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

Crustal Deformation Associated with the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 Detected by PALSAR/InSAR

測地部
鈴木　啓・雨貝知美・藤原みどり・和田弘人
Geodetic Department
Akira SUZUKI, Tomomi AMAGAI, Midori FUJIWARA and Kozin WADA
地理地殻活動研究センター　飛田幹男・矢来博司
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Mikio TOBITA and Hiroshi YARAI

要　　旨

国土地理院は,陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) に搭載されている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するとともに，地震等の災害発生時には，緊急解析も実施している．

2007 年７月 16 日に発生した平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震では，北行軌道と南行軌道の異なる軌道での観測がそれぞれ（北行軌道：７月 30 日，南行軌道：７月 19 日）実施され，これらの観測データを用いた緊急解析を行った．

南行軌道の解析結果は，地震による広範囲の変動を面的に捉えることに成功した．しかし，北行軌道の解析結果では，観測データに電離層の擾乱と思われるノイズが含まれていたため，地震による変動を明確に捉えることができなかった．そこで，北行軌道については,再度観測が実施された９月 14 日のデータを利用し再解析を行った．その結果，明瞭な変動が捉えられ,本震の震央から約 15㎞ 離れた西山丘陵の西側斜面に帯状の隆起帯（最大約 15㎝）を発見した．そこで，この隆起帯が地震に伴った変動なのか，もしくは SAR 干渉解析による誤差かどうかの検討を行った．その結果，誤差による変動でないことが確認され，さらに，地震前後に実施された西山丘陵を横切る水準測量結果とも調和的であった．

この西山丘陵西側斜面の隆起帯は，活褶曲である小木ノ城背斜の位置と一致しており，地震に伴い褶曲構造が成長したと推定された．地震に伴う地殻変動において，このような活褶曲の成長が空間的な広がりとともに観測されたことは，極めて珍しい事例であり，干渉 SAR の面的な情報が非常に有効であることが示された．

１．はじめに

宇宙測地技術のひとつである SAR は，分解能の高いマイクロ波レーダーであり，地表の対象物からのレーダー反射波の強度に加えて，反射波の位相情報を得ることができる．干渉 SAR とは，このレーダー観測を地表の同一地点で２回以上実施し，それらの位相差をとることによって,数十 ㎞ 範囲の地表変動を約 100mの空間分解能, 数 ㎝ の精度で捉えることのできる技術である．

国土地理院は，1994 年以降，干渉 SAR を用いた定量的な地殻・地盤変動計測の実利用に向けて，解析手法ならびにそれらに必要なソフトウェアの研究開発を行ってきた（飛田，2003；飛田ほか,2005）．その結果,地震･火山による地殻変動や地盤沈下など，地表の変動現象を様々なスケールで捉えることに成功してきた（小澤ほか，2003；藤原ほか，2005）．

これらの研究開発の成果を基に，第６次基本測量長期計画では，宇宙航空研究開発機構（JAXA）により，2006 年 10 月から定常運用が開始された，陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS: Advanced Land Observing Satellite）のＬバンド合成開口レーダー（PALSAR）を用いた高精度地盤変動測量の実施を提示している．この高精度地盤変動測量では，長期的な変動監視として地盤沈下・火山地域を定常的に解析している（和田ほか,2007）．また，地震等の災害発生時には，災害状況把握のための緊急解析を実施している．

2007 年７月 16 日に発生した平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震（以下,「中越沖地震」という.）についても，平成 19 年（2007 年）能登半島地震と同様に緊急解析（雨貝ほか，2007）を実施した．この成果は，広範囲の変動を捉えると共に局所的な地表面の変化を捉えることに成功した．

本稿では，中越沖地震に際して実施した緊急解析結果について述べる（２章）．次に，その解析結果に現れた西山丘陵西側斜面の帯状隆起帯について検討を行った（３章）．そして，地震後の変動を監視するために実施した解析結果を考察し（４章），最後に，まとめと今後の課題について述べる（５章）．

