

## 桜島ブルカノ式噴火にともなう地盤収縮過程の再検討

## Reanalysis of the ground deflation process caused by Vulcanian eruptions at Sakurajima volcano

○石井杏佳・井口正人

○Kyoka ISHII, Masato IGUCHI

Ground deformation associated with eruptions at Sakurajima volcano has been recorded by tiltmeters and extensometers. We re-analyzed time-series tilt and strain data from relatively large events at the Minami-dake crater to characterize the temporal patterns of eruption rates. The deflationary period was found to be composed of two distinct phases: initial deflation of a shallow pressure source ( $\sim 1.5$  km) followed by a deeper source ( $\sim 4$  km). In this second phase, the deflation rate decreases with a common rate across different events. Applying an incompressible fluid flow approximation (Nishimura, 1998), we found that a low bulk modulus of magma ( $10^7$ - $10^8$  Pa) accounts for these observed trends, suggesting the involvement of gas-rich magma during these major events.

## 1. はじめに

噴火発生にともなう火砕物の噴出率は、噴火様式や噴煙高度を支配する重要な変数である。その推定には、噴火時の地盤変動の時系列データが有効であり、噴出のダイナミクスやマグマの上昇過程の理解に大きく貢献している。たとえばストロンボリ火山では、山腹からの溶岩流出時に噴出率が指数関数的に減少することが報告されている。これは、山腹の噴出火口の標高より上部に存在するマグマの荷重で噴出が駆動されるモデルによって説明され、このモデルを用いた噴出率予測の可能性も指摘されている (Ripepe et al., 2017)。

桜島では噴火発生にともなう、島内に設置された伸縮計・傾斜計で明瞭な山体の収縮が観測される。この収縮体積は火山灰噴出量と比例関係にあることがわかっており、地盤変動量から総噴出量を推定する経験式が提案されている (Iguchi, 2016)。以前、著者らは、収縮体積の時間関数を指数関数で近似できることを示し、これを用いて噴出率を予測できる可能性を指摘した (石井・井口, 2024, 防災研年会)。しかし、関数形状を決めるパラメータの制約が難しく、現在、暫定的に使用している値では、多くの噴火で噴出率が過大評価になっている。そこで、本研究では近年桜島で発生した規模の大きな噴火事例に焦点を当て、噴出モデルにもとづいて収縮過程の見直しを行った。

## 2. 使用データと解析手法

2017 年以降に南岳火口で発生した噴火のうち、ハルタ山観測坑道・有村観測坑道における収縮時

のひずみ変化量が 50  $\mu$ strain を超える 9 イベントを解析対象とした。これらの噴火の収縮過程は、伸縮計記録の特徴から、大きく 2 つのフェイズ (Phase 1, Phase 2) に分けられる。噴火直後は、伸縮計記録の火口方向成分が伸び、直交方向成分が縮む。その後、火口方向成分が反転し両成分とも縮むフェイズに移行する。これは、噴火直後に浅い圧力源が収縮し、その後、より深い圧力源が収縮していることを示唆している。そこで、有村観測坑道の傾斜計・伸縮計記録を用いて、各フェイズの圧力源深さを推定し、それぞれでの体積変化と収縮率の時間変化を調べた。圧力源の位置は火口直下を仮定し、球状圧力源とした。Phase 1 では伸縮計 2 成分の比を用いて、Phase 2 では面積歪みと傾斜の比を用いて、深さを推定した (Iguchi et al., 2013; Ishihara, 1990)。圧力源の深さは時間変化しないとして、累積収縮体積と収縮率の時間変化を算出した。

## 3. 累積体積・収縮率の時間変化

解析対象とした 9 事例について、収縮源の深さは Phase 1 で 1.5 km 程度、Phase 2 で 4 km 程度に推定された。事例によらず、深さは大きく変わらなかった。変動体積 (図上段) は Phase 1 で  $10^4$   $\text{m}^3$  程度、Phase 2 で  $10^4 \sim 5$   $\text{m}^3$  となり、Phase 2 の収縮量は Phase 1 の数倍 $\sim$ 1桁大きくなった。収縮の継続時間は、Phase 1 では 20 分未満の事例が過半数を占め、Phase 2 は 60 分を超える事例も多かった。収縮率 (図下段) は、Phase 1 では  $<100$   $\text{m}^3/\text{s}$  の範囲で大きくばらついた。一方、Phase 2 では

多くの事例で、よく似たトレンドで噴出率が減少する様子が確認された。特に、収縮開始から 10～40 分の期間では、過半数の事例において同一の傾きで収縮率が低下しているように見える（図右下ハッチ部）。この期間の変化を一次関数でフィッティングすると、その傾きは平均で  $-0.0211 \text{ m}^3/\text{s}/\text{s}$  となった。

