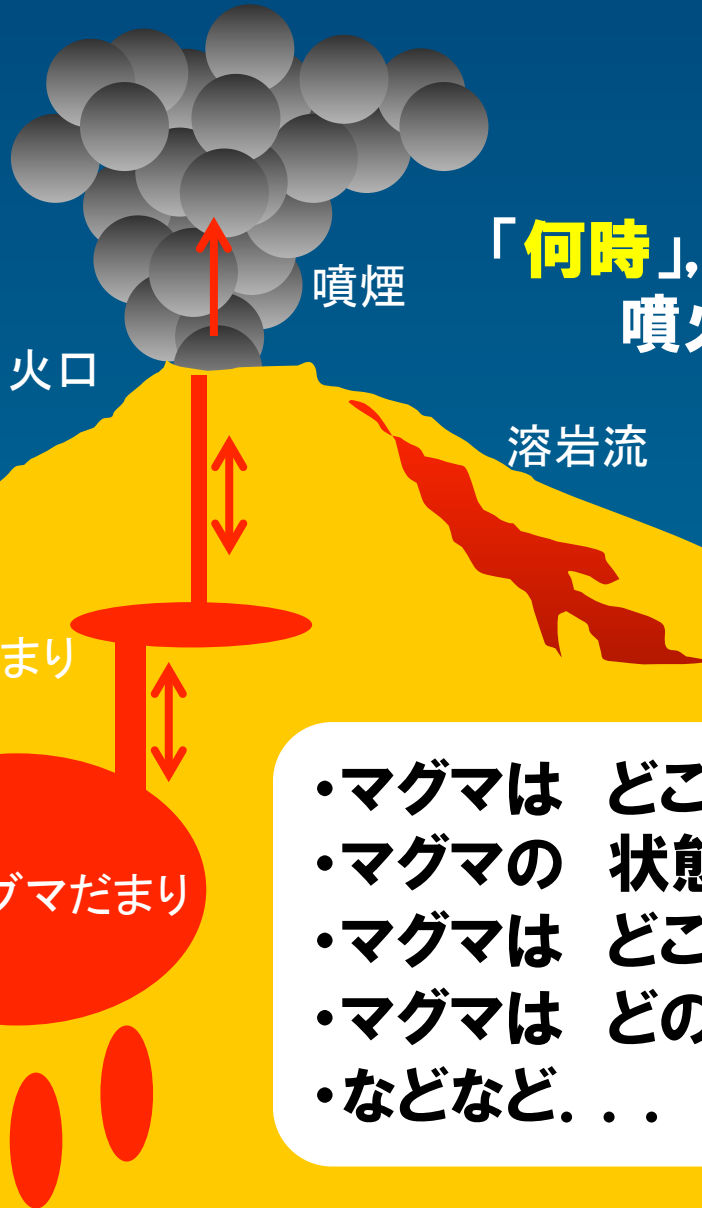




火山活動メカニズムの研究 におけるSARへの期待

小澤拓(防災科研)

火山活動メカニズムの研究



「何時」、「何処で」、「どのような」
噴火が起こるのか？を知りたい。

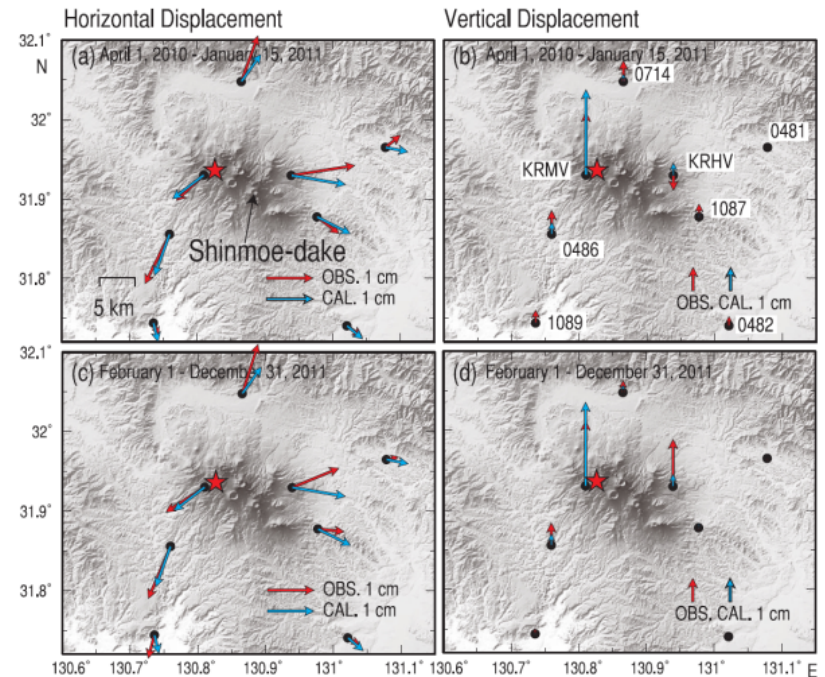
- ・マグマは どこに どれくらい 存在する？
- ・マグマの 状態(性質, 圧力など) は？
- ・マグマは どこで どれくらい 移動した？
- ・マグマは どの程度 噴出した？
- ・などなど...

火山性地殻変動

桜島の噴火前兆的变化

(京大防災研,
火山噴火予知連絡会資料, 2012)

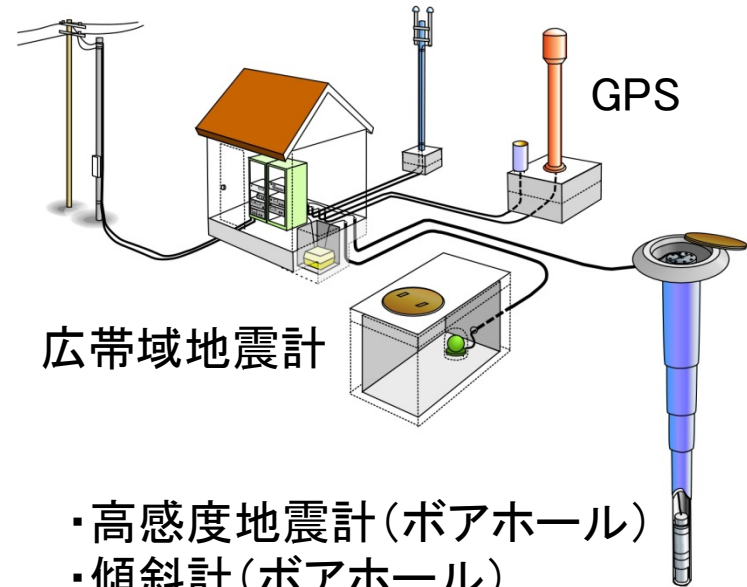
霧島山の膨張(Ueda *et al.*, 2013)



- 噴火発生前・中・後に地殻変動が観測される事例がある。
- 観測された地殻変動から、マグマの動きを推定する。
- より深い理解のためには、より高密度な地殻変動情報がほしい。

火山観測網の強化

防災科研火山基盤観測網 (V-net) 整備



- もっと高密度な地殻変動情報がほしい。
- 遠隔地 (海外) の火山も見たい。
- などなど...

➡ SARの利用

SARを用いた火山研究(黎明期)

エトナ山の地殻変動 (Massonnet *et al.*, 1995)



伊豆半島東部の膨張(国土地理院, 1996)

