

地殻変動計測のためのSAR画像分析の高度化に関する研究（第1年次）

実施期間 平成19年度～平成21年度
地理地殻活動研究センター
地殻変動研究室 飛田 幹男

1. はじめに

SAR干渉解析（InSAR）のアルゴリズムは、SARセンサーの諸元、及び地殻・地盤変動現象（地震、火山活動、地盤沈下）の特性に適合するものが必要とされる。このため、アルゴリズムを柔軟に変更できるよう独自でソフトウェアを開発することが重要である。国土地理院がNASAのジェット推進研究所（JPL）と共同で開発を始めたソフトウェア“GSISAR”は、当初JERS-1衛星のSAR干渉解析を対象にし、その諸元に適合するよう改善が加えられ、兵庫県南部地震、サハリン北部地震、鹿児島県北西部地震、岩手山地震に伴う地殻変動等を画像として捉えて、多くの実績をあげた。その後、ALOS PALSARセンサーへの適合化の取り組みが開始され、GSISARの実行形式プログラムを核とする日本語GUIによる制御を取り入れた“新GSISAR”（初版）が、2004年、宇宙測地課により実現した。2006年にはALOS衛星が打ち上げられ、GSISAR及び新GSISARは密接な整合・連携が図られつつ逐次改良が加えられている。平成19年度には、能登半島地震、新潟県中越沖地震、スマトラ南部沖地震等の際に地殻変動分布図を提供し、これらを基に作成された震源断層モデルを通して、地震像の解明や地すべりの研究などに貢献した。

2. 研究内容

本研究では、JERS-1衛星のLバンドSARデータの解析で培った技術を基に、ALOS衛星に搭載されているLバンドSARセンサー“PALSAR”の諸元、及び地殻変動計測に適した解析ソフトウェアの開発及び改良を行うとともに、SAR画像分析手法の高度化を行う。

なお、平成14～18年度に実施された一般研究「ALOS PALSAR干渉解析ソフトウェアの開発に関する研究」の一部は、特別研究「正確・迅速な地盤変動把握のための合成開口レーダー干渉画像の高度利用に関する研究」（平成20～22年度）としてPhase Unwrapping処理技術高度化や水蒸気位相遅延分布の計算手法開発という難問に挑む研究に引き継がれ、一方、それ以外の部分はGSISARや新GSISARの高度化のため本研究に継続される。また、特別研究「SAR衛星の位置情報の高精度化を通じた地盤変動抽出の高度化に関する研究」（平成19～21年度）に関連した残存干渉縞の軽減については本研究でも扱い、3つの研究が連携することでSAR分析や干渉画像利用の高度化を推進するものである。

3. 得られた成果

3. 1 解析アルゴリズムの改良による残存干渉縞の軽減

地殻変動計測を目的としたSAR干渉解析処理では、地殻変動以外の要因による干渉位相（干渉縞）を取り除くのが主要な工程である。地殻・地盤変動を示す変動縞以外の干渉縞として、軌道縞、地形縞、大気縞、電離層縞、ドップラー縞等があり、これらをここでは、残存干渉縞または残存縞と呼ぶ。従来は、残存縞の原因を主に衛星軌道（軌道縞）に求めて基線再推定を行うことで、残存縞を除去してきた。JERS-1では、衛星軌道情報の精度が高くなかったため、この方法は妥当かつ有効であった。ただし、基線再推定を行う際には、干渉画像中の少なくとも3箇所、地殻変動量が既知である（または、地殻変動がないと仮定する）必要があった。

ALOSの軌道情報には、ALOS軌道情報（予測値）、ALOS軌道情報（決定値）、ALOS高精度軌道情報の3種類があり、

その内、ALOS高精度軌道情報はGPS干渉測位によって1 mより高い精度を有している。このALOS高精度軌道情報を基に軌道縞と地形縞を計算すると、従来より正確に軌道縞と地形縞を除去できる可能性が生じた。

衛星軌道情報から計算される基線ベクトル成分の内、視線方向に垂直な成分 B_{perp} の精度が例えば1 mの場合には、画像1シーン中の残存軌道縞は0.6サイクルとなるはずである。2007年9月27日にスマトラ島南部沖で発生したMw8.4の巨大地震の地殻変動を捉えるため、2007年1月29日と2007年9月16日という地震前後に取得されたPALSARデータの干渉解析を実施した際、このこと（ALOS高精度軌道情報を用いて残存縞が0.6サイクル以下になるかどうか）を検証した。しかし、残存縞は4シーン連結画像中に10数本以上と予想以上に大きかった（図-5左）。こうした大きな残存縞の原因として、大気縞、電離層縞、ドップラー縞、ALOS高精度軌道情報の精度不足、解析アルゴリズムの精度不足等が考えられたが、今回は、解析アルゴリズムの精度不足に着目して、調査を行った。

