

2. 2 リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発

(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	機関種別	役職	氏名
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	井口 正人
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	中道 治久
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	為栗 健
国立大学法人京都大学	共同実施機関	助教	山本 圭吾
国立大学法人京都大学	共同実施機関	助教	山田 大志
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	石川 裕彦
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	竹見 哲也
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定研究員	Alex Poulidis
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	丸山 敬
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定教授	山路 昭彦
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定准教授	佐々木寛介
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	志村 智也
国立大学法人京都大学	共同実施機関	RA	瀧下 恒星
国立大学法人鹿児島大学	参加機関	特任教授	真木 雅之
国立大学法人鹿児島大学	参加機関	外来研究員 (釜慶大学)	Dong-In Lee
国立大学法人筑波大学	協力機関	教授	田中 博
国立大学法人神戸大学	協力機関	教授	大石 哲
国立大学法人東北大学	協力機関	准教授	太田 雄策
国立大学法人東京大学	協力機関	准教授	鈴木雄治郎
国立研究開発法人国立環境研究所	協力機関	主任研究員	清水 厚
一般財団法人日本気象協会	協力機関	主任研究員	井上 実
国立大学法人東北大学	協力機関	教授	西村 太志
国立大学法人東北大学	協力機関	修士課程学生	朝倉由香子
三菱スペース・ソフトウェア(株)(鹿児島大学)	協力機関	博士課程学生	小堀 壮彦

(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した。

2) 平成 29 年度：

桜島、霧島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島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。レーダーの反射強度と降灰量を比較し、両者の関係を検討した。火山灰拡散予測の高速化のために桜島南部の観測点の傾斜計及び地震計を改修した上で、地盤変動や地震動のデータベースを整備した。また、高精度化のために、再現された風速場をドップラーライダーやドローンを用いた大気中のその場観測により検証した。噴煙の最上部に現れる傘雲の形成を考慮するように火山灰拡散モデルを改良した。

3) 平成 30 年度：

南九州 5 火山におけるレーダー観測を継続した。ディスドロメータを火口から直線状に配置することにより、降灰量と粒径分布の距離依存性を明らかにした。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の経験的關係式の精度を向上させた。GNSS を桜島の北東側の大隅半島に設置し、桜島島外の火山灰観測を強化した。桜島東部の黒神観測井に設置されている地震計及び傾斜計を改修作業し、地盤変動及び火山性微動振幅データから火山灰噴出率を求める推定式を高精度化させた。また、噴火の発生を自動的に検知して、PUFF モデルを自動的に起動できるように改良した。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った。また、FALL3D による桜島近傍の火山灰拡散シミュレーションを行い、地上降灰量と比較して、精度検証・高精度化を図った。ホノルルで開催される国際会議(Asia Oceania Geosciences Society)において、研究成果を発表するとともに研究に関する情報収集を行った。さらに、風洞実験装置を利用してレキの空力特性を把握した上で、瓦や壁材を対象にレキへの耐衝撃性能試験を行い、サブテーマ D3 に引き渡す基礎データを作成した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

即時把握技術開発においては、X バンド MP レーダー、GNSS、ライダーによるリモートセ

ンシング観測を継続することにより、このマルチパラメータ観測システムが噴煙高度や降灰量等の即時的把握と噴煙量の推定に有効であることが示された。予測の高速度化技術においては、傾斜計及び地震計を改修することにより、噴火の発生、地震動や地盤変動データからの噴出率と噴煙高度の評価パラメータを高度化が図られた。予測の高精度化においては、火山体周辺の風速ベクトル分布を高分解能で把握することにより、降灰量の予測がさらに改善された。太陽光パネルの破壊実験のデータをサブテーマ D3 に引き渡した。

5) 令和 2 年度：

令和 2～4 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、長期間のデータを解析することにより連続噴火に伴う地盤変動速度や火山性微動振幅やレーダーの反射強度の時間変化と地上降灰量の時間変化を比較して、3 者の関係を明らかにする。

6) 令和 3 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。大規模噴火等の連続噴火に対応するためのシミュレータの改良設計を行う。

7) 令和 4 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。オンラインシステムを実装し、地上降灰量の時間変化と比較することにより予測精度を評価する。

8) 令和 5 年度：

令和 5～7 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) 令和 6 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) 令和 7 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) 令和 2 年度業務目的

これまで進めてきた「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」を引き続き継続することにより、噴煙の検出の定量化を図るとともに、火山灰拡散予測の高速化および高精度化を進める。令和 2～4 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。令和 2 年度は、長期間のデータを解析することにより連続噴火に伴う地盤変動速度や火山性微動振幅やレーダーの反射強度の時間変化と地上降灰量の時間変化を比較して、3 者の関係を明らかにするとともに、変化する気象場に対応した高分解能の風速場データベースを作成し、気象モデルや地上気象観測から得られる現在の気象場に類似した気象場に対応する高分解能風速場をデータベースから抽出する手法を開発する。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

令和 2 年度においては、これまでに単発的なブルカノ式噴火の観測及び解析によって培われた火山灰放出量の即時把握技術、予測の高速化及び高精度化技術をさらに発展させたいと、噴出率の時間変化を取り扱うことにより、長時間継続する噴火活動に対処しようとした。これまでの技術開発の延長線上で、最も進んだ部分は、ディストロメータによって測定される粒径分布を、直接的なリアルタイム地上降灰量の把握およびレーダー反射強度を活用したリモートセンシング的降灰量の把握技術である。これは降雨であれば、地上降雨量とレーダー降雨量に対比されるものである。火山灰拡散予測のオンラインシステムの開発に向けては、基礎データベースの充実を図った。これらは、1 分間毎の噴出率と 100m の空間分解能をもつ 1 時間ごとの高精細風速場データベースであり、約 2 年分をカバーしている。これらによって長時間の火山灰予測実験を行える体制ができ、同時に構築した約 2 分間隔毎のレーダー噴煙高度データベースにより火口上噴煙高度が、また、ディストロメータによる分単位降灰量データベースによって、降下火山灰量の予測値を検証することが可能となった。

(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

霧島、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レーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業も併せて行う。前年度までに桜島を取り巻くように設置したディストロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量と粒径分布の距離依存性を明らかにする。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したとき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、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例を得ることにより、その経験的関係式の精度を上げる。

これまでに設置した GNSS によって得られる LC 搬送波位相残差及び SN 比と比較的規模の大きい噴火による地上降灰量との関係を調べ、関係式を提示する。

桜島島内に設置した 2 台のライダーによる火山灰観測を継続する。ライダーで観測可能な火山灰消散係数の上限を決定した上で火山灰消散係数について気候学的解析を行い、大気環境常時監視局データとの照合を行う。火山灰の輸送拡散数値モデルを検証するためのデータセットを作成する。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダー

が当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、ここで実施する現地観測について、その一部もしくはその全てに代えて緊急観測を実施することを可能とする。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島南西部にある沖小島観測室の既設観測井に設置されている地震計及び傾斜計について、本研究への活用のために引き上げ及び改修作業を行う。このことにより、桜島南西部方面の地盤変動及び火山性微動振幅から求められるブルカノ式噴火発生に伴う噴出率見積もり方式を定式化し、これを降灰量分布から求めた噴出量と比較することにより、地盤変動及び火山性微動振幅データから過去に求めた噴出率推定式を高精度化する。

これまで用いてきたシミュレーション手法においては火山灰粒子の粒径から落下速度を計算していたが、ディストロメータにより観測される落下速度を直接反映できるようにシミュレーション手法を改良する。

課題 C3 と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行する。これにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させる。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

火山近傍の風速場は気象モデルから WRF により、高分解能しているが、用いる気象モデルと高分解能化の程度によって大きく異なるので、気象モデルと高分解能化の程度を変えて、火山灰拡散シミュレーションを行い、地上降灰量と比較することにより、最適な気象モデルと分解能を決定する。また、鉛直風を入れたシミュレーションを行い、その効果を検証する。さらに、シミュレーションにより、火山地形の影響を踏まえた火山噴煙の大気中への注入による風等の気象場への影響を評価する。

ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度を計測(年 2 回程度)し、鉛直プロファイルを把握する。取得したデータにより、地上観測機器や気象データとの比較、気象モデルの妥当性評価等を実施する。

ディストロメータは火山灰粒子の落下速度も計測できるので、観測された落下速度から見かけの粒子比重を求めることにより、火山灰粒子の凝集の程度を評価する。

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

まず、地震及び地盤変動データから噴出率の、また、レーダー観測により火口直上の反射強度の時系列データを作成する。ディストロメータ観測は地上降灰量を与えるので、地上降灰量の時系列データを作成する。その上で、連続噴火に伴う地盤変動速度や火山性微動振幅やレーダーの反射強度の時間変化と地上降灰量の時間変化を比較して、3 者の関係を明らかにする。

風速場は常に変わるが、WRF を用いた高分解能の風速場の計算には時間を要するため、逐次得ることができない、そこで、過去 1 ～ 2 年の気象場に遡り、高分解能風速場データベースを作成し、気象モデルや地上気象観測から得られる現在の気象場に類似した気象場に対応する高分解能風速場をデータベースから抽出する手法を開発する。

(c) 業務の成果

1) プロジェクトの総合推進

令和2年11月11日に東京（防災科学技術研究所東京会議室）において課題D全体の打ち合わせを行った。東京での打ち合わせは課題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た。主な論点は、ディストロメータのデータの受け渡しや噴煙のシミュレーションに関するパラメータについてである。

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

桜島においてレーダー、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を継続した。図1にマルチパラメータ観測の概要を示す。レーダーについては、点検を外部委託するとともに、UPSを交換して電源を強化した。ライダーについてはYAGレーザーのフラッシュランプを交換して観測の継続性の安定化を図った。

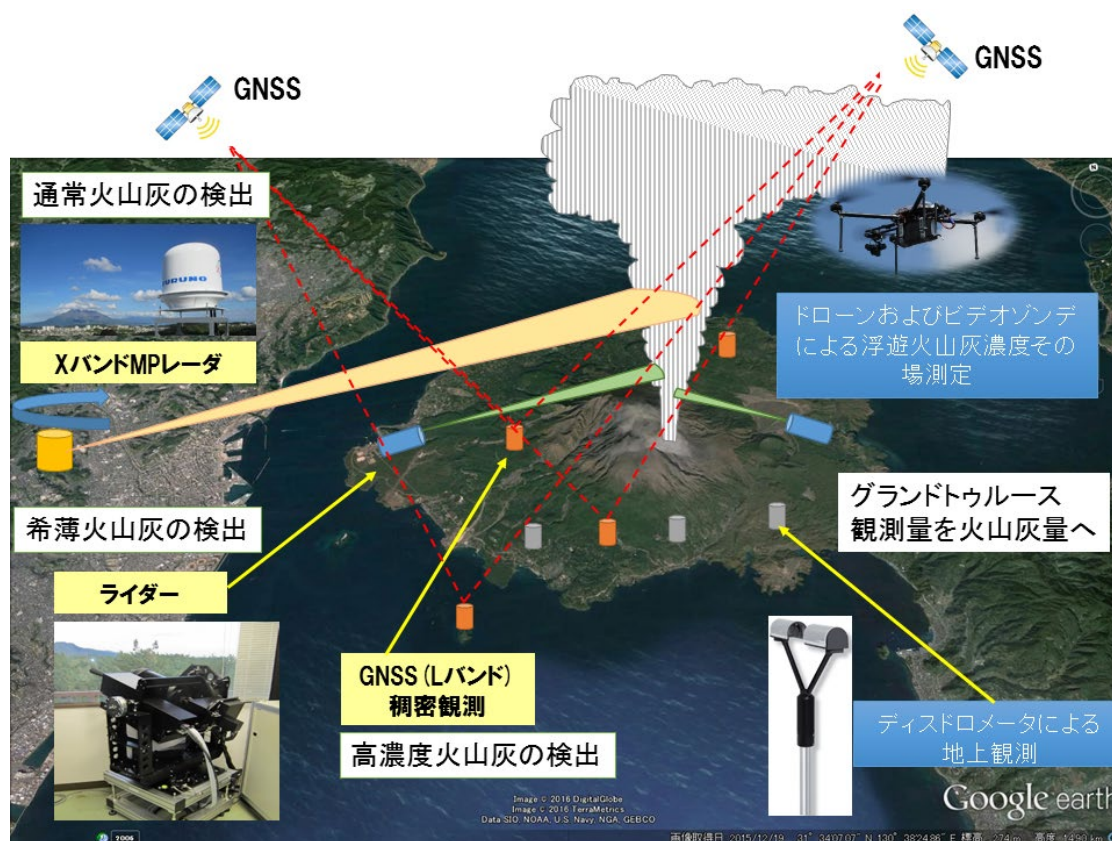


図1 火山灰のマルチパラメータ観測の概要。

a) レーダー観測

i) 観測の概要

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、諏訪之瀬島を対象に、X バンド MP レーダーによる噴煙の連続観測を 2017 年 8 月から現在まで継続している。レーダーの設置場所は鹿児島県内 6 カ所で表 1 に示す通りである。また、走査の仰角と方位角のパラメータを表 2 に示す。

表 1 レーダー基地局の場所

対象火山名	施設名	住所	緯度 (°)、経度 (°) 標高 (m)
霧島山	霧島市立牧園中学校	霧島市牧園町宿窪 田 751-1	31.85784, 130.75134 225
桜島	京都大学防災研究所 火山活動研究センター	鹿児島市桜島横山 町 1722-19	31.58960, 130.60115 44
桜島	鹿児島県立錦江湾高 等学校	鹿児島市平川町 4047	31.445607, 130.507227 105
薩摩硫黄島	三島村竹島焼却所	鹿児島郡三島村竹 島	30.81314, 130.40938 65
口永良部島	口永良部島避難所	熊毛郡屋久島町口 永良部島番屋が峰 207-4	30.470361, 130.176036, 281
諏訪之瀬島	諏訪之瀬島キャンプ 場	鹿児島郡十島村諏 訪之瀬島	29.61125, 129.70547 119

表 2 レーダーの走査モード及びパラメータ (2021 年 3 月 1 日現在)

火山名	HSQ スキャン	セクターRHI スキャン	
	仰角 (°)	方位角 (°)	仰角範囲 (°)
霧島山	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12.5, 15, 18, 40	設定なし	
桜島 (火山活動研究 センター)	設定なし	95~115	10~57
桜島 (錦江湾高等学校)	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30	設定なし	
薩摩硫黄島	5, 10, 15, 20, 30, 45, 60	設定なし	
口永良部島	設定なし	115~135*	4~60*
諏訪之瀬島	設定なし	10~20*	10~45*

HSQ スキャンは、水平面での走査、セクターRHI スキャンは鉛直断面での走査である。

*口永良部島は 2018 年 8 月以降、セクターRHI スキャンで観測を継続している。諏訪之瀬島は 2020 年 8 月以降、セクターRHI スキャンで観測を継続している。

レーダーの設置状況を図 2 及び図 3 に示す。使用したレーダーは古野電気（株）製 WR-2100 である。中心周波数は 9432.5MHz、空中線出力は 100W であり、およそ 30 km の範囲を観測することが可能である。レーダーの観測範囲を図 4 に示す。データ収録装置（PC）により、制御され、生データはハードディスクに収録される。PC により雨量データに変換され、雨量データは火山活動研究センターのサーバーに転送している。レーダーの生データはデータ量が大きいため、半年に 1 回の頻度で定期的にハードディスクを交換した。



図 2 レーダーの設置状況。鹿児島県立錦江湾高等学校に設置したもの



図 3 レーダーの設置状況 鹿児島市立牧岡中学校に設置したもの



図4 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、諏訪之瀬島におけるXバンドMPレーダーの観測範囲

ii) 桜島噴火

2020年6月4日午前2時59分に発生した噴火について述べる。この噴火には顕著な空気振動があり、噴出物の落下音を聞いた桜島の住民がいた。この噴火は悪天候下に発生したため監視カメラによる噴煙到達高度の測定は困難であった。一方、明朝の住民からの通報により鹿児島市および鹿児島地方気象台が調査し、桜島東部の路上において最大5cm径の火山レキが複数発見された。そのため、顕著な噴火であったことが把握できていたが、噴火規模については当日時点では不明であった。ところが、噴火4日後に居住地域（南岳山頂火口から水平距離3.3km）への火山岩塊の落下が住民によって情報提供されたのを受け、鹿児島市、鹿児島地方気象台、京都大学は6月8日午後に噴石落下地点の現地調査を行った。噴石の居住地域への落下は噴火警戒レベル5の事象であるが、当該噴火から経過時間が大きいことと、現地調査時点とその後において火山観測データに特段の変化は見られなかったことから噴火警戒レベル3で維持された。

噴火発生直後に気象庁が出した噴火に関する火山観測報（第2号）によると、噴煙高度は火口上1500m以上とされ、噴煙の最高到達高度は測定出来ていない。弾道を描いて飛散する大きな噴石（火山岩塊）の到達距離は4合目（南岳山頂火口から1300mから1700m）と報告された。しかし前述の通り実際は3000m超の到達距離であった。したがって、悪天候下であっても噴煙高度や噴石の飛散距離を即時把握するのは重要である。前年度の成果

報告書に記載の通り、悪天候下においても桜島においては気象レーダーにより噴煙の把握が可能で、噴煙の最高到達高度の測定は可能である。2020年6月4日午前2時59分に発生した噴火についてレーダー観測結果を図5に示す。

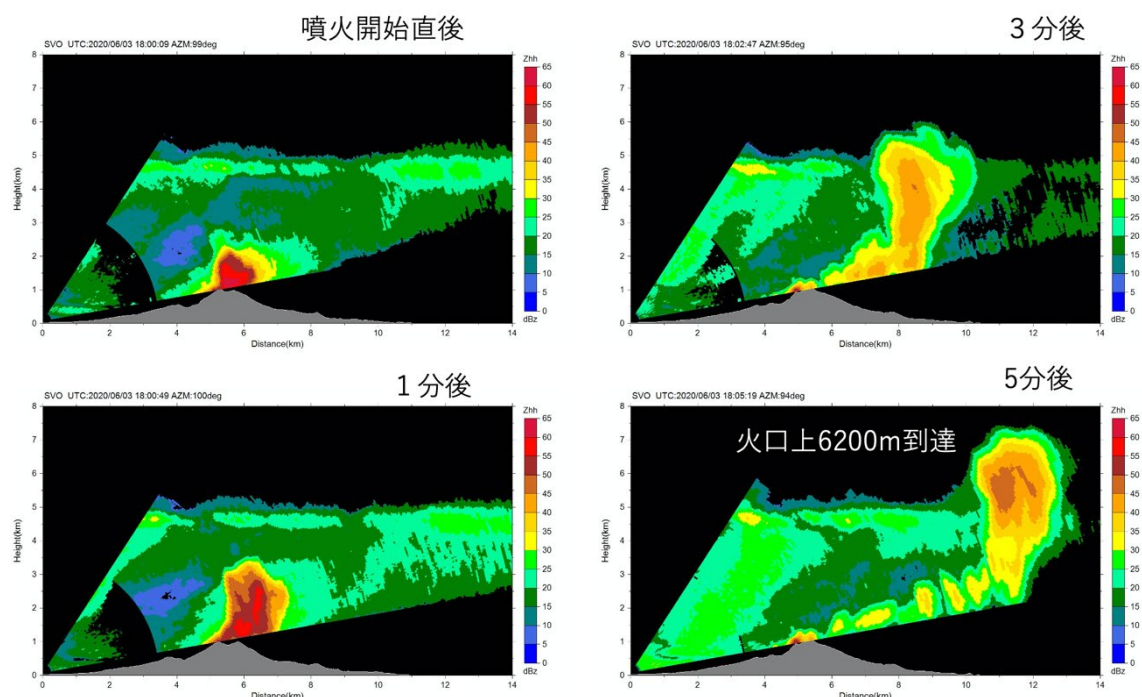


図5 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020年6月4日 3:00～3:04 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

噴火開始直後において顕著な反射強度の高まりが火口直上に見られ 25dBz の最高高度は 2500 m であり、この時点で噴煙高度は火口上 1400 m である。そして、噴火開始 1 分後には噴煙高度は火口上 3200 m となった。噴火開始 3 分後には噴煙は火口から東に 3 km 程度東に移動し、噴煙高度は火口上 4800 m となった。噴火開始 5 分後には噴煙は火口から 7 km 程度東に移動し、噴煙高度は火口上 6200 m となった。この噴煙高度は平成 29 年度成果報告書に記載した 2017 年 11 月 13 日の桜島噴火の噴煙高度の火口上 5000 m よりも高い。また、鹿児島地方気象台による桜島の噴煙高度報告における直近の最高噴煙高度は、2013 年 8 月 18 日 16 時 31 分の昭和火口噴火の噴煙高度 5000 m であり、2020 年 6 月 4 日 2 時 59 分の噴火はこの噴火を超える規模であったことが分かった。

iii) 諏訪之瀬島噴火

諏訪之瀬島は2020年4月末に噴火が頻発し、その後10月下旬以降に噴火活動がより活発になり、2020年12月21日に爆発回数が90回となった。そして、12月28日2時48分の噴火では弾道を描いて飛散する大きな噴石（火山岩塊）が火口から南東方向に約1.3 kmまで飛散した。2020年は諏訪之瀬島において噴火が頻発し、2017年8月に諏訪之瀬島に気象レーダーを設置して以降において最大の噴火活動期にあることから、2020年を対象にして諏訪之瀬島レーダーによる噴煙観測結果を示すこととする。気象庁が2020年に発表した諏訪之瀬島の噴火に関する火山観測報のうち本報告書にてレーダー反射強度分布を示す噴火を表3に示す。噴火に関する火山観測報の噴煙高度は火口位置の標高を海拔600 mとしたときの、火口からの相対高度である。

表3 2020年の諏訪之瀬島の噴火に関する火山観測報（気象庁，2020）¹⁾

日時	現象	噴煙高度 (m)	レーダー噴煙 高度 (m)	空振 (Pa)	備考	流向	図
2020/4/29 9:00～ 15:00	噴火 多発	1000	1400			直上	図 6, 7
2020/8/1 15:53	爆発	1800	1400	36.0		北西	図 8
2020/9/4 2:34	噴火	1300	1300			直上	図 9
2020/9/4 3:07*	噴火	1200	1800			直上	図 10
2020/9/5 13:27	爆発	不明	不明	13.5		不明	図 11
2020/9/26 16:54	噴火	1200	1000			南東	図 12
2020/12/28 2:48	爆発	200	不明		雲に入る 噴石 1.3 km 飛散	南東	
2020/12/28 3:00 ～9:00	噴火 多発	不明	2300			不明	図 13
2020/12/29 20:21	噴火	1800	1500			北東	図 14

*9/4 3:07～3:12においてレーダー反射強度分布からは該当する噴煙は確認出来ていないが、3:13頃に噴煙に対応する反射強度の高まりが確認されている。

2020 年 4 月 29 日の噴火多発と報告されている時間帯 9:00～15:00 の時のレーダー反射強度分布を図 6 と図 7 に示す。図 6 と図 7 はそれぞれ 12:14 頃と 12:15 頃の時間に対応する。反射強度分布から 20dBz の等反射強度の最高高度を噴煙到達高度とすると、これらの時間における噴煙の最高到達高度は海拔 2000 m、つまり火口上 1400 m である。

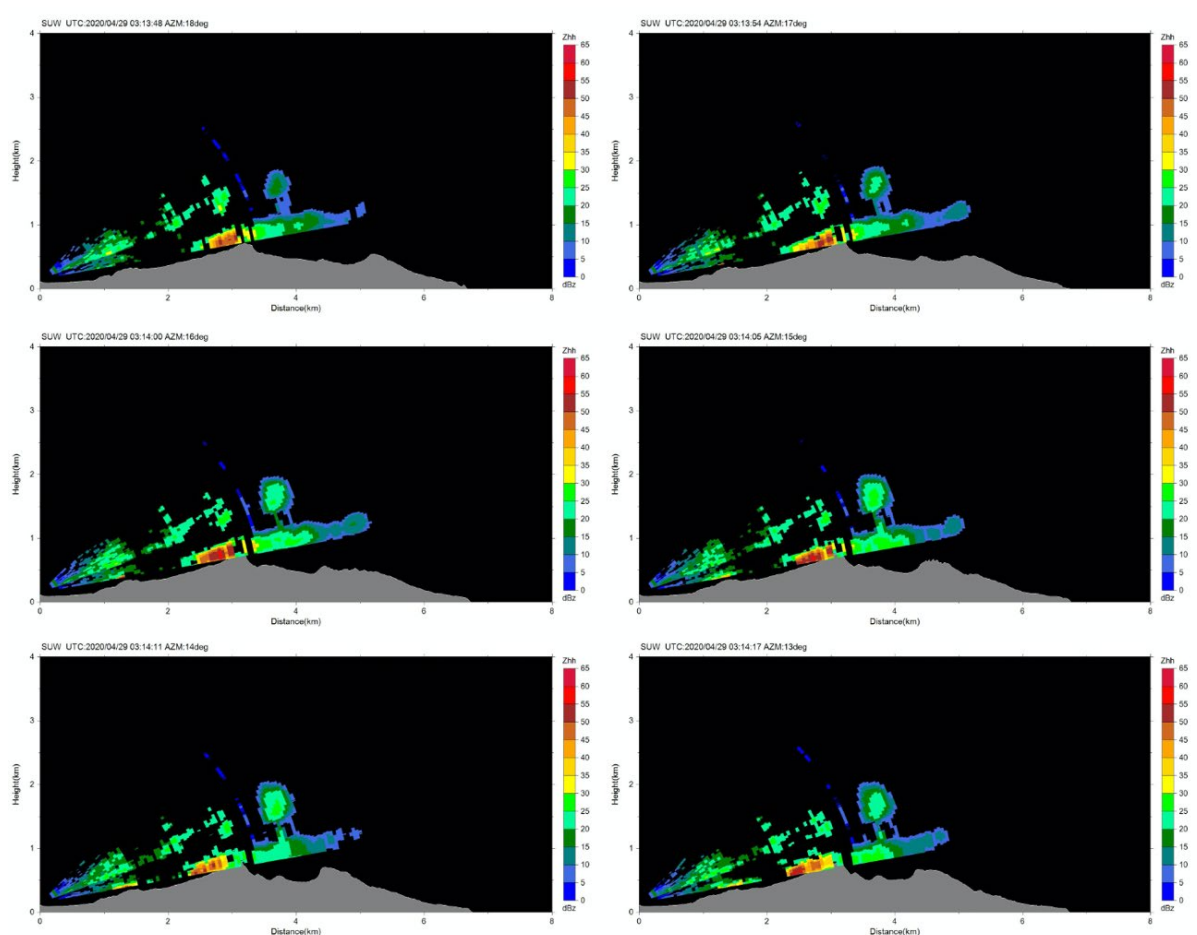


図 6 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 4 月 29 日 12:14 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

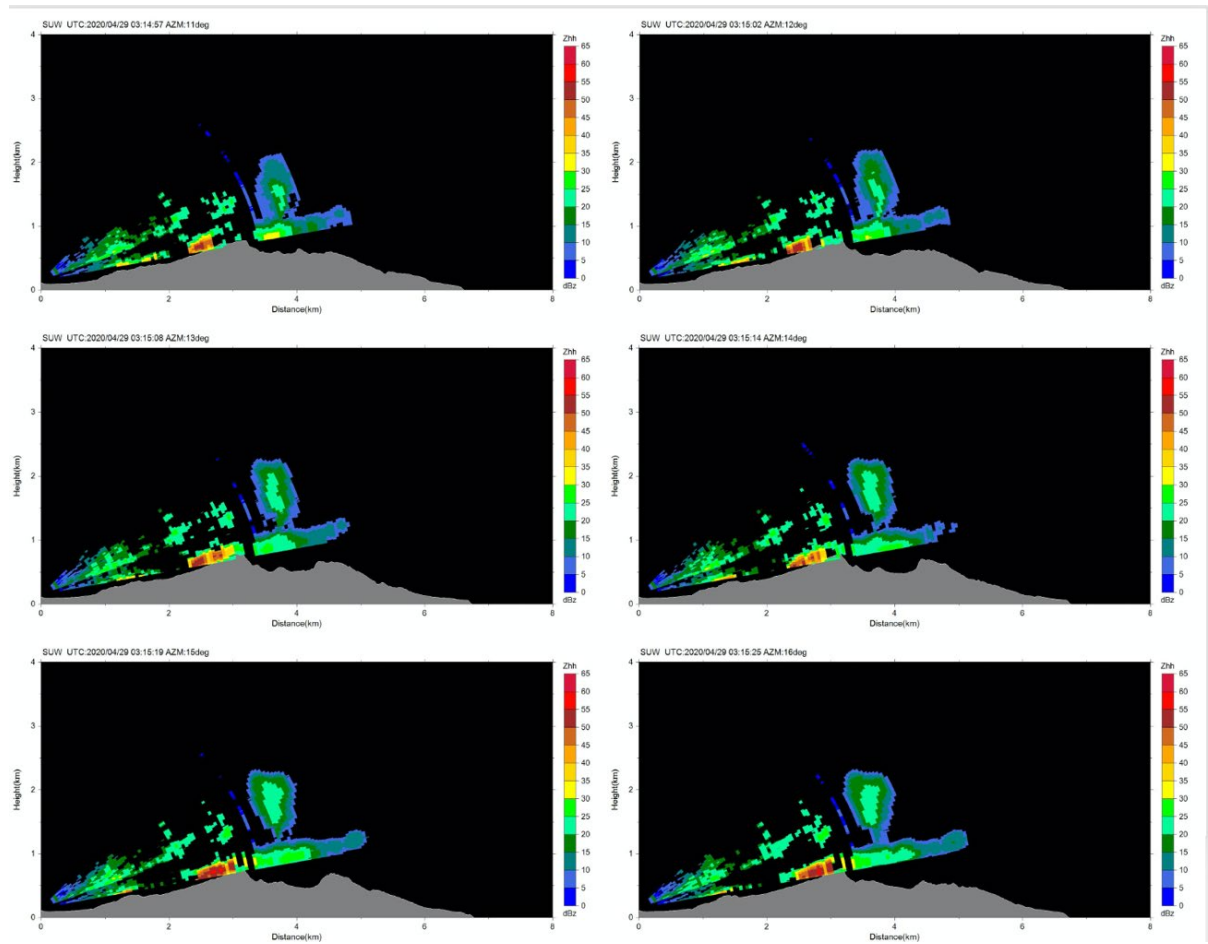


図 7 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 4 月 29 日 12:15 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

次に、2020 年 8 月 1 日 15:53 の爆発の噴煙を捉えたレーダー反射強度分布を図 8 に示す。図 8 は同日 15:56 頃の時間に対応している。反射強度分布から 20dBz の等反射強度の最高高度を噴煙到達高度とすると、これらの時間における噴煙の最高到達高度は海拔 2000 m、つまり火口上 1400 m であり、火山観測報の 1800 m より低い。また、図 8 の左上の図をみると分かるが爆発開始から 2 分程度経過しているにもかかわらず噴煙に対応する部分の反射強度が弱く、最高到達に達するのが噴火開始から約 3 分後である。前者については、噴煙に含まれる火山灰の量もしくは粒径のいずれかが小さい、もしくはそれらの両方とも小さいことが考えられる。後者については、爆発時の噴出速度が遅いため噴煙の上昇速度が遅いことが考えられる。

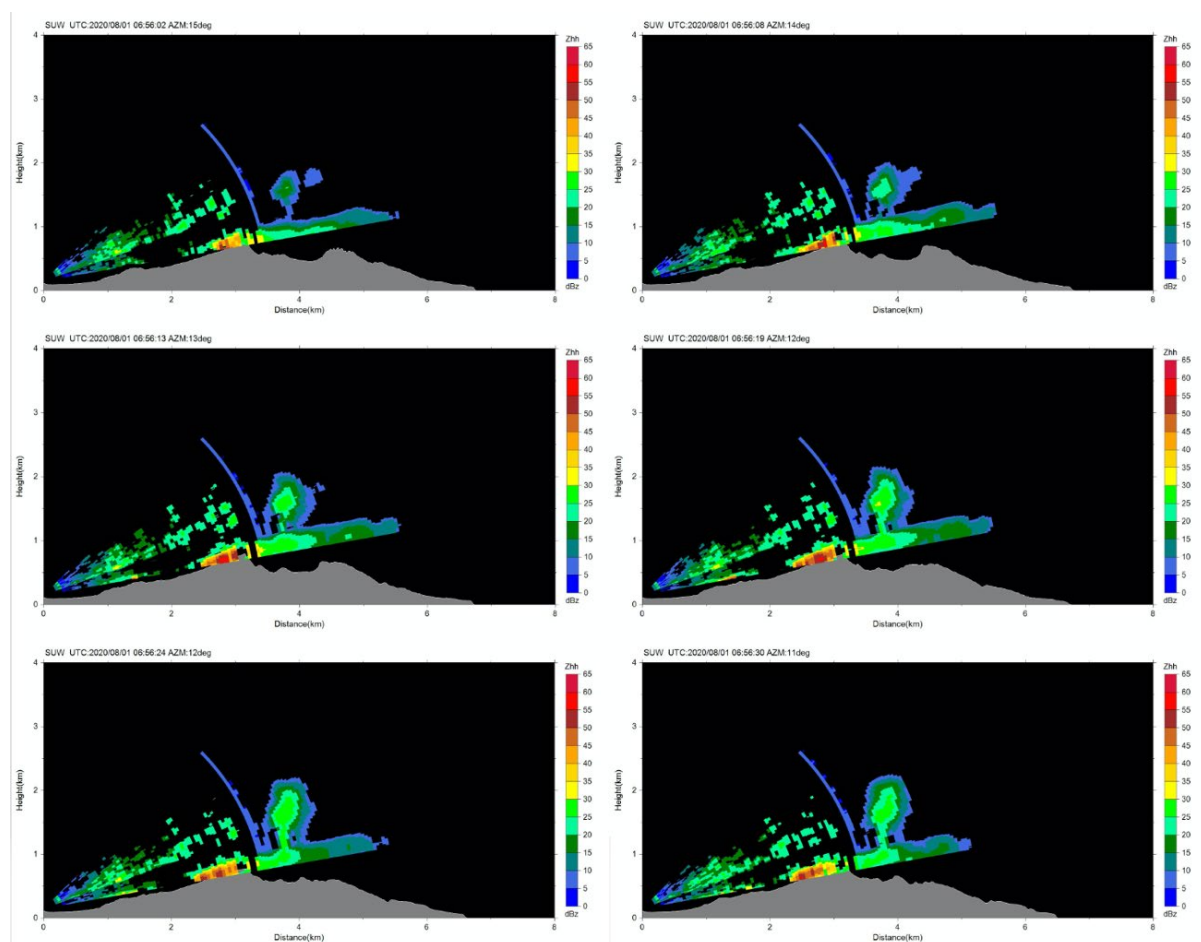


図 8 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 8 月 1 日 15:56 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2020 年 9 月 4 日 2:34 の噴火の噴煙を捉えたレーダー反射強度分布を図 9 に示す。図 9 は同日 2:39~2:40 の時間に対応している。20dBz の反射強度に対応する最高高度（噴煙到達高度）は海拔 1900 m で、つまり火口上 1300 m である。この高度は火山観測報の値と同じである。また、爆発噴煙の上昇は図 8 で示した 8 月 1 日の爆発よりも遅く、噴煙に対応する反射強度の高まりが見えるのが噴火開始の 5 分後である。

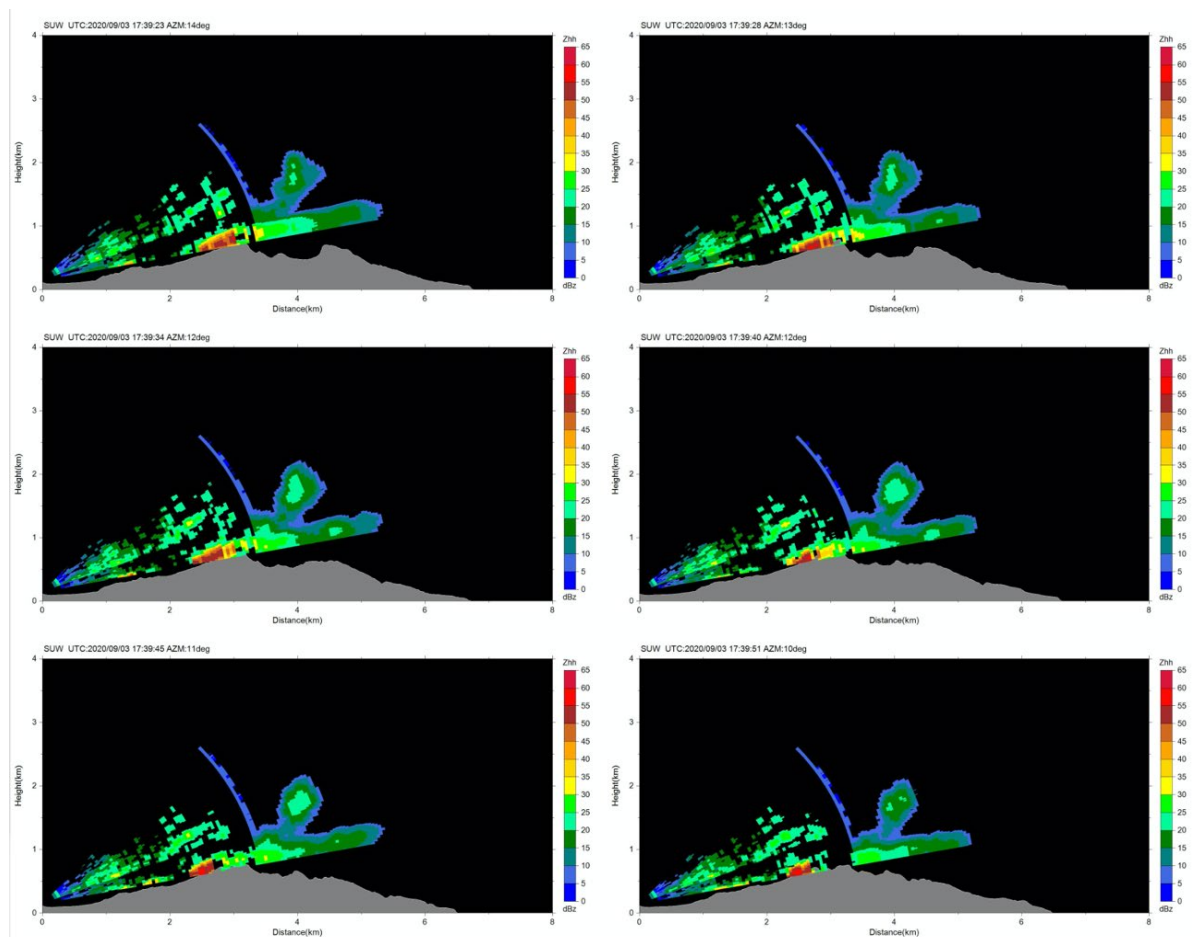


図 9 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 9 月 4 日 2:39~2:40。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2020 年 9 月 4 日 3:07 もしくはそれ以降の噴火による噴煙を捉えたレーダー反射強度分布を図 10 に示す。図 10 は同日 3:13 に対応している。なお、3:07~3:12 の時間帯についてレーダー反射強度分布を調べたが、噴煙に対応する反射強度の高まりは無かった。図 10 において 20dBz の反射強度に対応する最高高度（噴煙到達高度）は海拔 2400 m で、つまり火口上 1800 m であり、3:07 の噴火の火山観測報による噴煙高度 1200 m より有意に高い。

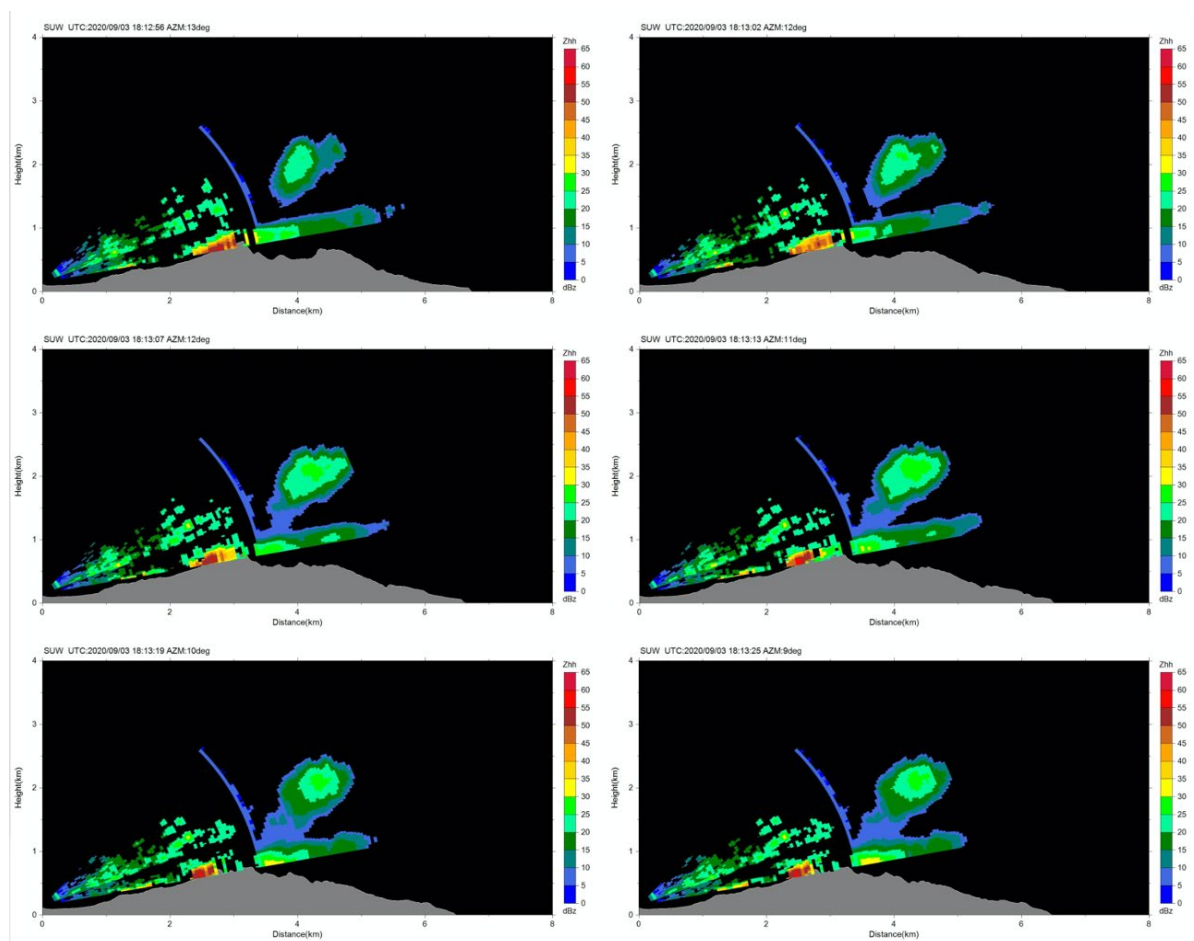


図 10 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 9 月 4 日 3:13 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

平成 31 年度の成果報告書に記載したとおり、桜島および口永良部島火山においては悪天候時の噴火であってもレーダー反射強度分布から噴煙の高度把握に成功している。そこで、諏訪之瀬島の悪天候時の噴火についても同様の検討を行った。

2020 年 9 月 5 日 13:27 の爆発は噴火に関する火山観測報によると噴煙高度および流向は不明とされている。この爆発の発生時間である 13:27 から 30 分程度の時間のレーダー反射強度分布を調べたが、噴煙に対応する反射強度の高まりは見つからなかった。図 11 に 13:28 頃の反射強度分布を示す。悪天候のためレーダースキャン範囲の全体において反射強度は 15dBz から 45dBz の値が分布している。なお、諏訪之瀬島山頂部分近傍において 50dBz を超える値があるのは、気象によるものではなく電波が地面に当たったの反射（グラウンドクラッター）による影響が除去できていないためである。昨年度の報告書で桜島や口永良部島の噴火について反射強度で噴煙が確認できたのは、反射強度が 50dBz～65dBz と非常に高い値が火口の直上に噴火直後に出現したためである。今回の諏訪之瀬島の調査では火口直上の高反射強度は確認できなかった。これは、図 8 の 2020 年 8 月 1 日 15:53 の爆発の噴煙の反射強度で示したように噴煙に対応する反射強度がそれほど高くないため、雨雲と見分けがつかないためだと考えることができる。

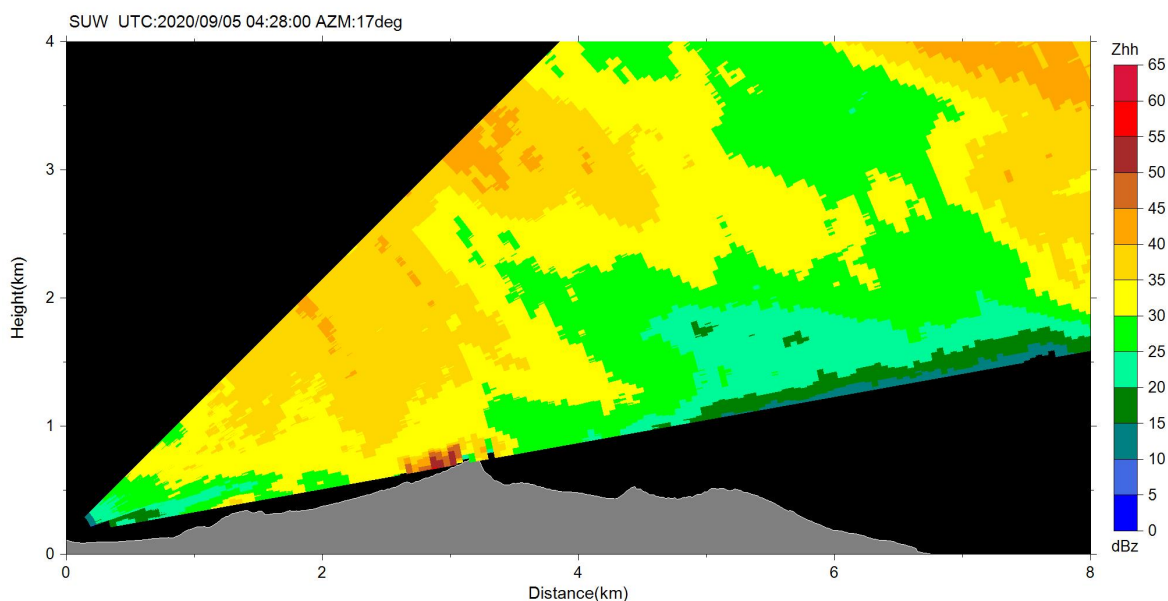


図 11 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。悪天候時の事例で、2020 年 9 月 5 日 13:28 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2020 年 9 月 26 日 16:54 の噴火の噴煙を捉えたレーダー反射強度分布を図 12 に示す。図 12 は同日 16:56～16:57 の時間に対応している。20dBz の反射強度に対応する最高高度（噴煙到達高度）は海拔 1600 m で、つまり火口上 1000 m である。この高度は火山観測報の値の 1200 m より低い。この時の噴煙の流向は南東方向であり、レーダー反射強度においても噴煙がレーダーサイトに近づく方向に移動しているのが分かる（図 12）。

