干渉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

Detection of Crustal and Ground Deformation Triggered by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 with InSAR

測地部　雨貝知美・鈴木　啓・和田弘人・藤原みどり
Geodetic Department
Tomomi AMAGAI, Akira SUZUKI, Kozin WADA and Midori FUJIWARA
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している．この定常解析に加え，災害発生時には，災害状況の把握等を目的として，緊急解析も実施している．

2008 年６月 14 日に発生した平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震では，北行軌道と南行軌道の異なる軌道からの観測がそれぞれ実施され，これらの観測データを用いた緊急解析を行った．

これらの解析結果は，地震による広範囲の変動を面的に捉え，岩手・宮城内陸地震における地殻変動の特徴を明らかにした．また，震源断層モデルの推定や基準点の改測などの復旧作業を行う上で，重要な情報として活用された．

１．はじめに

干渉合成開口レーダー（以下,「干渉 SAR」という.）は，人工衛星や飛行機など飛翔体に搭載した合成開口レーダーを用いて，地表のある地域を２回以上観測し，その期間に起こった地殻変動を受信波の位相差として捉えるリモートセンシング技術である．これにより，数 10km 四方という広範囲の地殻変動を，数 cm の計測精度で面的に捉えることができる．

国土地理院は,第 6 次基本測量長期計画に基づき，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）のＬバンド合成開口レーダー（PALSAR: Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）を用いて，高精度地盤変動測量を実施している．この高精度地盤変動測量は，地震・地盤沈下・火山・地すべり等による防災・災害状況把握のための地殻・地盤変動の監視を目的としている．特に，長期的な活動をすることが多い火山や地盤沈下地域は，定常的に解析を行い，監視に努めている．

一方，災害発生時には，災害状況の把握等を目的として，緊急解析を実施している．これまで，平成 19 年（2007 年）能登半島地震や平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震などで緊急解析を実施し，地震に伴う地殻変動や地すべりの様子を明らかにしてきた．また，これらの成果から，SAR 干渉解析の結果は，基準点の改測などの復旧作業を行う上で，重要な情報となることが示され，緊急時における SAR 干渉画像の利用が確立されつつある（雨貝ほか，2007；鈴木ほか，2007；矢来ほか,2008）．

このようななか，2008 年６月 14 日に発生した平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震（以下,「岩手・宮城内陸地震」という）についても，緊急解析を実施し，成果を公表した．

本稿では，宇宙航空研究開発機構（以下,「JAXA」という.）への観測要求について説明した上で（２章），岩手・宮城内陸地震に際して実施した緊急解析の概要と,その解析結果について述べる（３章）.さらに，余効変動を捉えるため実施した継続観測の解析結果について述べる（４章）．最後に，まとめと今後の課題について述べる（５章）．

２．観測要求

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，ほぼ同一の軌道を飛行した異なる時期の観測が必要となる.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」と呼び，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 JAXA へ要求を行う．

国土地理院は，JAXA と締結した共同研究協定により,「だいち」の観測に対する観測要求を提出している．国土地理院の観測要求は,「だいち」の基本観測計画に対する要求である基本観測要求と，災害等の緊急時に対する緊急観測要求に大別される（雨貝ほ

か,2007).

この共同研究のほか，国土地理院は，JAXA が実施している「だいち」を用いた防災利用実証実験(JAXA, 2008）の一環として，JAXA の協力のもと，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（以下,「地震 WG」という.）を 2008 年３月に設置し，事務局を務めている．防災利用実証実験の目的は，衛星データによる国内の防災への貢献を実証し，衛星データの利用の仕組みを構築することにある．実証テーマは複数あるが，地震 WG は「地盤・地殻変動及び被害把握」における実証実験を担う．そのため，地震 WG では WG 参画機関の共同研究者とともに，地震・地盤変動の発生メカニズムの解明を主な目的として，衛星データを活用し，その有効性を実証している．

地震 WG の事務局を務める国土地理院は，地震 WG 内での衛星データの流通及び成果の取りまとめを主に行う．また，共同研究者からの観測要求を取りまとめ,事務局内で審査の上,JAXA へ要求を行う.2008 年６月 14 日に発生した岩手・宮城内陸地震では，地震 WG からの要求として,JAXA へ観測要求を行った.

