

# 「だいち」 SAR 干渉解析により捉えられた霧島山 (新燃岳) の火山活動に伴う地殻変動とその圧力変動源の推定

## Estimate of Crustal Deformation and Pressure Sources of Mt. Kirishima (Shinmoedake) Volcanic Activity, Derived from InSAR Analysis Using Daichi SAR Data

地理地殻活動研究センター 小林知勝・飛田幹男・今給黎哲郎

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Tomokazu KOBAYASHI, Mikio TOBITA and Tetsuro IMAKIIRE

測地部 鈴木 啓・野口優子・石原 操

Geodetic Department

Akira SUZUKI, Yuko NOGUCHI and Misao ISHIHARA

### 要 旨

霧島山(新燃岳)の火山活動に伴う地殻変動を面的に捉えることを目的に、陸域観測技術衛星「だいち」の合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar. 以下、「SAR」という。)データを用いた干渉解析を行った。その結果、噴火前の SAR データを用いた干渉解析から、膨張性の地殻変動が新燃岳の西北西の領域で観測された。北行軌道のデータを用いた干渉画像によると、変位の中心は韓国岳の西約 5 km にあり、変動開始から 2010 年 11 月末までに最大約 -4 cm の衛星-地表間の距離変化があった。さらに噴火前と噴火後に撮像された SAR データのペアによる干渉解析からは、膨張性の地殻変動とほぼ同じ領域で、収縮性の地殻変動が観測された。観測された膨張性及び収縮性地殻変動の力源を求めるため、球状圧力源モデル(茂木モデル)を仮定したモデル計算を行ったところ、膨張源、収縮源はともに新燃岳の西北西約 5 km の位置に求まり、深さはそれぞれ、6.8 km, 6.1 km と推定された。2010/2/17-2010/11/20 及び 2010/11/20-2011/2/20 の期間の膨張及び収縮に伴う体積変化量はそれぞれ  $10.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,  $-10.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  と見積もられた。SAR 干渉解析から推定された圧力源の位置は、水平位置、深さとも、GPS データから推定された圧力源の位置と調和的である。

### 1. はじめに

霧島火山は、北西-南東方向に配列する複数の火山体の集合からなる第四紀火山である。新燃岳は霧島火山を構成する主要な火山の 1 つであり、霧島火山のほぼ中央に位置する安山岩質の成層火山である。比較的活動の活発な火山であり、近年では 1959 年の爆発的噴火や 2008 年の水蒸気爆発などがある(種子田・松本, 1959; 下司ほか, 2010)。この新燃岳で、2011 年 1 月噴火が発生した。1 月 19 日に小規模な噴火が始まり、同月 26 日午後から連続的な噴煙の放出が開始して、翌 27 日には爆発的な噴火に発展した。今回の火山活動は、享保噴火(1716-1717 年)以来

約 300 年ぶりの本格的なマグマ噴火である(井村・小林, 1991)。

霧島山近傍の GEONET 点(図-1)では、2008 年の小規模噴火の 1 年余り後の 2009 年 12 月頃から、深部のマグマ蓄積過程を反映していると思われる顕著な山体の膨張が観測されていた(今給黎・大脇, 2011)。その後、噴火活動が活発化するのに伴い縮みに転じた変動も観測された。

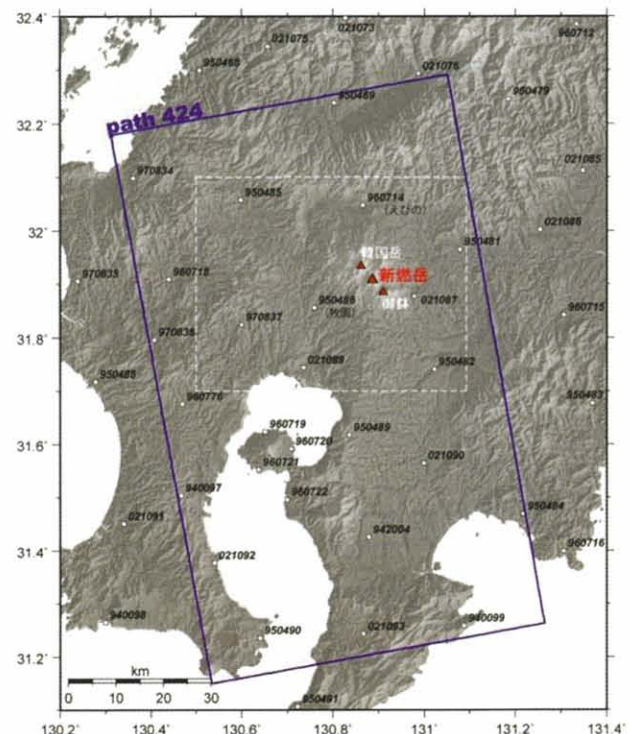


図-1 霧島山(新燃岳)の位置。青枠は path424 (frame620)における SAR 撮像範囲、白枠は図-3、-4の範囲を示す。□印は GEONET 観測点を示す。

