

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

宮城 洋介*・小澤 拓*・河野 裕希*

(2012 年 5 月 31 日受付, 2013 年 2 月 10 日受理)

Crustal Deformation Associated with the 2011 Eruption of Shinmoe-dake in Kirishima
Volcano Group, Southwestern Japan, Detected by DInSAR and GPS Measurements

Yousuke MIYAGI*, Taku OZAWA* and Yuhki KOHNO*

Shinmoe-dake in the Kirishima volcano group located in southwestern Japan started to erupt on January 19, 2011 and the eruption developed to Sub-Plinian eruption on January 26 and 27. Crustal deformations associated with the eruption, including pre-eruptive inflation, co-eruptive deflation, and post-eruptive inflation, were detected by DInSAR and GPS measurements. Geodetic information revealed by two different methods compensate each other and exhibit good agreement. The centers of these deformations for each period almost overlap and are located about 5 km west-northwest of the Shinmoe-dake crater. Assuming that the deformation source indicating magma chamber at a depth of 7.5 km was fixed at the same location and depth, volumes of the source are estimated to have increased $1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ for the pre-eruptive period, decreased $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ for the co-eruptive period, and increased $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ for the post-eruptive period. The co-eruptive volume decrease is comparable to the pre-eruptive volume increase and the emitted volume. However, the post-eruptive volume increase is obviously small and ceased after December 2011. The magma chamber has now returned to about 50 % of the eruptive volume of the 2011 eruption. If a volume increase start again at a similar rate, it will be about 10 months until the next 2011-size eruption.

Key words: Shinmoe-dake, Kirishima, GPS, DInSAR, Deformation

1. はじめに

霧島山・新燃岳は九州南部、鹿児島県と宮崎県の県境に位置する安山岩質の成層火山で、標高は最も高いところで約 1420 m、頂上には直径約 750 m の火口があり、御鉢火山と並び霧島火山群の中で近年その活動が最も活発な火山である (Fig. 1)。1716-1717 年に最大規模の噴火 (享保噴火) を起こして以来、1822 年、1959 年にそれぞれ中規模噴火を、1991 年や 2008 年を始めとして多くの小規模噴火を起こしてきたと記録されている (例えば井村・小林, 1991)。2011 年 1 月、新燃岳が噴火活動を開始した。本噴火は 2011 年 1 月 19 日、小規模なマグマ水蒸気爆発とみられる噴火から始まり、1 月 22 日の小規模な噴火を挟んで、1 月 26、27 日にはより規模が大きく爆発的な準プリニー式噴火、それ以降のブルカノ式噴火へと

移行した。これは、1959 年噴火以来 52 年振りの爆発的噴火であり、1822 年以来 189 年振りのマグマ噴火であった。1 月 27、28 日には火口内に溶岩が噴出し、その後の約 1 週間で急激に火口を満たした。2 月以降爆発的噴火の頻度は徐々に低下し、3 月以降はより低調になったが、一連の噴火による噴出物の体積はテフラと火口内溶岩の合計が $2.1-2.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ と見積もられ (東京大学地震研究所・防災科学技術研究所, 2012; 佐々木他, 2011)、噴火の規模としては、およそ 1 年半に渡って断続的に活動が続き、噴出物の体積が $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ に達した (井村・小林, 1991) とされている。享保噴火以来の大きさであり、依然として活動に注視する必要がある。

近年、活動的火山のモニタリングを目的として、マグマ活動に起因する地殻変動のデータが広く利用されてい

* 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1
防災科学技術研究所地震火山防災研究ユニット

3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-0006, Japan

Corresponding author: Yousuke Miyagi
e-mail: m_yousuke@bosai.go.jp

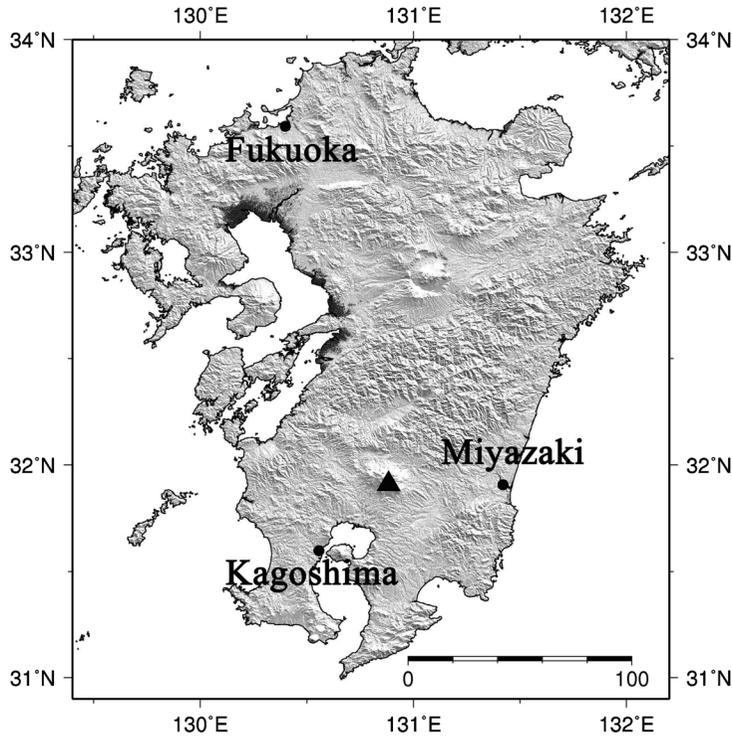


Fig. 1. Map of the study area. The triangle indicates Shinmoe-dake crater in the Kirishima Volcano Group.

る。これまでも多くの火山において、GPS (Global Positioning System) や人工衛星搭載の合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar, 以下 SAR) による地殻変動観測が行われ、地殻変動データを使って地下のマグマ活動が推定されている (例えば, Owen *et al.*, 2000; Massonnet *et al.*, 1995)。霧島山及びその周辺における過去の火山性地殻変動検出例としては小澤他 (2003) があるが、これは硫黄山周辺の局所的な地殻変動についての報告である。新燃岳では、1991年11月に発生した群発地震の際に光波測量と水準測量が行われたが、マグマ活動の推定にまでは至らなかった (東京大学地震研究所他, 1992)。

新燃岳を含む南九州地方の地殻変動は広域的に複雑なパターンを示す (Fig. 2)。国土地理院による GEONET 観測点によると 2009年12月以降、新燃岳周辺においてこのテクニクな地殻変動とは異なる局所的な膨張の変動が観測されており、2011年噴火に関係した活動であったと考えられる (Fig. 3)。防災科学技術研究所は 2010年4月より、新燃岳の東西2か所に設置した GPS 連続観測点において霧島山の火山活動モニタリングを目的とした観測を行っており、新燃岳周辺における GEONET 観測点と合わせて 13点から成る観測網によって GPS による活動監視を行ってきた。また複数の人工衛星搭載 SAR

