

## 3.2 「リアルタイムの火山灰評価手法の開発」

### 目 次

#### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 10か年の年次実施計画
- (e) 平成28年度業務目的

#### (2) 平成28年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
  - 1) プロジェクトの総合推進
  - 2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発
  - 3) 火山灰拡散予測の高速度化技術開発
  - 4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

#### (3) 平成29年度業務計画案

## (1) 業務の内容

### (a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

### (b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人京都大学	教授	井口 正人	iguchi.masato.8m
国立大学法人京都大学	准教授	中道 治久	@kyoto-u.ac.jp
国立大学法人京都大学	助教	山本 圭吾	
国立大学法人京都大学	助教	味喜 大介	
国立大学法人京都大学	助教	為栗 健	
国立大学法人京都大学	特定研究員	堀田 耕平	
国立大学法人京都大学	教授	石川 裕彦	
国立大学法人京都大学	准教授	竹見 哲也	
国立大学法人京都大学	特定研究員	Alex Poulidis	
国立大学法人京都大学	教授	丸山 敬	
国立大学法人京都大学	特定教授	辻本 浩史	
国立大学法人京都大学	助教	古本 淳一	
国立大学法人鹿児島大学	特任教授	真木 雅之	
国立大学法人鹿児島大学	技術補佐員	高橋 忍	
国立大学法人鹿児島大学	外来研究員 (釜慶大学)	Dong-In Lee	
国立大学法人筑波大学	教授	田中 博	
国立大学法人神戸大学	教授	大石 哲	
国立大学法人東北大学	准教授	太田 雄策	
国立大学法人東京大学	助教	鈴木雄治郎	
国立研究開発法人国立環境研究所	主任研究員	清水 厚	
一般財団法人日本気象協会	主任研究員	井上 実	
メトロウエザー株式会社	代表取締役	東 邦昭	

### (c) 業務の目的

火山灰に対して噴火前の予防的対策及び噴火後の迅速な防災対策のために、火山灰ハザードの予報的及び即時的評価を可能とする技術の実現を目指し、地上観測および大気中その場観測に裏付けされるリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、地震及び地盤変動観測データとシミュレーションを統合した火山灰拡散予測の高速化技術

開発、空間分解能の高い風速場把握および落下粒子特性把握による火山灰拡散予測の高精度化技術開発、連続的な噴火を対象とした火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの技術開発、噴火発生前の確率的降灰予測の技術開発を実施し、「課題D サブテーマ 3：火山災害対策のための情報ツールの開発」に解析結果を出力することを目的とする。

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成28年度：

リモートセンシングによる大気中の火山灰の検知及び地上の火山灰観測に着手するとともに、火山灰拡散予測の高速化及び高精度化のための技術開発を開始する。

2) 平成29年度：

桜島等5火山においてレーダー観測を開始し、既存のリモートセンシング観測を強化したうえで、降灰量との比較を行う。火山灰拡散予測の高速化のためにデータベースを整備する。また、高精度化のために、再現された風速場を観測により検証するとともに、火山灰拡散モデルを改良する。

3) 平成30年度：

リモートセンシング観測および風などのモデルと観測量の相関の高精度化を図る。地盤変動及び火山性微動振幅から求められる噴出率から推定される噴煙柱高度、噴煙外形を火山灰粒子の初期座標とするように、火山灰拡散シミュレーションを改良する。観測量に基づく、粒径分布および粒径毎の落下速度をシミュレーションに組み込む。

4) 平成31年度：

リモートセンシング観測から推定される火山灰の3次元濃度分布を可視化し、サブテーマ3火山災害対策のための情報ツールの開発に解析結果を出力する。観測とモデルから推定される火山近傍の風速ベクトルを火山灰拡散シミュレーションに組み込むことにより、高精度化を図る。

5) 平成32年度：

平成32～34年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発する。当該年度は、システム設計を行う。火山近傍での風のデータ同化による予測を試みる。

6) 平成33年度：

引き続き、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を進める。大規模噴火による火山灰の広域拡散に対応するために、レーダーデータの合成処理手法を開発するとともに、3次元火山灰濃度分布を多点GNSS観測から推定する手法の広域化を図る。移動用ライダー装置の運用について研究する。

7) 平成34年度：

地上火山灰データをオンラインで火山灰拡散シミュレーションに取り込み、火山灰の拡散予測のデータ同化を行うことにより、連続的噴火における火山灰予測精度を向上させ、オンラインシステムを完成させる。また、広域火山灰に対処するために、リモートセンシング観測から推定される3次元火山灰量分布の広域化をすすめる。

8) 平成35年度：

平成35～37年度は、噴火発生前の降灰確率の予測をめざす。過去の地盤変動データを整理し、前駆地盤変動継続時間および圧力源の前駆体積変化量をデータベース化して、発生時刻と規模の確率的予測を行う手法を開発する。また、気象庁により提供される風速ベクトル予測値から複雑な火山地形を考慮した高分解能の風速ベクトル場を予測する研究を行う。

9) 平成36年度：

発生時刻と規模の確率的予測をオンラインシステムとして稼働させるため、膨張開始時刻の高精度決定手法を開発し、高精度化を図る。また、時間関数として噴出率を与えられるように理論的な噴出率モデルを構築する。火山地形を考慮した詳細な予測風速ベクトルおよび予測降灰量を観測量と照合することにより、噴火発生前の予測精度を検証する。

10) 平成37年度：

前年度の予察的なシミュレーション結果と噴火発生後の観測量の照合に基づいて問題の所在を検討した上で、予測手法の改良を行い、高精度化を図る。

(e) 平成28年度業務目的

桜島にXバンドMPレーダー、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシングおよびディストロメータを用いた地上観測からなる火山灰観測のためのマルチパラメータ観測網を構築して、火山灰予測のためのパラメータを決定するための観測を開始する。火山灰拡散予測の高速化するためには、噴火発生時の地震動や地盤変動データを解析することにより噴煙高度を求める。また、高精度化のために気象モデルを用いて高精細な風速場を再現し、ドローンやドップラーライダーを用いた大気中および地上における火山近傍での大気中の風向・風速観測を開始し、気象モデルの妥当性を検討する。