SAR 干渉法は、マイクロ波レーダー観測を地表の同一地点で 2 回以上実施し、反射波の位相差をとることによって、地表の変動を捉える技術である。mm

の精度で地殻変動を捉えられる GPS と比べて測定精度は cm オーダーとやや劣るものの、数十m程度の高い空間分解能で数十 km 範囲の地表変位を面的に捉えることのできる長所を持つ。図-1 に示すように、GEONET 観測点は霧島山を囲んで配置されているものの、その間隔は 20km ほどある。SAR 干渉解析を適用することにより、霧島山（新燃岳）近傍の地殻変動が高空間分解能で面的に抽出され、地殻変動の力源、すなわちマグマ溜まりの位置などについての情報が得られることが期待される。

このような背景の下、本研究では、霧島山で進行する地殻変動分布を面的に捉えることを目的に SAR 干渉解析を行った。本稿では、SAR 干渉解析結果とそれをもとに構築した力源モデルを紹介する。

## 2. SAR 干渉解析

### 2. 1 解析概要

本解析には、(独)宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の陸域観測技術衛星「だいち」のデータを使用した。「だいち」搭載の SAR センサ (PALSAR) が照射する L バンド・マイクロ波は、干渉処理において植生に強く、国内の火山地域の観測に最適である。測地部ではこれまで、霧島山の地殻変動を監視する目的で、74ペアの干渉解析 (うち、path424: 49ペア、path71: 1ペア、path73: 24ペア) を実施してきた (これらの結果の一部は、国土地理院のホームページで公開されている: [http://vlodb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/result/data\\_routine.html](http://vlodb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/result/data_routine.html))。本研究では、さらに3ペアの解析を追加した。本稿ではこれらのうち、火山性の地殻変動を比較的高い S/N 比で捉えた path424 (北行軌道) の5ペアについて紹介する (図-2)。

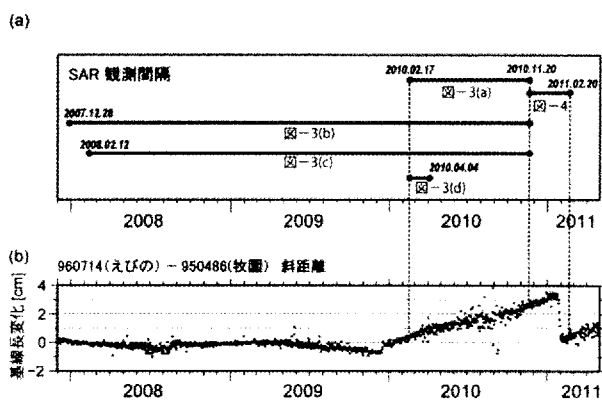


図-2 (a) SAR 干渉解析に用いた SAR データペアと (b) GEONET 観測点 960714 (えびの) - 950486 (牧園) 間の斜距離変化。

SAR 干渉解析結果には、しばしば地殻変動とは異なる数 cm 程度の位相変化が見られる。その主なものとして大気中の水蒸気起因の位相遅延による誤差 (以

下、「大気遅延誤差」という。)がある。本解析では、干渉画像内に含まれる大気遅延誤差を低減するために、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)」(以下、「特別研究 (H20-22)」という。)において国土地理院が開発した手法を適用した。本手法は、数値気象モデルから得られる SAR 撮像時の大気中屈折率分布をもとにレイトレーシング法を適用して計算した位相遅延量を、初期干渉画像から差し引く処理を行う。本処理では、国土地理院と気象庁とのオンライン防災情報の相互交換に関する協定「電子基準点等観測データ及び数値予報格点データの交換に関する細部取り決め協議書」によって、気象庁から提供されている数値気象モデルを利用した (ただし2008年4月以前は、メソ客観解析データを使用)。数値気象モデルは3時間おきのデータのため SAR の観測時刻に対応していない。本研究では、SAR の観測前後のモデルデータに格納されている値を撮像時刻にあわせて線形補間した値を使用した。

