

相対重力および地殻変動データから推定した 2015 年 8 月桜島急膨張イベントの圧力源  
Pressure Source of the Rapid Inflation Event in Sakurajima Volcano in August 2015,  
Modeled from Relative Gravity and Ground Deformation Data

○栗原剛志・風間卓仁・橋本学・山本圭吾・井口正人

○Tsuyoshi KURIHARA, Takahito KAZAMA, Manabu HASHIMOTO, Keigo  
YAMAMOTO, Masato IGUCHI

Sakurajima Volcano inflated rapidly on 15 August 2015, and this inflation event was observed by many geodetic instruments. The observed deformation data was modeled by the intrusion of a dike (e.g., Hotta et al., 2016; Morishita et al., 2016), but no one has utilized the gravity data observed at the southern Sakurajima (Kazama et al., 2016) in modeling the inflation source. We were thus motivated to model a new inflation source and its density value using all of the available geodetic data including the gravity data. We found that a dike with its volume and density values of  $1.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  and  $1.7 \text{ g/cm}^3$ , respectively, robustly explains the observed geodetic data.

### 1. 2015 年 8 月の桜島急膨張イベント

桜島火山では 2015 年 8 月 15 日に火山性地震が増加し、山体膨張を示す傾斜・伸縮変化が観測された (気象庁, 2015)。GNSS や InSAR といった地殻変動データの解析によると、この山体膨張は北北東—南南西に走向をもつダイクの貫入によって説明できることが分かった (国土地理院, 2015; Hotta et al., 2016; Morishita et al., 2016; 小澤ほか, 2016)。また、桜島南部・有村観測坑道局舎の相対重力計 CG-3M ではこの急膨張イベント時に  $-5.86 \pm 0.27 \mu\text{Gal}$  の微小な相対重力変化が検出された (風間ほか, 2016)。

この膨張イベントの物理モデリングに関しては、議論すべき点が主に 2 つある。1 点目は、取り扱う測地データの種類によってダイクのパラメーターが異なる、ということである。例えば、Hotta et al. (2016) は GNSS・傾斜・伸縮データを使用しており、ダイク中心点の深さを海拔下 1.3 km、体積変化量を  $2.72 \times 10^6 \text{ m}^3$  と見積もっている。一方、InSAR データを用いた解析 (Morishita et al., 2016; 小澤ほか, 2016) によると、深さは 0.8 km、体積は  $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$  前後でほぼ一致している。ダイクの位置が深いほど体積変化量も大きくなる傾向が見られ、これら 2 つのパラメーターにトレードオフの関係が存在している可能性がある。

2 点目は、有村で観測された相対重力変化データがダイク推定インバージョンに使用されていない、ということである。というのも、重力観測は

地下の密度変化を直接検出できる観測手法であり、今回の場合も重力データからダイク内密度を決定できる可能性がある。ダイク内密度を推定できれば、この急膨張イベントを引き起こした物質の組成を知る手がかりとなり、火山活動の物理プロセスをより深く理解できると期待される。

そこで本研究は、できるだけ多くの地殻変動データを用いて 2015 年 8 月桜島膨張イベントの圧力源を推定し、地殻変動データの種類と圧力源パラメーターの相関関係を詳細に調べる。また、複数の地殻変動データを統一的に解析することによってロバストな圧力源パラメーターを推定し、かつ有村の重力変化を説明しうる密度パラメーターを決定する。

### 2. 使用データおよびモデル設定

本研究で使用する測地データは以下の通りである: ① GNSS 観測点で得られた水平変位 (Hotta et al., 2016; Morishita et al., 2016)、② GNSS 観測点で得られた鉛直変位 (Morishita et al., 2016)、③ InSAR で得られた鉛直・東西変位の空間分布、④ 傾斜計で得られた水平方向の傾斜変化 (Hotta et al., 2016)、⑤ 伸縮計で得られた火口方向・火口直交方向の歪変化 (Hotta et al., 2016)、⑥ CG-3M 相対重力計で得られた重力変化 (風間ほか, 2016)。

また、本研究では 2015 年 8 月の膨張イベントを 1 個の矩形ダイクによって再現する。ダイクを表

現する8つのパラメーター（長さ・幅・深さ・開口量・緯度・経度・走向・傾斜角）はグリッドサーチによって広い範囲を網羅し、評価関数が最小となるパラメーターセットを最適解とする。ダイクの開口に伴う地殻変動はOkada (1992)によって、重力変化はOkubo (1992)によって計算する。この際、ポアソン比0.25の半無限均質媒質を仮定し、ダイクの深さに観測点標高を足し合わせることで火山地形の影響を経験的に考慮する。