## (2) 平成28年度の成果

### (a) 業務の要約

平成28年度に実施した業務の柱は、「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」である。即時把握技術開発においては、レーダーを除く項目について観測を開始した。マルチパラメータ観測網が起動し、火山灰観測がリアルタイムで行える状態にある。予測の高速化技術においては、噴火に伴う地盤変動量から火山灰放出量及び噴煙高度の上限を求める経験式が得られ、暫定的に火山灰拡散予測が可能な状態となっている。予測の高精度化においては、分解能の高いDEMを用いて急峻な火山地形の火山灰拡散への影響が評価され、また、ドローンやドップラーライダーを用いた山岳地域での3次元の風速ベクトルの観測に着手した。さらに、複雑な火山灰拡散や移流に対応したシミュレーション手法の改良を行った。

### (b) 業務の実施方法

#### 1) プロジェクトの総合推進

当該プロジェクトと関連する「課題C サブテーマ3」および「課題D サブテーマ3」と連携を図りつつ、研究集会を開催した。

#### 2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

桜島にXバンドMPレーダー、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシングおよびディストロメータを用いた地上観測からなる火山灰観測のためのマルチパラメータ観測網を構築し、観測を開始するとともに既存データを用いてレーダーの反射強度と火山灰放出量の関係を検討した。また、21世紀以降噴火が発生した霧島山、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてすみやかにXバンドMPレーダー観測ができるように付帯設備の設置を行った。

#### 3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

既存地震及び地盤変動データと噴煙高度の関係の経験式を得た。また、地震・傾斜計を設置し、地震及び地盤変動データの高精度化を図った。

#### 4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

火山体周辺では風速場が複雑なので、分解能の高いDEMを用い気象モデルに基づき、風の場を再現する。風速場を予測するために、ドローンやドップラーライダーを用いた大気中および地上における火山近傍での大気中の風向・風速観測を開始し、気象モデルの妥当性を検討した。

火山灰拡散シミュレーションでは分解能の高い風速場におけるシミュレーションに着手した。また、粒子の初期座標を3次元配置に拡張し、過去の噴火の降灰分布と照合してその妥当性を検討した。



図 1 火山灰のマルチパラメータ観測の概要

(c) 業務の成果

1) プロジェクトの総合推進

平成 28 年 12 月 13 日に秋葉原で、また平成 29 年 1 月 7 日に桜島において、研究集会を開催した。秋葉原での研究集会は課題 D 全体の連携、特に、課題 D サブテーマ 3 や課題 C サブテーマ 3 との連携について議論し、課題 D サブテーマ 2 の降灰量などの観測量を課題 D サブテーマ 3 に伝送することで合意した。また、桜島での研究集会では、2013 年 8 月 18 日に桜島で発生した火山噴火により放出された火山灰の拡散を WRF-Chem モデルで再現したものを中心に議論し、課題 D サブテーマ 2 の研究の進め方を検討した。

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

2-1) マルチパラメータ観測網の構築

桜島にレーダー、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシングおよびディストロメータを用いた地上観測からなる火山灰観測のためのマルチパラメータ観測網を構築した。図 1 にマルチパラメータ観測の概要を示す。

a) レーダー観測の準備

21 世紀以降噴火が発生した霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてすみやかに X バンド MP レーダー観測ができるようにレーダーの架台設置、電源の引き込み、通信回線の引き込みなどを行った。設置場所は表 1 に示す通りである。

表 1 レーダー基地局の場所

火山名	施設名	住所	緯度・経度・標高
霧島山	霧島市立牧園中学校	鹿児島県霧島市牧園町 宿窪田751-1	31.85784, 130.75134 標高208m
桜島	京都大学防災研究所 火山活動研究センター	鹿児島県鹿児島市桜島 横山町 1722-19	31.58960, 130.60115 標高26.8m
桜島	鹿児島県立錦江湾高等学校	鹿児島県鹿児島市平川 町4047	31.445607, 130.507227 標高88.5m
薩摩硫黄島	三島村竹島焼却所	鹿児島県鹿児島郡三島 村竹島	30.81314, 130.40938 標高59m
口永良部島	口永良部島避難所	鹿児島県熊毛郡屋久島 町口永良部島番屋が峰 207-4	30.470361, 130.176036 標高265.1m
諏訪之瀬島	諏訪之瀬島キャンプ 場	鹿児島県鹿児島郡十島 村諏訪之瀬島	29.61125, 129.70547 標高103m

レーダー架台等の設置状況を図 2 に示す。



図 2 レーダー架台の設置状況。左：口永良部島、右：竹島

#### b) ライダー観測

従来、エアロゾル観測として鉛直方向に波長 532nm の光を発射し、その後方散乱波の強度と偏光解消度を観測していたライダー観測技術を火山噴煙に応用した。レーザーを噴煙に直接照射し、その後方散乱波を観測する。ライダーは桜島島内の火山活動研究センター桜島火山観測所（西）及び黒神観測室（東）に設置した。

ライダー観測では希薄であっても可視できる程度の濃度であれば、雲（水滴）、火山灰のいずれでも極めて強い散乱強度を示す。偏光解消度が重要なパラメータであり、偏光解消度が小さい場合は球形粒子、大きい場合は非球形粒子による散乱と考えられる。球形粒

子からなる水滴の散乱では偏光解消度は小さく、非球形の火山灰粒子が含まれる噴煙では偏光解消度が大きくなることを期待される。実際に桜島で発生した火山爆発の噴煙の偏光解消度を求めたところ、爆発直後は0.7という極めて高い値が得られ(水滴は0~0.1程度)、その後0.4~0.5で安定した(図3)。噴火ではないが、白色噴煙が連続的に放出されているときも特徴的な時空間分布が得られた。白色噴煙の偏光解消度は0.1程度であり、主に水蒸気を主体とする火山ガスが凝結して水滴となっている。これが、火口から離れて白色噴煙が見えない状態では偏光解消度が増加し、水滴が蒸発した結果、少量の火山灰が浮遊し続けている状態が推定できた。有色噴煙、白色噴煙とも火山ガスと火山灰の混合体であるので、球形物質と非球形物質の量比の推定に偏光解消度が利用できる可能性がある。

