

## 桜島における火山噴火発生前の降灰予測 Forecasting volcanic ash deposition prior to onset of eruptions at Sakurajima volcano

○井口正人・石井杏佳  
○Masato IGUCHI, Kyoka ISHII

Sakurajima volcano has repeated Vulcanian eruption since 1955 for 68 years. We develop a forecasting system of volcanic ash deposition before occurrence of the eruptions based on monitoring ground deformation. Inflationary strain changes are detected by extensometer in an underground tunnel prior to the eruptions. Statistic characteristics of the ground deformation is represented by log-logistic distribution in duration time from the beginning of inflation to the occurrence of eruption, precursory volume change, contraction volume change accompanying the eruptions, and the contraction ratio to the precursor. This indicates time and scale of eruption can be forecasted probabilistically. In the forecasting system, FALL 3D simulator is operated with time interval 6 minutes for 20 scenarios (4 cases for time and 5 cases for scale) with probability given by log-logistic distribution.

### 1. はじめに

桜島では 1955 年以降、68 年間にわたって南岳山頂域の火口において噴火活動が繰り返されている。噴火様式は火山灰の放出を主体とするブルカノ式噴火であり、長時間にわたって火山灰を放出し続けることもある。そのうち、空気振動の強い噴火を「爆発」と呼ぶがその発生回数は 2023 年 12 月までに 15004 回に及ぶ。また、火山灰の噴出量は約 3 億トンと推定される。さらに、110 年前の 1914 年に発生した大規模噴火では、火山灰・軽石の降下量は約 6 億 m<sup>3</sup> と見積もられている。

このような噴火活動状況において、降灰予測のニーズは高い。火山灰粒子の運動は大気中における移流・拡散と重力による降下によってモデル化される。降灰量をこのモデルによって予測することが可能である。移流拡散モデルには多くのパラメータが介在するが、降灰量を決定する主要な要因は風速場と火山灰の噴出率・噴出量である。

鹿児島地方気象台は 1983 年には噴煙の流向に強い影響を与える風向を発表し、南岳山頂の風下側における降灰への注意を促している。現在、気象庁は噴煙高度を固定したうえで噴火が発生するとすればという仮定の下に、風速場の時間変化予測に基づいた降灰予報（定時）として 18 時間先までを予測している。さらに、気象庁は、桜島においては一定規模（噴煙量やや多量）以上の噴火が発生したときには、降灰予報（速報）と噴煙高度を考慮してより精度の高い降灰予報（詳細）を

表している。

火山灰の噴出率は、噴煙高度から求めることが多い。この手法では、噴出率が噴煙高度の 4 乗に比例することから誤差が大きいこと、噴煙高度は常時観測できないために、適切ではない。Iguchi (2016) は噴火に伴う火山性微動の振幅と地盤変動から見積もられる収縮体積の線形結合から噴出率・噴出量を求める経験式を得た。Tanaka and Iguchi (2019) はこのようにして求めた噴出率をもとに PUFF モデルを用いてリアルタイムで降灰量を予測するシステムを開発した。

ところが、噴火に伴う現象に基づくこのような手法（気象庁の降灰予報（速報、詳細）を含む）は、噴火発生後に火山灰粒子が地表に到達するまでの予測であることから、噴火口に近い場所においては火山灰粒子が到達するまでに予測が間に合わないことが多い。

そこで、本稿では噴火発生前に降灰予測を行う手法について検討する。

### 2. 噴火発生に前駆する地盤変動

降灰量は主に火山灰の噴出率・噴出量と風速場によって決定される。気象場については気象庁により、39 時間先までの予測値が公表されているので、噴火発生時刻が予測できれば風速場を決めることができる。火山灰噴出量については噴火の規模を予測する必要がある。すなわち火山噴火予知にとって基本的な課題である発生時刻と噴火規模

