

## ビンガム流体マグマを仮定した 2014 年からのインドネシアシナブン火山収縮の終息推定 Estimation of the end of deflation from 2014 at Sinabung volcano, Indonesia, under the assumption of magma as Bingham fluid

○堀田耕平・井口正人・大倉敬宏・Muhamad HENDRASTO・Hendra GUNAWAN・Umar ROSADI・Estu KRISWATI

○Kohei HOTTA, Masato Iguchi, Takahiro OHKURA, Muhamad HENDRASTO, Hendra GUNAWAN, Umar ROSADI, Estu KRISWATI

We estimated the end of deflation from 2014 at Sinabung volcano, Indonesia, assuming that magma is a Bingham and an incompressible fluid. At first, we obtained absolute pressure change in the reservoir from cumulative volume change obtained from continuous GNSS data using Nishimura (1998, JVGR) model. Next, we obtained yield stress of lava of Sinabung from the relationship between Silica content versus yield stress shown by Hulme and Fielder (1977, Phil. Trans. R. Soc. Lond.) and Silica content of Sinabung ashfall during 2010–2014 (58–60%; Anda et al., 2016, Sci. Total Environ). Absolute pressure in the reservoir fall below yield stress in February–March 2018, and magma migration, i.e., deflation is considered to end in this period. (117 words)

### 1. はじめに

インドネシアシナブン火山周辺の GNSS 連続観測データから、2013 年 12 月下旬の溶岩ドーム出現に前駆して 6 月ごろから斜距離の伸張が、2013 年 12 月末以降、短縮がそれぞれ検出された。収縮期について Mogi モデル (Mogi, 1958, BERI) を用いて変動源解析を行ったところ、急激な収縮が検出された 2013 年 12 月 27 日～2014 年 4 月 15 日 (Period 3) にはシナブン火山東麓の深さ 8.4 km bsl に、収縮率が減少した 2014 年 4 月 15 日～2016 年 1 月 16 日 (Period 4) にはそこからさらに北東の深さ 12.2 km bsl にそれぞれ収縮源が得られた。収縮源の位置を固定し、Period 4 以降は変動源の位置が変化しないと仮定した上で体積の時間変化を推定したところ、2015 年以降、徐々に体積減少率が低下していることが分かった。本研究では、マグマをビンガム流体と仮定してシナブン火山の収縮が終息する時期を推定した。

### 2. マグマだまり内部の圧力変化

Nishimura (1998, JVGR) は、火山体内部のマグマだまりに蓄積されたマグマが火道を通して開放されるとききの圧力の時間変化を、マグマが理想気体としたときと非圧縮性流体としたときの 2 つのモデルについてそれぞれ定式化した。なお、マグマだまりの位置や大きさは変化しないと仮定している。深部におけるマグマは非圧縮性流体であると考えられ、その圧力の時間変化は

$$P(t) = \begin{cases} \frac{\rho}{2} \left[ \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} - \frac{KS}{\rho V} t \right]^2 & 0 \leq t \leq \frac{\rho V}{KS} \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

と書ける。ここで、 $P_0$  はマグマだまり内部圧力の初期値、 $\rho$  はマグマの密度、 $K$  はマグマの体積弾性率、 $S$  は火道の断面積、 $V$  はマグマだまりの体積である。一方、マグマだまりの半径が深さに比べ十分に小さい場合、マグマだまりは Mogi モデルで近似できる。ポアソン比を 0.25 とすると、体積の時間変化は

$$V(t) = \frac{3V}{4\mu} (P(t) - P_0) + C \quad (2)$$

と書ける (Delaney and McTigue, 1994, Bull. Volcanol.)。ここで、 $\mu$  は剛性率、 $C$  は定数である。 $\mu = 30$  [GPa]、 $K = 17.2$  [GPa] (Malfait et al., 2014, EPSL)、 $\rho = 2,500$  [kg/m<sup>3</sup>] と仮定し、変動源の位置が変化しないと仮定している Period 4 以降の体積変化に対して式(1)および(2)を最小二乗法でフィッティングしたところ、 $P_0 = 307$  [MPa]、 $S = 743$  [m<sup>3</sup>]、 $V = 1.50 \times 10^{10}$  [m<sup>3</sup>] となり、Figure 1 のように GNSS 連続観測データから推定した積算体積変化にフィッティングすることができる。ここで、 $t$  は 2014 年 4 月 15 日からの日数とした。マグマだまりの半径は 1.53 km であるが、これは Period 4 における変動源の深さ 12.2 km bsl の 20% 未満であり、Mogi モデルの仮定は破綻しない (Lisowski, 2007, Springer-Verlag)。また、全体の体積変化 (~1.2