干渉解析には新GSISARを使用し、また、SAR干渉画像のアンラップ処理には、特別研究 (H20-22) において開発された位相連続化処理ソフトウェアに実装されている「位相連続化」機能を用いた。

### 2. 2 SAR 干渉解析による地殻変動分布図

図-3 に噴火前の SAR データを用いた干渉解析結果を示す。(a), (b), (c) はそれぞれ、2010/2/17-2010/11/20, 2007/12/28-2010/11/20, 2008/2/12-2010/11/20 のペアで、いずれも新燃岳の西北西の領域に、衛星-地表間距離が短縮する位相変化、すなわち膨張性の地殻変動が共通に観測された。変動の中心は韓国岳の西約 5 km にあり、変動量は最大約 -4 cm である。(d) は 2010/2/17-2010/4/4 のペアの結果である。観測期間が短いものの、(a)~(c) で観測された変動域とはほぼ同じ領域に、膨張性の地表変位が観測されている。一方、新燃岳の火口周辺において集中するような局所的な変動は、いずれの干渉画像からも捉えられていない。

図-4 に噴火前後に撮像された SAR データ (2010/1/20-2011/2/20) を用いた干渉解析結果を示す。新燃岳の西北西の領域に、衛星-地表間距離が伸長する位相変化、すなわち収縮性の地殻変動がみられる。噴火前に観測された膨張性の変動域とはほぼ同じ領域が収縮に転じている。変動量は最大約 4 cm で、図-3 (a)~(c) で観測された変動量とはほぼ同じである。GPS 観測によるえびの-牧園間の斜距離をみると、2010/2/17-2010/11/20 (図-3 (a)) の伸長量と 2010/11/20-2011/2/20 (図-4) の短縮量はほぼ同じであり (図-2 (b)), この2期間の変動量がほぼ

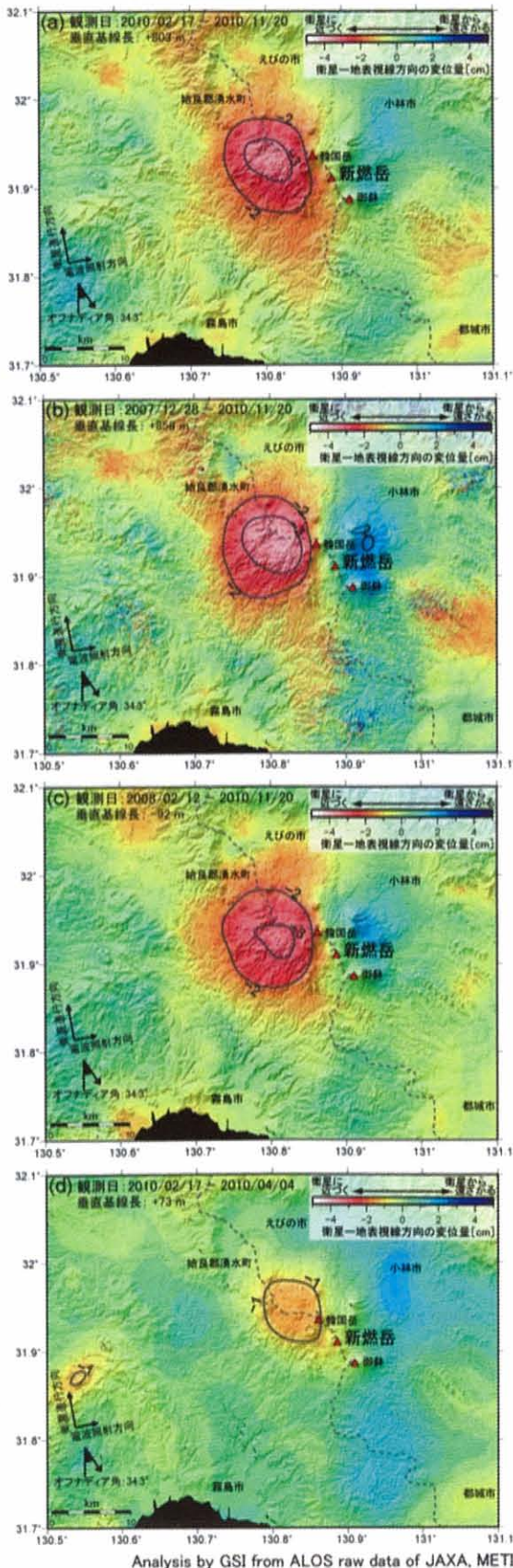


図-3 噴火前の SAR データを用いて得られた干渉画像。(a) 2010/2/17-2010/11/20。(b) 2007/12/28-2010/11/20。(c) 2008/2/12-2010/11/20。(d) 2010/2/17-2010/4/4。等量線間隔は 1 cm。

