

# 1-2

## 気象庁の SAR を用いた火山監視活用 Future Volcano Monitoring of JMA Using by Synthetic Aperture Radar

高木朗充, 新堀敏基(気象研), 福井敬一(地磁気観測所), 安藤忍(文科省)

Akimichi Takagi, Toshiki Shimbori, Keiichi Fukui and Shinobu Ando

気象庁は全国47の活火山を地震観測, 地殻変動観測, 遠望観測等により常時監視している. 特に地殻変動観測については, 気象庁における今後の火山監視業務の技術的方向性を検討した結果, 第1の柱として位置づけられることになった. そして, 最終目的はこれを基礎にした火山活動の評価を行うことにある.

SAR を用いた火山監視については, 現在監視業務として位置づけられてはいないものの, リモートセンシング技術としての利点, 及び差分干渉解析による面的な変動把握の実現という利点は監視業務にとって魅力的であり, 監視業務の将来を見据えた技術的蓄積や環境整備にむけて準備を始めたところである.

監視という観点から, 現状(ALOS 運用時)の SAR を用いた利点と課題点は図1の通りと考える(\*は差分干渉解析だけに関するもの).

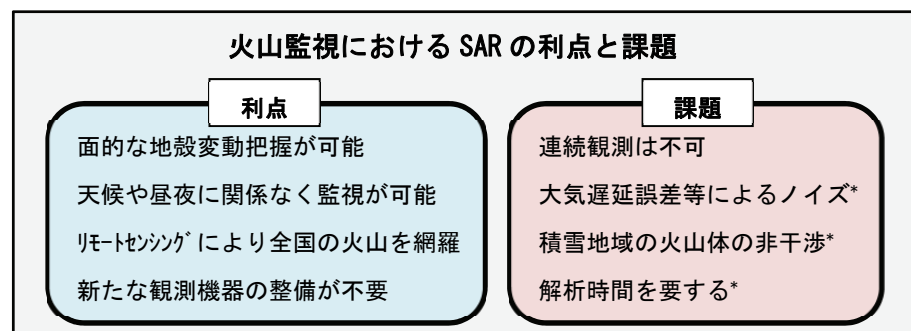


図1. 火山監視における SAR の利点と課題

将来の火山監視技術として, 克服しなければならない最大の課題は, 観測の時間分解能である. 活動評価のための火山地殻変動を把握するためには, 46 日の

衛星回帰日数は長すぎる. また, 大気遅延誤差等によるノイズは真の地殻変動をマスクをするため, 活動評価において悪影響を及ぼす. これらの課題を克服した上でさらに監視レベルを向上させるための将来的な手法として, 監視のための人工散乱体を設置して行う PS-InSAR の技術等を検討する必要がある.

本講演では, 以上の課題の中で, 現在取り組んでいる JMA-NHM による大気遅延誤差の補正に関する途中報告(図2)と, 活動評価に資する取り組みとして, 差分干渉解析結果を入力として圧力源を推定する機能を備えたソフトウェア MaGCAP-V(図3)に関する紹介を行う予定である.

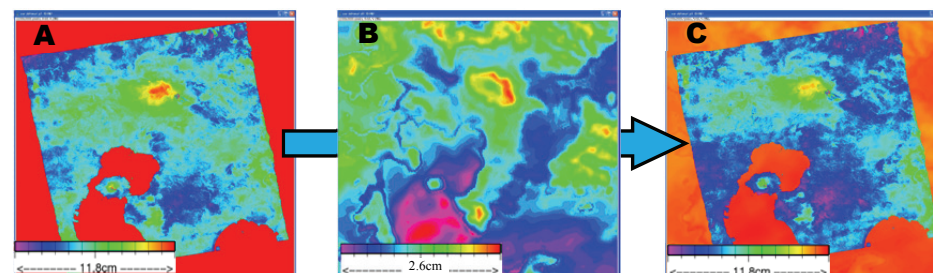


図2. 大気遅延補正の結果(2011120-20120220:霧島山) A: 差分干渉画像(補正前)

B: JMA-NHM で推定した大気伝搬遅延量の差 C: 補正結果

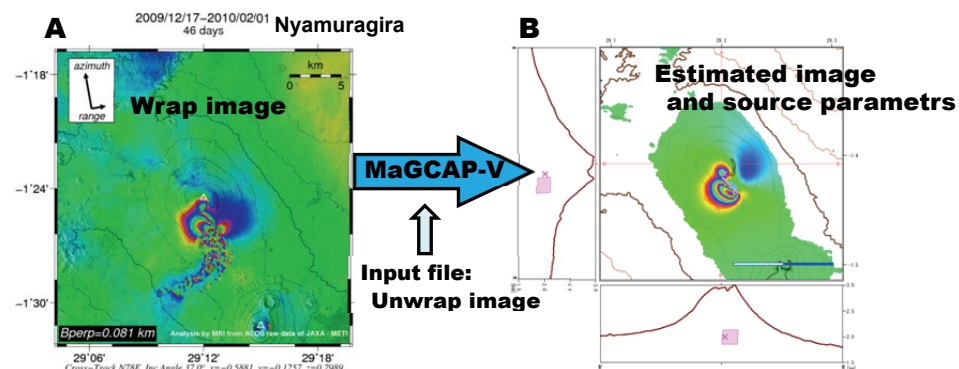


図3. MaGCAP-V による圧力源推定の例. SIGMA-SAR により作成されたアンラップ画像(A)を入力データとし, 視線方向の変動量分布から圧力源(B)を推定する.