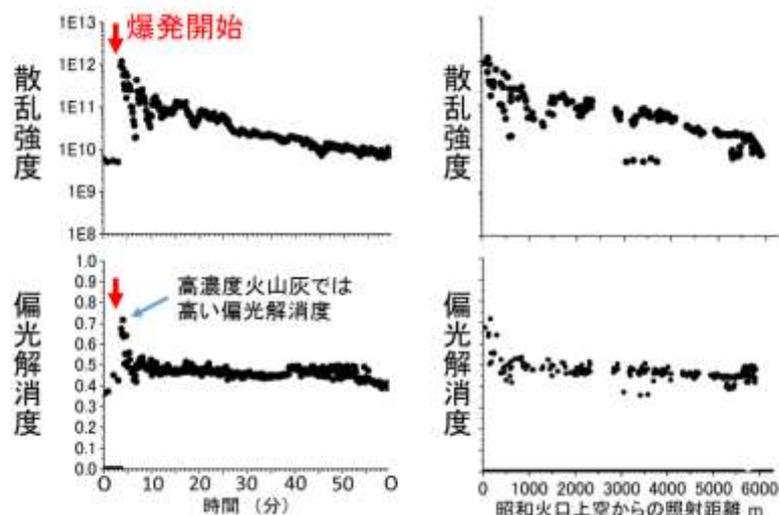


図3 火山爆発時の噴煙の散乱強度及び偏光解消度の時間変化。2016年7月26日に発生した桜島のブルカノ式噴火。

### c) GNSS 観測

GNSS を用いた火山灰モニタリングシステムの構築に向けて、GNSS 解析時の位相残差とその信号強度である SN 比データの比較を行っている。桜島の爆発的噴火により放出された火山灰では、位相残差と SN 比にそれぞれ特徴的な変化が確認され、これらのデータに反映される物性が異なる可能性が明らかになった (Ohta and Iguchi, 2015)<sup>1)</sup>。この手法を 2016 年 10 月 8 日に阿蘇山において発生した爆発に適用した。結果を図 4 に示す。この爆発による噴煙柱形成は GNSS 解析の位相残差とその信号強度である SN 比の変化として検出できた。GEONET703 観測点では噴火発生直後から最大 10cm の LC 位相残差増大と 3~4dB の SN 比の低下が観測されたが、474 観測点では明瞭な変化がなかった。703 で変化を検出した衛星の高度と変化がなかった 474 観測点の火口方向の衛星の高度を考慮すると噴煙の高度は 8.0km~12.5km と推定される。より時間分解能を高めるために 1 秒サンプリングのデータの解析も行った。SN 比の減少は噴火後約 400 秒で終息したが、位相残差の増加は 600 秒程度まで継続した。4-6cm の位相残差の増加に対して 4dB-Hz 程度の SN 比の減少となった。SN 比変化の位相残差の増加に対する割合は、1~1.5dB-Hz/1cm となり、桜島南岳噴火時の位相残差の増加の割合 (5db-Hz/1cm) と比べると少ない。

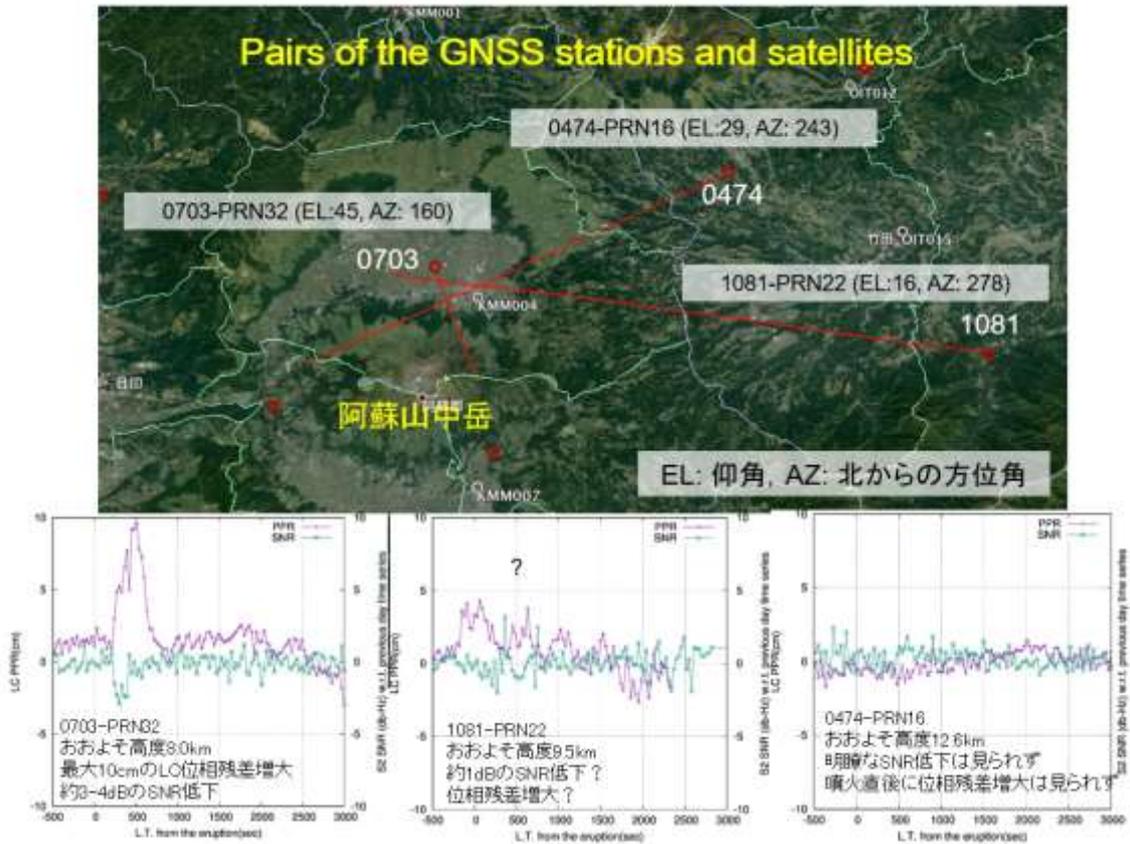


図4 2016年10月8日阿蘇山噴火時の噴煙を通過したGNSS衛星からの電波のLC位相残差およびSN比の時間変化。

d) ディスドロメータによる地上観測

ディスドロメータによる地上降灰量観測を開始した。降雨観測に開発された1次元の光学式ディスドロメータ (PARSIVEL2、ドイツ OTT Hydromet 社製) を用いた。本装置は落下粒子によってさえぎられる光を計測することによって、粒径ごとに粒子を観測するパーティクルカウンターであり、粒径毎の個数と落下速度を求めることができる。粒径と落下速度の関係は、雨の場合、Gunn-Kinzer line に沿うとされるが、火山灰は、水よりも密度が大きいので、Gunn-Kinzer line よりも上にプロットされることが予想される。実際、火山灰で実験を行ったところ、Gunn-Kinzer line よりも下にプロットされた。このことにより雨粒と火山灰粒子の識別が可能である。