解析アルゴリズムの精度不足の有無を確認するため、干渉解析処理過程の中から位相に影響する次の8つの処理過程について、アルゴリズム及びソース・コードの見直しを行った。

- | | |
|--------------|-----------------------|
| 1) 再生準備 | 2) 再生処理（レンジ圧縮・合成開口処理） |
| 3) 画像マッチング処理 | 4) 干渉処理 |
| 5) 基線ベクトル計算 | 6) 軌道縞除去 |
| 7) 地形縞計算 | 8) 地形縞除去 |

その結果、5)、6)、7)の処理過程に残存縞の主原因があることが判明した。それは、地球半径の値として日本付近のTypicalな値6,371,000.0mを用いていたことである。そこで、軌道情報を基に地表に対する衛星の相対速度を計算するプログラム“CalcVela.c”に、シーンセンターにおける衛星高度（GRS80楕円体に対する衛星の楕円体高）を計算する機能を追加（GSISARの改良）するとともに、この衛星高度が5)、6)、7)の処理を行う際に読み込まれる各パラメータファイルに反映されるようにした（新GSISARの改良）。その結果、残存縞が有意に軽減されること（図-5右）を確認することができた。

3. 2 ドップラーセントロイドの計算手法の変更による残存干渉縞の軽減

レンジ・ドップラー法によるSAR画像再生処理において使用するドップラーセントロイドの数値をどのように求めるかは、SAR干渉解析において重要である。なぜなら、使用するドップラーセントロイド数値によって、干渉縞が変わるからである。初期干渉画像から地形縞、軌道縞などを差し引いた干渉画像中に見られる規則的な残存縞の原因が、不適切なドップラーセントロイドに起因する場合があり、これを私達は、“ドップラー縞”と呼んでいる。ドップラーセントロイド数値を左右する最も大きな原因は、レーダー波が反射する地表ターゲットと人工衛星の相対速度であり、衛星速度、地球自転、衛星の姿勢がこれに関連する。ドップラーセントロイド数値は、従来、SARの生データから推定していたが、正確な推定は難しい。

JERS-1と比べてALOSでは、衛星軌道情報が高精度になり、軌道間の衛星位置関係を表す基線ベクトルが高精度に与えられるようになったため、軌道縞を精度良く除去できるようになった。これに伴い、これまで問題とならなかったドップラー縞の寄与は、無視できなくなった。衛星速度と地球自転から計算した相対速度を用いてドップラーセントロイドを計算するプログラム“calc_dop_m（MSS社開発）”を用いることで、SARの生データを用いる場合よりも、ドップラー縞を小さく抑えられ、残存干渉縞を軽減できる場合があることがわかった。ALOSは基本的にYaw Steering ONで運用されていることから、衛星の姿勢は理想的と仮定している。

3. 3 解析プログラムの改良

干渉解析処理ソフトウェア“GSISAR”を構成するプログラム群の改善点の内、主なものを以下に挙げる。

電子基準点等のGPSによる地殻変動3成分を基に干渉画像位相をflatteningするプログラム“flatgps.c”を改造して、二次曲面を表す $a_1X^2+a_2Y^2+a_3XY+a_4X+a_5Y+a_6$ の各係数 $a_1\sim a_6$ を“flat2nd_gps.coe”ファイルに出力するようにした。既存の“flat2nd_f”プログラムがこのファイルを読み込むことで、例えば32ルック画像でGPSデータによるflatteningを実行した結果を直ちに高分解能の4ルック画像に反映することができるようになり、処理工程が短縮された。

Level-1データのシーン結合処理に、9ラインだけ重複が生じるという問題を見つけ、契約業者に新GSISAR中のプログラムの不具合改修を依頼した。

対応点の位置ずれを計測するプログラム“ampcorr”が出力した位置ずれファイルを利用するプログラム“cullcorr.c”，“cullaffine.c”，“geocodb1.c”を改修して、利用可能な対応点数をそれぞれ、1万点から10万点、1万点から6万点、500点から1万点に増加させた。これはPALSARデータの高解像度と最近のコンピュータの高性能を生かすための改造である。

ドップラーセントロイド（ドップラー周波数）を推定するプログラム“DopCent.c”のコメント画面表示の簡素化とコンパイルオプションの最適化により、実行速度を上げた。また、入力ファイル名長の上限を50bytesから100bytesに変更した。

有珠山やパキスタン北部地震における地殻変動計測で有効であった、矩形領域指定による位置ずれ対応点削除を行うプログラム“cullbyhand.c”を新規にリリースした。