# 気象庁のSARを用いた火山監視活用

Future Volcano Monitoring of JMA Using by Synthetic Aperture Radar

高木朗充・新堀敏基(気象研究所)・福井敬一(地磁気観測所)  
・安藤忍(文部科学省)

【謝辞】本解析で用いたJERS-1/SARデータは(財)リモート・センシング技術センターから配布されたものである。またALOS/PALSAR データはPIXELで共有しているものであり、(独)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。JERS-1/SARおよびALOS/PALSAR に関する原初データの所有権は経済産業省およびJAXA にある。解析には、宇宙航空研究開発機構の島田政信氏により開発されたSIGMA-SAR を使用させていただいた。関係者各位にお礼申し上げます。

# 本日の話題提供

## 気象庁の火山監視でSARを活用する上での 利点と課題及び展望について

その課題等に対し、気象庁としてできることは？



### 監視技術の向上の観点

大気伝搬遅延によるノイズ除去に対する取り組み

(重点研究)気象観測技術等を活用した火山監視・解析手法の高度化に関する研究(H21~H25)

### 活動評価技術の向上の観点

SAR干渉解析結果から圧力源を見積もることが可能な汎用ソフトウェア開発の取り組み

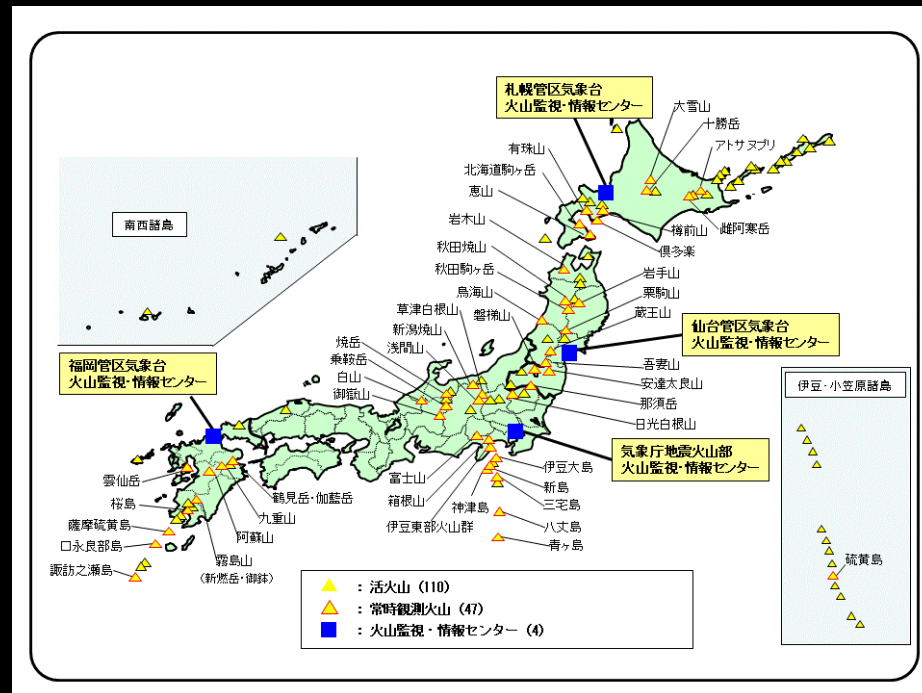
(重点研究)地殻変動観測による火山活動監視評価と噴火シナリオの高度化に関する研究(H23~H27)

# 火山監視におけるSARの利点と課題

今後の気象庁の火山監視業務の技術的方向性  
地殻変動を第1の柱として位置づけ, これに震動観測  
の成果を組み合わせる火山活動評価の基礎とする。

監視すべき火山  
常時観測を行う火山

110の活火山  
47の活火山



# SARの活用によるメリット

- (1) 衛星リモートセンシング技術により全国の火山を網羅できる。  
(現状) 47火山で常時観測。
- (2) 面的な地殻変動把握が可能になる。  
(現状) 47火山では最低1点のGPS連続観測点。
- (3) 天候や昼夜に関係なく監視が可能(とくに強度画像による監視)。  
(現状) 地形の変形把握は、遠望観測(監視カメラ)による光学的な情報のみ。
- (4) 新たな観測機器の整備が不要。



# SARの活用の課題

- (1) 連続観測は不可. 静止衛星なら...  
(現状) 回帰日数46日 (ALOS).
- (2) 大気伝搬遅延誤差等によるノイズ.  
(現状) 除去手法の技術開発.
- (3) 積雪地域の火山体の非干渉.
- (4) 解析処理に時間を要する (自動処理は可能か).