いずれの風向でも降灰観測ができるように、桜島火口からほぼ全方位に位置する島内の6か所にディスドロメータを設置し(図5)、オンラインによるデータ取得を開始している。



図5 桜島におけるディストロメータの配置図。赤丸が本課題による設置場所。

#### e) レーダー観測による火山灰推定の高度化

レーダーの反射強度と火山灰放出量の関係を検討する。気象レーダーによる降灰量の推定方法には工学的手法と理学的手法の二通りがある。工学的手法は降灰のレーダー反射因子と地上の降灰量との関係式を観測から求める方法である。一方、理学的手法は、観測された降灰粒子の粒径分布から散乱計算をおこない理論的な反射因子と降灰量との関係式を求める方法である。いずれの手法も降灰粒子の観測データが必要不可欠である。

このため、ディストロメータによる降灰観測を実施した。さらに、桜島～垂水市での降灰時の機動的観測のために観測点の選定を行い、WiFi通信を利用して観測データを収集する仕組みを構築した。以下、詳細を記す。

##### ・機動的観測のための観測点調査

冬から春の季節風下での降灰調査を迅速に実施するために、ディストロメータの設置場所調査をおこなった（図6(a)）。

##### ・ディストロメータの輸送・設置

連携研究機関から3台のディストロメータを輸送し、鹿児島大学のディストロメータ(1台)と併せて計4台を鹿児島大学産学官連携推進センター屋上へ設置した（図6(b)）。更にWiFiを用いたデータ収集の仕組みを構築した。

##### ・予備観測とレーダーデータ収集

各ディストロメータの較正のために降雨を対象に予備観測を実施した。また、2017年3月25日に発生した桜島南岳の噴火事例については国交省垂水XバンドMPレーダーのデータを取得し三次元解析を実施した（図6(c)）。



図 6(a) 機動観測場所調査



図 6(b) 4 台のパーシベルによる観測風景



図 6(c) 桜島南岳の噴火

(2017 年 3 月 25 日) のレーダー画像

## 2) 火山灰拡散予測の高速度化技術開発

桜島のブルカノ式噴火に伴い、火口側地盤の沈降傾斜及び収縮が観測される。これまでに観測されたひずみ及び傾斜変化は、火山灰放出量と相関があることが知られており、火山灰放出重量 ( $W$ ) は、地盤変動を励起する圧力源の体積変化 ( $\Delta V$ ) に対して以下の関係がある (Iguchi, 2016) <sup>2)</sup>。

$$W = \beta \Delta V \quad (1)$$

ここで、係数  $\beta$  は 2.5~2.6 が得られている。噴煙高度が推定できれば、火山灰拡散シミュレーションを行うことができるので、噴火に伴うひずみ及び傾斜変化と噴煙高度の関係を 2009 年から 2016 年に発生した約 14000 回の噴火について検討した。このうち、鹿児島地方気象台が噴煙高度を発表し (雲入りを除く)、5 ナノストレイン以上のひずみ変化が有村観測坑道において検知され、かつひずみ変化の継続時間が 5 分以上続いた噴火は 3398 回発生している。南岳火口方向とそれに直交する方向のひずみ変化から微小球状圧力源を仮定して、圧力源の深さと体積変化量を求め、ひずみ変化の継続時間で体積変化量を割ったものを噴出率とした。噴煙高度と噴出率の関係を図 7 に示す。

