

衛星 SAR データの差分干渉による能登半島地震に伴う地表の変動パターン

大 沼 巧*

(株)地球科学総合研究所

Surface Deformation Patterns Associated with the 2007 Noto Hanto Earthquake Detected by Satellite SAR Differential Interferometry

Takumi Onuma*

JGI, Inc.

Abstract

Aiming to understand surface deformation patterns associated with the 2007 Noto Hanto earthquake, differential interferometry was performed using ALOS PALSAR data acquired on 23 February (before the earthquake) and 10 April, 2007 (after the earthquake). Displacement in the line of sight (LOS) of the radar was mapped through processing steps such as generation of single look complex (SLC) image data, registration of two SLCs, refinement of baseline, and phase unwrapping of differential interferogram. LOS distance after the earthquake was found to decrease in the WNW direction from the Anamizu—Notokashima area, and the maximum reduction of 54 cm around Akakami—Kitawakisaki area was analyzed, as well as the increase of the LOS distance up to 5 cm in the area of Minazuki through Nishideyama area. Contours of LOS displacement show a pattern like a concentric circle centered several kilometers away to the NW of the Akakami-Kitawakisaki area, which is concordant with the location of the epicenter reported by Japan Meteorological Agency.

Key words: ALOS, PALSAR, Noto Hanto earthquake, Differential Interferometry, Surface displacement

1. はじめに

近年、衛星搭載 SAR データが広く利用可能となり、これを用いる干渉処理技術が確立されてきたことにより、地盤沈下・火山活動などのモニタリングや、地震前後の変位の測定に、衛星搭載 SAR データの干渉処理が広く行われるようになってきた（例えば Ozawa, *et al.*, 1997; Tobita, *et al.*, 1998; Nishimura, *et al.*, 2001; Tobita, *et al.*, 2001; Yarai, *et al.*, 2004; Ozawa, *et al.*, 2006 等）。本論では、2007 年 3 月 25 日に発生した「平成 19 年能登半島地震」によって生じた地表面の変動パターンを面的に捉えるために、現時点で唯一の L バンド衛星搭載 SAR センサである ALOS PALSAR のデータ（以下 PALSAR

データ）を用いて差分干渉処理を実施し、地表面の変動パターンを詳細に把握したので報告する。なお、本論中で用いた SAR 干渉処理の用語のうち * を付したものについては、SAR 干渉処理に精通していない読者を想定し、最後に簡単な解説を付した。

2. 使用データと SAR 画像再生処理・干渉処理の概要

(1) 複素画像（シングルルック・コンプレックス: SLC）再生処理

使用した PALSAR データの諸言を表 1 に示す。PALSAR データは、レベル 1.0 プロダクト*を（財）資源・環境観測解析センターから入手した。SAR 画像再生処理・

* e-mail: onuma@jgi.co.jp (〒112-0012 東京都文京区大塚 1-5-21)

差分干渉処理用のソフトウェアとしては、現在、幾つかの商用ソフトウェアが存在するが、ここでは GAMMA 社（スイス）製のソフトウェア（以下 GAMMA）を用いた。SAR 再生処理の一般的な流れとしては、ドップラー・アンビギュイティ推定*、ドップラー周波数の推定*、レンジ圧縮*、オートフォーカス*（位相誤差補正）、アジマス圧縮*というステップが考えられる。SAR データの処理では、ドップラー周波数の推定が極めて重要である。PALSAR データのように、その変化が画像の部位によっては急激である場合は、GUI が整備されたソフトウェアによりパラメータ固定（デフォルト）で自動処理を行うと、干渉処理の際に問題の原因となる場合がある。ここで用いた GAMMA が提供しているのは、コマンドライン・ベースのプログラム群であり、対象とするデータの特性に応じて比較的自由的なパラメータ設定が可能である。Fig. 1 は、2007/2/23 観測の PALSAR データ

について、アジマス方向に一定のオフセットを持たせて計算した、レンジ方向のドップラー周波数の変化を表している。アジマス方向に 2,500 エコー*、あるいは 5,000 エコーのオフセットを持たせた場合は、ファー・レンジにおいて著しく大きな、明らかに実データとは無関係と考えられる正の値が算出されており、ニア・レンジにおいては、著しく大きい負の値の場合もある。ここで対象とする PALSAR データは海域を多く含んでいるが、通常ドップラー周波数は陸域から計算されるために、計算対象範囲によって大きな違いが生じる。一般に、マスター画像（観測時期の古い方）とスレーブ画像のドップラー周波数の差が、パルス繰り返し周波数*（PRF; 表 1 参照）の 1/3 を超えると干渉が得られにくいとされるため、SAR データの処理では干渉処理だけではなく画像再生の段階においても、注意が必要である。ここでは、Fig. 1 のレンジ方向の 5,000~10,000 の範囲が陸域を多

Table 1. List of PALSAR data used in the study.