データの位相情報を使った差分 SAR 干渉解析 (Differential Interferometric SAR, 以下 DInSAR 解析) による地殻変動観測も行われてきた。

本研究では、DInSAR 解析と GPS 観測によって検出された 2011年新燃岳噴火前後の火山性地殻変動を示し、それら地殻変動情報から見積もられる地下マグマ溜りの体積変化量から、2011年噴火活動の推移について議論する。

2. データ解析

2-1 DInSAR

新燃岳 2011年噴火前後の地殻変動を検出するために、ALOS/PALSAR と RADARSAT-2 によって取得された SAR データを用い、DInSAR 解析を行った。陸域観測技術衛星 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) は、日本の宇宙航空研究開発機構によって 2006年1月24日に打ち上げられ、2011年5月12日までのおよそ5年4ヶ月間運用されてきた地球観測衛星である。ALOS に搭載されている PALSAR (Phased Array-type L-band SAR) は L-band (波長 23.6cm) の SAR センサであり、差分干渉処理において高い可干渉性を実現する (Zebker and Villasenor, 1992)。Canadian Space Agency (CSA) によって 2007年12

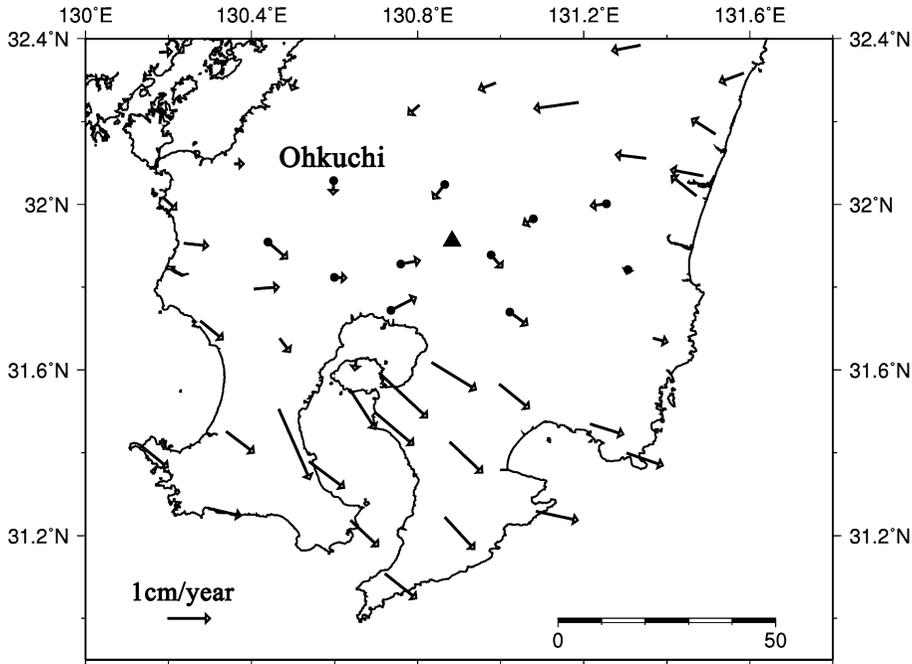


Fig. 2. Displacement velocity field caused by regional tectonics in normal period (2003/4/15–2005/12/31). The triangle indicates the location of Shinmoe-dake volcano. Dots indicate GPS sites which we used in this study.

月 14 日に打ち上げられ、現在も運用されている地球観測衛星・RADARSAT-2 は、同じく CSA によって打ち上げ・運用されてきた RADARSAT の後継機として、C-band (波長 5.6 cm) の SAR センサを搭載している。ALOS (46 日間) に比べて帰帰周期が 24 日間と短く、より高い時間分解能を実現する。

本研究では、噴火前 2007 年 12 月 28 日と 2010 年 2 月 17 日に取得された ALOS/PALSAR データ (期間①)、同じく噴火前 2010 年 2 月 17 日と 2010 年 11 月 20 日に取得された ALOS/PALSAR データ (期間②)、噴火前 2010 年 11 月 20 日と噴火後 2011 年 2 月 20 日に取得された ALOS/PALSAR データ (期間③)、そして噴火後 2011 年 3 月 3 日と 2011 年 11 月 22 日に取得された RADARSAT-2 データ (期間④) を使った DInSAR 解析を行い (Fig. 3, Table 1)、各期間における地殻変動の検出を行った。ALOS/PALSAR データの解析には、SIGMA-SAR ソフトウェア (Shimada, 1999) を使用し、干渉画像のアンラッピングには Ghiglia and Pritt (1998) によって提供されているブランチカット・アルゴリズム (Goldstein *et al.*, 1988) を用いた。なお、アンラッピングエラーの修正には奥山 (2010) の手法を使用した。また、RADARSAT-2 データの解析には GAMMA SAR Processor (Wegmüller and Werner, 1997) を使用した。初期干渉画像からの地形

稿除去処理には、国土地理院による 50 m メッシュ DEM 及び 10 m メッシュ DEM を使用した。軌道情報には高精度軌道情報を用いたが、それでも干渉画像に軌道縞が残存する場合に基線の再推定を行った。また、DInSAR 解析の結果は電離層遅延の影響を受ける場合があるが、本研究で得られた結果の干渉画像中には、電離層の影響と思われる長波長のノイズは見られないことから、電離層遅延による誤差は含まれないものと仮定する。

2-2 GPS

本研究で使用する GPS データは、霧島山周辺の GEONET 観測点 11 点と、防災科研の設置した GPS 連続観測点 2 点の合計 13 点におけるデータで、一日毎に決定される座標値から各 GPS 観測点における 3 成分 (東西, 南北, 上下) の地殻変動量を求めた。本研究では GPS 観測点の座標値推定のため、Bernese GPS Software (ver. 5.0) (Dach *et al.*, 2007) を用いた基線解析を行った。この際、日本周辺にある 5 点の IGS 観測点 (DAEJ・GUAM・SHAO・SUWN・YSSK) を強く拘束して霧島山周辺の GPS 観測点の座標値を推定した。サンプリングレートは 30 秒とし、軌道情報は IGS 精密暦を、座標系は ITRF2005 を使用した。

