

衛星合成開口レーダーを用いた
平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動の検出
**Crustal deformation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake
detected by InSAR**

測地部 山中雅之・野口優子・鈴木 啓・宮原伐折羅・石原 操
Geodetic Department
Masayuki YAMANAKA, Yuko NOGUCHI, Akira SUZUKI,
Basara MIYAHARA and Misao ISHIHARA
地理地殻活動研究センター 小林知勝・飛田幹男
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Tomokazu KOBAYASHI and Mikio TOBITA

要 旨

国土地理院は、地盤沈下・地すべりによる地盤変動や火山活動による地殻変動の監視を目的として、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) に搭載された L バンド合成開口レーダー (PALSAR) の観測データを用いて SAR 干渉解析を定常的に実施している。また、地震など災害が発生した際には、災害に伴う地殻変動の把握等を目的とした緊急解析を随時実施している。

2011 年 3 月 11 日に発生した平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（以下、「東北地方太平洋沖地震」という。）に対応するために観測された ALOS/PALSAR データに関して緊急解析を行った結果、東北地方から関東地方全域における広い範囲で地殻変動を面的に捉えた。牡鹿半島では、SAR 干渉解析による国内の地殻変動観測史上最大となる約 4 m（衛星視線方向）の変動量を検出した。また、本震後に内陸で生じた複数の誘発地震に関して震源域の面的な地殻変動を捉えた。

SAR 干渉解析により得られた地殻変動の情報は、詳細な変動範囲の把握や断層メカニズムの解明に大きく貢献している。

1. はじめに

干渉合成開口レーダー（以下、「干渉 SAR」という）は、人工衛星によるマイクロ波レーダー観測を地表の同一地点で異なる時期に 2 回以上実施し、反射波の位相値の差をとることによって、地表の変動を捉える技術である。これにより、一般に数十 m 程度の高い空間分解能（衛星により異なる）で数十 km から数百 km の範囲の地表変位を面的に捉えることができる。国土地理院は、2006 年 1 月に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS: Advanced Land Observing Satellite) に搭載されている L バンド合成開口レーダー (PALSAR: Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) の観測データを用いて、

定常的に SAR 干渉解析を実施している。この解析は、高精度地盤変動測量と位置づけられており、地盤沈下・地すべりによる地盤変動や火山活動による地殻変動の監視を目的として実施している。

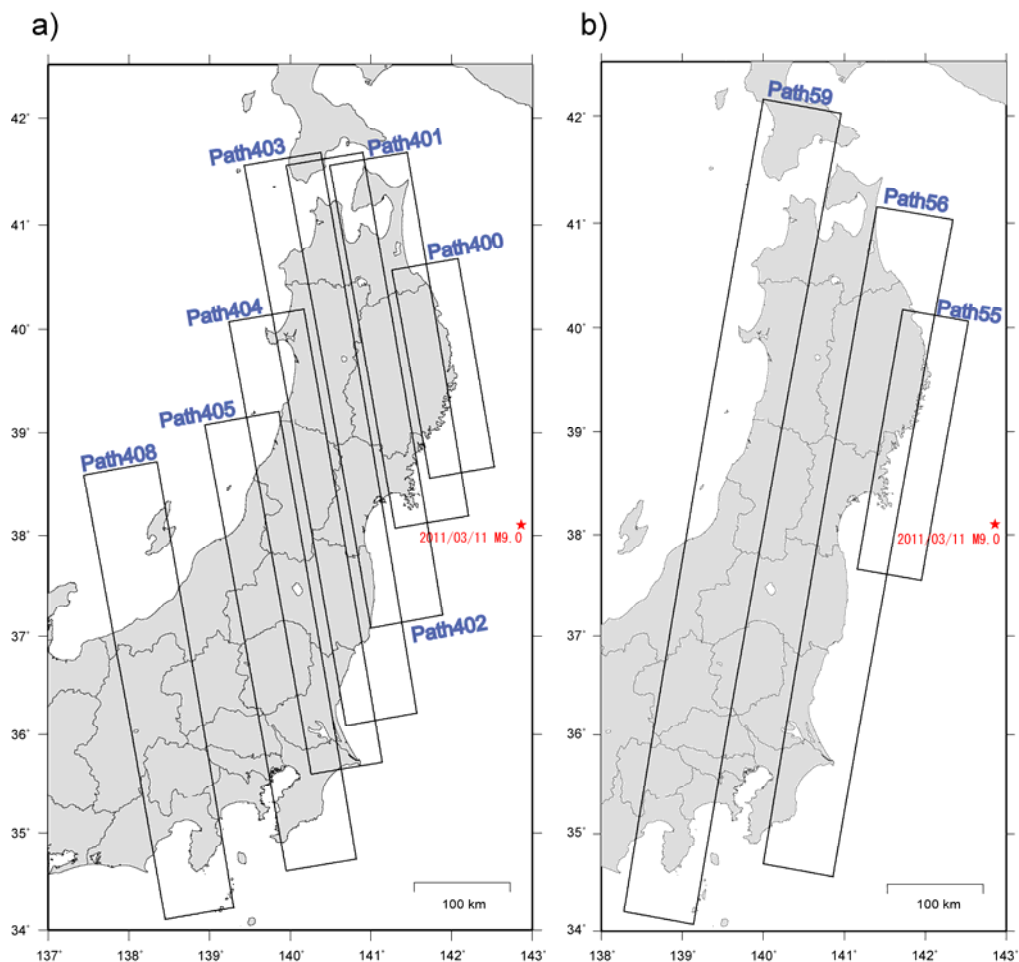
一方、地震が発生した際には、地殻変動の把握等を目的として、可能な限り迅速に緊急解析を実施してきた。過去にも国内では、平成 19 年（2007 年）能登半島地震、平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震、平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震などが発生した際に緊急解析を実施しており、電子基準点による GPS 連続観測のみからは把握しきれないような詳細な地殻変動を面的に検出することで、変動範囲の把握や断層メカニズムの解明に大きく貢献している（雨貝ほか、2007；鈴木ほか、2007；雨貝ほか、2008）。