# SARの活用の展望

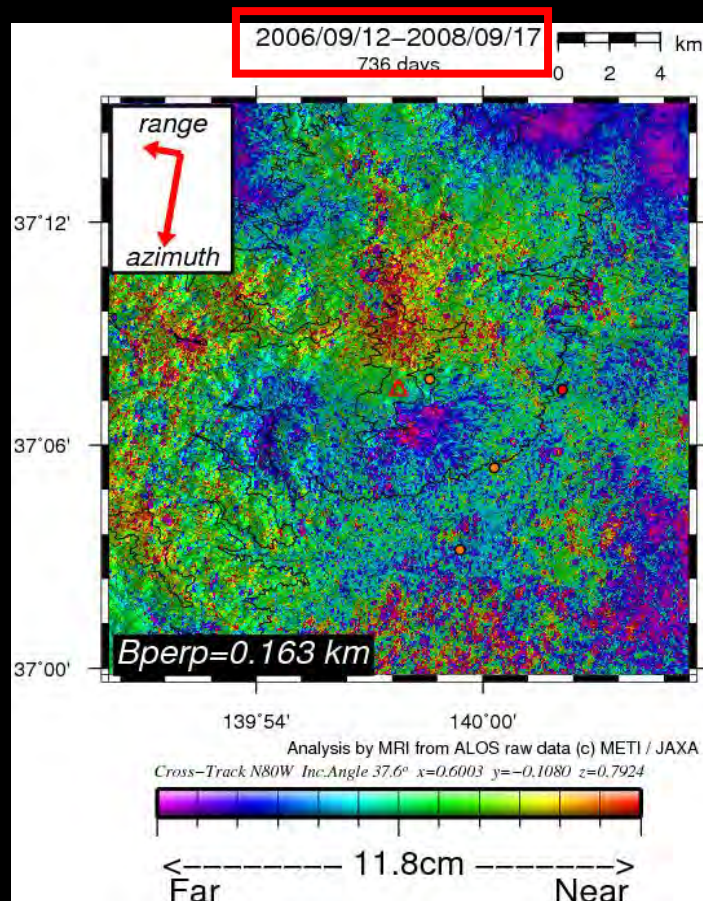
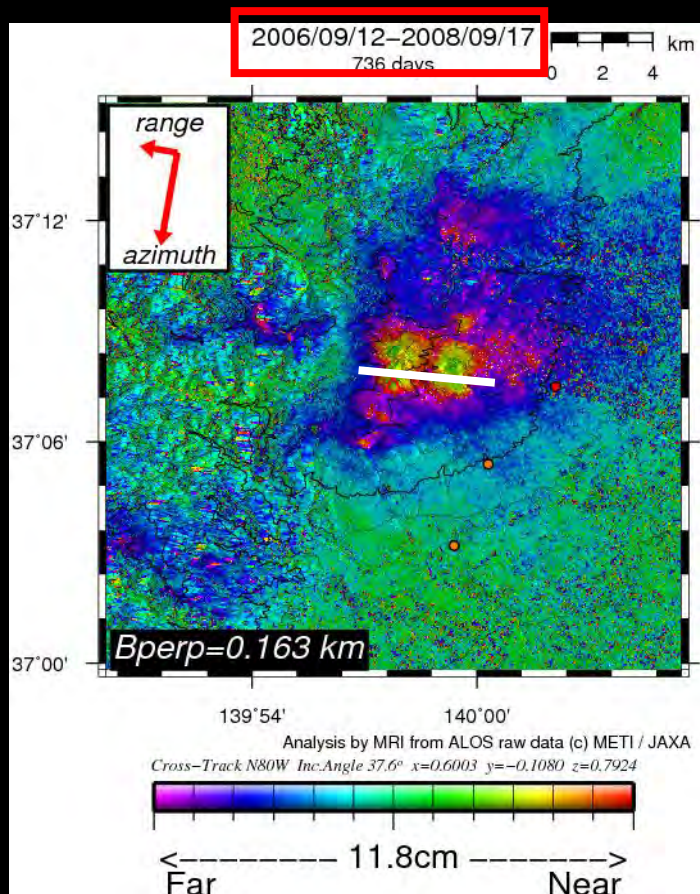
- (1) 業務として, 監視種目にどのように取り込むべきか.
- (2) 定時監視データとしてのロバスト性. (欠測の有無等)
- (3) 精度向上への取り組み. (PS-InSAR, ポラリメトリ解析技術等)



# 大気伝搬遅延誤差の取り組み(途中報告)

従来手法:

大気遅延誤差を標高の1次関数によって近似する方法(藤原, 1999)



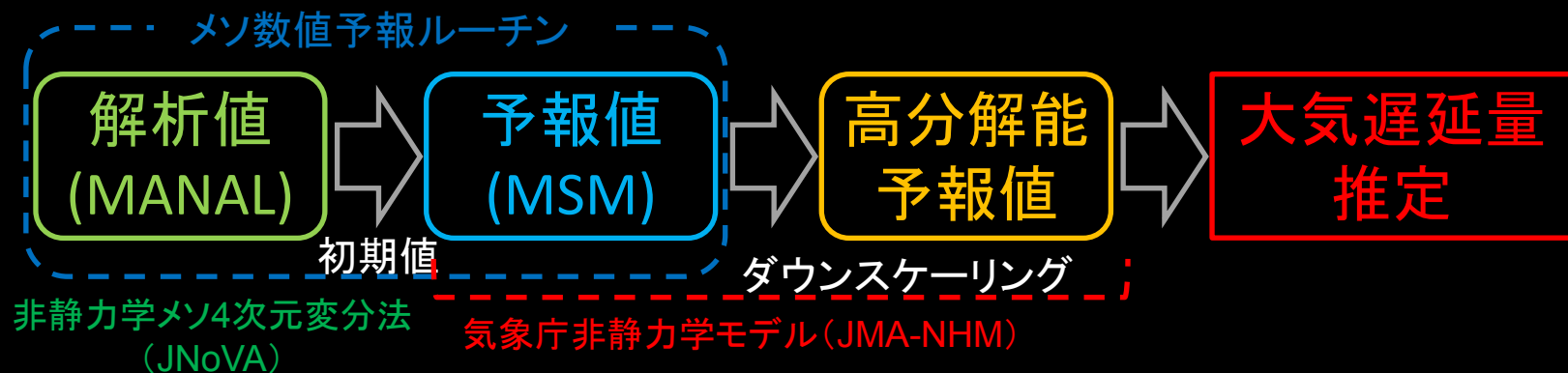
白線のプロファイルで標高との相関係数を求め、画情報で補正処理した結果。一部で補正しきれていない箇所はあるが、概ね除去できた。このように成功する場合もある。

