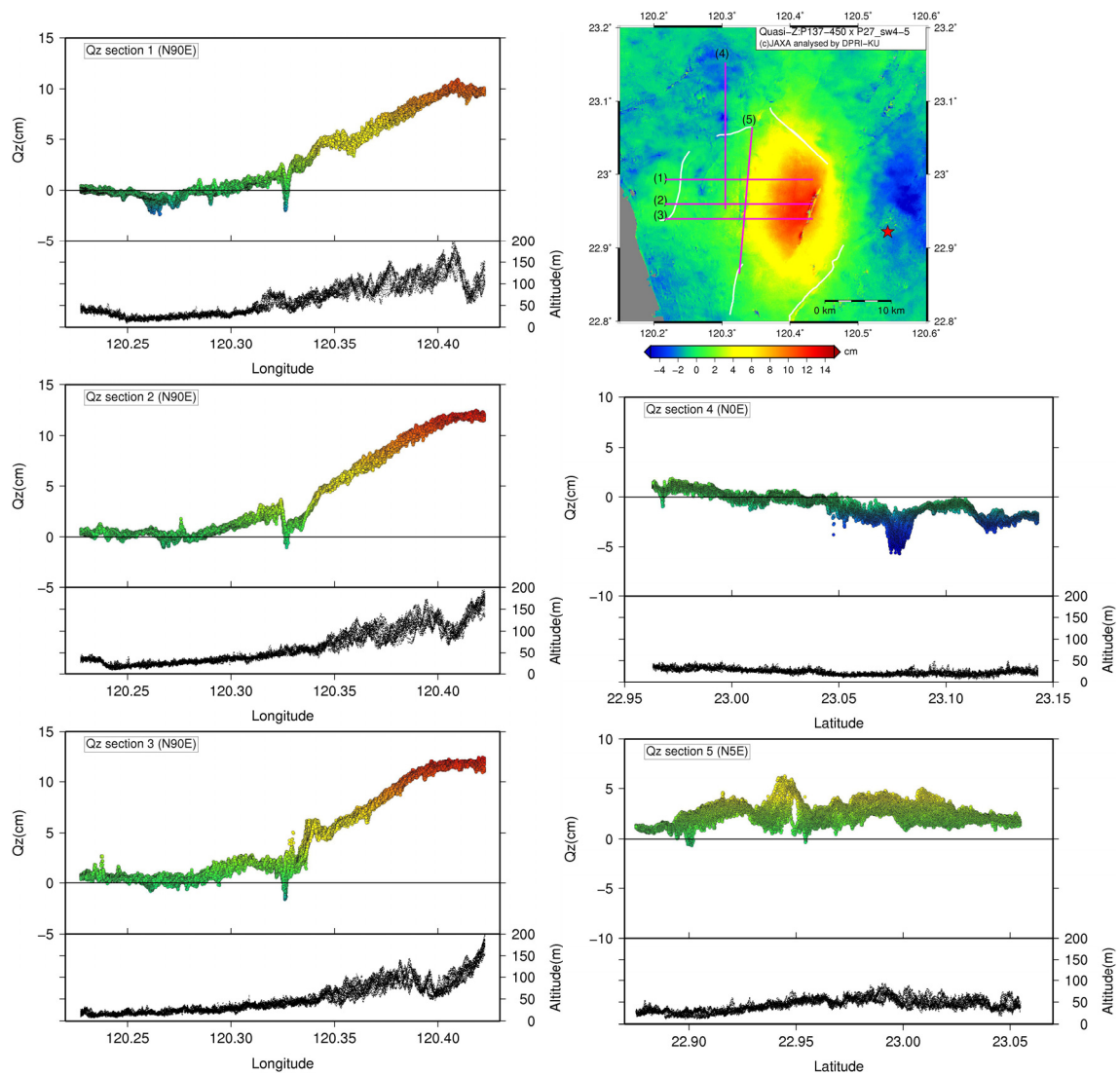


図 5. 5本の測線に沿った疑似上下成分のプロファイル。各プロファイルの下に地形断面を示す。右上に、プロファイルを取った測線を示す。

の分布が異なると考えられる。阿蘇外輪山北西部にもコヒーレンスの低下が認められる。この地域では、低コヒーレンスの多数の細い帯が西北西—東南東走向を持って集中している。数百～千 m の長さがあるものもある。図 8 (左) のペアではこの地域のコヒーレンスは高いことから、この変化は 4 月 15 日正午ころ以降に生じたものである。M_j7.3 の本震により生じたものであろう。干渉画像にもこの低コヒーレンスに対応する変位の不連続が認められる。これらの不連続は～19cm 程度で、変動域の幅は小さいので、この原因は地下の浅いところにあると考えられる。本震震央の北側にも複数の低コヒーレンスの帯が認められる。これらも図 8 (左) には認められないので、本震により生じたものであろう。干渉画像中にも明瞭な変位の不連続（一部では約 10cm）が認められる。断層モデルを適用すると、長さ 5km、幅 2km の正断層が 10～15cm 程度すべたと推定される。

3.3. 2016 年 8 月 24 日イタリア中部地震 (Mw6.2)

2016 年 8 月 24 日イタリア中部を震源とする Mw6.2 の地震が発生し、近傍のアマトリーチェを中心に甚大な被害が発生した。その後、この地域では 10 月 30 日にノルチャ近傍で Mw6.6、2017 年 1 月 18 日にはアマトリーチェ近傍で Mw5.7 はじめ、Mw5 以上の地震が連鎖的に発生した。2009 年の

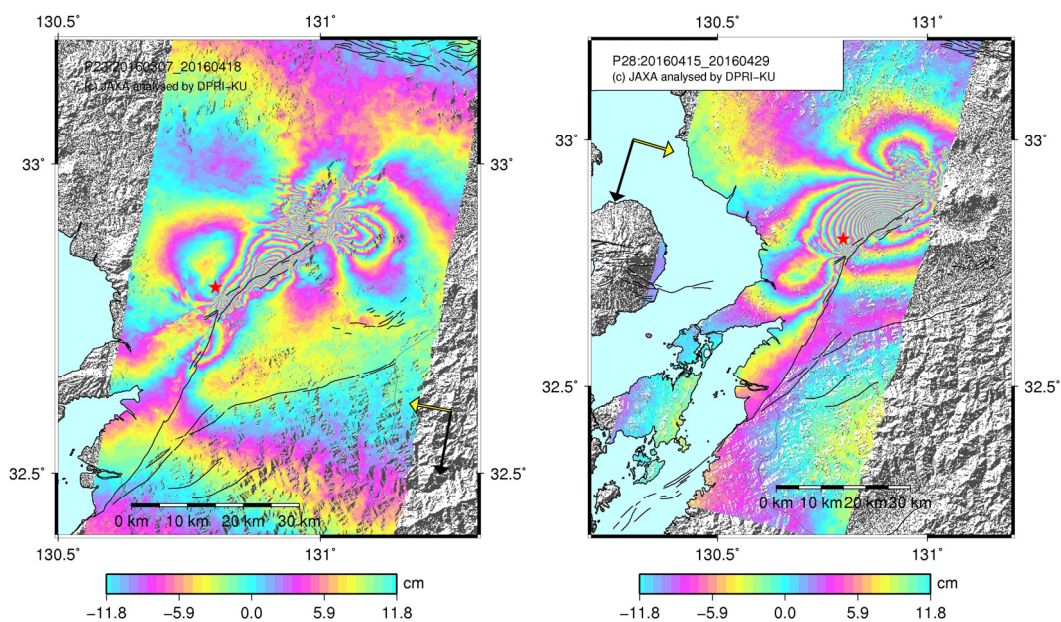


図 6. 2016 年熊本地震を挟む期間の ALOS-2/PALSAR-2 干渉画像. (左) P23, 3 月 7 日と 4 月 18 日のペア. 南行軌道, 右観測. (右) P28, 4 月 15 日と 4 月 29 日のペア. 南行軌道, 左観測. ☆は, 本震 (Mw7.0) の震央. 細い実線は活断層の地表トレース.

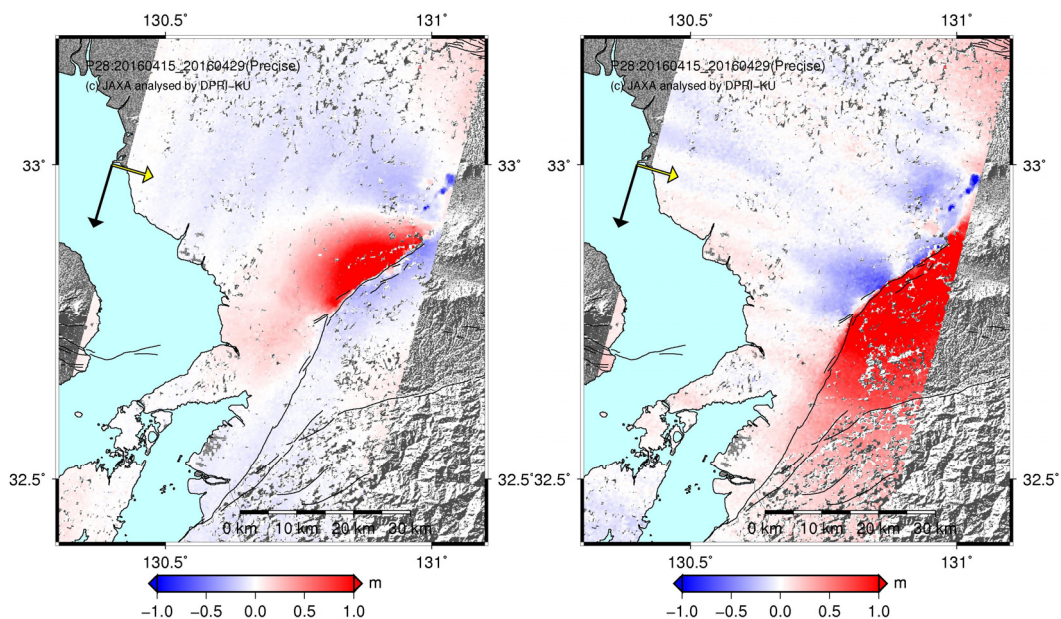


図 7. P28 (南行軌道, 左観測) のペアにおけるピクセル・オフセット. (左) レンジ・オフセット, 衛星から遠ざかる成分が正. (右) アジマス・オフセット. 南向きの変動が正となるように表示. 細い実線は活断層の地表トレース.

ラクイラ地震と同じ変動帯に位置するため, これらの地震の関連性も指摘されている. 8 月 24 日の地震発生以降, ALOS-2/PALSAR-2 の観測が継続して行われており, 10 月の活動についても画像が取得されている. ここでは, 8 月の地震について, 解析結果を報告する.

使用した ALOS-2/PALSAR-2 画像は, P197-F840-850 の 2015 年 9 月 9 日と 2016 年 8 月 24 日の画像を, と P92-F2750-2760 の 2016 年 5 月 25 日と 8 月 31 日の画像である. 入射角は, それぞれ 40.6° と 36.3° , 垂直基線長は -51.7m と -87.1m である. 熊本地震のケースと同様に, SLC_concat を用いて 2 つのフレームを結合し, 2 パス干渉処理, フラットニング, アンラップ, そして二次関数近似に

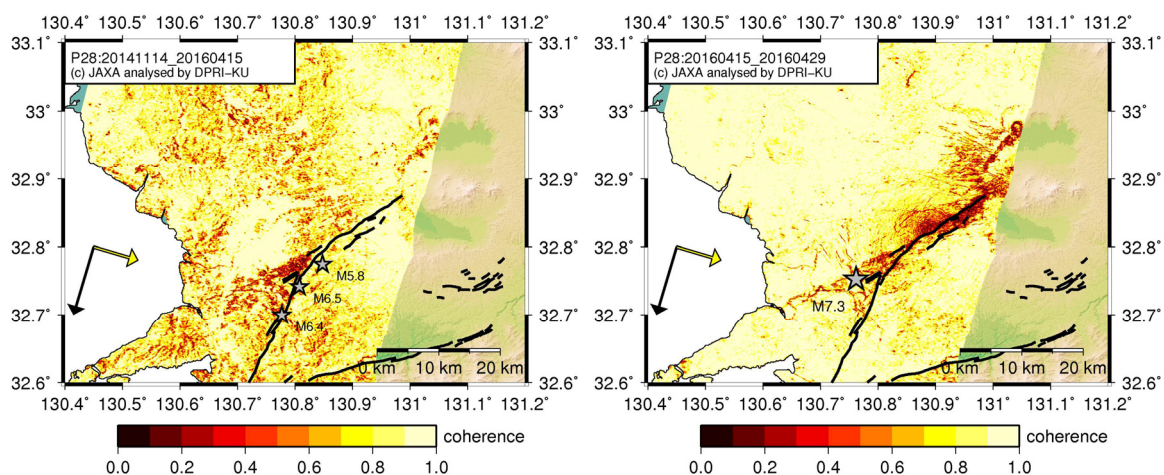


図 8. 熊本地震前後のコヒーレンス. (左) 前震を挟む期間, 2014 年 11 月 14 日と 2016 年 4 月 15 日のペア. (右) 前震後, 本震を挟む期間, 2016 年 4 月 15 日と 29 日のペア. 黒い実線は活断層の地表トレース.

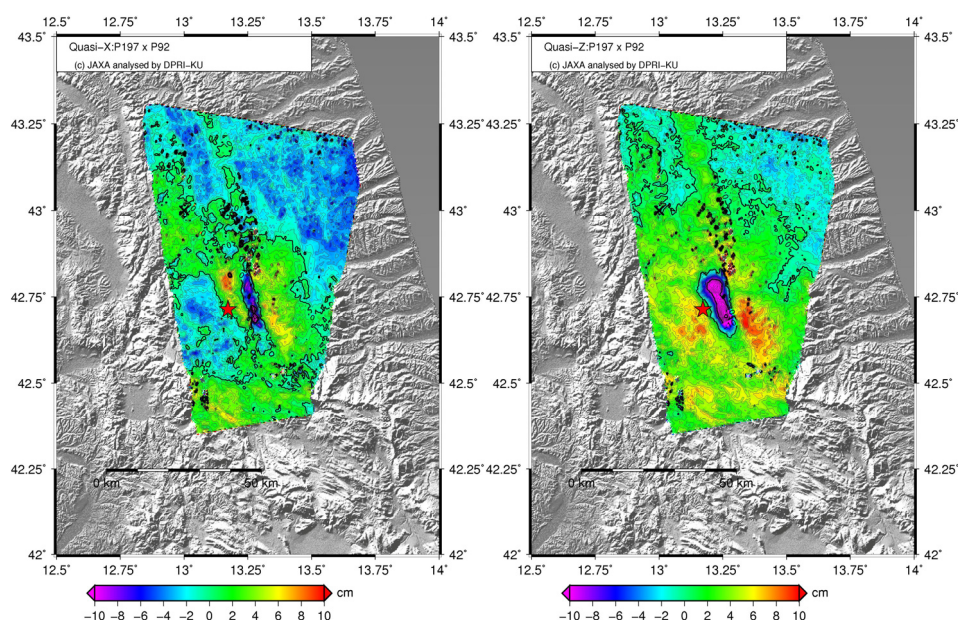


図 9. 2016 年 8 月 24 日イタリア中部の地震前後の地殻変動. (左) 疑似東西成分, (右) 疑似上下成分.

よるトレンドと標高依存誤差の除去を行った. 最後に, 2.5 次元解析を行い, 疑似東西および上下成分に変換した (図 9). 図 9 (左) は東西成分で, 震央の直ぐ北東に 8cm を越える東向きの変位, さらに東に 10cm 程度の西向きの変位が認められる. 図 9 (右) の疑似上下成分では, 震央の直ぐ東側に 10cm を越える沈降が顕著である.