東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード 9.0 を記録した国内観測史上最大の地震であり、国土地理院の GEONET による GPS 観測では、震源に近い電子基準点「牡鹿」（宮城県）で、水平方向（東南東）に約 5.3m、上下方向（沈降）に約 1.2m という国内 GPS 観測で最大となる変位が観測されたことをはじめ、北海道から西日本に及ぶ広い範囲で地殻変動が確認された。本稿では、東北地方太平洋沖地震に伴い、ALOS/PALSAR データを用いて実施した緊急解析とその結果について報告する。

2. 解析の概要

東北地方太平洋沖地震では、東西、南北ともに数百 km を越す広範囲で地殻変動が生じているため、PALSAR で一般的に観測されている高分解モード（観測幅約 70km）1 回の観測では、変動域全てをカバーする観測データが得られない。よって、地殻変動全域をカバーする観測データを取得するには、複数の軌道（Path）のデータが必要となる。

東北地方太平洋沖地震において、緊急解析を実施した Path とその範囲を図-1 に示す。



図－１ 緊急解析の範囲 a) 北行軌道 b) 南行軌道

北行軌道では、Path400 から Path405、南行軌道では、Path55 から Path59 までが観測されたことで、東北地方全域のデータが取得された。しかし、ALOS は、5月12日に運用を終了したため、北行軌道の Path406、Path407、南行軌道の Path57、Path58 については、地震後の観測が実施されず、関東・中部地方では解析結果が得られない地域が生じた。

東北地方太平洋沖地震では、ALOS 防災利用実証実験の枠組みに基づき、「衛星データを用いた地震・地盤変動データ流通及び解析グループ」（地震 WG、事務局：国土地理院）は（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）に対し、地震発生後、直ちに観測要求を行った。これを受け、3月15日（地震発生4日後、北行軌道（夜間観測））から PALSAR の緊急観測が東北・関東地方について順次実施され、随時観測データの提供が行われた。北行軌道では、4月18日に東北地方全域の観測が終了した。

国土地理院では、観測データの取得後、緊急の SAR 干渉解析を実施した。解析を行った観測データの組み合わせ（ペア）を表－1に示す。Pathによって処

理するデータ量が異なるため、解析処理時間は異なるが、各 Path の観測データの解析処理には、平均して半日～1日程度、結果の検証・確認まで含めると1日～2日程度の時間を要した。

Path	観測日(マスター) 観測日(スレーブ)	モード	オフナディア角	軌道方向	基線長	観測期間
400	2011/1/11	FBS	34.3°	北行	+1,125 m	92日
	2011/4/13	FBS				
401	2010/10/28	FBD	34.3°	北行	+1,498 m	138日
	2011/3/15	FBS				
402	2010/9/29	FBD	34.3°	北行	+1,295 m	184日
	2011/4/1	FBS				
403	2011/3/3	FBS	34.3°	北行	+358 m	46日
	2011/4/18	FBS				
404	2011/2/2	FBS	34.3°	北行	+847 m	46日
	2011/3/20	FBD				
405	2011/2/19	FBS	34.3°	北行	+428 m	46日
	2011/4/6	FBS				
408	2011/2/24	FBS	34.3°	北行	+532 m	46日
	2011/4/11	FBS				
55	2010/9/18	FBS	34.3°	南行	+1,191 m	184日
	2011/3/21	FBS				
56	2010/11/20	FBS	34.3°	南行	+993 m	138日
	2011/4/7	FBS				
59	2010/11/25	FBS	34.3°	南行	+924 m	138日
	2011/4/12	FBS				