3. 4 GSISARプログラムを搭載した新GSISARによる地殻変動解析事例

これまで本研究等で開発・改良を行ってきた解析アルゴリズム及びGSISARプログラム群は、随時、新GSISARに反映されている。平成19年度に筆者が、新GSISARを用いて干渉解析を行った主な地殻変動分布図（SAR干渉画像）を図-1～6に示す。これらの干渉画像を得る上で、PALSARデータの前処理、数値地形データの準備、市町村界の重ね合わせ等、測地部宇宙測地課や地理地殻活動研究センターの方々の協力を得ており、ここに感謝する。

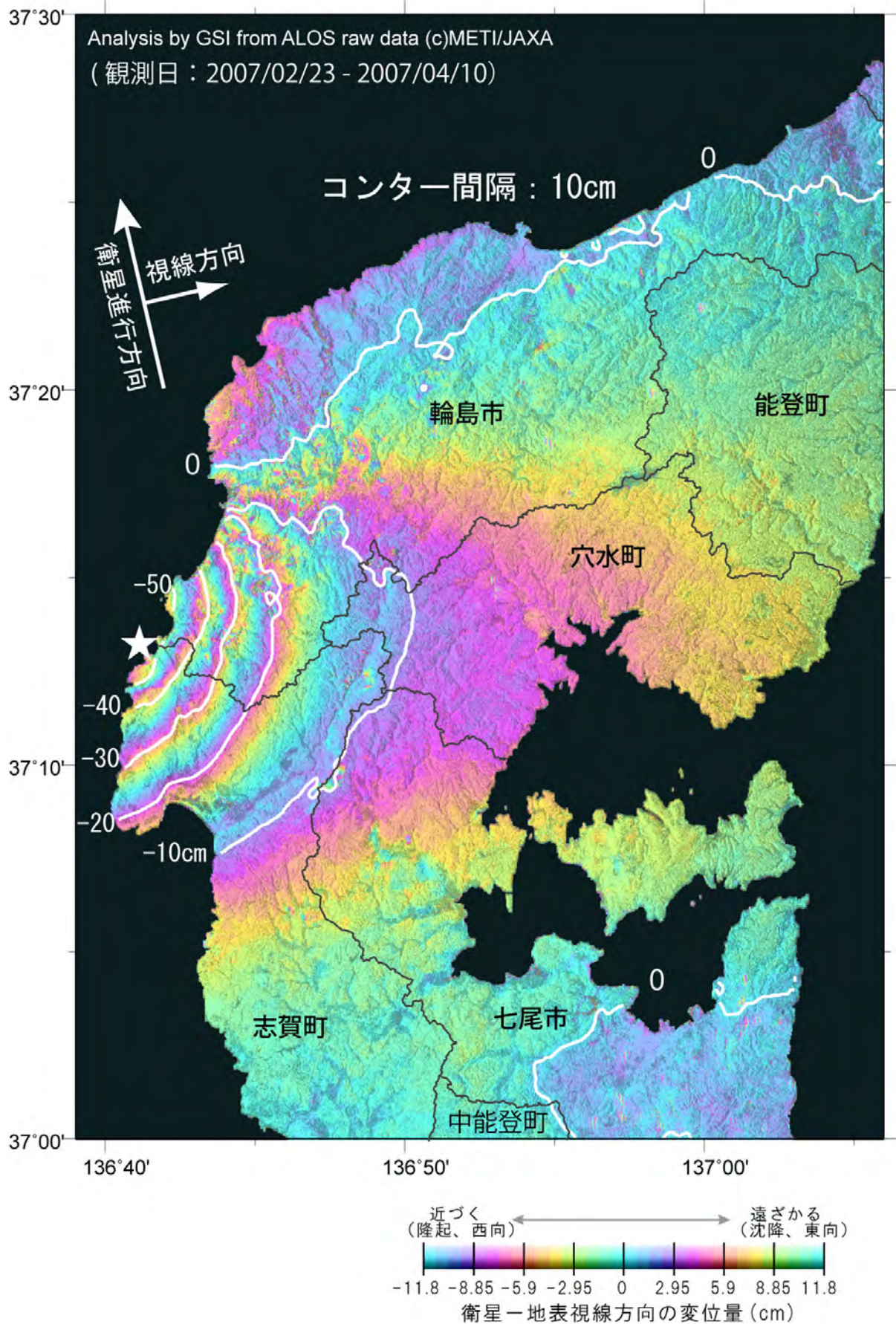
3. 5 軌道情報精度の違いによる干渉画像の違い

残存干渉縞の一要因である軌道情報精度が干渉縞に与える影響を調査するため、地震後のPALSARデータについて2種類の軌道情報を用いた干渉画像を作成し、地殻変動計測結果を比較した。図-6上のALOS軌道情報（予測値）を用いた干渉画像と、図-6下のALOS高精度軌道情報を用いた場合で、Bperpの差は約4m、視線方向地殻変動計測値の最大較差は13cmであった。一例に過ぎないが、ALOS軌道情報（予測値）の仕様上の精度は1kmであるのに対し、4mと極めて良好な精度が得られることがわかった。また、撮影直後に提供される予測値を用いた場合の地殻変動計測誤差の例が得られたことで、撮影直後に高精度な軌道情報を得るための特別研究の意義を確認できた。

