

SAR 干渉法による高精度地殻変動検出の試み

Attempts to detect precise crustal deformation by InSAR

小澤拓(防災科研)

Taku Ozawa (NIED)

地殻変動検出のための 2 パス差分 SAR 干渉解析は, ALOS の運用開始以前に, ある程度は確立されていたと言える. しかし, 大気遅延等に起因するノイズ軽減に関しては改良の余地が残されており, 解決すべき課題の一つであった. 本研究では, それを解決することを目的として, ①数値気象モデルを用いた大気遅延誤差軽減, ②多衛星・多観測モードによるデータを用いた高精度地殻変動検出, ③時系列解析手法による高精度地殻変動検出についての研究開発を試みた.

大気遅延誤差の大部分は地形に相関するため, これまでは, その成分を標高の一次式で近似して除去する方法が一般的であった. しかし, その係数を求めるためには, 地殻変動を無視できる山岳域が画像内に含まれている必要があり, 離島などでその方法を適用する場合には, 大きな不確定性が伴うという問題があった. そこで, 数値気象モデルから大気遅延をシミュレートする手法を適用したところ, これまでの手法と同程度の精度が得られることが確かめられた. しかし, 海外については, より粗いモデルしか入手出来ないため, その精度は劣る. このような地域における大気遅延誤差の軽減については, 今後の課題の一つと言える. また, ALOS の運用期間においては, 電離層擾乱による誤差が大きな問題となった. これについても, 緊急に解決を目指すべき課題の一つであろう.

時系列解析手法については, 2000 年頃から PS-InSAR 法や SBAS 法などが提案され, 広く用いられるようになった. これらの手法では, 大気遅延等の観測時間に依存する誤差成分は, スムージングもしくはスペクトルフィルタによって, これらの誤差を軽減する. それに加えて, 同時期に観測されたデータから, 平均的な地殻変動成分を求めることができれば, より確度の高い地殻変動検出が可能になると考えられる. そこで, 本研究では, 多衛星・多観測モードによるデータを入力できるように改良した SBAS 法を開発した(小笠原硫黄島における解析事例を図1に示す). この手法によっては, 従来の SBAS 法よりも高い精度で地殻変動を検出することが確かめられた.

その他, 多くの地震, 火山活動に伴う地殻変動の検出を試みた. 特に, M8 前後の地震については, ScanSAR データを用いた干渉解析を試み, 成功裏にその

地殻変動を検出することに成功した. ScanSAR の解析については, 今後, ツールや解析ノウハウの普及が必要であるが, 一般的な 2 パス差分 SAR 干渉解析については, 多くの解析機関で実施され, SAR 干渉法は一般的な地殻変動検出ツールの一つとなったと言える. その背景には, データ共有を主とした研究コミュニティの設立によるところが大きいと考える. 地殻変動研究において, このような研究コミュニティは必要不可欠なものであり, これを如何にして継続していくかは, 重要な問題である.

謝辞. 本研究では, JAXA と東京大学地震研究所との共同研究契約により提供された PIXEL 共有データを使用した. 本研究の一部は, 東京大学地震研究所共同研究(B)において行われた. PALSAR データの所有権は経済産業省および JAXA にある. また, 本研究においては国土地理院の GEONET データおよび基盤地図情報 10m メッシュ標高, 気象庁のメソスケール客観解析結果を使用した.

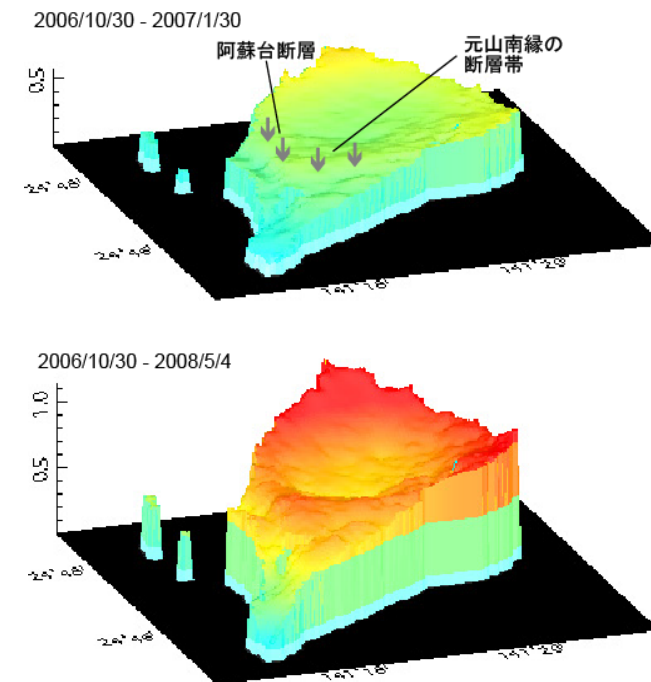
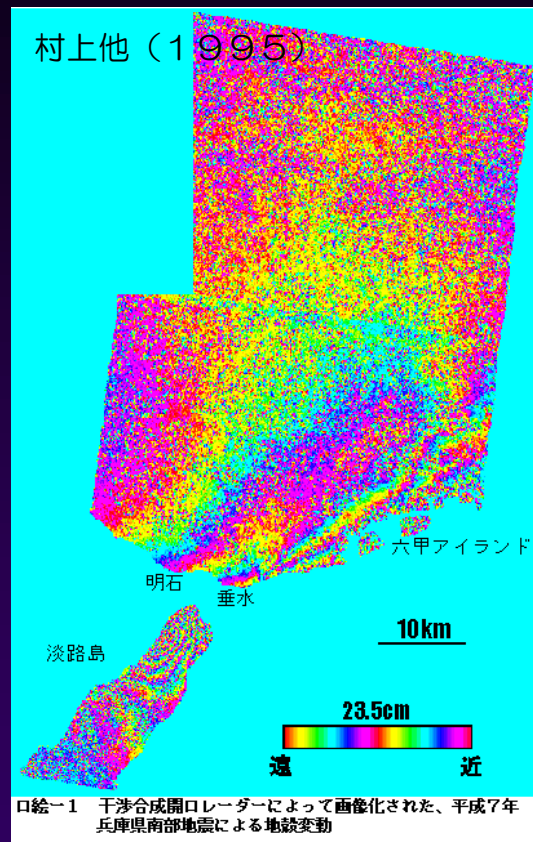


図1. ALOS/PALSAR の改良型の SBAS 法を適用して得られた, 小笠原硫黄島の地殻変動(準上下成分).

SAR干渉法による 高精度地殻変動検出の試み

防災科学技術研究所 小澤拓

ALOS運用開始以前の状況

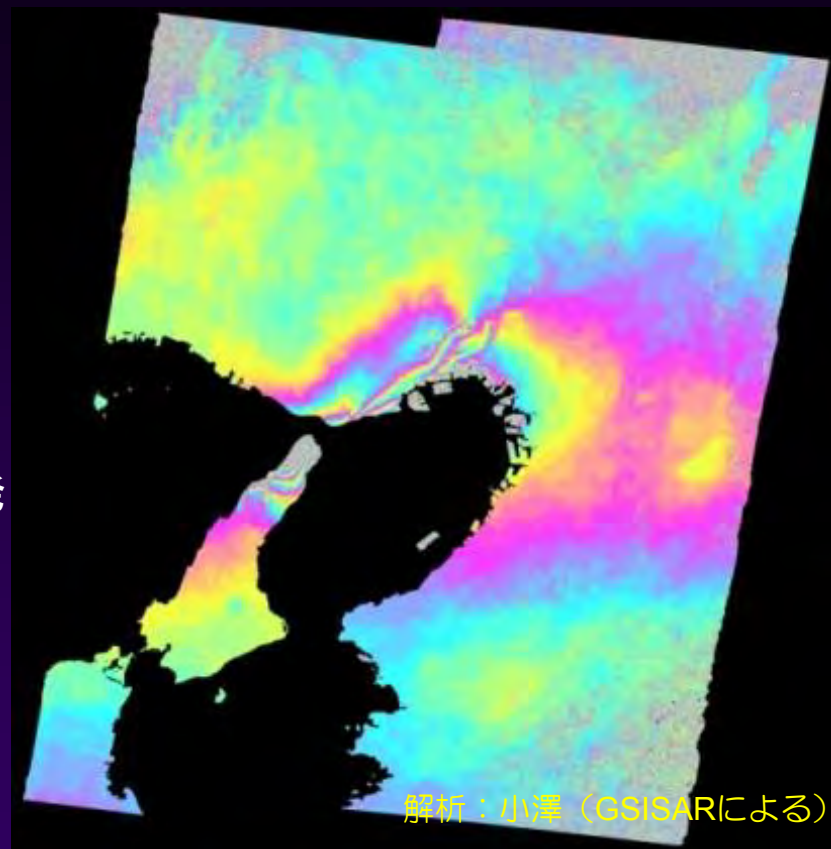


解析ノウハウの蓄積
(大気誤差補正など)

解析プロセッサの開発

フィルターの開発

計算機能力の向上



地殻変動検出精度：

数cm・・・と答えていたが、例えば4cmの変化を有意と
言い切れなかった。（検出精度、精度評価手法の問題）

地殻変動検出精度改善のために

- ①数値気象モデルを用いた大気遅延誤差軽減
- ②多衛星・多観測モードによる干渉画像の結合による高精度地殻変動検出
- ③時系列解析手法による高精度地殻変動検出

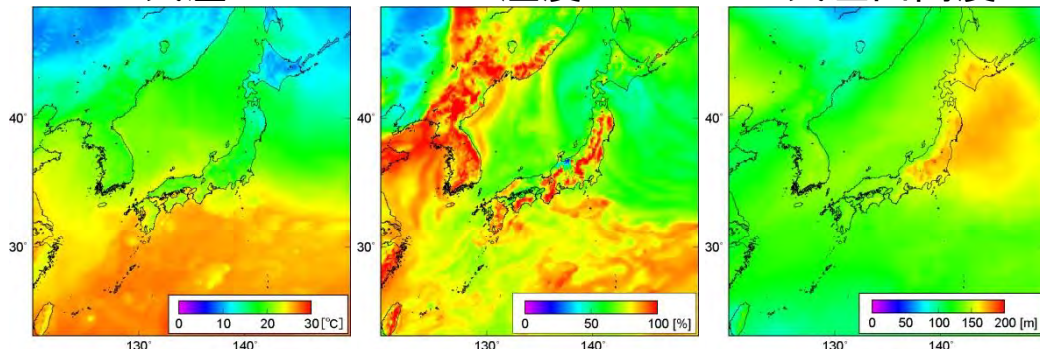
数値気象モデルに基づく遅延量の推定

気象庁メソスケールモデル(MSM)

