



SARが切り拓く地球人間圏科学の新展開@京都大学防災研究所 2013/8/22-23

気象庁におけるSARデータを活用した 地震・火山活動の把握と大気補正手法について

Monitoring of Earthquakes and Volcano Activity Using Synthetic Aperture Radar
and Atmospheric Correction Method - Case of JMA -

安藤忍・高木朗充・新堀敏基(気象研究所)

謝辞



- 本解析で用いたPALSARデータの一部は、火山噴火予知連絡会または国土地理院が中心となって進めている防災利用実証実験(それぞれ火山WG、地震WG)に基づいて観測・提供されたものです。
- 一部はPIXELで共有しているものであり、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す。
- また、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す。
- JERS-1/SAR及びPALSARに関する原初データの所有権は経済産業省及びJAXAにあります。
- 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きました。
- アンラップ画像処理については、Ghiglia & Pritt(1998)及び奥山(2010)を使用させていただきました。
- 干渉処理などの過程で国内火山については国土地理院発行の「数値地図50mメッシュ(標高)」を、北方領土と一部離島を含む海外については「SRTM3(90mメッシュ)」をそれぞれ使用しました。
- 地図の作成にはWessel and Smith(1995)によるGMTを使用しました。

関係者各位に御礼申し上げます。



本日の話題提供

1. 気象庁(気象研究所)におけるSARデータの地殻変動ツールとしての利活用の取組
2. SAR干渉画像における大気補正遅延誤差除去の取組
3. 今後の展望について

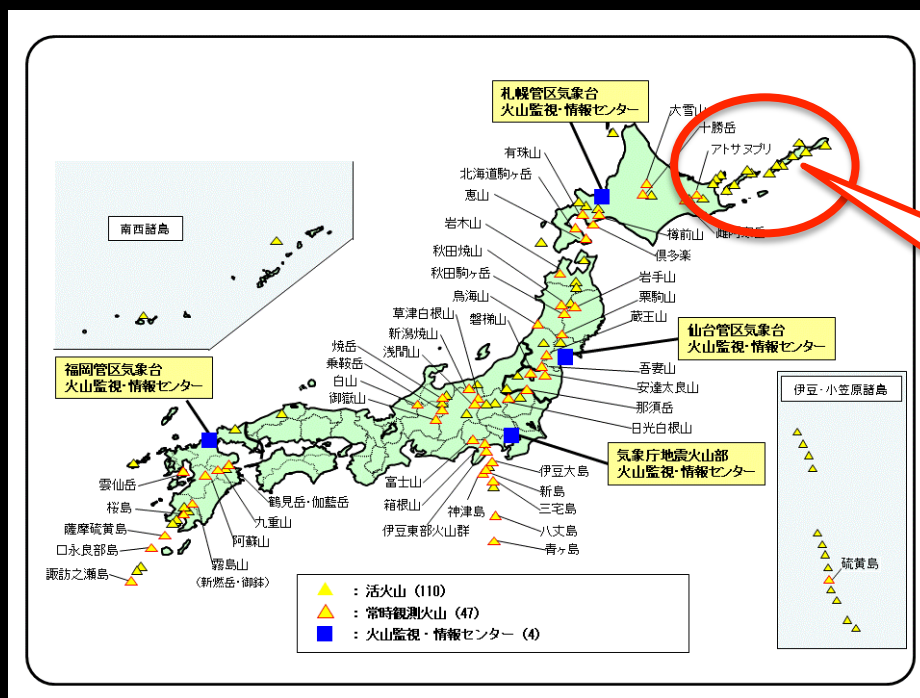
1. 気象庁(気象研究所)におけるSARデータの 地殻変動ツールとしての利活用の取組

火山監視におけるSARの利点と課題

現在(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の柱として位置付け, これに震動観測の成果を
 組み合わせて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



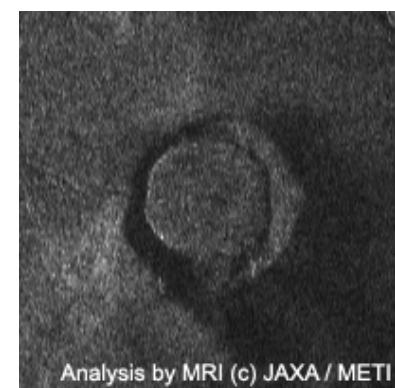
特に、
 観測機器の設置が困難な、
 北方四島の活火山の監視・
 評価の貢献に期待！

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火山で地上観測機器により常時観測
- (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

例えば...

2011年の霧島山新燃岳噴火に関して噴火警戒レベルの更新に利用(→ SARによる観測が唯一の手段)



Analysis by MRI (c) JAXA / METI

2011/2/1 22:59
Shinmoedake crater

気象庁におけるSARデータの利活用の取組1

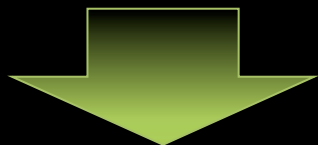
火山噴火予知連絡会・衛星解析G(通称:火山WG)

平成19年度～平成20年度

平成21年度～平成22年度

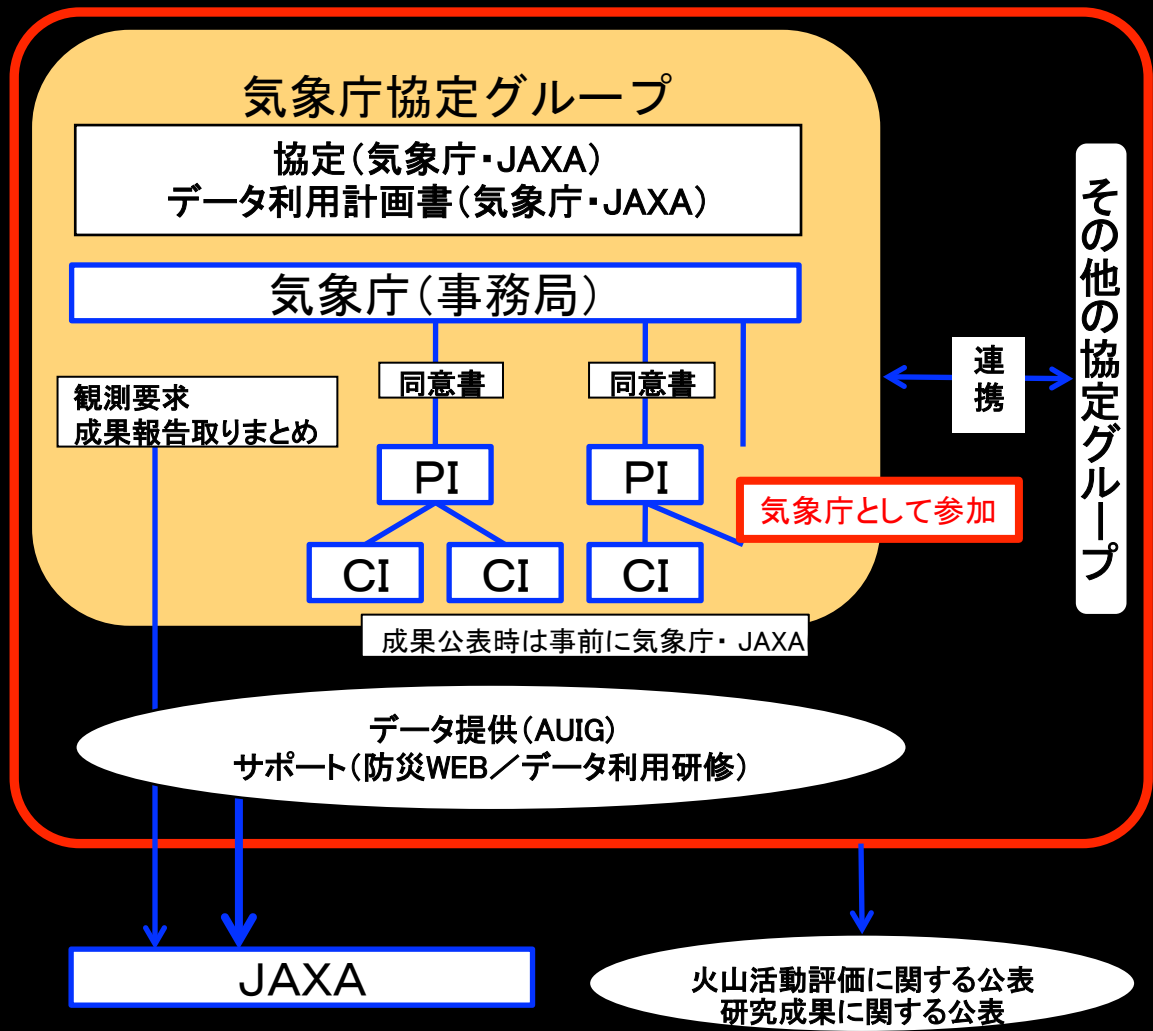
平成23年度～平成25年度

3回のフェーズで
JAXAとの共同研究を継続的に実施



次のような観測項目において取組

- ・ 地殻変動
- ・ 地形・地質
- ・ 火山噴出物
- ・ 噴煙(噴気)
- ・ 変色海域
- ・ 火口湖の色
- ・ 防災対応



JAXA

火山活動評価に関する公表
研究成果に関する公表

気象庁におけるSARデータの利活用の取組2

地震・地盤変動データ流通及び解析WG(通称:地震WG)