4. まとめ

ALOSの正確な軌道情報を用いても消えない残存縞について調査を行ない、解析アルゴリズムの高精度化を行った結果、残存縞が有意に軽減された。また、ドップラーセントロイドをSARデータから推定する代わりに、衛星速度と地球回転から計算する方法に変更することで残存干渉縞が軽減される場合があることがわかった。残存縞が軽減されると、干渉処理の高速・自動化が促進されるとともに、離島での地殻変動計測等にも有効である。

また、干渉解析ソフトウェアについて、個々のプログラムを改善（高速化、PALSARへの適合化、バグ修正）することで、実用度を高めた。本研究の成果は、中越沖地震他に伴う地殻変動の面的な把握に貢献した。



図一 2007年3月25日に発生した平成19年能登半島地震(M6.9)に伴う地殻変動分布を示すSAR干渉画像

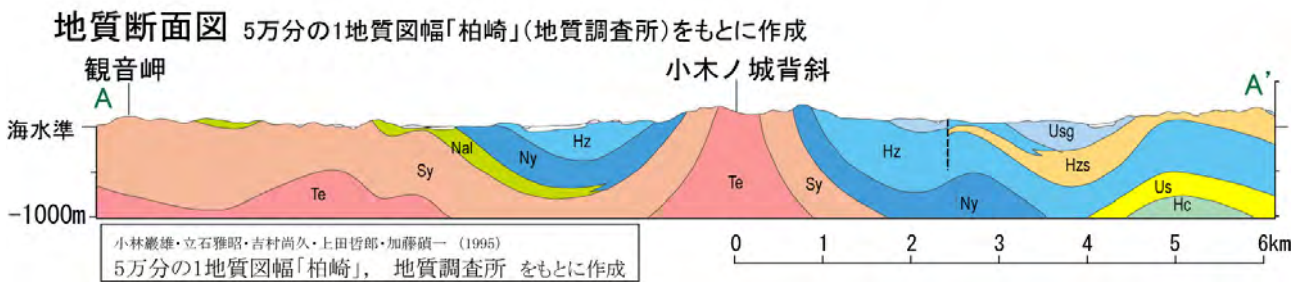
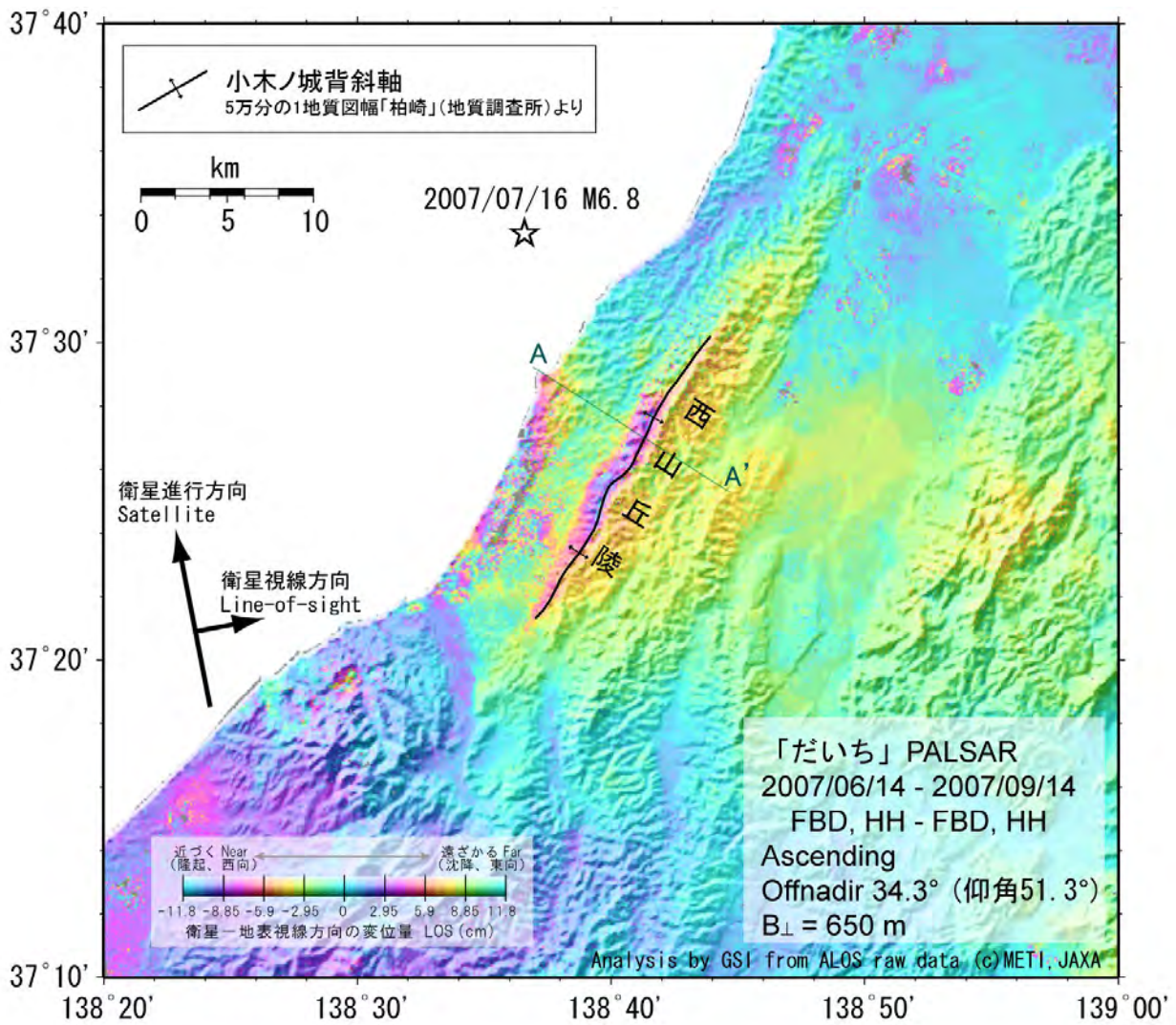
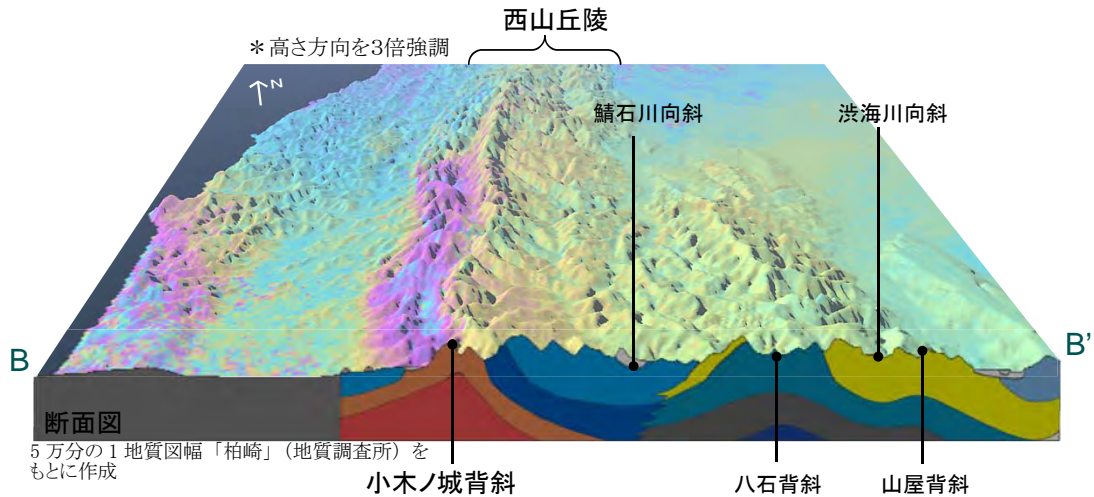