２．中越沖地震における緊急観測と再解析

２．１　緊急解析の概要

干渉 SAR を実施するためには，最低２回の観測が必要である．人工衛星を利用する場合は，ほぼ同一の軌道を飛行した異なる時期の観測が必要とされる．このペアとなる観測の位相差をとることによって，地殻変動量の検出に利用する．この組となる２つの観測データを「干渉ペア」といい，先に観測されたものを「マスター」，後に観測されたものを「スレーブ」という．地震等の災害が発生した場合は，災害前後に観測された干渉ペアが必要となる．そのため，災害発生前に観測されたマスターの諸元情報を確認し，干渉ペアとなるスレーブの緊急観測が実施されるよう宇宙航空研究開発機構(JAXA)へ要求を行う．

「だいち」に搭載された PALSAR には，複数の観測モードがある（宇宙航空研究開発機構，2006）．国土地理院の干渉 SAR では，それらの観測モードの中で，最も高精度な高分解能モード（１偏波，２偏波）（以下，「FBS」，「FBD」という．）のオフナディア角 34.3°の観測モードを基本モードとして定常解析を行っている．これに対して，緊急解析の際には，観測モードに限らず解析を実施する．

2007 年７月 16 日に発生した中越沖地震では，JAXA に対して国土地理院やその他の関係機関からの緊急観測要求を行い，７月 19 日（地震発生３日後）に FBS・南行(Descending)軌道・オフナディア角 34.3°の観測モード，７月 30 日(地震発生 14 日後)に FBS・北行（Ascending）軌道・オフナディア角 34.3°の観測モードによる緊急観測が実施された．これらの観測を受け，国土地理院では，表－１に示す２つの干渉ペアの解析を実施した．

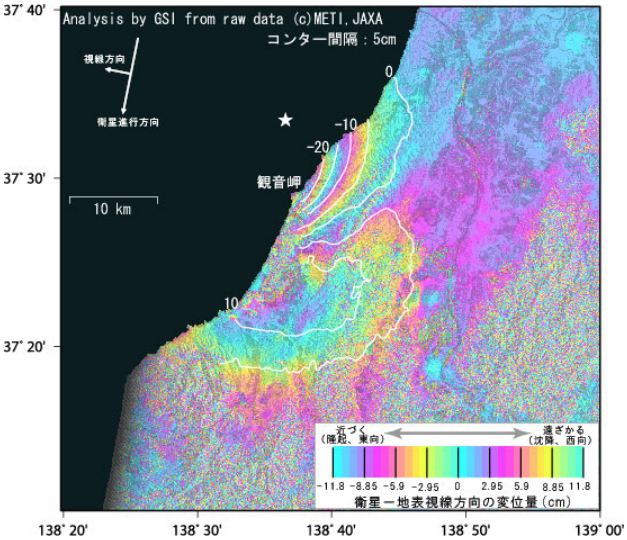
表－１　中越沖地震における緊急解析ペア

観測日(ﾏｽﾀｰ) 観測日(ｽﾚｰﾌﾞ)	ﾓｰﾄﾞ	運行軌道	基線長 垂直成分	期間	備考
2007/01/16 2007/07/19	FBS FBS	南行軌道	-300m	184 日	図-１
2007/06/14 2007/07/30	FBD FBS	北行軌道	+514m	46 日	図-２

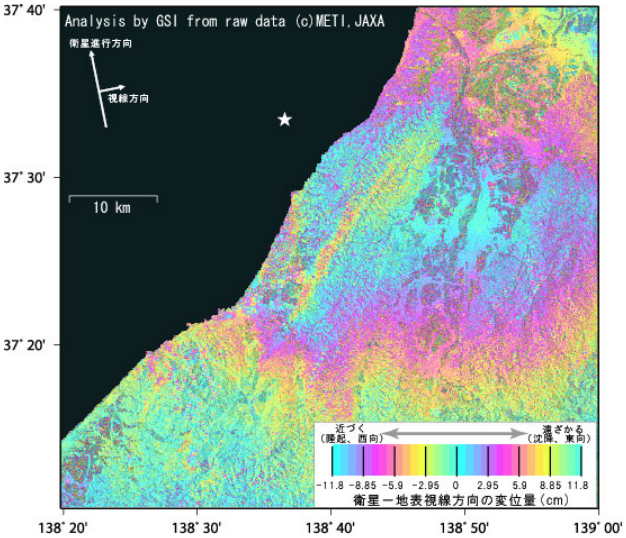
以上の干渉ペアのうち，地震後初の干渉ペアとなった南行軌道の解析結果については，緊急観測が行われた翌日の７月 20 日に記者発表（国土地理院，2007）にて公表した．