表－1 東北地方太平洋沖地震における緊急解析ペア

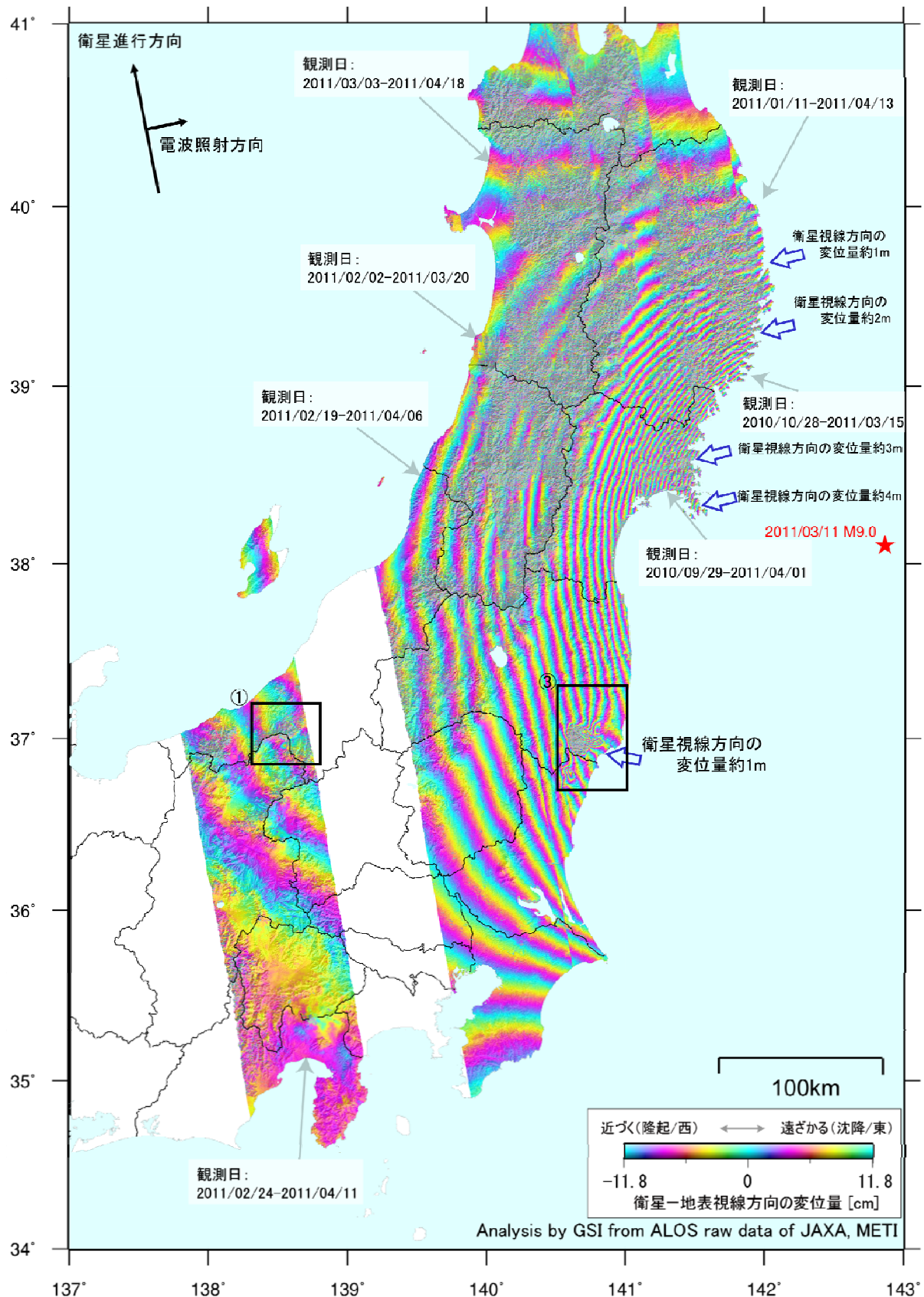
