次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト

次世代火山研究推進事業

課題Ｄ：火山災害対策技術の開発

令和２年度

成果報告書

令和３年５月

文部科学省研究開発局

国立研究開発法人　防災科学技術研究所

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が実施した令和２年度「課題Ｄ：火山災害対策技術の開発」の成果を取りまとめたものです。

サブテーマ１　無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発

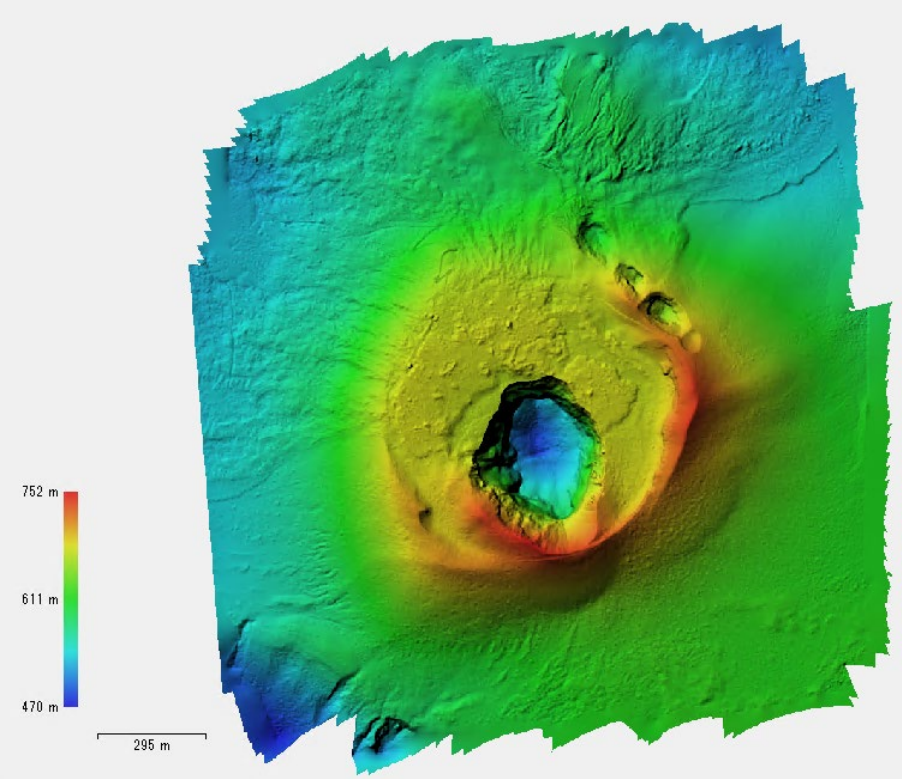


図１－１　RTK-GNSS 搭載 UAV で作成した伊豆大島山頂部の３次元地形データ

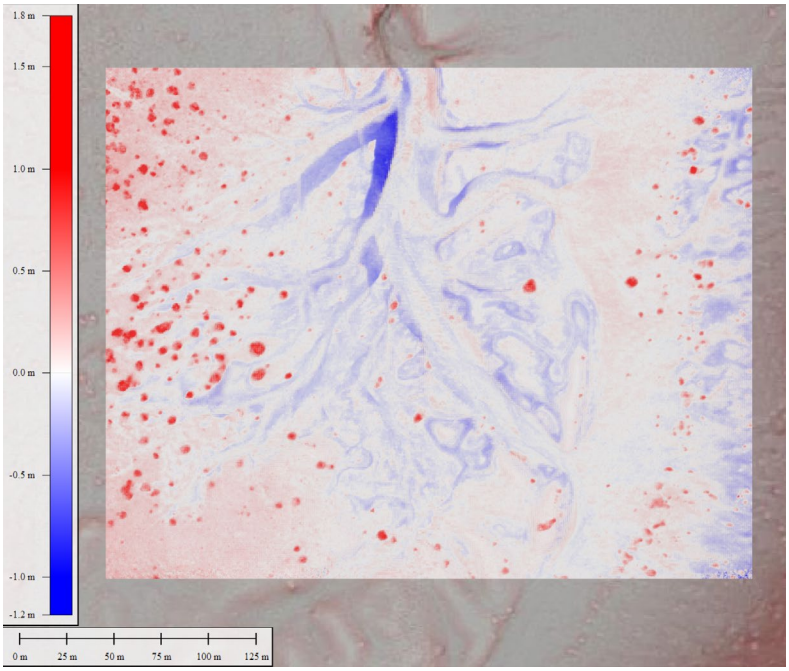


図１－２　伊豆大島裏砂漠の台風 15 号前後の地形比較（DEM と DSM の差分結果）

サブテーマ２　リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発

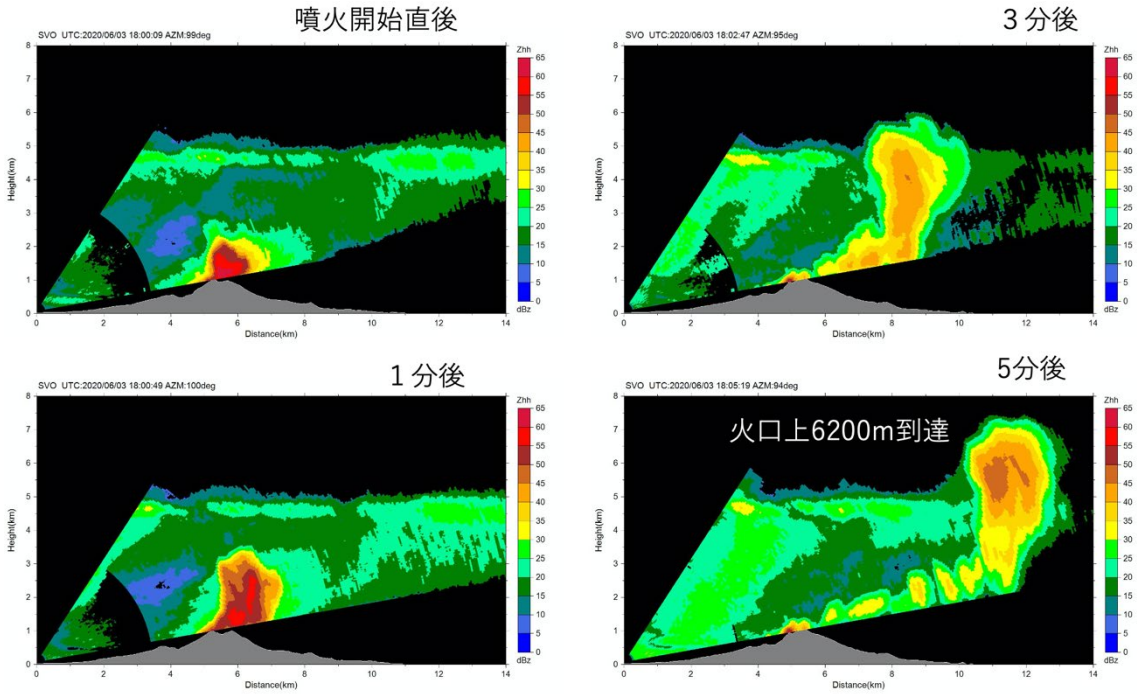


図２－１　桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンの反射強度分布。2020 年 6 月 4 日 3:00～3:04 の噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

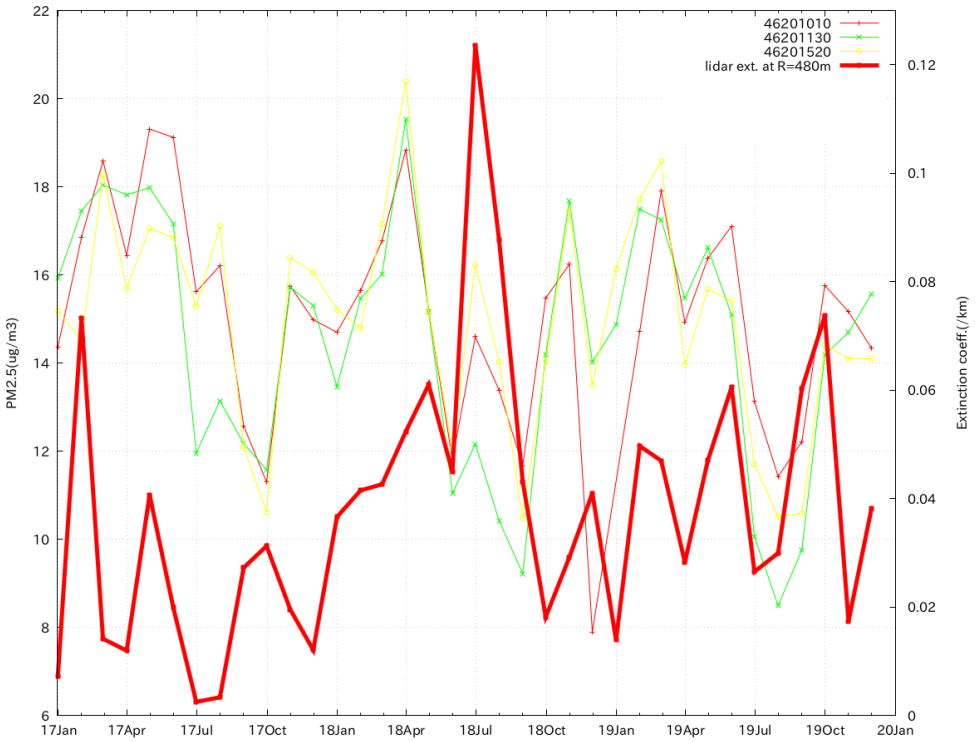


図２－２　大気環境常時監視局における月平均 PM2.5 （左軸）および SVO ライダーの視線方向

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。

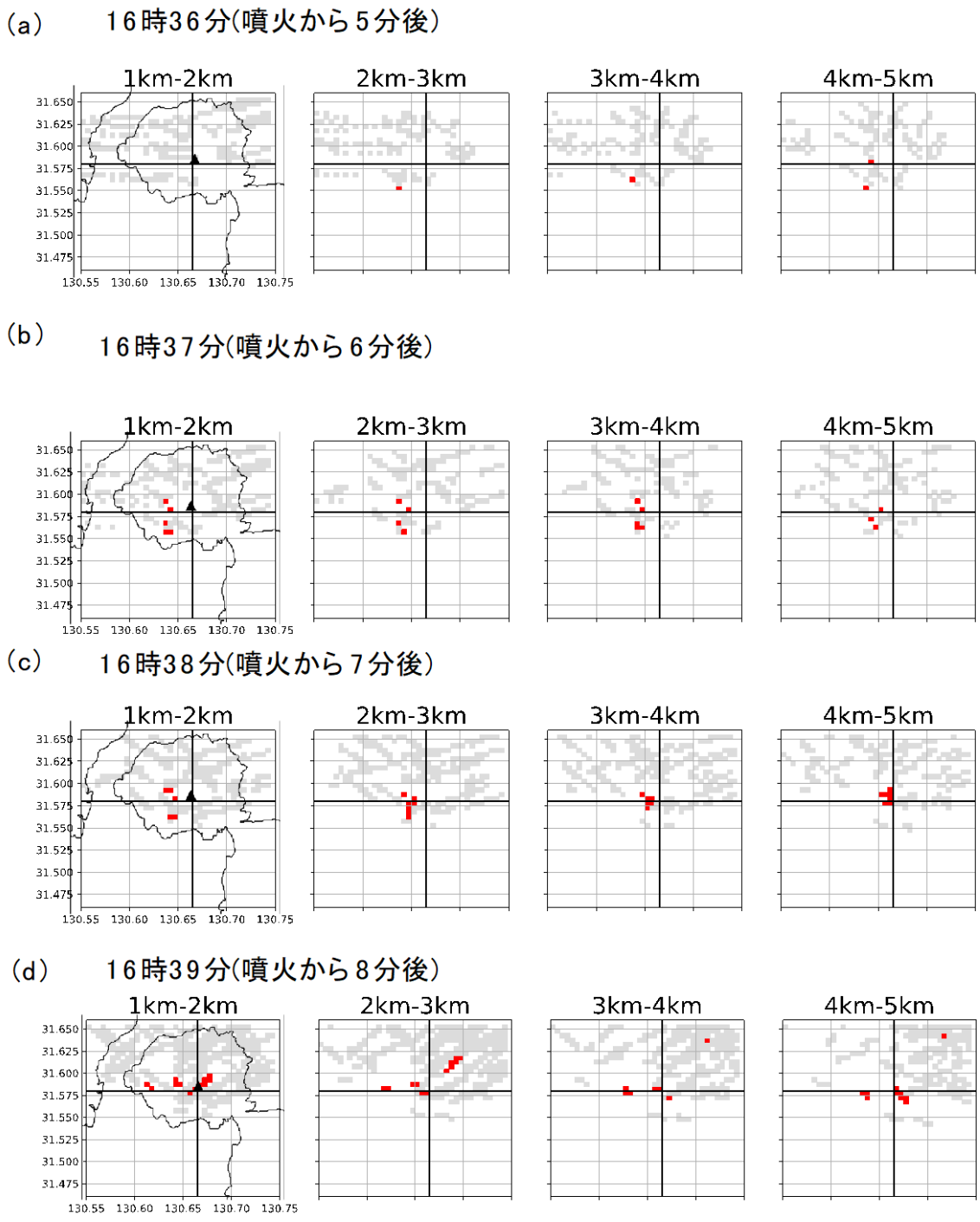


図２－３　LC-PPR が異常を示したグリッドの時空間分布（2013 年 8 月 18 日噴火)。異常を示すパスのみが存在するセルを赤色、異常を示さないパスが 1 つでも存在するセルを灰色、パスが存在しないセルを白色でそれぞれ示す。黒線が交差している箇所が昭和火口の位置を示す。

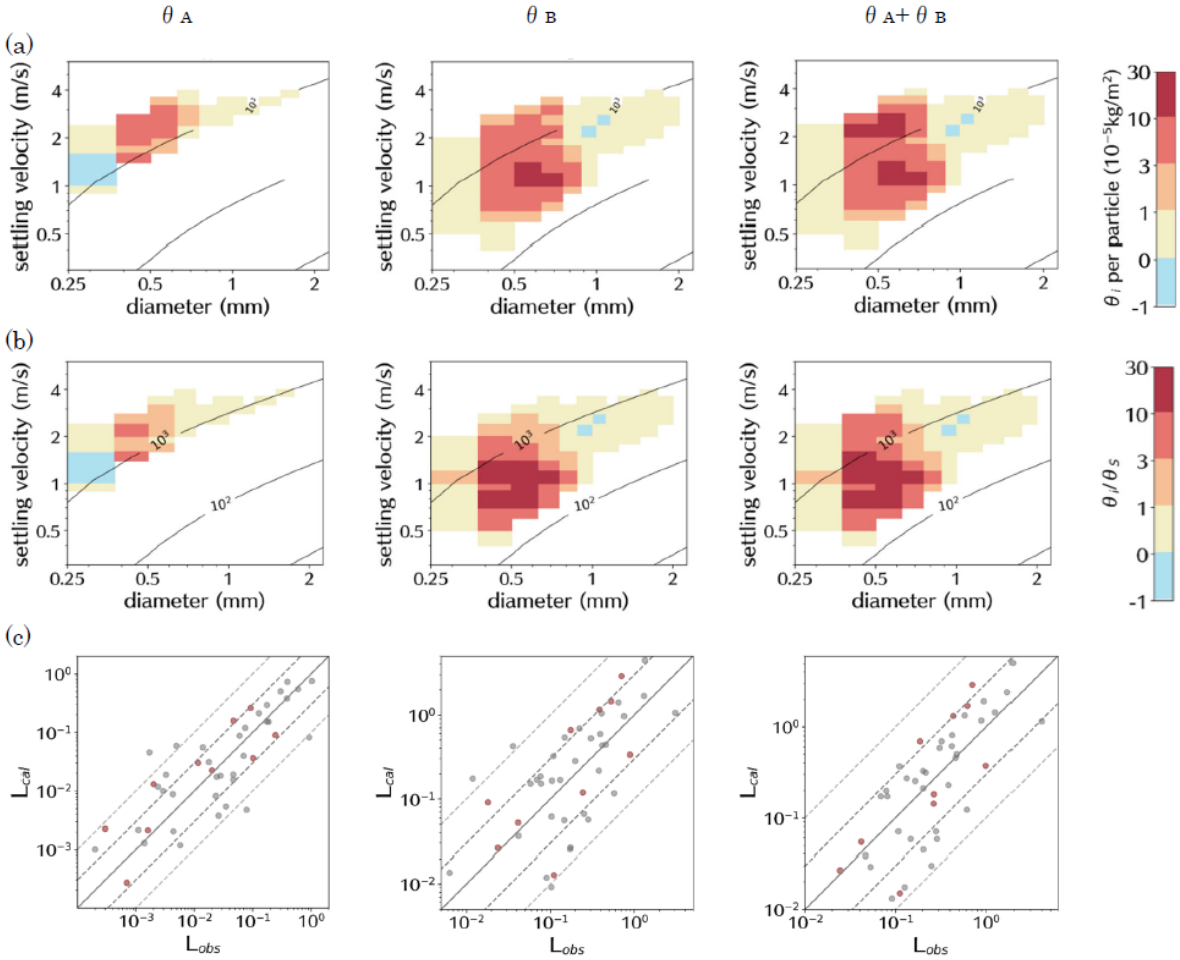


図２－４　(a) θ の粒径―落下速度分布、(b) θ / θ s の粒径―落下速度分布。等値線は Suzuki(1983)により計算される粒子の実効密度。(c) L_{obs} and L_{cal} の関係。単位は kg/m^2。実線は $w_{cal}=w_{obs}$ を、濃い破線は $w_{cal}=0.3w_{obs}$ と $w_{cal}=3w_{obs}$ を、薄い破線は $w_{cal}=0.1w_{obs}$ and $w_{cal}=10w_{obs}$ を表す。

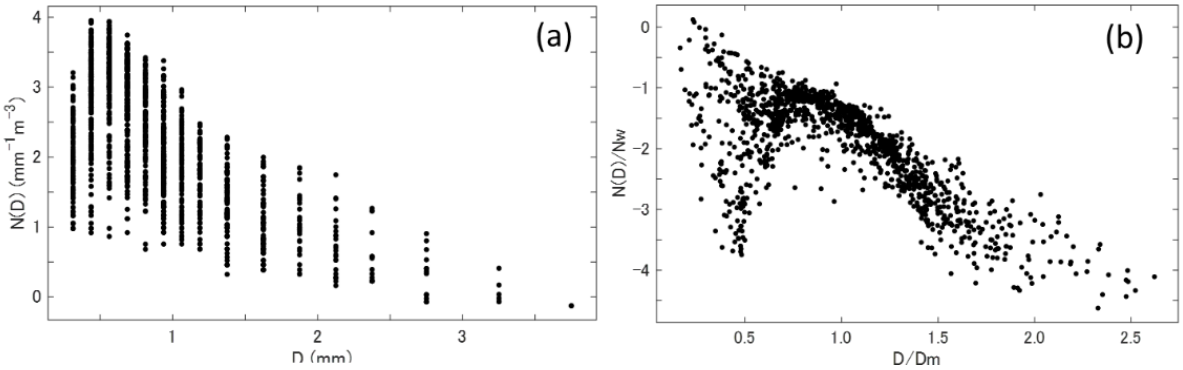


図２－５　規格化する前(a)と後(b)の PSD

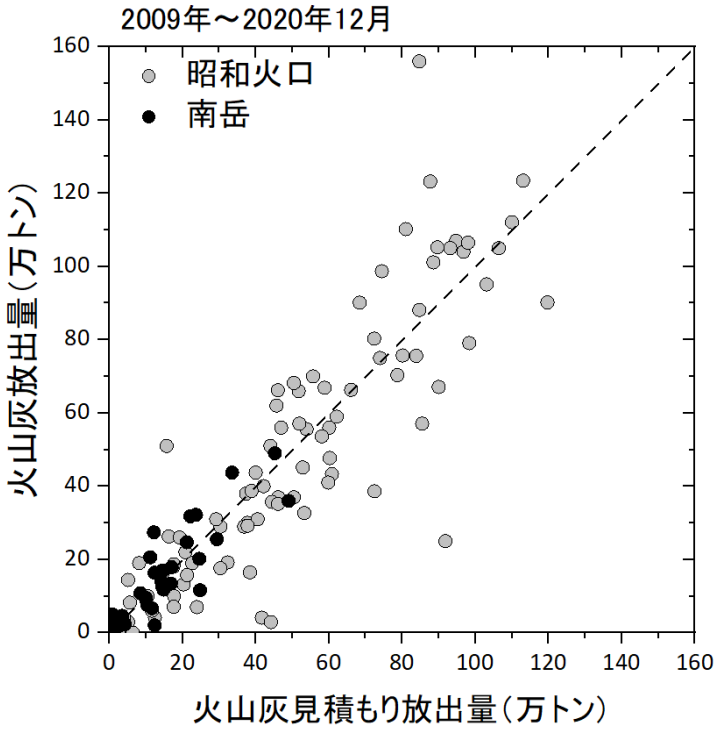


図２－６　2009 年 1 月から 2020 年 12 月までの 12 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

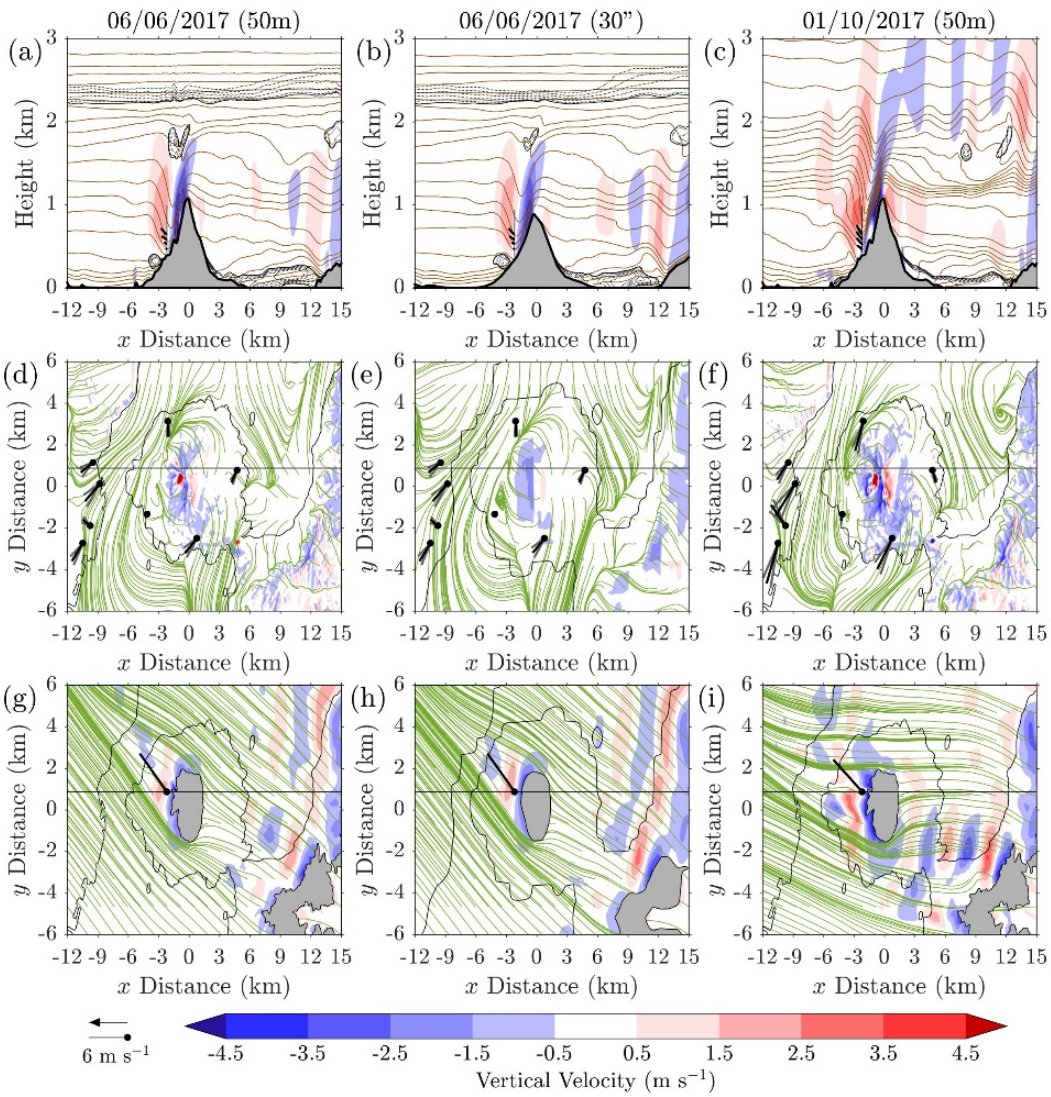


図２−７　シミュレートされた気流場と観測された風（ただし 0600-0900 JST の 3 時間平均）。（a），（d），（g）6 月事例（50 m メッシュ DEM の場合），（b），（e），（h）6 月事例（30 秒メッシュ DEM の場合），（c），（f），（i）10 月事例（50 m メッシュ DEM）。1 列目：ドップラーライダー観測地点を通る鉛直断面での鉛直風（カラーシェード；青は下降、赤は上昇）、等温線（茶色）、ドップラーライダー観測風（ベクトル）。2 列目：地上での鉛直風（カラーシェード）、流線（緑色）、地上観測風（ベクトル）。3 列目：2 列目の図と同様であるが、海抜高度 600 m での場を示す。

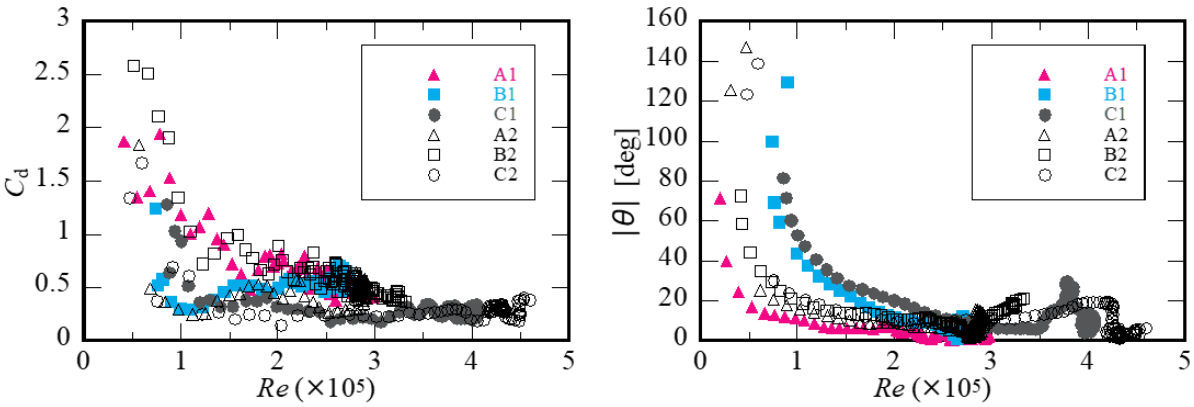


図２－８　空力特性

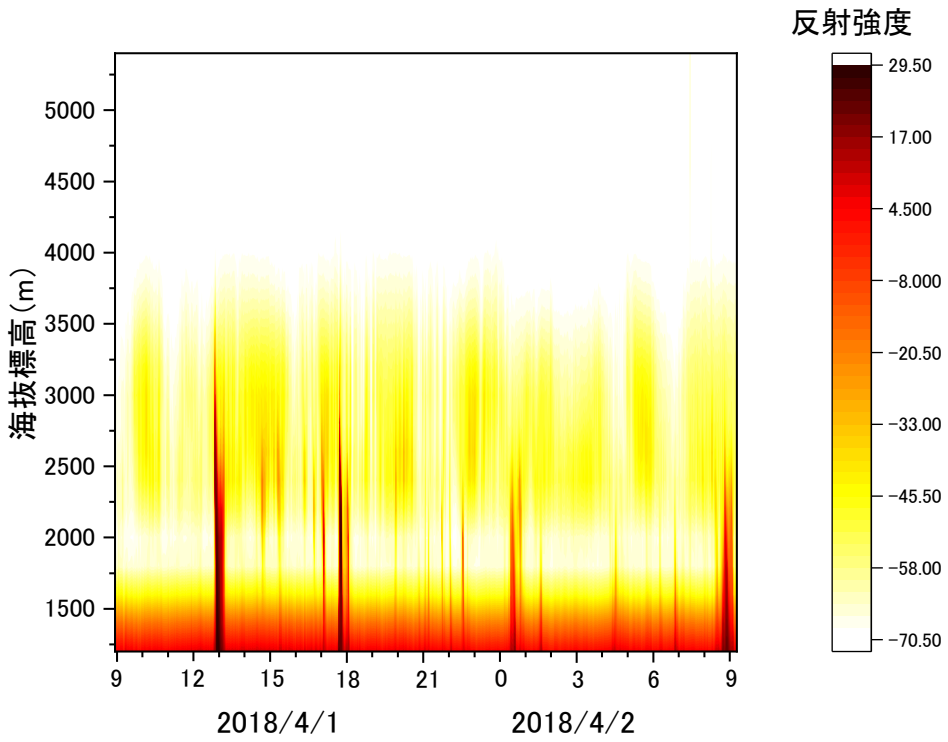


図２－９　反射強度鉛直プロファイルの時間変化。2018 年 4 月 1 日 9 時～翌日 9 時まで。

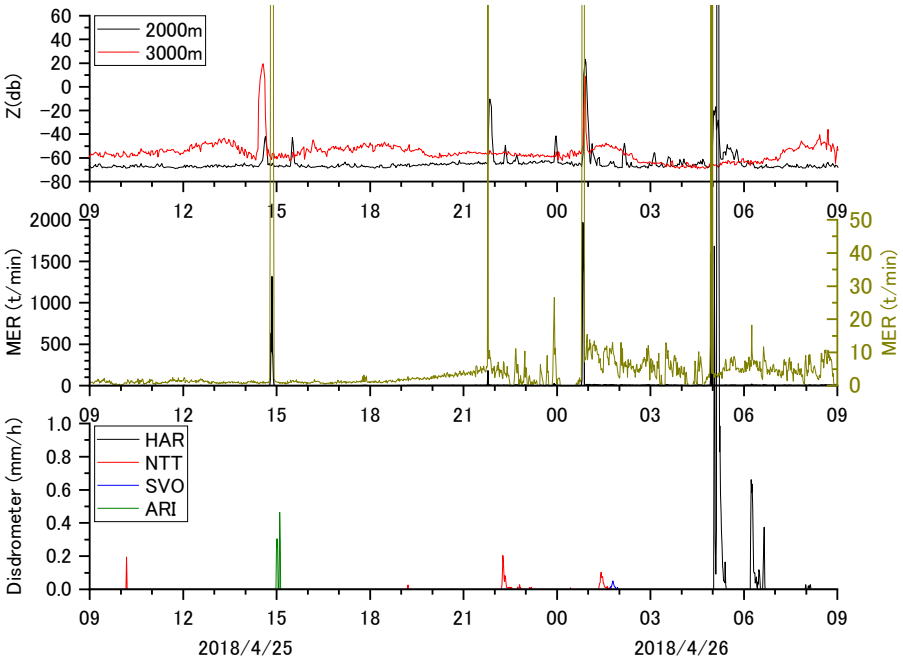


図２-10　レーダーの反射強度（海抜高度 2000m および 3000m）、火山灰の噴出率、降灰量の関係。火山灰の噴出率については、拡大したスケールを右軸に示した。

サブテーマ３　火山災害対策のための情報ツールの開発



図３−１　周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化のために改修したページ（左）。2020 年 3 月に公表された富士山噴火による小規模溶岩流のシミュレーション動画（右）



写真３−１　本研究で作成したテキストを活用した自治体担当者の演習（左）と図上訓練（右）の様子

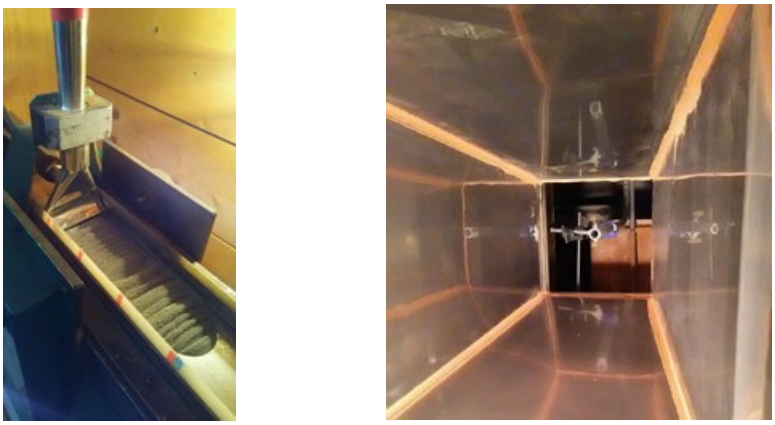


写真３−２　本年度の降灰実験で使用されたダストフィーダーの仕組み。左）火山灰の吸い込み口が上から伸びてきている（桜島火山灰を使用)。右）フィルター側から見た風路内への火山灰噴出口（写真中央)。