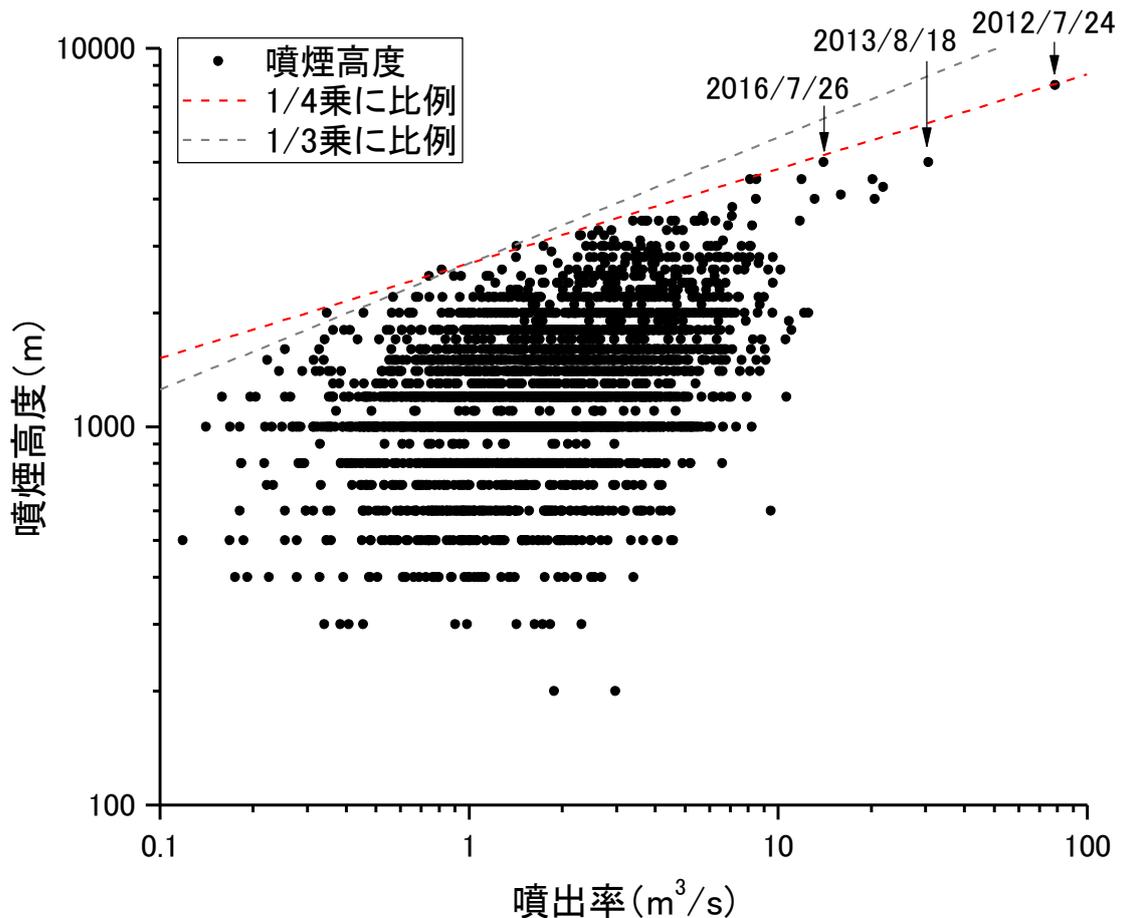


図7 噴煙高度と噴出率の関係

2012年7月24日に南岳において発生した爆発の噴出率が最大であり、78m<sup>3</sup>/sに達している。この噴火について気象庁は噴煙高度を発表していないが、YouTubeにアップロードされた桜島遠方からの画像により噴煙高度は8000mと決定できる。噴煙高度が5000mに達した2013年8月18日および2016年7月26日の噴火の噴出率は大きい。噴出率は10m<sup>3</sup>/s以下のものが圧倒的に多いが、噴煙高度との間に相関が認められる。噴煙高度 ( $H$ ) には噴出率 ( $\dot{V}$ ) に依存する上限が認められ、上限の直線を以下のように決定できる。

$$H = 2700\dot{V}^{1/4} \quad (2)$$

噴煙高度は(2)式を超えることはないので、期待される噴煙高度の最大値として(2)式から得られる噴煙高度を用いて火山灰拡散シミュレーションを行うことが可能である。

Morton et al. (1956)<sup>3)</sup>によって、噴煙柱の高度は放熱率の1/4乗に比例することが、理論的に示され、大規模噴火についてそれが確認されている。小規模噴火であるが、図7はそれを桜島において圧倒的多数のデータによって検証したものである。(2)式は上限においてMorton et al. (1956)の式が成り立つことを示した。

### 3) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

#### a) 風速ベクトルのその場観測

火山体周辺では風速場が複雑なので、分解能の高いDEMを用い気象モデルに基づき、風

の場を再現する。風速場の予測と検証のために、Compact Weather Station (CWS) を搭載したドローンおよび風速 3 成分を測定するドップラーライダー (DL) を用いて風速ベクトルの大気中その場観測を開始した。CWS は小型の超音波風向風速 Type. A (重量約 250g、サンプリング間隔 1 秒) と、風向風速に加えて気温、湿度の観測も可能な Type. B (重量約 650g、サンプリング間隔 1 分) の 2 種類である。DL は最大高度 600m までの風の鉛直プロファイル (30m 間隔) を測定する。センサーの取付け位置はプロペラによる影響を避けるために機体中央部の 50~60cm とした。使用したドローンは観測機器を搭載した状態で約 15 分の飛行が可能なので、所定の高度に到達するまでの最大上昇速度は 5m/s、観測終了後の最大下降速度は 2.5m/s とした。高度 1000m での観測を行う場合には、到達までに 200 秒、帰還に 400 秒を要するために高度 1000m での滞空時間は約 5 分となる。

UAV の離発着は桜島の南岳火口から 2.4km 南南東の有村から行った。また、同じ場所に DL を設置し、同地点での鉛直方向の風速 3 成分を連続的に記録した。結果の一例を図 8 に示す。

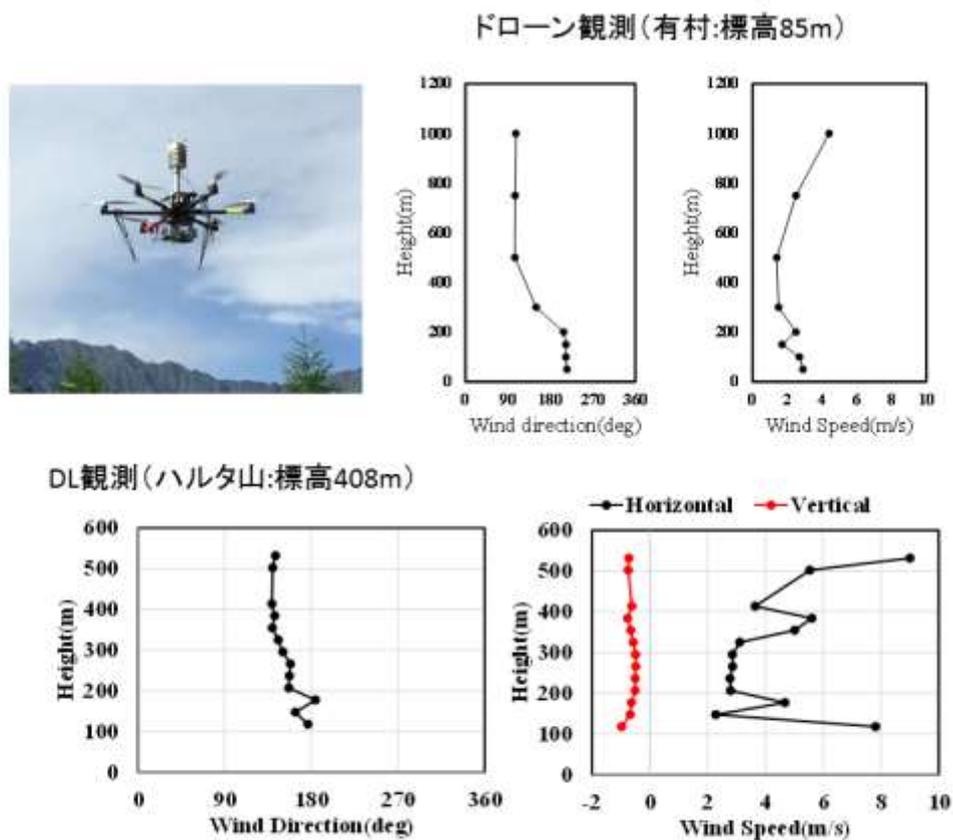


図 8 ドローンに搭載した風向風速計およびドップラーライダーによる風観測

ドローンによる風速ベクトルは、DL による遠隔観測と大差なく、ドローンによるその場観測によって概ね、再現できている。DL による観測では、風ベクトルの鉛直成分の観測が可能である。