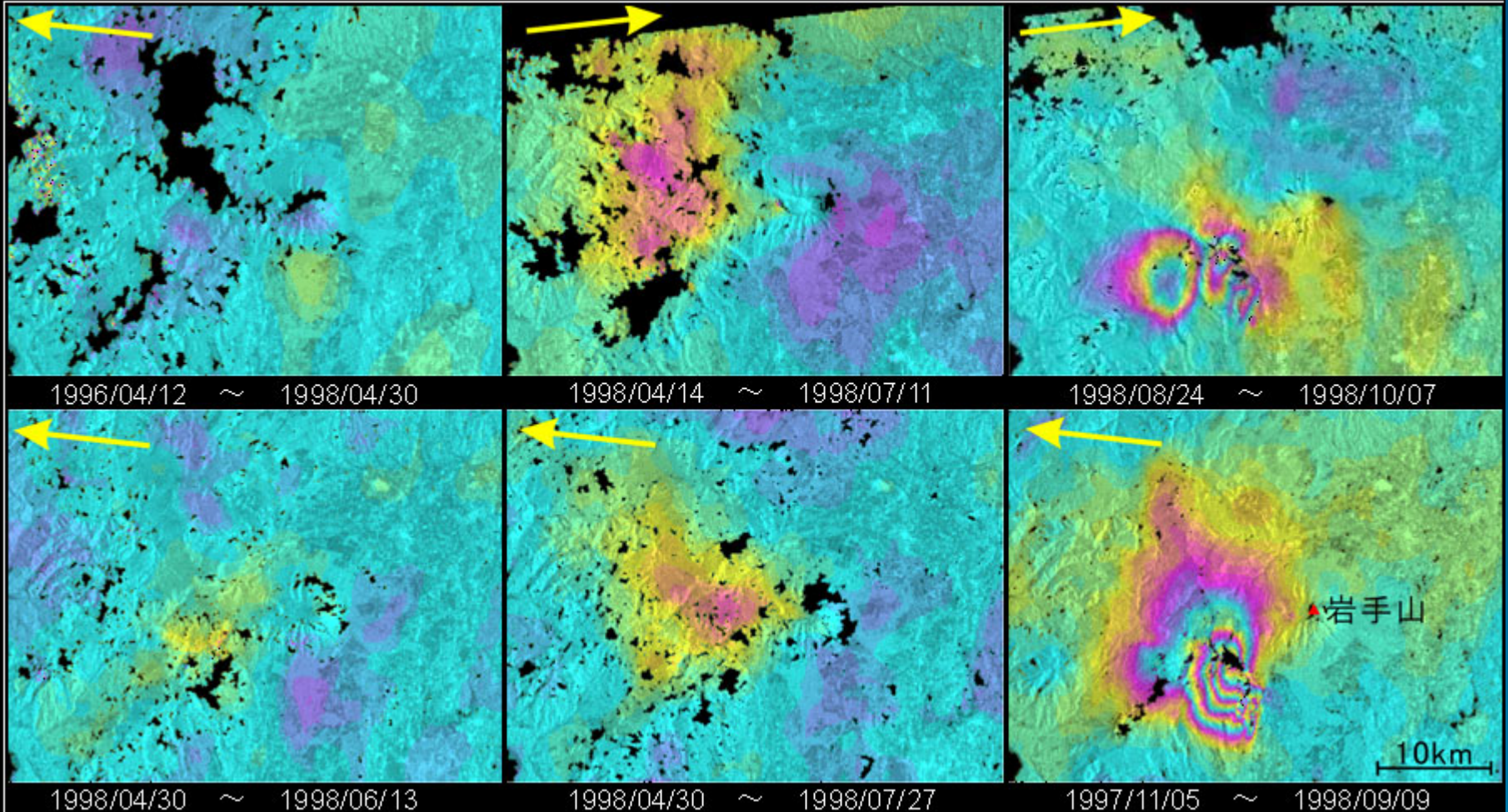


1998年岩手山噴火未遂の事例

JERS-1/InSAR解析結果

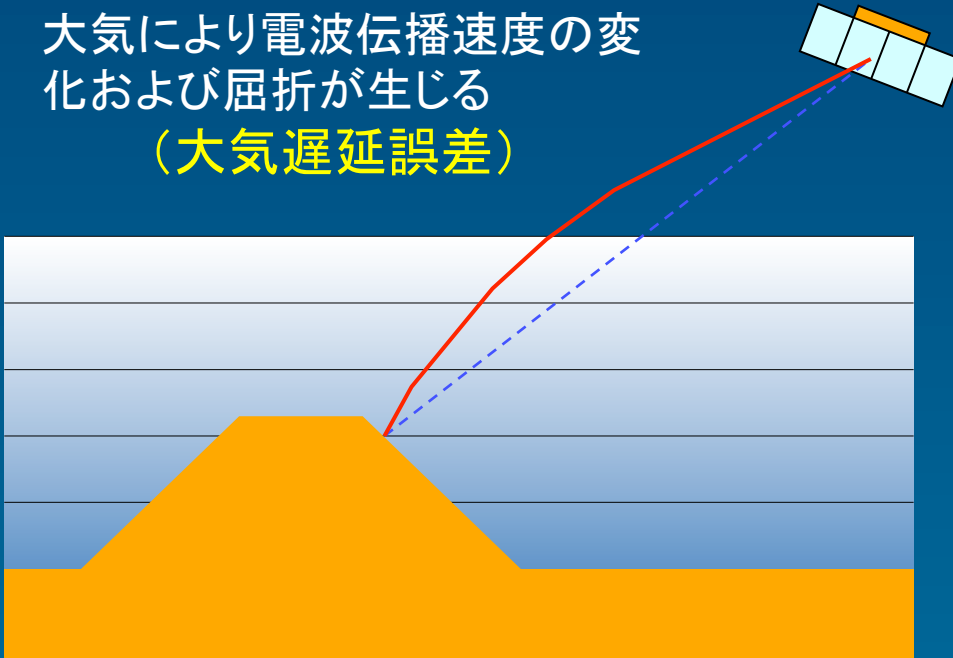
岩手県内陸北部の地震

1998年9月3日 M6.1



大気遅延の問題

大気により電波伝播速度の変化および屈折が生じる
(大気遅延誤差)



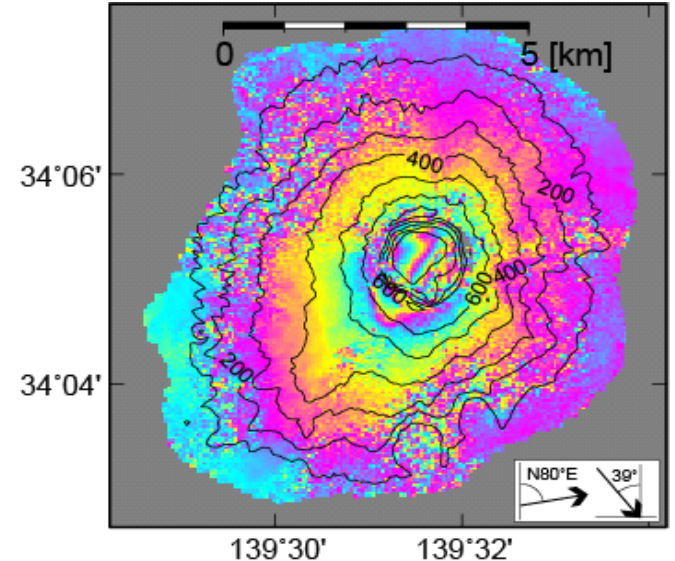
大気遅延誤差
地形に相関する成分が大きい

火山性地殻変動
地形に相関する場合は多々ある

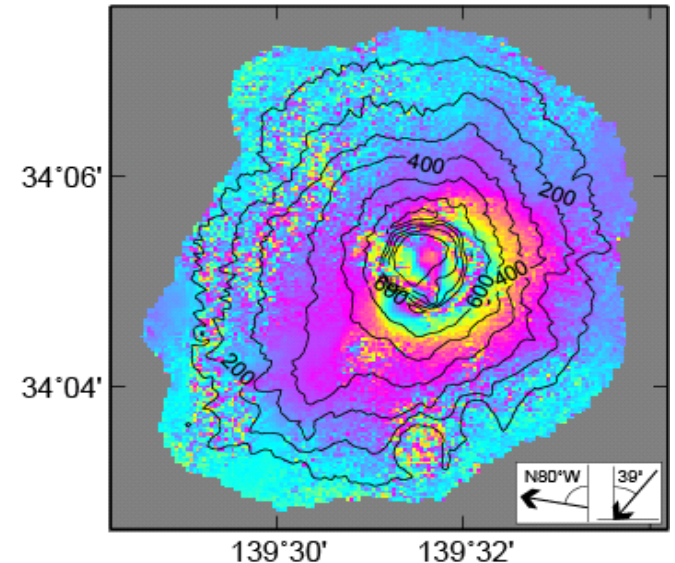
⇒ 本物？

三宅島のPALSAR干渉画像

アセンディング, 2.4yr



ダイセーディング, 2.3yr



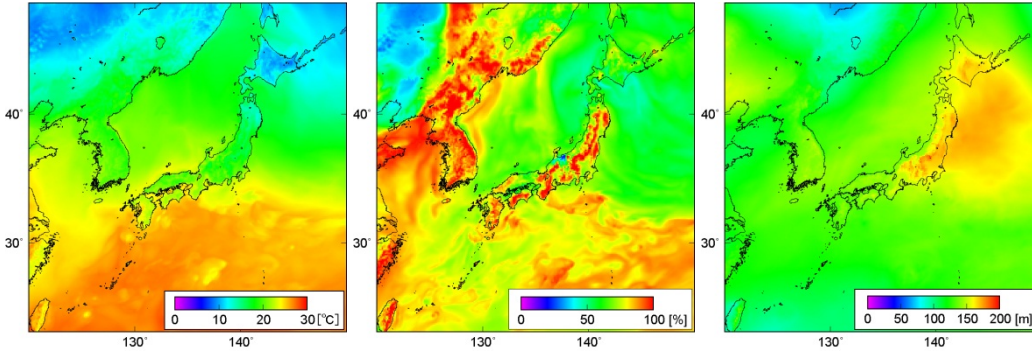
数値気象モデルに基づく大気遅延推定

気象庁メソスケールモデル(MSM)