# 数値予報GPV (JMA-NHM) の概要 1

**メソ数値予報モデル (MSM)** : GPS可降水量等の種々の観測データを非静力学メソ4次元変分法により同化して作成されたメソ解析値 (MANAL) を初期値 (側面境界値は気象庁全球モデル (GSM)) とし, 1日8回, 最長33時間予報を実行.

**高分解能予報値の作成** : InSARのための大気遅延量の推定では, さらにMSM予報値を初期値・境界値として, 当該領域をMSMと同じ気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) をダウンスケーリングして実行した観測時刻前後のモデル面GPVを内挿して用いた.

島田 (1999) で用いられた当時のGSMの気圧面解析値 (GANAL) から分解能が上がっており, 解析値から高分解能予報値作成まで一貫してJMA-NHMを用いていることが特徴.





# 数値予報GPV (JMA-NHM) の概要2

## MSMモデル面予報値

- 水平格子間隔: 5 km
- 鉛直層数: 50 (高度約22 kmまで)
- タイムステップ: 24秒
- 予報間隔: 1時間 (毎正時)
- 予報領域: 3600 km × 2900 km
- モデル地形: GTOPO30を平滑化 (約7.5 km相当)

## JMA-NHMによる高分解能モデル面予報値

- 水平格子間隔: 1 km
  - 鉛直層数: 50 (MSMと同じ)
  - タイムステップ: 8秒
  - 予報間隔: 1時間 (毎正時)
  - 予報領域: 約200 km四方
  - モデル地形: GTOPO30
- ※上の設定は、目的に応じて変更可能