を解決しなければならない。

桜島の噴火に前駆して、火口方向隆起の傾斜と伸長ひずみが観測されることが知られている。しかし、隆起傾斜と伸長ひずみは噴火の発生の前駆段階に入ったことを示し、90%の爆発に対して前駆地盤変動を検知することができるが、爆発の発生時刻と噴火規模を deterministic に決定することはできない。そこで、2009年以降に桜島昭和火口および南岳において発生した爆発に前駆する有村観測坑道におけるひずみ変化について統計学的な解析を行った。膨張開始から爆発発生までの時間、前駆する膨張体積量、噴火に伴う収縮体積用及び両者の比について頻度分布を調べたところ、いずれも Log-logistic 分布を示すことが分かった。すなわち、発生時刻と噴火規模をこの関数を用いて確率的に予測することが可能である。

### 3. 予測システムにおける処理手順

火山性微動の振幅と地盤変動から見積もられる収縮体積の線形結合から得られる噴出率を常時評価して降灰予測を行うリアルタイム予測システムはすでに開発してある (Iguchi et al., 2023)。シミュレーションエンジンは FALL3D8.0 (Folch et al., 2020) であり、6分ごとに計算される降灰量を足し合わせて地点ごとの降灰量としている。このシステムで用いる風速場は、WRF により高解像度化された2年間の風速場データベースから気象庁風速場予測値に最も近いものを使用する。

このシミュレーターを噴火発生前に降灰予測ができるよう改良した。手順は以下のとおりであり、この手順を繰り返して、地盤変動をもとに評価していく。

- (1) ひずみ信号を監視して膨張開始を検知
- (2) 現在時刻  $t_0$  から未来の時刻  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  における噴火発生確率を求める。
- (3) 1時間前から現在時刻までの膨張速度を外挿して、未来の時刻  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  における膨張量を求める。
- (4) 未来の時刻  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  における膨張量に対して収縮量が 1/5、1/2、1、2、5 倍になる確率を求める。
- (5) 時刻について4ケース、収縮量について5ケースを組み合わせて20通りのシナリオに基づいて移流拡散シミュレーションを行う。なお、噴出率は指数関数的

に減少するように予測収縮量を時間配分する。

- (6) 時刻毎の噴火発生確率と規模毎の噴火発生確率を掛け合わせて、噴火シナリオの確率マトリックスを作成する。
- (7) 20通りのシミュレーション結果を確率マトリックスの確率要素による加重平均して予測降灰量とする。

### 4. 今後の課題

- (1) 膨張開始から爆発発生までの時間の Log-logistic 分布は20~40分付近にピークをもつ。予測シミュレーションは6分ごとに実施するために、膨張時間が短い場合には間に合わない可能性がある。
- (2) 一方、膨張時間が頻度分布のピークを与える時間を超えると現在時刻における発生確率が最大となる。さらに、膨張時間が長くなるにつれ、未来の時刻  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  における噴火発生確率の差がなくなり時刻の予測が困難となる。膨張が長時間継続する場合の地盤変動は加速することはなく、爆発の直前には停滞もしくは緩やかな収縮に転じるので、この特性を考慮して確率を再評価する必要がある。
- (3) 本システムでは、6時間ごとに気象庁が公表する予測風速場を用いて、時間内挿した風速場を用いるが、風向が急変する場合は、適切な風速場を用いることができない。また、風が弱く噴煙がほぼ直上に上昇する場合も同様である。
- (4) 火山灰放出を伴わない膨張-収縮 (NED、Iguchi et al., 2022) も膨張イベント全体の半数を占めるので、注意が必要である。
- (5) NED の発生は火山活動状態に依存する。また、地盤変動から見積もる膨張体積量を火山灰重量に換算する際に、桜島のブルカノ式噴火活動において経験的に得られた係数を用いているが、係数は揮発性成分の関与によって変わる。さらに、Log-logistic 分布のパラメータも火山活動状態によって変化するので、調整を行う必要がある。