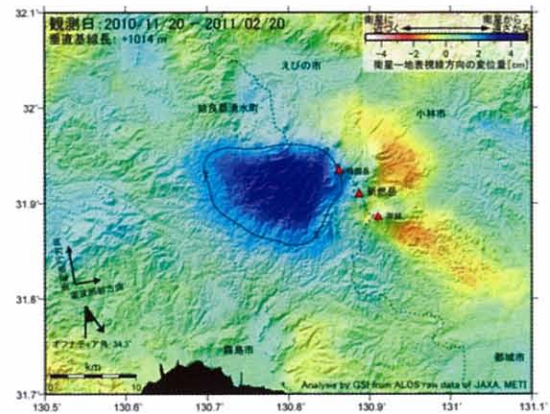


図-4 噴火前後の SAR データ (2010/11/20-2011/2/20) を用いて得られた干渉画像。2 cm 以上の変化量を 1 cm 間隔の等量線で示す。

同規模であるという点において両観測結果は互いに調和的である。

### 3. 圧力源の推定

#### 3.1 解析手法

観測された膨張性及び収縮性地殻変動の力源を求めるため、球状圧力源モデル(茂木モデル)(e.g., Mogi, 1958)を仮定したモデル計算を行った。推定には、Simulated Annealing(焼きなまし)法(e.g., Cervelli et al., 2001)を適用し、位置(緯度・経度・深さ)及び体積変化量の最適解を求めた。パラメータの探索範囲はそれぞれ、 $130.70^{\circ} \text{ E} \sim 130.95^{\circ} \text{ E}$ ,  $31.85^{\circ} \text{ N} \sim 32.00^{\circ} \text{ N}$ ,  $1 \sim 15 \text{ km}$ ,  $0.01 \sim 100 \times 10^6 \text{ m}^3$ とした。また、各変数の誤差推定にはブートストラップ法を適用した(Efron, 1979)。ブートストラップの反復回数は200回とした。

本解析では、Jónsson et al. (2002)に従ったQuadtree Decomposition(四分木分解)アルゴリズムを適用してSAR干渉データをリサンプリングし、モデリング解析に適切なデータセットを作成した。本処理には、特別研究(H20-22)において開発された位相連続化処理ソフトウェアに実装されている「Quadtree」機能を使用した。

#### 3.2 球状圧力源モデル

図-5及び図-6に、2010/2/17-2010/11/20(図-3(a))及び2010/11/20-2011/2/20(図-4)のSAR干渉解析データを用いたモデリング結果を示す。図中の白丸は推定された圧力源の水平位置で、膨張源、収縮源ともに新燃岳の西北西約5kmの位置に求まる。深さはそれぞれ、6.8km、6.1kmと推定された(表-1)。求められた圧力源モデルから計算される変位量は、観測された変位量分布をよく説明し、残差は干渉画像の誤差レベル以下となる。膨張性・収

