

合成開口レーダーによる地震活動に
関連する地殻変動観測手法について

平成 23 年 10 月 7 日

地震調査研究推進本部 地震調査委員会

合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法について

目次

1	はじめに	・・・ 1
2	解析の原理	・・・ 2
	2.1 SAR 干渉解析	
	2.2 ピクセルオフセット解析	
3	解析手法の標準化について	・・・ 11
	3.1 SAR 干渉解析の標準的な解析手法	
	3.1.1 解析手法	
	3.1.2 添付するパラメーター一覧	
	3.2 解析事例	
4	技術的課題の検討	・・・ 29
	4.1 軌道の推定	
	4.2 対流圏の影響（水蒸気による遅延）	
	4.3 電離層の影響	
	4.4 長期的な変動の抽出に伴う課題	
	4.5 ScanSAR を利用した解析	
	4.5.1 ScanSAR データを用いた解析	
	4.5.2 ScanSAR-ScanSAR 干渉解析における適用条件	
	4.5.3 チリ地震に関する解析事例	
	4.5.4 まとめ	
	4.6 ピクセルオフセット解析	
	4.6.1 ピクセルオフセット解析の長所	
	4.6.2 ピクセルオフセット解析の課題	
5	今後の課題	・・・ 51
6	「だいち」の運用停止を受けた当面の対応について	・・・ 53
	付録 1 SAR 干渉解析結果の表現の標準化の指針	・・・ 58
	1. 記載事項	
	2. SAR 干渉画像の表現	
	3. 記載例	
	付録 2 衛星データ解析検討小委員会の活動報告	
	1. 実際の解析事例、評価文のまとめ	・・・ 62
	1.1 小委員会発足前に地震調査委員会の評価に用いられた事例	
	1.2 地震調査委員会に報告した事例	
	1.3 その他の事例	

2. 委員会の設置、目的
3. 委員会の構成、会議開催状況

付録 3 用語集

・ ・ ・ 88

1. はじめに

我が国において高頻度に発生し、多くの人命や社会的被害をもたらしてきた地震は、我が国で発生する自然災害の中でも、国民の安全・安心を脅かす要因として最も深刻なものの一つである。地震調査委員会は、地震に関する観測、測量、調査又は研究を行う関係行政機関、大学等の調査結果等を収集し、整理し、及び分析し、並びにこれに基づき総合的な評価を行っており、その活動は、進歩し続ける観測や解析の技術を随時取り入れながら、常に最新・最高の科学的水準に合致したものでなければならない。

ひずみの蓄積過程、地震の破壊過程、余効現象のそれぞれの段階で引き起こされる特徴的な地殻変動は、地震活動を理解するための基本的なデータであり、それを時間的にも空間的にも高い密度で、高精度に観測する技術や、それらから最大限の情報を読み取る解析技術の高度化は、常に地震学の重要目標の一つになっている。近年、SAR を搭載した衛星が、各国から次々と打ち上げられ、宇宙から全地球を満遍なく定期的に観測したデータを用いて、地震活動に伴う地殻変動を観測する技術が急速に進展している。なかでも、2006年1月に打ち上げられた我が国の陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) は、運用開始直後から、我が国を含めた世界各地の様々な地殻変動を明瞭に捉え、地震活動の理解の高度化に大きな可能性を示した。

衛星データ解析検討小委員会(以下、小委員会)は、衛星データを用いた地震活動に関する資料の評価を行い、かつ衛星データの活用方策を検討するために地震調査委員会下に設置され、専門的立場からそれらの審議を重ねてきた。小委員会の審議において、特に力点をおいたポイントは、標準的データ処理手法の提案、精度と信頼性についての客観的評価、将来に向けての技術的課題の明確化である。各委員の熱心な貢献により、それぞれにおいて、一応の結論を得ることができた。特に、地震調査の基礎資料として標準的な解析方法及び解析結果の表現方法の取りまとめ、広域の定常的な地殻変動の検出方法の開拓、観測誤差の原因推定、信頼性の評価などに、一定の成果を上げることができた。それらを集約して、本報告書を作成した。

なお、「だいち」は、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に係る集中的な観測の実施の途上の5月12日に運用を終了した。世界的にみても大きな特徴のあるLバンド衛星が失われた影響は大きく、現在打ち上げ計画が推進されている次号機の順調な打ち上げと観測開始が強く待たれる。

小委員会の活動は、衛星の打ち上げと運用及びデータ取得・提供については経済産業省及び宇宙航空研究開発機構(JAXA)に、地震災害時の観測要求からデータ提供についてはJAXA及び地震ワーキンググループ事務局である国土地理院に、また、SARの技術的研究や地震調査の精力的実施と小委員会への成果やデータの提供については委員会メンバーが所属する各機関に、それぞれ多くを負っている。これまでの御協力に関して、心からの謝意を表す。

小委員会の成果が、今後の地震調査委員会の活動に資し、さらに、関連する技術研究の開発に少しでもつながることがあれば、関係者一同の最大の喜びとするところである。

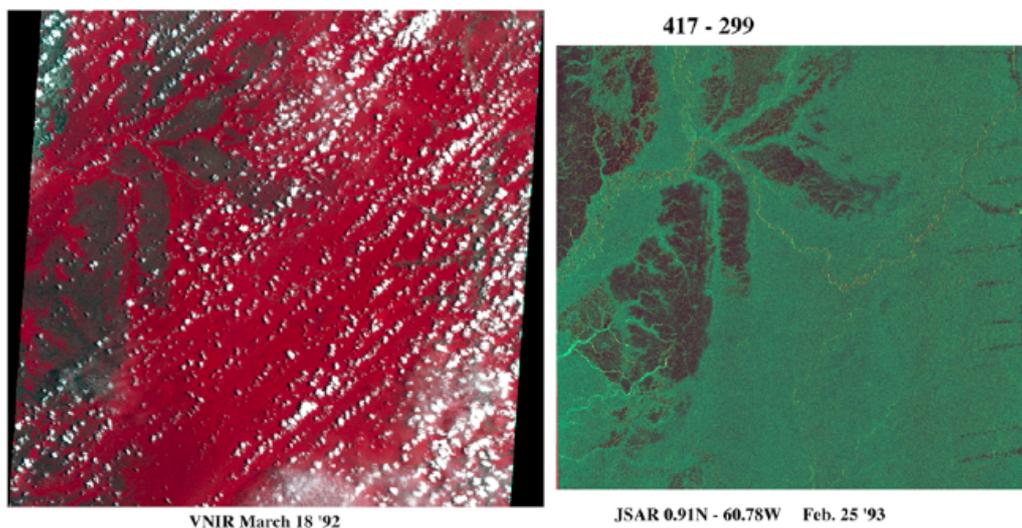
2. 解析の原理

SAR (Synthetic Aperture Radar、和名：合成開口レーダー) は、観測対象物の認識と距離を計測する従来型レーダー (RADAR) を進化させたもので、相関処理等の特殊な処理をすることで、高分解能で観測対象物 (地上) の画像を取得できる映像レーダーである。SAR は 1950 年代に米国の企業により開発され、常に雲に覆われる南米の地質調査に利用された。人工衛星用 SAR は 1972 年 2 月のアポロ 17 号をはじめとして、1978 年 6 月の NASA SEASAT-SAR の地球観測に始まり、欧州宇宙機関、日本、ロシア、ドイツ、イタリア、カナダなどで開発が進んだ。2010 年以降は各国から SAR 衛星の打ち上げ計画が目白押しであり、SAR ゴールデンエイジとも呼ばれている。

宇宙からの高分解能センサとして、光学センサと SAR が代表的である。SAR が近年増加している理由として、1) 天候に左右されずに観測可能なこと、2) 振幅のみならず距離情報の取得が可能ながあげられる (特に、後者は地殻変動検出の大きな要因である)。

図 2. 1 に光学センサと SAR の画像例を示す。光学画像は晴天時には非常に多くの情報を含む。しかし、曇天時にはそうではない。特に、熱帯雨林では雲で対象物がさえぎられることが多く、晴天データの収集には 2~3 年を要する。近年重要な課題になってきた森林監視のための定期的なデータ取得には、天候に左右されない SAR が必要である。

Difference of microwave and optical images for dense forest



Comparison of OPS and SAR

図 2. 1 光学画像 (左) と SAR 画像 (右) の比較

SAR の受信信号(g)は送信信号(f)に比べ往復時間分だけシフトするとともに、その振幅は観測対象物の反射係数やレーダーの特性等に比例する。

$$g(t) = A \cdot f\left(t - \frac{2R}{c_0}n\right) \quad (2.1)$$

R はレーダーと対象物との距離、 c_0 は宇宙空間に於ける光速、 n は屈折率、 A は地面の反射係数、 t は時間である。屈折率とは光や電波が媒質中を進行するときの「抵抗」である。往復距離と屈折率が後で述べる SAR 映像化の基本となり、誤差源にもなる。

図 2. 2 に示すように SAR は衛星の飛行とともに地面に対して一定のパルス幅 (ALOS/PALSAR では 27 マイクロ秒) で周波数変調 (FM) した波を発射する。ALOS は高さ 691.25 km を飛行するために、この信号は地表面から約 5 ミリ秒後に返ってくる。SAR はこのような信号を毎秒約 2000 回という頻度で繰り返し発射し、同じ繰り返し頻度で時間信号列を受信する。

SAR 映像化処理は、このように得られた受信信号列を相関処理 (圧縮処理) することであり、その参照信号として、レーダーから送信された周波数変調波、地上との相対速度とその時間変化によるドップラー周波数およびそのドップラー周波数変化率を用いる。従って、焦点のあった画像を得るために、参照信号を精度よく作成すると共に、周波数安定性、アンテナパターンの精度、低い雑音特性などのレーダー特性に高い安定性が求められる。相関処理後の信号は (2. 2) で表現される (島田、1999)。

$$S_{ra}(R, x) = A(R, x) \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi B_w (R - R_0)}{C}\right) \operatorname{sinc}\left(2\pi \left(\frac{x - x_0}{L}\right)\right) \exp\left(-\frac{4\pi R_0}{\lambda} j\right) \quad (2.2)$$

$S_{ra}(R, x)$ はレンジ、アジマス圧縮した信号波形、 R はレンジ座標値、 x はアジマス座標値、 B_w はバンド幅 (FM 変調の帯域幅)、 C は光速、 L はアンテナアジマス長、 R_0 は基準となるレンジ距離、 x_0 は基準となるアジマス距離、 λ は波長、 $\operatorname{sinc} X$ は $\sin X / X$ で表される関数、 A は観測対象物の反射係数、 j は虚数単位である。このように、SAR の映像データは複素数で表現され、絶対値は観測対象物の反射係数に、位相は衛星と観測対象物の距離に比例した情報を表す。本式は SAR の一分解能セルに 1 散乱点がある場合を示すが、非常に多くの散乱体が含まれる場合には、全ての寄与分についての総和で得られる。

ここでの要点

- 1) SAR 画像の明るさは地面の反射係数に比例する。
- 2) 分解能 (セルの大きさ) はレンジ方向には帯域幅に反比例、アジマス方向にはアンテナ長に比例する。
- 3) 衛星と観測対象物の距離に比例する指数項が含まれる。

SAR は離れた場所の映像化を行うもので、(2. 1) 式にあるように、時間遅れは電波伝搬路上の媒質により変化する。この時間遅延を変化させる因子が屈折率であり、電離層によるものと大気 (水蒸気、乾燥空気) によるものがある。

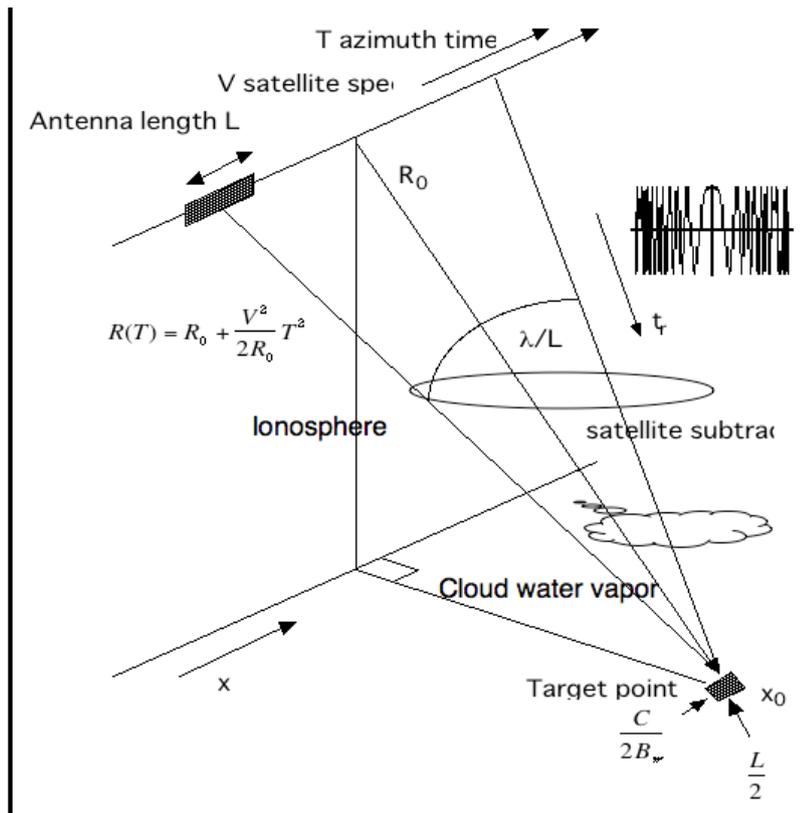


図 2. 2 SAR の観測座標系と介在する誤差要因

SAR の映像信号（受信信号を相関処理したもの）は数学的な表現が容易であるが、以下に述べるような留意点がある。

- 1) SAR のサンプリングに使用している時計の安定性が重要である（ただし、最近の衛星は非常に安定な GPS 時計に同期しており、誤差要因から外れる）。
- 2) スペックル雑音：SAR の分解能は帯域幅とアジマス方向の積分時間（あるいは合成開口時間）に依存し、両者を調整することで高分解能化が可能である。現状の分解能は数メートル程度であり、そのなかには波長オーダーの間隔で数十～数百の独立な散乱体が含まれる。受信信号はこれらからの反射信号が合成されるために、衛星の位置と散乱体の位置関係によっては映像の明るさが平均値に対して乗算分布する。
- 3) 観測がレンジ・ドップラー（前者が距離の計測、後者が方向の計測）で行われるために、衛星直下の観測はできない。直下から横方向約 30～40 度傾けての観測が多い（図 2. 3）。
- 4) レイオーバー、シャドウイング、レンジシフト、アジマスシフト、フォアショートニングについて図 2. 4 に示す。斜め照射の為に、山岳地帯では、高いところが低いところよりもレーダーに近づくことや、山の反対側で電波が照射されないこと、山の高いところがレンジ方向に近づくこと、ドップラー周波数がゼロでない場合に高さのある対象物が衛星進行方向にずれること、画像が縮むこと等が発生する。これらは、主として SAR の位置誤差に関係するもので、地図に合わせ込みをする場合に補正が必要な要因となる。

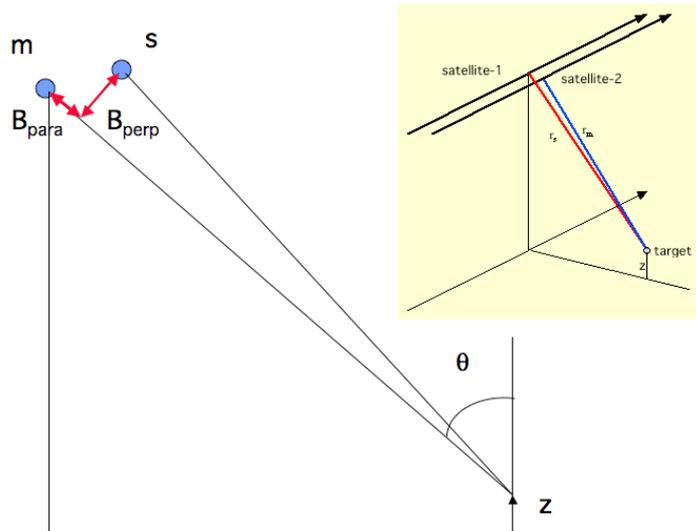


図 2.3 干渉 SAR の座標系について

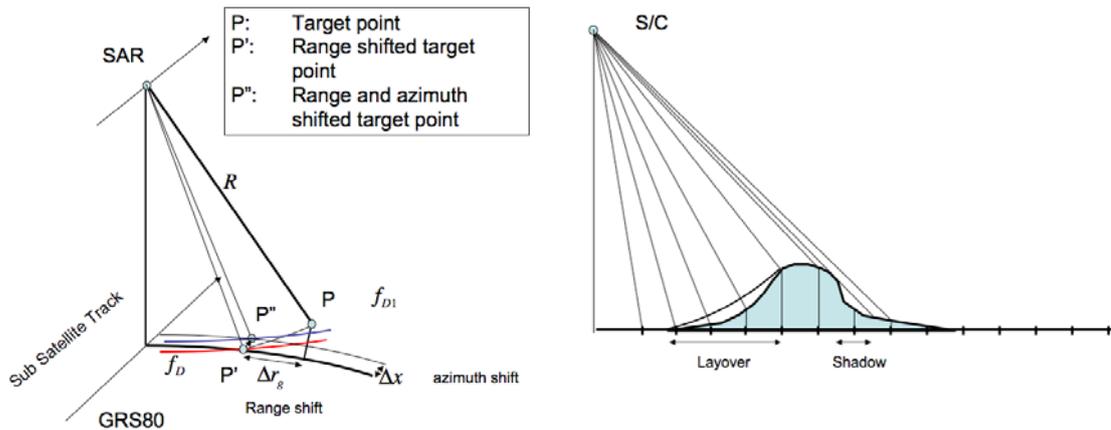


図 2.4 観測対象点 P が準拋楕円体より高い為に、SAR 画像の基準投影面 (GRS80) 上、衛星直下点側に画像がシフトすることをレンジシフト、ドップラー周波数が 0 でないことにより衛星進行方向に画像がずれることをアジマスシフトという (左図を参照、shimada (2010))。ただし、後者は画像再生時にゼロでないドップラー周波数を用いるときに発生する。画像全体がレンジシフトをし、全体として詰まった感じの画像になることをフォアショートニングという。また、SAR が距離毎に映像化することで高い山の山頂が山の麓よりも更に衛星直下点側に移動することをレイオーバー、電波が手前の山等で遮られて照射されない領域が発生することをシャドウイングという (右図参照)。

一般に変化抽出とは、異なる二期間に発生した変化量あるいは変化域を抽出することをいう。SAR 画像によって、地表の反射係数の変化を抽出することも可能であるが、ここでは、地殻変動に特化して話を進める。

SAR 画像が (2.2) 式で振幅と位相で表現されるように、1) 振幅画像の変化をとらえるものと、2) 位相情報の変化をとらえるものの二つのアプローチがある。ここでは便宜的に、後者を SAR 干渉処理、前者を変化抽出として、以下で方法、得られる情報、そして精度を記述する。

これら 2 種類の地殻変動抽出処理は「二枚の画像が隅から隅まで平均的に一致するこ

と」を必要条件とするが、映像化に関する処理パラメータ（ドップラー周波数と地上点のサンプリング間隔の共通化）を調整することで、それらの処理が容易になる（ただし完全に一致する訳ではない）。

2. 1 SAR 干渉解析

SAR 干渉解析では異なる二時期に観測した画像を極力同じ処理パラメータで処理をして、二枚の画像の位置合わせを正確に行った後に、位相差 (ϕ) を計測する。

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda_0}(r_m n_m - r_s n_s) \quad (2.1.1)$$

λ_0 は宇宙空間における波長、 r は衛星から観測対象物までの距離、 n は屈折率を表す。添字 m はマスター画像（基準画像）を、 s はスレーブ画像（比較画像）を表す。ここに、(2.1.1) 式は SAR 画像を構成する個々の散乱点（反射点）に対して成立する。一方、SAR 映像は、分解能と称される数メートル四方に含まれるすべての散乱体（電波の反射体）からの反射電力と位相量の総和として表現され、SAR 画像の位相差はそれらの総和で表現される（(2.1.1) 式は煩雑さをさける為、そのうちの 1 散乱点に対する表現であるが、本来は、含まれる全ての散乱点に対する平均的な表現となる）。位相差はそれらの位相量の総和であり、ピクセル内の反射体の平均的な位置ずれ量を位相に変換したものとなる。

(2.1.1) 式には、基線長 (B_{perp} , B_{para})、観測対象物の高さ (z)、二時期間の衛星と地表面間距離の変化 (dr) が陰に含まれる。図 2.3 を参考に、これら微小量をテーラー展開すると、

$$\begin{aligned} \phi &= -\frac{4\pi}{\lambda_0}(r_m n_m - r_s n_s) \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda_0}(r_m n_m - r_s n_m + r_s n_m - r_s n_s) \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda_0} n_m (r_m - r_s) - \frac{4\pi}{\lambda_0} r_s (n_m - n_s) \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda_0} n_m \left(\frac{B_{perp} z}{r_m \sin \theta} + B_{para} + dr \right) - \frac{4\pi}{\lambda_0} r_s (n_m - n_s) \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

となる。 θ はマスタ軌道の入射角、 r はスラントレンジである。これを地殻変動量について整理すると、

$$dr = -\frac{\lambda_0}{4\pi n_m} \left\{ \phi + \frac{4\pi}{\lambda_0} r_s (n_m - n_s) \right\} - \left(\frac{B_{perp} z}{r_m \sin \theta} + B_{para} \right) \quad (2.1.3)$$

となる。このように、地殻変動量は含まれる変数の精度に依存する。位相量は以下の演算で行われ、その精度は、(2.1.5) 式で表現される。

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{R_e(\langle C_m \cdot C_s^* \rangle)}{I_m(\langle C_m \cdot C_s^* \rangle)} \right\} \quad (2.1.4)$$

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{1-\gamma^2}{2N\gamma^2}} \quad (2.1.5)$$

$$\gamma = \frac{|\langle C_m \cdot C_s^* \rangle|}{\sqrt{\langle C_m \cdot C_m^* \rangle \langle C_s \cdot C_s^* \rangle}} \quad (2.1.6)$$

Re、Im は複素数の実部と虚部を、N は平均個数、 γ は二画像のコヒーレンス、(干渉度)、 $\langle \rangle$ は平均処理である。コヒーレンスは各々の画像の平均電力で規格化されており、 γ は 1 以下の正の値を取る。

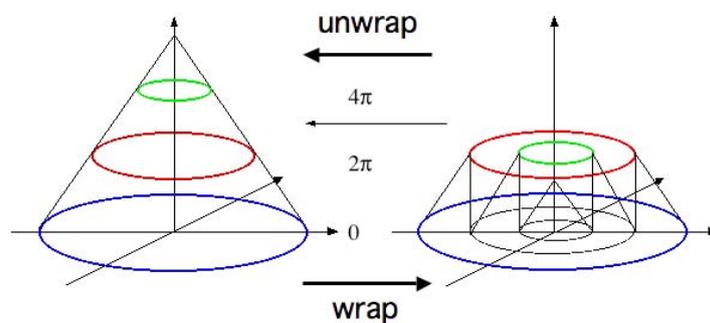
なお、SAR 干渉解析で得られる地殻変動量は衛星と観測点との視線方向成分である。

アンラップ (unwrap)

(2.1.3) 式によると、位相量 ϕ と距離変化量 dr は一対一に対応するはずであるが、 ϕ は (2.1.4) 式で求まる為に、その値域は $-\pi \sim \pi$ に限定される (ラップされる)。この制限を取り除くのがアンラップ処理である。処理の概要を図 2.5 に示すが、 $-\pi \sim \pi$ に押し込まれた位相量を連続量に変換する処理である。この処理は困難で昔から大きな課題であった。一次元のアンラップは、伊藤の方法 (Itho, 1982) でほぼ解決できるが、SAR 干渉解析で扱うのは二次元アンラップ処理であり、これまでに、ブランチカット法 (Goldstein et al., 1988) を始めとして様々な方法が開発された (Ghiglia et al., 1998)。一様に困難なのは、コヒーレンスの良くない (ノイズの多い) 画像をアンラップする場合である。また、山岳地帯ではレイオーバー、シャドウイングのように信号の品質が悪い場所が多く、問題を複雑にする。近年は時間が掛かるがマニュアルで二次元アンラップをするブランチカット法が信頼されている。

Unwrapping

Continues the wrapped phase ($-\pi \sim \pi$) to unwrapped phase.



method : the branch cut , the least square method, etc.