２．２　緊急解析結果

表－１に示した南行・北行軌道の SAR 干渉画像をそれぞれ図－１及び図－２に示す．図－１より，最も変化の大きい場所は，柏崎市椎谷（観音岬）付近でおよそ 25cm 衛星に近づいたことがわかる．一方，北行軌道の結果は，画像中心（柏崎市～新潟市）付近に地震に伴った変動とは想定できない縞が残り，明瞭な地殻変動を捉えられない結果となった．



図－１．SAR 干渉画像（Descending:34.3°）
(2007/01/16-2007/07/19)

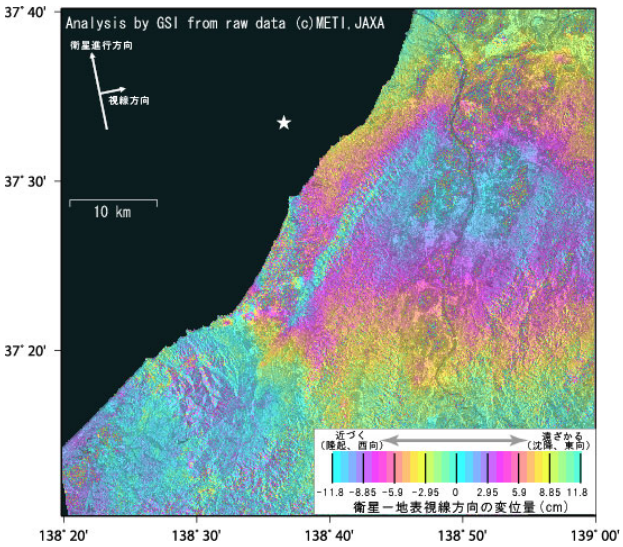


図－２．SAR 干渉画像（Ascending:34.3°）
(2007/06/14-2007/07/30)

２．３　北行軌道の誤差要因の追求と再解析

北行軌道の緊急解析結果（図－２）からでは，明瞭な変動を捉えられない結果となった．この原因を追及するため，マスターを 2006 年９月 11 日（FBS・北行（Ascending）軌道・オフナディア角 34.3°）に変更し，解析を行った（表－２）．その SAR 干渉画像（図－３）からも図－２同様の縞が現れたため，緊急観測時（７月 30 日）の観測データに何らかの誤

差があると判断された．その後，この誤差要因は，電離層の擾乱による影響と推定された（衛星データ解析検討小委員会，2007）．



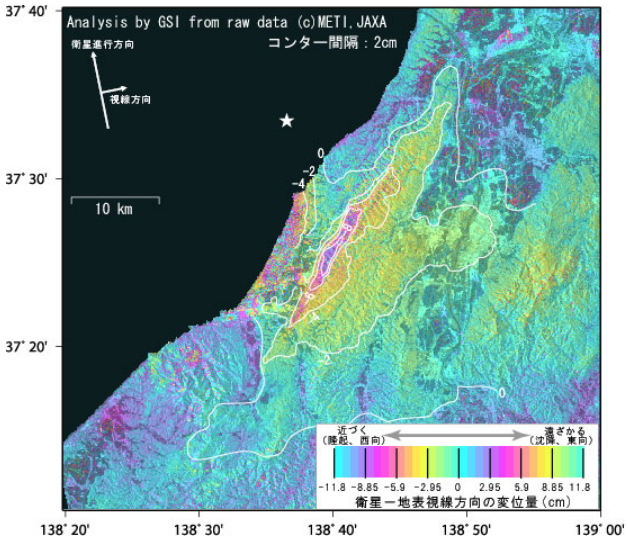
図－３．SAR 干渉画像（Ascending:34.3°）
(2006/09/11-2007/07/30)

再解析には，地震発生より若干間隔が開いた９月 14 日（地震発生後 60 日後）のデータを用いた.観測モードは，FBD・オフナディア角 34.3°である．再解析を行った干渉ペアの詳細を表－２に示す．

表－２　中越沖地震における再解析ペア

観測日(ﾏｽﾀｰ) 観測日(ｽﾚｰﾌﾞ)	ﾓｰﾄﾞ	運行軌道	基線長 垂直成分	期間	備考
2006/09/11 2007/07/30	FBS FBS	北行軌道	-744m	322 日	図-３
2007/06/14 2007/09/14	FBD FBD	北行軌道	+653m	92 日	図-４

