

## 空気振動観測によるブルカノ式噴火岩塊到達距離の検討

### Hazard evaluation of ballistics from Vulcanian eruptions using infrasound observations

○山田大志・井口正人

○Taishi YAMADA, Masato IGUCHI

The maximum reaching distance of ballistics from Vulcanian eruptions, which defines hazard areas, is evaluated by infrasound observation. The distance mainly depends on the initial velocity of ballistics under the condition that drags in the atmosphere are limited. To evaluate the initial vertical velocity,  $V_{max}$ , we focus on the infrasound pulse from the eruption onset, and set the peak value of the integrated infrasound waveform,  $I_{max}$ , as a representative proxy. The  $I_{max}$  represents the intensity and duration of instantaneous gas emission at the eruption onset, which can relate to  $V_{max}$ . We find that the upper limit of the  $V_{max} / I_{max}$  ratios depends on  $V_{max}$ . Based on the equation of motion of ballistic, differences in explosion depth explain the  $V_{max} / I_{max}$  ratio characteristics.

#### 1. はじめに

火山噴火に伴う放出岩塊がもたらすハザードの範囲は、その最大到達距離によって規定される。よって、到達距離を観測量から評価することは極めて重要な課題である。火山噴火は多様な形式でエネルギーを放出し、その一部が岩塊運動に分配される (Gerst et al., 2013)。しかし全エネルギーと岩塊運動への分配比率の推定は容易ではない。

直径が 1 m 以上の岩塊の運動に対しては空気抵抗の影響は限定的であるため、岩塊到達距離の主要な決定要因は噴出時の初速である (井口・他, 1983)。1955 年から現在まで継続している桜島南岳の噴火活動では、岩塊の最大到達距離と空気振動 (空振) 最大振幅の間に明瞭な関係が得られている (井口・山田, 2021)。このことは、岩塊の初速獲得と空振励起の間に一定の関係が成立していることを示唆する。この知見に基づき、本研究は空振観測によってブルカノ式噴火に伴う岩塊到達距離の評価を試みる。対象とするのは 2017 年 10 月以降の桜島南岳山頂火口における噴火活動である。

#### 2. 観測

京都大学防災研究所は、南岳山頂火口からおおよそ 3 km の距離に位置するハルタ山観測室において連続空振観測を実施している。使用している低周波マイクロフォン SI104 (白山工業製) は 0.05–1500 Hz の帯域に様な感度を有する。

岩塊の到達距離は鹿児島地方気象台による遠望観測記録を参照する。当該記録における到達距離は合目によって表記されており、各合目は山頂からの距離に応じて数百メートル程度の範囲に相当する。そこで乱数を仮定することで合目から水平距離に換算する (井口・山田, 2021)。

#### 3. 岩塊鉛直初速度 ( $V_{max}$ ) への換算

井口・他 (1983) では、最大到達距離を与える岩塊射出角は  $63^\circ$  となることを観測から明らかにしている。この射出角と空気抵抗を考慮した弾道方程式 (Minakami, 1942) によって、到達距離を火口における岩塊鉛直初速度 ( $V_{max}$ ) (m/s) に換算する。

#### 4. 空振増圧相の評価

2017 年以降の南岳の噴火活動は、休止期を挟む噴火エピソードが繰り返されている (Iguchi et al., 2022)。特に活発な噴火活動が発生した 2019 年 9 月以降のエピソードでは、2020 年 6 月 4 日 (2:59) の噴火において火口から 3.3 km の地点に岩塊が落下した。この期間の空振記録の重要な特徴は増圧相の長周期化であり、爆発時のガス放出の時定数が長いことを意味する。時定数の長いガス放出は、岩塊を加速させることが想定される。すなわち岩塊運動を評価するためには、増圧相の最大振幅と併せて周期も評価する必要がある。そのため、本研究では振幅の距離減衰を補正した空振波形一回積分の最大値 ( $I_{max}$ ) (Pa・s) を岩塊到達距離評価の

指標とする。

### 5. $V_{max}$ と $I_{max}$ の関係

図1に該当期間の518イベントにおける  $V_{max}$  と  $I_{max}$  の関係を示す。全体を代表する  $V_{max}/I_{max}$  の範囲として、標準偏差によって  $1.0 \times 10^{-4} - 3.0 \times 10^{-4}$  が得られる。しかし厳密には  $V_{max}/I_{max}$  は常に一定ではない。図2では  $V_{max}/I_{max}$  の  $V_{max}$  に対する依存性を検討している。 $V_{max}$  が大きくなるほど  $V_{max}/I_{max}$  の上限値が小さくなる傾向が認められる。