## b) 火山灰の大気輸送に及ぼす地形効果の検討

火山噴火による火山灰の大気中の拡散・沈着の問題は大気科学の視点からの研究も必要不可欠であるので、火山活動が活発で噴煙高度が数 km に及ぶ噴火も頻繁に発生する桜島を対象とし、領域気象モデルを用いて火山灰の大気輸送の数値解析をした。特に、火山灰輸送に及ぼす地形により励起される気流や波動の影響に着目して解析した。

数値シミュレーションには気象モデルと化学過程・エアロゾル過程モデルとの結合モデルである WRF-Chem (version 3.6.1) を用いた。西日本・南日本をカバーする領域を第 1 領域 (12.5 km 格子) とし、九州をカバーする第 2 領域 (2.5 km 格子)、鹿児島県をカバーする第 3 領域 (500 m 格子) を設定した。モデル上端高度は 50 hPa とし、鉛直に 90 層を取り、下層ほど細かい格子間隔とした。初期値・境界値には ERA-Interim を用いた。

対象とした噴火イベントは、2013 年 8 月 18 日に発生したブルカノ式噴火である。このときの噴煙の到達高度は火口から 5 km ないし 7 km と見積もられている。降灰は桜島から西・北西方向の広域に観測された。降灰の測定値として鹿児島県による 62 箇所の観測点でのデータを、火山噴火状況は気象庁によるデータを利用した。

噴火による火山灰の排出を模擬するため、火口上空にトップヘビーな傘型の火山灰プルームのプロファイルを噴火時刻に与えた。プルームの初期高度 HP は明確ではないため、ここでは、3 km、4 km、5 km の 3 通りの設定をした感度実験をすることで、プルーム高度の違いによる火山灰の拡散・沈着への影響も調べた。さらに地形の影響を明示するため、対照実験として第 3 領域の標高を仮想的にゼロとした実験も行った。

図 9 には、異なる HP の場合の実地形実験と平坦地形実験とで得られた降灰量の結果を示す。卓越風向が東・東南であったため、降灰は桜島から西・北西に広がっていることが分かる。降灰観測地点の結果と比べて計算は良好な結果を示している。実地形と平坦地形の場合を比べると、平坦地形の場合には降灰量が距離に応じて減少して分布パターンもスムーズである一方、実地形の場合には離れた地点でも降灰量の多い地域があり卓越風向に直交方向の分布の広がりも顕著である。距離に応じた降灰量分布や鉛直断面など他の角度から調べたところ、平坦地形の場合には HP が高いほどより遠くまで降灰が生じるが、実地形の場合には HP によらずに降灰は遠方まで達することが分かった。

このような違いは、桜島や下流側の薩摩半島の地形と大気成層の効果により励起された流れパターンの違いや重力波の生成の影響を受けていることが分かった。火山地形は重力波と風下側での下降流を発生させ、その影響は火山近傍及び遠方にも及ぶことがわかった。

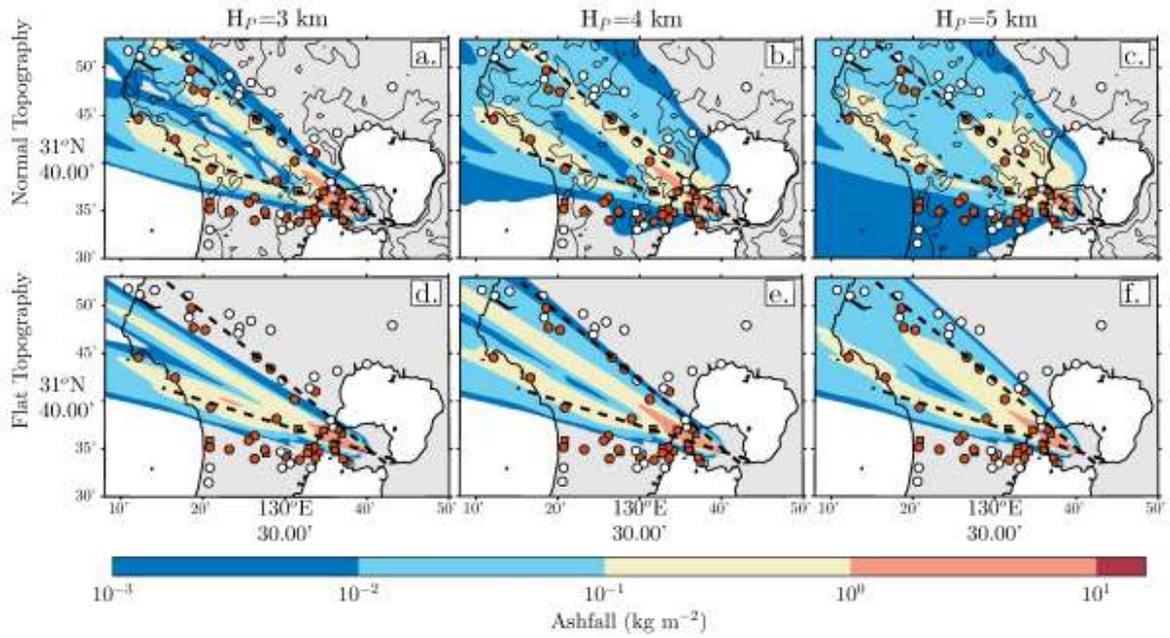


図9 HPが3 km, 4 km, 5 kmの場合に計算された降灰量。実地形の場合 (Normal) と標高ゼロの平坦地形 (Flat) の結果を示す。色つきの丸印は降灰が観測された地点を示す。