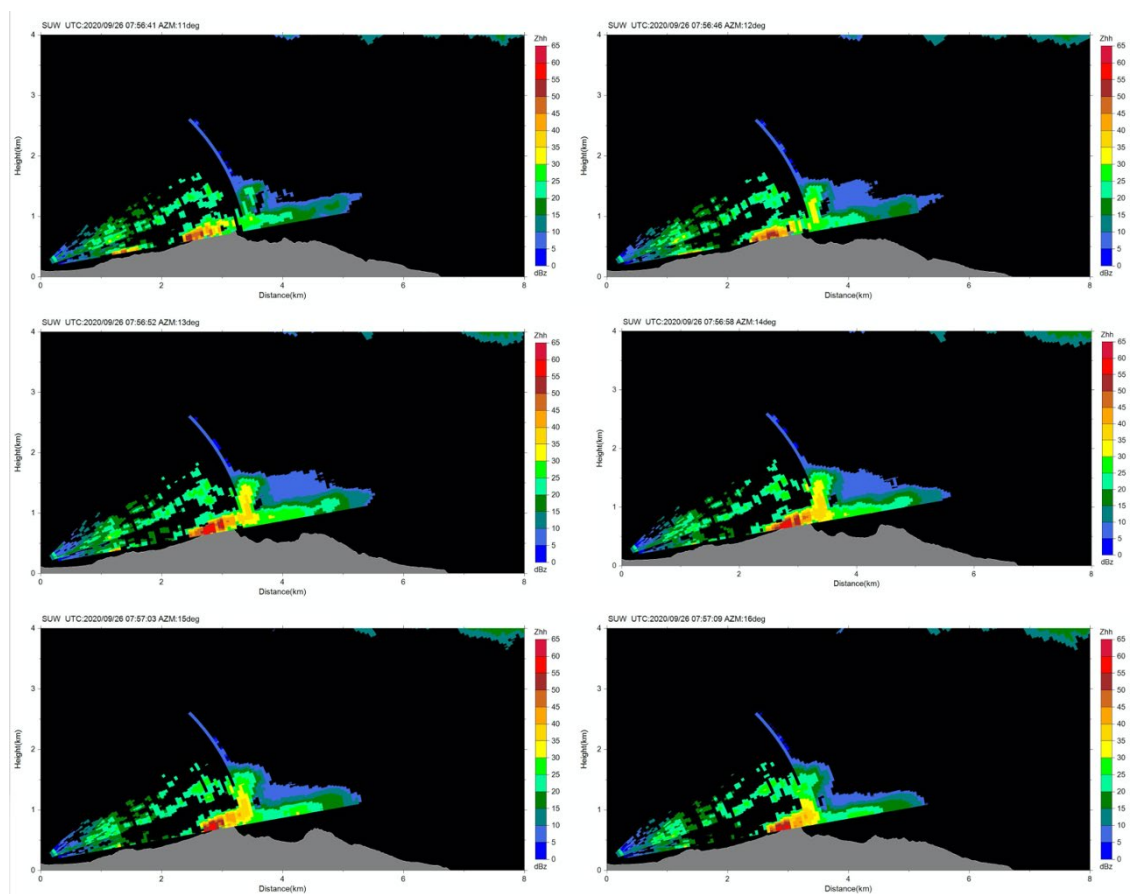


図 12 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 9 月 26 日 16:56～16:57。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2020 年 12 月 28 日 2:48 の爆発は噴煙高度 200 m にて雲に入るとされており、レーダーによる反射強度分布を確認したところ、噴火開始から約 20 分間は反射強度分布では噴煙は確認出来なかった。しかし、噴火開始の 22 分後 (3:09) から噴煙と認識できる反射強度の高まりが確認出来た (図 13)。この時間帯は噴火多発とされている時間で、噴煙の流向は不明であるが 2:48 時点では噴煙の流向は南東である。図 13 に示す 3:09~3:10 の反射強度分布からイメージされた噴煙は時間の経過とともに噴煙の形が崩れ、レーダーのある南方向に流されているのが分かる。20dBz の反射強度に対応する最高高度 (噴煙到達高度) は海拔 2900 m で、つまり火口上 2300 m である。この時間帯については噴火に関する火山観測報はなく、そのため噴煙高度の比較出来ない。なお、2020 年の 1 年間について諏訪之瀬島に対して出された噴火に関する火山観測報を調べたところ、噴煙高度の最高値は 2000 m であった。よって、図 13 で示したレーダーで捉えられた噴火は諏訪之瀬島の噴火においては最大級であったと言える。

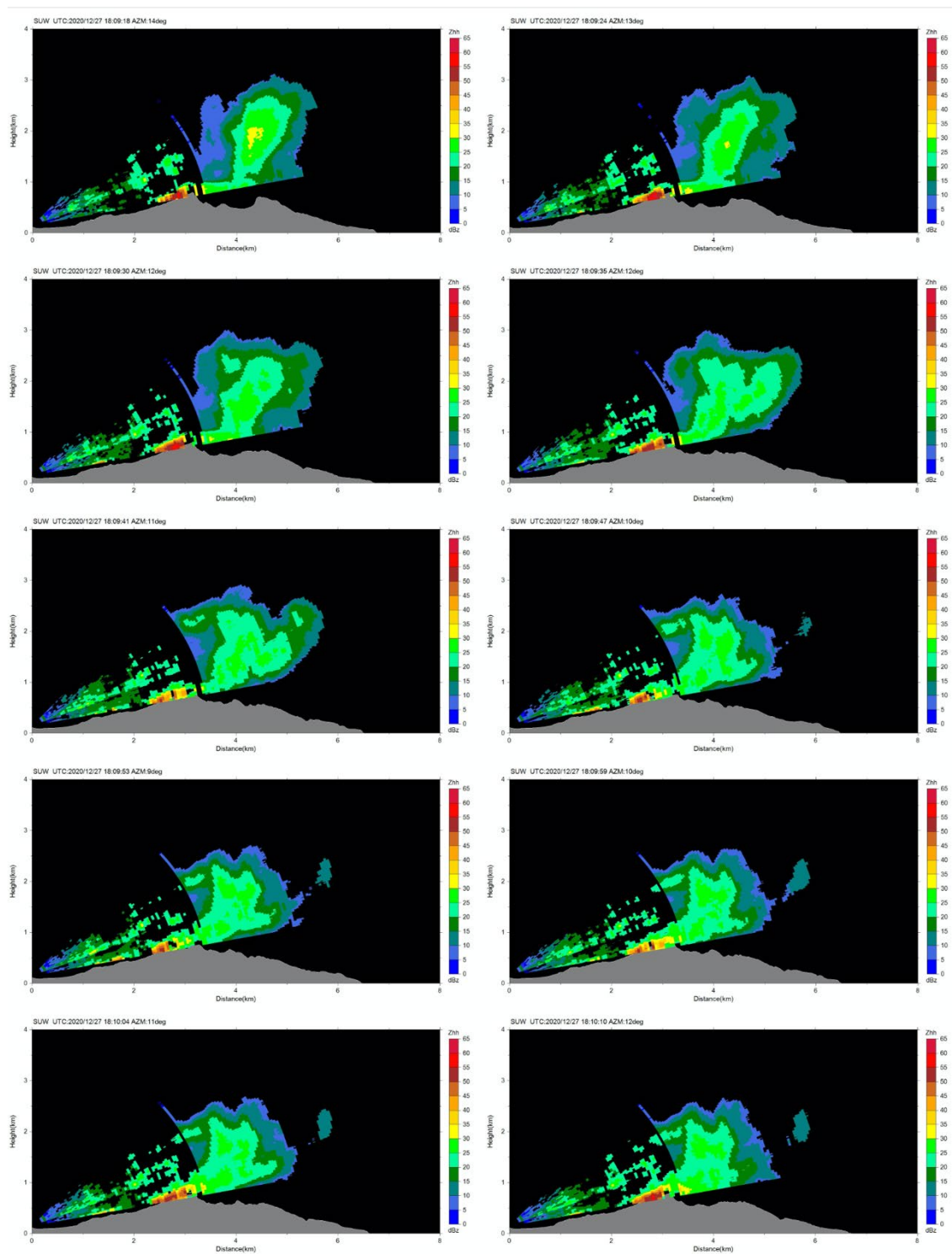


図 13 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 12 月 28 日 3:09～3:10。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

最後に、2020 年 12 月 29 日 20:21 の噴火の噴煙を捉えたレーダー反射強度分布を図 14 に示す。図 14 は同日 20:22～20:24 の時間に対応している。20dBZ の反射強度に対応する最高高度（噴煙到達高度）は海拔 2100 m で、火口上 1500 m に達したことになる。この高度は噴火に関する火山観測報の値の 1800 m より低い。この時の噴煙の流向は北東方向であり、レーダー反射強度においても噴煙がレーダーサイトから遠ざかる方向に移動してい

るのが分かる（図 14）。

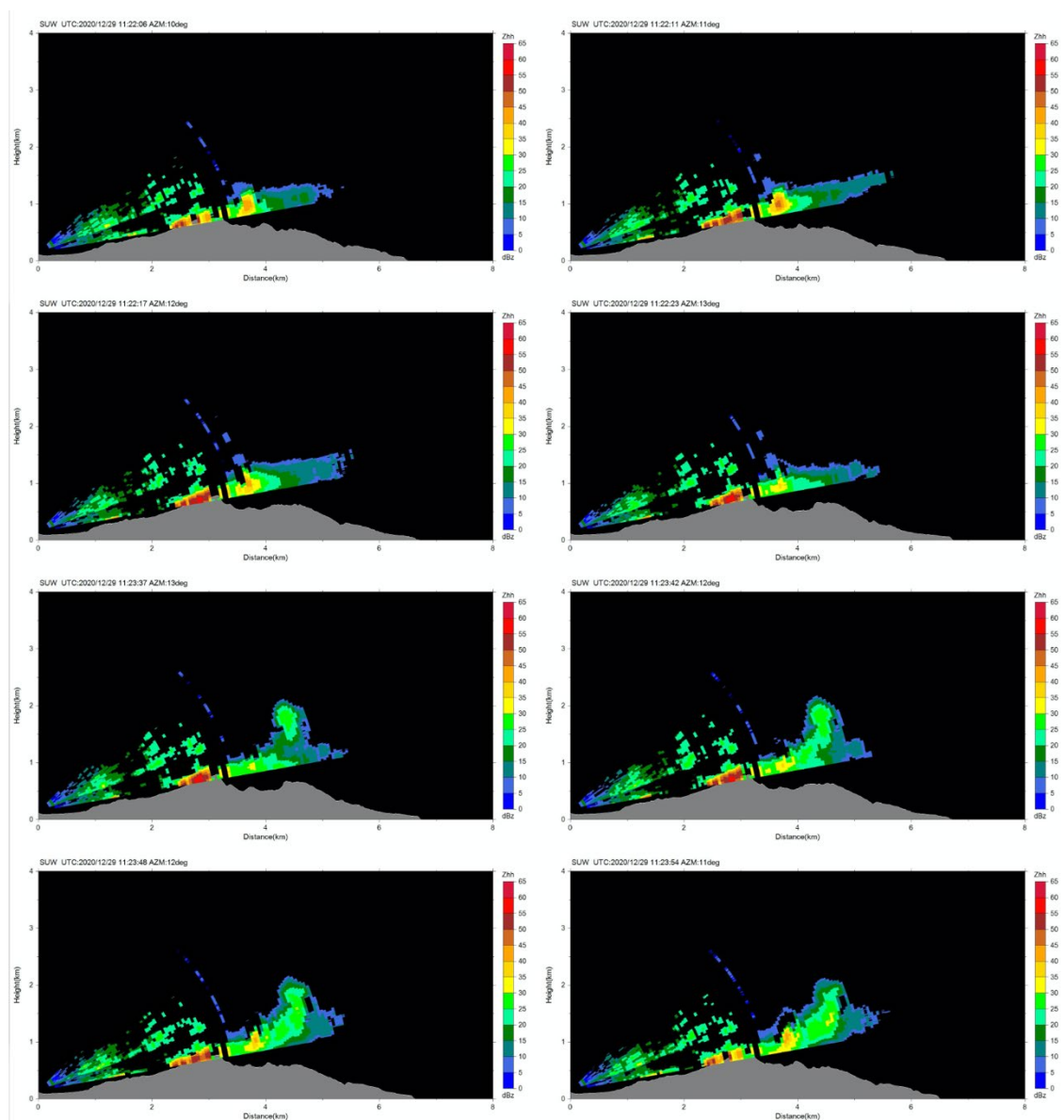


図 14 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 12 月 29 日 20:22～20:24。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

b) ライダー観測

i) 2020 年の観測状況

桜島火山観測所本館、黒神観測室の2か所に設置された2波長偏光ミュー散乱ライダーの稼働率（2020年1月から12月）を図15に示す。本館（SV0）ライダーでは短期間の欠測の他はほぼ通年観測が行われたが、黒神（KUR）ライダーでは半年近い欠測がある。これはADコンバーターの不調によるもので、新型コロナウイルス感染症蔓延の影響もあり原因特定・装置交換等の対処に時間を要した。2021年以降、トラブル時に欠測期間を短くする運用手段を検討する必要がある。

なおこれら観測結果については取得されたデータを毎時国立環境研究所のサーバーで解析し、日単位の距離・時間断面図として

<https://www-lidar.nies.go.jp/Sakurajima/fig/>

に掲載している。さらに得られた消散係数は数値モデル検証にも利用可能な状態でサーバーに蓄積されている。

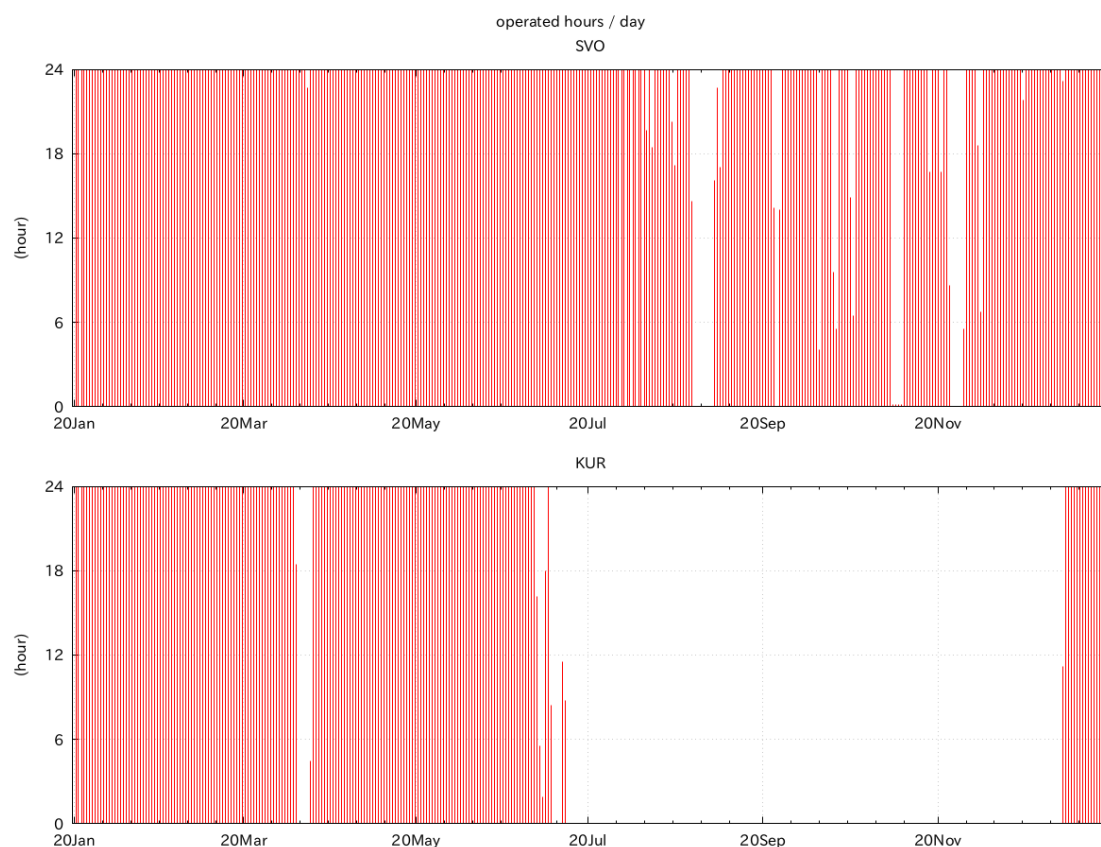


図15 2020年の(上)SV0, (下)KURライダーによる1日当たり観測時間。終日観測が行われた場合に24となる。

ii) エアロゾル消散係数の気候学的解析

ほぼ通年で観測が行われた SVO ライダーについて、消散係数プロファイルを月単位で時間方向に平均し、手前(ライダー)側から火口付近までのエアロゾル分布の季節変動について鹿児島気象台により公開されている火山情報と対比しながら調査した。なお 2017 年から 2019 年までの同様の結果については既に Shimizu et al. (2021)⁷⁾として公表されているのでそちらを参照されたい。図 16 の上段に、2020 年の月毎の消散係数分布を示す。これによると、エアロゾルが最も手前側まで輸送されたのは 6 月で、この時鹿児島気象台における降灰量(図 16 下段赤線)も高い。他にライダーで火口(5.5km)付近に高濃度が見られたのは 1 月、4~6 月、11-12 月であったが、1 月を除き降灰量はそれほど多くなく、ライダーでも手前側の消散係数は低い。鹿児島において夏季以外には西寄りの風が卓越しているため(Shimizu et al., 2021)⁷⁾、SVO ライダー側への輸送量は大きくなかったものと考えられる。

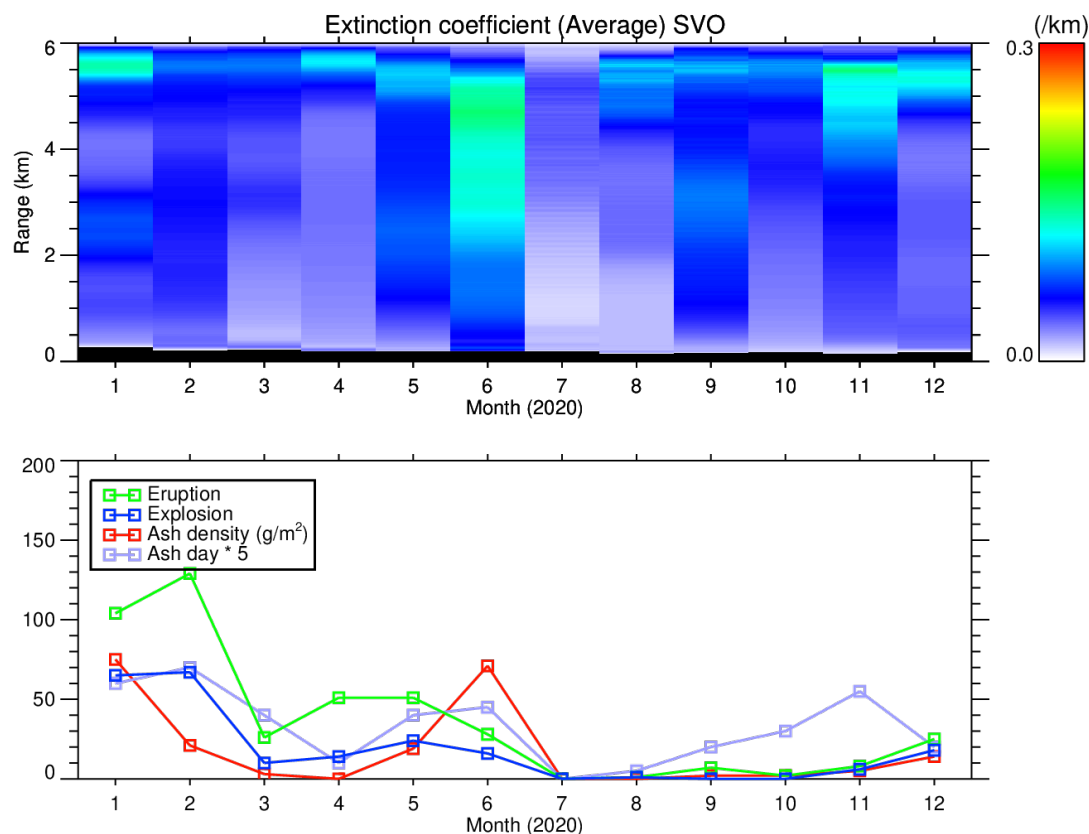


図 16 2020 年の(上)SVO ライダーによる視線方向の月平均エアロゾル消散係数分布と(下)鹿児島気象台による桜島の月毎の噴火回数・爆発回数・降灰量・降灰日数。

iii) 大気環境常時監視局データとの比較

都道府県が実施する大気環境の常時監視では、粒子に関して SPM(粒径 $10\mu\text{m}$ で 100%カット)および PM2.5(粒径 $2.5\mu\text{m}$ で 50%カット)の質量密度を一般局・自排局において測定し、値が環境基準内に収まっているか等を調査している。ここでは鹿児島市内の 8 局(うち PM2.5 測定は 3 局のみ)の月平均データと、SVO ライダーの手前側(480m 地点)の月平均消散係数を対比させ、火山灰と SPM・PM2.5 との関連について調査した。図 17 は 2017 年から

2019 年にかけての SPM(8 局)およびライダー消散係数の月単位時系列である。2017 年には両者の間に対応が見られないが、2018-2019 年にはピークがほぼ一致するなど対応関係が良くなっている。

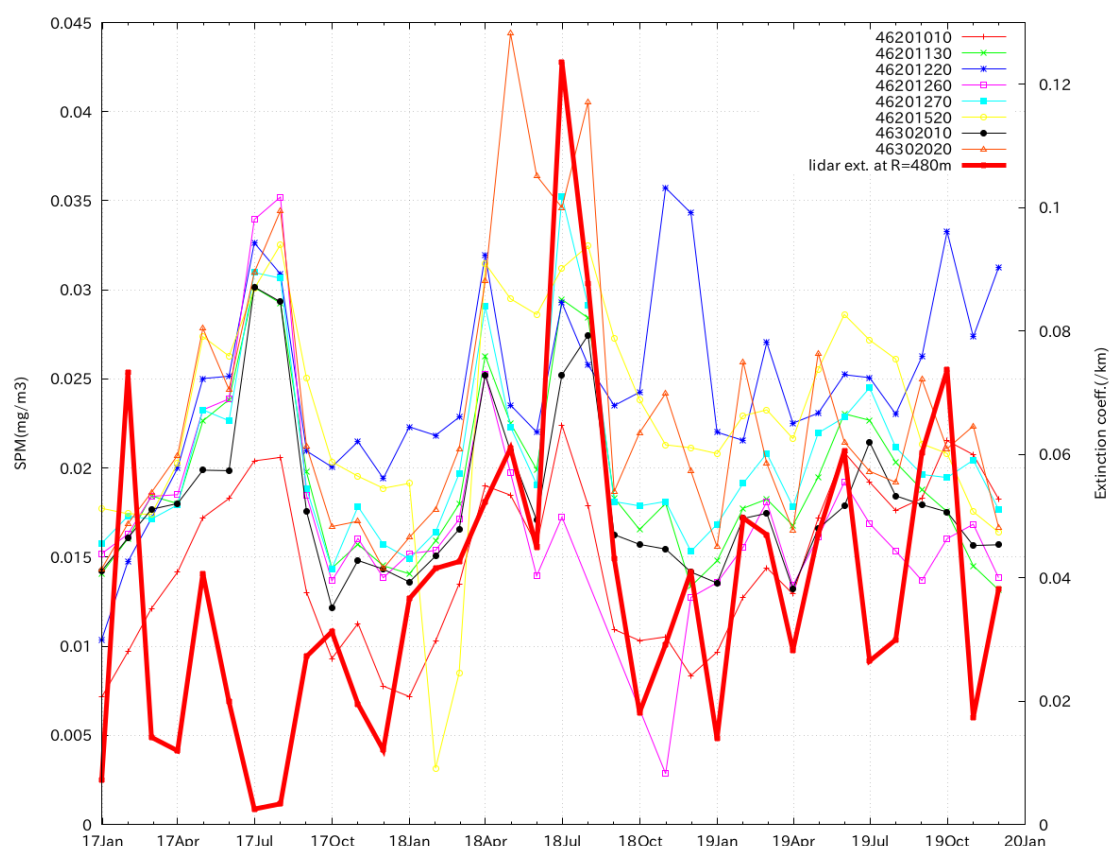


図 17 大気環境常時監視局における月平均 SPM(左軸)および SV0 ライダーの視線方向 480m 地点における月平均エアロゾル消散係数(右軸)の 2017 年 1 月から 2019 年 12 月までの変動。

一方 PM2.5 に関して同様にプロットしたものを図 18 に示すが、こちらでは PM2.5 の変動幅が小さくライダー消散係数とも対応しない。ライダー消散係数と各局 SPM・PM2.5 との間の相関係数を表 4 に示した(括弧内は 2018-2019 年に限定した場合の値)。これらによると、ライダー消散係数と対比させた場合に

- (1) SPM は西側の観測点(鹿児島市役所・谷山支所・環境保健センター・鴨池・桜島支所・赤水)において相関が高く、東側地点(有村・黒神)で相関が低い。
- (2) PM2.5 は 3 地点(いずれも西側)とも相関が低い。

ということが明瞭であり、1. は SV0 ライダーが桜島西側の火山灰を計測していることと整合的である。また 2. で西側地点であっても PM2.5 との相関が低いことから、このサイズの微小粒径においては火山灰の影響はほぼ見られず、今後桜島の噴火が環境基準に影響を与えるとすれば SPM であろうことが想定される。SPM 環境基準については国内での達成率が非常に高いことから行政的に何らかの対策が求められている状況ではないが、桜島周辺では状況が異なることに注意が必要である。また 2017 年に SPM とライダーで対応が見られない点については、同年の噴火が昭和火口で発生していたこととの関連が考えられるが、

詳細についてはこのような下流側観測からだけではなく、化学輸送モデルを利用した流路解析による把握が必要である。

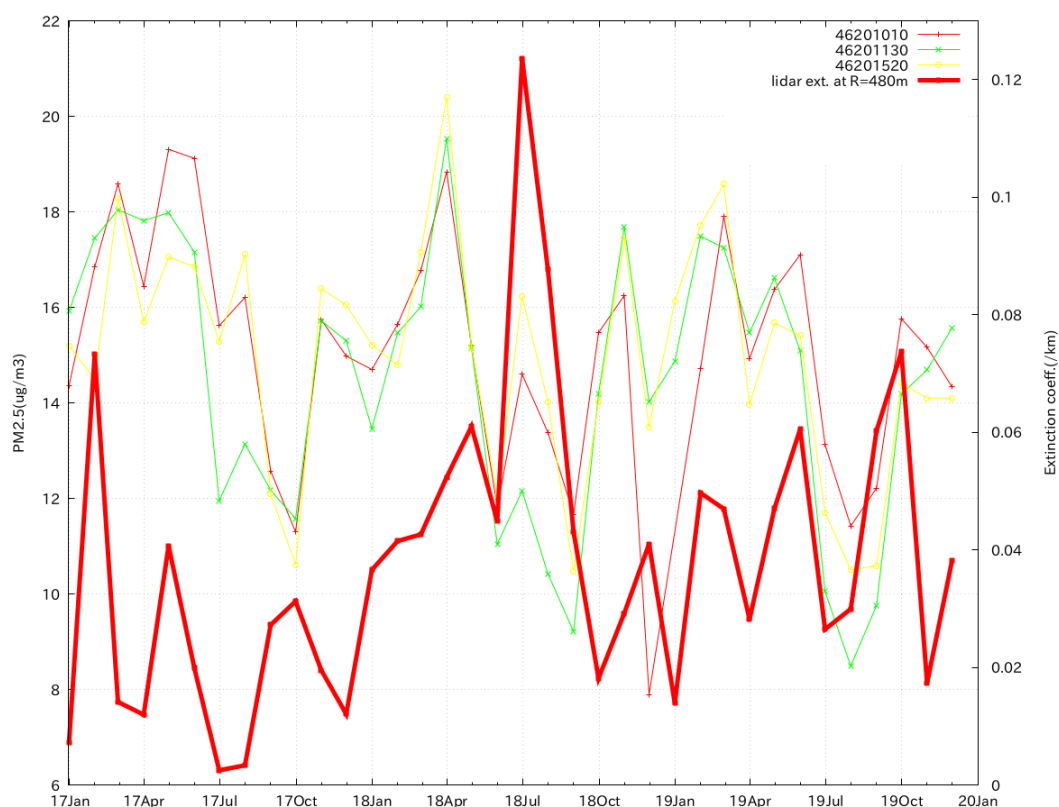


図 18 大気環境常時監視局における月平均 PM2.5 (左軸)および SV0 ライダーの視線方向 480m 地点における月平均エアロゾル消散係数(右軸)の 2017 年 1 月から 2019 年 12 月までの変動。

表 4 SV0 ライダー消散係数(480m 地点)と大気環境常時監視局における SPM・PM2.5 の月平均値について 2017 年 1 月から 2019 年 12 月で比較した際の相関係数

地点コード	地点名	SPM 相関係数	PM2.5 相関係数
46201010	鹿児島市役所	0.34 (0.52)	0.07 (0.25)
46201130	谷山支所	0.29 (0.71)	-0.13 (-0.15)
46201220	有村	0.20 (0.21)	-
46201260	黒神	-0.23 (0.12)	-
46201270	環境保健センター	0.36 (0.72)	-
46201520	鴨池	0.22 (0.40)	-0.04 (0.13)
46302010	桜島支所	0.20 (0.69)	-
46302020	赤水	0.41 (0.70)	-

カッコ内は 2017 年のデータを除いた場合の結果。PM2.5 については 8 局中 3 局のみで測定されている。

c) GNSS 観測

本年度は噴煙高度が 5000m に達した 2013 年 8 月 18 日 16 時 31 分の桜島昭和火口の噴火

および、2020 年 8 月 9 日 17 時 05 分の桜島南岳の噴火を対象として、GNSS による噴煙把握能力の検証を実施した。

データは国土地理院 GEONET 観測点および京都大学・東北大学による GNSS 観測点のデータを用いた。また解析においては、従来の GIPSY-OASIS から Gipsy-X Ver.1.0 (Bertiger et al., 2020)¹⁾ に解析ソフトウェアを変更し、精密単独測位法 (PPP 法) による通常の測位解析を行い、各衛星-観測点間の電離層フリー結合 (LC) の搬送波位相遅延量 (Post-fit Phase Residuals, PPR) を得た。以下、LC-PPR と呼ぶ。解析間隔は 30 秒であり、衛星システムには GPS のみを用いた。また、噴火発生前 5 日間を同条件で解析し、GPS 衛星の周回周期 (23 時間 56 分 4 秒) を考慮して LC-PPR 時系列をスタックし、噴火時の LC-PPR 時系列から差し引くことで観測点周辺のマルチパスノイズの影響を低減した。このようにして得られた LC-PPR 時系列から噴煙にともなう異常を客観的に評価するために、以下の手順を導入した。まず、解析対象の LC-PPR パスにおける噴火発生当日の 5 日間の LC-PPR 時系列を使用し、噴火発生後 30 分間の時刻における LC PPR の平均と分散 (σ^2) を求めた。これに対して噴火時の LC-PPR 時系列の最大振幅が $+3\sigma$ 以上の値を取り、かつインパルス状の形状を持つものを異常とした。その結果、2013 年 8 月の噴火では観測点と GPS 衛星間のパスが 96 個中 6 個、2020 年 8 月の噴火では 77 個中 7 個のパスで異常を確認することができた。図 19 に 2020 年 8 月 18 日の噴火における HIKG 観測点と SVN51 との間の LC-PPR 時系列を示す。同結果において明瞭な LC-PPR 異常が確認できる。

次に得られた LC-PPR の異常から桜島上空の噴煙の時空間分布を推定するために、桜島上空に東西 0.5km, 南北 0.5km, 高さ 1.0km 間隔のグリッドを配置し、異常が認められた LC-PPR パスが通過した領域を調べた。具体的には異常が検知された LC-PPR パス「のみ」がセル内に存在する場合 (赤色) と、以上が検知されない LC-PPR パスが 1 本でも含まれる場合 (灰色)、そしてそもそもパスが通過していないセル (白色)、の 3 種類に分類をした。図 20 に 2013 年 8 月 18 日の噴火における 16 時 35 分以降の異常が検知されたグリッドの時空間発展を示す。同図を見ると噴火から 6 分後時点で火口の西側において異常が検知されたグリッド (赤色でしめされたグリッド) が明瞭に確認できる。これは噴煙の流向が北西方向であったという目視による報告と整合的な結果である。一方で、噴火発生から 7 分後に火口の東側で異常グリッドが確認できる。今回の方法では、簡略化のためにパスの経路上すべての領域において異常を示すとしている。そのため、火口西側の観測点から東方向に向くパスの場合、火口東側に噴煙が無い場合でも異常グリッドが現れる。今後、異常グリッドの判定については、改善する必要がある。

最後に LC-PPR 時系列と噴煙の発展過程について議論を行う。図 21 に 2020 年 8 月 9 日の噴火における異常を示す LC-PPR のパスにおけるインパルス状の信号の開始時刻とそのピーク振幅の関係を両対数グラフで示す。これを見るとパルスの開始時刻 (t) とピーク振幅 (A) は $A = t^{-1/2}$ の関係が見られた。LC-PPR の値は 2 次元での噴煙濃度 ($= t^{-1}$) と長さ ($= t^{1/2}$) の積に比例すると考えると、同噴火において噴煙は二次元的に広がったと推測することができる。

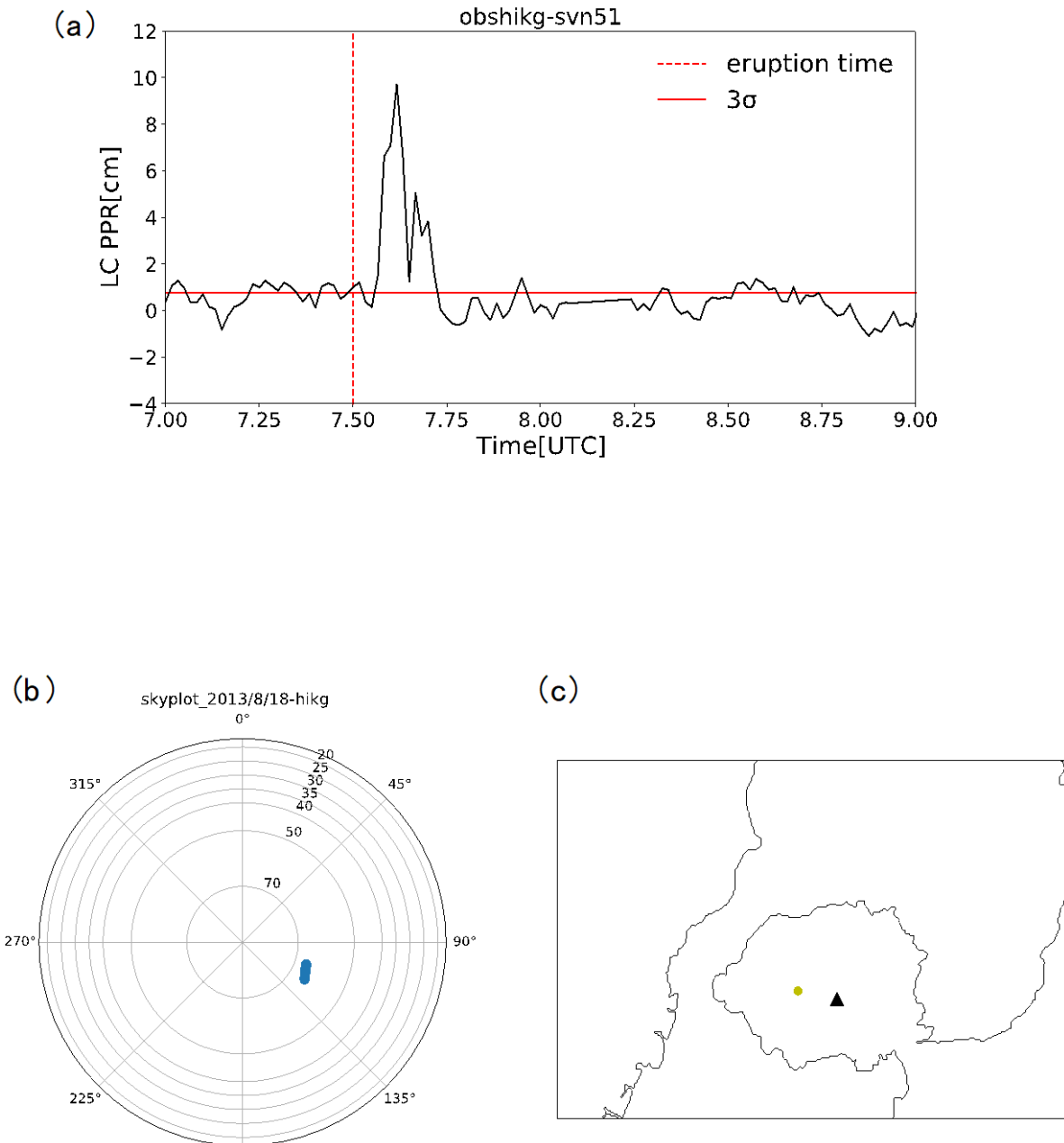
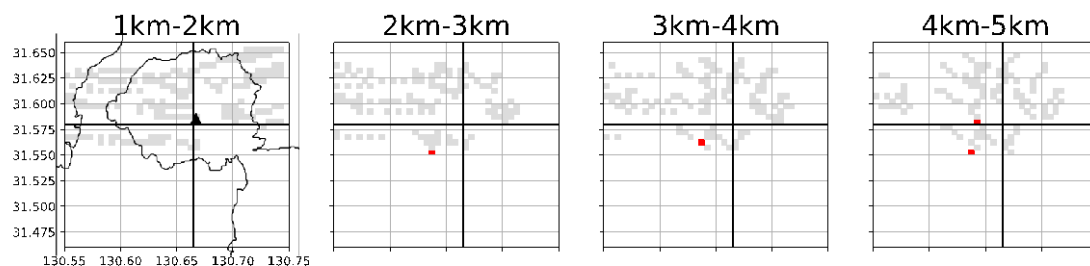
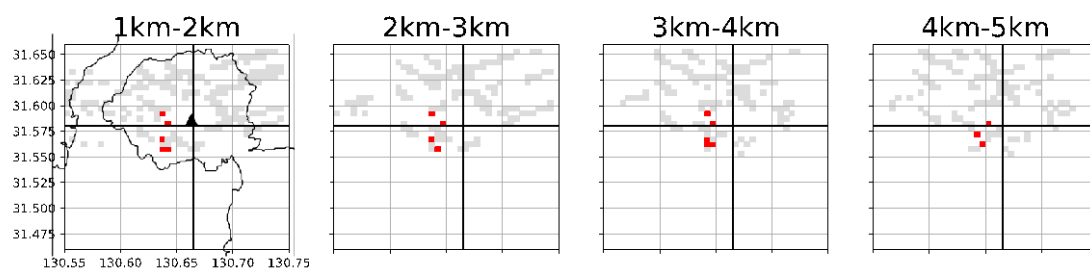


図 19 (a) 2013 年 8 月 18 日噴火における HIKG 観測点における LC-PPR 時系列。横軸は時刻(UTC)、縦軸は LC-PPR の値、赤点線は噴火発生時刻、赤色実線は 3σ の値を示す。(b) 以上が見えている時刻における SVN51 衛星の位置のスカイプロット。(c) 観測点の位置。

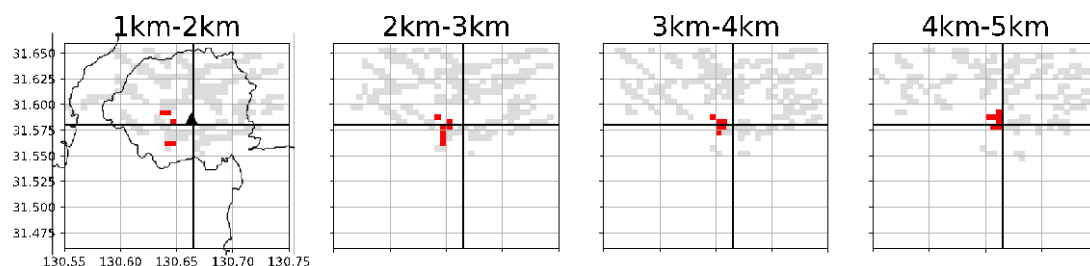
(a) 16時36分(噴火から5分後)



(b) 16時37分(噴火から6分後)



(c) 16時38分(噴火から7分後)



(d) 16時39分(噴火から8分後)

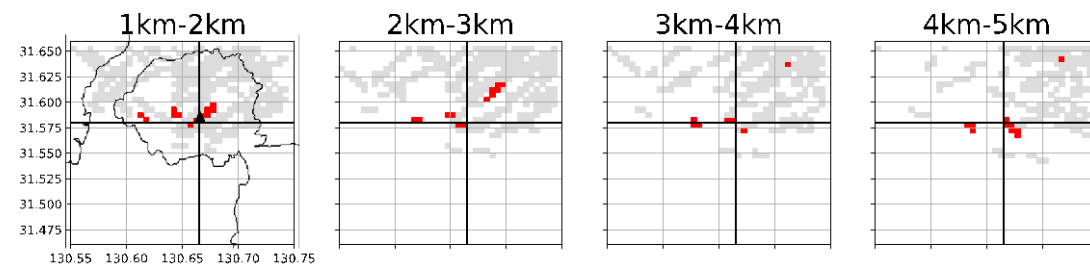


図 20 LC-PPR が異常を示したグリッドの時空間分布 (2013 年 8 月 18 日噴火)。異常を示すパスのみが存在するセルを赤色、異常を示さないパスが 1 つでも存在するセルを灰色、パスが存在しないセルを白色でそれぞれ示す。黒線が交差している箇所が昭和火口の位置を示す。

2020年8月9日のイベントにおけるパルスの開始時刻
とLC PPRの関係

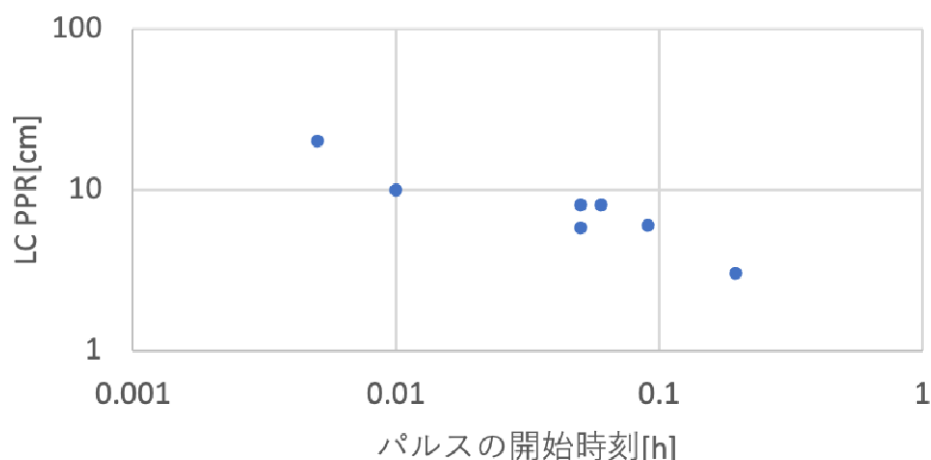


図 21 2020 年 8 月 9 日の噴火において異常を示した LC-PPR のインパルス的な信号の開始時刻 (t) と LC-PPR のピーク振幅 (A) の関係。両者には $A = t^{-1/2}$ の関係が見られる。

比較的規模の大きい噴火によって生じた LC-PPR と地上降灰量の関係を調べた。LC-PPR 最大値と火山灰放出量および地上降灰量の関係を表 5 に示した。LC-PPR は GNSS 地上観測点と GNSS 衛星の組み合わせで異なるのでそのうち最大のものを用いた。また、地上降灰量はディスドロメータにより観測されたもの、またはサンプリング調査によるものであり、距離 4km の値に換算した。地上降灰量が多いほど、LC-PPR が大きくなる傾向が見られる。距離 4km における地上降灰量 (I_{p4}) は、LC-PPR (R_{LC-PP}) に対して概ね以下の関係が求められる。

$$I_{p4} = 50R_{LC-PP}$$

表 5 LC-PPR 最大値と火山灰放出量および地上降灰量の関係

噴火発生日時	LC-PPR 最大値 (m)	火山灰放出量推定値 (千トン)	距離 4 km における地上降 灰量推定値 (kg/m ²)
2012 年 7 月 24 日 19:15	0.239	188	15.0
2013 年 8 月 18 日 16:31	0.091	63	3.3
2017 年 11 月 13 日 22:07	0.030	491	2.6
2020 年 8 月 9 日 5:38	0.145	70	1.9

火山灰放出量は地盤変動量から推定した。

SN 比についても調査したが、2012 年 7 月 24 日 19:15 の噴火以外は顕著な変化が見られなかった。

d) ディスドロメータによる地上観測

i) ディスドロメータによる地上観測の概要

昨年度に引き続きディスドロメータによる地上降灰量観測を行った。観測には降雨観測のために開発された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、粒径および落下速度ごとの粒子数を記録する。粒径の測定範囲は 0.25mm～26mm、落下速度の測定範囲は 22.4m/s 以下である。

ディスドロメータの桜島における位置を図 22 に示す。各観測点では、時間雨量相当量、粒子数、センサーの温度、電源電圧に加え、粒径毎の 30 クラスと落下速度毎の 32 クラス、合計 960 クラスに分けた粒子数が 1 分毎に記録される。いずれの観測点もオンラインによるデータ取得が可能である。他のプロジェクトにより設置したものを合わせて 21 台のディスドロメータが桜島において稼働している。

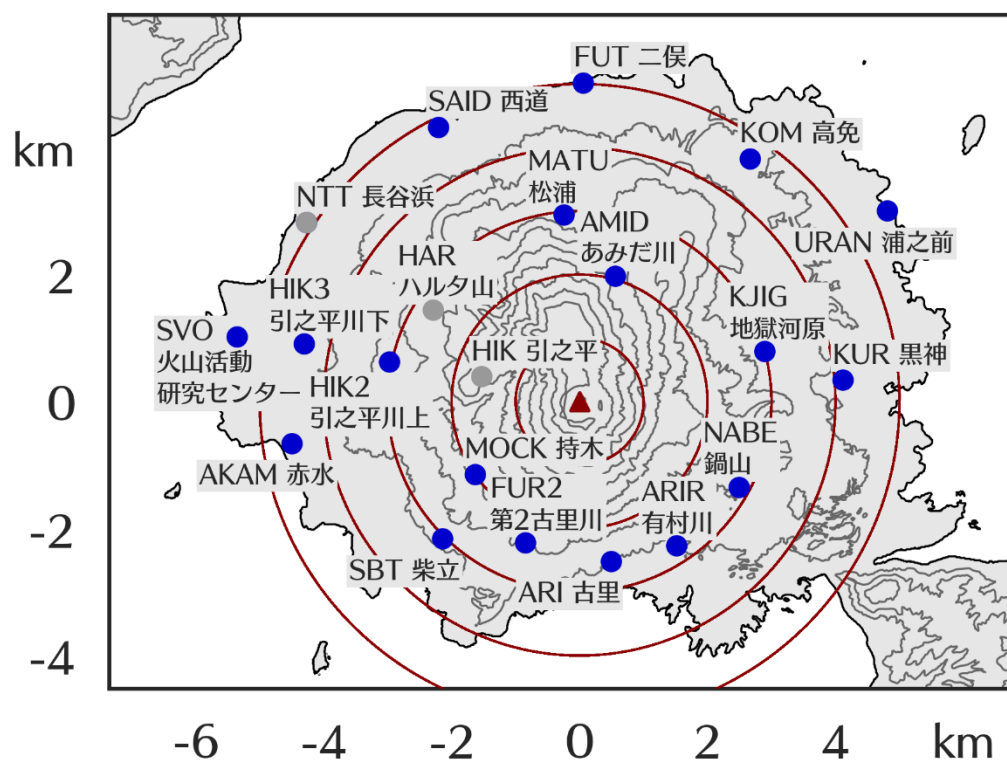


図 22 桜島におけるディスドロメータの位置図。青丸は本プロジェクトにおいて設置した観測点、白丸は他のプロジェクトにおいて設置した観測点。赤三角は南岳 A 火口の位置を、赤線は南岳 A 火口から 1km ごとの同心円を示す。

ii) ディスドロメータによる降灰量の見積もり

平成 29 年度報告書において、単位面積当たりの火山灰重量 (W) の単位を g/m^2 、ディスドロメータの時間雨量相当量の積算値 (I_p) の単位を mm/h とすれば、両者は以下のように近似できることを示した。

$$W = 24I_p \quad (1-1)$$

本年度は、ディスドロメータの近傍で採取された単位面積当たりの火山灰の重量と比較することにより、降灰開始から火山灰を採取した時間までにディスドロメータが検知した粒径及び落下速度の組み合わせクラスごとの粒子数 N_{ij} を単位面積あたりの火山灰重量 w_{obs} へ換算する以下の経験式を求めた。

$$w_{\text{obs}} = 2.15 \sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^{32} \rho'_{ij} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_i}{2} \right)^3 \frac{N_{ij}}{0.18 \times 0.03} \quad (1-2)$$

ただし、 ρ'_{ij} は粒径と落下速度のクラスに対応する粒子の実効的な密度で、粒子を回転楕円体粒子だと仮定して計算された値 (Suzuki, 1983) ⁹⁾ に下限値 $500 \text{kg}/\text{m}^3$ を設定したものである。本年度は、さらにディスドロメータの近傍で採取された火山灰サンプルをふるい分けてそれぞれの単位面積あたりの重量を計測し、ディスドロメータの観測結果と比較することにより、降灰開始から火山灰を採取した時間までにディスドロメータが検知した粒径及び落下速度の組み合わせクラスごとの粒子検知 1 粒あたりの重量を求めた。

44 個のサンプルを 0.25mm のふるいにかけ、 0.25mm 以上が優勢なイベント、 0.25mm 以下の粒子が優勢なイベントを抽出した。それぞれの粒子数の粒径一落下速度分布を図 23 に示す。2 つの分布は検知される粒径の最頻値が共通する一方、粒径ごとの落下速度の最頻値には違いが見られ、ディスドロメータの粒径区分がサンプル採取における粒径区分とは整合しないことが示唆された。