これらのことから, 沈降域の直下に正断層運動が予想されるので, Fukahata and Wright(2008)の手法を用いて, 断層モデルの推定を行った (図 10). なお, 断層モデルの推定には, P197 のデータのみを用いた. また, CMT 解を参考にし, 横ずれ成分は 0 に拘束し, 縦ずれ成分のみ推定している. 図 9 (左) に見られる西向き変位の領域付近に上端を持ち, 傾斜角 45° で西に傾き下がる断層面が最適と推定された. すべりの分布には 2 つのピークが推定され, 北のピークの方がやや深く (5km 程度) 推定されている. 最大すべりは南の浅い方のピークで, 約 70cm と推定された. すべりは, 深さ 10km より浅いところに限られていることが特徴である.

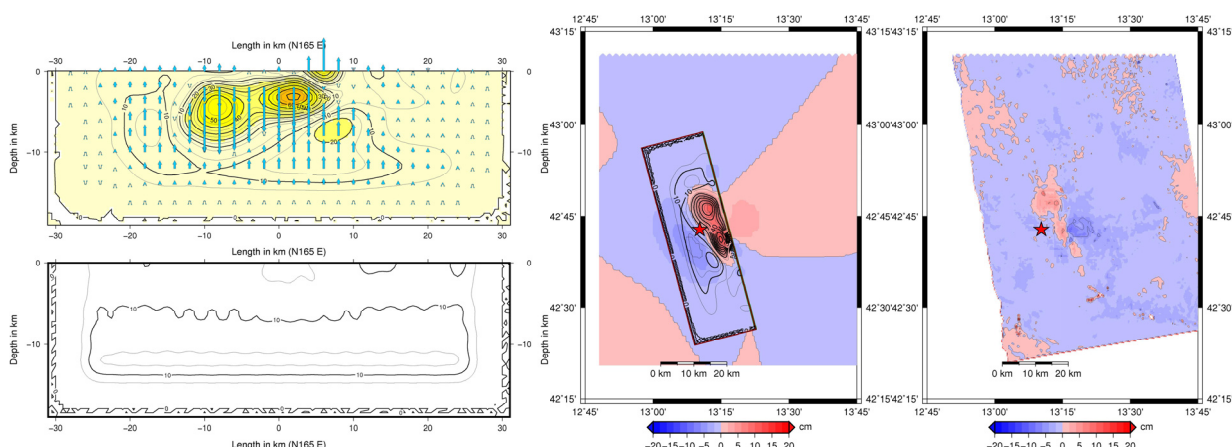


図 10. イタリア中部の地震の干渉画像 (P197 北行軌道からの干渉画像) から推定した (左上) 地震時すべり分布と (左下) 誤差の分布. (中) 理論視線距離変化, と (右) 残差. 視線距離伸長が正. ☆は震央を示す.

表 2. 本解析で用いた鳥取県中部の地震前後の ALOS-2/PALSAR-2 の観測

パス・フレーム (スワス)	マスター観測日	スレーブ観測日	Bperp(m)	入射角
P128-F700(sm)	2016/05/23	2016/10/24	54.3	32.4°
P128-F700(sw2)	2016/07/18	2016/12/19	43.5	34.4°
P128-F700(sw3)	2016/07/18	2016/12/19	51.7	39.0°
P22-F2900(sm)	2016/08/03	2016/10/26	1.4	32.4°
P22-F2900(sw1)	2016/09/28	2016/12/21	410.5	29.2°
P22-F2900(sw2)	2016/09/28	2016/12/21	395.7	34.4°

3.4. 2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震後の変動

2016 年 10 月 21 日に鳥取県中部倉吉市付近で、Mj6.6 の地震が発生した。ALOS-2/PALSAR-2 の緊急観測が 4 方向からなされた。この結果、地殻変動の三成分が得られている (国土地理院, 2016)。京都大学防災研究所では、西村卓也准教授を中心に、地震前から稠密 GPS 連続観測が行われている。この連続観測の結果から地震後の余効変動が得られつつあるので、これとタイアップするために、干渉 SAR により余効変動抽出を試みた。しかし、地震直後の 4 回の観測はいずれも Strip-map モードでなされているが、引き続いてこのモードでの観測がなされていない。また、4 回の内 2 回は、左観測であるため、ScanSAR モードでの観測もなされていない。したがって、2016 年末までの余効変動期をカバーする観測は、表 2 に示す ScanSAR の右観測のみである。ScanSAR 観測のペアも本震を挟んだ期間であるため、地震時変動を含んでいる。幸い Strip-map モードの観測と ScanSAR の震源域をカバーするスワスの入射角の差が 2° 前後であるため、Strip-map モードの干渉画像と ScanSAR の干渉画像の差を取ることで、地震時変動を消去し、余効変動を検出できる可能性がある。

ScanSAR の画像の解析においては、表 2 に示すそれぞれ 2 スワスの解析を行い、mosaic コマンドで干渉画像を結合した後、アンラップし、さらにトレンドと標高依存誤差の除去を行った。Strip-map モードについては、干渉処理後アンラップし、トレンドと標高依存誤差の除去を行った。ScanSAR と Strip-map の干渉画像は、それぞれ参照点が異なるので (それぞれの画像の中心を参照にアンラップしている)、コヒーレンスと断層運動から予想される変動を考慮して、また GPS の観測結果との比較を容易にするために、GEONET 東伯を参照点として、干渉画像の差を取った (図 11)。

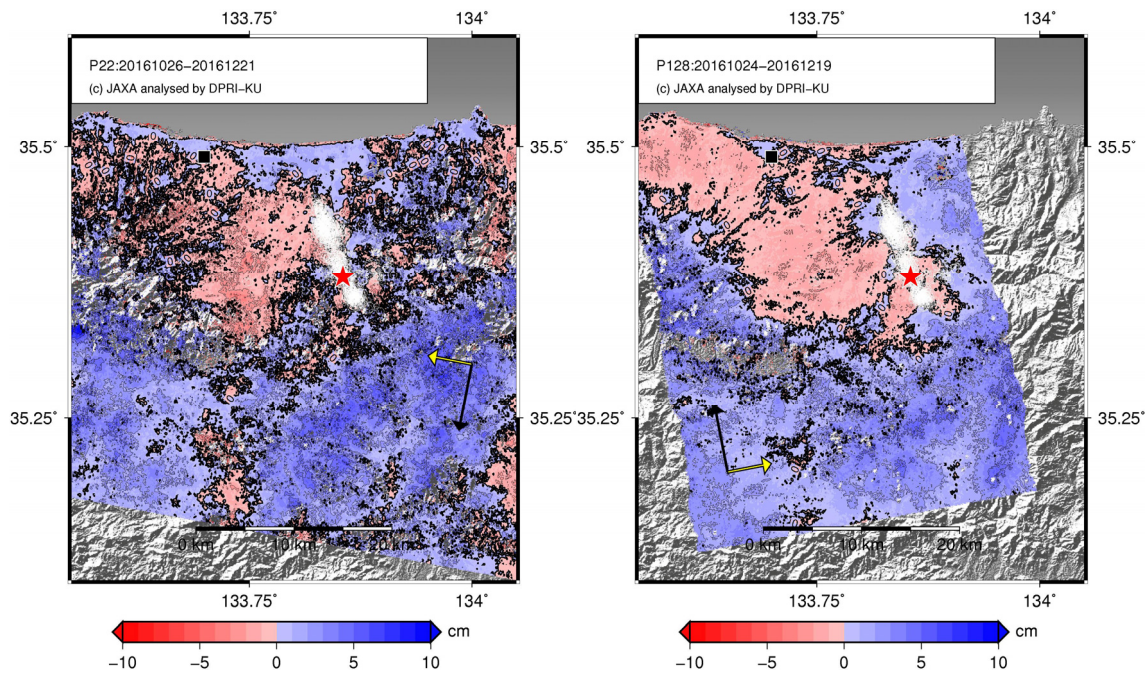


図 11. 鳥取県中部の地震後の地表面変動。(左) 南行軌道 P22, (右) 北行軌道 P128. ☆は本震震央, 白○は余震の震央 (いずれも気象庁一元化震源) を示す. ■は参照点とした GEONET 東伯を示す. コンターは 2cm 間隔.

図 11 に示すように, 5cm 以上の顕著な変動は検出されなかった. 震央付近から北西に延びる視線距離短縮が両方向からの干渉画像に認められる. 隆起が生じたことを示唆するが, 両者の観測誤差を考慮すると有意とはいえない.

4. まとめ

3 年間の ALOS-2/PALSAR-2 画像を収集し, 解析した結果の一部を紹介した. この他, CI の高田氏により, GPS 速度場を用いて補正することにより, 跡津川断層周辺の変動の検出がなされた. また, 2014 年長野県北部の地震, 2015 年ネパール地震, 2016 年ニュージーランド・カイクウラ地震, 茨城県北部の地震等の解析を行った.

地震時変動の検出については, 緊急観測が数多くなされたこともあり, 極めて高精度・高分解能の変動を検出することに成功したと言える. 活断層帯周辺の変動に関しては, ALOS-2/PALSAR-2 の同一モード・同入射角の繰り返し観測が限られており, さらに, 電離層擾乱等の影響が大きい画像も複数あるため, 精度のよい結果を得るのは難しかった. このため, (1)電離層・対流圏擾乱の影響の低減手法の確立, (2)定常的な変動の検出のためのデータの蓄積, が今後の課題である.

参考文献

- Fukahata, Y. and T. Wright, A non-linear geodetic data inversion using ABIC for slip distribution on a fault with an unknown dip angle, *Geophys. J. Int.*, **173**, 353-364, 2008.
- 橋本学, 「だいち」合成開口レーダーで観測された京都盆地と大阪平野の地盤変動, *自然災害科学*, **33**, 115-125, 2014.
- Hashimoto, M., Ground Deformations in the Kyoto and Osaka Area During Recent 19 Years Detected with InSAR, *IAIG Symposia Series*, **145**, 155-164, 2016.
- 橋本学, SAR で観測した中央構造線断層帯 (金剛山地東縁一和泉山脈南縁) 周辺の地殻変動, *日本測地学会第 126 回講演会*, 045, 89-90, 2016.
- 国土地理院, 合成開口レーダー (SAR) によって明らかとなった 3 次元地殻変動と震源断層モデル, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic161027-index.html>, 2016.

陸域プレート境界周辺の地殻変動様式の解明

PI：北海道大学大学院理学研究院 古屋正人

CI：北海道大学大学院理学研究院 高田陽一郎

1. はじめに

陸域プレート境界における地殻変動の観測を通じて、地震発生ポテンシャルの評価や地殻や上部マントル物質の変形のレオロジー特性を解明する。地震時、地震後、地震間の地殻変動を高空間分解能な干渉合成開口レーダによって観測し、地殻変動の物理モデルの構築をめざした。

以下では、2015 年 7 月 3 日のホータン地震の結果の概要を述べる。2016 年熊本地震に伴う地殻変動データの検出と断層モデルは Himematsu and Furuya (2016)で報告されている。

2. 地震時地殻変動の検出結果と断層モデル

2015 年 7 月 3 日に中国新疆ウイグル自治区ホータンで発生した Mw6.4 の地震に伴う地殻変動を ALOS-2 データに基づいて検出した (図 1)。ALOS-2 データは 2014 年 10 月 5 日と 2015 年 7 月 26 日に Ascending 軌道で得られたものである。地震の断層運動に伴う地殻変動のほかに、地震で誘発されたと見られる局所的な変動も見られた。

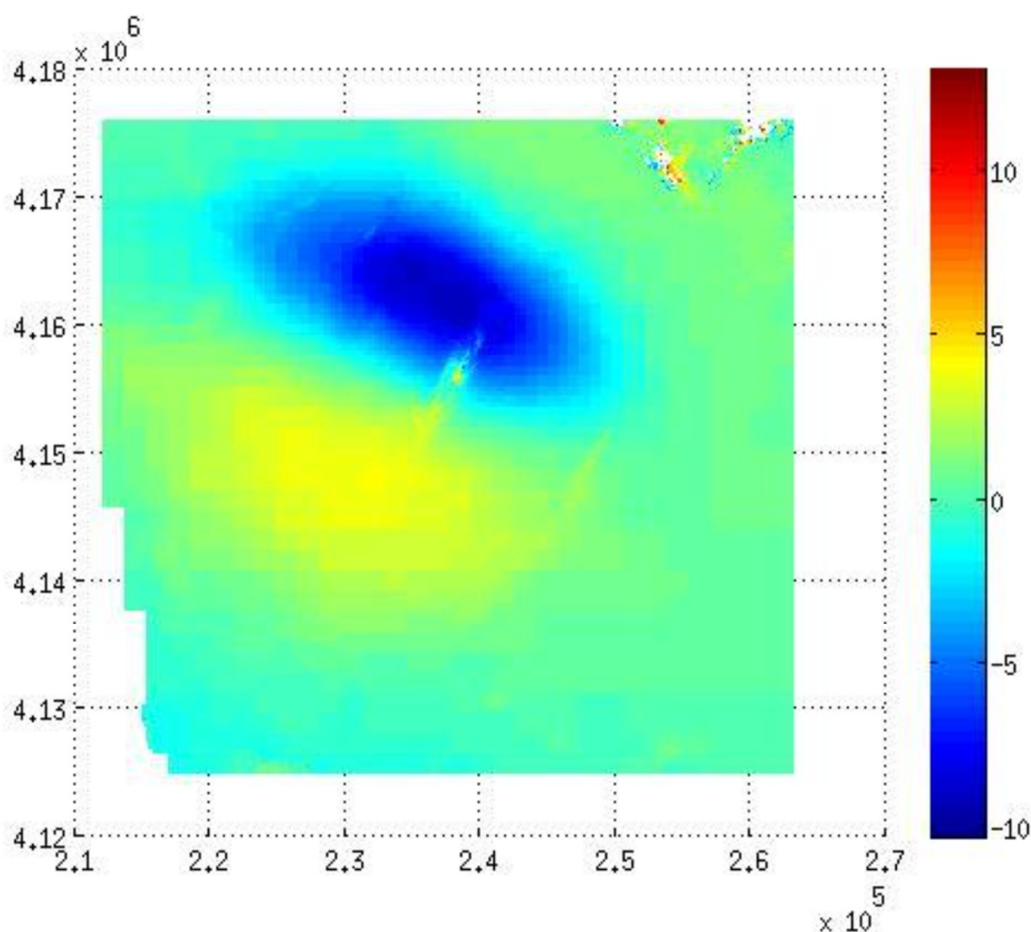


図 1. ALOS2 データで得られた和田地震に伴う地殻変動。青色（黄色）は衛星視線距離（単位は cm）が短くなる（長くなる）ことを示している。縦軸横軸は UTM 座標。単位はメートル。

図 1 で得られたデータに基づいて、半無限弾性体を仮定した断層モデルを作成した (図 2)。それに基づいた衛星視線距離変化の計算値を図 3 に示す。

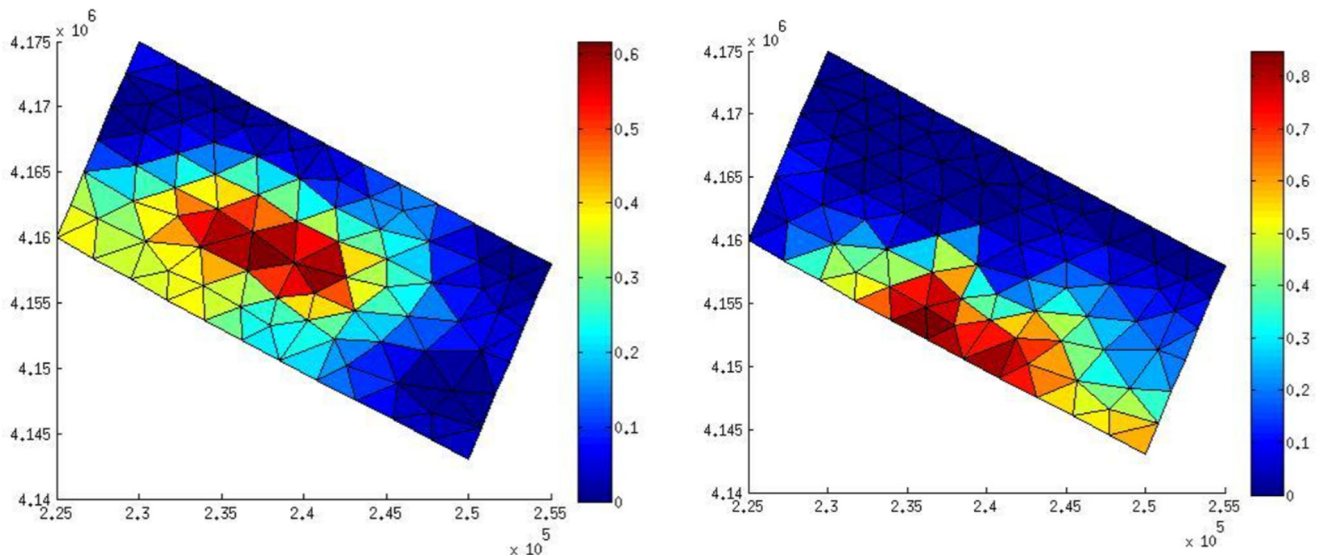


図 2. 図 1 のデータに基づいて推定された断層すべり分布. 左が横ずれ成分、右が縦ずれ (逆断層) 成分. 単位はメートル.