## ダウンスケール (ネスティング)

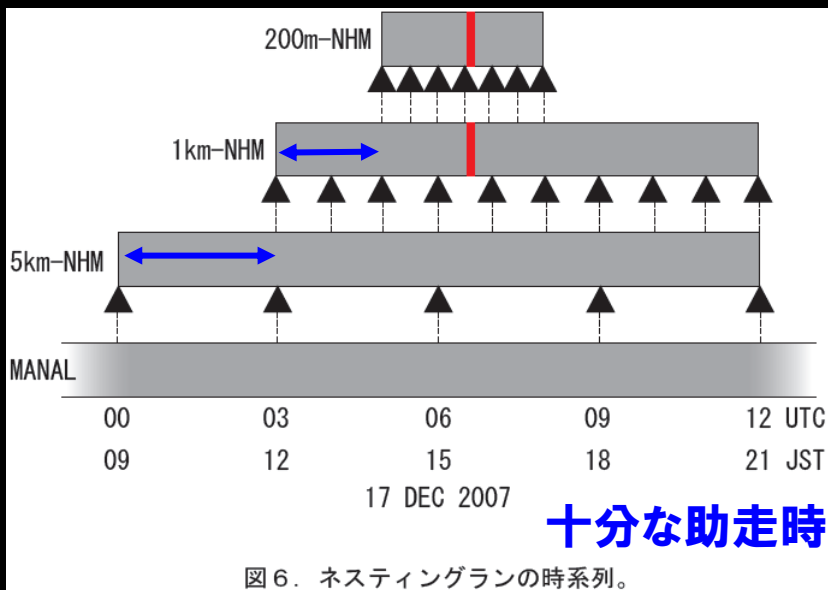


図6. ネスティングランの時系列。

十分な助走時間と助走距離

## JMA-NHMによる高分解能モデル面予報値

## MSMモデル面予報値

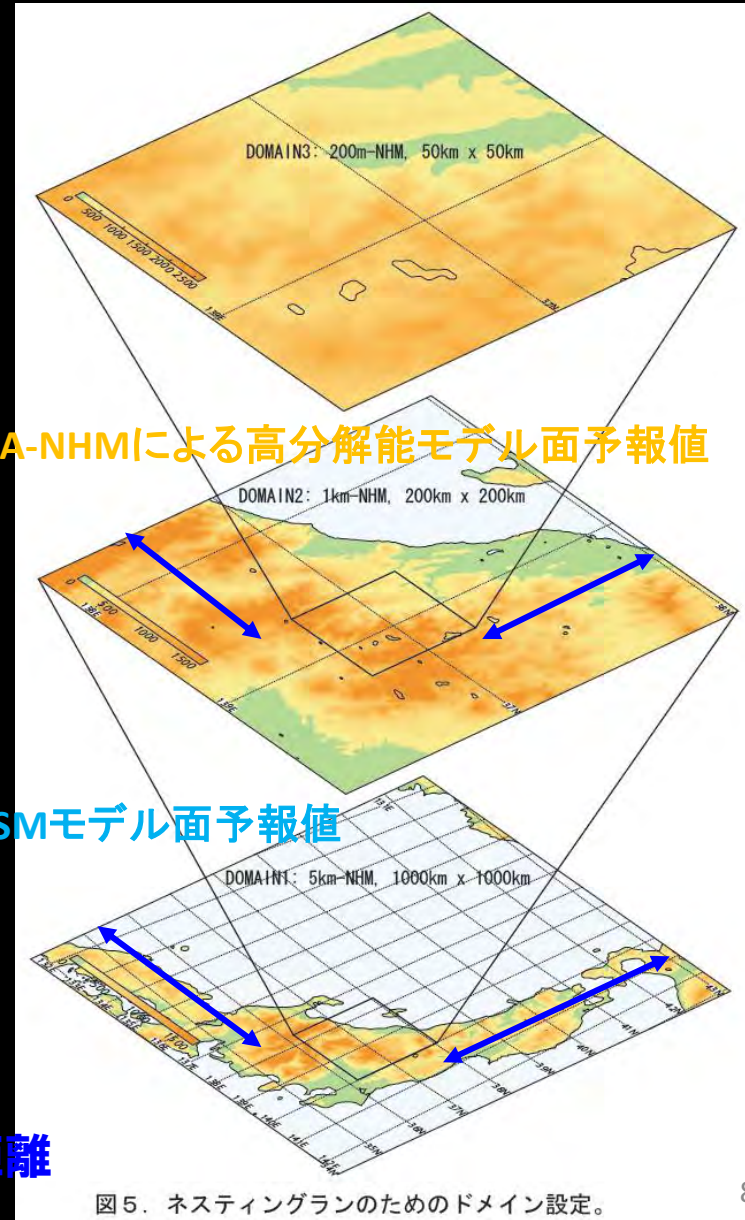


図5. ネスティングランのためのドメイン設定。

# 大気遅延量の推定

観測ターゲットからセンサー方向の視線遅延量を以下のステップで求める。

- i. 観測ターゲットから天頂方向の各モデル面高度を求める
- ii. 各モデル面高度に対応する視線方向の緯度・経度を求める
- iii. i, iiで求めた各ポイントにおいて、観測時刻の前後1時間のGPVを時空間内挿して屈折率を計算する
- iv. iiiで求めた屈折率とそのポイントにおけるモデル層厚から遅延量を求め、視線方向に積算する

マスター画像(M)とスレーブ画像(S)の各ピクセルごとの大気位相遅延量の差を、平行大気を仮定した島田(1999)で計算：

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda_0} \frac{2}{\sin 2\Theta_0} \sum_i (n_{Mi} - n_{Si}) \Delta r_i$$

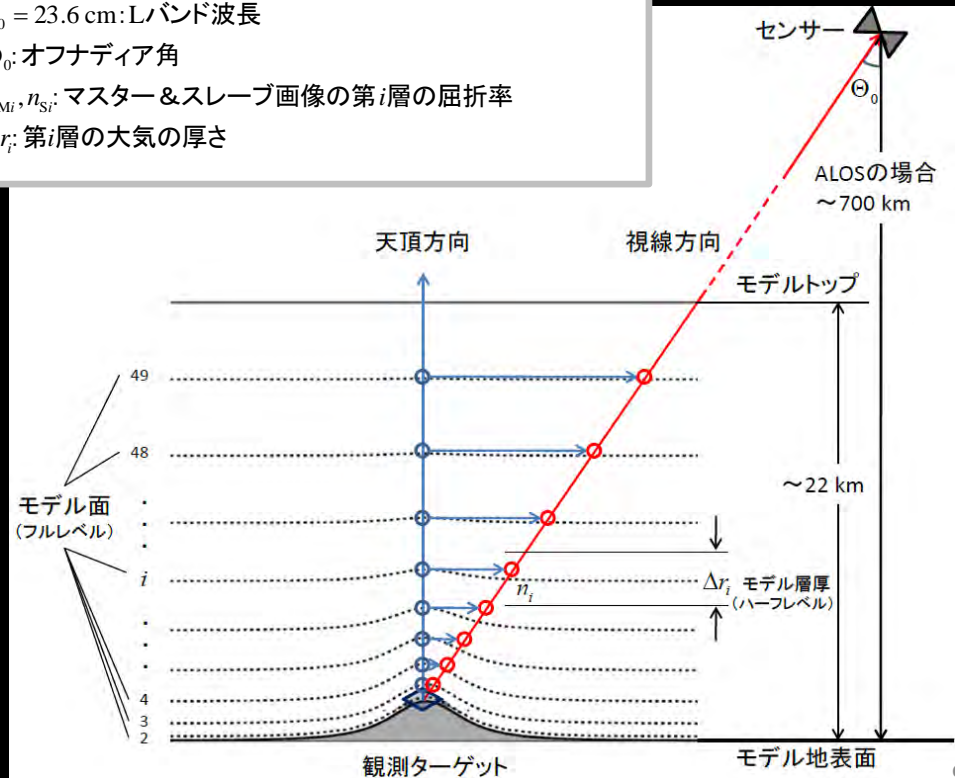
- $\lambda_0 = 23.6 \text{ cm}$ : Lバンド波長
- $\Theta_0$ : オフナディア角
- $n_{Mi}, n_{Si}$ : マスター&スレーブ画像の第*i*層の屈折率
- $\Delta r_i$ : 第*i*層の大気の厚さ