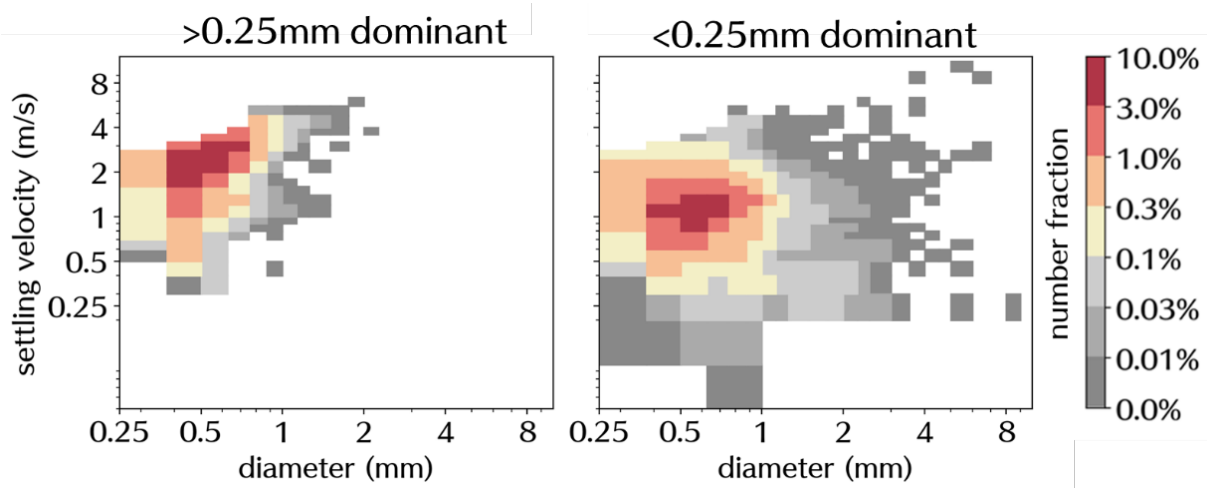


図 23 全てのイベントにおける累計の粒子数の粒径一落下速度分布。

ディスドロメータの分類する粒径一落下速度の組み合わせそれぞれにおける粒子重量からなるベクトル θ_s を、まず回転楕円体近似 (Suzuki, 1983) ⁹⁾ により計算した。粒子の体積は粒径ごとに一定とされ、粒子の形状や空隙による重量の差異は実効密度の差異として扱われる。44 回の累計の降灰重量の実効密度分布は、2 つの対数正規分布の足し合わせで近似できた (図 24)。実効密度の高い粒子群、低い粒子群をそれぞれ粒子群 A, B とすると、A

はサンプルにおいて 0.25mm 以上と分類され、ディストロメータでもほぼ同じ粒径として検知される空隙のない粒子で、B はサンプルにおいて 0.25mm 以下と分類される粒子だと考えられる。ディストロメータが仕様上検知しない細粒粒子が検知されたのは、0.25mm 以上の凝集粒子として降下した後に着地して崩壊したり、個々の粒子は独立しつつ高濃度で降下した粒子群が一つの粒子と判定されたりしたためだと考えられる。

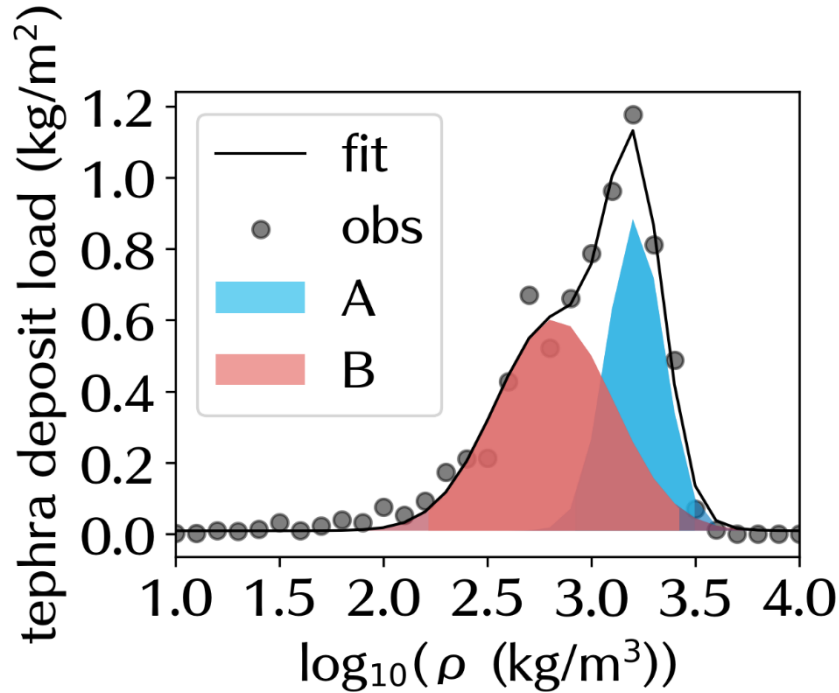


図 24 全イベントにおける累計の粒子重量の実効密度分布と、その対数正規分布による近似。

粒子群 A, B に対応する降灰量の換算式をそれぞれ求める。各イベントの降灰量からなるベクトル S_{Aj} , S_{Bj} は、ディストロメータの分類する粒径—落下速度の各組における各イベントの粒子数からなる行列 N_{Aij} , N_{Bij} と各組の粒子重量からなるベクトル θ_{Ai} , θ_{Bi} の積で表せる：

$$S_{Aj} = N_{Aij} \theta_{Ai} \quad (1-3)$$

$$S_{Bj} = N_{Bij} \theta_{Bi}$$

ただし、添字 A, B は粒子群に対応する。この式に観測量として、 S_A , S_B にふり分けられた 0.25mm 以上、以下の降灰量を、 N_{Aij} と N_{Bij} にディストロメータの観測値を代入し θ_A , θ_B を求める。なお、計算に考慮される組み合わせは、(1) 全イベントにおける累計の粒子数が全体の 0.1% を超え、(2) 実効密度が図 24 の対数正規分布の 1.5σ の範囲内という 2 つの条件を満たす 33 組 (A)、89 組 (B) である。

求められた θ_A , θ_B の粒径—落下速度分布を θ_s に対する比として図 25 に示す。 θ_A/θ_s , θ_B/θ_s は最大値でそれぞれ 4.9、23 となった。ともに計算対象から外れた粒子や濃度が十分でなく検知されなかった細粒粒子の重量を補完するため、 θ_s より大きくなったと考えられる。粒子数分布と比べると、A は粒径依存性がより大きく、B はおおよそ似た分布となった。B において 0.5mm 以上の粒子の粒径が大きくなるほど倍率が小さくなるのは、

高濃度粒子群の濃度が粒径の3乗に比例せずより小さく増加するためだと考えられる。

S_A と S_A+S_B はほぼ全て 10 倍以内の精度で求められた一方、 S_B は 10 倍以上の過大事例が目立った。計算値と観測値の対数をとって比較する、二乗平均平方根対数誤差 RMSR による残差評価では、 S_A+S_B の計算精度は θ_s に基づく降灰量 S_s と同程度だった(図 26)。検知されない $1g/m^2/min$ 未満の降灰が長時間続いた場合や、計算対象外である $1.125mm$ 以上の粒子が降下した場合に誤差が大きくなることが示唆された。

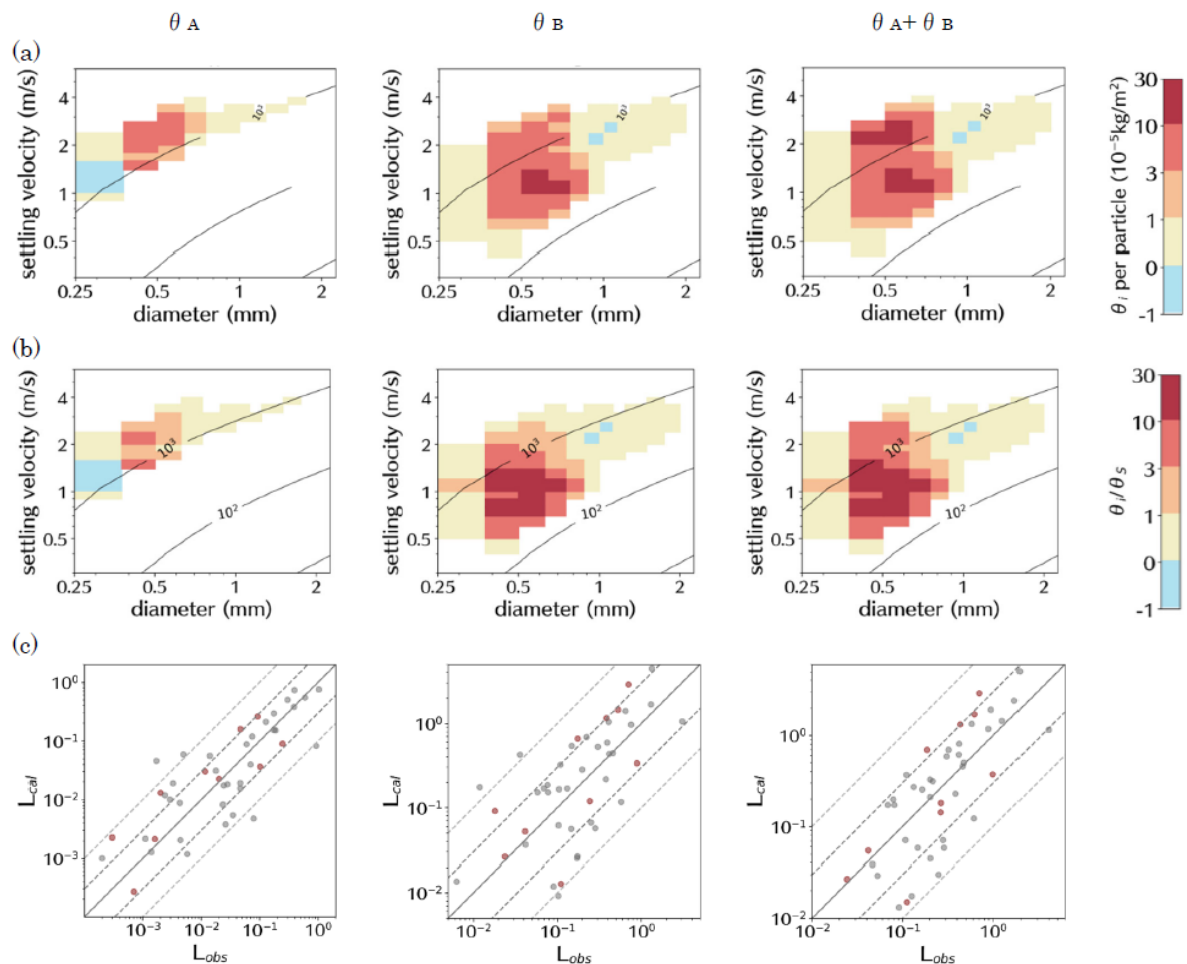


図 25 (a) θ の粒径一落下速度分布、(b) θ / θ_s の粒径一落下速度分布。等値線は Suzuki (1983)⁹⁾ により計算される粒子の実効密度。(c) L_{obs} and L_{cal} の関係。単位は kg/m^2 。実線は $w_{cal}=w_{obs}$ を、濃い破線は $w_{cal}=0.3w_{obs}$ と $w_{cal}=3w_{obs}$ を、薄い破線は $w_{cal}=0.1w_{obs}$ and $w_{cal}=10w_{obs}$ を表す。

この見積もりの誤差の原因は、降灰を単一の粒子の落下として扱っていることによる。実際に地上に到達した火山灰は凝集して落下したと推定されるものも少なくない。図 25 には実効密度を等値線により示した。粒子分布の上限が単一の火山灰粒子の密度で $2500 kg/m^3$ である。実効密度は $200 \sim 2500 kg/m^3$ の値を取るので、凝集粒子のみかけの空隙率はおおよそ $0 \sim 92\%$ と推定される。球形の凝集粒子がそれよりも十分小さく、同じ大きさの球形粒子がお互いに接触する集団だとすると、空隙率は 19% で、実効密度は $2030 kg/m^3$ となるが、多くの粒子の実効密度はそれよりも小さい。球形の凝集粒子を形成しても個々の火山灰粒子

は弱く接触しているだけで空隙が大きいことが推定される。粒子の大きさと形状が揃っていなければ、空隙は更に大きくなり、実効密度も小さくなる。また、湿度が高い時には凝集粒子は球形になりやすいが、湿度が低いときは、火山灰粒子がチェーンを形成しているだけのこともある。この場合は、実効密度はさらに小さくなる。

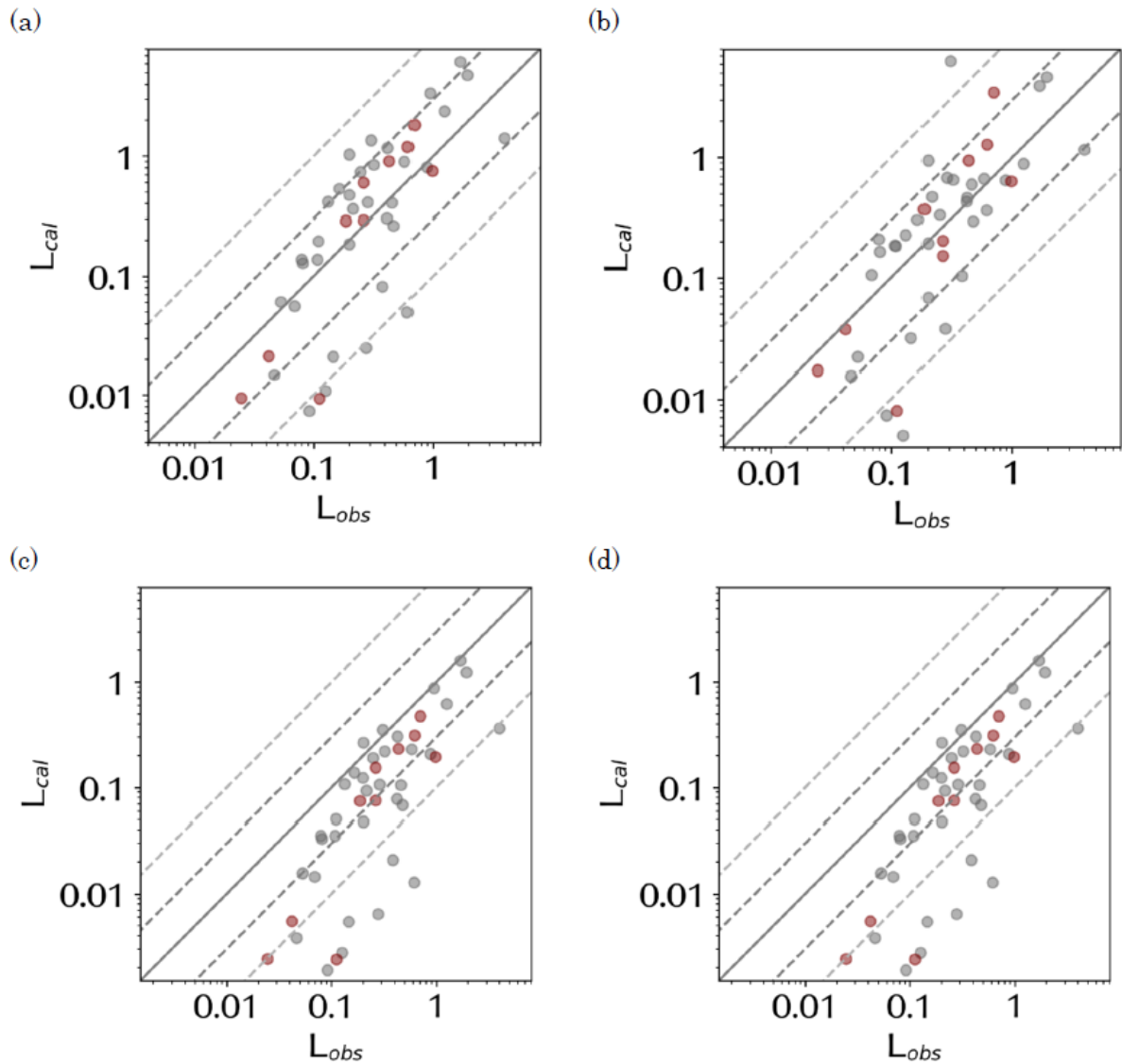


図 26 $\theta_A + \theta_B$ と θ_S からそれぞれ求められた降灰量 (S_{cal}) とサンプルから求められた降灰量 (S_{obs}) の関係。黒点は θ の導出に使われたイベント。

iii) 降灰量のキャンペーン観測

換算式から求められた降灰量を、2回の降灰イベントにおいて5分から15分おきのサンプル採取により検証した結果を図27に示す。2回のイベントの降灰量はそれぞれ観測値の2倍以内、5倍以内の精度で求まり、実効密度の低い凝集粒子や高濃度な細粒粒子と実効密度の高い単一粒子を区別しつつ、より高時間分解能に計測できることが示された。

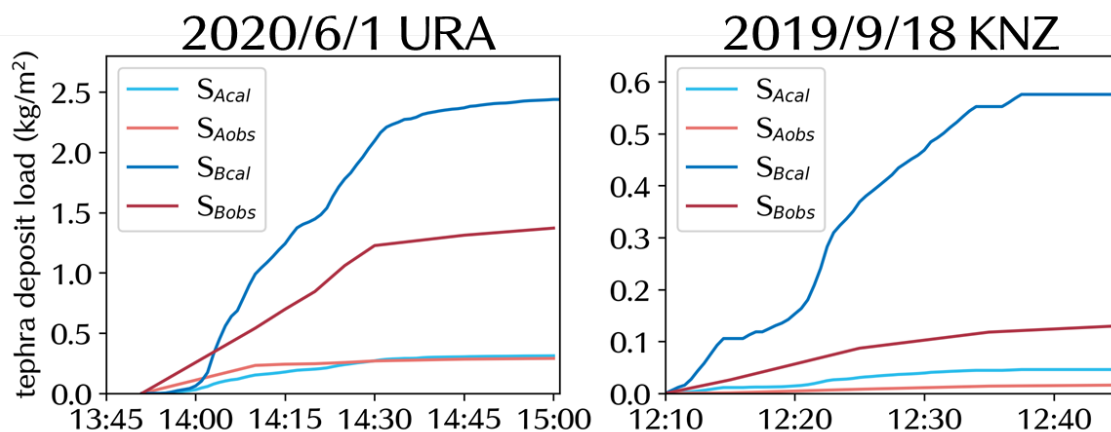


図27 降灰量の時間変化。換算式から求められた降灰量と5分から15分おきのサンプル採取により得られた降灰量を比較した。

2021年2月28日の噴火でSV0に降下した火山灰粒子について、火山灰サンプルをふるい分けして求められた降灰量分布は表6に示すようになった。0.5mmから1mmの粒子が最も多く、2mm以上の粒子も無視できない程度に検知されていた。その一方で0.125mmの細粒な粒子も目立った。

表6 粒径毎の降灰量

粒径 μm	<125	125- 250	250- 500	500- 1000	1000-2000	>2000
降灰量 g/m^2	15.3	5.8	9.7	36.1	16.7	2.3

250 μm 以下の粒子は21g、250 μm 以上の粒子は65gだったが、ディストロメータと経験的な換算式により求められた250 μm 以下、以上の粒子の降灰量はそれぞれ101g、26gと計算され、それぞれサンプル降灰量の約5倍、約0.4倍だった。粗粒の粒子が過小、細粒の粒子が過大となった原因はそれぞれ、2600 kg/m^3 の回転楕円体の終端速度を速度上限としているのが750 μm 以下に限られることと、粗粒粒子も計算対象にまたがっていること(図28)だと考えられる。

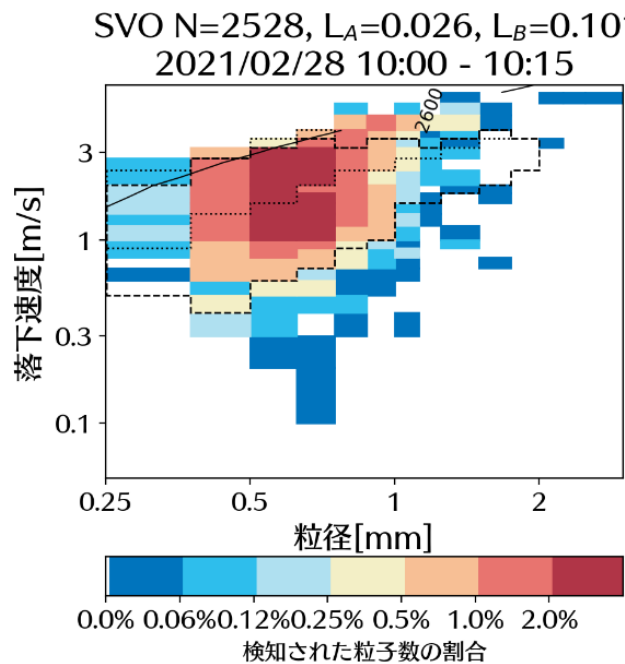


図 28 2021 年 2 月 28 日 10:00 の噴火において SVO 観測点においてディストロメータで検知された火山灰粒子の粒径一落下速度分布。N は粒子数、 L_A および L_B はそれぞれグループ A (サンプルにおいて $250 \mu\text{m}$ 以上の粒子)、グループ B (サンプルにおいて $250 \mu\text{m}$ 以下の粒子) の粒子の降灰量 (単位は kg/m^2) を表す。点線はグループ A、破線はグループ B の計算対象範囲。

iv) ディスドロメータ観測による降灰量の時間変化

ディスドロメータ観測による降灰量の時間変化から噴火活動を評価する。ディスドロメータは雨滴も検知し、その頻度は降灰よりも多いので、検知された粒子の中から降灰によるイベントを抽出し、さらに、明らかにノイズと考えられるものを除去した。2020年に発生した噴火のうち、噴煙高度3000m以上に達したものについて、ii)において求めた経験式から計算されたディスドロメータの降灰量を図29～37に示す。ここで、有村観測坑道において計測された地震動の振幅により、噴出率の指標とした。

2020年に発生した噴火はすべて南岳山頂火口において発生したものであるが、これらの噴火は空気振動や弾道岩塊の放出を伴うブルカノ式噴火と噴煙の上昇のみを伴う非ブルカノ式噴火に分けられる。ここでは、ブルカノ式噴火を爆発（図中では「ex」と表記）とし、非ブルカノ式噴火は単に噴火（図中では「er」と表記）とする。なお、噴煙高度3000m以上に達した噴火のうち、2020年6月4日2:59、同16:38、6月10日11:19、12月29日16:14の噴火については、降雨と同時に降灰があったので結果から除外した。

1回の噴火に対応して、1つの観測点のみで検知される場合が最も多い。風速場が水平方向に一樣であれば火口から噴出した火山灰粒子は風下においてのみ検知されるからである。例えば2020年3月17日5:58に発生した、高度3000mの噴煙を伴う噴火は、ARIR観測点のみで降灰が検知された（図29）。また2020年4月4日には、噴煙高度2600m、2200m、3800mの噴火が1時間に繰り返し発生したが、同じくARIR観測点のみで検知された（図30）。また、12月17日19:59に発生した噴煙高度3000mの噴火は、FUR観測点のみで検知された（図37）。

1回の噴煙放出に対し、隣接する2つの観測点において火山灰が検知されることもよくある。6月1日13:37に発生した爆発は火口上高度4300m（気象庁の火山噴火に関する観測報では3000m以上）に達する噴煙を伴い、その後数時間にわたり連続的に火山灰を放出した。この噴火に伴う傾斜変化は 0.37μ ラディアンに達しているため、1988年以降で最大規模の噴火と考えられる。南岳北東山腹のURAN観測点とKJIG観測点で多数の火山灰粒子が検知された（図35）。特にURAN観測点では1分あたりの降灰量が最大で約 200g/m^2 に達した。降灰開始から終了までの累計の降灰量は約 2.4kg/m^2 で、2020年に発生した噴火の中では最も多量の降灰をもたらした。他にも、6月5日1:30の噴火ではARI観測点とFUR2観測点で降灰が検知された（図36）。

噴火が連続的に発生すると降灰検知時間が長くなる。2020年4月5日には15:30に噴煙高度2100mの噴火が発生し、その後16:40にかけて2000から3500mの噴煙を伴う4回の噴火が連続的に発生した（図31）。これらの噴火による降灰はARIR観測点で検知された。一連の噴火によってもたらされた降灰は降り始めてから降り止むイベントを5回繰り返し、これらが5回の噴火に対応すると考えられる。

一方、噴火が短時間に連続して繰り返される場合にそれぞれの噴火が識別できない事例も見られた。2020年5月27日には13:23に噴煙高度3000mの噴火が発生したのを皮切りに、14:00にかけて合わせて4回の噴火が発生した（図34）。この噴火による降灰はNABE、ARIR、ARIの3観測点で検知され、ARIR観測点やARI観測点では時間降灰量のピークを識別できるが、降灰そのものは継続しているので、個々の降灰イベントを分離するのは難しい。

風速場が水平一様でなかったり、高さによって大きく異なったりする場合には、火口から見て広い方位に位置する観測点で降灰が検知される。2020年4月27日22:46に発生した噴火では、3000m以上の噴煙を伴う噴火が発生し、NABE、ARIR、ARI、FUR2の4観測点で降灰が検知された(図32)。2020年5月9日5:31(図33)に発生した噴煙高度4200mの噴火と、それに続く火山灰連続放出では、FUT、NTT、SAID、MATUの4観測点で降灰が検知された。

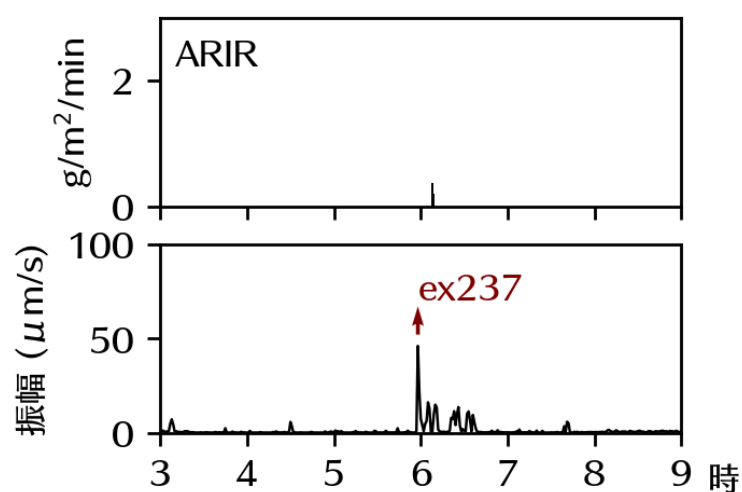


図29 2020年3月17日の爆発による降灰時の有村川（ARIR）における降灰量と地震動の振幅。

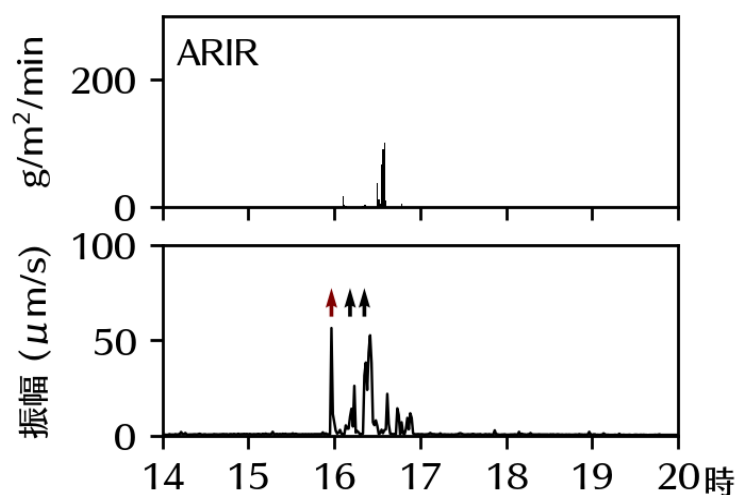


図30 2020年4月4日の爆発と噴火による降灰時の有村川（ARIR）における降灰量と地震動の振幅。赤矢印は爆発を、黒矢印は噴火を表す。

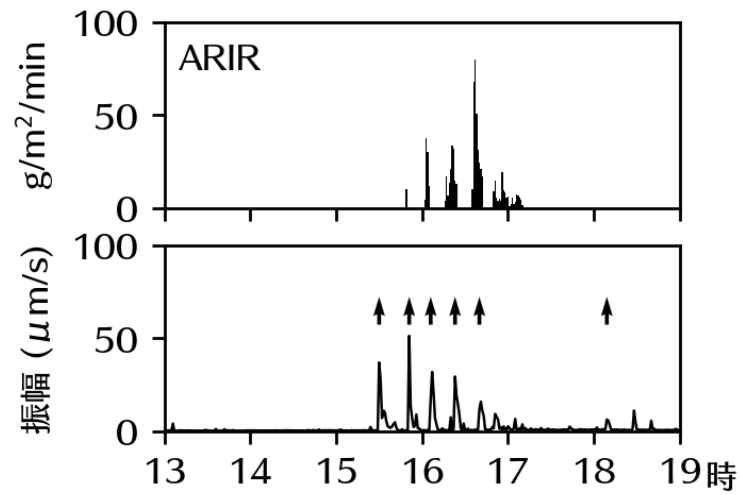


図 31 2020 年 4 月 5 日の噴火（2020 年 271-276 回目）による降灰時の有村川（ARIR）における降灰量と地震動の振幅。矢印は噴火を表す。

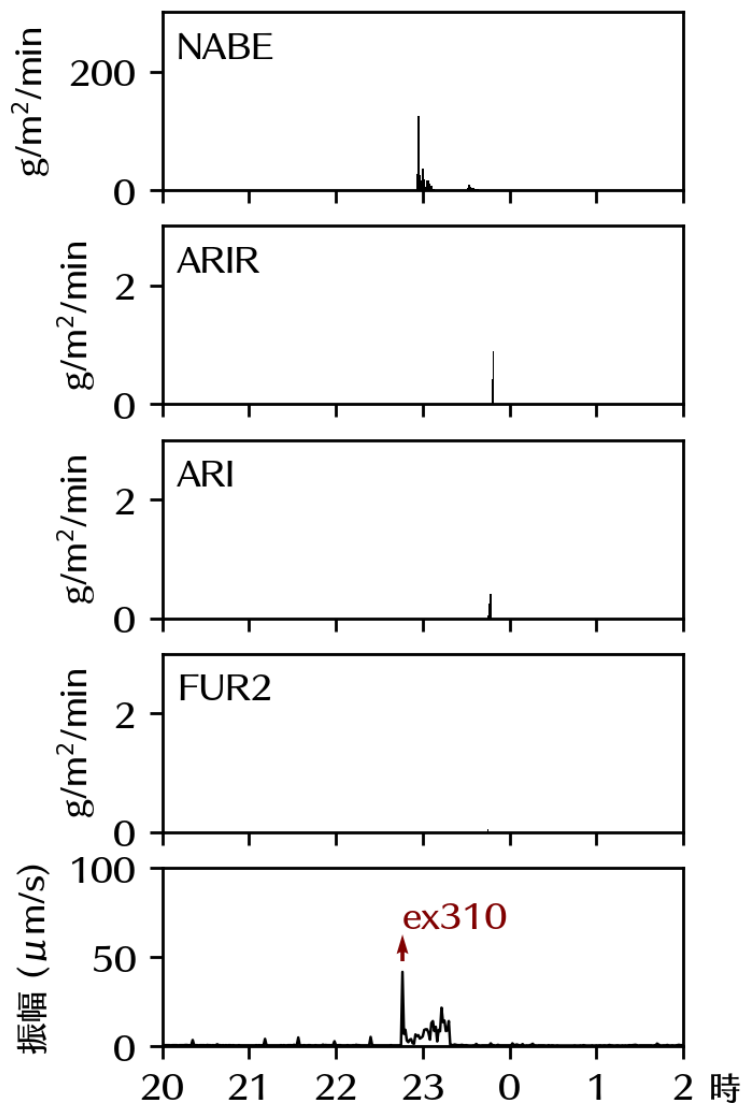


図 32 2020 年 4 月 27 日の爆発による降灰時の鍋山 (NABE)、有村川 (ARIR)、古里 (ARI)、第 2 古里川 (FUR2) における降灰量と地震動の振幅。

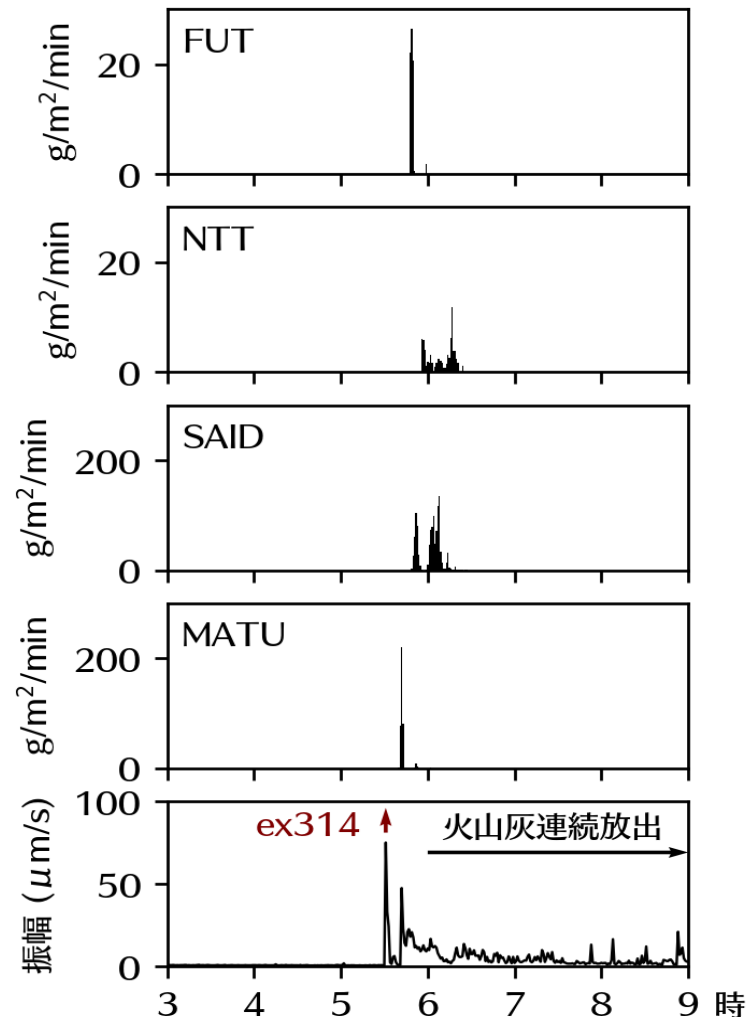


図 33 2020 年 5 月 9 日の爆発による降灰時の二俣 (FUT)、長谷浜 (NTT)、西道 (SAID)、松浦 (MATU) における降灰量と地震動の振幅。

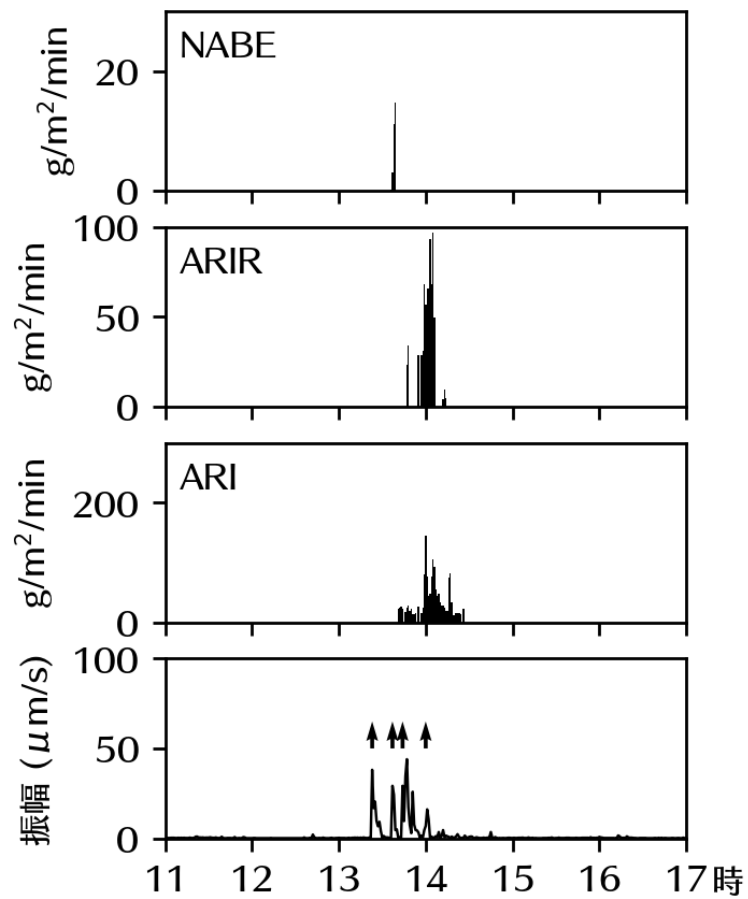


図 34 2020 年 5 月 27 日の噴火（2020 年 358-361 回目）による降灰時の鍋山（NABE）、有村川（ARIR）、古里（ARI）における降灰量と地震動の振幅。矢印は噴火を表す。

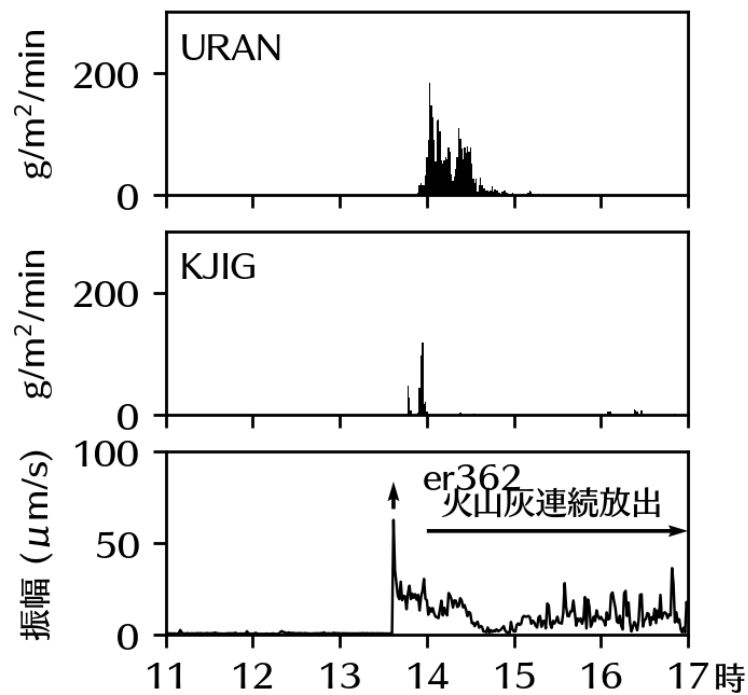


図 35 2020 年 6 月 1 日の噴火による降灰時の浦之前（URAN）、地獄河原（KJIG）における降灰量と地震動の振幅。

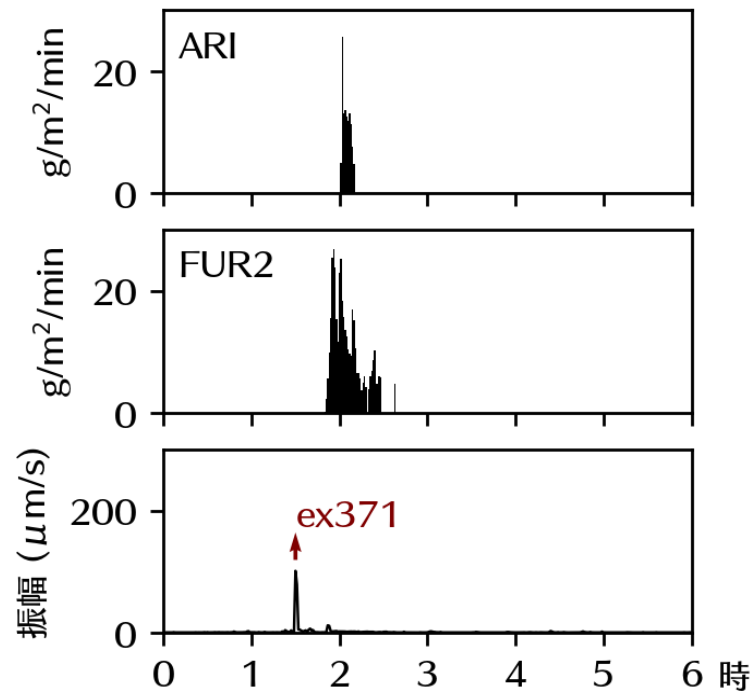


図 36 2020 年 6 月 5 日の爆発による降灰時の古里（ARI）、第 2 古里川（FUR2）における降灰量と地震動の振幅。

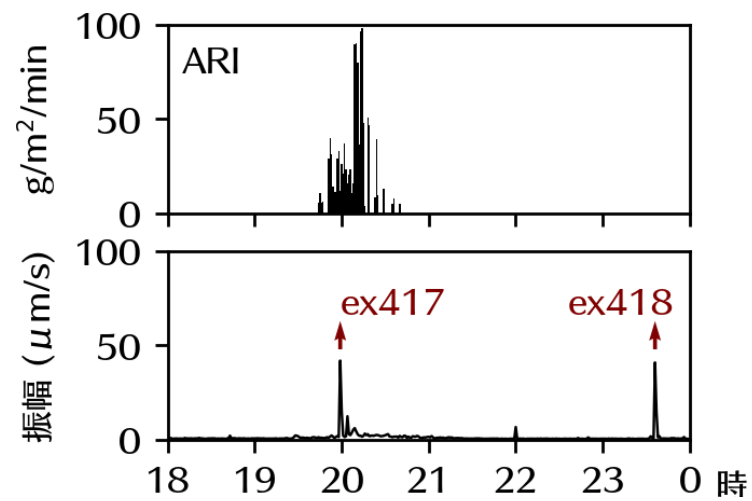


図 37 2020 年 12 月 17 日の爆発による降灰時の古里（ARI）における降灰量と地震動の振幅。

v) 降灰量の空間分布

いくつかの噴火においては火口から同じ方向で異なる距離にある複数の観測点において降灰が観測されているので、火山灰粒子の距離依存性を検討することが可能である。

例えば 8 月 9 日 5:38 に発生した噴煙高度 5000m の噴火においては、南岳北麓の AMID、MAT、FUT の 3 地点で降灰が観測された。AMID、MAT、FUT は南岳火口からそれぞれ、2.1km、3.0km、5.1km の距離にあり、それらの降灰量を比較して図 38 に示す。

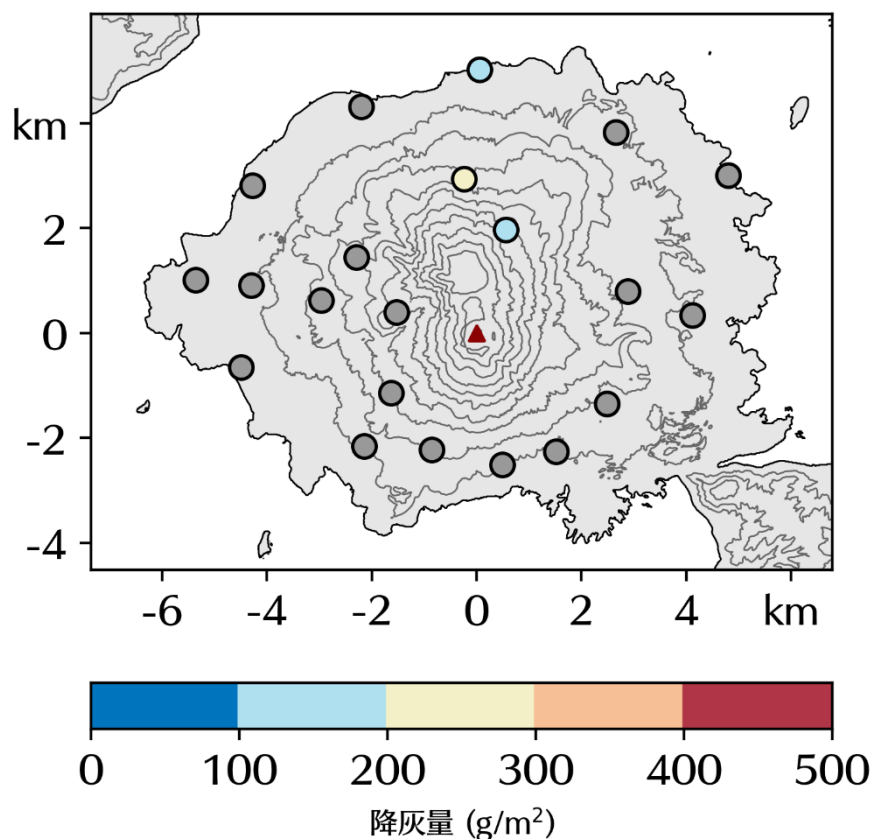


図 38 2020 年 8 月 9 日の爆発による降灰量の空間分布。灰色の地点は降灰がなかったことを示す。

降灰量の時系列を図 39 に示す。爆発は 5:38 に発生し、AMID 観測点（火口からの距離 2.1km）では 5:45 から、MAT（火口から 3.0km）では 5:46 から、FUT（火口から 5.1km）では 5:50 から降灰が検知された。火山灰粒子を検知した時間は AMID で 40 分間、MAT と FUT で 13 分間であった。AMID では噴火が開始してから 1 時間以上経過したあとに最大 $5.5\text{g/m}^2/\text{min}$ の弱い降灰が断続的に検知され、累計の降灰量の大半はこの時間帯に降下したものであった。

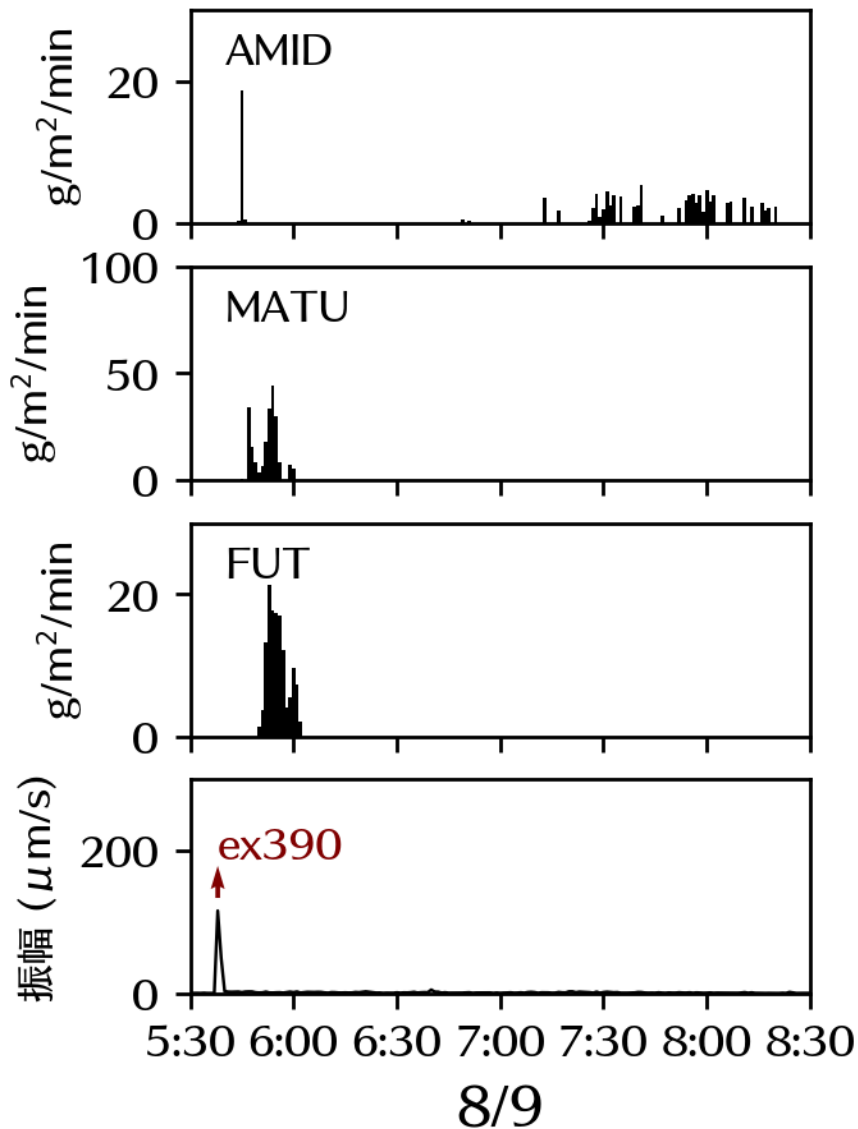


図 39 2020 年 8 月 9 日の爆発による降灰時のあみだ川 (AMID)、二俣 (FUT)、松浦 (MATU) における降灰量と地震動の振幅。

これらの観測点における噴火直後からの火山灰粒子落下速度の頻度分布の時間変化を比較する (図 40)。AMID では 5 : 45 ごろに検知粒子数がピークを迎え、最大で 12m/s を超える粒子が降下し、最頻値は 4m/s 程度だった。本稿で示した方法で求められる降灰量は 4m/s 以上の高速な粒子が計算対象から外れているため、図 26 のように求められた降灰量は過小評価されている恐れがある。少し遅れて検知され始めた MATU 観測点では最大で 6m/s 程度の粒子が検知され、最頻値は 3m/s 程度と、いずれも AMID 観測点よりも低速だった。FUT 観測点で検知された粒子の落下速度範囲や最頻値は MATU 観測点と同程度であったが、時間を追うごとに徐々に落下速度の遅い粒子が降下した。このように、落下速度の大きい粒子は火口近傍に降下し、速度の小さい粒子は遠方まで到達することが観測から確認できた。