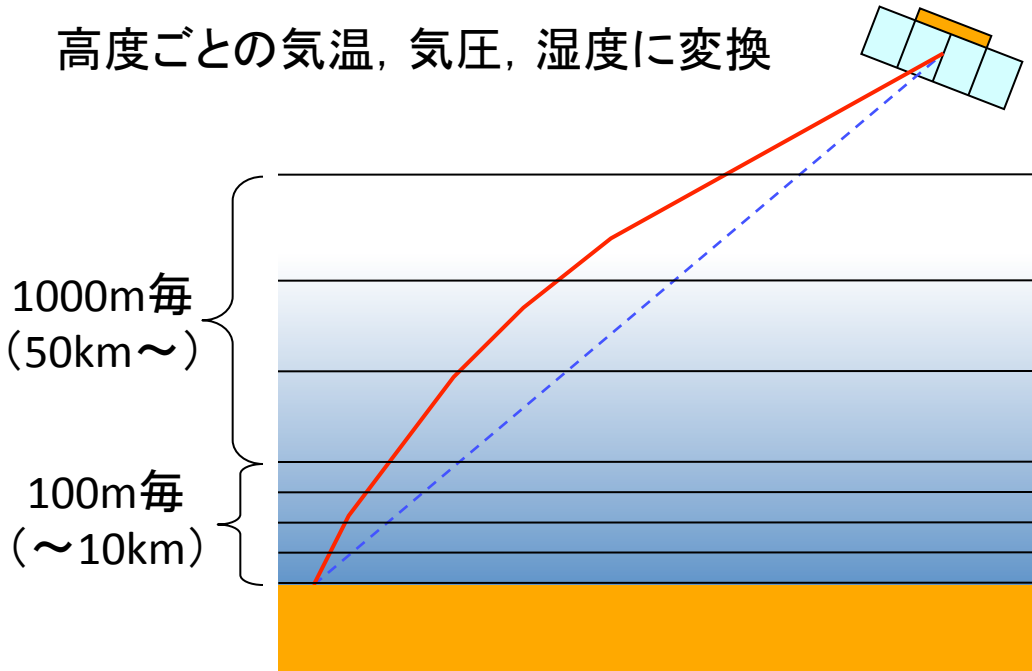
気温

湿度

気圧面高度



高度ごとの気温, 気圧, 湿度に変換

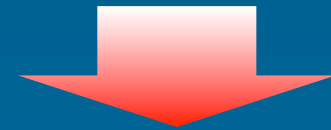


屈折率

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

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

P_d : 乾燥大気圧, P_v : 水蒸気圧, T : 温度



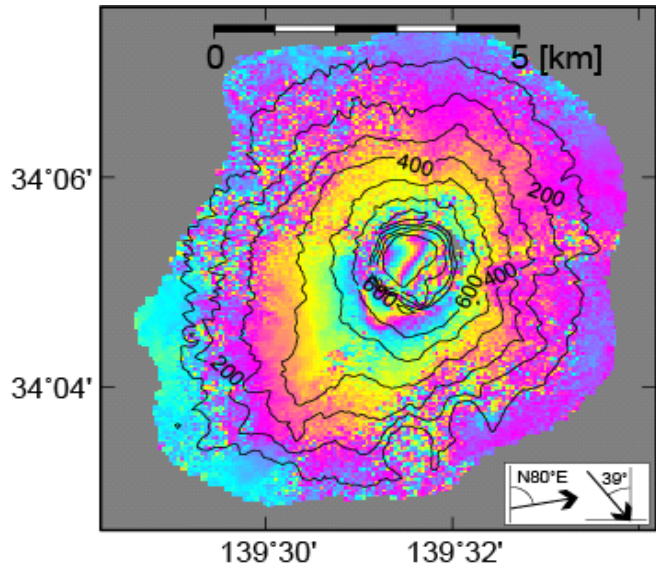
レイレーシング法により
レーダ波の伝播経路を推定

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

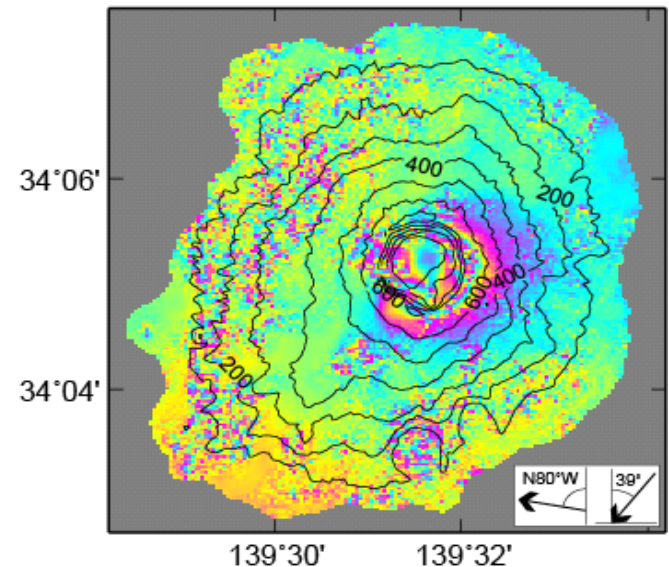
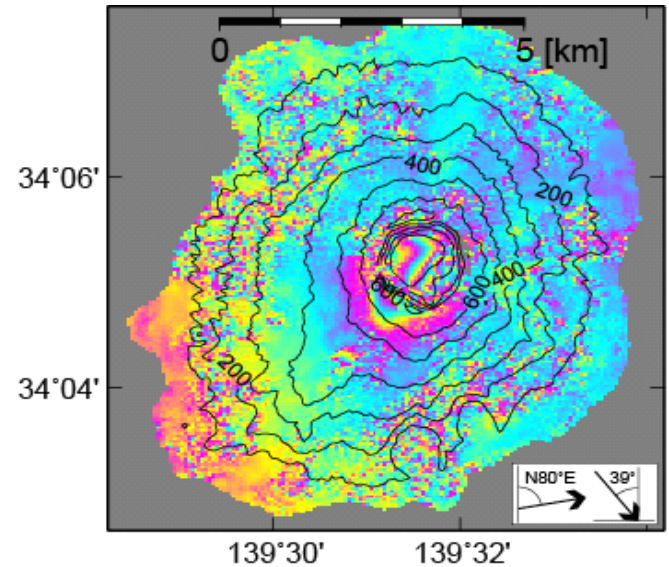
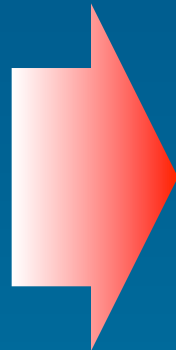
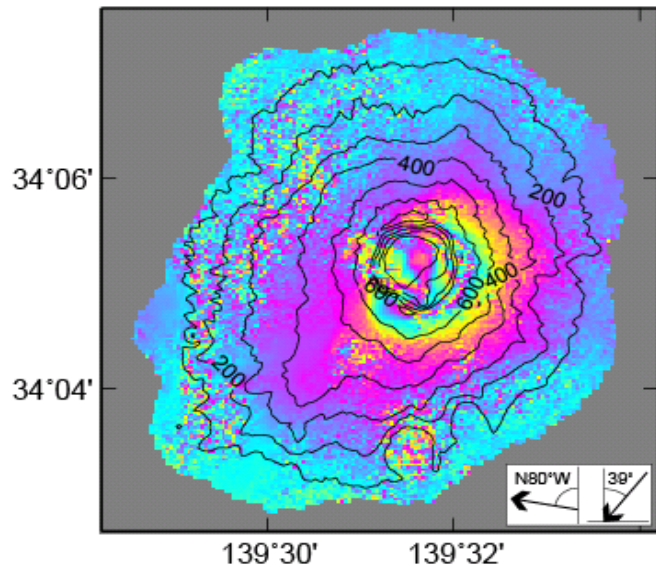
小澤・清水(測地学会誌, 2010)

推定した大気遅延成分を除去

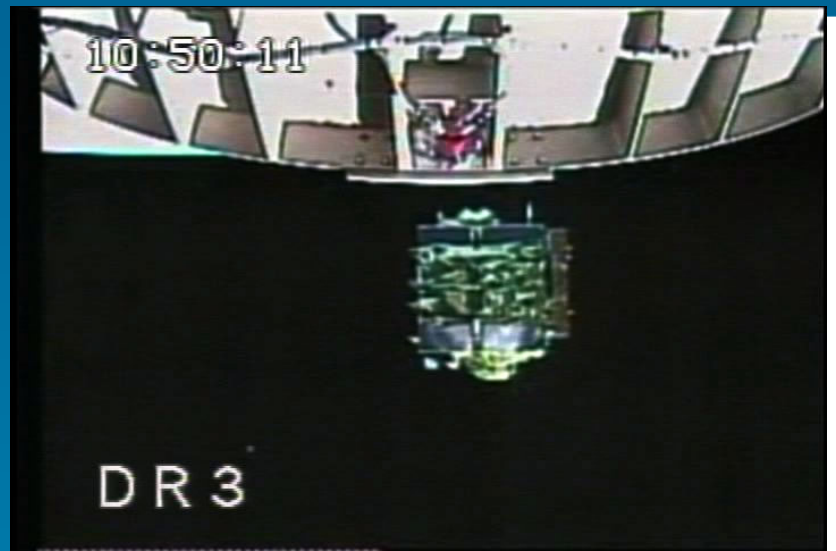
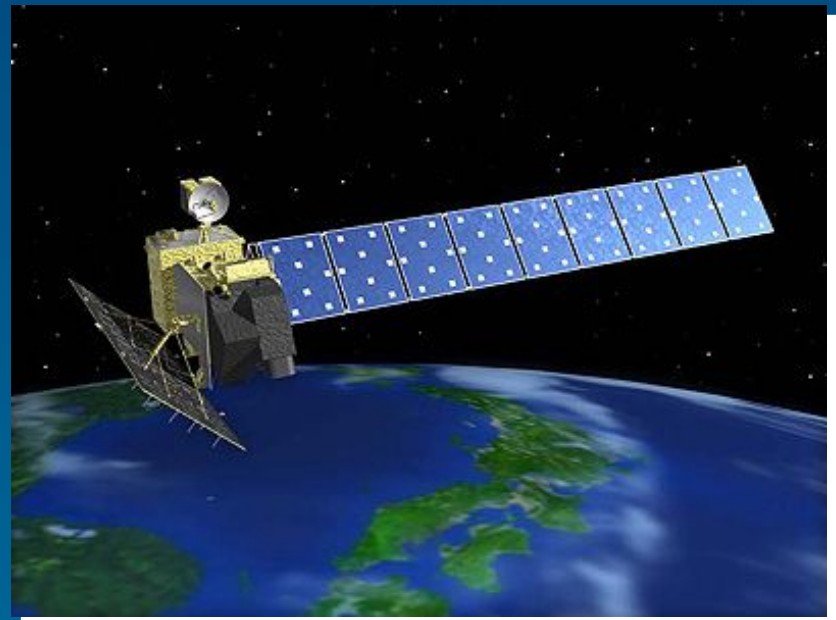
アセンディング, 2.4Yr



ディセンディング, 2.3Yr

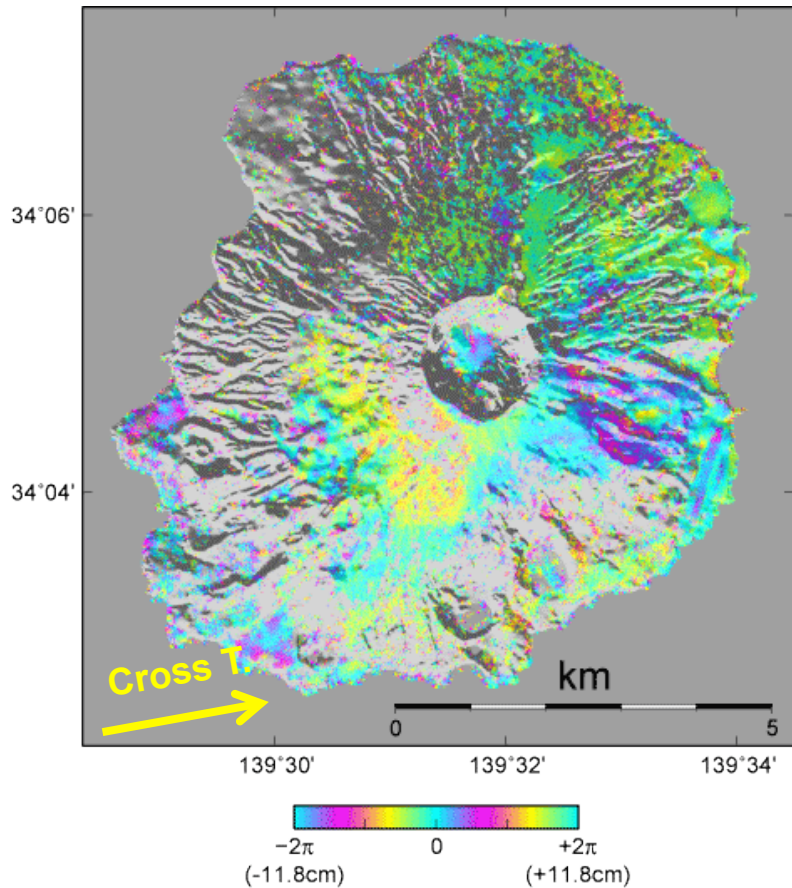


2006年1月24日 だいち打ち上げ



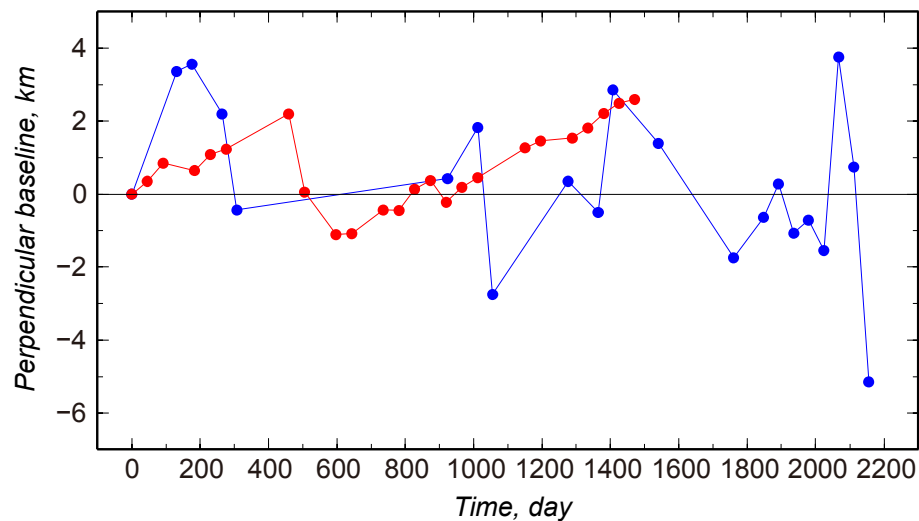
高干渉性

三宅島のPALSAR/InSAR画像
(2006/7/27-2007/9/11)