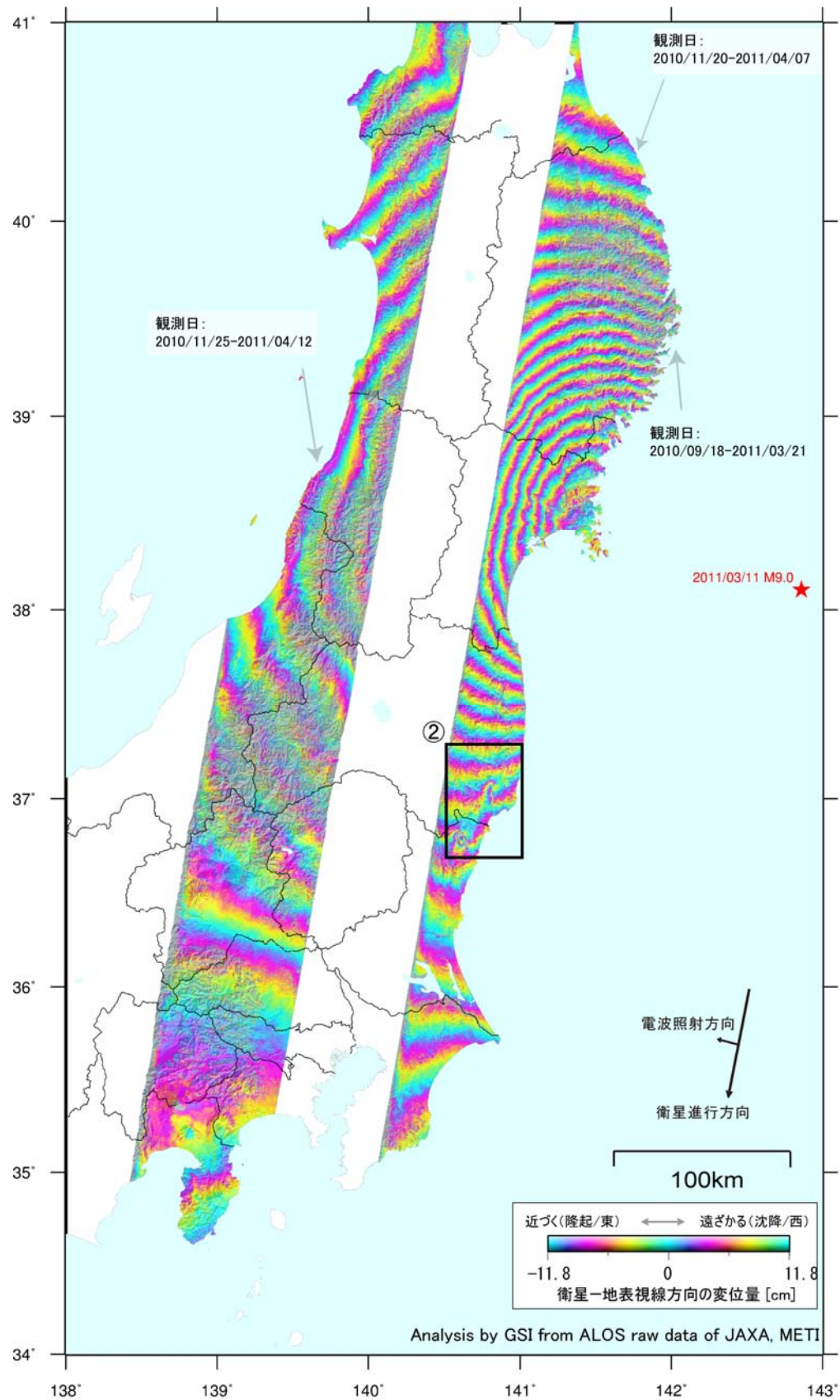