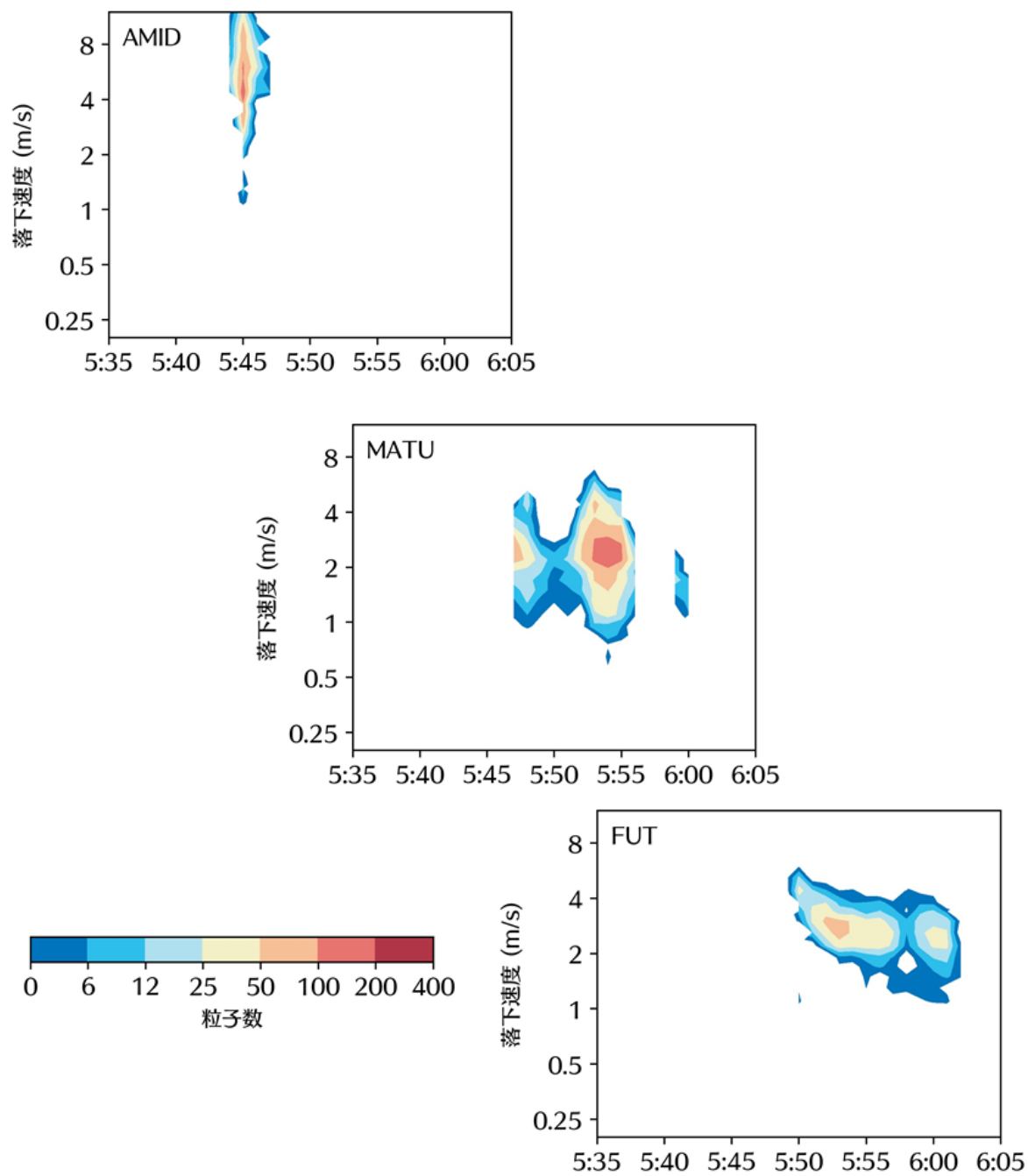


図 40 AMID、MATU、FUT 観測点のディストロメータにより観測された火山灰粒子の落下速度頻度分布の時間変化の比較。

e) レーダー観測による火山灰推定の高度化

平成 31 年度の報告では、桜島の噴火時に取得された降灰粒子の粒径分布 (PSD) から降灰量推定式 (R_A -Z 関係式) を導出した。得られた推定式はある長期間の降灰量を推定する式として利用できるが、時々刻々と変化する降灰量の変化を推定する場合には大きな誤差が生じる。その理由は、降灰粒子の PSD が変動するためである。そこで、本年度は、PSD の特徴について詳細な調査をおこなった。具体的には、降水粒子の PSD の近似にしばしば用いられるガンマ関数が降灰粒子の近似にも使えるかどうか、ガンマ PSD パラメータの統計的特徴、それぞれのパラメータ間の相関関係、普遍的な PSD の検討等をおこなった。以下、i) から v) では本研究に使用したデータとデータ処理について述べた。iii) から iv) では PSD を近似関数に用いたガンマ PSD 関数のパラメータの説明とその計算方法について述べた。解析結果は v) から ix) で紹介した。なお、本報告書に記載した研究成果は Maki et al. (2021)⁶⁾ にまとめられている。

i) 使用したデータ

使用したデータは、京都大学防災研究所が桜島に設置している Parsivel2 のネットワーク (図 22) で収集されたデータの中から、2018 年に発生した 6 つの噴火事例のデータを抽出した。事例の抽出に当たっては気象庁鹿児島地方気象台の桜島火山の噴火の統計資料 (気象庁) と国土交通省が桜島南岳火口から約 11km 離れた垂水市に設置している X バンドマルチメータレーダの仰角 6° の反射因子の PPI 画像を参考にした。

ii) データ処理

大気中を落下する粒子の様々な物理量はパーシベルの測定データから求められる。落下粒子の粒径分布 (PSD) は次式から得られる。

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{nd} \frac{C_{ij}}{A_i \cdot \Delta t \cdot V_j \cdot \Delta D_i}; \quad N(D_i) [\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}], D_i [\text{mm}] \quad (2-1)$$

ここで、 $N(D_i)$ は単位体積内にある、直径が D_i から $D_i + \Delta D_i$ の粒子の個数、 D_i 、 ΔD_i はそれぞれ、 i 番目のサイズビンの平均直径およびビン間隔である。 C_{ij} は i 番目のサイズビンと j 番目の速度ビンで計測された粒子の個数、 nd はサイズビンの数 (本機器では 32)、 Δt は測定時間間隔 (本機器では 60 秒)、 V_j は j 番目の速度ビンで測定された落下速度である。 A_i は i 番目のサイズビンの有効測定面積で、次式から計算される。

$$A_i = [180 \times (30 - 0.5 D_i)] \times 10^{-6} \quad [\text{m}^2] \quad (2-2)$$

平均直径が D_i の粒子の平均落下速度は次式で表される。

$$V(D_i) = \sum_{j=1}^{nv} V_j \cdot C_{ij} / \sum_{j=1}^{nv} C_{ij} \quad [\text{ms}^{-1}]. \quad (2-3)$$

ここで、 nv は速度ビンの数 (本機器では 32) である。
降灰強度 R_A は次式から求められる。

$$R_A = \frac{\pi \rho_p}{6} \sum_{i=1}^{nd} (V(D_i) \cdot N(D_i) \cdot D_i^3); \quad R_A [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (2-4)$$

ここで、 ρ_p は火山灰粒子の固体密度で本研究では 2.5 g cm^{-3} ($= 2.5 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$) とした。

式(2-1)と(2-3)より、

$$R_A = \frac{\pi}{6} 10^{-9} \rho_p \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nv} D_i^3 \frac{C_{ij}}{A_i \Delta t}; \quad R_A [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (2-5)$$

火山灰の堆積密度を ρ_p (本研究では 1.25 g cm^{-3} とした) とすると、 $[\text{mm h}^{-1}]$ で表した降灰強度 R_A は次式で表される。

$$R_A = 6\pi 10^{-4} \frac{\rho_p}{\rho_b} \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nv} D_i^3 \frac{C_{ij}}{A_i \Delta t}; \quad R_A [\text{mm h}^{-1}] \quad (2-6)$$

火山灰密度 C_A は

$$C_A = \frac{\pi}{6} 10^{-6} \rho_p \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nv} D_i^3 \frac{C_{ij}}{A_i \Delta t V_j}; \quad C_A [\text{kg m}^{-3}] \quad (2-7)$$

レーダ反射因子 Z は

$$Z = \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nv} D_i^6 \frac{C_{ij}}{A_i \Delta t V_j}; \quad Z [\text{mm}^6 \text{m}^{-3}] \quad (2-8)$$

粒径分布を特徴付けるパラメータである質量重み付き直径 D_m は PSD の 4 次モーメントと 3 次モーメントの比で、

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^{nd} N(D_i) D_i^4 \Delta D_i}{\sum_{i=1}^{nd} N(D_i) D_i^3 \Delta D_i}; \quad D_m [\text{mm}] \quad (2-9)$$

粒径分布を特徴付けるもう一つのパラメータである規格化切片パラメータ N_w は次式から計算される。

$$N_w = \frac{4^4}{\pi \rho_p} \left[\frac{C_A}{D_m^4} \right]; \quad N_w [\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}] \quad (2-10)$$

iii) 降灰粒子の関数表現

レーダ気象学では、降水粒子の粒径分布の情報は降水量の推定や降水雲内部の微物理過程を調べるために必要不可欠な情報である。これらの目的のために、降水粒子を関数形で表現し、その時間変化や空間変化が調べられる。このようなレーダ気象学での考え方や手

法は降灰現象にも適用できる。本節では、火山灰粒子の粒径分布がガンマ関数や規格化ガンマ関数で表されること、更に、降灰強度や降灰密度、レーダ反射因子などの PSD の積分パラメータが粒径分布関数を用いて表現できることを示す。

以下の内容はレーダ気象学における研究対象である降水についてなされたものである。ここでは、降水粒子を降灰粒子に置き換えて記述する。降灰粒子の関数形として、次式で表されるガンマ関数を仮定する。

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \quad (3-1)$$

ここで、 D は直径、 $N(D)$ は単位体積内の単位直径増分当たりの降灰粒子の個数、 N_0 、 Λ 、 μ は粒径分布を特徴づけるパラメータで、それぞれ、切片パラメータ、傾きパラメータ、形状パラメータと呼ばれる。通常、各変数の単位には、 D (mm)、 Λ (mm⁻¹)、 N_0 (mm^{-1- μ} m⁻³) が用いられる。ここで、 N_0 の単位に μ が入っているために量パラメータは完全に独立ではない点に注意する必要がある。このため、 N_0 は μ の変動の影響を受けその変動には物理的な意味はない。式(3-1)は、傾きパラメータ Λ の代わりに物理的な意味を持つ体積メジアン直径 D_0 を用いて、

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp[-G(D / D_0)] \quad (3-2)$$

と表すこともできる。ここで、 $G = \Lambda D_0$ で、 $D_{max}/D_0 \geq 2.5$ 、かつ、 $\mu \geq -3$ の時、

$$G = \Lambda D_0 = 3.67 + \mu$$

の関係が 0.5%内の精度で成り立つ。体積メジアン直径 D_0 は降灰粒子の粒径分布において、単位体積内の全降灰粒子の合計体積を 2 等分する直径と定義される。 D_0 の計算が面倒なことから、(2-9) で定義される D_m が用いられることがある。 D_m と D_0 には次の関係が成り立つ。

$$D_m = (4 + \mu) / (3.82 + \mu) D_0 \quad (3-3)$$

ここで、上式の 3.82 は降灰粒子の終端速度のべき乗近似式に起因する。 $\mu \geq 0$ では D_m と D_0 の違いは約 9%より小さく、 μ が大きくなるほどその違いは小さくなり、 $\mu = 10$ では両者の違いは 2%程度である。

D_m を用いてガンマ分布を表すと、

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp[-(4 + \mu)(D / D_m)] \quad (3-4)$$

$$\Lambda = (4 + \mu) / D_m \quad (3-5)$$

と表される。

iv) 粒径分布パラメータの計算

ガンマ PSD の 3 つのパラメータ、 N_0 (または N_w)、 Λ (D_0 または D_m)、 μ は PSD の n 次モーメント

$$M_n = \int_0^\infty D^n N(D) dD \quad (4-1)$$

を用いて計算することができる。 M_n は、Parsivel²による観測から得られた粒径分布データを用いて次式により求めることができる。

$$M_n = \sum_{i=1}^{32} D_i^n N_i(D_i) \quad (4-2)$$

計算の便宜上、 M_2 、 M_4 、 M_6 を組み合わせた変数 η を次式で定義する。

$$\eta = \frac{M_4^2}{M_2 M_6} = \frac{[\Gamma(5+\mu)]^2}{\Gamma(3+\mu)\Gamma(7+\mu)} = \frac{(3+\mu)(4+\mu)}{(5+\mu)(6+\mu)}. \quad (4-3)$$

η は $\mu \geq -3.63$ の場合、 μ に関して単調増加する関数である。式(2-3)を解けば、 μ は次式から求めることができる。

$$\mu = \frac{(7-11\eta) - (\eta^2 + 14\eta + 1)^{1/2}}{2(\eta - 1)}. \quad (4-4)$$

μ の値がわかればガンマ分布の傾きパラメータ Λ は次式から求められる。

$$\Lambda = \left[\frac{M_2 \Gamma(5+\mu)}{M_4 \Gamma(3+\mu)} \right]^{1/2} = \left[\frac{M_2 (4+\mu)(3+\mu)}{M_4} \right]^{1/2} \quad (4-5)$$

但し、上式では $\Gamma(x) = (x-1)\Gamma(x-1)$ を考慮した。

$$N_0 = \frac{M_n \Lambda^{\mu+n+1}}{\Gamma(\mu+n+1)} \quad (n=2,4,\text{or }6) \quad (4-6)$$

上式は、 N_0 は、 μ と Λ が求まれば、任意の n を指定して求められることを示している。この時、 n の値は2、4、6のいずれの値でも良く、それぞれの場合の N_0 の計算値の違いは1%程度である。 D_0 は μ と Λ が求まれば、次式から計算できる。

$$D_0 = \frac{3.82 + \mu}{\Lambda} \quad (4-7)$$

v) 結果：完全モーメント法 vs 非線形回帰分析

図41に2018年7月16日の噴火時に観測されたPSDの形状の時間変化を示す。図の実線と破線の曲線はそれぞれ完全モーメント法と非線形回帰分析から求めたガンマ関数曲線である。両手法の結果は観測時刻15:54のPSDを除いて、概ね一致している。15:54のPSDは、完全モーメント法から求めた関数形が指数分布に近い（言い換えれば μ が小さい）のに対して、非線形回帰分析から求めた関数形は上に凸の形（ μ が大きい）をしている。この違いは、非線形回帰分析と完全モーメント法における大きな粒子の影響の違いによるものである。時刻15:58から16:04の期間には大きな粒子が存在しなくなったために、完全モーメント法と非線形回帰分析の結果はよく一致している。本研究では、大きな粒子を考慮できる完全ガンマ法を採用した。

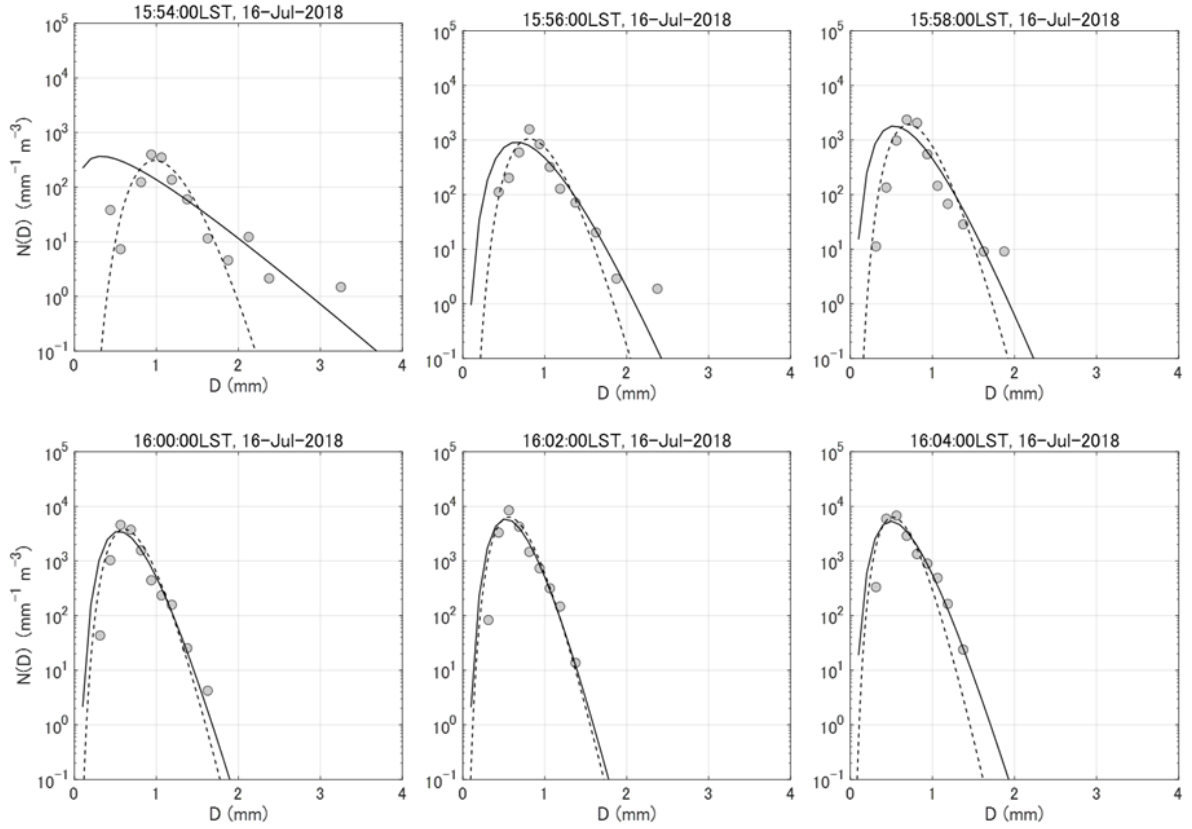


図 41 観測された PSD の時間変化の例（2018 年 7 月 16 日噴火）。白丸は観測値、実線と破線はそれぞれ完全モーメント法、非線形回帰分析から求めたガンマ曲線。

vi) 結果：ガンマ PSD パラメータの頻度分布

次に、全噴火事例で観測された降灰粒子のガンマ PSD の 3 つのパラメータ ($\log_{10}N_0$ 、 D_0 または Λ 、 μ) の頻度分布と確率密度分布を図 42 に示す。

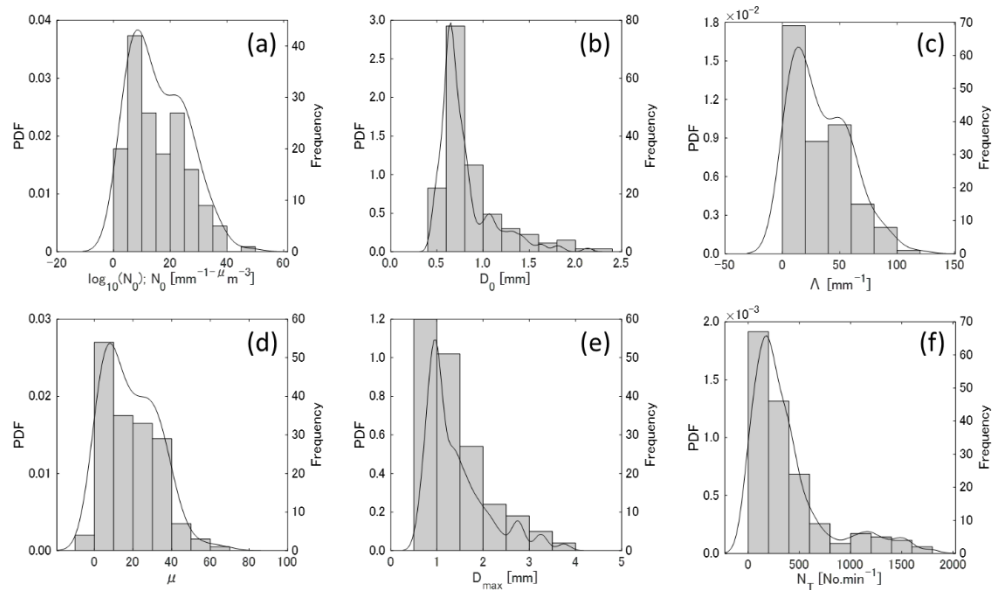


図 42 降灰粒子のガンマ PSD の 3 つのパラメータ ($\log_{10}N_0$ 、 D_0 または Λ 、 μ) の頻度分布と確率密度分布。

ガンマ PSD の 4 つのパラメータ $\log_{10}N_0$ 、 D_0 、 Λ 、 μ の最頻値（標準偏差）はそれぞれ 8.8（9.6）、13.4（25.0）、0.65（0.29）、8.3（13.7）である。その他の統計量を表 7 にまとめた。

表 7 ガンマ PSD パラメータ、規格化 PSD パラメータ、積分パラメータの統計的特徴

Parameter	Unit	Mode	Med	Mean	SD	Max	Skew	D ₁₀	D ₉₀
$\log_{10} N_0$	$\text{mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$	8.83	9.64	15.8	9.64	47.9	0.581	4.79	28.2
Λ	mm^{-1}	13.4	27.2	33.5	25.0	118	0.742	6.05	65.4
D_0	mm	0.65	0.69	0.79	0.292	2.13	1.88	0.54	1.21
μ	-	8.3	17.1	18.9	13.7	67.3	0.661	3.10	36.8
D_{\max}	mm	0.97	1.19	1.42	0.679	3.75	1.42	0.81	2.36
$\log_{10} N_w$	$\text{mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$	4.60	4.42	4.15	0.704	5.15	-0.875	3.07	4.87
D_m	mm	0.853	1.19	0.853	0.350	2.36	1.83	0.559	139
N_T	m^{-3}	182	252	381	380	1788	1.75	26	998
R_A	mm h^{-1}	0.52	1.08	2.01	2.17	11.7	1.64	0.23	5.43
C_A	g m^{-3}	0.0931	0.180	0.225	0.189	0.845	1.21	0.0323	0.478
$10\log_{10} Z$	dBZ	17.1	18.2	19.3	7.43	36.9	0.087	9.28	28.8

R_A の計算では、 $\rho_b = 1.25 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ 、 $\rho_p = 2.50 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ とした。

vii) 結果：ガンマ PSD パラメータ間の相関関係

レーダリモートセンシングの主要課題として、レーダの測定値から噴火雲の物理量をいかにして求めるかがある。通常、未知数である物理量の数はレーダで測定できるパラメータの数よりも多い。そこで、未知のパラメータ間の関係式を理論的あるいは経験的に求める事により未知数の数を減らす方法がとられる。あるパラメータ間に高い相関が認められれば、リモートセンシングによる火山灰モニタリングを構築する上で参考になる。さらに、その相関関係になんらかの理論的な解釈ができれば噴火雲内の微物理過程の推定にも役に立つ。

図 43 および表 8 にガンマ PSD パラメータ間の相関を示す。図 43 によれば、ガンマ PSD の 3 つのパラメータ、 $\log_{10}N_0$ 、 Λ 、 μ の間には良い相関関係が認められる。この結果は、レーダ観測からガンマ PSD パラメータの一つを推定できれば、他のガンマ PSD パラメータを推定できることを意味している。図 43 には、 D_{max} と形状パラメータ μ との関係も示した。PSD の形状は、大きな降灰粒子が観測される時 μ は 0 に近づき（即ち指数分布に近づく）、逆に、粒径が小さくなるほど μ が大きくなる（上に凸の度合いが大きくなる）。この結果は、最大粒径を与えれば、表 8 に示した関係式を用いてガンマ PSD のほかのパラメータを決定できることを示唆しており、火山灰移流拡散モデルの PSD 初期値設定に利用できるかもしれない。

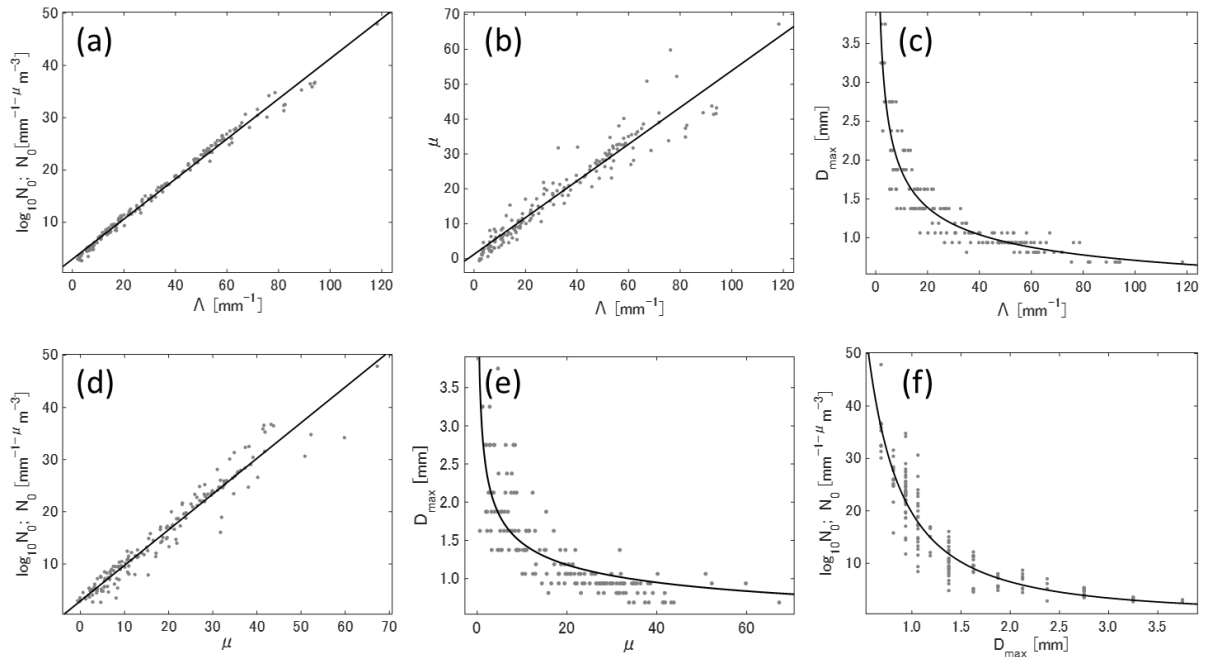


図 43 ガンマ PSD パラメータ間の相関関係。

表 8 ガンマ PSD パラメータ間の相関関係式

	$\log_{10}N_0$	Λ	μ	D_{max}
$\log_{10}N_0$	—	$\log_{10}N_0 = 0.383 \Lambda + 2.942$ (0.995, 0.91)	$\log_{10}N_0 = 0.684 \mu + 2.89$ (0.973, 2.211)	$\log_{10}N_0 = 19.67 D_{max}^{-1.606}$ (0.920, 3.784)
Λ	$\Lambda = 2.585 \log_{10}N_0 - 7.308$ (0.995, 2.361)	—	$\Lambda = 1.751 \mu + 0.469$ (0.960, 7.005)	$\Lambda = 42.23 D_{max}^{-2.046}$ (0.937, 8.76)
μ	$\mu = 1.386 \log_{10}N_0 - 3.02$ (0.974, 3.148)	$\mu = 0.527 \Lambda + 1.222$ (0.960, 3.842)	—	$\mu = 23.87 D_{max}^{-1.713}$ (0.853, 7.178)
D_{max}	$D_{max} = 5.863 \log_{10}N_0^{-0.595}$ (0.922, 0.263)	$D_{max} = 4.862 \Lambda^{-0.418}$ (0.937, 0.238)	$D_{max} = 3.018 \mu^{-0.314}$ (0.779, 0.393)	—

viii) 結果：規格化 PSD

図 44 は規格化する前後の PSD を比較した図である。規格化する前の PSD (図 44a) は、降灰強度による変動が大きく特徴的な分布は確認できないが、規格化後の PSD はある形状に収束していることがわかる (図 44b)。このことは、PSD を規格化することによりある降灰強度によらない普遍的な PSD 分布形が存在することを示唆している。その分布形として規格化ガンマ PSD モデル式 (3-6) を仮定すれば、図 44b の $N(D)/N_w$ の変動は μ で整理できるかも知れない。本研究で扱ったサンプル数が 166 と少ないためにこの検証は今後の課題である。

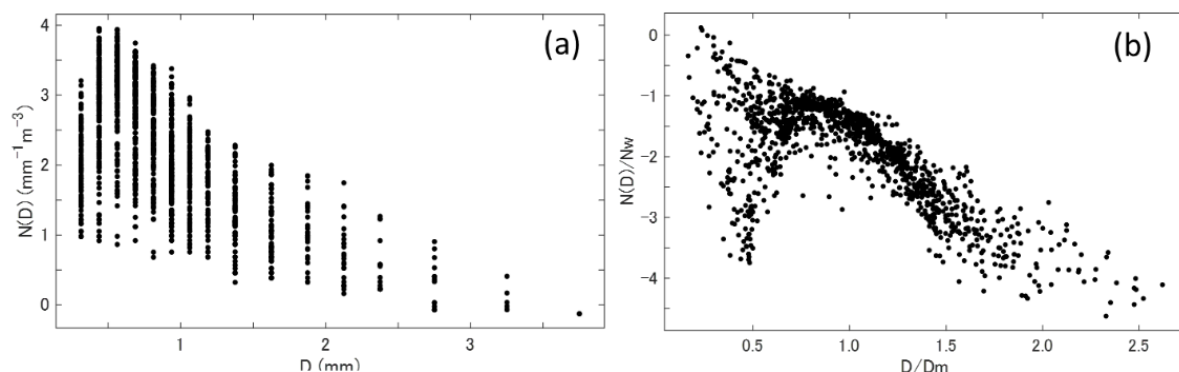


図 44 規格化する前(a)と後(b)の PSD

少ないサンプル数ではあるが、規格化ガンマ PSD のパラメータの統計的な特徴を明らかにしておくことは今後の研究の参考になる。規格化ガンマ PSD パラメータ (D_m , $\log_{10} N_w$) の頻度分布と確率密度関数を図 45 に示す。 μ については図 42d に示した通りである。 D_m 、 $\log_{10} N_w$ 、 μ の最頻値 (標準偏差) はそれぞれ 0.656 (0.350)、4.60 (0.704)、8.31 (13.7) である。

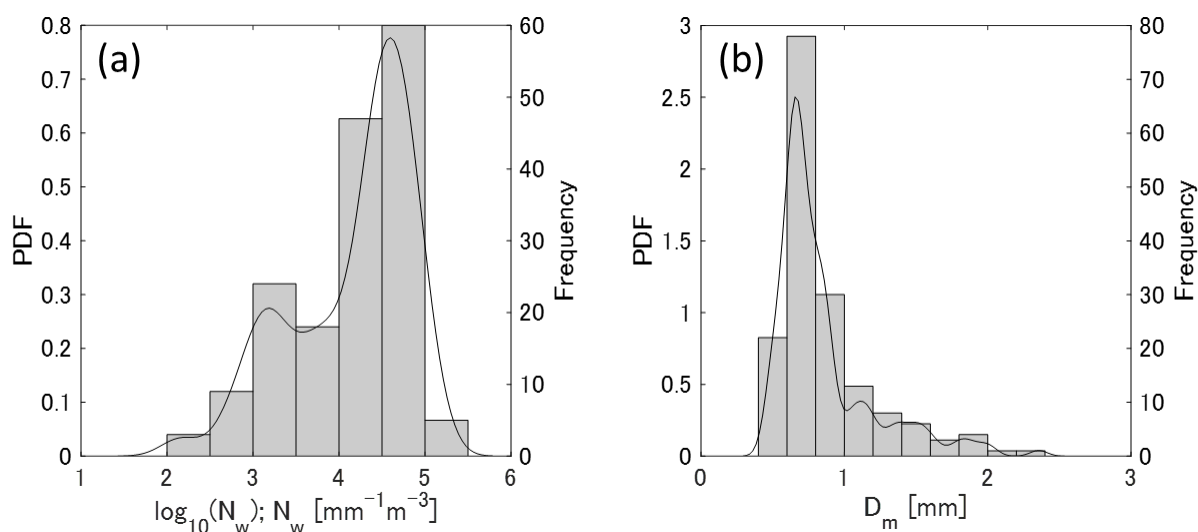


図 45 規格化切片パラメータと質量重み付き直径の頻度分布と確立密度関数

ix) 結果：降灰強度 .vs. 規格化 PSD パラメータ

降灰強度 R_A 、規格化 PSD パラメータ (N_w 、 D_m 、 μ) 間になんらかの相関関係があるかどうかを調べた。図 46 に R_A と z の散布図、 R_A/N_w と D_m の散布図を示す。図 46a は昨年度の報告で求めた散布図で、規格化 PSD パラメータを用いた散布図 (図 46b) と比較するために再掲した。図中の曲線は非線形回帰分析から求めたべき乗式で

$$R_A / N_w = 2.54 \times 10^{-4} D_m^{4.97} \quad (\text{e9. 1})$$

である。変形して

$$R_A = 2.54 \times 10^{-4} D_m^{4.97} N_w \quad (\text{e9. 2})$$

となる。上式の 95%信頼限界の上限と下限のべき乗式は次の通りである。

$$R_A = 2.72 \times 10^{-4} D_m^{5.07} N_w; 95\% \text{ upper limit} \quad (\text{e9. 3})$$

$$R_A = 2.36 \times 10^{-4} D_m^{4.87} N_w; 95\% \text{ lower limit} \quad (\text{e9. 4})$$

である。

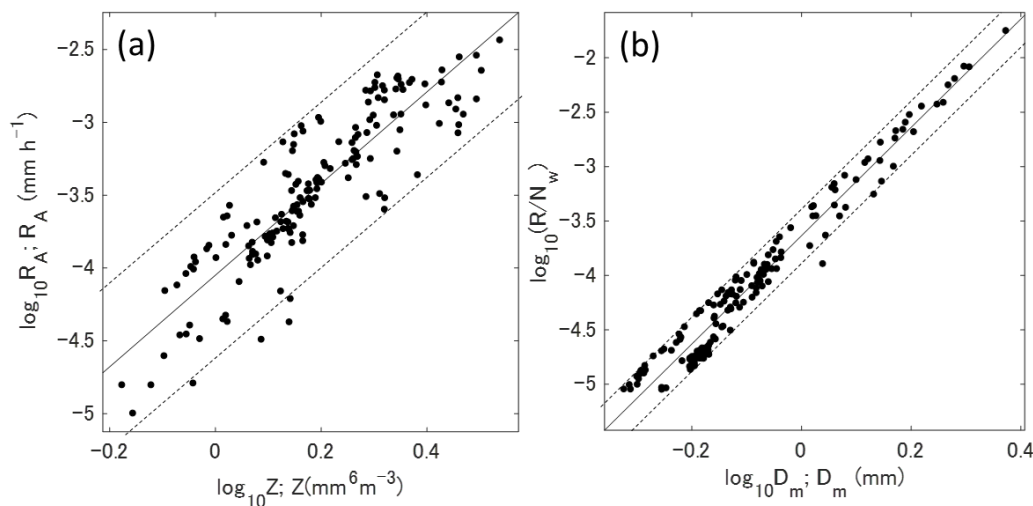


図 46 (a) R_A — Z 関係と (b) R_A/N_w — D_m 関係。

図 46b で、 R_A/N_w と D_m の相関係数 (分散) は 0.991 (0.000177) で、 R_A と Z の相関係数と比べて高い (低い) 値となっている。このことは、(e9. 1) 式は R_A を推定する優れた関係式であることを示唆している。

式 (e9. 1) あるいは式 (e9. 2) から R_A を推定する場合、 D_m と N_w を何らかの方法で求める必要がある。降水現象の場合、 D_m と N_w を推定する方法として、衛星リモートセンシングの二周波レーダ観測や二重偏波レーダ観測が提案されている。降灰現象に関しても同様な手法が利用できるかも知れない。これも今後の課題である。

x) まとめと今後の展望

前年度の報告では、工学的な方法から求めた降灰量推定式について述べた。本年度の報告では、理学的降灰量推定式に必要な火山灰粒子の粒径分布 (PSD) の特徴を調べた。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- ・降灰粒子の粒径分布はガンマ関数で近似できる。
- ・ガンマ関数を規定する 3 つのパラメータ (切片パラメータ、傾斜パラメータ、形状パラメータ) 間には良い相関関係が認められた。
- ・最大粒径とガンマ関数の 3 つのそれぞれのパラメータの間に相関が認められた。このことは最大粒径が与えられれば降灰粒子の粒径分布を推定できることを示唆している。
- ・規格化 PSD を用いることで、降灰強度に依存しない粒径分布を議論できることが示唆された。
- ・降灰強度は規格化 PSD パラメータ (規格化切片パラメータ、質量重み付き直径) で表すことができる。このことは、上記二つのパラメータを何らかの方法から推定できれば、より高精度の降灰強度の推定が可能になることを示唆している。

今後の課題として、より多くの PSD 観測データを解析することにより、今回の結果をより明確にしていく必要がある。また、規格化 PSD パラメータを推定する方法として偏波レーダパラメータ (反射因子と反射因子差) の利用が考えられる。今後、本プロジェクトで整備した小型 X バンド MP レーダデータと Parsivel² のデータを用いて理論的な降灰強度推定式を提案したい。

f) 緊急観測

本プロジェクトでは、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダーが当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、ここで実施する現地観測について、その一部もしくはその全てに代えて緊急観測を実施することを可能とする、こととなっている。諏訪之瀬島では2020年12月21日以降、空振と火山岩塊の放出を伴う爆発的な噴火が頻発するようになり、12月28日の2:48の爆発では岩塊が火口丘の東南東1.3kmの距離に達したため、福岡管区气象台より噴火速報を発出、噴火警戒レベルが3（警戒区域2km）に引き上げられた。そこで、本プロジェクトでは緊急観測を立ち上げたので、それについて報告する。

i) はじめに

諏訪之瀬島はわが国でも最も活動的な火山の一つで、桜島と同様に長期間の噴火活動が継続している。20世紀以降、島の中央部にある御岳の山頂から北東側に開いたカルデラ内において火口丘を形成しながら噴火が繰り返されている。1995年までは火口丘内で、ブルカノ式噴火やストロンボリ式噴火を主体とする噴火が繰り返されたが、1996年から2000年まで静穏化した。2000年12月にそれ以前に存在した火口丘の北東側に新火口が形成され、2001年には噴火が頻発し、従来の火口丘と合体して新たな火口丘を形成した。それ以降、噴火は繰り返されているものの、長期的にみると噴火活動度は低下傾向にあった。

2019年12月からGNSS観測により検出される島内の地盤膨張が検出され、その後、諏訪之瀬島西方海域の地震活動は高まる傾向にあった。噴火活動は2020年4月28日～29日にストロンボリ式噴火が頻発した。さらに、10月ごろから噴火の発生頻度が増加するとともに、連続的に火山灰を放出するようになり、マグマ噴出量の増加傾向が見られた。さらに、12月21日以降、空振と弾道岩塊の放出を伴う爆発的な噴火が頻発するようになり、12月28日の2:48の爆発では岩塊が火口丘の東南東1.3kmの距離に達したため、福岡管区气象台より噴火速報を発出、噴火警戒レベルが3（規制区域2km）に引き上げられた。

このような噴火活動は2001年以前の噴火活動と比べて諏訪之瀬島の噴火としてはとりわけ活動的なものではないが、2019年末からの地盤変動と地震活動は、20年程度の停滞期（噴火がないわけではない）を経て、マグマ貫入によって新たな活動期に入った可能性を示唆するものである。また、12月21日から現在に至る噴火は従来の爆発頻発に近いものであるが、10月からの火山灰連続放出は、従来あまり見られなかった現象である。火山学的に現在噴出しているマグマの実態を解明しておく必要がある。

噴火現象を防災の観点からみると、噴火警戒レベルは3に引き上げられたものの多くの弾道岩塊は北東側に開いたカルデラ内を東方向に飛行し、1km前後の距離まで飛散しているだけであり、山頂へのアクセスを可能とする南からの山頂ルートへはカルデラの南壁に阻まれて飛散しにくい。むしろ、連続的な火山灰放出に伴う降下火山灰の対処の方が、南に位置する集落では問題となっている。

ii) 実施内容

以上のことを考慮して、以下の項目について調査を行った。

①地震観測

- ②地盤変動観測
- ③空振観測
- ④火山ガス観測
- ⑤噴出物の採取と分析
- ⑥降下火山灰の観測

ii) 実施期間、出張者

第1回緊急観測

出張期間 2021年1月9日～11日

出張者 京都大学防災研究所 井口正人
京都大学防災研究所 山田大志

第2回緊急観測

出張期間 2021年2月5日～7日

出張者 京都大学防災研究所 井口正人
京都大学防災研究所 山田大志
京都大学理学研究科 瀧下恒星

第3回緊急観測

出張期間 2021年3月5日～10日

出張者 京都大学防災研究所 井口正人
京都大学防災研究所 山田大志
京都大学理学研究科 瀧下恒星
産業技術総合研究所 森田雅明
産業技術総合研究所 篠原宏志
常葉大学 嶋野岳人

iv) 地球物理学的観測

図 47 に示す諏訪之瀬島御岳火口から 3.1km 離れた SUW、1.4km 離れた SWI、0.7km 離れた SWA に地震計（1Hz）および低周波マイクロホンを設置し、無線伝送等により火山活動研究センターまでテレメータした。設置日は、それぞれ 2021 年 1 月 10 日、2 月 6 日、3 月 6 日である。観測点 SUW には 1989 年から ACO の低周波マイクロホンが稼働しているが、今回設置したマイクロホンはすべて SI104（白山工業）であり、低周波成分の感度が改善されている。



図 47 臨時観測地点の位置図。●は緊急観測点（地震計、低周波マイクロホン）。●は気象庁の観測点の位置を示す。×は 2021 年 1 月 11 日の火山灰採取地点。

これらの地震計及び低周波マイクロホンによって検出された。噴火に伴う地震動と空気

振動を検討する。

2021 年 1 月は、2020 年 12 月の爆発活動の余波が残っていると解釈される爆発（噴火）と火山灰放出が続いた。図 48 に 2021 年 1 月 11 日 7:19 に発生した噴火に伴う地震動と空気振動を示す。地震動は明瞭では、空気振動記録には振幅 1Pa 程度ではあるが、明瞭なパルスが記録されている。この噴火の写真を図 53 に示す。マッシュルーム状の噴煙が火口上高度 1000m 程度に達した。1 月 16 日にも小規模な爆発が連発した（図 49、図 50）。いずれも空気振動の振幅は 14~15Pa に達しており、1 月 11 日 7:19 に発生した噴火に比べて、1 桁大きい。図 50 に示した例では、爆発的なパルスが発生した後も、100 秒以上にわたって継続していることがわかる。爆発的な噴火後に火山灰が連続的に放出され、このような長時間に及ぶ火山灰放出が、降下火山灰の増加に寄与したことが推定される。

爆発発生と連動せず、火山性微動が単独に発生していることも多い。図 51 にその記録例を示す。火口から 3.1km 離れた SUW では火山性微動が識別できないが、火口から 1.4km の距離にある SWI では火山性微動が地震動として識別できる。空気振動は風によるノイズが大きい、火山性微動に対応する空気振動もみられる。

3 月 6 日には火口から 0.7km 離れた SWA に地震計及び低周波マイクロホンを設置したが、火口近傍であるために爆発の検出力は高い。爆発に伴う空気振動は、SUW では 60Pa であったが、SWA においては 287Pa で、ほぼ 4 倍程度である。また、地震記録には、噴石が観測点近傍に落下したことを示す高周波パルスが、爆発地震開始から 29~30 秒に現れている。

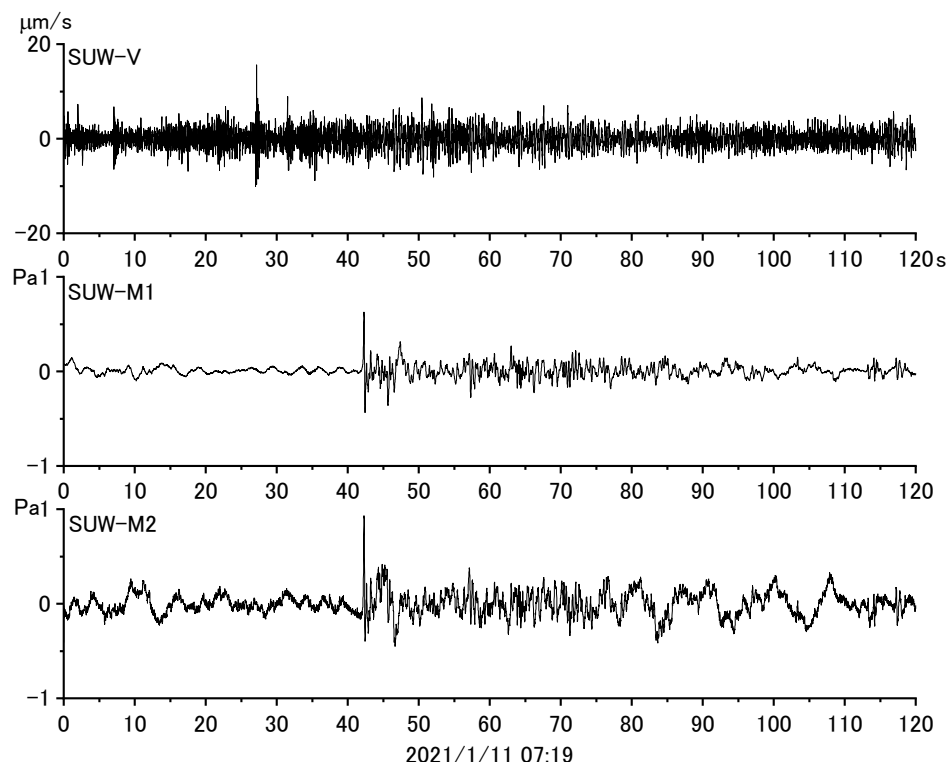


図 48 2021 年 1 月 11 日 7:19 に発生した噴火に伴う地震動（上段）および空気振動（中段、下段）

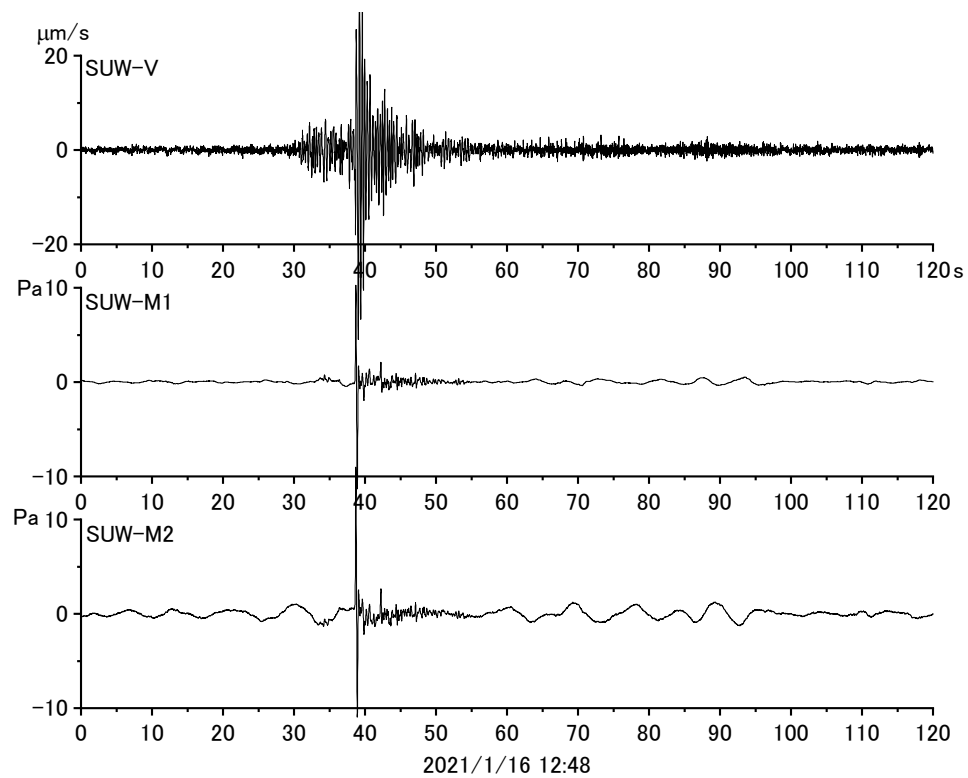


図 49 2021 年 1 月 16 日 12:48 に発生した爆発に伴う地震動（上段）および空気振動（中段、下段）。SUW-M1 は ACO のマイクロホン、SUW-M2 は SI104 によって観測された空気振動。