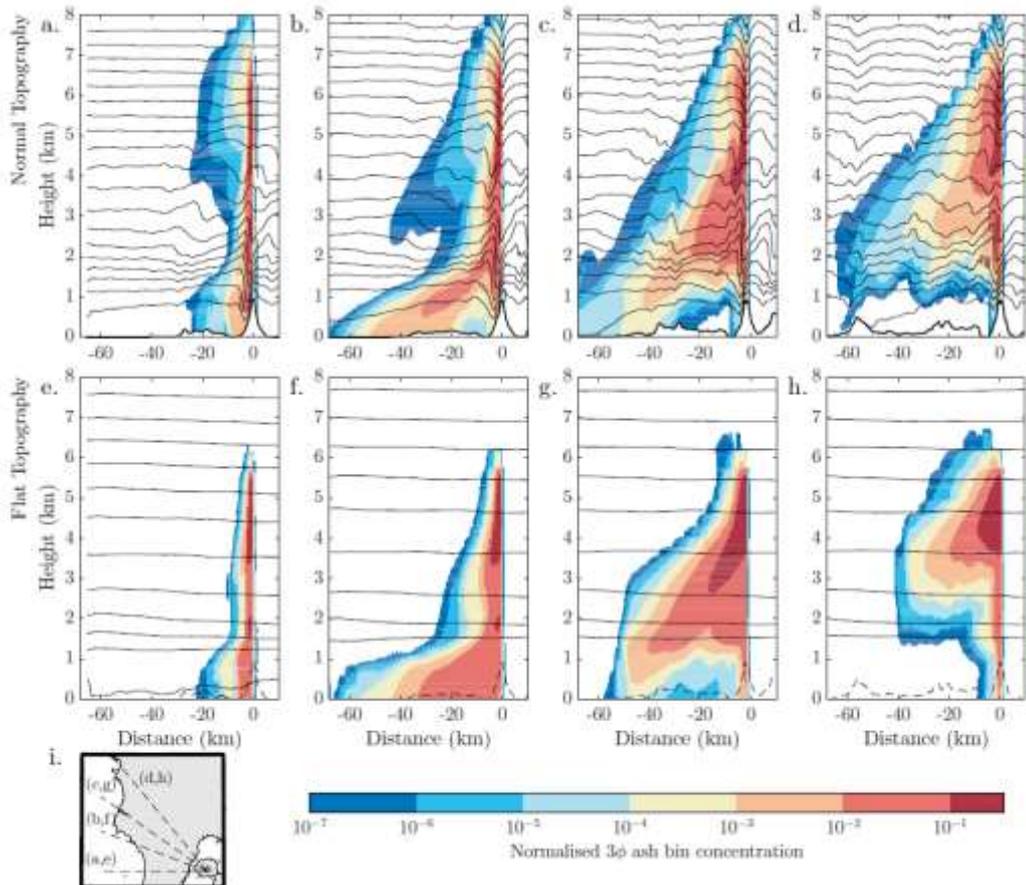


図10 気象モデルにより計算された火山灰の濃度

### c) 火山灰拡散シミュレーションの改良

火山灰拡散シミュレーションはこれまでも PUFF モデルを用いて行ってきたが、本課題においてはパラメータの与え方を改良した。PUFF モデルは粒子追跡法であり、初期座標に配置された粒子を風、重力降下、ランダムウォークによる拡散で移動させるものである。これまで、粒子を初期座標として火口から鉛直上方へ一次元配置していたが、大規模噴火では火口上に噴煙の成長に伴い成層圏付近に傘雲を形成するので、傘雲を考慮して移流・拡散シミュレーションを行う必要がある。2014年2月にインドネシアのケルト火山で発生した噴火を対象に、傘雲の形成を考慮した火山灰拡散シミュレーションを行い、降灰分布と照合することによりその妥当性を検討した<sup>4)</sup>。

ケルト火山では2014年2月13日にプリニー式噴火が発生した。噴煙の到達高度は17kmで、噴火は約2時間続いた。火山灰は下層においては北東方向へ、上層においては西方へ移流した。噴火開始直後に傘雲が形成される様子は衛星画像によってとらえられており、その大きさは噴火開始後30分で直径100kmを超えている。そこで、高度の増加とともに水平方向の拡散係数 ( $C_h$ ) が、増加するような(3)式を提案し、シミュレーションを行った。

$$C'_h = C_h \times \left[ 1 + \frac{z}{z_0} \exp \left\{ - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \right] \quad (3)$$

結果を図11に示す。比較のために、拡散係数の増加を考慮しない場合も併せて示した。火山灰の拡散域の再現に著しい改善が見られる。

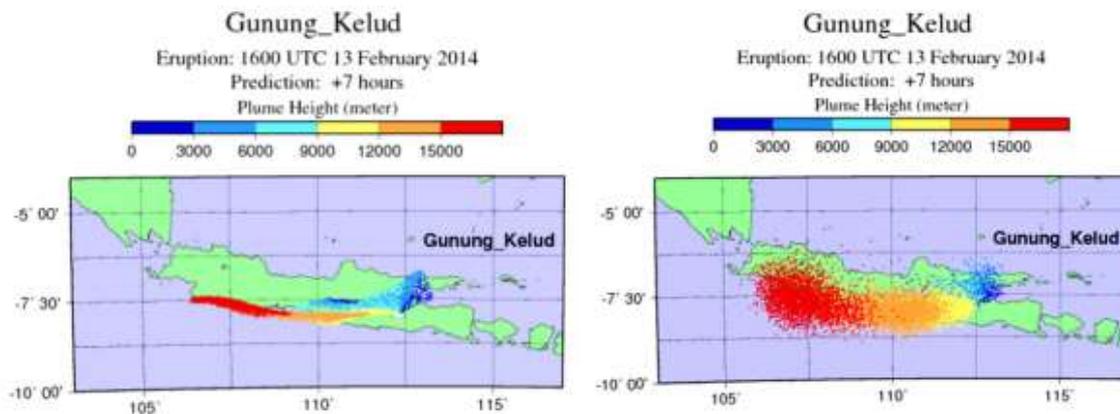


図11 PUFFモデルによる火山灰拡散シミュレーション。左：水平方向の拡散係数の増加を考慮しない場合。右：水平方向の拡散係数の増加を考慮した場合。

### (d) 結論ならびに今後の課題

火山灰のマルチパラメータ観測網により火山灰観測がリアルタイムで行える状態にあり、火山灰予測の高速化及び高精度化のための準備段階の観測と解析が開始できたので、サブテーマ自体の平成28年度における目標はほぼ達成できた。