平成19年度～平成20年度

平成21年度～平成22年度

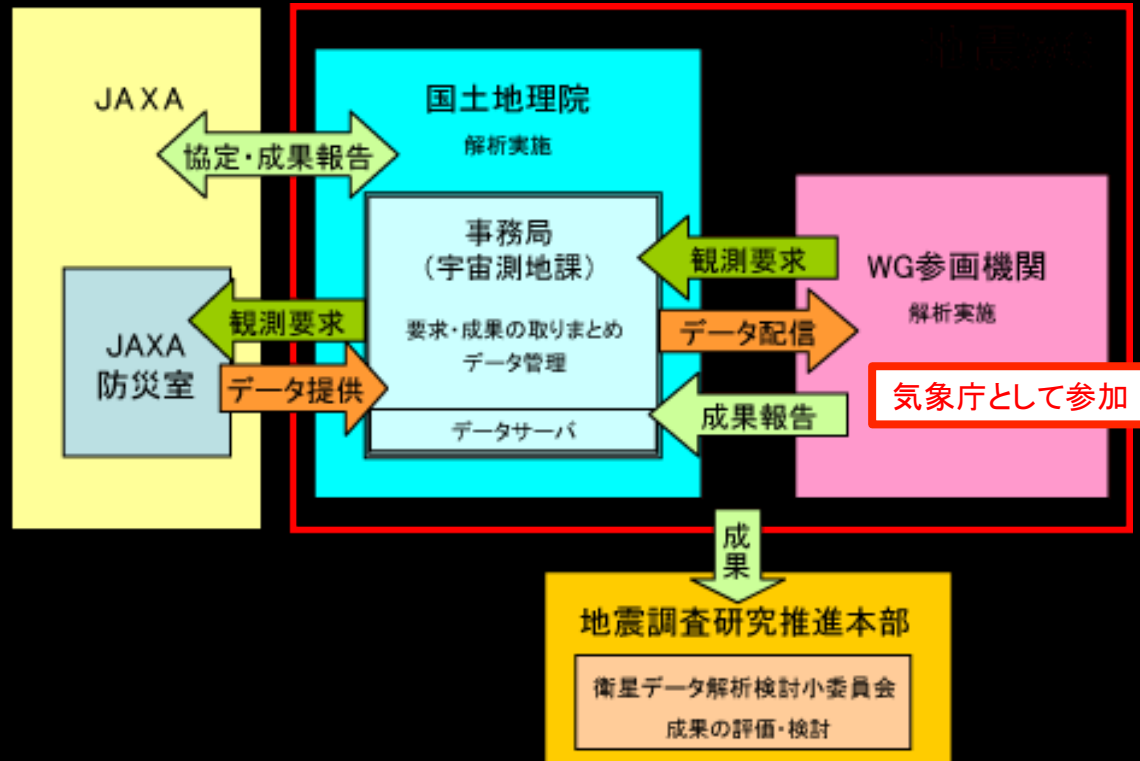
平成23年度～平成25年度

気象庁は平成20年から参加



次のような観測項目において取組

- ・大地震時の地殻変動把握
 - 断層モデルの検証
- ・東海地域の定常的な地殻変動
 - 固着域の把握
 - 長期スロースリップの検出



国土地理院HPより

ALOS「だいち」防災実証実験での取組テーマ

JAXA衛星利用推進センター 防災利用システム室



火山WG

- 対象：
 - 国内全国の活火山
- 目的：
 - 地殻変動の検出
- 概要：
 - 定常的火山観測が行われていない火山の活動評価を行う。光学センサによる解析も合わせて行う。