３．岩手・宮城内陸地震における緊急解析

３．１　解析の概要

岩手・宮城内陸地震では，地震 WG からの緊急観測要求を受け，６月 23 日（地震発生９日後，夜間観測）に FBS・北行（Ascending）軌道・オフナディア角 34.3°の観測モード，６月 24 日(地震発生 10 日後，昼間観測）に FBS・南行（Descending）軌道・オフナディア角 41.5°の観測モードによる緊急観測が JAXA により実施された．これらの観測を受け，国土地理院では，各々の観測について，複数の干渉ペアの解析を実施した．このうち，最も条件の良い干渉ペア（表－１）は，２回目の緊急観測が実施された翌日の６月 25 日に，記者発表（国土地理院，2008a）にて公表された．

表－１　岩手・宮城内陸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	軌道 方向	基線長 垂直成分	期間	備考
2007/08/06 2008/06/23	FBD FBS	北行	-614 m	322 日	図-２
2006/06/19 2008/06/24	FBD FBS	南行	+286 m	736 日	図-３

なお，SAR 干渉解析における良い条件とは，①干渉度が高いこと，②大気遅延や電離層遅延による位相擾乱の影響が少ないことである．

①を満たすには，ａ）基線長垂直成分が短い，ｂ）マスターとスレーブの期間が短い，ｃ）最も分解能の高い高分解能モード１編波（FBS）同士のペアである，等の条件が挙げられる．このうち，最も影響する条件はａ）である．

今回の緊急観測は，発災直前の６月中旬に JAXA によって ALOS 軌道（傾斜角）制御が実施された影響から，b）の条件を満たす干渉ペアでは基線長垂直成分が大きく,良好な干渉を得られなかった.そこで，①，②の条件を満たす表－１の干渉ペアを最終成果とした.

３．２　得られた成果

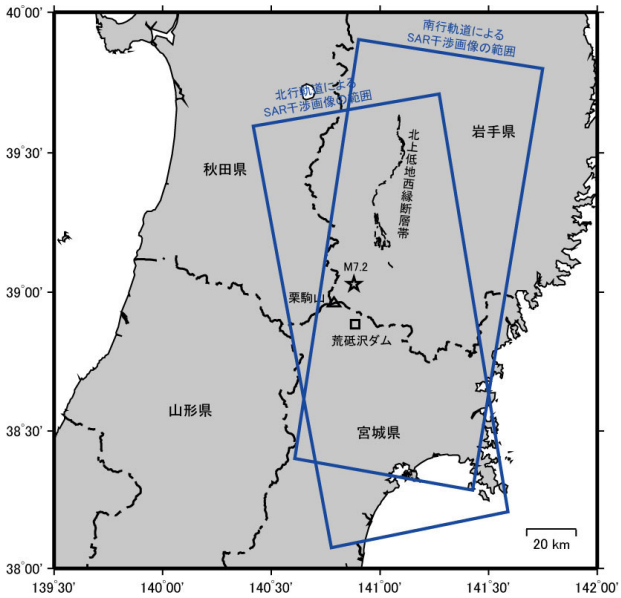
３．２．１　干渉画像

表－１に示した解析ペアの範囲を図－１，ぞれぞれの SAR 干渉画像を図－２及び図－３に示す.