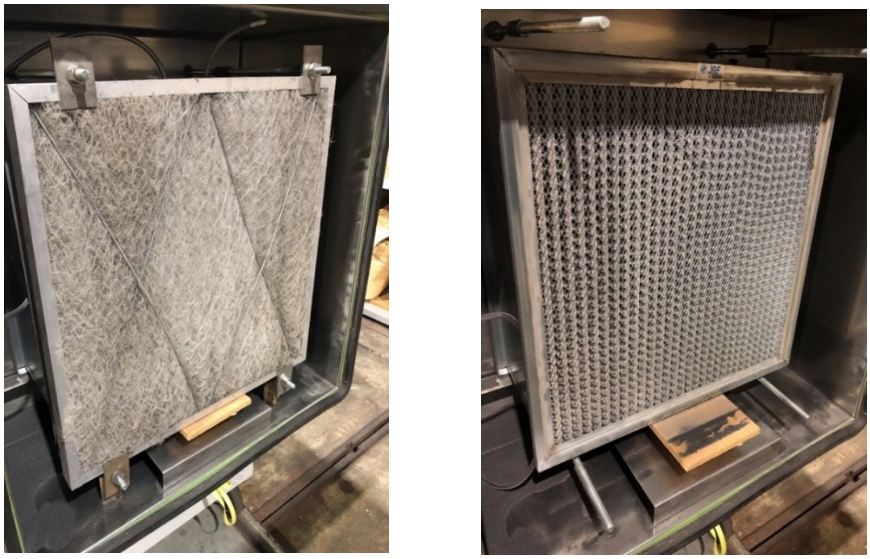


写真３−３　試験終了後のプレフィルタ（左）と中性能フィルタ（右）

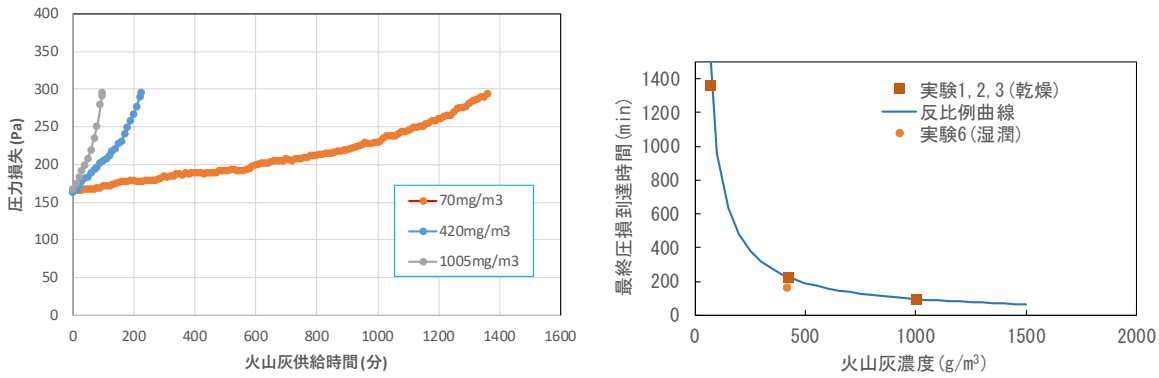


図３−２　火山灰供給時間と圧力損失(左)、および、火山灰濃度と中性能フィルタ要交換圧損（最終圧損)までの所要時間(右)との関係

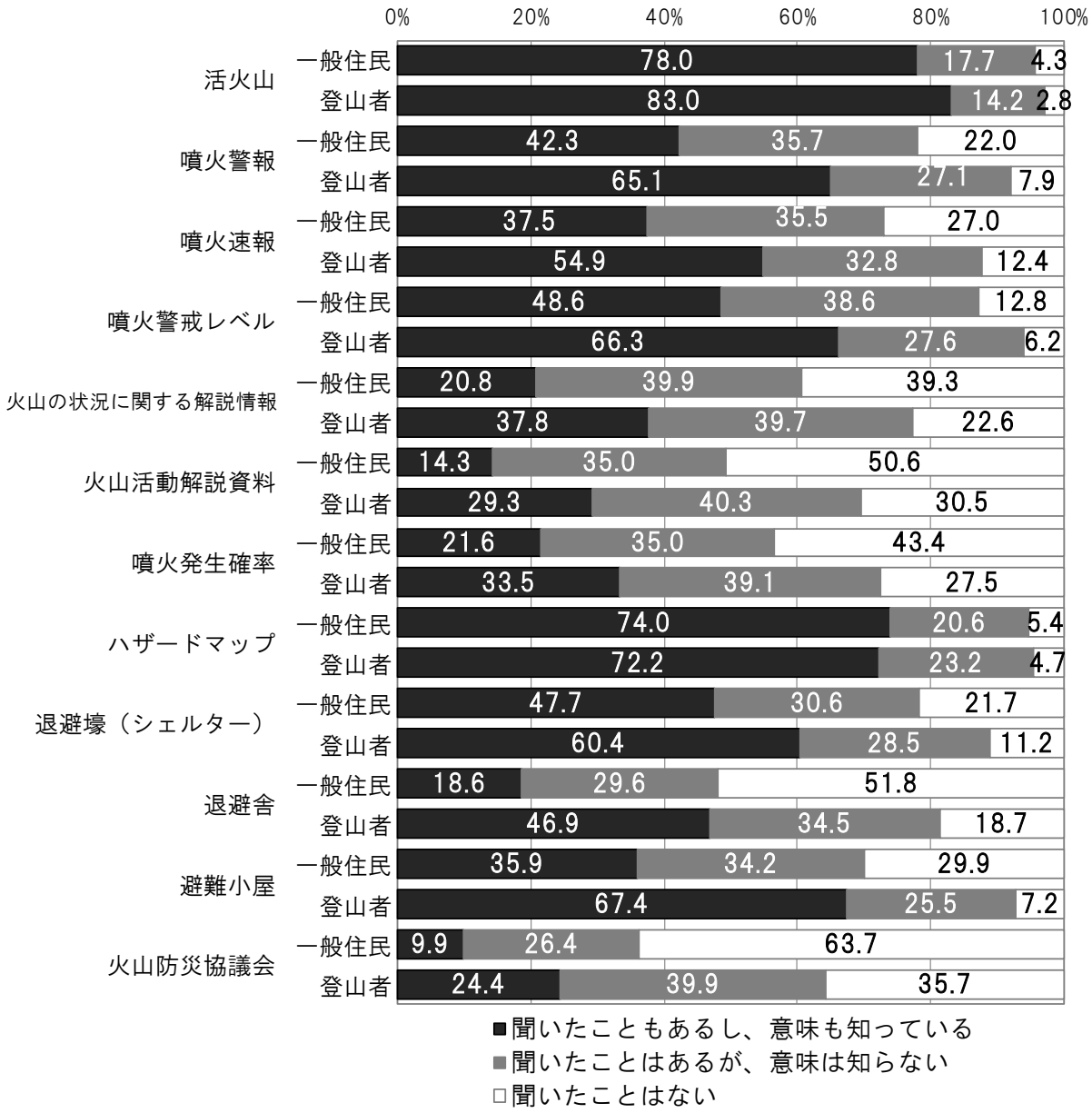


図３－３　Web アンケートによる火山情報の認知状況（調査対象者：一般住民 5,000 名、登山者 2,000 名）



写真３−４　登山者動向把握のために那須岳で実施した登山者へのビーコン配布の作業風景（左）と配布したビーコン（右）。

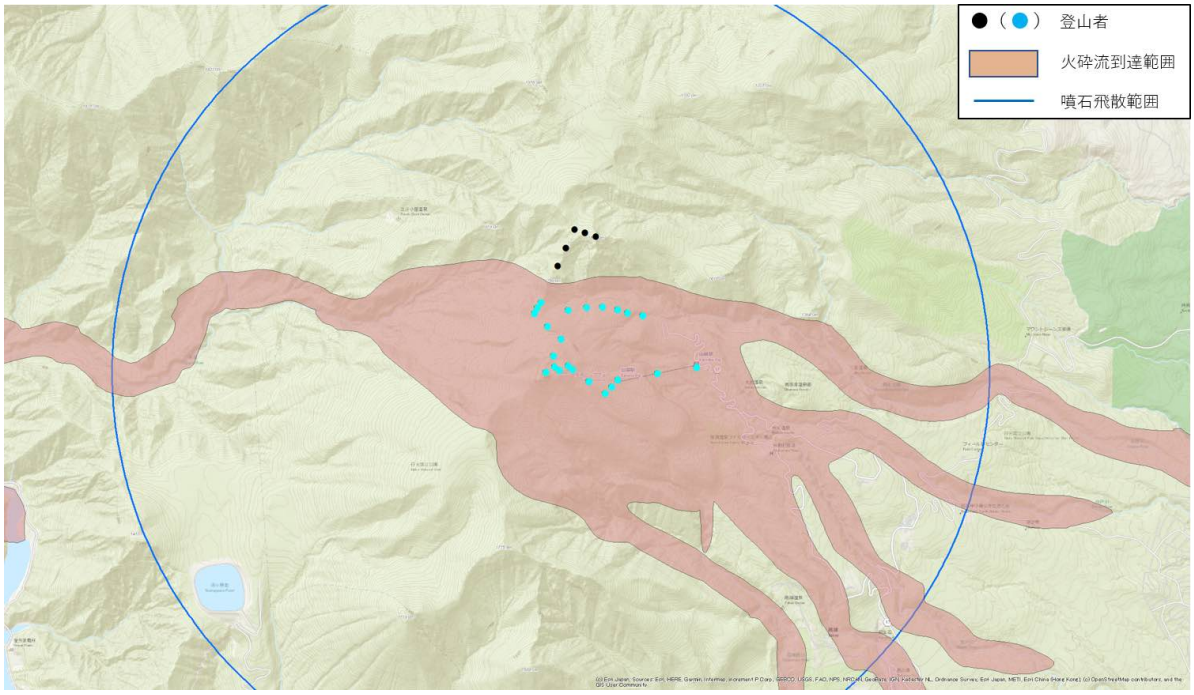


図３−４　那須岳ハザードマップ上に示した 2020 年 10 月 3 日 12 時 00 分時点の登山者情報。黒丸と青丸は登山者 539 名のおおよその位置。ハザードマップの火砕流到達領域内の登山者（300 名）が青丸。

はじめに

日本では火山観測研究が始まってから、火山爆発指数が４以上の大きな噴火をまだ経験したことがない。災害に絡む火山現象の予報は気象庁が行うことが気象業務法によって定められている。大学や国立研究開発法人等の研究者は、火山災害の軽減のために火山噴火予測技術の高度化を目指して研究を進めており、これまで、火山噴火予知連絡会に参画するとともに、気象庁が行う火山現象の予報業務に活用する技術の向上に貢献してきた。一方、それぞれの活火山に設置されている火山防災協議会では、気象庁から出される噴火警戒レベルに応じて、当該火山のハザードマップや火山専門家等の意見を考慮し、入域禁止の設置や避難行動などの対策を事前に定めている。このような警報から対策に直結する仕組みは活火山を抱える諸外国にはみられないユニークな特徴である。気象庁から出される噴火警戒レベルは火山の活動度の評価であって、想定される噴火のハザードやリスクを考慮した被害評価ではない。本来、火山周辺の住民や登山者への安全や利益を守るためには、噴火ごとに、ハザード評価とリスク評価を経た上で、住民の生活を守りながら安全な対策をとるのが好ましい姿であると考えられる。そのためには、日本で最近体験していない規模の大きな噴火のハザード予測を含めて、本プロジェクトの研究成果をもとに、気象庁や地方自治体など、防災対策を行う側がリスク評価や判断に役立つ、噴火ハザードに関する情報を提供できることが望ましい。

本研究課題では、火山災害に対応するため、リアルタイムで噴火の状況を把握するとともに、そのデータを迅速に解析し、その後の推移予測とハザード・被害評価、さらには対策に資する情報の提供までを一連で行う技術を開発する。そのため、本研究が目指す観測データを一元化するとともに、観測から予想される現象や被害をいち早く把握・予測し、分かりやすい情報を防災機関や関係する火山専門家に提供する。それによって、防災関係機関がこれらの情報を、噴火警戒レベルに加味して、防災対策に生かすという速やかな連携が可能となる。さらに、噴火の観測結果や予測結果から、現状が当該火山の噴火事象系統樹のどこに位置するのか、今後どのように展開するのか、その過程でどのような被害がありうるのかも含めて、情報提供することも重要であり、そのための情報ツールを開発する必要がある。これらは課題Ｄの目的であると同時に、本プロジェクト全体のアウトプットとしても極めて重要である。

サブテーマ１では、噴火発生前後からドローンなどの無人機を用いて火口付近の地形や噴出物に関するリアルタイムの災害情報を取得する技術を開発し、それによって取得した情報や解析の結果を他課題の研究者と共有できるように準備する。サブテーマ２では、桜島火山をケーススタディとして、噴火前の観測データや気象情報から、予想される噴火に伴う火山灰の移動拡散・浮遊や降灰のリスクを事前に予想し、それを災害対策に活かす研究を進める。そこでは、噴火に先立って蓄積される地震エネルギーや膨張量から噴火の規模を推定し、現場で取得する気象情報から降灰予測モデルを準備する。サブテーマ３では、これらの観測や予測情報に加えて、課題Ａで整備するプラットフォームを用い、防災関係者（自治体や火山防災協議会に参加する専門家）が必要とする火山ハザードやリスク情報、火山噴火に対する知識を提供するためのツール開発を行う。

目　次

グラビア
はじめに

１．研究概要の説明　3

（１）　研究者別の概要　3

（２）　研究実施日程　6

２．研究成果の説明
２．１　無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発
(1) 業務の内容
(a) 業務題目　9
(b) 担当者　9
(c) 業務の目的　9
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）　10
(e) 令和２年度業務目的　12
(2) 令和２年度の成果
(a) 業務の要約　12
(b) 業務の実施方法　12
(c) 業務の成果　14
(d) 結論ならびに今後の課題　47
(e) 引用文献　47
(f) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定　47
(3) 令和３度の業務計画案
(a) プロジェクトの総合推進　48
(b) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速　48
(c) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発　48
(d) SfM/MVS 計算時間の短縮　48

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　49
(b) 担当者　49
(c) 業務の目的　49
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）　50
(e) 令和２年度業務目的　51

(2) 令和２年度の成果
(a) 業務の要約 53
(b) 業務の実施方法 53
(c) 業務の成果 55
(d) 結論ならびに今後の課題 161
(e) 引用文献 162
(f) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定 164
(3) 令和３度の業務計画案
(a) 業務計画、実施方法 166
(b) 目標とする成果 166

２．３　火山災害対策のための情報ツールの開発
(1) 業務の内容
(a) 業務題目 167
(b) 担当者 167
(c) 業務の目的 168
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 168
(e) 令和２年度業務目的 171
(2) 令和２年度の成果
(a) 業務の要約 172
(b) 業務の成果 172
(c) 結論ならびに今後の課題 214
(d) 引用文献 215
(e) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定 216
(3) 令和３度の業務計画案
(a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化 216
(b) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化 216
(c) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化 217

３．会議録 218

４．むすび 220

別添　学会等発表実績

１．研究概要の説明

課題Ｄサブテーマ１では“噴火時の迅速性”の実現のため、無人機を利用して火山災害をリアルタイムで把握する技術を開発する。この技術によって噴火時においてアクセス困難な場所へ無人機を投入することにより、現場の情報をリアルタイムで取得し、火山災害対応や対策等に資するデータを提供することが可能になる。

課題Ｄサブテーマ２では、観測から予測、対策への一連の流れを具体化するケーススタディとして､桜島の噴火による火山灰ハザードをリアルタイムで評価する手法を開発する。最終的には噴火発生前の確率的火山灰予測システムを完成させ､24 時間以内に地点毎の降灰確率を提示することが可能になる。

課題Ｄサブテーマ３では、課題Ａ（各種観測データの一元化）で開発される一元化共有システムのデータベースに保存される観測データや課題Ｂ(先端的な火山観測技術の開発)、課題Ｃ（火山噴火の予測技術の開発)、及び課題Ｄサブテーマ１、２で得られる解析結果等の研究成果を活用し、火山災害に関わる自治体の防災担当者らが、災害発生時に適切な初動対応及び防災活動を行うことを支援するための「火山災害対策のための情報ツール」を開発する。この情報ツールにより、自治体等が災害予防及び被害拡大防止に必要な行動をとるための科学的根拠に基づく情報を得ることが可能になる。

（１）研究者別の概要

サブテーマ１

所属機関・ 部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概 要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	間接 経費
アジア航測株式会社 先端技術研究所 室長 国土保全技術部 課長 システム開発部 課長 国土保全技術部 システム開発部	 千葉　達朗 佐々木　寿 野中　秀樹 成毛　志乃 三浦俊介 江川　香 森　貴章 望月　拓実 泉田　温人 浦山　利博	【サブテーマ１】 サブテーマ１の研究課題の実施および総合推進を行った。 サブテーマ１の無人機を利用して火山災害をリアルタイムで把握する技術の高度化の研究を行い､伊豆大島の実証実験を通じて、取得データの高精度化および解析処理の迅速化に寄与する研究を進めることができた。	R2.4.1～ R3.3.31	6,065,712	1,399,780

サブテーマ２

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
京都大学・防災研究所・教授	井口　正人	【サブテーマ２】サブテーマ２の研究テーマを総合的に推進した。このうち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度化技術開発、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発の研究を行い、火山灰予測を高精度化させた。	R2.4.1～R3.3.31	58,256,227	13,443,744
同・准教授	中道　治久	レーダーによる噴煙観測を行い、噴煙検知においてこの手法の妥当性を証明した。	R2.4.1～R3.3.31		
同・准教授	為栗　健	火山性微動の観測を行い、噴出率の見積もりを高精度化させた。	R2.4.1～R3.3.31		
同・助教	山本　圭吾	地盤変動観測を行い、噴出率の見積もりを高精度化させた。	R2.4.1～R3.3.31		
同・助教	山田　大志	火山性微動、地盤変動、空気振動観測を多角的に行い、見積もりを高精度化させた。	R2.4.1～R3.3.31		
同・教授	石川　裕彦	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、風速データの精緻さの必要性を証明した。	R2.4.1～R3.3.31		
同・准教授	竹見　哲也		R2.4.1～R3.3.31		
同・研究員	Alex Poulidis		R2.4.1～R3.1.31		
同・教授	丸山　敬	噴石模型落下実験を行い、粒子の大気中移動シミュレーションに必要な基礎パラメータの値を得た。	R2.4.1～R3.3.31		
同・特定教授	山路　昭彦	ドローンによる上空の風速ベクトルと火山灰・ガスの観測を行い、風速場の高精度化の観測データを取得した。	R2.10.1～R3.3.31		
同・特定准教授	佐々木寛介		R2.4.1～R2.9.30		
同・准教授	志村　智也		R2.4.1～R3.3.31		
同・リサーチアシスタント	瀧下　恒星	ディスドロメータの観測を行い、降灰量	R2.4.1～R3.3.31		

		の高精度化を図るとともに、シミュレーション手法を高度化させた。			
以下、参加機関 鹿児島大学・特任教授 同・外来研究員	真木　雅之 Dong-In Lee	レーダーの反射強度と降灰の粒径分布の関係を検討し、両者の間の理論式に道筋をつけた。	R2.4.1～ R3.3.31	2,738,765	632,022
以下、研究協力機関 筑波大学・教授	田中　博	火山灰拡散シミュレーション（PUFF）を行い、予測精度を向上させた。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－
神戸大学・教授	大石　哲	レーダーの反射強度と降灰の粒径分布の関係を検討し、両者の間の理論式に道筋をつけた。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－
東北大学・教授 同・准教授 同・修士学生	西村　太志 太田　雄策 朝倉由香子	GNSSデータを解析し、噴煙の空間分布を明らかにした。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－
東京大学・准教授	鈴木雄治郎	噴煙シミュレーションを行うことにより、噴出率と火山灰拡散の関係を明らかにした。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－
国立環境研究所・主任研究員	清水　厚	ライダー観測を行うことにより、桜島周辺の噴火活動に伴うエアロゾルの経年変化を明らかにした。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－
日本気象協会・主任研究員	井上　実	ドローンによる上空の風速ベクトルと火山灰・ガスの観測を行い、風速場の高精度化の観測データを取得した。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－
三菱スペース・ソフトウェア(株)（鹿児島大学)・博士学生	小堀　壮彦	レーダーの反射強度と降灰の粒径分布の関係を検討し、両者の間の理論式に道筋をつけた。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－

サブテーマ３

所属機関・ 部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	間接 経費
国立研究開発法人　防災科学技術研究所　火山研究推進センタ	中田 節也	【サブテーマ３】 サブテーマ３の研究課題の総合推進および課題 D 全体のとり	R2.4.1～ R3.3.31	7,742,907	1,786,824

ー　センター長 研究統括 研究員 客員研究員 客員研究員	 宮城 洋介 棚田 俊收 宮村 正光 中村 洋一	まとめを行った。 サブテーマ３の避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化の研究を行い、那須岳における登山者の動向把握を行い、可視化した動態データを周辺自治体の防災担当者らと共有できた。			
株式会社大林組 技術本部 技術研究所 上級主席技師 上級主席技師 主任研究員	 野畑 有秀 大塚 清敏 諏訪　仁	サブテーマ３の降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化の研究を行い、換気用フィルタの降灰実験を通じて、その影響評価が可能となった。また、大規模降灰による建築屋根への降灰影響評価を行った。	R2.4.1～ R3.3.31	9,714,597	2,241,830
山梨県富士山科学研究所 主幹研究員 主幹研究員 主任研究員 研究員	 吉本 充宏 石峯 康浩 本多 亮 久保 智弘	サブテーマ３の周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化研究を行い、潜在的なニーズ対応するべく開発を行った。また、降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化研究においてパソコンの降灰影響を確認した。さらに、避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化研究を行い、登山者のための退避壕等の耐久性評価を得た。	R2.4.1～ R3.3.31	7,779,748	1,795,326
東京大学大学院情報学環　総合防災情報研究センター 特任教授	 田中　淳	サブテーマ３の降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化研究を行い、一般住人対しての大規模降灰に関するアンケート調査を通じて、降灰現象に関しての情報発信上の課題を得た。	R2.4.1～ R3.3.31	4,912,689	1,133,697

(2) 研究実施日程

サブテーマ１

研究実施内容	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

① プロジェクトの総合推進	←											→
② RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化		←						→				
③ SfM/MVS 計算時間の短縮				←				→				

サブテーマ２

研究実施内容	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
① プロジェクトの総合推進	←											→
② リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発	←											→
③ 火山灰拡散予測の高速化技術開発	←											→
④ 火山灰拡散予測の高精度化技術開発	←											→
⑤ 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発	←											→

サブテーマ３

研究実施内容	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
① 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化	←											→
② 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化	←											→

③ 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化	←											→

２．研究成果の説明

２．１　無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
アジア航測株式会社	共同実施機関	先端技術研究所　室長	千葉達朗
		国土保全技術部　課長	佐々木寿
		システム開発部　課長	野中秀樹
		国土保全技術部	成毛志乃
		国土保全技術部	三浦俊介
		国土保全技術部	江川　香
		システム開発部	森　貴章
		システム開発部	望月拓実
		システム開発部	泉田温人
		システム開発部	浦山利博

(c) 業務の目的

本業務では、噴火時における無人機（ドローン等）及び航空機による火口周辺や火口周辺から離れた空域から撮影した可視画像・赤外画像等を用いて、噴石の飛散状況、溶岩流や火砕流の発生状況やその到達範囲等の火山噴火の状況を迅速に把握するためのシステムを開発することを目的とする。

写真測量解析においては、解析処理に時間を要していた課題を解決するために、低解像度の解析をリアルタイムで出力し、時間と共に解像度を上げていく一連の写真測量処理システムを構築する。また、夜間や噴煙等により視界不良の場合でも、取得した画像から定点を自動的に抽出して、写真測量処理を自動的に行うシステムを開発する。処理された可視画像や赤外画像から、噴石の飛散状況、溶岩流や火砕流の到達範囲をマッピングして位置情報を自動的に取得し、直面する火山災害への対応への支援を念頭に、噴火の推移と災害の発生状況をリアルタイムで把握するシステムを開発する。

なお、実施期間中に噴火が起きた場合には、検討中の内容を反映する等して無人機（ドローン等）を運航して撮影した空域からの可視画像をもとに、３Ｄモデルを作成するなどして、ホームページで公開できるよう資料を作成することとする。作成した資料のうち、地形データを取得した場合には、本委託業務が他のサブテーマと一体となって展開する次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトにおける次世代火山研究推進事業の課題Ｄサブ

テーマ２（リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発)、課題Ｃサブテーマ３（シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発）へデータ提供した上で、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）で情報共有される計画とする。また、最新の現地概略情報を取得できた場合には、被災自治体等へ画像等を提供するとともに、要望をふまえて改めて現地情報を取得、提供することを想定する。

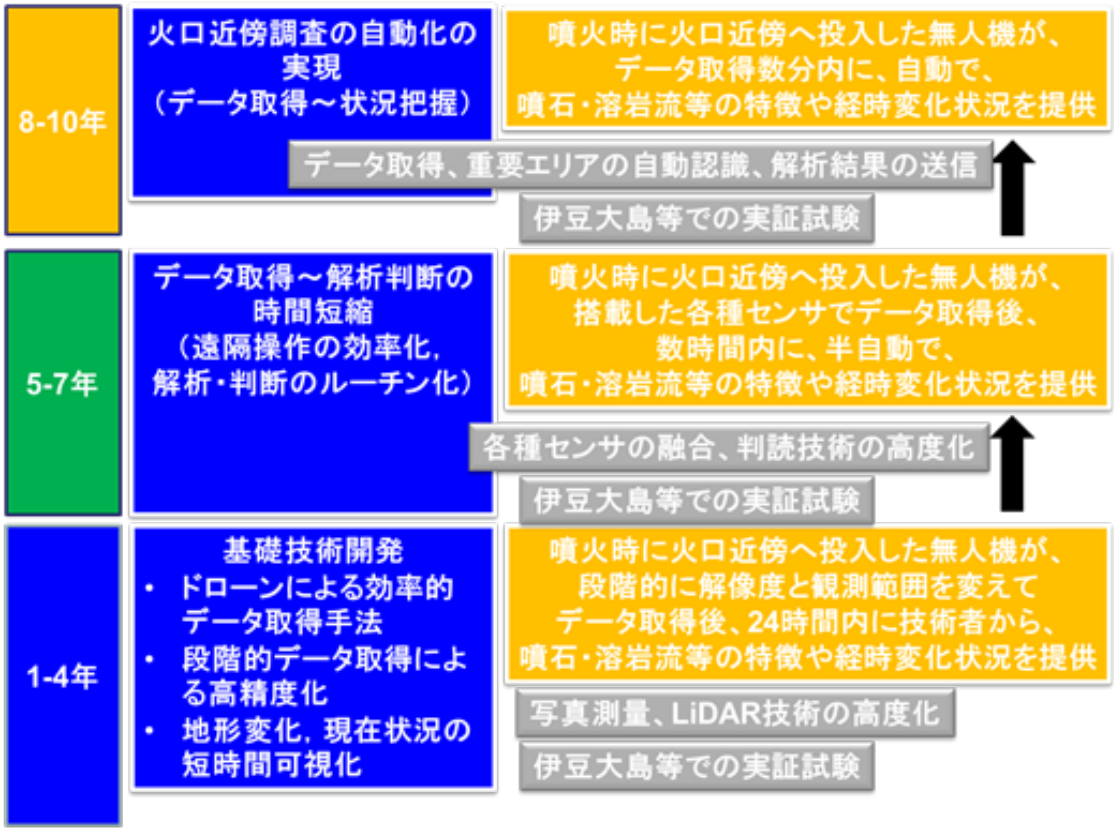


図 1 本業務の全体計画

(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：

「無人機を使った火山災害把握手法」の現状把握と、状況把握のために必要な無人機等の機能・仕様等を明らかにした。また、火山噴火時に想定される各種制約条件をふまえて、実証実験計画を立案した。

2) 平成 29 年度：

無人機（ドローン等）を用いて、写真測量技術、SfM 技術、UAV 搭載 LiDAR の活用等による火山災害状況把握に掛る時間と抽出変化の内容・解像度の違いについて、実証試験を通じてとりまとめた（表 1)。

表 1　火山災害状況把握のために活用可能な技術と特徴の優劣

	画像解析		地形計測
	ＵＡＶ＋Photogrammetry	ＵＡＶ＋Structure-from-Motion	ＵＡＶ＋Laser Imaging Detection and Ranging
変化の詳細把握	△	○	◎
処理時間	◎	△	○
操作性	◎	◎	△
コスト	○	◎	△

3）平成 30 年度：

災害誘因現象の発生から初期状況把握までの総時間短縮のための、無人機（ドローン等）観測からデータ解析、結果提供までの課題を抽出し、災害シナリオやタイムラインにそった、時点最適なルーチンを開発した。

4）令和元年（平成 31 年）度：

前年度までに開発したルーチンをモデル火山において実証試験し、中間成果をとりまとめるとともに、次段階の課題を設定する。

5）令和 2 年度：

前年度までに開発したルーチンで取得したデータをもとに、変化を抽出・判断するための課題と事例を収集整理する。自動標定技術や夜間や天候不順時の代替手段等について技術開発の方向性を設定する。

6）令和 3 年度：

無人機（ドローン等）に搭載する機器（GNSS 受信機、赤外カメラ、火山ガス計測装置、噴出物採取装置、レーザ計測装置等）を利用したモデル火山における実証試験と、画像解析・データ処理技術により、経時変化抽出のための課題と解決策をとりまとめる。

7）令和 4 年度：

無人機（ドローン等）に搭載する機器の改良案の提示と、火山防災・対策に資する画像解析・データ処理技術の高度化により、噴火前データが存在しない場所での変化抽出方法を開発する。

8）令和 5 年度：

前年度までに開発したルーチン、搭載機器仕様をもとに、災害状況把握技術を遠隔自動化および時短化するための課題を整理し、必要機能・改良点等をとりまとめる。

9）令和 6 年度：

トレーサを用いた変化把握や噴出物の自動追尾計測・解析処理機能を開発して、実証試験を行う。

10）令和 7 年度：

高度化した無人機（ドローン等）と必要機能を組み込み改良した各種センサを利用して、噴出物（噴石・溶岩流・火砕流など）の発生状況や到達範囲の経時変化などをリアルタイムで取得し、火山防災・対策情報に資するデータを提供する。

(e) 令和２年度業務目的

本サブテーマでは、噴火時における無人機（ドローン等）及び航空機による火口周辺や火口周辺から離れた空域から撮影した可視画像・赤外画像等を用いて、噴石の飛散状況、溶岩流や火砕流の発生状況やその到達範囲等の火山噴火の状況を迅速に把握するためのシステムを開発することを目的とする。令和２年度は、無人機（ドローン等）の観測から火山災害状況把握の基礎となる地形データの取得のため、RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化による 3D モデルの精度向上に関して実証試験を通じてとりまとめる。また、高精度の 3D モデルを短時間で作成するために、計算に特化した専用の機器を用いた SfM/MVS 計算時間の短縮について研究を行う。

(2) 令和２年度の成果

(a) 業務の要約

- 伊豆大島で実証実験を実施し、新たに購入した RTK-GNSS 搭載 UAV を用いた計測を行う。また、比較検証として、昨年度まで使用した UAV による計測も行う。
- RTK-GNSS 搭載 UAV で取得したデータを用いた計測精度向上と高速化について研究する。昨年度まで使用した UAV の取得データとの比較も行う。
- SfM/MVS 計算時間の短縮を図るため、汎用のノートパソコンではなく、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器を用いた研究を実施する。

(b) 業務の実施方法

1) プロジェクトの総合推進

- 現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進する。
- サブテーマ 2 との連携：大量降灰時にドローンを活用した地形変化抽出を行い予測降灰量と照合することを目的として、地形データ精度向上の検討を実施する。
- サブテーマ 3 との連携: 各種コンテンツのインプットデータとして利用するため、ドローンで取得した画像から地図と重ねられる「オルソ画像」を迅速に作成する手法に関する実証実験を計画して実施する。オルソ画像の必要分解能、体裁等について連携して進める。
- テーマ A、C との連携: 災害状況把握のためにドローン等による空域からの画像、画像から作成されるオルソ画像および数値標高モデルのフォーマットや分解能、受け渡し方法について連携して研究する。また、数値シミュレーション用データとして使用される数値標高モデルの分解能、品質、受け渡しのフォーマットにつ

いて連携して研究する。

- 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携・融合の一環として、現地で取得した画像から３Ｄ地形モデルを作成する技術の体験、民間企業における火山調査関連技術や火山防災業務の紹介等のプログラムを計画・準備した上で、開催案内と参加者募集を行う。

2) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化

- 2019 年度は、UAV の撮影のタイミングに合わせて、撮影範囲内に GCP を設置し、その地点を撮影と同時に RTK-GNSS 計測を実施した。その結果、従来よりも大幅な精度向上が実現でき、差分等の計算を直ちに行えることが確認できた。しかしながら、実際の噴火中には、火口周辺は危険で立ち入りが難しく、このような RTK-GNSS を使用した GCP 標識の設置や同時計測を行うことは困難であると考えられる。
- そこで今年度は、最新の RTK-GNSS 搭載型の UAV を導入し、現地での GCP の設置と同時計測を省いた、高精度現状把握手法の開発を計画する。導入予定の機種では、工事現場等で、地上での同時計測なしで、センチオーダーの高精度のモデルが迅速に作成できるとされている。
- 噴火によって、火口付近の立ち入りが不可能な場合はもちろん、火口周辺の地形が大きく変化し、既往の GCP が失われたようなケースでも、位置やゆがみの補正をすることなく、迅速に差分計算し、噴出量などを求めることも想定して研究を進める。

3) SfM/MVS 計算時間の短縮

- 撮影後に作成する３D 地形モデルは精度を向上させることで、迅速な現況把握が可能となる。1m メッシュ程度の地形モデルでは、最も多い 20 ㎝程度の火山弾のサイズやクレーターの深さを計測することは難しい。特に堆積した火山灰の層厚を計測するには、さらに精密なモデルが必要となるが、これまではデータ処理に数日を要していた。計算時間とモデルの精度は、相反する問題で、計算時間を優先させれば、精密なモデルが作成できない。
- そこで、高精度の３D 地形モデルを短時間で作成するために、汎用のノートパソコンではなく、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器（アジア航測で開発中）を使用した研究を行う。この機器の使用により高速で高精度の３D 地形モデルを作成し、現在より短時間での状況把握に資するデータの作成について研究する。

(c) 業務の成果

1) プロジェクトの総合推進

現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進した。

a) サブテーマ 2 との連携

大量降灰時にドローンを活用した地形変化抽出を行い予測降灰量と照合することが考えられる。今回、伊豆大島において RTK-GNSS 搭載 UAV（図 2）を用いた実証実験を行い、計測測精度向上について検証した（詳細は(2)(c)2)を参照)。

従来の UAV(Matrice210)と RTK-GNSS 搭載 UAV (Phantom4-RTK)の取得画像から作成した DSM を用いた断面図を比較すると、図 3 に示すように、高さ方向に多少のずれが確認できた。差分の RMS(二乗平均平方根)を求めると 0.423m となり、40~50cm 近くのずれが発生することとなる。

今回 RTK-GNSS 搭載 UAV を使用して計測を行ったが高精度な測量結果を得ることが出来なかった。計測時の衛星や基地局との接続状況にもよるが、計測方法については引き続き検証が必要であると考えられる。



図 2　使用したRTK-GNSS搭載UAV(左)と撮影状況(右)

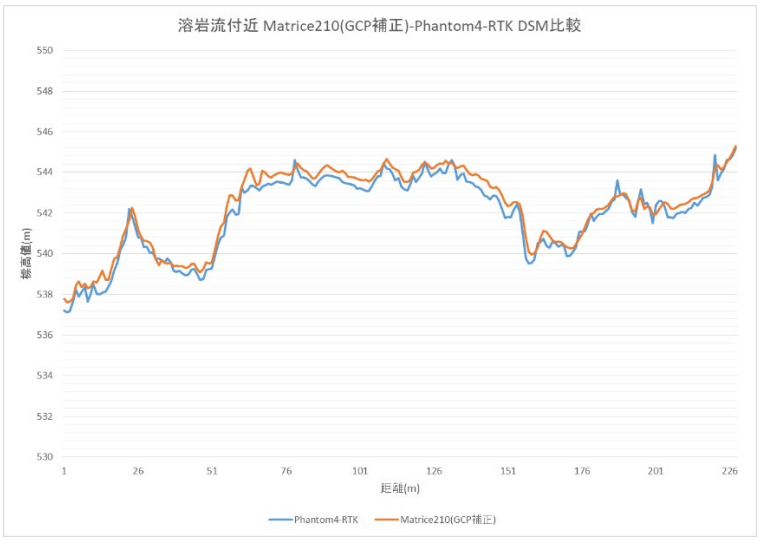


図 3　従来のUAV(Matrice210)とRTK-GNSS搭載UAV (Phantom4-RTK)の断面比較

b) サブテーマ 3 との連携の検討

火山噴火時に迅速な対応を行う際、既存の大縮尺地図との比較がなされることが予想される。伊豆大島で作成されている大縮尺な地図は、東京都が整備している国土基本図（縮尺 2500 分の 1）である（図 4）。国土基本図は東西方向 2km、南北方向 1.5km の範囲を示す地図であり、図郭番号が定められている。

公共測量における標準的な作業方法等を定められている作業規定の準則（令和 2 年 3 月 31 日 国土交通省告示 第 461 号）では、縮尺 2500 分の 1（地図情報レベル 2500）の写真地図を作成する場合の分解能（地上画素寸法）は 0.4m 以内とされている。

そのため、オルソ画像の体裁は国土基本図と同様のメッシュで分割した画像とする。また、オルソ画像の分解能は 0.4m とし、画像ファイルは TIFF 形式、位置情報ファイルは TFW として作成する方針とする。

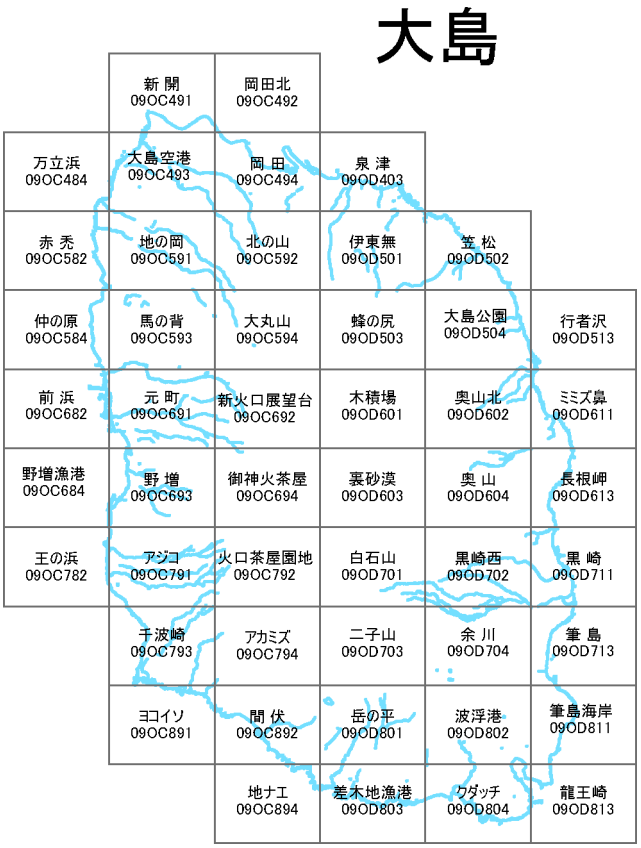


図 4 東京都縮尺1/2500地形図（平成23年度版）索引図の伊豆大島の例

出典：東京都 HP（https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/kiban/map_user/index.html）

ドローンで取得した画像から迅速にオルソ画像を作成するためには、SfM/MVS 計算時間の短縮が必要となる。今年度は、高精度な三次元モデルを短時間で作成するために、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器（アジア航測で開発中）を使用し、三次元モデルの作成を行った。三次元モデルの精度及び処理時間を汎用 PC 及び市販ソフトウェアと比較した。汎用 PC 及び市販ソフトウェアは、専用機器に比べ約 3 時間処理に時間がかかることがわかった（詳細は(2)(c)3)を参照）。

令和 2 年度の撮影した画像から作成したオルソ画像（分解能 0.4m）を図 5、図 6 に示す。撮影範囲が限定的なため、空白部が多くなってしまう。作成したオルソ画像には等高線、道路、建物などの地物がないため(図 6 左)、オルソ画像単独では位置を特定する情報が不足するという課題がある。図 6 右は地理院地図との重ね合わせた画像であり、道路等との関係が把握できる。

SfM/MVS 計算には時間がかかるものの、作成された三次元モデルからオルソ画像を作成する時間は、面積にもよるが数分～１時間程度である。一方、オルソ画像と既存地図を重ね合わせた画像の作成には、調整等に時間を要するため、今後、自治体等のニーズを把握し、表示内容の検討を進める必要がある。