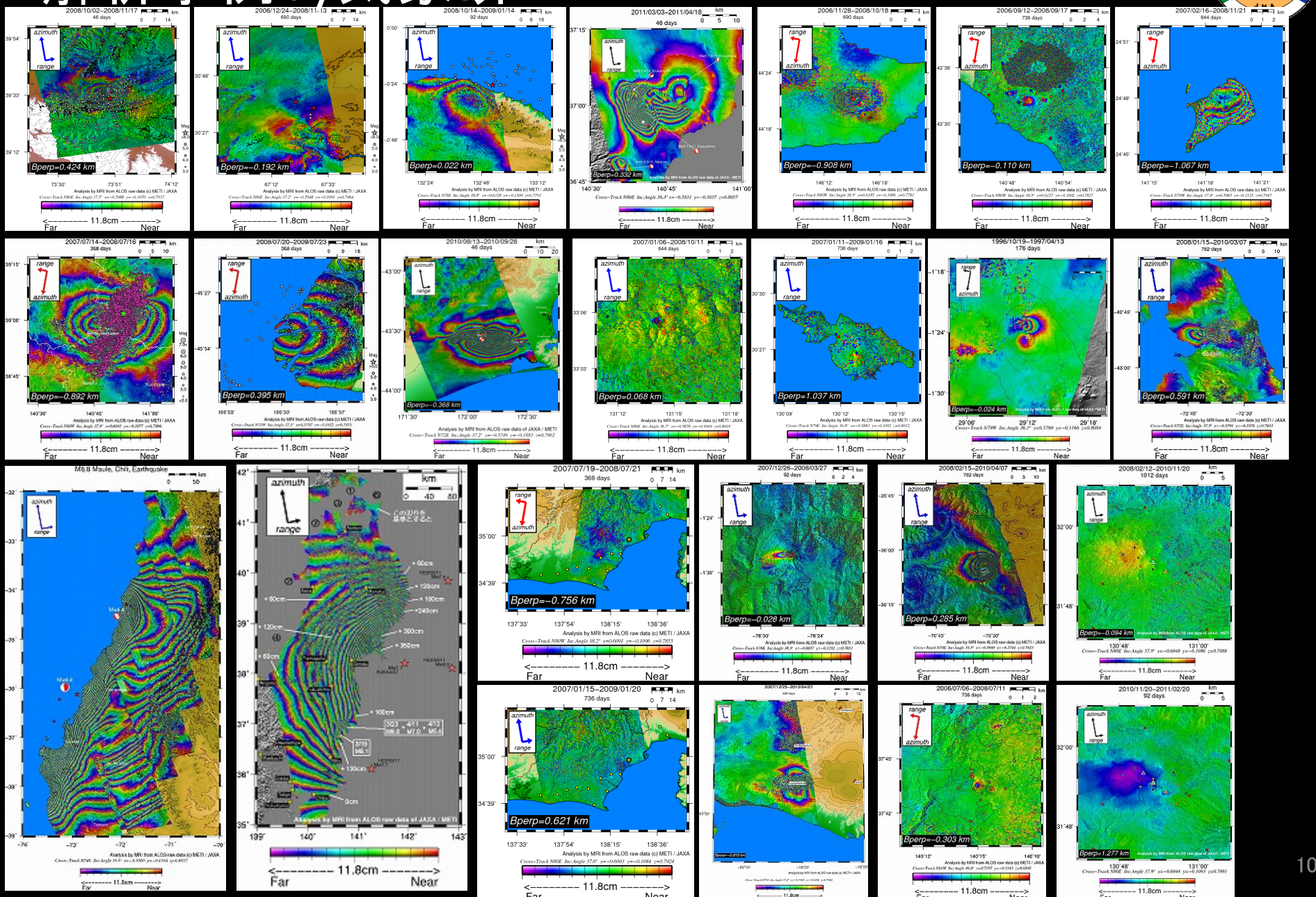
原則、火山(国内)が対象

地震WG

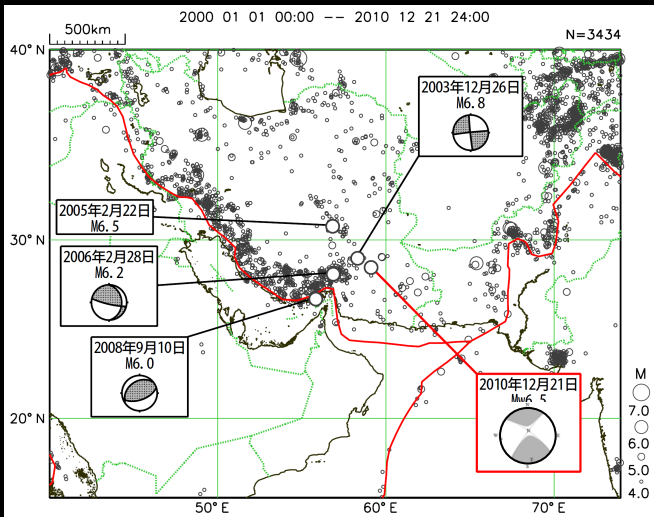
- 大地震時の地殻変動把握：
 - 断層モデルの検証
- 東海地域の定常的な地殻変動面的把握：
 - 固着域の把握、長期スロースリップの検出

原則、地震(どこでも)が対象

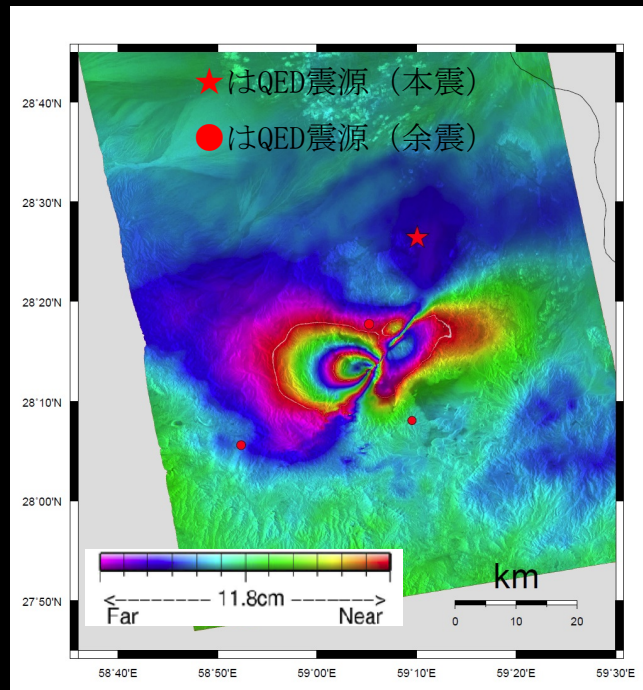
解析事例by気象研



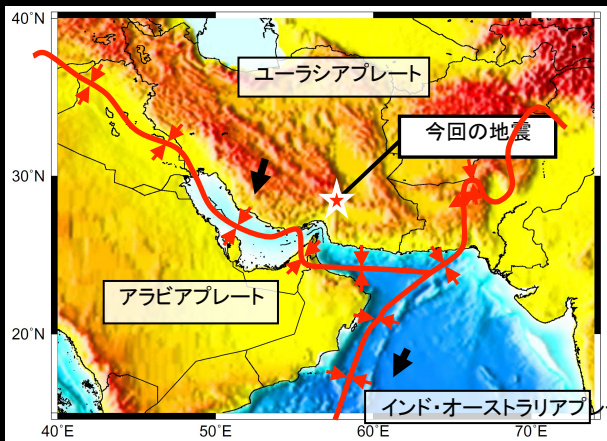
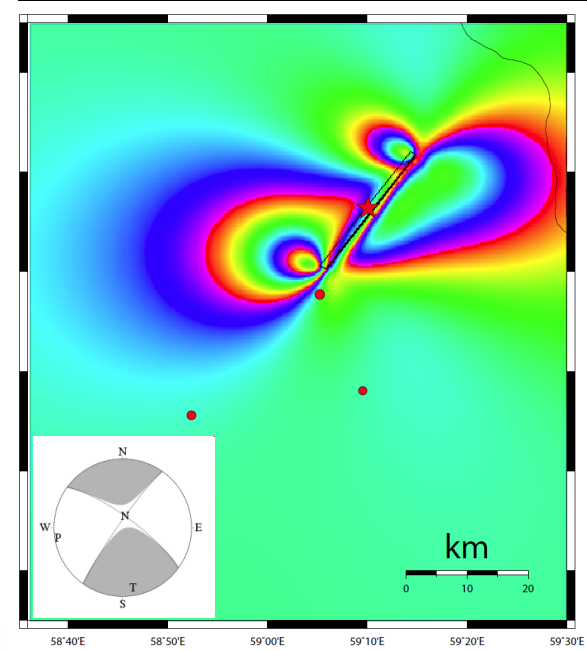
2010年12月21日 イラン南部の地震 (Mw6.5)



SAR干渉画像



CMT解の走向・傾斜・すべり角からの理論値



- ・ SAR干渉解析結果から、断層面が判明
- ・ USGSの震央位置は北に約20kmずれている

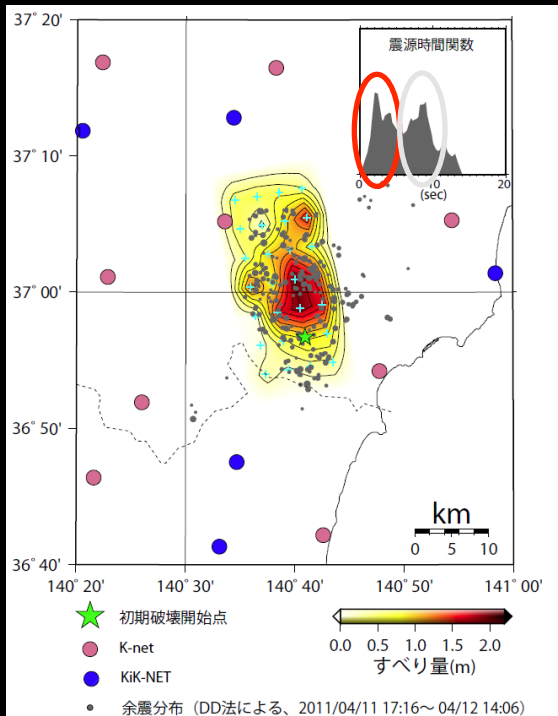
余震が少ないため、地震発生当初、周辺の地震活動と地形から、2つの節面のうち、北西—南東走向の節面が断層面だと思っていた・・・

岩切ほか(2012)より

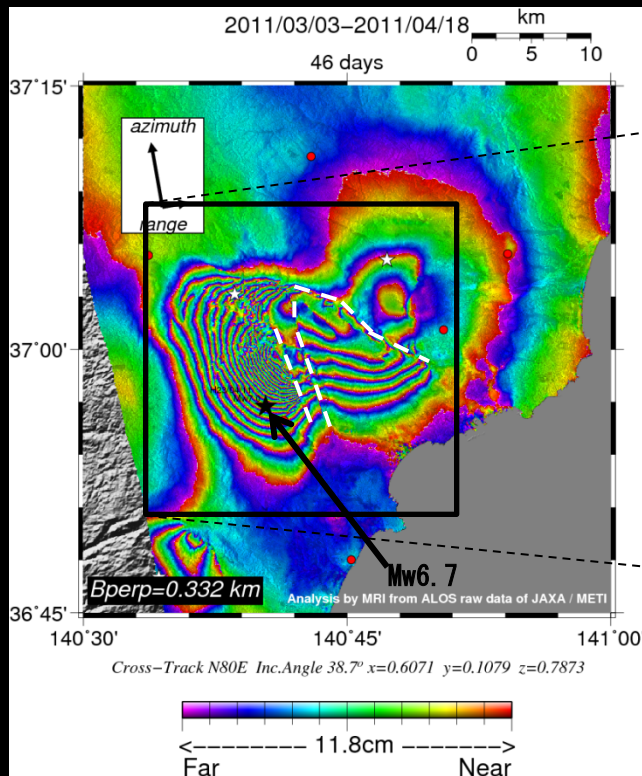
2011年4月11日 福島県浜通りの地震(Mw6.7)