### 3. グリッド検索によるダイクパラメーター推定

まず本研究では、①～⑤の地殻変動データを別々に用いてダイクパラメーターを推定する。この際、観測値と計算値の差分を取り、この残差二乗和を評価関数  $f_i$  として定義する（添え字  $i$  は各地殻変動データに付した番号を意味する）。

次に、①～⑤の地殻変動データを全て用いてダイクパラメーターを推定する。この際、評価関数  $f$  を以下のような無次元量で定義する。

$$f = \sum_i ( f_i / \sigma_i^2 n_i )$$

ただし、 $\sigma_i$  は各地殻変動データの典型的な誤差量 (Hotta et al., 2016; Morishita et al., 2016)、 $n_i$  は各地殻変動データの個数である。

図1はダイクパラメーターの長さについて評価関数  $f$  の分布を等高線によって示し、各地殻変動データを個別に使用した時の最適パラメーターを各シンボルで表現している。本来であればそれぞれの最適パラメーターが一致して1箇所に集まると期待されるが、この図では最適パラメーターがそれぞれ大きく離れている。この原因としては、第2章で述べたモデル設定（例えば半無限媒質という仮定や経験的地形補正の手法）が現実の桜島火山を正しく表現していないためと考えられる。より現実的な圧力源推定を行うには有限要素法などの高度な計算技術が不可欠であるが、ここでは評価関数の定義を変更することでロバストなパラメーター推定を試みる。

### 4. モデル誤差を考慮に入れたパラメーター推定

現状のモデル設定では観測量の大きなデータほどモデル誤差が大きくなっていると考えられる。そこで本研究は評価関数を以下の通り再定義する。

$$f' = \sum_i f_i$$

$$f_i = \sum_j ( x_{ij}^{obs} - x_{ij}^{cal} )^2 / \sigma_{ij}^2$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_i \quad \text{for } |x_{ij}^{obs}| < 10 \sigma_i$$

$$\sigma_{ij} = 0.1 |x_{ij}^{obs}| \quad \text{for } |x_{ij}^{obs}| \geq 10 \sigma_i$$

このような評価関数を用いてグリッドサーチ計算を実施したところ、各地殻変動データおよび全ての地殻変動データを用いたときの最適パラメーターは図1よりも互いに近い場所に集まることが確認された。これは再定義された評価関数の式によってモデル誤差の影響を低減化できたことを意味している。

図2は新たな評価関数  $f'$  によって得られたダイクの位置と、GNSS 水平変動の観測値（黒矢印・赤矢印）および計算値（白矢印）である。ダイクの開口量は2.93 mで先行研究よりも1.5倍程度大きいものの、ダイク体積は  $1.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  で先行研究と同等の値を見積もることができた。さらに、このダイクパラメーターとOkubo (1992)の式によって重力変化を計算すると、ダイク内密度が  $1.7 \text{ g/cm}^3$  のときに重力観測値を再現できることが分かった。この密度は一般的なメルトの密度よりも小さく、減圧に伴うマグマの発泡を示している可能性がある。

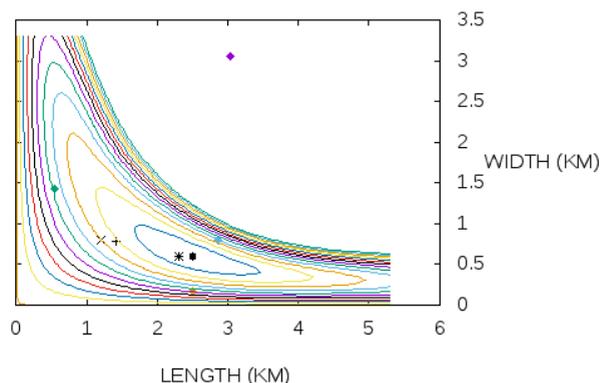


図1: ダイクの長さおよび幅に対する評価関数  $f$  の変動分布、および各地殻変動データから得られた最適ダイクパラメーター。

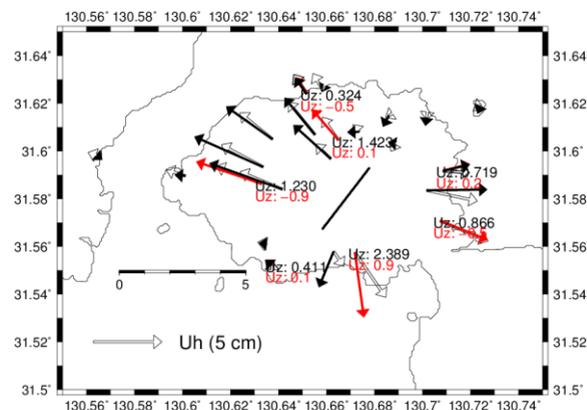


図2: 評価関数  $f'$  によって得られたダイク、およびGNSSデータの観測値と計算値。