Granule ID	Acquisition Date	Orbit	Path	Row	Off Nadir	PRF (Hz)	Mode	A/D
PASL10C0702231327240801180000	2007/2/23	5769	414	73.8	41.5	1915.0	FBSH	Ascending
PASL10C0704101327270801180001	2007/4/10	6440	414	73.7	41.5	1915.0	FBSH	Ascending

PRF: パルス繰り返し周波数, Mode: 観測モード, A/D: 軌道の種類

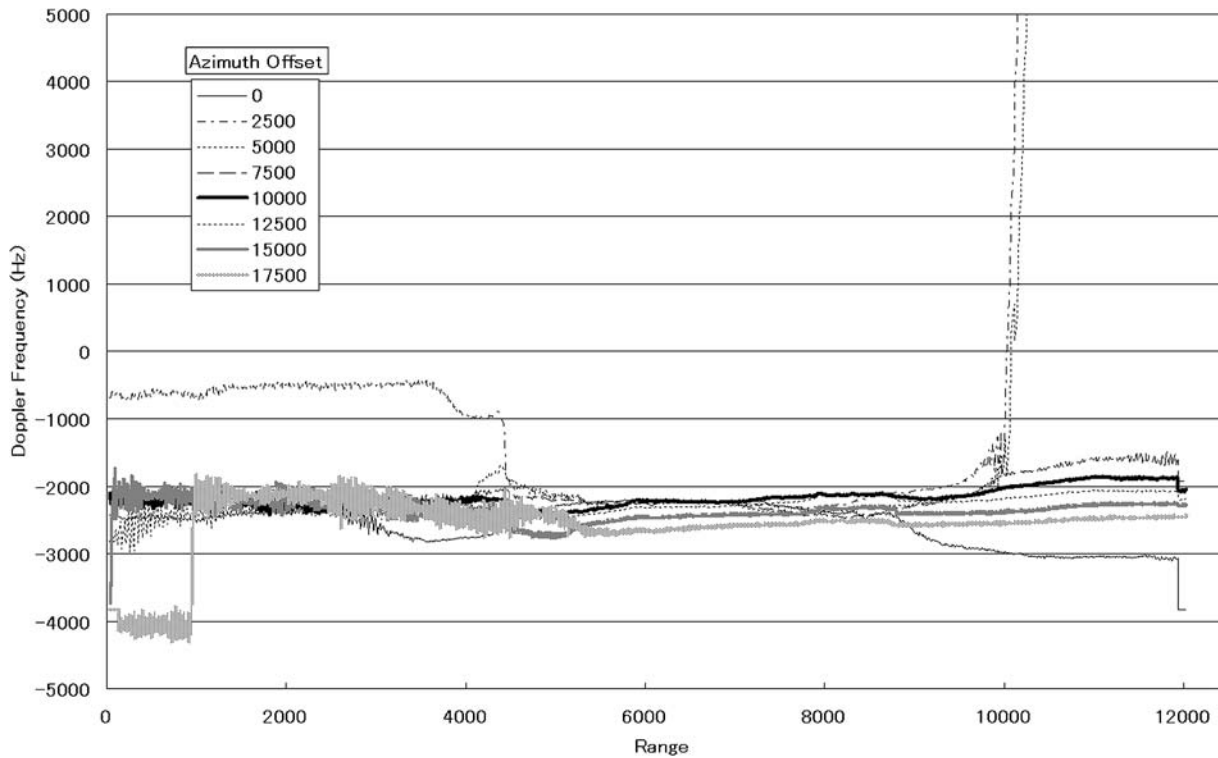


Fig. 1. Doppler frequency change of PALSAR data acquired on 23 February, 2007.