近地強震波形による震源過程解析結果
1つの断層面を設定

地図上に投影したすべり量分布

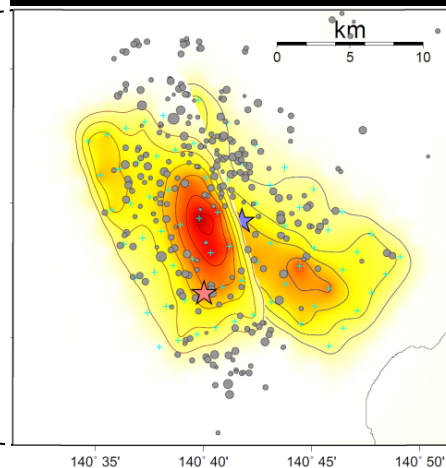


SAR干渉画像

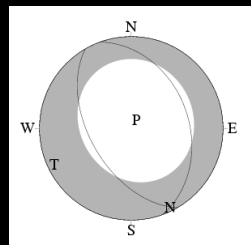
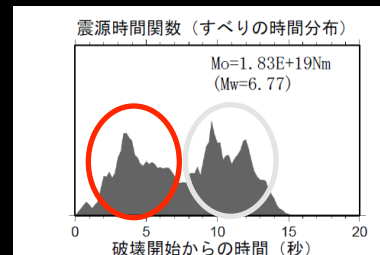


近地強震波形による震源過程解析結果
2つの断層面を設定

地図上に投影したすべり量分布



★ は破壊開始点を、★ は2枚目の断層の破壊が始まった点を示す。● はDD法で再決定された余震(この地震発生から24時間以内に発生したM2.0以上のもの)の震央を示す。



CMT解

ノダブルカップル成分が大きい
→複数の断層面か

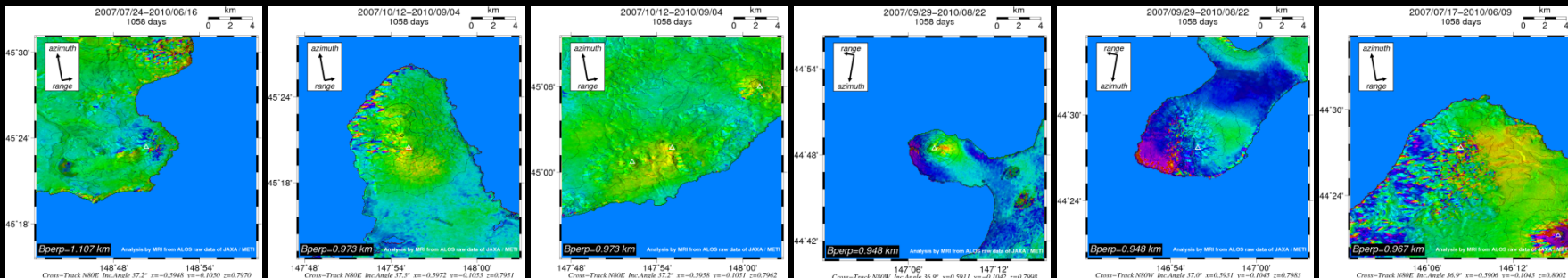
★: 2011. 4. 11 (Mw6.7) の震央
☆: 2011. 3. 23 (Mw5.7) 及び 4. 12 (Mw5.9) の震央
●: GPS観測点
白点線: 位相不連続

- 3月23日07:12浜通り (Mw5.7, Mj6.0)
- 3月23日07:34浜通り (Mw5.4, Mj5.5)
- 4月11日17:16浜通り (Mw6.7, Mj7.0)
- 4月11日20:42浜通り (Mw5.4, Mj5.9)
- 4月12日14:07中通り (Mw5.9, Mj6.4)