図-2 北行軌道による SAR 干渉解析画像図

オフナディア角: 34.3°, 軌道情報: 高精度軌道情報使用

★は東北地方太平洋沖地震の震央を示す。黒枠①および③はそれぞれ図-5, 図-7 の位置を示す。



図ー3 南行軌道による SAR 干渉解析画像図

オフナディア角 : 34.3° , 軌道情報 : 高精度軌道情報使用

★は東北地方太平洋沖地震の震央を示す。黒枠②は図6の位置を示す。

一般的に SAR 干渉解析では、2 時期の観測データの衛星軌道間距離の垂直成分（基線長）が短く、1 回目と 2 回目の観測の観測間隔が短いほど干渉しやすく（干渉度が高く）なる。地震後の観測データと最も干渉性の良い解析結果を期待できる地震前の観測データを選択する指標として基線長を用いる。本来は基線長の短いペアを用いることが望ましいが、本解析では、一部の Path については、地震後のデータに対して短い基線長のデータが存在しなかったため、1,000m を越えるようなやや基線長の長いペアについても解析を実施した。

SAR 干渉解析により得られる地殻変動情報に大きく影響を与える誤差要因として、SAR 衛星の軌道情報の精度が挙げられる。ALOS が観測した直後に利用可能な衛星の軌道情報は、予測軌道情報（RARR: Range And Range Rate）のみであり、ALOS に搭載されている GPS の観測データから得られる高精度軌道情報は、観測が行われてから数日後に公表される。そのため、観測データ取得直後に利用可能な予測軌道情報を用いて解析を行うため、予測軌道情報の誤差に起因した干渉縞も生じることとなる。

国土地理院では、予測軌道情報による誤差を軽減するため、GPS 連続観測（GEONET）から得た地殻変動量を用いて干渉 SAR による変動量を補正する融合解析（飛田ほか、2005）を実施し、高精度軌道情報が利用できない地震直後においても、精度の高い地殻変動を迅速に検出した（Kobayashi et al, 2011）。

3 月 17 日に、本震後最初に観測された Path401 の解析結果について報道発表を行った。それ以降、新たな Path について観測が実施される毎に随時解析を実施し、解析結果を国土地理院のホームページ（http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/result/sar_data/urgent/20110311_tohoku_taiheiyo.html）で公表した。

PALSAR には、高分解能モードの他に約 350km の観測幅をもつ広域観測モード（ScanSAR）がある。東北地方太平洋沖地震でも、広域観測モードによる撮影が実施されたが、バースト同期や基線長など、観測ペア間の諸条件が整わなかったため、良好な干渉画像を得ることはできなかった。

3. SAR 干渉解析による地殻変動分布図

3. 1 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動

北行軌道のデータを解析した SAR 干渉解析画像を図-2 に、南行軌道のデータを解析した SAR 干渉解析画像を図-3 に示す。

今回の解析では、東北地方の山間部等で一部干渉度が低く、砂目模様となっているものの、全体的に干渉度が高い画像が得られた。山間部の干渉の低い部分は、積雪のために干渉度が低くなっていると考

えられる。

東北地方太平洋沖地震に伴う変動を示す干渉縞は、東北地方から関東及び中部地方まで及んでおり、この地震に伴い、少なくとも、南北に 600km、東西に 200km に及ぶ範囲で地殻変動が生じたことが図-2 及び図-3 の解析結果から見る事ができる。

図-2 では、牡鹿半島の先端から本州の最北端にかけて、34 本の変動縞が確認できる。これは、衛星視線方向に約 4 m 変動したことに相当する。一方、GPS 連続観測によると、本震の前後で牡鹿半島先端の電子基準点「牡鹿」において、水平（東南東方向）に約 5.3m、上下（沈降）に約 1.2m の変位が観測された。この変位量を SAR 衛星の視線方向に換算すると、約 3.8m で、SAR 干渉解析と GPS 解析で得られた変動量は整合的である（図-4）。

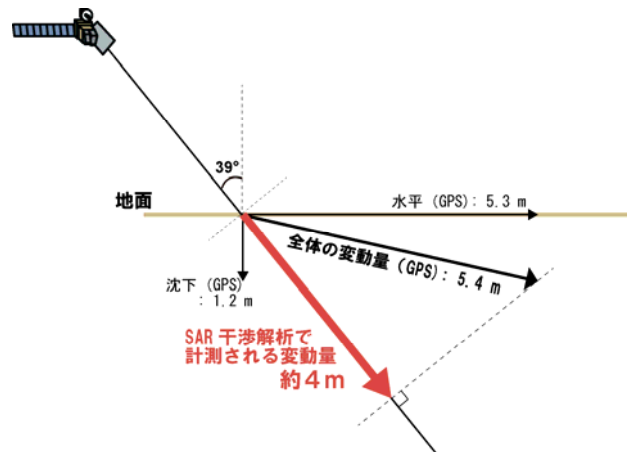


図-4 SAR干渉解析による変動量とGPSによる変動量の関係

北行軌道の解析結果（図-2）から検出された変動縞は、全体として震央を中心とする同心円上に広がりを見せるが、隣接する2つのPathの間で、変動縞に不連続が見られる。東北地方太平洋沖地震では、地震発生後から継続した余効変動が観測されており、国土地理院のGPS連続観測によると地震後6ヶ月で水平に60cm、上下に約10cmの累積変動量が見られている（国土地理院、2011）。Path間に見られる変動縞の不連続は、各pathで観測日が違うことにより、余効変動による累積変動量が異なることに起因していると考えられる。震央を中心とした同心円状の変動縞は、東北地方太平洋沖地震のメカニズムと調和的であり、また、沿岸域では長波長の縞が連続的に分布して特段局所的な変動は見られない。これらのことは、GPS連続観測で見られる太平洋沿岸の沈降が、局所的な地盤沈下によるものではなく、テクトニックな沈降であることを改めて示している。