図 2.5 ラップ、アンラップの概念図

誤差

誤差については、影響の大きい項目をいくつか取り上げる。

観測誤差（位相計測）

観測誤差は、(2.1.5)式で表現されるようにランダムに発生する誤差であり、コヒーレンス (γ) とサンプル数で表現される。また、標準偏差は、サンプル数を選択することで30度程度に押さえることは可能であり、これは、地殻変動量1cmに対応する。

軌道誤差

軌道誤差は、ALOS で約40cm（1シグマで6cm程度）である。(2.1.3)式から見られるように、地殻変動を数cmで決めようとする、同程度の精度が必要になる。

近年どの地球観測衛星も軌道決定精度が向上しており、ほぼ許容可能な精度に近づいてきたと言える。補正方法については、いくつか提案されているが、単一シーンでの軌道補正よりも複数シーン（1パス）を用いた軌道補正が効果的である。

電離層誤差、大気遅延誤差

これらは、(2.1.2)式の n （屈折率）にあたる量で、モデル化が非常に困難である。空間的、時間的に（程度によるが）ゆったりとした変動であり、この変動は地殻変動の数cmから数10cmに相当する量に及ぶ。補正は非常に困難であり、正確な補正のためのモデル化が最大の課題である。

標高誤差

(2.1.3)式にあるように、標高と B_{perp} は積の形で含まれる。よって、標高の精度は B_{perp} の値に依存する。仮に B_{perp} を100mとすると、高さの誤差が10mとしても、位相誤差には7度、地殻変動に相当する量で0.22cmにしかならず、大きな誤差にはならない。

2. 2 ピクセルオフセット解析

ピクセルオフセット解析では、二つの振幅画像間の位置ずれを計測することで変動量を求める。通常、二時期に取得した画像間には、(1) 画像全体にかかる位置ずれ(平行移動、回転、大きさ)と、(2) 画像の一部でおこる局所的な位置ずれが含まれる。(1)の画像全体にかかる位置ずれは、主にセンサの位置や姿勢の違いに起因し、(2)の局所的に現れる位置ずれは、地物の位置の変化(地殻変動)に起因する。

地殻変動による変化を抽出するためには、まず、二つの画像間でマスタ画像に対するスレーブ画像のオフセットを求める。そして、求めたオフセットから、(1)の画像全体にかかる位置ずれの成分を取り除くことで(2)の局所的な位置ずれ量を得る。具体的には、画像マッチングによって二つの画像間で対応点(ピクセル)を探し、各ピクセルについてオフセットを計算する。得られたオフセットを用いてスレーブ画像をマスタ画像に合わせるための座標変換式(多項式)を求める(図2.6)。この変換式を用いて(1)のオフセットを計算し、各ピクセルにおける二つの画像間のオフセットから差し引くと、(2)の局所的な地殻変動によるオフセットが残る。

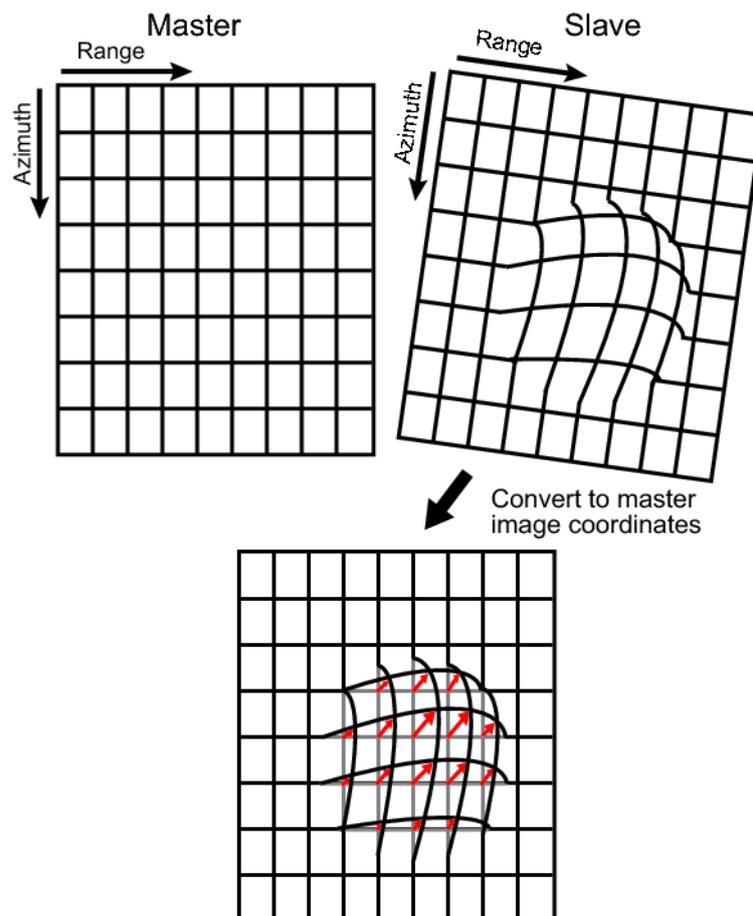


図2.6 ピクセルオフセット解析の概念図。赤矢印が変動を示す。

ピクセルオフセット解析によって得られる位置ずれの情報は、画像の横方向と縦方向の2つの成分からなる。レーダー座標系の画像であれば、縦方向はアジマス方向、横方向は

レンジ方向の変動成分に対応する。アジマス方向の成分は、そのまま地表面におけるアジマス方向の変動を表す。一方、レンジ方向の成分は、衛星と地表面を結ぶ線に沿った変動を表す (図 2. 6)。

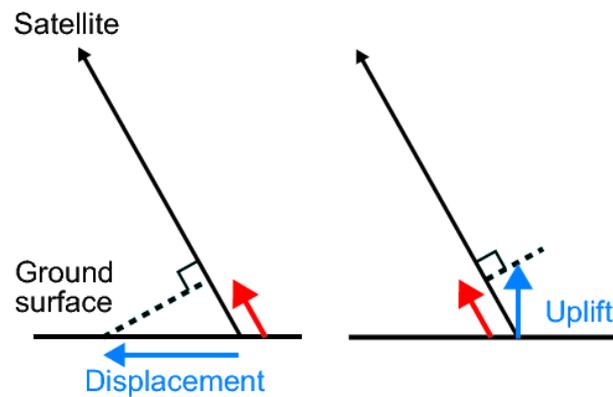


図 2. 7 レンジ方向の位置ずれ。赤矢印がレンジ方向の変動を示す。

ピクセルオフセット解析では、画像に対してオーバサンプリング処理を施しマッチングを行うことで、画像空間分解能の 10 分の 1 程度の変動を検出することができる。ただし、解析に使用する画像の画質や観測条件、画像マッチングの条件によって、変動計測精度は低下する。精度が低下する要因としては、画像ノイズや画像マッチング時の相関窓の大きさがある。相関窓が大きいと対応点は求まりやすいが、相関の高い領域の影響を受けるため、オフセットが正しく求まらない可能性がある。また、画像中に占める地殻変動領域の割合が大きいと、スレーブ画像をマスタ画像に合わせるための座標変換式を正しく求められなくなり、結果として(1)の位置ずれ成分を正確に除くことが難しくなる。このほか、二つの画像取得時のセンサ位置の違いも精度低下の要因となる。センサの位置が大きく離れている (B_{perp} が大きくなる) と、画像間で地形の倒れこみの度合いが変わるため、標高差の大きいところで変動を誤抽出する可能性が高くなる。

3. 解析手法の標準化について

地震調査委員会に提出される SAR 干渉解析結果の主な役割は、地震活動を理解するための基本的なデータの 1 つとして空間分解能の高い地殻変動情報を提供することである。SAR 干渉解析手法は多種多様であるため、SAR 干渉解析結果に関する提出資料も多種多様になる。そこで、より効率的かつ効果的に SAR 干渉結果を作成・利用するため、ガイドラインを策定した。

ここでは、SAR 干渉解析の標準的な解析手法について記述する。

3. 1 SAR 干渉解析の標準的な解析手法

3. 1. 1 解析手法

SAR 干渉解析処理のフローチャートを図 3. 1. 1 に示す。処理手順としては 1. 生データの受信、2. 複素画像の作成、3. 位置あわせ、4. 干渉画像の作成、5. 軌道縞・地形縞の除去、6. 位相アンラップ、7. ジオコーディングなどが挙げられる。以下、各処理について順に説明する。

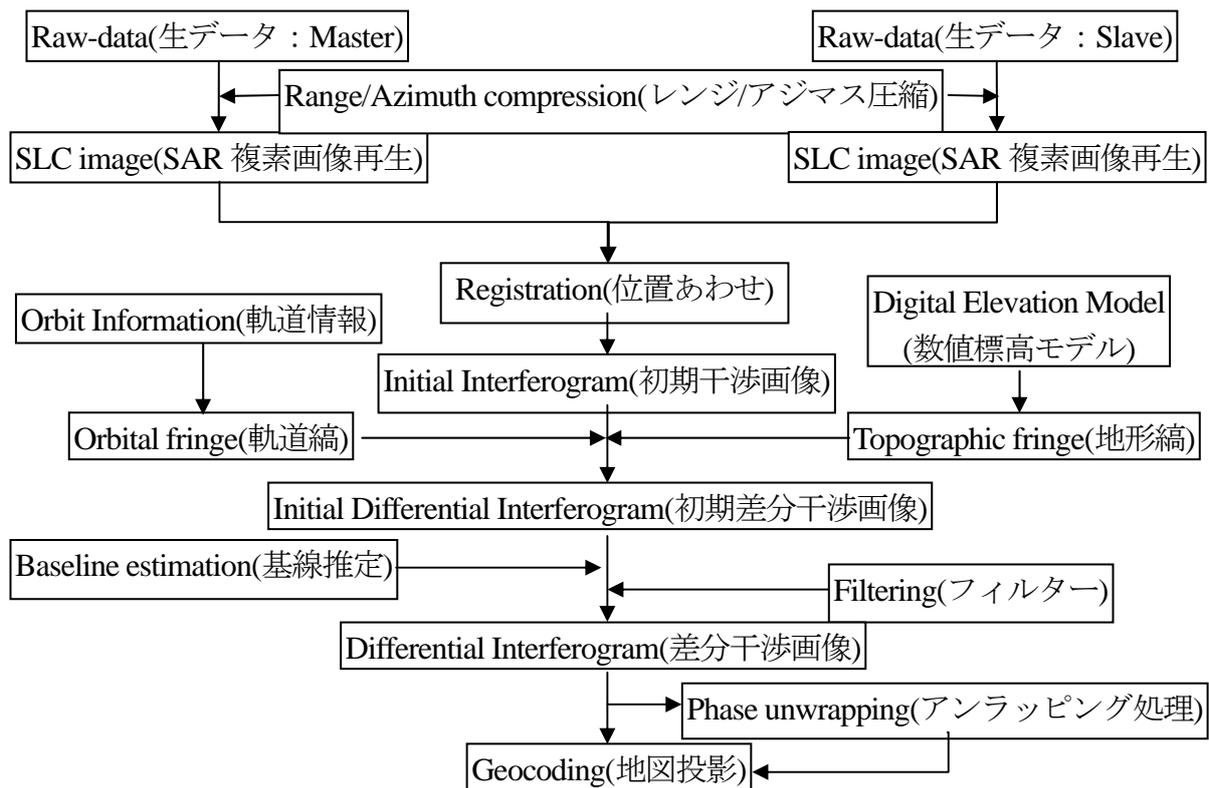


図 3. 1. 1 SAR 干渉処理フローチャート

(1) 生データから SLC 画像の生成

SAR 干渉解析を行うには時間的もしくは空間的に異なる同一地域の二時期の人工衛星から得られた生データ (raw-data) が必要である。人工衛星により観測された raw-data は地表面の点ターゲットの集合であり、二次元インパルス応答との畳み込み積分の結果であるため、それ自体での画像判読は難しい (図 3. 1. 2 左)。raw-data をレンジ方向 (通常衛星進行方向に対して右側) とアジマス方向 (衛星進行方向) に圧縮処理を施すことにより SLC 画像 (Single Look Complex) を得る (図 3. 1. 2 中)。また、実部と虚部の二乗和の平方根で計算される振幅値にフィルターやマルチルック処理を行うことによって強度画像を得ることができる (図 3. 1. 2 右)。通常、我々がよく目にする SAR 画像はこれにあたる。JAXA および RESTEC などからは、図 3. 1. 2 右あるいは地図座標系に変換された画像データ (レベル 1.5) を購入することもできるが、SAR 干渉解析を行う場合には人工衛星から得られた位相情報が必要なため、通常 raw-data から SLC 画像化する処理を二時期のデータについて行う必要がある。

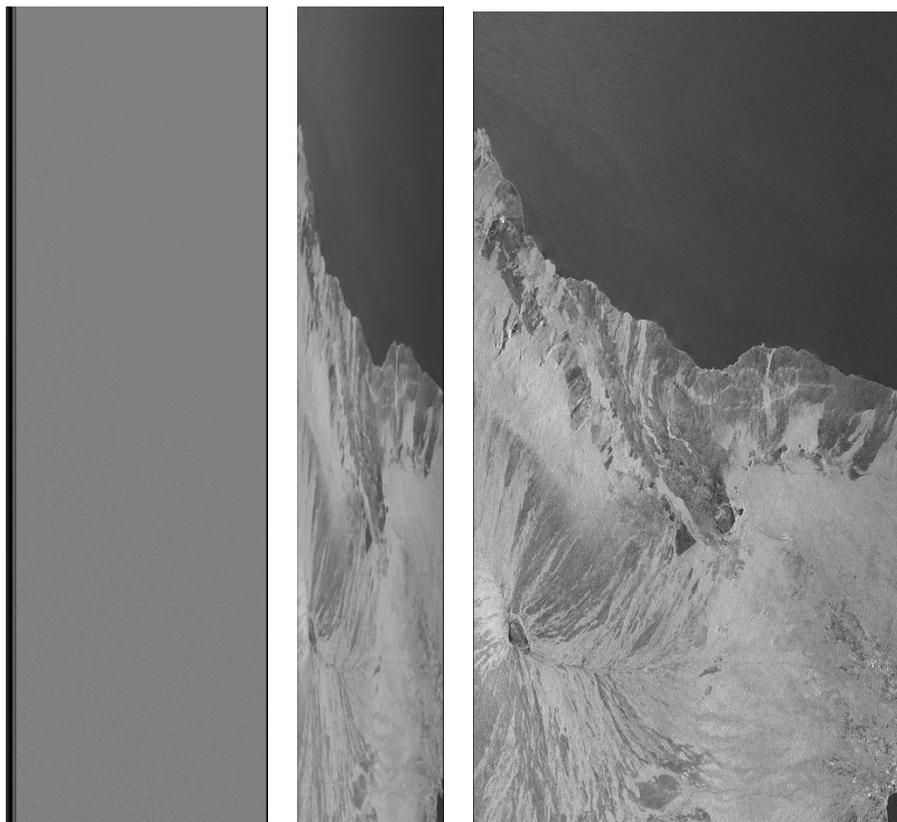


図 3. 1. 2 左 : raw-data、中 : SLC 画像、右 : 強度画像の一例

(2) 位置あわせ

画像マッチング (Image Registration) と呼ばれるこの操作を行わないと処理の本質である干渉処理の成功率が極端に低くなる。同じ回帰軌道上から得られる二時期の人工衛星データは同一の地域を撮像しているとはいえ、画素単位で厳密に一致することはない。干渉処理を成功させるためには、二時期の SLC 画像に対してピクセル単位での対応付けを可能であれば 0.5 ピクセル以下の精度で行う必要がある。また、この手法は、飛田ほか (1999) や本稿の 2. 2 で説明されたように、メートルオーダーの地殻変動があった場合には強度画像において適用される手法 (ピクセルオフセット解析) と同じ原理である。

(3) 干渉画像の作成

干渉の原理は光の波動性を証明した「ヤングの実験」がわかりやすい (図 3. 1. 3)。位相の揃ったコヒーレントな波が 2 つのスリットを通過した場合、光路差により反対側の壁において平行な干渉縞が観測される。ここで、SAR 干渉解析の場合「2 つのスリット間隔」は二時期の衛星軌道の差に、「壁」は地表面にそれぞれ該当する。スリット間隔が短ければ干渉縞の間隔は広く、逆に間隔が長ければ干渉縞の間隔は狭く現れる。またそれぞれの干渉可能範囲についても図 3. 1. 3 の中・下図に示すようにスリット間隔によって異なる。すなわち、衛星軌道差が大きいほど干渉範囲が狭くなることを意味している。すでに 2. 1 で説明されているとおり、厳密に位置あわせが行われた 2 つの SLC 画像に対して複素共役の掛け算を規格化することにより、図 3. 1. 4 に示すような初期干渉画像を得ることができる。

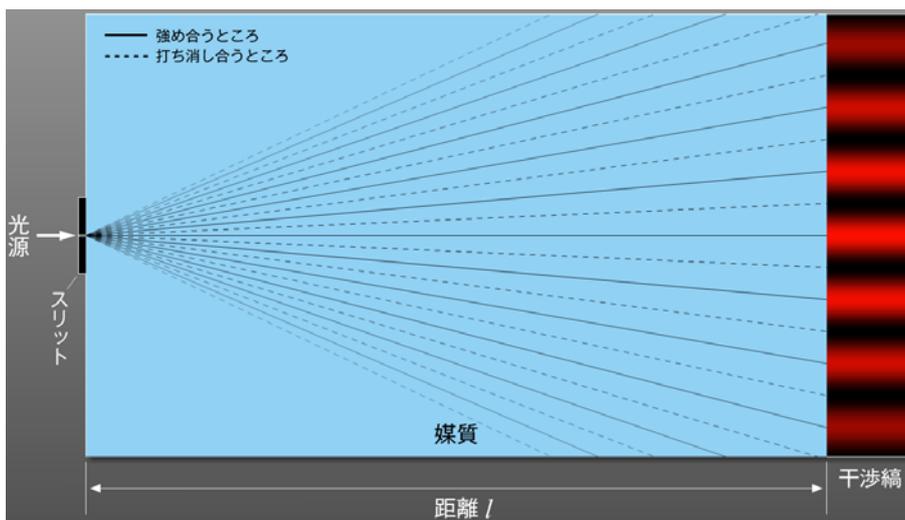
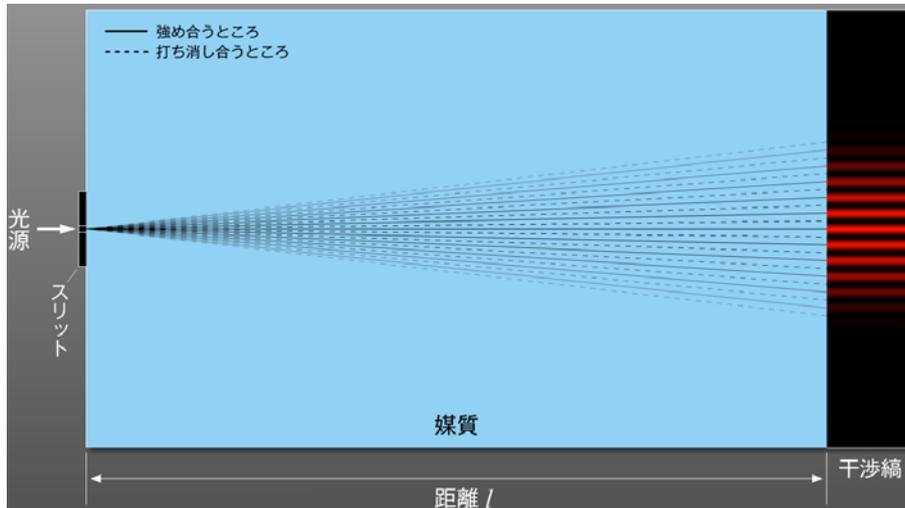
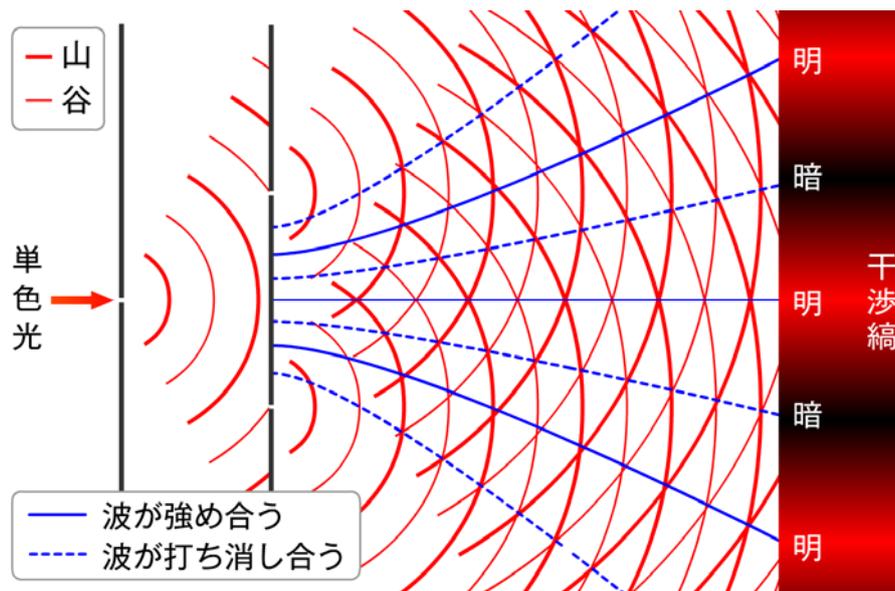