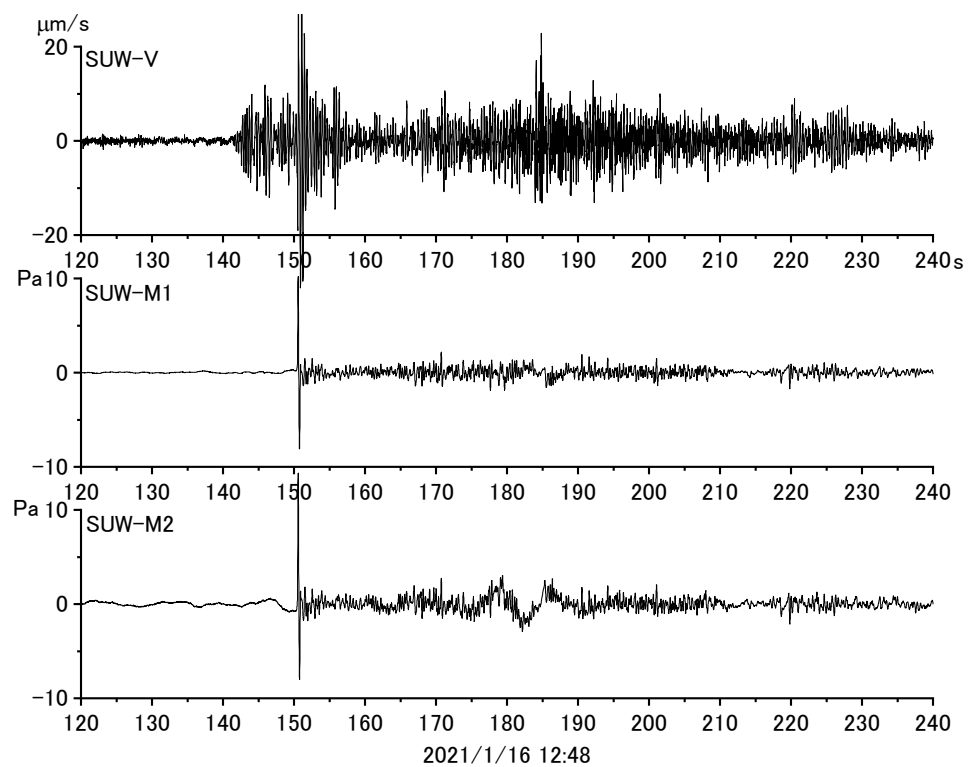


図 50 2021 年 1 月 16 日 12:50 に発生した爆発に伴う地震動（上段）および空気振動（中段、下段）。

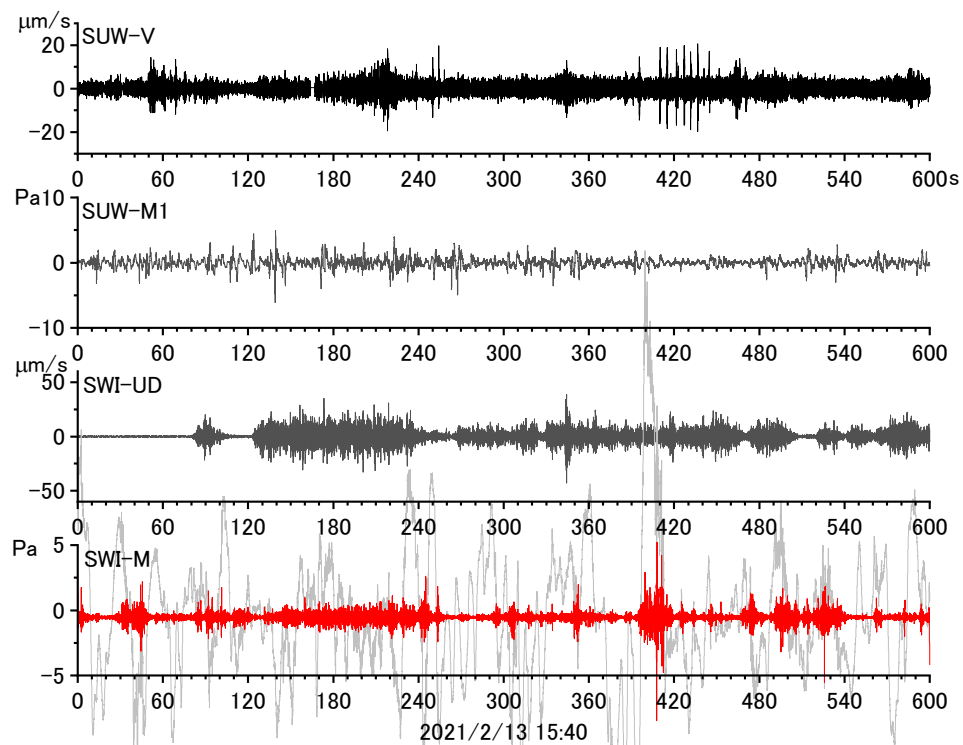


図 51 2021 年 2 月 13 日 15:42 に発生した噴火に伴う地震動（上段）および空気振動（2 段目）、以上観測点 SUW、地震動（3 段目）および空気振動（4 段目）、以上観測点 SWI。SWI の空気振動は 1Hz のハイパスフィルターを施したものである。

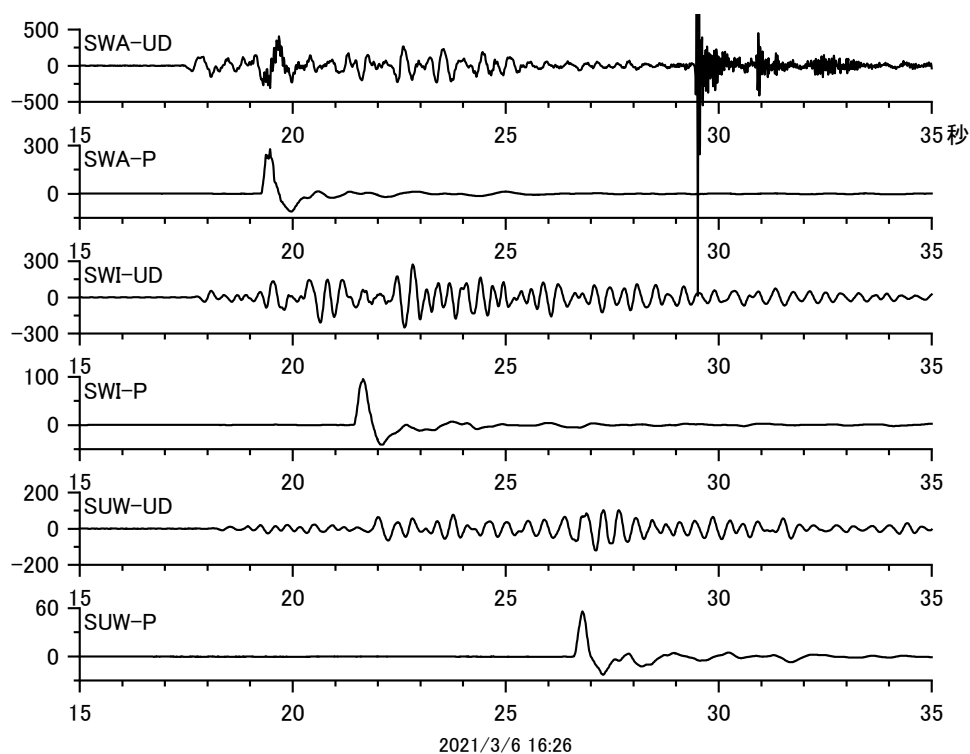


図 52 2021 年 3 月 6 日 16 時 26 分の爆発に伴う地震及び空振記録。「-UD」は地震動上下成分を、「-P」は空気振動を表す。SWA-UD の 29～30 秒に現れた高周波成分は噴石が観測点近傍に落下したことにより励起されたものである。



図 53 2021 年 1 月 11 日 7:19 に発生した噴火による噴煙。図 47 の×において撮影した。

v) 火山灰観測

2021 年 1 月 11 日 7:19 に発生した噴火によって、集落内で降灰があったので、採取して分析を行った。この噴火により降下した火山灰を集落（火口からの距離 3.6km）において採取した。降灰量は、 154g/m^2 であった。距離 3~4km における降灰量としては桜島の小規模噴火と同程度である。

また、火山灰に付着する水溶性成分の分析を東京工業大学の野上教授に依頼した。Cl イオンは 227 mg/kg 、 SO_4 イオンは 637 mg/kg であり、Cl/ SO_4 モル比は 0.96 となった。これは桜島と比較しても高い値である。1989 年 9 月~10 月に実施された集中総合観測のときの Cl は $21\sim 725\text{ mg/kg}$ 、 SO_4 は $618\sim 3900\text{ mg/kg}$ 、Cl/ SO_4 モル比は 0.09~0.50（平林教授採取、分析）、また、2000 年以降でも Cl/ SO_4 モル比は高くても 0.3 であり、今回の結果は、ガス中の HCl の割合が非常に高いことを示し、マグマが高温化していることを示唆する。

さらに、採取した火山灰の石基ガラス化学組成について、常葉大学嶋野教授から東京大学地震研究所に依頼した。これまでの噴出物と同様の組成であった。

これまでは噴火活動の最盛期にはガラス質つまり低結晶度の粒子が顕著であったが、最近数か月の火山灰は、中結晶度の粒子が大半を占めることに特徴がある。基本的にマグマ供給率が低い最近の諏訪之瀬島の活動について、マグマの上昇を支配するのは、火道の境界条件の違いか、あるいはマグマ供給パターン（一度に上昇してくるマグマバッチの大小、あるいはその変動周期の大小のような時間変動パターン）の違いと考えられるので、いずれかを反映している可能性が指摘できる。

これまでの噴火活動では結晶度が不均質で、ほぼ固化したマグマの隙間を結晶化していないマグマが流れるというような状況だったのが、最近は全体的にゆっくりと上昇し噴出しているようなイメージが考えられる。上昇速度は遅いが、安定してマグマが供給されていると評価できる。

2021 年 2 月 7 日には、爆発的ではないもののほぼ連続的に火山灰を放出していた。陸域

では降灰がなかったが、フェリーとしまが諏訪之瀬島切石港を出港して北上し、噴煙の下を通過した際に（図 54）、フェリーとしまの上甲板において火山灰採取を行った。採取皿に堆積した火山灰から求められた採取量は 0.104g であり、面積 0.073m² を考慮すると単位面積当たりの降灰量は 1.42g/m² となった。採取量が僅少のため面積を測定せずに甲板に堆積した火山灰を採取し、その粒径の重量分率を求め、先述した降灰重量から各粒径区分の降灰量を見積もった（表 9）。

表 9 火山灰粒子の粒径分布

	全体の重量	0.125mm 未満	0.125-0.25mm	0.25-0.5mm	0.5mm 以上	欠損率%
袋込み (g)	16.38	5.95	10.729	1.834	1.202	
正味 (g)	15.234	4.804	9.583	0.688	0.056	0.68
重量%		31.5%	62.9%	4.5%	0.4%	
降灰量換算 g/m ²	1.42	0.45	0.89	0.06	0.01	

なお、サンプル袋（重量 1.146g）に入れたまま火山灰粒子を計量した。

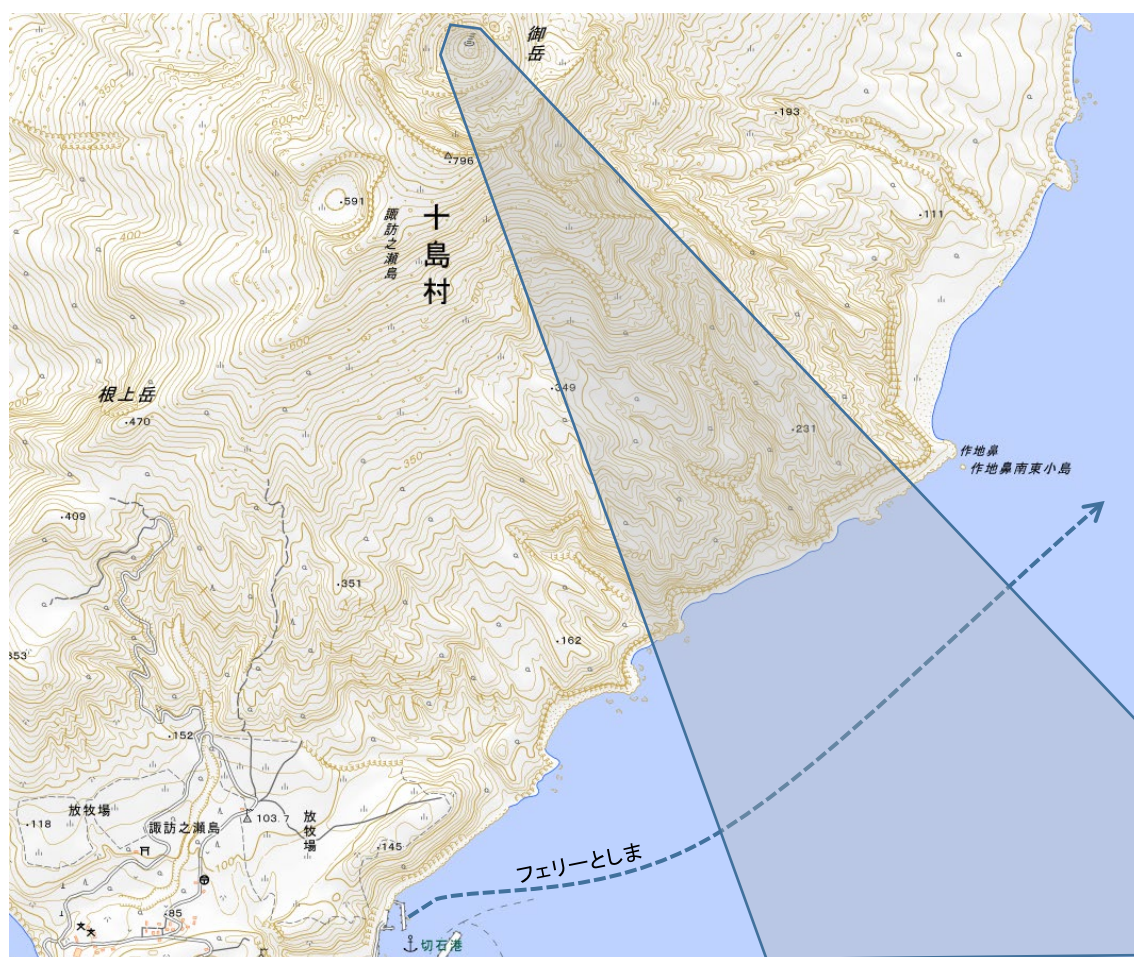


図 54 2021 年 2 月 7 日の火山灰採取地点



図 55 火山灰放出する諏訪之瀬島の御岳

諏訪之瀬島はほぼ連続的に火山灰の放出が続けている（図 55）。噴煙の放出が簡潔に強くなることもある。切石港にビデオカメラを設置し、噴煙放出強度が高まる時刻と火山性微動の発生が対応することを確認した。

2021 年 3 月 7 日から 10 日の期間に観測点 SUW においてディストロメータを設置し（図 56）、降灰の連続観測を行うとともに、火山灰採取を行った。9 回の降灰イベントを検知することができ、このうち、SUW での採取はディストロメータによる並行観測を実施した。



図 56 ディストロメータ（Parsivel²）による火山灰のリアルタイム観測

降灰量の測定結果を表 10 に示す。

表 10 火山灰採取量

地点	開始時刻	終了時刻	袋込み重量 g	袋重量 g	正味重量 g	降灰量 g/m ²
SUW	2021/3/6 18:35	2021/3/6 18:40	1.653	1.131	0.522	7.15
SUW	2021/3/7 10:15	2021/3/8 15:55	2.026	1.129	0.897	12.3
SUW	2021/3/8 15:55	2021/3/8 16:00	1.751	1.128	0.623	8.53
SUW	2021/3/8 16:33	2021/3/8 16:36	1.89	1.12	0.77	10.5
SUW	2021/3/8 16:36	2021/3/9 9:30	1.523	1.128	0.395	5.4
SUW	2021/3/9 17:15	2021/3/10 8:00	2.786	1.13	1.656	22.7
S1	2021/3/9 10:00	2021/3/9 17:00	16.542	4.012	12.53	172
SWA	2021/3/6 17:00	2021/3/9 12:30	35.55	1.564	33.986	466
SWA	2021/3/9 12:30	2021/3/9 15:40	3.895	1.558	2.337	32

表 11 DOAS を用いたトラバース観測による二酸化硫黄ガス放出率の観測結果

トラバース	開始時刻	終了時刻	最大濃度	風速	風速	S02 flux	S02 flux
番号	HH:MM:SS	HH:MM:SS	ppm. m	deg North	m/s	kg/s	ton/day
1	10:10:45	10:25:25	377.14	-161.0	12.0	15.66	1353.2
2	10:25:31	10:47:55	413.81	-165.9	12.0	13.50	1166.4
3	10:48:01	11:03:39	343.15	-162.0	11.9	16.49	1424.6
4	11:03:44	11:19:16	652.12	-162.0	11.7	18.49	1597.5
5	11:19:21	11:31:48	404.51	-160.8	11.2	12.22	1055.9
6	11:31:54	11:49:24	389.20	-162.5	11.0	12.42	1072.7
平均値			429.99	-162.4	11.6	14.80	1278.4

vi) 物質科学的調査

2021年3月6日に諏訪之瀬島御岳火口周辺において噴出物の調査を行った。御岳火口周辺において多数の噴石を確認した。最大で80cm程度の大きさであった。また、観測点SWAから距離50m以内に3個の噴石を確認した(図57、59)。3月2日に爆発発生回数が増加していたので、3月2日以降の爆発活動によるものである。

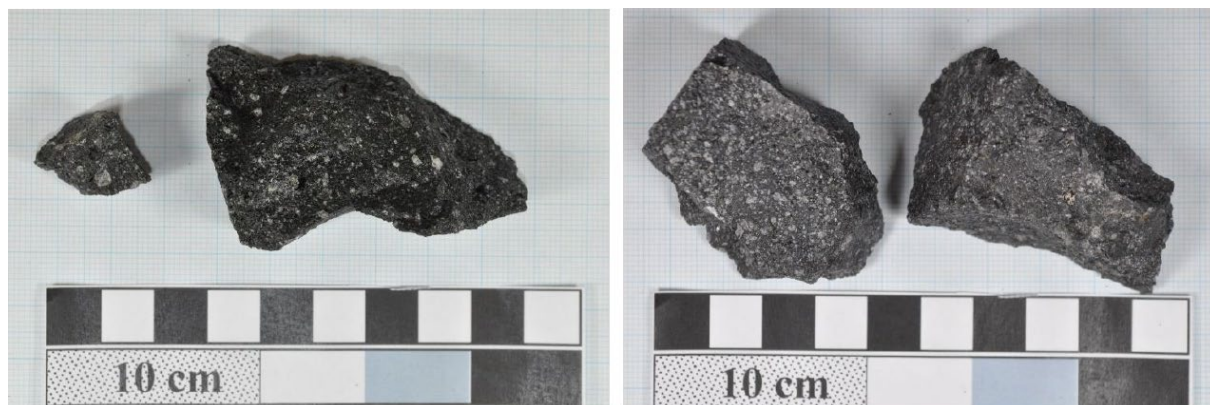


図57 諏訪之瀬島火口周辺で採取された岩塊。(左) 2021030606 (2021年3月6日御岳山頂下A点近傍で採取)、(右) 2011072401 (2011年7月24日御岳山頂で採取)。

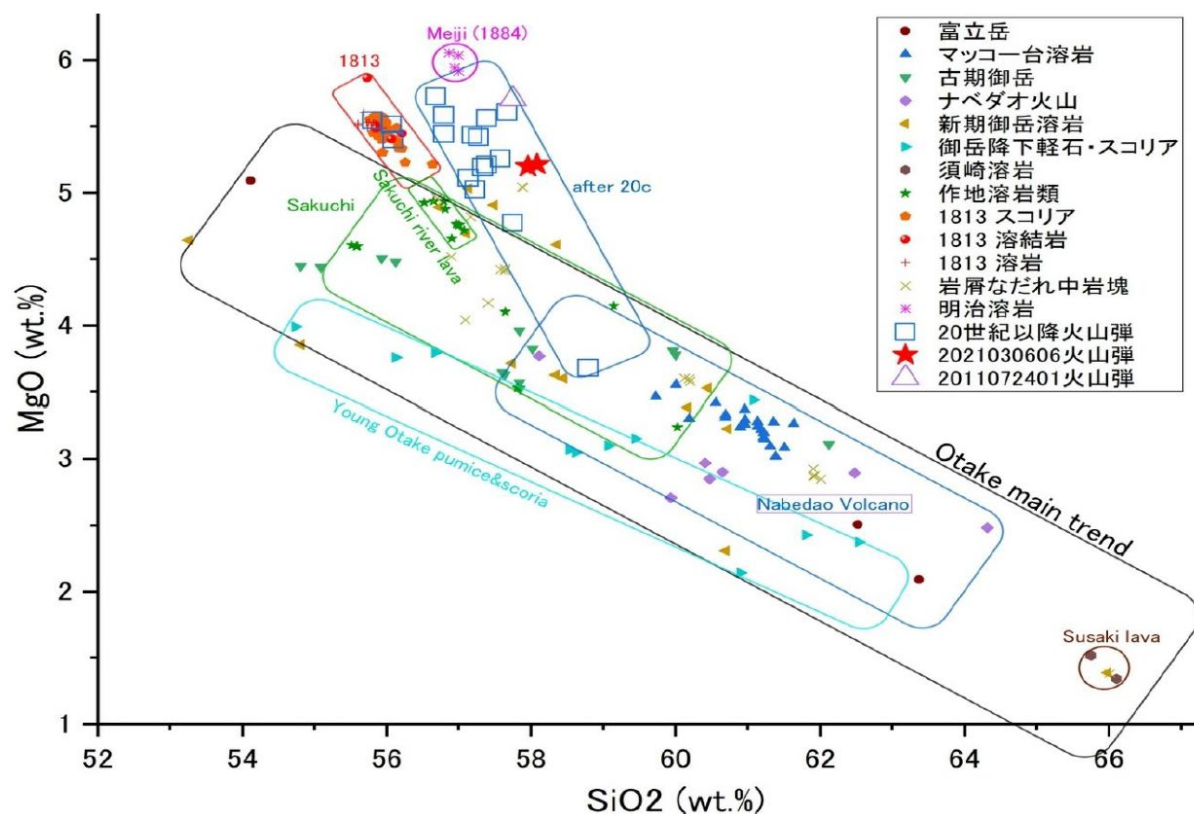


図58 全岩化学組成 (SiO_2 -MgO; ★: 今回)

2021年3月6日に御岳山頂付近で認められた火山弾は、暗褐色～黒色の多面体状の比較的発泡度に乏しい岩塊が主であった。発泡度に富む軽石状の火山弾はほとんど認められな

かったが、優黒色の発泡した岩塊も認められた。いずれも火山灰にほとんど覆われておらず、数日以内に着弾したと思われるものを採取した。全岩化学組成は 20 世紀以降の火山弾と同様の化学組成を示した（図 58、表 12）。

表 12 全岩化学組成分析結果（暫定値）

	2021030606-1/2	2021030606-2/2	2011072401-1/2	2011072401-2/2	950420a	20090723AM
	今回採取	今回採取	2011 年採取	2011 年採取	御岳火口南西 岩塊(火山 弾?)	旧 C 点の 20m 手前井口採取 火山弾
SiO ₂	57.33	57.27	57.01	57.06	57.58	57.27
TiO ₂	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65
Al ₂ O ₃	16.19	16.23	15.90	15.86	16.06	16.39
FeO*	7.88	7.89	8.00	7.93	7.58	8.26
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
MgO	5.15	5.13	5.63	5.68	5.26	4.73
CaO	8.52	8.56	8.73	8.72	8.78	8.45
Na ₂ O	2.80	2.80	2.67	2.70	2.65	2.79
K ₂ O	1.22	1.21	1.15	1.16	1.21	1.23
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10
total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
(wt.%)						
Rb	33.9	33.1	31.1	33.1		
Ba	158.9	156.1	162.8	165.1		
Nb	2.9	3.3	2.9	2.8		
Sr	210.0	209.0	205.4	204.6		
Zr	83.9	82.4	79.1	79.4		
Y	12.6	11.5	10.8	11.2		
Cr	60.3	61.5	81.0	81.6		
Ni	22.8	23.1	30.3	31.3		
V	210.4	206.3	208.2	206.7		
Cu	82.3	82.9	56.3	73.9		
Pb	6.8	7.8	2.9	4.5		
(ppm)						

船舶を用船し、海上においてトラバース法（6 回）によって、二酸化硫黄放出率を 2021 年 3 月 8 日に測定した。トラバースの航路を図 60 に示す。放出量は 1000～1400 トン/日であり（表 11）、最近の諏訪之瀬島における二酸化硫黄放出率とほぼ同じであった。

2021 年 3 月 9 日にマルチガスセンサーによる火山ガス観測を SWA 観測点付近において実施した。測定者は森田雅明氏、篠原宏志氏（産業技術総合研究所）である。火山ガス組成の測定結果は以下の通りである。

SO₂ 濃度最大値：1.7 ppm

SO₂/H₂S：170±100

CO₂/SO₂：1.6±0.4（全体では 3.9、低温噴気?）

H₂/SO₂：0.022±0.008

H₂O/SO₂：n. d.

H₂O は相関が見られなかったが、H₂ は H₂O と逆相関があった。今回の測定値（図 61）は過去の値（2016 年 4 月の観測）と同程度であり、開放型火道の極浅部で脱ガスを反映して、ガスの放出活動は活発なまま維持されていると評価される。



1) 御岳火口縁に落下した噴石（スケールは 20cm、常葉大学嶋野氏撮影）



2) 地震観測点 SWA 付近に落下して飛散した噴石（火口からの距離）。灰色の噴石が最近落下したもの。褐色のものは過去の噴出物。

図 59 諏訪之瀬島爆発による噴石の落下状況

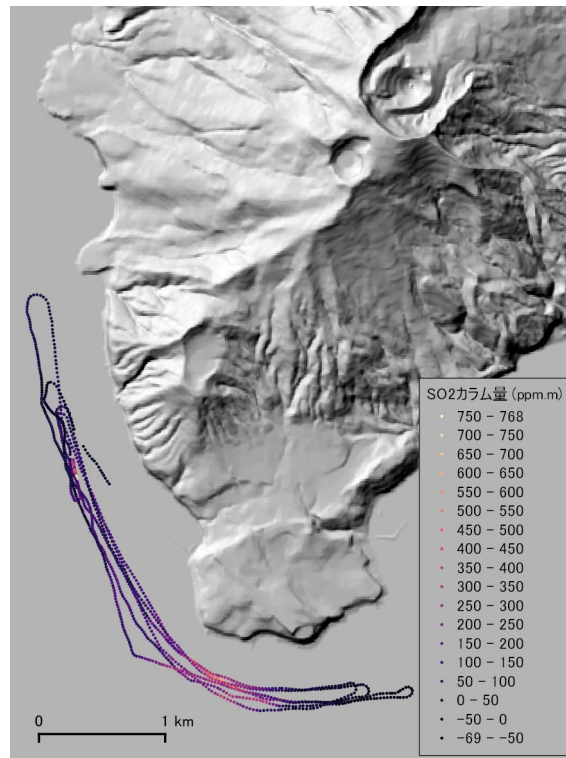


図 60 トラバース法による二酸化硫黄放出率測定のための航路

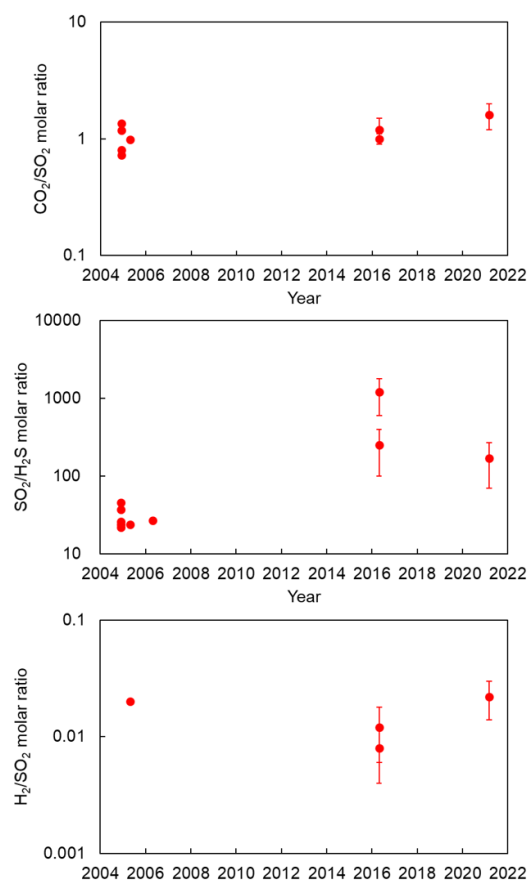


図 61 マルチガスセンサーを用いた火山ガス組成の測定結果。過去の測定と比較して示した。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

本サブテーマでは火山灰拡散予測の高速化技術開発に PUFF モデル (Tanaka et al., 1994)¹¹⁾を用いてきた。PUFF モデルは、火口直上に火山灰粒子を多数配置し、風速場に沿う輸送、拡散、重力落下を考慮して、粒子の移動をラグランジュ的に追跡するものである。火山灰粒子の初期値は、火口周辺に配置された地震計や傾斜計の速報値から経験則に基づいて推定されている (Tanaka and Iguchi, 2019)¹²⁾。地震計等により単位時間あたりの噴出率を推定し、その熱エネルギーから噴煙高度が計算され、火口上の噴煙の最高到達高度に応じて噴煙の形状が推定されている。このように、高速化は進展したが、従来の高速化技術をより強固なものにするための技術開発を行った。

a) 地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーを用いた火山灰放出量推定の高精度化

火山灰放出量は地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーと相関があることが知られており、火山灰放出重量 (W_e) は、2-3Hz の周波数帯のスペクトル (A) と地盤変動を励起する圧力源の体積変化 (ΔV) に対して以下の線形関係がある (Iguchi, 2016)⁴⁾。

$$W_e = \alpha A + \beta \Delta V + \gamma \quad (5-1)$$

2009 年から 2013 年までの昭和火口の噴火活動では、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -1.03 \times 10^5$ と近似されている (Iguchi, 2016)⁴⁾。ここで、 γ は常時微動を考慮した補正項である。昭和火口の噴火活動は 2015 年 6 月までは、頻繁に発生したが、7 月以降は噴火活動が低下し、2016 年 7 月 27 日から 2017 年 3 月 24 日までは噴火が発生していない。2017 年 4 月以降、噴火は頻繁に発生したが、10 月 31 日の噴火からは南岳において噴火が頻発するようになり、この火山活動は現在 (2021 年 3 月) も続いている。2019 年 9 月から Episode5 に入り、活発な噴火活動は 2020 年 6 月まで続いた (図 62)。そこで、噴火活動期の違いにおける火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーの関係を検討した。

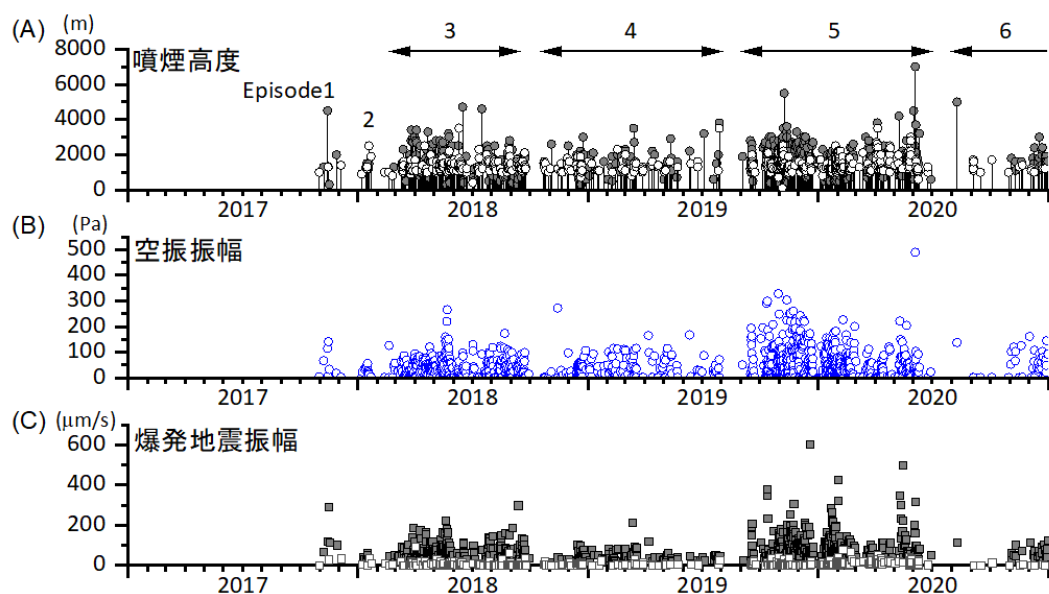


図 62 2017 年 10 月 31 日に南岳の噴火活動に回帰して以降の噴火活動。(a) 火口上噴煙高度 (鹿児島地方気象台)。(b) 空振振幅。(c) 爆発地震の最大振幅。

図 63 に 2009 年 1 月から 2020 年 12 月までの 12 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変

動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係を示す。月ごとの火山灰放出量は、鹿児島県内 62 点における降灰量の実測値から推定されたものである (Iguchi, 2016)⁴⁾。

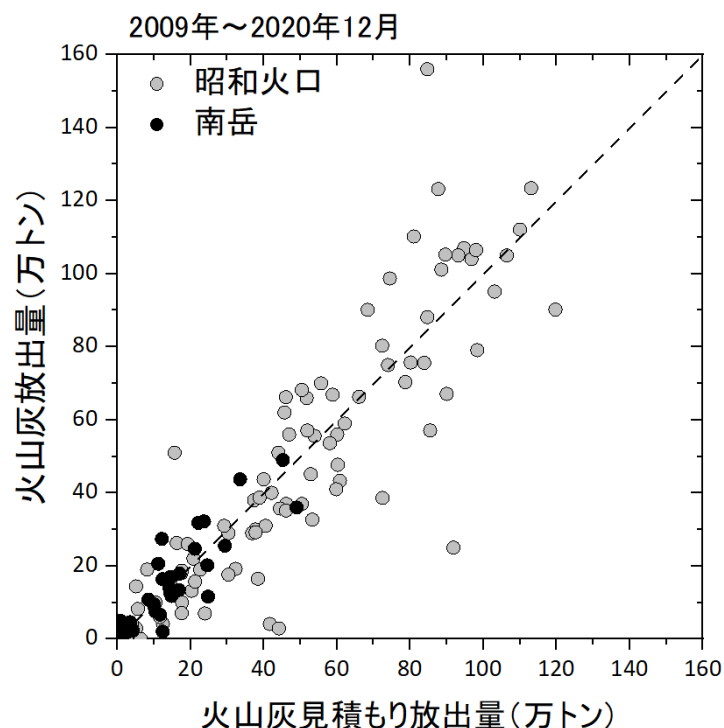


図 63 2009 年 1 月から 2020 年 12 月までの 12 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

係数については、昭和火口噴火活動期については $\alpha=3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta=2.6$ 、 $\gamma=-0.5 \times 10^5$ とした。南岳噴火活動期については、 $\beta=2.2$ とした方が火山灰放出量をうまく説明できる。噴火活動期によって、係数を変える必要が指摘できる。

b) 圧力源の体積変化と噴煙高度との関係の検討

上記の経験式(3-1)は、桜島の個々のブルカノ式噴火にも適用可能である。ブルカノ式噴火だけを考慮する場合、(3-1)式の第 2 項の地盤変動による寄与が大きいのので、火山灰放出重量は、地盤変動を励起する圧力源の体積変化に対して以下のように近似できる。

$$W_e = \beta \Delta V \quad (5-2)$$

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 2 月～2021 年 3 月に発生した噴火について検討した。

2009 年 2 月～2021 年 3 月に発生した噴火の噴煙高度の推移を図 64 に示す。ほとんどの噴煙高度は鹿児島地方気象台の遠望観測に基づくものであるが、雲入りの報告については、再検討したものもある。2012 年 7 月 24 日の爆発については、井口 (2013)³⁾による。また、2020 年 6 月 4 日の爆発は X バンド MP レーダーの画像により決定した (図 5 参照)。このう

ち、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分以上続いた爆発は4763回発生している。圧力源モデルとして微小球状圧力源を仮定して、南岳火口方向とそれに直交する方向のひずみ変化から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平均噴出率とした。噴煙高度と平均噴出率の関係を図65に示す。

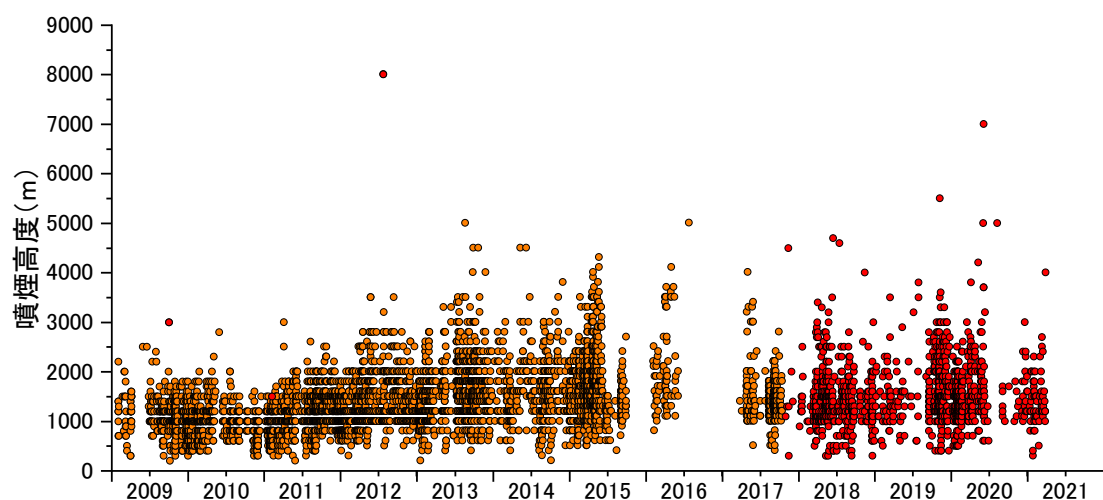


図 64 桜島の爆発に伴う噴煙高度の推移。主に、鹿児島地方気象台の観測によるが、必要に応じて、噴煙高度データを補てんした。赤丸は南岳、橙丸は昭和火口の噴火である。

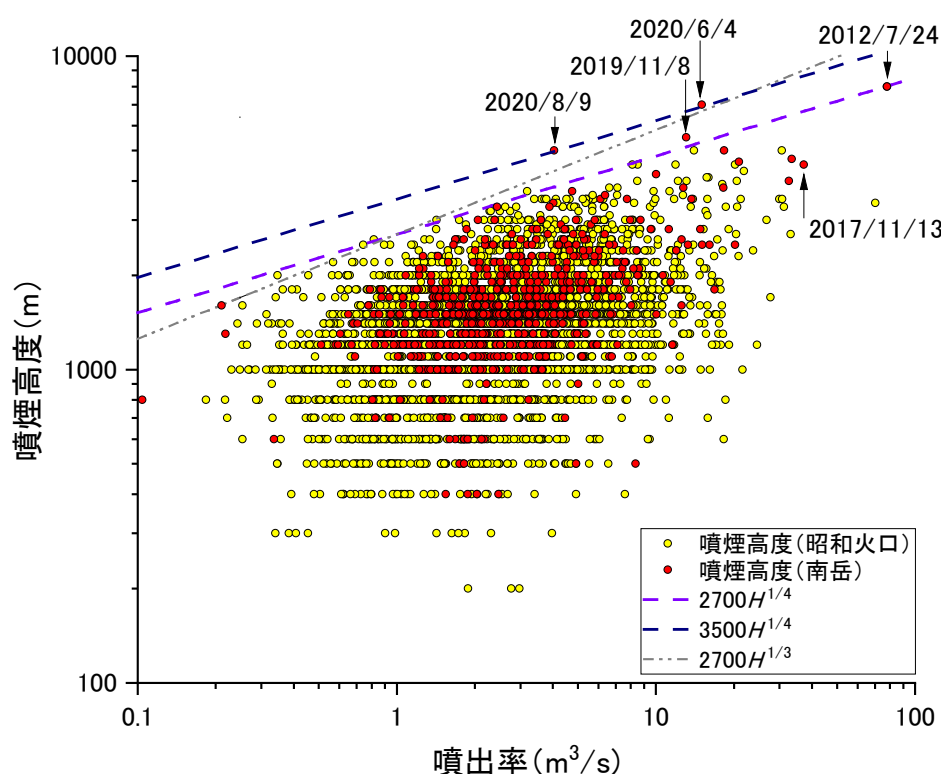


図 65 噴煙高度と噴出率の関係。

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、78m³/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とされている(井口、2013)³⁾。噴煙高

度が 5000m に達した爆発は噴出率が多い。2020 年 6 月 4 日の爆発の噴煙高度は 7000m と推測されるが、噴出率は $15\text{m}^3/\text{s}$ と見積もられる。噴出率は $10\text{m}^3/\text{s}$ 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、平成 31 年度までの報告書では、上限の直線を以下のように決定した。

$$H = 2700\dot{V}^{1/4} \quad (5-3)$$

一方、2020 年 6 月 4 日と 8 月 9 日の爆発の噴煙高度は、式 (5-3) の上限式を超えており、この 2 つの爆発の噴煙高度を上限とすれば、式 (5-3) は以下のように改訂される。

$$H = 3500\dot{V}^{1/4} \quad (5-3)'$$

本プロジェクトにおいて使用する PUFF モデルにおいては、式 (5-4) の経験式を用いて噴出率から噴煙高度 (z_2) を決定し、PUFF モデルにより火山灰の移流・拡散をシミュレーションしている (Tanaka and Iguchi, 2019)¹²⁾。

$$z_2 = z_1 + bW_e^{1/4} \quad (5-4)$$

ここで、 z_1 は火口の標高である。これまで b は経験的に 400 が与えられているが、式 (5-3)' を考慮すると、 b は 519 となる。

c) 地震及び地盤変動観測の改修による噴出率の高精度化

平成 29 年の古里観測井 (南部)、平成 30 年度の黒神観測井 (東部)、令和元年度の新島観測井 (北東部) に引き続き、令和 2 年度は桜島南西部の沖小島 (図 66) において埋設型地震計 (固有周期 1 秒) と傾斜計の改修を行った。沖小島は霧島錦江湾国立公園内にあり、また鳥獣特別保護地区にも指定されている。絶滅危惧種ウチヤマセンニュウの繁殖地となっており、鹿児島県自然保護課から作業が許可されたのは 2020 年 11 月末であった。したがって、12 月以降の改修作業開始となった。沖小島は無人島で港湾施設や資材搬入路がないため、12 月 20 日～27 日にかけて海岸に機材運搬船着岸用の桟、島内の機材搬入路の整地作業などを行った。

改修のための旧機器の引き上げ作業は 2021 年 1 月 26 日から開始し 1 月 30 日に完了した。1 月 31 日～2 月 3 日にかけて孔内の洗浄を行った。2 月 3 日～4 日にダミー通し試験を行い孔底部着底を確認した。2 月 4 日から改修機器の挿入作業を開始し (図 67)、2 月 7 日に深度 348m 付近にて着底したが着底信号が発出されなかった。孔内洗浄後に水中浮遊していたゴミが孔底部キー溝に沈殿した可能性があるため、改修機器を再度引き上げてから孔底部の吸引作業を行うこととした。2 月 21 日～22 日に孔底部の吸引作業を行い、2 月 24 日に孔底部キー溝に改修機器が入り、予定深度 348.7m に設置を確認した。改修機器の設置完了時に地震計・傾斜計機器の性能が正常であることを確認した。

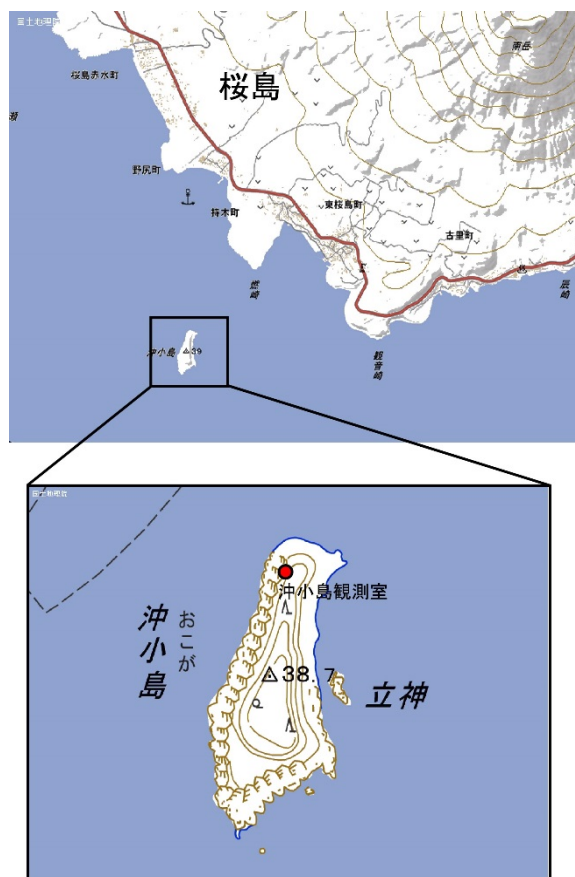


図 66 沖小島観測室の観測井位置図。



図 67 埋設型地震計・傾斜計の設置作業状況。

改修後の埋設型地震計の記録例を示す。図 68 は 2021 年 3 月 12 日に発生した桜島南岳

の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形である。一般的に、爆発地震は低周波成分に富むが、沖小島は始良カルデラ南縁に位置し地震動記録は比較的高周波成分を含む。図 68 に示したいずれの観測井とも南岳山頂火口からは 4km 以上離れており、初動部分の振幅は微弱であるが、初動から数秒後には火道最上部における膨張・収縮過程を反映する主要動が記録されている。

2021年3月12日13:18
桜島 爆発地震

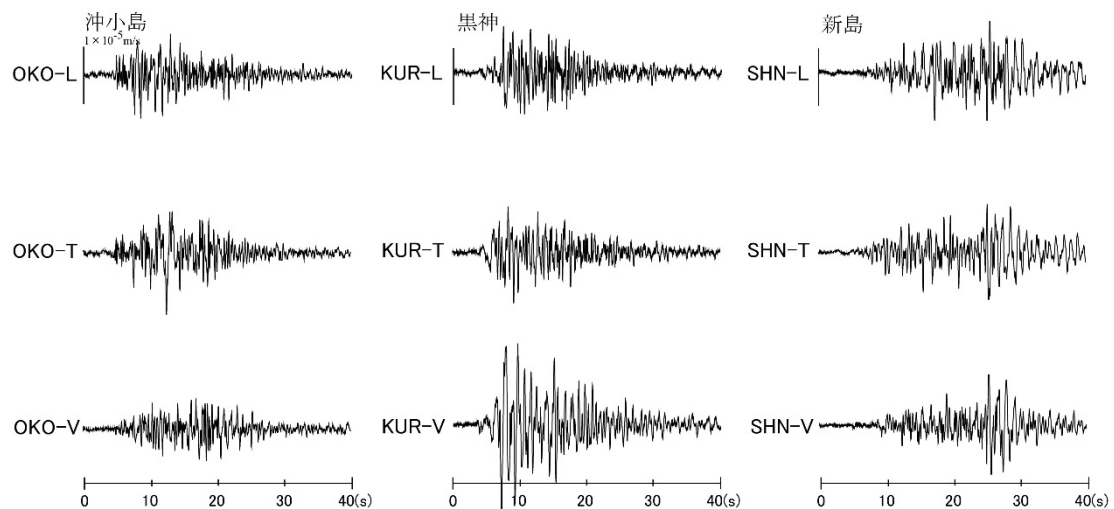


図 68 2021 年 3 月 12 日に発生した桜島南岳の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形。左列が今回設置した沖小島観測井の地震計記録、中列が平成 30 年度に設置した黒神観測井、右列が令和元年度に設置した新島観測井の記録である。上から順に、水平動の火口方向成分、水平動直交成分、上下動成分である。

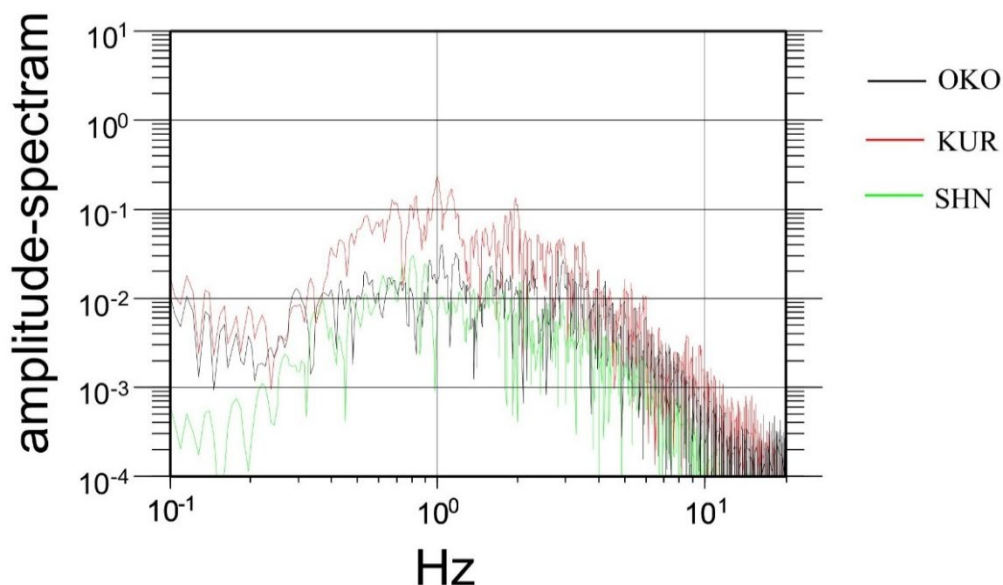


図 69 沖小島 (OKO)、黒神 (KUR)、新島 (SHN) における爆発地震 (図 68) のスペクトル。

沖小島における 3 月 12 日に発生した爆発地震の上下動成分のスペクトルを図 69 に示す。ここでも、先行して改修した黒神および新島観測井の地震記録と比較した。3 観測井ともに爆発地震の特徴である 0.5~2Hz 付近の低周波にピークを持ち、固有周期 1 秒の地