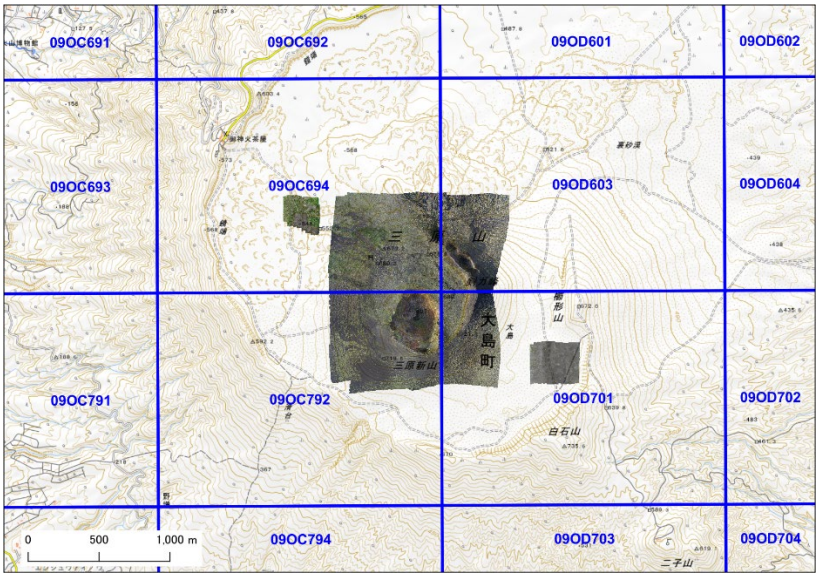


図 5　作成したオルソ画像の例（地理院地図と重ね合わせ）

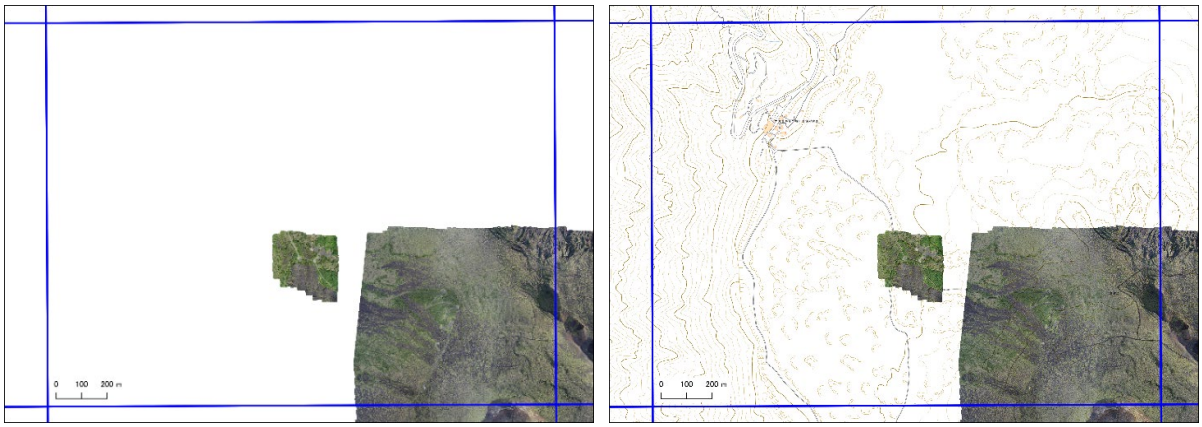


図 6　作成したオルソ画像の例（図郭09OC694）左：オルソ画像のみ　右：地理院地図

c) テーマ A、C とのデータ連携の検討

サブテーマ D1 で取得したデータについての連携方法について検討した。桜島火山 60 周年記念研究集会（11 月 10 日・11 日）終了後に行った課題 D の打合せ、および 2021 年 1 月 28 日のサブテーマ C3 との Web 打合せなどの結果を踏まえ、データ連携方法を整理した（図 7）。

- サブテーマ D1 が作成したデータは、基本的にサブテーマ A に格納され、必要に応じて各サブテーマが参照する形式とする。ファイル形式等は表 2 を想定する。
- サブテーマ D1 からサブテーマ D2 および D3 へは、直接データを提供せず、サブテーマ A 経由で必要なデータを入手する。
- サブテーマ C3 に、サブテーマ D1 が作成した数値標高モデル（DEM）を提供することで、噴火後の地形を反映した溶岩流の数値シミュレーションなどを実施することが可能となる。やり取りが頻繁になる場合も想定し、直接受け渡しする方法も検討した方が良い
- サブテーマ C3 に、サブテーマ D1 が提供する数値シミュレーション用データのファイル形式等を表 3 に示す。溶岩流のシミュレーションは 1 ～ 2 日かかるので、頻繁に DEM をもらっても計算できない。分布等は把握したいため、頻繁な計測は継続した方が良い。
- 噴火前の地形データを収集して整備しておくことも重要である。

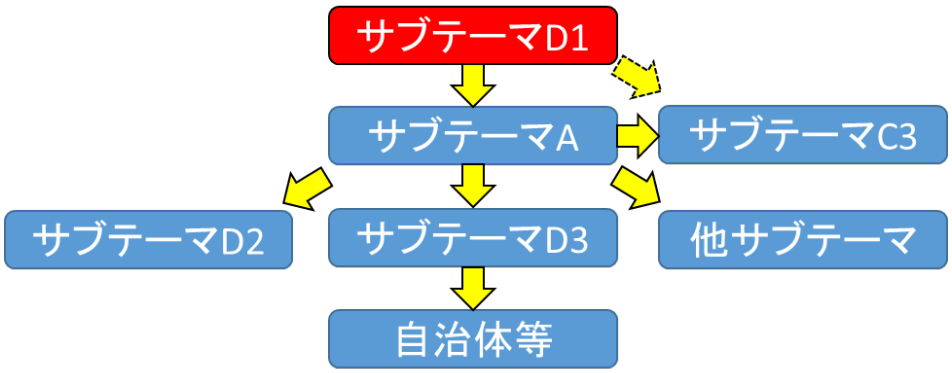


図 7　他サブテーマとのデータ連携イメージ

表 2　サブテーマAに格納するデータ例

データ種別	フォーマット	備考
UAV で取得した画像	Jpg 形式	撮影後の生データ
UAV で取得した動画	MP4 形式	撮影後の生データ
オルソ画像	Geotiff 形式	
3D モデル	Obj 形式	
数値標高モデル	Esri ASCII ラスター形式	UTM 座標
判読結果等	KML 形式	

表 3　サブテーマC3に提供するデータの一覧

データ種別	フォーマット	備考
オルソ画像	Geotiff 形式	
数値標高モデル	Esri ASCII ラスター形式	10m メッシュ

ファイル形式については整理できたが、分解能、品質、受け渡し方法については今後の課題である。数値シミュレーションに使用する数値標高モデルは 10m メッシュで良いが、詳細な差分解析から噴出量を算出するための分解能や品質については処理時間も含めた検討が必要となる。また、データの受け渡し方法については、迅速な対応をするために共同実施機関内に専用サーバーを構築するなどの検討が必要である。

d) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携として現地実証実験への参加者募集を行い、３名が参加した。内訳は九州大学２名、東京工業大学１名であった。

現地での UAV に関する研修および宿舎でのデータ処理に関する研修を実施した(図 8)。



UAV の飛行実習



GCP 設置の説明



SfM/MVS 計算に特化した専用機器の説明



三原山火口の地形の講義

図 8　研修写真

2) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化

a)実証実験の概要

2019 年度は、UAV の撮影範囲内に GCP（Ground Control Point）を設置し、その地点の座標を RTK-GNSS 計測した上で、三次元モデルの作成を行った。その結果、従来よりも大幅な精度向上が実現でき、二時期差分等の計算が行える精度の三次元モデルが作成できることを確認した。しかし、実際の噴火中には、火口周辺は危険で立ち入りが難しく、RTK-GNSS を使用した GCP の設置を行うことは困難であると考えられる。

今年度は、RTK-GNSS 搭載 UAV を導入し、GCP を設置しない三次元モデルの作成として、高精度な現状把握手法の開発を計画した。導入した UAV は、工事現場等において地上計測なしで、センチメートルオーダーの高精度の三次元モデルが迅速に作成できるとされている。RTK-GNSS 搭載 UAV は、DJI 社の Phantom4-RTK(図 9、表 4)を用いた。

噴火によって、火口付近の立ち入りが不可能な場合はもちろん、火口周辺の地形が大きく変化し、既往の GCP が失われたようなケースでも、位置やゆがみの補正をすることなく、迅速に差分計算し、噴出量などを求めることも想定した三次元モデル作成のための計測方法を検討した。

2020 年 9 月 30 日～10 月 1 日に伊豆大島の三原山山頂火口と山麓を対象に実証実験を実施した。



図 9　Phantom4-RTK

表 4　Phantom4-RTK　機体スペック

機体情報	詳細内容
機体重量	1391g
対角寸法	350mm
最大飛行速度	50～58km/h
最大飛行時間	約 30 分



図 10　Phantom4-RTK　飛行風景



図 11　高精度GNSS レシーバー　D-RTK 2 モバイルステーション

Phantom4-RTK は、高精度 GNSS レシーバーの D-RTK 2 モバイルステーションと併せて使用することで、RTK-GNSS 測位を行うことができる。「RTK」とは「Real Time Kinematic（リアルタイムキネマティック）」の略で、地上に設置した「基準局」からの位置情報データによって、高い精度の測位を実現する。これに、GPS・GLONASS・Galileo といった衛星を用いた測位『GNSS 測位システム』を組み合わせることで、センチメートルレベルの高い精度で測量データを取得することが可能となり、GCP を使用することなく高精度なモデルデータを作成することができる。

b)三原山火口付近でのモデル・DSM 比較

三原山山頂の火口付近において、2019 年度と同様に GCP を火口周辺に設置し「RTK-GNSS 搭載 UAV」の Phantom4-RTK と「未搭載 UAV」の Matrice210 で同一エリアの撮影を行った。Matrice210 で撮影した画像から作成したモデルは GCP により補正を行い、Phatom4-RTK で撮影した画像から作成したモデルと DSM の比較を行った。

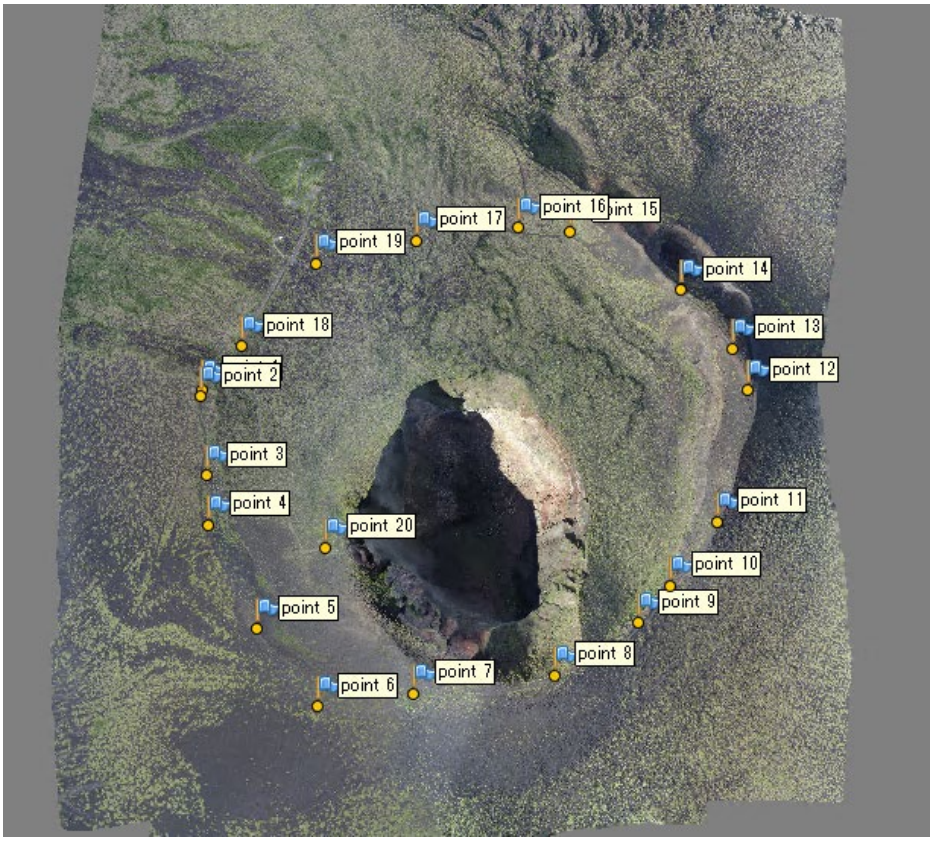


図 12　三原山山頂火口付近　GCP設置地点

Matrice210 で取得した画像から作成した火口の三次元モデルを図 13 と図 14 に示す。

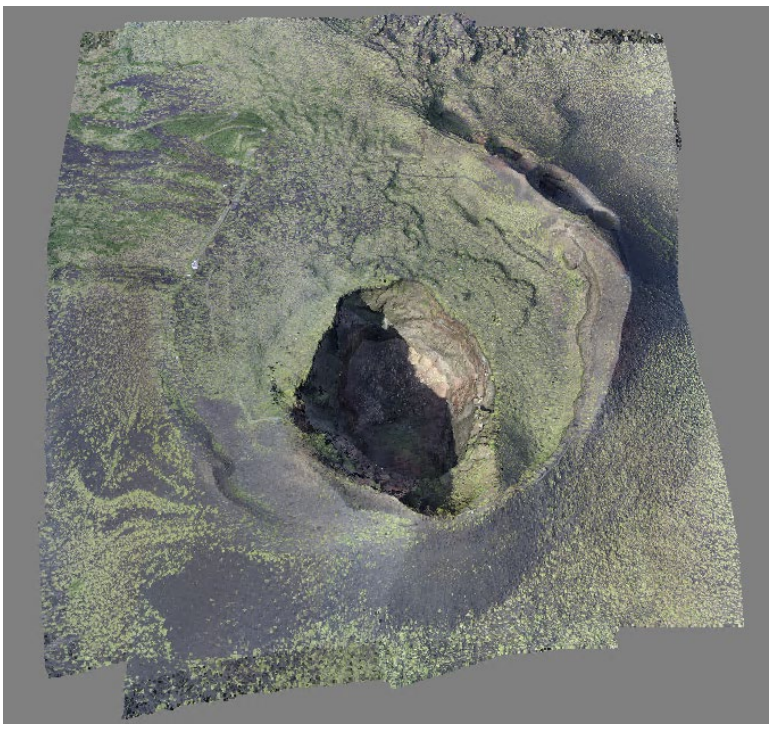


図 13　Matrice210撮影データ作成モデル(GCP補正済)

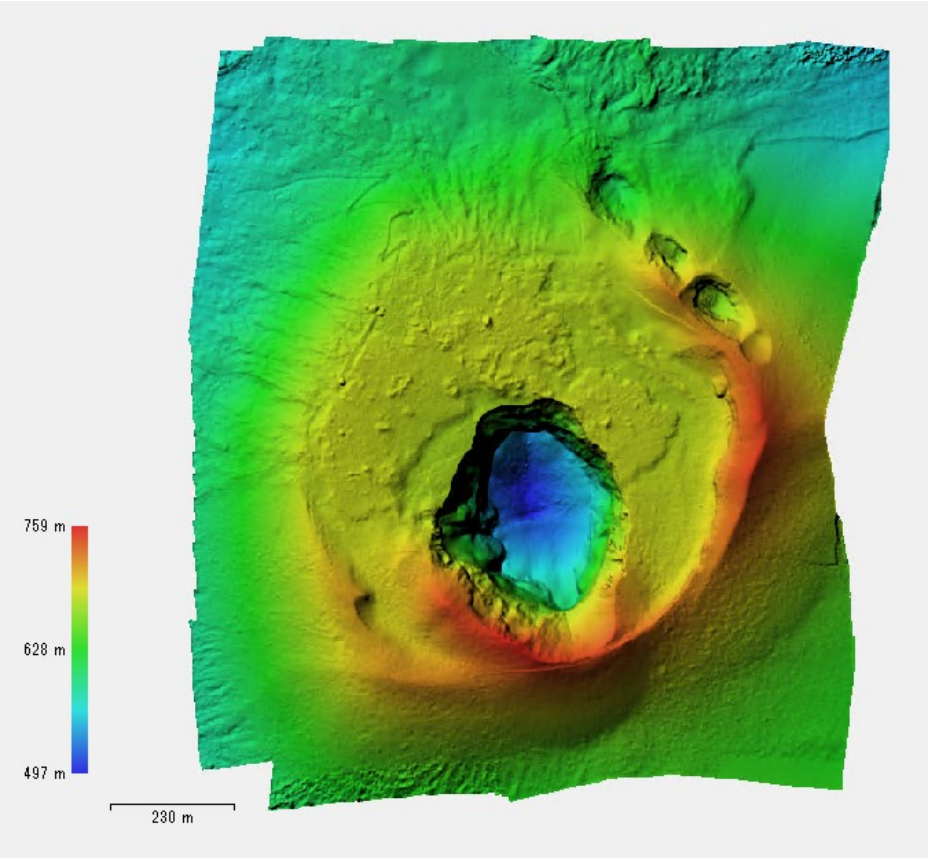


図 14　　Matrice210撮影データ作成DSM

Phantom4-RTK で取得した画像から作成した火口の三次元モデルを図 15 と図 16 に示す。

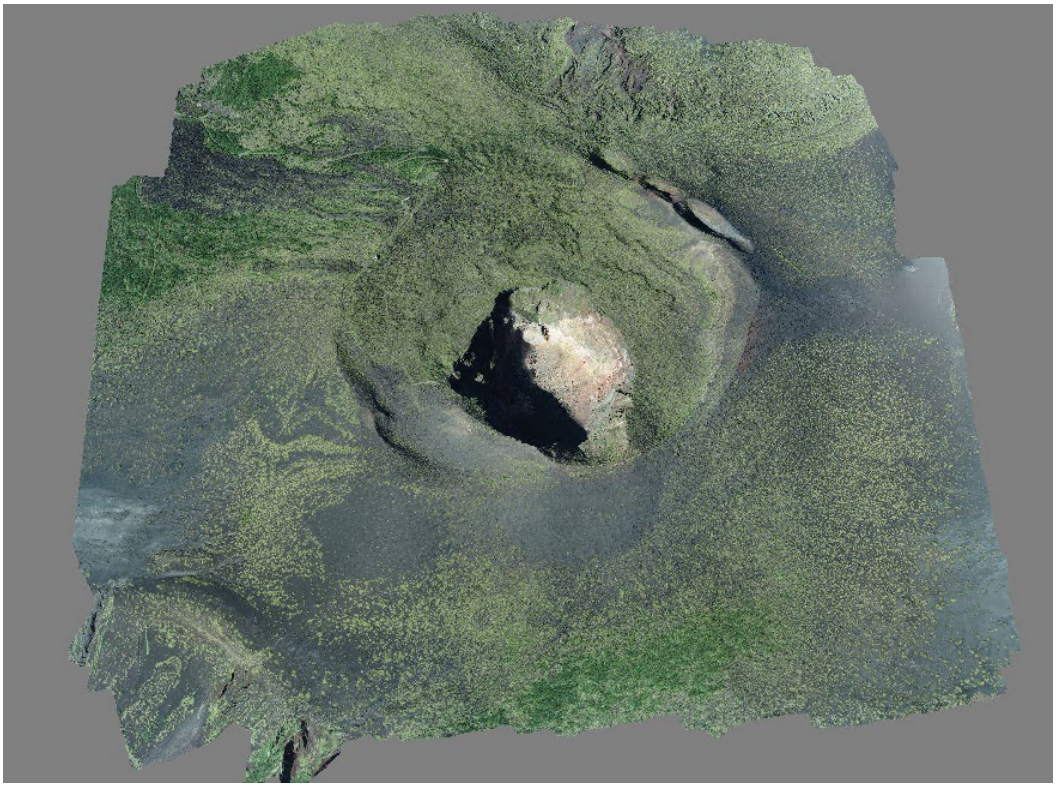


図 15　Phantom4-RTK撮影データ作成モデル

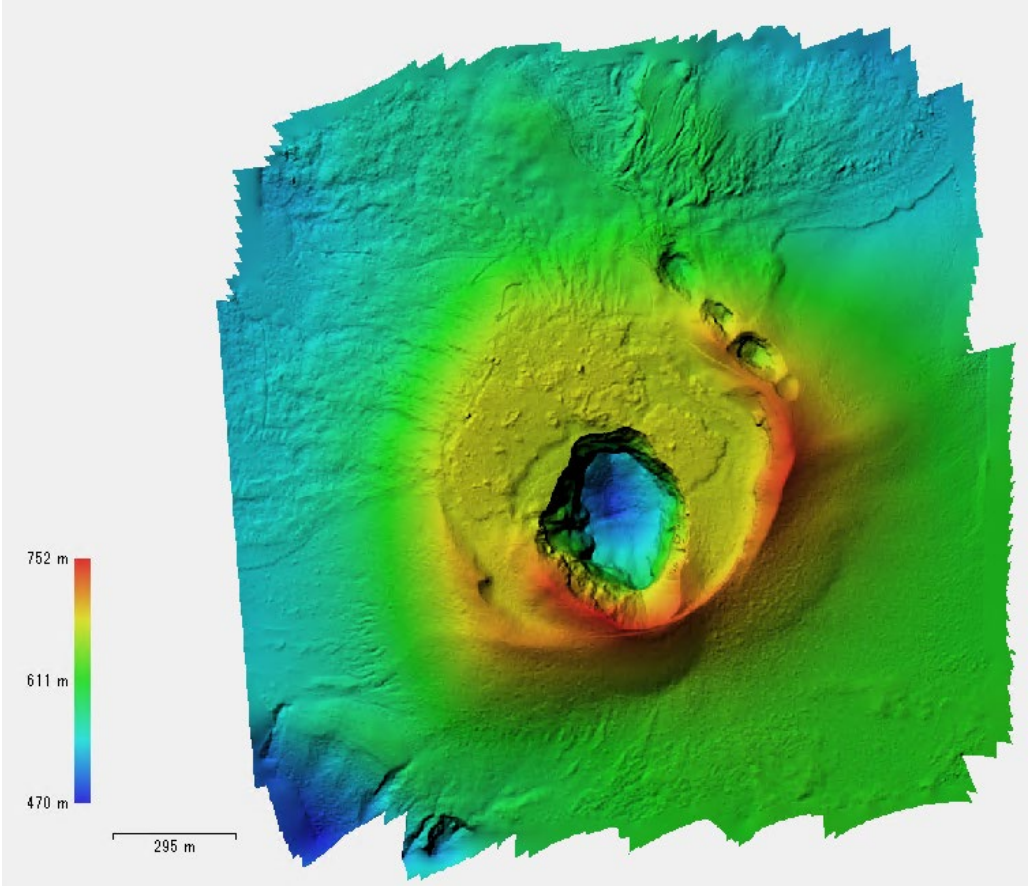


図 16　Phantom4-RTK撮影データ作成DSM

Matrice210 撮影データ（GCP 補正）と Phantom4RTK 撮影データから作成した DSM は図 17 の位置で断面図の比較を行った。GCP 補正した Matrice210 と Phantom4-RTK の DSM を比較すると、図 18、図 19 に示すように、高さ方向に大きなずれが確認できた。DSM の高さ差分の RMS(二乗平均平方根)を求めると断面位置①で 8.5409m、断面位置②で 12.154m となり 10m 近くのずれが発生していることが確認できた。

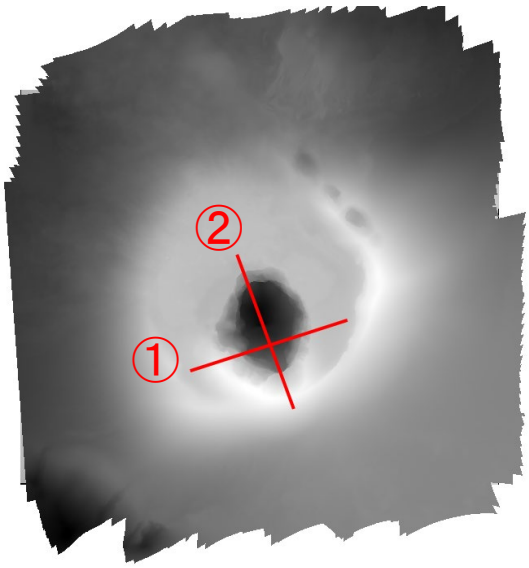


図 17　三原山火口Matrice210(GCP補正)モデル-Phantom4-RTKモデル　DSM比較断面位置

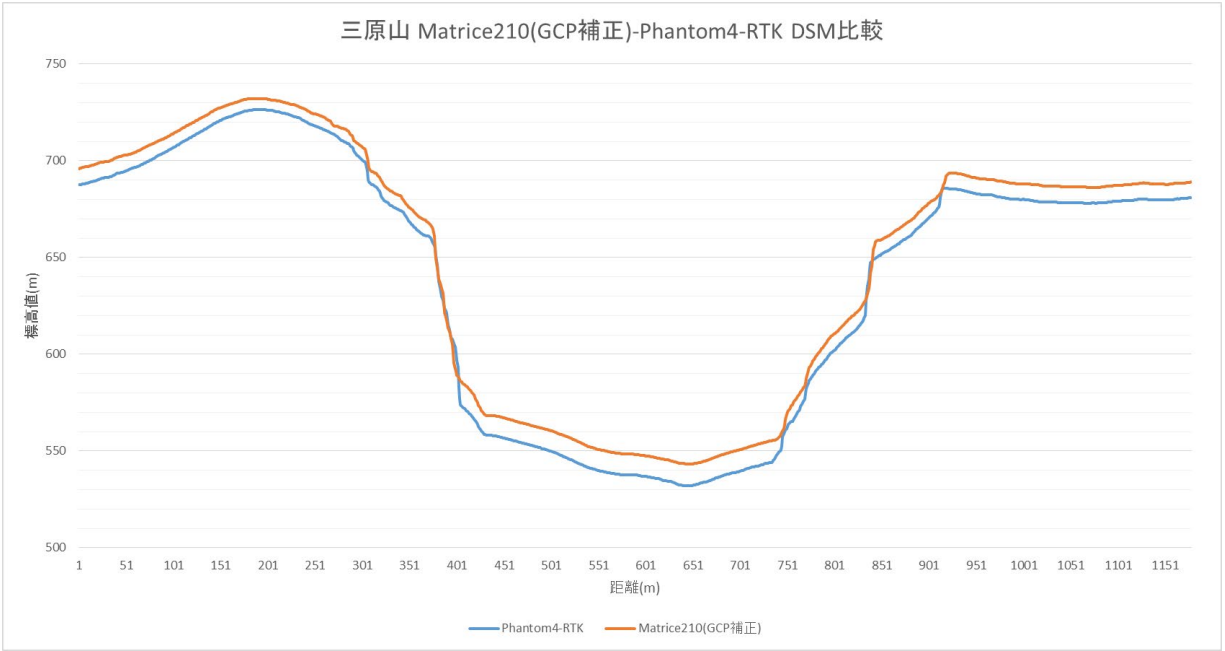


図 18　Matrice210(GCP補正)-Phantom4-RTK DSM比較　断面図①

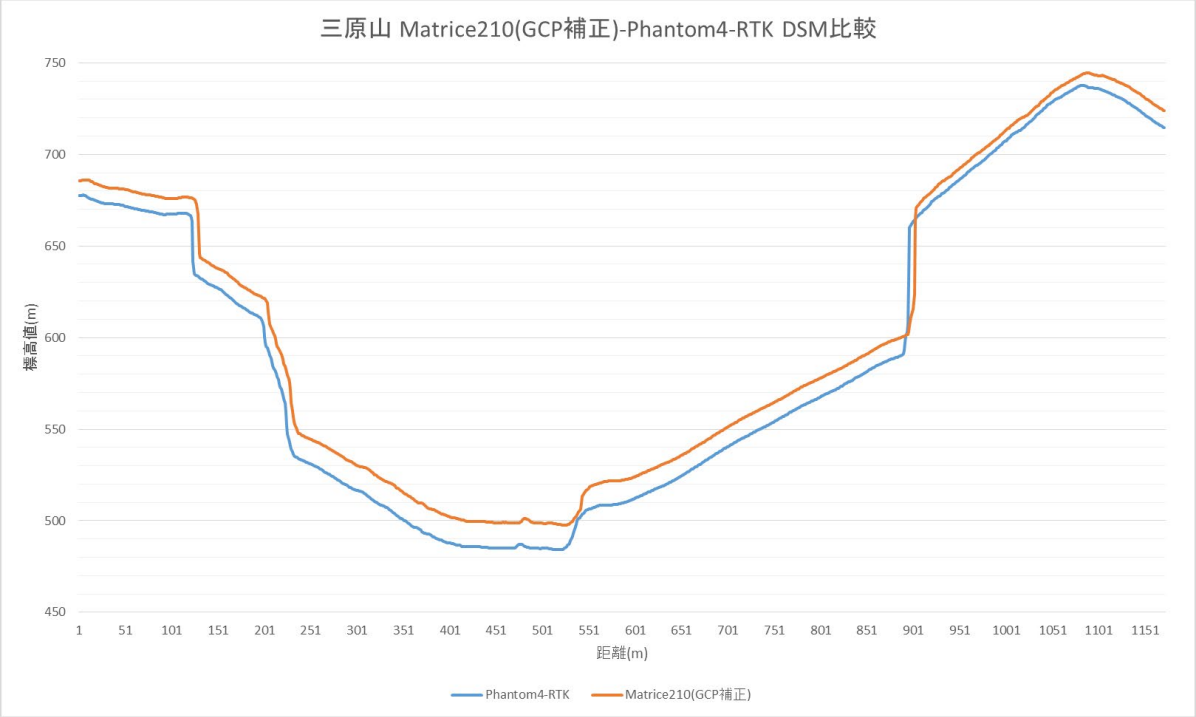


図 19　Matrice210(GCP補正)-Phantom4-RTK DSM比較　断面図②

c)溶岩流付近(三原山)でのモデル・DSM 比較

1986 年噴火時の溶岩流付近においても GCP を設置し「RTK-GNSS 搭載 UAV」の Phantom4-RTK と「未搭載 UAV」の Matrice210 で同一エリアの撮影を行った。三原山火口付近での撮影と同様に、Matrice210 で撮影した画像から作成したモデルは GCP により補正を行い、Phatom4-RTK で撮影した画像から作成したモデルと DSM の比較を行った。

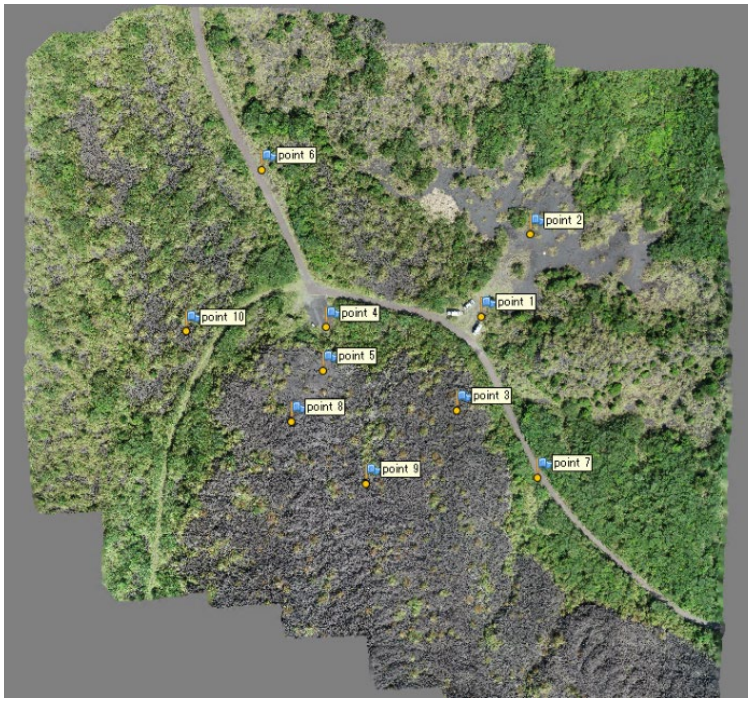


図 20　溶岩流付近(三原山)　GCP設置地点

Matrice210 で取得した画像から作成した溶岩流の三次元モデルを図 21 と図 22 に示す。

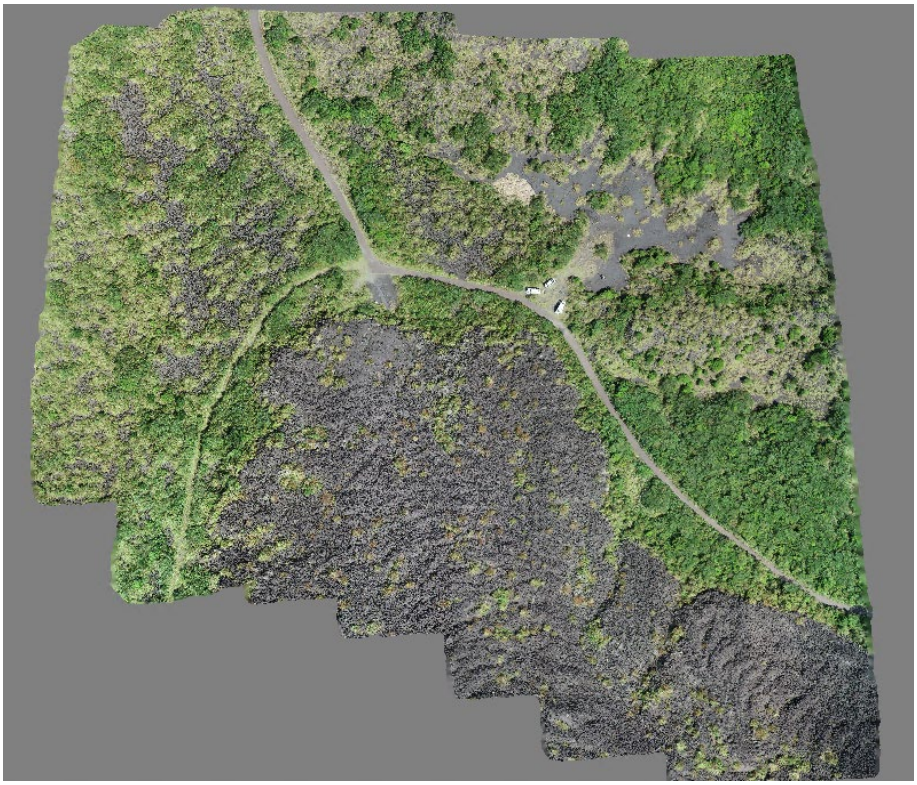


図 21　Matrice210撮影データ作成モデル(GCP補正済)