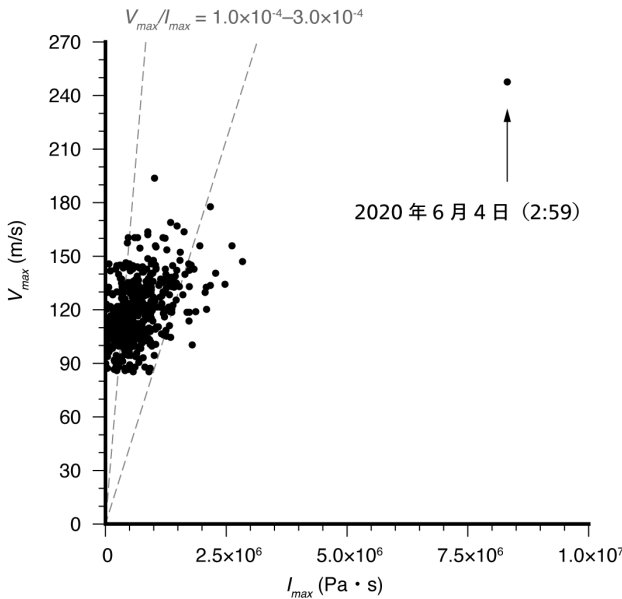


図1.  $V_{max}$  と  $I_{max}$  の関係

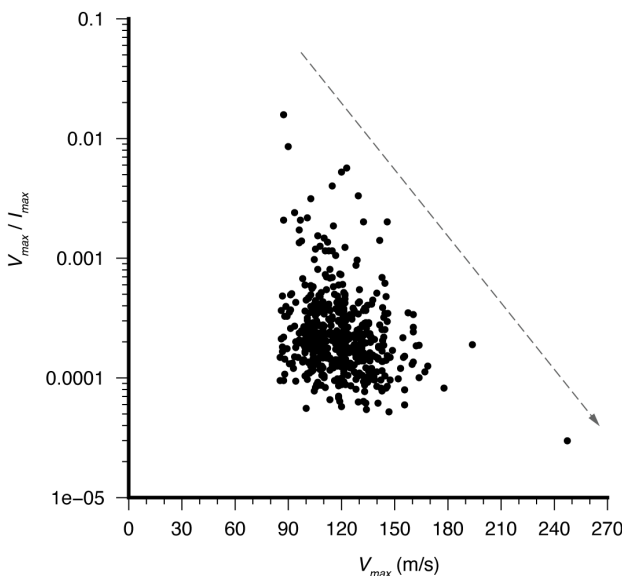


図2.  $V_{max}/I_{max}$  と  $V_{max}$  の関係

### 6. 運動方程式に基づく $V_{max}/I_{max}$ の検討

$V_{max}/I_{max}$  の特徴を、岩塊単体の運動方程式に基づ

いて検討する。岩塊質量  $m$  (kg), 岩塊鉛直位置  $u(t)$  (m), 岩塊底面積  $s$  (m<sup>2</sup>), 火道内圧力  $P(t)$  (Pa)を用いて、運動方程式は以下のように表される。

$$m \frac{d^2 u(t)}{dt^2} = sP(t) \quad (1)$$

式1を時間領域で一回積分し、 $V_{max}$  を与える圧力の時間積分を  $I_{max}$  で近似できると仮定すると、以下の関係が得られる。

$$\frac{V_{max}}{I_{max}} = \frac{s}{m} \quad (2)$$

岩塊形状を直方体と仮定すれば、 $s/m$  は岩塊密度  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) と深さ  $d$  (m)を用いて  $1/\rho d$  と表される。 $\rho$  が一定 (2500 kg/m<sup>3</sup>) の条件においては、 $V_{max}/I_{max}$  の低下は  $d$  の増大を意味する。図1における  $V_{max}/I_{max}$  の代表的範囲は  $d=1.3-4.0$  m, 先述の2020年6月4日の噴火の場合は  $d=13.8$  mに相当する。つまり、 $V_{max}$  が大きいイベントほど爆発深度が深いことが示唆される。

### 6. 解釈と議論

空振増圧相の長周期化に代表される火山ガス放出量の増加は、噴火活動の活発化を反映していると解釈できる。岩塊到達距離の増大には、火口底へガス溜まりの強度だけでなく、岩塊を加速させるガス放出量の増大が必要であると言える。

運動方程式に基づく検討では、 $V_{max}$  の大きなイベントほど  $d$  が深いという特徴が示唆される。深部ほど静岩圧の増加によって高压条件を実現できるため、より高い  $V_{max}$  を実現できるのかもしれない。10 m程度の厚さの溶岩の下では0.2 MPa程度の静岩圧が想定されるが、具体的な爆発圧力との関係については定量的な検討が必要である。

火山体は有限の破壊強度を有していることから、溜め込める圧力や、起因する  $V_{max}$  には上限があることが想定される。図2に示す  $V_{max}/I_{max}$  上限の  $V_{max}$  への依存性からは、発生しうる最大の岩塊到達距離を予測することができるかもしれない。

謝辞

鹿児島地方気象台の遠望観測記録を参照させて頂きました。