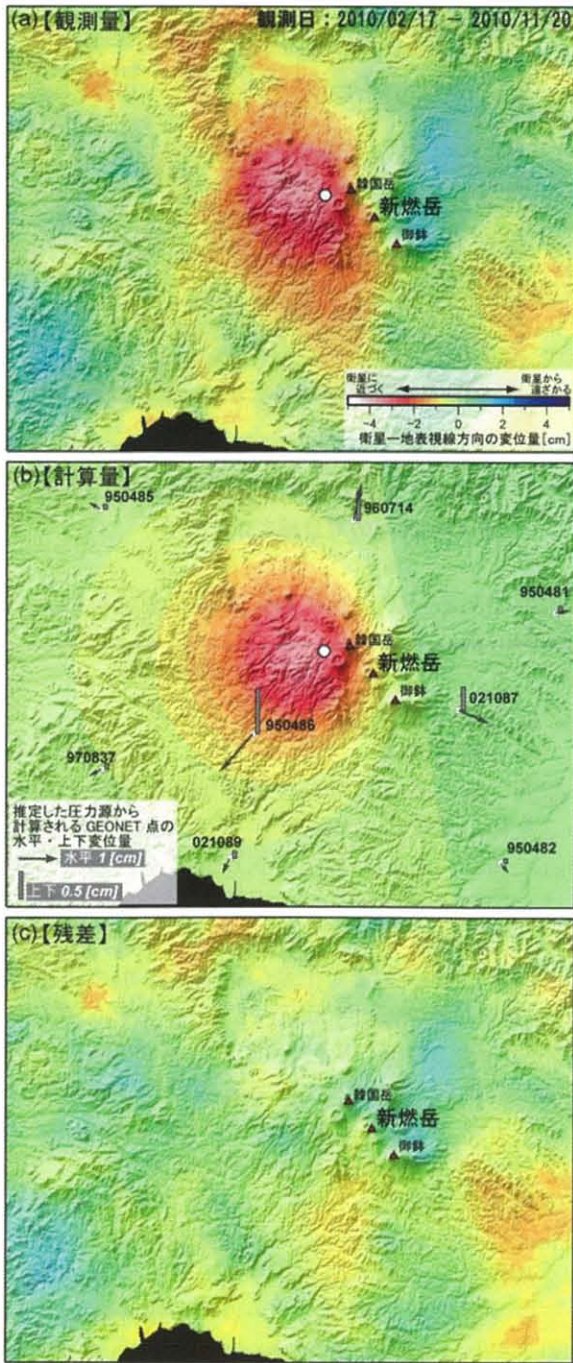


図-5 2010/2/17-2010/11/20 (図-3 (a)) の SAR 干渉解析結果を用いたモデリング結果. (a) 観測量. (b) 推定されたモデルからの計算量. (c) 残差.

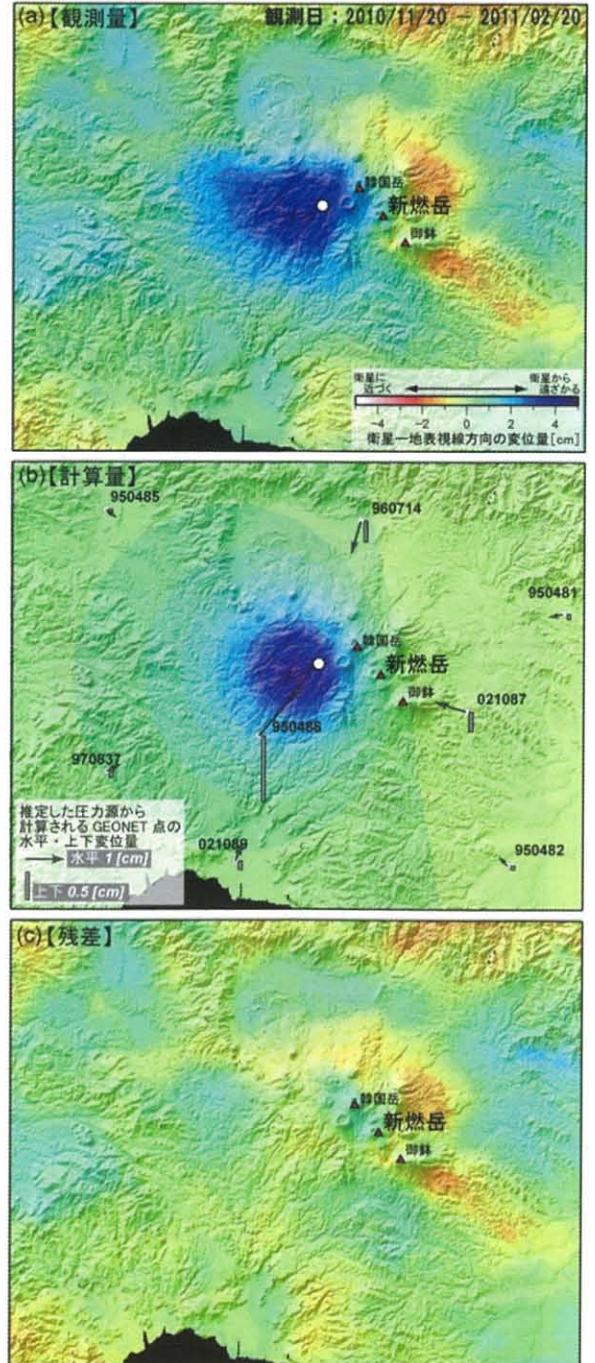


図-6 2010/11/20-2011/2/20 (図-4) の SAR 干渉解析結果を用いたモデリング結果. (a) 観測量. (b) 推定されたモデルからの計算量. (c) 残差.