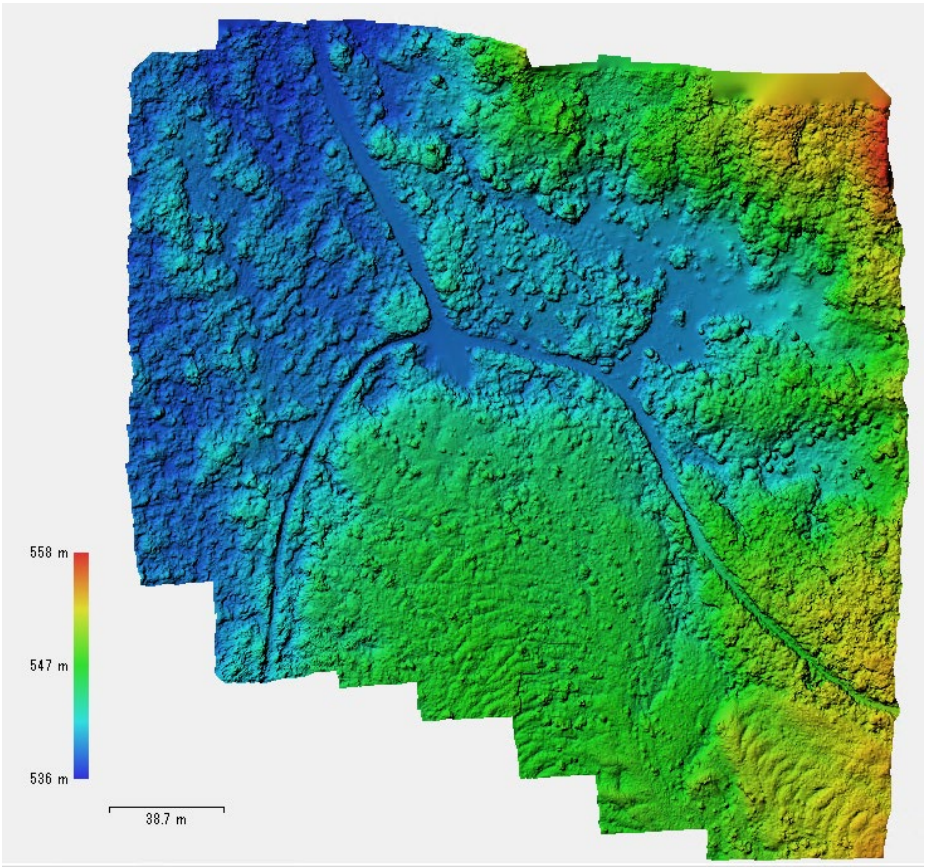


図 22　Matrice210撮影データ作成DSM

Phantom4-RTK で取得した画像から作成した溶岩流の三次元モデルを図 23 と図 24 に示す。

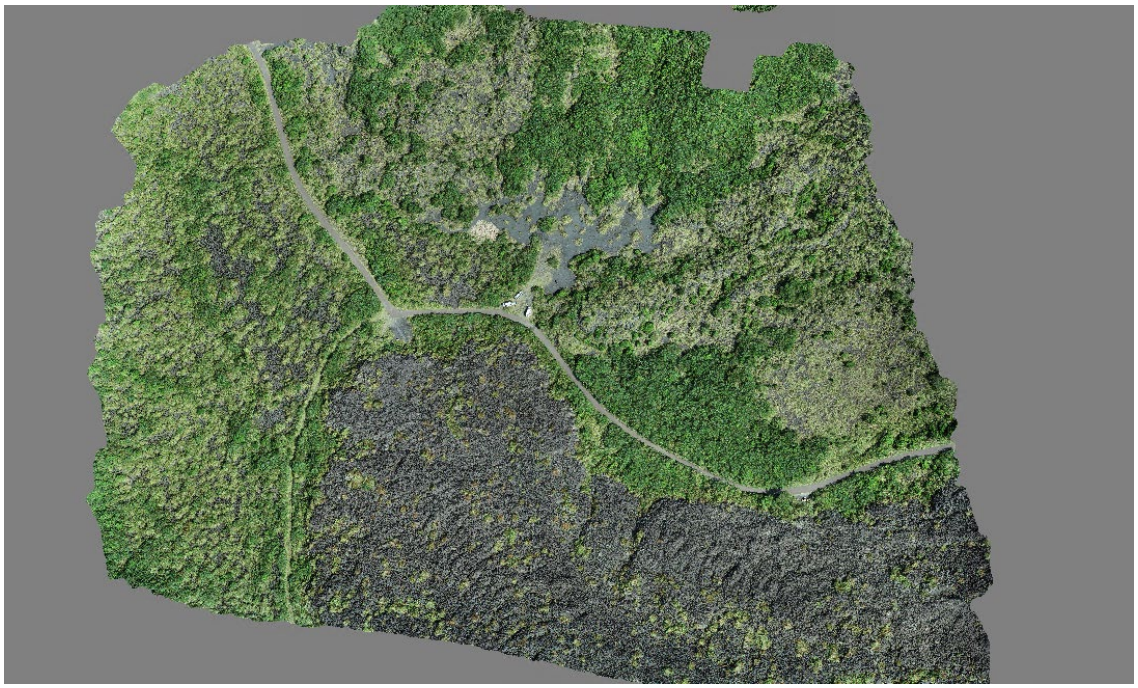


図 23　Phantom4-RTK撮影データ作成モデル

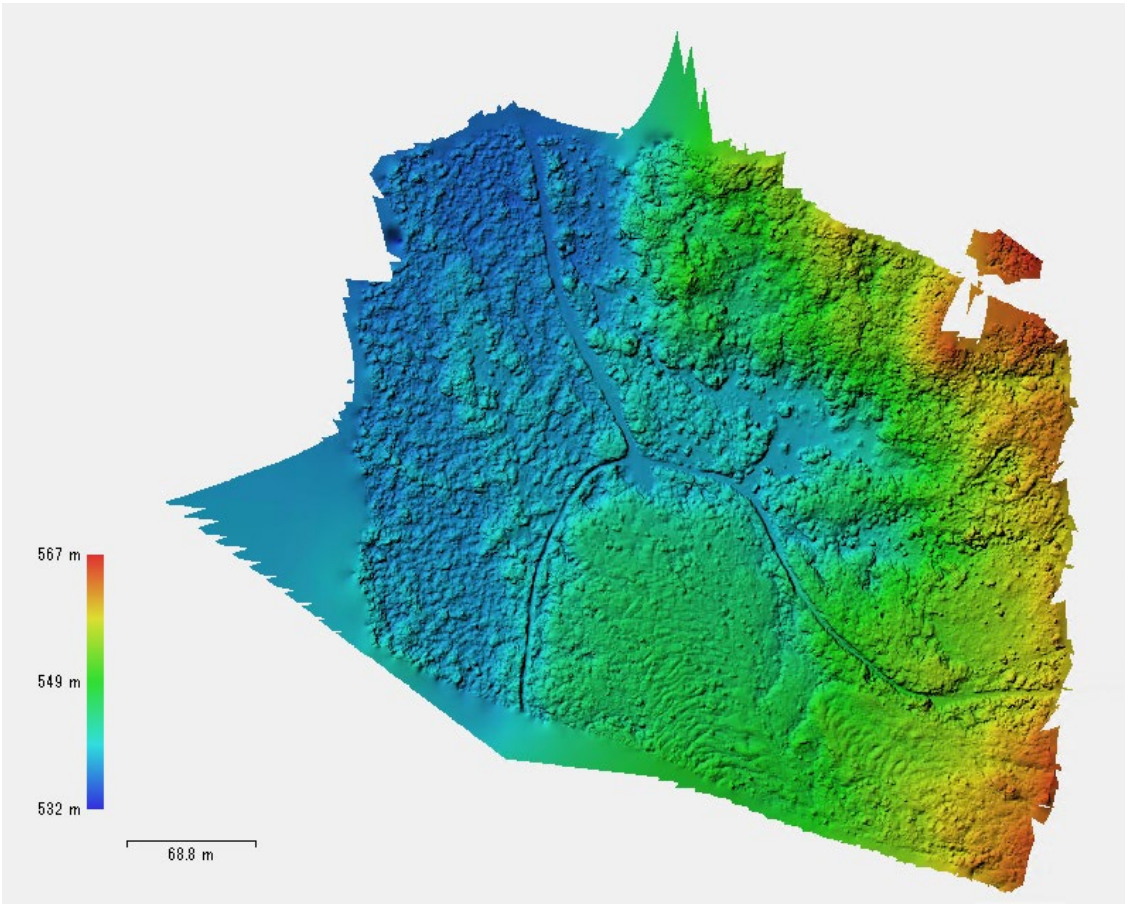


図 24　Phantom4-RTK撮影データ作成DSM

Matrice210 撮影データ（GCP 補正）と Phantom4-RTK 撮影データから作成した DSM は図 25 の位置で断面図の比較を行った。

GCP 補正した Matrice210 と Phantom4-RTK の DSM を比較すると、図 26、図 27 に示すように、高さ方向に多少のずれが確認できたが、三原山火口付近のモデル程のずれは発生していなかった。DSM の高さ差分の RMS(二乗平均平方根)を求めると断面位置①で 0.423m、断面位置②で 0.527m となり 40~50cm 近くのずれが発生していた。

今回 Phantom4-RTK を使用して計測を行ったが高精度な測量結果を得ることが出来なかった。特に高低差のある三原山火口付近では 10m 程度のずれが発生し、計測時の衛星や基地局との接続状況にもよるが、計測方法については引き続き検証が必要であると考えられる。また、Phantom4-RTK の測位方法は表 5 に記載しているその他の方法も存在するため、別の測位方法での検証も必要と考えられる。

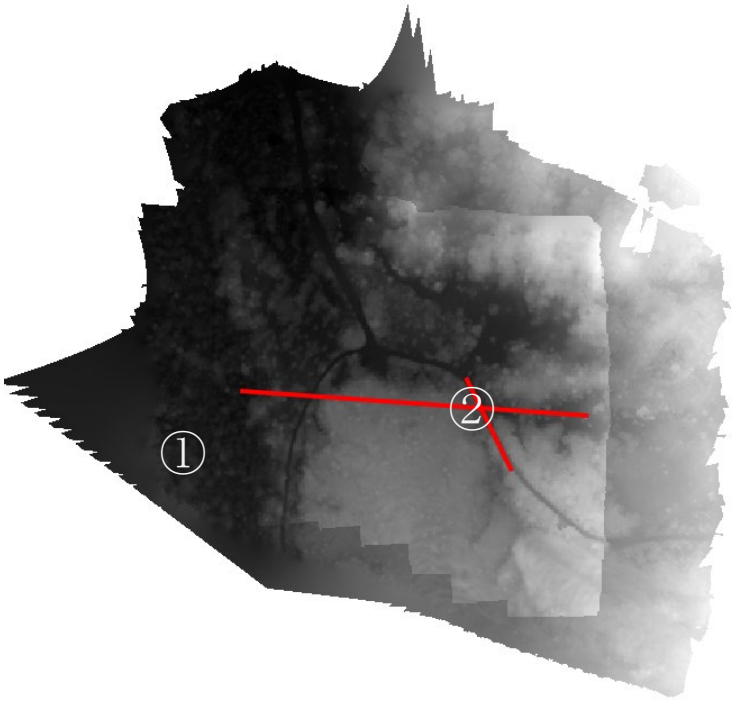


図 25　溶岩流付近(三原山)Matrice210(GCP補正)モデル-Phantom4-RTKモデル　DSM比較断面位置

表 5　Phantom4-RTK　その他の測位方法

種類	測位方法	備考
ネットワーク型 RTK	位置情報データ配信サービスを使用した測位	基地局が不要であるが、通信契約が必要
PPK 方式	ネットワーク RTL 方式と同様の技術を後処理として行い補正する	ネットワーク通信を必要としないが、後処理が発生

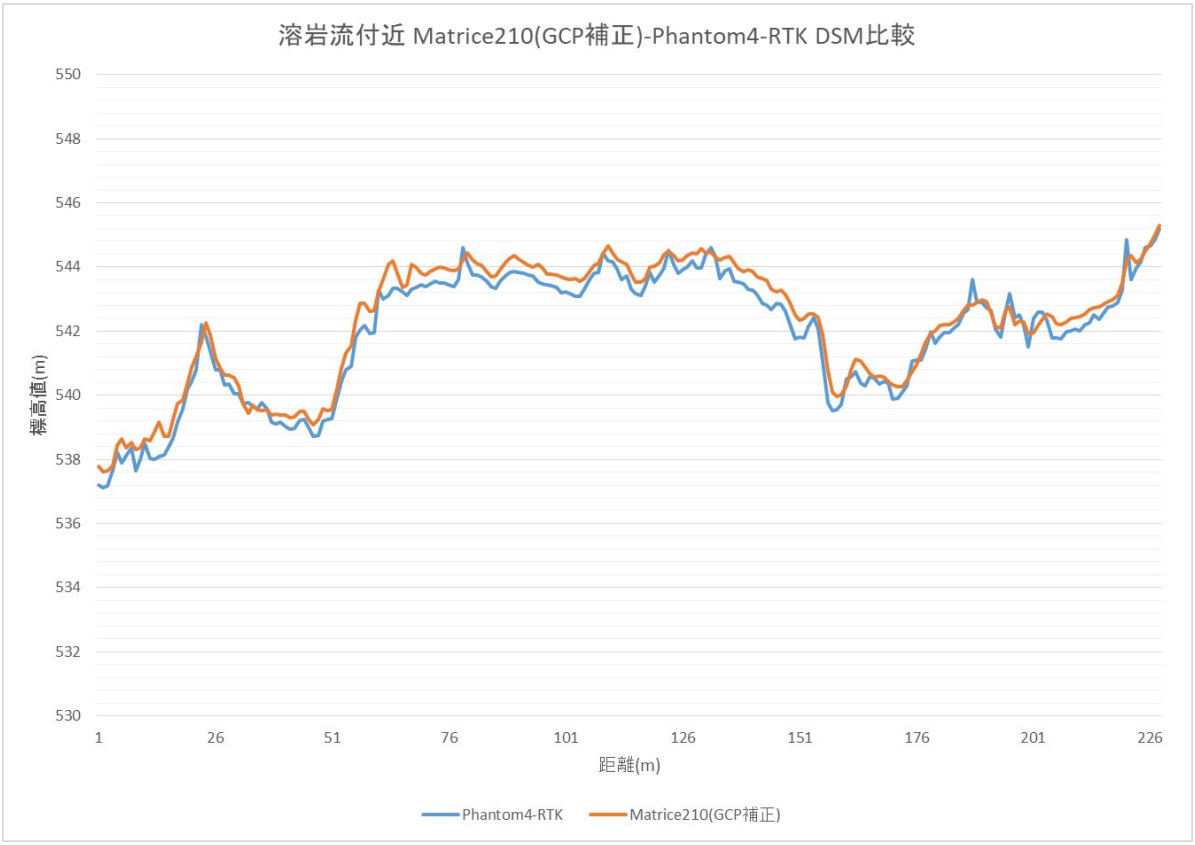


図 26　Matrice210(GCP補正)-Phantom4-RTK DSM比較　断面図①

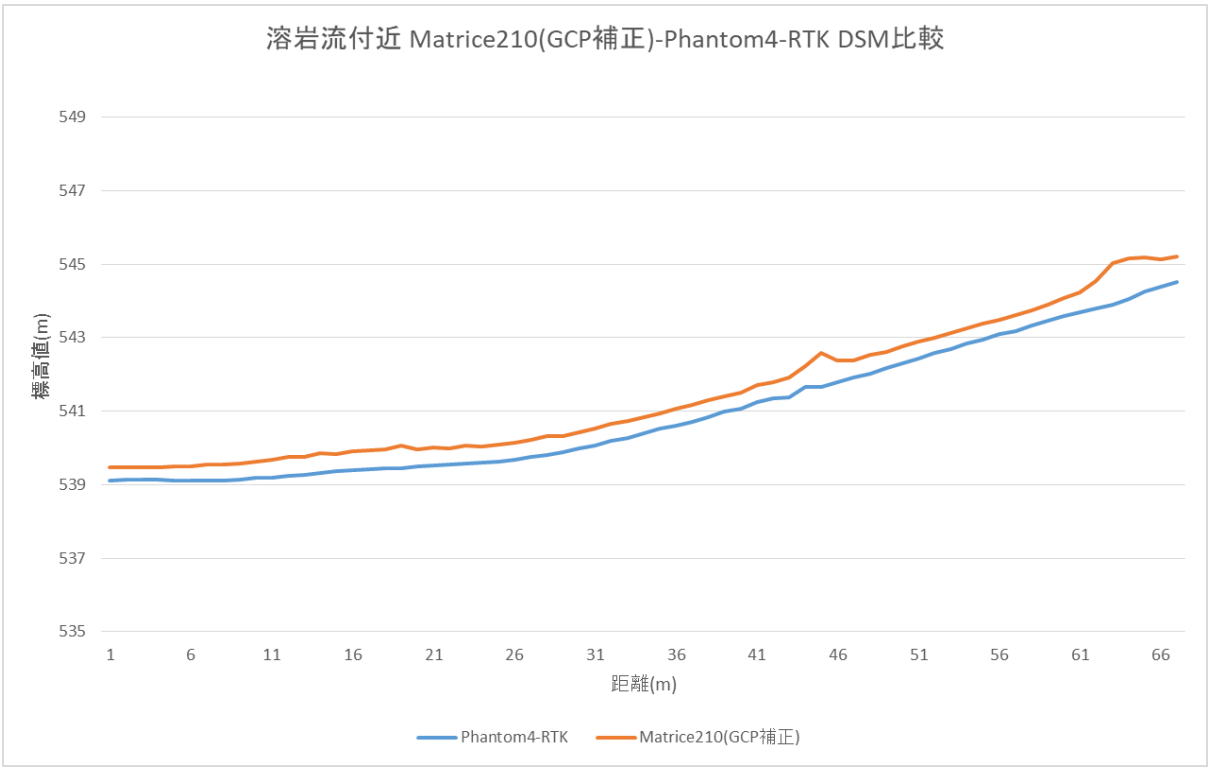


図 27　Matrice210(GCP補正)-Phantom4-RTK DSM比較　断面図①

d)最低限の GCP 付与による Phantom4-RTK 撮影データの位置精度・歪み補正

今回の検証では Phantom4-RTK での高精度な計測結果を得られなかったが、最低限の GCP を付与することで、複数の GCP で補正を行った Matrice210 撮影データから作成したモデルと同等の精度を得ることができないか検証を実施した。

検証対象は Phantom4-RTK で撮影を行った三原山火口付近と溶岩流付近のデータで作成したモデルとし、GCP を 3 点・4 点・5 点で均等に付与し、モデルの補正状況を Matrice210 撮影データから作成した DSM と比較を行い、評価を行った。

i)三原山火口付近

以下に GCP3～5 点の付与した箇所と、補正したデータと Matrice210 撮影データから作成したモデルとの DSM を比較した結果として、図 17 で示す位置の断面図を示す。

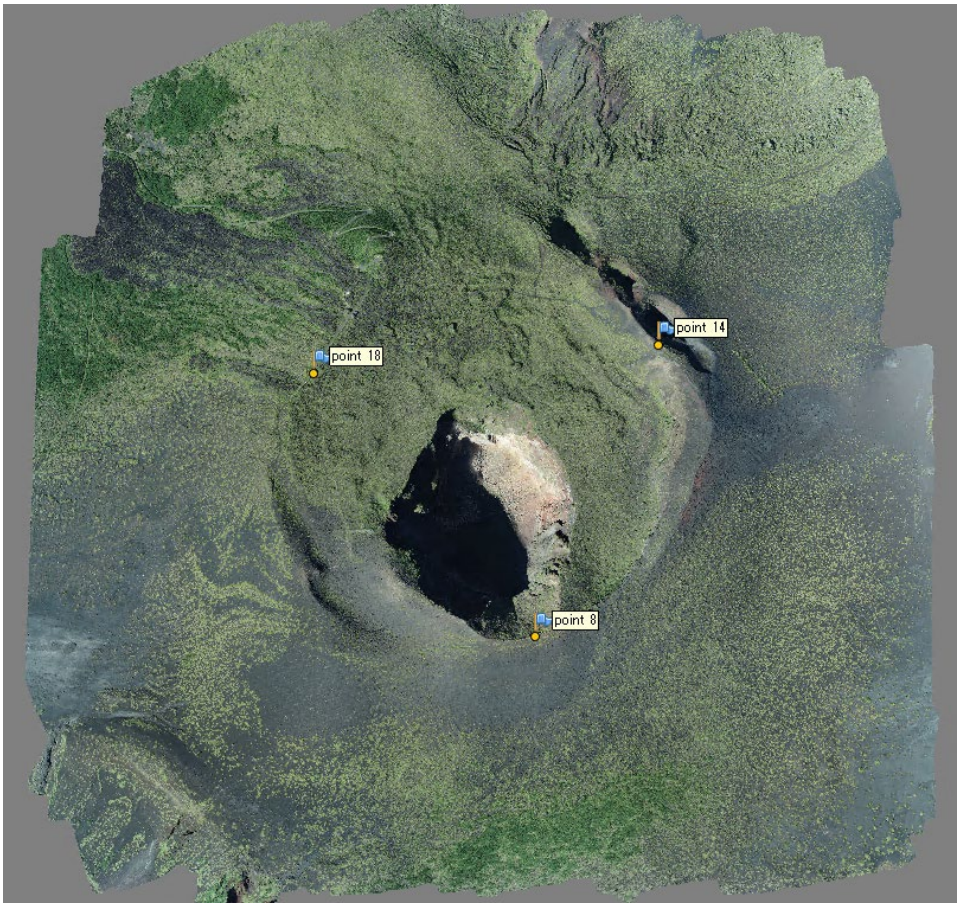


図 28　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル GCP3点での補正

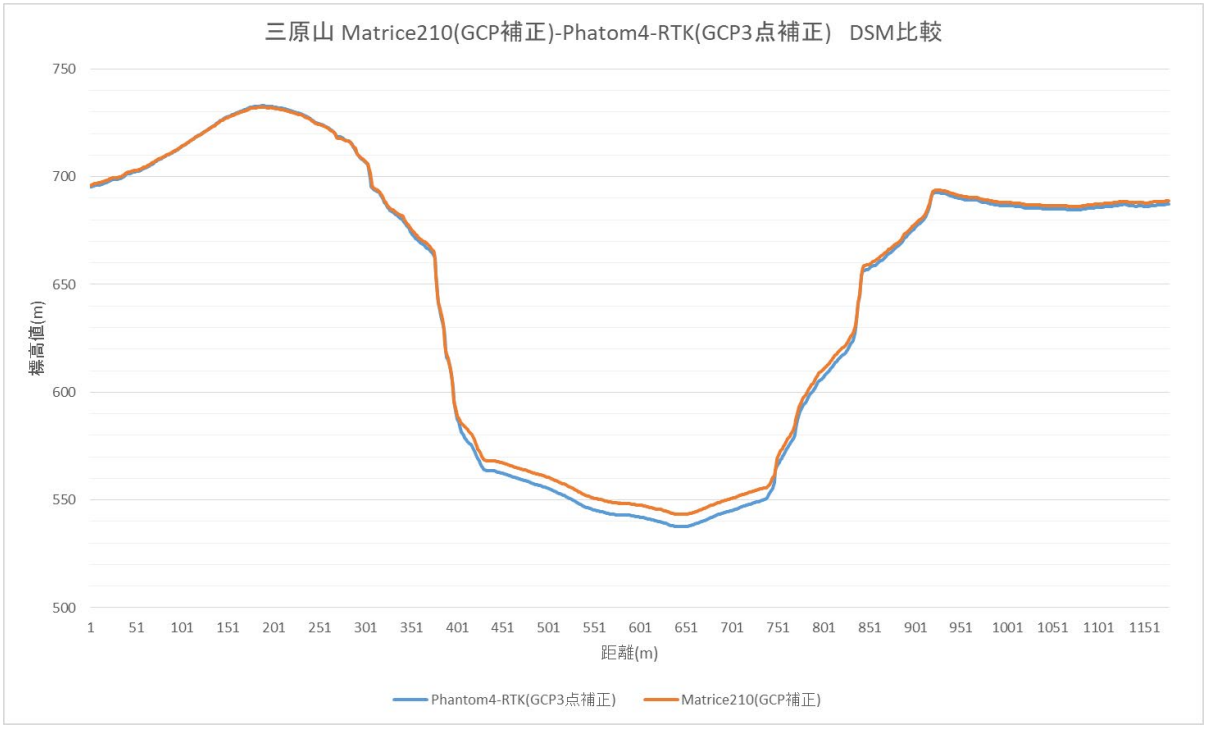


図 29　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP3点補正) DSM比較 断面図①

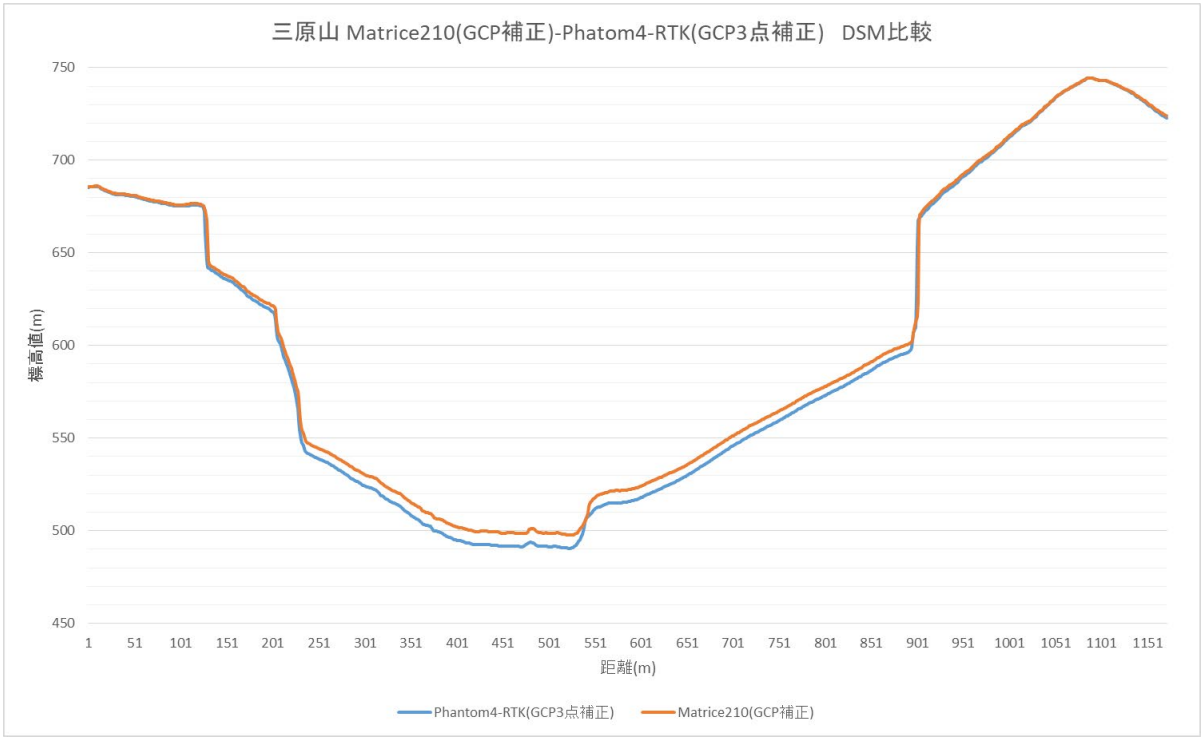


図 30　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP3点補正) DSM比較 断面図②

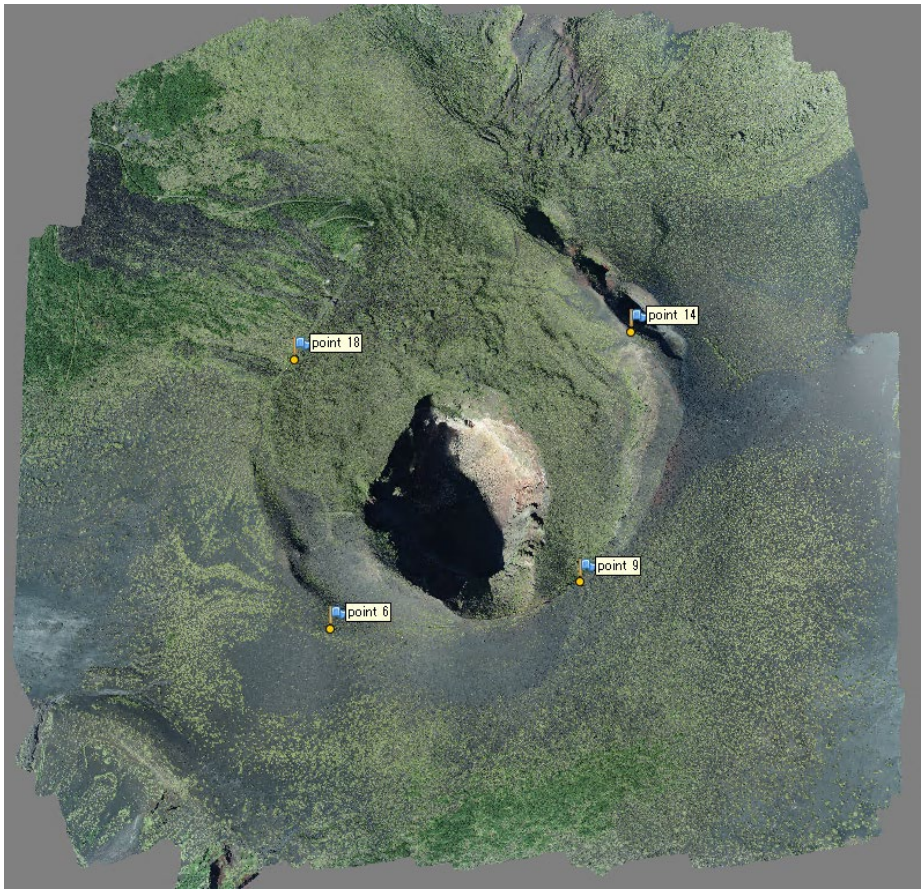


図 31　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル GCP4点での補正

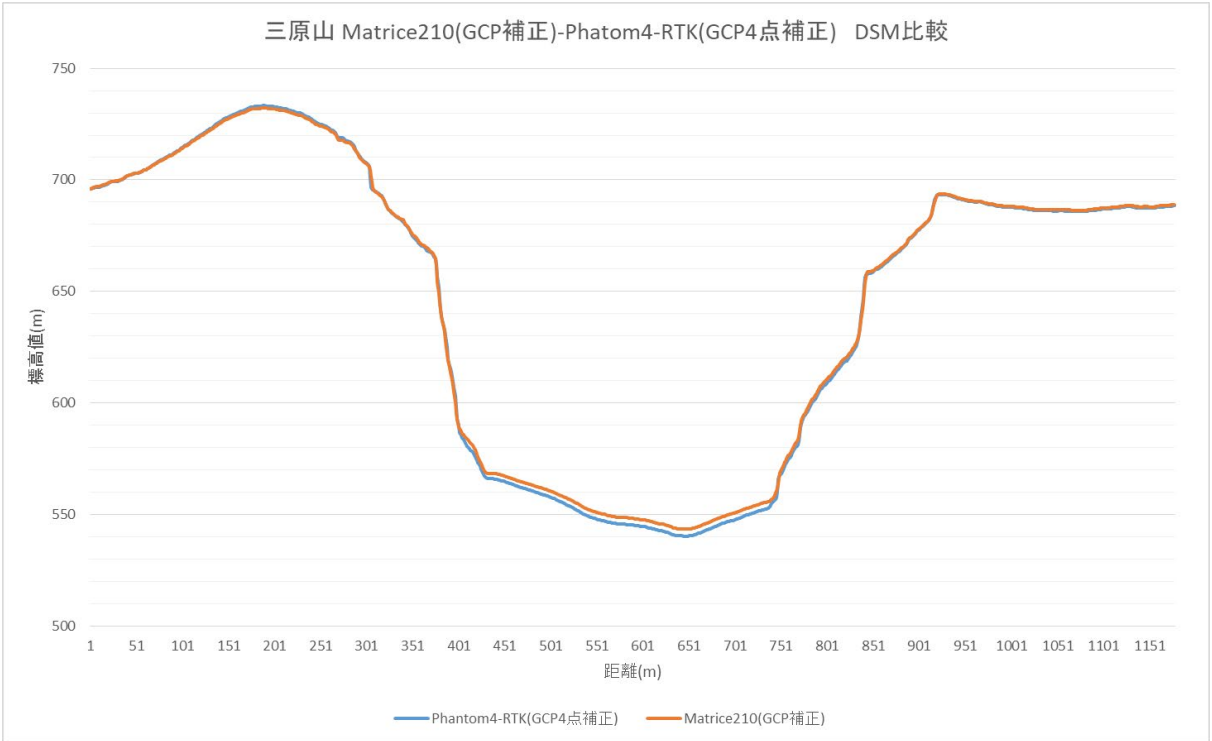


図 32　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP4点補正) DSM比較 断面図①

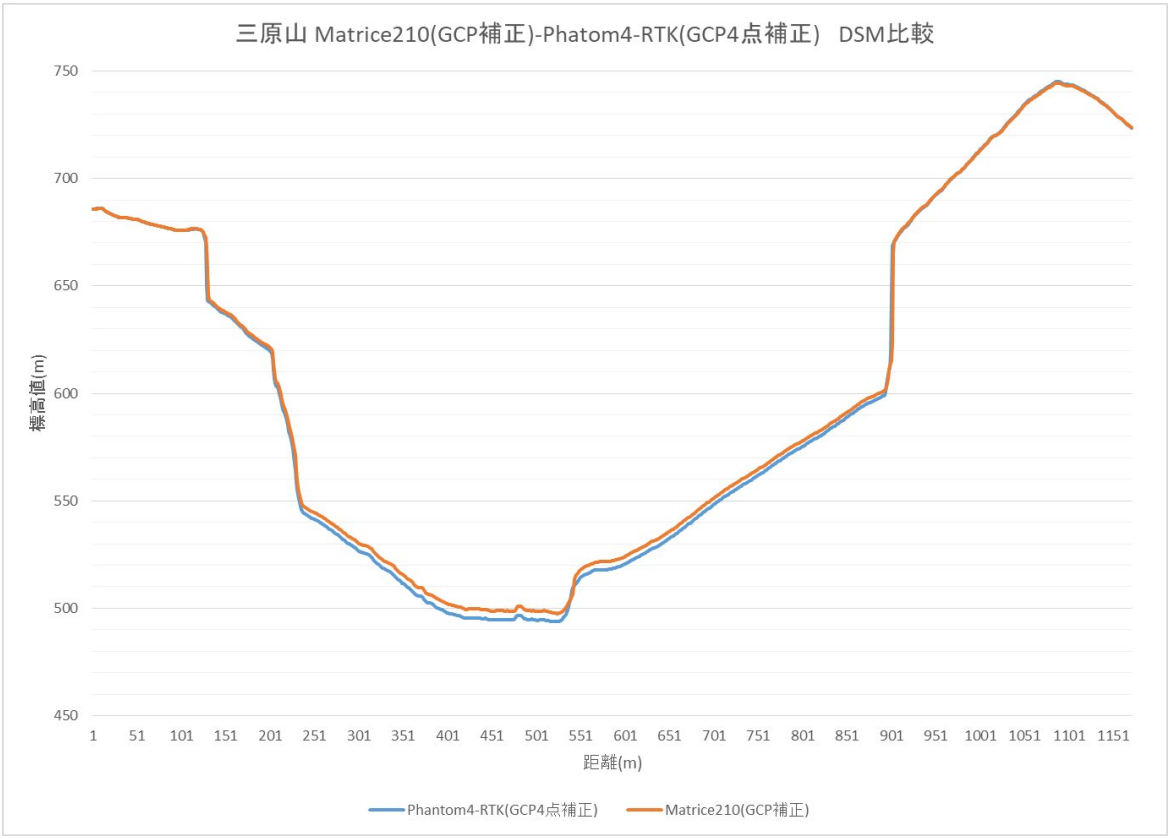


図　33　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP4点補正) DSM比較 断面図②

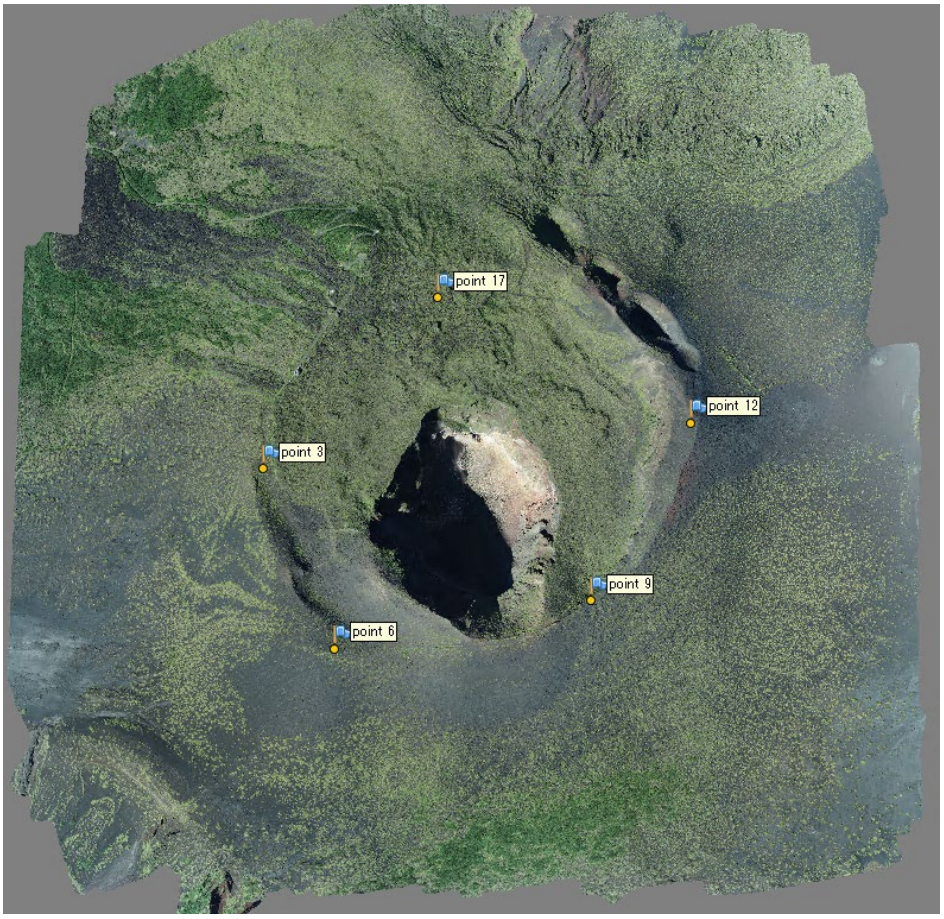


図　34　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル GCP5点での補正

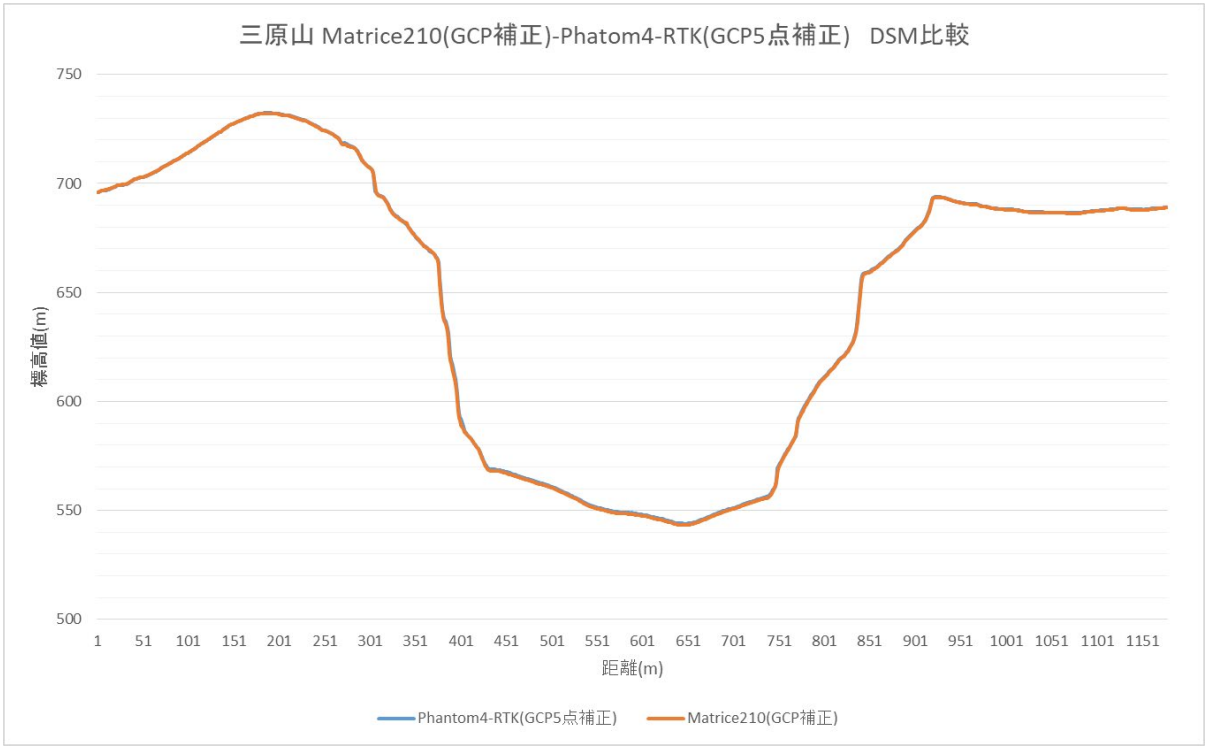


図 35　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP5点補正) DSM比較 断面図①

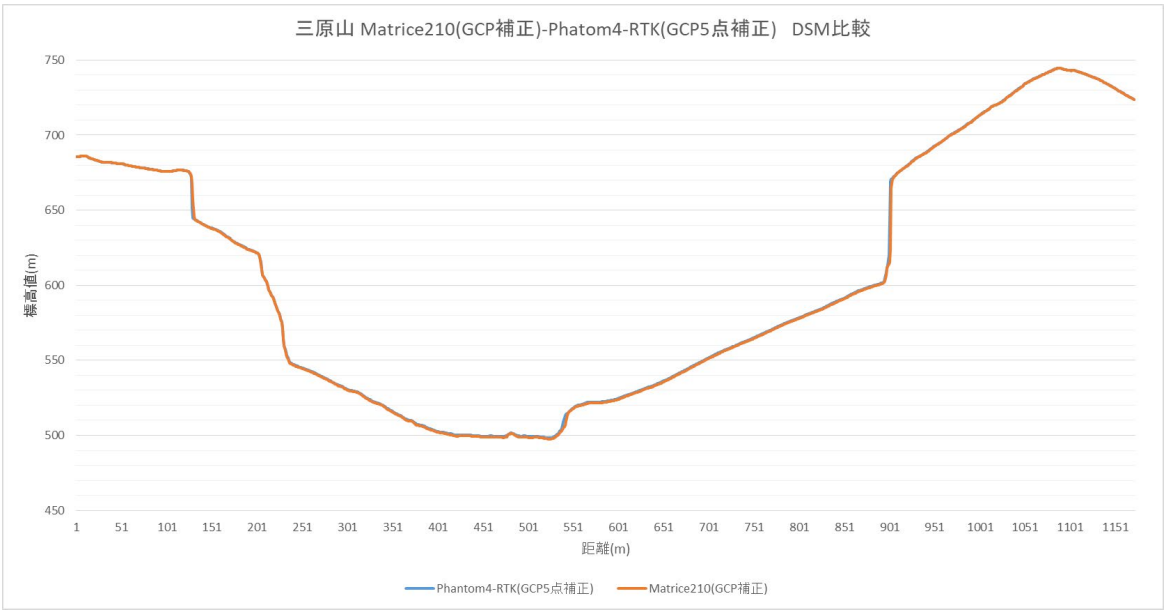


図 36　三原山火口付近 Phantom4-RTK作成モデル(GCP5点補正) DSM比較 断面図②

各データの DSM の比較結果において、断面位置での高さ方向の差分を RMS(二乗平均平方根)でまとめた。GCP3 点補正の場合は、断面位置①で 3.181m、断面位置②で 5.098m、GCP4 点補正の場合は、断面位置①で 1.719m、断面位置②で 3.152m、GCP5 点補正の場合は断面位置①で 0.542m、断面位置②で 1.777m であった。