DInSAR による地殻変動データと同期させるために、SAR データが取得された 2010 年 11 月 20 日、2011 年 2

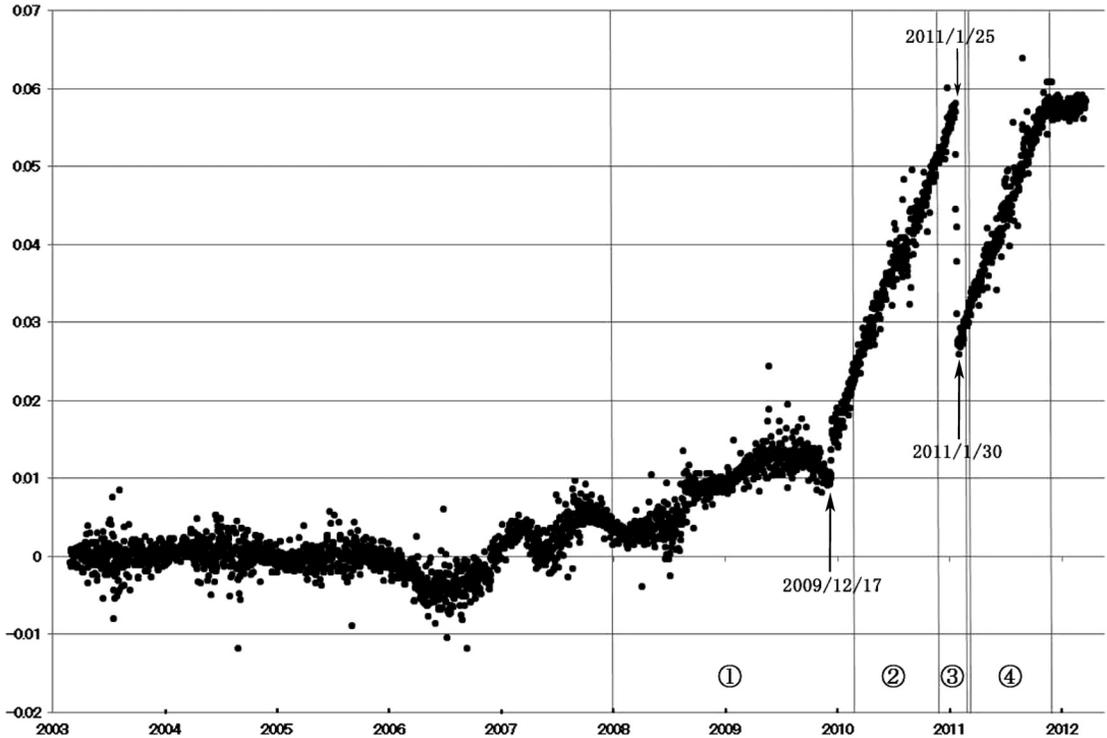


Fig. 3. Change of baseline length between Makizono and Ebino that are continuous GPS sites in GEONET. Time series are detrended, and annual and semi-annual components are removed. Periods ①, ②, ③, and ④ indicate SAR data acquisition periods. ① 2007/12/28–2010/2/17. ② 2010/2/17–2010/11/20. ③ 2010/11/20–2011/2/20. ④ 2011/3/3–2011/11/22.

Table 1. SAR data information, including acquisition dates of first and second images, sensor names, perpendicular baselines, and errors estimated in each interferogram.

	First image	Second image	Sensor	B_{perp} (m)	Error (cm)
Period①	2007/12/28	2010/2/17	ALOS/PALSAR	63	0.9
Period②	2010/2/17	2010/11/20	ALOS/PALSAR	785	1.0
Period③	2010/11/20	2011/2/20	ALOS/PALSAR	1002	1.5
Period④	2011/3/3	2011/11/22	RADARSAT-2	241	1.3

月 20 日, 2011 年 3 月 3 日, 2011 年 11 月 22 日の各日の前後 1 週間ずつ, 合計 15 日間の平均を各成分で求め, それらの差を各期間, 各成分の変位量とした。ただし, 防災科学技術研究所の 2 点の観測点は 2010 年 4 月 10 日から稼働しているため, 上記方法では噴火前 DInSAR ペア (上記期間 ②) と同期間の地殻変動が得られない。他の観測点も含め同期間の変化量が直線的であることから (Fig. 3), 噴火前の膨張レートが一定だったと仮定して直線近似を行い, その傾きから各観測点における 2010 年 2 月 17 日–2010 年 11 月 20 日の 276 日間の変位量を求めた。なお, 本研究では, 新燃岳から十分に遠く, 火山性地殻変動の影響が少ないと考えられる GEONET・大口観

測点を固定点としている。Fig. 2 で見られる広域のテクトニクスに起因する地殻変動速度を考慮すると, 本研究では長くても 9 か月間の地殻変動であることから, 広域のテクトニクスによる影響は十分小さいものであると考えることができる。よって以下で大口観測点を固定点とすることによって得られる地殻変動は, ローカルな火山活動に起因する地殻変動であると仮定する。

3. 結 果

Table 1 及び Fig. 3 で示された各期間において, DInSAR 解析によって検出された地殻変動を Fig. 4 に, GPS によって検出された地殻変動を Fig. 5 に示す。なお,

DInSAR データの誤差として、火口から十分に離れ変動量が 0 と仮定できる領域の 0 からのばらつきを求めたところ、期間①が 0.87 cm、期間②が 1.0 cm、期間③が 1.5 cm、そして期間④が 1.3 cm と見積もられた。GPS データの誤差は、南北成分で約 0.20 cm、東西成分で約 0.35 cm、そして上下成分で約 0.90 cm と見積もられた。また、GPS データから計算されたスラントレンジ変位量と GPS 観測点付近の DInSAR データによる変位量の差は、平均で 0.24 cm (期間①)、0.63 cm (期間②)、0.39 cm (期間③)、0.30 cm (期間④) となり、良い一致を示す。Fig. 3 より、2011 年 1 月の噴火に向けての急激な基線長の伸び、すなわち膨張が始まったのは 2009 年 12 月であるが、それ以前の期間 (期間①) の ALOS/PALSAR データを用いた DInSAR 解析によって得られた干渉画像を Fig. 4a に示す。Fig. 4a からは地殻変動は検出されず、同時期に顕著な基線長の変化が見られなかった GEONET による観測結果と調和的である。

Fig. 4b は噴火前ペア (期間②) から得られた干渉画像である。Fig. 4a と比べて、画像中にややノイズが多く見られ、得られた変動量の誤差は約 1.0 cm であった。新燃岳火口 (図中赤三角) から約 5 km 西北西を中心として、ノイズと比べて十分に大きな位相の変化が見られる。これは衛星-地面間の距離が縮まるパターン (緑→黄→赤) を示しており、最大で約 4 cm の、隆起を含む地殻変動が起こったと解釈することができる。同期間の GPS によって検出された地殻変動は、同じく火口から約 5 km 西北西に変動の中心 (図中緑星) を持ち、放射状に外向きの水平変動と概ね隆起の上下変動を示す (Fig. 5a と Fig. 5b)。