噴火に伴う地盤変動量から火山灰放出量及び噴煙高度の上限を求める経験式が得られたので、暫定的に火山灰拡散予測が可能な状態である。上限値を用いることは火山灰到達距離の最大値を得ることなので、ハザード予測としてはこれでいいが、実際の噴煙高度は

これよりも低いので、噴煙高度の予測精度を上げる必要がある。地形効果を考慮した火山灰拡散シミュレーションで示されたように、火山地形は重力波と風下側での下降流を発生させ、その影響は火山近傍だけでなく遠方にも及ぶ。山頂付近の風の場合は、噴煙の到達高度を低減させるので、噴煙高度の予測においては、風ベクトルの多様性がどの程度実効噴煙高度に影響を与えるか評価する必要がある。

このことは、火山近傍での風の予測と、観測データによる検証が極めて重要であることを意味する。地形の影響の程度は、本年度では、試作として検討した程度であり、多様な風速場に対する影響評価と、実際の観測データとの照合を行っていく必要がある。実観測においてもキャンペーン観測を行っただけでなく、平成 29 年度以降は、連続観測への拡張と、観測点の増強、また、ドローンを用いて山頂直上の風を直接観測する必要がある。

火山灰のマルチパラメータ観測は始まったばかりであり、大気中火山灰濃度や地上降灰量などのグランドトゥルスデータとの照合に至っていない。今後、グランドトゥルス観測データを積み上げていく必要がある。特に、レーダーの反射強度は、火山灰の粒径分布特性に大きく依存するので、地上観測や大気中観測により、直接的に火山灰粒径分を観測する必要がある。

(e) 引用文献

- 1) Ohta, Y., Iguchi, M.: Advective diffusion of volcanic plume captured by dense GNSS network around Sakurajima volcano: A case study of the Vulcanian eruption on July 24, 2012, Earth Planets, Space, Vol. 67:157, DOI 10.1186/s40623-015-0324-x, 2015.
- 2) Iguchi, M.: Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash - case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan -, Jour. Disast. Res., Vol. 11, pp.4-14, 2016.
- 3) Morton, B. R., Taylor, G. and Turner, J. S.: Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 234, No. 1196. (Jan. 24, 1956), pp. 1-23, 1956.
- 4) Tanaka, H. L., Iguchi, M., Nakada, S.: Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal from Kelud volcano in Indonesia on February 13, 2014, Jour. Disast. Res, Vol.11, pp.31-42, 2016.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
辻本浩史・井上 実・志村智也・町田駿一	UAV とドップラーライダーを用いた急峻な山岳地域における気象観測	平成 28 年度京都大学防災研究所研究発表講演会	平成 29 年 2 月 22 日

Alexandros-Panagiotis POULIDIS, Tetsuya TAKEMI, Masato IGUCHI	Orographic Effects on the Transport and Deposition of Volcanic Ash - A Sakurajima Case Study	平成 28 年度京都大学 防災研究所研究発表 講演会	平成 29 年 2 月 22 日
---	---	----------------------------------	---------------------

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成 29 年度業務計画案

#### ① プロジェクトの総合推進

当該プロジェクトと関連する「課題 C サブテーマ 3」および「課題 D サブテーマ 3」と連携を図りつつ、研究集会を開催する。

#### ② リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

X バンド MP レーダーを霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島に設置し、観測を開始する。ディストロメータを用いた地上降灰観測により、降灰量の時間変化を明らかにする。また、噴火頻発期には火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、X バンド MP レーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量との関係を多くの噴火事例について調べ、その関係式を決定する。

GNSS 観測についても同様の解析を行う。LC 搬送波位相残差及び SN 比が対象となる。地盤変動量から算出される火山灰放出量との関係についても検討する。

ライダー観測は光を使うので、低濃度の希薄火山灰を対象とする。得られる後方散乱強度および偏光解消度を、ドローンに搭載した粉塵計を用いた大気中その場観測から得られる火山灰粒子密度（PM2.5 相当）と照合して、散乱強度と火山灰濃度の関係を明らかにする。また、偏光解消度は粒子の形状に依存するので、粒子形状を検討することにより、水滴と火山灰粒子の識別を試みる。また、X バンド MP レーダーのデータを定量的に解釈するために火山灰粒径分布観測を桜島周辺において機動的に実施する。

#### ③ 火山灰拡散予測の高速度化技術開発

地震計及び傾斜計の機能向上を図ったうえで、ブルカノ式噴火について噴火発生に伴う地盤変動及び火山性微動振幅を降灰量分布から求めた噴出量と比較することにより、地球物理学的観測データからの過去の噴出率推定式を高精度化する。

噴煙柱シミュレーションによって、噴出率ごとの噴煙柱高度、噴煙外形のデータベースを作成する。火山噴火の映像からシミュレーションの妥当性を検討する。

#### ④火山灰拡散予測の高精度化技術開発

WRF-CHEM メソ気象モデルにより複雑火山地形における火山体周辺の風速ベクトル分布を求める。ドローンやドップラーライダーを用いた大気中および地上における火山近傍での大気中の風向・風速観測と照合することにより、気象モデルの妥当性を検討して風の場の再現の高精度化を図る。

桜島など過去の噴火活動で落下したレキの落下速度等の空力特性を、防災研究所（宇治市）の風洞実験装置を利用して明らかにする。レキの大きさと落下速度を実験的に求めるが、形状およびレキの姿勢との関係にも注目して解析を進める。

従来の火山灰拡散シミュレーション（PUFF）を噴出率の時間変化を取り込めるように改良し、地上観測によって得られる降灰速度と比較して、その改良の妥当性を検討する。