三原山火口付近のように高低差が大きく発生している箇所では、GCP5 点補正でも 1m 程度のずれが発生するケースも確認できたため、高さ方向のずれを補正するために最低限 5 点以上の GCP を使用する必要があると考えられる。

ii)溶岩流付近(三原山)

以下に GCP3～5 点の付与した箇所と、補正したデータと Matrice210 撮影データから作成したモデルとの DSM を比較した結果として、図 25 で示す位置の断面図を示す。

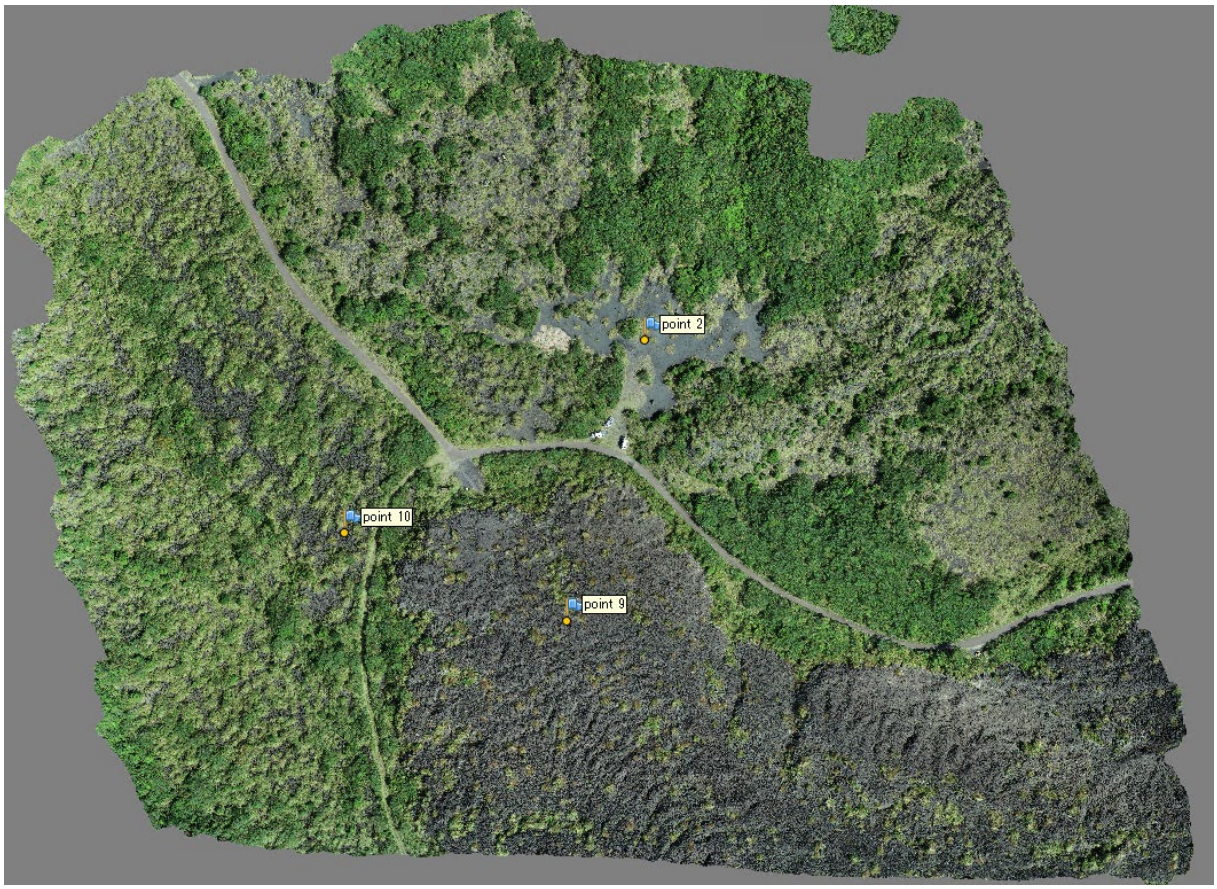


図 37　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル GCP3点での補正

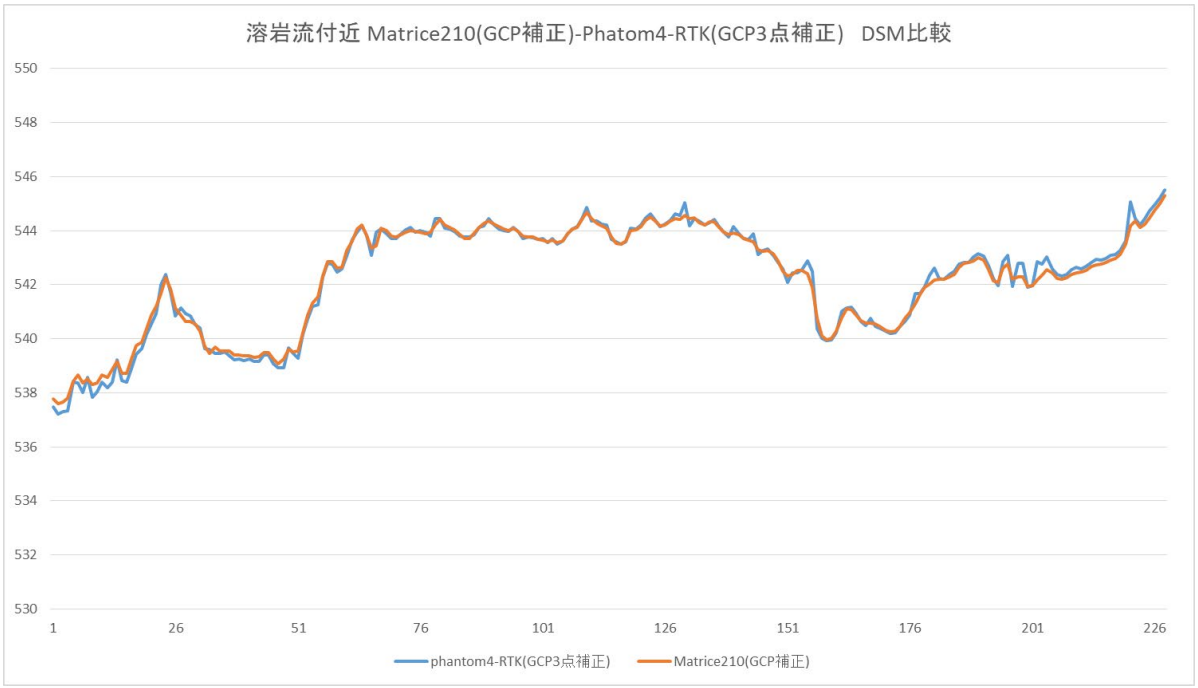


図 38　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP3点補正) DSM比較 断面図①

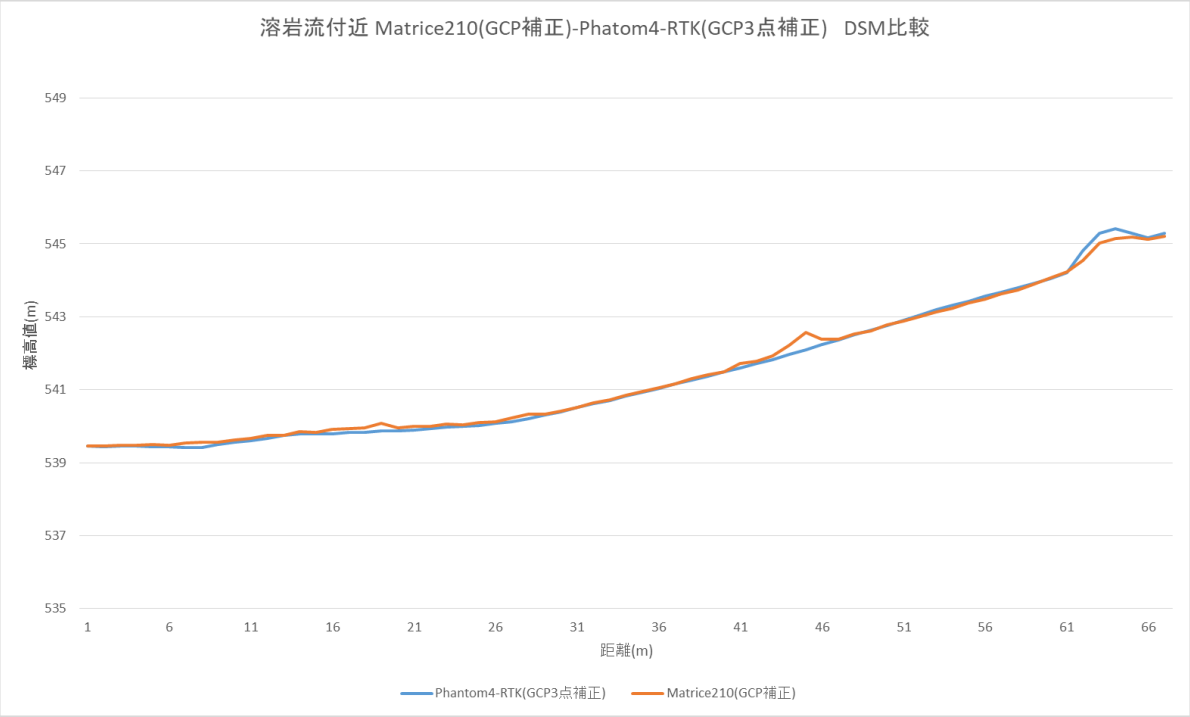


図 39　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP3点補正) DSM比較 断面図②

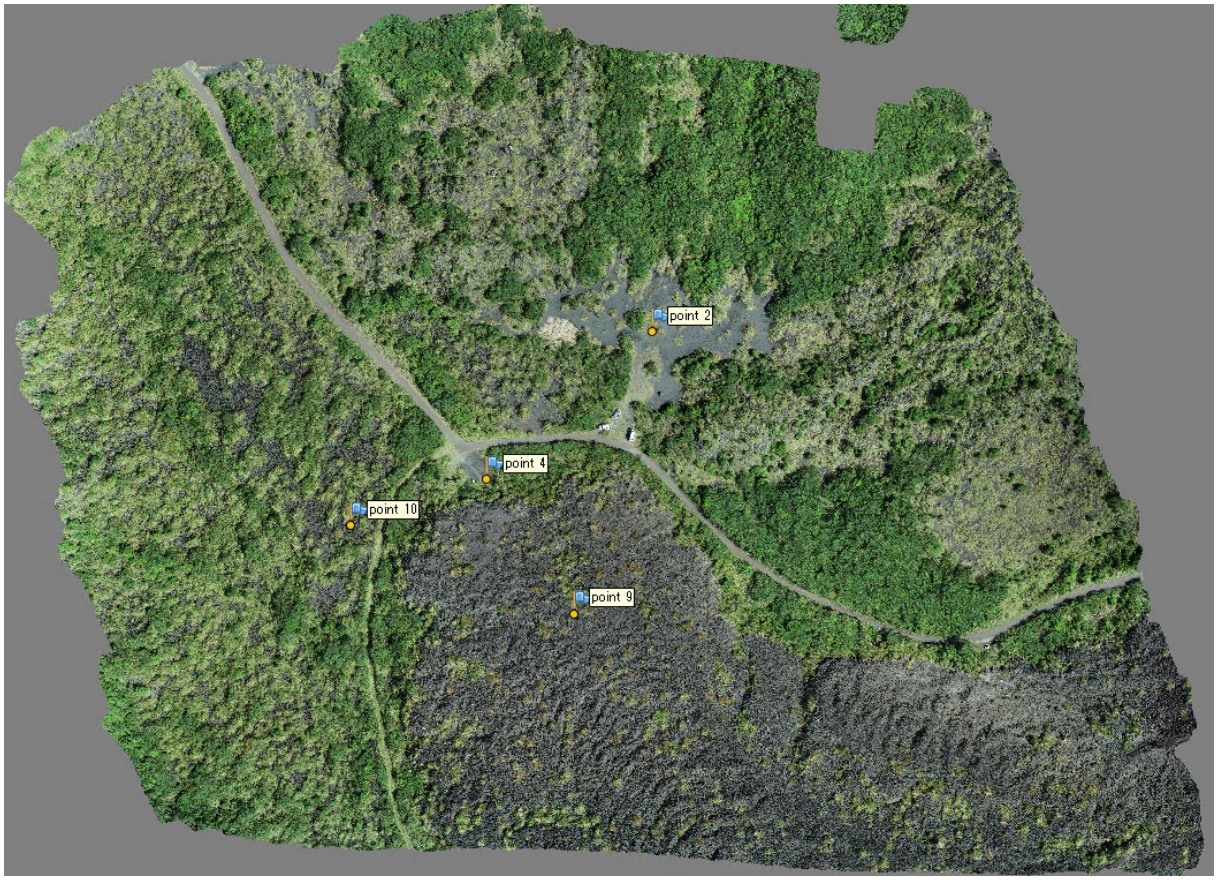


図 40　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル GCP4点での補正

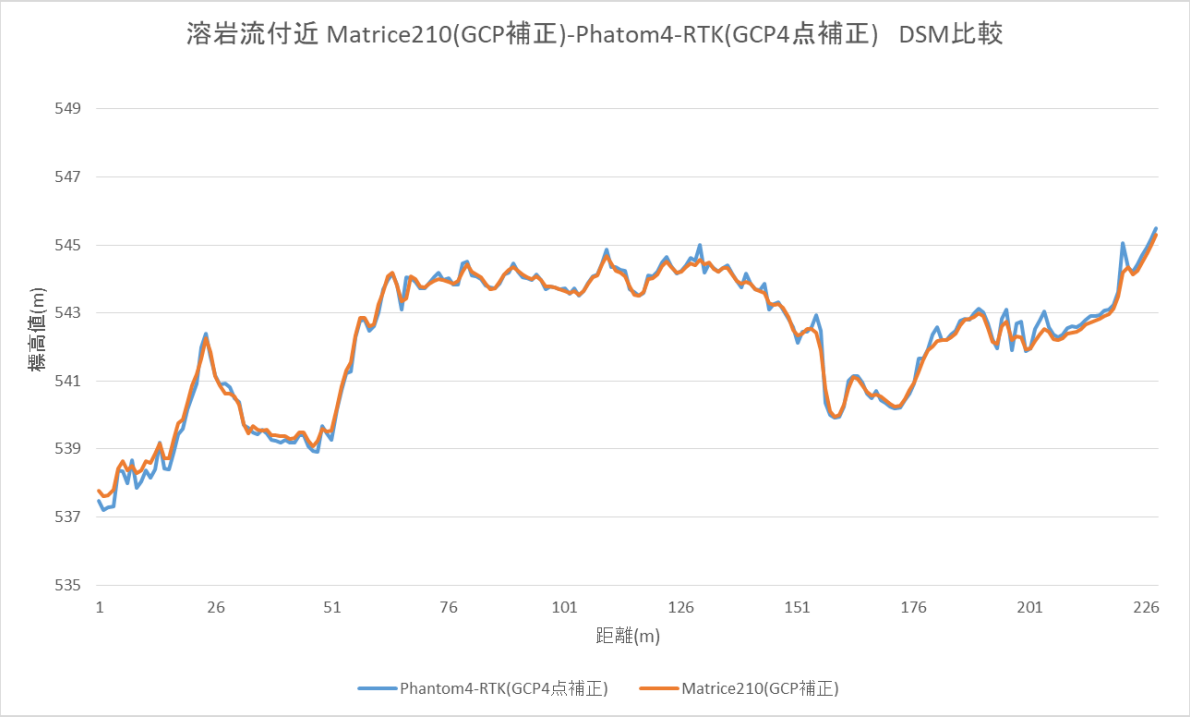


図 41 溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP4点補正) DSM比較 断面図①

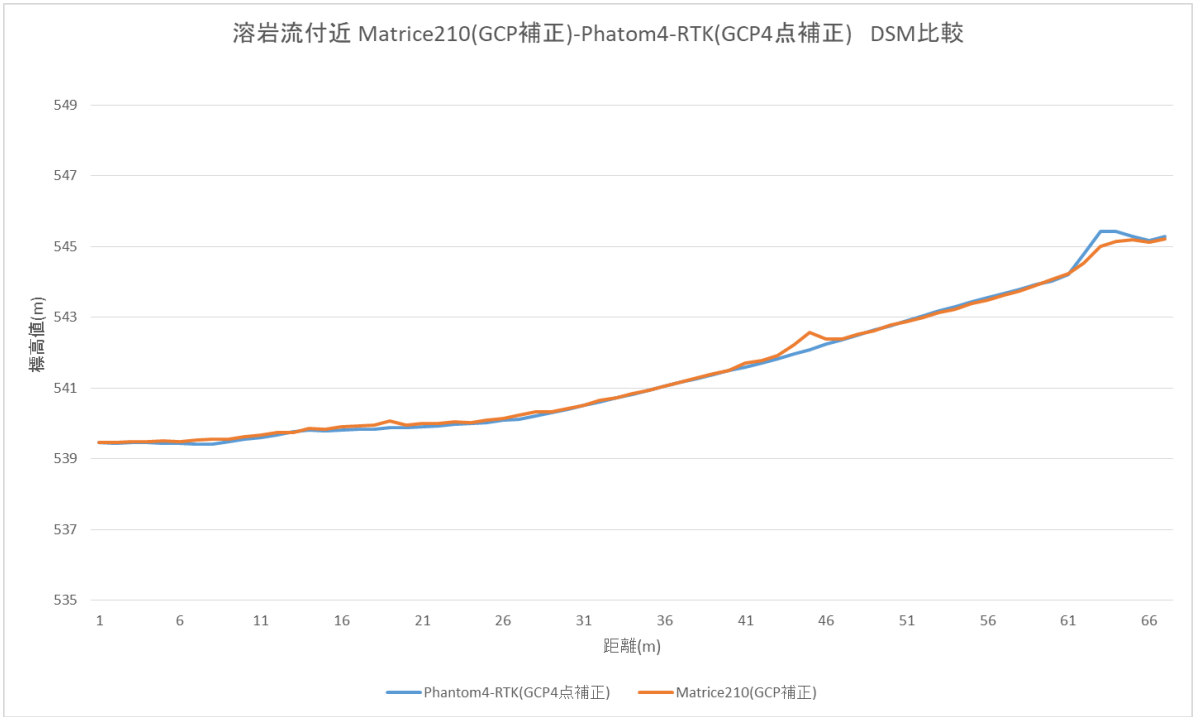


図 42 溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP4点補正) DSM比較 断面図②

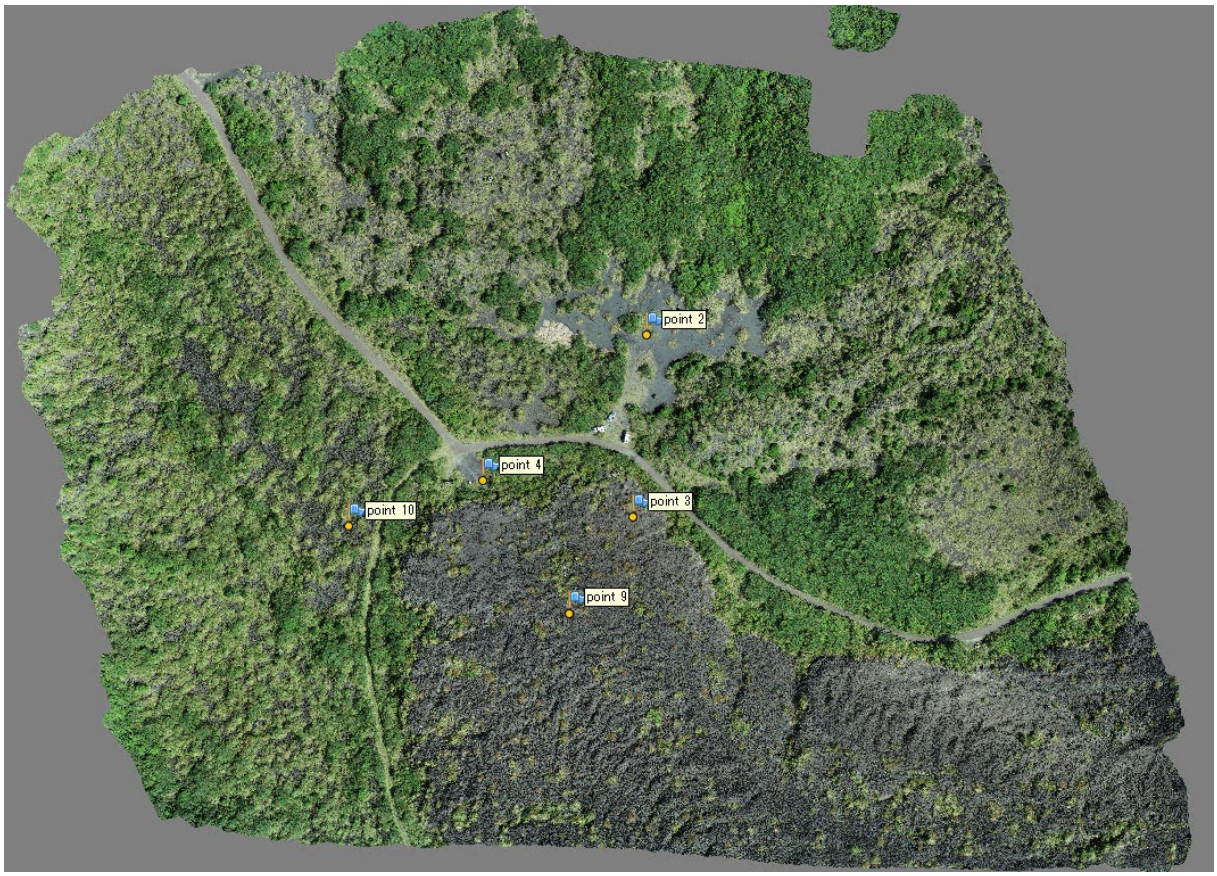


図 43　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル GCP5点での補正

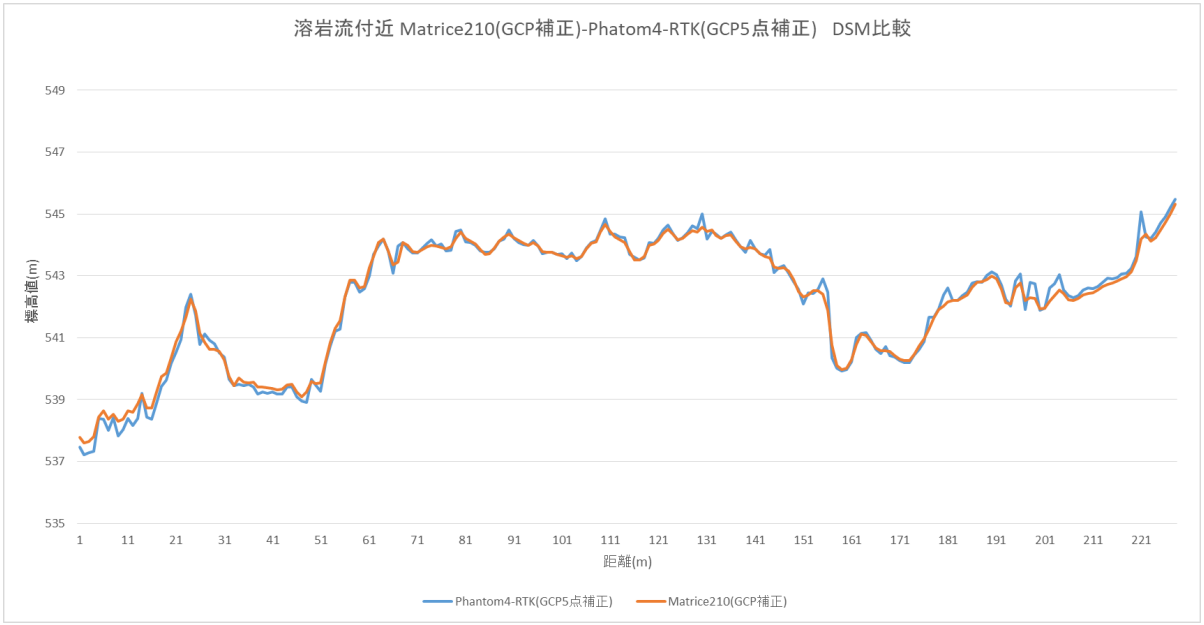


図 44　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP5点補正) DSM比較 断面図①

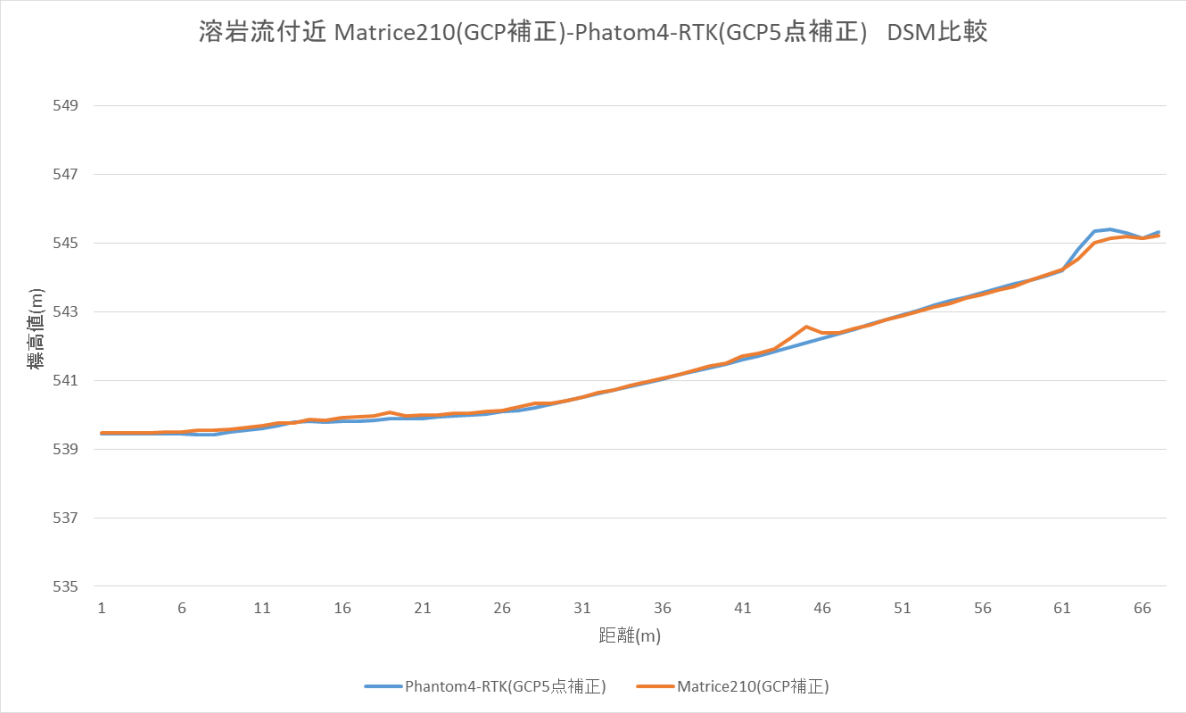


図 45　溶岩流付近(三原山) Phantom4-RTK作成モデル(GCP5点補正) DSM比較 断面図②

各データの DSM の比較結果において、断面位置での高さ方向の差分を RMS(二乗平均平方根)でまとめた。GCP3 点補正の場合は、断面位置①で 0.202m、断面位置②で 0.112m、GCP4 点補正の場合は、断面位置①で 0.194m、断面位置②で 0.117m、GCP5 点補正の場合は断面位置①で 0.197m、断面位置②で 0.114m であった。

溶岩流付近は三原山火口付近のように高低差が大きく発生している箇所ではないため、GCP3 点補正でも 20cm 程度の高さ方向の補正を行うことができた。速報データとしては、GCP3 点補正の結果でも十分に使用できると考えられる。

e)裏砂漠(三原山)　Matrice210 での撮影

三原山の裏砂漠を対象に、Matrice210 で撮影を行い、設置した GCP によりモデルの補正を行った。その結果をもとに、2019 年に被害をもたらした台風 15 号により裏砂漠の地形がどのように変化したのか、台風 15 号以前の DEM と比較を行い、結果の解析を行った。

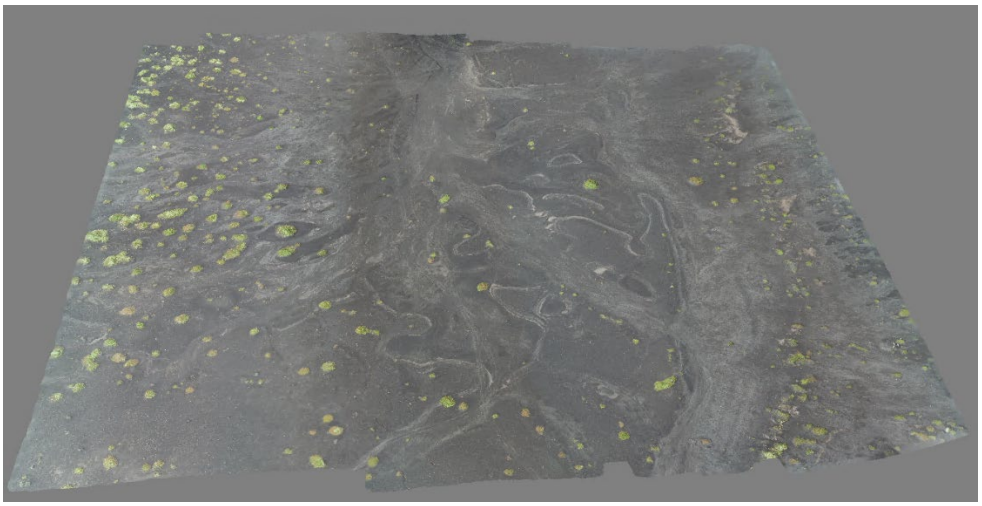


図　46　裏砂漠Matrice210撮影データ作成モデル(GCP補正)

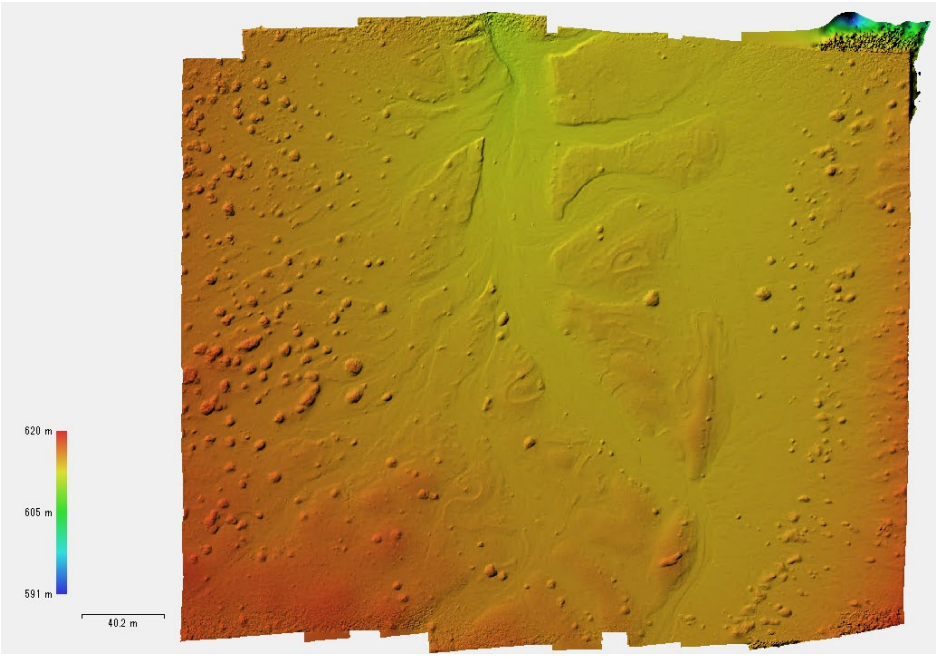


図　47　裏砂漠Matrice210撮影データ作成DSM

図 48 の解析結果から、2019 年台風襲来時の水流による側岸侵食で高さが 1m程度低くなっていることが確認できた。

また、2019 年台風襲来時の風食による高さがに 10~20cm 程度低くなっている箇所も確認できた。

今回の検証結果より、風食による小さな変化についても確認することができたことから、噴火した際の火山灰等の堆積変化についても、UAV で撮影した結果から解析できると考えられる。