Fig. 4c は噴火時を挟んだペア (期間③) から得られた干渉画像である。Fig. 4a や 4b と比べて画像中にノイズが多く見られ、得られた変動量の誤差は約 1.5 cm であった。上記 Fig. 4b で示された噴火前の変動の中心と同じ領域で逆のパターン、衛星-地面間の距離が遠ざかるパターン (緑→青→赤) の位相変化が見られ、最大で約 4.5 cm の沈降を含む地殻変動が起こったと解釈することができる。同期間の GPS によって検出された地殻変動は、変動中心に対して放射状に向かってくる水平変動と概ね沈降の上下変動を表す (Fig. 5c と Fig. 5d)。

Fig. 4d は噴火後ペア (期間④) から得られた干渉画像である。噴火前、噴火中に変動の中心があった領域と同じ位置を中心に衛星-地面間の距離が縮まるパターン (緑→黄) の位相変化が見られ、噴火前と同様に隆起を含む地殻変動が、同じ場所で起こったと解釈することができる。ただし、地殻変動量はやや小さく、最大で衛星視線方向に約 2.5 cm であった。同期間の GPS によって検出

された地殻変動は、噴火前 (Fig. 5b) と同様に変動の中心から放射状に外向きの水平変動と概ね隆起の上下変動を表す (Fig. 5e と Fig. 5f)。3 期間それぞれにおいて、DInSAR 解析と GPS の結果は良い一致を示しており、どちらも同じ変動源による地殻変動を検出したものだと考えることができる。そしてその変動のパターンは、噴火前の膨張、噴火に伴った収縮、そして噴火後の膨張に分けることができ、変動の中心は全ての期間共通で、新燃岳から約 5 km 西北西にあるということが分かった。

4. 考 察

本研究では検出された地殻変動の変動源として、地下浅部にあるマグマ溜りを仮定し、Mogi (1958) による球状圧力源モデルを用いて、各期間に検出された地殻変動の説明を試みる。変動源のパラメータ (緯度、経度、深さ、体積変化量) は、以下の、観測値と計算値から得られる χ^2 を最小にするものを最適パラメータとし、グリッドサーチにより推定した。なお、マグマは非圧縮性流体であり、周囲の岩石のポアソン比は 0.25 と仮定する (Delaney and McTigue, 1994)。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{O_i - C_i}{\sigma_i} \right)^2$$

ここで、 N : 観測データ数、 O_i : i 番目の観測値、 C_i : i 番目の計算値、 σ_i : i 番目の観測値 O_i の誤差、とする。DInSAR の観測データ数は、Fig. 4 の主な変動領域を切り出した範囲 (Fig. 6) のデータを使用し、期間②は $N=8100$ 、期間③は $N=8095$ 、期間④は $N=13381$ となった。変動源の位置を固定せず、期間毎に求めたパラメータを Table 2 に (Model 1)、全期間を通して変動源の位置に変化がないと仮定し、全期間の DInSAR と GPS データを同時に用いて求めたパラメータを Table 3 に示す (Model 2)。Fig. 7 は両モデルから得られた計算値と観測値の残差図であり、どちらも計算値をよく説明できている。また、両モデルによる最適パラメータ及び残差図を比較したところ、大きな違いがないことが分かる (Table 2, Table 3, Fig. 7)。さらに、観測された干渉画像から、全期間を通して変動の中心がほとんど変化していないことが分かっており、本研究では変動源はその位置を変えずに体積を変化させた (Model 2) と仮定し、噴火前、噴火中及び噴火後の変動源の体積変化量を見積もる (Table 3)。なお、得られた最小の χ^2 を χ^2_{\min} とし、各パラメータを最適パラメータから変化させた時の差 $\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi^2_{\min}$ が 1 になる時のパラメータの幅を、各パラメータの誤差とし (Bevington, 1969)、Table 2、Table 3 に示した。全期間の DInSAR 及び GPS データを用いたモデリングの結果、2011 年噴火に関与した主マグマ溜りの位置は新燃岳