く含むものと考えられる。スレーブ画像についても同様の検討を行い、両者の平均を求めると約 $-2,200$ Hz となり、これを両者のドップラー周波数値として用いた。なお、アジマス方向における平均を用いてレンジ方向に変化するドップラー周波数（いわゆる Natural Doppler）を用いることも考えられるが、単一ドップラー周波数を用いる方が、差分干渉処理の際の地形成分除去をはるかに容易に行うことができるため、ここではレンジ方向に変化しない定数とした。

PALSAR データの処理では、ENVISAT や ERS1/2 などでは問題にならない、Lバンド（波長 23.6 cm）SAR に特有の電波干渉（Radio Frequency Interference; RFI）にも注意する必要がある。Lバンド（1.5/1.6 GHz 帯）は UHF 帯の一部であり、地上波による干渉の可能性がある。RFI は、干渉により搬送波に地表の電波原からの電波が重畳される現象を指し、ノイズの原因と成り得る。Fig. 2 は、RFI の有無を検出するレンジ・スペクトル算出処理の例であるが、PALSAR（2007/2/23 観測のデータ）ではスパイク状のノイズが頻繁に見受けられる。これがいわゆる RFI であり、このような処理により、レンジ圧縮においてどの程度のフィルタリングを施せば良いかを検討する必要がある。アジマス圧縮後に像を結ぶるためには、レンジ圧縮後の位相誤差の補償が正しく行われなければならない。この位相誤差を補償する処理が

オートフォーカス処理であるが、データ本来の（陸域の）ドップラー周波数と著しくかけ離れた値で処理されたレンジ圧縮後のデータでは、オートフォーカス処理がうまく行えなくなる。使用した PALSAR データについては、オートフォーカス処理結果の S/N はマスター画像で 87、スレーブ画像で 78 であり、一般に $S/N > 10$ であれば、アジマス圧縮後の解像度が保たれるため、干渉処理を念頭に置いた画像再生処理は、適切に行われたといえることができる。

(2) 差分干渉処理

干渉処理では、マスター画像とスレーブ画像の精密マッチングが要求される。その許容誤差は、標準偏差で 0.1 画素程度とされる。基線長鉛直成分が十分小さい場合は、観測ジオメトリが大きく違わないため、高精度のマッチングが期待できる。地形起伏が著しく大きい、あるいは基線長鉛直成分が大きい場合は、同じ画素の投影される位置がマスター画像とスレーブ画像の間で大きく異なり、マッチングに注意が必要となる。使用した PALSAR データペアの基線長鉛直成分はシーンの中央で約 430 m であり、PALSAR データの場合は十分干渉が期待できる距離である。マッチングは対応点探索処理により行われる。サブ・ピクセルの精度は、周波数空間への変換と拡大で行われる。マスター・スレーブ間でメッシュ状に対応点を配置し、振幅画像を周波数空間へ変