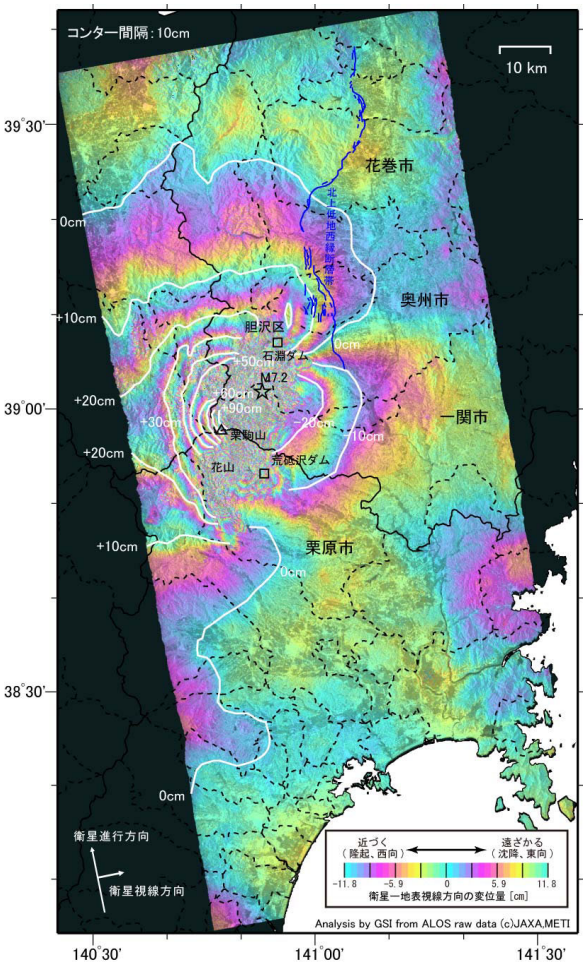
図－２及び図－３から，岩手・宮城内陸地震によって，地殻変動の影響を受けた範囲が明らかとなった．ここからわかる地殻変動の範囲は，GPS データから推察された逆断層型の震源断層モデルの変動域（国土地理院，2008b）と調和的である．ここで，SAR 干渉画像中に見られる砂目模様の範囲は，SAR 干渉解析で捉えられないほど，急激な地形の変動があったことを示している．この地殻変動集中帯は，奥州市胆沢区付近から栗原市花山周辺に至る長さ約 30km，幅約 10km の範囲に及ぶ．この地殻変動集中帯における最大変動量は，少なくとも１ｍを超えると推察でき，GPS データによる電子基準点「栗駒２」における変動量（国土地理院，2008b）を裏付けている．また，地殻変動集中帯が北北東－南南西に伸びていることから，断層の走行は北北東－南南西であるがわかる.

これらの成果は，GPS データとあわせて，断層モデルの計算に用いられるほか，国土地理院が管理する測地基準点の復旧測量の実施地域を決定する際にも，重要な資料として用いられた.

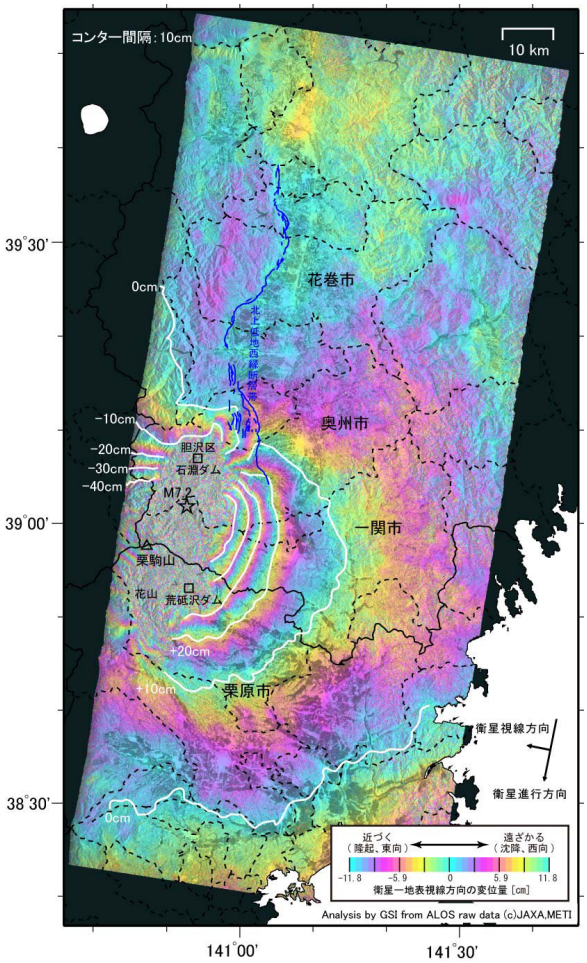
なお，北行軌道と南行軌道による SAR 干渉画像の見え方の違いについては，記者発表（国土地理院，2008a）資料を参照されたい.