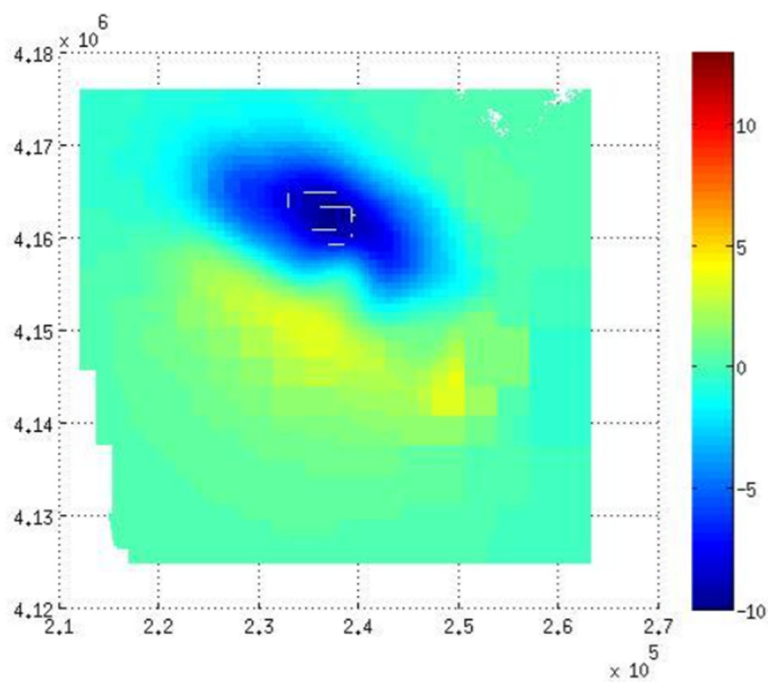


図 3. 図 2 の断層モデルに基づいて計算された衛星視線距離変化. 単位は cm. 縦軸横軸は UTM 座標. 単位はメートル.

3. 議論とまとめ

この地震の発生域は、大局的なテクトニクスとしては“左横ずれ”のプレート境界とも想定される

Karakash fault が走っている。しかしながら、図 4 にも示す通り近年発生している地震の多くは“逆断層型”であり、今回の地震もその例にもれないようで、内陸地震の変形様式の複雑性の一面を示している。この地震は M6.4 と規模としては大きくはないが、SAR によって今後も内陸地震に伴う地殻変動データを蓄積していくことが望まれる。

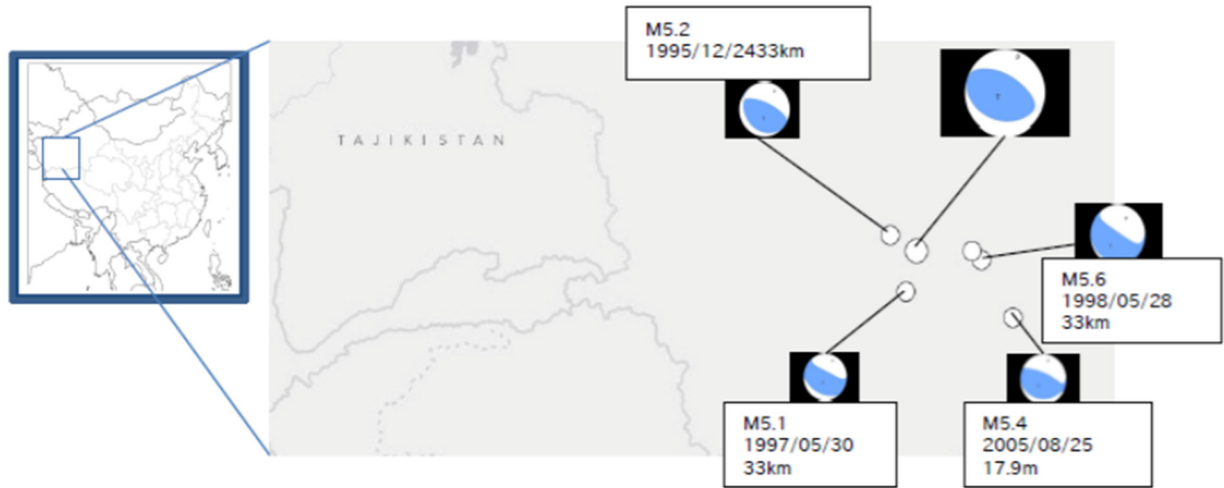


図 4. 過去 20 年間に於ける北西チベットホータン周辺で発生した Mw5 以上の地震 (USGS より)

4. 参考文献

草地勝 (2016), 2015 年 7 月タリム盆地南部ホータンで発生した 地震(M6.4)に伴う地殻変動の検出, 北海道大学理学部地球惑星科学科卒業論文.

Himematsu, Y. and M. Furuya (2016), Fault source model for the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 pixel-offset data: Evidence for dynamic slip partitioning, Earth Planets Space, 68:169, doi:10.1186/s40623-016-0545-7.

5. 謝辞

本研究で用いた PALSAR-2 データは PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface)において共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものである。

干渉 SAR 解析を用いた変位速度急変帯の地震発生ポテンシャルの評価に関する研究

PI：鹿児島大学大学院理工学研究科 中尾 茂

1. はじめに

Bird(2003)は琉球弧よりなる沖縄プレートを定義し、その北端をGPSで観測された速度が空間的に急激に変化する場所とした。この領域はほぼ東西に南九州を横断しており、北の領域に対して南側は東に変位している（図1, Takayama and Yoshida, 2007）。しかし、地質学的な境界は見出されていない。また、この領域の中央から西側では1997年に鹿児島県北西部地震（M6.6）をはじめとして被害地震が発生しているが、東側ではそのような報告がなく、地震が起こるか可能性に関する情報は非常に重要である。地震の発生ポテンシャルを評価するためにはこの領域がどのような歪場であり、プレート境界あるいは断層が存在するのか、存在する場合は固着の場所、その強度がどうなっているかなどを空間分解能が高い干渉SARデータを使用して明らかにすることを目的として解析を開始した。

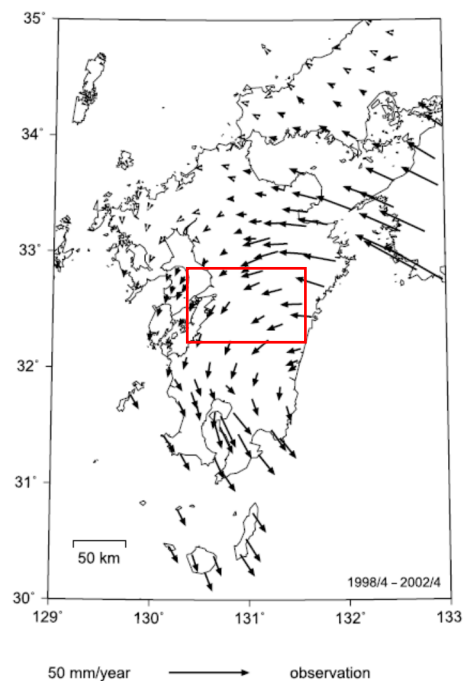


図1. 1998年4月1日から2002年4月1日までの平均変位速度 (Takayama and Yoshida, 2007). Amur プレート基準.

2. PS 干渉 SAR 解析

鹿児島と宮崎の県境を撮像したデータ21シーンについて Hopper et al. (2004)により開発された StaMPS v3.3b1 を用いて PS 干渉 SAR 解析をおこなった。解析期間は2007年6月から2010年12月までで、アセンディング軌道である。

本解析では、2008年12月13日に撮像されたシーンをマスター画像として解析を行った。図2にマスター画像に対する B_{perp} を示す。

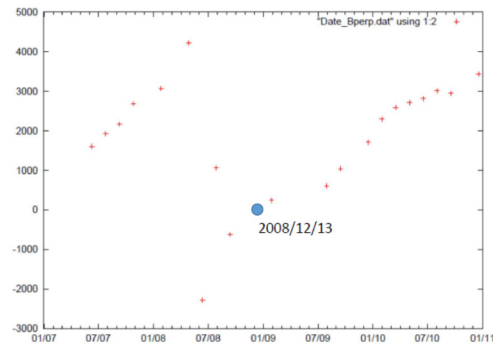


図 2. 2008 年 12 月 13 日撮像データと各画像との Bperp.

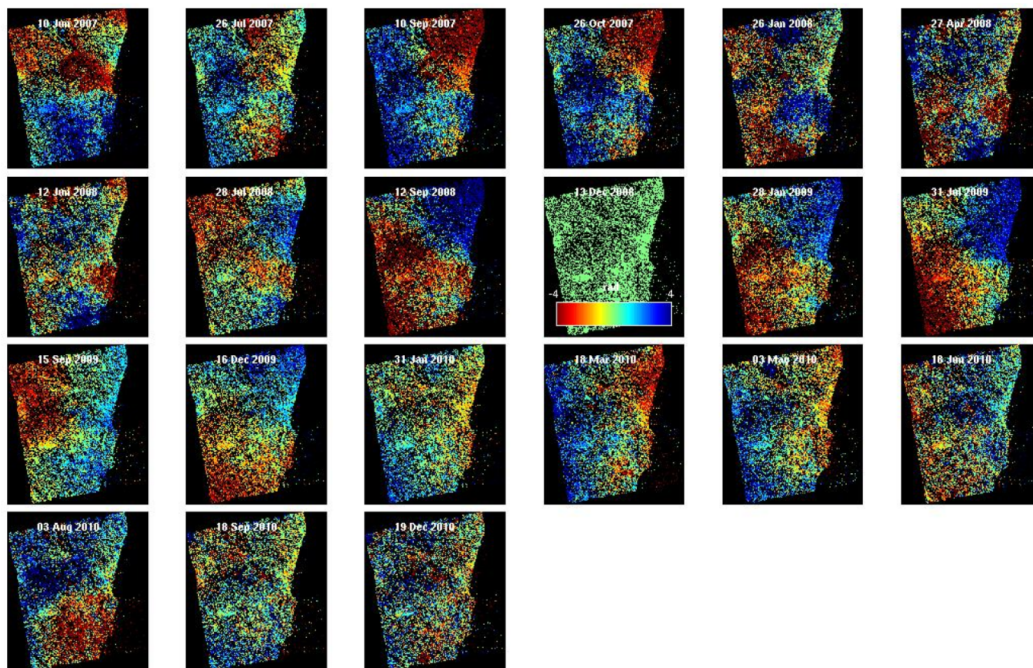


図 3. 差分干渉画像データからマスター画像上の DEM エラー，大気の影響，軌道エラーを除いた画像
(アセンディング軌道)

図 3 に差分干渉画像データからマスター画像上の DEM エラー，大気の影響によるエラー，衛星軌道エラーを除いた画像を示す．多くの画像が画像の中心で画像の上半分と下半分で変動の方向の境界があるように見える．図 4 に各スレーブ固有の大気の影響によるエラーおよび衛星軌道のエラーを示す．図 4 は図 3 とよく似た画像であり，図 3 の視線方向の変動の境界はスレーブ画像上の大気あるいは衛星軌道のエラーであると考えられる．これらのエラーも除いた差分干渉画像を図 5 に示す．これらの差分干渉画像を用いて LOS 方向の平均変位速度を図 6 に示す．解析領域の東半分では，北緯 38 度を境とし，北側で LOS が短縮し，南側で伸張する変化が捉えられ，GPS 観測により得られた地殻変動のパターンと定性的には一致する．しかし，解析領域の西半分では北緯 32 度付近で LOS 変位の境界は見られない．解析領域中に 3 つの変動領域（解析領域西側，解析領域東側北，解析領域東側南）があるように見え，GEONET の結果とは矛盾する領域も存在する．

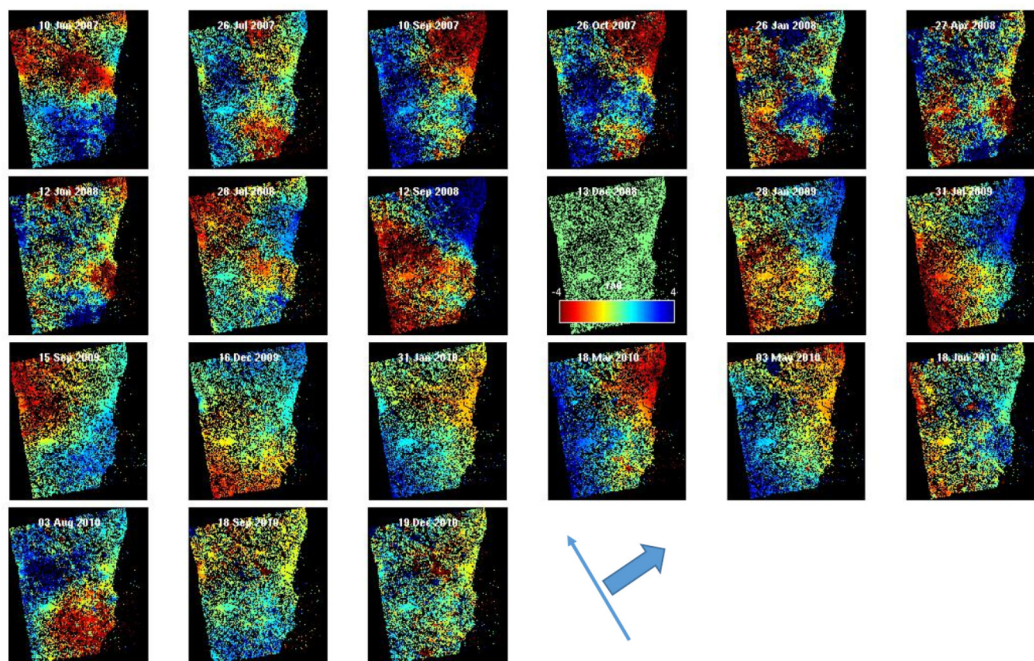


図 4. スレーブ画像上の大気の影響によるエラーと軌道のエラーを示す.