$\times 10^{10} \text{ m}^3$ ) はマグマだまりの体積の1%未満であり、マグマだまりの大きさの変化は無視できる。得られたパラメータを(1)式に代入すると、マグマだまり内部の圧力変化 (MPa) は

$$P(t) = \begin{cases} 12.5[4.96 - 3.41 \times 10^{-3} t]^2 & 0 \leq t \leq 1454 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

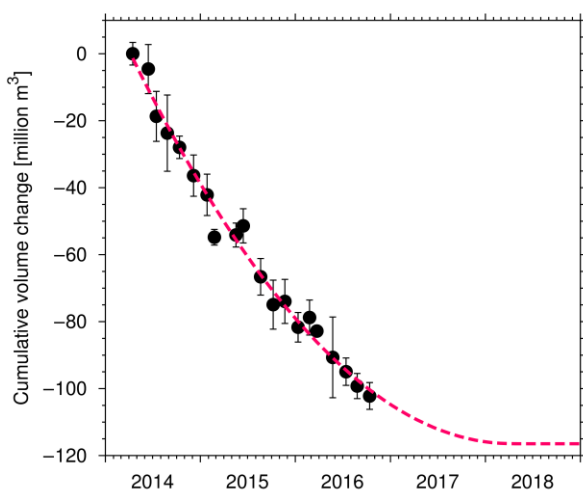
となる。

### 3. マグマの降伏応力

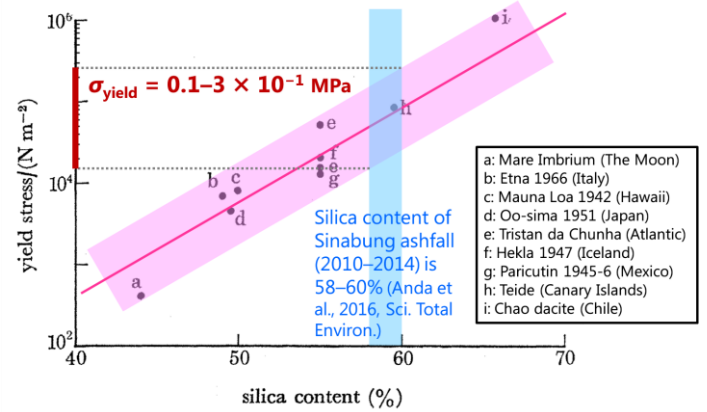
Hulme and Fielder (1977, Phil. Trans. R. Soc. Lond.) は、いくつかの溶岩について降伏応力とシリカ含有率の相関を示した。一方, Anda et al. (2016, Sci. Total Environ) によると, 2010~2014年のシナブン火山降灰のシリカ含有率は58~60%である。両者が重なる範囲を読み取ると, シナブン火山溶岩の降伏応力は  $0.1 \sim 3 \times 10^{-1} \text{ MPa}$  と推定される (Figure 2)。

### 4. 収縮終息時期の推定

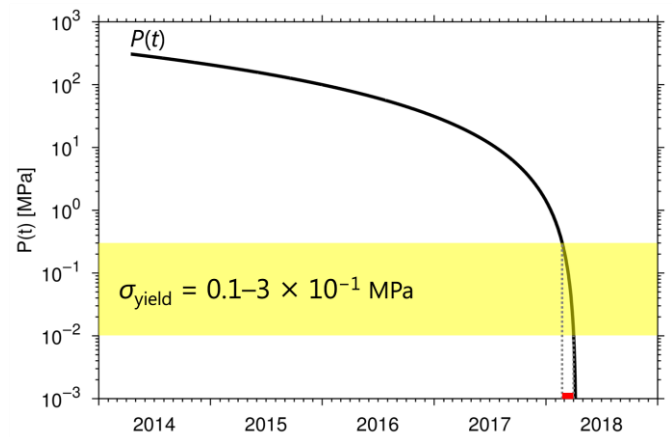
マグマをビンガム流体かつ非圧縮性流体とすると,  $P(t)$ が降伏応力  $0.1 \sim 3 \times 10^{-1} \text{ MPa}$  を下回る2018年2~3月ごろにマグマが流れなくなり, 収縮が終息することになる (Figure 3)。この推定は2016年10月までの観測に基づくものであり, 今後新たなマグマ貫入がないと仮定している。より正確な推定には引き続きGNSS連続観測やデータの解析を行う必要がある。



**Figure 1.** Comparison of cumulative volume change after the period 4 estimated from continuous GNSS data (solid circles with error bars) and fitted eqs. (1) and (2) (magenta dashed line).



**Figure 2.** Yield stress versus silica content (Fig. 3 from Hulme and Fielder, 1977, Phil. Trans. R. Soc. Lond.; modified).



**Figure 3.** Pressure change inside the magma reservoir (solid line) and yield stress of magma (yellow range).