図 3. 1. 3 ヤングの実験イメージ図
 波長と干渉縞の関係 (上) とスリット間隔が長い場合 (中), 短い場合 (下)

(4) 軌道縞と地形縞

「ヤングの実験」のように「壁」が平坦な場合は、スリットの間隔に依存した平行な干渉縞が得られるが、実際の「壁」は地表面のため大小の起伏がある。この場合には、その起伏に対応した歪んだ干渉縞が得られる。軌道縞については既知の衛星データから、地形縞については数値地図からそれぞれシミュレート画像を作成することが可能である(図3.1.5)。数値地図 (DEM: Digital Elevation Model) については、国内では国土地理院が発行している 50m メッシュ数値標高や最近では基盤地図情報 10m メッシュが利用可能である。また、海外では北緯南緯 60° 以内であればスペースシャトル (SRTM: shuttle radar topography mission) による 3 秒角 (約 90m メッシュ) の DEM が NASA から取得可能である。つまり、図3.1.4の初期干渉画像には平行な干渉縞 (軌道縞) と地表面の起伏による干渉縞 (地形縞) が含まれた位相結果であり、もし二時期の画像データ間で地殻変動が存在する場合には、初期干渉画像 (図3.1.4) から軌道縞および地形縞 (図3.1.5) を除去することにより地殻変動 (変動縞) が得られる。

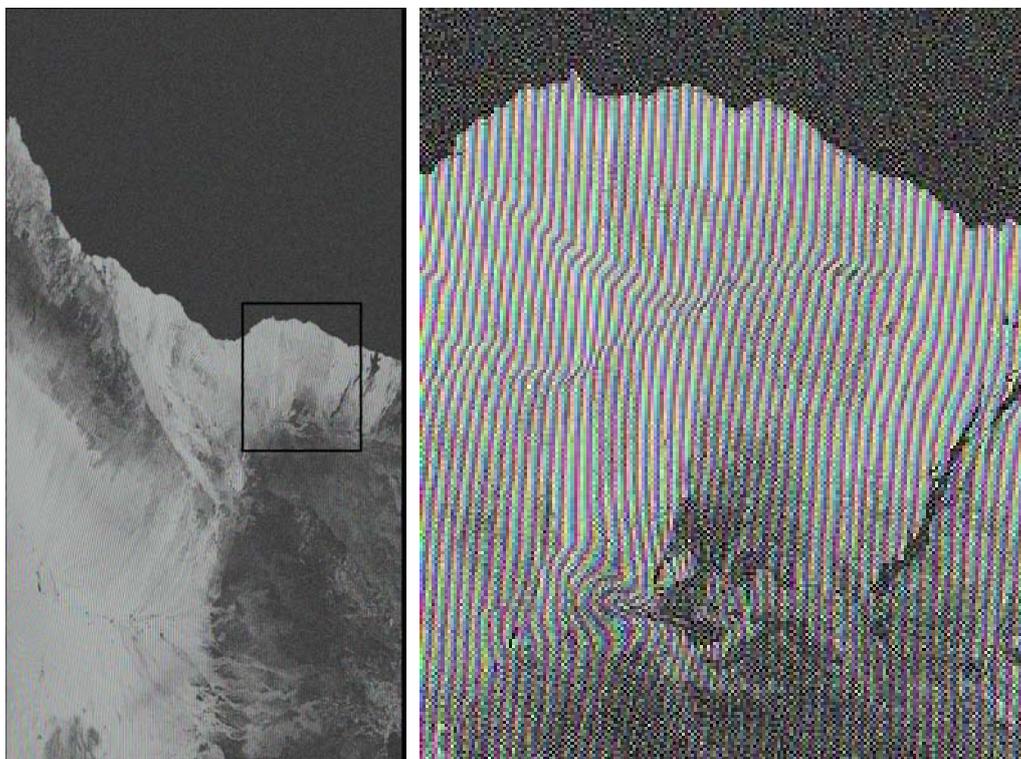


図3.1.4 初期干渉画像の一例 (右図は左図枠内の拡大図)

(5) 基線推定

衛星軌道情報の精度によっては、推定した軌道縞が正しくなく、十分に除去できない場合がある。この場合は軌道情報の基線推定を行う必要がある。しかしながら、ALOS の軌道制御は高精度のため、この補正を省略することも多い。

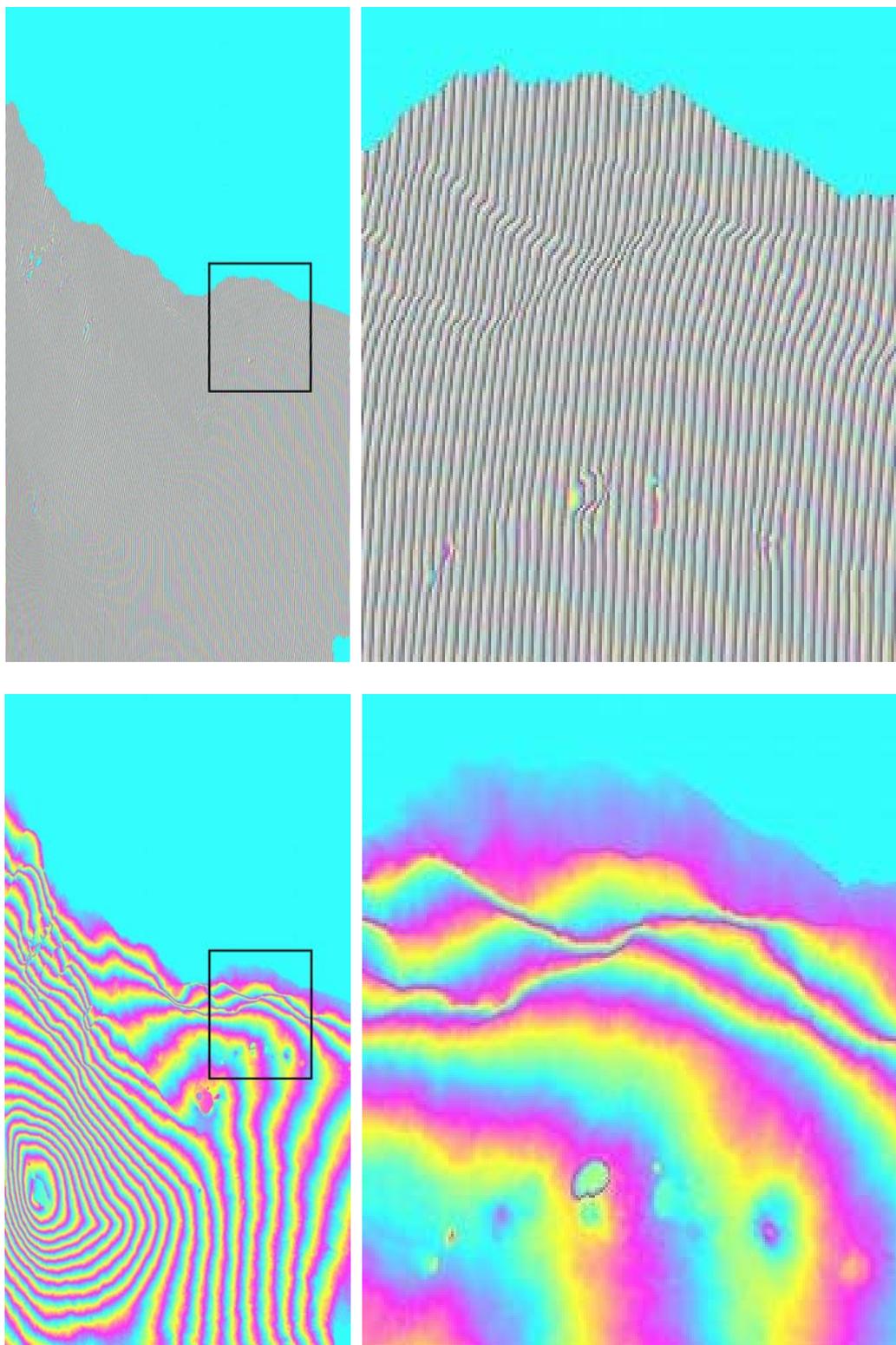


図3.1.5 シミュレート画像
(上：軌道縞、下：地形縞、右図はそれぞれ左図枠内の拡大図)

(6) フィルター処理

コヒーレンスの低下などにより得られた干渉画像は多くのノイズを含んでいる。これを除去するため二次元の画像フィルターを施す。単純な部分平均化フィルターでも十分な効果はあるが、周波数領域でのノイズ除去フィルターなどもある。なお、後述のアンラッピング処理では、コヒーレンスが低い場合にはアンラッピング処理が非常に難しくなるため、本処理は必須条件である。図3.1.6に 32×32 の平均窓でフィルター処理（フィルターの強さ 1.0）を施した差分干渉画像を示す。

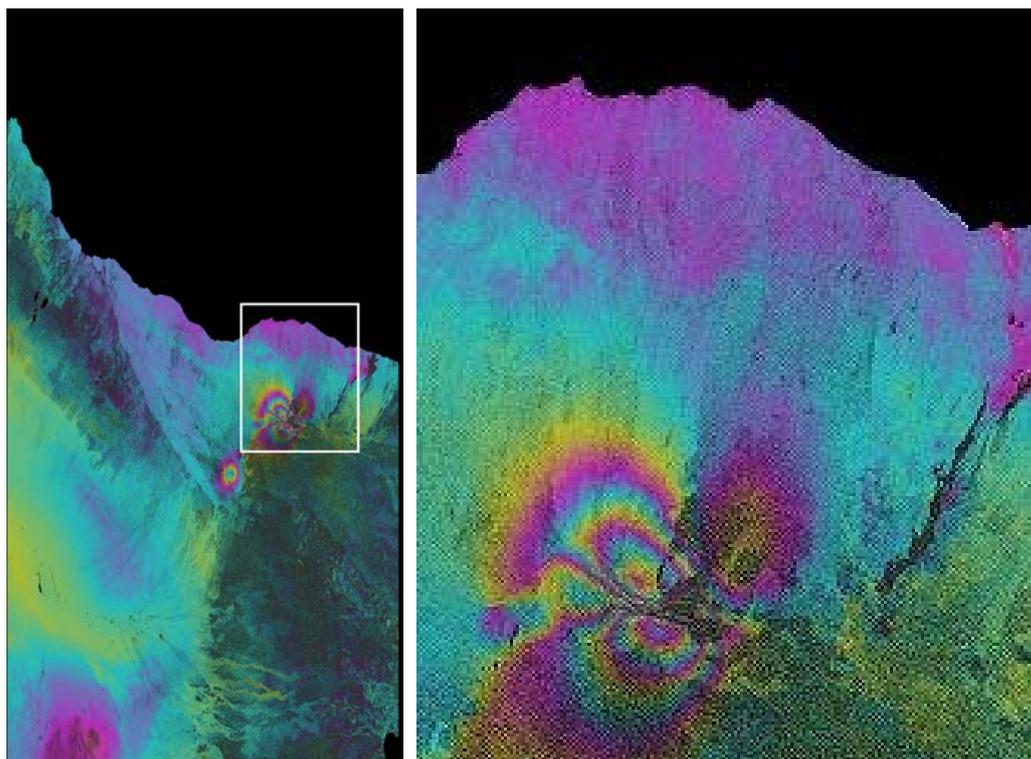


図3.1.6 フィルター処理後の差分干渉画像（右図は左図枠内の拡大図）

(7) アンラッピング処理

上記過程により得られた差分干渉画像は、 $-\pi \sim +\pi$ の位相データとして表現されており、そのままでは視線方向の距離変化すなわち変動量の絶対値を得ることができない。この 2π の任意性を取り除くことをアンラッピングといい、ブランチカット法やPCG法などが主に利用されている。ブランチカット法はある積分経路に沿って位相を繋ぐ方法で、コヒーレンスが高い場合には非常に精度よくアンラッピングすることが可能であるが、低干渉域による位相不連続の影響を強く受け、アンラッピングエラーが生じ、別途修正する必要がある。一方、PCG法は観測された位相の勾配と計算から得られる勾配の差が最小になるようにアンラッピングする方法で、低干渉域については重みを小さくしてアンラッピングを行う。このためやや厳密性に欠けるが、位相を滑らかに繋ぐ（連続的）ことが可能である。現時点ではいずれの方法も手動処理による部分が多く、結果については解析者に依存するところが非常に大きい。図3.1.7にブランチカット法によるアンラップ結果を示す。

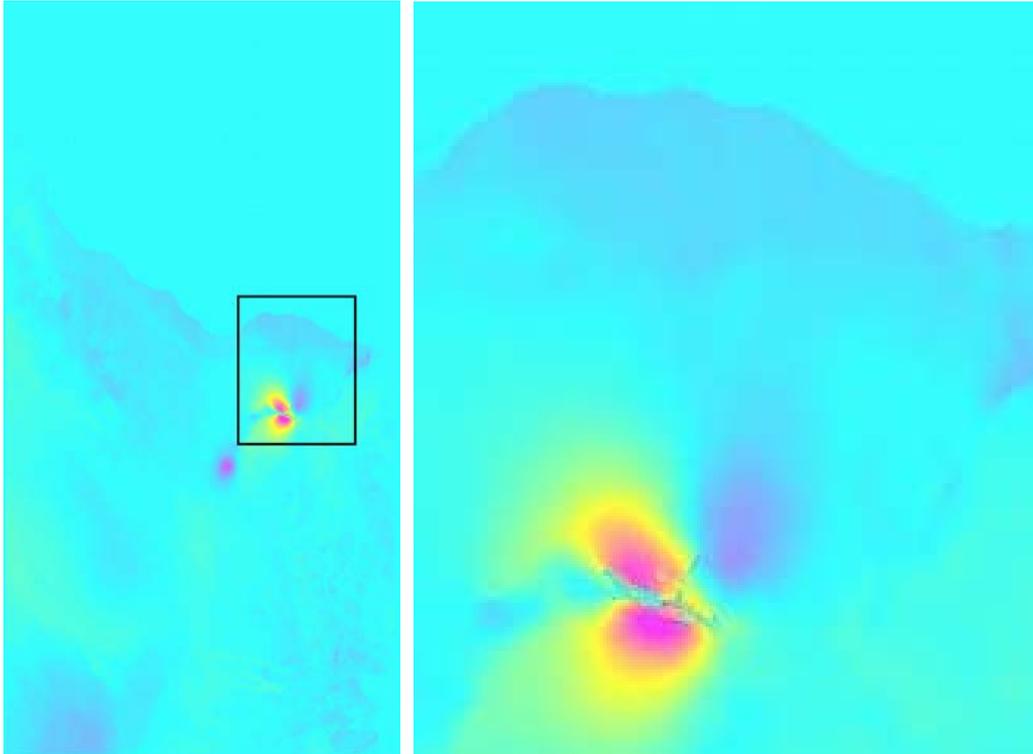


図3. 1. 7 アンラッピング画像（右図は左図枠内の拡大図）

（8）地図投影

図3. 1. 6や図3. 1. 7はレーダ座標系のままであるため、通常地図座標系に変換する必要がある。この処理はレーダ座標系のレンジアジマス座標と地図座標系の緯度経度座標とを対応付けする処理であるが、DEM から地形縞をシミュレートする処理の逆変換を行うことと同じである。図3. 1. 8に地図座標系に変換した差分干渉画像を示す。

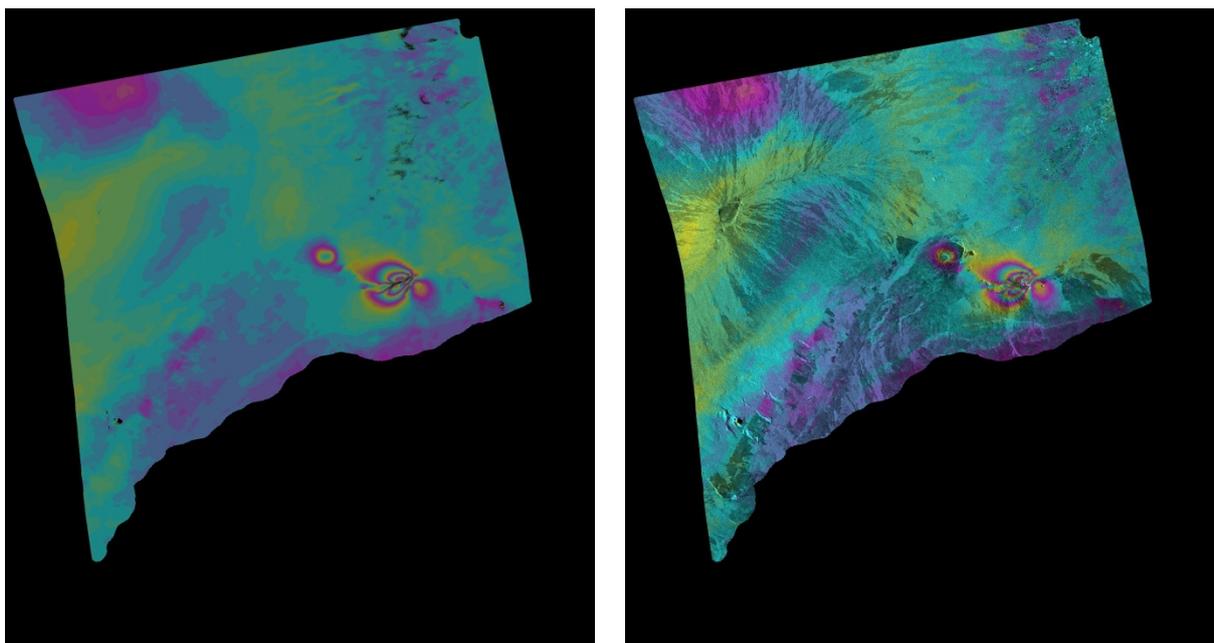


図3. 1. 8 ジオコーディング後の差分干渉画像（右は強度画像との重ね合わせ）

(9) 水蒸気量の推定

一般的に電磁波は大気中において伝播遅延が生じる。Zebker *et al.* (1997)によれば、SAR 干渉解析への影響は水蒸気による湿潤項の影響が大きいことが指摘されており、大気遅延の影響はほとんど水蒸気によるものとみなせる。藤原ほか(1999)は標高に相関した疑似的な地殻変動に着目し、基線値推定後の幾何的な地形補正のあとで、標高と相関のある残差位相を最小二乗法により標高の一次関数として求め、水蒸気量を補正した。また、島田 (1999) は、客観解析データ (GANAL) を用いて大気位相遅延量を求めて補正し、この方法が有効であることを証明した。この手法はレイトレーシングによる遅延時間や屈折パスなどの計算を行い、先に得られた変動量の補正を試みるものであるが、近年では SAR 干渉法による位相分解能が向上しており、上記の方法による水蒸気補正 (モデルの構築) では不十分なケースもあり、補正手法については、なお課題が残されている (4. 2 参照)。

(10) 電離層の推定

4. 3で述べられるように、電離層によると考えられる干渉画像への影響は最近多くの事例が報告されている。現時点では電離層の電子数減少時に発生するプラズマ変動 (バブル) の影響が、最も大きな要因の一つとして挙げられ、PALSAR の夜間観測 (観測地域のローカル時の 22 時頃) 時に出現する頻度が高いことがわかっている。また、最近の研究では場所に依存して発生することも分かっているが、常時発生するわけではないため、水蒸気の推定よりも電離層の推定は困難である。しかしながら国内に限れば国土地理院が展開している GEONET による GPS-TEC マップがデータベース化されており (Saito *et al.*, 1998)、電離層による影響と思われる疑似変動縞が出現した観測日時とおおよそ対応していることから、撮像日と比較することで電離層による影響の推定は可能であるが、補正手法については、やはり研究課題となっている。

3. 1. 2 添付するパラメーター一覧

(1) シーン数

ALOS/PALSAR のデータシーンは RSP (Reference System for Planning) によりパスとフレームによって定義されている。衛星の下降軌道 (Descending) に平行なパス (1~671) と衛星の緯度引数に基づき等間隔に区分された 7200 フレーム (0~7199) に分割され、その番号によって位置を表現する。フレーム番号は通常 10 間隔 (約 56km) で、広域観測 (SCAN-SAR) モードについては 50 間隔 (約 278km) となる。1 シーンの大きさはオフナディア角や緯度により変動はあるが、ストリップマップモードで 70km×70km、広域観測モードの場合は 350km×350km となる。したがって、2008 年四川地震や 2010 年チリ地震のように広範囲に地殻変動が及ぶ場合には複数シーンを連結した上で SAR 干渉解析をする必要がある。ただし、隣接するパスは地球の自転および回帰日数 (ALOS : 46 日) により、1 パス西隣りの観測は 17 日後、1 パス東隣りの観測は 29 日後となるため注意が必要である。