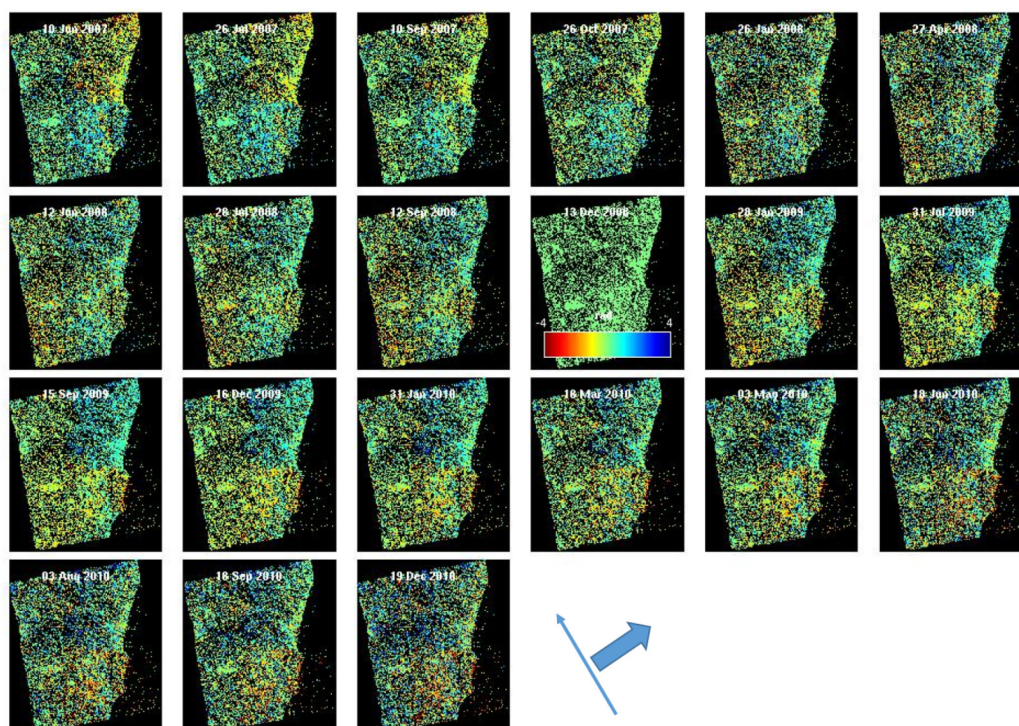


図 5. マスター画像およびスレーブ画像の大気の影響によるエラー，軌道エラーとマスター画像のDEMエラーを除いた差分干渉 SAR 画像.

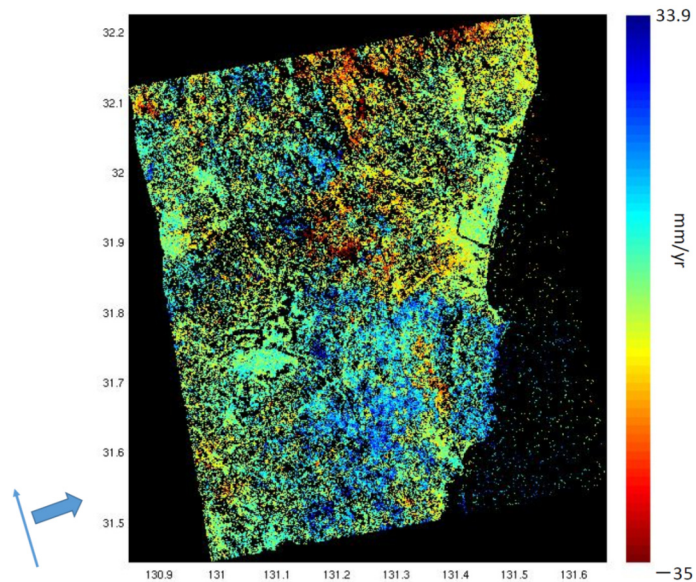


図 6. アセンディング軌道での平均した LOS 変換の速度.

2007 年 2 月から 2011 年 4 月の間に撮像されたディセンディング軌道の画像についても StaMPS を使って PS 干渉 SAR 解析を行った. 図 7 に 2009 年 12 月 29 日に撮像された画像をマスター画像としたときの Bperp を示す.

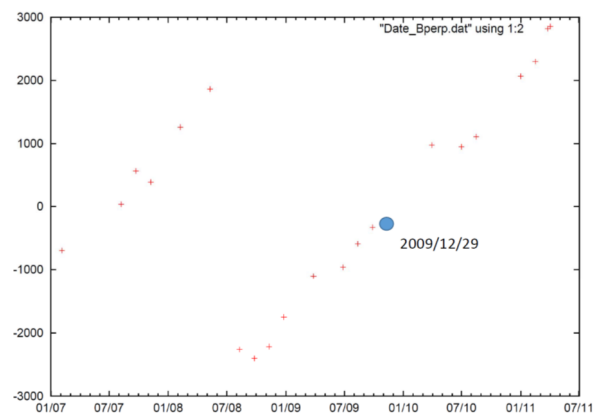


図 7. 2009 年 12 月 29 日撮像データと各画像との Bperp.

図 8 に差分干渉 SAR 画像からマスター画像中の大気の影響によるエラーと軌道エラーを除いた画像を示す. 画像中央を境にして上半分と下半分で変動の違いが見られるが, 画像により上下の変動パターンが逆の場合もあり, 現在考えようとしている定常的な変動が捕らえられているとはいいいがたいと考えられる. さらに図 9 にこれらの差分干渉画像を用いて LOS 方向の平均変位速度を示す. ディセンディングの LOS 平均速度の空間分布では GEONET で観測された変動パターンを得ることができていない.

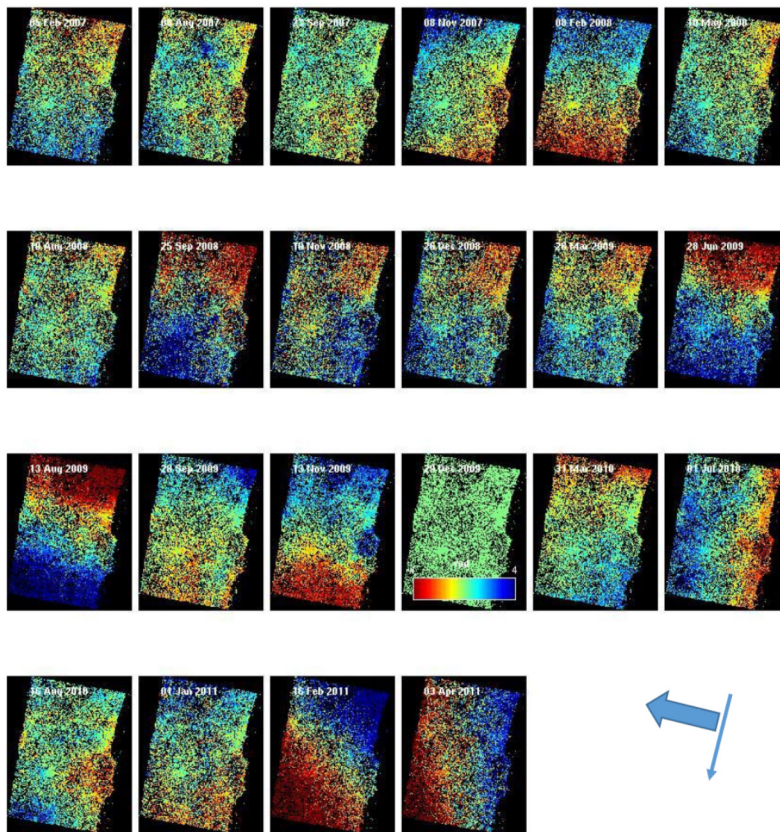


図 8. マスター画像の大気によるエラーと軌道エラーを差し引いた差分干渉 SAR 画像.

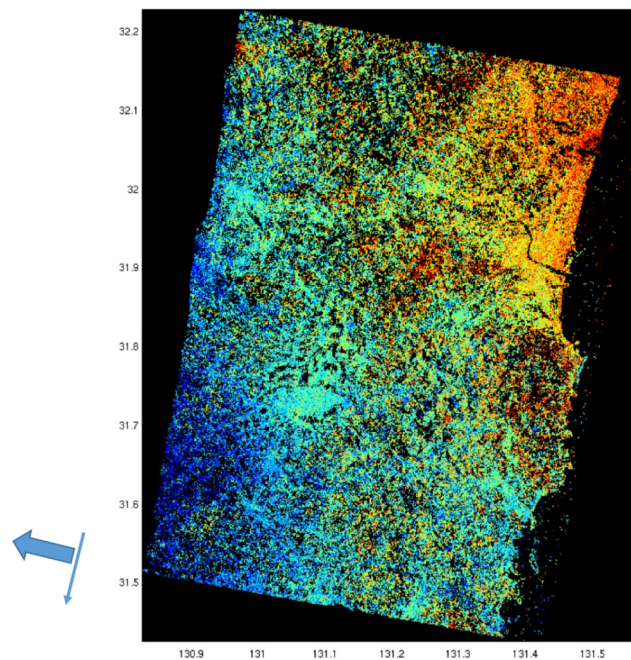


図 9. ディセンティング軌道での平均した LOS 変換の速度.

3. 議論とまとめ

StaMPS ではマスター画像の大気伝播遅延や軌道誤差による LOS の変化とともにスレーブ画像

についても推定される．アセンディング画像の解析において、スレーブ画像で推定された 20 のうち 13 画像で、北緯 32 度付近で大気伝播遅延や軌道誤差による LOS の変化が伸びから縮みに変化しており、図 6 と同じパターンをしている．また、マスター画像の大気伝播遅延や軌道誤差による LOS の変化も図と同じように 3 つの領域に分けることができる．このようにエラーの空間パターンと同様な変動が現在求めたい GEONET で求められた変動であるため、エラーの推定の精度を検討する必要があると考えられる．

図 10 に鹿児島大学が行っている GNSS 連続観測と GEONET 観測点の変位速度より推定されるディセンディング画像のシミュレーション画像を示す．鹿大観測点で観測期間が短い観測点での変位速度の推定が過大になっている場所があり、特異な変動があるように見えている．これから全体的にみるとディセンディング軌道からも GEONET から得られた変動を捕らえることが可能であることがわかる．図 8 では各画像にさまざまな変動があり、これらの原因を究明し、精度良く取り除く必要がある．

以上より、アセンディング軌道では目的としていた GEONET で得られた変動パターンが定性的に得られたが、GEONET より想定される変動パターンと矛盾する領域もある．ディセンディング軌道では、変動パターンは得られなかった．さらなる誤差要因の究明が必要である．

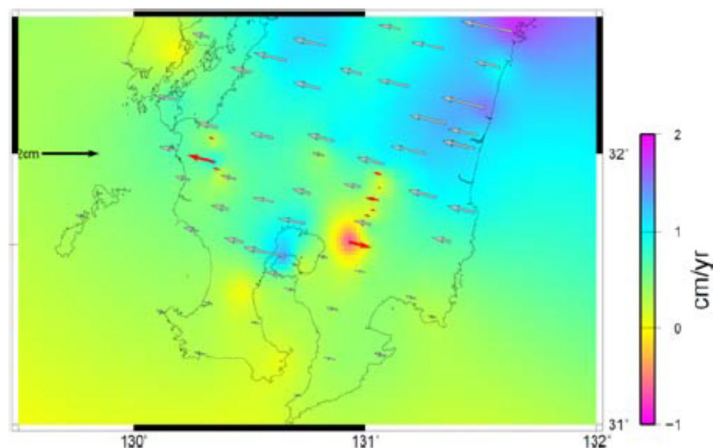


図 10. GNSS データからシミュレートしたディセンディング画像の視線速度．ベクトルは GNSS 観測点での視線変化の水平成分を示す．

参考文献

Bird P. (2003), An updated digital model of plate boundaries, *Geochem. Geophys. Geosyst*, 4, 1027, doi:10.1029/201GC000252.

Hooper, A., H. Zebker, P. Segall and B. Kampes(2004), A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Gephys. Res. Lett*, 31, L23611, doi:1029/2004GL021737.

Takayama, H. and A. Yoshida(2007), Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data, *J. Gephys. Res.*, 112, B06413, doi:10.1029/2006JB004690.

PALSAR-2 と PALSAR の地殻変動検出能力の比較

PI：宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター 夏秋 嶺

CI：宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター 本岡 毅

CI：東京電機大学・理工学部 島田 政信

1. はじめに

本研究は、ALOS PALSAR とその後継である ALOS-2 PALSAR-2 の地殻変動検出能力の比較が目的である。ALOS-2/PALSAR-2 は、ALOS/PALSAR の性能を評価して、干渉精度が向上するように SAR 感度、帯域幅、軌道保持等を考慮して、設計上全体的な干渉 SAR 精度を向上させたものである。本研究では、本精度の確認を目的として PALSAR-2 を用いて、1) 干渉性能、2) 地殻変動抽出能力の二点について検討する。この評価の為に、84MHz、28MHz の Stripmap モードの干渉、ScanSAR-InSAR の能力について評価対象とする。評価は平時における変動量、災害時における変動量の抽出を行い、ALOS-2 の干渉能力についての把握を行う。

2. 84MHz 帯域幅による地殻変動の検出

ALOS-2 PALSAR-2 は ALOS PALSAR に比べ、帯域幅が 24MHz から 84MHz まで拡大した。これはレンジ分解能に換算して約 10m から 3m への向上になり、より詳細な地殻変動の検出が可能となった。この他、14 日回帰軌道と左観測および軌道のばらつきを 500 メートル以内に収める運用（実際には 200 メートル半径を達成）などが、地震発生直後の観測を可能としている。本章では 2014 年長野県神城断層地震および 2016 年熊本地震および 2016 年鳥取地震を例に、ALOS-2 の地殻変動検出能力について報告する。

2-1. 2014 年長野県神城断層地震

性能向上の成果は 2014 年 11 月 22 日に発生した長野県神城断層地震において早くも発揮された。地震発生後 2 日後の 11 月 24 日には早くも干渉解析可能となる観測がなされ、以後 28 日までに 5 回観測が行われた。図 1 に左観測の事例として 11 月 27 日と 10 月 2 日の観測データを利用した干渉画像を示す。

この干渉ペアは ALOS では不可能であった左観測である点、干渉ペアの垂直基線長が 9 メートルと非常に短い点で ALOS-2 の特長をよく表している。また、84MHz 帯域幅による分解能向上の成果を示すため、図 1 中の黒枠で示された領域を図 2 に拡大する。図 2 は被災地のうち堀之内地区と呼ばれる地域の拡大図である。マルチルックおよびフィルタ処理をする前の干渉位相画像であるが、中央の谷地川および合流する姫川の右岸に変動縞が集中していることがわかる。ALOS-2 では垂直基線長が短く SAR の感度が高いため、ALOS では必須であったマルチルック処理やフィルタリング処理なしでも図 2 のように明瞭な局所的な変動を捉えることが可能であることが確認された。実際の運用としては、変動域全体を把握するため、また定量的な変動の評価のためにマルチルック処理とフィルタリング処理は依然として必要である。また、仮にレンジ・アジマス両方向に 4 ピクセルずつの 16 look であっても ALOS の 1look と同等の分解能であり、十分な性能といえる。しかし、局所的な変動を把握する場合はマルチルックの窓を小さく、フィルタによる平滑化を最低限にしたとしても、詳細な位置合わせ[1]のみでより局所的に集中した変動を検知できると言える。