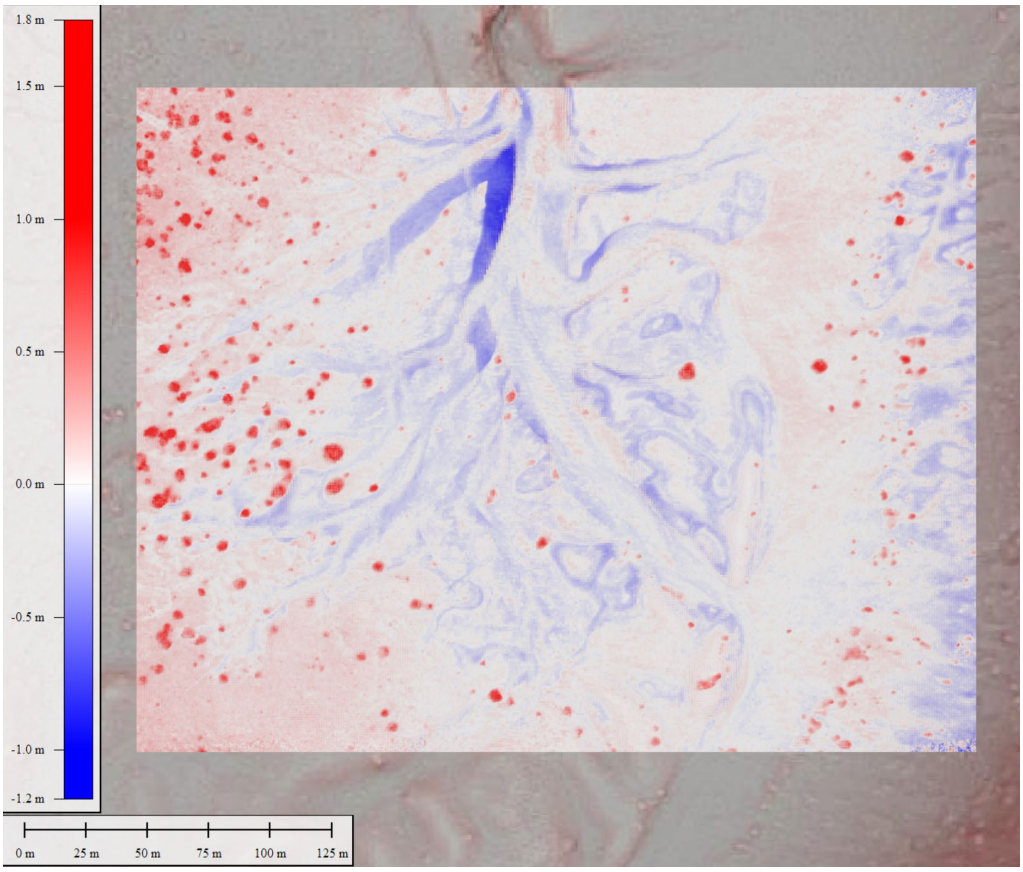


図 48　裏砂漠　台風15号前後のDEMとDSMの差分結果

f)御神火茶屋付近から三原山火口への長距離飛行での撮影

御神火茶屋付近から Matrice210 を使用して、三原山火口付近までの長距離での飛行と撮影を行った。この撮影は、噴火時に離れた地点からの飛行・撮影が可能であるかの検証として実施した。



図 49　御神火茶屋付近からの撮影ルート(出典：地理院地図)



図 50　御神火茶屋から約1.5km地点の三原山山頂付近での撮影画像

御神火茶屋付近から三原山火口付近までの距離はおおよそ 2km である。今回の飛行では、飛行中に UAV 本体との接続が切れることなく、問題なく撮影を行うことができた。

これは噴火警戒レベル３－①「カルデラ内および山頂火口から約 2km までの範囲への立入規制」が発表された場合にも、立ち入り禁止範囲外から撮影できることが想定され、噴火時にも離れた位置からの撮影で可能であることが確認できた。

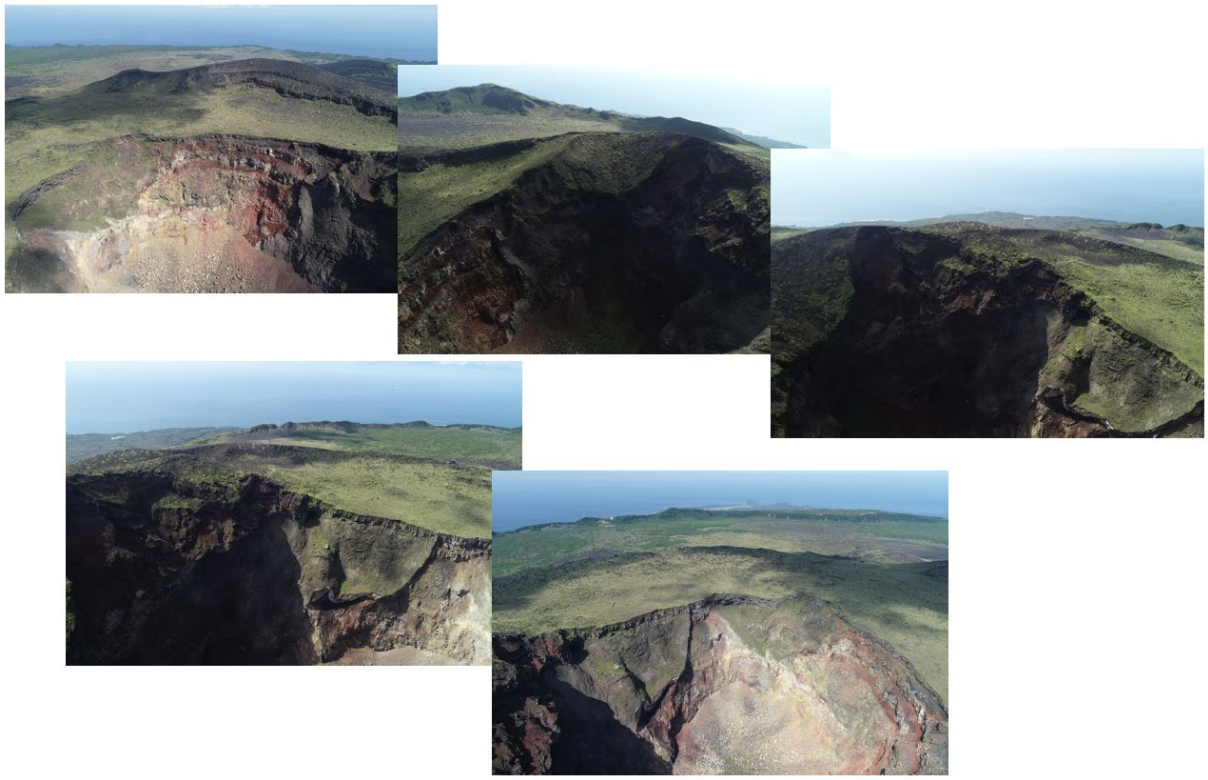


図 51　御神火茶屋から約2km地点の火口内部の撮影画像

3)　SfM/MVS計算時間の短縮

データ取得後に作成する三次元モデルの精度を向上させることで、迅速な状況把握が可能となるが、高精度の三次元モデルの作成には、時間を要する。高速化と高精度化は、相反する関係であるため、処理時間を優先すると、精密な三次元モデルを作成することが難しくなる。

今年度は、高精度な三次元モデルを短時間で作成するために、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器（アジア航測で開発中）を使用し、三次元モデルの作成を行った。三次元モデルの精度及び処理時間を汎用 PC 及び市販ソフトウェアと比較した。



図 52　SfM/MVS計算に特化した専用機器

専用機器と汎用 PC 及び市販ソフトウェア（Metashape）において、三次元モデル作成の処理時間を比較した。処理データは、Matrice210 で撮影した 429 枚の 4K 画像を用いた。

表 6　処理時間の比較

機器	三次元モデルの精度	モデルのメッシュ数	処理時間
専用機器	高精度 (オリジナル画像の解像度で作成)	16,157,863	4 時間 52 分 11 秒
汎用 PC 及び市販ソフトウェア	高精度 (オリジナル画像の解像度で作成)	23,933,307	7 時間 54 分 10 秒

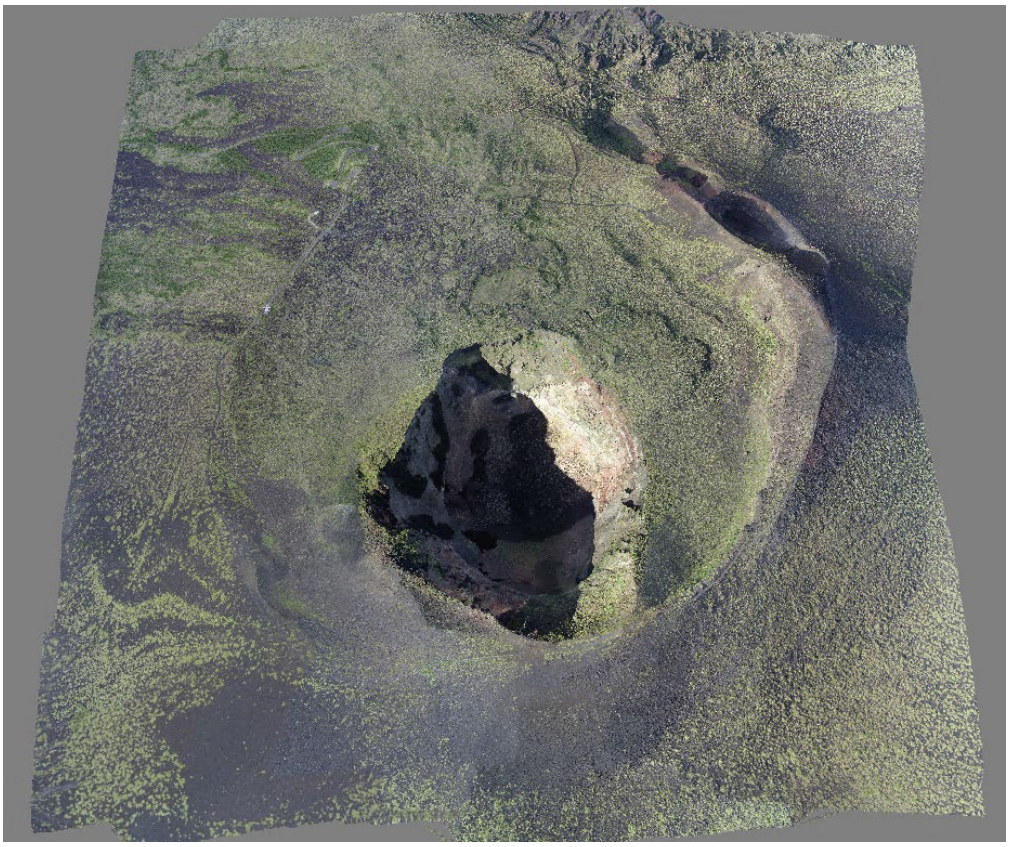


図 53　専用機器で作成した三次元モデル

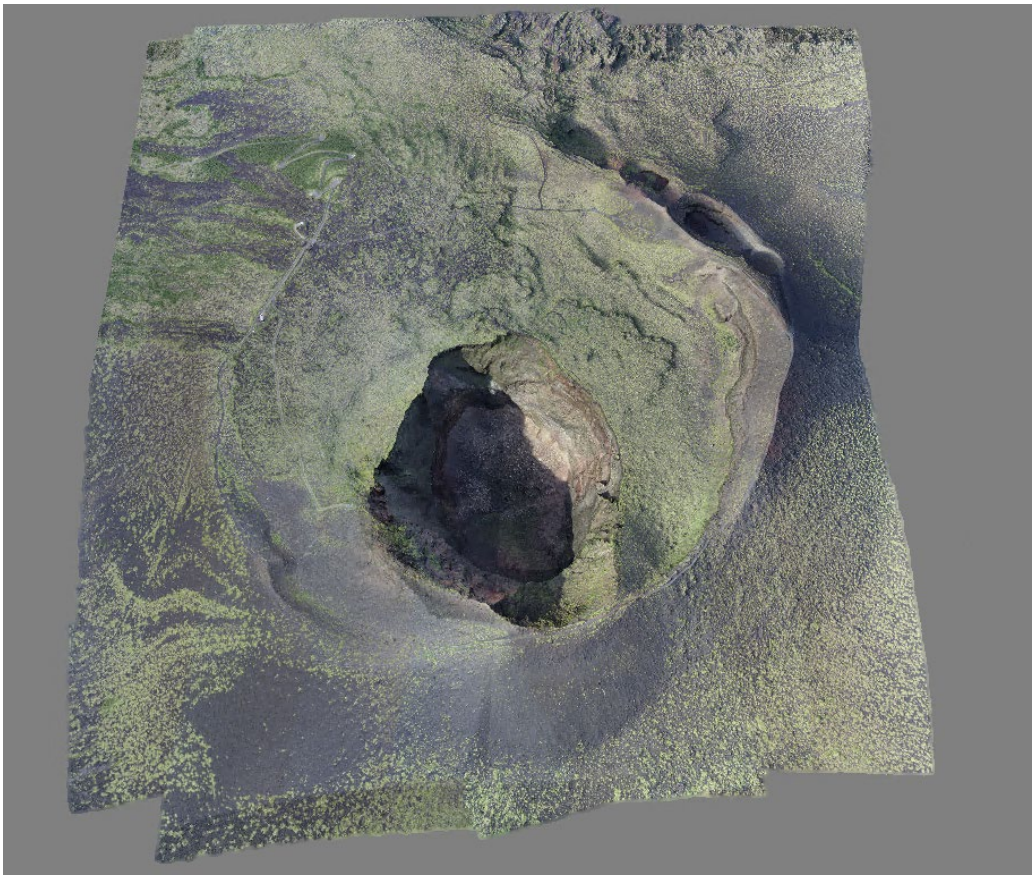


図 54　汎用PC及び市販ソフトウェアで作成した三次元モデル

汎用 PC 及び市販ソフトウェアは、専用機器に比べ約 3 時間処理に時間がかかる。ただし、モデルのメッシュ数は、汎用 PC 及び市販ソフトウェアの方が多い結果となり、より詳細なモデルを作成することができている。

汎用 PC の場合、スペックに依存し処理時間も変わることが想定される。特に、処理に時間がかかっているメッシュを発生させる処理についてはメモリ数に大きく依存するため、PC スペックを上げることで、処理時間は短縮することができると考えられる。

専用機器の場合、処理前の事前準備の工程が少ないため、データ取得から処理完了までの全体的な時間では、より短時間で処理を完了させることができる。

専用機器には、モードとして高精度の「BEST」と低精度の「FAST」が存在する。「FAST」とすると精度は低くなるが処理時間は短くなる。「FAST」で処理した場合の時間は、画像枚数・画質にも影響するが 4K 画像を 500 枚程度処理する場合で約 30 分程度の処理時間でモデルが作成できる。

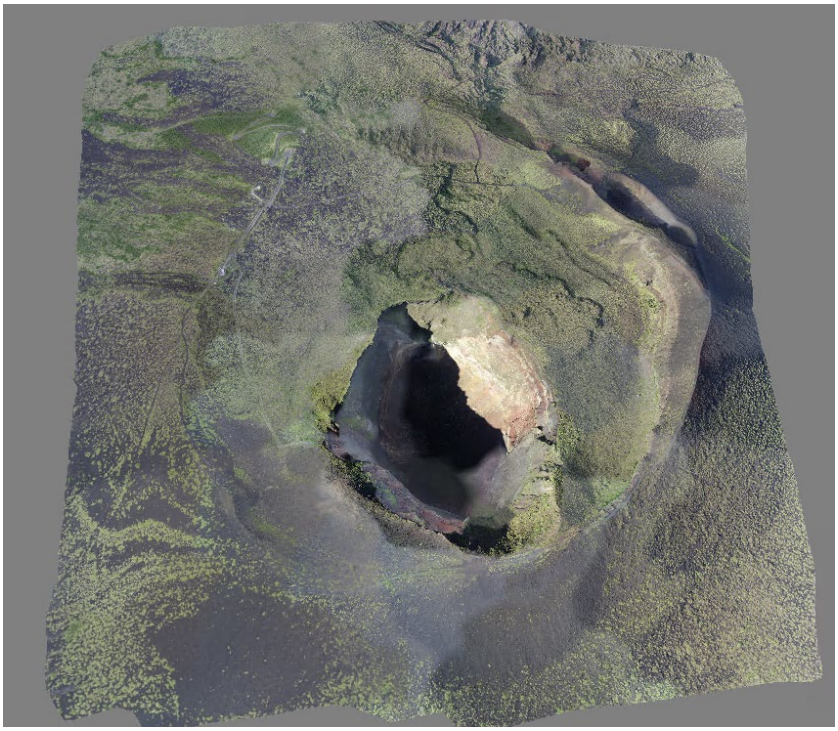


図 55　専用機器「FAST」モードで作成したモデル

「FAST」モードで作成したモデルのメッシュ数は 30,000～50,000 程度となるが、噴火時の速報としては利用できるデータではないかと考えられる。

噴火時は、低精度だが迅速に三次元モデルを提供するには専用機器を用いて、平行して汎用 PC 及び市販ソフトウェアを用いて高精度の三次元モデルを作成することが良いのではないかと考えられる。

データ処理の高速化を目的とし、UAV の飛行と同時に三次元処理する市販ソフトウェアも開発されているため、このような最新技術を活用することも検討する必要がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

伊豆大島において、RTK-GNSS 搭載 UAV を用いた撮影を行い、基準点（GCP）を設置せずに３D モデルを作成する方法を研究した。2019 年度と同様に GCP を火口周辺に設置し「RTK-GNSS 搭載 UAV」の Phantom4-RTK と「未搭載 UAV」の Matrice210 で同一エリアの撮影を行い、比較検証を行った。GCP 補正した Matrice210 と Phantom4-RTK の DSM を比較すると、火口周辺では 10m 程度、溶岩流では 40～50 ㎝程度のずれが生じたが、GCP を 3～5 点用いて解析すると誤差が減少する。計測時の衛星や基地局との接続状況にもよるが、計測方法については引き続き検証が必要であると考えられる。

伊豆大島の噴火時には立入規制となるため、噴火時に離れた地点からの飛行・撮影が可能であるかの検証を行った。御神火茶屋付近から三原山火口付近までの約 2km の長距離飛行を行ったところ、飛行中に UAV 本体との接続が切れることなく、問題なく撮影を行うことができた。これは伊豆大島の噴火警戒レベル３－①「カルデラ内および山頂火口から約 2km までの範囲への立入規制」が発表された場合にも、立ち入り禁止範囲外から撮影できることを確認した。

高精度な三次元モデルを短時間で作成するために、SfM/MVS 計算に特化した専用の機器を使用し、三次元モデルの精度及び処理時間を汎用 PC 及び市販ソフトウェアと比較した。汎用 PC 及び市販ソフトウェアは、専用機器に比べ約 3 時間処理に時間がかかる。ただし、モデルのメッシュ数は、汎用 PC 及び市販ソフトウェアの方が多い結果となり、より詳細なモデルを作成することができている。噴火時は、専用機器を用いて低精度だが迅速に三次元モデルを作成し、平行して汎用 PC 及び市販ソフトウェアを用いて高精度の三次元モデルを作成することが望ましいと考えられる。データ処理の高速化を目的とし、UAV の飛行と同時に三次元処理する市販ソフトウェアも開発されているため、このような最新技術を活用することも検討する必要がある。

今後の課題として、RTK-GNSS 搭載 UAV を用いて、安全を確保しつつ、３Dモデルの精度を向上させる技術開発が必要である。また、5～7 年目の目標である数時間以内のデータ処理完了のためには、SfM/MVS 計算時間をさらに短縮させる手法検討が必要である。取得したデータの共有について、伊豆大島のデータを用いた具体的な連携方法の検討を進める必要がある。

(e) 引用文献

なし

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和３年度の業務計画案

(a) プロジェクトの総合推進

- 現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進する。
- サブテーマ 2 との連携：ドローンを活用した地形変化抽出を行い、予測降灰量と照合することを目的として、数値地形モデルの迅速な作成についての実証実験を計画して実施する。
- サブテーマ3との連携: 各種コンテンツのインプットデータとして利用するため、ドローンで取得した画像から地図と重ねられる「オルソ画像」を迅速に作成する手法に関する実証実験を計画して実施する。オルソ画像の必要分解能、体裁等について連携して進める。
- テーマ A、C との連携:災害状況把握のためにドローン等による空域からの画像、画像から作成されるオルソ画像および数値標高モデルのフォーマットや分解能、受け渡し方法について連携して研究する。また、数値シミュレーション用データとして使用される数値標高モデルの分解能、品質、受け渡しのフォーマットについて連携して研究する。
- 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携・融合の一環として、現地で取得した画像から３Ｄ地形モデルを作成する技術の体験、民間企業における火山調査関連技術や火山防災業務の紹介等のプログラムを計画・準備した上で、開催案内と参加者募集を行う。
- 東京都大島町において説明会を開催し、取得データに関する自治体等からのニーズを把握する。

(b) RTK-GNSS搭載UAVの導入による計測精度向上と高速

- 2021 年度は、実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの飛行による高精度現状把握手法の開発を計画する。
- 噴火によって、火口付近の立ち入りが不可能な場合はもちろん、火口周辺の地形が大きく変化し、既往の GCP が失われたようなケースでも、位置やゆがみの補正をすることなく、迅速に差分計算し、噴出量などを求めることも想定して研究を進める。

(c) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発

- これまで火口などの地形を高精度に把握する手法を検討するため、計測対象エリア近傍から計測を行い精度向上の検討を行ってきた。しかし、実際の噴火では計測は立入規制区域外からの撮影となり、火口上空を飛行することができないことも想定される。また、日中だけではなく夜間のデータ取得などが求められる可能性がある。
- 2021 年度は、実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの夜間飛行による撮影を実施し、夜間における高精度現状把握手法の開発を計画する。
- また、火口上空を飛行できないことも考え、日中に火口内を斜め撮影し、取得画像から写真測量技術を用いて解析する手法を開発する。

(d) SfM/MVS計算時間の短縮

- 2021 年度は RTK-GNSS 搭載 UAV を用いてリアルタイムにデータ処理を行うソフトウェアを購入し、高精度の３D 地形モデルをさらに短時間で作成する手法について研究する。

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	共同実施期間	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度化技術開発、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度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度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関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度化技術開発」、「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度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、予測の高速度化及び高精度化技術をさらに発展させたうえで、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、ディスド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、ディスドロメータ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ド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、ディスド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、ディスド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。

ディスド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。ディスド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、ディスド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ド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。

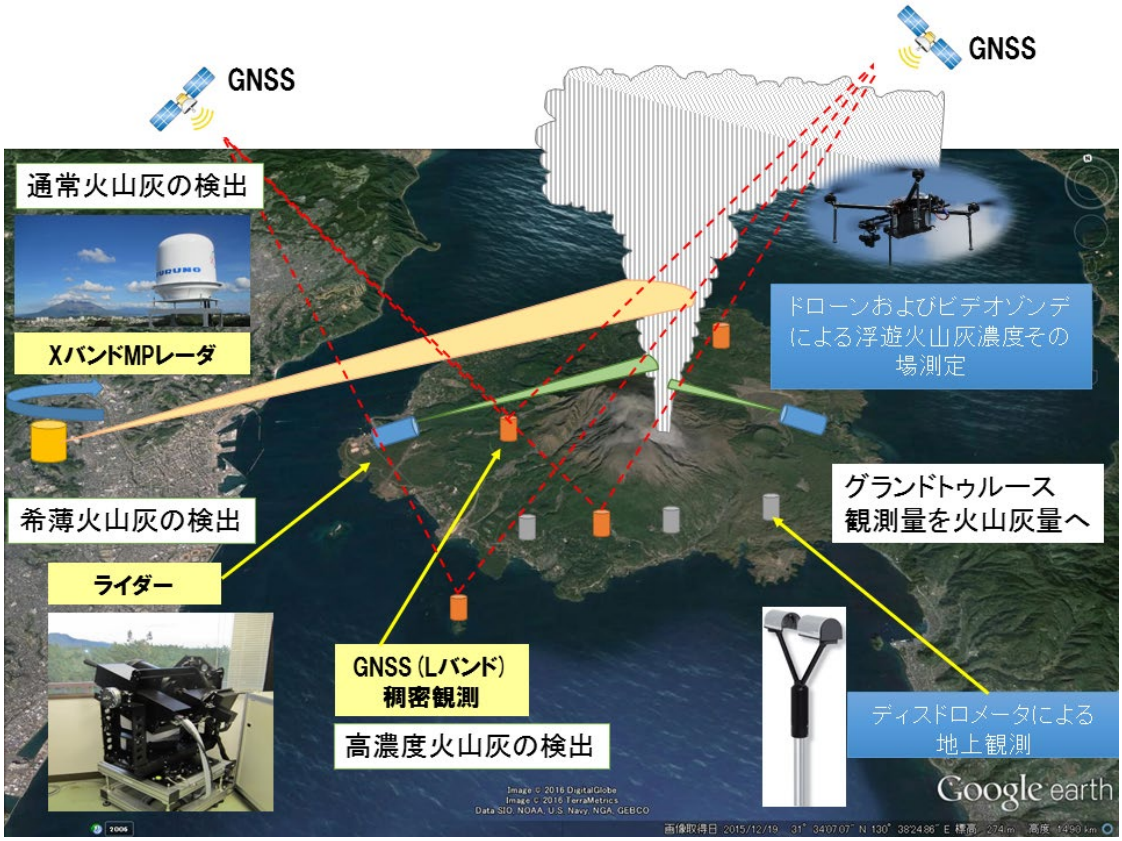


図 1　火山灰のマルチパラメータ観測の概要。

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ので、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。霧島市立牧園中学校に設置したもの

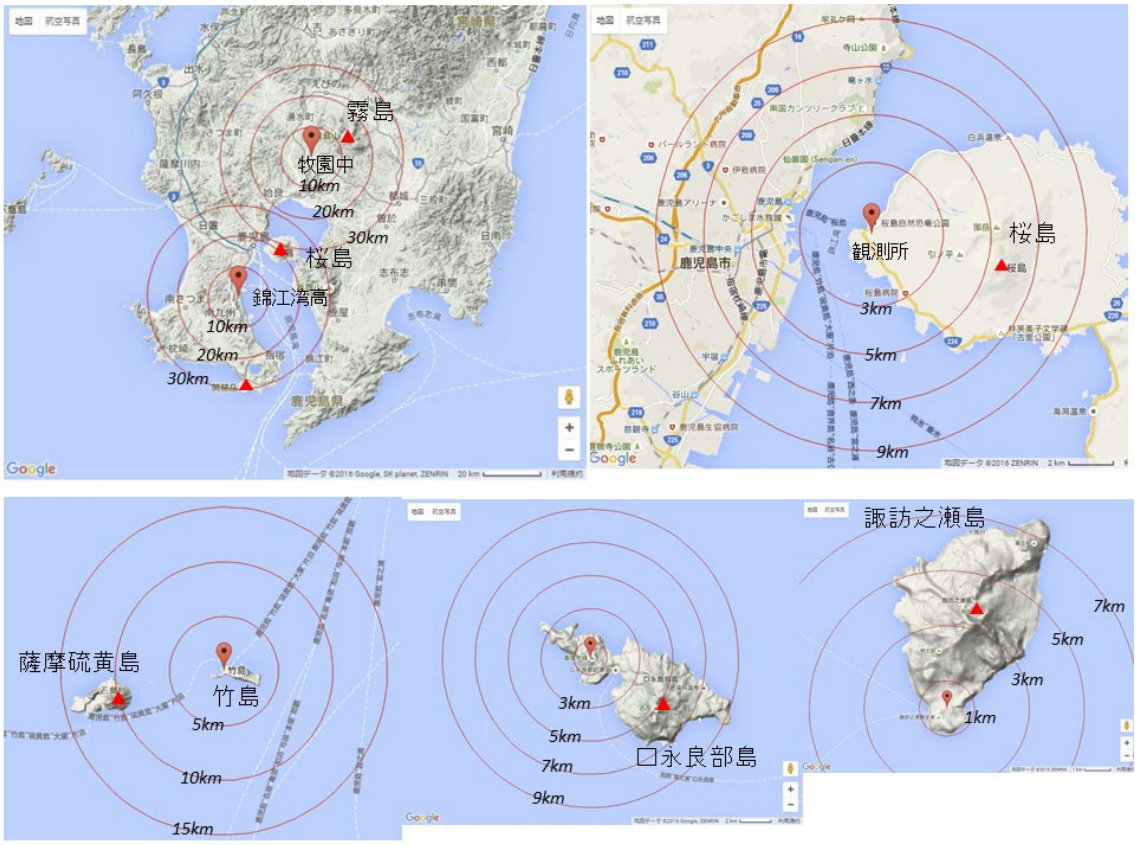


図 4　霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島における X バンド MP レーダーの観測範囲

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 5 cm 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 3.3 km）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 1500 m 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 1300 m から 1700 m）と報告された。しかし前述の通り実際は 3000 m 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。

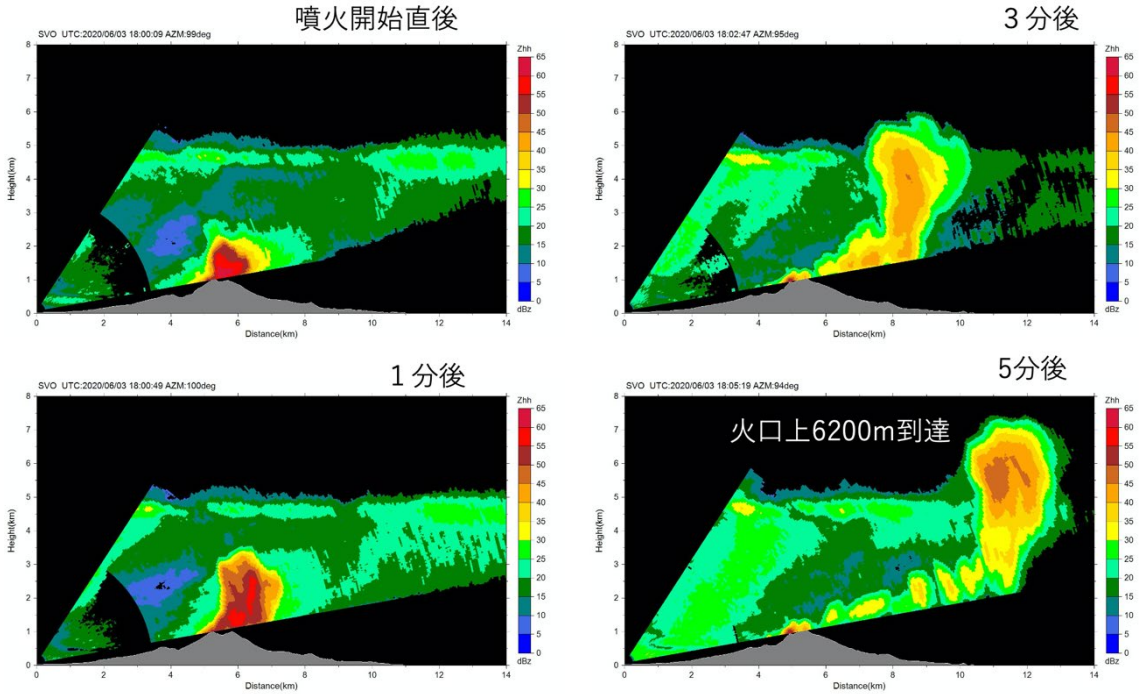


図 5　桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 6 月 4 日 3:00～3:04 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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抜 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抜 2000 m、つまり火口上 1400 m である。

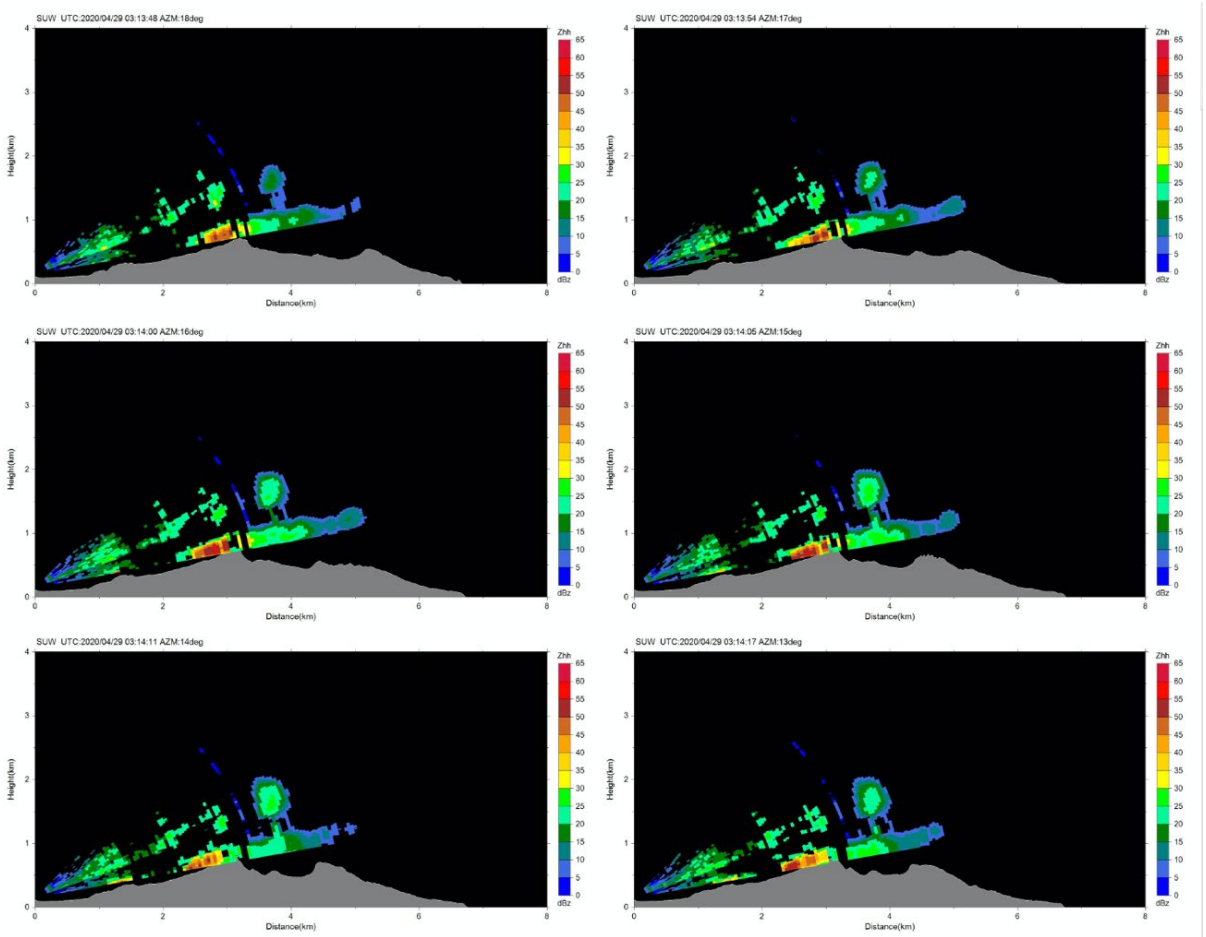


図 6　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 4 月 29 日 12:14 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

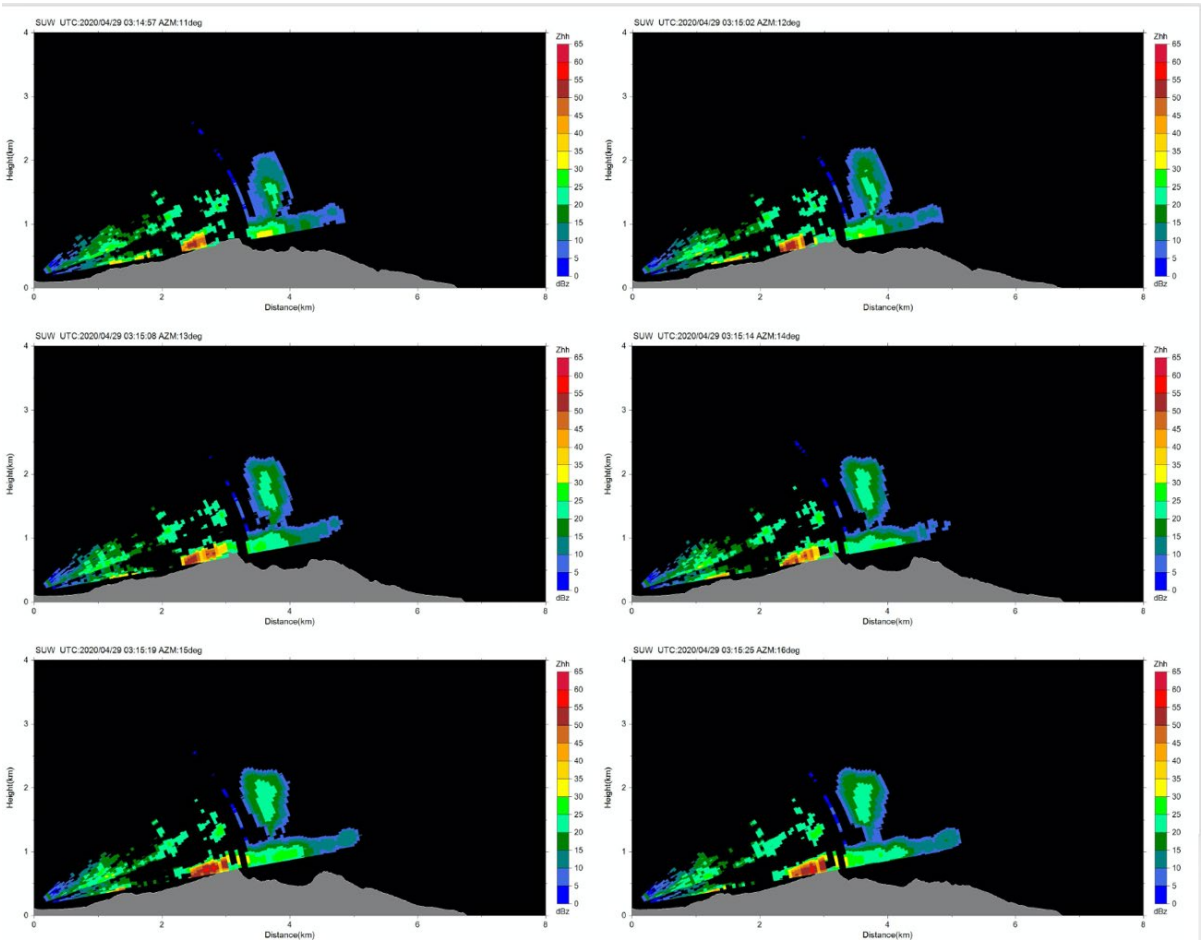


図 7　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 4 月 29 日 12:15 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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抜 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のに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。