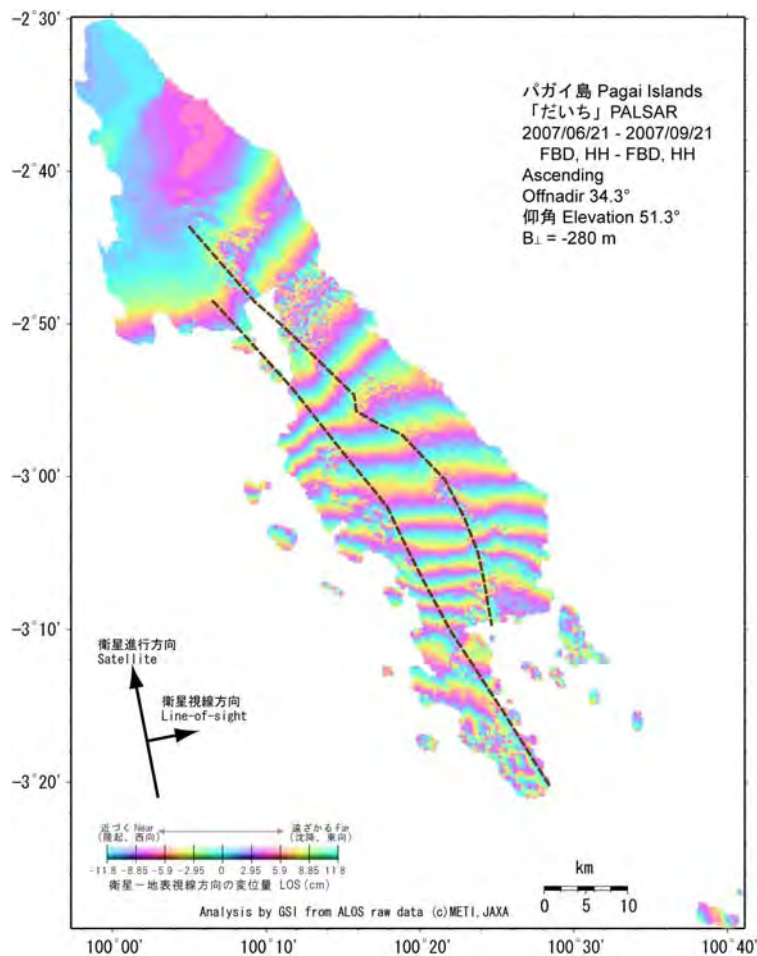
図-2 2007年7月16日に発生した平成19年新潟県中越沖地震(M6.8)に伴う地殻変動分布を示すSAR干渉画像と地質図をもとに作成した地質断面図。小木ノ城背斜位置及び地質断面図は、地質調査所「地質図幅「柏崎」(使用承認番号 第63500-A-20071002-002号)をもとに作図。

<http://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic071002-index.html>