震計が正常に動作していることが分かる。

次に、高周波振動について検討する。図 70 に 2021 年 3 月 12 日に鹿児島湾北部の若尊火山近傍において発生した火山構造性地震の波形記録を示す。この地震のマグニチュードは 3.2 で、鹿児島湾北部沿岸において有感であった。新島観測井や黒神観測井と比べると、沖小島観測井は震央距離が遠く、桜島火山における減衰を受けやすいが、それでも P 波および S 波は明瞭に記録されており、しかも振幅は新島観測井や黒神観測井と比べると小さいものの同じオーダーで記録されているので同等の検知能力があると考えられる。

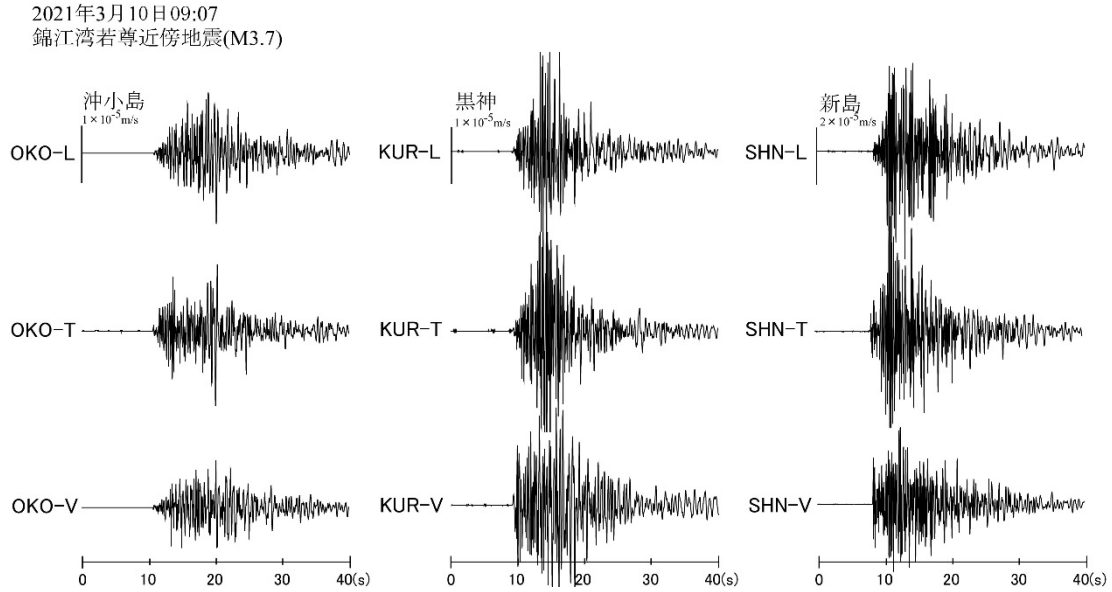


図 70 2021 年 3 月 10 日に錦江湾若尊近傍で発生した火山構造性地震の波形。

このように、爆発地震や火山構造性地震については、震央からの 10km 以内の距離であれば、十分検知できるが、本節で検討する火山灰放出に伴う火山性微動をどの程度の精度で検知できているかは不明である。式 (3-1) のうち、地震動に関する項は有村観測坑道 (ART) の短周期地震計の 2-3Hz の周波数帯域のスペクトルによって決めたが、有村観測坑道 (ART) は南岳火口から 2.4km の距離にあるが、黒神観測井 (KUR) および新島観測井 (SHN) はそれぞれ 4.4km、7.6km の距離あるので、火山性微動の震源から遠いことになる。そこで、遠方の観測点においてもどの程度火山性微動振幅から火山灰放出量を見積もることが可能であるかを評価する。

KUR および SHN における地震記録 (2-3Hz の周波数帯域のスペクトル) を用いると、火山灰放出量は以下のように求められるはずである。

$$W_{KUR} = \alpha_{KUR} \sum_i^N A_{KUR,i} + \gamma_{KUR} + \beta \sum_i^N V_i \quad (5-5)$$

$$W_{SHN} = \alpha_{SHN} \sum_i^N A_{SHN,i} + \gamma_{SHN} + \beta \sum_i^N V_i \quad (5-6)$$

W_{KUR} および W_{SHN} は、KUR および SHN の地震動記録からそれぞれ独立に求められる火山灰放出量であるが、本来、同じものであるので、 α_{KUR} と α_{SHN} 、および γ_{KUR} 、 γ_{SHN} は、 W_{KUR} と W_{SHN} の差が最小となるように決定される。

式 (3-1) のパラメータは ART において観測された振動から決められているので、KUR および SHN の 2-3Hz の周波数帯域の 1 分毎のスペクトルを ART と比較して、図 71 に示した。いずれの場合も相関はよく、KUR と SHN の ART に対する振幅比は、それぞれ 0.17 および 1.19 と求められる。これらの値は、2~3Hz の周波数帯域における ART に相対的な Site effect に位置づけられる。この相対的な Site effect を考慮して、火山灰放出量を評価してみる。2020 年 5 月 25 日の場合、式 (3-1) から ART の地震動データを用いた火山灰放出量は 6,228 トンとなるので、KUR を用いた場合、7,281 トン、SHN を用いた場合は 15,547 トンと見積もられる。KUR を用いた場合、ほぼ同等であるので、火口からの距離 5km 程度までは、式 (3-1) による火山灰放出量評価手法が十分実用になるといえる。一方、SHN の場合は、2 倍以上過大である。

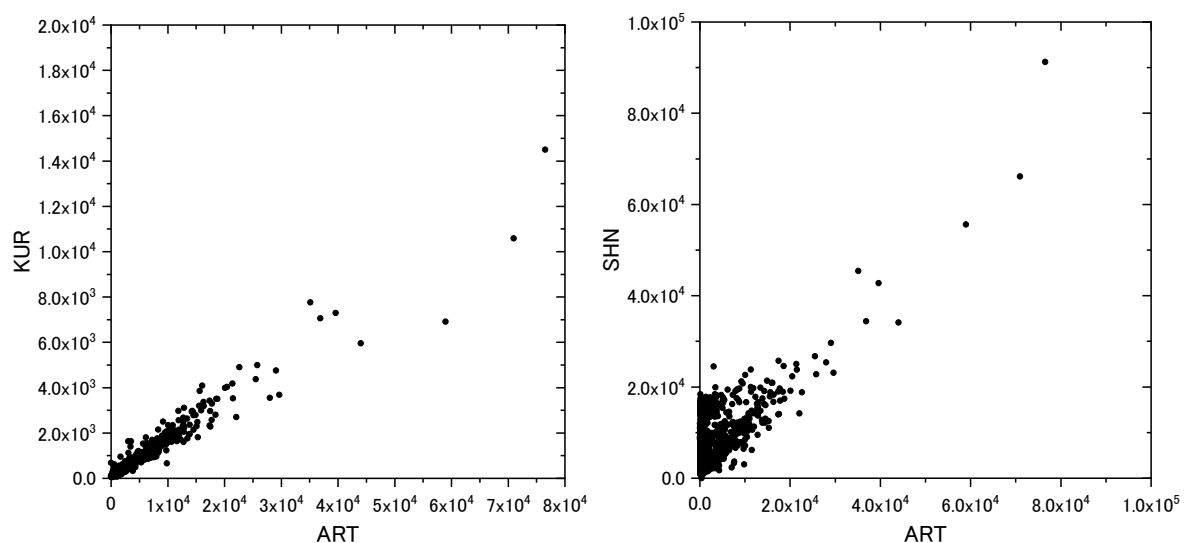


図 71 2-3Hz の周波数帯域の 1 分毎のスペクトルの相関。左：KUR と ART の関係。右：SHN と ART の関係。2020 年 5 月 27 日の例。

この理由について考察を行う。KUR と ART の相関では、すべてのプロットが直線状に並ぶが、SHN と ART の相関図では、ART の振幅が小さいときに、SHN の振幅が $0 \sim 2 \times 10^4$ の範囲でばらつくものが大半を占める。これを時系列において示したのが、図 72 である。振幅の大きいパルスは、噴火イベントに対応するか、いわゆる B 型地震に対応するものであり、図 71 に示すように、ART、KUR、SHN の間で相関が良い。一方、これらのパルスが見られない 2 時から 7 時の時間帯では、SHN の振幅だけが増大している。8 時から 15 時までは、パルス状のイベントを除いて低下するが、15 時頃から再び増大した。この変化は、バックグラウンドノイズが時間変化していることを示す。地震記録は、脈動などのバックグラウンドのノイズを含むので、式 (3-1) では定数パラメータ γ によってノイズの効果を経験的に除去している。図 72 に示すように ART と KUR については、信号パルスに比べてバックグラウンドノイズが無視しうるほど小さいので、パラメータ γ を定数と扱っても差し支えないが、SHN の場合は、バックグラウンドノイズが大きいだけでなく、その時間変化も大きい。このことは、パラメータ γ を時間変化する量として扱う必要があることを意味する。

桜島のように低ノイズレベル観測点が多数ある火山ではノイズが大きい観測点を除去

すればよいが、バックグラウンドノイズの時間変化を考慮せざるを得ない火山も多い。したがって、今後は、パラメータ γ をリアルタイムで評価する手法を検討する必要がある。

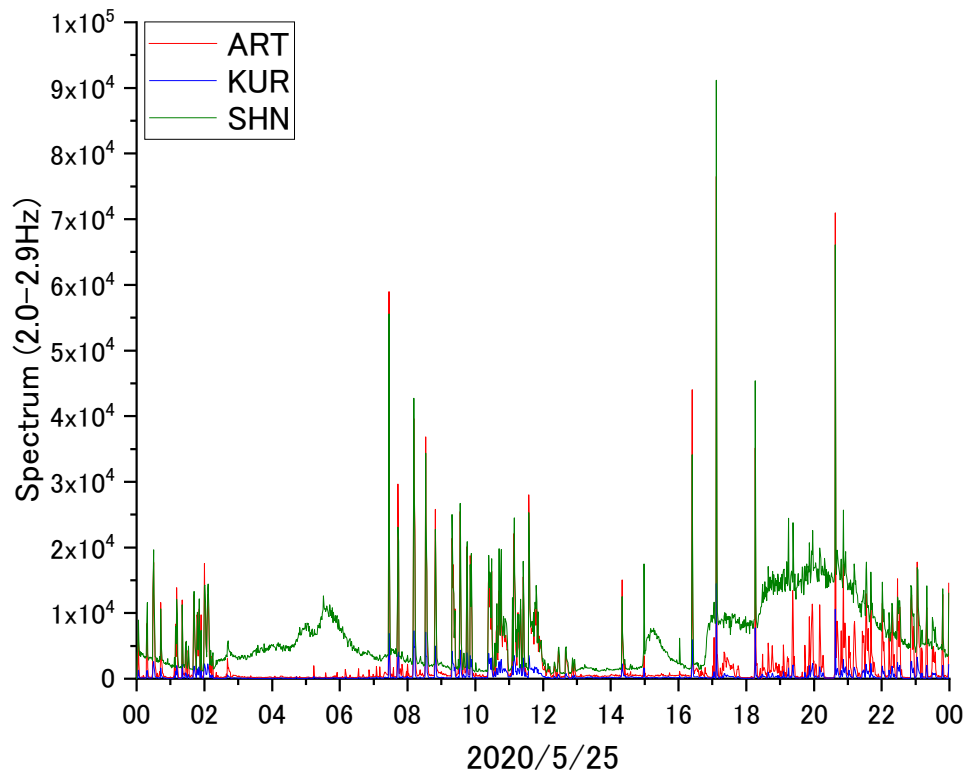


図 72 ART、KUR、SHN における 2～3Hz の周波数帯域の振幅の時間変化。1 分毎にプロットした。

d) 噴煙シミュレーションによる噴煙高度の検討

噴煙ダイナミクスが火山灰拡散に与える影響を調べるため、課題C3と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行した。火山灰拡散予測には、噴煙高度に加え噴煙内外における火山灰粒子の分布を知る必要がある。そのため、流体としての噴煙と粒子計算の同時シミュレーションを行った。サブプリニー式噴火に相当する噴出率を火口に与え境界条件とした。シミュレーションの結果、噴煙挙動と大気中の火山灰分布・地表への降灰分布を得た（図 73）。また、火山灰の粒径毎に噴煙内外の分布が異なる様子を捉えた（図 74）。これらのシミュレーションの設定は、これまで蓄積した噴煙形成と降灰データベースに比べて噴出率が大きい場合に相当し、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースに、高噴出率のケース・スタディ結果が追加されたことになる。

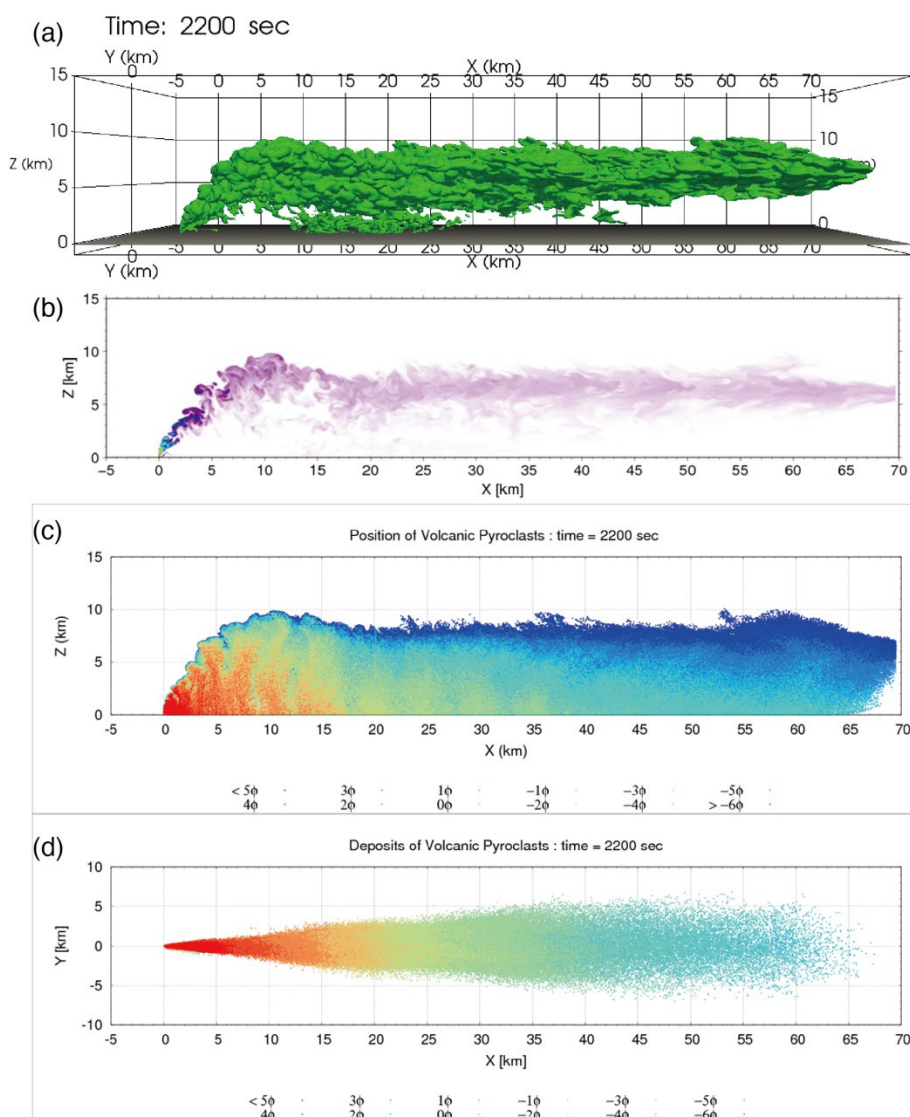


図 73 サブプリニー式火山噴煙の 3 次元数値シミュレーション結果。(a)噴出物濃度 0.2wt%等値面の鳥瞰図。(b)噴煙断面における噴出物濃度分布。(c)大気中の火山灰粒子分布。(d)地表への火山灰降灰分布。(c)と(d)における色は火山灰の粒径を示す。

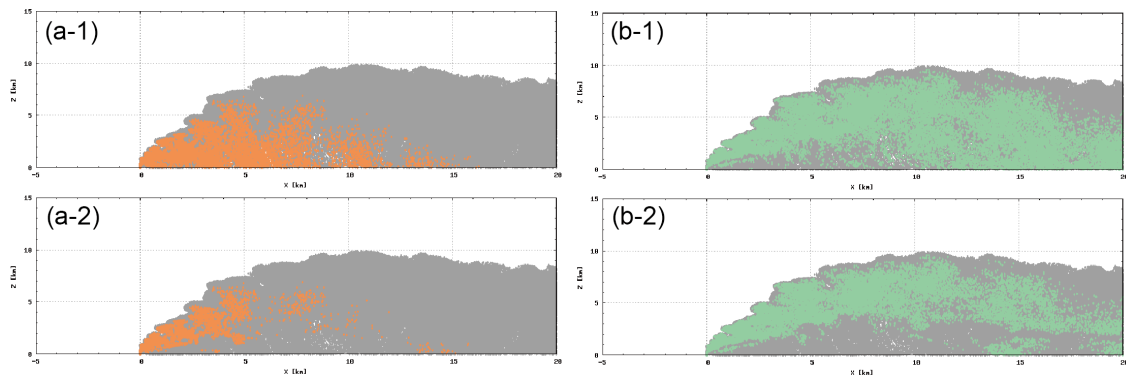


図 74 サブプリニー式噴火における火山灰粒子シミュレーション。粒径が 8～16 mm の火山灰の (a-1) 全粒子分布と (a-2) 噴煙内分布。粒径が 1～2 mm の火山灰の (b-1) 全粒子分布と (b-2) 噴煙内分布。

e) PUFF モデルによる火山灰の輸送拡散予測と MP レーダーの実測の同化実験

火山灰粒子の初期値から火山灰輸送拡散モデルで噴煙粒子の将来予測を行う場合、初期値の推定誤差が大きな問題となっている。そこで、モデルによる予測値に、X バンド MP レーダーにより観測される反射強度から得られた実測値をリアルタイムで取り込むことができれば、より信頼性の高い輸送拡散モデルに改良することが可能となる。これはモデル予測に観測値を取り込む 4 次元同化技術そのものであり、気象学の分野ではその開発に長い歴史がある。開発初期の最適内挿法を変分法で改良した 3 次元変分法や、時間軸にも変分法を拡張した 4 次元変分法、カルマンゲインにより同化の最適値を時々刻々変化させるカルマンフィルター、それをアンサンブル予報と組み合わせて逆行列計算を簡略化したアンサンブルカルマンフィルターなどが開発されている。将来的には粒子の位置の尤度を計算し、観測からかけ離れた粒子を削除する代わりに、観測に近い領域に新たに粒子を置く粒子フィルターなどの技術開発が期待されている。

Tanaka et al. (2020)¹³⁾では、MP レーダーの観測データを PUFF モデルに同化する最初の試みとして、PUFF モデルによる噴煙の輸送拡散の予測値に、1 スナップショットの MP レーダーデータを同化し、予測値を観測値で修正するアルゴリズムの開発が行われた。対象とした事例は 2019 年 11 月 8 日 17:24JST の桜島噴火であり、20dBz 以上の MP レーダーデータが用いられた。モデルは噴火前の 17:00 に計算を開始し、1 分間隔の噴出率と噴煙高度のデータを 5 分間隔に編集してモデルに取り込むことで噴火事例が再現されている。図 75(左)は、地震計等から得られた噴出率を用いて作成した 17:30 の火山灰の東西鉛直断面と南北鉛直断面の図であり、火口上空 4000 m にコラム状の噴煙が推定され、西風に流されて火口の東側に輸送された火山灰の分布が予測されている。ここに、同時刻に MP レーダーで観測された噴煙粒子を足し合わせたものが図 75(右)の分布である。MP レーダーの観測値については、昨年度と同報告書に図が掲載されている。この図を見ると、噴煙は火口を中心に東西に広がり、左図のコラム形状が右図ではドーム形状に修正されている。モデル予測にはなかった火口西側への輸送拡散が取り込まれていることが分かる。また、MP レーダーにはない大気下層の重力落下成分が分布していることから、この図が予測値に観測値を同化した信頼性の高い噴煙分布となっていることが分かる。

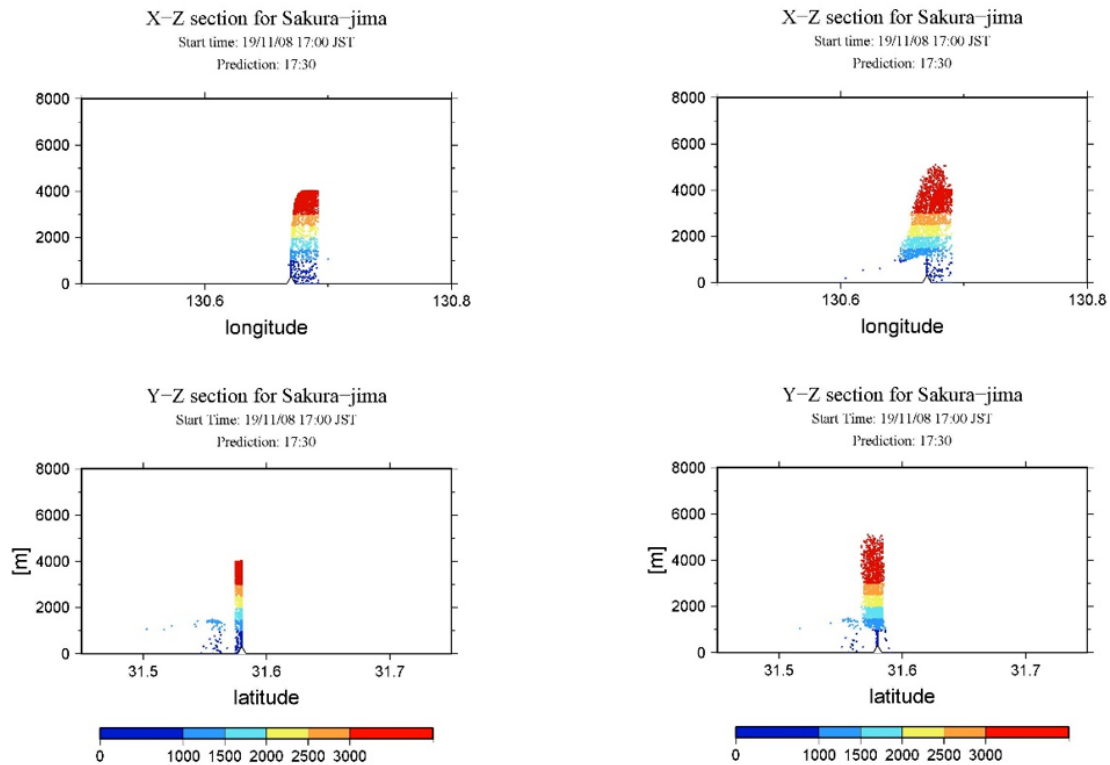


図 75 (左) PUFF モデルにより予測された噴煙の東西鉛直断面 (上) と南北鉛直断面 (下) の分布図。(右) MP レーダーの観測値を同化して修正された噴煙の同鉛直断面図。

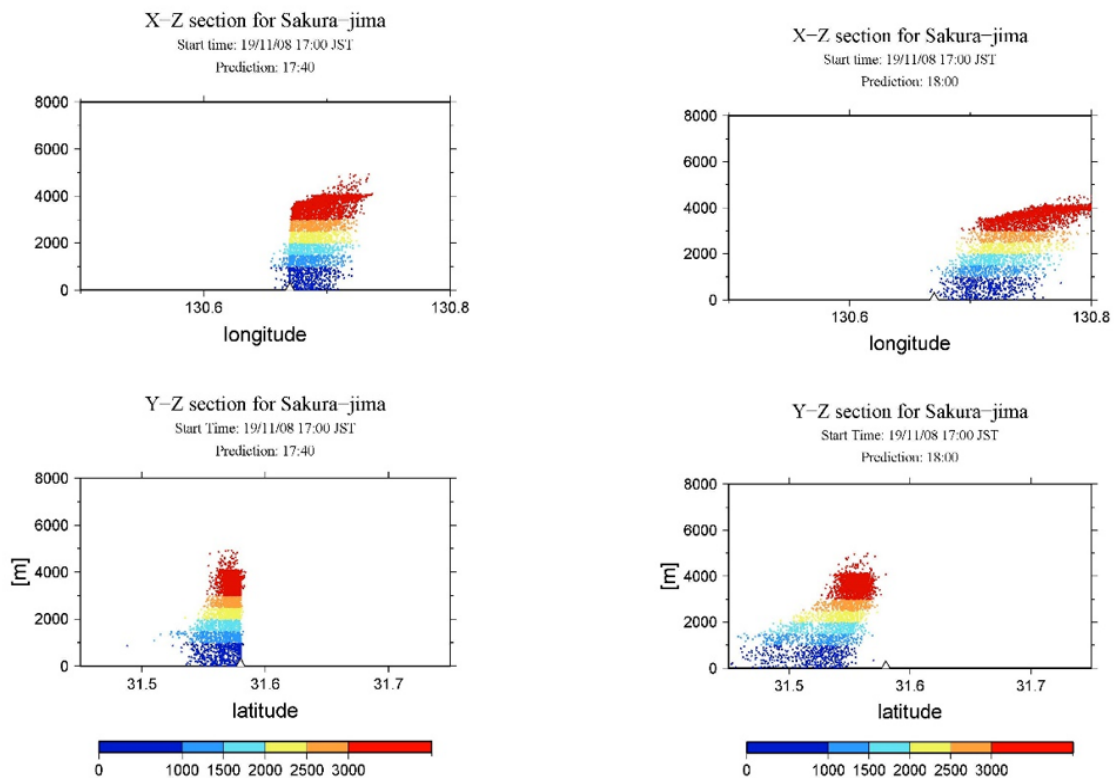


図 76 PUFF モデルに MP レーダーの観測値を同化して修正された噴煙の予測。(左) 噴火 16 分後の 17:40 JST. (右) 噴火 36 分後の 18:00 JST.

図 76 は、MP レーダーの観測を同化した PUFF モデルによる火山灰の 17:40 (左) と 18:00

(右) の鉛直断面図である。初期の火山灰分布の実測値がモデルに取り込まれていることから、予測値の信頼性が十分に高まっていると考えられる。噴煙高度は 5000 m の実測値となっており、上層の西風によりくさび形に変形しながら東に輸送されている。一方、大気下層には北風成分があり、下層の火山灰は南に向かって輸送されている。

図 77(左)は、PUFF モデルによる降灰粒子の分布図である。桜島の火口から垂水方面に降灰分布が伸びていることがわかる。地震計等のデータから噴出率が推定されているので、火山灰粒子に質量を割りあてて、右図のように降灰量 (g/m^2) の分布に変換することができる。等値線は常用対数の値を表し、図中の 1 は $10 (\text{g}/\text{m}^2)$ の等値線、2 は $100 (\text{g}/\text{m}^2)$ の等値線を示す。火口から南東に向かって $100 (\text{g}/\text{m}^2)$ の降灰があり、 $10 (\text{g}/\text{m}^2)$ の降灰が図の右隅に達していることが分かる。本研究の成果により、MP レーダーの実測値を用いて火山灰の初期分布が修正されていることから、より信頼性の高い輸送拡散モデルに改変されていると考えられる。

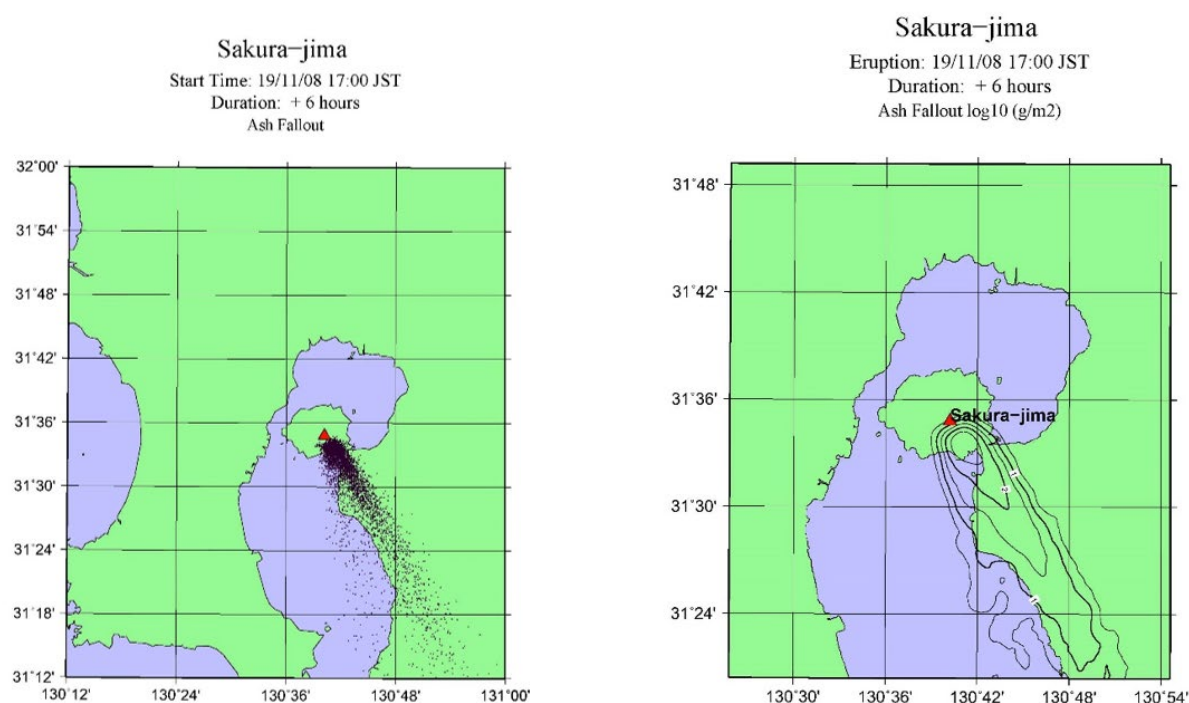


図 77 PUFF モデルに MP レーダーの観測値を同化して修正された噴煙の予測から得られた降灰分布。(左) 噴火から 6 時間後までの降灰粒子の分布。(右) 噴火から 6 時間後までの降灰量 (g/m^2) の分布で、等値線は常用対数の値を表し、1.0 は $10 (\text{g}/\text{m}^2)$ の等値線を示す。

今後の課題としては、本研究により 1 スナップショットに対して試験的に実施されたデータ同化を、多数の MP レーダーの実測を時々刻々と同化することで、より信頼性の高い火山灰輸送拡散モデルへと改良することである。そのために、最先端技術として注目されている粒子フィルターの同化技術を火山灰粒子に応用することを検討中である。また、MP レーダーデータから粒子質量の推定値が得られるので、これを地震計等から推定された粒子質量と比較し、降灰分布の定量的な推定に応用することを検討する。

f) ディスドロメータにより計測された落下速度を直接反映できるようなシミュレーショ

ン手法の改良

従来の降灰シミュレーションは、観測手法の制約から、粒径が同じ粒子は落下速度が同じだと仮定して火山灰の分散を計算し降灰量を求め、観測値に基づいた事例研究を行ってきた。しかし、同じ粒径の粒子群においても、形状や凝集の程度の違いにより落下速度の違いが生じるため運動の違いが生じ、現実との齟齬が生じる。ディストロメータでは粒径、落下速度ごとの粒子数を計測することができるため、シミュレーションの結果を落下速度ごとに検証することができる。こうした観測手法に合わせて、粒子群追跡型の移流拡散モデル Tephra2 を改良し、粒子の分散過程を落下速度で離散化できるモデル Tephra4D を開発した (Takishita et al., 2021)¹⁰⁾。本節では落下速度分布の適用可能性について、Tephra4D の Tephra2 からの改良点を述べる。

Tephra2 では噴煙から分離する火山灰粒子を、分離する高度と粒径によって離散化する。個々の粒子群が噴煙から分離して大気中を落下するときの重心の移動経路(以下、「流跡線」と呼ぶ)を計算し、拡散の効果を考慮して地表における降灰量を計算する。流跡線の計算にあたっては、粒径 d の仮想粒子が、水平方向には、水平方向に一樣で鉛直成分を持たない風による移流により、鉛直方向には、重力と粒子の落下時の空気抵抗力の釣り合いによって決まる終端速度による降下により移動するものとする。全体の粒子重量分布は粒径ごとに与えられる。Tephra4D では、粒子密度 2640 kg/m^3 の代表的な粒子を設定して、流跡線の計算をする。以下の式から、海拔 0 m において終端速度 v_t を取る代表的な粒子の粒径 d を求め、落下時の周辺大気の密度変化を反映して計算を行う。全体の粒子重量分布はディストロメータの分類に準じる落下速度ごとに与えられ、シミュレーションの初期パラメータとして観測された累計の重量分布を代入することもできる。粒子が回転楕円体粒子だと仮定すると、Suzuki (1983)⁹⁾から v_t と d の間には以下の式が成り立つ：

$$v_t = \frac{\rho_p g d^2}{9\eta_a F^{-0.32} + \sqrt{81\eta_a^2 F^{-0.64} + \frac{3}{2}\rho_a \rho_p g d^3 \sqrt{1.07 - F}}} \quad (5-7)$$

ただし、 g は重力加速度、 d は粒径、 η_a, ρ_a は周辺媒質(大気)の粘性率と密度、 F は粒子の長短比である。 $g=9.81 \text{ m/s}^2$, $\rho_p=2640 \text{ kg/m}^3$, $\eta_a=1.8 \times 10^{-5}$, $\rho_a=1.205$, $F = 0.81 + 0.03 \log_2(d/1000)$ (Freret-Lorgeril et al. (2019)²⁾が計測したストロンボリ火山の火山灰粒子の粒径と長短比の相関図に基づく)として、ディストロメータの落下速度区分ごとに数値的に解いた d を表13に示す。

Tephra4D は依然改良の余地を残す。d) ディストロメータによる地上観測、ii) ディストロメータによる降灰量の見積もりにおいて、ディストロメータは凝集粒子や高濃度な細粒粒子群を、同じ粒径の 0.25mm より大きな粒子に比べて小さい落下速度で検知する、すなわち、落下速度が同じ粗粒粒子と比べてより大きな粒子として検知することが示された。地表で同じ落下速度を取る粒子群でも、高濃度な細粒粒子群と単体で降下する細粒粒子群では、形状や実効密度の違いに起因して上空での落下速度変化が異なる。こうした粒子群の形状や凝集の有無を反映するためには、ディストロメータで区分されている最大で 30×32 の粒径—落下速度の組み合わせそれぞれについて、代表的な粒子を仮想し流跡線を描くよう改良するのがよい。噴煙全体の重量分布を粒径—落下速度の組み合わせごとに、地表で観測した重量分布や粒子数分布を元に落下速度ごとにバイモーダルな分布で与えれば、より現実に近い初期パラメータを用いたシミュレーションが行える。

表 13 ディスドロメータの各落下速度クラスに対応する代表的な粒径

vt (m/s)	d (mm)	vt (m/s)	d (mm)	vt (m/s)	d (mm)	vt (m/s)	d (mm)
0.05	0.025	0.85	0.106	2.6	0.325	7.6	0.931
0.15	0.0433	0.95	0.119	3.0	0.375	8.8	1.25
0.25	0.0559	1.1	0.137	3.4	0.425	10.4	1.74
0.35	0.0662	1.3	0.162	3.8	0.475	12.0	2.32
0.45	0.0751	1.5	0.187	4.4	0.55	13.6	2.98
0.55	0.083	1.7	0.212	5.2	0.65	15.2	3.72
0.65	0.0902	1.9	0.237	6.0	0.75	17.6	4.99
0.75	0.0969	2.2	0.275	6.8	0.85	20.8	6.97

4) 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

i) 調査概要

桜島を対象にドローンによる上空の風速ベクトルおよび火山灰・火山ガス調査を実施した。調査は桜島島内のハルタ山 (Site A) および黒神獄河原 (Site B) で実施した (図 78)。今年度は、主にドローンによる上空の乱流計測の可能性調査および、桜島上空の火山灰・火山ガス濃度分布の実測データの蓄積に取り組んだ。年間 2 回の観測キャンペーンを設定し、それぞれの調査期間は以下の通りである。各調査期間におけるフライト概要は表 14 に示す。



図 78 調査地点 (Site A; ハルタ山、Site B; 黒神地獄河原)

表 14 ドローンフライト概要

Run	観測日	調査地点	離陸時刻	着陸時刻	フライト内容
①-1	2020/8/4	Site A	10:38:26	10:56:40	500m-700m 1m/s で往復
①-2	2020/8/4	Site A	11:09:15	11:27:15	500m-700m 1m/s で往復
①-3	2020/8/4	Site A	11:33:45	11:48:26	500m-700m 1m/s で往復
①-4	2020/8/4	Site A	13:27:45	13:45:50	500m-700m 1-2m/s で往復
①-5	2020/8/4	Site A	13:50:51	14:09:12	500m-700m 1-2m/s で往復
①-6	2020/8/4	Site A	14:36:03	14:53:16	2m/s で 1000m まで往復
①-7	2020/8/4	Site A	14:58:22	15:16:12	2m/s で 1000m まで往復
①-8	2020/8/4	Site A	15:24:36	15:43:06	5 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
①-9	2020/8/4	Site A	15:46:30	15:58:27	100-300m 往復
①-10	2020/8/5	Site A	10:00:00	10:17:18	2m/s で 1000m まで往復
①-11	2020/8/5	Site A	10:30:02	10:52:33	1m/s で 500-1000m まで往復
①-12	2020/8/5	Site A	11:00:03	11:19:19	4 分間ホバリング (700m, 600m, 500m)
①-13	2020/8/5	Site A	11:30:03	11:48:14	4 分間ホバリング (600m, 400m, 200m)
①-14	2020/8/5	Site A	11:55:03	12:11:21	2m/s で 1000m まで往復
①-15	2020/8/5	Site A	13:30:39	13:50:44	4 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
①-16	2020/8/5	Site A	14:00:03	14:12:27	100m-300m 1-2m/s で往復
①-17	2020/8/5	Site A	14:20:04	14:41:16	1m/s で 500-1000m まで往復
①-18	2020/8/5	Site A	14:51:02	15:08:54	1m/s で 0-500m まで往復
①-19	2020/8/5	Site A	15:15:04	15:33:08	2m/s で 1000m まで往復
②-1	2020/9/15	Site A	10:43:14	11:01:30	0m-500m 1m/s で往復
②-2	2020/9/15	Site A	11:09:15	11:31:55	500m-1000m 1m/s で往復
②-3	2020/9/15	Site A	11:37:38	11:50:50	4 分間ホバリング (500m, 300m)
②-4	2020/9/15	Site A	11:56:21	12:13:41	4 分間ホバリング (900m, 700m)
②-5	2020/9/15	Site A	12:18:22	12:36:37	4 分間ホバリング (1000m, 100m)
②-6	2020/9/15	Site A	13:40:08	13:55:26	3 分間ホバリング (600m, 500m, 400m)
②-7	2020/9/15	Site A	14:00:18	14:12:42	3 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
②-8	2020/9/15	Site A	14:27:59	14:44:09	3 分間ホバリング (600m, 500m, 400m)
②-9	2020/9/15	Site A	15:26:53	15:43:25	4 分間ホバリング (800m, 600m)
②-10	2020/9/16	Site B	10:31:26	10:48:22	500m-1000m 1m/s で往復
②-11	2020/9/16	Site B	11:30:44	11:48:04	0m-500m 1m/s で往復
②-12	2020/9/16	Site B	11:50:46	12:13:55	500m-1000m 1m/s で往復
②-13	2020/9/16	Site B	13:18:00	13:35:45	4 分間ホバリング (500m, 300m, 100m)
②-14	2020/9/16	Site B	13:38:46	14:00:15	4 分間ホバリング (900m, 700m, 500m)

① 2020 年 8 月 4 日～5 日

② 2020 年 9 月 15 日～16 日

ii) 調査方法

ドローンは、6ローターのマルチコプター（SPIDER-CS6；ルーチェサーチ株式会社）を使用した。ドローンによる上空の風ベクトルおよび乱流計測においては機体中心に40 cmのポールを立て、先端に2次元超音波風向風速計を取り付けた。今年度は乱流計測のため、高時間分解能で計測が可能なタイプの風速計（FT205；FT-Technologies）を搭載した。風向風速データは10 Hzでデータロガーに収録し、フライト終了後にデータを回収した。また、桜島上空での火山灰および火山ガス濃度の分布計測では、PMセンサ（PM2.5モニター；ヤグチ電子工業株式会社）および火山ガスセンサ（QRAE3；RAE Systems）を搭載した（図79）。



図 79 調査で使⽤したドローン外観

iii) 調査結果

ドローンによる上空の風向ベクトルおよび乱流計測

図 80 にドローンを鉛直方向に移動させながら計測した風速データから算出した 100m ごとの平均風速および乱流強度を示す。風速については高度を 100m ごとに区切り、各層をドローンが通過中に測定した瞬時値を平均した(高度 200m の風速は高度 150m~250m を通過中に計測された風速データの平均値とした)。乱流強度は同様に各層を通過中に計測された風速データから、標準偏差(SD)および平均風速(AVE)を算出し、標準偏差(SD)/平均風速(AVE)で定義した。図 80 では移動速度を 1m/s および 2m/s の 2 パターンで、上昇時・下降時に分けてデータを整理した。それぞれの鉛直プロファイルは同時刻のものではないが、およそ 1 時間以内で取得したデータに基づいており(表 14 の Run ①-17 ~ Run ①-19 に該当)、気象場としては Run ごとに大きな差異はないと考えられる。

図 80 より、平均風速は地上から上空 1000m まで 7m/s 前後で推移しており、大きな変化は見られない。これは、上昇時・下降時および移動速度(1m/s, 2m/s)に関わらず共通していた。一方、乱流強度に着目すると、地上付近の乱流強度が最も大きく、上空に行くにしたがって、小さくなる傾向がみられた。上昇時と下降時で比較すると下降時に地上付近の乱流強度が大きくなる傾向がより顕著にみられ、これは移動速度に関わらず共通していた。

図 81 に、指定高度で 4 分間ずつホバリングして得られた風速値(Run ②-13 および Run ②-14)から FFT によりスペクトル解析を行った事例を示す。図 81 では比較のため Kolmogorov の $-5/3$ 乗則の傾きも示している。図 81(a)より、500m と比較すると 600m および 700m では 0.2Hz より高周波側で減衰がほとんど見られなかった。図 81(b)では、200m, 400m の高度ではスペクトルの減衰は概ね $-5/3$ 乗則に従っているが高度 600m では 1Hz 以上の高周波成分の減衰が小さかった。600m 以上の高度において高周波側のスペクトルの減衰が小さい一因として、計測に使用した超音波風速計の測定分解能 (0.1 m/s)が不十分である可能性が考えられる。

今回ドローンで計測された乱流強度の鉛直プロファイルは、平均風速がほぼ一様であっても、上空に行くにしたがって乱れが小さくなるという特徴が捉えられており、定性的には妥当なものと判断される。一方で、乱流強度の定量的評価やドローン下降時に計測された地上付近の乱流強度の増大の原因を調査するためにも、今後はドップラーライダー等との比較観測が必要であると考えられる。

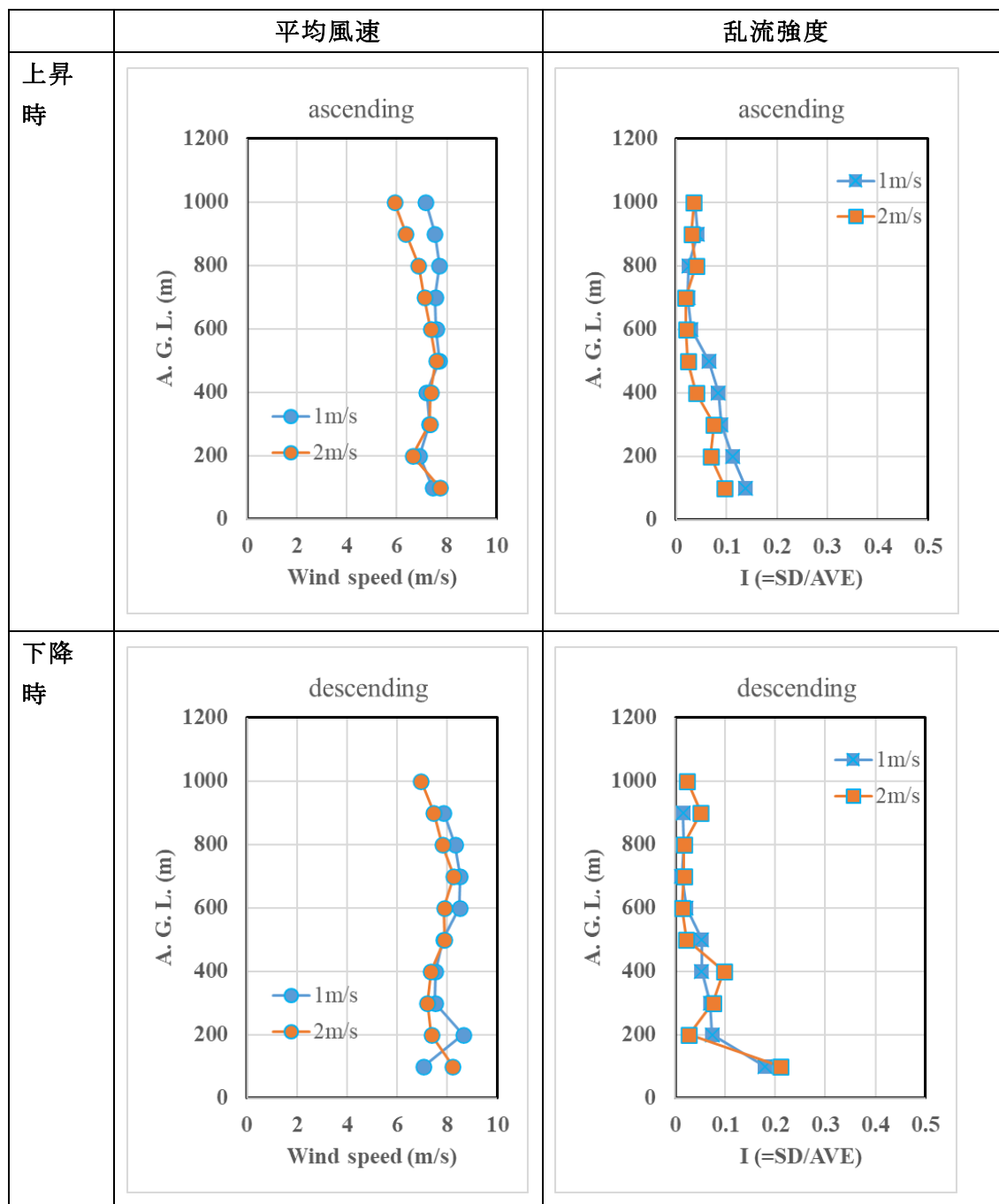


図 80 ドローンによる風速・乱流観測結果（移動観測）

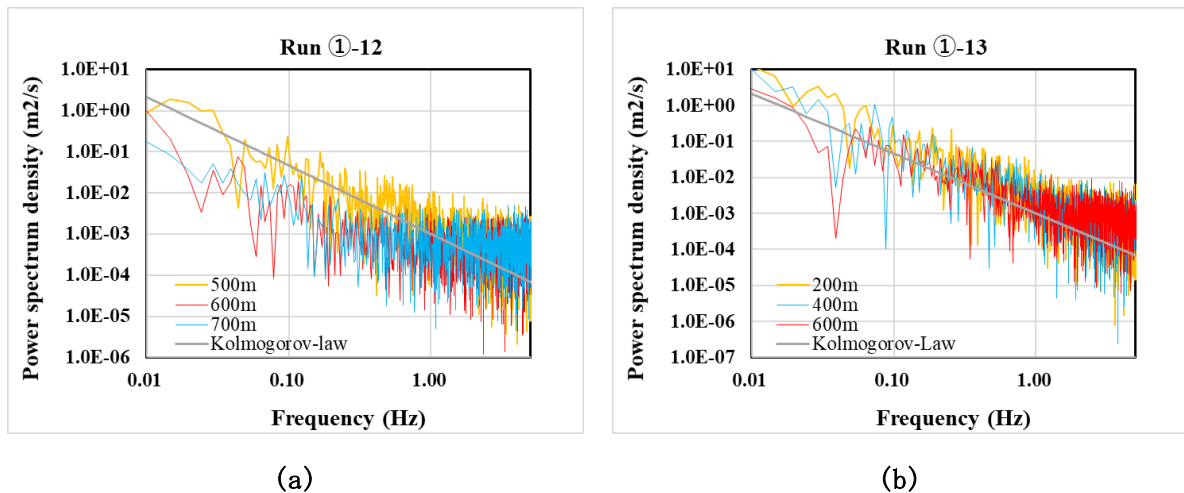


図 81 ドローンにより計測した高度別乱流エネルギースペクトルの解析例

ドローンによる上空の火山灰・火山ガスの分布測定

図 82 に 2020 年 9 月 15 日にハルタ山 (Site A) で実施した、ドローンによる火山灰・火山ガスの観測結果の一部を示す。当日の桜島火口付近は雲に覆われており、目視で噴煙の有無を確認できる状況ではなかった。図 81 に示す、一連の観測結果をみると Run ②-1 に対して Run ②-2 で PM 濃度が大きく上昇しており、特に粗大粒子 (PM₁₀) の濃度上昇が顕著であることから、この間に噴火が発生したことが示唆される。その後、高濃度の PM が Run ②-5 まで継続して観測され、Run ②-6 では Run ②-1 と同レベルまで低下した。これら一連のフライトでドローンにより観測された風向は、北東～東で大きな変化はなかったことから Run ②-5 と Run ②-6 の間で噴火が止まったものと推測される。これらの結果から、ドローンによる風ベクトルおよび PM の観測結果だけからも噴火の時間帯が推定できることが示された。