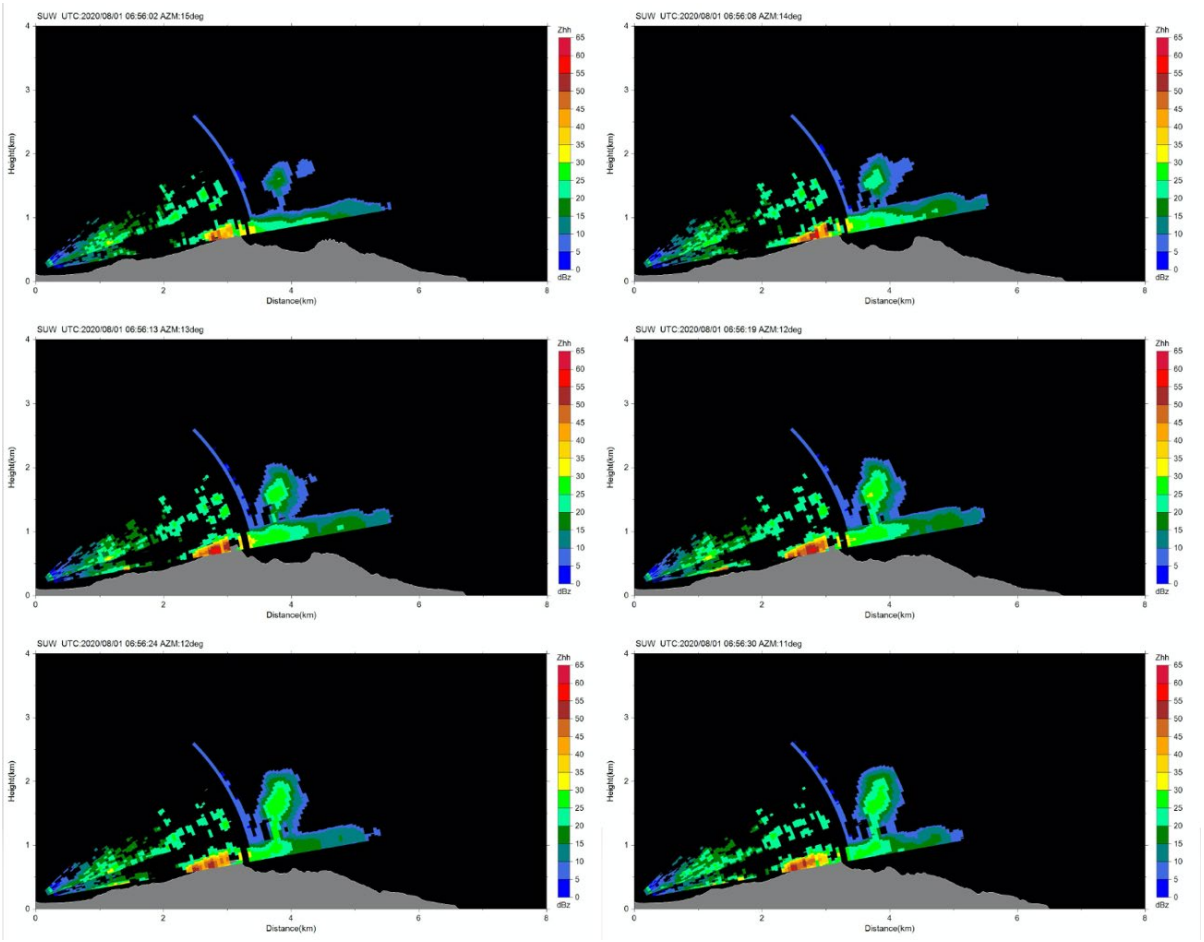


図 8　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 8 月 1 日 15:56 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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）は海抜 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。

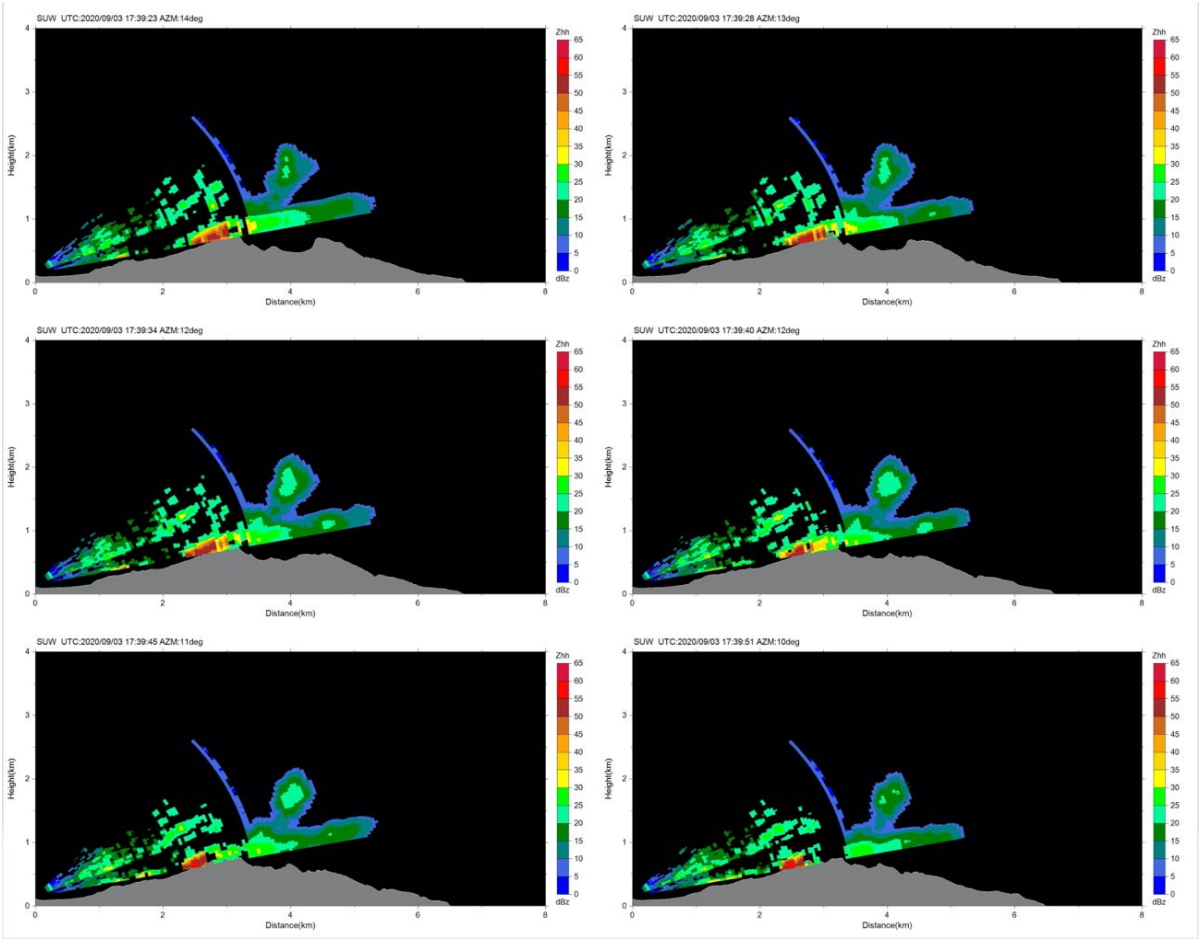


図 9　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 9 月 4 日 2:39~2:40。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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）は海抜 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。

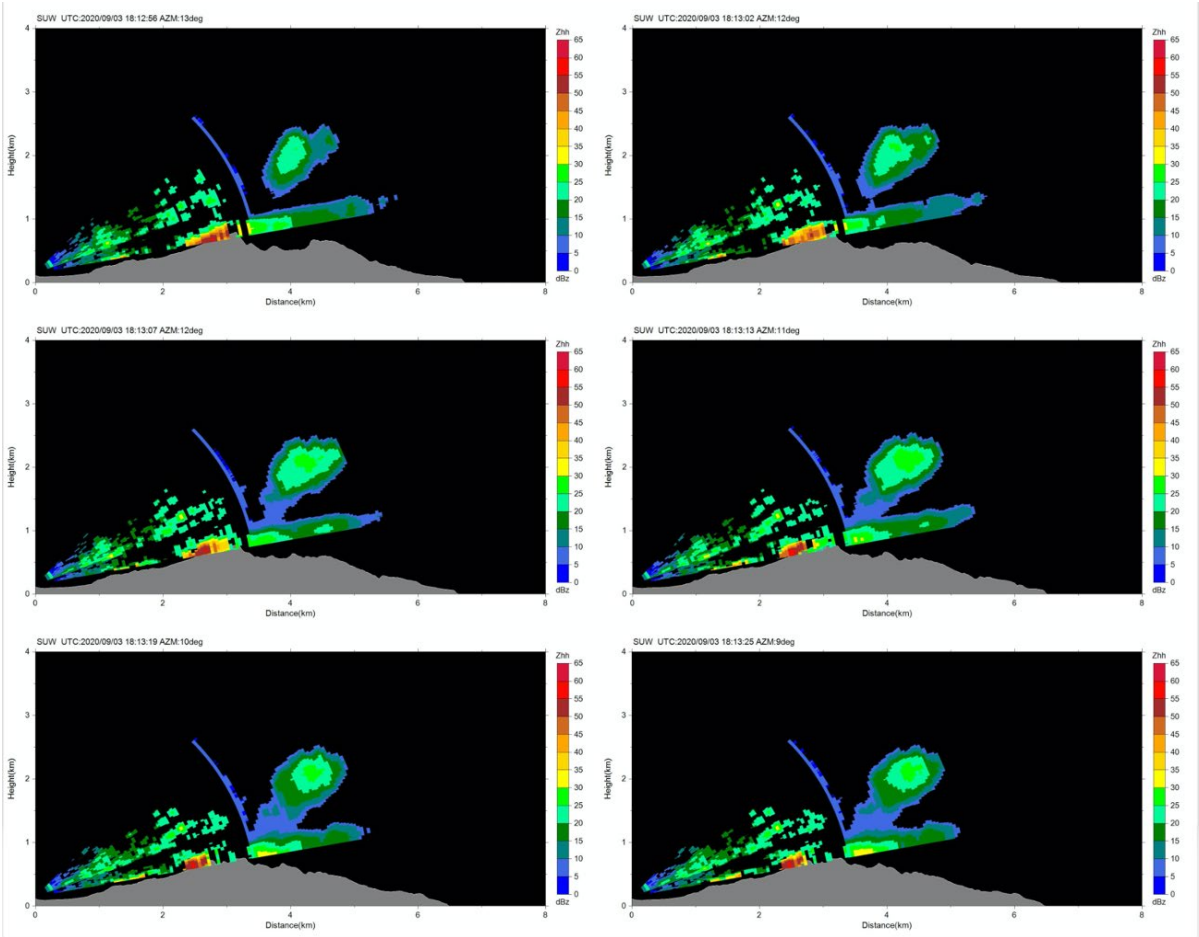


図 10　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 9 月 4 日 3:13 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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ての反射（グランドクラッター）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。

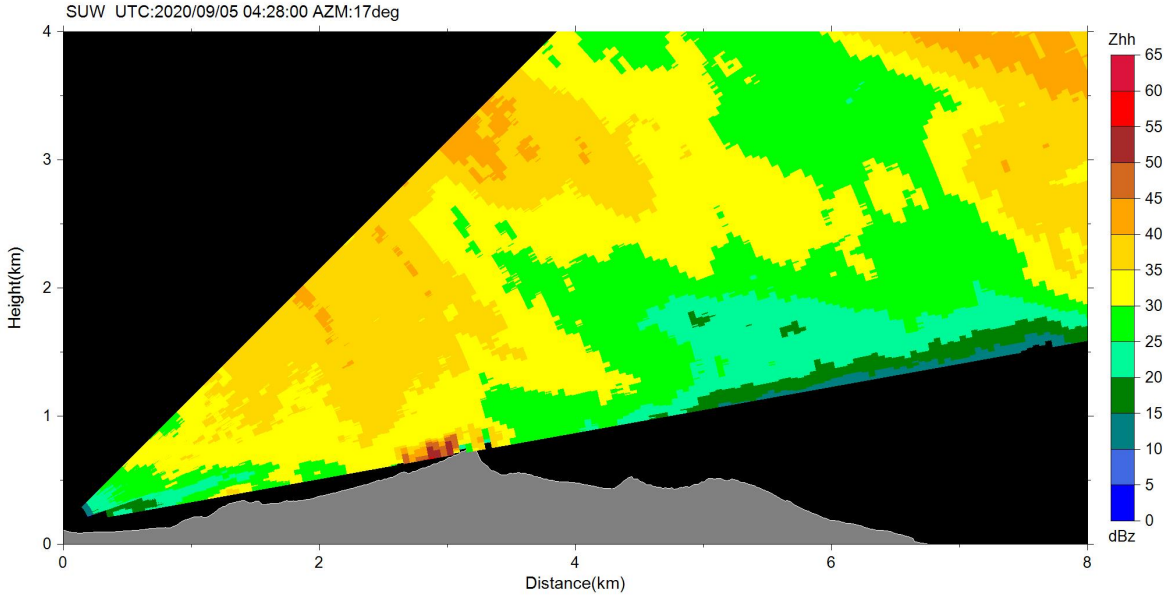


図 11　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。悪天候時の事例で、2020 年 9 月 5 日 13:28 頃。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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）は海抜 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)。

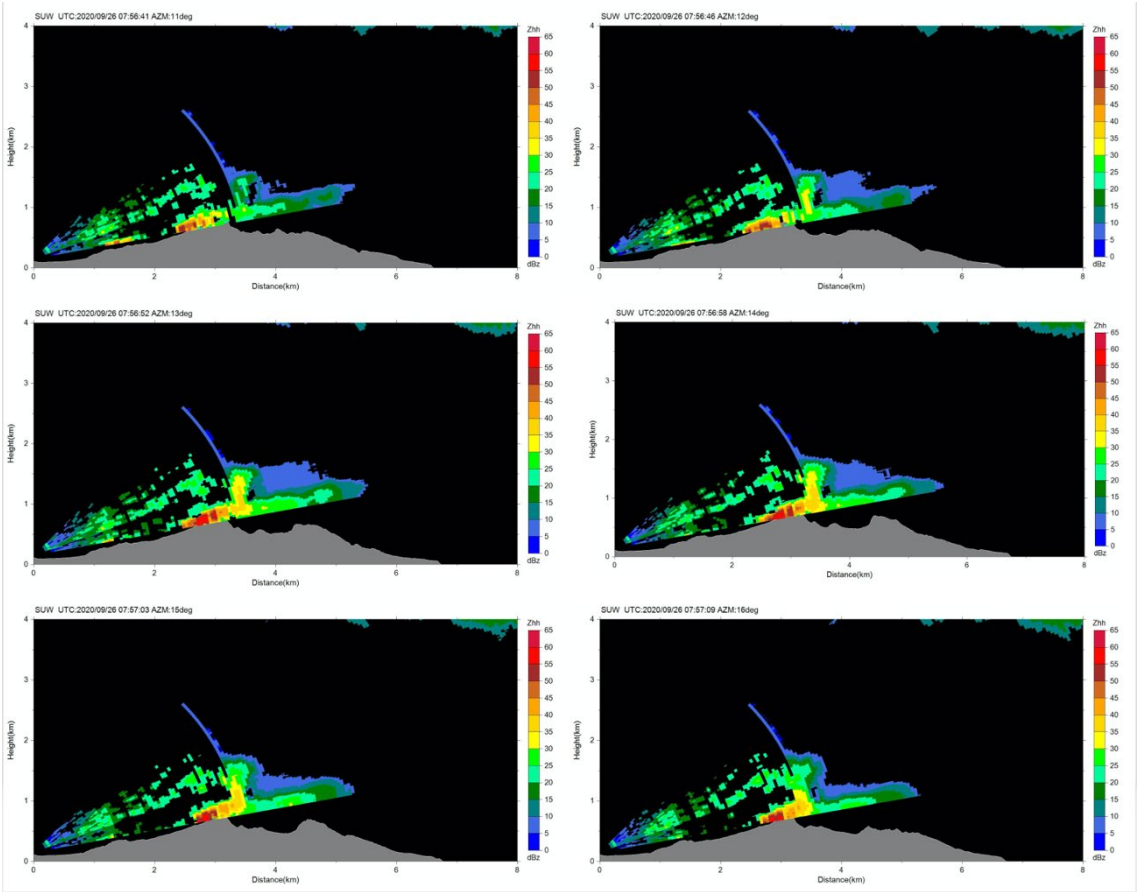


図 12　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 9 月 26 日 16:56～16:57。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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）は海抜 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。

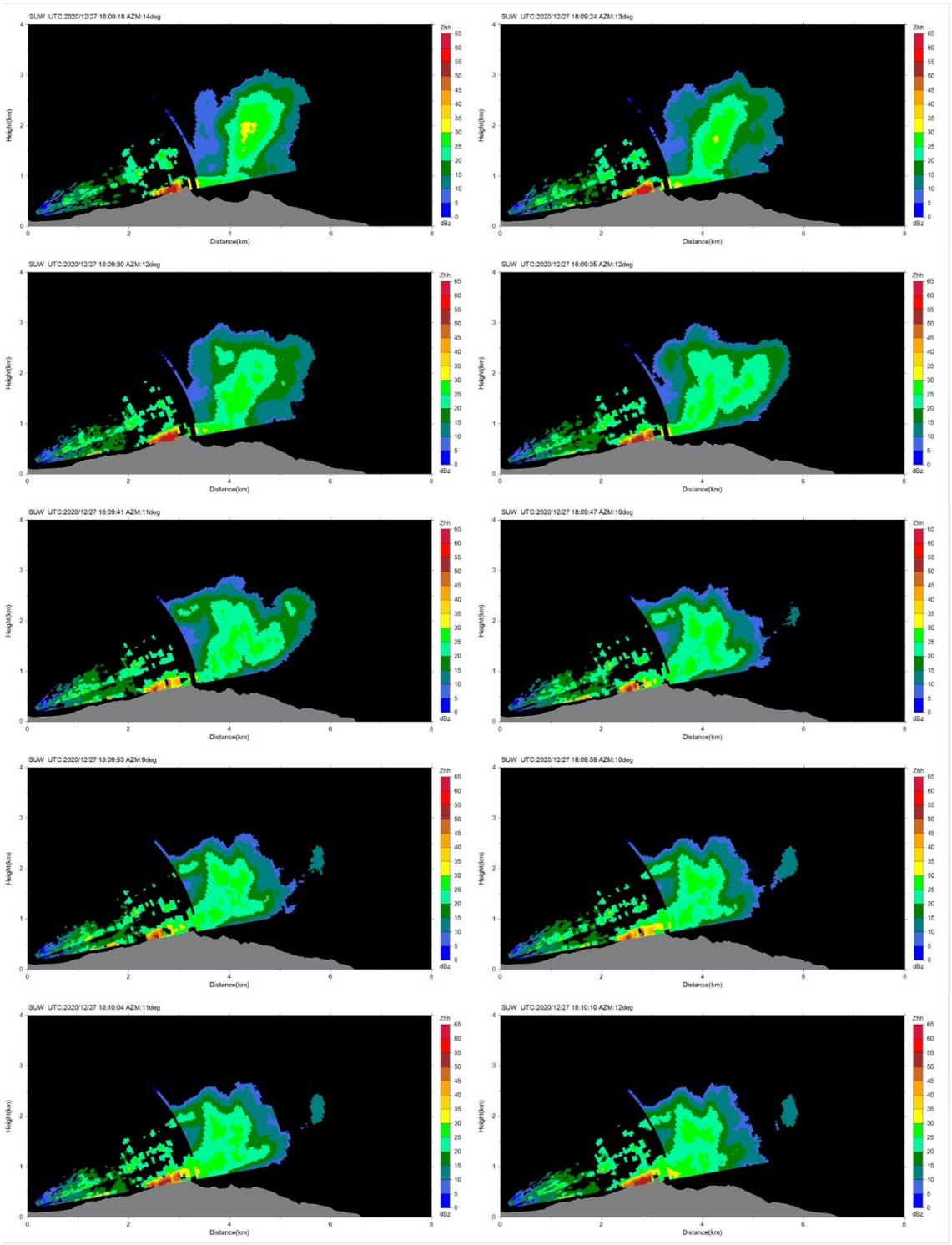


図 13　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 12 月 28 日 3:09～3:10。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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）は海抜 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）。

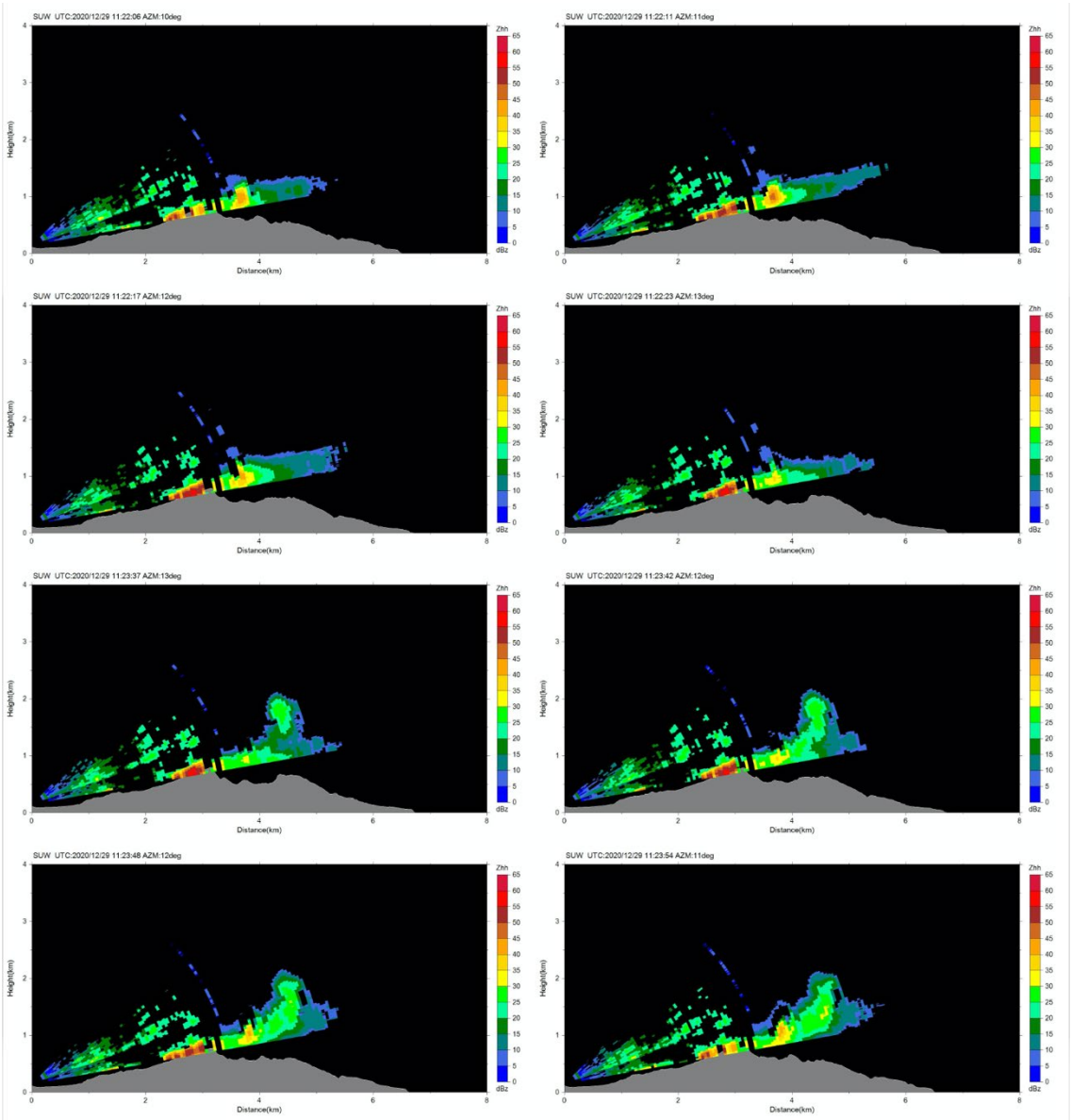


図 14　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020 年 12 月 29 日 20:22～20:24。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

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（SVO）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性がある。

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。

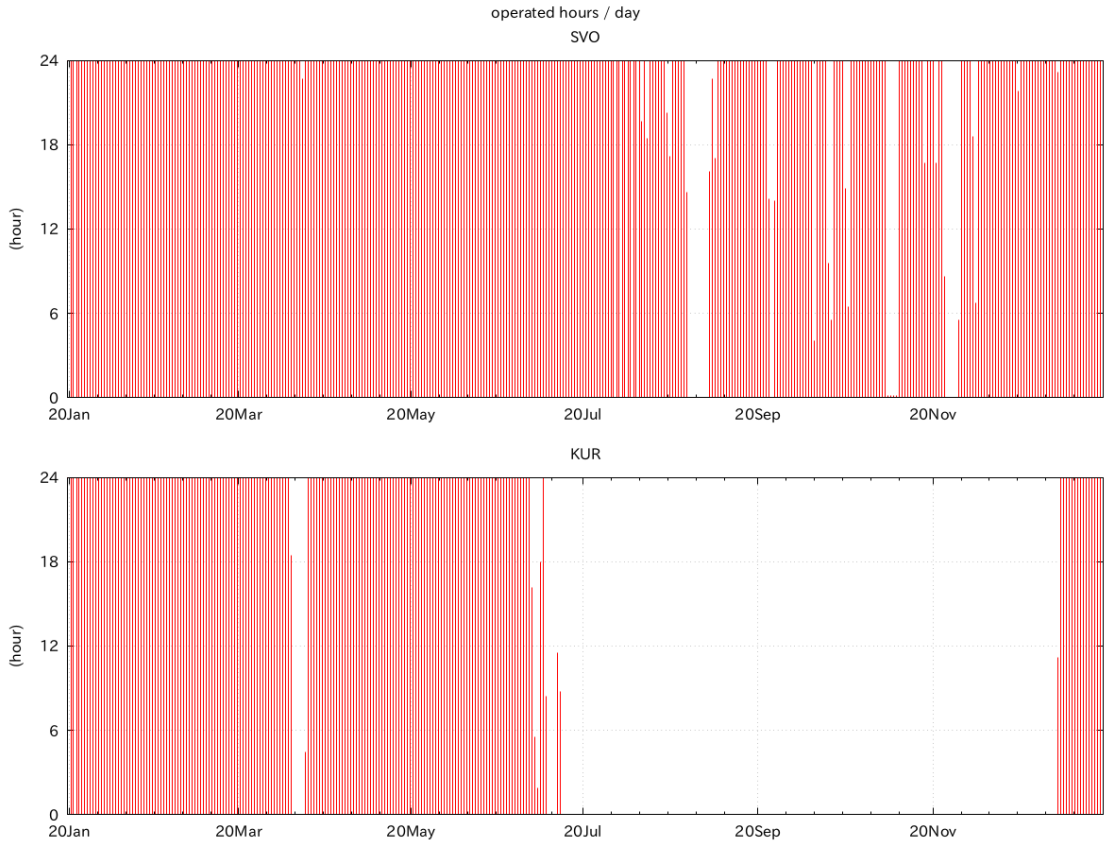


図 15　2020 年の(上)SVO, (下)KUR ライダーによる 1 日当たり観測時間。終日観測が行われた場合に 24 となる。

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。

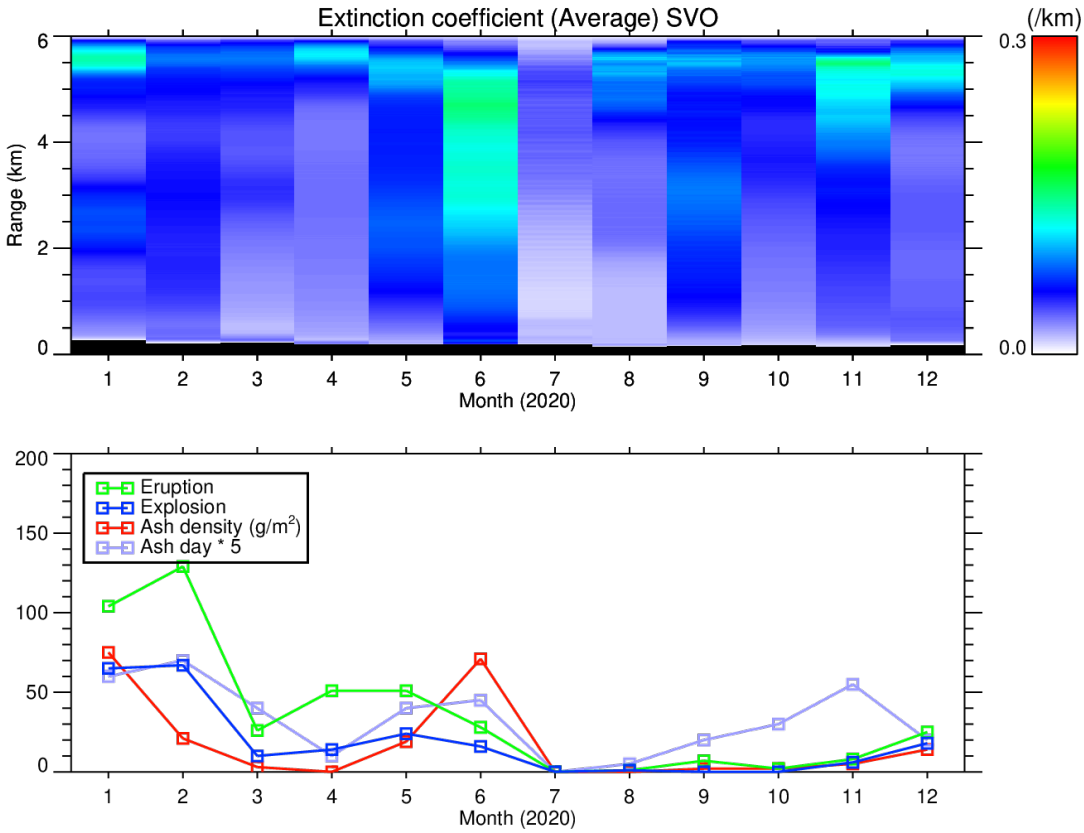


図 16　2020 年の(上)SVO ライダーによる視線方向の月平均エアロゾル消散係数分布と(下)鹿児島気象台による桜島の月毎の噴火回数・爆発回数・降灰量・降灰日数。

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 10μm で 100%カット)および PM2.5(粒径 2.5μm 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。

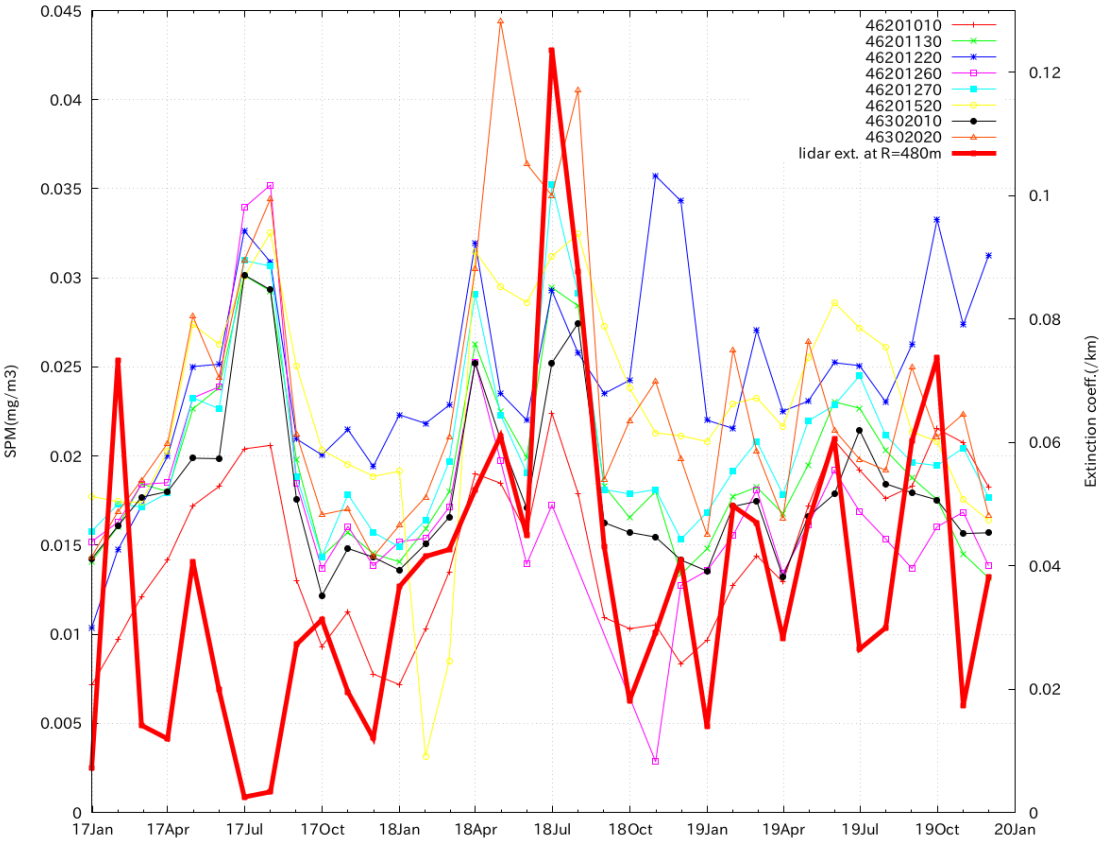


図 17　大気環境常時監視局における月平均 SPM(左軸)および SVO ライダーの視線方向 480m 地点における月平均エアロゾル消散係数(右軸)の 2017 年 1 月から 2019 年 12 月までの変動。

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 SVO 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。

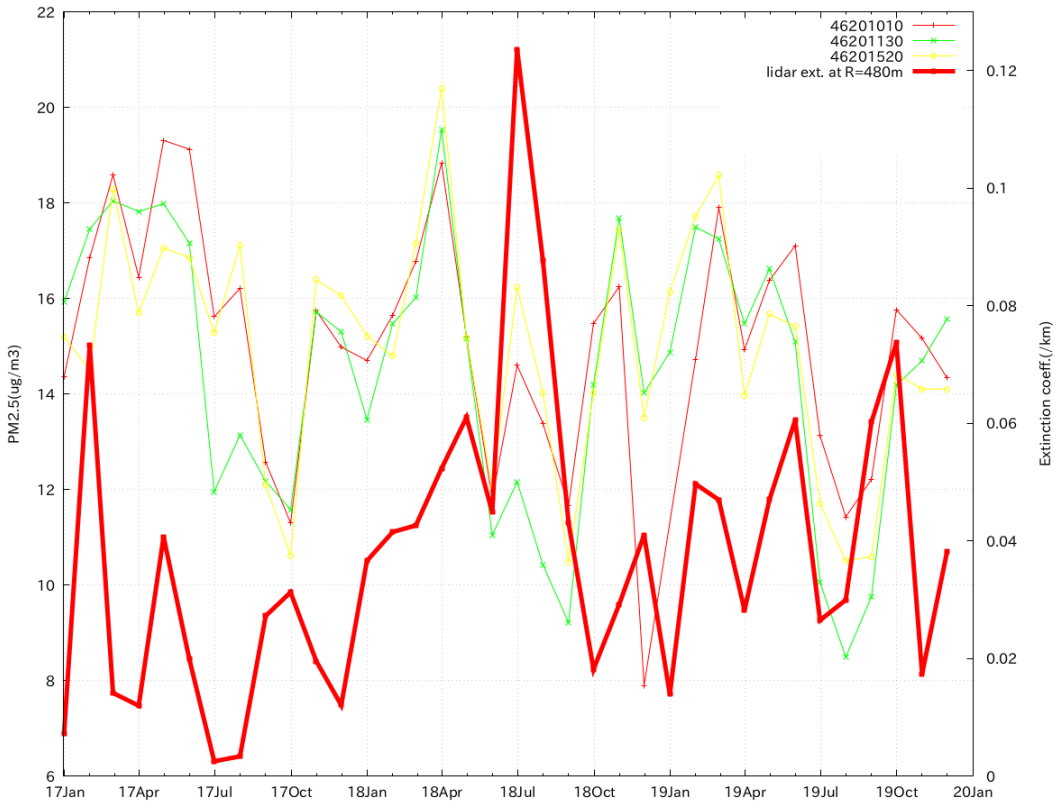


図 18　大気環境常時監視局における月平均 PM2.5 (左軸)および SVO ライダーの視線方向 480m 地点における月平均エアロゾル消散係数(右軸)の 2017 年 1 月から 2019 年 12 月までの変動。