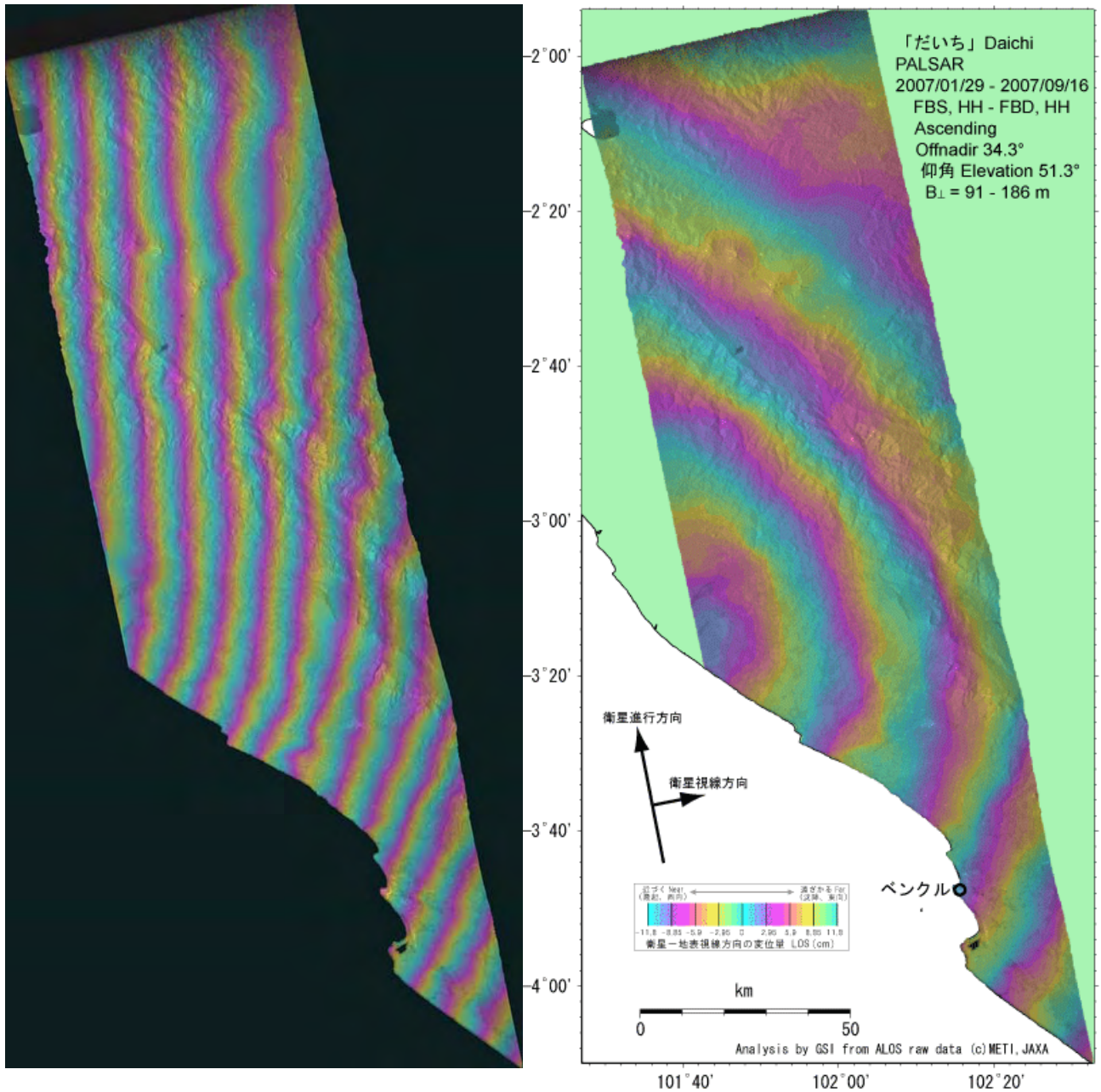


背斜：褶曲した地層の山に当る部分
 向斜：褶曲した地層の谷に当る部分

図一 3 2007年7月16日に発生した平成19年新潟県中越沖地震(M6.8)に伴う地殻変動分布を示すSAR干渉画像の鳥瞰図と地質図をもとに作成した地質断面図. 鳥瞰図はカシミールと数値地図50mメッシュ(標高)を用いて作成. 地質断面図は, 地質調査所 地質図幅「柏崎」(使用承認番号 第63500-A-20071002-002号)をもとに作図. <http://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic071002-index.html>



図一 4 2007年9月12日に発生したスマトラ島南部沖地震(M8.4)に伴うパガイ島(Pulau Pagai)での地殻変動を示すSAR干渉画像. 破線は, 位相の不連続曲線の概略位置を示す. <http://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic071001-bengkulu.html>



図一五 2007年9月12日に発生したスマトラ島南部沖地震 (M8.4) に伴うスマトラ島ベンクル市 (Bengkulu) 付近の地殻変動を示すSAR干渉画像. 左は3. 1に示した解析アルゴリズム改良前, 右は改良後. 左図には残存干渉縞が含まれており, この図から地殻変動情報を取り出すことはできない. 巨大地震の場合, 地殻変動が広域に及ぶので, この例のように4シーン連結しても, 画像中に変動ゼロの場所を設定できないことがある. このような場合, 恣意的に残存縞を除去することには問題があるので, 客観的に右図が得られたことの意義は大きい.

(右図) <http://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic071001-bengkulu.html>