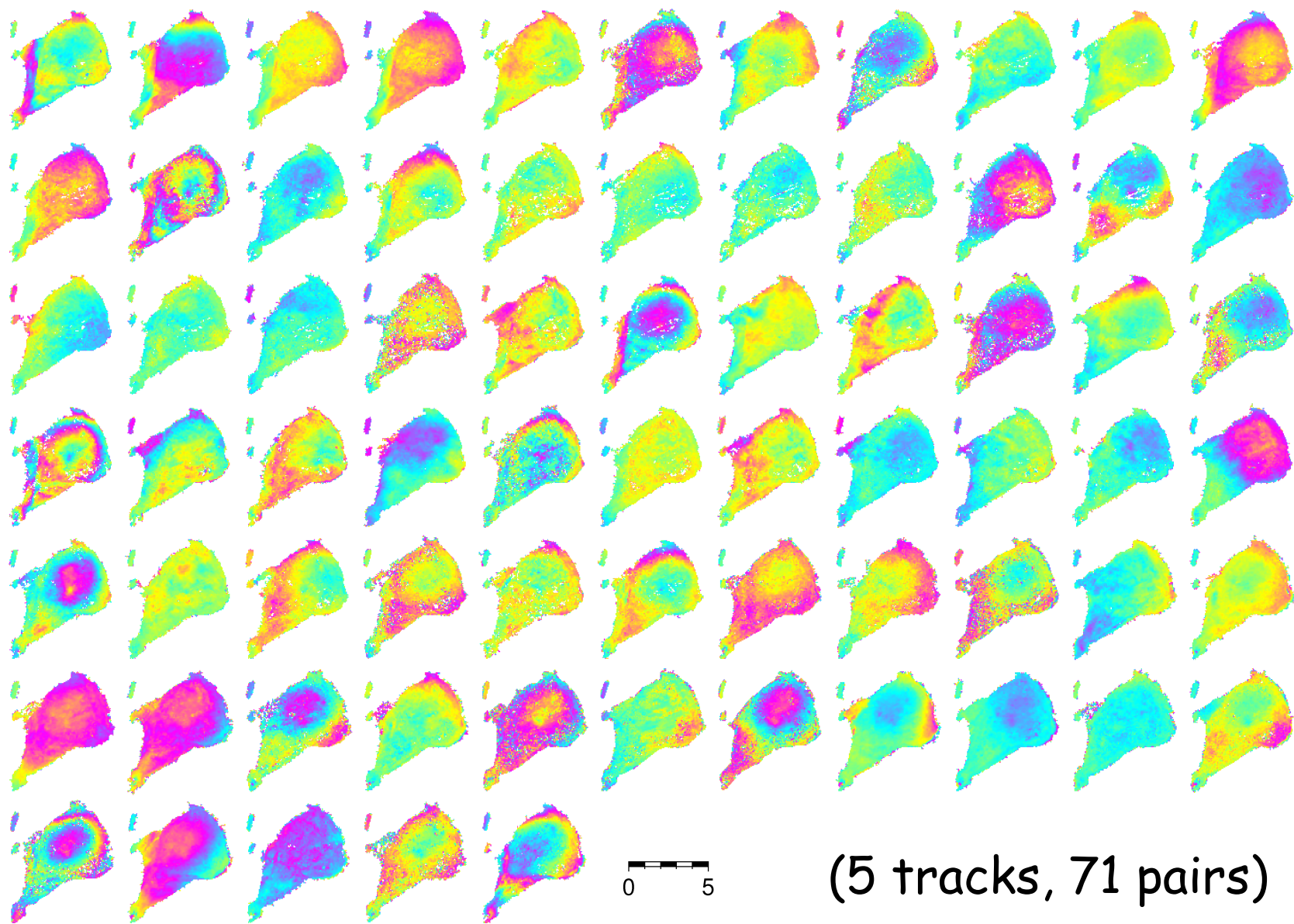
B_{PERP} : 3600m

ALOS(赤)とJERS-1(青)の
垂直基線長の時間変化



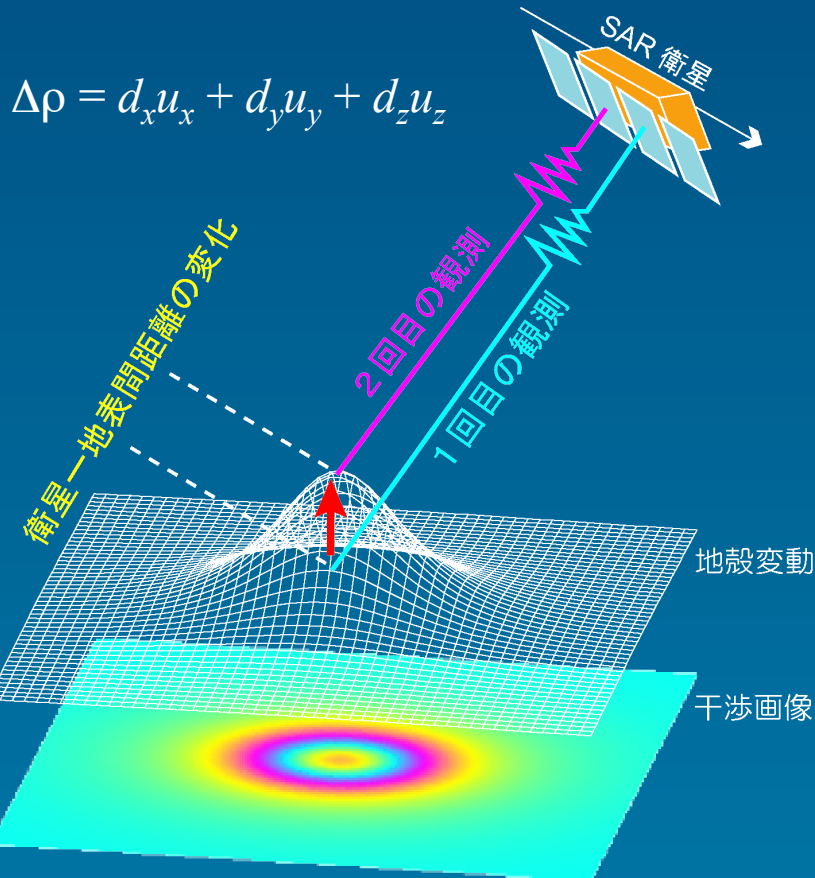
高頻度に高干渉度の画像
が得られるようになった。

小笠原硫黄島に関するPALSAR干渉画像



時系列解析

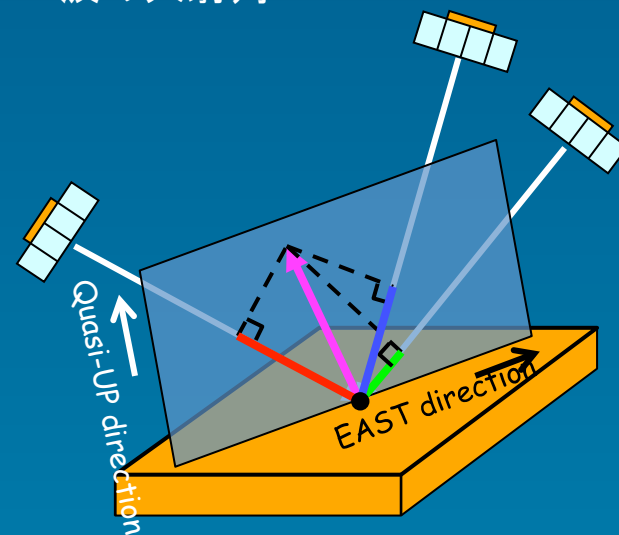
複数軌道データを用いたSBAS的解析手法:
(Ozawa and Ueda, 2011)



$$\Delta\rho_{\text{insar}} = \Sigma(d_{qew,i}u_{qew} + d_{qud,i}u_{qud}) + h_{\text{error}}B_{\text{PERP}}/\rho\sin\theta + \text{noise}$$

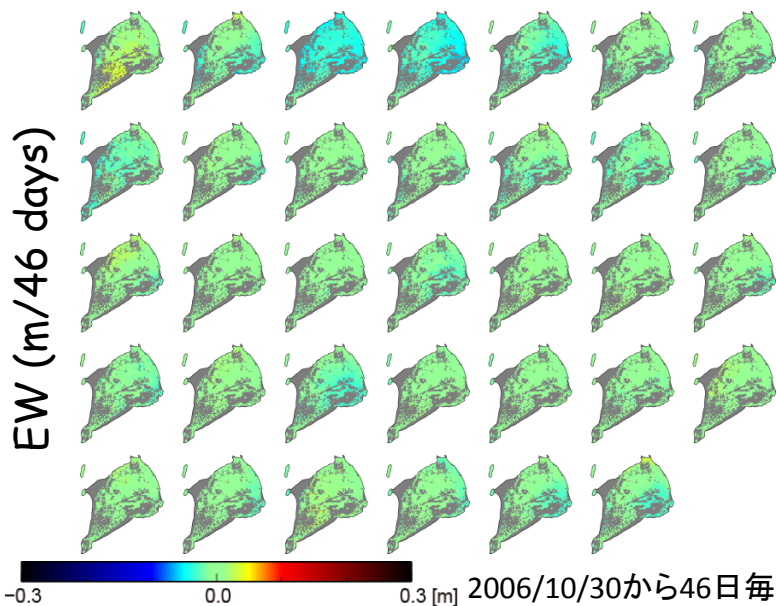
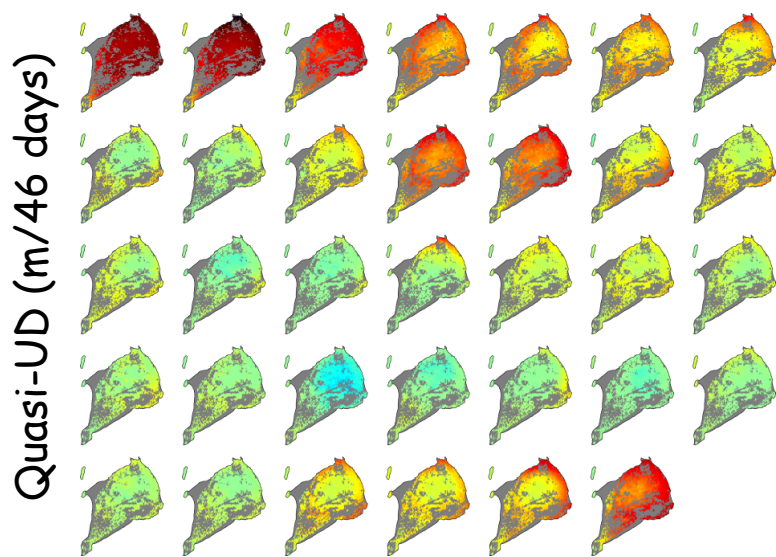
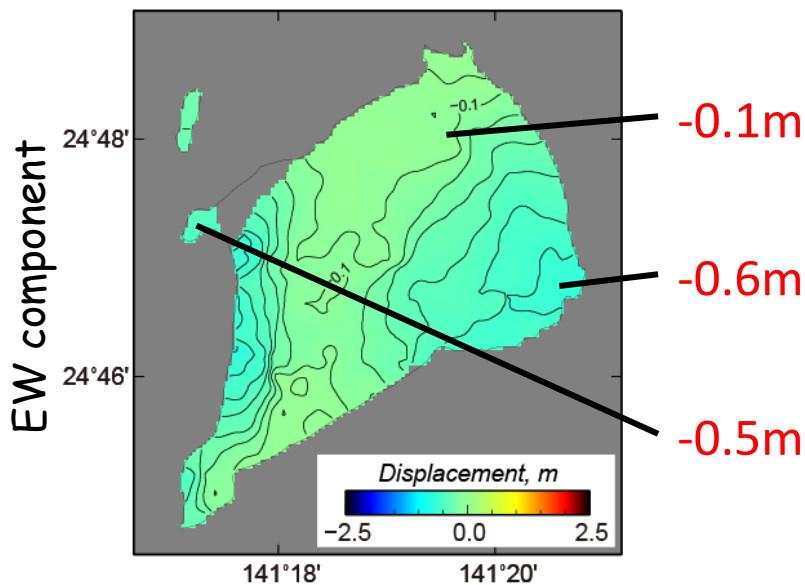
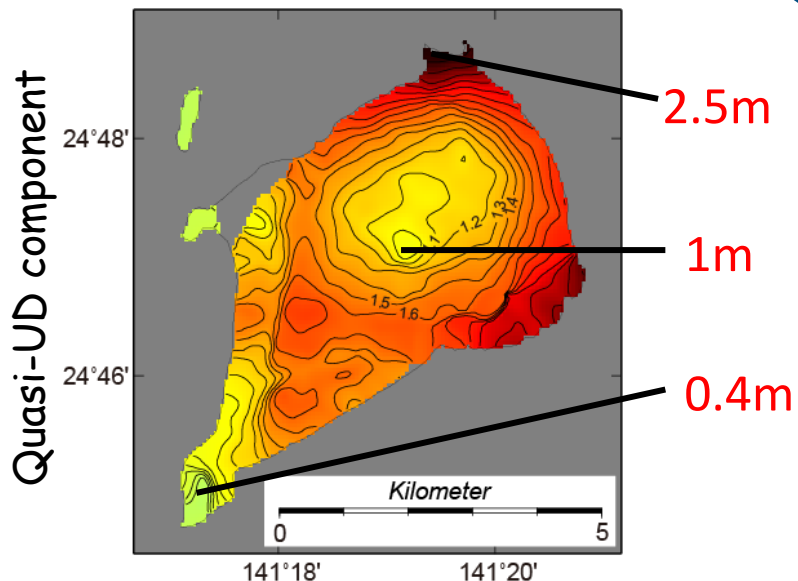
期間における変位ベクトル
視線方向ベクトル
DEM誤差
基線長(視線に対する垂直成分)
スラントレンジ
レーダー波の入射角