2007/06/14-2007/09/14 の SAR 干渉画像を図－４に示す．この SAR 干渉画像では，図－２，３の解析結果とは異なり，明瞭な変動を捉えることに成功した．



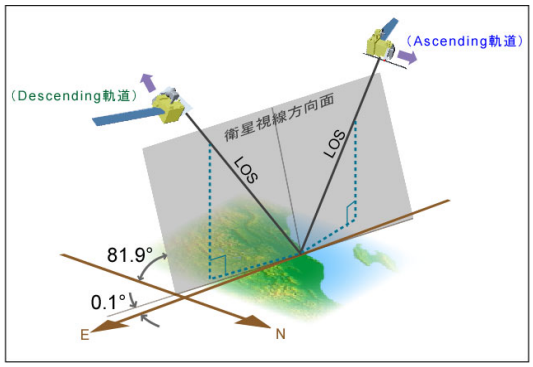
図－４．SAR 干渉画像（Ascending:34.3°）
(2007/06/14-2007/09/14)

２．４　2.5 次元解析

２．４．１　2.5 次元解析

干渉 SAR では，衛星から地表への視線方向の変位量を計測するため，単独では変動の方向を特定することができない．しかし，２方向以上からの SAR 干渉画像を組み合わせることにより変動を２次元的，３次元的に把握することが可能となる（Massonnet et al., 1995, 1996; Fialko et al., 2001）．

中越沖地震では，緊急解析での南行軌道と再解析での北行軌道の２方向の干渉画像が得られている（図－１，４）．これらの解析結果を合成することにより，地表の各地点においてほぼ上下方向と，ほぼ東西方向の２次元成分へ分離が可能となる(図－５)．この手法により得られた準上下方向と準東西方向の変動量分布をそれぞれ図－６及び図－７に示す．準上下方向の変動図から変位量は，柏崎市椎谷（観音岬）付近で大きく，25cm を超える隆起が確認できる．これは，地震後実施された水準測量において，最大隆起量を観測した観音岬付近にある一等水準点（4458）の隆起量と良い一致を示した．