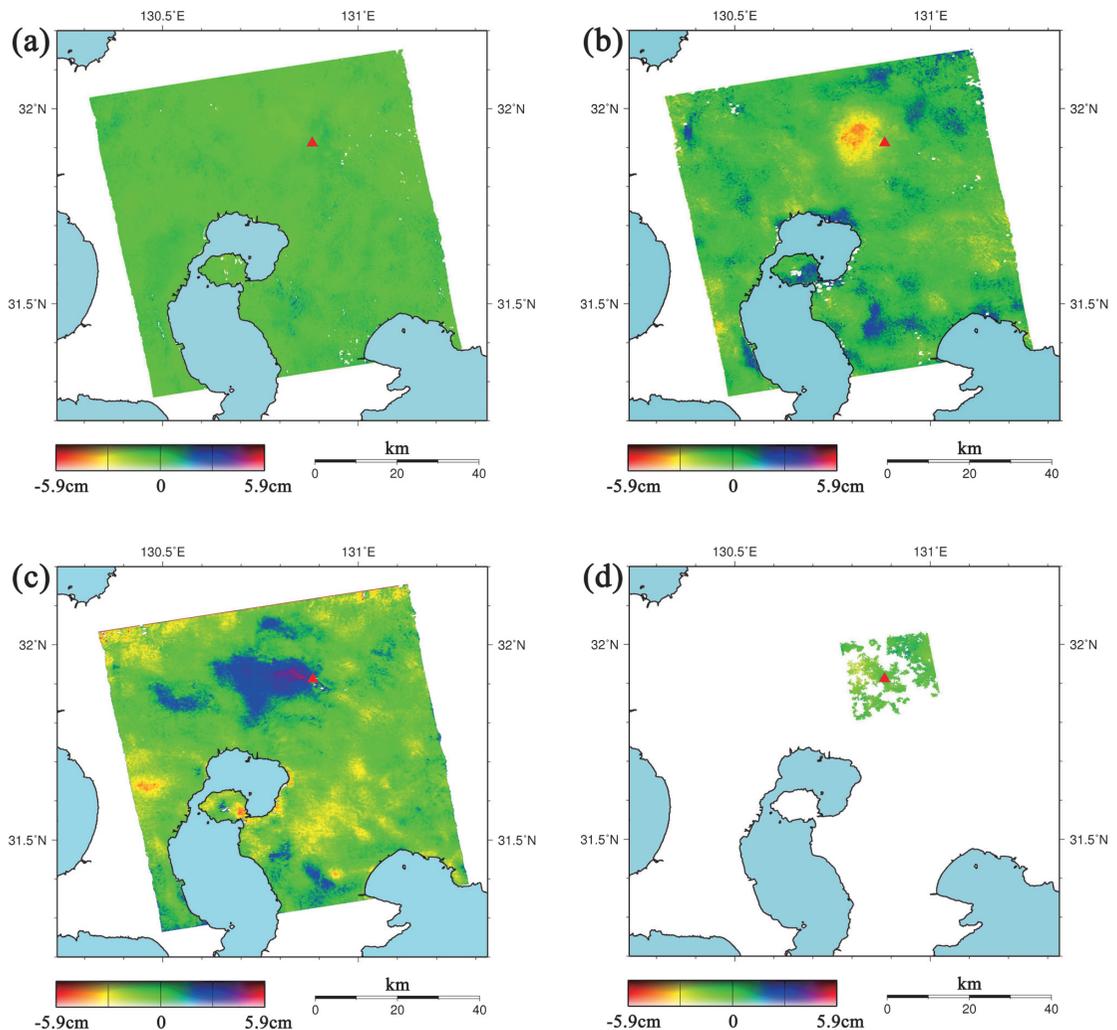


Fig. 4. (a) Interferogram produced using ALOS/PALSAR data acquired on 2007/12/28 and 2010/2/17. (b) Interferogram produced using ALOS/PALSAR data acquired on 2010/2/17 and 2010/11/20. The color cycle of green-yellow-red indicates a shortening of the satellite-ground distance. (c) Interferogram produced using ALOS/PALSAR data acquired on 2010/11/20 and 2011/2/20. Another color change is found in similar area as (b) and the color cycle of green-blue-red that is opposite pattern of (b), indicating an elongation of the satellite-ground distance. (d) Interferogram produced using RADARSAT-2 data acquired on 2011/3/3 and 2011/11/22. A slight color change (green-yellow) is found in similar area as (b) and (c).

火口から約 5 km 西北西の地下 7.5 km であると推定された。

噴火前ペア (期間②) の干渉画像中 (Fig. 4b), 変動の中心周辺を拡大したものを Fig. 6a に, Model2, Model 1 によってシミュレートされた干渉画像をそれぞれ Fig. 6b, Fig. 6c, 観測値 (Fig. 6a) との残差をそれぞれ Fig. 7a, Fig. 7b に示す。また同期間の GPS による観測値と Model 2 による計算値を用いたベクトル図を Fig. 5a, Fig.

5b に示す。ここで Fig. 5a 中, 新燃岳西側にある万膳観測点において観測値と計算値に有意な違いが見られ, 単一の球状圧力源モデルでは説明しきれていない可能性が考えられるが, 本研究では体積変化量推定を単純化するために, より複雑なモデルは採用しない。推定されたマグマ溜りにおける期間②の体積変化量は, $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ の増加と見積もられ, 噴火前の膨張レートが一定であったと仮定すると, 1 日毎の膨張レートは $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$

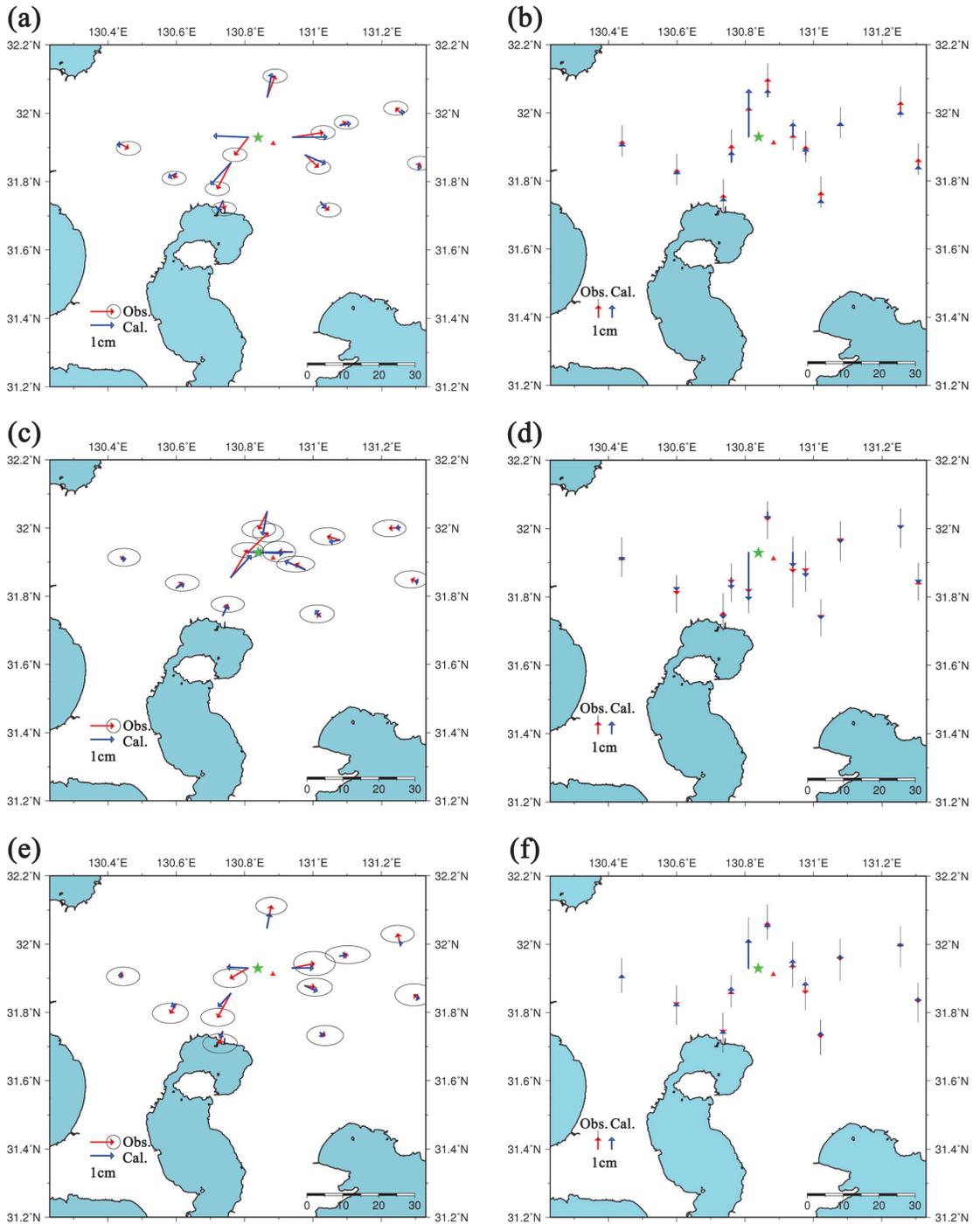


Fig. 5. (a) Horizontal and (b) vertical displacement vectors detected by GPS data for 2010/2/17–2010/11/20. (c) Horizontal and (d) vertical displacement vectors detected by GPS data for 2010/11/20–2011/2/20. (e) Horizontal and (f) vertical displacement vectors detected by GPS data for 2011/3/3–2011/11/22. Red arrows indicate observed displacements, and blue arrows indicate displacements calculated using Mogi [1958], in which we used best fit parameters estimated by grid-search method. Error ellipses and error bars indicate 68.3% confidence regions. The red triangle indicates the location of Shinmoadake volcano. The green star indicates the location of an estimated deformation source.