3. 2 内陸地震に伴う地殻変動

3月11日以降、3月12日の長野県・新潟県県境付近の地震(M6.7)をはじめ、3月19日の茨城県北部の地震(M6.1)、4月11日の福島県浜通りの地震(M7.0)など、東日本の各地において、東北地方太平洋沖地震に誘発されたと考えられる地震が頻発した。

東北地方太平洋沖地震に伴う長周期の変動縞の中に見られる比較的短周期な地殻変動は、東北地方太平洋沖地震後に発生した地震に伴う地殻変動である。(図-2及び図-3の黒枠①~③)

3. 2. 1 長野県・新潟県県境付近の地震(3月12日)

図-5に、図-2の黒枠①で示した、3月12日の長野県・新潟県県境付近の地震(M6.7)に伴うSAR干渉解析の結果を示す。この地震に伴う地殻変動を正確に把握するため、全体の変動から、東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を除去している。積雪の影響のため干渉不良により不明瞭な地域が県境の一部に見られるが、約15km四方にわたり、地震に伴う地殻変動がみられる。また、その南側におよそ4km四方にわたる地殻変動がみられる。

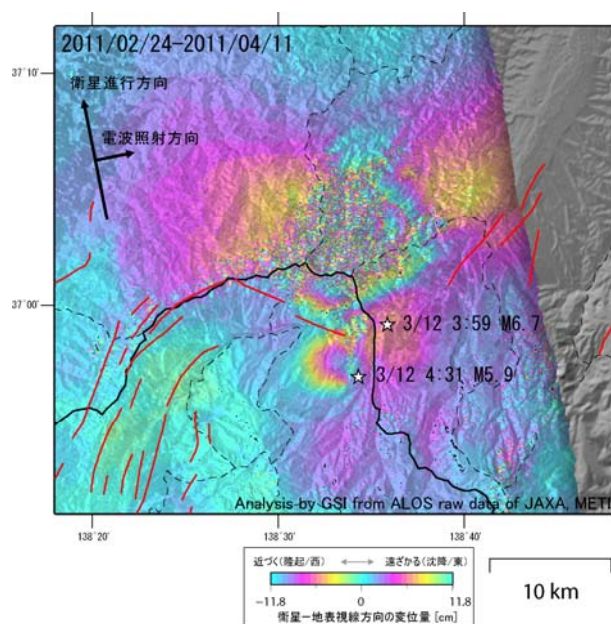


図-5 SAR干渉解析図(長野県・新潟県県境付近の地震(3/12))

オフナディア角: 34.3°

軌道情報: 高精度軌道情報使用

赤線: 活断層

黒線: 県境

黒破線: 市町村境界

これらの変動は長野県・新潟県県境付近の地震(3月12日3時59分, M6.7)及びその最大余震(3月12日4時31分, M5.9)による地殻変動を示しており、SAR干渉解析が捉えた地殻変動から、震源となる断層の走行はそれぞれ、北東-南西方向、北北東-南南西方向と推測される。

3. 2. 2 茨城県北部の地震(3月19日)及び福島県浜通りの地震(3月23日)

図-6に、図-3の黒枠②で示した、茨城県北部の地震(3月19日, M6.1)および福島県浜通りの地震(3月23日, M6.0)に伴うSAR干渉解析の結果を示す。3.2.1と同様に、東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を除去している。茨城県北部の地震では、約10km四方にわたり変動が生じており、衛星視線方向に約40cmの変位が見られる。また、北西-南東方向の変位の不連続が見られる。