$(d_{qew,i} \ d_{qud,i})$
 $(u_{qew} \ u_{qud})$
 h_{error}
 B_{PERP}
 ρ
 θ

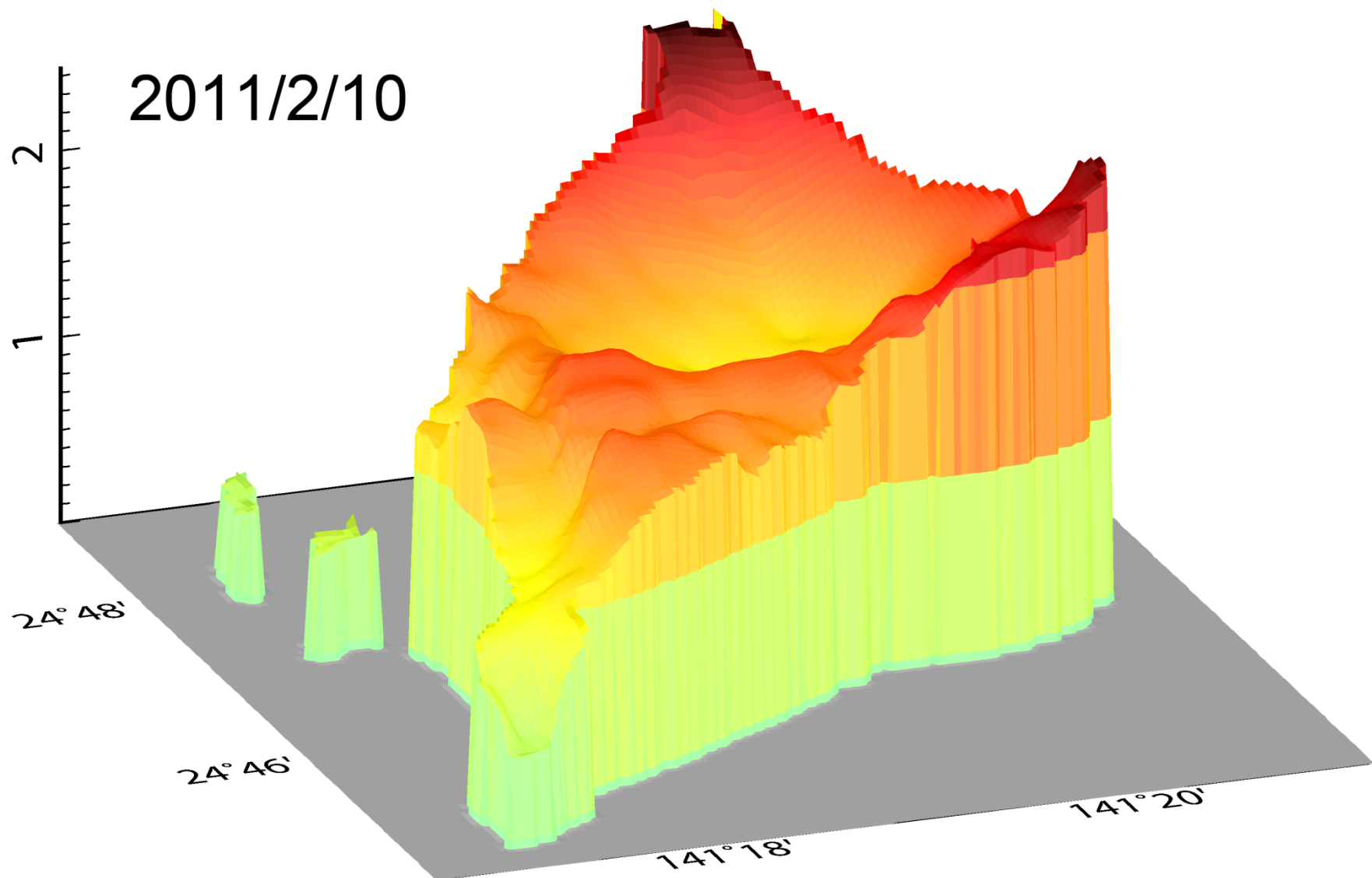


推定された地殻変動時系列

2006/10/30-2011/2/10

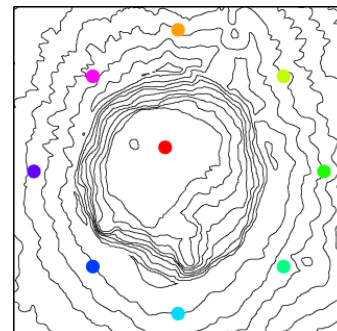
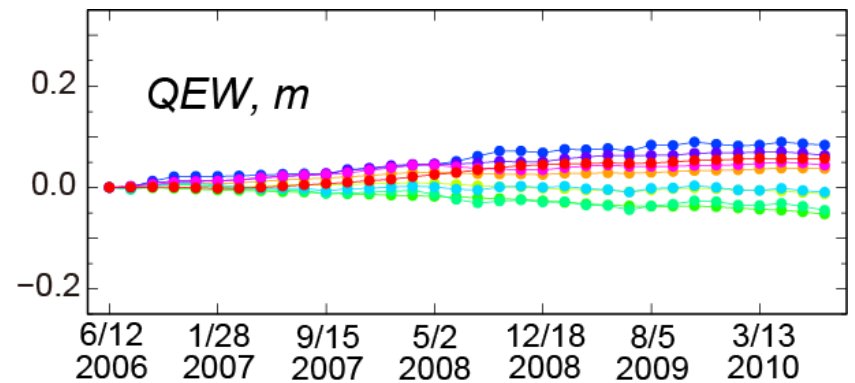
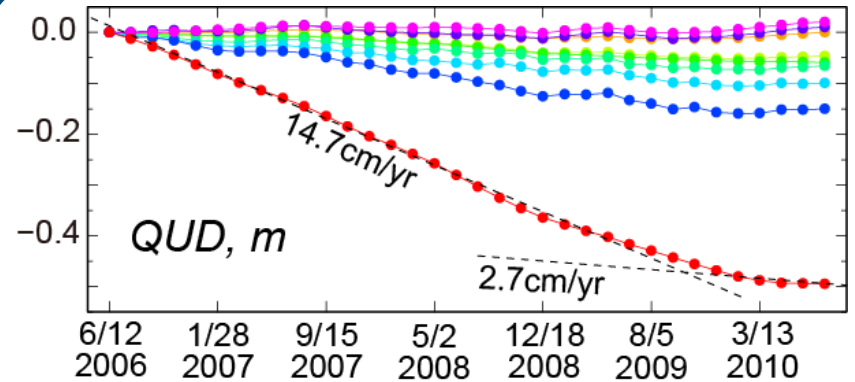
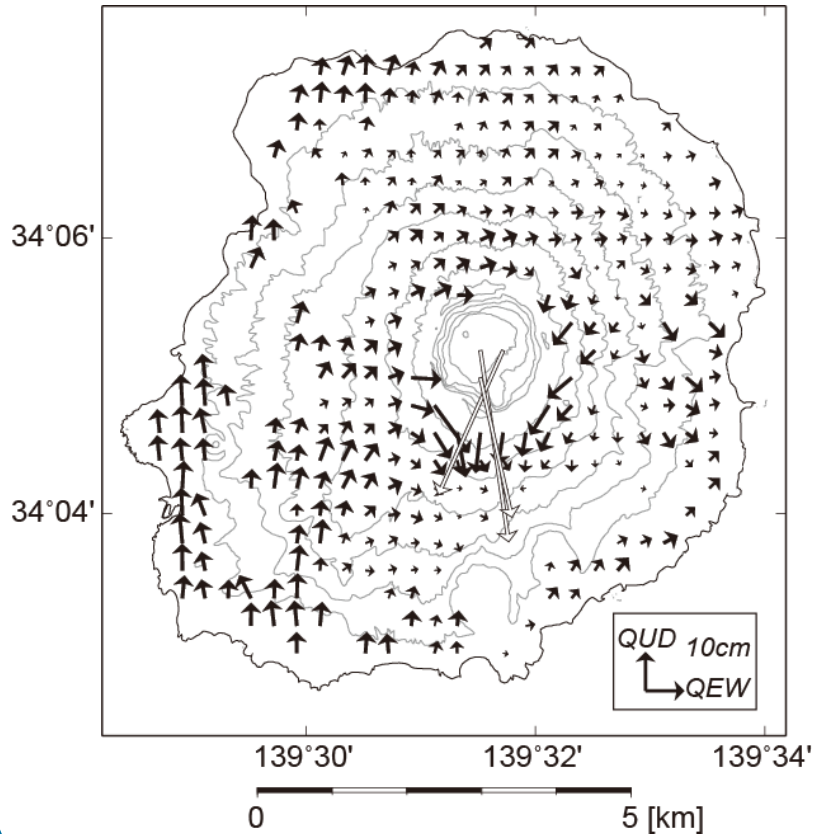


地殻変動の準上下成分



三宅島における解析事例

2006/6/6 - 2010/8/8



**2009年から
地殻変動鈍化**

- 西海岸の隆起
- 火口周辺の収縮・沈降

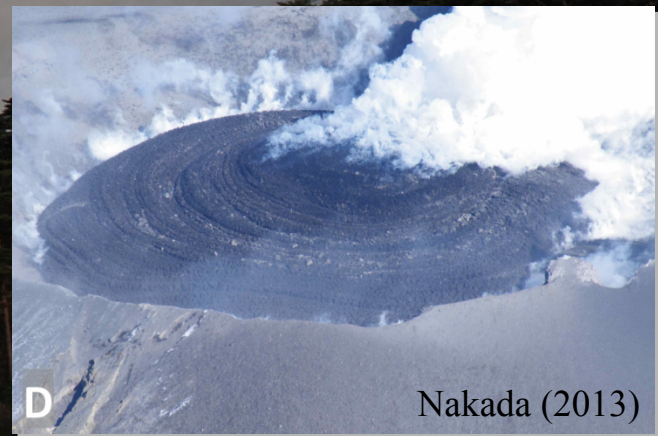
SARによる火山性地殻変動の検出

- SARは、空間的に複雑な地殻変動、現地観測が困難な場所の地殻変動を捉えられる。
- SARセンサ・衛星の性能、SAR解析技術の向上により、ある程度の精度を安定的に得られるようになった。
- SARは地殻変動検出のための有効なツールとなった(より精度が改善されれば、より重要な情報が得られる)。



メカニズム研究

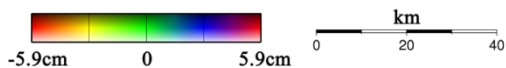
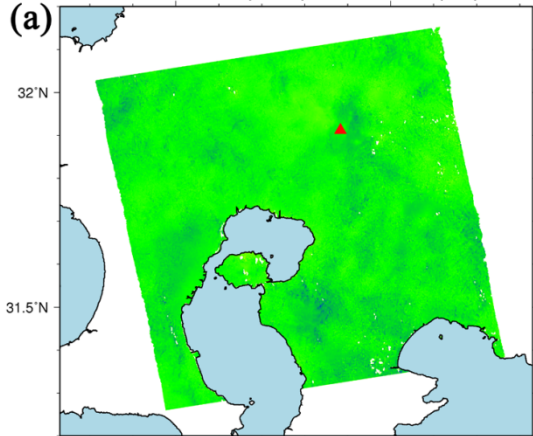
2011年新燃岳・霧島山噴火