表-1 推定されたモデルパラメータ

干渉ペア	経度 (1σ) [°]	緯度 (1σ) [°]	深さ (1σ) [km]	体積変化量 (1σ) [m <sup>3</sup> ]×10 <sup>6</sup>
2010/2/17 -	130.835 (0.003)	31.930 (0.004)	6.8 (0.5)	10.6 (0.8)
2010/11/20 -	130.824 (0.003)	31.920 (0.003)	6.1 (0.4)	-10.2 (0.8)
2010/11/20 -				
2011/2/20				

縮性の地殻変動とも、1つの圧力源で観測結果を良く説明できる。体積変化量は、膨張源、収縮源ともほぼ同規模の  $10 \times 10^6 \text{ m}^3$  と求まった。

#### 4. 議論

##### 4. 1 マグマ溜まりに関する考察

今給黎・大脇 (2011) は、GEONET 点に加えて、気象庁、(独) 防災科学技術研究所の霧島山周辺の GPS 観測点による地殻変動データも利用したインヴァー

ジョン解析により、膨張源及び収縮源を推定した(図-7 ■印). その結果、韓国岳の西方数 km、深さ6~8 km の深部に圧力源が推定されている. ●印は SAR 干渉データから求められた圧力源の位置を示すが、SAR 干渉データから推定された圧力源は、水平位置、深さとも、GPS の結果とほぼ調和的である.

図の誤差棒は  $3\sigma$  を示すが、推定のばらつきを考慮すると、膨張・収縮源は同一のマグマ溜まりを示すのであろう. マグマの蓄積に伴うマグマ溜まりの増圧に伴い地表が膨張し、その後マグマ溜まりから新燃岳へのマグマの上昇・噴出に伴いマグマ溜まりが減圧して地表では収縮が観測されたと解釈される.

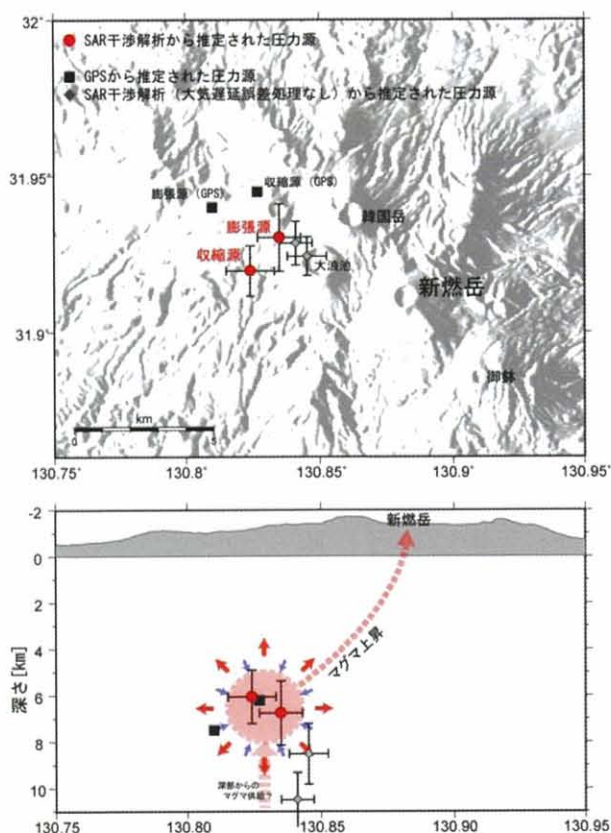


図-7 推定された膨張・収縮源の位置 (●印). 誤差棒は  $3\sigma$ . ■印は GPS から推定された膨張源及び収縮源の位置を、◆印は大気遅延誤差の低減処理を適用しない干渉結果を用いて推定された圧力源の位置を示す.