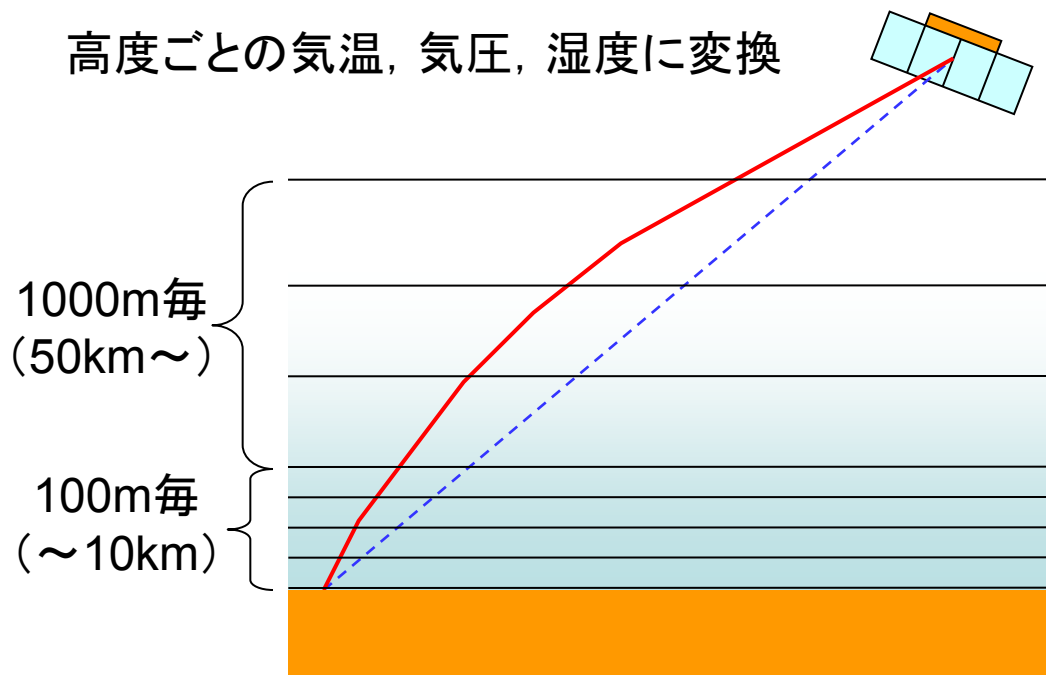
気温

湿度

気圧面高度



高度ごとの気温, 気圧, 湿度に変換

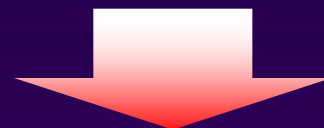


屈折率

$$(n-1) \times 10^6$$

$$= K_1 \frac{P_d}{T} + K_2 \frac{P_v}{T} + K_3 \frac{P_v}{T^2}$$

P_d : 乾燥大気圧, P_v : 水蒸気圧, T : 温度



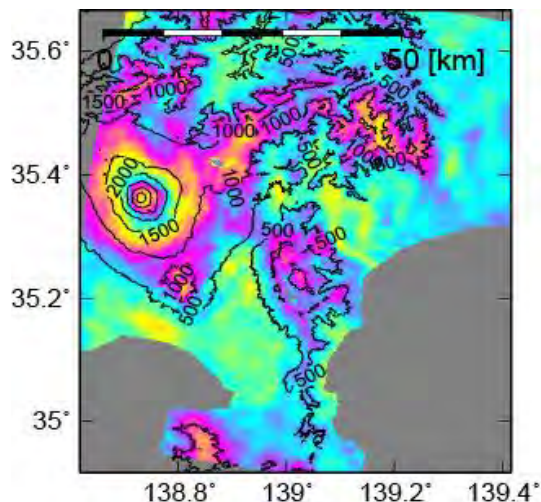
レイレーシング法により
レーダ波の伝播経路を推定

伝播経路に沿った遅延量の
積分および屈折による経路
の伸びを計算

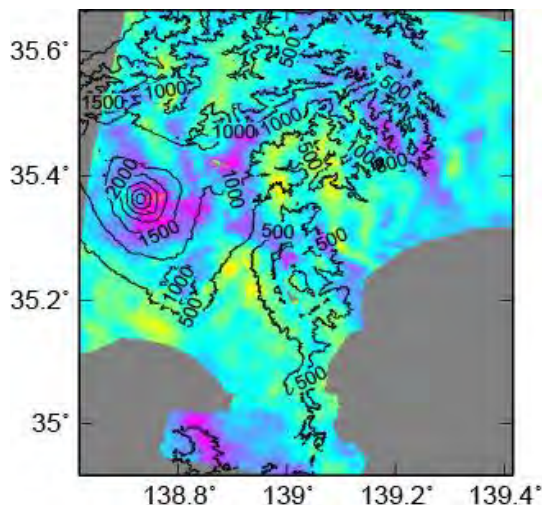
結果例（補正無，標高1次，MSM）

2008/8 - 2008/11

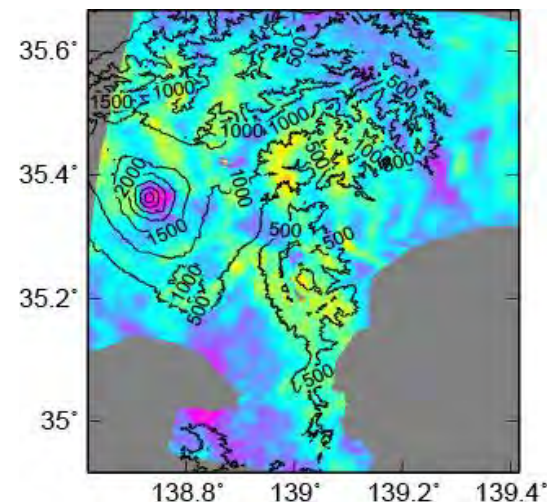
補正無し



標高1次

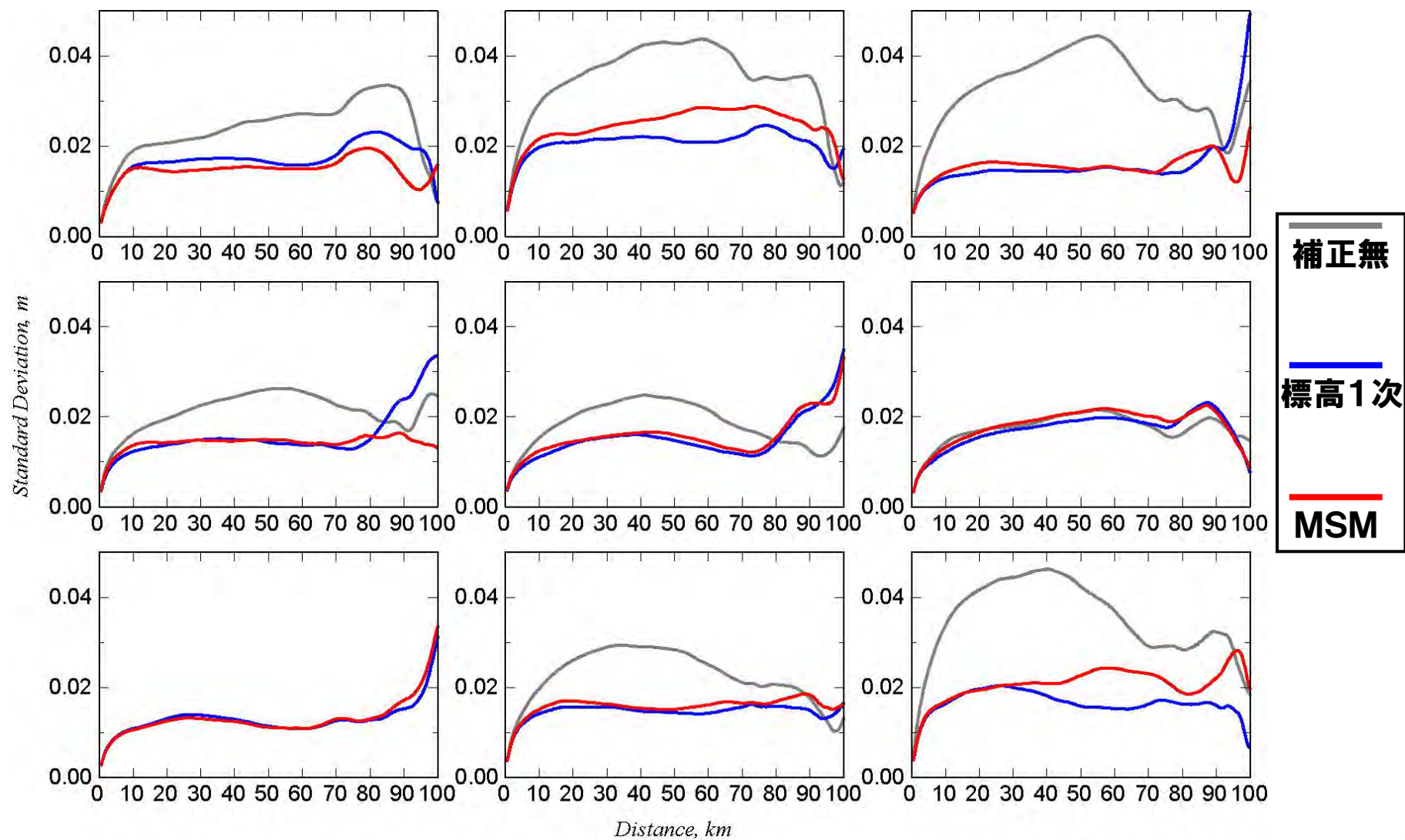


MSM



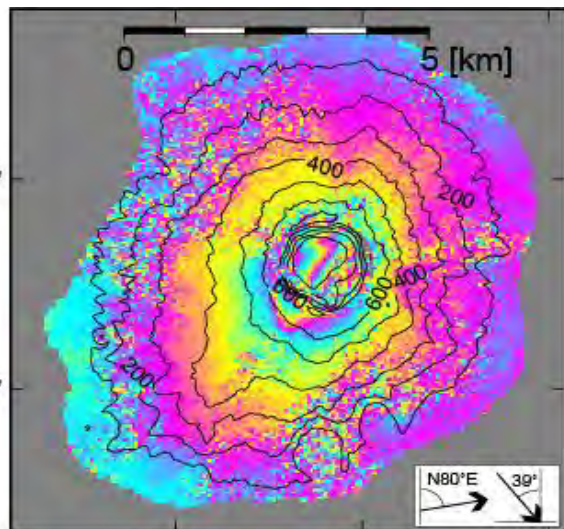
- 地形に相関する成分は，精度良く除去されているように見える
- MSMと標高1次の手法を適用して得られた結果は，それぞれほとんど変わらないように見える