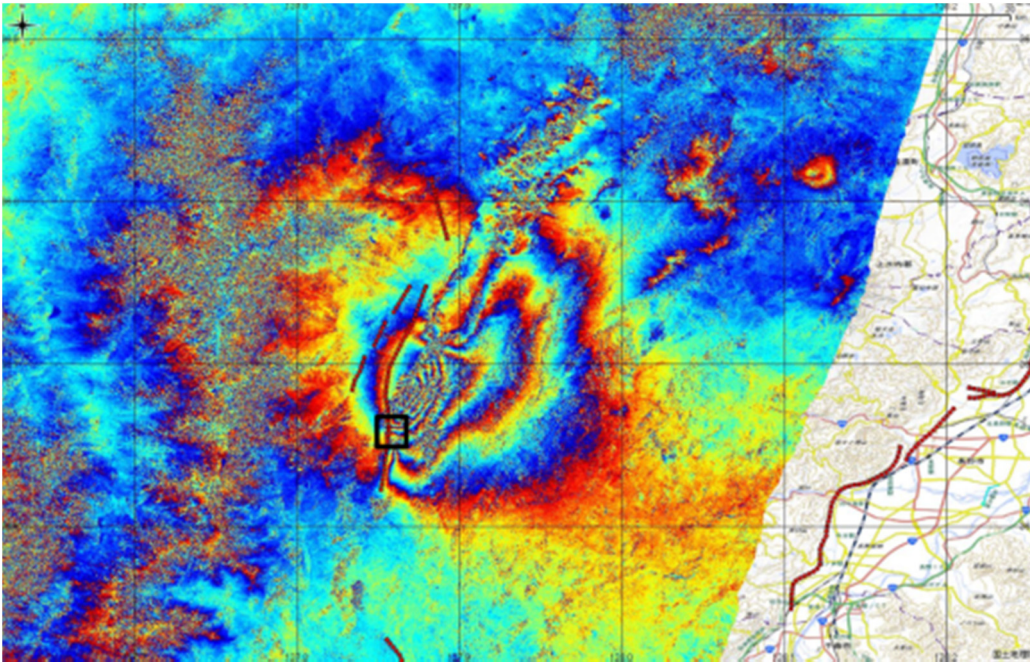


図 1. Path 25 Frame 2840 より観測された長野県神城断層地震の地殻変動（干渉ペア 11 月 27 日 - 10 月 2 日）赤点線は国土地理院 都市圏活断層図による既知の活断層を示す。

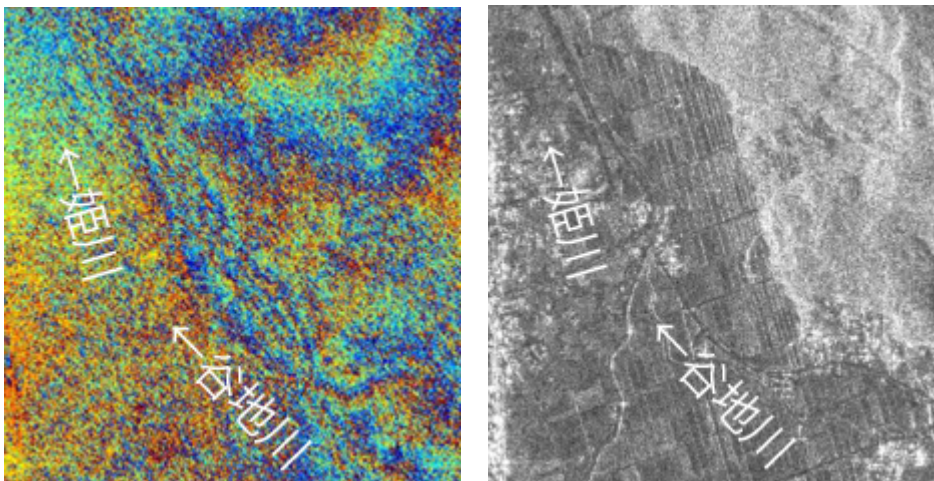


図 2. 図 1 黒枠の拡大図. 左：干渉位相画像 右：強度画像

2-2. 2016 年熊本地震

2016 年 4 月 14 および 15 日に発生した熊本地震においては, ALOS-2 は 84MHz および ScanSAR モードによって被災地を連日観測した. 特に震源が浅く規模が大きかったため, 干渉解析の結果には干渉縞が不連続となる領域が多数生じている. これらの不連続線は地震断層だけでなく地震に伴い生じた地割れ等にも対応しており, その両端で地殻変動量が異なることを意味している[2]. 84MHz モードではその高分解能を生かして詳細に不連続域の特定することができた. 図 3 に参考として 2016 年 4 月 15 日と 29 日の干渉ペアより作成した, 本震に伴う地殻変動を検知した干渉画像を示す.

一般的には地殻変動は断層のすべり面を中心に同心円状の変動縞を呈する. しかし, 熊本地震では震源が浅く地表に多数の地割れが生じたほか, 地表部での割れ目の雁行や分岐が生じたために不連続な領域が目立った. 特に断層から離れた熊本市街や阿蘇外輪山の北西斜面においても不連続な領域が

多数発見された。これは未知の地下構造によると思われるが、干渉解析によって異常な変動が生じた領域を面的に特定できた事例と言える。阿蘇外輪山の割れ目は震災後に梅雨の時期となるために防災上も活用された。図4に現地調査により確認された位相の不連続線と対応する山林中の地割れの写真を示す。

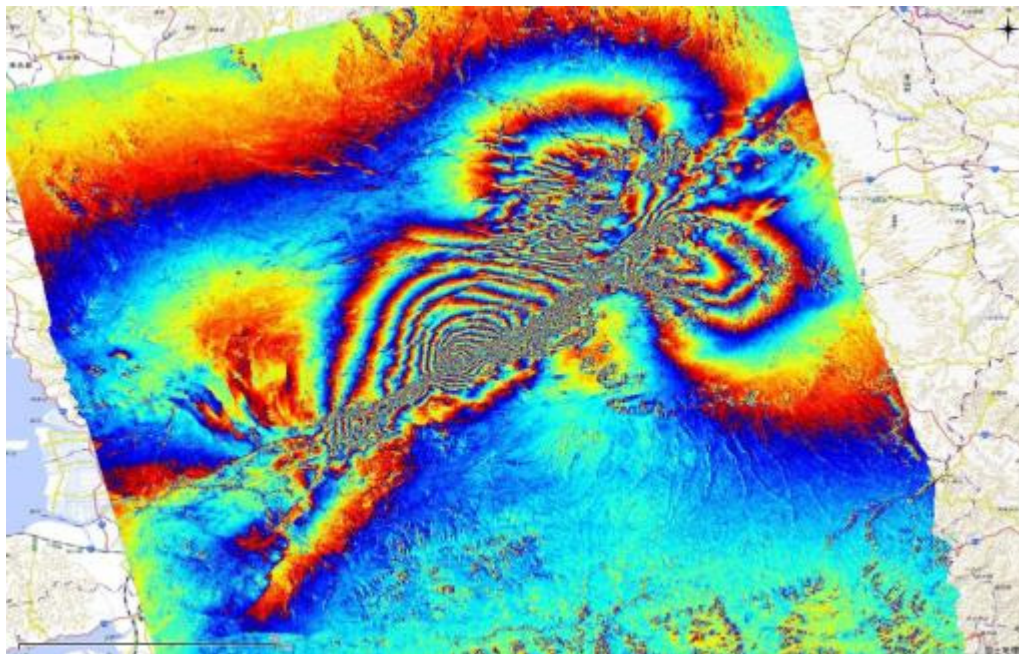


図3. Path 126 Frame 670より観測された長野県神城断層地震の地殻変動（干渉ペア4月15日 - 4月29日）。



図4. 現地調査により発見した阿蘇山中の地表の割れ目。

2-3. 2016 年鳥取県中部地震

ALOS-2 は左観測が可能であるため、同一の地殻変動を昇交-降交軌道、右-左観測の合計 4 通りの方向から観測することができる。4 方向からの観測で得られた変動量は、実際の地殻変動をそれぞれの観測の視線方向ベクトルへ射影したものであるから、逆算することにより地殻変動の三次元的な推定が可能である[3]。原理上は 3 方向からでも算出は可能だが、ALOS-2 飛行方向の特性上、南北方向の感度は低いため誤差は大きくなる。原理的には同様の解析は、干渉解析とピクセルオフセットないしは Multiple Aperture Interferometry (MAI) を利用することでも可能であるが、ピクセルオフセットや MAI による解析精度は干渉位相の精度より劣るため、干渉解析の精度を生かし切れるとは言えず、また変動量自体も比較的大きなものが要求される。

四方向からの観測による三次元変動の解析事例として 2016 年鳥取地震を例に挙げる。図 5 に 2016 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部地震の地殻変動を観測した干渉画像を示す。いずれも地震発生後の 10 月 22 日から 26 日にかけての短期間で取得された。同一の地震に対して入射角が異なるため異なる干渉縞となっている。これらを別個に位相アンラップを行い、得られたそれぞれの視線変動量を三次元の変動量に換算した結果を図 6 に示す。今回の地震は北北西-南南東走向の左横ずれ断層であるため、南北方向だけでなく東西方向へも変動量が検知された。また、震源付近を中心に上下変動も検知された。

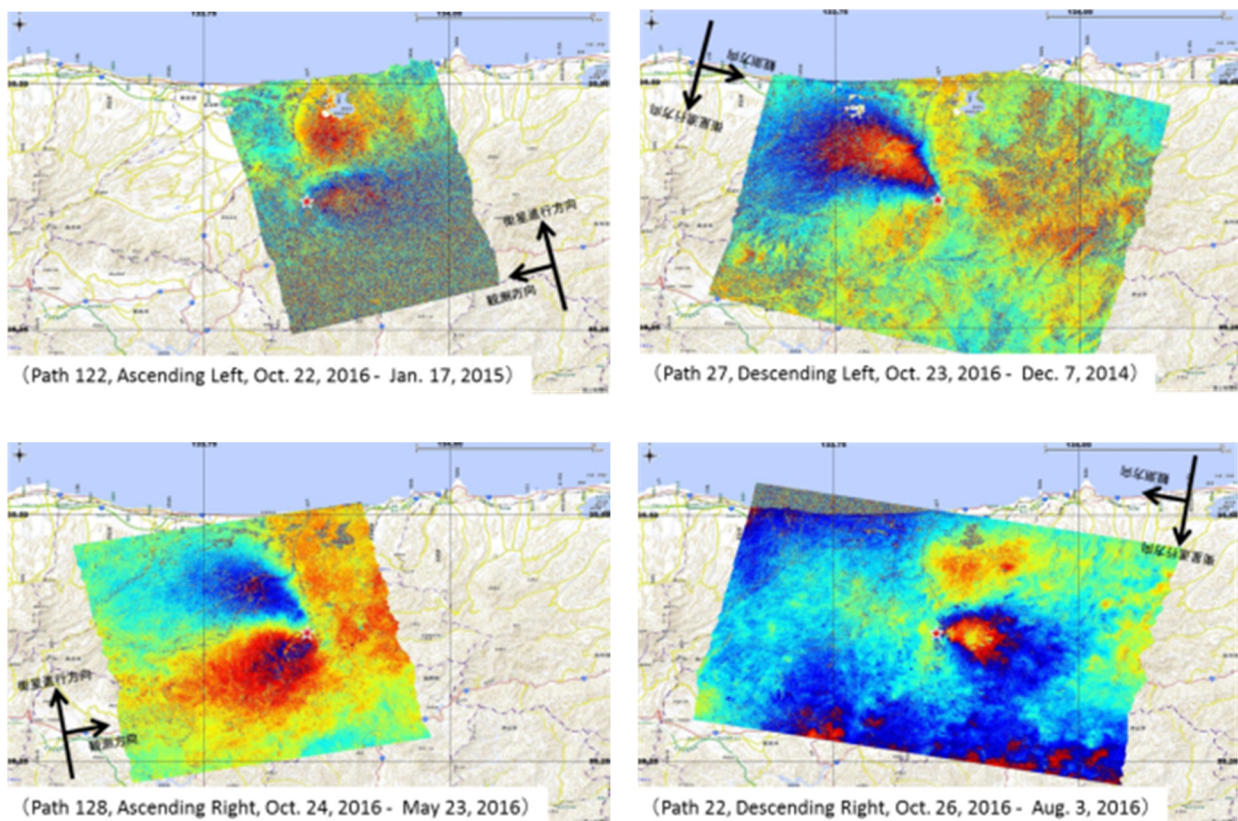


図 5. 2016 年鳥取県中部地震の干渉画像。中央の赤星が震源。左上：Path 122 Frame 740 昇交左観測（干渉ペア 2015 年 1 月 17 日 - 2016 年 10 月 22 日）。右上：Path 27 Frame 2870 降交左観測（干渉ペア 2014 年 12 月 7 日 - 2016 年 10 月 23 日）。左下：Path 128 Frame 700 昇交右観測（干渉ペア 2016 年 5 月 23 日 - 2016 年 10 月 24 日）。右下：Path 22 Frame 2900 降交右観測（干渉ペア 2016 年 8 月 3 日 - 2016 年 10 月 26 日）。

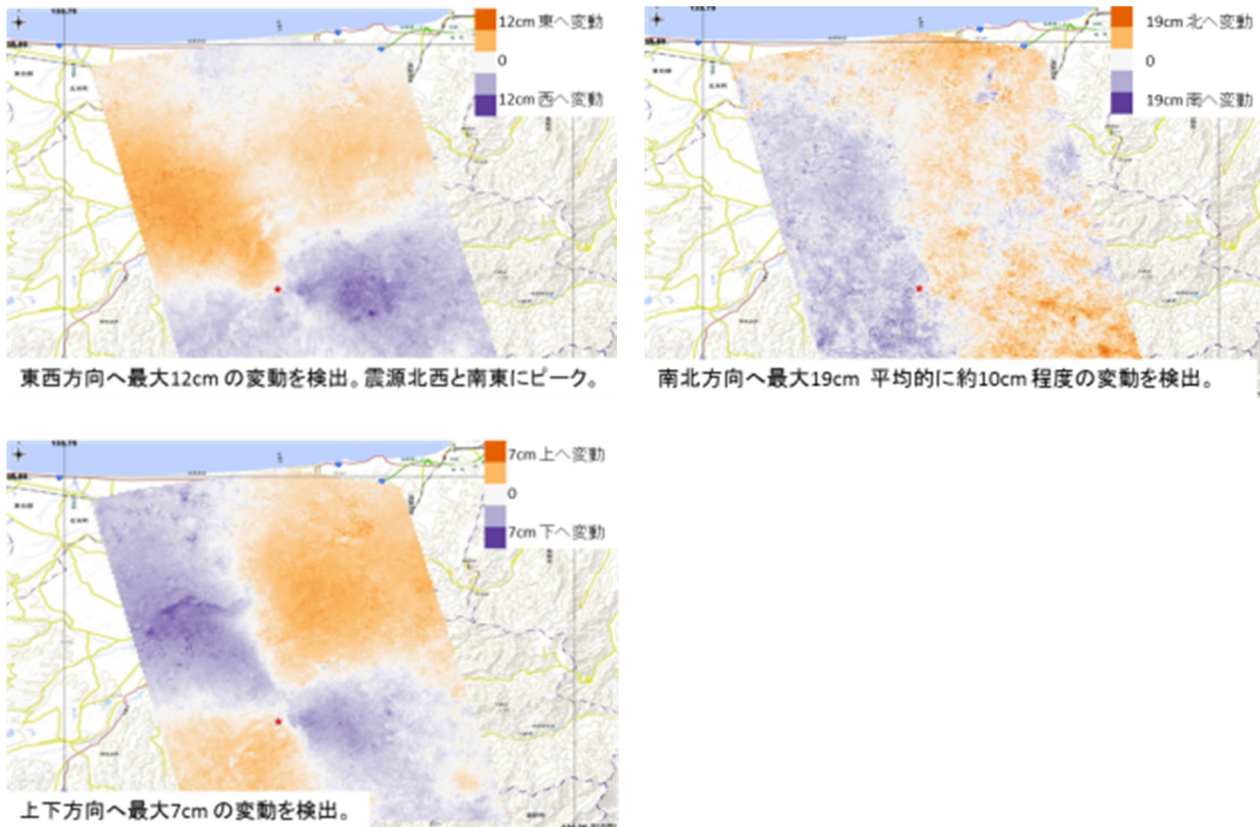


図 6. 計測された 3 次元変動量. 左上：東西，右上：南北，右下：上下方向の変動量.