図－１　緊急解析ペアの範囲



図－２　SAR 干渉画像（Ascending，34.3°）
観測日：2007/08/06－2008/06/23
軌道情報：ALOS 高精度軌道情報
活断層の位置は地震調査研究推進本部（2001）による



図－３　SAR 干渉画像（Descending，41.5°）
観測日：2006/06/19－2008/06/24
軌道情報：ALOS 高精度軌道情報
活断層の位置は地震調査研究推進本部（2001）による

（注意）
カラーバーや画像中のコンターの数値は，衛星から地表までの視線方向の距離の変化量を示す．つまり，マイナスの場合は，衛星と地表の距離が縮まったことを示し，北行軌道では地表が隆起あるいは西向に，南行軌道では隆起あるいは東向に動いたことを意味する．

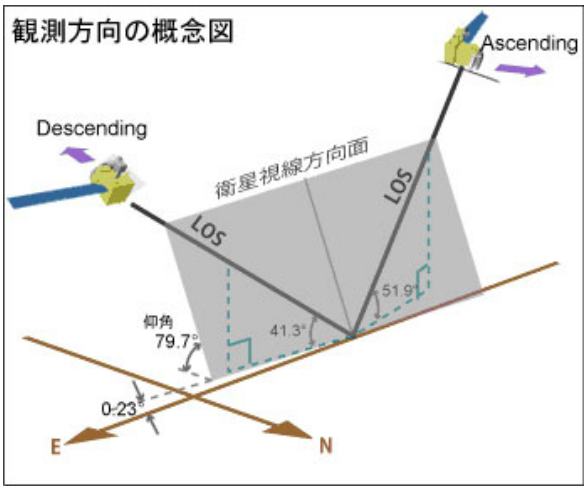
３．２．２　2.5 次元解析

干渉 SAR では，衛星から地表への視線方向で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；Yarai et al., 2004）．

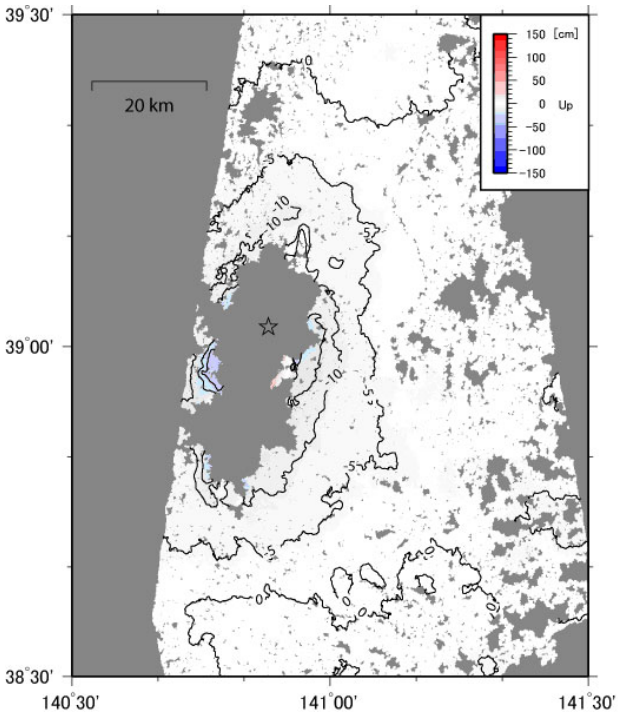
岩手・宮城内陸地震でも，図－２，３に示すように，北行軌道と南行軌道からの２方向の干渉画像が得られている．これらの干渉画像を解析することにより，地表の各地点において衛星の視線方向が張る

平面（衛星視線方向面）上の変位成分を求めることができる（図－４）．地表の各地点（２次元的に分布）について衛星視線方向面上の変位（２次元成分）を得られることから，この手法は2.5次元解析と呼ばれる（Fujiwara et al.，2000）．今回の場合，得られる変位成分は，図－４に示されているようにほぼ上下方向とほぼ東西方向となる．得られた準上下方向と準東西方向の変動量分布図をそれぞれ図－５及び図－６に示す．