Structure Function

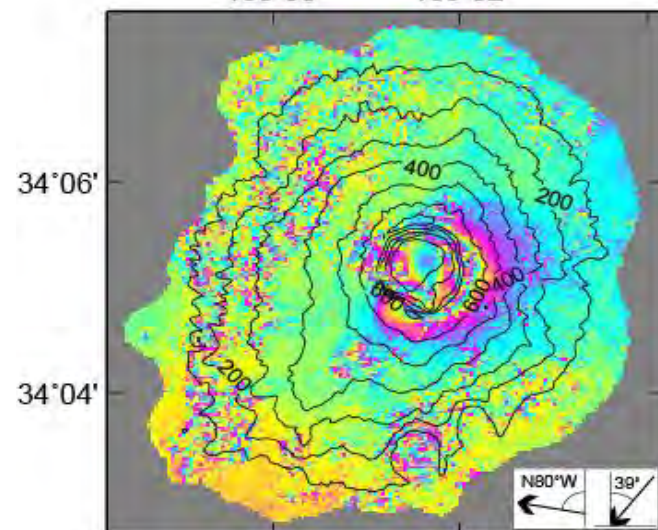
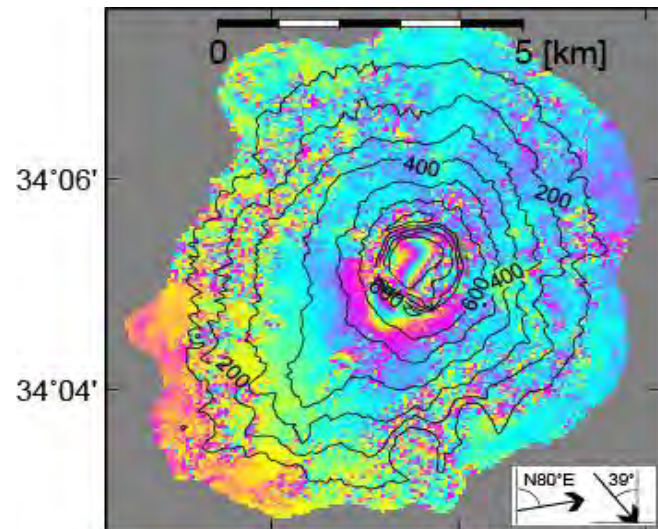
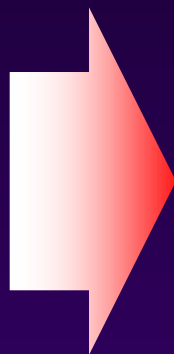
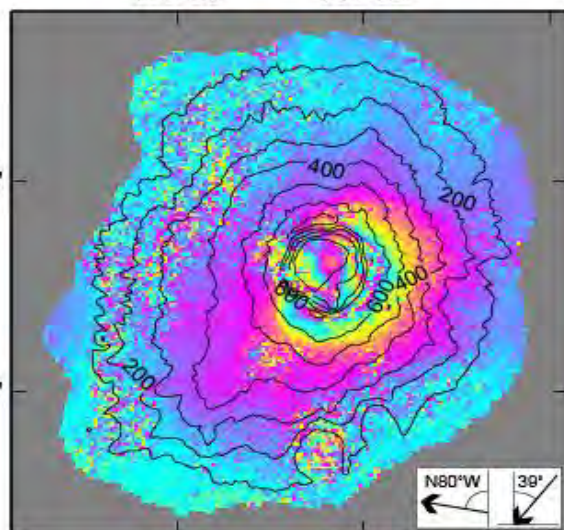


三宅島における適用事例

アセンディング, 2.4yr



ディセンディング, 2.3yr



まとめ

- 大気誤差を標高1次で近似する従来の方法とほぼ同じ精度が得られた
- 離島等，標高1次で補正する手法を適用できない領域では有効
- 地殻変動検出精度はALOS運用前と比べてそれほど改善されていない？
- より高精度な気象モデルがあれば高精度化可能。

気象庁によるより高精度な気象モデル開発



水平分解能2キロメートル
の数値予報モデル「局地モ
デル」（気象庁HPより）

高精度化の可能性



Weather Research and
Forecasting (WRF)

木下・古屋，気象モデルによる集中豪雨時のInSAR伝搬遅延シミュレーション

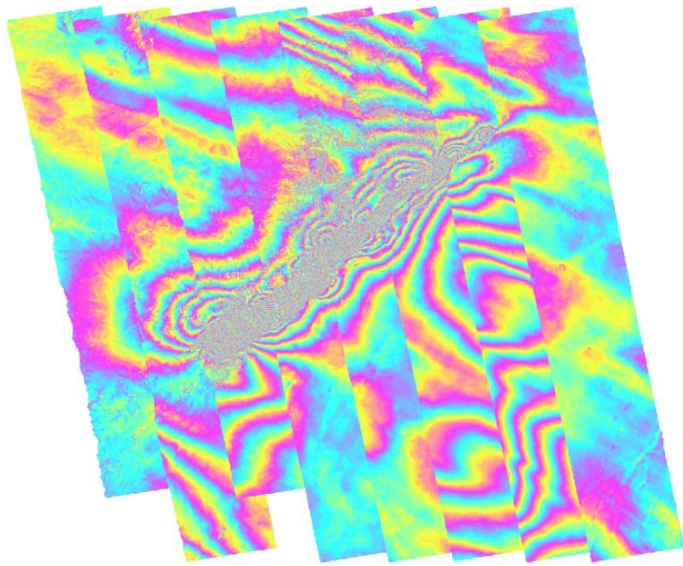
しずく (GCOM-W1)