3. 28MHz 帯域幅による地殻変動の検出

日本以外の海外の観測では ALOS と同じく 28MHz 帯域幅による観測を行っている. ただし, SAR 感度や衛星運用は ALOS-2 により向上している. 隣接する領域での比較として 2016 年に発生したイタリア中部地震および 2009 年のラクイラ地震を事例とする. イタリア中部地方では, 2009 年 4 月 3 日に 2009 年ラクイラ地震が発生したほか, 2016 年 8 月 24 日, 10 月 26 日, 10 月 30 日に連続して比較的大きな地震が発生した. また, 2017 年には群発地震が発生している.

この領域を観測した干渉画像の例を図 7 に示す. 図 7 左上の干渉画像は 8 月 24 日の地震をに対応する変動縞であり, 二本の平行する活断層の中間で大きな変動が生じていることがわかる. 図 7 右上の干渉画像は 10 月 26 日および 30 日の地震に対応する変動縞である. 今回, 2016 年の 3 回の地震の全てを分離する観測は他のパスを含めても存在しないため, 8 月 24 日と 10 月 26 日の地震が重畳された別のパスの干渉画像を図 8 に示す. この 2 つの地震の変動域はわずか 5 キロメートルほどの距離を置いて不連続となっていたが, 10 月 30 日の地震は両者の中間にある変動していない領域で生じ, 結果として図 7 右上のような干渉縞を呈することとなった. 図 7 左下に 3 地震全てを包含する干渉画像を示す. 結果として東西 40 キロメートル, 南北 50 キロメートルにわたる変動域が観測された.

その後, 2017 年 1 月に再び同地域の南部で群発地震が生じた. 前回の変動域の南部には図 9 に示すようにラクイラ地震の変動域がある. 2016 年 10 月 30 日までの変動域はラクイラ地震の変動域と約 20 キロメートルほど離れていたが, この群発地震により図 7 右下のような直径約 10 キロメートルの変動域が生じた.

図 10 に図 7 左下, 右下および図 8 の干渉画像すべてを重畳させた変動域の図を示す. 既知の断層と比較すると, 2016~17 年の一連の地震の変動域は全て並行する二本の断層の中間が主な変動域で

ある一方で、2009 年のラクイラ地震は断層の南側の領域が変動域であることがわかる。このような、主たる変動域を面的に把握することで今後の地震の予測に寄与する可能性がある。

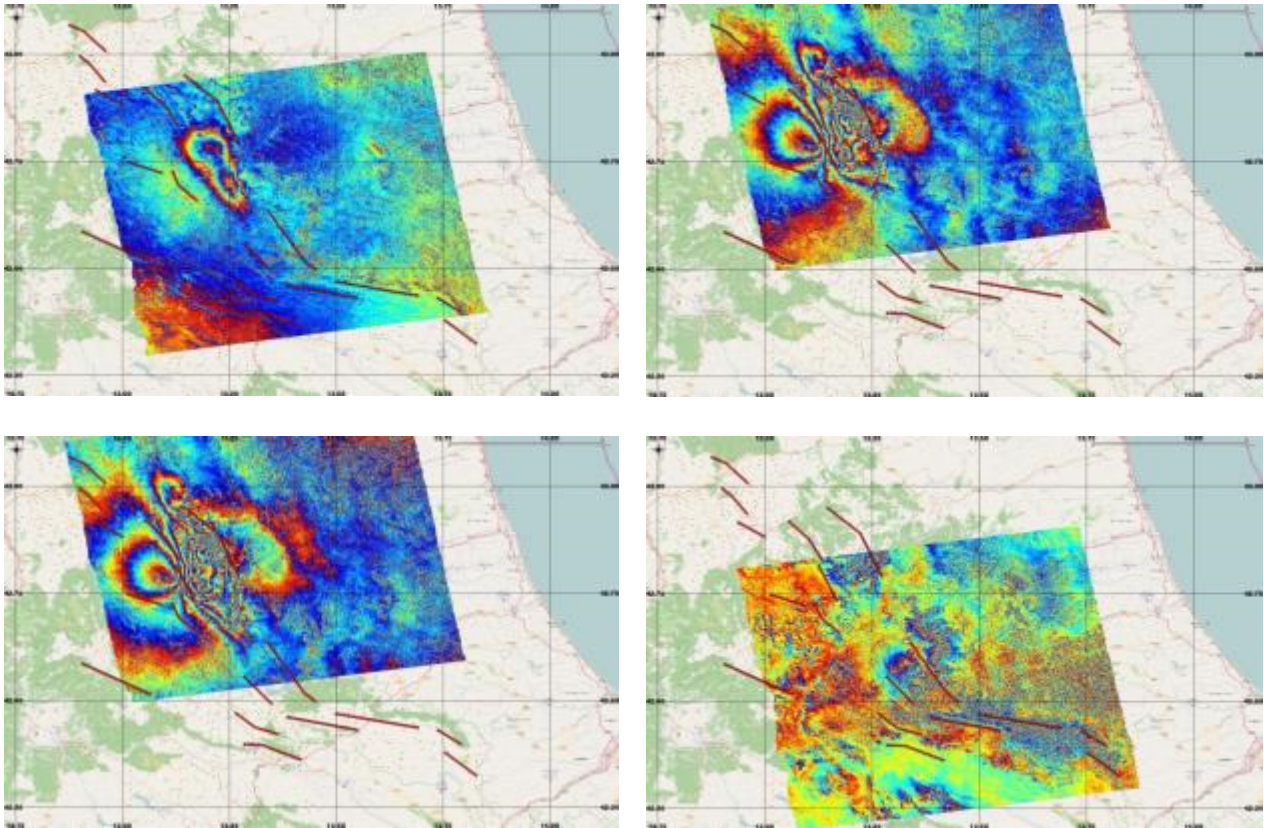


図 7. 2016 年イタリア中部地震の干渉画像。赤線は F. Galadini, C. Meletti, E. Vittori “Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie” INGV(2000) による既知の断層。いずれも Path 197 Frame 840-850。左上：2015 年 9 月 9 日 - 2016 年 8 月 24 日。右上：2016 年 8 月 24 日 - 2016 年 11 月 2 日。左下：2015 年 9 月 9 日 - 2016 年 11 月 2 日の 3 地震全てを包含した干渉画像。右下：2016 年 11 月 2 日 - 2017 年 1 月 25 日。

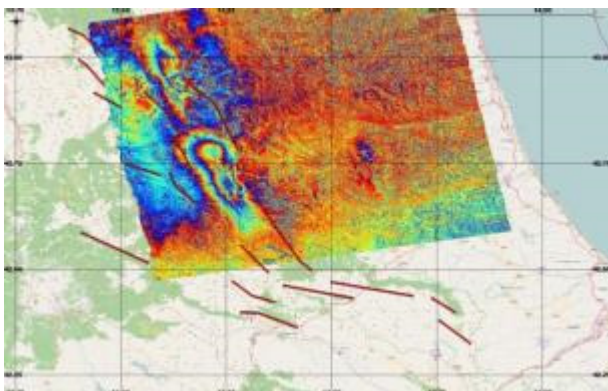


図 8. 2016 年イタリア中部地震の干渉画像。南側が 8 月 24 日、北側が 10 月 26 日の地震に対応する変動縞。Path 198 Frame 840-850(干渉ペア 2016 年 2 月 5 日 - 2016 年 10 月 28 日)。赤線は F. Galadini, C. Meletti, E. Vittori “Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie” INGV(2000) による既知の断層。

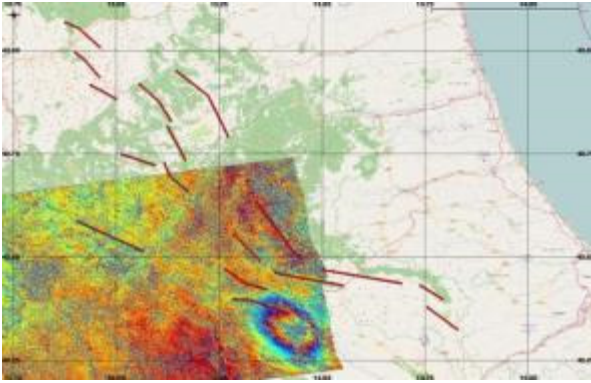


図 9. 2009 年ラクイラ地震の干渉画像. Path 639 Frame 830 (干渉ペア 2007 年 3 月 2 日 - 2009 年 4 月 22 日). 赤線は F. Galadini, C. Meletti, E. Vittori “Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie” ING V(2000) による既知の断層.

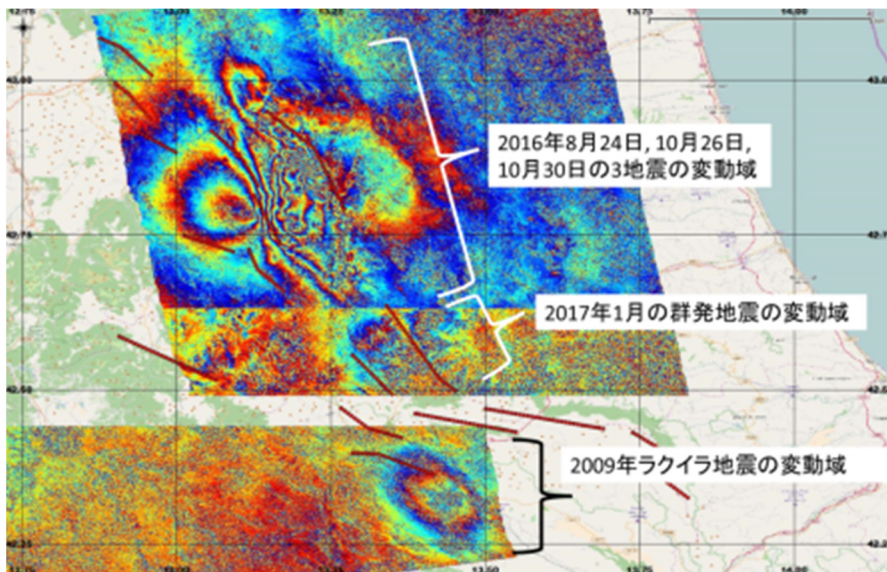


図 10. 2009 年ラクイラ地震と 2016～2017 年にかけての干渉画像の重ね合わせ.

ALOS と ALOS-2 の干渉画像を比較する限りにおいて 28MHz 帯では大きな差が無いと考えられる。ただし、軌道が高精度に制御される ALOS-2 では、垂直基線長がいずれの干渉ペアを使用しても小さいため、電離層等の影響がなければ再直近の干渉ペアを使用することが可能である。一方で、ALOS では垂直基線長が長いために位置合わせや地形縞を除去する際の DEM の精度などが変動縞の算出に大きく影響する。これらを踏まえると、ALOS-2 の方がより実用的であると結論できる。

4. ScanSAR InSAR の能力

ALOS-2 は ScanSAR 観測モードにおいても干渉解析が可能となっている。当初は ScanSAR の観測ごとのバーストを同期させる機能に不具合があり、限定された干渉ペアでのみ干渉解析が可能であったが、2015 年 2 月 8 日の修正より後は干渉解析が可能となった。ALOS-2 は観測幅 350 キロメートル、サブスワスが 5 本のもとの観測幅 490 キロメートル、サブスワスが 7 本のものの、2 つの ScanSAR 観測モードがある。陸域を含め通常は 350 キロメートル幅のモードが使われているが、海洋観測には 490 キロメートルのものが使われている。いずれも干渉解析が可能であるが、その事例として 2016 年熊本地震の解析結果を図 11 に示す。いずれも明確に熊本地震の変動域を捉えている。

ScanSAR 干渉画像は ALOS-2 が L-バンドを使用している関係上、電離層の変動が干渉縞に重畳される。その除去を定量的に除くためには帯域分割法などの SAR データのみを使用する方法、GNSS 点などを使用し既知の変動に合うよう干渉画像を調整する方法、電離層の変動を平面の 1 次もしくは 2 次近似により除く方法が挙げられる。今回は曲面による近似を採用したが、干渉画像全体に変動域が含まれるような大規模な地殻変動が生じた場合にはこの手法では実際の変動を除いてしまう可能性があるため、改善が必要と考えられる。

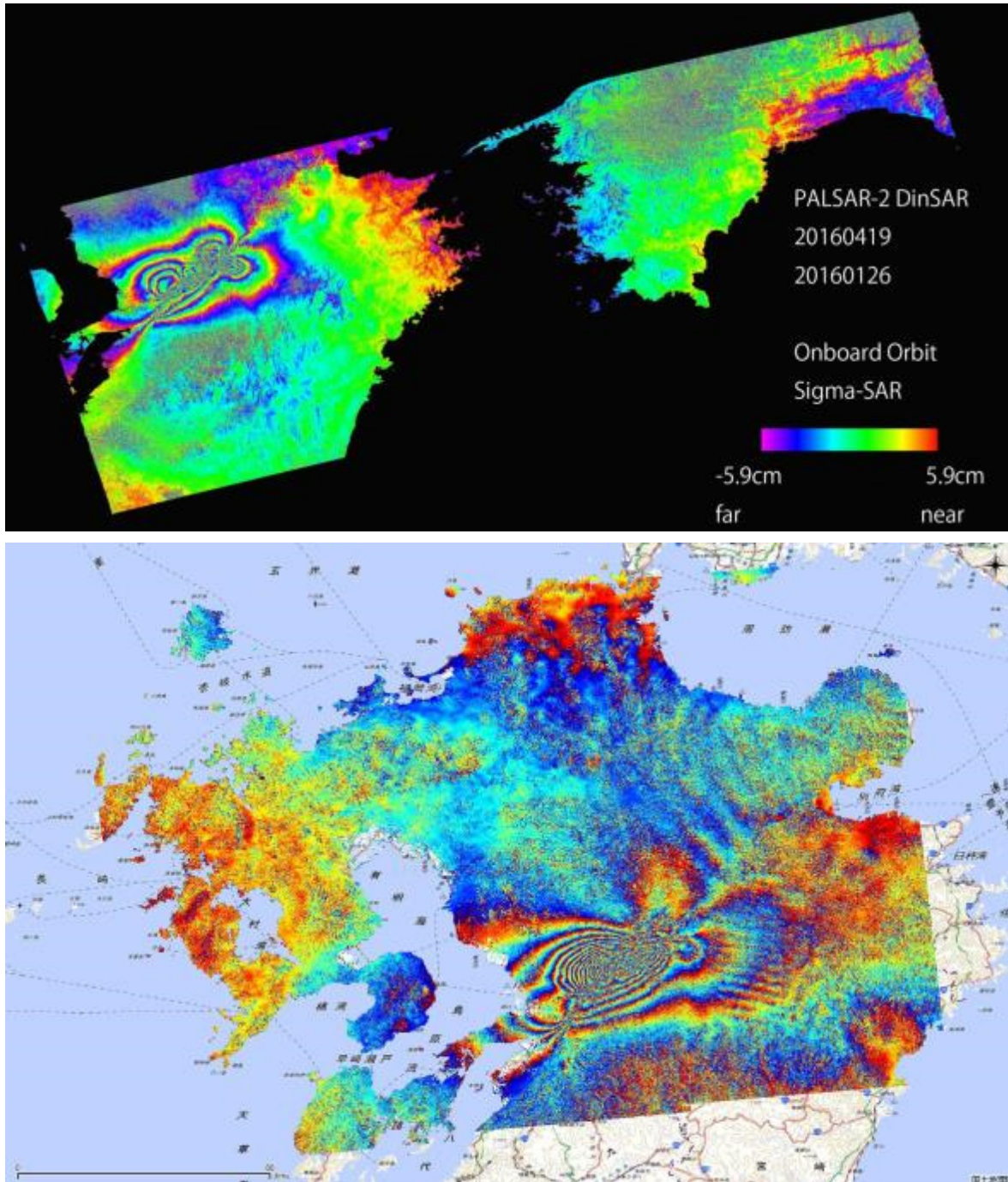


図 11. 2016 年熊本地震の ScanSAR 干渉画像。上：350km 観測幅 Path 124 Frame 700（干渉ペア 2016 年 1 月 26 日-2016 年 4 月 19）。下：490km 観測幅 Path 135 Frame 650（干渉ペア 2015 年 2 月 9 日-2016 年 4 月 18）。