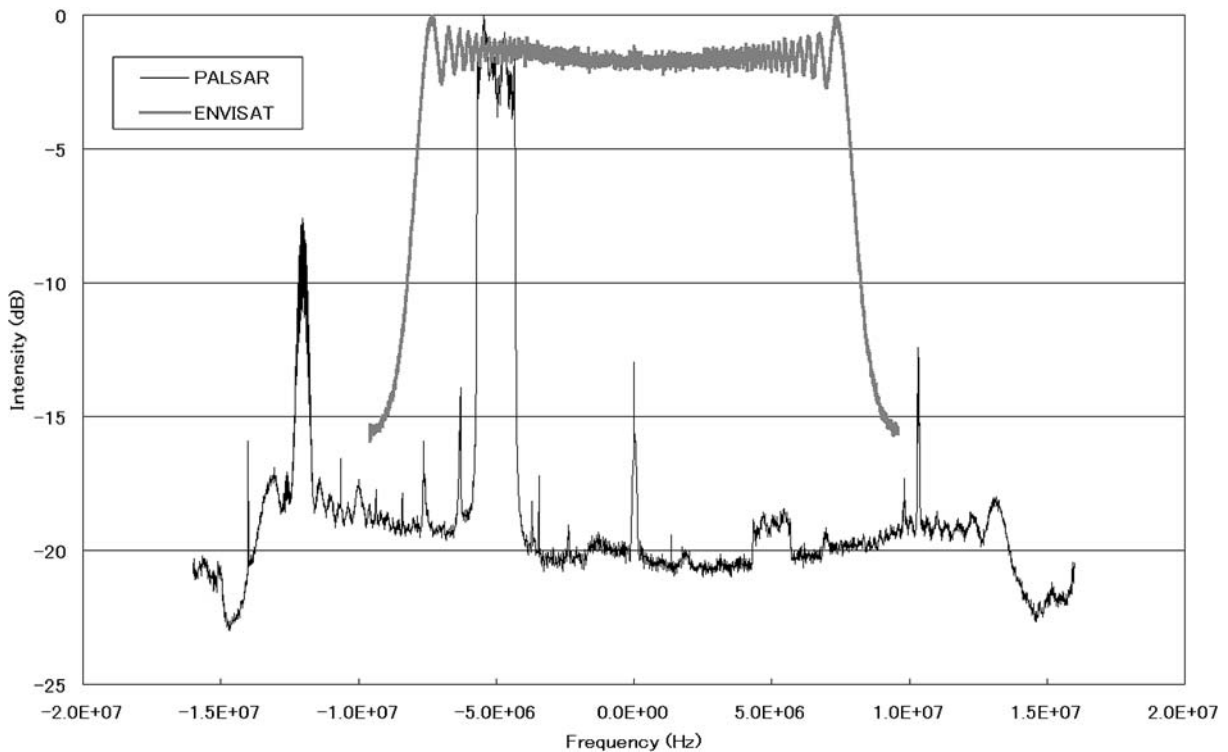


Fig. 2. Range spectrum of PALSAR data acquired on 23 February, 2007 and of typical ENVISAT ASAR data.

換，拡大して実空間に戻し分解能を向上させ，相関係数を計算することにより，対応点を探索する．メッシュ状の対応点群を満たすアフィン変換係数を最小二乗にて求め，スレーブ画像の位置がマスター画像に合うように変換する．使用した PALSAR データについての誤差は，標準偏差でレンジ方向に 0.03 画素，アジマス方向に 0.05 画素であった．

位置が対応するマスター画像，スレーブ画像の SLC を用いて，干渉処理を行い，初期インターフェログラムを得る (Fig. 3)．この際，位相ノイズを低減するために，インターフェログラムはレンジ 4 ルック，アジマス 8 ルックにて作成した．Fig. 3 から判るように，陸域全体に干渉縞が広がっており，極めて良好な干渉状態である．国土地理院発行の数値地図 50 m メッシュ (以下 DEM) から，Fig. 3 の対象範囲をカバーする DEM を切り出し，差分干渉処理の参照データとした．マスター画像，スレーブ画像の軌道情報から計算される基線長に基づき，DEM データから地形位相をシミュレートして，初期イ

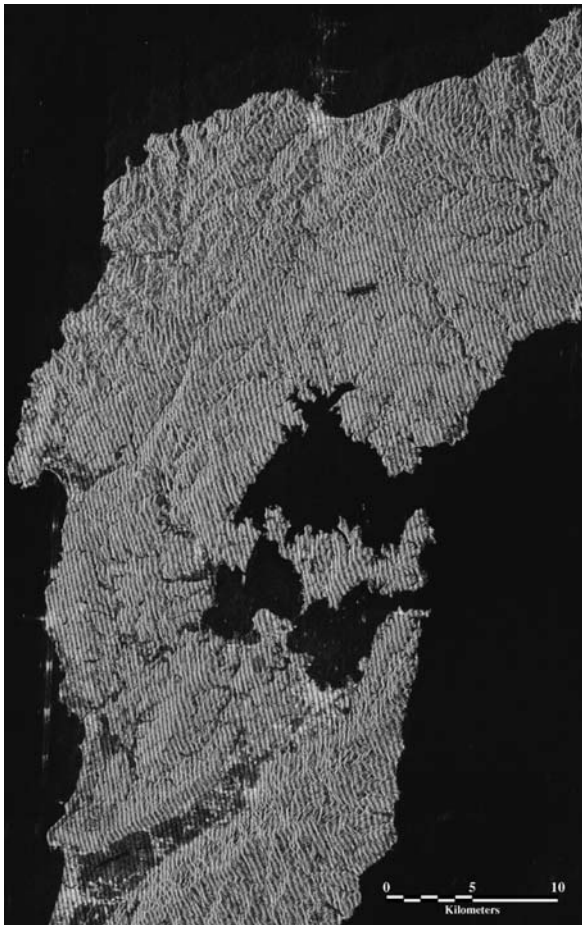


Fig. 3. Initial interferogram calculated from PALSAR data acquired on 23 February, 2007 and 10 April, 2007 (in slant range).