(2) ルック数

SAR 干渉画像の位相ノイズを低減するためにマルチルック処理が行われる。マルチルック処理には 2 通りある。1 つは、SAR 画像再生処理において、SAR 合成開口長を N 分割し、それぞれの開口で独立に画像再生処理を行った後、N 個の再生画像を重ね合わせる方法で、もう 1 つは、隣接する N 個の画素の平均値 (complex データの場合、実数部と虚数部それぞれの平均値) を求める方法である。この数 N をルック数と呼び、ルック数 N のマルチルック処理を N ルック処理という。N が大きいほどスペックルノイズの低減効果は大きくなるが、空間分解能は N 倍劣化する。レンジ方向とアジマス方向のルック数を決める考え方として、分解能を揃える方法とピクセル間隔を揃える方法がある。例えば、分解能を揃える方法の場合、アジマス方向の分解能は周波数や距離に関係なくアンテナ長の 1/2 になることから、JERS-1 では $12\text{m} \times 1/2 = 6\text{m}$ 、ALOS では $8.9\text{m} \times 1/2 \div 4.5\text{m}$ である。レンジ方向の分解能は約 18m (ALOS の FBS モードの場合は約 9m) であることから、JERS-1 では 3 ルック処理、ALOS では 4 ルック処理 (FBS モードの場合は 2 ルック処理) をすることで、レンジ方向、アジマス方向ともに同程度の分解能となり、分解能の揃った画像を得ることができる。

(3) フィルター

地殻変動量を算出するために正確にかつ容易にアンラップ処理したり、干渉縞の判読性をよくしたりするために、差分干渉画像にフィルターを施すことをフィルタリングと呼ぶ。ここでは現在広く使用されているフィルタリングの方法として Goldstein and Werner (1998) の手法について述べる。Goldstein and Werner のフィルタリング (以下、G&W フィルター) は干渉画像上を走査・移動する窓内を順次フィルタリングするもので自己周波数スペクトラムを重み関数とする平滑化フィルターである。窓の走査は 75% オーバーラップするように移動するが、その窓の大きさ、フィルターの強さについては解析者および解析ソフトによりさまざまである。ただし、フィルタリングの回数については、対象の変動量が非常に小さい場合や小領域の場合には、平滑化による過少見積もりの原因となるため複

数回のフィルタリングには注意が必要である。図 3. 1. 9 にフィルターの強さによる干渉画像の比較の例を示す。

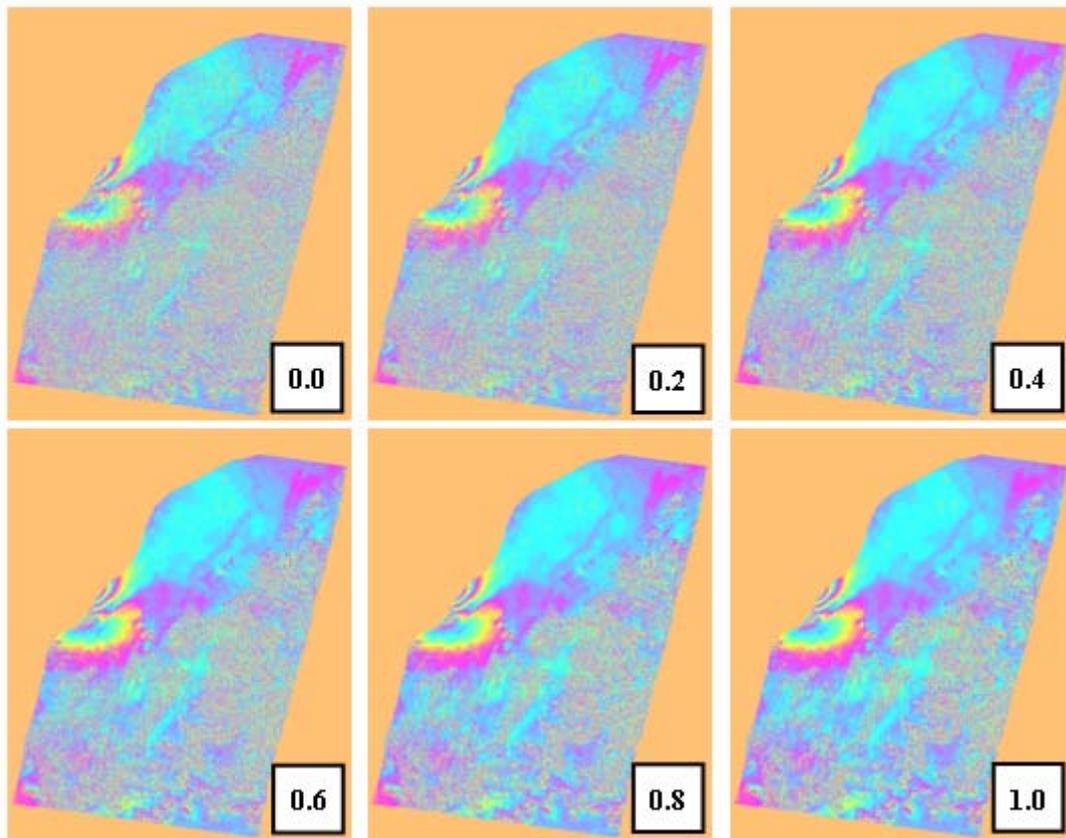


図 3. 1. 9 フィルターによる干渉画像の比較

サンプルは 2007 年新潟中越沖地震の干渉画像 (2007/ 1/16 - 7/19)。窓サイズは 64 × 64 ピクセル、図中の数字はフィルターの強さを示す。

(4) ノイズ

「ノイズ」の定義は、大気や電離層の影響によるものから、SAR 画像再生におけるスペクトルノイズまで様々あるが、ここでは無変化地点の位相ばらつき量に着目した解析事例を挙げる。奥山 (2008) はアンラッピング処理の際に発生するエラー (通称アンラッピングエラー) の修正に関するプログラムを開発しており、その前処理として位相のばらつきについて評価を行っている。これによれば干渉画像のある小領域内で位相を bilinear 近似し、その誤差の二乗和で位相のばらつきを評価するものである。

例えば、あるピクセルの安定性の評価に ± 5 ピクセル (11 × 11 ピクセル) の窓サイズを用い、次式の計算手順により位相ばらつきの評価を行う。

1. 小領域内で位相を bilinear 近似 $\rightarrow \varphi_{trend} = ax + by + c$

2. 誤差の二乗和で位相のばらつきを評価 $\rightarrow \sigma^2 = (1/n) \sum (\varphi - \varphi_{trend})^2$

3. 値を「0～1」の指数で表現 $\rightarrow \text{stability} = 1/(\sigma^2 + 1)$

ここで、 x はピクセルの位置、 y は位相を示す。

以上から、位相が安定（ばらつきが少ない）している場合は、stability（安定性）の値は大きく（最大値=1）をとり、位相が不安定（ばらつきが多い）な場合は stability の値は小さく（最小値=0）なる。

3. 2 解析事例

本節では、本小委員会から地震調査委員会に報告した代表的な解析事例3つ（2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震）について紹介する。

（1）平成19年（2007年）新潟県中越沖地震

2007年7月16日10時13分頃に新潟県上中越沖の深さ約10kmでマグニチュード(M)6.8の地震が発生し、新潟県と長野県で最大震度6強を観測した。本震の発震機構は北西－南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で地殻内の浅い地震であった。

この地震についてのSAR干渉解析及び地震調査委員会の議論の結果は以下のとおりである。

表3.2.1 2007年7月16日 新潟県中越沖地震の解析項目

項目	内容
衛星名およびセンサー名	ALOS/PALSAR
データ観測日	2007/01/16－2007/07/19 JST
衛星軌道	南行軌道
地震名	平成19年（2007年）中越沖地震
地震発生年月日	2007年7月16日10時13分JST
マグニチュード	M6.8
範囲（緯度／経度）	37° 15′ -37° 40′ /138° 25′ -138° 55′
データ取得間隔（日）	184日間
基線長 [B _{PERP} 成分] (m)	300m
震源の深さ (km)	約10km
オフナディア角[度]	34.3
観測モード（旧観測－新観測）	FBS-FBS

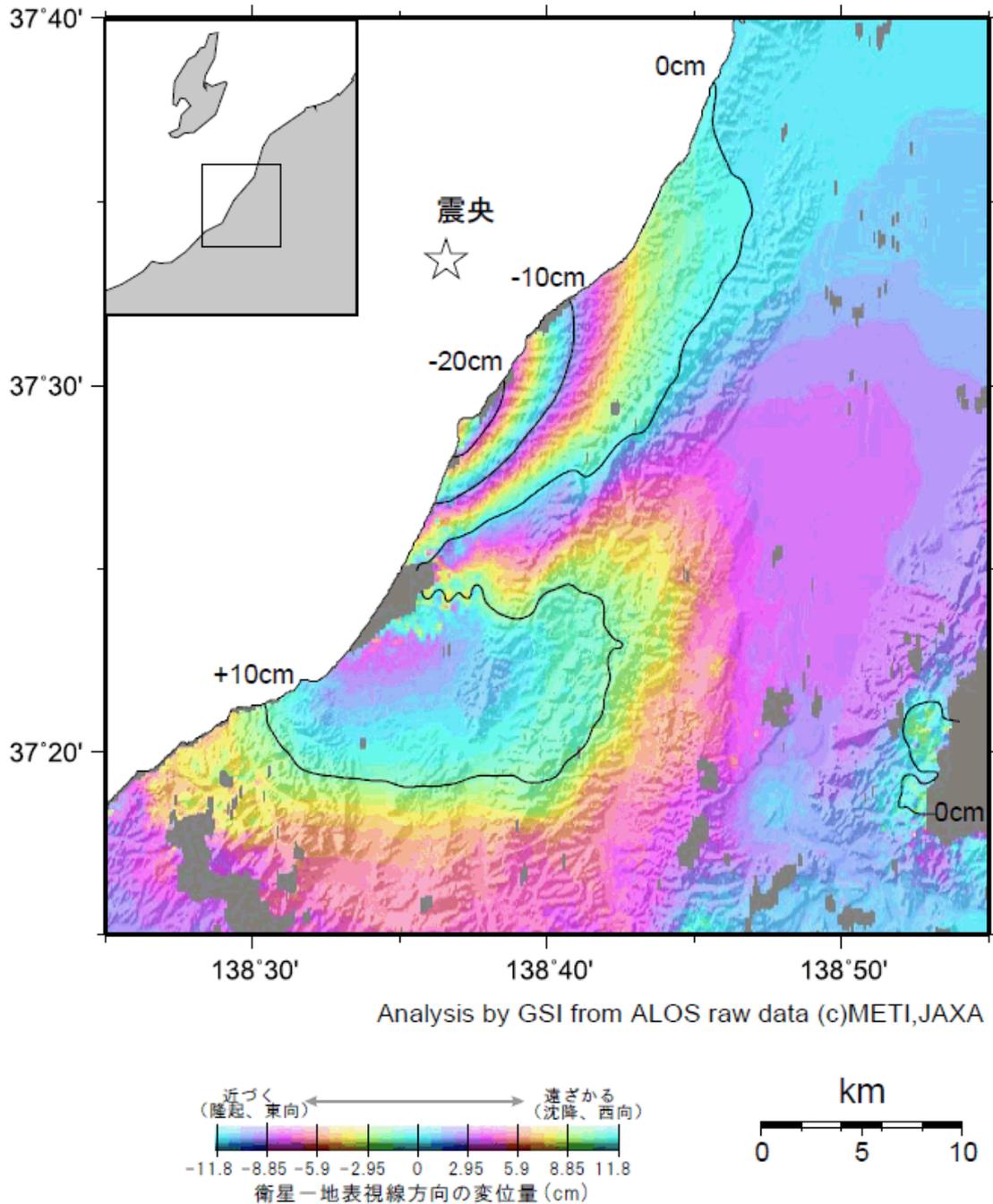
○陸域観測技術衛星「だいち」に搭載された合成開口レーダ（SAR）のデータから、新潟県中越地方沿岸を中心に今回の地震に伴う地殻変動が面的に観測された。これらの地殻変動観測結果はお互いにほぼ調和的である。

○陸域観測技術衛星「だいち」に搭載された合成開口レーダ（SAR）のデータから、新潟県中越沖地震の震源域の東側にある西山丘陵の西側斜面の小木ノ城背斜付近で、新潟県中越沖地震の発生に伴って、長さ約15km、幅約1.5kmの帯状の隆起域が認められた。約10cmもしくはそれ以上の最大隆起量が認められ、水準測量結果とも矛盾しない。

○震源分布を参照した地殻変動解析結果でも、南東傾斜の断層に加え、震源域北東部に北西傾斜の断層を考慮することで、データをより良く説明できる。

平成19年新潟県中越沖地震 合成開口レーダー干渉解析結果

「だいち」によるSAR干渉画像
(Descending34.3° 2007/1/16-7/19)



国土地理院

図3.2.1 新潟県中越沖地震の評価 (平成19年8月8日公表) 資料

(2) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震

2008 年 6 月 14 日 8 時 43 分頃に岩手県内陸南部の深さ約 10 km で M7.2 の地震が発生し、岩手県と宮城県で最大震度 6 強を観測した。発震機構は西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、地殻内の浅い地震であった。

この地震についての SAR 干渉解析及び地震調査委員会の議論の結果は以下のとおりである。

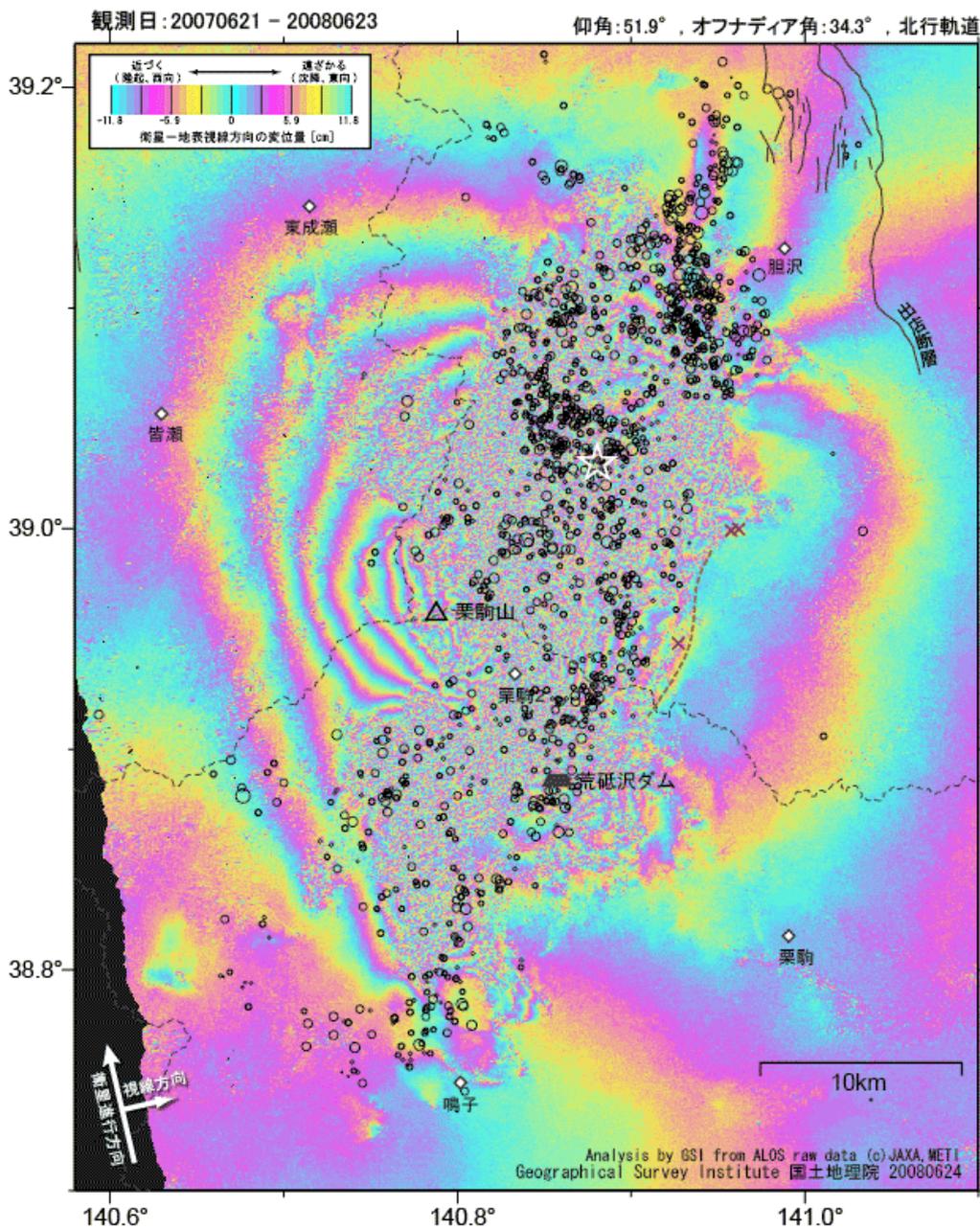
表 3. 2. 2 2008 年 6 月 14 日 岩手・宮城内陸地震の解析項目

項目	内容
衛星名およびセンサー名	ALOS/PALSAR
データ観測日	2007/06/21－2008/06/23 JST
衛星軌道	北行軌道
地震名	平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震
地震発生年月日	2008 年 6 月 14 日 8 時 43 分 JST
マグニチュード	M7.2
範囲 (緯度/経度)	38.7° -39.2° /140.6° -141.1°
データ取得間隔 (日)	368 日間
震源の深さ (km)	約 10km
仰角 [度]	51.9

○SAR 干渉解析結果によると、震源域の変動の大きかった領域は、長さ約 30km、幅 10km に広がっており、その東縁に、現地調査で明らかになった地表地震断層と見られる地表変状が位置している。

○GPS 観測及び SAR 干渉解析から推定した断層モデルからも同様なすべり量の集中域が見られる。

平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動 「だいち」SAR干渉画像



☆ 本震震央 (気象庁)

- 余震分布 (20080614-0622)
2008年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ(東北大・北大・弘前大・地震研・名大・京大防災研・九大・産大・防災科研)のデータを使用し気象庁が再計算した震源を使用
- / 活断層 (地震調査研究推進本部による)
- 地表変位が観測された付近に伸びる地質断層 (20万分の1日本シームレス地質図から読み取り)
産業技術総合研究所 地質調査総合センターのWEBサイトに掲載
http://www.gsj.jp/jishin/iwatemiyagi_080614/epicenter-geomap.html
- ◇ 電子基準点
- × 国土地理院の現地調査により、地表変位が確認された地点

国土地理院

図3.2.2 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の評価(平成20年6月26日公表)資料

(3) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震

3 月 11 日 14 時 46 分頃に三陸沖の深さ約 25 k m で M9.0 の地震が発生した。この地震の規模はこれまでに日本国内で観測されたなかで最大である。この地震により宮城県栗原市で最大震度 7 を観測した。発震機構は西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した地震である。

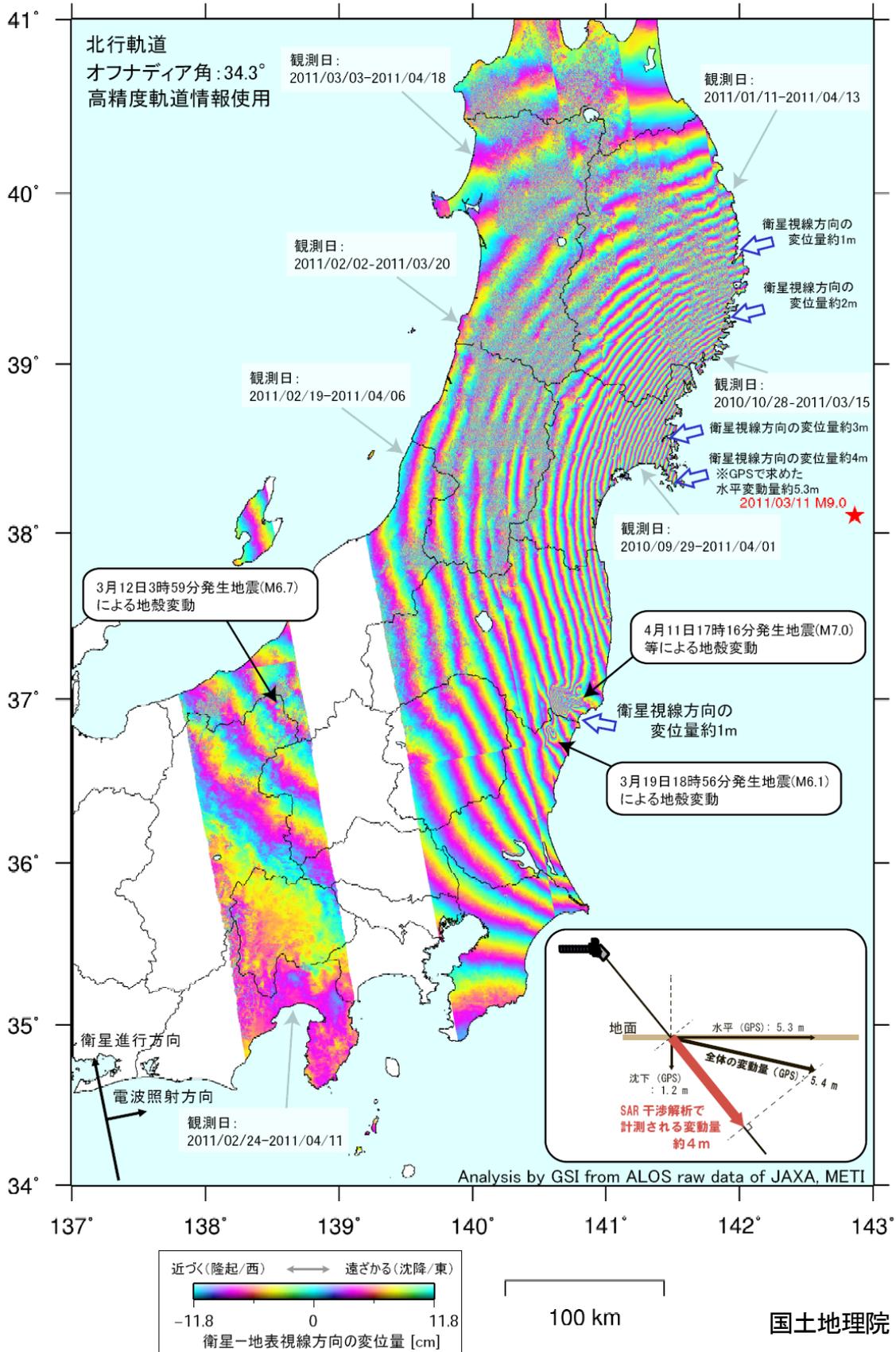
この地震についての SAR 干渉解析及び地震調査委員会の議論の結果は以下のとおりである。