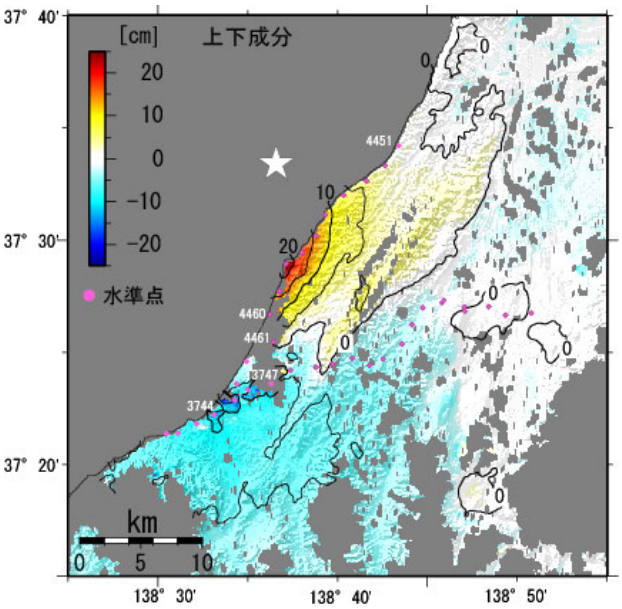


図－５．2.5 次元解析モデル図

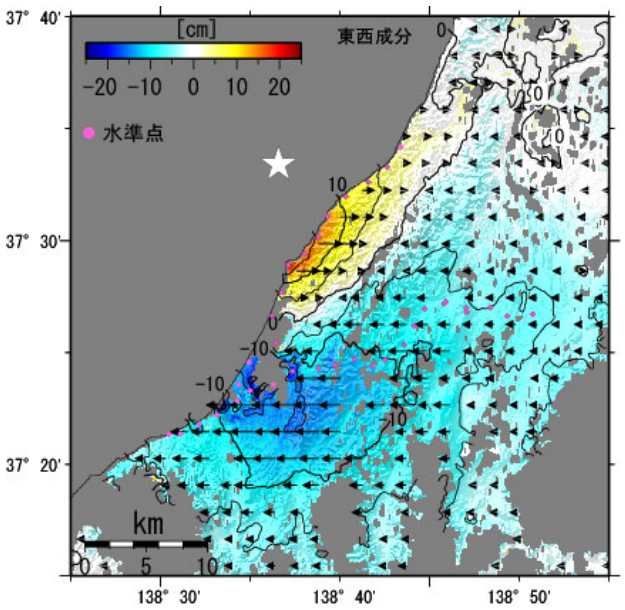
２．４．２　準上下方向と水準測量による変動量の比較

2.5 次元解析から得られた準上下方向の変動量の精度を検証するため，地震後実施された水準測量結果との比較を行った．比較に使用した水準点（36 点）は，一等水準点（4451）を基準にした震源域周辺の点である（図－６）．

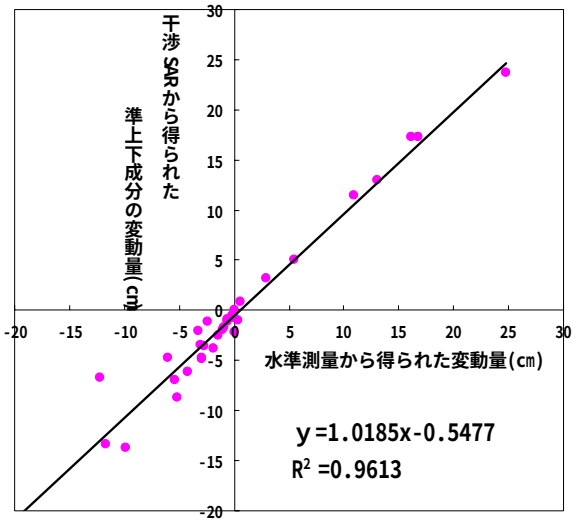
水準測量の変動量を横軸に，準上下方向の変動量を縦軸にとった散布図を図－８に示す．ここで異常点（4461）や干渉していない部分にある水準点（4460,3747）は，予め棄却した．その後，変動量の較差が 10cm 程度生じていた１点（3744）を棄却した結果，残りの水準点（32 点）では非常によい相関を示している．また，散布図に示された水準点 32 点では，干渉 SAR，水準測量から得られるそれぞれの変動量の差の標準偏差が約 1.5cm であった．



図－６　準上下成分の変動量分布図



図－７　準東西成分の変動量分布図



図－８　準上下成分と水準測量との相関

３．西山丘陵西側斜面の帯状隆起

３．１　概要

北行軌道の再解析結果（図－４）では，本震の震央から南側へ約 15km 離れた西山丘陵の西側斜面に帯状の隆起帯（最大約 15cm）が確認できる．この隆起帯が地震に伴った地殻変動であるか，SAR 干渉解析上の誤差によるものかの検討を行った．

SAR 干渉画像中に現れる主要な誤差要因は，①対流圏や電離層などの伝播遅延に起因する空間的擾乱による誤差（図－２，３），②デジタル標高データ（以下，「DEM」）による誤差，が挙げられる．そこで，これら誤差要因を判断するため，以下の検討を行った．

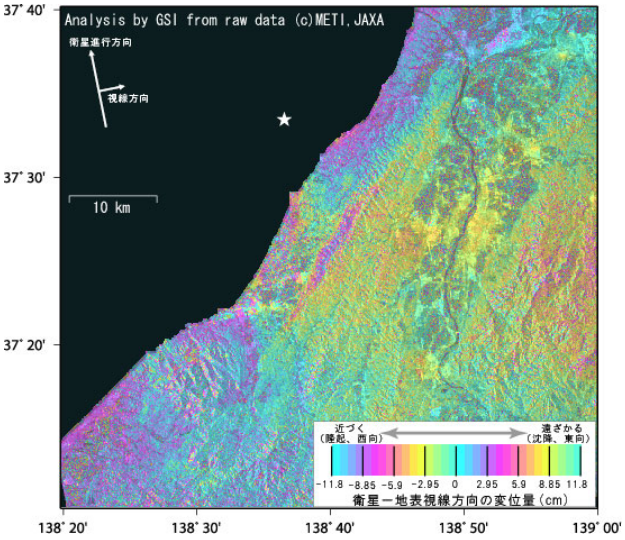
まず，①については，２．３項のように干渉ペアを変更した解析結果を比較することにより，大気等の擾乱による影響かどうかの判断を行った．②については，通常国内では国土地理院作成の 50mメッシュ標高を使用している．そこで，アメリカ地質調査所（USGS：United States Geological Survey）が無償提供している標高データ（SRTM:The Shuttle Radar Topography Mission，以下，「SRTM」という．）へ変更し比較を行った．さらに，この周辺域では水準測量も実施されたため，この隆起帯に位置する水準点の変動量からも検討を行った．