ンターフェログラムから減じて，差分インターフェログラムを得た (Fig. 4)．差分インターフェログラムの 1 サイクル (2π) は，衛星-地表間を往復する間に生じた位相差であり，1 波長の 1/2 である 11.8 cm の距離に相当する．この時点で軌道縞は除去されており，Fig. 4 に含まれるのは，[変動分の縞]+[大気遅延+位相ノイズ]+[軌道推定誤差による縞]である．この段階の図は，国土地理院や JAXA のホームページなどで既に公開されているが，これは $-\pi \sim \pi$ にラップされた位相による表現であり，SAR 処理の経験を有さない一般のユーザには隆起・沈降の識別が困難である．そこで，ここではこれにアンラップ処理*を施し位相を連続させ，変動量に換算した．差分インターフェログラムに対してフィルタリングを施し (Goldstein and Werner, 1998)，相関を得た (Fig. 5)．一般に，差分干渉結果の相関が 0.4 程度以上であれば，干渉結果は信頼できるとされるが，図から判るように，このペアではほぼ全面に亘り 0.7~0.8 を超えており，このことから干渉が良好であることが判る．フィルタリング後の差分インターフェログラムを MCF 法 (Constantini, 1998; Constantini and Rosen, 1999) によりアンラップし位相を繋げ，基線長の再推定を行った．既に変動が現れていると考えられる半島の北西部をマスクし，変動が極めて小さいと考えられる範囲に限って GCP (Ground Control Point: 物理量が既知である各種補正の基準となる点) を配置し，それらについて DEM の標高値と (シミュレート位相を足し戻した) アンラップ後の位相を用いて最小二乗法により高度エラーが最小となる基線長を算出した．さらにその基線長データを用いて，DEM からの地形位相シミュレーション，差分インターフェログラムの計算，アンラップ処理を経て，アンラップ後の位相を視線方向の変動量に換算して，最終的な変動量の図を得た (Fig. 6)．

3. 地表面の変動パターン

アンラップ処理においては，画像内に基準となる点を設け，そこからの位相の変化分を変動量に換算した．ここでは，羽咋市内の人口建築物が密集する JR 羽咋駅付近を基準として，そこでの変動を 0 と仮定した．従って，Fig. 6 の変動量は基準点に対する相対変動量を示している．しかしながら，平成 19 年 6 月~7 月に実施された国土地理院の水準測量結果によると，羽咋市付近においては，平成 13 年の測量結果に対して殆ど変化していないことが判っており (<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007/0711.htm>, cited on 28th February, 2008)，羽咋市付近に基準点を設けたことは地震

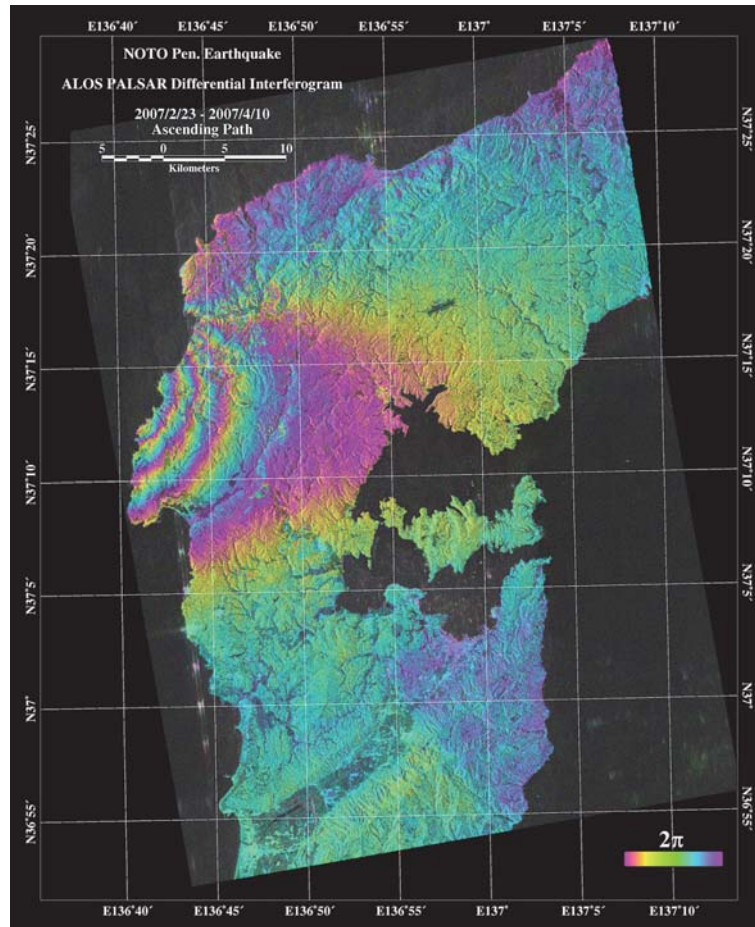


Fig. 4. Differential interferogram calculated from PALSAR data acquired on 23 February, 2007 and 10 April, 2007.