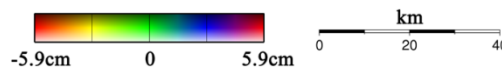
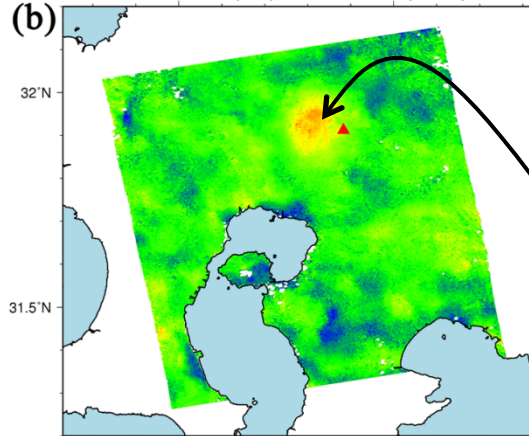
写真：長井(防災科研)，2011/1/27

InSARによる霧島山周辺の地殻変動

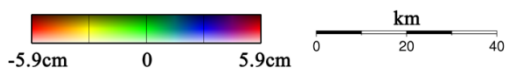
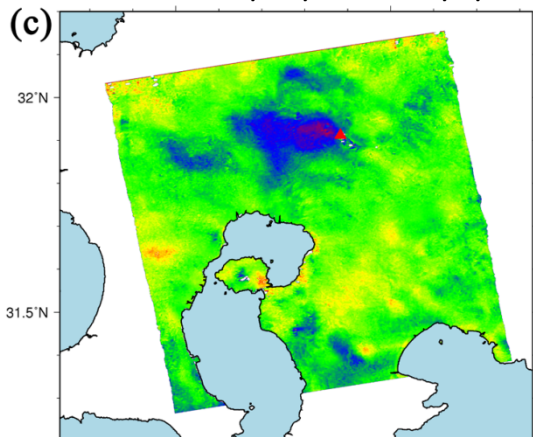
静穏期: 2007/12/28-2010/2/17



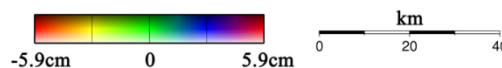
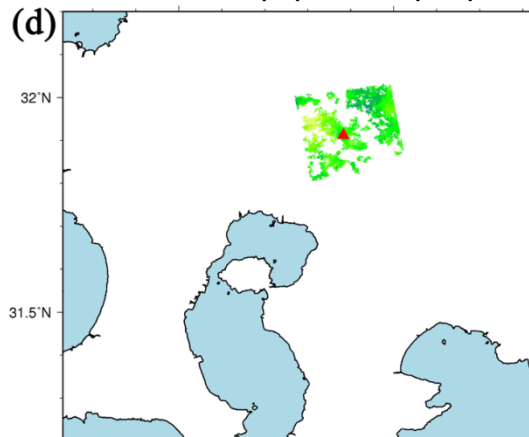
噴火前: 2010/2/17-2010/11/20



噴火時: 2010/11/20-2011/2/20



噴火後: 2011/3/3-2011/11/22



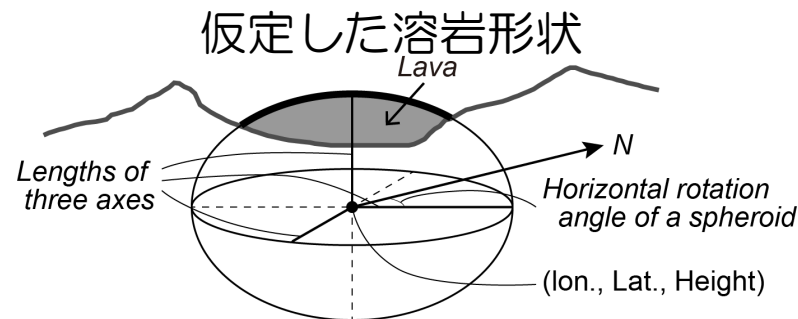
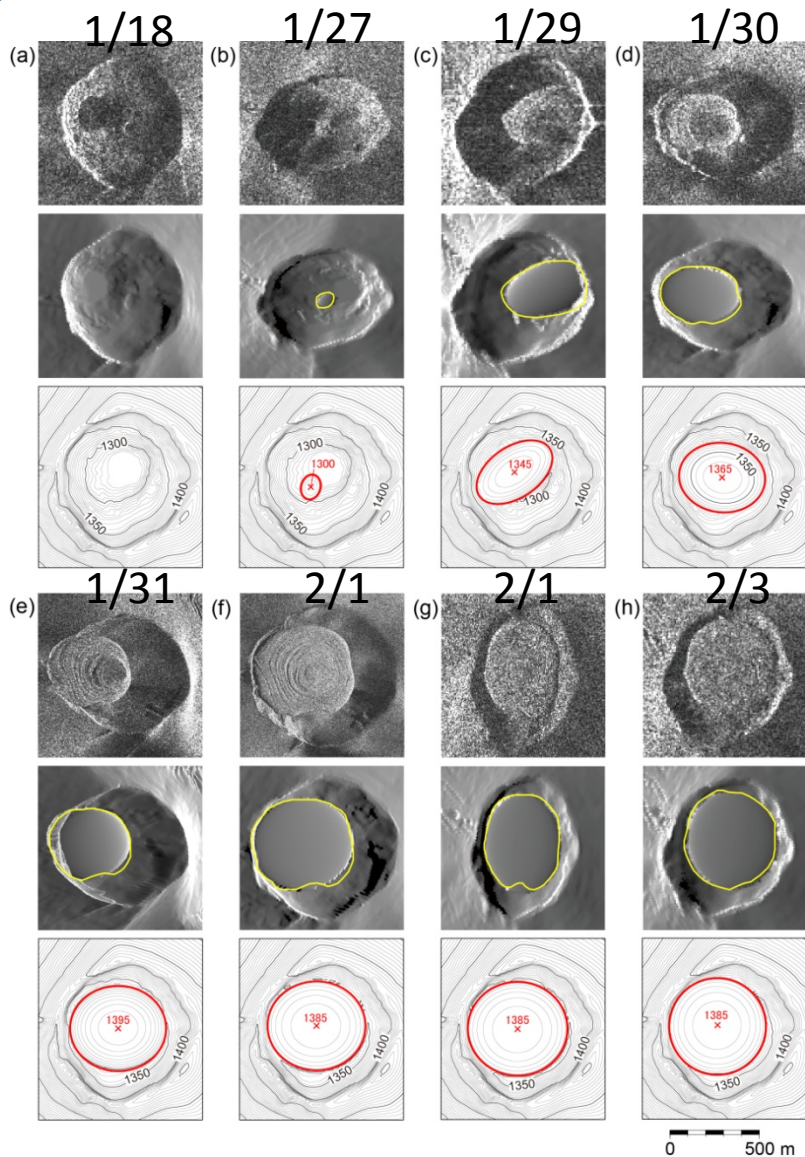
GPS観測結果とともに、
噴火前の膨張、噴火時の
収縮、噴火後の再膨
張を明らかにした。

深さ7.5km

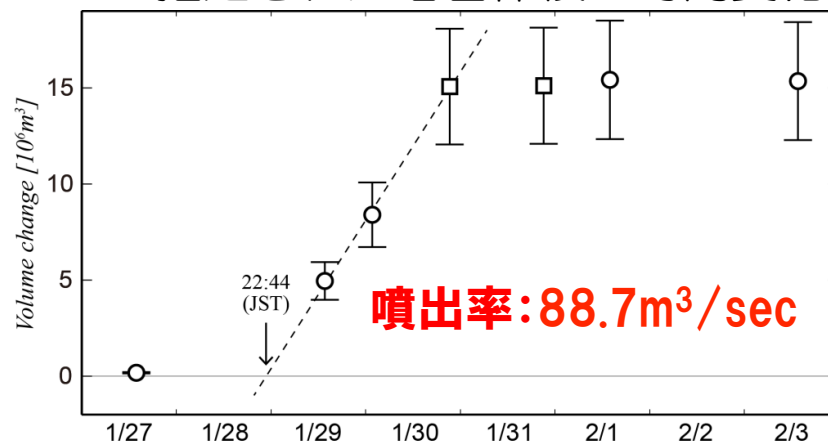
宮城ほか、DInSAR及び
GPSによって検出された、
霧島山・新燃岳2011年
噴火に伴う地殻変動、
火山, 2013.

SARによる火口内溶岩の成長

(Ozawa and Kozono, 2013)



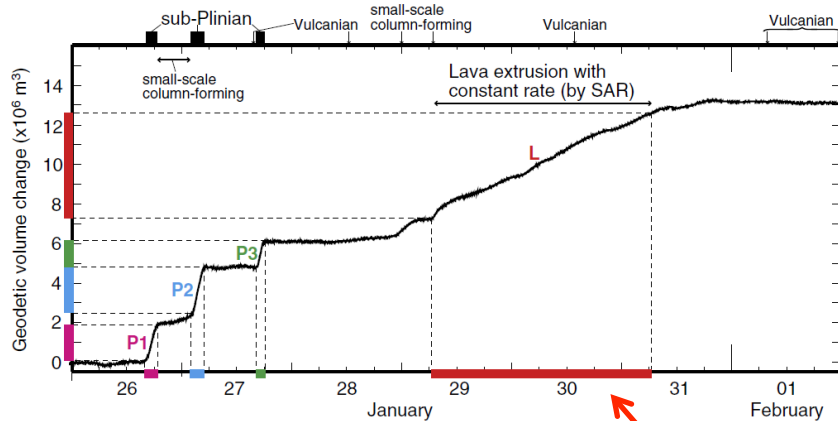
推定された溶岩体積の時間変化



とてもラフな推定であるが、
溶岩成長を捉えた**唯一の結果**

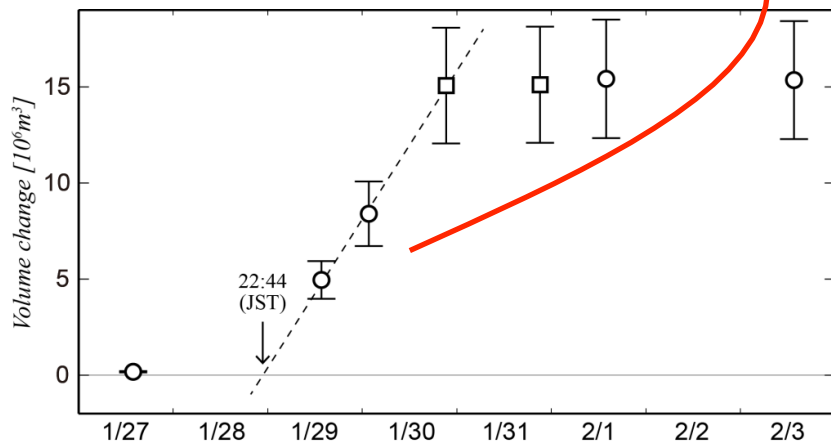
噴火様式の変化 (Kozono *et al.*, 2013)

傾斜変動(マグマだまりの収縮量)