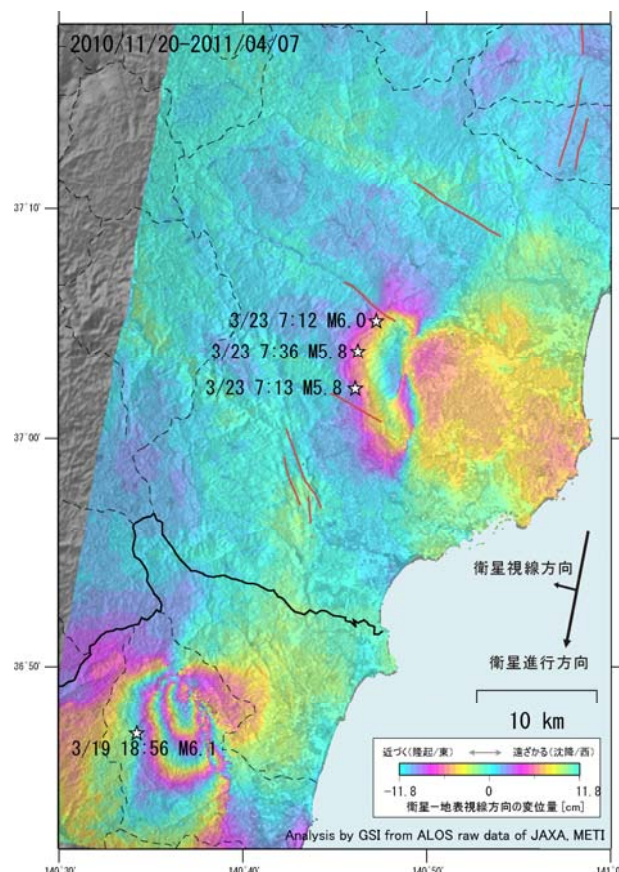


図-6 SAR干渉解析図(茨城県北部の地震(3/19)及び福島県浜通りの地震(3/23))

オフナディア角: 34.3°

軌道情報: 高精度軌道情報使用

赤線: 活断層

黒線: 県境

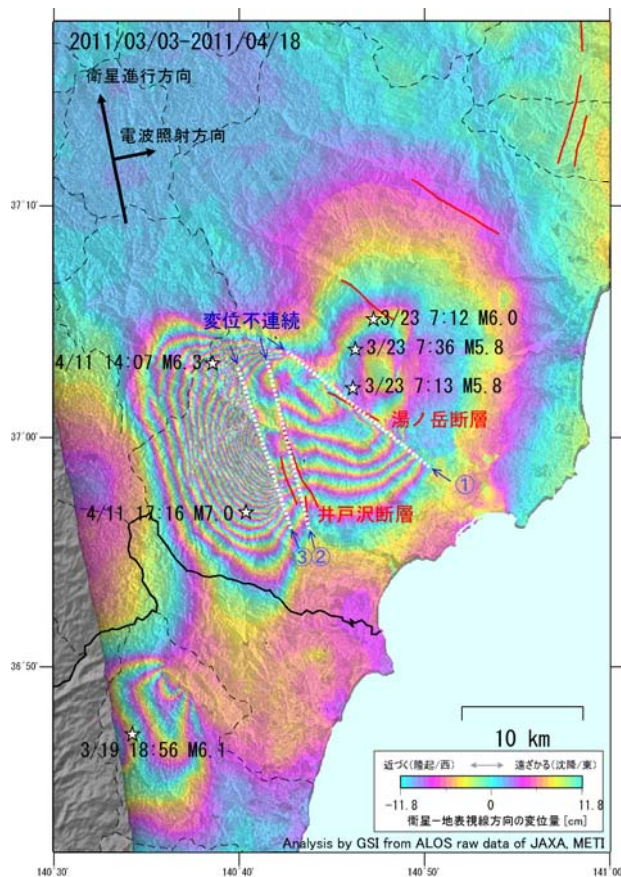
黒破線: 市町村境界

福島県浜通りの地震では、約 12km 四方にわたり変動が生じており、衛星視線方向に約 12cm の変位が見られる。また、南北方向の変位の不連続が見られる。

また、3. 2. 3 で後述する湯ノ岳断層および井戸沢断層付近には変動はみられず、これらの断層破壊は SAR データの観測日（4 月 7 日）以降に生じていることがわかる。

3. 2. 3 福島県浜通りの地震（4 月 11 日）

図－7 に、図－2 の黒枠③で示した、4 月 11 日の福島県浜通りの地震（M7.0）に伴う SAR 干渉解析の結果を示す。3. 2. 1 と同様に、東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を除去している。また、図の変動には前述の茨城県北部の地震（3 月 19 日、M6.1）及び福島県浜通りの地震（3 月 23 日、M6.0）による地殻変動が含まれている。



図－7 SAR 干渉解析図（福島県浜通りの地震（4/11））

オフナディア角：34.3°

軌道情報：高精度軌道情報使用

赤線：活断層

黒線：県境

黒破線：市町村境界

約 50km 四方の範囲に地殻変動がみられ、衛星視線方向に最大で約 2 m の変位が見られる。また、3 本の明瞭な変位の不連続が見られ、複数の断層面上で破壊がおきたことを示唆している。

東側の変位不連続線（図－7 中①）は北西－南東方向の走行を持ち、湯ノ岳断層の位置と調和的である。また、西側の 2 本の変位不連続線（図－7 中②、③）は北北西－南南東方向の走行を持ち、井戸沢断層の 2 本のセグメントの位置に調和的である。