- 2012年5月18日打ち上げ
- 可降水量に感度のあるバンド
23.8GHz：15 x 26km
- AMSR2は2日間で地球上の99%以上の場所を観測

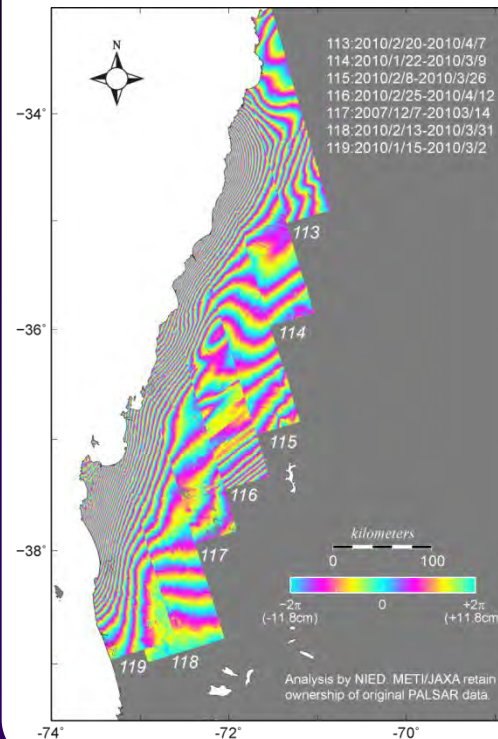
電離層擾乱

四川地震に関する干渉画像

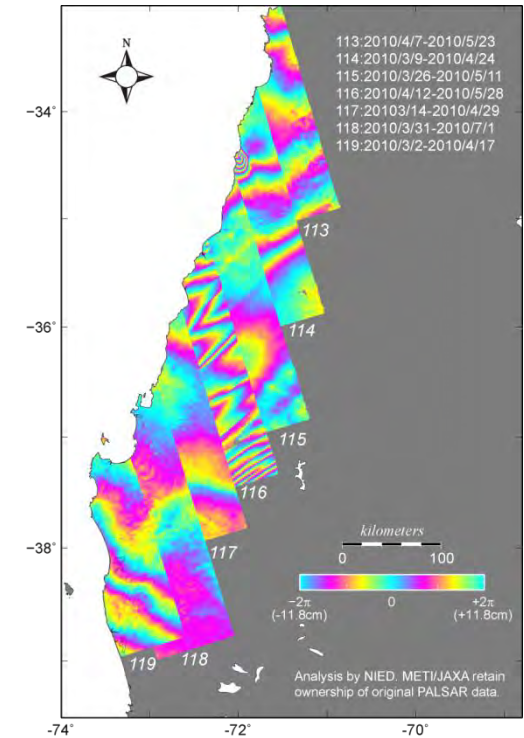


2010年チリ地震に関する干渉画像

Coseismic pair

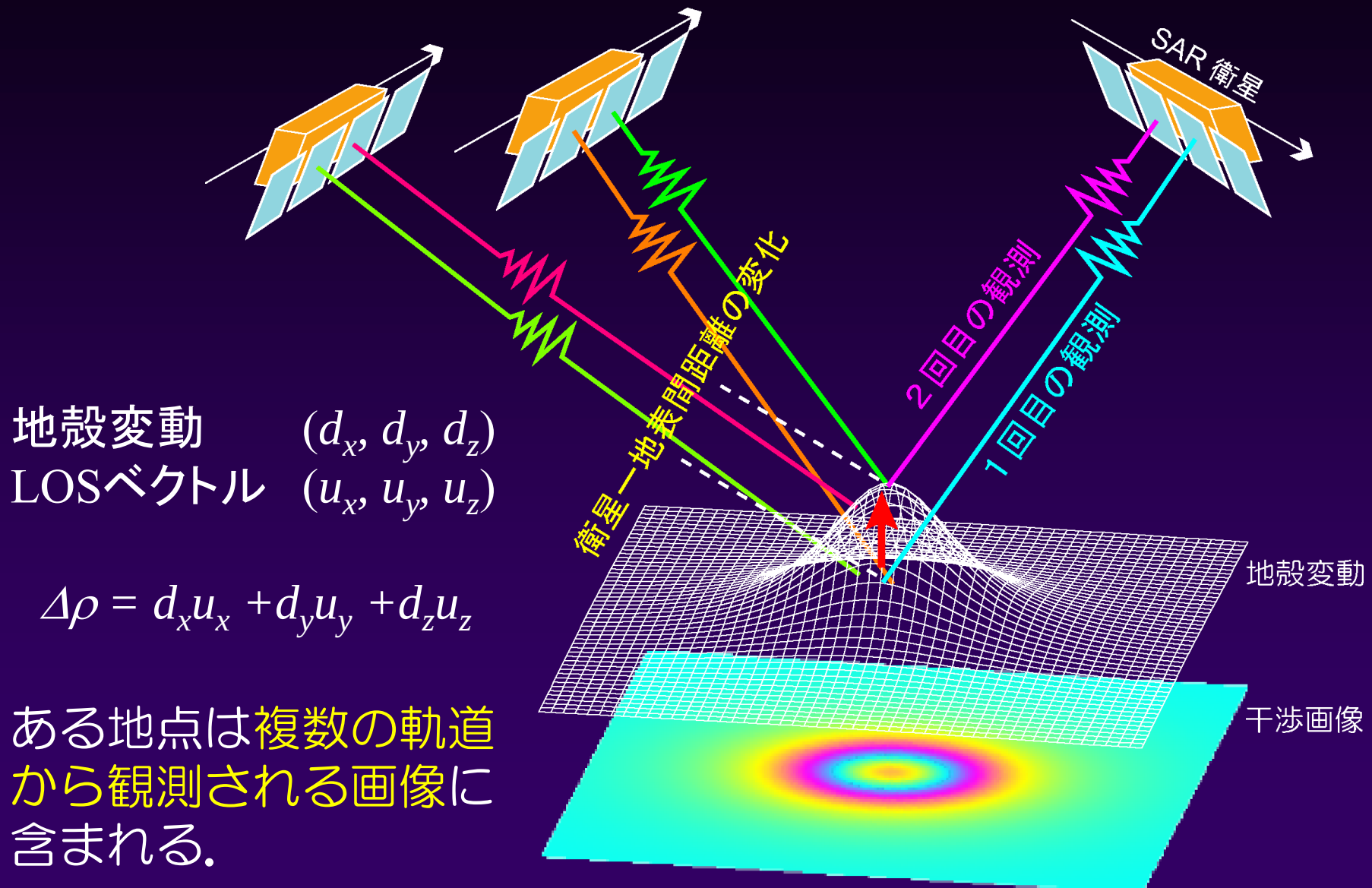


Postseismic pair

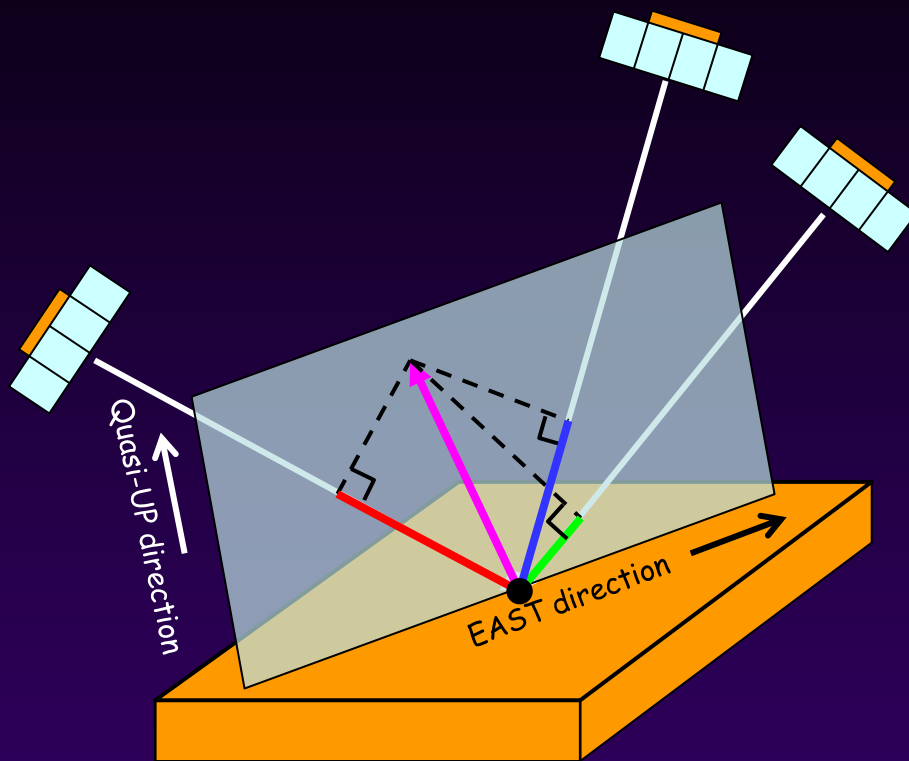


擾乱が激しいときには、誤差は10cmを優に超える。
ALOS運用前にはそれほど重要視していなかった？

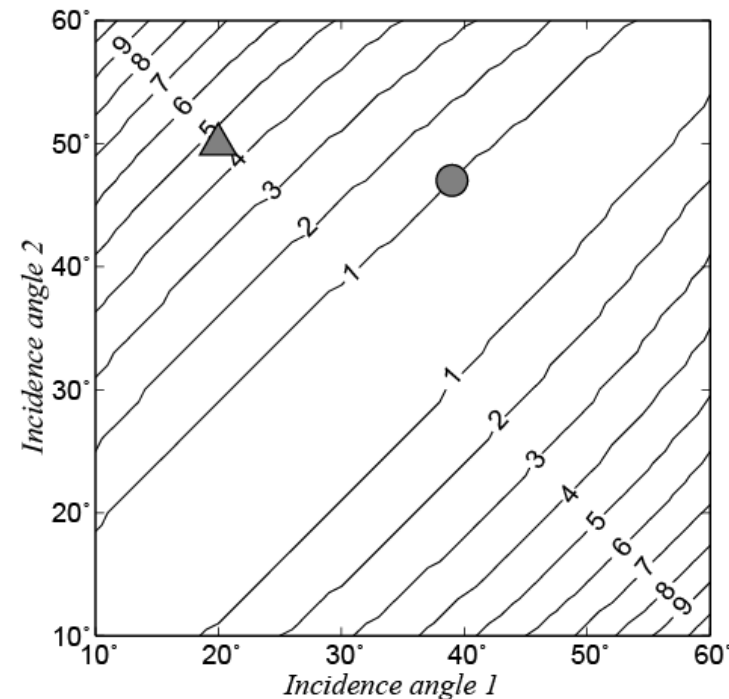
入射角が異なる干渉画像の結合



視線方向（LOS）と共通面



LOSの共通面からの最大ずれ角

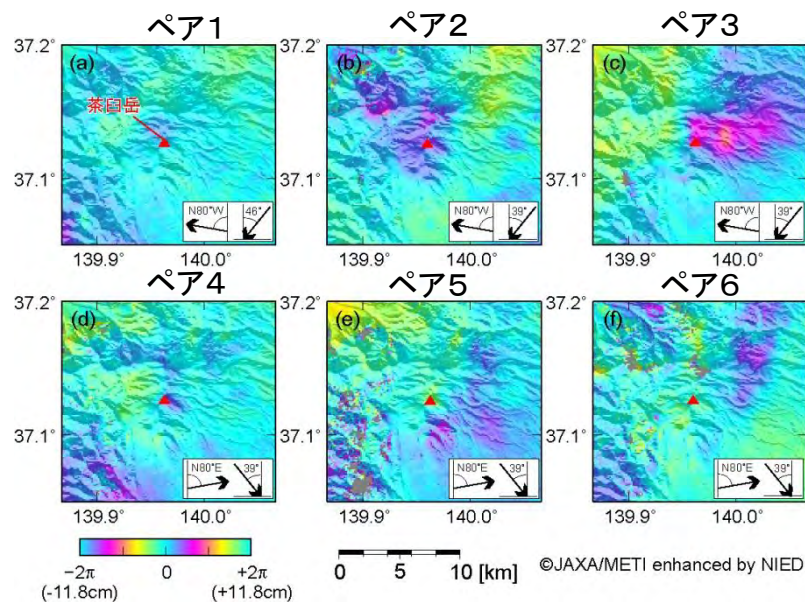


- ライト（orレフト）ルッキングのみの視線方向はほぼ1枚の共通面に含まれる.
- スラントレンジ変化は、共通面の水平成分（東西成分）とその垂直成分（準上下成分）によって記述できる.

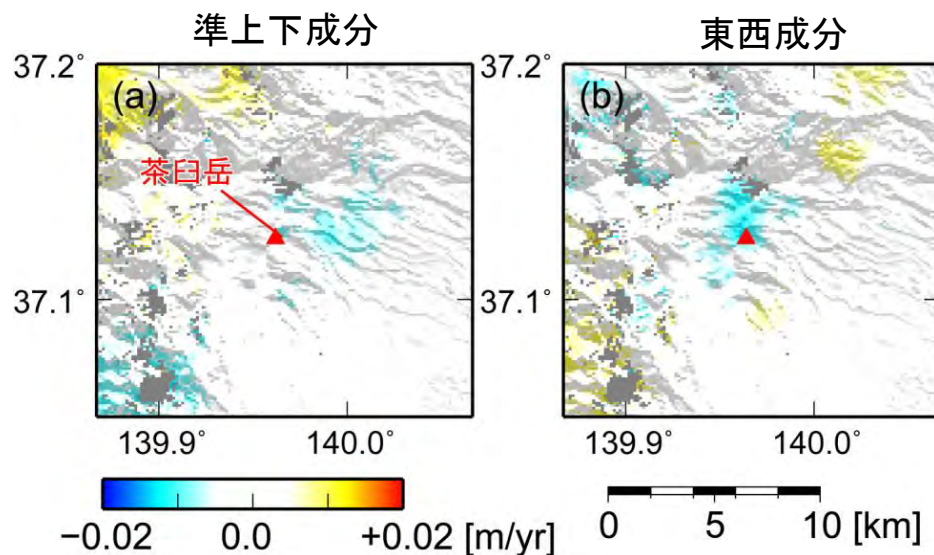
那須岳における解析事例

ペア1	パス:055(南行軌道), オフナディア角:41.5°	観測日:2006/10/23, 2008/10/28
ペア2	パス:058(南行軌道), オフナディア角:34.3°	観測日:2006/6/12, 2008/12/18
ペア3	パス:058(南行軌道), オフナディア角:34.3°	観測日:2006/9/12, 2008/9/17
ペア4	パス:405(北行軌道), オフナディア角:34.3°	観測日:2006/8/8, 2008/11/13
ペア5	パス:405(北行軌道), オフナディア角:34.3°	観測日:2006/11/8, 2008/6/28
ペア6	パス:405(北行軌道), オフナディア角:34.3°	観測日:2006/12/24, 2008/12/29