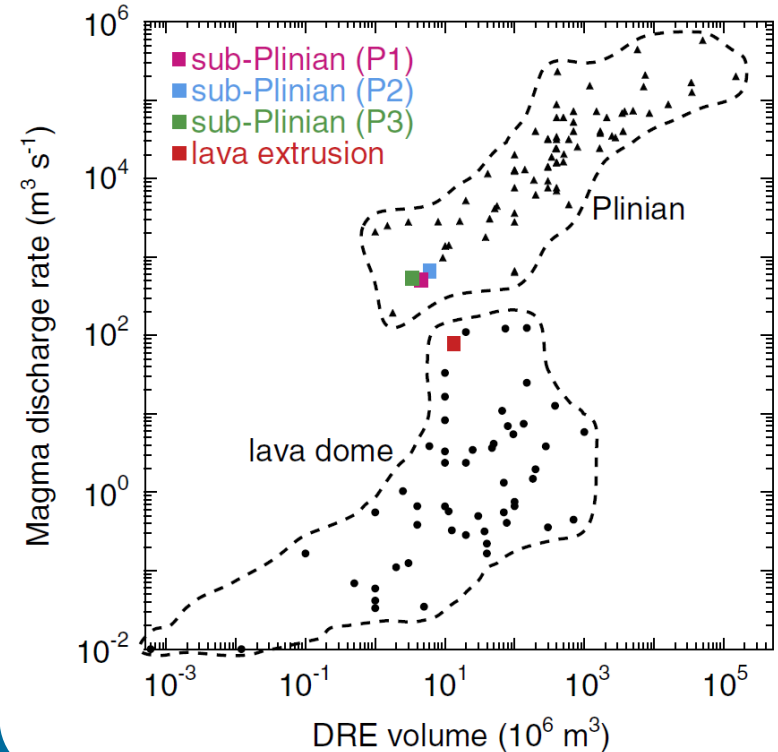


マグマだまりの収縮と
噴出量との関係

SARによる溶岩噴出量



噴出量, 噴出率, 噴火様式の関係



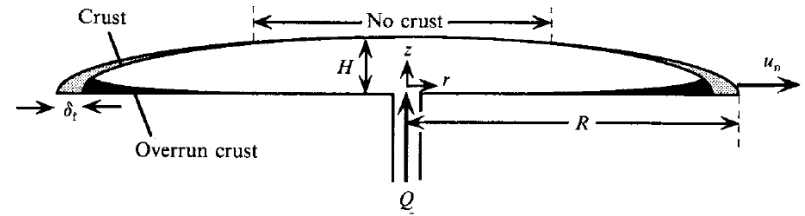
溶岩流出噴火・噴煙形成噴火の境界付近において噴火タイプが推移

溶岩の粘性率 (Ozawa and Kozono, 2013)

噴出率一定時の溶岩半径 r と時間 t の関係

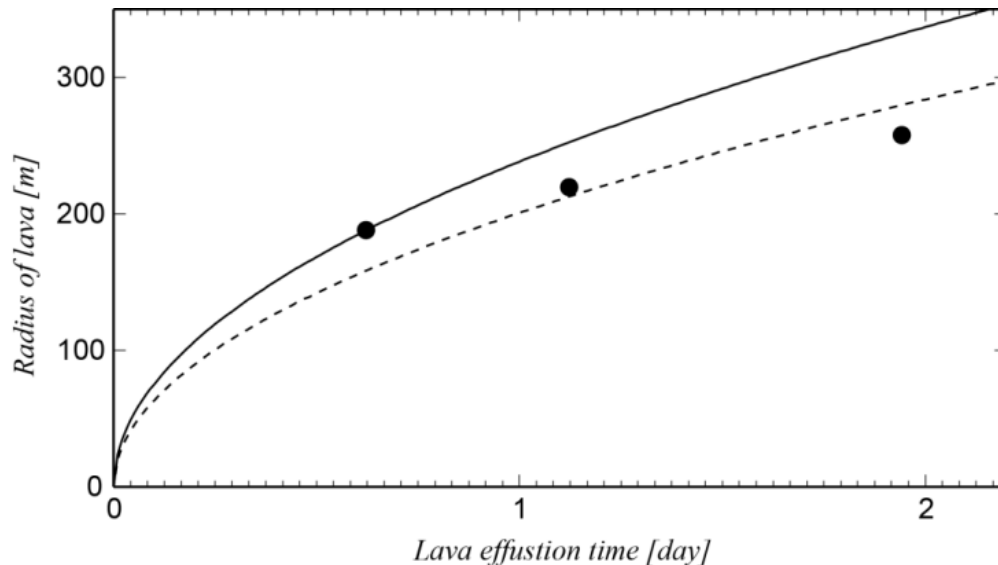
$$r = Ct^{1/2}, C = 0.715 \left(\frac{g\Delta\rho Q^3}{3\eta} \right)^{1/8}$$

η : マグマ粘性率 $\Delta\rho$: 密度差 (マグマ-大気)
 Q : マグマ噴出率 g : 重力加速度



(Huppert *et al.*, 1982)

推定された溶岩半径の時間変化

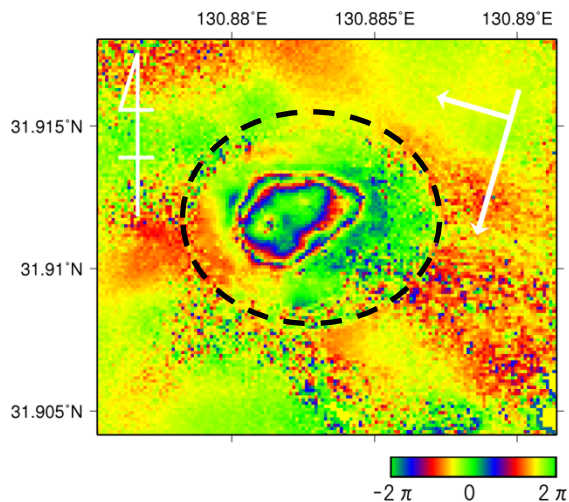


推定粘性率:
 2.1×10^9 Pa s 以下

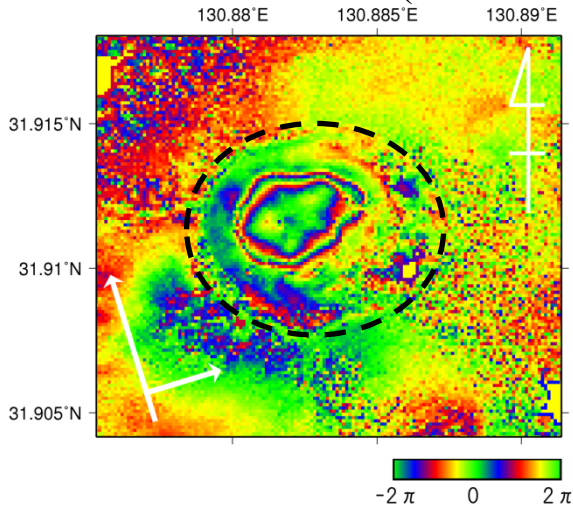
噴火休止時期の火口内変化

(Miyagi *et al.*, in preparation)

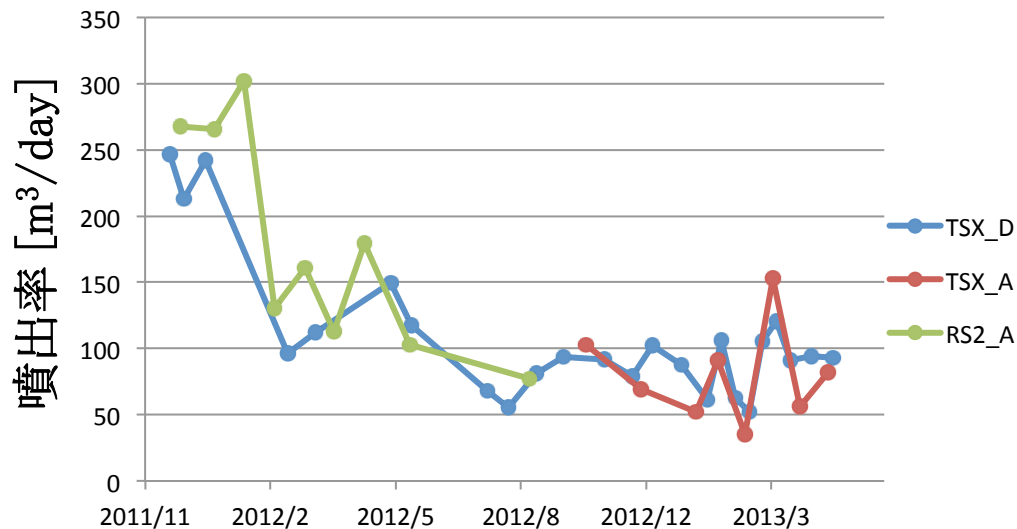
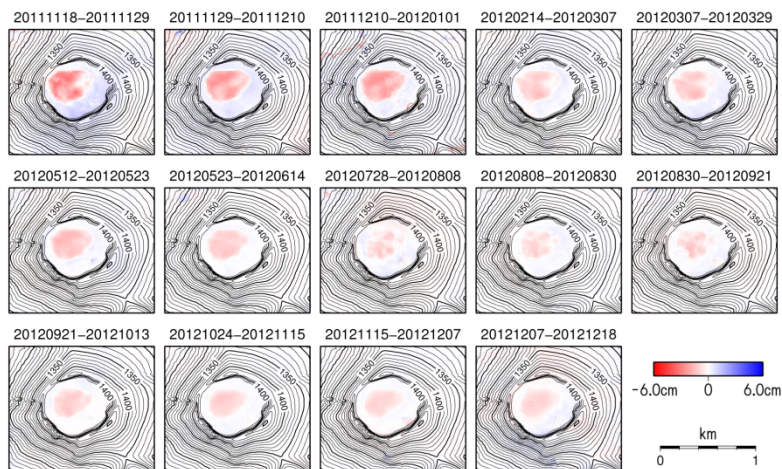
2012/11/15-2012/12/18 (南行軌道)



2012/11/17-2012/12/20 (北行軌道)

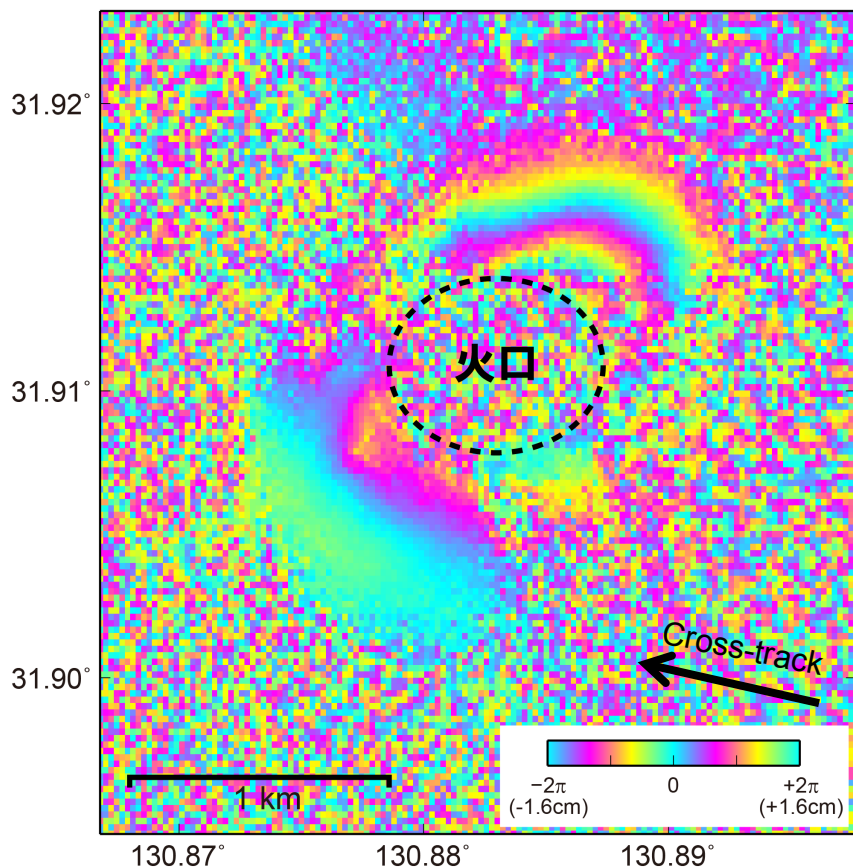


TerraSAR-X/InSAR画像 (南行軌道)