３．２　大気等の伝播遅延による影響

大気等の伝播遅延による影響を確認するため，異なる時期で解析を行った．使用したデータは，マスターを 2006 年９月 11 日，スレーブを 2007 年９月 14 日とした（表－３）．その SAR 干渉画像を図－９に示す．

表－３　大気遅延の検討に行った解析ペア

観測日(ﾏｽﾀｰ) 観測日(ｽﾚｰﾌﾞ)	ﾓｰﾄﾞ	運行軌道	基線長 垂直成分	期間	備考
2006/09/11 2007/09/14	FBS FBD	北行軌道	-874m	368 日	図-９



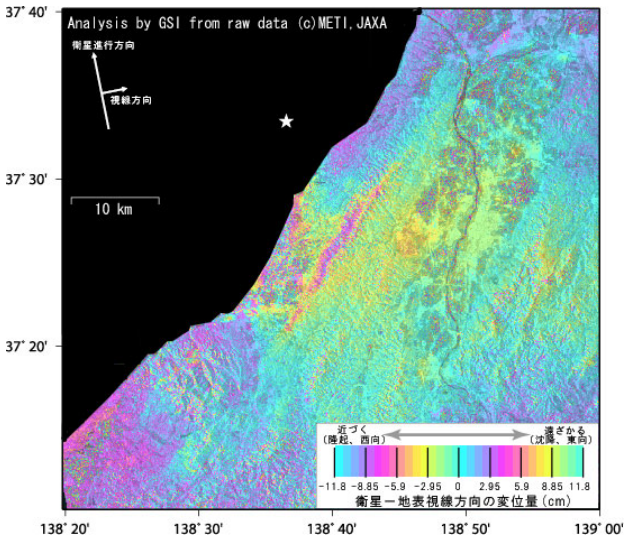
図－９　SAR 干渉画像（Ascending:34.3°）
(2006/09/11-2007/09/14)

この SAR 干渉画像からも図－４同様，西山丘陵に帯状の隆起域が確認できる．従って，この隆起帯は，大気等の伝播遅延による影響である可能性が低いと考えられる．

３．３　DEM による誤差の影響

DEM による影響を確認するため，表－３の干渉ペアを用い，国土地理院作成の 50mメッシュ標高から SRTM へ変更して解析を行った．

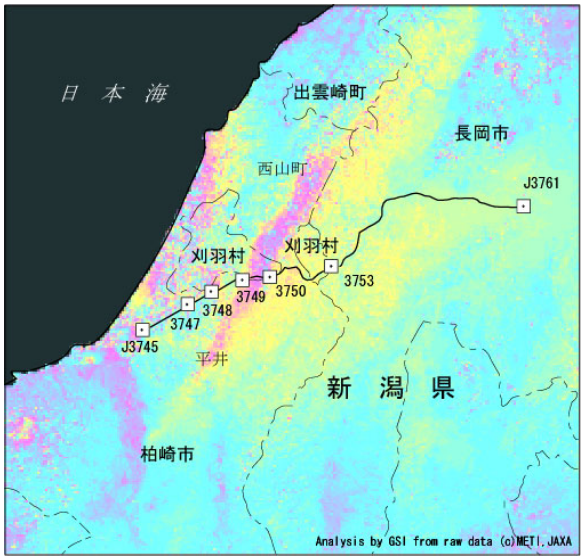
SRTM３（90mメッシュ）は，データの欠測があるため，欠測のない SRTM30（１km メッシュ）で補間したものを使用した．精度的には，国土地理院作成の 50mメッシュ標高に劣るが，地形誤差の判別には問題ない精度である．この SAR 干渉画像（図－10）からも同一地域に帯状隆起帯を確認することができる．この結果より，DEM による誤差でもなく，地震に伴った変動である可能性は高いと考えられる．