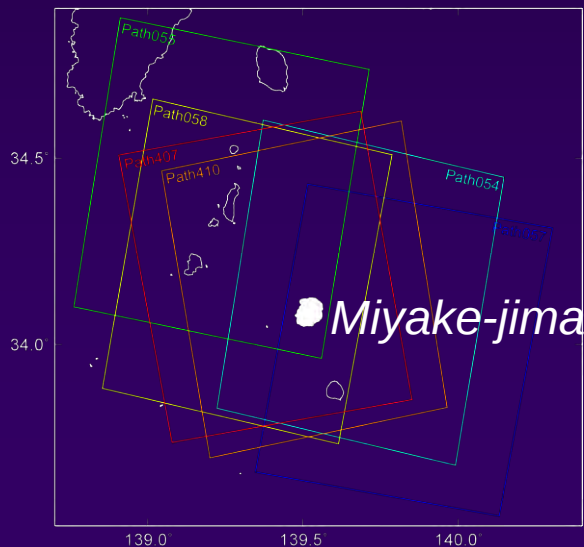
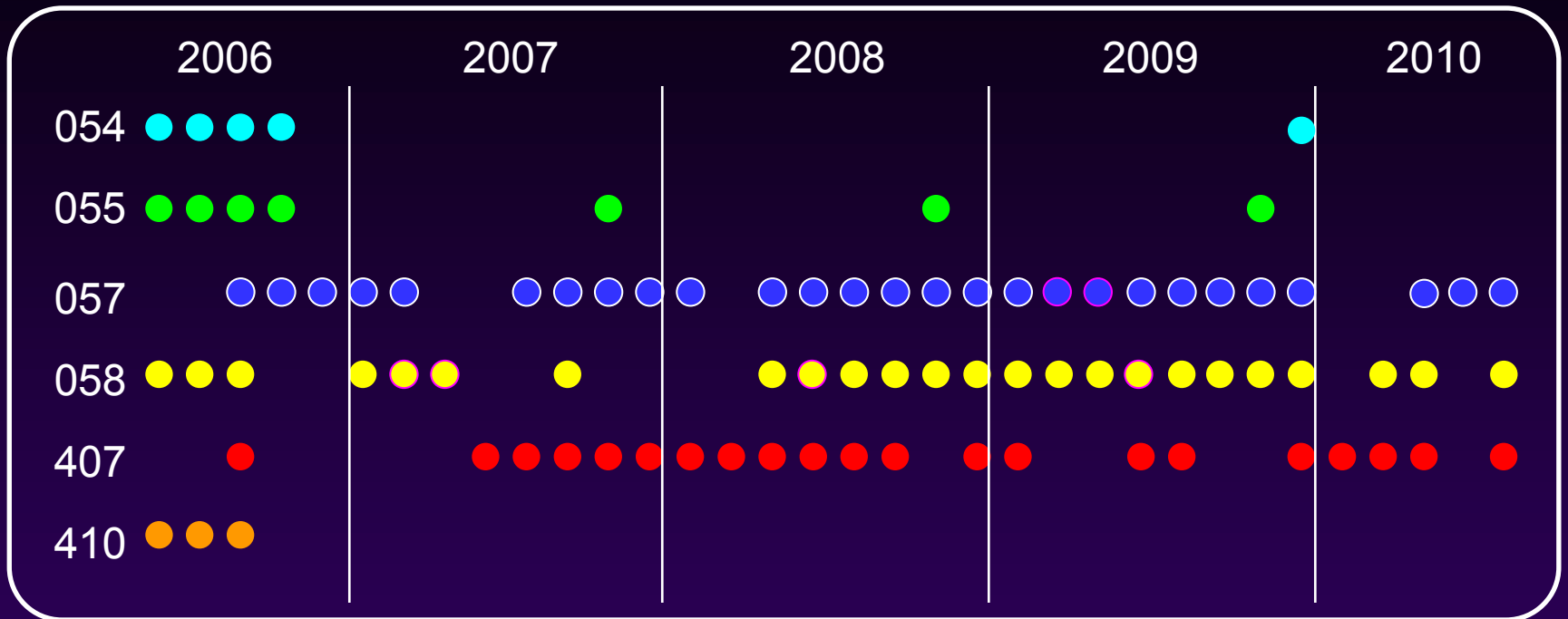
干渉画像



スタック画像



三宅島における適用例



- 6軌道からの観測画像を使用
- オフナディア角は34.3度と41.5度
- 共通面は垂直から南に10度傾く
- LOSの共通面からのずれは1度以下

観測方程式

新解析手法：

$$\Delta\rho_{\text{insar}} = \Sigma(d_{x,i}u_x + d_{y,i}u_y) + h_{\text{error}}B_{\text{PERP}}/\rho\sin\theta + \text{noise}$$

SBAS法

$$\Delta\rho_{\text{insar}} = \Sigma(\Delta\rho_i) + h_{\text{error}}B_{\text{PERP}}/\rho\sin\theta + \text{noise}$$

期間*i*における変位ベクトル

$(d_{x,i} \ d_{y,i})$

視線方向ベクトル

$(u_x \ u_y)$

DEM誤差

h_{error}

基線長（視線に対する垂直成分）

B_{PERP}

レーダー波の波長

λ

スラントレンジ

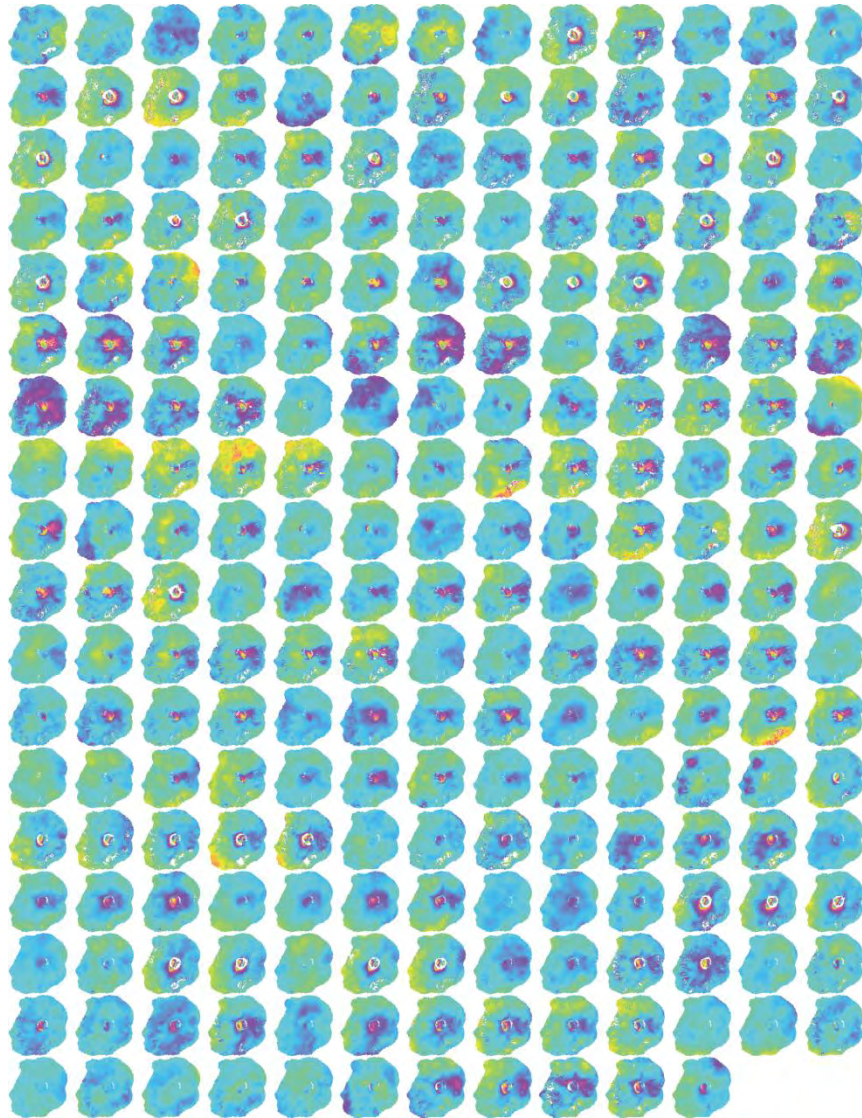
ρ

レーダー波の入射角

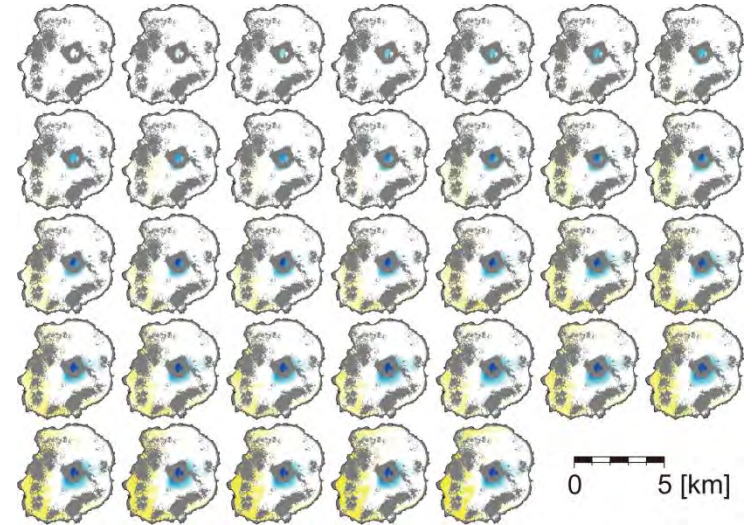
θ

推定された地殻変動時系列

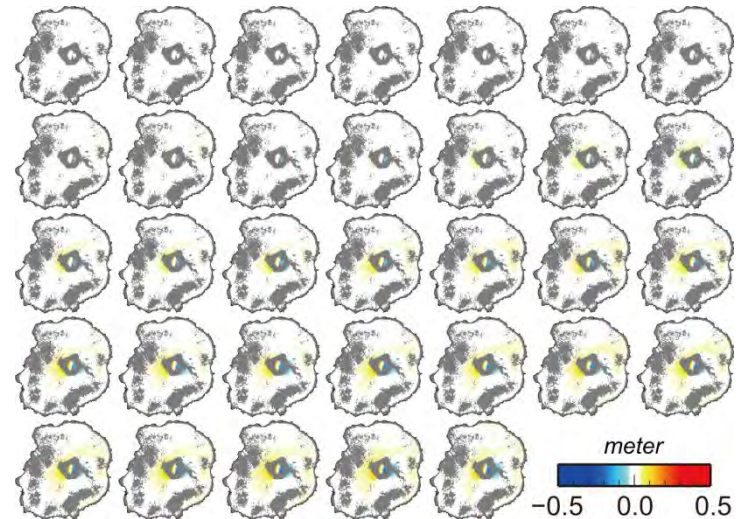
干渉画像(232ペア, 大気, 傾き誤差補正適用)