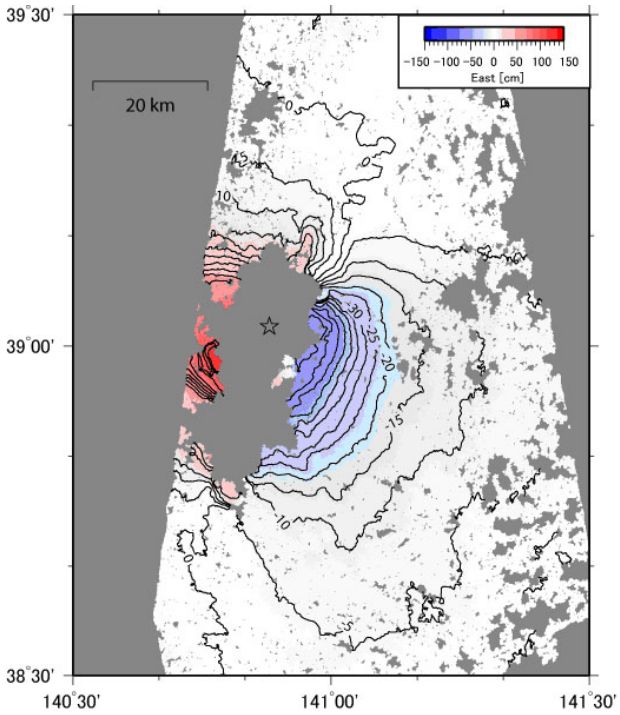
これらの画像から，地殻変動集中帯（低干渉領域）をはさむ東西の地塊が，各々少なくとも約１m，西北西－東南東方向に相互に近寄る方向に変動したことがわかる．これは逆断層のセンスを示している．



図－４　2.5次元解析モデル図



図－５　干渉SARによる準上下成分の変動分布図



図－６　干渉SARによる準東西成分の変動分布図

４．余効変動の確認

４．１　解析の概要

GPSデータでは，本震後約１ヶ月間に，最大数cm程度の余効変動がみられ，2008年８月現在も継続している．そこで，余効変動を面的に捉えるため，表－２に示す，地震後の干渉ペアの解析を実施した．

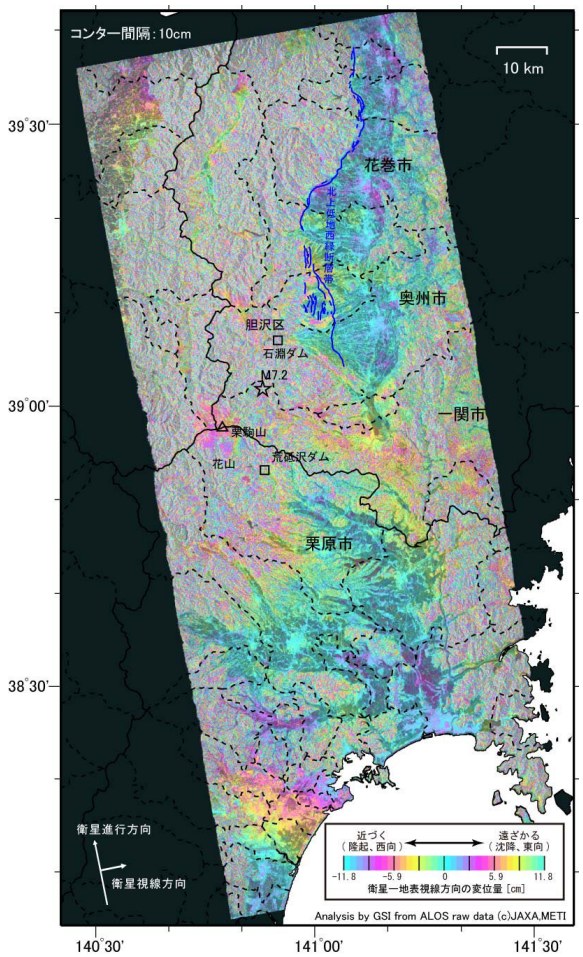
表－２　岩手・宮城内陸地震における継続解析ペア

観測日(ﾏｽﾀｰ) 観測日(ｽﾚｰﾌﾞ)	ﾓｰﾄﾞ	軌道 方向	基線長 垂直成分	期間	備考
2008/06/23 2008/08/08	FBS FBS	北行	-3,277 m	46日	図-７