図－10　SAR 干渉画像（Ascending:34.3°）
(2006/09/11-2007/09/14:SRTM 使用)

３．４　水準測量による検討

国土地理院では，地震発生後水準測量を実施している（池田ほか，2008）．観測された水準路線の一部は，帯状隆起が確認できる西山丘陵を横断しているため，隆起帯に位置する水準点の変動量によって検討を行った．西山丘陵を横断する水準点の位置関係を図－11 に示す．帯状隆起帯にある水準点（3749）は，地震発生後の８～９月に水準測量が実施された．出雲崎町の水準点（4451）を基準とした場合，この約一ヶ月間の変動量は，数 mm の隆起を観測した．以上の結果から，水準測量によってもこの地域の隆起が確認された．



図－11　西山丘陵を横断する水準路線

以上，３．２～３．４節の検討結果から西山丘陵の局所的な変動が明らかになった．この隆起帯は，活褶曲である小木ノ城背斜（小林ほか,1996）とよく一致していることから，褶曲構造が反映した結果と考えられた．なお，この成果は，10 月２日に記者発表（国土地理院，2007）にて公表された．

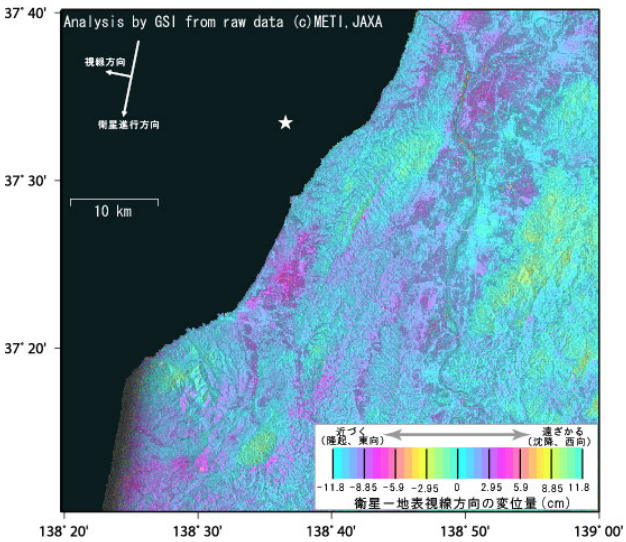
４．地震後の解析結果について

中越沖地震震央付近での観測が，再解析実施後 10 月 19 日に南行軌道で，10 月 30 日に北行軌道でそれぞれ実施された．そこで，地震後の変動を確認するため解析を行った．その干渉ペアの詳細を表－４に示す．また，それぞれの SAR 干渉画像を図－12 及び図－13 に示す．

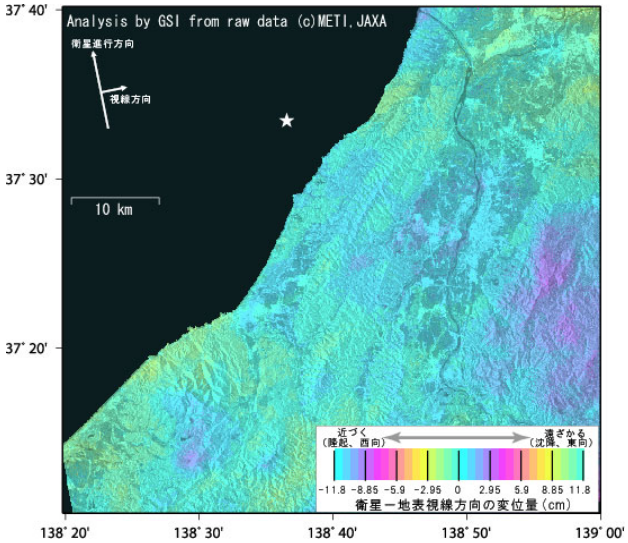
表－４　中越沖地震後の解析ペア

観測日(ﾏｽﾀｰ) 観測日(ｽﾚｰﾌﾞ)	ﾓｰﾄﾞ	運行軌道	基線長 垂直成分	期間	備考
2007/07/19 2007/10/19	FBS FBS	南行軌道	+623m	92 日	図-12
2007/09/14 2007/10/30	FBD FBS	北行軌道	+568m	46 日	図-13