屈折率は、GPS可降水量で使用されている次式を用いた(大谷・内藤, 1998):

$$(n_i - 1)10^6 = 77.60 \frac{p_i}{T_i} + 71.98 \frac{e_i}{T_i} + 3.754 \times 10^5 \frac{e_i}{T_i^2}$$

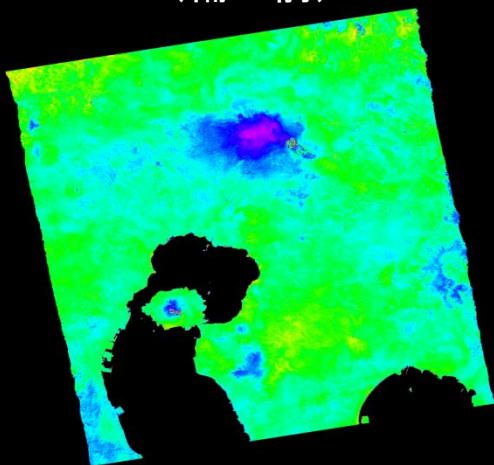
$p_i$ [hPa]: 気圧,  $T_i$ [K]: 気温,  $e_i$ [hPa]: 水蒸気圧

(温位, 気圧, 混合比(水蒸気)のGPVから算出)

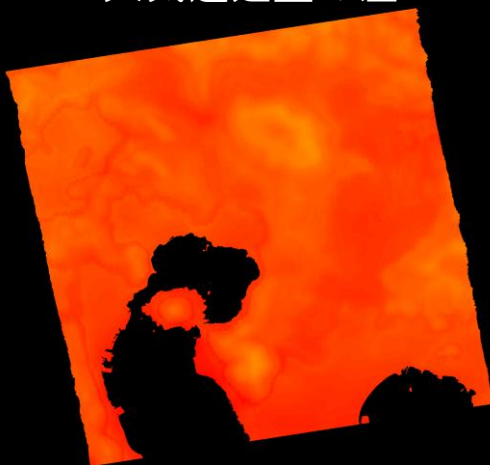


# 大気遅延量補正の結果

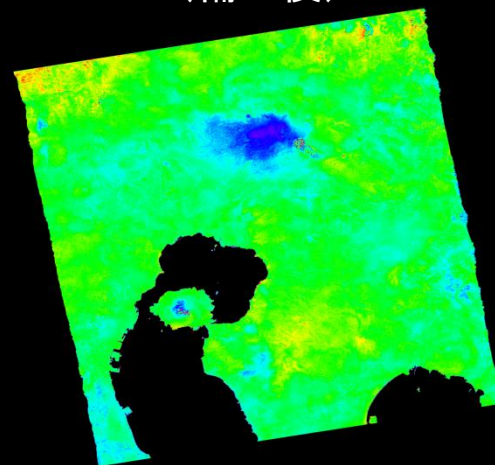
SAR干渉画像  
(補正前)



JMA-NHMで推定した  
大気遅延量の差



SAR干渉画像  
(補正後)



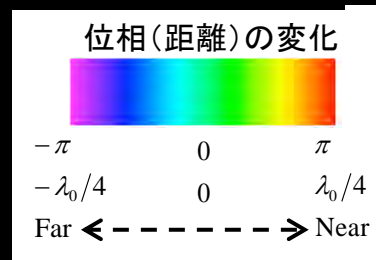
撮像日

●マスター画像 (M) : 2011/02/20 13:44UTC

●スレーブ画像 (S) : 2010/11/20 13:46UTC

最大差分を  $\pi$  でオフセット

最大変化量 :  $0.22 \pi$  (=1.32 cm)



- 補正前の干渉画像では、水蒸気起因と考えられる大気遅延誤差が重畳
- 多くの地域では地形標高と大気遅延誤差に相関が見られるが全てではない
- 同じマスター画像を含む他の干渉ペアでも同じ傾向
- この事例で見積もった大気遅延量の差は数cmオーダーで、ターゲットとする地殻変動量と比べて無視できない
- 大気遅延補正後のSAR干渉画像でも、霧島山では降灰によると見られる新燃岳の南東方向を除き、衛星から遠ざかる方向の変動が見られる
- 補正後も残存するノイズを除去し真の地殻変動を抽出するためには、GPS観測などのグランドトゥースとの比較検討が必要

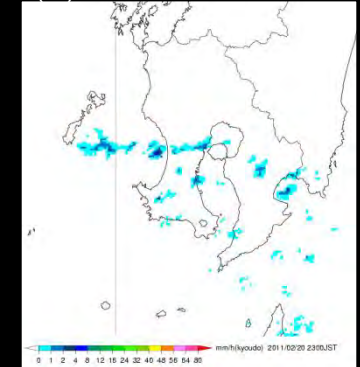
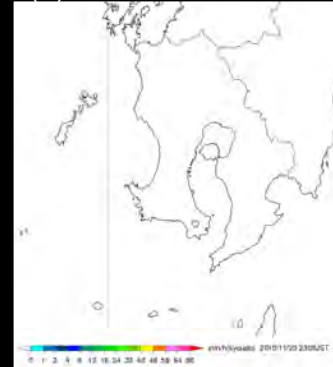