岩切ほか(2012)より

近地強震波形による震源過程解析では、地震発生直後では1つの断層モデルを設定したが、その後得られたSAR干渉画像を参考に2つの断層面を設定して、再解析を行った。

北方四島や霧島山新燃岳の解析



茂世路岳

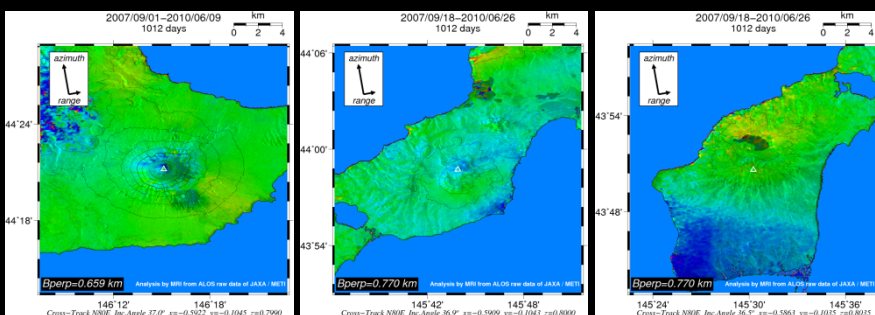
散布山

指臼岳・小田萌山・択捉焼山

択捉阿登佐岳

ベルタルペ山

ルルイ岳

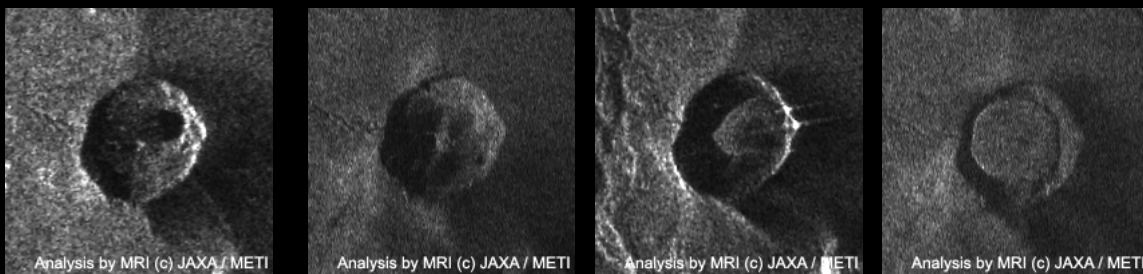


爺爺岳

羅臼岳

泊山

観測機器の設置が不備の場合でも、衛星モニタリングによる火山活動の把握が可能。



2010.11.20

2011.1.27

2011.1.29

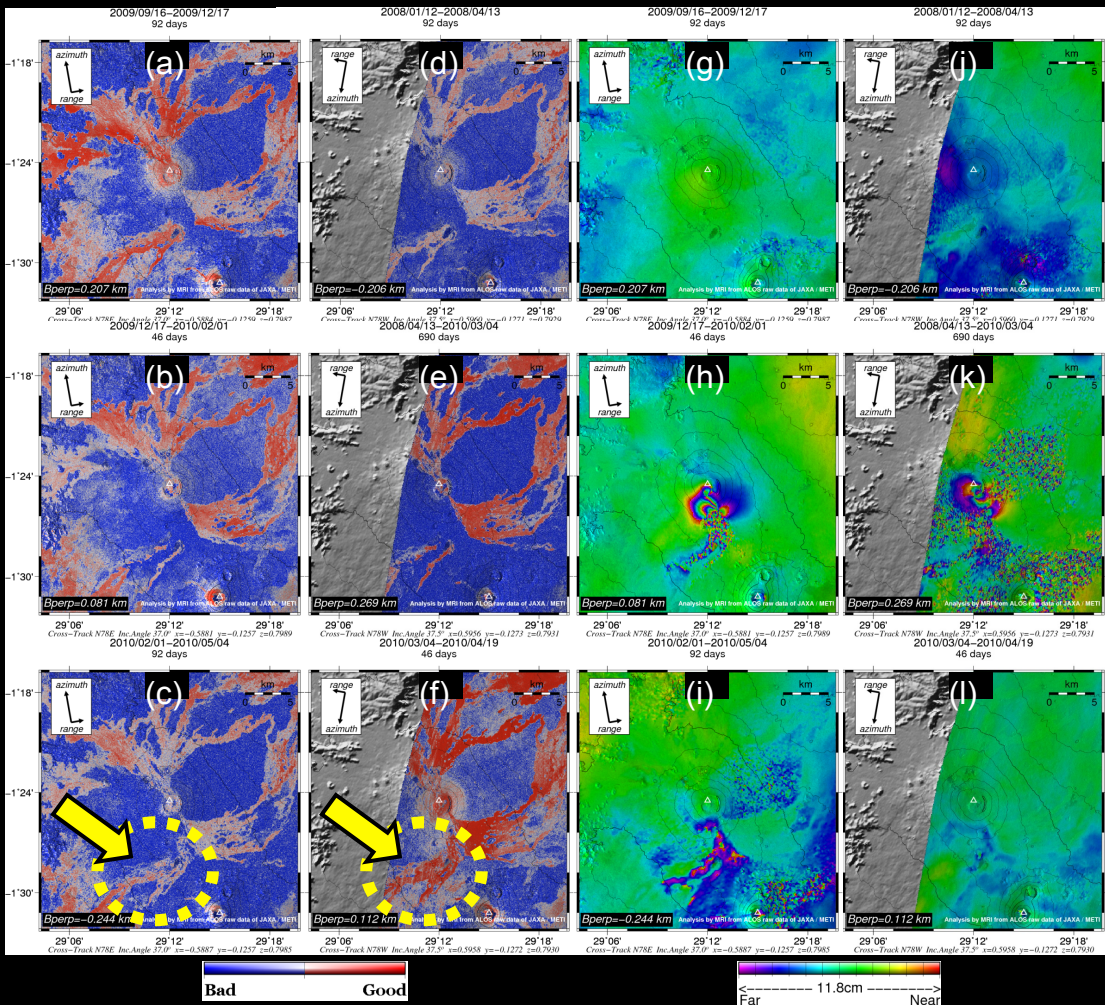
2011.2.1

溶岩の蓄積過程を検知した。

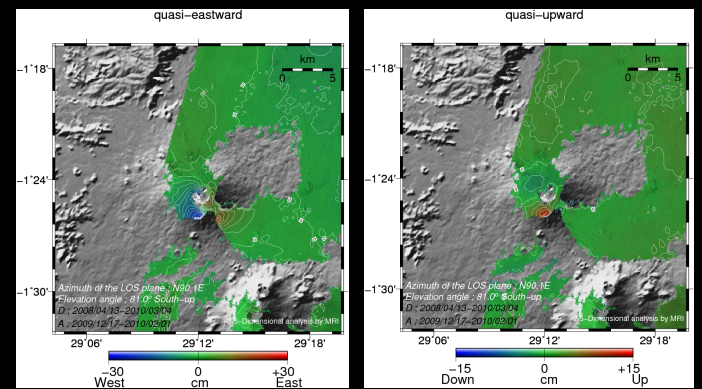
悪天候や夜間における撮影も、
LバンドSAR
の場合は、雲を透過しての観測が可能。
→火山噴火警戒レベルの引き上げに貢献。

安藤ほか(2011)

Nyamuragira火山(2010.1の噴火)



衛星観測は世界中観測可能であるため、海外の火山噴火においても、地殻変動の検出が可能。さらに相関画像を使い、噴火に伴う溶岩流出痕の検出も可能。さらに、両軌道からのデータがあれば、2.5次元解析も可能。



2.5 dimensional displacement images.

(a)-(f): Coherence images and (g)-(l): SAR Interferometry.
(Uppers: Before eruption, Middles: Before and After eruption,
Lowers: After eruption).

安藤ほか(2011)

SARの活用における課題と展望

課題

(1) 連続観測は不可

(現状) 回帰日数46日 (ALOS) (次期) 14日?

(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) 解析処理に時間とテクニックが必要 (自動処理は可能か)

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) 精度向上への取組 (PS-InSAR, ポラリメトリ解析技術等)

気象研究所における取組

以前：火山WGに気象研として参加

現在：火山WG、地震WGに気象庁として参加



テーマは重点研究に絡めて、大きく2つ！

監視技術の向上の観点

大気伝搬遅延による
ノイズ除去手法の取組

(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)

対流圏遅延
研究班で貢献を！

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組

(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)

自然現象
研究班で貢献を！

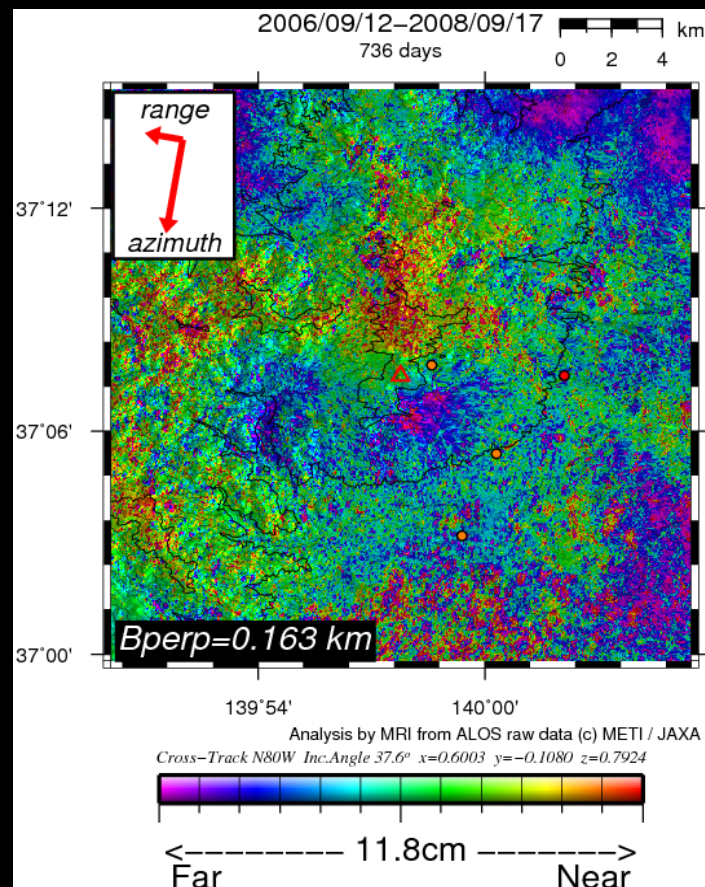
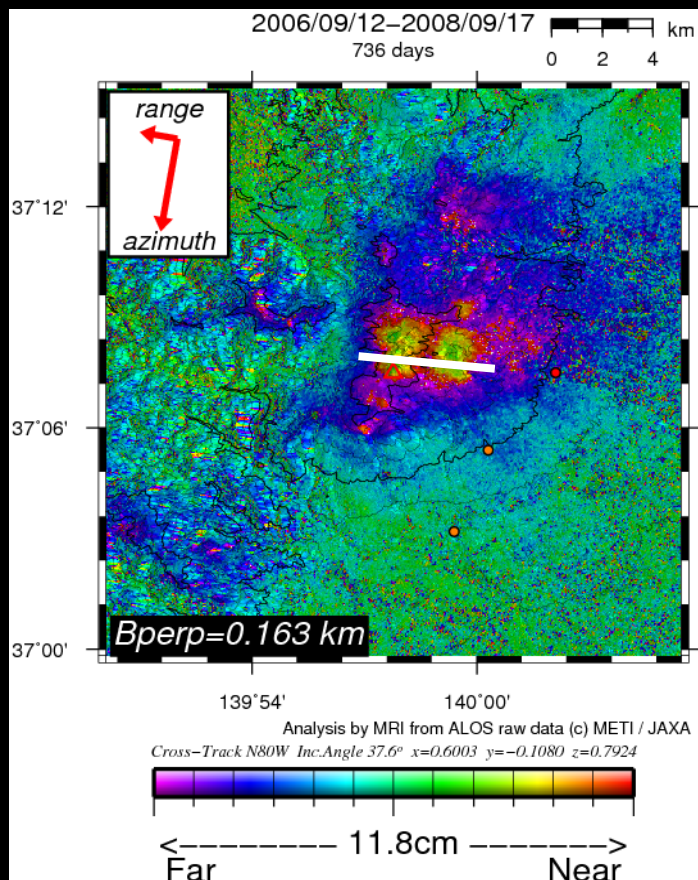
2. SAR干渉画像における大気補正遅延誤差除去の取組