ここで、弾性体中に圧縮性の流体が貫入する問題を考える. 貫入する流体の体積 ( $\Delta V$ ) とそれに伴う周囲の弾性体の体積変化 ( $\Delta V_0$ ) は以下の関係式で表される.

$$\Delta V_0 / \Delta V = K_f / (K_f + (4\mu/3)) \quad (1)$$

ここで  $K_f$ ,  $\mu$  はそれぞれ、流体の体積弾性率、弾性

体の剛性率である. ここで、貫入したマグマが周囲の母岩とおなじ物性、つまり  $K_f = \lambda + 2\mu/3$  と仮定すると (ここで  $\lambda$  はラメ定数)、モデルから推定された体積変化量  $\Delta V_0 = 10 \times 10^6 \text{ m}^3$  は、 $\Delta V = 18 \times 10^6 \text{ m}^3$  のマグマ貫入で説明され得る. ただし  $\lambda = \mu$  とした.

#### 4. 2 大気遅延誤差低減処理の効果

図-8 に大気遅延誤差の低減処理を適用及び未適用の干渉画像をそれぞれ示す. 例えば、変動量及びその分布に大きな差がないと考えられる 2010/2/17-2010/11/20, 2007/12/28-2010/11/20, 2008/2/12-2010/11/20 のペアを比較すると、低減処理を適用していない画像の位相変化は、その大きさや空間分布にばらつきが見られる. 一方、低減処理後の結果では、変動量はいずれも最大 -4 cm 程度と未適用の結果と比べるとばらつきが小さい. 変位の空間的広がりもほぼ同心円状のパターンを示して画像間のばらつきは小さく、低減処理を施した干渉画像の方がより適切に地殻変動を抽出していると思われる.

低減処理の効果をさらに検証するため、GPS 観測による変動量との比較を簡単に試みた. ここでは GEONET 観測点の牧園 (950486) における変動量の比較を行った. 2010/2/17-2010/11/20 の期間の衛星視線方向の距離変化量は、GPS 観測では -1.0 cm と見積もられる. これに対して同地点における低減処理適用/未適用の干渉解析結果はそれぞれ、-1.3 cm, -2.3 cm となる. 低減処理を施した結果は GPS とほぼ整合的な結果となり、大気遅延誤差の低減に本処理が有効に機能していることがわかる. 同様に、2010/11/20-2011/2/20 の期間の衛星視線方向の距離変化量は GPS 観測で +0.8 cm となり、これに対する低減処理適用/未適用の干渉結果はそれぞれ、+1.8 cm, +2.3 cm となる. 前者の期間と比べると低減処理の効果は十分とは言えず、干渉画像にはなお大気遅延誤差が残存していると考えられる. しかしながら、低減処理を適用しない結果が変位量を過剰計測しているのに対して、変位を抑えるセンスに本処理が機能していることは確認できる.

大気遅延誤差の低減処理の有無により、圧力源の推定結果にも違いが生じる. 低減処理を行わないデータをもとに推定した圧力源を図-7 の◆印で示す. 系統的により東に、より深く推定される傾向にある. 低減処理前の方が、標高に相関した位相変化が重畳して変動分布の重心がより山側である東のほうにシフトし、圧力源もより東に推定されたと考えられる. また、低減処理前の方が広範囲に位相変化が生じており、より遠方の地表変位を説明するために力源が深めに見積もられたと推察される.

数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理を施した干渉解析事例はまだそれほど多くなく、これによりどれほどの低減効果があるのか、その定量