# 大気遅延量分布の確認

気象レーダーによる降水実況

(S) 2010/11/20 14:00UTC

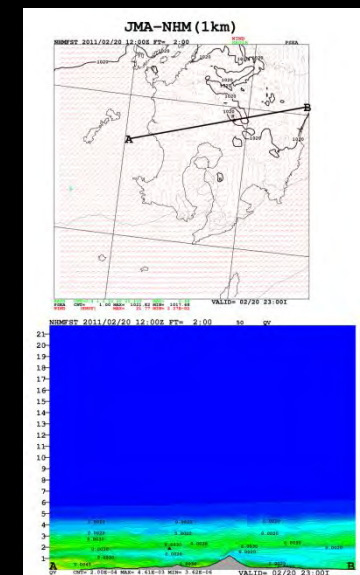
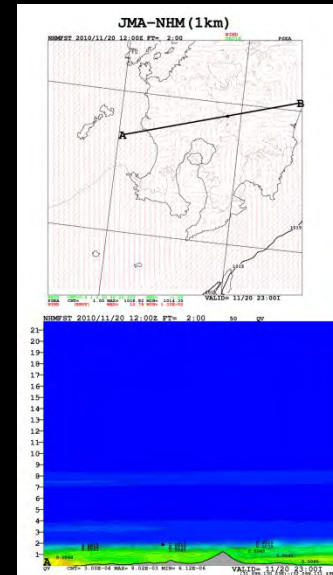
(M) 2011/02/20 14:00UTC



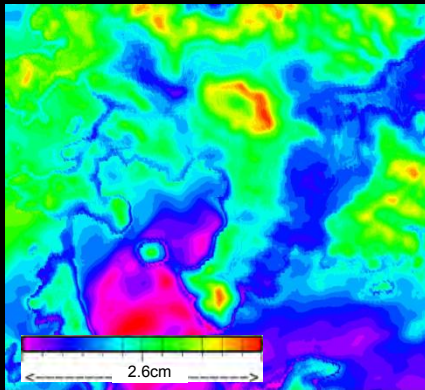
JMA-NHMによる高分解能予報値

(S) INIT: 2010/11/20 12UTC  
VALID: 14UTC (FT=2)

(M) INIT: 2011/02/20 12UTC  
VALID: 14UTC (FT=2)

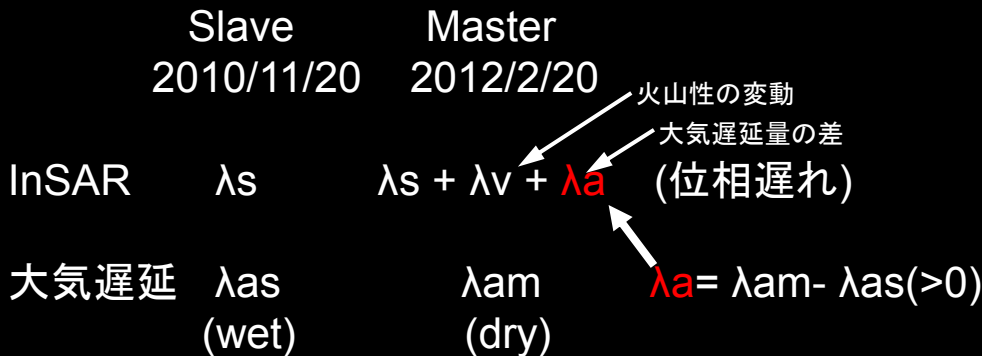


大気遅延量の差



- ▶レーダー実況によるとスレーブ画像に比べて、マスター画像の撮像日の方が湿潤な大気構造が認められる
- ▶ダウンスケーリングしたJMA-NHMによる視線方向の水蒸気は、マスター画像の撮像日の方がより上層まで分布

## 【位相遅れの考え方】



(上段) 気圧[hPa], 風[kt]と1時間積算降水量[mm]  
(下段) 水蒸気の混合比[kg/kg]のA-B間鉛直断面図

# 大気遅延補正の課題と展望

- 幾何学遅延量は考慮していない。伝搬速度の遅延量と比較して大きくないと考えられるが、確認が必要。
- モデルトップ(22km)より上層の処理はしていない。空気密度が小さいため大きくないと考えられるが、確認が必要。
- 電離層における位相遅れは考慮していない。対流圏と比べ大きくないと考えられるが、確認が必要。

- 2009年10月に現業化されたMANALにおけるGPS可降水量のデータ同化(小司・他, 2009)に伴い算出される天頂遅延量の直接利用の可能性。
- 平成25年度から運用されるLFM(2km解像度, 60層)や新MSM(右図)を利用したダウンスケージング。