干渉SAR解析における 対流圏及び電離圏補正関連の報告(抜粋)

- InSARデータに基づく2008年9月西濃豪雨時の三次元水蒸気分布の推定(木下ほか, 2012JPGU)
- 九州中央部の差分干渉SAR解析での標高に相関をもつ位相残差(大村ほか, 2011JPGU)
- 衛星搭載合成開口レーダ観測に与える伝搬性電離圏擾乱の影響(齊藤ほか, 2011JPGU)
- 稠密GPSデータを用いたALOS/PALSAR干渉画像の電離層遅延補正(竹村ほか, 2011JPGU)
- InSARによる経年的な微小変動検出のための電離層ノイズ除去の試み(福島, 2011JPGU)
- InSARで捉えた集中豪雨その2: Azimuth offsetデータに基づく電離層モデルの推定(木下ほか, 2011JPGU)
- 気象庁非静力学モデルによる大気遅延量の推定とSAR干渉解析への応用(新堀ほか, 2011JPGU)
- 数値気象モデルを用いたSAR干渉解析における大気遅延誤差の軽減(小澤ほか, 2010測地学会誌, 56, 137-147.)
- 高分解能数値気象モデルと高速波線追跡ツールKARATを用いたInSARにおける大気伝搬遅延の補正についてその2(木下ほか, 2010JPGU)
- 数値気象モデルを用いたSAR干渉解析における大気中水蒸気起因の位相遅延量誤差の低減の試み(小林ほか, 2010JPGU)
- 数値気象モデルを用いたSAR干渉解析における大気遅延誤差軽減の試み(小澤ほか, 2009JPGU)
- 数値気象モデルを用いたSAR干渉画像における大気位相遅延の評価について(矢来ほか, 2009JPGU)
- Mitigating atmospheric noise for InSAR using a high resolution weather model (J.Foster et al., 2006, GRL, 33, p.L16304 10.1029/2006GL026781.)
- 干渉SAR画像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(藤原ほか, 1999測地学会誌, 45, 315-325.)
- 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—(島田, 1999測地学会誌, 45, 327-346.)

大気伝搬遅延誤差

例えば、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)を適用した一例。



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場所はあるが、概ね除去できている。

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)

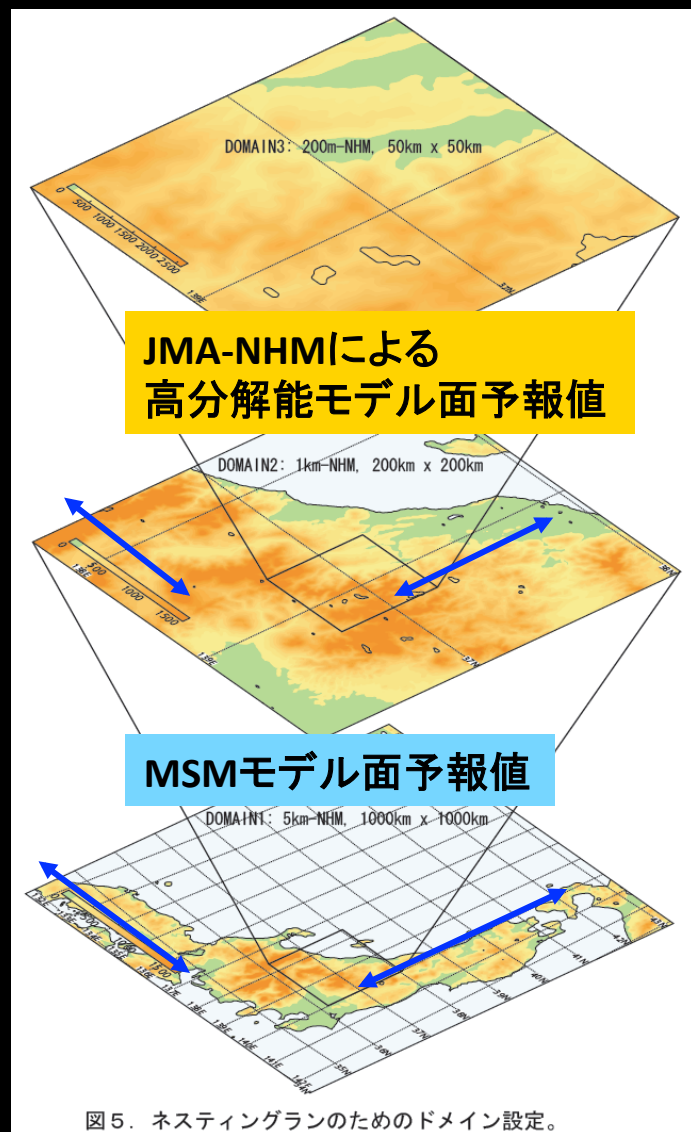
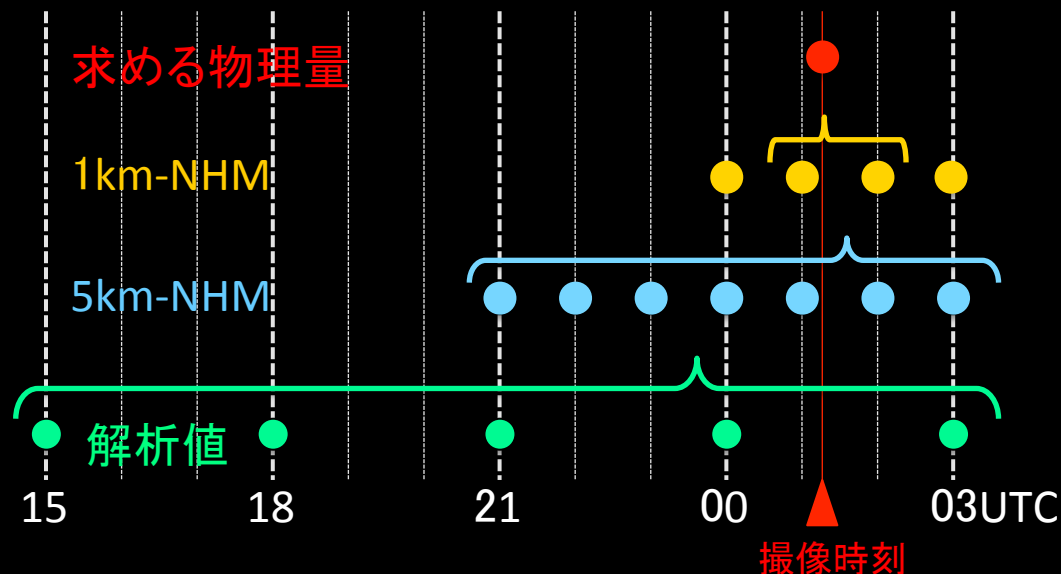