また、火山ガスのうち、H₂S についてはすべての Run で検出下限値以下 (<0.1ppm) であった。SO₂ については、Run ②-2 のみ検出され、最大濃度は 0.2ppm であった。PM の高濃度の時間帯・高度で SO₂ が必ずしも高濃度にはなっておらず、火山灰と火山ガスの同期は見られなかった。

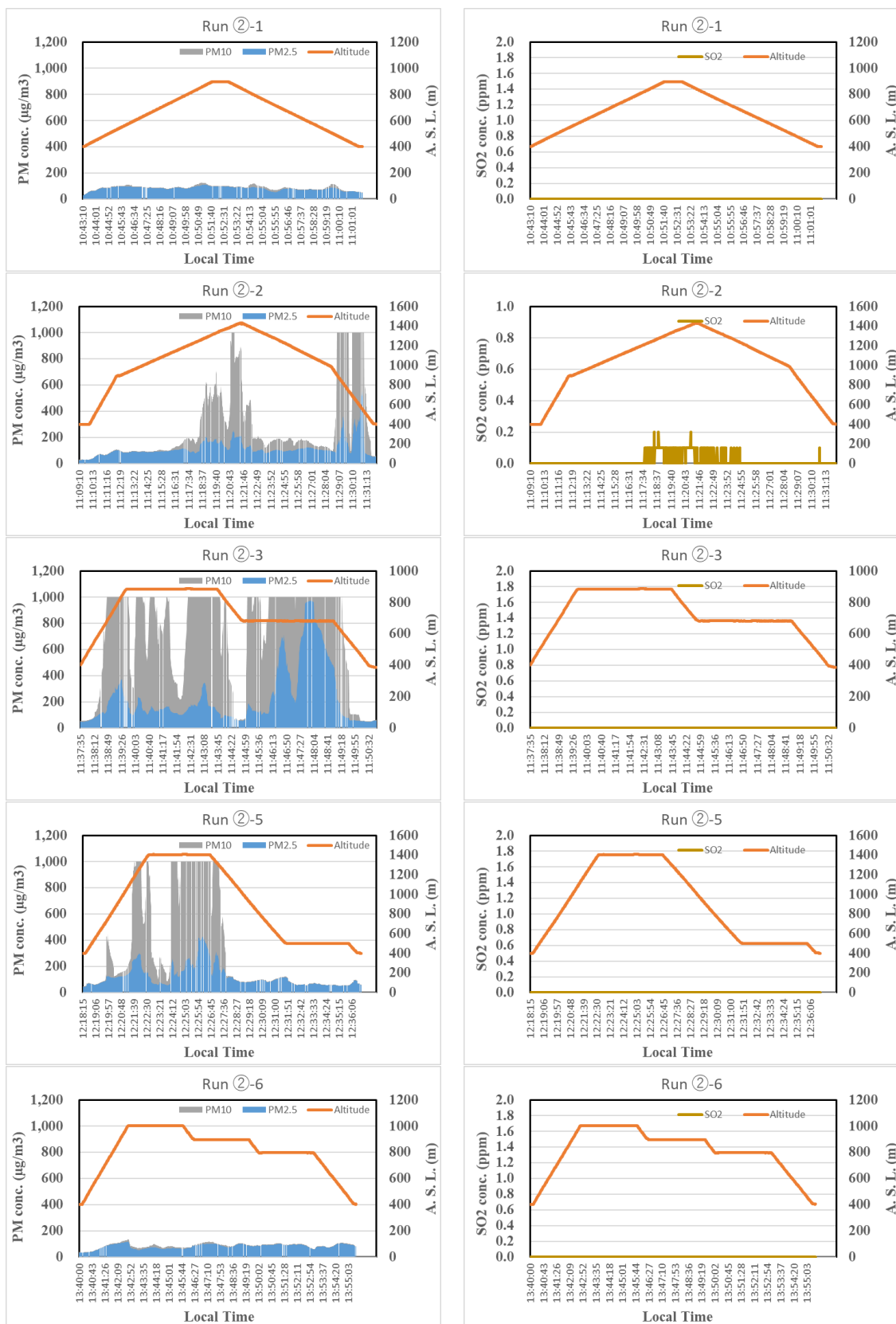


図 82 ドローンによる桜島周辺の火山灰・火山ガスの観測結果（左図：PM 右図：SO₂）

b) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーション

i) はじめに

メソ気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF) モデルを用いて、桜島火山および周辺の複雑地形を高解像度で精緻に表現することで、地形の微細構造に起因した火山近傍の詳細な風速場を数値シミュレーションする。また、様々な粒径を想定し、粒子の落下を考慮した粒子追跡計算により、降灰パターンへの地形影響を調べる。

これまで、高分解能気象モデルシミュレーションにより、降灰の再現性について検討し、解像度依存性を明らかにしてきた。また、火山灰拡散および降灰の予測実験を行い、定量的な予測に要する解像度について調査した。令和2年度においては、気象モデルによる高分解能数値シミュレーションにより、桜島および周辺地形の複雑さを精緻に再現した上(図83)で、地形周りの風速場の再現性によって、異なる粒径の火山灰の降下パターンがどのように影響を受けるのかを調べる。

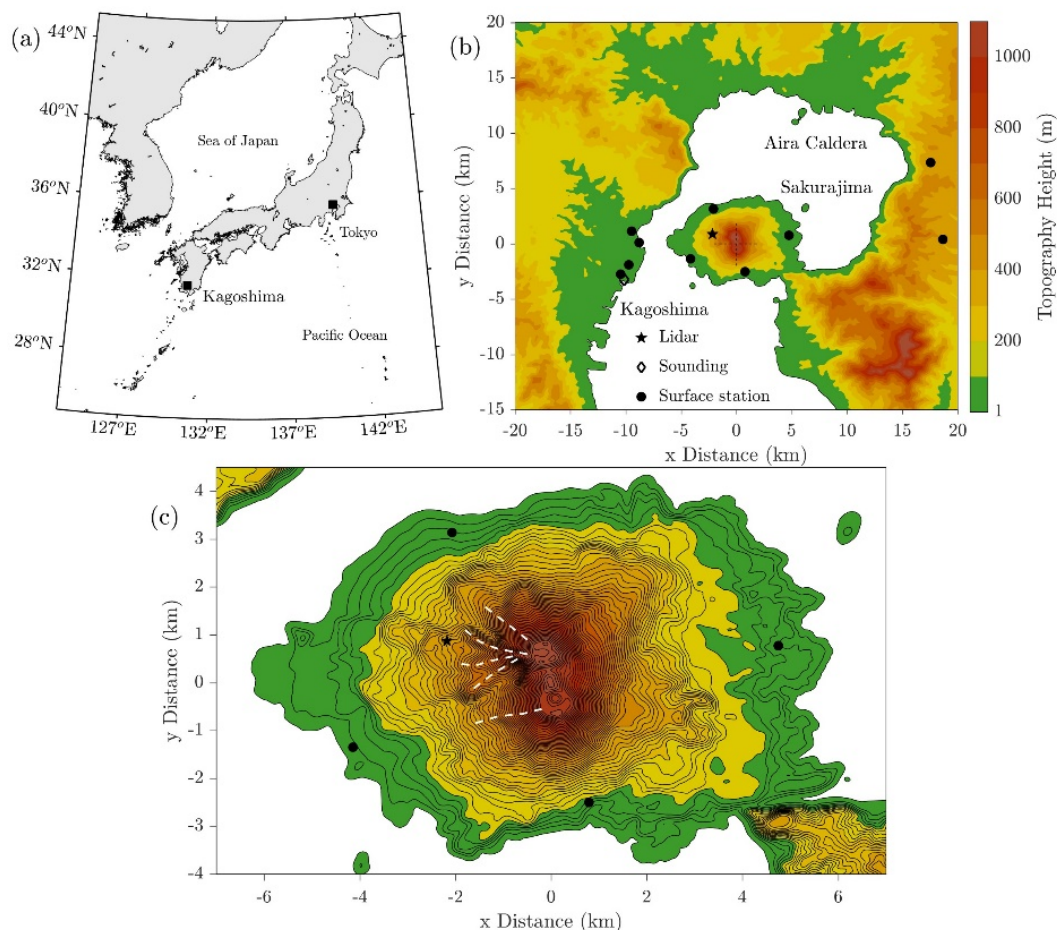


図 83 (a) 日本地図と鹿児島島の位置、(b) 桜島および周辺地形、(c) 桜島の地形

ii) 数値モデルの設定

本研究では、気象場の再現には領域気象モデル WRF Version 4 (Skamarock et al. 2019)⁸⁾を用いる。WRF モデルの計算領域の設定を図 84 に示す。一番外側の領域を Domain 1 とし、内側に Domain 2, Domain 3, Domain 4 をネストさせて領域設定した。Domain 1 と 2 の水平格子幅は、それぞれ 3150 m および 1050 m とし、これらの計算領域での乱流混合

のパラメタリゼーションには境界層スキームを用いた。さらに内側の Domain 3 と 4 では、格子幅を 150 m および 50 m とし、乱流混合には LES モデルで用いる乱流スキームを用いた。また、鉛直方向には、格子間隔を下層ほど細かくし、上層ほど粗くするような伸縮型の鉛直レベルを設定した。WRF による領域シミュレーションで必要とされる気象場の初期条件・境界条件は、ヨーロッパ中期気象予報センター（ECMWF）の解析値 ERA5 を用いた。

数値シミュレーションにおいては、モデルでの地形表現の違いが気流場の表現に及ぼす影響を調べるため、Domain 3 および 4 のモデル地形を国土地理院 50 m メッシュ数値地図の DEM データと GTOP030 の DEM データから作成したそれぞれのケースを設定した。モデル地形の作成に用いた DEM データ以外の数値実験の設定はすべて同一である。気象モデルの解像度が同じであった場合、DEM データの解像度が異なると、モデルの地形の複雑さが変わることになる。国土地理院 50 m メッシュ値を使うと Domain 3 や 4 でのモデル地形も複雑さがより現実的になるが、30 秒メッシュの GTOP030 の場合には DEM 解像度以下のスケールの複雑さは表現されないことになる。図 2 (b) には、国土地理院 50 m メッシュ値と GTOP030 の 30 秒メッシュ値のそれぞれから作成したモデル地形の標高を示している。DEM データの解像度が粗いと、モデル地形も滑らかな形状となってしまうことが分かる。

解析対象としたのは、2017 年 6 月 6 日および 2017 年 10 月 1 日の桜島噴火の事例とした（図 84）。これらの二事例の気象場の特徴を天気図および高層観測により図 85 に示す。

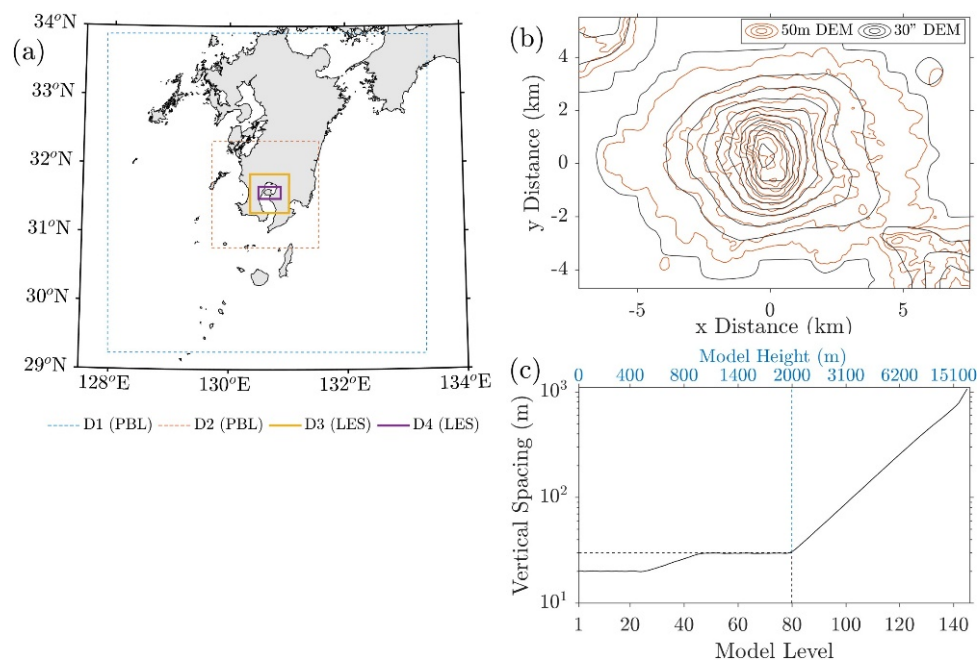


図 84 (a) WRF モデルの計算領域 (D1, D2, D3, D4)、(b) 国土地理院 50 m メッシュ数値地図から作成したモデル地形の標高の等値線 (橙色) および GTOP030 から作成した地形の標高 (黒色)、(c) 鉛直層数と鉛直格子間隔の関係

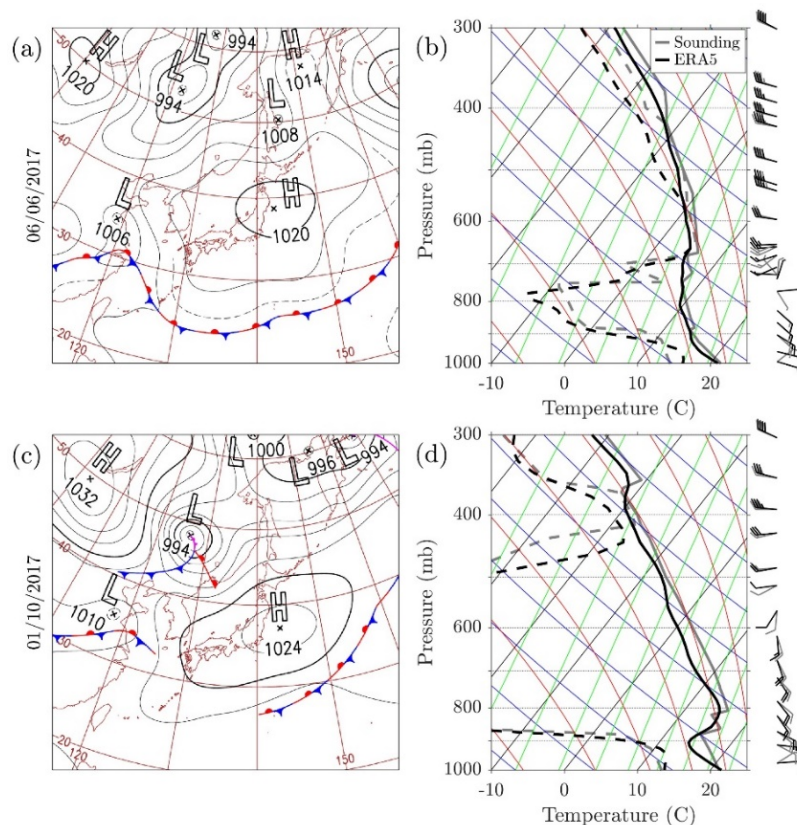


図 85 解析対象とした 2017 年 6 月 6 日の気象状況 ((a) 天気図、(b) 高層気象観測) および 2017 年 10 月 1 日の気象状況 ((c) 天気図、(d) 高層気象観測)

iii) 結果

WRF モデルでシミュレートされた 6 月 6 日および 10 月 1 日の 6～9 時 (3 時間平均値) における気流の鉛直断面および水平断面での場を図 86 に示す。6 月 6 日の事例については、50 m メッシュ DEM による地形の場合の結果に加え、30 秒メッシュ DEM による地形の場合の結果も示している。いずれの事例の場合も、総観規模の風向は東寄りである。この東風が桜島を乗り越える際に、山頂に対して下流側において強い下降流・上昇流のパターンが見られ、地形要因が気流場に表れていることが分かる。ドップラーライダー観測は 1 地点ではあるものの、上昇流場を捉えており、この観測結果にシミュレーション結果は合致している。50 m メッシュ DEM と 30 秒メッシュ DEM の場合と比べると、鉛直断面ではその違いは明瞭には認められないが、高分解能 DEM の場合に山頂付近の下降流がより鮮明に現れているように見える。

水平断面で気流場を見してみる (図 86 (d)、(e)、(f))。地上での気流場は、桜島において特に複雑になっていることが分かる。シミュレートされた風速場を地上観測による風速値と比べると、モデルは良好に実際の風況を再現しているものと判断される。シミュレーション結果で 50 m メッシュ DEM と 30 秒メッシュ DEM の場合とを比べると、地上付近の気流場に違いが見てとれる。すなわち、50 m メッシュ DEM の高分解能地形データを用いたケースのほうが、気流場が複雑に分布している。また、地上付近ではあるものの、鉛直風も、高分解能地形データを用いた場合の方が、より強く表現されていることが分かる。

地上から離れた上空 600 m (海拔高度) での風速場を見してみる (図 86 (g) (h) (i))。こ

の高度になると、地形の複雑性の違いによる風速場の違いは明瞭ではなくなる。特に水平風速場には違いはないように見える。しかしながら、鉛直風については、50 m メッシュ DEM と 30 秒メッシュ DEM の場合とで、分布の局在化の度合いが違う（高分解能 DEM の場合のほうは鉛直風の強い領域がより局在化している）。すべての場合において、桜島火山を迂回する流れ場が再現されている。このような地形に影響を受けた流れ場により、火山灰など物質輸送も影響されることが示唆される。

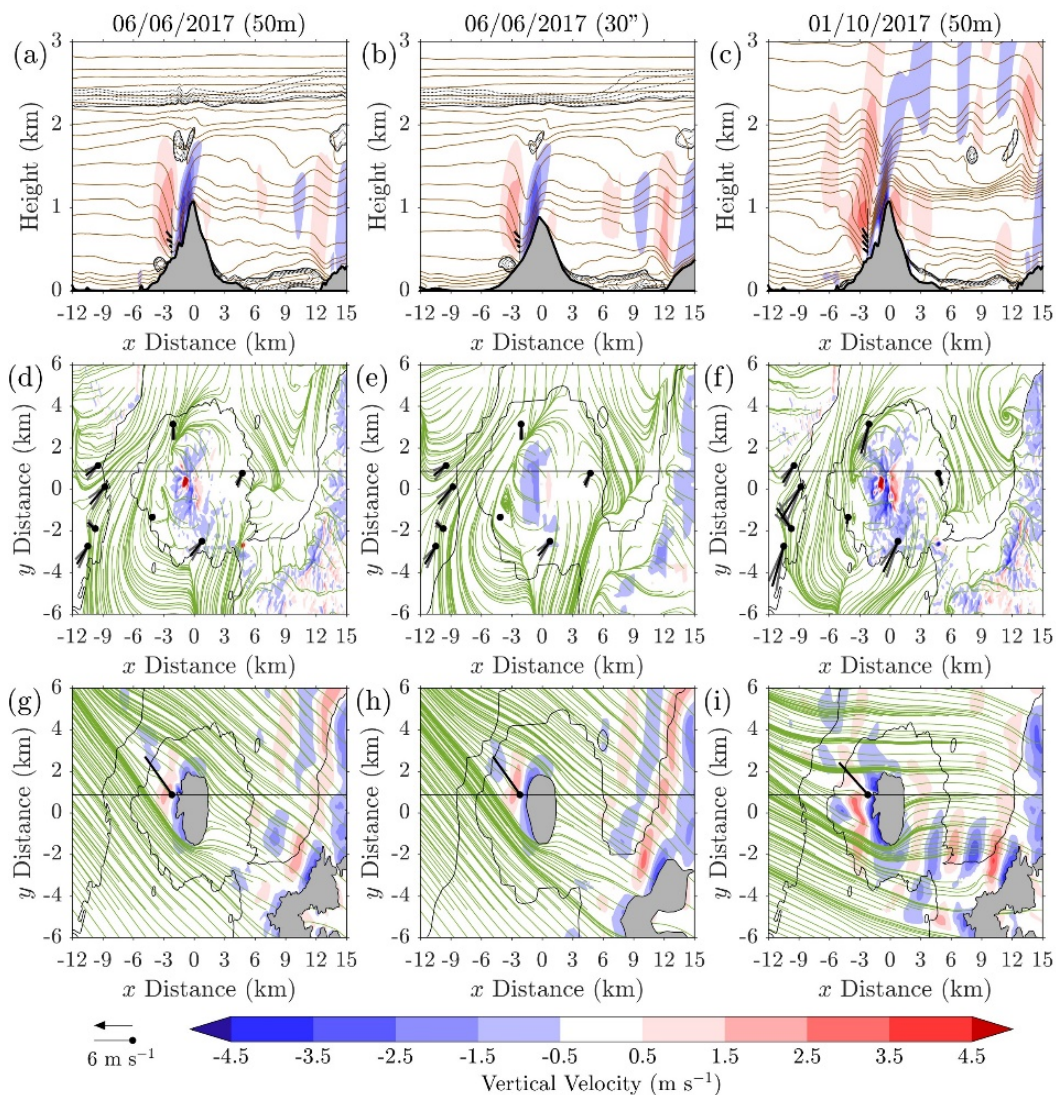


図 86 シミュレートされた気流場と観測された風（ただし 0600-0900 JST の 3 時間平均）。(a), (d), (g) 6 月事例 (50 m メッシュ DEM の場合), (b), (e), (h) 6 月事例 (30 秒メッシュ DEM の場合), (c), (f), (i) 10 月事例 (50 m メッシュ DEM)。1 列目：ドップラーライダー観測地点を通る鉛直断面での鉛直風（カラーシェード；青は下降、赤は上昇）、等温線（茶色）、ドップラーライダー観測風（ベクトル）。2 列目：地上での鉛直風（カラーシェード）、流線（緑色）、地上観測風（ベクトル）。3 列目：2 列目の図と同様であるが、海拔高度 600 m での場を示す。

次に、Domain 1 から 4 までのネスト計算で得られた異なる解像度の計算結果から、解像度の違いによる気象場の再現性の違いについて示す。図 87 は、水平風速（U）、風向（WD）、

リチャードソン数（対数にして示す）($\log(Ri)$)、相対湿度（RH）の地上から高度 10 km の範囲の 9 時における数値について、高層気象観測に対する平均二乗誤差（RMSE）を示す。いずれの物理量についても、モデル解像度が上がるほど（水平格子幅が細くなるほど）RMSE が小さくなる傾向が確認できる。この傾向は、風速値について明瞭である。ただし、相対湿度については必ずしもすべてのケースで高分解能化が結果を良くするわけではないようであるが、それでもある程度の改善の傾向は確認できる。

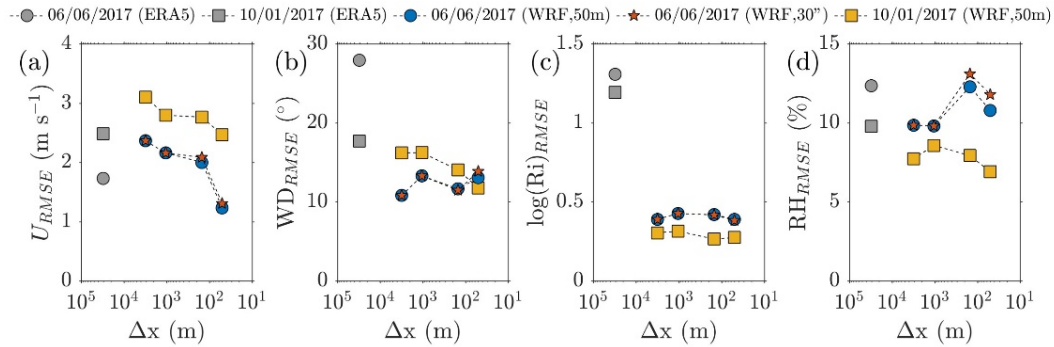


図 87 高層気象観測値に対する ERA5 および WRF 出力値の平均二乗誤差（RMSE）。地上から海拔高度 10 km までの範囲で、9 時のデータについて算出したもの。横軸に水平格子間隔（ Δx ）を示す。(a) 水平風速（U）、(b) 風向（WD）、(c) リチャードソン数（対数にして示す）($\log(Ri)$)、(d) 相対湿度（RH）。6 月 6 日の事例、10 月 1 日の事例について、ERA5 解析値、WRF 計算ケースそれぞれ異なる色で示している。

次に、WRF 出力データを用いて粒子追跡計算を実施した。図 88 は、粒子の注入高度 H_I を海拔高度 500 m にした場合の軌跡を示す。WRF 出力値は、Domain 4 での計算結果を用いている。鉛直速度の影響を調べるため、気流の鉛直速度を 0 と仮定した場合 (W_0) および WRF 出力値の鉛直速度を用いた場合 (W_{Pert}) について軌跡を求めた。ここで、水平風はともに同じ WRF 出力値を用いている。また、異なる終端速度のケースで結果を示している。終端速度が大きな場合 ($U_T = 8$) には、 W_0 の場合と W_{Pert} の場合とで軌跡は似たようなものとなっている。終端速度が $U_T = 5$ となると、 W_0 の場合と W_{Pert} の場合とで軌跡に違いが生じるようになる。終端速度がさらに小さくなると ($U_T = 0.3$)、 W_0 の場合と W_{Pert} の場合とで軌跡は大きく異なるようになる。終端速度の違いは、粒径の違いに相当するため、この図で示される結果から、大粒子の場合には気流の上下運動の大きさにはあまり影響を受けずに火口近傍にすぐさま落下するが、一方小粒子の場合には気流の上下運動に強く影響されて火口から離れたところに降下していくことが分かる。

このように、実際の粒子の落下パターンは、粒径が異なると気流の影響を受け方も異なり、結果として粒子の終端速度と大きく違う速度で粒子が降下していくと言える。このことを示すため、異なる終端速度（すなわち異なる粒径の粒子）について、粒子の落下速度がどの程度終端速度と違うのかを、終端速度に対する落下速度の比 (U_F/U_T) として図 89 に示す。結果は、6 月事例（50m メッシュ DEM の場合）、6 月事例（30 秒メッシュ DEM の場合）、10 月事例（50m メッシュ DEM の場合）について、粒子の注入高度 H_I を 1000 m とした場合と 500 m とした場合の結果を示している。終端速度が大きな場合（粒径の大きな場合）

には、注入高度の違いによらず、 U_F/U_T は 1 に近い数値を取っている。終端速度が徐々に小さくなると、注入高度の違いによる U_F/U_T の違いは大きくなり、またこの比は 1 から離れた数値を取るようになる。さらにエラーバーが大きくなることから、ばらつきも大きくなることが分かる。さらに終端速度が小さくなると、 U_F/U_T は事例によって 1 に近づいたり 1 から離れたたり、また注入高度の違いも大きかったり小さかったりと、不確実性が顕著になる。6 月事例について、50m メッシュ DEM の場合と 30 秒メッシュ DEM の場合とを比べると、粗い解像度の DEM の場合には、高分解能 DEM の場合よりも、注入高度による違いやエラーバーの大きさは小さくなることが分かる。このように、図 88 で示した軌跡の特徴が図 89 に表現されている。

以上のような軌跡パターンの違いによって、粒子の落下地点が火口からどの程度離れることになるのかを調べてみた。図 90 は、全粒子の落下地点の位置を火口からの平均距離で示している。終端速度が大きい場合には、軌跡からも分かる通り、火口近傍に落下し、落下位置は鉛直運動の大きさや注入高度の違いにあまり影響を受けないことが分かる。終端速度が徐々に小さくなると、落下地点は火口から遠ざかり、鉛直運動の大きさや注入高度の影響が明瞭に表れるようになる。終端速度が 0.3 の場合には、図示した範囲から大きく離れてしまうため、図中には表示されていないものの、終端速度が小さくなることで落下地点は鉛直運動の大きさや注入高度の影響を強く受けるものと言える。さらに、モデル地形の精緻さもより重要になっていくと言える。

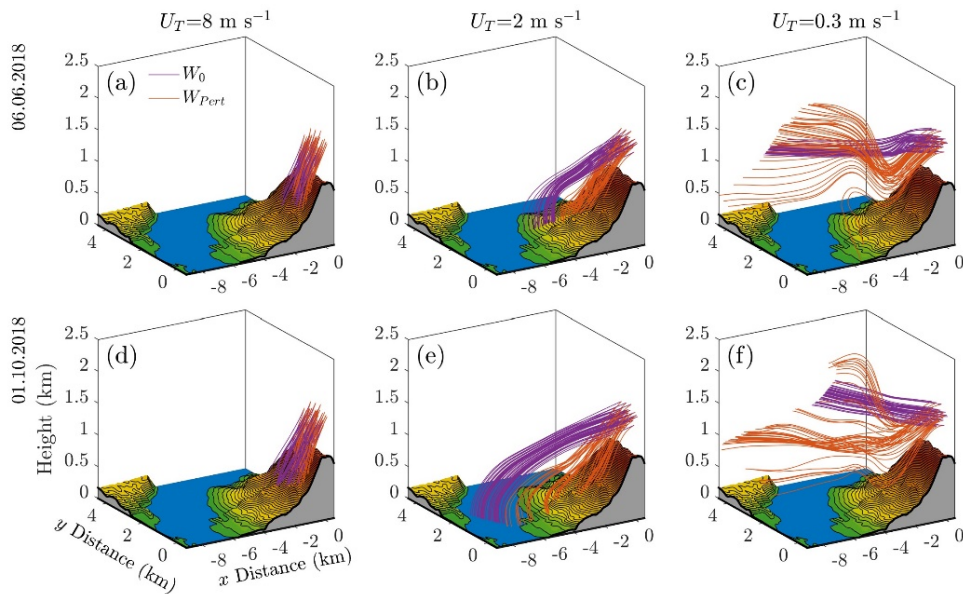


図 88 注入高度 (H_I) 500 m (海拔高度) にした場合の粒子の軌跡。(上段) 6 月事例、(下段) 10 月事例で、異なる終端速度 (U_T) の場合を示す：(a), (d), 8 m s^{-1} , (b), (e), 2 m s^{-1} , (c), (f), 0.3 m s^{-1} 。鉛直速度を 0 と仮定した場合 (W_0 ; 紫色) および WRF 出力値の鉛直速度を用いた場合 (W_{Pert} ; 赤色) を示す。

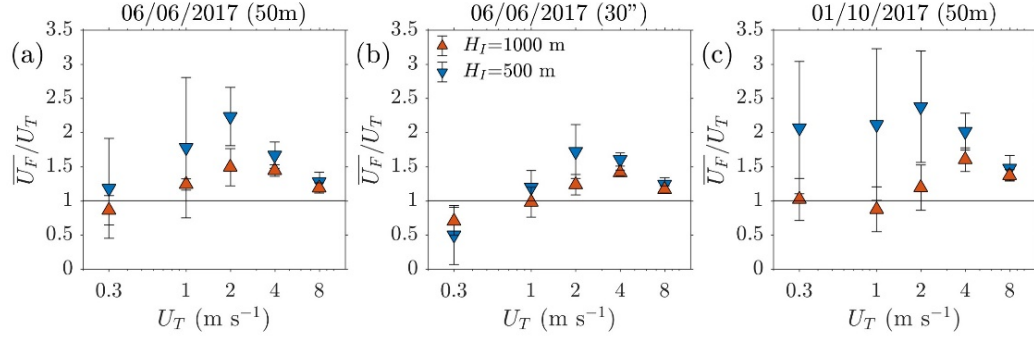


図 89 粒子の終端速度に対する落下速度の比 (\bar{U}_F/U_T) を終端速度 U_T について示す。(a) 6 月事例 (50m メッシュ DEM の場合)、(b) 6 月事例 (30 秒メッシュ DEM の場合)、(c) 10 月事例 (50m メッシュ DEM の場合) について、粒子の注入高度 H_I が 1000 m の場合 (赤三角) と 500 m の場合 (青三角) の結果を示す。

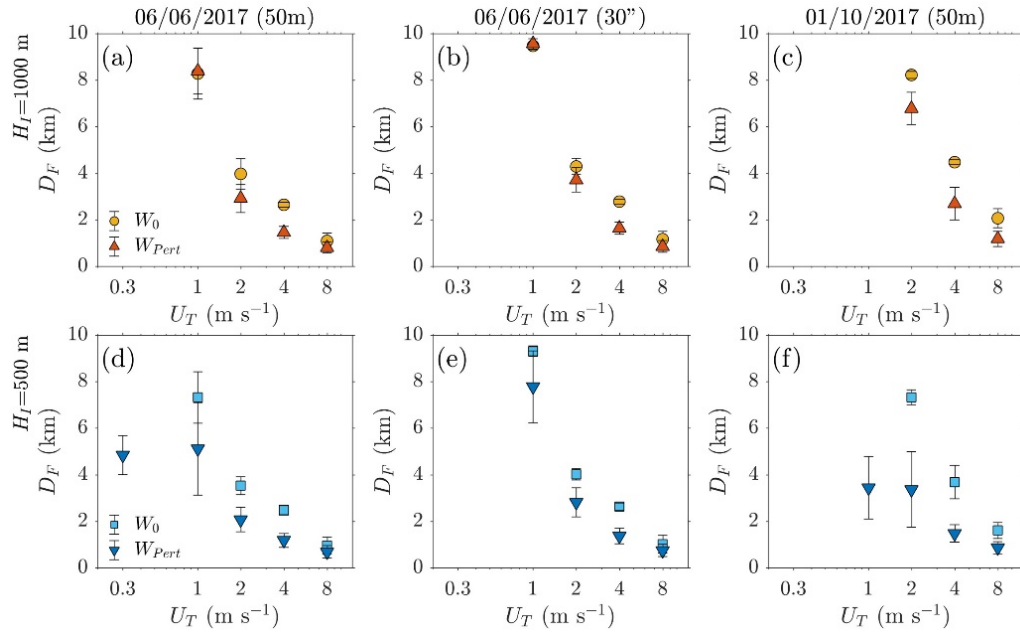


図 90 全粒子の落下地点の平均距離。(a), (d) 6 月事例 (50m メッシュ DEM の場合)、(b), (e) 6 月事例 (30 秒メッシュ DEM の場合)、(c), (f) 10 月事例 (50m メッシュ DEM の場合) で、1 列目は注入高度 $H_I=1000$ m、2 列目は 500 m とした結果。また、WRF の鉛直風速を使った場合とゼロとした場合について異なる印で示している。

iv) 気象モデルの検討

火山灰の移流は気象モデルに基づく風速場につよく依存するので、世界各国で公表されている気象モデルを用いて火山灰拡散シミュレーションを実行し、気象モデルの適性を検討した。検討した気象モデルは、JRA55 (55 年間の気象庁の再解析データ)、ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts による再解析データ)、MSM (気象庁のメソスケール気象予測データ)、GFS (National Centers for Environmental Prediction による全球予測モデル) である。

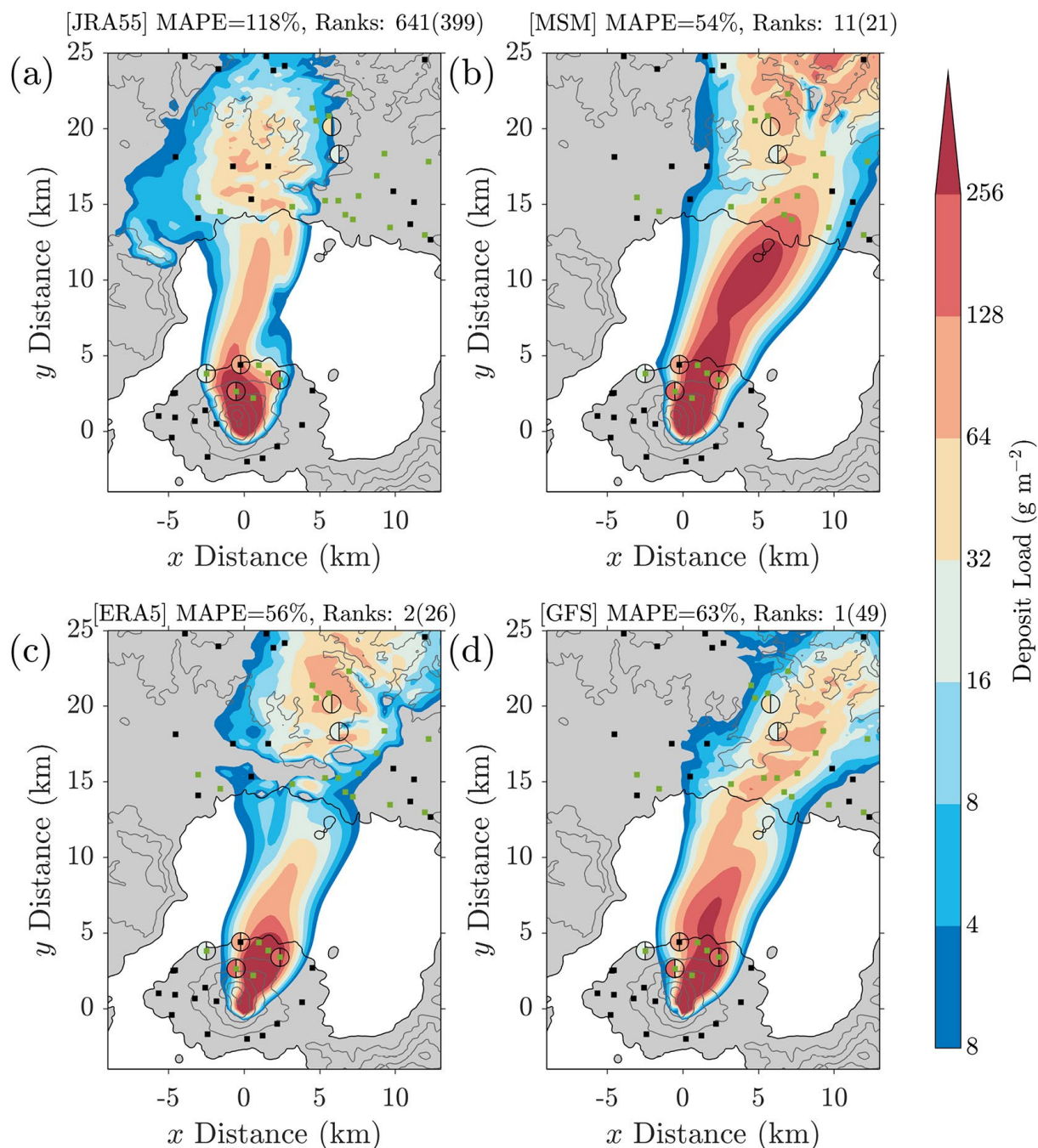


図 91 異なる気象モデルに基づく降下火山灰量の予測結果 (Poulidis et al., 2021)⁷⁾。単位面積当たりの降灰量をカラスケールで示した。(a) JRA55、(b) MSM、(c) ERA5 および (d) GFS 気象入力データ。括弧内に各ケースのパラメータ (PBL スキーム、プルームモデル、TGSD、終端速度スキーム、および凝集) を示す。○は火山灰サンプリングの位置で、○の左側に観測量を右側に予測値をカラスケールで示した。□はディストロメータと鹿児島地方気象台の聞き取り調査地点の場所で、緑と黒は降灰の有無を示す。

それぞれの気象モデルから得られている風速場を WRF により解析し、高解像度化された風速場に基づいてシミュレーションを行った。対象とした噴火は 2019 年 7 月 28 日に南岳において発生した噴火である。この噴火活動により、火山灰が鹿児島空港に達し、27 便の

フライトが欠航となった。気象モデル毎の降灰量の分布を図 91 に示す。最もよい結果が得られたのは GFS データを用いたシミュレーション（図 91d）であり、火山灰の拡散経路が正しく追跡できているとともに、桜島周辺と霧島市における降灰量をうまく再現できた。また、MSM（図 91b）および ERA5（図 91c）データセットを使用したシミュレーションでもほぼ同等の結果が得られている。ただし、ERA5 の場合、反時計回りのバイアスが生じた。JRA55 データセットを使用したシミュレーション結果（図 91a）は、有意な反時計回りのバイアスが生じ、桜島及び霧島市における降灰量の再現に難があった。GFS、MSM、ERA5 のデータを用いたシミュレーション結果はほぼ同等であり、利用のしやすさから MSM（気象庁のメソスケール気象予測データ）は最適であると判断される。

v) まとめ

本研究では、水平格子幅 50 m という高解像度での気象モデルによる桜島周辺地域での気流の数値シミュレーションを実施し、粒子の軌跡計算により、複雑地形のモデルでの表現性や粒径の大きさ、さらには解像度の違いによる降灰パターンへの影響を調べた。まず、高分解能化により、風速場の表現は改善されることが明瞭に示された。また、粒子の軌跡計算から、粒径が大きな粒子の場合には、鉛直運動の違いや粒子の注入高度の違いによらず火口近傍に速やかに降下するが、粒径が小さい粒子の場合には、鉛直運動の影響や注入高度の影響を強く受け、降下速度も異なり、結果として降灰位置も大きく異なることが分かった。さらに、高分解能気象シミュレーションにおいては、高分解能 DEM を用いて複雑地形の影響を受けた気流を精緻に表現することが大事であることが分かった。より高分解能の気象場は火山灰拡散シミュレーションを高精度化させることが期待できるが、WRF を用いた計算に時間がかかることを考慮すると、水平格子幅 50 m の分解能は最適な解像度と言える。また、高解像度気象場を作る気象データとして MSM（気象庁のメソスケール気象予測データ）は最適であると判断される。

なお、これらの研究成果を公表するために、国際誌 *Atmosphere* に特集 “Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University-Monitoring and Modelling Volcanic Ash Transport and Deposition” を企画した。本サブテーマからは、6 編の論文が収録されている（2021 年 3 月末時点）。

https://www.mdpi.com/journal/atmosphere/special_issues/volcanic_ash_modelling

c) 噴石の風力特性

平成 31 年度に引き続き、噴火時の噴石の飛散運動を精度よく予測するための噴石の動的空気特性を明らかにすることを目的として、加速度センサーと角速度センサー、気圧計を組み込んだ発泡ウレタン製の噴石模型をドローンに吊り下げて約 150m 上空まで持ち上げて行った落下実験結果の解析を行った。

i) 解析概要

模型に組み込まれたセンサーから得られた値（図 92）をローパスフィルターでフィルタリングした後、積分して速度、変位、角度の時間変化を求めた。模型の姿勢は角速度の値から求めたクォータニオンで表した回転行列を用いて空間に固定された絶対座標系における加速度を求め、台形公式による時間積分によって模型の姿勢、落下速度および落下軌道を算出した（図 93）。

落下時の噴石模型はドローンの下で振動しており、落下開始時の姿勢が変動している。落下開始時の時刻は模型を吊り下げるフックにつなげたワイヤーの切断時刻として記録されているが、初期姿勢の変化により、落下後の軌跡が大きく変化した。そこで、ビデオカメラの記録を画像解析して得られた落下軌道にセンサーの積分により得られた軌道が最もよく合うように初期姿勢を最適化して模型の落下運動を求めた。形状の異なる 3 種類の模型を各 2 回、6 ケース落下させた実験結果について、図 94 に示すようにビデオ画像から求めた値とほぼ同様な軌跡が求められた。軌跡の誤差の最大値は、150m 落下して最大約 2.5m となった。

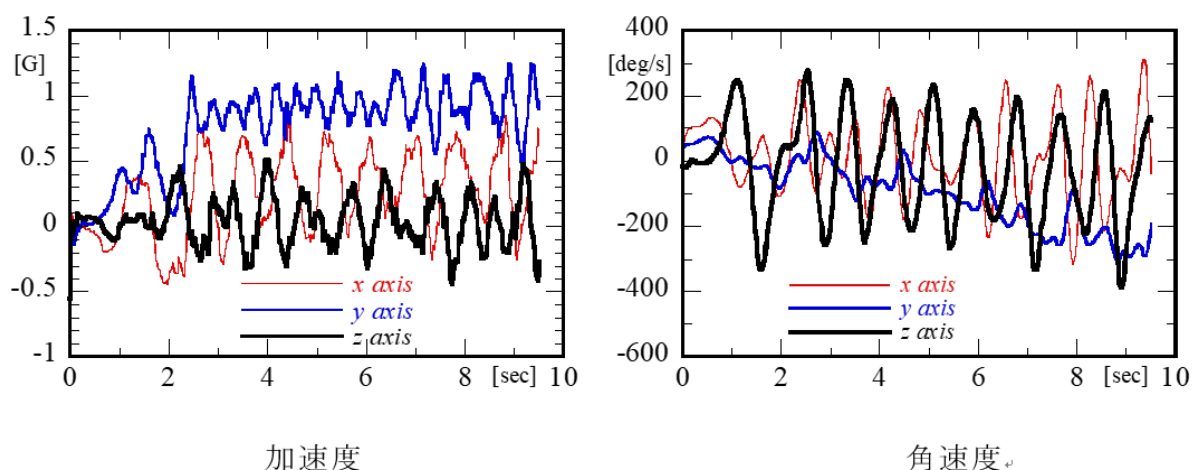


図 92 センサーからの出力記録例

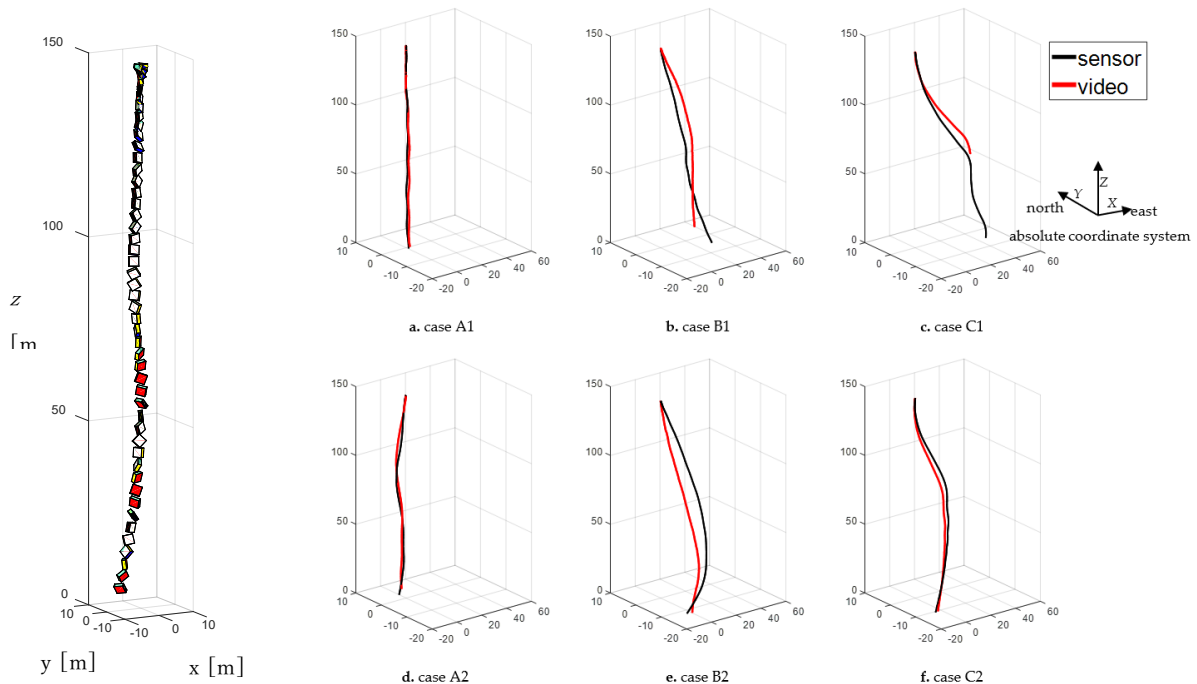


図 93

落下運動 (Case A2)

図 94 落下実験を行ったすべての落下軌道

ii) 解析結果

図 92 に示したモデルの落下運動について、絶対座標系に変換した結果を図 95 に示す。図 95a に示すように、求めた変位はビデオ画像から求めた値とよくあっており、加速度、角速度を積分して求めた値は回転を含めた実際の落下をよく再現していると考えられる。