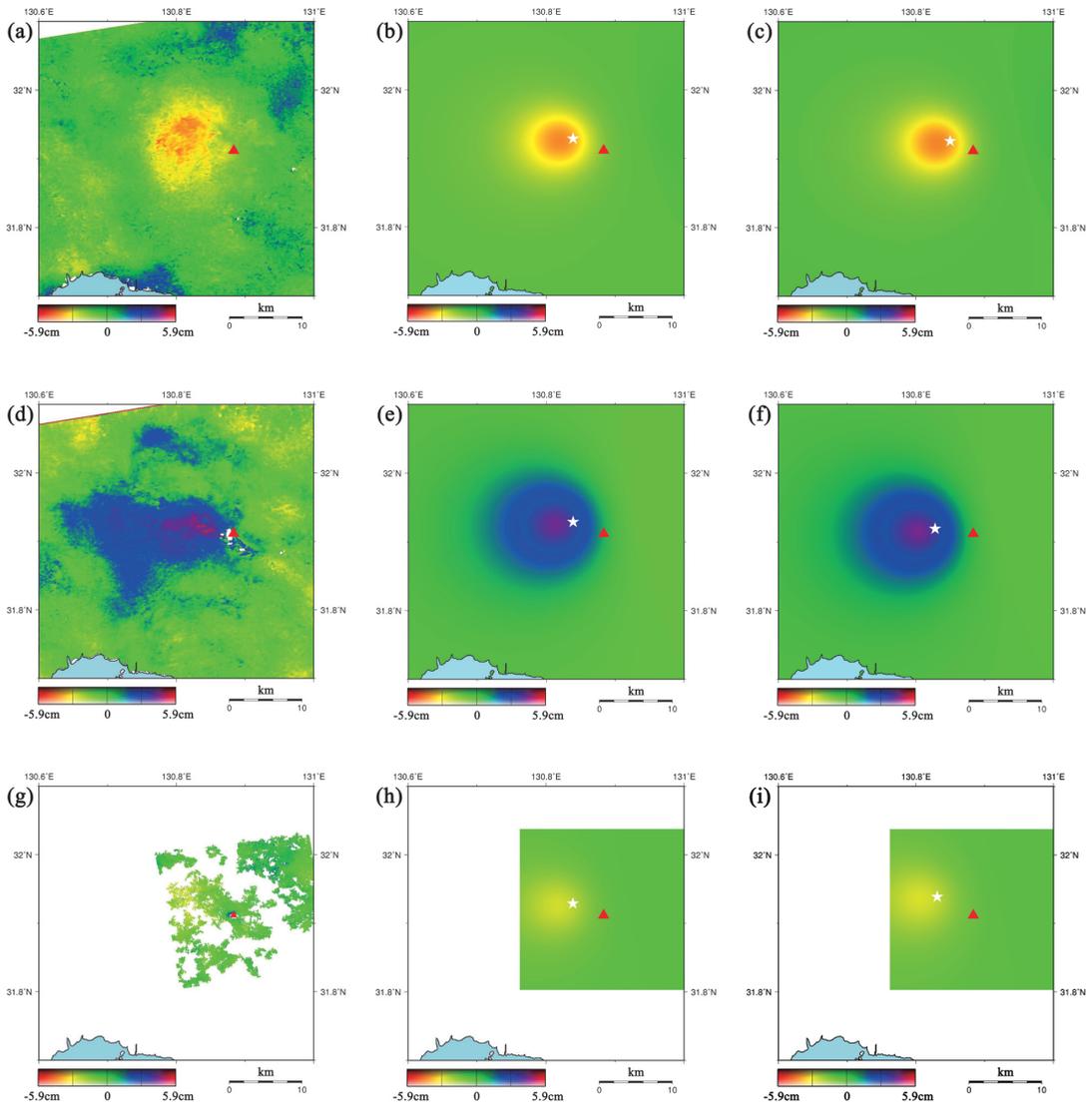


Fig. 6. (a) Enlarged main deformation areas in Fig. 4b. (b), (c) Interferograms for 2010/2/17–2010/11/20 calculated using Model 2 and Model 1. (d) Enlarged main deformation areas in Fig. 4c. (e), (f) Interferograms for 2010/11/20–2011/2/20 calculated using Model 2 and Model 1. (g) Enlarged main deformation areas in Fig. 4d. (h), (i) Interferograms for 2011/3/3–2011/11/22 calculated using Model 2 and Model 1. The red triangle indicates the location of Shinmoe-dake volcano. The white star indicates the location of an estimated deformation source.

と見積もられる。

噴火時を挟んだペア（期間③）の干渉画像中（Fig. 4c）、変動域を拡大したものを Fig. 6d に、Model2、Model 1 によってシミュレートされた干渉画像をそれぞれ Fig. 6e、Fig. 6f、観測値（Fig. 6d）との残差をそれぞれ Fig. 7c、Fig. 7d に示す。また同期間の GPS による観測値と Model2 による計算値を用いたベクトル図を Fig. 5c、Fig. 5d に示す。噴火を挟んだ期間③における変動源の体積変化量

は $1.2 \times 10^7 \text{m}^3$ の減少と見積もられる。

噴火後ペア（期間④）の干渉画像中（Fig. 4d）、変動の中心周辺を拡大したものを Fig. 6g に、Model2、Model 1 によってシミュレートされた干渉画像をそれぞれ Fig. 6h、Fig. 6i、観測値（Fig. 6g）との残差をそれぞれ Fig. 7e、Fig. 7f に示す。また同期間の GPS による観測値と Model 2 による計算値を用いたベクトル図を Fig. 5e、Fig. 5f に示す。推定されたマグマ溜りにおける期間④の体