図5. ネスティングランのためのドメイン設定。

精緻な計算には、十分な助走時間と助走距離が必要

大気遅延の推定

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：

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

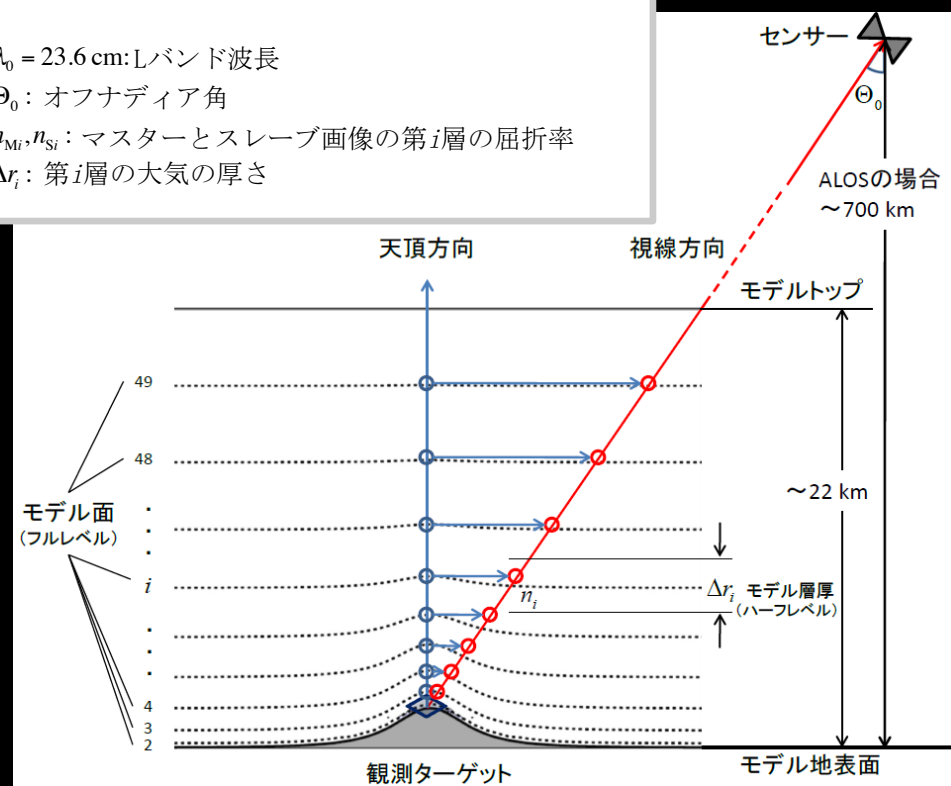
- $\lambda_0 = 23.6 \text{ cm}$: Lバンド波長
- Θ_0 : オフナディア角
- n_{Mi}, n_{Si} : マスターとスレーブ画像の第 i 層の屈折率
- Δr_i : 第 i 層の大気の厚さ

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

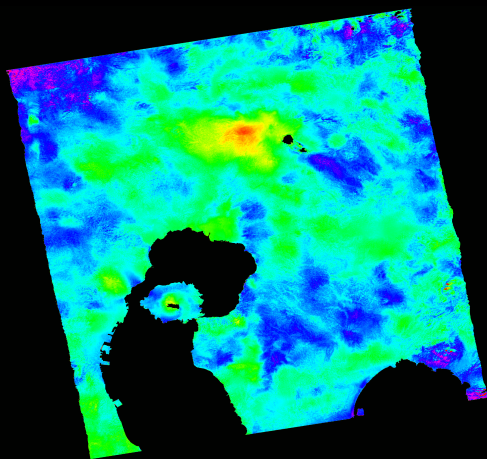
撮像日

●マスター画像(M): 2011/02/20 13:44UTC

●スレーブ画像(S): 2010/11/20 13:46UTC

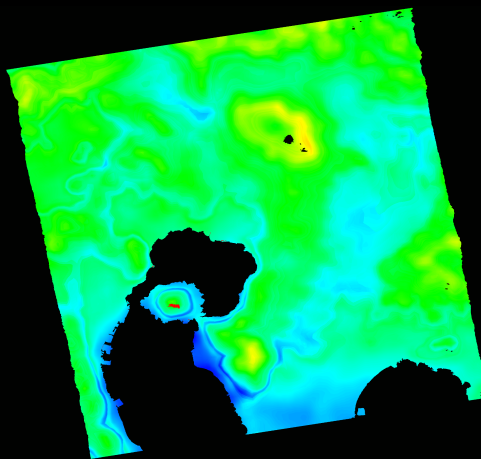


SAR干渉画像
(補正前)



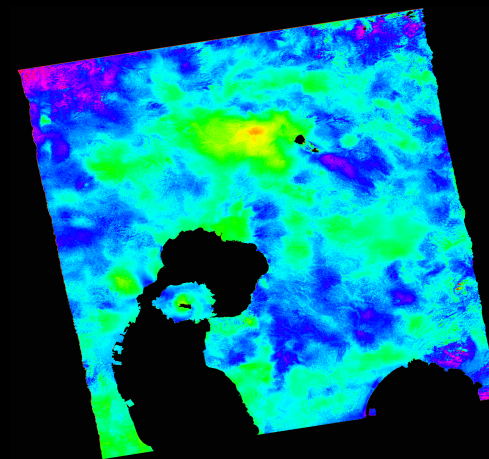
-0.5~+0.5(1サイクル)
で表示

JMA-NHMで推定した
大気遅延量の差



-0.1~+0.1(1/5サイクルに強調)
で表示

SAR干渉画像
(補正後)



-0.5~+0.5(1サイクル)
で表示

- 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ツールズとの比較検討が必要

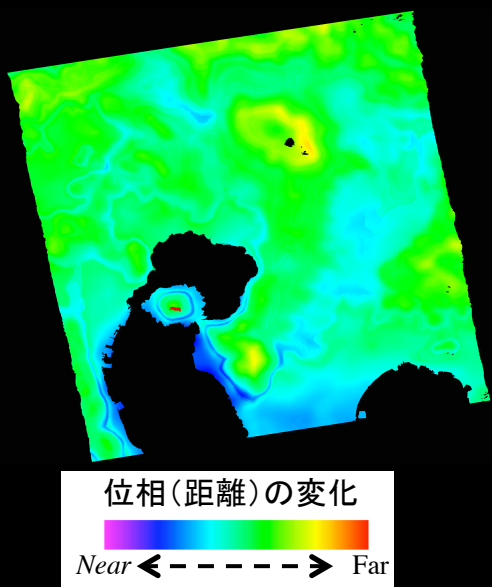
位相(距離)の変化



+ π 0 - π
 - $\lambda_0/4$ 0 $\lambda_0/4$
 Near ← ----- → Far

色使いが、通常と反転している所以要注意！1サイクル=2 π

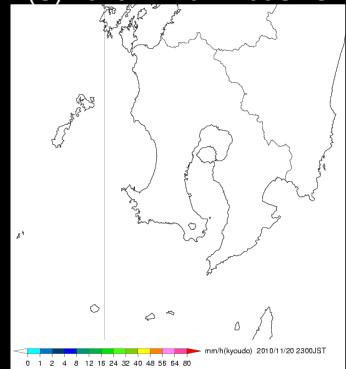
大気補正量分布の確認



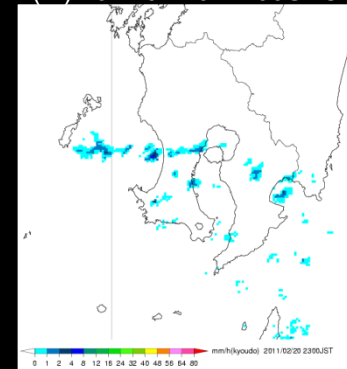
- レーダー実況によるとスレーブ画像に比べて、マスター画像の撮像日の方が湿潤な大気構造が認められる。
- ダウンスケーリングしたJMA-NHMによる視線方向の水蒸気は、マスター画像の撮像日の方がより上層まで分布している。