準上下成分(垂直から南に10度)

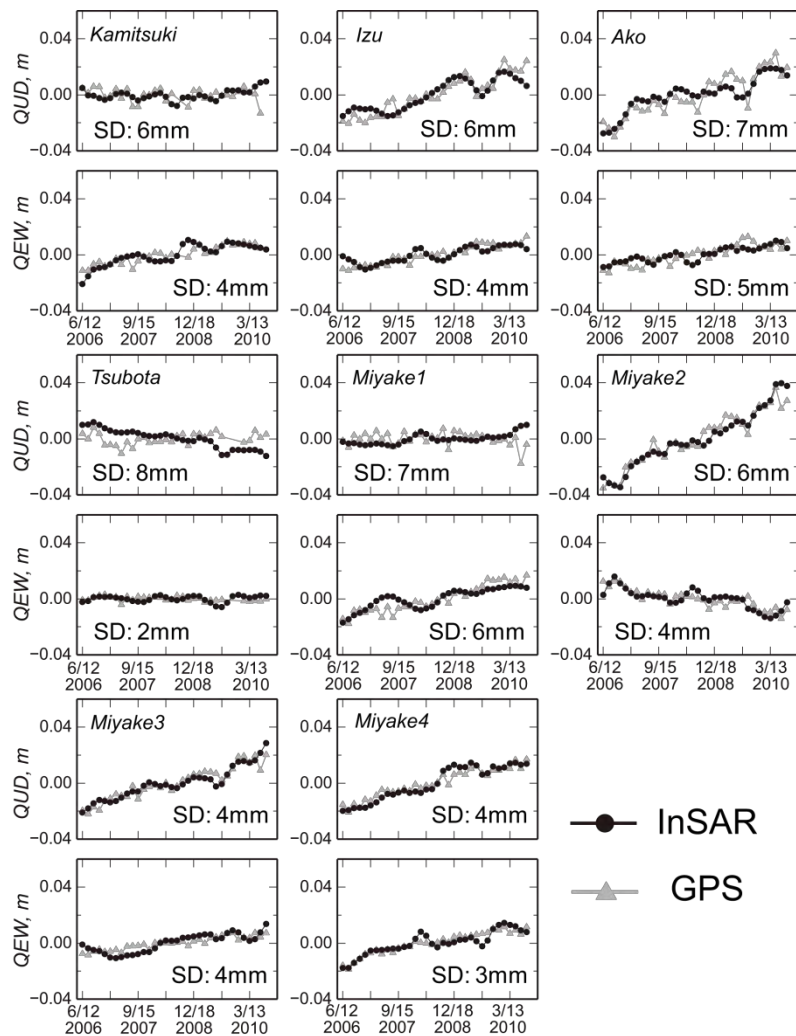


東西成分

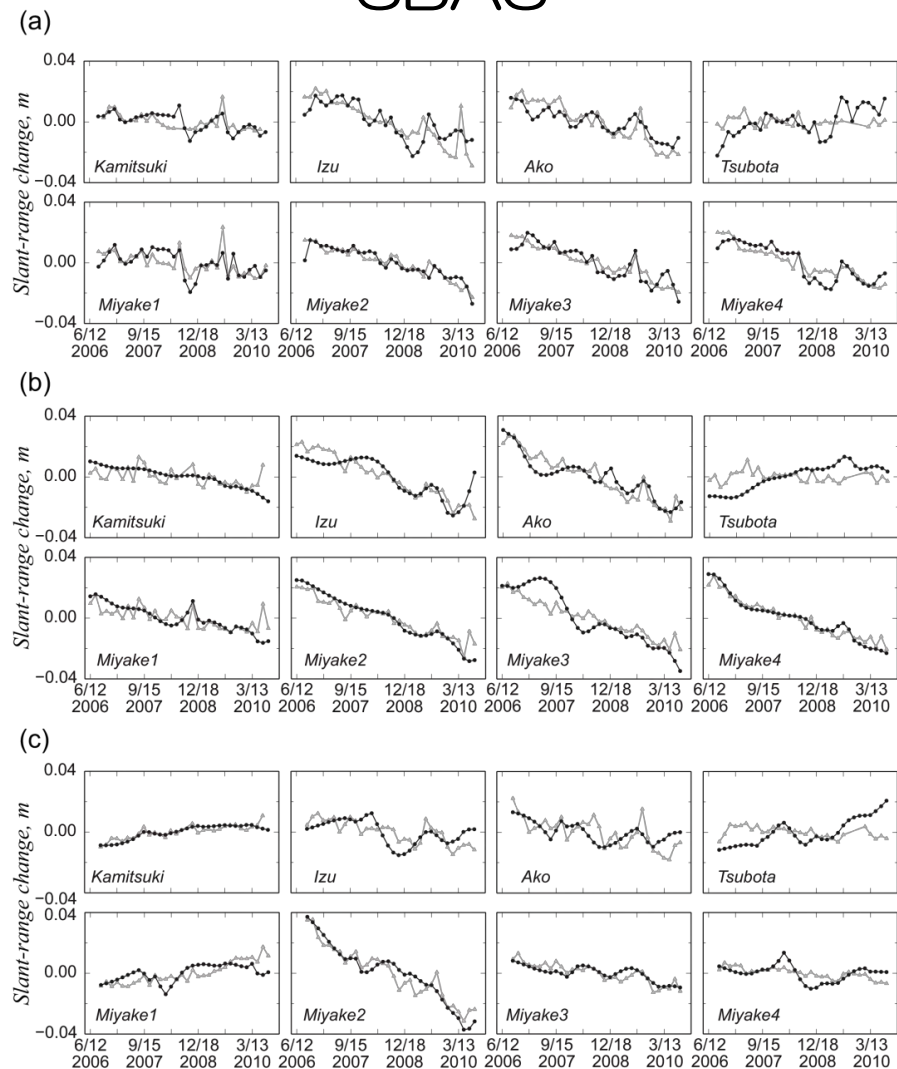


GPSによる地殻変動との比較

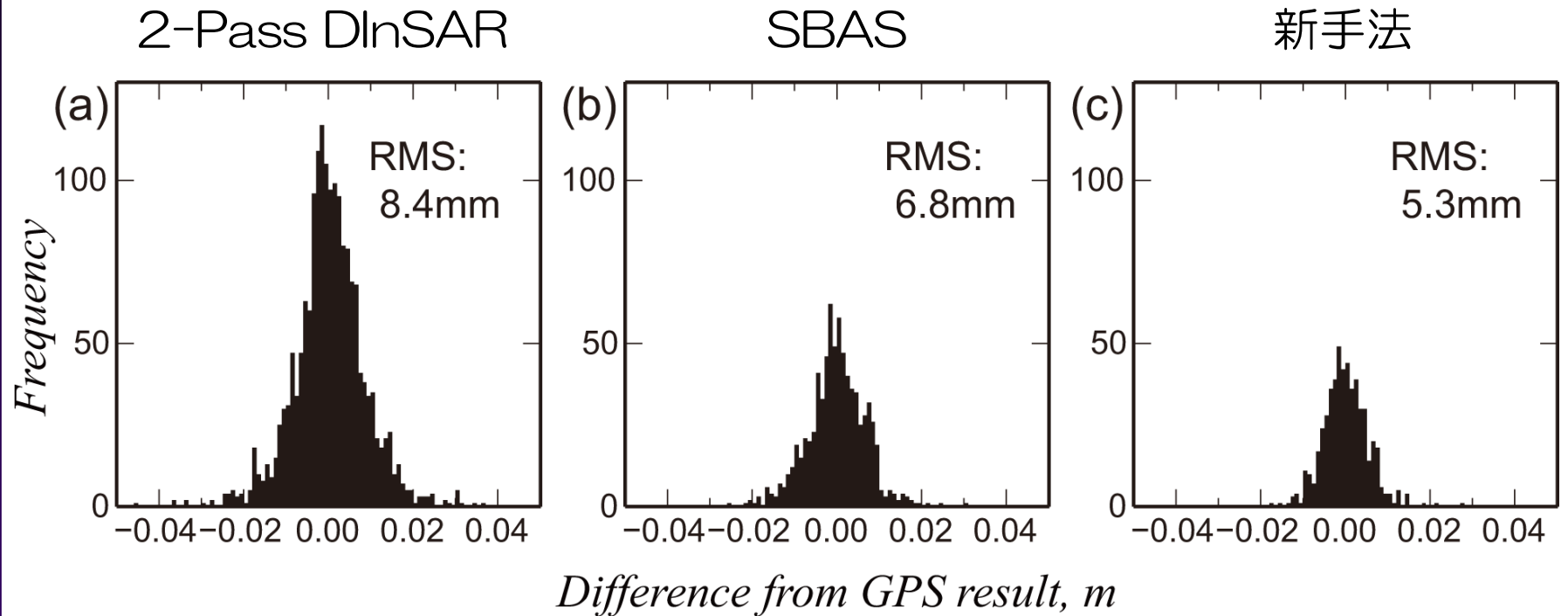
新手法



SBAS



GPS観測結果との比較



若干ながら，SBASよりも高いGPSとの一致が得られた

時系列解析に関するまとめ

大量データを入力すれば、より高精度な地殻変動が得られるが、ALOSデータのみでは、精度改善は限定的。

これから開始される多くのSARミッションデータを効率的に用いる手法となり得る。

ALOS-2, Sentinel, RADARSAT-2, COSMO-SkyMed,
TerraSAR-X, SAOCOMM