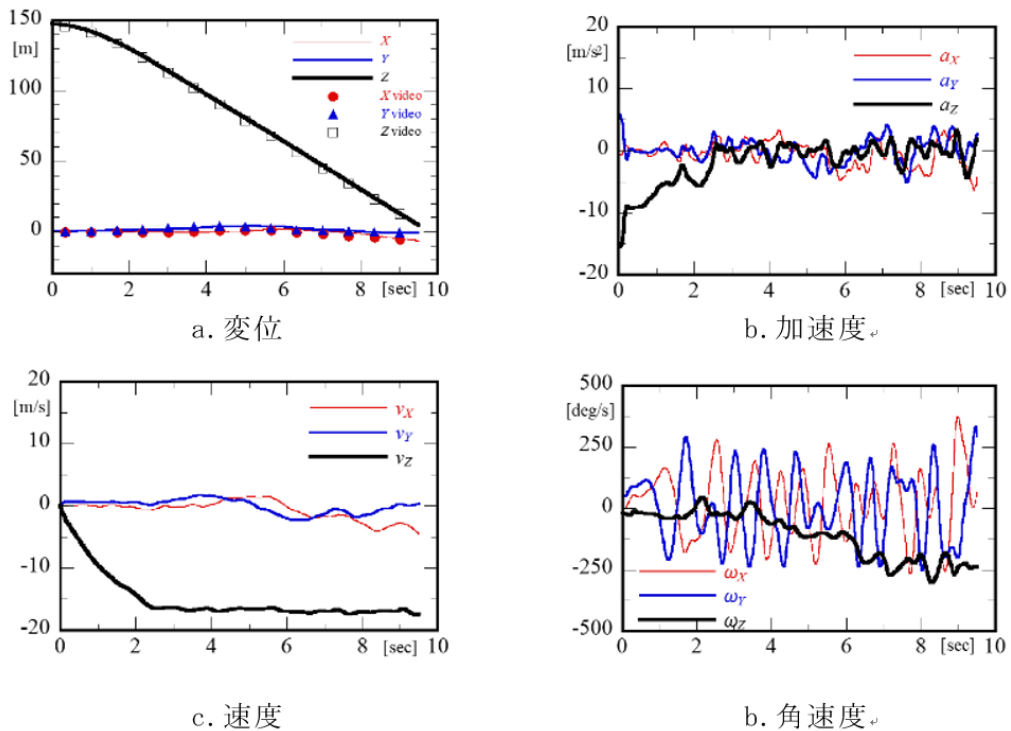


図 95 落下運動の解析例

得られた結果からモデルが受けた風力を求め、図 96 に示す。ここで、風力係数を求める際

の噴石模型の代表面積は、見附面積の平均値とした。図 96 より、風力係数はレイノルズ数とともに減少し、同じレイノルズ数に対する風力係数のばらつきも小さくなり、レイノルズ数が 3×10^5 以上では、風力係数の値は 0.2 から 0.5 の範囲をとることがわかった。相対風向と風力の向きとの偏角も風力係数と同様にレイノルズ数とともに減少し、同じレイノルズ数に対する風力係数のばらつきも小さくなり、レイノルズ数が 2×10^5 以上では、偏角の値は 0 から 30° の範囲をとることがわかった。

噴石模型のように不整形な形状を持つ物体が飛散する際には、物体の回転による姿勢変化や風向・風速変化により風が吹いてくる方向から見た見附方向の物体の形状が変化するので、風力の大きさと向きが時々刻々変化する。図 96 に示した風力係数 (C_d) と相対風向と風力の向きとの偏角 (θ) は、その影響を取り込んだ値となっている。噴石などの不整形な物体の飛散運動を高精度に再現しようとした場合、回転を含む姿勢変化と周囲の風向風速の変化を取り込んだ計算を行う必要があるが、本研究で得られた風力係数と偏角を用いればそれらの影響を取り込んだ計算が物体の回転運動を直接計算することなく可能となる。

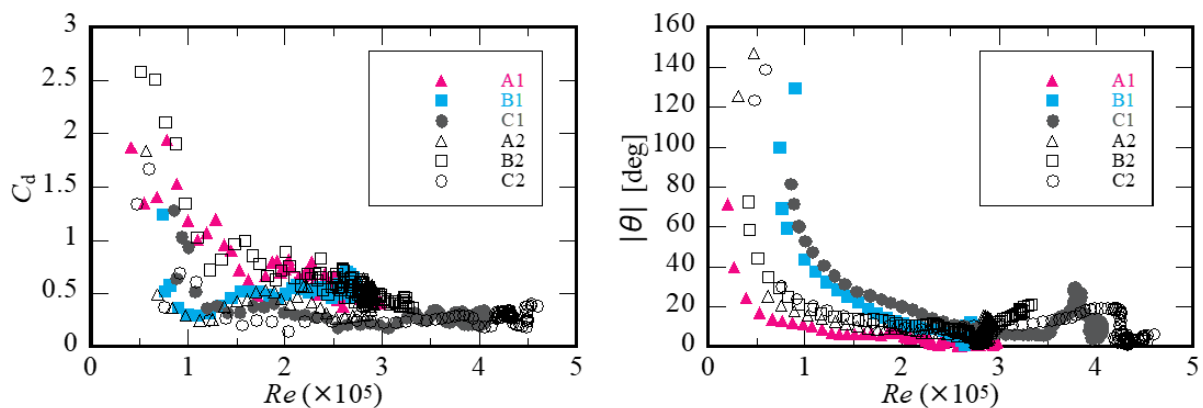


図 96 空力特性

iii) まとめ

昨年度模型の落下実験で得られた結果をもとに、噴石模型の落下軌道を求めた。得られた軌道はビデオ映像の画像解析で得られた落下軌跡と比較し、実際の落下運動をよく再現していることを示した。運動の記録から、噴石のような不整形な物体の回転運動を含む飛散運動をシミュレーションする際に必要となる風力係数と、相対風向と風力の向きとの偏角を求めた。これにより、回転運動を伴う噴石の飛散運動の軌道を、噴石の回転運動を直接計算することなく求めることが可能となるので、噴火時の噴石の飛散シミュレーションに応用する予定である。

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

これまでの、桜島において発生するブルカノ式噴火を対象にして、火山灰の移流拡散と降下を予測することを目的として研究を進めてきたが、桜島周辺に降下する火山灰のうち、ブルカノ式噴火によって降下する火山灰は 1/3 程度であり、残りは連続的な火山灰放出により噴出されたものである。したがって、火山灰の噴出を連続する量として扱わないと、災害の予測において重要となる積算量としての降下火山灰を予測することはできない。特に、プリニー式噴火のように多量かつ長時間にわたって火山灰を噴出する場合には、連続的噴火を念頭に置いた火山灰予測は必須である。そこで、令和 2 年度から 4 年度は連続噴火による火山灰の予測を目指した研究とそのためのオンラインシステムを構築する。

令和 2 年度は、連続量を扱うための基礎データとして、噴出率、レーダー観測による火口直上の反射強度、WRF を用いた高分解能の風速場、そして実証対象となる降灰量の時系列データベースを作成し、これらの関係を明らかにする。

噴出率は、火山性微動の振幅と地盤変動を励起する圧力源の体積変化から求められることはすでに述べたとおりである。レーダー観測による火口直上の反射強度とその分布は、火山灰の濃度と噴煙高度を反映したものであり、噴出率の検証に活用できる。WRF を用いた高分解能の風速場の計算には時間を要するため、逐次得ることができないので、データベースを作成しておくことは特に重要である。

a) 噴出率の時系列

先に述べたように火山灰の噴出率は式 (3-1) から求めた。この式は、月ごとの降下火山灰量から算出した火山灰放出量と 1 か月のスペクトルおよび圧力源の体積変化量に適用されたものであるが、個々の爆発についても適用可能なことが示されている (Iguchi, 2016)。ここでは、この式を 1 分毎の 2~3Hz 帯域のスペクトルと圧力源の体積変化量に適用し、1 分毎の火山灰放出量として、連続的に算出した。なお、パラメータ α 、 β 、 γ は 1 か月の値から 1 分の値に換算している。地震動については、桜島島外において発生する構造的な地震や火山構造的な地震 (A 型地震) は火山灰放出に寄与しないので、これらの地震を検知した場合は、 αA の項を除去した。また、圧力源の体積変化 (V) が火山灰放出に関与するとする βV の項については、 V を火口方向のひずみと直交方向のひずみの比から求めているため、噴火開始から両者の比が -2~0 の間に入る時間帯のみについて算出している。

このようにして求めた 1 分毎の火山灰噴出率を噴火活動が南岳に回帰した 2017 年 11 月以降、2020 年 12 月までについて図 97 に示した。最も、噴出率が大きかったのは、2017 年 11 月 13 日 22:07 に開始した爆発で、22:08 に 18 千トン/分に達した。2018 年 6 月 16 日 7:19 の爆発では噴出率が 16 千トン/分、7:20 でも 14 千トン/分を維持した。2018 年 11 月 14 日 0:42 の爆発でも噴出率が 14 千トン/分であった。これらの爆発では、噴煙高度が 4000m 以上に達しており (鹿児島地方気象台の観測では 2017 年 11 月 13 日 22:07 の爆発は雲入りとなっているが、レーダー観測から 4200m 程度と判定できる)、噴出率と噴煙高度は密接な関係があることがわかる。

2019 年では 9 月以降、2020 年 6 月まで噴出率が高い状態が続いた。これは、噴火活動が活発であったことを反映している。特に、2019 年 11 月上旬は噴出率が高く、噴出率が 16 千トン/分に達した 11 月 6 日 23:01 の爆発を含め、4 回、噴出率が 10 千トン/分を超えた。

噴煙高度が 5500m に達した 11 月 8 日 17:24 の爆発でも噴出率は 6 千トン/分と多い。本サブテーマの目的とは異なるが、このようにして求められた噴出率は噴火活動を評価する上で最も定量的な指標と言える。

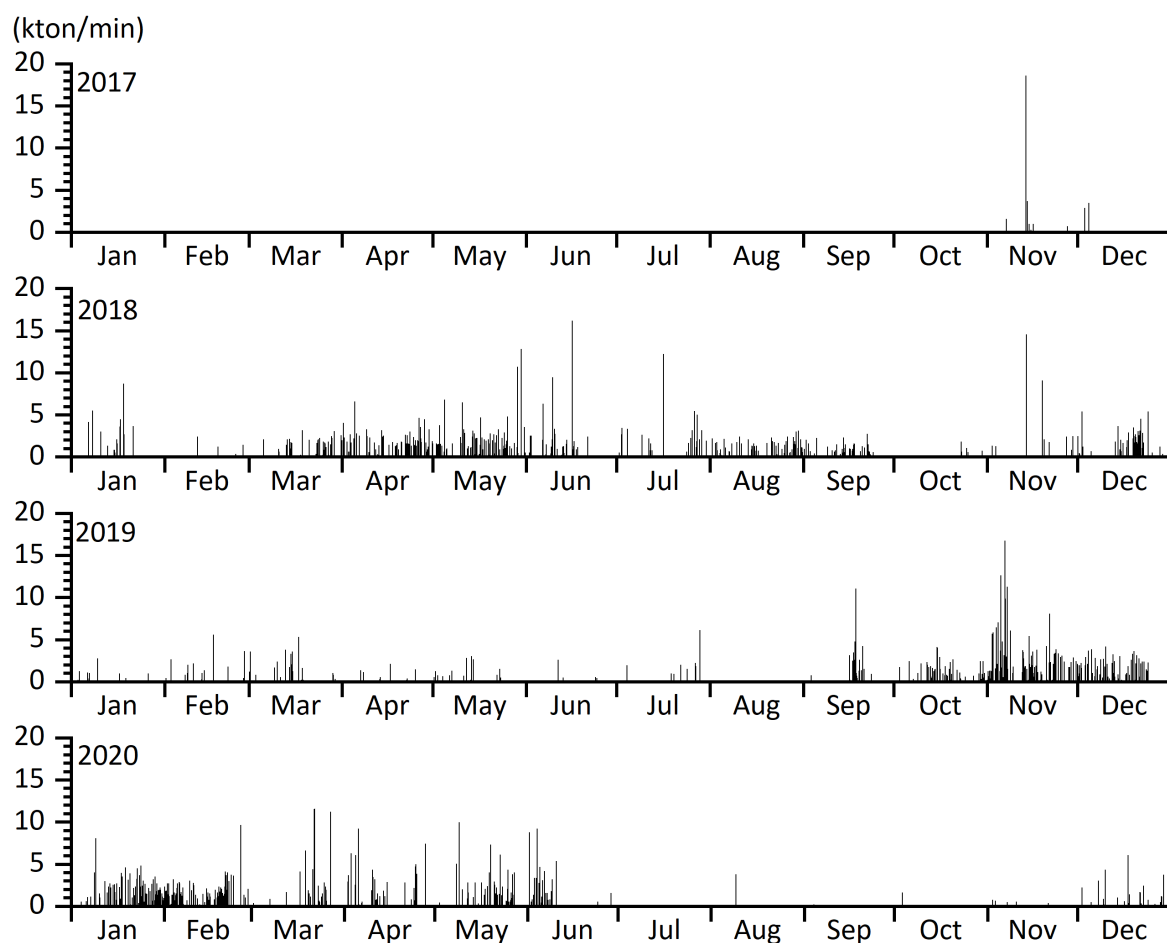


図 97 噴出率の時系列。1 分毎にプロットした。

b) レーダー反射強度の時系列

先に 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、a) レーダー観測に記述したように桜島では京都大学防災研究所火山活動研究センターにおいてセクター RHI スキャンするレーダーが連続稼働しており、1～2 分程度の時間分解能で噴煙の反射強度を把握することができる。噴火活動が南岳に回帰した 2017 年 11 月以降について火口直上の反射強度の鉛直分布を再解析してデータベース化した。なお、レーダーデータは 1 観測点でも 3 か月で 2T バイトになる膨大なものなので、2019 年 3 月までデータベース化した。

注目した位置は北緯 31.579166°、東経 130.658333° であり、南岳火口のほぼ中央部である。海拔高度 1200m から 5400m までは 200m ごとに反射強度を抽出した。海拔高度 2000m および 3000m の反射強度の時系列を 2018 年 4 月について例示して図 98 に示した。図 98 には噴出率を併記した。海拔高度 3000m の反射強度に注目するといくつかのパルスが認められる。これを噴出率の増加と比較すると 14 個の反射強度パルスが、噴出率の増加パルスに対応する。すなわち、火山灰放出率の増加はレーダーの反射強度の増加として識別でき

ることがわかる。一方、レーダーの反射強度は長時間にわたって高い値を保っている時間帯がある。これを降水量（図 98）と比較すると対応がよく、雨雲の水滴による反射であることがわかる。したがって、レーダーの反射強度の増加は、短時間のパルスであれば、火山灰を含んだ噴煙を、長時間の場合は水滴の存在を表していることになる。これまでのところ、噴煙が長時間にわたって高い高度を保つことがないので、問題とはなっていないが、高高度の噴煙放出が長時間続く場合は、火山灰雲と雨雲の識別が問題となる。

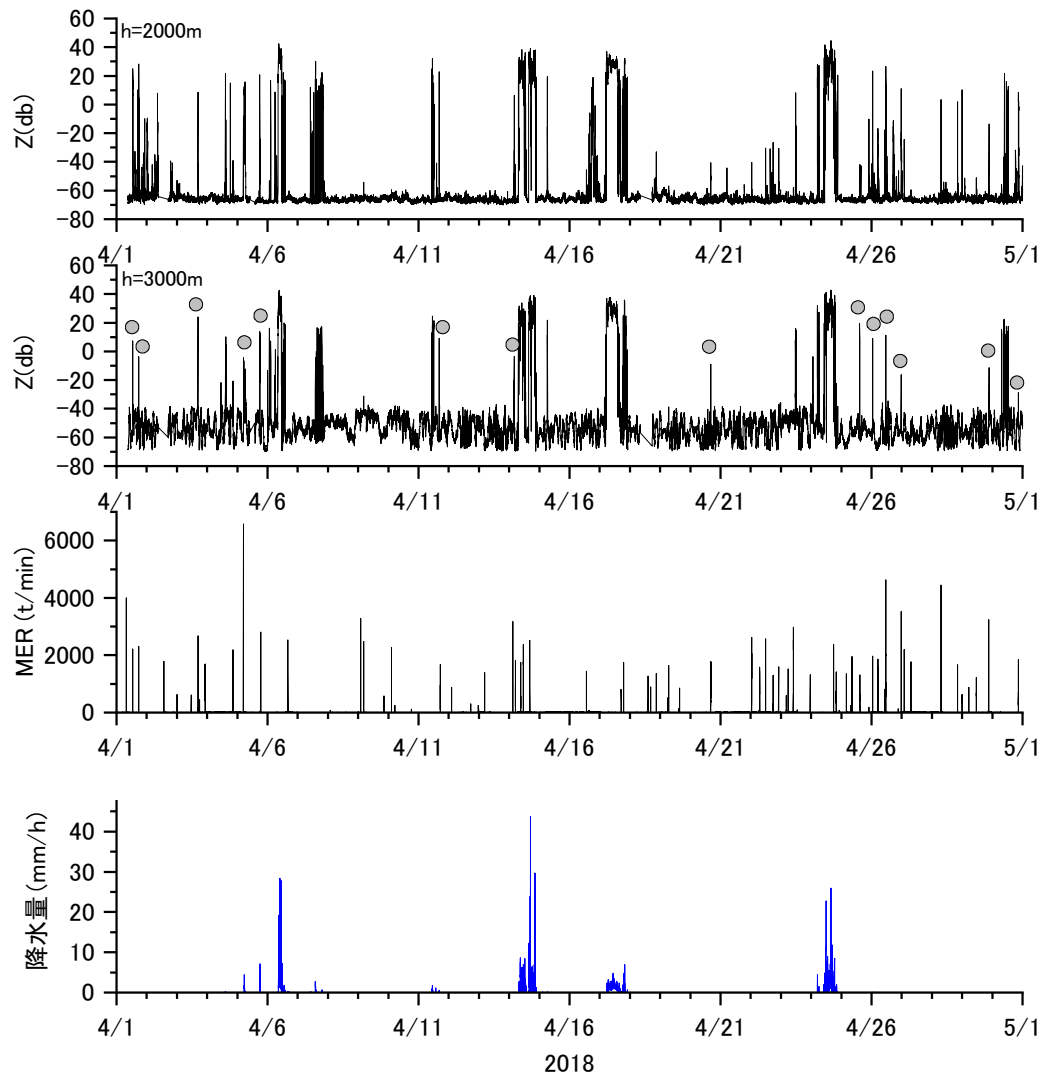


図 98 海拔高度 2000m および 3000m における反射強度の時間変化。3 段目は火山性微動振幅及び圧力源の体積変化から算出した火山灰噴出率。4 段目はディストロメータにより観測した降水量（桜島火山観測所）を示す。

レーダーにより観測された反射強度の増加と噴出率の増加の対応関係を明瞭にするために、図 98 を拡大して 1 日分を図 99 に示す。噴出率の増加パルスは 4 月 1 日 12:49 と 17:37 の爆発に対応する。噴出率の増加パルスに比べて、反射強度パルスの幅が広いのは、噴煙が漂っていることを意味するものと考えられる。

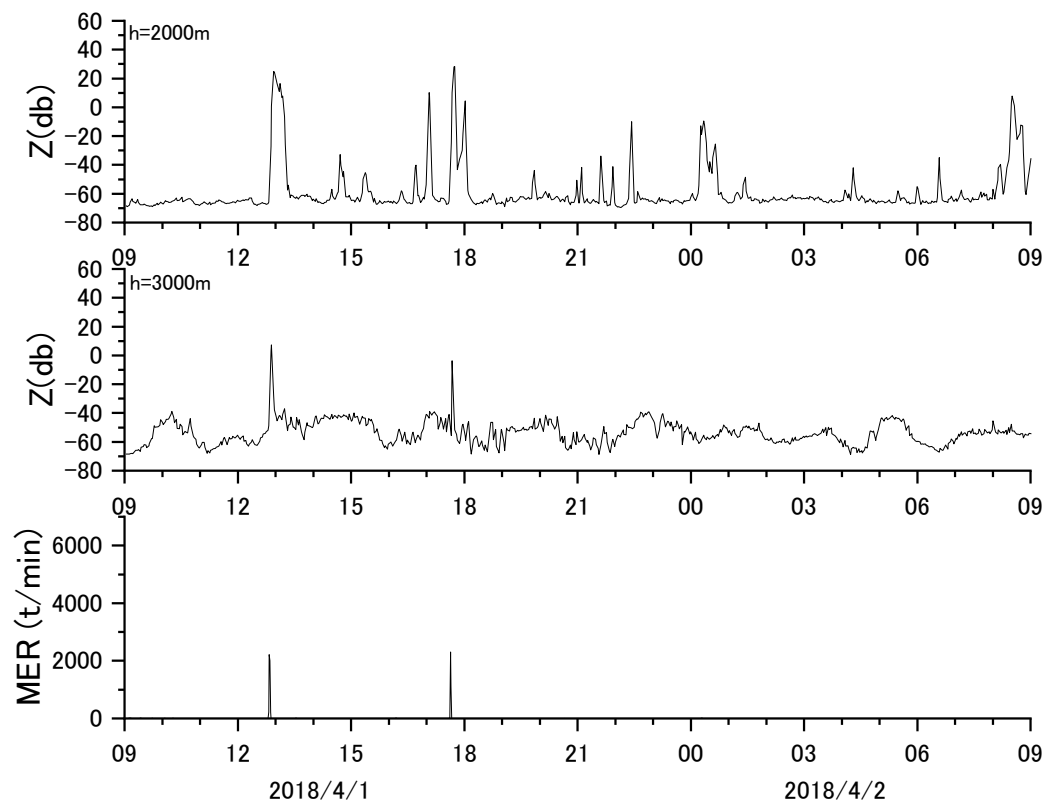


図 99 海拔高度 2000m および 3000m における反射強度の時間変化。3 段目は火山性微動振幅及び圧力源の体積変化から算出した火山灰噴出率。2018 年 4 月 1 日 9 時～翌日 9 時までの時系列を示す。

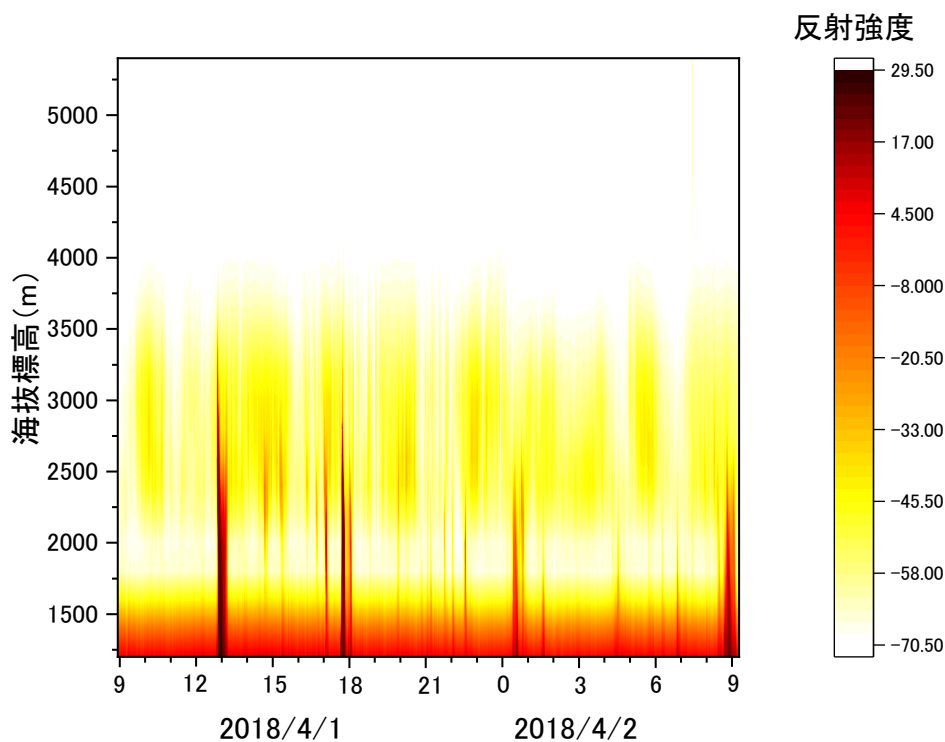


図 100 反射強度鉛直プロファイルの時間変化。2018 年 4 月 1 日 9 時～翌日 9 時まで。

反射強度鉛直プロファイルの時間変化を図 100 に示す。反射強度が強い部分と弱い部分は十分なコントラストがあるので、色の濃い部分の時間変化は噴煙の高度変化を反映して

いるものと考えられる。そこで、反射強度の閾値を設け、閾値を超える高さをレーダー噴煙高度として、その抽出を行った。ここでは暫定的に閾値を 0db とした。レーダー噴煙高度の時間変化を図 101 に示す。レーダー噴煙高度が鹿児島地方気象台による観測値と同程度のものもあるが、レーダー噴煙高度が低いものも多い。特に、噴煙高度が海拔 2000m 以下（火口上 1000m 以下）の場合、その傾向が顕著である。また、図 101 において示したレーダー噴煙高度は火口上の鉛直プロファイルのみを見ているので、風が強く噴煙がなびくときは過少となる。なお、レーダー噴煙高度が 5000m に達し、反射強度が強いときは多量の水滴を含む雨雲が桜島上空にある時である。この場合、遠望観測はできないことが多い。このような状況では、火山性微動振幅及び圧力源の体積変化から算出した火山灰噴出率のみが有効である。

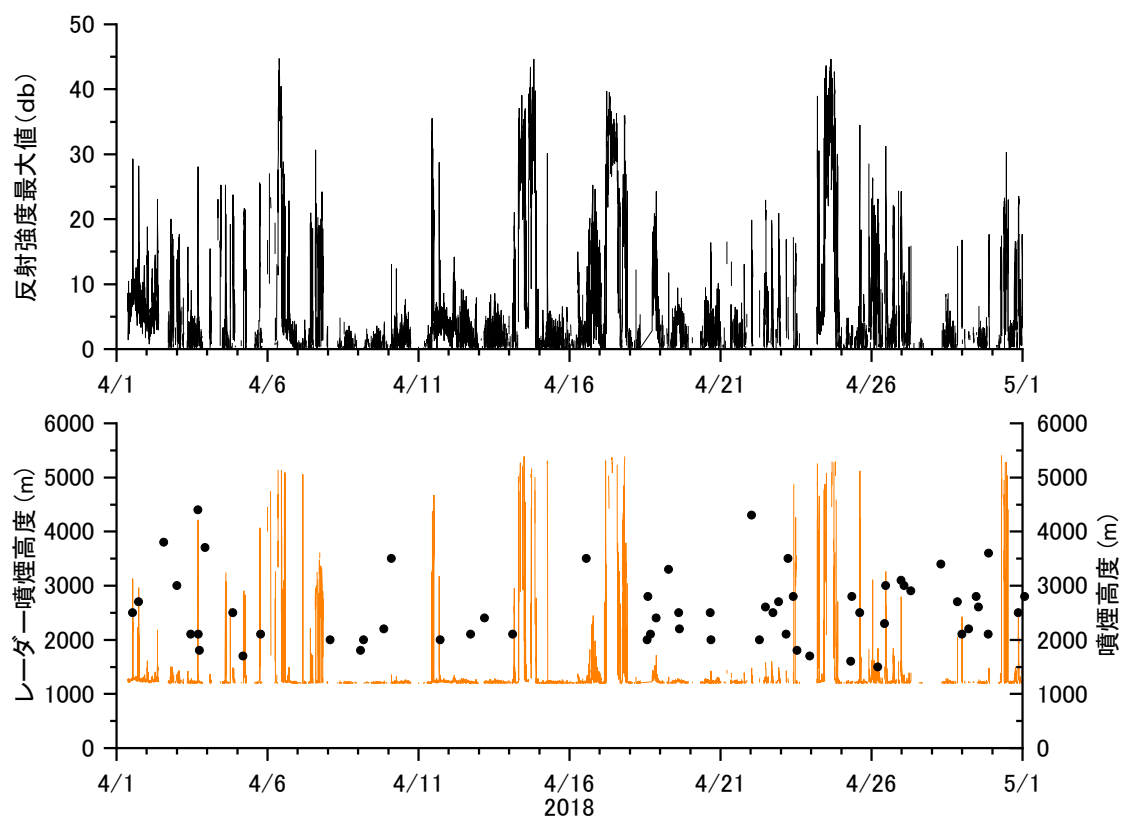


図 101 レーダー観測から求めた鉛直プロファイル上の反射強度の最大値とレーダー噴煙高度。●は鹿児島地方気象台による観測値。噴煙高度は海拔高度としてプロットした。

c) 風速場の時系列

火山灰粒子の移流は風速場に制御されるので、風速場の把握は必須であるが、4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発、b) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーションにおいて述べたように、火山近傍における火山灰粒子の移流予測のためには風速場を高分解能化する必要がある。一方、WRF を用いた高分解能の風速場の計算には時間を要するため、噴出率や噴煙高度のように逐次得ることができない、そこで、過去の気象モデルに遡り、2018 年と 2019 年について高分解能風速場データベースを作成した。風速場の分解能は 100m である。計算された高分解能風速場データベースは膨大であるので、ここではその一例を示

す。

図 102 は南岳の南東 0.5km、高度 1000m 付近における 2019 年 9 月～12 月の風速場である。水平風は概ね 20m/s 以下であるが、9 月下旬には風速 40m/s を超えた。このときは、はじめ上昇風、その後、下降風が強くなった。鉛直風についてみると下降風が卓越していることがわかる。

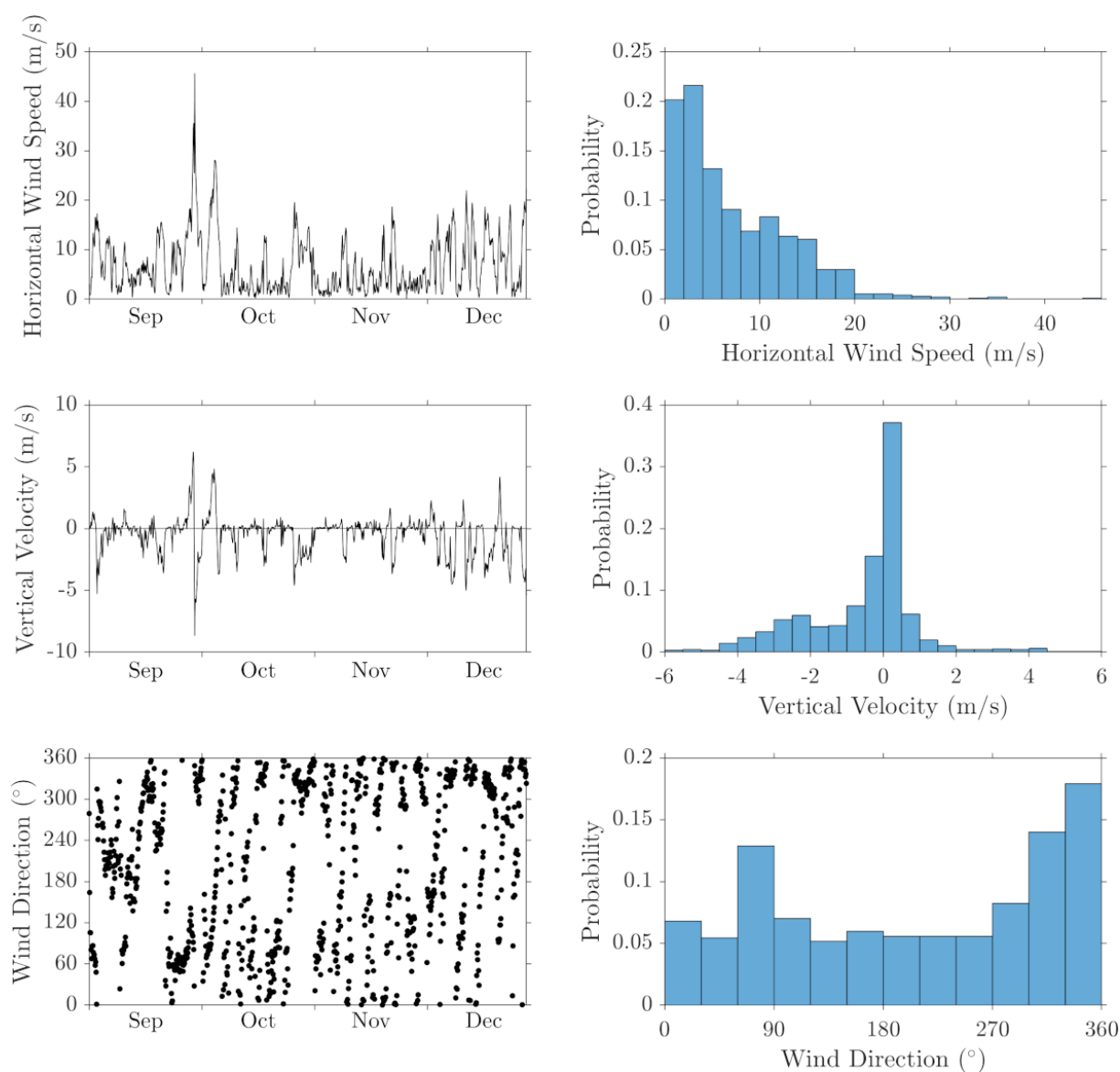


図 102 南岳の南東 0.5km、高度 1000m 付近における 2019 年 9 月～12 月の風速場。左列は上から水平風、鉛直風、風向である。右列はそれらの確率分布を示す。

気象モデルや地上気象観測から得られる現在の気象場に類似した気象場を検索する手法を検討した。類似した気象場がわかれば、それに対応する高分解能風速場をデータベースから抽出すればよい。気象モデルで表現される桜島周辺の格子点における風速と風向の類似性を考えればよい。現在の風速場を $v_{0,k,j}$ (ここで $k=1, 2, 3$ 、それぞれ東西、南北、鉛直方向。 j は j 番目の格子点) とすると i 番目の過去風速場との残差は以下のように表さ

れる。残差が最小となる過去風速場を探索すればよい。

$$RES(i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^3 (v_{i,k,j} - v_{0,k,j})^2 \quad (5-1)$$

ここで、n は参照する格子点の数である。局地数値予報では、地上での格子点間隔は 2km、気圧面は 4km なので、10 の気圧面を参照するとしても桜島周辺に限れば 100 個以下の格子点の数となる。過去の風速場をすべて検索してもよいが、卓越する風向 8 方位により、あらかじめグループ分けしておけば、高速の探索が可能となる。

d) 降灰量の時系列

ディストロメータにより降灰量の観測を行うことは、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、d) ディストロメータによる地上観測に述べたとおりである。ここでは、火山灰の噴出率、レーダーの反射強度、降灰量の関係を検討する。図 103 にこれらの関係を例示する。2018 年 4 月 25 日 9 時～26 日 9 時までには、4 月 25 日 14:48、4 月 26 日 0:48、4:56 の 3 回の爆発が発生している。これらの爆発は噴出率増加のパルスとして識別できるが、レーダー反射強度の増加とディストロメータによる火山灰粒子の検知として現れている。また、噴火には認定されていないが 4 月 25 日 21:50 に噴出率が増加しており、それに対応してレーダー反射強度の増加が海拔 2000m の高度においてみられる。海拔 3000m では変化がないことから噴煙高度は 2000m から 3000m の間であると思われる。

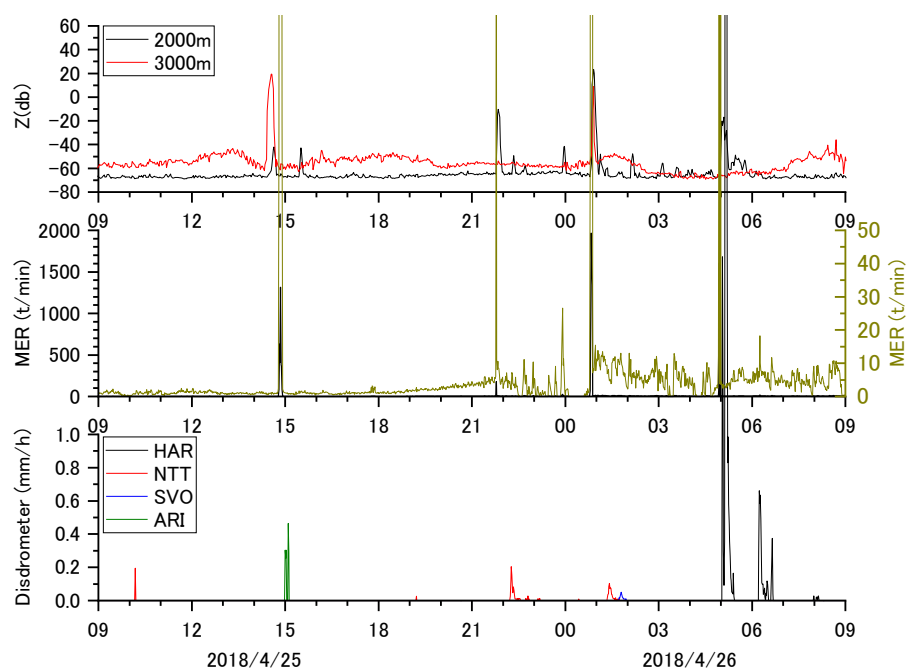


図 103 レーダーの反射強度（海拔高度 2000m および 3000m）、火山灰の噴出率、降灰量の関係。火山灰の噴出率については、拡大したスケールを右軸に示した。

これらの噴火イベントに対応する火山灰粒子は確実に検知されているが、噴火イベントごとに検知される観測点が異なる。4月25日14:48の爆発では観測点ARI（観測点の位置については図22参照）において検出されたが、4月26日0:48の爆発ではNTTとSV0で検出され、4:56の爆発ではHARで多量の降灰があった。このことは、1日の間で風向が大きく変わったことを意味する。

一方で、ディストロメータは、多くの場合、降雨時の雨滴を検知するので、火山灰粒子と水滴の落下を識別する必要がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

本サブテーマでは、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を研究の柱として、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発によって統合化する方針で研究を進めてきた。

XバンドMPレーダーは、比較的噴煙高度の低い諏訪之瀬島における噴火についても噴煙を検出することに成功した。これまで桜島、霧島新燃岳、口永良部島噴火でも噴煙を検知できており、プロジェクト開始以降、4火山について噴煙を検知できたことになる。XバンドMPレーダーによる噴煙観測が実用的な段階になったといえる。また、ディストロメータにより粒径分布が把握できるが、これをリアルタイム降灰量のデータとすることができると同時に、レーダー反射強度と降灰量をつなぐ経験式を高精度化することができた。

ライダー、レーダー、GNSSの異なる波長を用いたリモートセンシング観測を統合した観測システムにより、噴煙を検知するが、様々な火山灰濃度を想定した火山灰観測が可能となった。ライダーはきわめて希薄な火山灰に対しても有効であり、レーダーは桜島において頻繁に発生する規模の噴火の噴煙を検知する。さらに、GNSSはこれら小規模噴火の内、比較的規模の大きいものを検知できており、さらに規模の大きい噴火において活用できることが期待されるが、これまでのところ事例が少ない。

令和2年度から4年度は、これまでのブルカノ式噴火に関する知見を連続噴火に拡張するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を行うが、令和2年度はそのためのデータベースを整備してきた。これらのデータベースは、火山灰噴出率、レーダー噴煙高度、高解像度風速場、降下火山灰量である。2020年までのデータを対象として解析してきたが、データが膨大であるために解析途上である。噴出率の評価については、観測坑道をはじめとする桜島の高精度観測により、かなり実用的なものになった。今後、本手法を他の火山へ展開するにあたって、その場合、地震動による評価を中心として手法を高度化していく必要がある。地震・地盤変動観測から得られる噴出率と噴煙高度は上限を規定することにより、その関係を導くことができた。また、様々な気象条件により、噴煙高度が過大に導かれることがあっても、レーダーの反射強度の火口上での空間分布を用いることにより、誤差を低減させることが可能であることを示した。火山灰拡散シミュレーションには高分解能の風速場データが必須であるが、WRFにより高分解能化された風速場

は、有効であり、特に、山頂を超えた風下側の鉛直運動や鉛直シアを高分解能の風速ベクトル場で表現することにより、火山灰の降下域と降灰量を高精度で予測することに成功した。この成果を連続噴火に適用してシステム化するためには、常に、高分解能の風速場を計算し続けなければならないが、計算時間の長さからリアルタイムで WRF により計算し続けることは現実的ではない。そこで、過去 2 年間の気象モデルに遡り、高分解能の風速場データベースを作成し、現状の風速場に対応した適切な高分解能気象場を抽出する手法を提案した。なお、手法の妥当性は検証されていないので、今後、システム開発の過程において検証していく必要がある。

令和 2 年度から 4 年度に開発する火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを構成する要素のうち、噴出率の算出はかなりロバストであるが、噴出率から評価される噴煙高度は、レーダー噴煙高度と照合して同化することになるが、レーダーは雨雲に対して強い反射強度を示すので、降雨時には使えない。降灰量計として地上における降下火山灰量の検証に使用したいディストロメータも降雨を強く検知するので、同様に使用することができない。最も重要な雨滴が落下する大気場における火山灰粒子の移流拡散については、研究そのものがないので、降雨時の火山灰予測は、当面今後の課題として残される。

本サブテーマでは移流拡散シミュレーターとしてラグランジュ的な手法で、多数の粒子を追跡する PUFF や Tephra2（または、空間 3 次元＋時間変化を考慮した Tephra4D）、オイラー的な手法で、空間格子点における火山灰濃度変化を計算する FALL 3D を使用してきた。いずれの場合でも高解像度の風速場を考慮することにより、予測精度が向上することは証明できた。一方、オンラインシステムでは、リアルタイムで一定時間間隔ごとに噴出率パラメータによって、火口上空に火山灰が追加されるとともに、過去に噴出して移流拡散している火山灰の状態及び、降下した火山灰量を保持し続ける必要があり、それに対応するソフトウェアの改変が必要となる。

(e) 引用文献

- 1) Bertiger, W., Yoaz Bar-Sever, Angie Dorsey, Bruce Haines, Nate Harvey, Dan Hemberger, Michael Heflin, Wenwen Lu, Mark Miller, Angelyn W. Moore, Dave Murphy, Paul Ries, Larry Romans, Aurore Sibois, Ant Sibthorpe, Bela Szilagyi, Michele Vallisneri, Pascal Willis: GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research, *Advances in Space Research*, Volume 66, Issue 3, pp. 469-489, 2020.
- 2) Freret-Lorgeril, V., Donnadieu, F., Eychenne, J., Soriaux, C., Latchimy, T., In situ terminal settling velocity measurements at Stromboli volcano: Input from physical characterization of ash. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, No. 374, pp. 62-79, 2019.
- 3) 井口正人：桜島火山の噴火活動—2012 年 7 月～2013 年 6 月—，桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究，平成 24 年度分報告書，pp. 1-8, 2013.

- 4) 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.
- 5) 気象庁:鹿児島地方気象台, 桜島の噴火についての統計資料, 2020. https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/kazan_top.html
- 6) Maki, M., Takaoka, R., Iguchi, M., Characteristics of particle size distributions of falling volcanic ash measured by optical disdrometers at the Sakurajima volcano, Japan. *Atmosphere*, 2021.
- 7) Poulidis, A. P., and Iguchi, M., Model sensitivities in the case of high-resolution Eulerian simulations of local tephra transport and deposition, *Atmospheric Research*, 247, 105136, 2021.
- 8) Shimizu A, Iguchi M, Nakamichi H.: Seasonal Variations of Volcanic Ash and Aerosol Emissions around Sakurajima Detected by Two Lidars. *Atmosphere*, Vol. 12(3):326, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12030326>
- 9) Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Power, J.G., Duda, M.G., Barker, D.M., Huang, X.Y., A model description of the advanced research WRF model version 4 (No. 980 NCAR/TN-556+STR). Technical Report. National Center for Atmospheric Research. Boulder, 2019. doi:10.5065/ldfh-6p97.
- 10) Suzuki, T.: A Theoretical Model for Dispersion of Tephra, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, 1983.
- 11) Takishita, K., Poulidis, A.P., Iguchi, M.: Tephra4D: A Python-based model for high-resolution tephra transport and deposition simulations - applications at Sakurajima volcano, Japan, *Atmosphere*, 12(3), 331, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12030331>
- 12) [Tanaka, H.L.:](#) Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt Volcano, Alaska. Proc. First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, U.S. Geological Survey, Bulletin 2047, pp. 283-291, 1994.
- 13) [Tanaka, H.L. and M. Iguchi:](#) Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal for Sakura-jima using real-time emission rate estimation, *Journal of Disaster Research*, Vol. 14, No.1, pp. 160-172, 2019.
- 14) [Tanaka, H.L., Nakamichi, H., and Iguchi, M.: 2020:](#) PUFF model prediction of volcanic ash plume dispersal for Sakurajima using MP radar observation, *Atmosphere*, Vol. 11(11), 1240, 2020. <https://doi.org/10.3390/atmos11111240>

(f) 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

名称	機能
Tephra4D (4次元火山灰粒子中心追跡法)	WRFにより高空間分解能化された3次元の風速場とその時間変化を考慮して、2次元 Gauss 分布を仮定した火山灰粒子の中心位置を追跡することにより地上降灰量を評価する。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和3年度の業務計画案

(a) 業務計画、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

霧島、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レーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業も併せて行う。これまでに桜島を取り巻くように設置したディストロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量の時間変化を把握する。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したとき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、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例を得ることにより、その経験的関係式の精度を上げる。また、スキャン頻度が高い船舶レーダーにより噴煙を観測することにより、時間分解能の高い噴煙の上昇および移流・拡散状態を把握する。

これまでに設置したGNSSによる噴煙観測を継続し、解析によって得られるLC搬送波位相残差及びSN比の低下について、噴火様式や噴煙に含まれる水蒸気量と関連付けて検討する。

桜島島内に設置した2台のライダーによる火山灰観測を継続する。ライダーで観測可能な火山灰消散係数の上限を決定した上で火山灰消散係数について気候学的解析を行い、大気環境常時監視局データとの照合を行う。火山灰の輸送拡散数値モデルを検証するためのデータセットを引き続き作成するとともに、消散係数と火山灰噴出量の関係を検討する。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダーが当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、ここで実施する現地観測について、その一部もしくはその全てに代えて緊急観測を実施することを可能とする。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島北西部にあるハルタ山の既設観測井に設置されている地震計及び傾斜計について、本研究への活用のために引き上げ及び改修作業を行う。このことにより、桜島北西部方面の地盤変動及び火山性微動振幅から求められるブルカノ式噴火発生に伴う噴出率見積もり方式を定式化し、これを降灰量分布から求めた噴出量と比較することにより、地盤変動及び火山性微動振幅データから過去に求めた噴出率推定式を高精度化する。また、火山灰噴出率推定式を桜島以外の火山に拡張するために、桜島における広帯域地震記録の超長周期成分の解析を行うとともに、長期間の噴火活動を継続している諏訪之瀬島やインドネシアのシナブン火山の火山性微動を解析し、推定式の拡張性について検討する。

課題 C3 と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを

実行する。これにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させる。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

気象モデル WRF による高分解能シミュレーションおよび分解能を変えたシミュレーションから、火山の地形の影響を受けた拡散場の再現性の評価に基づき、火山灰拡散を精度良く予測するためのシミュレーション条件を評価する。特に、火山地形の影響を受けた鉛直風の影響を適切に取り入れ、火山地形の影響を取り込んだ火山噴煙のモデル化と気象モデルによる予測シミュレーションを実施する。予測精度の検証には、現地で実施される様々な実測データを活用する。

ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度を計測(年2回程度)し、鉛直プロファイルを把握する。取得したデータにより、地上観測機器や気象データとの比較、気象モデルの妥当性評価等を実施する。

火山周辺の気流をさらに高精細化させるため、WRF から得られる気象場を境界条件とし、地形の凹凸、地表面の植生や構造物など気流を乱す粗度の影響を考慮して、非定常な乱流場の計算を行うことのできるキャノピーモデルを用いたラージエディシミュレーションを用いて、噴火時の火山周囲の気流性状を明らかにする。

ディストロメータは火山灰粒子の落下速度も計測できるので、観測された落下速度から見かけの粒子比重を求めることにより、火山灰粒子の凝集の程度をさらに多くのデータを用いて評価する。

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

オンライン化を図るために、データの集約システムを開発する。オンラインで集約されるデータは地震及び地盤変動データから計算される噴出率、レーダー観測により得られる火口直上の反射強度、地上風速データ、ディストロメータ観測による火山灰の粒径・落下速度毎の粒子数である。また、気象モデルの気象場を WRF により高分解能化した気象場データは随時、データベースに追加する。集約システムが完成すれば、課題 A の JVDN が受け入れ可能なものから順次、JVDN へ自動送信を行う。また、気象モデルや地上気象観測から得られる現在の気象場に類似した気象場に対応する高分解能風速場をデータベースから抽出する手法を開発する。さらに、火山灰の移流拡散モデルを噴出率の連続データに対応できるように改良を検討する。

(b) 目標とする成果

令和2年度から4年度は、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を行うので、令和2年度において整備した火山灰噴出率、風速場などデータベースを利用すれば、連続噴火に伴う降灰量の時系列が予測可能となることを事例に沿って証明する。また、リアルタイムで観測される値を自動解析し、データベースに即時追加するシステムを構築する。さらに、既存の火山灰拡散シミュレーションコードを見直し、令和4年度にシミュレーションの連続化・実装ができるように、改良点を抽出する。