表 3. 2. 3 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の解析項目

項目	内容
衛星名およびセンサー名	ALOS/PALSAR
データ観測日	2010/09/29－2011/04/01 JST 2010/10/28－2011/03/15 JST 2011/01/11－2011/04/13 JST 2011/02/02－2011/03/20 JST 2011/02/19－2011/04/06 JST 2011/02/24－2011/04/11 JST 2011/03/03－2011/04/18 JST
衛星軌道	北行軌道
地震名	平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震
地震発生年月日	2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分 JST
マグニチュード	M9.0
範囲 (緯度/経度)	34° -41° / 137° -143°
データ取得間隔 (日)	184 日、138 日、92 日、46 日、46 日、46 日、46 日
震源の深さ (km)	約 25km
観測モード (旧観測－新観測)	FBS-FBS
オフナディア角	34.3

○陸域観測技術衛星「だいち」に搭載された合成開口レーダー (SAR) のデータからも、東北地方から関東地方にかけての広い範囲で GPS 観測結果と調和的な地殻変動が観測されている。

合成開口レーダー(SAR)と電子基準点(GPS連続観測点)の融合解析による地殻変動



※この図は観測地点の西側上空を飛行する人工衛星と地表面の距離の変化量を示しています。なお、GPS連続観測による地殻変動は、牡鹿半島で本震発生時に東南東方向に約5.3mの移動、約1.2mの沈下でした。

図3.2.3 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の解析結果
(第226回地震調査委員会報告資料)

4. 技術的課題の検討

前章までに述べたように、SAR 干渉解析は、地殻変動検出のための確立した手法となっている。本章では、SAR 干渉解析に関わる主な誤差要因の特徴とその軽減策及び、近年研究が進められている新しい解析手法についてまとめる。

SAR 干渉解析の主な誤差要因としては、軌道推定の誤差、大気圏（対流圏）におけるマイクロ波の屈折、電離層におけるマイクロ波の屈折が挙げられる。

衛星の軌道の精度は、軌道縞の推定に大きく影響する。大気圏と電離層における屈折は、マイクロ波の伝播経路をゆがめ、SAR 干渉解析で観測される位相に大きな誤差を生じさせる。特にだいちで用いられる L バンド SAR は、波長が長く、電離層の影響を大きく受ける。いずれの誤差も高精度の地殻変動の検出において大きな障害となる。これらの誤差の特徴と軽減策について 4. 1 ～ 4. 3 節で紹介する。

これまでの SAR の研究対象は、地震時変位のように大きな変動が中心であった。一方、地震発生にいたるひずみ蓄積過程や大地震後の余効変動などは地震時変位に比べてかなり小さいため、誤差との判別が難しく、検出には特別な処理が必要である。ところで、上記の主要な誤差要因は観測毎に相関がないものと考えられるので、多数の干渉画像を用いてこれらの誤差を軽減し、微小な変動のみを抽出する試みがなされている。海外では、ERS と Envisat データの蓄積により、地盤沈下やサンアンドレアス断層のクリープ等を捕らえる時系列解析が試みられ、成果を挙げている。本報告書では、我が国において重要な課題である海溝型地震に向けたひずみ蓄積の検出のための試みと問題点を 4. 4 節で紹介する。

マグニチュード 8 クラスの巨大地震の場合、変動域は 300km を超える。これまでの SAR は、観測幅約 70km のストリップマップモードによる観測が中心であったため、この観測幅でもって地殻変動の全貌を捕らえるためには、10 パス前後の互いに隣接するパスにおける観測が必要である。実際の事例として、2008 年中国・四川（汶川）地震では 8 パス、2010 年チリ・マウレ地震では 10 パスの観測によって、初めて全域の地殻変動が明らかになった。しかし、各パスの観測で最大約 1 ヶ月半もの時間差が生じている。後半に得られたデータには余効変動の影響が含まれていると考えられ、断層モデルの推定にも少なからず影響を与えてしまう。この問題を解決するのが ScanSAR である。ScanSAR はだいちの PALSAR では広域観測モード（WB1、WB2）といわれるもので、ビームの射出角を 3 ～ 5 段階に一定間隔で変えることによって、約 350km（ストリップマップモードの 5 倍）の観測幅を実現する手法である。ただし、この手法で得られる画像データの扱いには特別な処理が必要である。この処理に関する概要と得られた成果について 4. 5 節で紹介する。

SAR 干渉解析には、変位勾配が大きすぎる場合にはコヒーレンスが低下し、情報が得られないという問題がある。このため、地表に地震断層が現れた等の地殻変動が大きい場合には、断層近傍では干渉しない。一方、強度画像は変位勾配の大小に関わらず情報が得られるので、地震前後の強度画像を用いて変位を求めることができる。この手法がピクセルオフセット法である。ピクセルオフセット法を用いた地殻変動解析について、その長所・短所を整理し、本解析技術における現状の総括、および課題について 4. 6 節で紹介する。

4. 1 軌道の推定

SAR 干渉処理の精度は、軌道の決定精度に大いに依存する（軌道の内挿方法も同様）。（3. 1. 3）式にあるように、地殻変動量は距離差に対応し、軌道決定精度への要求は地殻変動量への要求と同程度と大変厳しい。日本の衛星搭載 SAR に関しては、1）JERS-1 SAR の干渉性は良いものの、軌道決定精度は悪い。2）ALOS/PALSAR では干渉性が飛躍的に向上し、軌道決定精度も向上した。3）しかし、たまに軌道決定精度が十分でないときがある：との評価を受けている（第1回 ALOS-PI workshop report, 2008、第2回 ALOS-PI ワークショップ報告書、2008）。軌道決定精度は、表4. 1. 1に分類される。特に、JERS-1の精度が悪いのは、レンジングに使用したアンテナの基準点がずれていたというのが一番の要因であった。その後、校正を行うことで、同じ手法（RARR）の決定精度はかなり向上したが、JERS-1にさかのぼって精度の向上は出来ない。

表4. 1. 1 JERS-1 と ALOS の軌道決定精度

項目	精度
JERS-1/RARR	180m (アロングトラック)、50m (クロストラック) : いずれも 3 シグマ)
ALOS/RARR	10 m
ALOS/精密軌道	40 cm (3シグマ)
ALOS/GPS 軌道	リアルタイムで配信される軌道データ (一秒間隔)

RARR: Range and Range Rate の略で、地上から衛星に対して打ち上げる S-band 信号を衛星搭載のトランスポンダーで増幅し、折り返して地上に再送信するが、地上で受信した信号の時間遅れから距離を、ドップラー周波数から速度を算出する。これを複数軌道にわたって、モデルとあわせて時間解析することで衛星位置、速度を算出する方法。

SAR 干渉解析で必要とされる軌道決定精度は、位相精度と同等の 2 cm であることから、ここに示されるように、現状の軌道決定精度はどれ一つとっても SAR 干渉解析の要求軌道精度を満たさない。そのために、軌道補正は必要である。

SAR 干渉処理に使用する軌道データは、1 分間隔で生成された位置、速度の 3 方向 x, y, z, vx, vy, vz の 6 成分あり、それらは、エルミート演算子で時間補間される。軌道決定精度は、表4. 1. 1に示した通りであるが、その精度の向上は容易ではない。SAR 干渉処理に関係する軌道情報が関わる時間の長さは、処理するシーンサイズに依存するが、シーンサイズを取得した時間の長さだけ、6 軌道要素が必要である。これらを、干渉画像から推定するのは困難である。また、軌道補正には観測データである位相変動（地殻変動のアンラップしたもの）を使用するが、このデータには、対流圏、電離層による擾乱が含まれる可能性がある。そのために、それらを用いて軌道補正を行うには困難を伴う。

図4. 1. 1に軌道補正の一例を示す。左は JERS-1 SAR の軌道決定値を用いた干渉画像であるが、軌道精度が悪い為に軌道誤差に伴う多くの平行縞が見られる。これらを、補正したものが右の画像である。画像の右上と、左下でやや青色領域（軌道の補正が不完全な場所）が見られるが、概ね正しく軌道補正されたものと考えてよい。

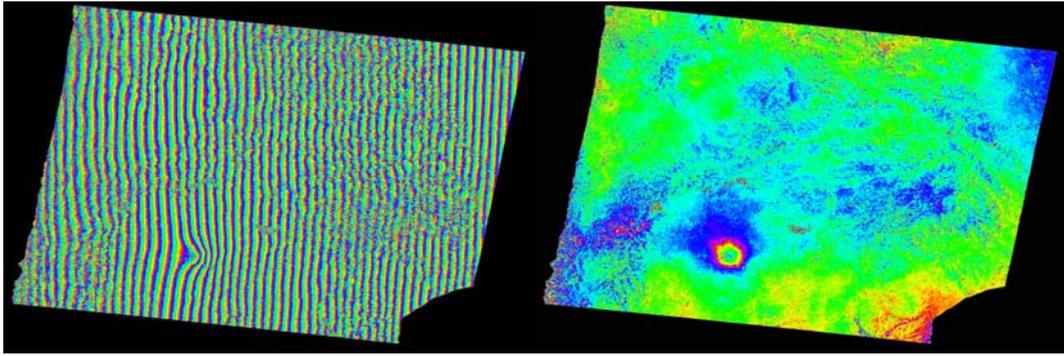


図4.1.1 軌道補正の一例、左) 補正前の画像、右) 補正後の画像。JERS-1 SAR として、1995年10月21日と1995年9月7日を使用した。

4. 2 対流圏の影響（水蒸気による遅延）

大気圏での屈折率は、地表から約 30km までが各々異なる気圧、気温、水蒸気圧をもつ平行成層で構成されるとして、各々の層では以下の経験式で表現される。

$$n = 1 + \frac{77.6}{T} p \cdot 10^{-6} + \frac{0.373}{T^2} e \quad (4.2.1)$$

(4.2.1) 式は屈折率の経験式であり (Kerr, 1951; 虫明, 1961)、 p , T , e はそれぞれ大気圧 (hPa)、気温 (K)、水蒸気圧 (hPa) である。この式からわかるように、屈折率は乾燥大気のみならず湿潤大気からも生じる。 n は 1 より大きく、電波伝搬速度が真空中に比べて遅くなるという特徴がある。

一般に、SAR の観測幅は 100km 以下であり (ScanSAR では 350km である)、これら屈折率の不均質がこのシーンサイズよりも大きい場合には、問題はない。しかし、これ以下のときには解析結果に、地殻変動以外の変動位相 (変動縞) が発生し、解析上で問題となる。ここではこれらの影響を紹介する。

図 4.2.1 に、大気遅延特性の影響を表した例を示す。図 4.2.1 (左) が、JERS-1 SAR で見られた富士山頂で大気遅延の影響が色濃く出た画像である。この事例では、一周期の位相変動が現れており、11.8cm の沈降 (この画像の組み合わせでは) が擬似的に発生したかのように見える。一方、図 4.2.1 (右) は、(4.2.1) 式を使用して補正した画像例である (島田, 1999)。3 種類の気象データ (p , T , e) は、気象庁の客観解析データを用いた。この事例は、補正がうまく行った場合である。全ての場合に大気の影響が補正できるわけではなく、80% が客観解析データで補正でき、残り 20% が補正できなかった。

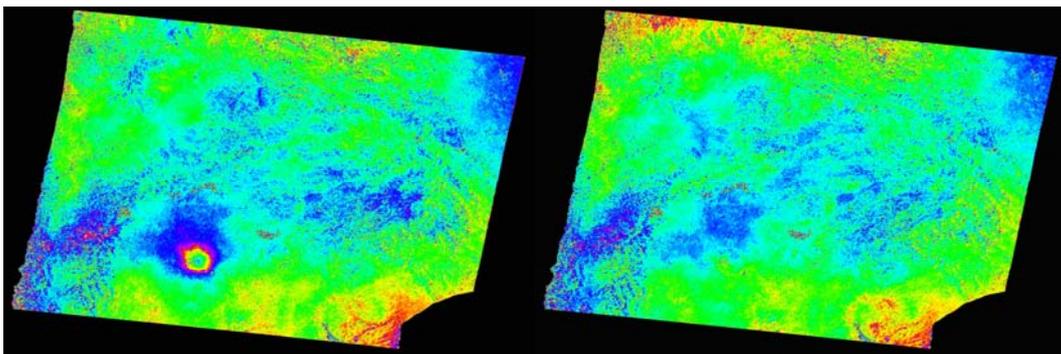


図 4.2.1 大気遅延の影響を受けた SAR 画像(左)、(4.2.1) 式を用いて補正した画像 (右)。ここでは、気象庁作成の客観解析データを用いた。衛星データは JERS-1 SAR が観測した富士山画像で、1995 年 10 月と 9 月のデータである。

客観解析データを用いる以外に、地形高度と相関する成分を除去する経験的な補正方法がある (藤原他, 1999)。図 4.2.2 は、2010 年初頭に発生したマヨン火山の噴火の解析時に確認された山頂部の疑似地形変化と、それを地形高度に依存する成分を補正した事例である。水蒸気遅延は発生空間的スケールが小さい為、このような経験的な補正方法は、補正箇所を解析者が主観的に補正する方法 (インタラクティブな補正) が重要である。

水蒸気遅延についてもまだ研究課題であるが、山岳地帯の大気の流れ、水蒸気量の移動等が以前に比べてより定量的な解析が実施されるようになり、補正の可能性が増してきた感はある。しかしながら、遅延量を正確に推定できるところまでには至っておらず、依然として大きな課題である。この理由は（電離層補正についてもそうであるが）、これら遅延要因の大気中での挙動を正確に把握（モデル化）出来できないことにあると考えられる。

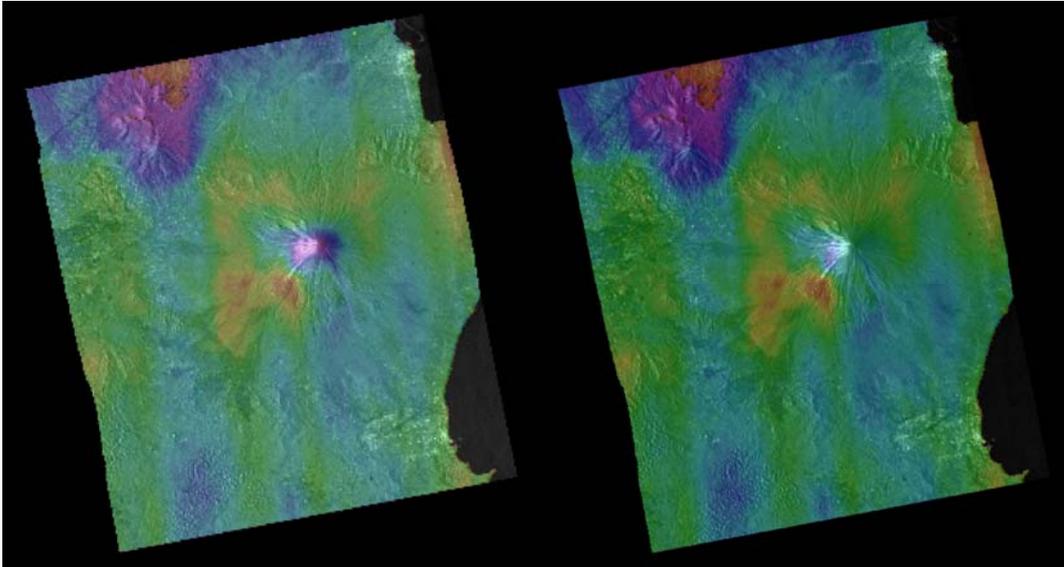


図4. 2. 2 大気遅延の影響を受けた SAR 画像(左)、高度との相関成分を除去した画像(右) : とともに ALOS/PALSAR で観測

4.3 電離層の影響

電離層の屈折率は、

$$n = \sqrt{1 - \frac{Ne^2}{me_0\omega^2}} \quad (4.3.1)$$

で表現される。ここに、 N, e, m, e_0, ω はそれぞれ、単位体積当りの総電子数（電子密度）、電子の電荷、質量、真空の誘電率、角周波数である。屈折率は1より小さいのが特徴である。そのために、電波伝搬速度が真空中よりも速くなる特徴がある。

電離層による影響に関しては非常に多くの事例がある。特に、電離層は太陽の日周運動と大きく関連しており、ALOS/PALSAR は夜間に主として運用されることから、電離層の減少時に発生するプラズマの変動（プラズマバブル）、電離層の緯度方向への伝搬（ともに空間スケールは数十キロメートルから数100キロメートルに及ぶ）の影響を受けて、SAR 干渉画像内にも同様な変動が現れる。また、プラズマの変動が特に強いときには、振幅画像内にも変動縞が現れる。

これらの変動縞は常時発生する訳ではなく、場所、時期に依存する。総じて、干渉処理画像内に現れる確率が振幅画像に現れる確率より非常に高い。振幅画像内の縞は、ストリーキングと称され、PALSAR では総観測パスのうち2.5%が影響を受けている(Shimada et al., 2008)。図4.3.1（左）は四川省大地震のときに観測された干渉画像であり、平地においても激しくうねる位相変動が観測された。このような事例は、それ以外にも非常に多く観測されている。合わせて、磁気赤道付近で発生する類似の縞を図4.3.1（右）に示す。

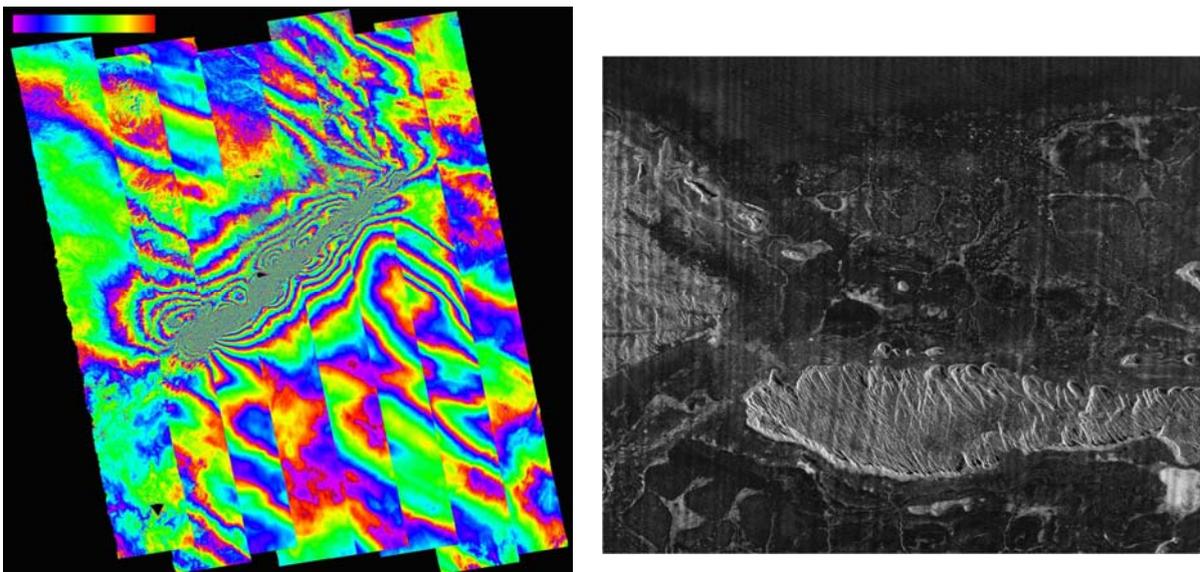


図4.3.1 電離層の変動により影響を受けたと思われる干渉処理画像。左)は四川省地震の8パスをモザイク処理したものであり、中には南東から北西に掛けての縞が見られる。右)は中央アフリカ・ガボンで観測された事例であり、縞は地球の磁力線の方角と合致している。

これらの除去は一般に困難で決定的な方法が無いのが現状であるが、可能性として以下の方法が考えられる。

方法1)：帯域幅分割法による成分類推法：電離層の屈折率は角周波数と関係があることから SAR の信号帯域を分割し、高い周波数と低い周波数でそれぞれ干渉処理を行い、それらの差分関係から、中心周波数に於ける補正量を抽出して補正する方法。ただし、分割した周波数窓間の周波数差が大きい必要があり、ALOS/PALSAR のバンド幅 (28MHz) 程度では、十分な変化分の抽出が困難である。

方法2)：レイトレーシングによる方法：電離層異常のモデル化を行い、トレースごとに補正する。その場合には、遅延時間の計算、屈折パスの計算等を行なうことから、最終的に補正が出来る可能性はある。しかし、問題はどのようにモデルを構築するかであり、プラズマは磁力線に沿うという条件は最低限満たされなければならない。

その他、多くの方法が開発されているが、現在のところ最適と考えられる方法はなく、実用的な方法として認められるにはさらなる事例と検証が必要である。

4. 4 長期的な変動の抽出に伴う課題

海外においては、主としてCバンド SAR の干渉画像にスタッキング法やSBAS（短基線長解析）やPSInSAR などの時系列解析手法を適用して、地下の流体の運動に関連する地盤変動（Schmidt and Bürgmann, 2003; Furuya et al., 2007 など）や、火山性地殻変動（Samsonov et al., 2010 など）、余効変動（Biggs et al., 2009）あるいは活断層のクリープ（Lyons and Sandwell, 2003; Biggs et al., 2007; Lanari et al., 2007 など）など時定数の長い変動の検出が多数報告されている。しかし、Cバンド SAR は山岳や森林地域でコヒーレンスが低く、さらに時間的なデコリレーションも激しいなど、我が国のような起伏に富んだ地形を持つ地域への適用が難しい。そこで、Lバンド SAR を用いて長期的な変動の抽出がどの程度可能か、そして克服すべき問題点があるとすれば何かを探ってみた。

対象地域として、四国東部を選んだ。この地域は南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの影響を受け、最大6 cm/yr におよぶ西北西方向の変動が観測され、しかも南北方向に変位の勾配が大きいの（例えば、Tabei et al., 2002）。この変位の方向はALOS/PALSARの軌道と高角度で斜交するため、適切な地域と考えた。