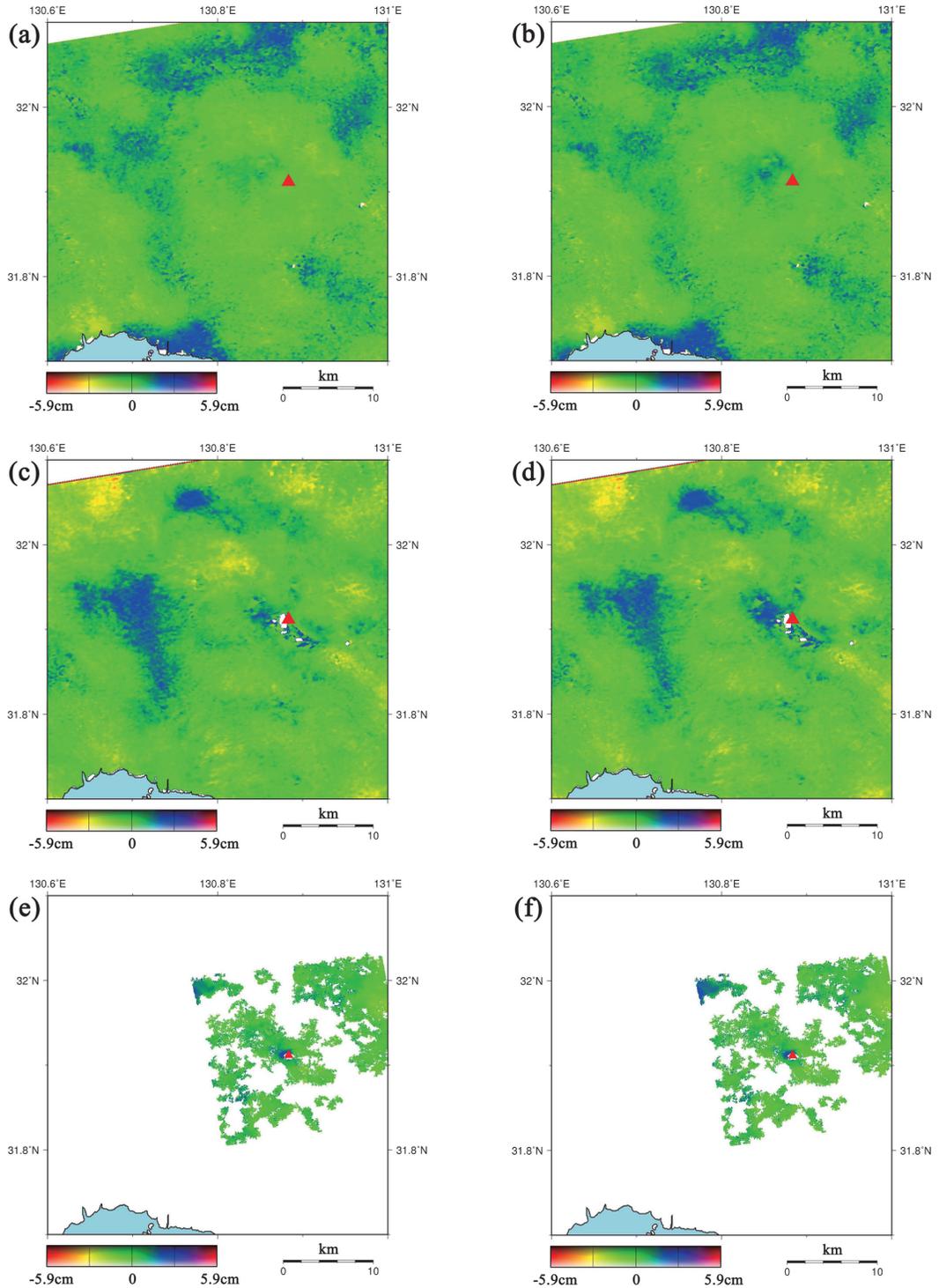


Fig. 7. (a), (b) Residuals between observed (Fig. 6a) and calculated interferograms produced using Model 2 and Model 1 (Figs. 6b and 6c) for 2010/2/17–2010/11/20. (c), (d) Residuals between observed (Fig. 6d) and calculated interferograms produced using Model 2 and Model 1 (Figs. 6e and 6f) for 2010/11/20–2011/2/20. (e), (f) Residuals between observed (Fig. 6g) and calculated interferograms produced using Model 2 and Model 1 (Figs. 6h and 6i) for 2011/3/3–2011/11/22.

Table 2. Best fit parameters estimated using Model 1.

	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	Volume change (m ³)	RMS (cm)
Period②	31.926N±0.004	130.850E±0.004	7.5±0.3	+1.2±0.05×10 ⁷	0.94
Period③	31.919N±0.003	130.828E±0.004	7.4±0.3	-1.2±0.05×10 ⁷	1.35
Period④	31.939N±0.003	130.831E±0.002	8.4±0.1	+0.90±0.02×10 ⁷	0.75

Table 3. Best fit parameters estimated using Model 2.

	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	Volume change (m ³)	RMS (cm)
Period②	31.929N±0.002	130.839E±0.002	7.5±0.1	+1.2±0.05×10 ⁷	0.95
Period③	31.929N±0.002	130.839E±0.002	7.5±0.1	-1.2±0.05×10 ⁷	1.36
Period④	31.929N±0.002	130.839E±0.002	7.5±0.1	+0.70±0.02×10 ⁷	0.74

積変化量は、 $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ の増加と見積もられ、噴火後の膨張レートが一定であったと仮定すると、1日毎の膨張レートは $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ と見積もられる。なお、Fig. 4d, Fig. 6g中、火口近傍の北側から西側にかけてのごく限られた領域に、衛星-地面間の距離が遠ざかるパターン(緑→青)の位相変化が見られる。これは火口から約5km西北西を中心とする地殻変動とは別の変動源に起因するものと見られ、残差図(Fig. 7e, Fig. 7f)でも同様に見られる。これは期間④において、火口直下の非常に浅い部分にあるマグマ溜りが、溶岩の噴出に伴い収縮している可能性を示唆している。

Fig. 3より、顕著な噴火前膨張は2009年12月17日から2011年1月25日まで継続していたと考えられ、この間の膨張レートが一定であったと仮定すると、噴火前のマグマ溜りにおける体積増加量はおよそ $1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ であったと見積もることができる。次に噴火時を挟んだ期間の体積変化量は $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ の減少と見積もられたが、ここで使用したPALSARデータの取得日が噴火の約2か月前と約1か月後であり、期間③には噴火直前までと噴火直後からの膨張期が含まれる。Fig. 3から、膨張は1月25日まで続き、噴火後1月30日から再膨張が始まっていると見ることができることから、期間③は以下の3つの期間に分けられる。

- I. 2010/11/20-2011/1/25
- II. 2011/1/25-2011/1/30
- III. 2011/1/30-2011/2/20

ここでIとIIIの期間は膨張をしており、その膨張レートが上記期間②と④から得られたレート($4.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ と $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$)であると仮定すると、2の期間における体積減少量は、 $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ と見積もられる。1月26, 27日の準プリニー式噴火で噴出したテフラの岩石換算体積はおよそ $0.70-1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ と見積もられ(東京大学地震研究所・防災科学技術研究所, 2012)、1月31日ま

で火口内に蓄積された溶岩の体積はおよそ $1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ と見積もられる(佐々木他, 2011)。従って、噴火に伴った地殻変動から推定されるマグマ溜りの体積減少量と噴出物体積のオーダーは等しく、同程度の量であったと解釈することができる。また、マグマの圧縮性を考慮に入れた場合でも、噴出物体積とマグマ溜りにおける体積変化量の差は2.3倍程度とされており(Segall, 2010)、同様の解釈が成り立つと言える。