気象レーダーによる降水実況

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

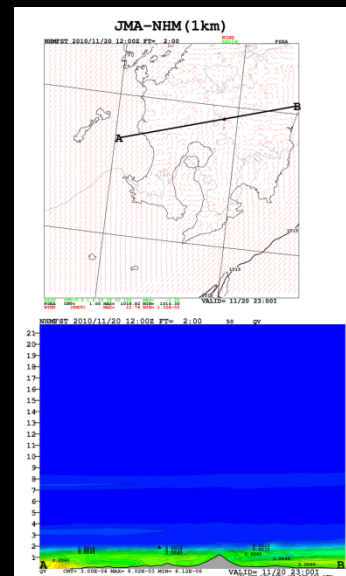


(M) 2011/02/20 14:00UTC

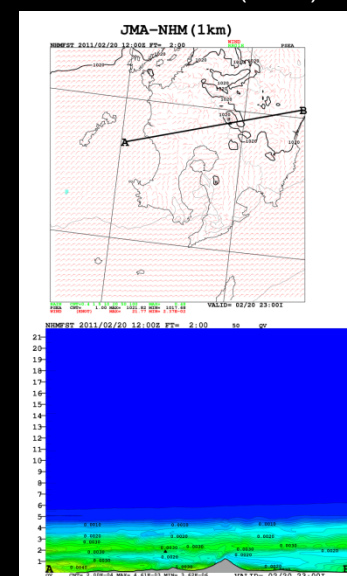


JMA-NHMによる高分解能予報値

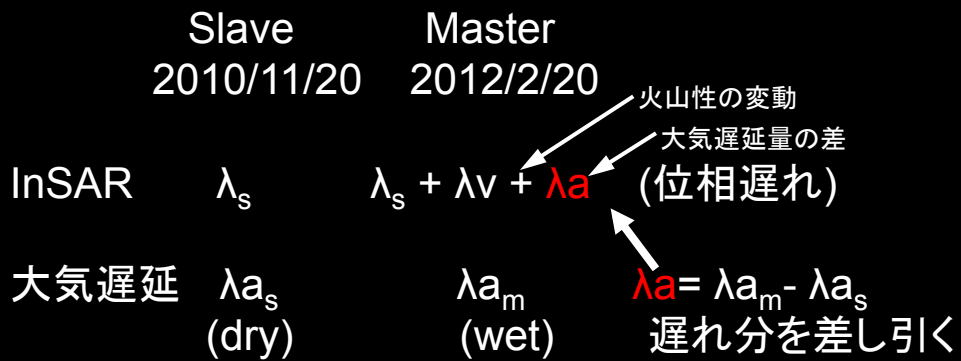
(S) INIT: 2010/11/20 12UTC
VALID: 14UTC (FT=2)



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

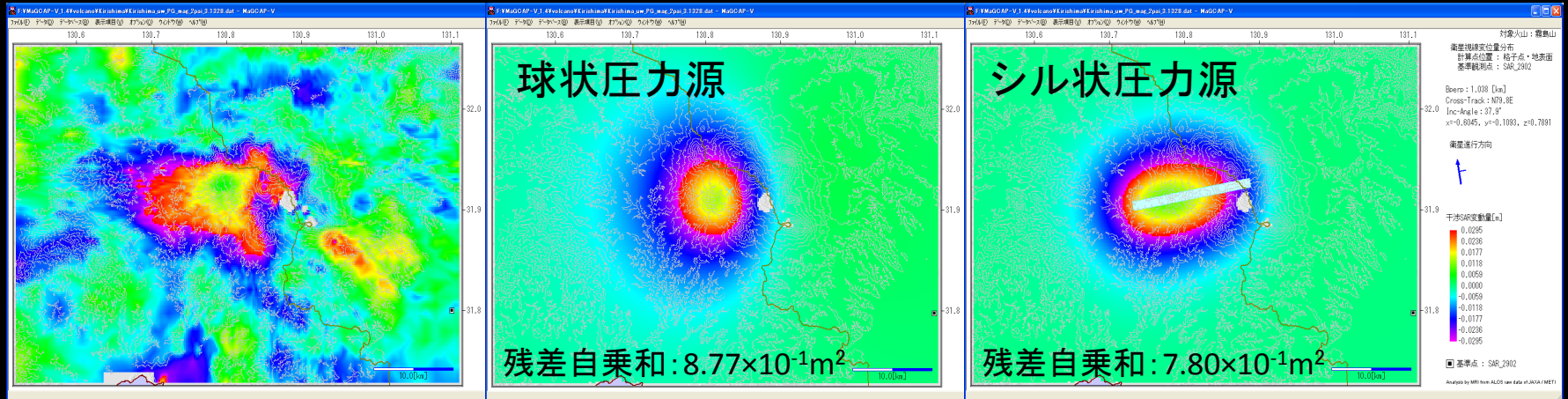


【位相遅れの考え方】



(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

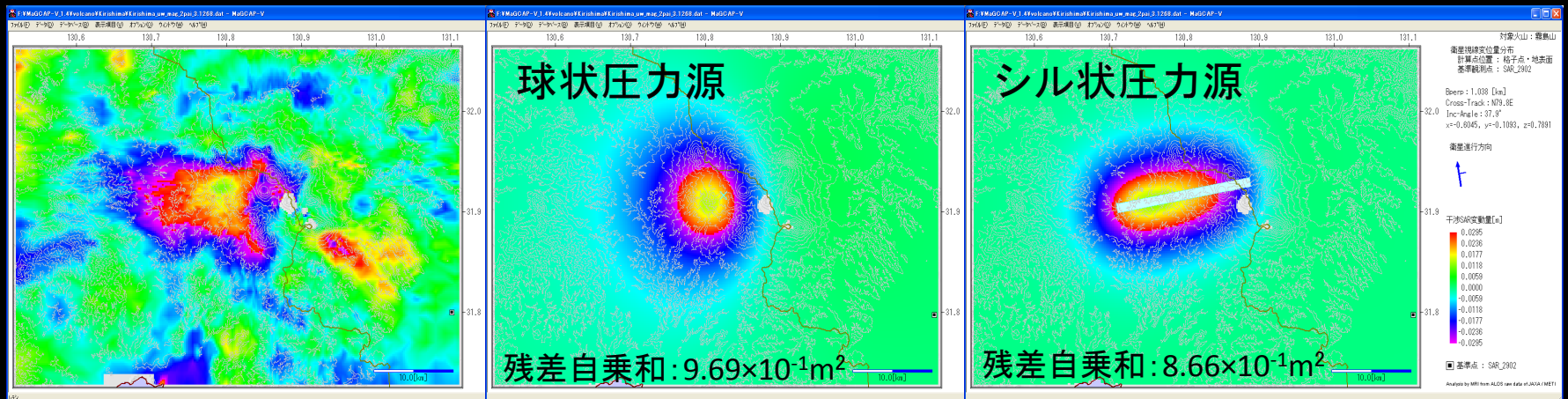
MaGCAP-Vを使った圧力源推定への影響



補正前

深さ6.0km、 $1.04 \times 10^7 \text{m}^3$

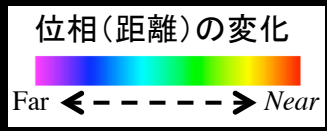
深さ7km、 $15 \text{km} \times 1 \text{km}$ 、 $1.20 \times 10^7 \text{m}^3$



補正後

深さ5.5km、 $0.85 \times 10^7 \text{m}^3$

深さ6km、 $17 \text{km} \times 1 \text{km}$ 、 $1.02 \times 10^7 \text{m}^3$



深さ: 10%程度浅くなった。体積変化量: 20%程度過大評価していた。

高木ほか(2013)



3. 今後の課題と展望

大気遅延量補正の課題と展望

- 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。 →新MSMモデルによる計算
- 電離層における位相遅れは考慮していない。 →電離圏検討班との連携

- 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リング。
- 撮像時刻におけるMANALを直接計算し補正手法に適用。
- 地殻変動と可降水量の同時推定によるSAR気象学の実現。

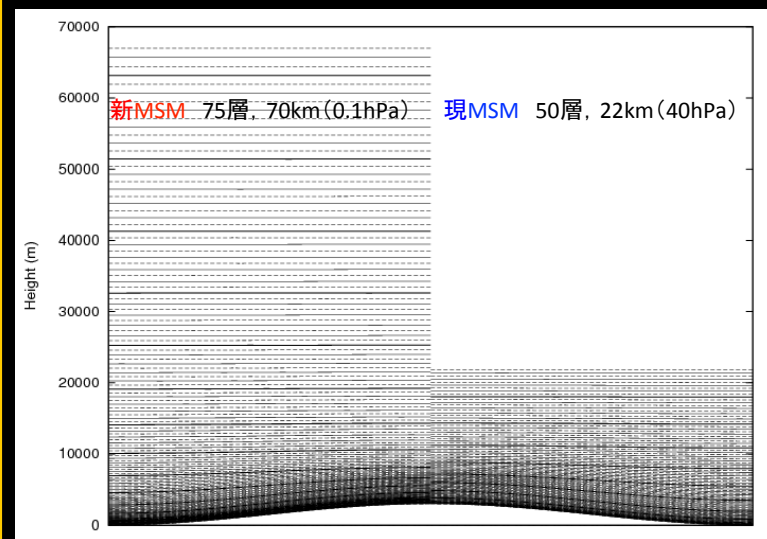


図3.2.4 メソモデルの鉛直レベルの配置(左:新メソモデルの案、右:現在のメソモデル)。平成23年度数値予報テキスト(2011)より。