2006年～2010年前半までの室戸～岡山（パス417）および室戸～兵庫西部（パス67）のALOS/PALSARデータを解析し、スタッキング法を用いて経年的な変動を検出することを試みた。図1は、室戸～岡山の北行軌道（パス417）における観測データの取得日と垂直基線長（以下Bperp）の関係である。2008年半ばに行われたALOSの軌道調整により、2009年後半から時間基線長が2年前後、Bperpが500m以下というペアが増加している。当該地域の地殻変動の大きさから考えて、特別な処理をしなくとも干渉処理により経年的な変動をとらえることが期待できる。ここでは、図4.4.1中の水色の線で示す45ペアを解析した。図4.4.2は北行軌道のパス417において、時間基線長1年9ヶ月以上、Bperpが760m以下のペアに対するアンラップ干渉画像である。いくつかの干渉画像には、電離層の影響と考えられる擾乱が認められる。10cmを超える変動のほとんどが電離層の影響（伝播性電離層擾乱：TID）と考えられ、スタッキングに使用できない。京都大学によるGPS-TECのwebsite(<http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp/>)から取得したパス417観測時刻近傍13:30(UT)のGPS-TEC (perturbation)の分布を見ると、2009年7月21日、9月5日、2010年6月8日などTECの擾乱が見られる日を含む干渉画像には、顕著な干渉縞が現れている（34, 40, 41, 45番など）。一方、地形と相関のある干渉縞を有する干渉画像もあり（32, 33など）、電離層が平穏でも対流圏の影響により、さらにノイズが加わる。図4.4.3は、時間基線長が短い干渉画像も含め、電離層の影響の大きい干渉画像のみを除いて、総解析ペアの40%にあたる18ペアの画像をスタッキングした結果である。対流圏の影響は無視している。スタッキングにはGammaのstacking関数を使用した。ここでは10個以上のデータのあるピクセルについて、視線方向の平均変位速度を示している。得られたスタッキング画像は、図4.4.3（右）のGPS観測変位からの合成干渉画像と四国においては概ね整合している。しかし、岡山側にはGPSからの合成干渉画像には見られない東西方向の変位勾配が見られ、電離層の影響が依然残っていることを示唆している。

南行軌道パス67からの画像についても、同様な解析を行った。南行軌道からの観測は回数が少ないものの、昼間の観測であるためTIDの影響は少ないと期待された。しかし、

電離層の擾乱が見られる日もあるので、これらを除くとスタッキングに使用できる干渉画像数はかなり限られたものになってしまう。

これまでに指摘されてきたように、

- (1) 電離層の擾乱（特に TID）による影響
- (2) 対流圏の擾乱による影響
- (3) 長い垂直基線長によるアンラッピングの困難さ
- (4) 観測回数
- (5) 観測方向

が、課題として挙げられる。以下に各項目について述べる。

(1) 電離層の擾乱（特に TID）による影響

電離層の影響は、観測日によって複雑なパターンを示すため、モデル化し除去することは容易ではない。GPS-TEC から推定し除去することが考えられるが、GPS-TEC の特徴的な波長は干渉画像に見られる縞の波長より長いように見える。長波長のものは除けるかもしれないが、短波長の縞は残る可能性が高いであろう。現状では、経験的に擾乱の大きい日のデータを除くことにならざるを得ない。なお、GPS 速度場から干渉画像を合成し、これと観測画像との差をとることにより長波長のノイズを抽出することも可能である (Fukushima and Hashimoto, 2009)。しかし、この方法は、GPS 観測網がある地域にしか適用できないという欠点がある。

(2) 対流圏の擾乱による影響

対流圏の擾乱による影響のうち、地形と相関のある影響を除くことは可能である。視線距離変化を地形の多項式でモデル化し、これを補正するものである。しかし、図 4.4.2 のデータに適用し、スタッキングを行ったところ、逆に地形の効果が強調される結果となった。用いた stacking 関数が時間基線長の短いペアに大きい重みを与えるため、一部のペアで地形補正がうまくいっていない画像が強調された可能性が考えられる。一方、干渉画像中にも山岳波と考えられる波動のような干渉縞が認められるものもあるので、これも無視できない。

(3) 長い垂直基線長によるアンラッピングの困難さ

アンラッピングの問題は、垂直基線長の短いペアが増えてきたため、かなり改善できるものとする。今回示したほとんどの干渉画像は、コヒーレンスが高く、四国山地の険しい地域でもアンラッピングがスムーズに行えた。ただ、この地域特有の問題として、本州や島嶼など、海を挟んだ地域との連続性に問題が残ることが挙げられる。電離層の擾乱と考えられる縞模様は、理由は不明であるが、中国地方に顕著に現れ、四国にまで及んでいないケースが多い。このため、アンラッピングにおいて、ブリッジでつなぐ場合の位相のステップ量の与え方に大きな任意性が残ってしまう。

(4) 観測回数

北行軌道については、これまで24回の観測が行われ、年平均4～5回を確保している。しかし、南行軌道のパス67については、これまで12回の観測しか行われておらず、年平均4回に満たない。特に2009年には1月と4月のわずか2度の観測しか行われていない。電離層や対流圏の擾乱がランダムに発生することを考えると、観測回数が多いことが必須である。南行軌道ではScanSARの観測も行われている。パス67はScanSARのビーム4の領域に入り、FBS/FBDとの干渉処理も可能であるので、ScanSARデータを用いて観測の回数の少なさを補うことも必要である。

(5) 観測方向

観測方向としては、北行・南行両方の画像があることが当然望ましいが、上記のような状況で十分な観測量の確保は難しい。しかし、南行軌道の方が、この地域の地殻変動に感度が高いため、変動を検出できる可能性は北行軌道より高いと考える。次期衛星ALOS-2においては、南行軌道からの観測回数も増えるものと期待されるため、対象とする地域の地殻変動特性を考慮した観測計画を立案することが重要である。

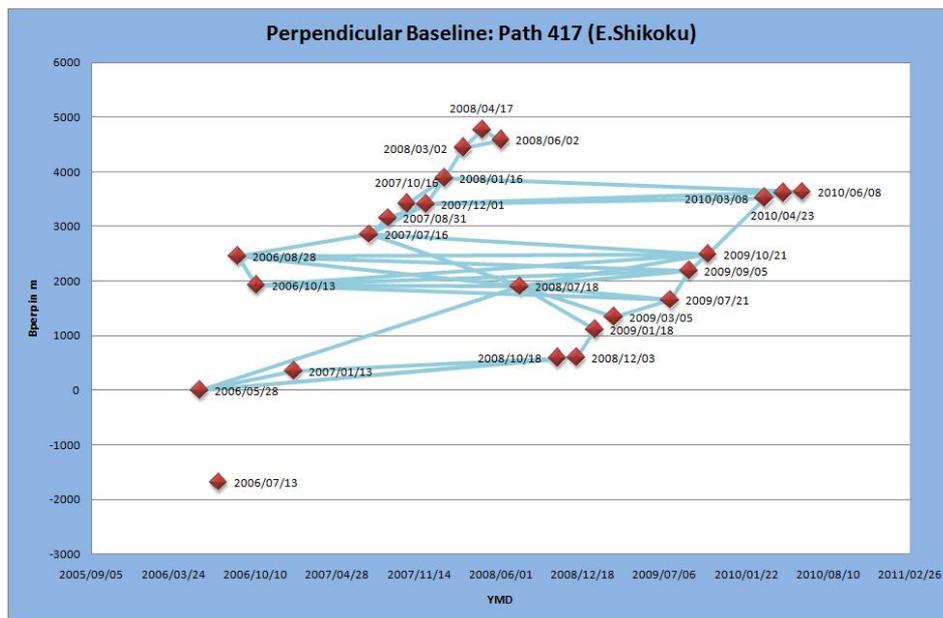


図4.4.1 北行軌道のパス417の画像の時系列と垂直基線長。直線で結んだペアが図4.4.2で示されているもの。

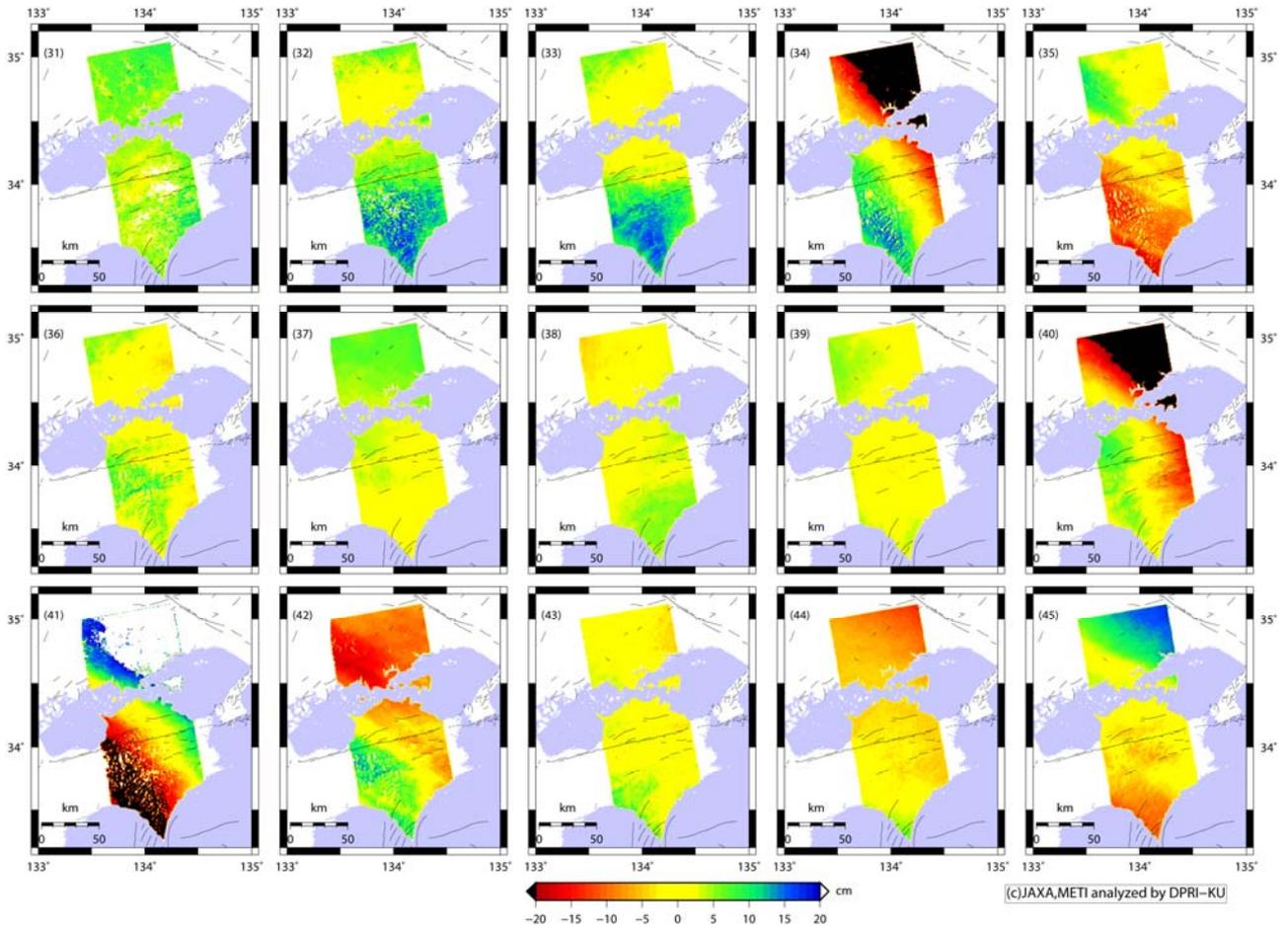


図 4. 4. 2 パス 417 の干渉画像の例
 (時間基線長：1年9ヶ月以上、垂直基線長：760m以下)

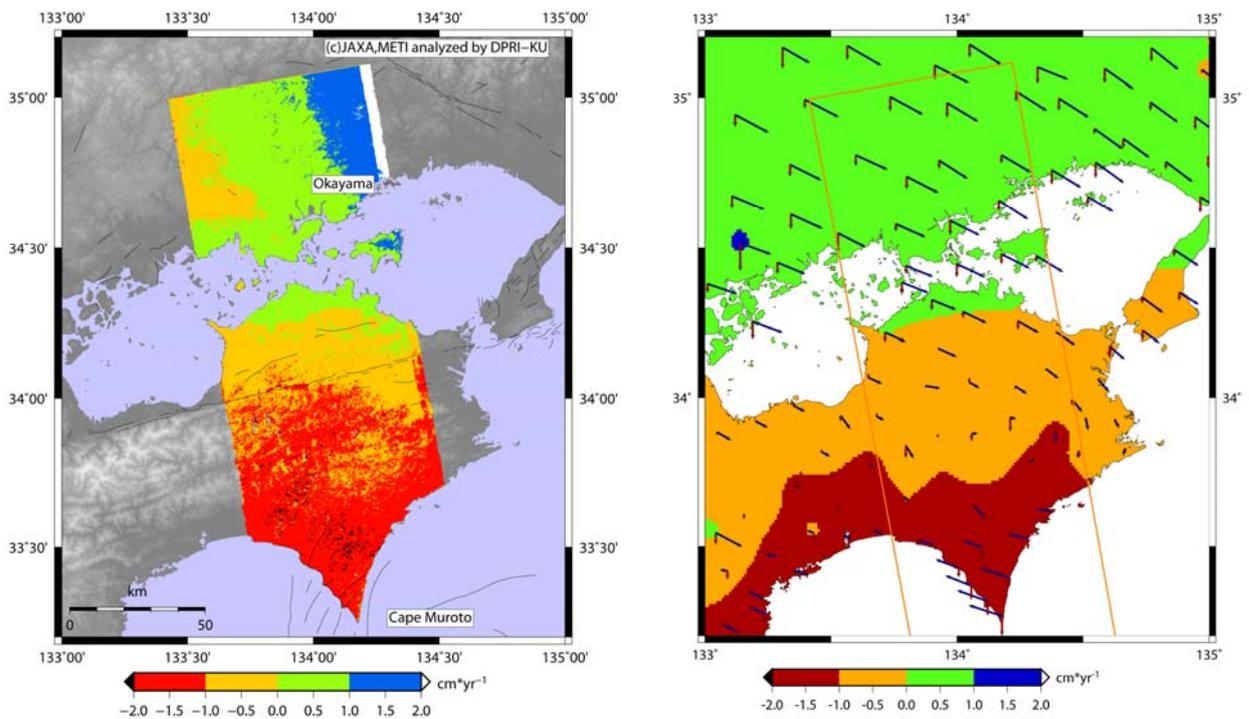


図 4. 4. 3 (左) 電離層擾乱の影響が少ない干渉画像をスタッキングして得られた視線方向変位速度。(右) GPS 観測から得られた視線方向変位速度。四国北部が左図と同じ色になるように調整。

4. 5 ScanSAR を利用した解析

SAR 干渉解析によっては、干渉画像内における相対的な地殻変動（スラントレンジ変化）が得られるので、長波長の地殻変動を捉えるためには、観測幅が広いモードによる観測が有効である。SAR 干渉解析に一般的に用いられているストリップマップモードの観測幅は数 10km から 100km であるが、この程度の観測幅では、M7 以上の地震に伴う地殻変動の全容を一度の観測では捉えられない場合がある。そのような場合には、複数の軌道から観測された SAR データを解析しなければならないが、各軌道の観測日における大気や電離層の状態によってノイズの大きさが異なることや、含まれる余効変動の大きさが異なることによって、その解釈を複雑にさせる場合がある。さらに、M8 クラスの地震については、さらに多くの軌道について解析する必要があり、その全容を把握するまでに約 1 カ月の時間を要する。このように、ストリップマップモードを用いた干渉解析による地殻変動観測は、即時性が低い場合がある。

ScanSAR はレーダー（電波）の照射方向を変化させながら観測することにより、広範囲を一度に観測するモードである（図 4. 5. 1）。最近では、観測幅が数百 km の ScanSAR データを用いた干渉解析が可能になり、大規模な地震に伴う広範囲におよぶ地殻変動の全容を一度の観測で捉えられるようになった（e. g., Holzner and Bamler, 2002, Pritchard and Fielding, 2008, Tong et al., 2010）。このような ScanSAR による干渉解析が実用的に利用できるようになれば、効率的かつ迅速な地殻変動検出が可能になると期待されている。

本節では、地殻変動検出のための ScanSAR データの利用方法の概要を述べ、その長所、短所および今後の課題についてまとめる。

4. 5. 1 ScanSAR データを用いた解析

ScanSAR は、ある電波照射方向に関して、その方向を変化させずに数百回のパルスを照射した後、電波照射方向を変化させて、再度、照射方向一定で数百回のパルスを照射する。その電波照射方向一定での数百回のパルス照射をバーストと呼ぶ。

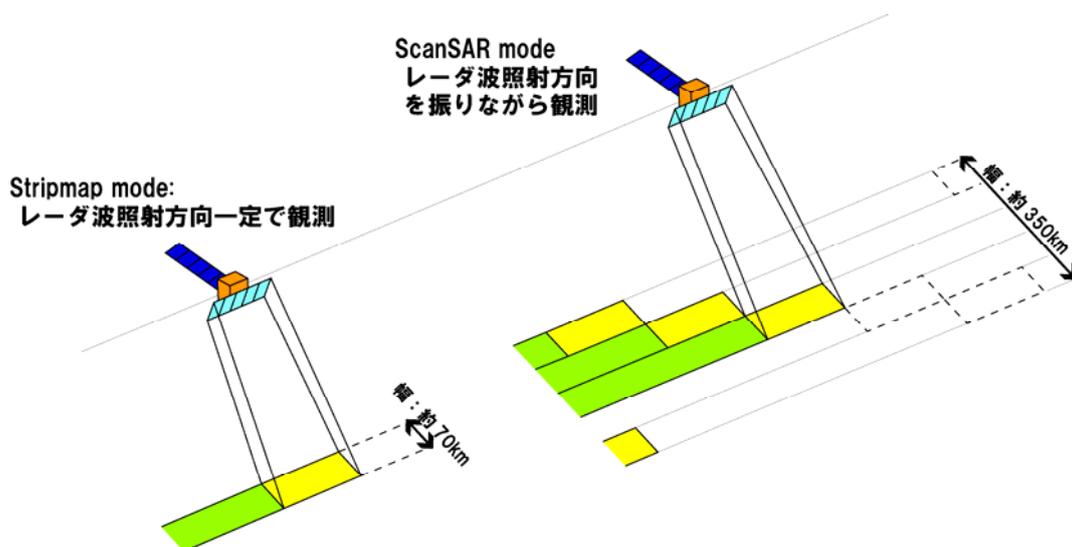


図 4. 5. 1 ストリップマップモードと ScanSAR モードによる観測。

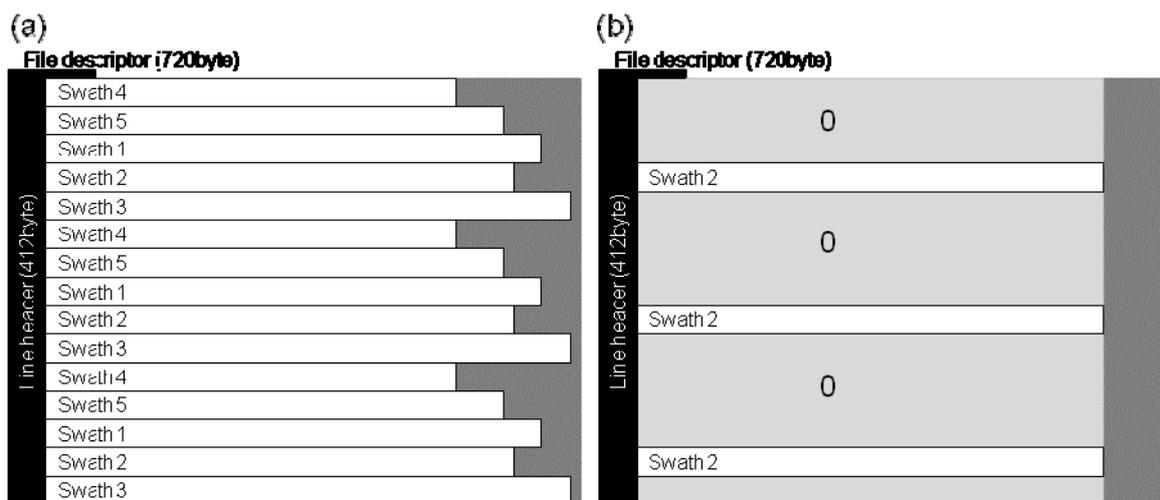


図 4.5.2 (a) PALSAR Level1.0 データのデータ格納様式。(b) Swath 2 を処理する場合のデータ。

PALSAR の ScanSAR は、電波照射方向を最大 5 段階 (Swath 1 ~ 5) に変化させて観測を行うことにより、350km の観測幅を実現している。ただし、地表 (ターゲット) に対するレーダーの照射が断続的になることにより、分解能が低下するという短所がある。

ScanSAR データに関する Single Look Complex (SLC) 画像の作成においては、Full-Aperture 法、SPECAN 法、SIFFT 法、拡張 chirp-scaling 法等が用いられる (e. g, Cumming and Wang, 2002)。この中で、Full-Aperture 法 (Bamler and Eineder, 1996) は、生データの内容を変更するのみで、ほとんどの SAR プロセッサが採用しているレンジドップラー法による SAR 処理が可能であることから、良く用いられている。以下では、その方法を簡単に説明する。

Full-Aperture 法は、最初にデータを Swath ごとに分割して、個別に解析を行う。一般に、SAR データは、1 回のパルス照射に対するエコーの記録が 1 行に記述されている (PALSAR level1.0 のデータ格納様式を図 4.5.2 (a) に示す)。これを Swath ごとのデータに分割して、処理を行う。具体的には、解析する Swath 以外のデータが格納されているラインのデータを 0 に相当する値に置き換え (図 4.5.2 (b))、そのデータをストリップマップモードのデータと同様に処理を行い、SLC 画像を作成する。また、干渉処理においてもストリップマップモードのデータと同様に処理を行い、Swath ごとの解析結果を地図投影後に結合もしくはレーダー座標系において結合後に地図座標に変換する。

4.5.2 ScanSAR-ScanSAR 干渉解析における適用条件

SAR 干渉法において、高い干渉性を得るためには、解析に用いるデータを観測した軌道間の距離 (基線長) が短い必要がある (Zebker and Villasenor, 1992)。特に、基線長が長すぎる干渉ペアに対しては、SAR 干渉法を適用することができない。これは、ScanSAR データを用いた SAR 干渉解析においても同様である。ScanSAR データと ScanSAR データのペアに SAR 干渉法を適用する場合 (ScanSAR-ScanSAR 干渉解析) には、基線長に関する適用条件に加えて、バーストのタイミングが同期している必要がある。これはバーストオーバーラップと呼ばれ、図 4.5.3 に示すように、SAR 干渉法を適用するデータ間のバース