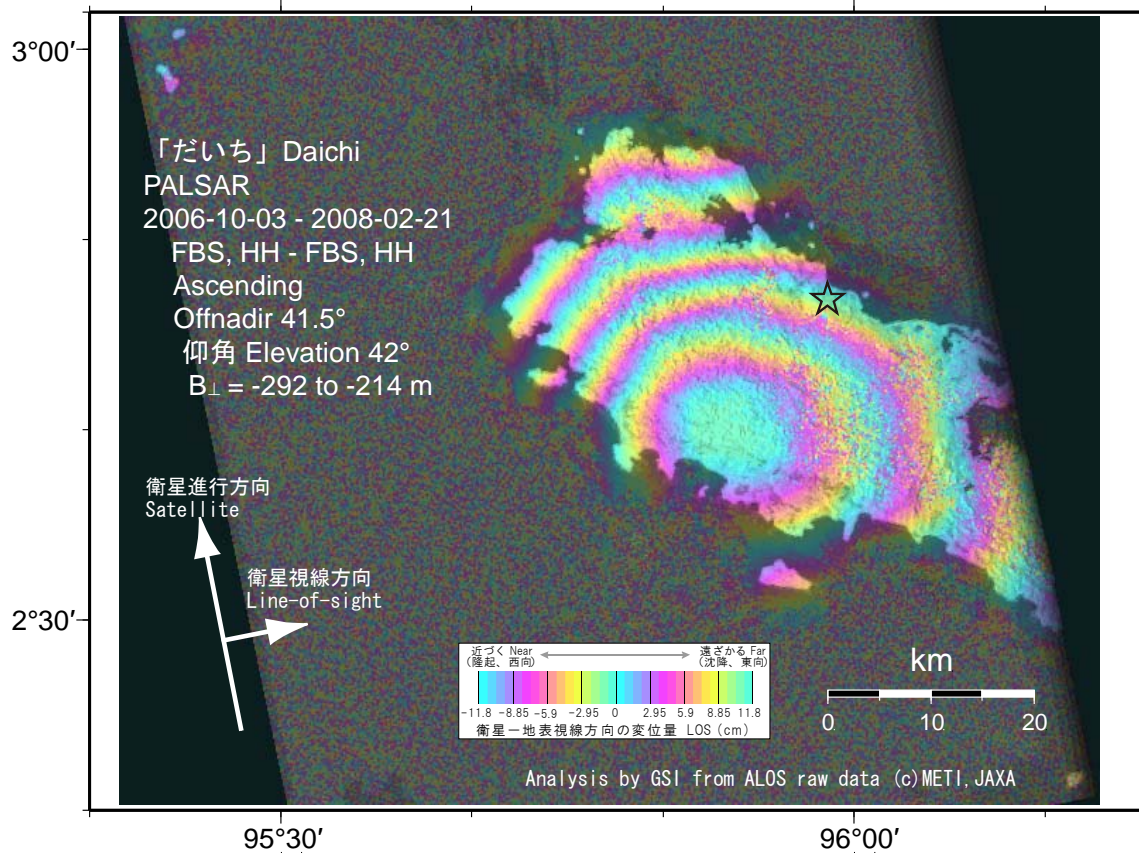
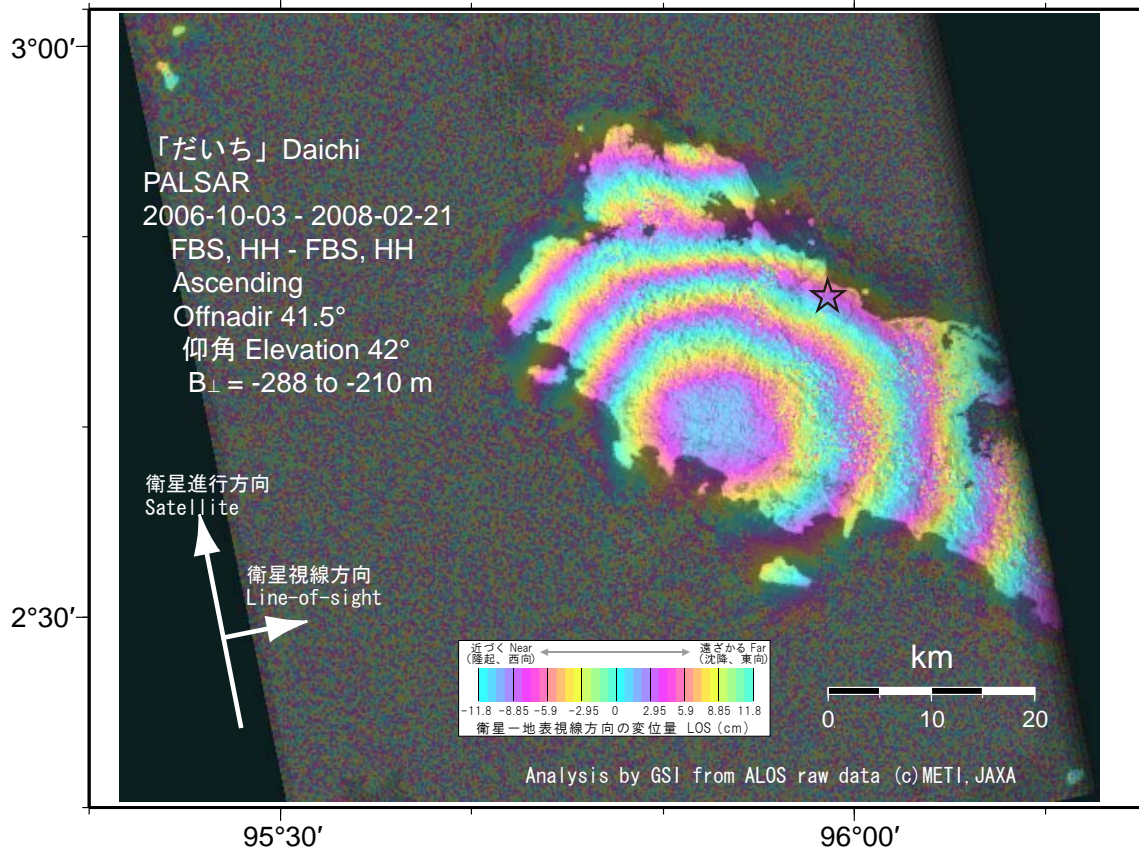


図-6 2008年2月20日に発生したスマトラ島西方沖シムルエ島の地震 (M7.5) に伴うシムルエ島北西部の地殻変動を示すSAR干渉画像. 上はALOS軌道情報 (予測値), 下はALOS高精度軌道情報を使用.
(上図) <http://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic080224-index.html>