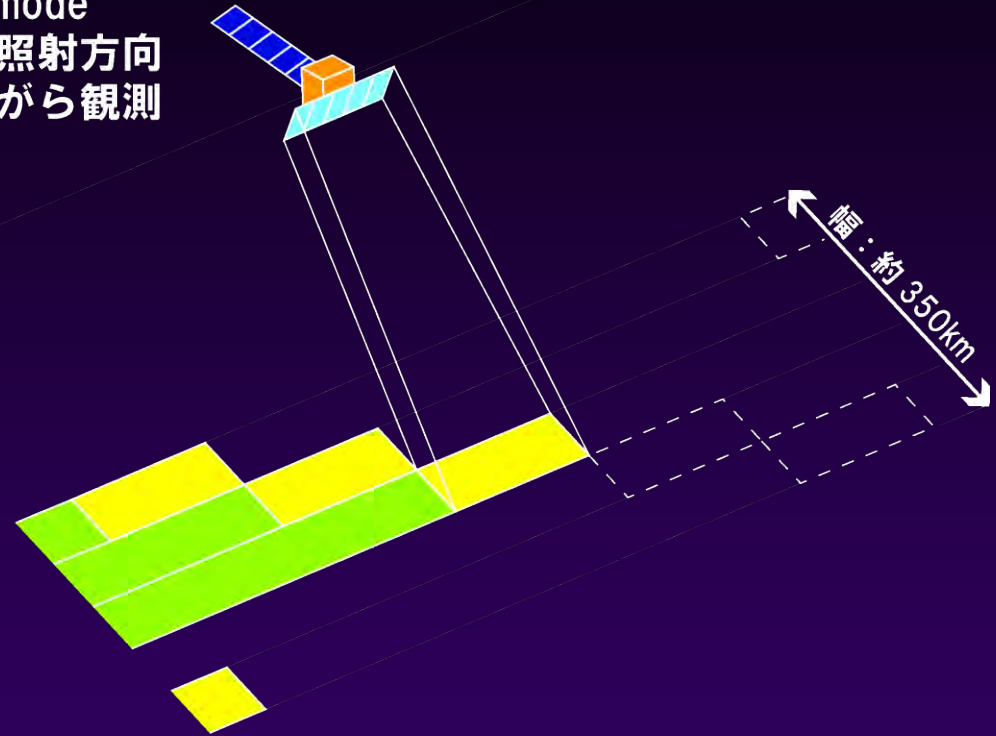
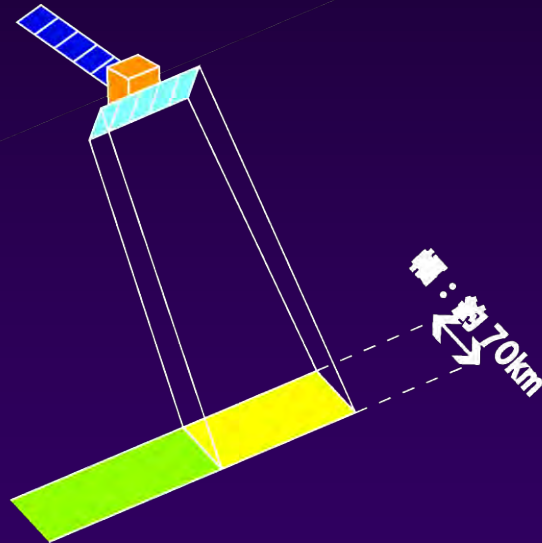
本研究で示した改良型のSBAS法に限らず、従来のSBAS法、PS-InSAR法など、時系列解析は今後のSAR解析の主流

多くのデータを使える環境が継続されることが必要
高精度に地殻変動を検出するためには、熟練が必要

ScanSAR

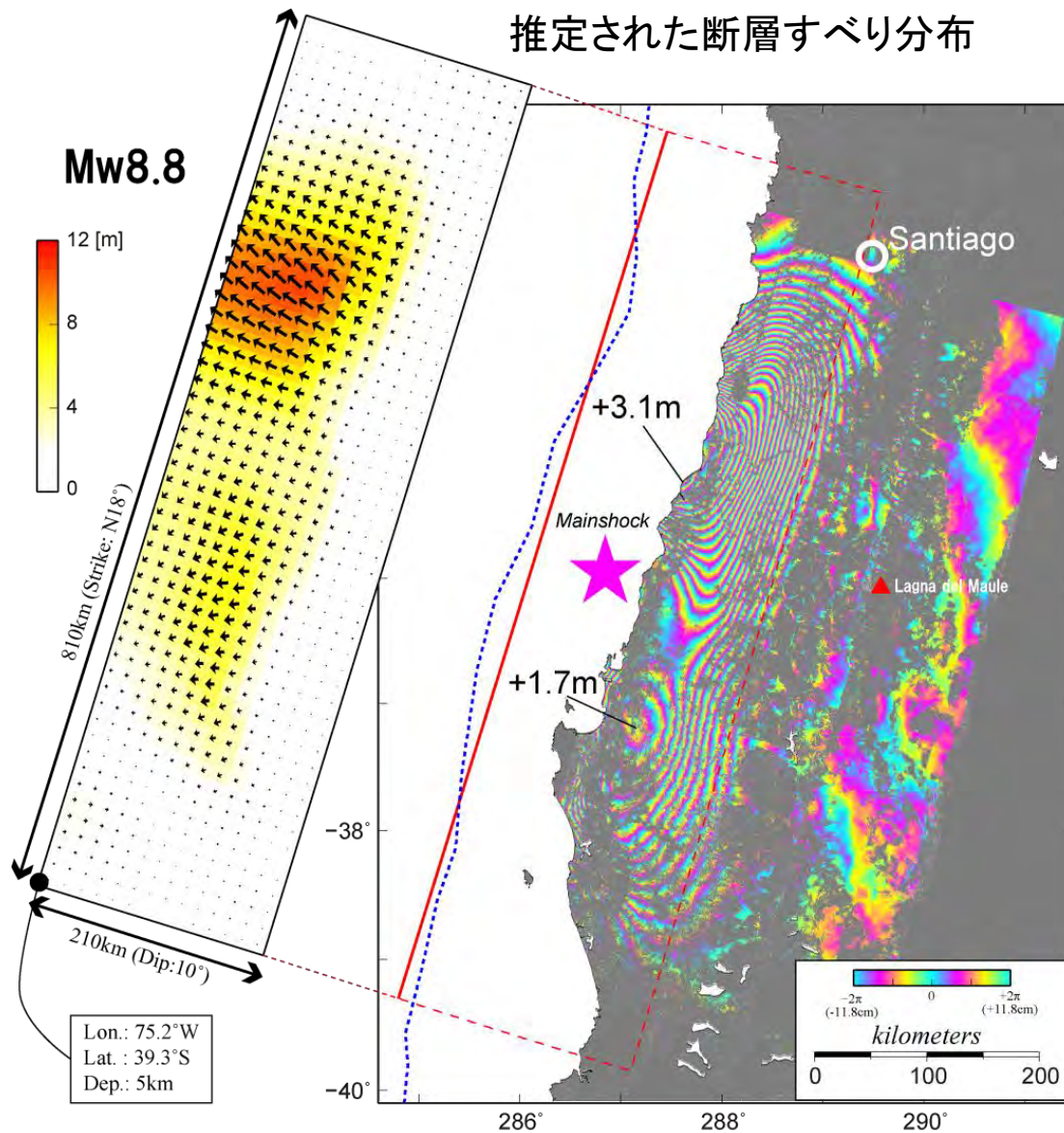
ScanSAR mode
レーダ波照射方向
を振りながら観測

Stripmap mode:
レーダ波照射方向一定で観測

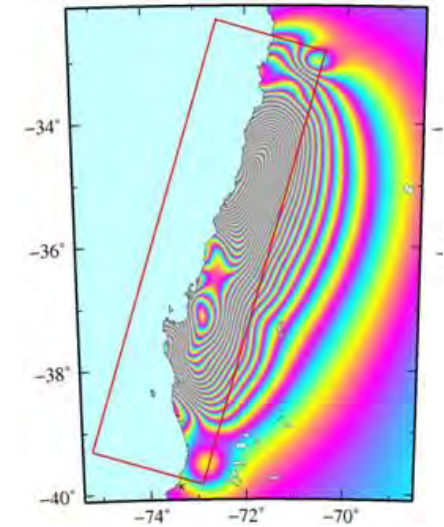


ScanSARにより広範囲の画像を取得できる
(ただし、空間分解能は低い。干渉性が悪い)