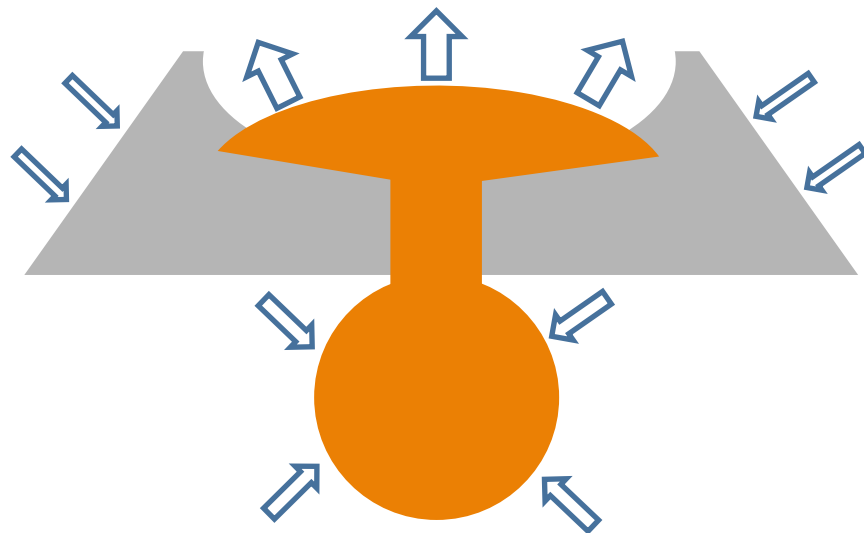
火口周辺の地殻変動とモデル

TerraSAR-X/InSAR画像(2012/3/7-2013/4/7)



火口下800mに位置するシル型力源(収縮)で良く説明できる。

推定されるモデル



2011/11/28-2013/4/7:

溶岩噴出量: $+5.2 \times 10^4 \text{ m}^3$

地下収縮量: $-4.3 \times 10^4 \text{ m}^3$

(暫定解)

続きは、火山・測地学会で！
(宮城ほか)

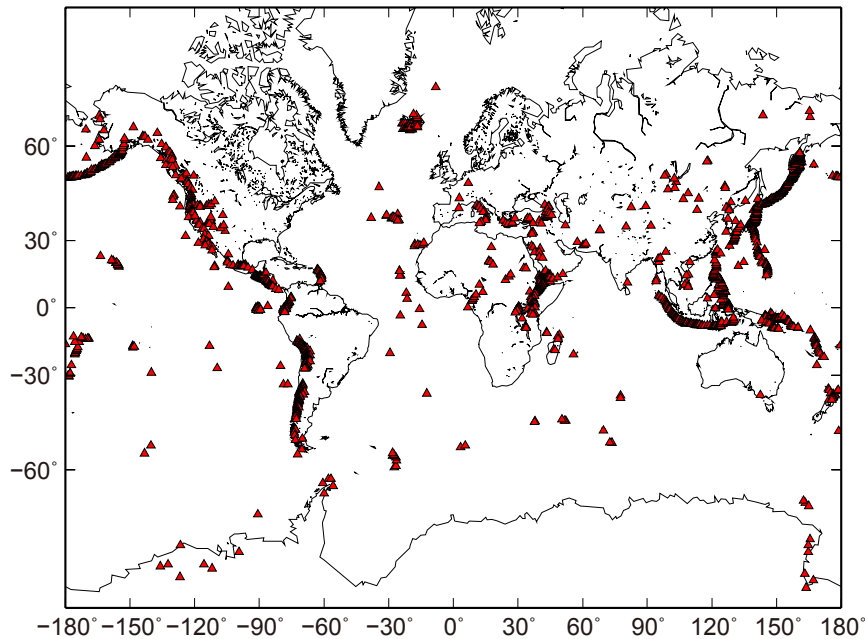
新燃岳・霧島山噴火に関するまとめ

- 従来のInSAR手法を用いて、噴火前、噴火時、噴火後の膨張・収縮変形を捉えた。
(深さ7.5kmの力源が求まった)
- SAR画像から溶岩の成長を捉えた。
(噴出率:88.7m³/sec)
- **地上観測データと組み合わせ**て、噴火様式が変化しやすい状況にあったことが解った。
- 噴出した溶岩の粘性率を推定した。
- 噴火活動が静穏になった現在でも、わずかながら溶岩流出が継続していることを明らかにした。

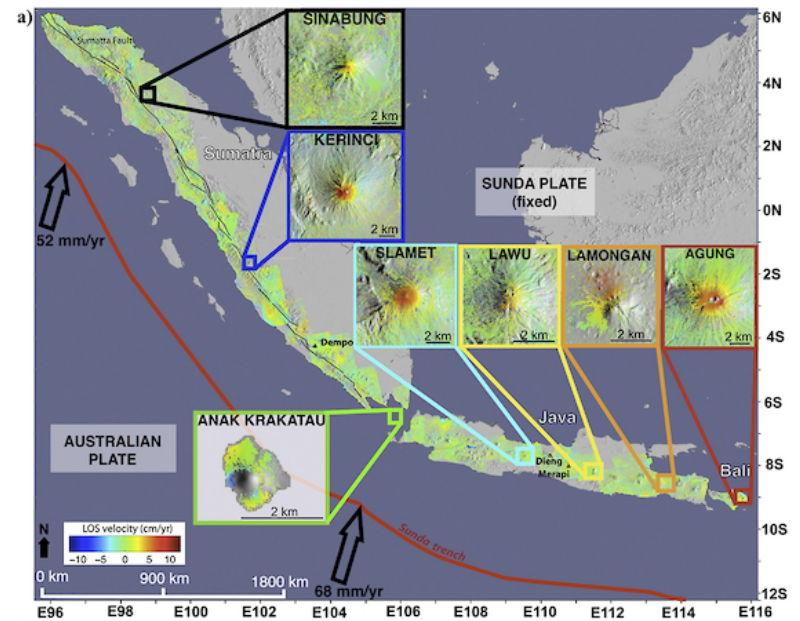
火口周辺の観測に基づく結果

今後の課題1(網羅的解析)

火山の分布



InSARによるインドネシアの地殻変動



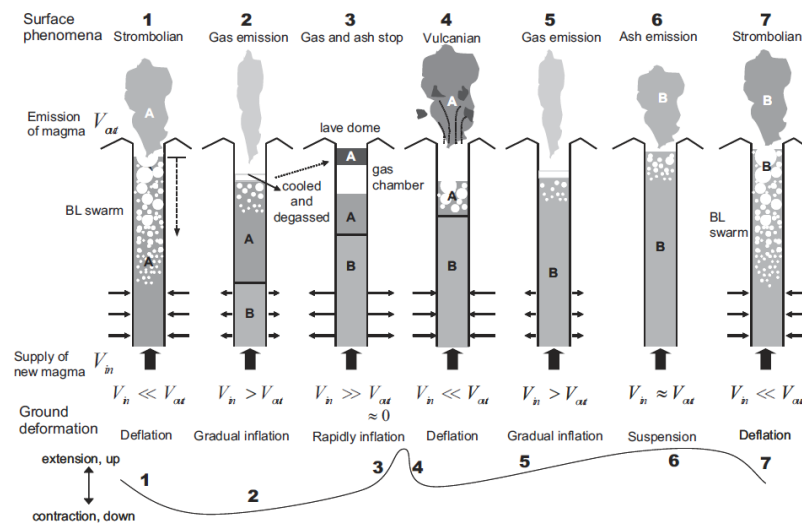
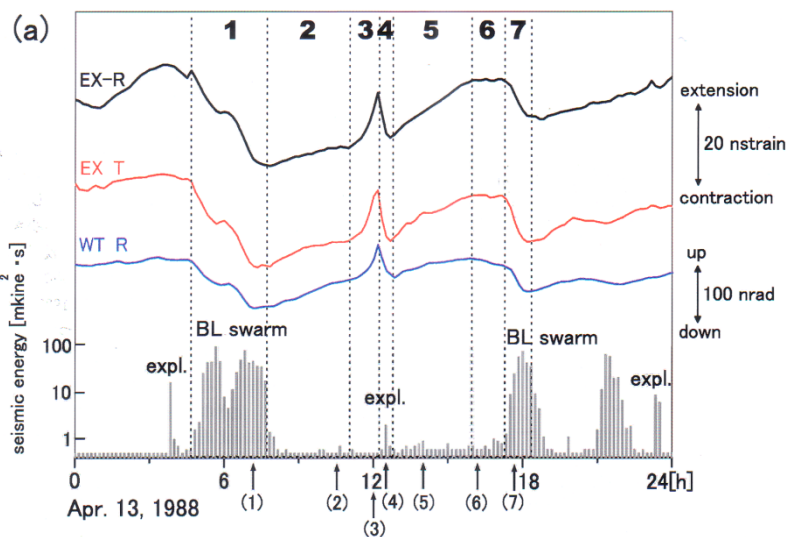
Chaussard and Amelung (2012)

- どこで、火山性の地殻変動が発生しているか？
- ・ 多様な火山タイプ・噴火様式での事例
- ・ 研究対象の絞り込み

今後の課題2(噴火発生時のSAR解析)

噴火が発生した火山に対して、集中的にSAR観測を実施し、火口内・周辺の変化、地殻変動の推移を調査する。

イメージ: 桜島における地殻変動とBL型地震および推定されるモデル(立尾・井口, 2009)



- 現地観測との連携も重要
- 地殻変動検出精度の改善(より深部との関連性)
- 時間分解能の向上
(解析手法開発, 地上設置型SARの利用)

地上設置型SAR

今後の課題3(解析技術開発)

- 地殻変動検出精度の向上(より深部のメカニズム)
(大気・電離層遅延軽減, 時系列解析手法)
- 積雪・火山灰の影響(PSの利用?)
- 時間分解能向上 (多くの衛星SARデータにOzawa and Ueda (2011)の方法を適用すれば感度を持つ)

ALOS-2(日本, L-band)



Sentinel-1(ESA, C-band)



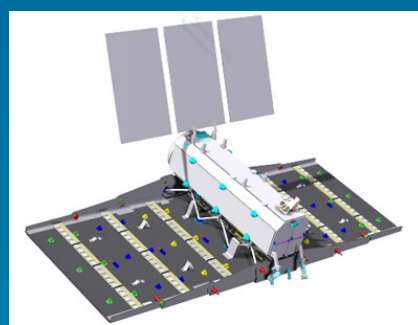
Radarsat-2(カナダ, C-band)



TerraSAR-X(ドイツ, X-band)



COSMO-SkyMed(イタリア, X-band) SAOCOMM(アルゼンチン, L-band)



**多衛星・多バンドSAR
による高頻度観測**

まとめ

SARは空間的に複雑な地殻変動，現地観測が困難な場所の地殻変動を検出可能であり，火山活動メカニズムの研究における有用なツールである。

- 網羅的解析(地殻変動が生じている火山を探す)
- 噴火発生時の火口内・周辺の変化，および，その前後の地殻変動の推移を調査するため，集中的なSAR観測を実施する。
- 現地観測(GPS，傾斜計，地震，地上設置SAR等)との連携
- より高精度・高時間分解能の地殻変動を求めるための解析技術の開発