4 月 11 日の福島県浜通りの地震（M7.0）に伴い、地震断層が地表に出現したことが複数の機関の現地調査により報告されている（石山ほか、2011 など）。地表に出現した地震断層の位置と SAR 干渉画像による変位の不連続線は一致しており、SAR 干渉画像の変動縞の不連続部では、不連続の間に見られるギャップの大きさに対応した地盤変状が表れている（小荒井ほか、2011）。

4. まとめ

国土地理院では、ALOS/PALSAR データを用いて、東北地方太平洋沖地震に伴う緊急解析をおこなった。解析により把握された地殻変動には、以下の特徴が見られた。

- ・地震に伴う変動は東北地方から関東および中部地方まで及んでいる。
- ・最も変動が大きい牡鹿半島で、衛星視線方向に約 4 m の伸びがみられた。この変動量は、GPS 連続観測の結果（東南東方向に約 5.3 m の移動、約 1.2 m の沈下）と整合している。
- ・本震後、内陸で生じた誘発地震に伴う局所的な地殻変動を複数検出し、電子基準点による GPS 連続観測網のみでは把握が困難な断層近傍の詳細な変動を明らかにした。
- ・東北地方太平洋沿岸では、本震のメカニズムと調和的な沈降がみられ、GPS 連続観測網により把握された 1 m に及ぶ沈降が、局所的な沈下ではなく、テクトニックな沈降であることが確認された。

ALOS は設計寿命 3 年、目標寿命 5 年を超えて運用され、そのデータを用いた SAR 干渉解析は、国内外の数々の地震に伴う変動範囲の把握や地震発生メカニズムの解明に極めて有効な情報となってきた。しかし、東北地方太平洋沖地震に伴う災害状況把握のための集中的な撮影の途上、2011 年 5 月 12 日には、電力異常によりその運用は終了となった。ALOS の後継機である ALOS-2 は 2013 年の打ち上げが予定されている。ALOS-2 では、バーストオーバーラップ機能の改善により、広域観測モードによる干渉処理が可能になる他、地震の発生から緊急観測の実施までの期間が大幅に短縮されるなど、ALOS における技術・

経験や利用実証で得られた成果に基づき、改良や新たな機能の付加が計画されており、引き続き地震防災・研究に貢献するため、早期の打ち上げ及び実運用が期待される。

謝 辞

ここで使用した「だいち」の PALSAR データの所有

権は、(独)宇宙航空研究開発機構及び経済産業省にあります。また、これらのデータは、ALOS 防災利用実証実験／衛星データを用いた地震・地盤変動データ流通及び解析グループ(地震 WG)の協定に基づき、(独)宇宙航空研究開発機構から提供を受けています。この場を借りて、御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 雨貝知美, 和田弘人, 藤原みどり, 鈴木啓, 飛田幹男, 矢来博司 (2007): 衛星合成開口レーダーを用いた平成 19 年(2007 年)能登半島地震に伴う地殻, 地盤変動の検出, 国土地理院時報, 113, 3-11.
- 雨貝知美, 鈴木啓, 和田弘人, 藤原みどり, 飛田幹男, 矢来博司 (2008): 衛星合成開口レーダーを用いた平成 20 年(2008 年)岩手, 宮城内陸地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 117, 15-20.
- 石山達也, 佐藤比呂志, 加藤直子, 八木浩司, 宮城豊彦, 今泉俊文 (2011): 2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層について (第 1 報), http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/fukushimahamadoori/#FukushimaNo1 (accessed 6 Oct.2011).
- 小荒井衛, 岡谷隆基 (2011): いわき市内陸部における 4 月 11 日福島県浜通りの地震に係る災害現地調査報告, <http://www.gsi.go.jp/common/000060960.pdf> (accessed 6 Oct.2011).
- Kobayashi, T., M. Tobita, T. Nishimura, A. Suzuki, Y. Noguchi and M. Yamanaka (2011): Crustal deformation map for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, detected by InSAR analysis combined with GEONET data, Earth Planets Space, 63, 621-625.
- 国土地理院 (2011): 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の地震後の変動と滑り分布モデル (暫定), <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110314-index.html> (accessed 6 Oct.2011).
- 鈴木啓, 雨貝知美, 藤原みどり, 和田弘人, 飛田幹男, 矢来博司 (2007): 衛星合成開口レーダーを用いた平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 114, 47-53.
- 飛田幹男, 宗包浩志, 松坂茂, 加藤敏, 矢来博司, 村上亮, 藤原智, 中川弘之, 小澤拓 (2005): 干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究, 国土地理院時報, 106, 51-55.