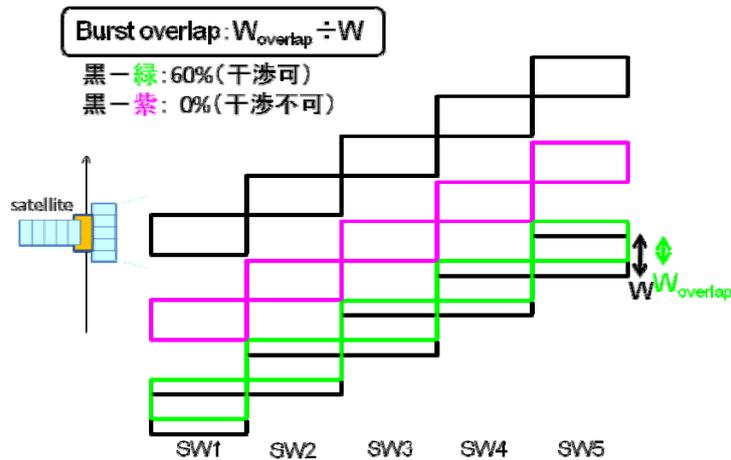


図 4. 5. 3 バーストオーバーラップに関する概念図。

トの重なる割合で表わされる。図 4. 5. 3 の黒と緑で示したように、バーストの大半が重なっている干渉ペアには、精度良く SAR 干渉法を適用することができる。一方、黒と紫で示したように、全く重なりが無い場合には、干渉は得られない。PALSAR の通常運用においては、意図的にバーストを同期させた観測は行われていないが、地震発生直後などに、特別な観測要求が行われた場合には、バーストを同期させた観測が行われる。

ScanSAR とストリップマップモードのデータペアについても、オフナディア角が同じ部分にのみ、SAR 干渉法を適用することができる。この場合、バーストオーバーラップは常に 100%なので、その制限は受けない。

4. 5. 3 チリ地震に関する解析事例

ScanSAR データを利用した地殻変動検出例として、2010 年 2 月 27 日に南米チリの海岸付近において発生した地震 (Mw8.8) に関する解析事例 (Hashimoto et al., submitted) を紹介する。地震発生直後に防災利用実証実験地震 WG において、本地震に伴う地殻変動を検出するための最適な観測についての議論が開始され、2010 年 3 月 1 日の ScanSAR モードによる観測 (南行軌道) が要求された。本データは、2008 年 4 月 10 日のデータとのバーストオーバーラップが大きく、平野部においては連続性の高い干渉縞が得られた (図 4. 5. 4 (a))。得られた干渉画像は、震央付近における南北約 600km、海岸から約 200km の範囲に、スラントレンジが大きく伸長する地殻変動が生じていたことを示している。特に、その分布に着目すると、スラントレンジ伸長の 2 つのピークが南緯 35 度と 37 度付近に見られ、本地震では少なくとも 2 つのアスペリティで破壊が生じたことを示している。一方、図 4. 5. 4 (b) は北行軌道のストリップマップモードのデータから求めた干渉画像である。本地震の地殻変動は広域に及んでいるため、全域の地殻変動を捉えるためには 7 つの軌道からの観測が必要であった。そのため、その観測が終了するまでに、地震発生から 1 カ月以上の時間を要した。このように、ScanSAR を用いた干渉解析は、広範囲におよぶ地殻変動の全容を短時間のうちに把握できるという長所を有している。

地震後に観測された 2010 年 3 月 1 日の ScanSAR データに関して、観測日が近い ScanSAR データとは、バーストオーバーラップが小さかったため、時間間隔が長いデータとのペアでしか干渉を得ることができなかった。ALOS 衛星の軌道は、時間とともに一方向にシフト

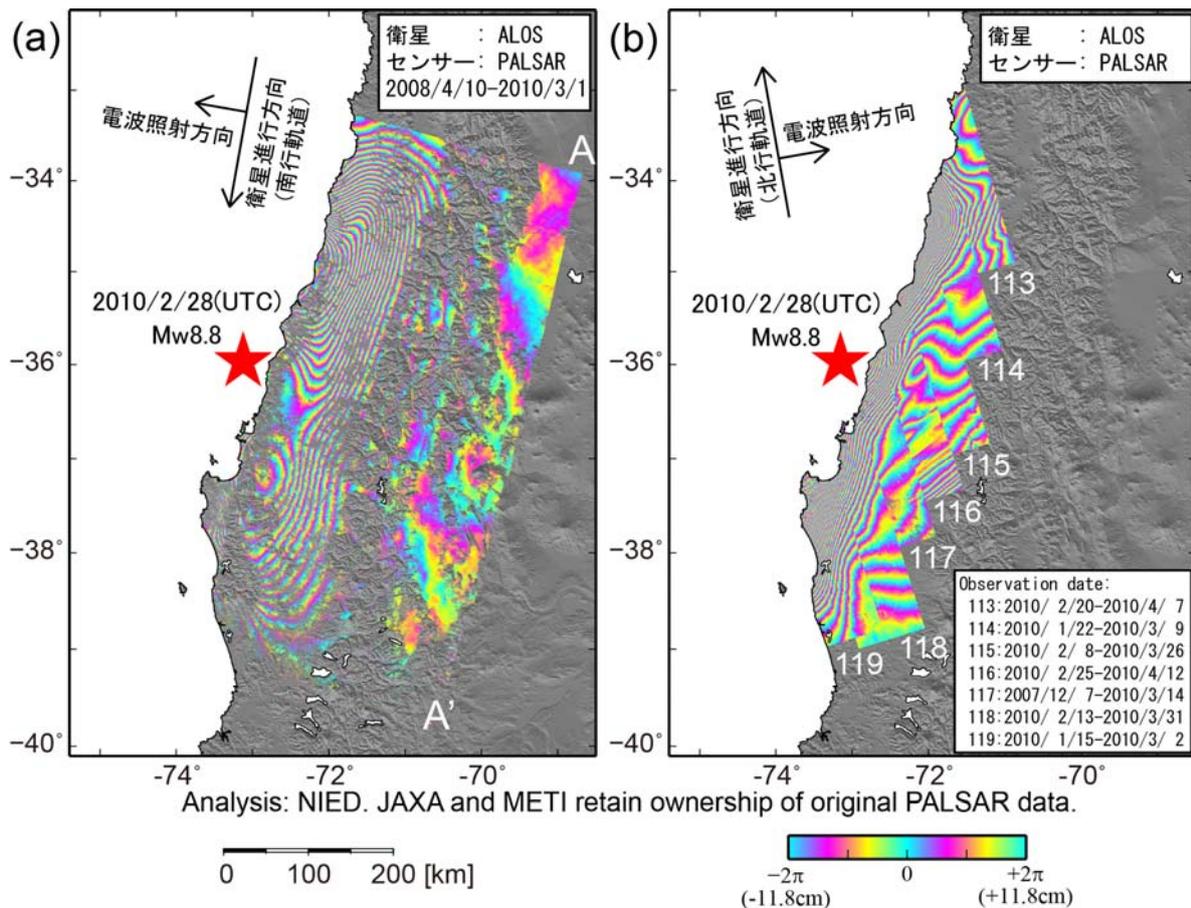


図4.5.4 (a) チリ地震に関する ScanSAR-ScanSAR 干渉解析結果。本解析では、2008/4/10 と 2010/3/1 に南行軌道から観測されたデータを使用した。(b) アセンディング軌道のストリップマップモードのデータから求めたチリ地震に伴う地殻変動。用いたデータの観測日を図中右下に示す。

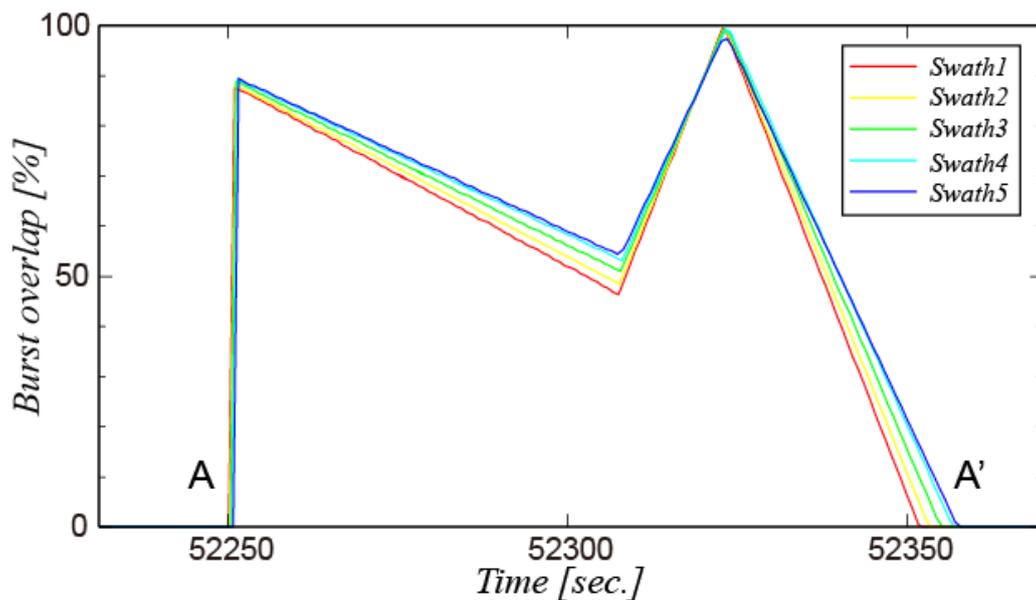


図4.5.5 チリ地震に関する ScanSAR-ScanSAR 干渉解析に用いた干渉ペアに関するバーストオーバーラップ。A, A' は図4.5.4 (a)に示す A, A' のラインに対応する。

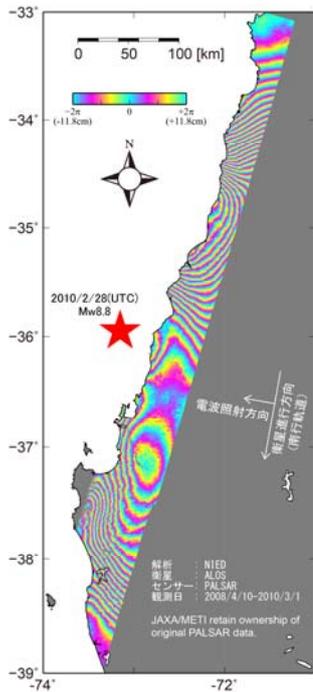


図4.5.6 PALSARのScanSARデータ(2010/3/1)とストリップマップモードデータ(2010/1/14)との干渉解析結果。

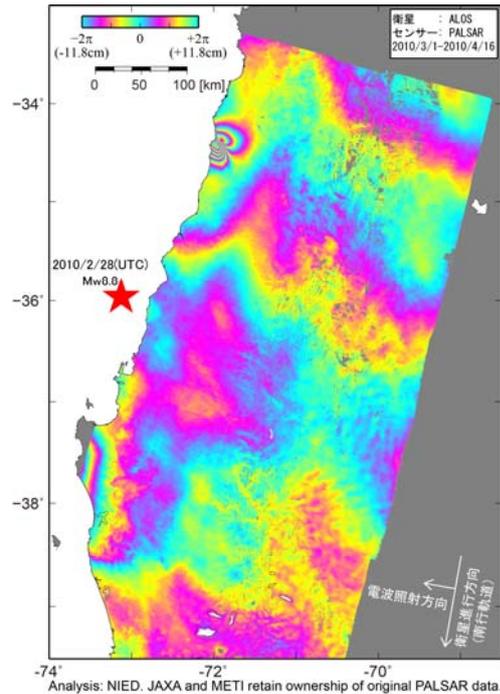


図4.5.7 2010/3/1と2010/4/16の干渉ペアに関するScanSAR-ScanSAR干渉解析結果。

するという特徴を有しているため、解析した干渉ペアに関する基線長(B_{PERP})は1625m (swath 3)と好条件ではなかった。これにより、山岳部においては高い干渉性は得られなかった。また、時間的な散乱の変化に起因する干渉性劣化も含まれると考えられる。さらに、干渉画像の南端付近においてはバーストオーバーラップが徐々に減少し、南緯40度付近では、全く干渉が得られなかった(図4.5.5)。このように、ScanSAR-ScanSAR干渉解析においては、バーストオーバーラップの条件がきわめて重要である。通常運用において、常にバースト同期が行われているわけではないので、条件によっては、どのデータともScanSAR-ScanSAR干渉解析を適用することができないという可能性もあり得る。しかし、そのような場合でも、ストリップマップモードのデータとの組み合わせで、オフナディア角が同じ部分についてのみ、SAR干渉法を適用することができる。図4.5.6は、2010年1月14日に観測されたストリップマップモードデータとの干渉解析結果であり、画像全域において高い干渉性が得られた。このことは、たとえScanSAR-ScanSAR干渉解析に関する適用条件を満たすデータが無かったとしても、干渉解析に適用できるストリップマップモードのデータがあれば、有効にScanSARデータを利用することができることを示している。

大きな被害の発生が想定される規模の地震が発生した場合には、地震WG等からの要求を通じて、バーストを同期させた観測が実施される。チリ地震に関しては、余効変動を検出することを目的として、2010年4月16日に2010年3月1日の観測とバーストを同期させた観測が実施された。バースト同期、基線長、データ取得間隔に関する条件がきわめて良かったことから、画像全域において高い干渉性が得られた(図4.5.7)。南緯37.5度付近における余効変動や南緯37.5度付近に発生した余震に伴う地殻変動等を明瞭に見る

ことができる。しかし、地殻変動シグナルとは考えられない長波長のスラントレンジ変化が見られ、なんらかのノイズが重畳していると考えられる。このようなノイズの原因を明らかにし、補正する手法を確立していくことも、今後の課題の一つである。

4.5.4 まとめ

SAR 干渉解析による地殻変動検出において、ScanSAR のデータを用いることの最大の利点は、広範囲の地殻変動を一度に把握することが出来ることである。これにより、地震に伴う地殻変動の全容を迅速に把握できる可能性が高くなる。一方、ScanSAR データの干渉ペアに SAR 干渉法を適用するためには、それらの観測におけるバーストが同期している必要がある。PALSAR の通常運用においては、意図的なバースト同期は行われていないので、すべての ScanSAR データに SAR 干渉法を適用できるわけではない。また、ScanSAR はストリップマップモードと比べて、分解能が劣るという問題点がある。分解能が低いことにより、空間勾配が大きい地殻変動に対する検出限界が低くなる。例えば、地表断層付近の地殻変動を検出できない場合がある。また、干渉性が低くなるという問題も生じる。よって、緊急観測を要求する場合には、予測される地殻変動の範囲や大きさなどから、それを検出するためには、ストリップマップモードと ScanSAR モードのどちらが適しているかを見極めることが重要である。

現在、地殻変動検出における PALSAR の ScanSAR の利用は、急速に進みつつある。しかしながら、ScanSAR の解析は、ほとんどの SAR 解析ソフトウェアに実装されておらず、現時点では解析機関が独自にプリプロセッサを開発するなどして、事例研究を進めているところである。その事例研究の中でプリプロセッサの改良や解析ノウハウの蓄積を重ね、最近の解析事例においては、それぞれの機関で調和的な結果が得られるようになってきた。しかし、長波長のノイズが重畳する場合があるなど、いまだ問題点は残されており、その改良は今後の課題である。

最後に、ScanSAR 干渉解析の長所、短所および今後の課題点について、以下にまとめる。

長所：

- ・干渉可能なアーカイブデータがあれば、地震発生後の 1 度の観測で、広範囲の地殻変動を把握できる。
- ・大規模な地震に伴う地殻変動の全容を迅速に把握することができる。

短所：

- ・ストリップマップモードの画像と比べて分解能が劣る。
- ・ストリップマップモードの画像と比べて干渉性が劣る。
- ・空間勾配が大きい地殻変動に対する検出限界が低い。
- ・干渉ペア間でバーストが同期している必要がある。

今後の課題点：

- ・ScanSAR の SAR 処理のための（プリ）プロセッサの開発および改良。
- ・ノイズ要因の解明およびその軽減手法の研究。

4. 6 ピクセルオフセット解析

主にサブメートルオーダーの大規模変位を抽出するための SAR データ解析技術として、ピクセルオフセット法がある(2.2)。本小委員会でも、2008年中国・四川(汶川)地震、2008年岩手・宮城内陸地震において、SAR 干渉法では計測困難である震源断層近傍の地表変位を本手法により抽出し、地殻変動分布の全容を明らかにして、地震像の解明に大きな貢献を果たした。本節では、ピクセルオフセット法を用いた地殻変動解析について、その長所・短所を整理し、本解析技術における現状の総括、および課題についてまとめる。

4. 6. 1 ピクセルオフセット解析の長所

(1) 干渉性に影響されない

SAR 干渉法の主な干渉条件として、1) 変位勾配が小さいこと、2) 散乱状態に大きな変化がないこと、3) 基線長が短いこと(臨界基線長以下)が挙げられる。SAR 干渉法を用いた地殻変動観測との比較の上で重要な点は1)、2)である。ピクセルオフセット法はこれら条件に縛られることなく変位量の算出が可能だからである。これらの長所は、地殻変動観測において、1) 大規模な地殻変動の観測ができる、2) 時間経過に伴う相関低下(Temporal decorrelation)に計測が左右されない、という利点がある。

(2) 2成分を計測可能

ピクセルオフセットでは、衛星-地表間の成分(レンジ成分)に加え、衛星の飛行方向に平行な地表面上の水平成分(アジマス成分)が計測可能である。このことは、北行・南行軌道の両データがあれば、計4成分の変位から完全な3次元変位場を獲得できることを意味する。SAR 干渉法では、計測できる変位成分が1方向のみのため、たとえ北行・南行軌道の両データがあったとしても、準上下・東西の2成分で構成される、いわゆる2.5次元変位場しか得ることができない。

(3) 位相アンラッピングが不要

SAR 干渉解析では、観測される位相差は $-\pi$ から $+\pi$ の範囲に折り畳まれており、いわゆる 2π の任意性のため変位量分布は一般的に不連続である。連続した変位量を得るためには、 2π を加減算して折り畳まれた位相を繋ぎ合わせる、位相アンラッピング処理が必要となる。一般に、位相アンラッピング処理には非常に手間がかかる場合が多く、正確な変位場を得るのは困難であることが多い。一方、ピクセルオフセットでは、ピクセル間の変位量が直接算出されるため、位相アンラッピングのような複雑かつ面倒な処理を経ることなく、変位場を獲得できる長所がある。

(4) 全天候型 ~光学センサとの比較~

同様なアプローチで光学センサを用いても、ピクセルオフセット解析は可能である。光学センサを用いたピクセルオフセット解析では、空間分解能が高いという利点が存在する一方で、雲などで地表が覆われてしまうと地表変位を計測できないという欠点がある。一方、SAR センサが照射するマイクロ波は、雲などを透過するため天候に左右されず確実に地表情報を獲得することができる点で大きなメリットがある。

4.6.2 ピクセルオフセット解析の課題

(1) 低計測精度

中国・四川（汶川）地震の震源域付近において、地震前データペアを用いた精度検証を行った結果によると、ピクセルオフセット解析の精度は、山地で約 30cm、平野で約 10cm であった（Kobayashi et al., 2009）。また、岩手・宮城内陸地震の震源域周辺の地殻変動の少ない地域において検証を行った結果によると、ピクセルオフセット解析の精度は、おおよそ 30–60cm であった。オフセット量は、垂直基線長や相関窓サイズなどの解析パラメータに依存することから、一概にこの見積りをもってピクセルオフセット計測の誤差とまで一般化はできないが、概して数十 cm の精度であることが言えよう。

原理上、ピクセルオフセットのレンジ成分のオフセット量と、SAR 干渉解析により計測される距離変化量は等価である。SAR 干渉解析と併せることにより、センチメートルからメートルオーダーまでの広いダイナミックレンジをカバーした地殻変動の全容把握と地震像の解明に非常に有効である。ただし、解析精度に改善の余地があり、両者の定量的な接続にはなお課題が残されている。

(2) 低空間分解能

ピクセルオフセットの変位計算では、適当な大きさの相関窓を設定して、対応する相関窓間の面積相関から変位量を見積もる。原理上、この相関窓の大きさが、計測の空間分解能に直結する。安定した信頼性の高い変位量を抽出するには、ある程度大きめの相関窓が必要となり、結果的に、数百 m から 1 km 程度のサイズが計測に適切な相関窓となる。例えば、128 ピクセルの窓サイズを採用した場合、ALOS/PALSAR（FBS モード）では、レンジ、アジマス方向でそれぞれ～960 m、～400 m のサイズに相当する。一般的な SAR 干渉処理では数十 m の空間分解能であることを考えると、その 10 分の 1 程度の分解能にとどまることとなる。

(3) 地形の影響

SAR 干渉解析では、その原理上、ある基線長（臨界基線長）を超えると干渉それ自体が不可能となる。一方、ピクセルオフセット法は、基本的には基線の長短には依存しないで変位を計測可能である。しかしながら、基線長と標高に強い相関が現れるため、実際には長基線長の場合には適用が困難な場合が多い。これは、フォアショートニングに差が出るため、実際の地表変位とは異なる見かけのオフセットが現れるためである。地形起伏の大きな領域を解析する場合、その規模は数 m にも達することがあり、地殻変動観測においてこの影響は無視することはできない。

このような見かけのオフセットの軽減のために、標高を考慮しながら画像間の位置を合わせる高度な画像マッチング処理を、中国・四川（汶川）地震や岩手・宮城内陸地震の解析に適用した（Kobayashi et al., 2009）。その結果、中国・四川（汶川）地震の解析では、最大 3m 近くにもおおよぶ見かけ上のオフセット量が（図 4.6.1 (a)）、10～40cm 程度に抑えられ（図 4.6.1 (b)）、変動の計測精度を飛躍的に向上させることができた。これにより、地形起伏の激しい山岳地帯を含めた地殻変動観測が可能となり、地震断層の位置の推

定などに大きく貢献した。

しかしながら、標高を考慮しても、DEMの精度や急峻な地形領域での位置合わせの精度の不足、レイオーバーの出現などの原因により、山岳地帯の一部でなお数十cmのオフセットが残る場合がある。そのため、高精度の計測には、地形の影響が小さくなるように、垂直基線長が小さなペアを選択する必要がある。このことは、ピクセルオフセットにおいても、SAR干渉解析同様、短基線長のペアの解析が有利であることを意味する。

2013年度打ち上げ予定の次期SAR衛星ALOS-2では、安定した短基線長軌道を確認した運用が目指されている。計測精度の向上に資すると考えられ、今後の研究に期待が寄せられる。

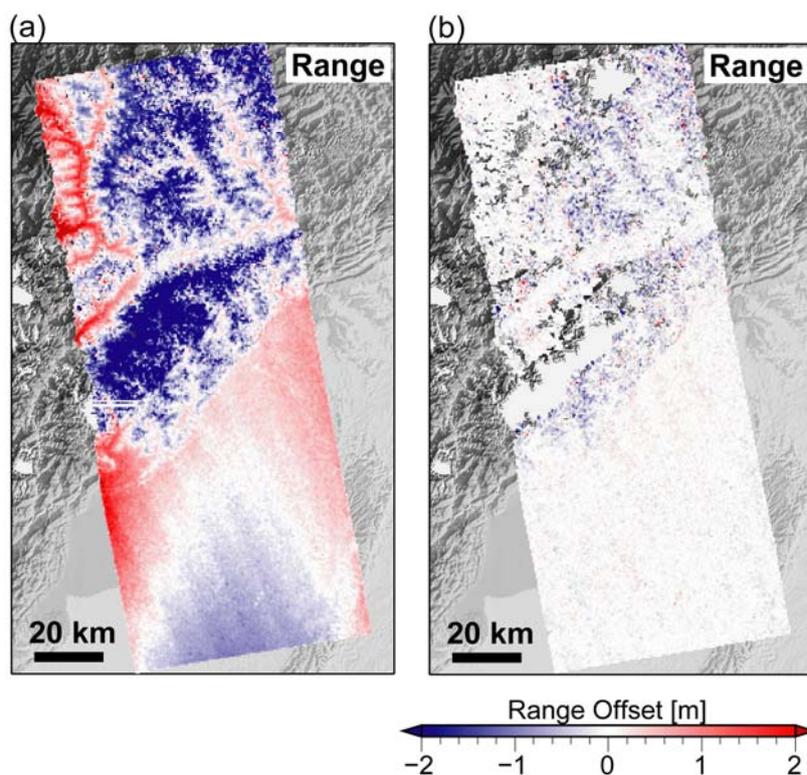


図4.6.1 ピクセルオフセット解析における標高補正処理の有効性 (Kobayashi et al., 2009)。(a)補正処理なし。(b)補正処理あり。Copyright (2009) American Geophysical Union.