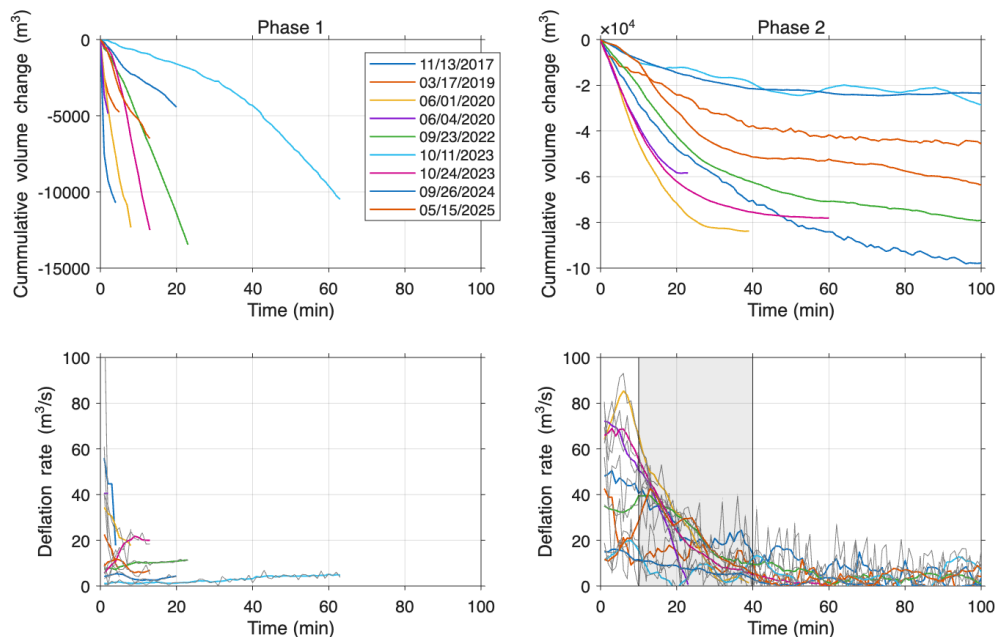
#### 4. 噴出モデルとの比較

収縮体積の時間変化は、圧力源（マグマだまり）からのマグマの上昇・噴出のダイナミクスが支配していると考えられる。そこで、本研究では、Nishimura(1998)のマグマ噴出にともなうマグマだまりの圧力変化モデルを用いて、Phase 2 で得られた収縮率変化の解釈を試みた。実際の噴火で噴出するのはマグマとガスの混合体であるが、Nishimura(1998)では、噴出物の端成分として理想気体と非圧縮性流体を想定し、2つのモデルを提案している。井口（2012, 防災研年報）では、理想気体モデルを用いて昭和火口で発生した噴火の噴火直後のひずみ変化を説明している。一方、ここで着目する Phase 2 は、深さ 4 km 程度のマグマだまりからの噴出過程であり、気体だけが噴出するとは考えにくいため、非圧縮性流体モデルを採用することとした。Hotta et al.（2018）に倣って、Nishimura モデルが提案する圧力変化の式を体積変化の式に変換した後、その時間微分をとると、以下のような  $t$  についての一次関数になる。

$$-\frac{dV(t)}{dt} = -\frac{3K^2S^2}{4\mu\rho V}t + \frac{3KS}{4\mu}\sqrt{\frac{2P_0}{\rho}}$$

ここで、 $K$  はマグマの体積弾性率、 $S$  は火道断面積（半径 30 m と仮定）、 $V$  はマグマだまりの総体積、 $\mu$  はラメ定数（剛性率；30 GPa）、 $\rho$  はマグマの密度（2500 kg/m<sup>3</sup>）、 $P_0$  はマグマだまりの初期圧力である。これが図の下段で示す収縮率に対応する。前述の傾きの値が  $t$  の係数に一致すると考えると、 $K$  と  $V$  の関係式が得られる。本研究の知見からは  $K$  と  $V$  のいずれも制約できないが、仮に  $V$  が  $10^9 \sim 10^{10} \text{ m}^3$  程度とすると、 $K$  は  $10^7 \sim 8 \text{ Pa}$  となる。一般的に、深部のマグマの体積弾性率は  $10^{10} \text{ Pa}$  程度、浅部の圧縮性の高いマグマでは  $10^{8 \sim 9} \text{ Pa}$  とされている（たとえば、Huppert & Woods, 2002）。 $K = 10^{10} \text{ Pa}$  を再現するには  $10^{14} \text{ m}^3$  程度のマグマだまりを想定する必要がある、現実的ではない。したがって、地盤変動データから得られた収縮率を説明するには、 $K$  が小さい（圧縮性が高い）マグマが想定される。

今回解析対象とした事例の中には、噴出した火山灰中に発泡した粒子が多く含まれていた事例もあり、普段の噴火より Gas-rich なマグマが上昇してきたことが示唆されている（たとえば、嶋野・山田, 2025, 火山学会）。 $K$  が小さくなる傾向は、この観測事実と整合的である。今後、これらの知見を踏まえて、より適切な収縮関数の予測手法を検討する必要がある。



図：噴火にともなう累積体積変化（上段）と収縮率の時間変化（下段）。収縮率は 5 分ごとの移動平均を示す（細線が平均処理前）。左が Phase1, 右が Phase2。