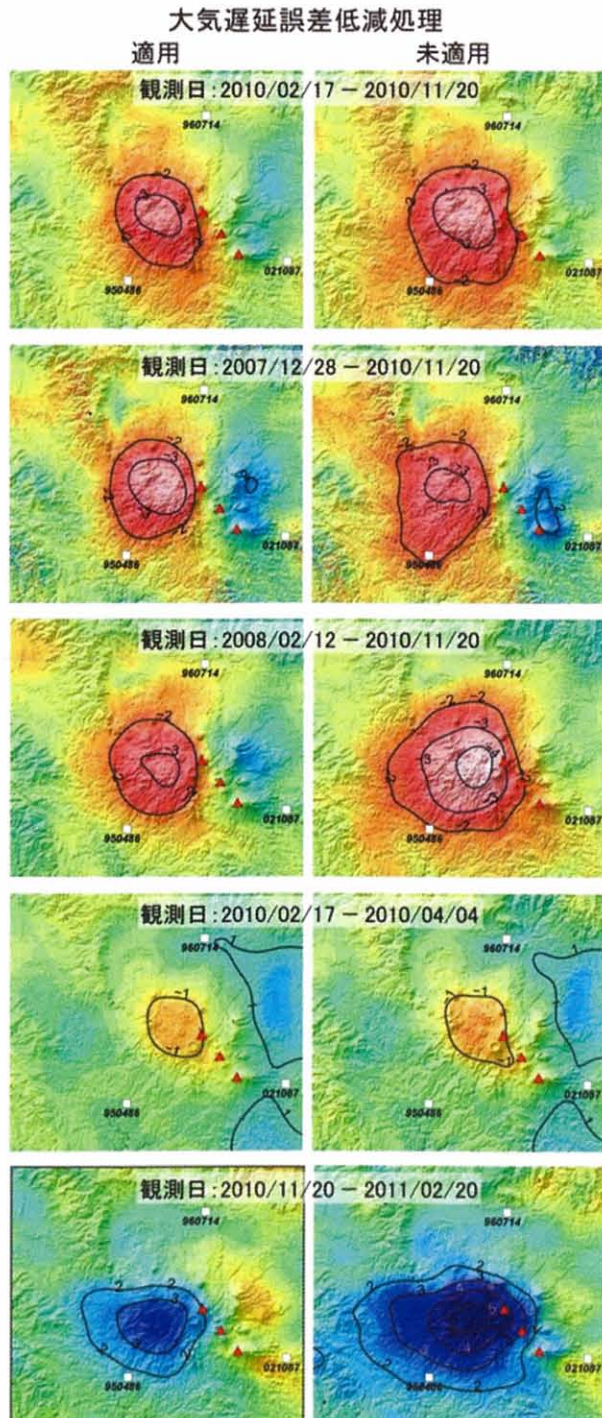


図-8 大気遅延誤差の低減処理を適用した干渉画像(左)と未適用の干渉画像(右)の比較. 等量線間隔は1 cm.

的評価についてはさらなる研究が必要である. ただし, 今回の事例に関しては, 低減処理を施した結果の方が, GPS 結果と整合的な面が見られ, 処理前後の干渉画像の比較からもより適切に地殻変動を捉えていると思われる. 今後, さらに多くの解析事例を積み, 数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理に関する考察を深めていくことが重要であろう.

## 5. まとめ

SAR データを用いた干渉解析により, 霧島山(新燃岳)の火山活動に伴う, 噴火前の膨張性及び噴火前後の収縮性地殻変動を捉えた. 球状圧力源モデル(茂木モデル)を仮定した地殻変動力源の推定によると, 膨張源, 収縮源はともに新燃岳の西北西約5 km, 深さ約6~7 kmの位置に求まった. この結果は, GPS データから推定された圧力源の位置とほぼ調和的である.

## 謝辞

本研究で用いたPALSARデータは, 火山噴火予知連絡会・衛星解析グループ(火山WG)を通じての提供及び国土地理院と宇宙航空研究開発機構(JAXA)との協定に基づいた提供を受けています. PALSARデータの所有権は宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び経済産業省にあります. この場を借りて, 御礼申し上げます.

## 参考文献

- Cervelli, P., M. H. Murray, P. Segall, Y. Aoki, and T. Kato (2001): Estimating source parameters from deformation data, with an application to the March 1997 earthquake swarm off the Izu Peninsula, Japan, *J. Geophys. Res.*, 106, 11217-11237.
- Efron, B. (1979): Bootstrap methods: another look at the jackknife, *Annals of Statistics*, 7, 1-26.
- 下司信夫, 宝田晋治, 筒井正明, 森健彦, 小林哲夫 (2010) : 霧島火山新燃岳2008年8月22日噴火の噴出物,

火山, 55, 53-64.

今給黎哲郎, 大脇温子 (2011): 火山GPS統合解析データに基づく霧島山の変動源モデル, 国土地理院時報, 121, 183-188.

井村隆介, 小林哲夫 (1991): 霧島火山群新燃岳の最近300年間の噴火活動, 火山, 36, 135-148.

Jónsson, S., H. Zebker, P. Segall and F. Amelung (2001): Fault slip distribution of the 1999 M7.2 Hector Mine earthquake, California, estimated from satellite radar and GPS measurements, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 92, No. 4, 1377-1389.

Mogi, K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthquake. Res. Inst., 36, 99-134.

種子田定勝, 松本征夫 (1959): 霧島火山新燃岳1959年2月の爆発, 地質学雑誌, 65, 703-704.