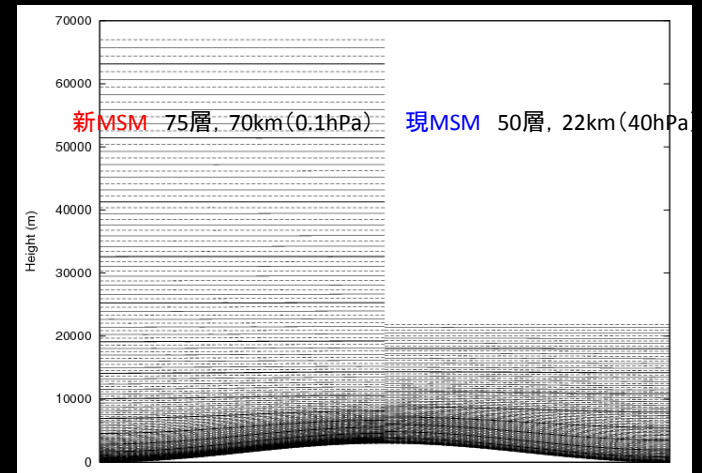
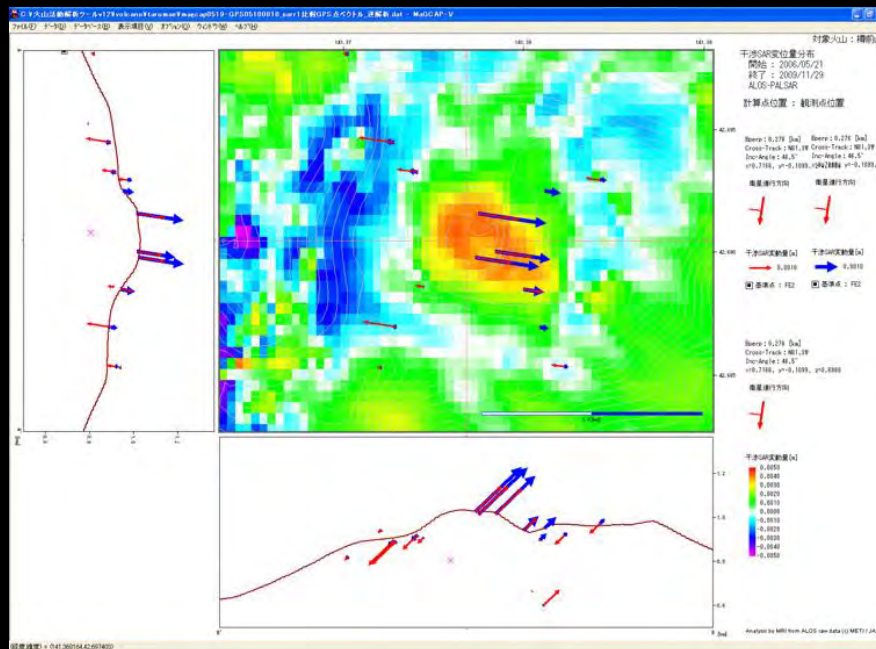
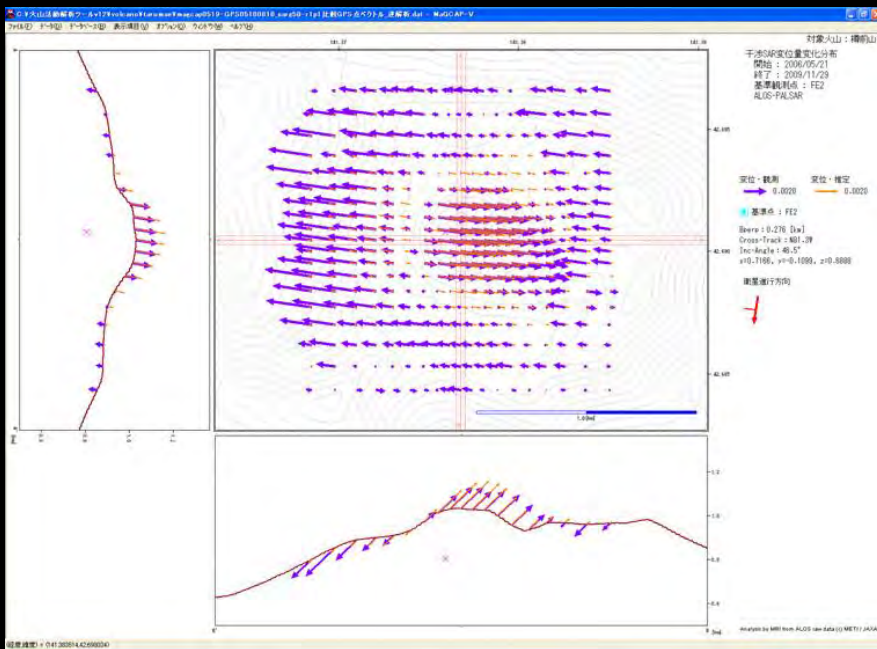


図3.2.4 メソモデルの鉛直レベルの配置(左:新メソモデルの案, 右:現在のメソモデル)。平成23年度数値予報テキスト(2011)より.12





# 汎用ソフトウェアMaGCAP-Vの開発



推定結果の表示例(樽前山)。モデル推定に用いたりサンプリング点における観測値(青矢印)と計算値(赤矢印)が示されている。樽前山北東斜面のGPS観測点からの偏差量をモデル推定に用い、ドーム直下に茂木モデルのソースが求められた(×印)。

干渉SAR変動量分布(カラーマップ)とGPS観測点における変動量(赤矢印)、モデル計算値(青矢印)。樽前山北東斜面のGPS観測点での変動量を0とした時の値で示している。