噴火後の膨張レートが一定であると仮定すると、噴火後マグマの再蓄積が開始された1月30日から11月22日までの体積増加量は $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ と見積もられる。これは噴火前の体積増加量($1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$)や噴火時の体積減少量($1.5 \times 10^7 \text{ m}^3$)と比べて明らかに少なく、2011年11月22日時点で、噴火時の体積減少量の約50%に相当する。噴火後の体積増加レート約 $8.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{月}$ を考慮すると、同様のペースでマグマ溜りへのマグマの再蓄積が続けば、2012年10月頃までに再び2011年噴火前のマグマ蓄積量に近づいていくと思われたが、その後のGPS観測の結果から、2011年12月以降膨張のペースが鈍化していることが明らかになった。これは噴火後継続していたマグマ溜りへの深部からのマグマの供給が減少、もしくは停止したことに起因すると考えられ、2012年5月現在も再膨張は始まっていない。

5. まとめ

2011年1月に始まった霧島山・新燃岳の噴火活動に対して、人工衛星搭載のSARセンサを用いたDInSARデータと現地GPSデータから、本噴火に伴った地殻変動を検出した。検出された地殻変動は、DInSAR, GPS共に、噴火前の膨張、噴火に伴った収縮、噴火後の膨張のパターンが見られた。変動の中心は3期間共に新燃岳火口から西北西に約5km離れた場所であり、同一の変動源が関与したものと考えられる。これらの地殻変動は地下マグ

マ溜りの膨張・収縮に起因するものであると仮定し、得られた DInSAR, GPS データを使って、新燃岳火口から約 5 km 西北西の地下 7.5 km にあるマグマ溜りの、各期間における体積増加・減少量を Mogi モデルを仮定して見積もった。その結果、噴火前のおよそ 1 年間で約 $1.7 \times 10^7 \text{m}^3$ の体積増加があり、その後噴火が発生し、噴火時に少なくとも $1.5 \times 10^7 \text{m}^3$ の体積減少があったことが分かった。噴火後は同じマグマ溜りの体積増加が確認され、地表への噴出は減ったが地下マグマ溜りへの再充填が開始されたと解釈される。その体積増加量は 2011 年 1 月 30 日-2011 年 11 月 22 日期間で約 $8.0 \times 10^6 \text{m}^3$ と見積もられ、2011 年噴火直前の状態で回復するには、同じレートでさらに 10 か月程度必要となる。しかし、GPS 観測の結果 2011 年 12 月以降の膨張レートが鈍化していることが明らかになっており、現在はマグマ溜りへの深部からのマグマの供給が減少していると思われる。2011 年 12 月時点で約 50% の再蓄積がされており、今後マグマの供給が再開され 2011 年規模の噴火に繋がる可能性は無視できない。そのため、今後も継続的な地殻変動モニタリングと地下マグマ溜りの体積増加レートの推定が必要となる。また、推定されるマグマ溜りの位置が火口からおよそ 5 km 離れていることから、マグマ溜り-火口間でマグマの移動があったと考えられる。このマグマの移動が噴火時に短時間で起こったものなのか、噴火前から徐々に起こっていたものなのかは現在のところよく分かっておらず、今後種々のデータから明らかにする必要がある。

謝 辞

本研究で使用した ALOS/PALSAR データの所有権は経済産業省及び JAXA が有するものであり、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を、PIXEL を通して配布されたものである。RADARSAT-2 データの所有権は CSA 及び MacDonald Dettwiler and Associates (MDA) が有するものであり、株式会社イメージワンから配布されたものである。また、本研究の一部は、科学技術振興調整費「平成 23 年霧島山新燃岳噴火に関する緊急調査研究」において実施された。

査読者である九州大学・松島 健准教授と北海道大学・高橋浩晃准教授には、本論文を改訂するにあたり大変貴重な御意見や御助言をいただきました。記して感謝の意を表します。

引用文献

Bevington, P. R. (1969) Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, Mcgraw-Hill, New York.

- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez and M. Meindled (2007) Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute of University of Bern, 612.
- Delaney, P. T. and McTigue, D. F. (1994) Volume of magma accumulation or withdrawal estimated from surface uplift or subsidence, with application to the 1960 collapse of Kilauea volcano, *Bull. Volcanol.*, **56**, 417-424.
- Ghiglia, D. C. and Pritt, M. D. (1998) Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software, Jhon Wiley & Sons, Inc., ISBN0-471-24935-1.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A. and Werner, C. L. (1988) Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, *Radio Sci.*, **23**, 4, 713-720.
- 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.
- Massonnet, D., Briole, P., and Arnaud, A. (1995) Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, **375**, 567-570.
- Mogi, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **36**, 99-134.
- 奥山 哲 (2010) ブランチカット法で生じた SAR 干渉画像中のアンラップエラーの修正, *測地学会誌*, **56**, 4, 169-177.
- 小澤 拓・宗包浩志・矢来博司・村上 亮 (2003) JERS-1 の干渉 SAR により検出された霧島火山群・硫黄山周辺の局所的な地殻変動, *火山*, **48**, 507-512.
- Owen, S., Segall, P., Lisowski, M., Miklius, A., Murray, M., Bevis, M. and Foster, J. (2000) January 30, 1997 eruptive event on Kilauea volcano, Hawaii, as monitored by continuous GPS, *Geophys. Res. Lett.*, **27** (17), 2757-2760.
- 佐々木寿・磯部浩平・本間信一・阪上雅之・向山 栄・中田節也・小林哲夫・村上 亮 (2011) 霧島山新燃岳における斜め写真を用いた火口内溶岩の体積推定, *日本火山学会講演予稿集 2011*, 13, 2011-10-02
- Segall P. (2010) Earthquake and volcano deformation, Princeton Univ. Pr.
- Shimada, M. (1999) Verification processor for SAR calibration and interferometry, *Adv. Space Res.*, **23** (8), 1477-1486.
- 東京大学地震研究所・京都大学防災研究所・京都大学理学部・鹿児島大学理学部 (1992) 霧島火山群・新燃岳の 1991 年群発地震と微噴火, *火山噴火予知連絡会会報*, **52**, 79-94.
- 東京大学地震研究所・防災科学技術研究所 (2012) 第 122 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) 霧島山, 50.
- Wegmüller, U., and Werner, C. L. (1997) Gamma SAR processor and interferometry software, in Proceedings of the 3rd ERS Symposium, Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-414, 1686-1692.
- Zebker, H. A., Villasenor, J. (1992) Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, **30** (5), 950-959.

(編集担当 青木陽介)