(4) 電離層の影響

ピクセルオフセットに長波長のノイズが含まれることがある。それらは時に数mの規模に達し、地殻変動の抽出に致命的な影響を与える。経験的にこのノイズは、北行軌道の、アジマス成分によく現れる傾向にある。この問題が顕著に認識されたのは、中国・四川（汶川）地震で（図4.6.2 (a)）、最大4–5 mの振動的なノイズが重畳し、地殻変動観測に大きな支障をきたした。

この長波長ノイズの軽減のために、空間周波数領域においてノイズに相当する周波数成分を除去するフィルタリング処理法を開発した (Kobayashi et al., 2009)。このフィルタリング操作を中国・四川（汶川）地震に適用したところ、長波長ノイズを有意に軽減することに成功した（図4.6.2 (b)）。これにより、アジマス方向の変位パターンがわかるよう

になり、断層の運動様式の推定に大きく貢献した。

このアプローチは電離層におけるノイズ発生源をモデル化することなく、信号処理レベルでノイズ軽減ができ大変簡便であるものの、ノイズの振動方向と地殻変動性シグナルの振動方向が同じ場合には、それぞれの周波数成分が既知でない限り両者を分離することは困難なため、適用範囲には限界がある。ノイズ原因を精査し、より本質的なノイズ軽減・除去の解決方法が望まれる。この電離層起因と思われる長波長変動は、ピクセルオフセットのみにとどまらず、SAR 干渉解析にも深刻な影響を与えており（4.3）、SAR データを用いた地殻変動解析においてこの問題の克服は今後の大きな課題と言えよう。

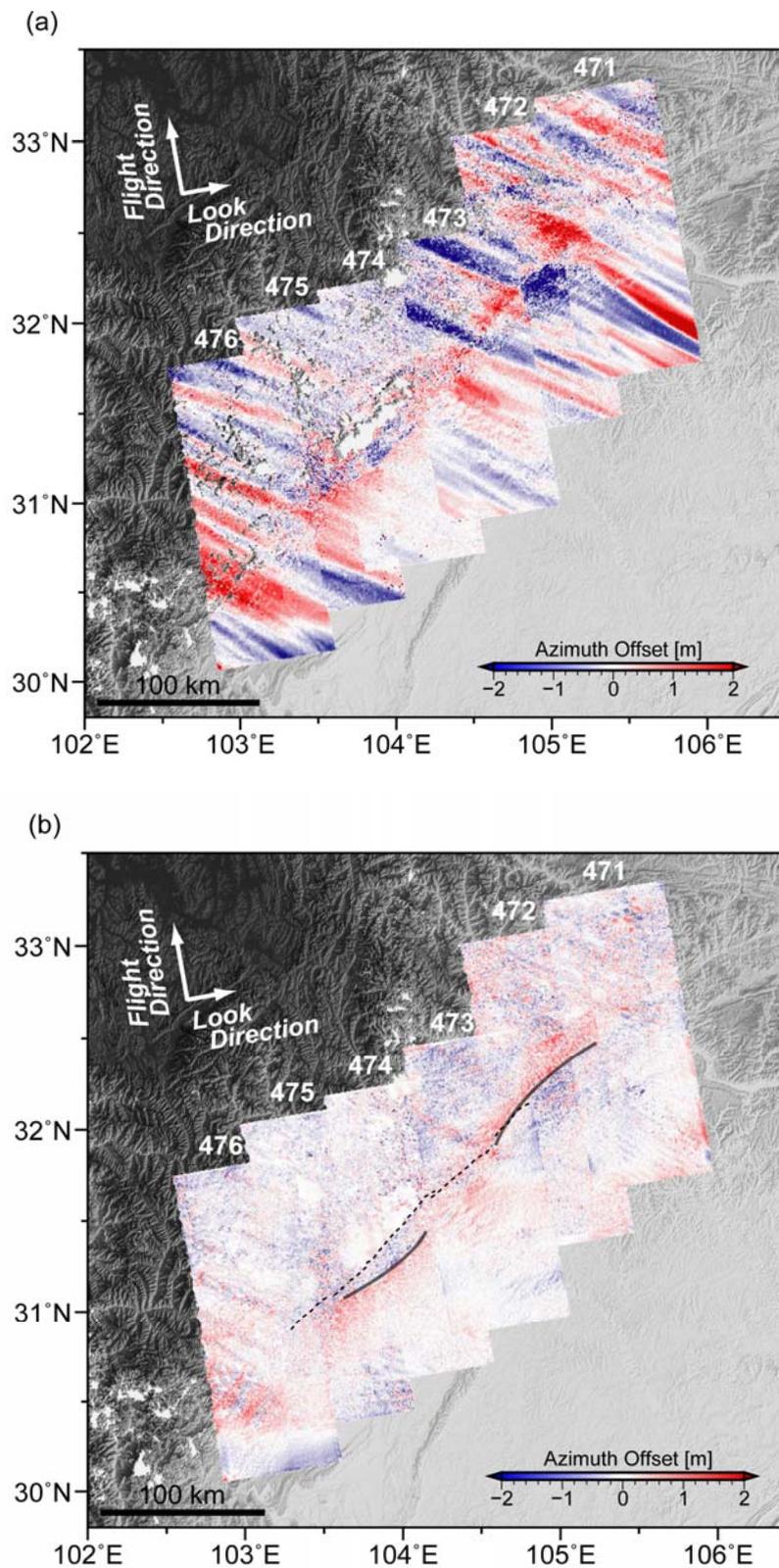


図4.6.2 電離層起因と思われる長波長ノイズの例。中国・四川（汶川）地震 (Kobayashi et al., 2009)。(a) フィルタリング処理前。(b) フィルタリング処理後。Copyright (2009) American Geophysical Union.

5. 今後の課題

小委員会では、懸案であった幾つかの課題に対して、一定の方向性を見出すことができた。一方で、時間の制約や、十分な関連データの蓄積ができなかったため、結論を見出すに至らず、将来にその解決をゆだねざるを得ない課題も残った。ここでは、それらの課題について簡単に述べる。

(1) 電離層擾乱による誤差の補正方法

小委員会の検討により、位相干渉画像やピクセルオフセット解析結果に表れる空間的中・長波長のノイズの原因が、電離層の総電子数の空間分布の不均一性にあることをほぼ明らかにすることができた。さらに、それらの対処については、数多くのデータを取得し、基本的に電離層状態のランダム性が高いことに期待して、時間的に平均化(スタッキング)を行う方法や、単一データに対して空間的フィルター処理を施し、中・長波長のノイズを除去する方法を提示することも行った。

しかしながら、それらの誤差除去方法は、ノイズ自体を根源的に取り除く根本的な解決方法ではなく、まだ完全なものではない。今後の技術的発展が期待される課題である。

(2) 雪氷被覆による相関低下の対処方法

小委員会の活動期間に我が国で発生した主要な地震に限っては、時期的にも地域的にも積雪とはほぼ関係のない状況で発生し、委員会における検討中に大きな問題となることはなかった。しかし、これまでの多くの観測事例において、雪氷に覆われた地域では、位相の干渉性が極度に劣化して、地殻変動情報の取得に深刻な悪影響を与えることが指摘されている。我が国においても、特に高緯度地方や山岳部においては、年間のかなりの期間が、雪氷に覆われる地域があり、その期間に地震が発生した場合には、SAR 干渉解析では、地殻変動の即時把握が困難になる恐れが高い。小委員会では、この問題については、効果的な対処方法を見出すことができなかった。これも、将来に残された課題である。

(3) 多種衛星利用による時系列解析

これまでに SAR を搭載された衛星が各国から打ち上げられ、利用可能なデータ量が増えており、時間的にも空間的にもカバーされる領域が飛躍的に拡大しつつある。これらの有利性を積極的に利用して、多種の衛星からのデータを統一的に解析して、地殻変動の時間的発展の様子をきめ細かく解析する手法の開発が世界的に進んでいる。小委員会では、海溝型地震の準備過程である海洋プレート沈み込みによる広域の定常的な地殻変動の検出方法について、関連する議論を行ったが、十分にその可能性を掘り下げるまでには至らなかった。この問題も将来の課題である。

なお、打ち上げ後の5年間、数々の貴重な観測データを取得し、我が国周辺はもとより地球上の各地で発生した主要な地震に関する理解を深めるために多大な貢献をした「だいち」も、2011年4月22日電源機能を喪失し、5月12日に運用を終了した。世界的にみても大きな特徴のあるLバンド衛星が失われた影響は大きく、現在打ち上げ計画が推進されている次号機の順調な打ち上げと観測開始が強く待たれるとともに、世界各国の他の衛星

のデータの有効活用が従来にも増して重要な課題である。

以上のように、小委員会の活動においては、様々な理由からその解決を将来にゆだねざるを得ない課題がいくつか残った。そのいずれも解決されれば地震の調査研究の高度化への SAR の貢献度を一層高める効果の高いものばかりである。我が国のこの分野の研究者の更なる努力によって、これらの課題が解決され、その結果が我が国だけでなく世界の地震調査研究の発展につながることを期待したい。そのためにも、衛星データの解析手法の開発や地震研究への応用を担う次世代の研究者および技術者の育成も喫緊の課題の一つであり、この点に関しても関係者の息の長い努力が必要である。

6. 「だいち」の運用停止を受けた当面の対応について

小委員会では、「だいち」が目標設計寿命を超過したものの極めて順調に観測運用されていたこと、および宇宙基本計画において PALSAR の機能を進化させた SAR が搭載される後継機（ALOS-2）の平成 25 年度における打ち上げが予定されていることから、我が国で発生する地震の調査研究に最適である L バンド SAR の利用を前提とした検討を行ってきた。しかしながら、平成 23 年 5 月 12 日の「だいち」の運用終了を受け、後継機の運用が開始されるまでの当面の間の地震調査研究における合成開口レーダーによる地殻変動観測手法の利用方法について、以下の通り検討した。

（1）開発側と利用側の連携による ALOS-2 の観測計画の早急な策定

平成 18 年 1 月に打ち上げられた「だいち」においては、約 9 ヶ月間の機能検証期間と初期データ取得期間を経て、同年 10 月から実運用段階に移行した。初期データ取得期間においては、我が国はもとより世界の主要な地殻活動地域を対象とした効率的なデータの取得計画が、利用サイドと開発サイドの密接な連携のもとに周到に作成され、干渉処理の前提となる初期データの整備が短期間に完了した。計画には、観測モードの優先順位の選定も含まれており、これらの綿密な事前検討の結果が、「だいち」の打ち上げ直後から始まる大きな成果の継続的達成の主要な基盤となっている。地震調査研究における SAR 利用の空白期間を可能な限り短縮するためには、ALOS-2 の実運用をできるだけ早期に開始する必要がある。そこで、地震分野と宇宙開発分野の専門家の密接な連携に基づく効果的な運用計画の策定が広く様々な意見を集約できる開かれた環境において、実施されることが重要である。

（2）国際的枠組みも活用した海外衛星 SAR データの積極的利用

国土の大部分が深い植生に被覆された我が国に SAR 干渉解析による地殻変動計測手法を適用する場合には、樹冠などをある程度貫通する L バンドのレーダーの有利性は、数多くの解析例により実証されている。一方、より短い波長の C および X バンド SAR を利用した干渉手法も、都市部や裸地などの土地条件においては、有効性を発揮する場合がある。また、変動の時間発展が平滑であるなどの一定の条件が満たされた場合には、欧米で開発された永続散乱体干渉手法（PSInSAR）が高い観測精度を達成し、一定程度の効果をあげている。従来、我が国の地震調査においては、「だいち」によるデータ利用で、必要とされる情報が得られていたため、一部の例外を除き C および X バンドの利用は限られてきた。しかしながら、「だいち」の運用終了から ALOS-2 の運用開始までの間、L バンド衛星データの新規取得が望めない状況であるため、L バンド以外のデータを最大限活用して、地殻変動情報を取得する取り組みを行うことも重要である。

なお、従来の調査研究において外国衛星データの利用がそれほど進まなかった理由の一つに、データが高額であることがあった。近年、各国の宇宙機関の国際連携による枠組みである国際チャータ活動やセンチネルアジア活動を通じて、利用者が費用負担することなく衛星観測データが提供されるようになった。これらの制度を積極的に利用して、海外衛星データを活用した地震調査研究を進めることは、当面の空白期間を解消するだけではな

く、ALOS-2の運用開始後も、精度検証や新たな統合解析手法に発展させるなど、将来のSAR利用自体の高度化にも資するものと期待される。

さらに、衛星データ以外にも、宇宙航空研究開発機構および情報通信研究機構や国土地理院により航空機搭載SARが整備されており、これらの活用も検討すべきである。

(3) 「だいち」のアーカイブデータを利用した解析技術の高度化に資する研究開発の 継続

「だいち」の運用開始後、国内外の数々の地震を対象とした解析研究が数多く実施され、本報告書に集約されたように大きな成果が上がっており、干渉SARは、我が国の地震調査研究において不可欠の手法となっている。しかしながら、5章で述べたような技術的課題が依然として残っており、これらが解決すればこの手法の有効性がさらに高まることは疑いがない。「だいち」がこれまでに取得したデータは、世界の主要な地殻活動域を空間的にも時間的にも密にカバーし、全世界の陸上の変動地域を対象とするLバンドの観測データセットとして比肩するものがない重要な知的財産となっている。これらのデータを利用した技術的課題の克服を目指す詳細な研究や、まだ解析されていない未発掘イベントの解析を通じて、SARによる地震調査研究の高度化の努力を継続することも同様に重要である。

参考文献

2章

2-1

- Goldstein, R. M., H. A. Zebker and C.L. Werner (1988): Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping, *Radio Science*, 23, 4, 713-720.
- Ghiglia, D. C. and M. D. Pritt, two-dimensional phase Unwrapping. theory, Algorithms and software . New York: Wiley, 1998.
- Itho, K. (1982): Analysis of the phase unwrapping algorithm, 2470 APPLIED OPTICS / Vol. 21, No. 14 / 15 July.
- Shimada, M(2010): Ortho-rectification and Slope Correction of SAR Data Using DEM and Its Accuracy Evaluation, IEEE JSTAR special issue on Kyoto and Carbon Initiative, vol. 3, Issue 4, pp. 657-671.
- 島田政信(1999):合成開口レーダー処理、測地学会誌、45,4, (1999), 277-281.

3章

3-1

- 藤原智・飛田幹男・村上亮・中川弘之・P. Rosen (1999): 干渉 SAR における地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気一標高補正、測地学会誌、45、315-325.
- 科学技術振興機構 (2008) : 光でつながる科学、株式会社NHK エンタープライズ、
<http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0090g/start.html>
- Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki (1998): High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, *Geophys. Res. Let.*, vol. 25, 3079-3082.
- 島田政信 (1999): SAR 干渉処理における軌道誤差と大気位相遅延の補正方法—地殻変動検出への応用—、測地学会誌、45、327-346.
- 飛田幹男・藤原智・村上亮・中川弘之・P. A. Rosen (1999) : 干渉 SAR のための高精度画像マッチング、日本測地学会誌、第 45 巻、297-314.
- Zebker, H. A., P. A. Rosen, and S. Hensley (1997): Atmospheric artifacts in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *J, Geophys. Res.* 102, 7547-7564.

3-2

- Goldstein, R. and C. Werner (1998): Radar interferogram filtering for geophysical application. *Geoph. Res. Letters*, Vol.25, No.21, 4035-4038,
- 奥山哲 (2008): http://www.sci.hokudai.ac.jp/~okuoku/programs/mask_phase.html

4 章

4-1

Proceedings of ALOS PI 2008 Symposium, 3-7 November 2008, Island of Rhodes, Greece, SP-664

Proceedings of the First Joint PI symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Kyoto, Nov. 19-23, 2007

4-2

藤原智・飛田幹男・村上亮・中川宏之・P Rosen(1999)、干渉 SAR による地表変動検出精度向上の為の基線値推定法と大気-標高補正、測地学会誌、45, 315-325.

Kerr, D.E. (1951): Propagation of short radio waves, McGraw-Hill, 191.

虫明康人(1961) : アンテナ・電波伝搬、電子通信学会大学講座 18、コロナ社、138-141

島田政信(1999), SAR 干渉処理における軌道誤差と大気位相遅延の補正方法-地殻変動検出への応用-, 測地学会誌、45、4、327-346.

4-3

Shimada, M. , Y. Muraki, and Y. Otsuka(2008) : Discovery of anomalous stripes over the Amazon by the PALSAR onboard ALOS satellite, Proc. IGARSS2008, Boston July 6-11, 2008.

4-4

Biggs, J., T. Wright, Z. Lu, and B. Parsons (2007): Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska, Geophys. J. Int., 170, 1165-1179, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03415a.

Biggs, J., R. Bürgmann, J.T. Freymueller, Z. Lu, B. Parsons, I. Ryder, G. Schmalzle, and T. Wright (2009): The postseismic response to the 2002 M7.9 Denali Fault earthquake: constraints from InSAR 2003-2005, Geophys. J. Int., 176, 353-367, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03932a.

Fukushima, Y., and M. Hashimoto (2009): On detection of crustal deformation associated with plate subductions with ALOS/PALSAR data, presented at the 3rd ALOS Joint Symposium, Kona, Hawai' I, Nov. 9-13.

http://www.asf.alaska.edu/sites/www.asf.alaska.edu.pi_symp/files/documents/presentations/Fukushima_Y._geearth1.pdf

Furuya, M., K. Mueller and J. Wahr (2007): Active salt tectonics in the Needles District, Canyonlands (Utah) as detected by interferometric synthetic aperture radar and point target analysis: 1992 - 2002, J. Geophys. Res., 112, B06418, doi:10.1029/2006JB004302.

Lanari, R., F. Casu, M. Manzo, and P. Lundgren (2007) : Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California, Remote Sensing of Environment, 109, 20-28.

- Lyons, S., and D. Sandwell (2003): Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatters, and stacking, *J. Geophys. Res.*, 108, B1, 2047, doi:10.1029/2002JB001831.
- Samsonov, S., K. Tiampo, P. J. Gonzalez, V. Manville, and G. Jolly (2010) : Ground deformation occurring in the city of Aukcoang, New Zealand, and observed by Envisat interferometric synthetic aperture radar during 2003–2007, *J. Geophys. Res.*, 115, B08410, doi:10.1029/2009JB006806.
- Schmidt, D. A., and R. Bürgmann (2003): Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, *J. Geophys. Res.*, 108, B9, 2416, doi:10.1029/2002JB002267.
- Tabei, T., M. Hashimoto, S. Miyazaki, K. Hirahara, F. Kimata, T. Matsushima, T. Tanaka, Y. Eguchi, T. Takaya, Y. Hosoi, F. Ohya, and T. Kato (2002): Subsurface structure and faulting of the Median Tectonic Line, southwest Japan inferred from GPS velocity field, *Earth, Planets Space*, 54, 1065–1070.

4 – 5

- Bamler, R. and M. Eineder (1996): ScanSAR processing using standard high precision SAR algorithms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 34, 212–218.
- Cumming, I. G. and F. H. Wong (2005): *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Artech House, Norwood.
- Hashimoto, M., T. Ozawa, M. Tobita, M. Miyawaki, M. Shimada, and Y. Fukahata: Coseismic deformation from the 2010 Chile earthquake with PALSAR ScanSAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, submitted.
- Holzner, J., and R. Bamler (2002): Burst-Mode and ScanSAR Interferometry, *IEEE Geosci. Remote Sensing*, 40, 1917–1934.
- Pritchard, M. E., and E. J. Fielding (2008): A study of the 2006 and 2007 earthquake sequence of Pisco, Peru, with InSAR and teleseismic data, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L09308, doi:10.1029/2008GL033374.
- Tong, X., D. T. Sandwell, and Y. Fialko (2010): Coseismic slip model of the 2008 Wenchuan earthquake derived from joint inversion of interferometric synthetic aperture radar, GPS, and field data, *J. Geophys. Res.*, 115, B04314, doi:10.1029/2009JB006625.
- Zebker, H. and J. Villasenor (1992): Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30, 950–959.

4 – 6

- Kobayashi, T., Takada, Y., Furuya, M., and Murakami, M. (2009): Locations and types of ruptures involved in the 2008 Sichuan Earthquake inferred from SAR image matching, *Geophys. Res. Lett.* 36, L07302, doi:10.1029/2008GL036907