6. おわりに

2014 年の ALOS-2 打ち上げから 2016 年度にかけて発生した地震に対応する ALOS-2 の干渉解析結果から、ALOS-2 は前号機となる ALOS よりその SAR 感度、帯域幅、軌道保持等が改善し、地殻変動の詳細な把握が可能であることが示された。また、ALOS では限定的な運用であった ScanSAR 干渉解析が安定して可能となった。電離層縞の除去は今後の課題となるものの、東西に長い変動域が生じた場合に地殻変動を定量的に把握するためには必要な機能であることが確認された。今後も解析手法やソフトウェアの改善を随時行っていきたい。

参考文献

1. Ryo Natsuaki and Akira Hirose, “InSAR Local Co-Registration Method Assisted by Shape-From-Shading,” IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 6, No. 2, April, pp. 953-959, (2013).
2. Tim J. Wright, Barry E. Parsons, and Zhong Lu, “Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR,” Geophysical Research Letters, Vol. 31, L01607, (2004) doi:10.1029/2003GL018827.
3. Evelyn J. Price and David T. Sandwell, “Small-scaled eformationsa ssociatedw ith the 1992 Landers, California, earthquake mapped by synthetic aperture radar interferometry phase gradients,” Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. B11, Pages 27001-27016, November 10, (1998).

発表文献

1. E. O. Lindsey, R. Natsuaki, Xu X., M. Shimada, M. Hashimoto, D. Melgar, and D. T. Sandwell, “Line-of-sight displacement from ALOS-2 interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 aftershock,” Geophysical Research Letters, 42, 6655–6661 (2015), doi:10.1002/2015GL065385.
2. Ryo Natsuaki, Hiroto Nagai, Takeshi Motohka, Masato Ohki, Manabu Watanabe, Rajesh B. Thapa, Takeo Tadono, Masanobu Shimada and Shinichi Suzuki, “SAR interferometry using ALOS-2 PALSAR-2 data for the Mw 7.8 Gorkha Nepal earthquake,” Earth, Planets and Space, 68:15, (2015).
3. 夏秋嶺、永井裕人、本岡毅、大木真人、渡邊学、田殿武雄、Rajesh Bahadur Thapa、島田政信、鈴木新一, “2015 年ネパール地震における ALOS-2/ALOS による干渉解析と被害抽出,” 地球惑星科学連合大会(2015), S-SS66-P10
4. 渡辺学、夏秋嶺、永井裕人、本岡毅、田殿武雄、大木真人、Thapa Rajesh、米澤千夏、島田政信, “PALSAR-2 の 3 時期コヒーレンス差解析による、ネパール震災被害箇所検出の試み,” 地球惑星科学連合大会(2015), S-SS66-P11
5. 永井 裕人、夏秋 嶺、石原 光則、大木 真人、田殿 武雄、本岡 毅、鈴木 新一, “地球観測衛星による熊本地震の緊急観測対応” 地球惑星科学連合大会(2016), MIS34-P93
6. 各事例に関しウェブサイトにて公開 http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/index_j.htm

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

PI：産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門 田中 明子

1. はじめに

地表変動を伴うと予測されるイベントをはさむ二時期（程度）の干渉 SAR (InSAR) 解析は、ある意味、ルーチンワーク的になり、結果は迅速に公開されるようになった。本課題では、地震 SAR 解析 WG を通じてご提供頂いた PALSAR-2 データの InSAR 解析を ISCE (InSAR Scientific Computing Environment, <https://winsar.unavco.org/isce.html>) を用いて行った。他機関で迅速に公開された結果と、整合性のとれたほぼ同様な結果が得られた。

2. 成果概要

本地震 WG を通じて実施された PALSAR-2 による緊急観測のデータを用いた InSAR 解析の結果の一例を図 1, 図 2 に示す。これらの結果は、他機関において公開された結果や論文として公表されたものと調和的である。

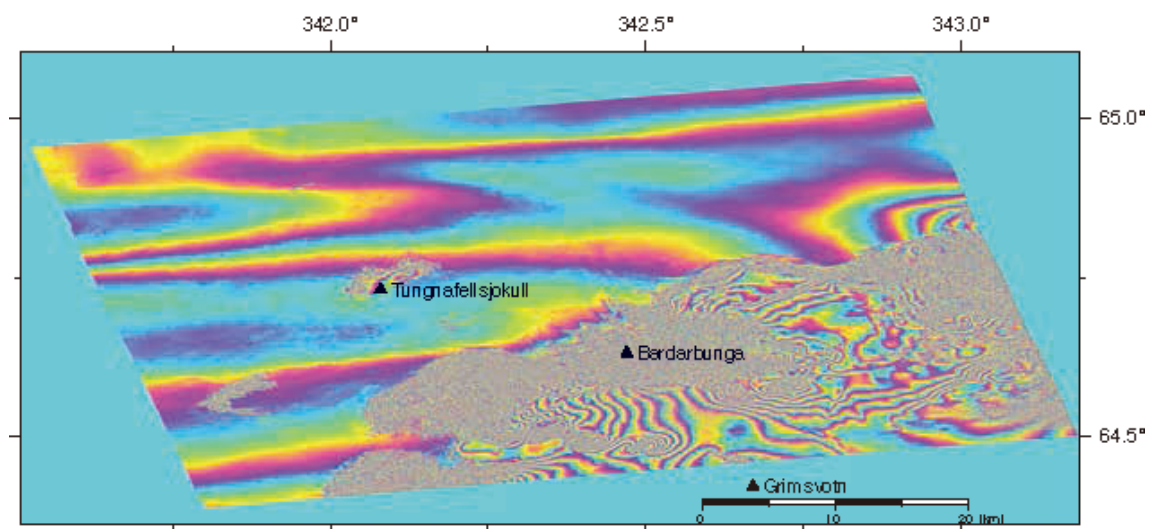


図 1. PALSAR-2 ascending wrapped interferogram
spanning the period 28 August and 11 September, 2014.

PALSAR-2 による緊急調査データによる InSAR 解析では、イベント後に取得されたデータが提供された後に、解析され結果が公表されるまでの時間は、条件が整っていれば ~ n 時間程度であった [例えば, <http://www.eorc.jaxa.jp/>, <http://www.gsi.go.jp/>]. もはやリアルタイムに準じて情報が公開されているといえるのではないだろうか. これは, Caltech と NASA/JPL による ARIA (Advanced Rapid Imaging and Analysis Center for Natural Hazards) の結果と遜色がないように思われる. なお, ARIA は, 例えば, 地震に伴う変動量に関して, 一般に公開するまでの時間を InSAR 解析に関しては 1 日程度と想定している. 現実的には, データの転送速度など様々な問題・制限があるとはいえ, イベント

トに対応する緊急観測に関しては、データ取得から公開までのプロセスは、これ以上の高速化は困難だと考えられる。

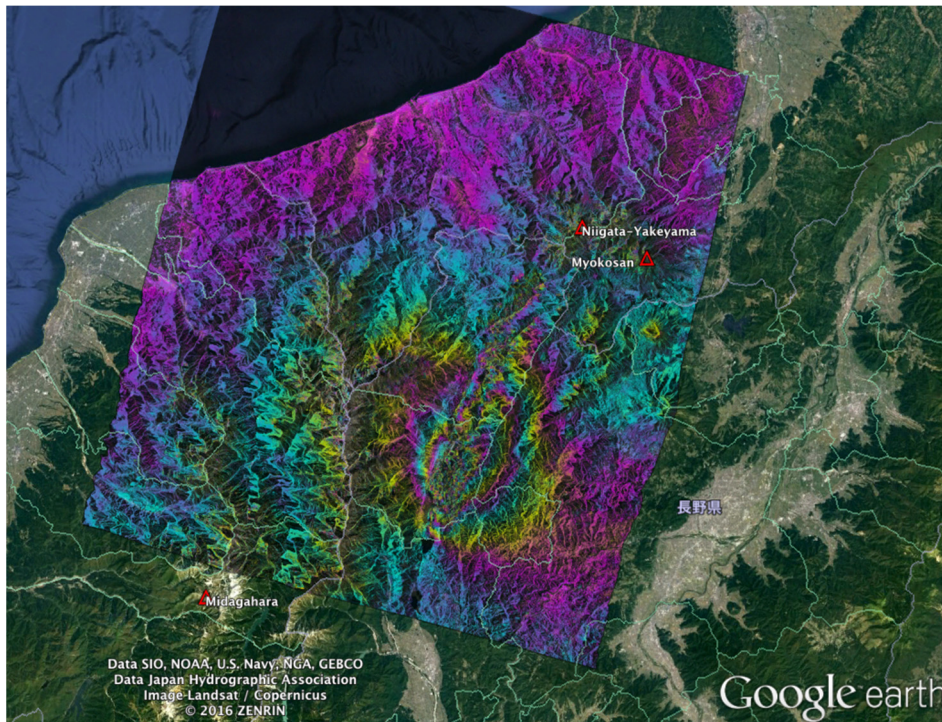


図 2. PALSAR-2 descending wrapped interferogram
spanning the period 2 October and 27 November, 2014..

このような地震・火山活動などのイベントに伴う緊急観測は、比較的大きなシグナルを捉えるためであろう。一方、定期的に取得される多数の SAR 画像を用い、時系列的に高精度の変動を得るための "InSAR 時系列解析" の技術開発が活発に行われてきている。また、従来の InSAR 解析においても、長期間にわたり高精度の変動を捉えた例や、SAR 散乱強度画像報の様々な時間スケールの変動を捉えた例などもある。前者の例としては、Fialko and Pearse (2012) [Science. 338(6104):250-252] による Uturuncu 火山周辺域において、ERS-1/2 と EnviSAT を用い、20 年程度にわたるものがある。この例では、火口付近ではほぼ一定の約 7 mm/yr で短縮し、周辺部では最大 3 mm/yr 伸張していることを捉えることに成功し、これらは深さ 16 km にあるダイピルにより説明されるとした。 $n \text{ mm/yr}$ 程度の低速な変形を高い空間分解能で観測することができるようになったことは、過去 20 年近くにわたる SAR 観測の積み重ねによる。後者の例としては、メコンデルタの河口州において、4 年程度にわたり PALSAR-1 の散乱強度画像の情報のみを用い、経年・季節・日変化を捉えることができた例 [Tanaka et al. (2016) IAS Sp. Pub. 47:21-33] がある。いずれの例も、SAR データの波長や観測範囲などに依存して、捉えることのできる変動量・率やその空間波長などが限られてはいる。しかしこれらは、定期的にデータを取得した積み重ねの結果得られたものである。

3. おわりに

定期的に撮像される多数の SAR 画像を用い、精度を向上させかつ時系列的に変動を追跡するため

の "InSAR 時系列解析" を行うためには、現存する PALSAR-2 のデータではまだ不足しているように思える。今後は、データの蓄積を待ち、解析を試みたい。それだけではなく、Sentinel-1a のデータとの相補的な解析の実施や、PALSAR-2 の wide swath/strip map のペアを用いた解析にも取り組みたい。

4. 謝辞

本研究で用いた PALSAR-2 データは、地震 SAR 解析 WG より提出された観測要求に基づいて緊急観測なされたもの、この WG を通じて提供されたもの、また、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学 地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供された PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているものを使用した。また、PALSAR データに関しては、PIXEL において共有しているもの、財団法人 宇宙システム開発利用推進機構より提供されたものを使用した。PALSAR データの、所有権は経済産業省および JAXA にある。

SAR 及び GNSS データ解析に基づく 奥羽脊梁山脈沿いのひずみ集中機構に関する研究

PI：東北大学大学院理学研究科 三浦 哲

CI：東北大学大学院理学研究科 太田雄策

東北大学災害科学国際研究所 福島 洋

1. はじめに

これまで東北地方では、2008 年岩手宮城内陸地震をはじめとする大きな内陸地震が度々発生している。2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）発生後は、東北地方全域で顕著な余効地殻変動が現在も進行しており、東北沖地震発生前後で地震活動に明瞭な変化がみられ、誘発地震も発生している。本研究では、SAR 及び GNSS データ解析を併用することにより、東北沖地震後の陸域の地殻変動を高い時間・空間分解能で明らかにし、東北日本弧の粘弾性応答を定量化することを通じて、奥羽脊梁山脈沿いのひずみ集中機構の解明を目指す。

東北沖地震発生前のひずみ解析により、奥羽脊梁山脈沿いで東西短縮ひずみが集中していることが明らかにされ、定常的な微小地震活動の集中や過去に大地震が多発していること、当該領域下の地震波の速度構造や減衰構造の特徴と調和的であることが指摘されている。東北地方では、国土地理院の GEONET に加えて、本学が独自に稠密観測網を構築し陸域の地殻変動のモニタリングを実施しているが、全域を一様な観測点密度でカバーすることは不可能であり SAR データ解析が必要不可欠である。

2. 2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震（M6.3）に伴った地殻変動の解析

2016 年 12 月 28 日 21 時 38 分に茨城県北部の深さ約 10km でマグニチュード(M)6.3 の地震が発生した。この地震により茨城県で最大震度 6 弱を観測し被害を伴った。この地震の震源周辺で発生している地震活動は、北北西-南南東方向に延びる長さ約 15km の領域で発生しており、減衰しつつも継続している。この地震の発震機構は東北東-西南西方向に張力軸を持つ正断層型で、地殻内の浅い地震である（気象庁、2017；図 1）。

この地震前後の 2016 年 11 月 17 日と 2016 年 12 月 19 日の ALOS-2 の撮像データを入手し、干渉解析を行った結果を図 2 に示す。震源域周辺に明瞭な干渉縞が見られ、その北東側には位相の不連続も顕著である。図 2 中の AB プロファイルに沿った衛星視線方向（東上空、入射角約 36 度）の変位量を図 3 に示す。この図から 30cm 程度の明瞭な変位不連続が確認できる。国土地理院（2017）が実施した現地調査によると、当該地域において多数の新鮮な開口亀裂等が確認されている。

得られた SAR 干渉画像による視線距離変化量を用いて、Fukushima et al. (2013) の方法により断層滑り分布を推定した結果を図 4 に示す。深さ約 2-3 km に大きな滑りが推定されており、地震波形インバージョンによる滑り分布の推定結果（気象庁、2017）と概ね整合している。図 5 に観測された干渉画像と推定されたモデルによって計算された干渉画像及びそれらの残差を示す。

当該地域では、2011 年 3 月 19 日に東北地方太平洋沖地震の誘発地震と考えられる M6.1 の地震が発生している。両者の余震分布や地震波形インバージョンによる滑り分布の推定結果を比較すると、ほぼ同一の断層が繰り返し滑ったように見えることから、内陸地震の発生機構を議論する上で極めて重要なイベントである。また、東北地方太平洋沖地震から丁度 1 か月後の 2011 年 4 月 11 日には隣接

する福島県いわき市を震源域とする M7.0 の内陸地震が発生 (Fukushima et al., 2013) するなど、茨城県北部から福島県南部沿岸に至る領域は地震活動が引き続き活発な状態にあることから、今後も注意深くモニタリングを続けることが必要な地域である。

参考文献

Fukushima, Y., Y. Takada, and M. Hashimoto (2013): Complex Ruptures of the 11 April 2011 Mw 6.6 Iwaki Earthquake Triggered by the 11 March 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake, Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 103, 1572-1583, doi: 10.1785/0120120140

気象庁 (2017) : 第 300 回地震調査委員会資料 (2017 年 1 月 13 日) 気象庁.