４．２　得られた成果

表－２に示した解析ペアのSAR干渉画像を図－７に示す．

この間，６月中旬に引き続き，２回目のALOS軌道（傾斜角）制御がJAXAによって実施された．この影響により，基線長垂直成分が3,000mを超えており，震源周辺はほとんど干渉していない．そのため，本解析では余効変動の検出には至らなかった．なお，余効変動の検出については，今後も引き続き監視を続けていく．



図－７　SAR 干渉画像（Ascending，34.3°）
観測日：2008/06/23－2008/08/08
軌道情報：ALOS 高精度軌道情報
活断層の位置は地震調査研究推進本部（2001）による

５．まとめと今後の課題

国土地理院では，岩手・宮城内陸地震に際し，地震 WG 事務局として緊急観測要求を行い，その観測データを用いた緊急解析を行った．その結果，下記の点が明らかとなった．

- 変動分布は，北北東－南南東に走行を持つ逆断層を示しており，GPS データによる断層モデルとよく一致する．
- 長さ約 30km，幅約 10km に及ぶ地殻変動集中帯が存在する．
- 地殻変動集中帯（低干渉領域）をはさむ東西の地塊が，各々少なくとも約１m，西北西－東南東方向に相互に近寄る方向に変動した．

また，余効変動の監視のため，緊急解析に引き続き解析を行った．この結果については，ALOS 軌道（傾斜角）制御の影響により有意な結果は得られず，余効変動の検出には至らなかった．今後も解析を行い，余効変動の監視を行うとともに，地震発生後の地殻変動を明らかにする．

さらに，これまでも課題として挙げられてきたが，大気や電離層における電波伝搬遅延は，SAR 干渉解析にとって依然として大きな問題となっている．今回実施した解析でも，大気擾乱による影響が見られる干渉ペアがあった．これらの除去あるいは軽減が実現されれば，SAR 干渉画像の著しい高精度化が期待できる．今後も，この課題について，引き続き研究を行う．

謝　辞

ここで使用した「だいち」の PALSAR データの所有権は，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／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，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，第 113 集，小特集：平成 19 年（2007 年）能登半島地震，3-11.

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.

Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa, and M. Tobita (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophy. Res. Let., 27, 2049-2052.

地震調査研究推進本部 地震調査委員会（2001）：北上低地西縁断層帯の評価，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01jun_kitakami/index.htm (accessed 23 Jun. 2008).

国土地理院（2008a）：記者発表資料「人工衛星データを用いて岩手・宮城内陸地震に伴う面的な変動が明らかに（第１報）」，http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h20-iwatemiyagi/0625.html (accessed 25 Jun. 2008).

国土地理院（2008b）：記者発表資料「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動（第２報）」，http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h20-iwatemiyagi/080614houdou3.html (accessed 18 Jun. 2008).

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.

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，第114集，小特集:平成19年(2007年) 新潟県中越沖地震，47-53.

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.

宇宙航空研究開発機構：「だいち」からの災害監視，https://bousai.jaxa.jp/（accessed 12 Aug. 2008).

Yarai, H., T. Ozawa, T. Nishimura, M. Tobita, and T. Imakiire (2004) : Crustal deformation associated with the northern Miyagi earthquake detected by RADARSAT-1 and ENVISAT SAR interferometry, Earth Planets Space, 56, 103-107.

矢来博司，飛田幹男，宇根寛，佐藤浩（2008）：SAR干渉解析による能登半島地震に伴う地すべり変動の抽出,平成１９年度京都大学防災研究所特別教育研究経費（拠点形成）研究集会 衛星搭載型合成開口レーダーを用いた地震・火山災害ポテンシャル評価手法の高度化・効率化 講演発表資料
http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/main/HomeJ.html（accessed 12 Aug. 2008).