に伴う変動を考察する上で妥当であると考えられる。

Fig. 6 から、変位量は、穴水～能登鹿島付近から門前町赤神～北脇崎にかけての地域に向かって西北西方向に増大し、レーダ視線方向における短縮は最大で 54 cm に達することが判明した。また、猿山～西出山～皆月海岸にかけての一带においても、視線方向で最大 5 cm に達する逆向きの（即ち衛星から遠ざかる）変位が捉えられた。等変位線のパターンは、半島の北西数 km を中心とする同心円状を呈し、報告されている震源位置と極めて調和的である。

4. まとめ

能登半島地震の前後に観測された PALSAR データの差分干渉処理を実施し、地震によって生じた地表変動量の面的分布を捉えることに成功した。インターネット上では位相表現において既に幾つかの報告事例があるが、本論では位相をアンラップし変位量へと変換し、レーダ視線方向の変位量分布図を示すことができた。SAR

データ処理の経験を有さない一般のユーザには、位相表現よりも変位量による表現の方が直接的で判りやすく利用においても優れていることは明白であり、干渉処理結果は、回転する不連続の位相ではなく、変位量にて公開されるべきものとする。

しかしながら、作成した変位量図はレーダ視線方向の 1 次元のものであり、3 次元成分を反映したものではない。また、PALSAR 2 シーンのみの処理結果であるため、大気遅延や局所ノイズを含んでいる可能性は否定できない。今後、同地域に関して多くの PALSAR データが取得されれば、新に多くの干渉ペアが成立しその援用によりインターフェログラムのスタッキングによる解析結果の改善や、ポイントターゲット処理による変動履歴解析が可能となるため、モニタリングも兼ねて、PALSAR による継続観測が望まれるところである。

謝 辞

小論を改善する上で匿名査読者から有益な助言を頂い

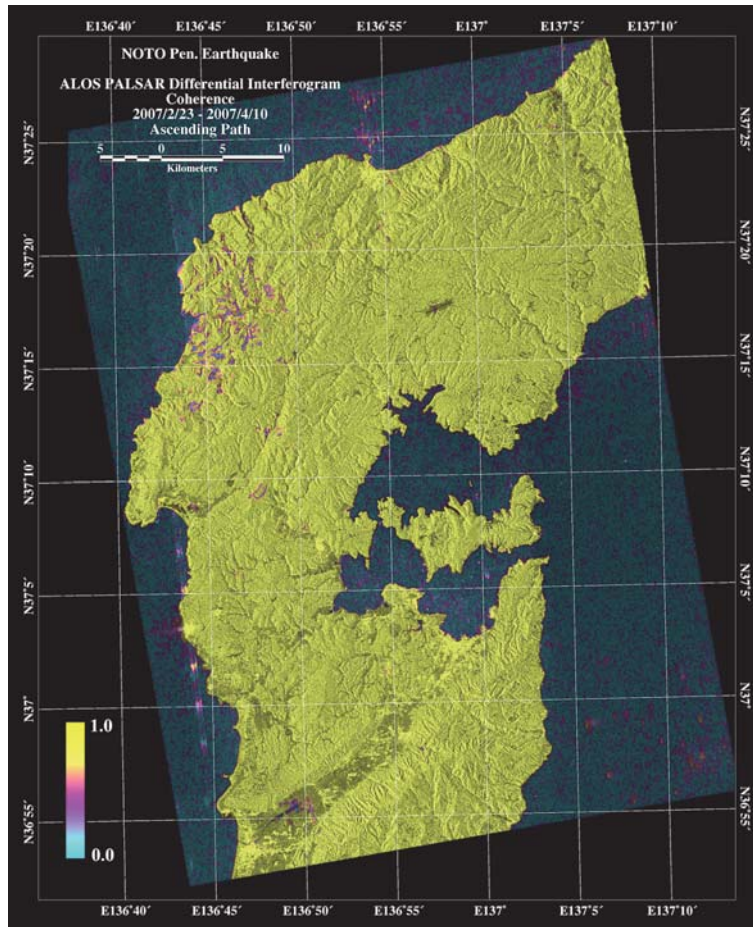


Fig. 5. Coherence map derived from differential interferogram calculated from PALSAR data acquired on 23 February, 2007 and 10 April, 2007.