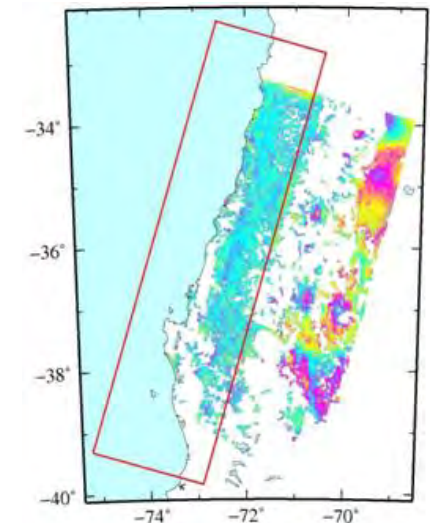
解析事例１：チリ地震（断層すべり分布）



シミュレート画像



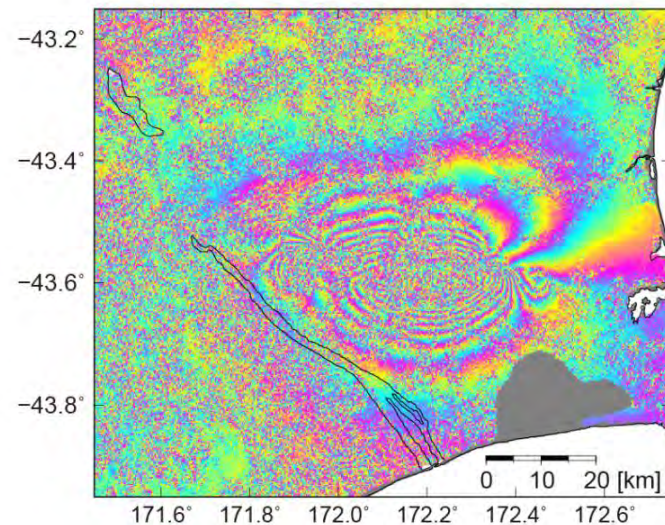
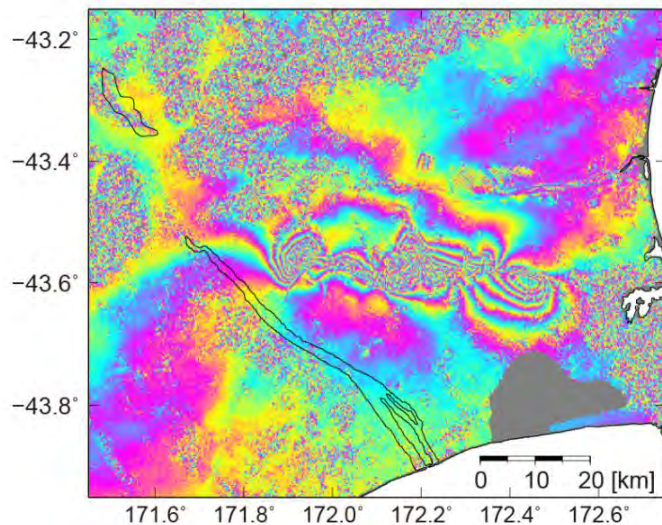
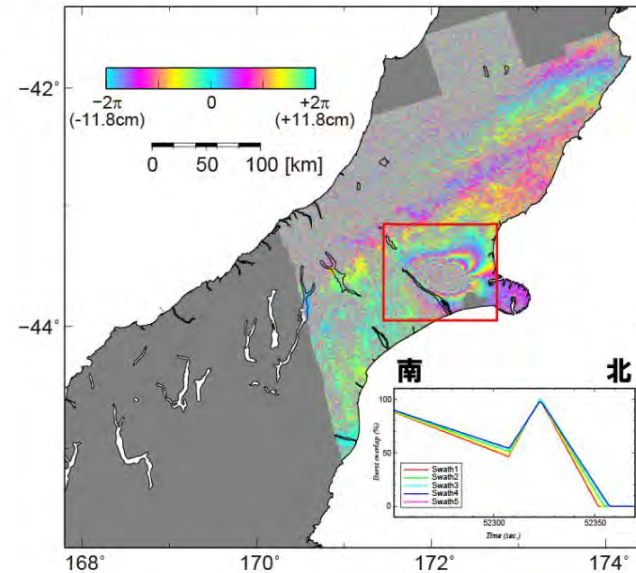
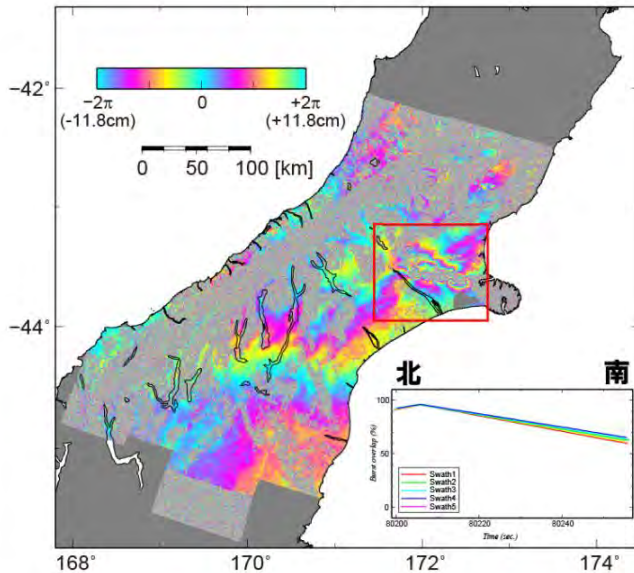
残差画像



2010年ニュージーランド地震

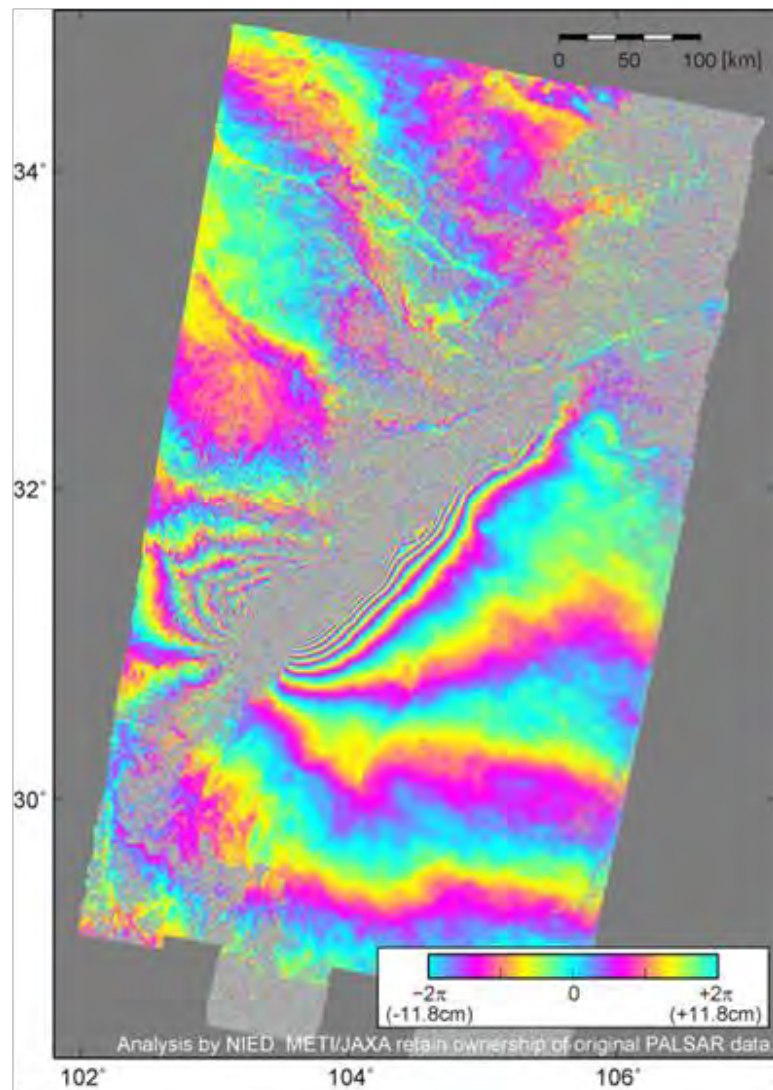
PALSAR/ScanSAR データを用いた干渉解析結果
(2009/12/3-2010/9/5, $B_{PERP}:-1973\text{m}$, Descending)

PALSAR/ScanSAR データを用いた干渉解析結果
(2008/5/31-2010/9/6, $B_{PERP}:1069\text{m}$, Ascending)

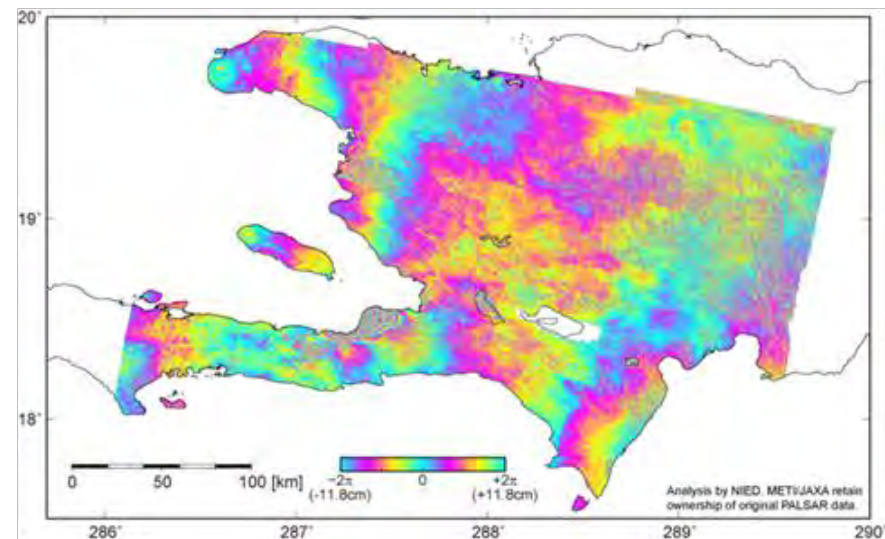


その他

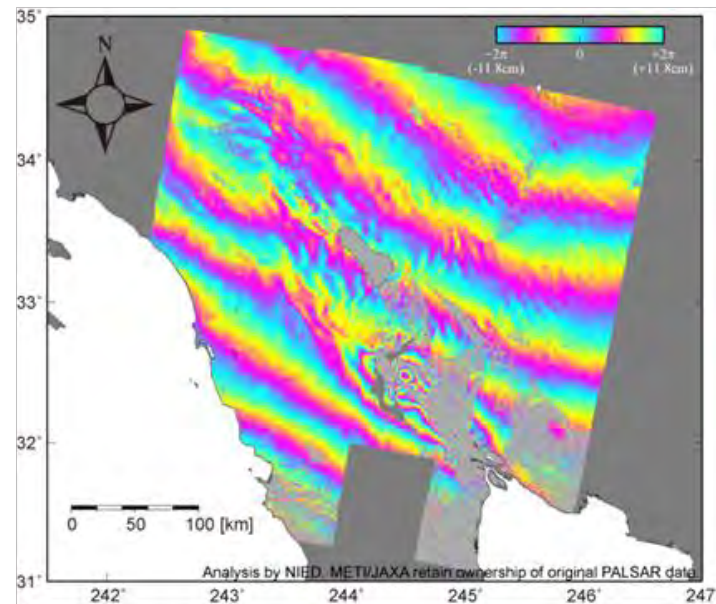
汶川（四川）地震



ハイチ地震



メキシコ・バハ地震



ScanSARの利用に関するまとめ

- 条件が良ければ，十分に干渉する.
- 軌道誤差では説明できない成分が重畳.
大気・電離層擾乱？ or 処理過程による成分？
- 誰でも使える解析ツールが出てきた（ALOS_preproc）
- 将来は標準的な観測となる可能性がある.
（ALOS-2においても定常観測に含まれる）

適用性に関する調査（空間分解能），より確実に地殻変動検出を可能にするための技術開発など，課題は多い.

まとめ

技術的なことについて

- 2パス差分SAR干渉法の精度はそれほど変わっていない
- 数値気象モデルを用いた大気遅延誤差軽減手法は有効
- ツールの整備が必要
- 電離層ノイズ軽減の研究は急務
- 時系列解析今後のSAR解析の主流
- ScanSARの利用については、研究すべきことの一つ

研究コミュニティについて

PALSARにより多くの重要な研究成果が得られた。これは研究コミュニティが設立されたことによるところが大きい。

- データ共有
- 新規にSAR研究を始めるための、重要な道場的役割
- ユーザーからの観測要求

謝辞

本研究では、PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) で共有しているPALSARデータを使用した。これは宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約によりJAXAから提供されたものである。本研究の一部は、東京大学地震研究所共同研究 (B) において行われた。PALSARデータの所有権は経済産業省およびJAXAにある。また、本研究においては国土地理院のGEONETデータおよび基盤地図情報10mメッシュ標高、気象庁のメソスケール客観解析結果を使用した。関係各位に感謝の意を表する。