これらの SAR 干渉画像（図－12，13）からは，特段の変動は確認できない結果となった．仮に西山丘陵の帯状隆起帯が mm 単位の変動を継続していたとしても，干渉 SAR で捉えられるレベルの変動ではないといえる．



図－12　SAR 干渉画像（Descending:34.3°）
(2007/07/19-2007/10/19)



図－13　SAR 干渉画像（Ascending:34.3°）
(2007/09/14-2007/10/30)

５．まとめと今後の課題

能登半島地震に続き，中越沖地震においても干渉 SAR によって，地殻変動を正確に捉えることができた．緊急観測を要求した北行軌道の観測データ（７月 30 日）を使用した解析は，電離層による誤差を含んだ結果となり，明確な地殻変動を捉えるに至らなかった．しかし，その後の再解析では，中越沖地震に伴った西山丘陵西側斜面の帯状隆起帯を発見した．これは，従来の GPS・水準測量では検出が困難な地殻変動を，干渉 SAR の利点である面的な情報によって発見できたものである．

今後の課題としては，本稿でも検討された電離層の擾乱による定量的な補正方法の確立である．この電離層を含む大気補正については，未だ非常に困難な課題であるが，観測されたデータから面的な変動を効率的かつ高精度に解析・提供するためには避けて通れない重要な課題である．

謝　　辞

ここで使用した「だいち」の PALSAR データの所有権は，経済産業省および宇宙航空研究開発機構にある．また，これらのデータは，宇宙航空研究開発機構との共同研究協定に基づいて提供を受けた．ここに記して謝意を表する．

参 考 文 献

Fialko, Y., M. Simons, and D. Agnew(2001): The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations, Geophy. Res. Let., 28, 3063-3066.

藤原　智，仲井博之，板橋昭房，飛田幹男，矢来博司（2005）：JERS-1 干渉 SAR による小空間スケール地表変位の検出 －有明海周辺干拓地における田の沈下・隆起－，測地学会誌，第 51 巻，第４号，199-213.

国土地理院(2007)：記者発表資料, http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007/0412.htm(accessed 20 Jul. 2007).

国土地理院(2007)：記者発表資料, http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007/1002.htm(accessed 2 Oct. 2007).

Massonnet, D., P. Briole, and A. Arnaud (1995): Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, Nature, 375, 567-570.

Massonnet, D., K. Feigl, H. Vadon, and M. Rossi(1996): Coseismic deformation field of the M = 6.7 Northridge, California earthquake of January 17, 1994 recorded by two radar satellites using interferometry, Geophy. Res. Let., 23, 969-972, 1996.

小澤　拓，宗包浩志，矢来博司，村上　亮（2003）：JERS-1 の干渉 SAR により検出された霧島火山群・硫黄島周辺の局所的な地殻変動，火山，第 48 巻，第６号，507-512.

飛田幹男（2003）：合成開口レーダー干渉法の高度化と地殻変動解析への応用，測地学会誌，49，1-23.

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ーの解析技術に関する研究，国土地理院時報，第 106 集，37-49.

宇宙航空研究開発機構（2006）：ALOS データ利用ガイドブック，付録３　PALSAR データの関連情報.

和田弘人, 松坂　茂, 藤原　智, 仲井博之, 藤原みどり, 雨貝知美, 飛田幹男, 福崎順洋, 矢来博司(2007)：ALOS/PALSAR データの干渉 SAR 測量への利用とデータ処理・解析システムの構築概要，国土地理院時報，第 111 集，小特集Ⅱ：国土地理院における陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）の利用，107-11.

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, 第 113 集, 小特集:平成 19 年(2007 年）能登半島地震，3-11.

小林巌雄，立石雅昭，吉村尚久，上田哲郎，加藤碩一（1996）：５万分の１地質図幅「柏崎」，地質調査所,地質ニュース，498 号，13-14.

衛星データ解析検討小委員会（2007）:新潟県中越沖地震に関する衛星データ解析結果報告，地震調査委員会提出資料.

池田尚應，横川正憲，田上節雄，佐々木利行，塩谷俊治，大森秀一，根本盛行（2008）：平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震に伴う緊急現地調査（水準測量），国土地理院時報，第 114 集，小特集：平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震，39-45.