た。また東京大学地震研究所の佐藤比呂志教授には、小論の構成につき終始御指導を頂いた。深甚なる謝意を表する次第である。

用語解説

レベル 1.0 プロダクト

PALSAR データは、(独)宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と (財)資源・環境観測解析センター (ERSDAC) より配布されており、共通する標準プロダクトとしてレベル 1.0, 1.1 および 1.5 が存在する。レベル 1.0 は、画像データではなく信号データであり、そのままでは画像化できない。画像化には SAR プロセッサと呼ばれる SAR 処理ソフトウェアが必要となる。レベル 1.1 は画像再生処理により作成されるスラント・レンジ上の複素画像 (いわゆるシングルルック・コンプレックス; SLC) であり、画像処理ソフトウェアにて画像を出力できる。レベル 1.5 は、グラウンド・レンジに変換され、地図投影された画像データである。

PRF

SAR センサは、レーダ波の送信と受信を繰り返しながら移動するが、繰り返しの間隔をパルス繰り返し間隔 (Pulse Repetition Interval: PRI), その逆数をパルス繰り返し周波数 (Pulse Repetition Frequency: PRF) と呼ぶ。PRF はアジマス方向のサンプリング周波数でもある。

ドップラー周波数, ドップラー・アンビギュイティ推定

SAR 処理の最も重要な部分が、ドップラー・パラメータと呼ばれるこれらの値の決定である。SAR システムでは、センサと地表のターゲット間の距離は時間とともに変化する。この距離、即ちターゲットからの信号の位置を決定するパラメータが、ドップラー周波数とその変化率である。概念的には、センサとターゲット間の距離は時間の関数であり、1 階微分がドップラー周波数、2 階微分がドップラー周波数変化率に相当する。SAR システムではアジマス方向のサンプリング周波数は PRF であり、従って見掛けのドップラー周波数は $-PRF/2 \sim PRF/2$ の値を取ると考えられるが、真のドップラー周波数は、これに PRF の整数倍を加えたものとなる。この整数は曖昧さを持つために、ドップラー・アンビギュイティ・ナンバーと呼ばれる。ドップラー・アンビギュイティ推定処理によりこれを求め、真のドップラー (中心) 周波数を求める。

エコー

SAR シグナルデータはエコーと呼ばれるレコードから構成され、レベル 1.0 プロダクトでは、10 秒間の受信信号が 28,000~33,000 程度のエコー群として記録されている。地表の同一ターゲットからの信号は、連続する多数のエコーに亘って記録されている。