国土地理院 (2017) : 第 300 回地震調査委員会資料 (2017 年 1 月 13 日) 国土地理院.

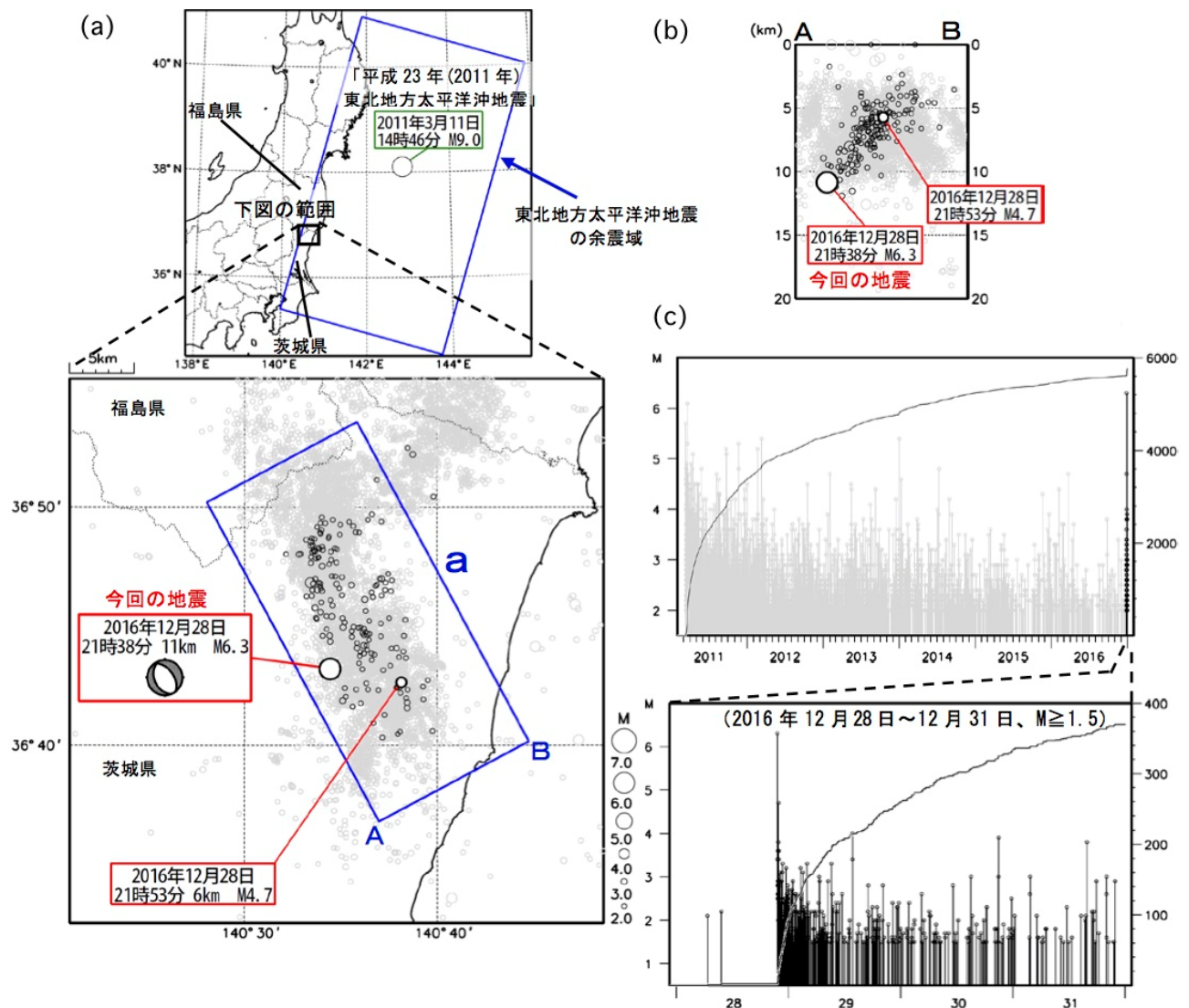


図 1. 2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震 (M6.3). (a) 震央分布, (b) 断面図, 及び (c) MT 図

[地震調査委員会 (2017) 気象庁資料に加筆・修正]

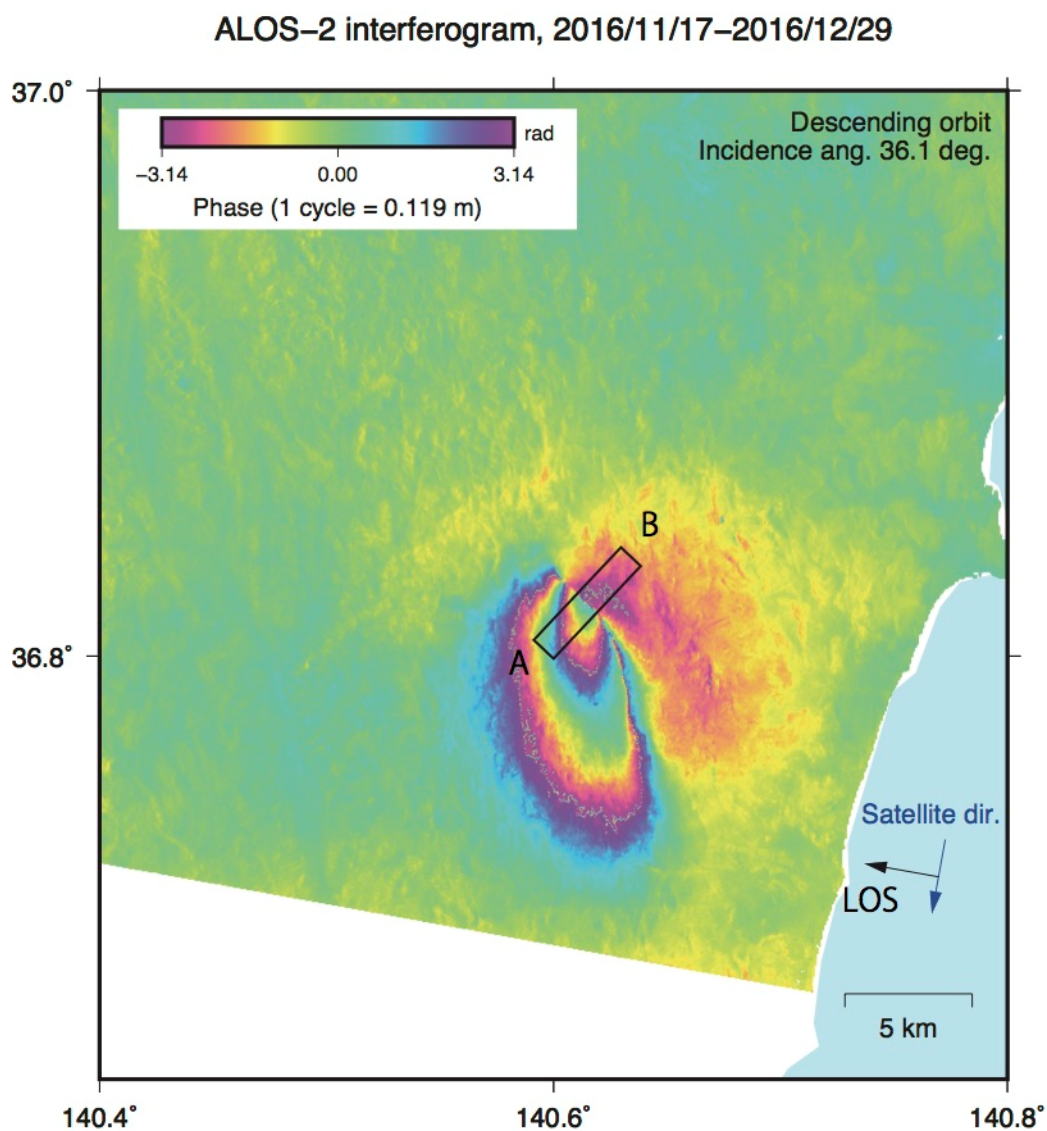


図 2. 2016 年 12 月 28 日茨城県北部の地震（M6.3）前後の干渉 SAR 解析結果。本成果は、JAXA の防災利用検証実験（地震 SAR 解析 WG）の活動を通じて得られたものである。

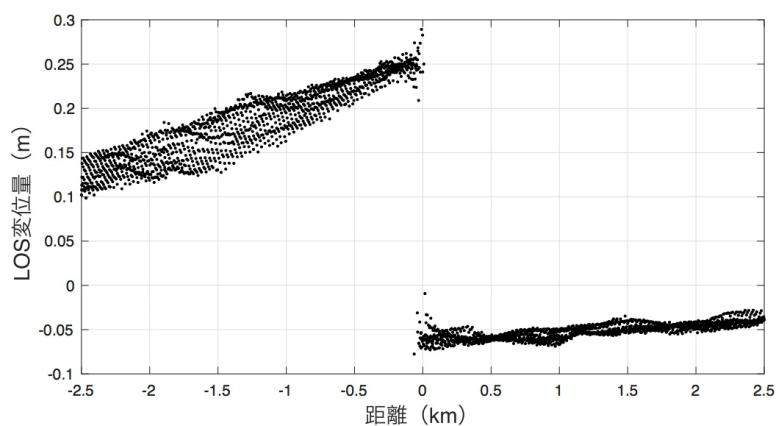


図 3. 図 2 の AB プロファイルに沿う衛星視線方向（東上空，入射角 36 度）の変位量。30 cm 程度の明瞭な変位不連続が確認できる。

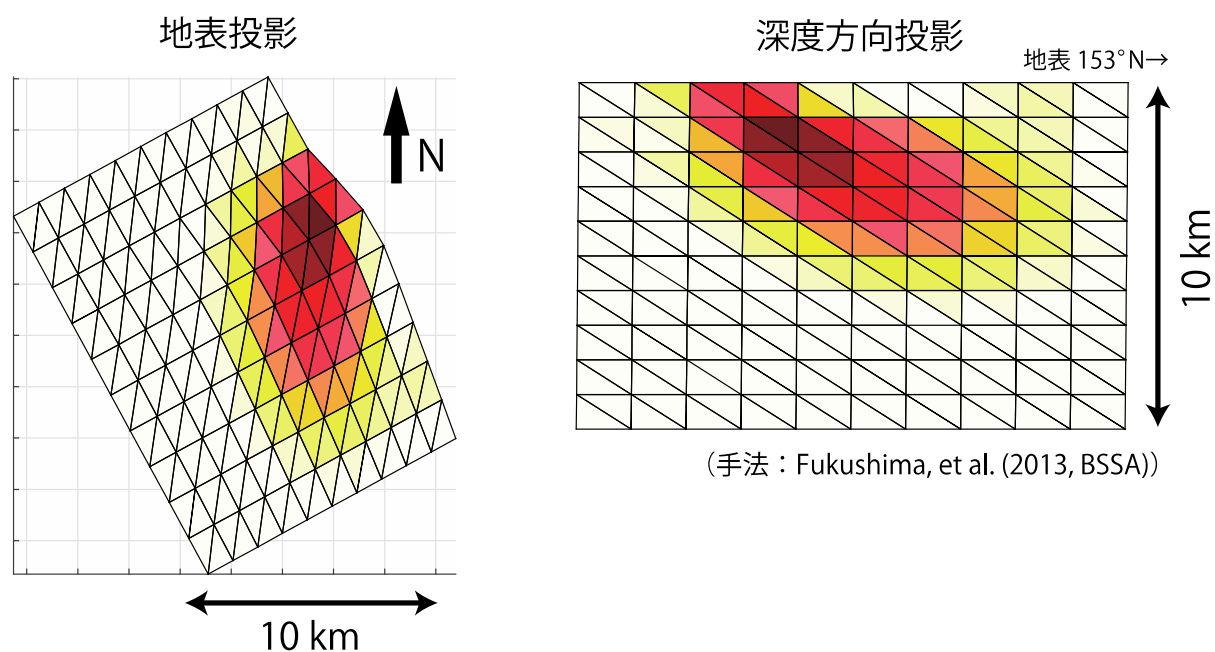


図4. 図2の SAR 干渉画像から求めた断層すべり分布. 断層上端は干渉 SAR 画像で確認できた変位不連続曲線及びその延長上に固定し, 傾斜角, すべり角及び各要素上の滑り量を推定した.

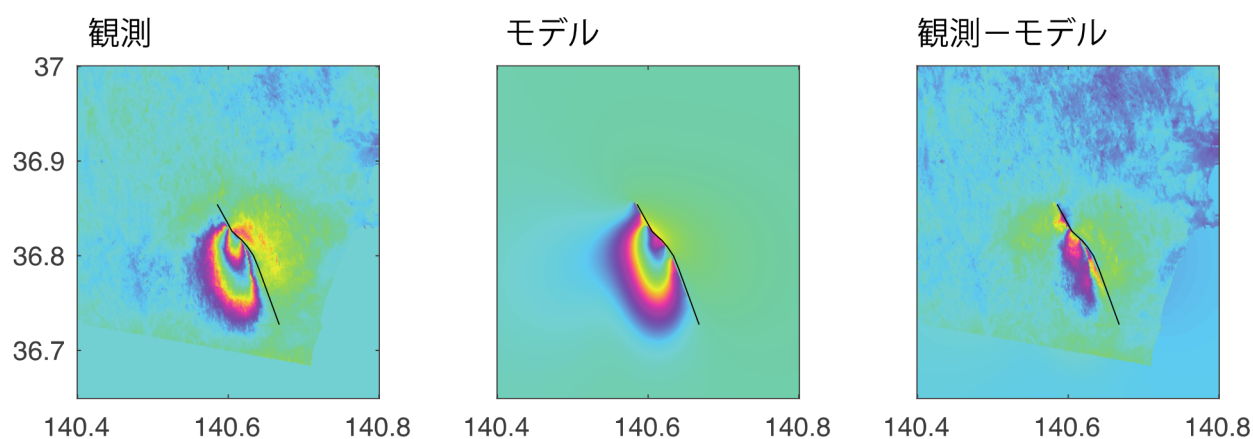


図5. 左から SAR 干渉画像, 推定されたモデルにより再現された干渉画像, 及びそれらの残差.