レンジ圧縮, アジマス圧縮

SAR システムでは、地表の 1 点のターゲットはパルスの

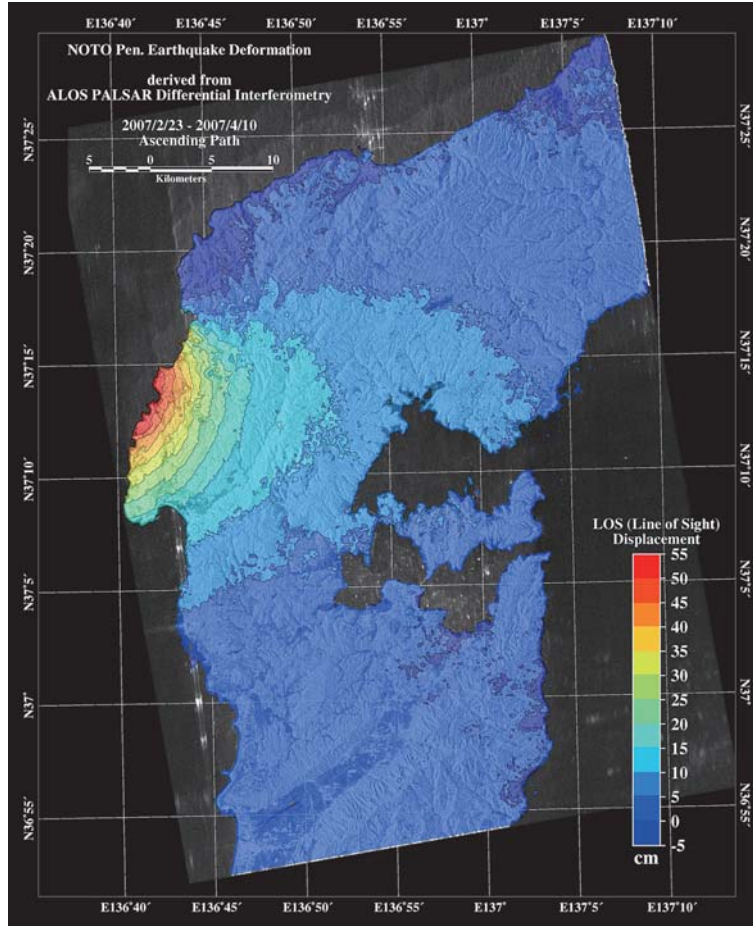


Fig. 6. Surface deformation in LOS direction derived from differential interferometry using PALSAR data pair.

長さ (40 μ 秒) の間だけ照射される。移動するアンテナによって照射され、地表のターゲットに散乱された信号は、多数の連続するエコーの上で、レンジ方向・アジマス方向とともに離散して“分布”している。これらのレンジ方向・アジマス方向に離散分布する信号を一点に“集約する”処理が、レンジ圧縮・アジマス圧縮と呼ばれる処理である。処理はレンジ方向 (エコー毎) を先に行い、次いで圧縮されたデータについてアジマス方向 (連続するエコー) の処理を行う。

オートフォーカス

ドップラー周波数は、ドップラー (中心) 周波数と変化率、および画像の位置 (即ち時間) によって算出されるが、その位相精度を向上させる処理がオートフォーカス処理である。通常は、この処理によってドップラー・アンビギュイティ・ナンバーの補正も行われる。

アンラップ処理

差分干渉処理の結果は、 $-\pi \sim \pi$ までの回転する位相として得られる。 $-\pi$ から π までの変化が空間で連続しており、さらに別の $-\pi$ から π が連続する場合、それらは 4π 分の連続する位相変化を表している。このように $-\pi \sim \pi$ にラップ (wrap) された位相を連続させる処理を、アンラップ (unwrap) 処理と呼ぶ。位相は、画像内の一点の位相を基準としてアンラップされる。アンラップされた位相は、レーダ波が衛星と地表を往復する間に生じた相対的な遅れに相当

し、従ってその 1/2 が地表の変位量を反映しており、これに波長 (Lバンドの場合 23.6 cm) を乗じて視線方向の相対変位量を得る。

文献

- Constantini, M., 1998, A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **36**, 3, 813-821.
- Constantini, M. and P.A. Rosen, 1999, A generalized phase unwrapping approach for sparse data. Proceedings of IGARSS '99, Hamburg, 28 June-2 July, pp. 267-269.
- Goldstein, R.M. and C.L. Werner, 1998, Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4035-4038.
- Nishimura, T., S. Fujiwara, M. Murakami, M. Tobita, H. Nakagawa, T. Sagiya and T. Tada, 2001, The M6.1 Earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan, observed by satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 635-638.
- Ozawa, S., M. Murakami, S. Fujiwara and M. Tobita, 1997, Synthetic Aperture Radar Interferogram of the 1995 Kobe Earthquake and its Geodetic Inversion, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2327-2330.

- Ozawa, T., S. Nishimura and H. Ohkura, 2006, Crustal Deformation Associated with the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake Derived from ENVISAT/InSAR and Fault-slip Modeling, *Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **69**, 1–6.
- Tobita, M., S. Fujiwara, S. Ozawa, P.A. Rosen, E.J. Fielding, C.L. Werner, M. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta and M. Murakami, 1998, Deformation of the 1995 North Sakhalin earthquake detected by JERS-1/SAR interferometry, *Earth, Planets and Space*, **50**, 313–325.
- Tobita, M., M. Murakami, H. Nakagawa, H. Yarai, S. Fujiwara and P.A. Rosen, 2001, 3-D surface deformation of the 2000 Usu eruption measured by matching of SAR images, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4291–4294.
- Yarai, H., T. Ozawa, T. Nishimura, T. 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.

(Received February 4, 2008)

(Accepted March 17, 2008)