表 4　SVO 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+3σ 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、改善する必要性がある。

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。

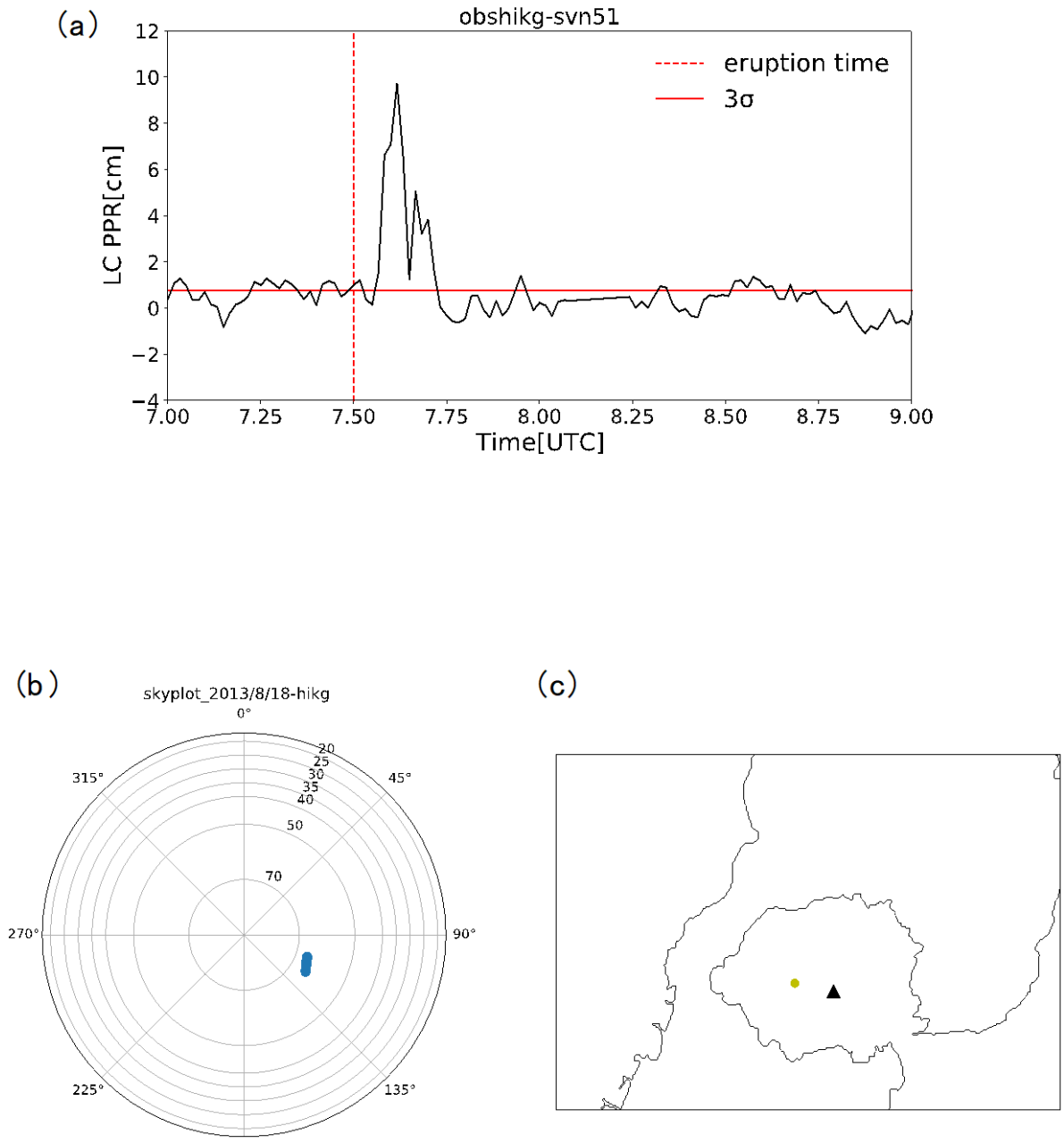


図 19　(a) 2013 年 8 月 18 日噴火における HIKG 観測点における LC-PPR 時系列。横軸は時刻(UTC)、縦軸は LC-PPR の値、赤点線は噴火発生時刻、赤色実線は 3σ の値を示す。(b) 以上が見えている時刻における SVN51 衛星の位置のスカイプロット。(c) 観測点の位置。

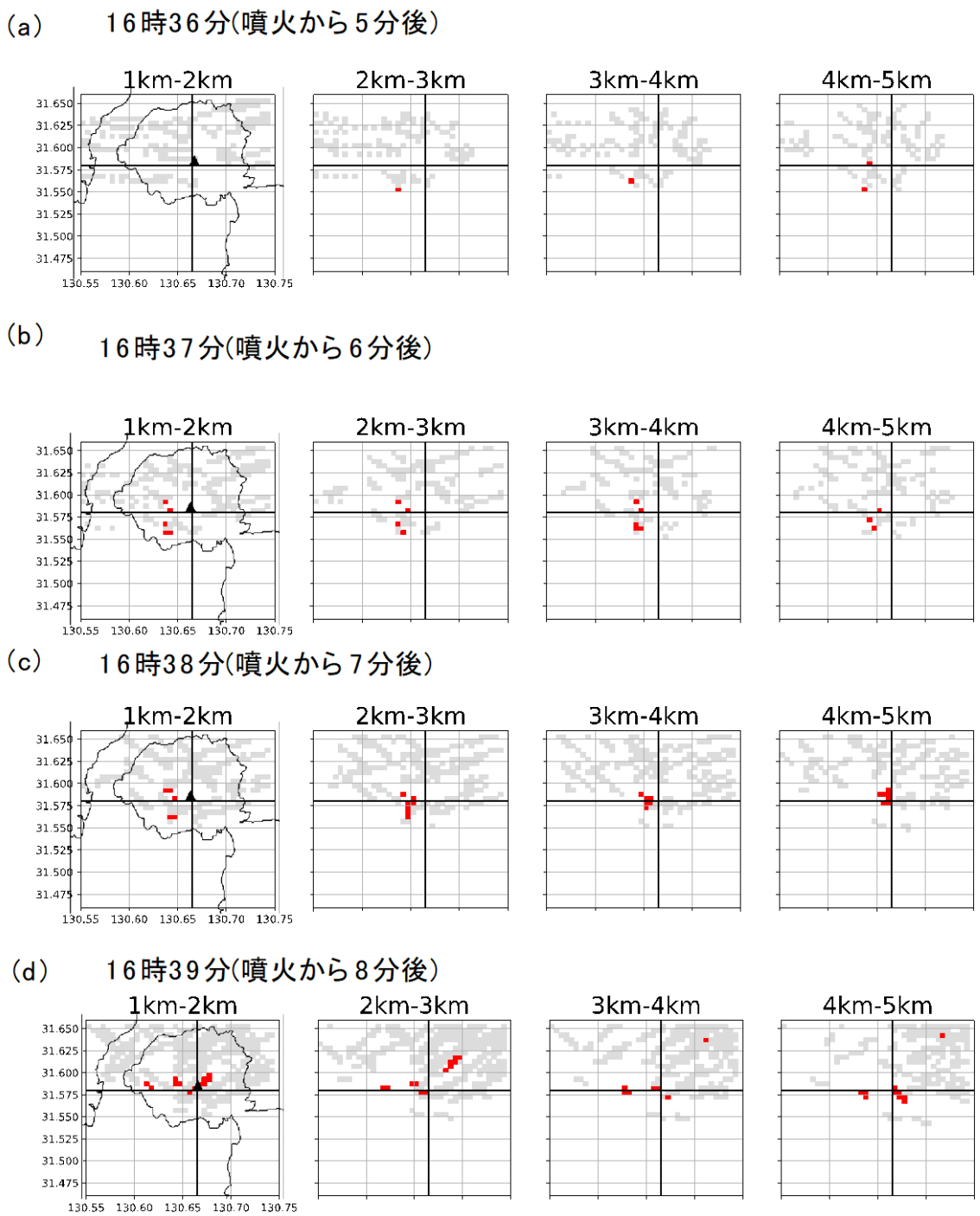


図 20　LC-PPR が異常を示したグリッドの時空間分布（2013 年 8 月 18 日噴火）。異常を示すパスのみが存在するセルを赤色、異常を示さないパスが 1 つでも存在するセルを灰色、パスが存在しないセルを白色でそれぞれ示す。黒線が交差している箇所が昭和火口の位置を示す。

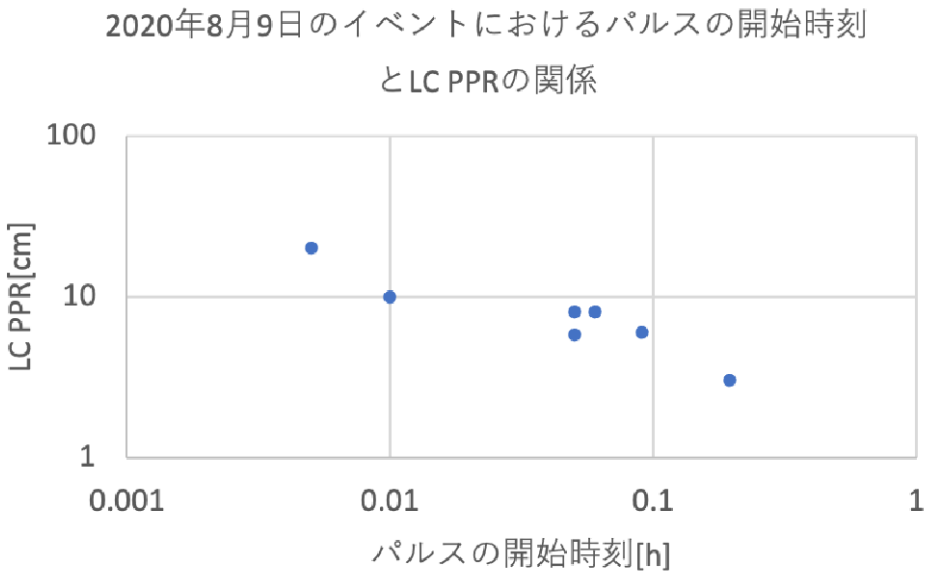


図 21　2020 年 8 月 9 日の噴火において異常を示した LC-PPR のインパルス的な信号の開始時刻(t)と LC-PPR のピーク振幅(A)の関係。両者には$A = t^{-1/2}$の関係が見られる。

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/m²）
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。

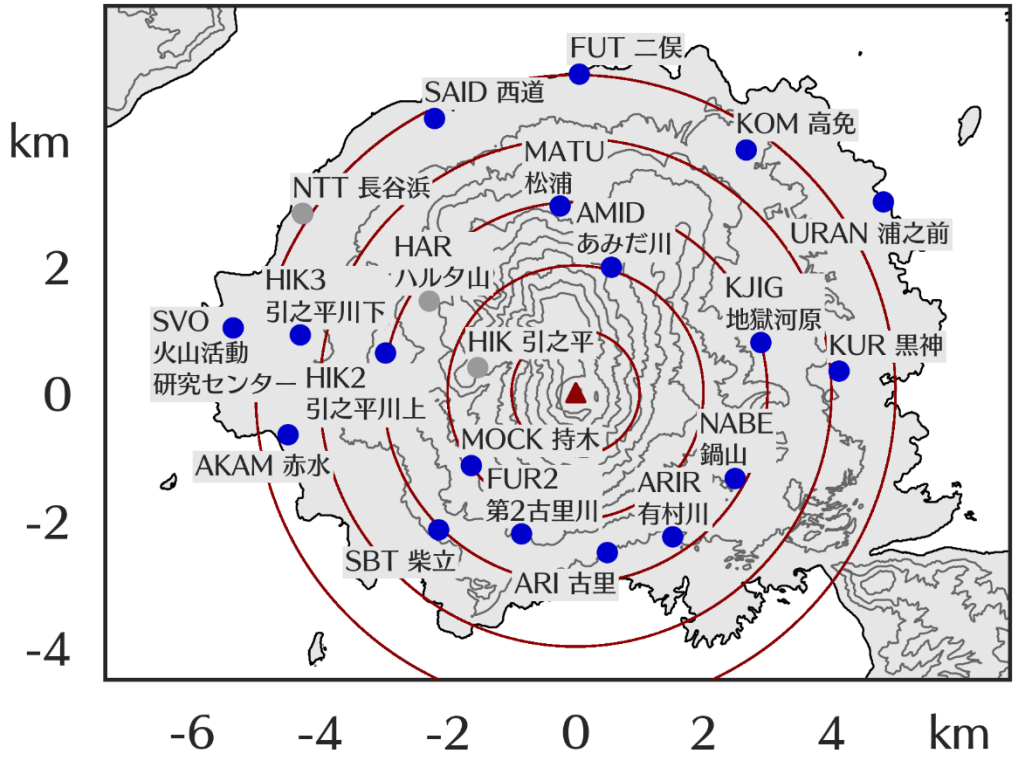


図 22　桜島におけるディスドロメータの位置図。青丸は本プロジェクトにおいて設置した観測点、白丸は他のプロジェクトにおいて設置した観測点。赤三角は南岳 A 火口の位置を、赤線は南岳 A 火口から 1km ごとの同心円を示す。

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/㎡、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。

$$W = 24I_p \tag{1-1}$$

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。

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

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 500kg/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―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。

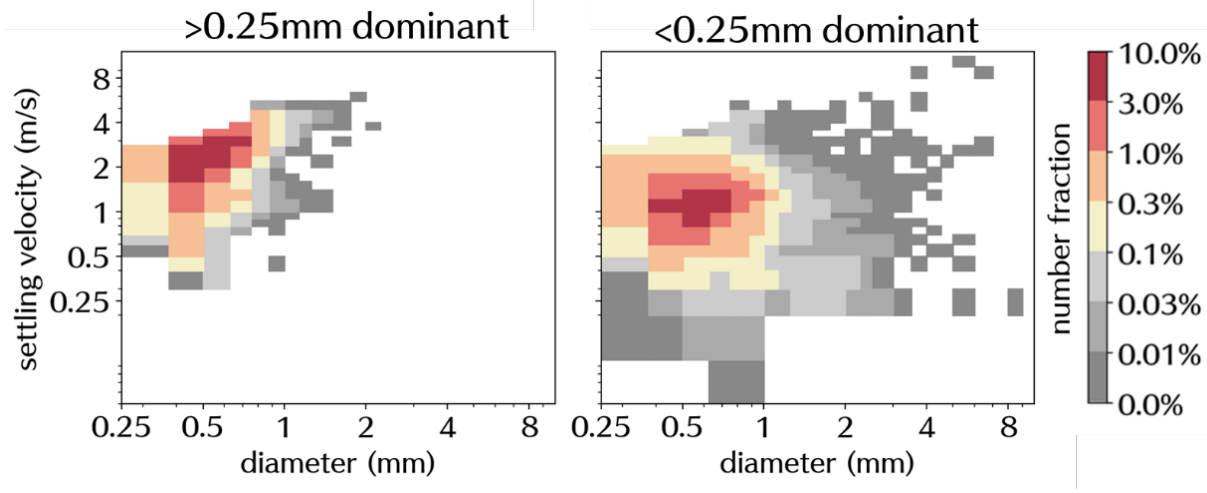


図 23　全てのイベントにおける累計の粒子数の粒径―落下速度分布。

ディスドロメータの分類する粒径―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、ディスド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。ディスド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。

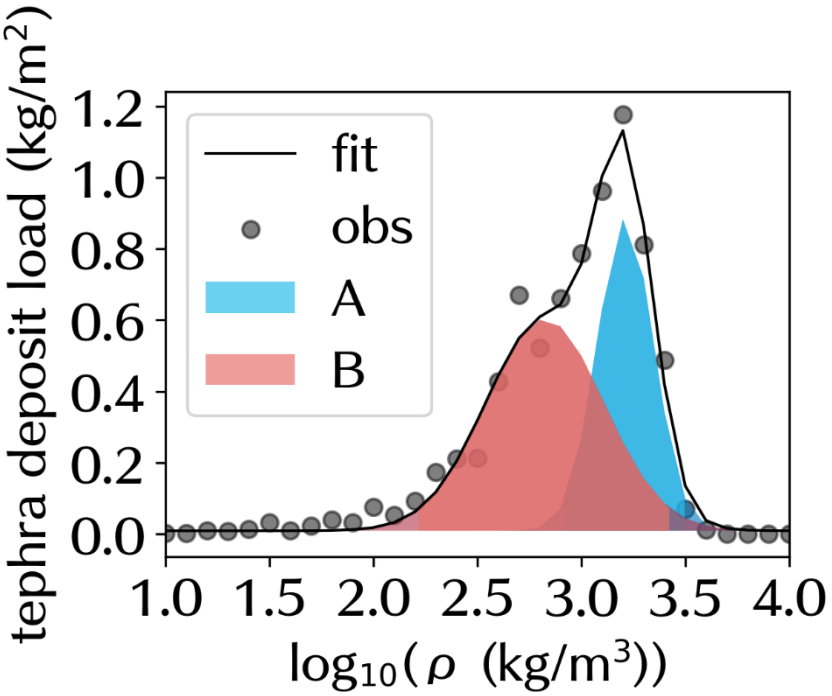


図 24　全イベントにおける累計の粒子重量の実効密度分布と、その対数正規分布による近似。

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、ディスド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：

$$S_{A_j} = N_{A_{i,j}}\theta_{A_i} \qquad (1\text{-}3)$$
$$S_{B_j} = N_{B_{i,j}}\theta_{B_i}$$

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 にふるい分けられた 0.25mm 以上、以下の降灰量を、N_{Aij} と N_{Bij} にディスド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。

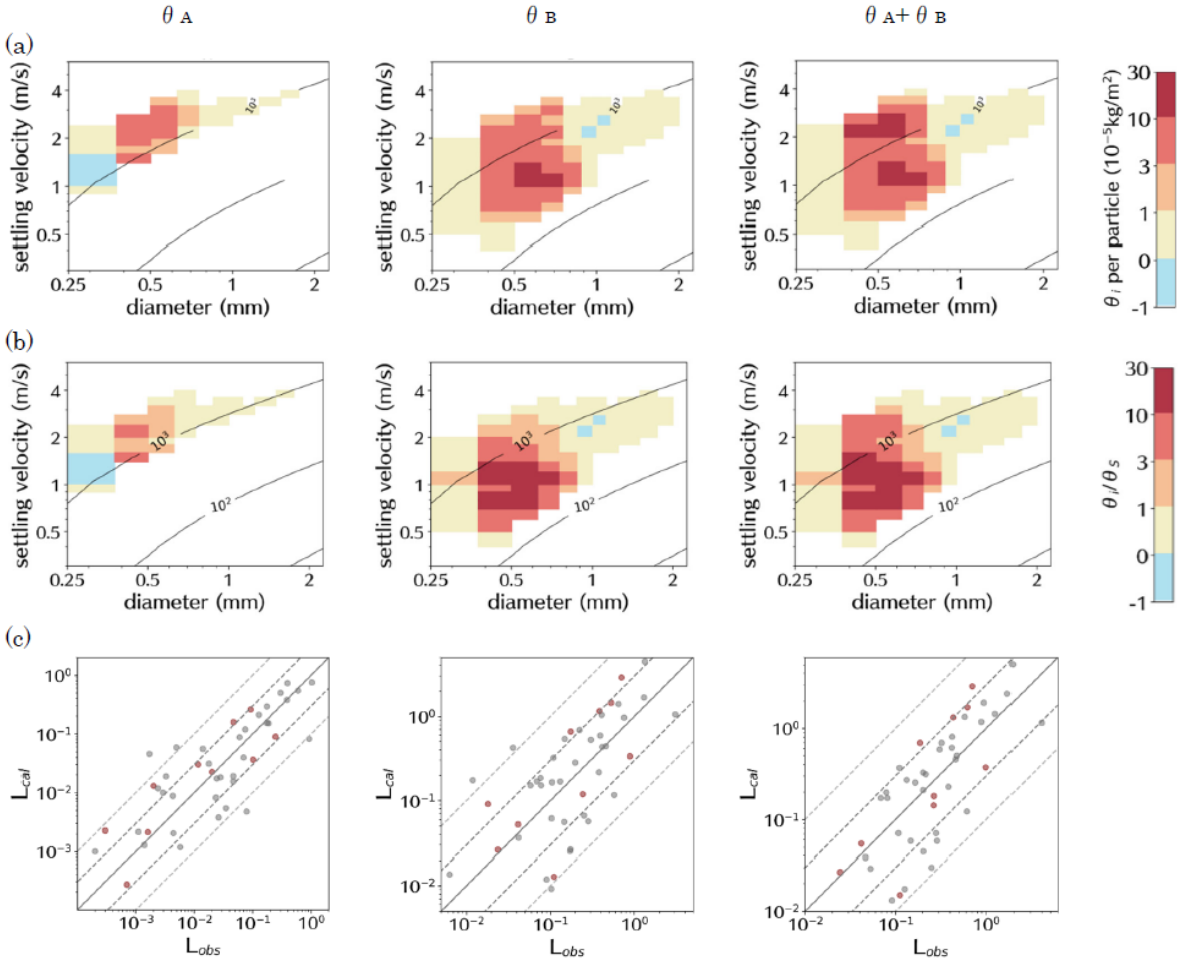


図 25　(a) θ の粒径―落下速度分布、(b) θ / θ_S の粒径―落下速度分布。等値線は Suzuki(1983)[9]により計算される粒子の実効密度。(c) L_{obs} and L_{cal} の関係。単位は kg/m^2。実線は $w_{cal}=w_{obs}$ を、濃い破線は $w_{cal}=0.3w_{obs}$ と $w_{cal}=3w_{obs}$ を、薄い破線は $w_{cal}=0.1w_{obs}$ and $w_{cal}=10w_{obs}$ を表す。

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 2500kg/m^3 である。実効密度は 200～2500 kg/m^3 の値を取るので、凝集粒子のみかけの空隙率はおよそ 0～92%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。

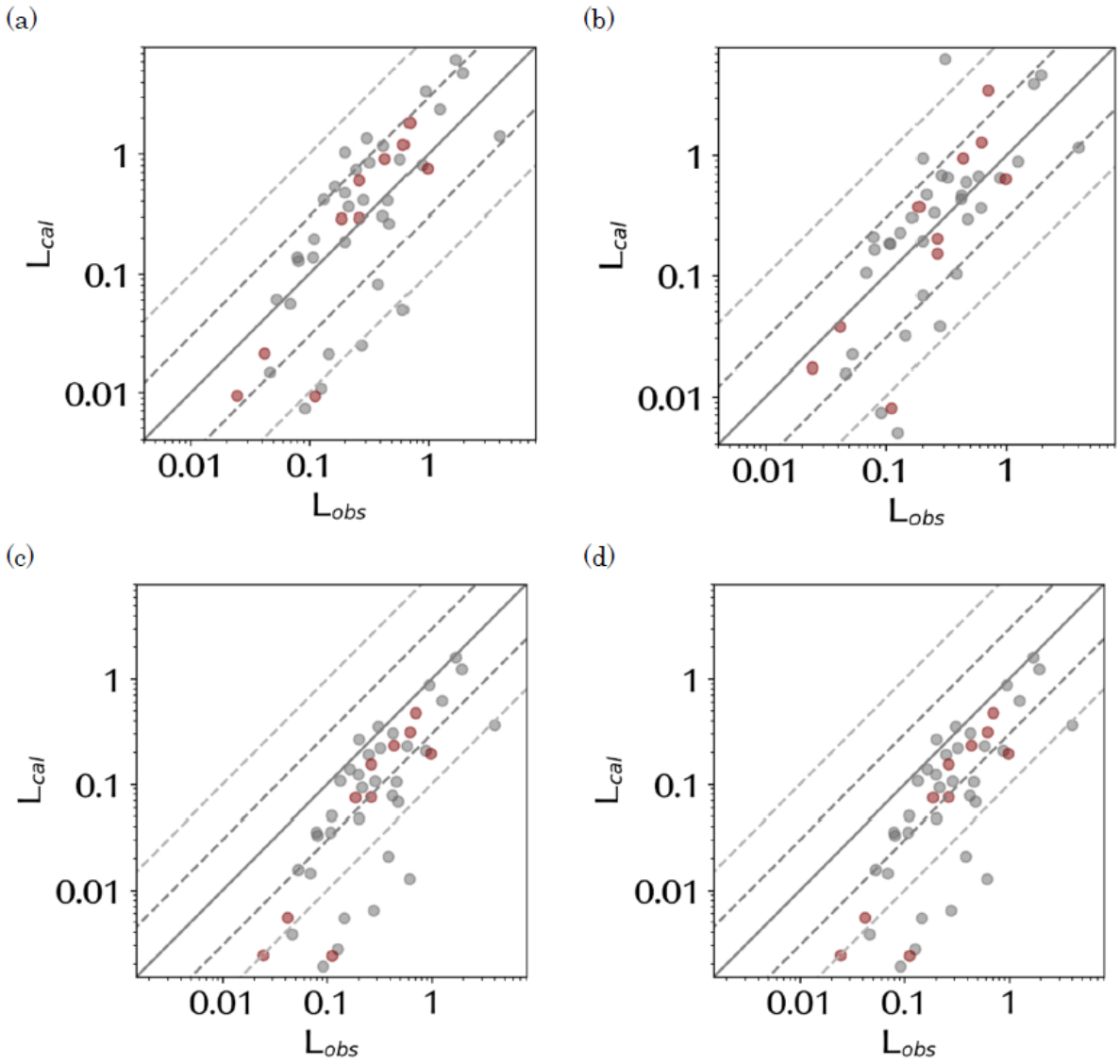


図 26　$\theta_A+\theta_B$ と θ_S からそれぞれ求められた降灰量(S_{cal})とサンプルから求められた降灰量(S_{obs})の関係。黒点は θ の導出に使われたイベント。

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。

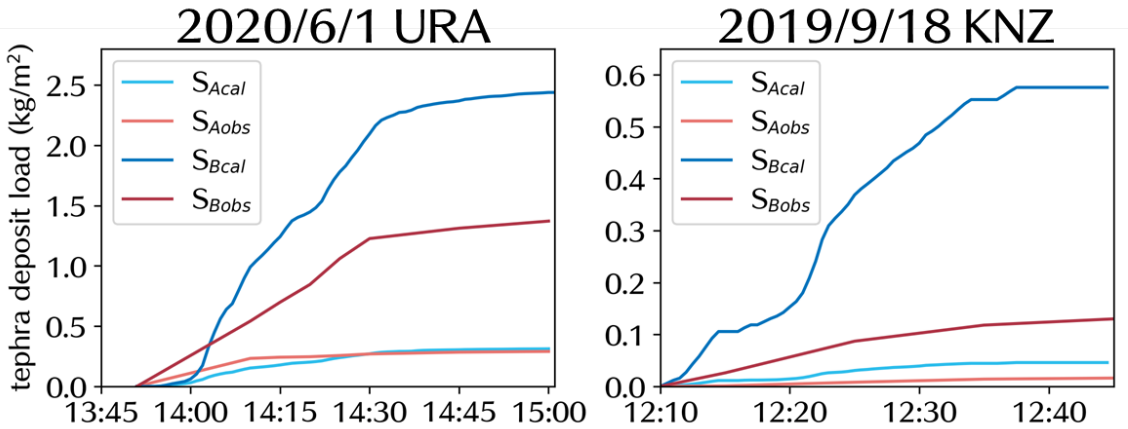


図 27　降灰量の時間変化。換算式から求められた降灰量と 5 分から 15 分おきのサンプル採取により得られた降灰量を比較した。

2021 年 2 月 28 日の噴火で SVO 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/m²	15.3	5.8	9.7	36.1	16.7	2.3

250μm 以下の粒子は 21g，250μm 以上の粒子は 65g だったが、ディスドロメータと経験的な換算式により求められた 250μm 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、2600kg/m³ の回転楕円体の終端速度を速度上限としているのが 750μm 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。

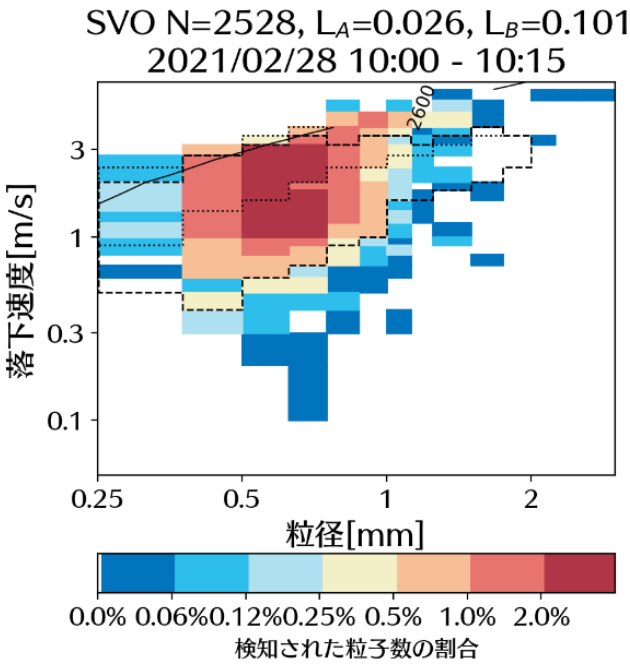


図 28　2021 年 2 月 28 日 10:00 の噴火において SVO 観測点においてディスドロメータで検知された火山灰粒子の粒径―落下速度分布。N は粒子数、L_A および L_B はそれぞれグループ A（サンプルにおいて 250μm 以上の粒子）、グループ B（サンプルにおいて 250μm 以下の粒子）の粒子の降灰量(単位は kg/m^2)を表す。点線はグループ A、破線はグループ B の計算対象範囲。

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様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ので、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。

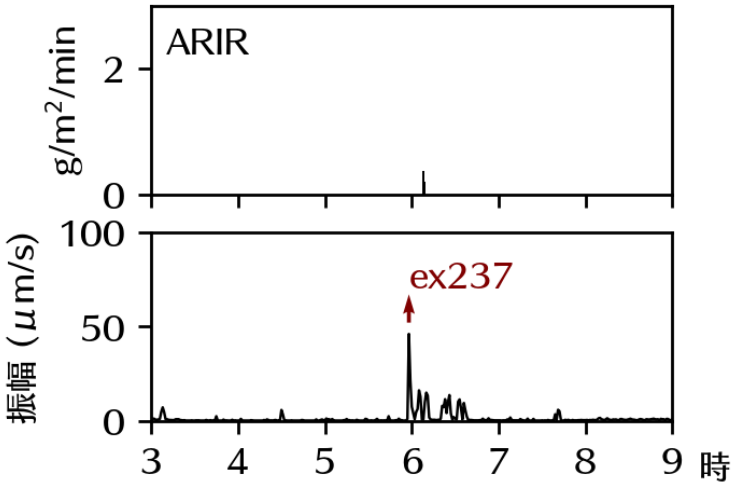


図 29　2020 年 3 月 17 日の爆発による降灰時の有村川（ARIR）における降灰量と地震動の振幅。

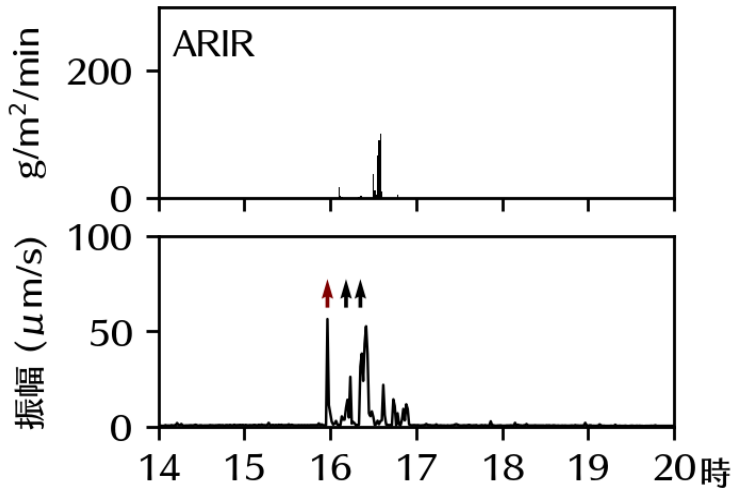


図 30　2020 年 4 月 4 日の爆発と噴火による降灰時の有村川（ARIR）における降灰量と地震動の振幅。赤矢印は爆発を、黒矢印は噴火を表す。

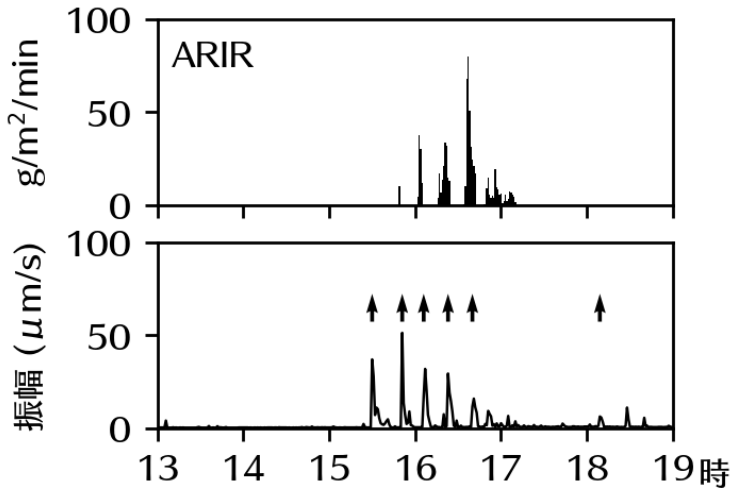


図 31　2020 年 4 月 5 日の噴火（2020 年 271-276 回目）による降灰時の有村川（ARIR）における降灰量と地震動の振幅。矢印は噴火を表す。

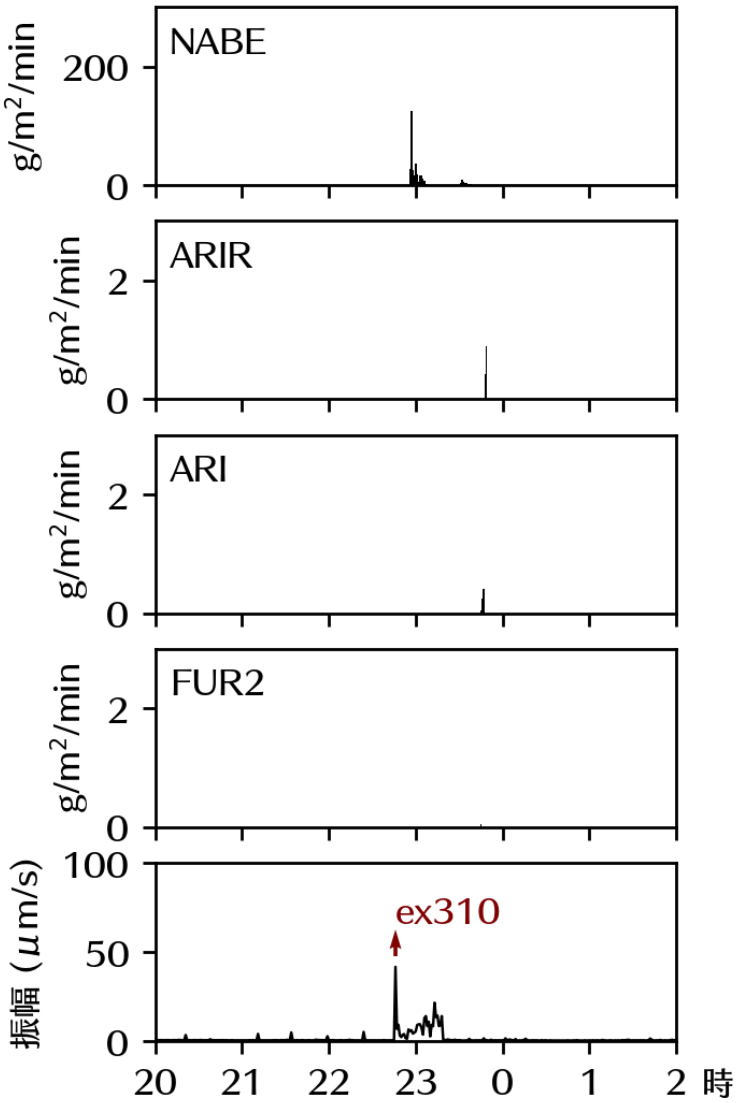


図 32　2020 年 4 月 27 日の爆発による降灰時の鍋山（NABE）、有村川（ARIR）、古里（ARI）、第 2 古里川（FUR2）における降灰量と地震動の振幅。

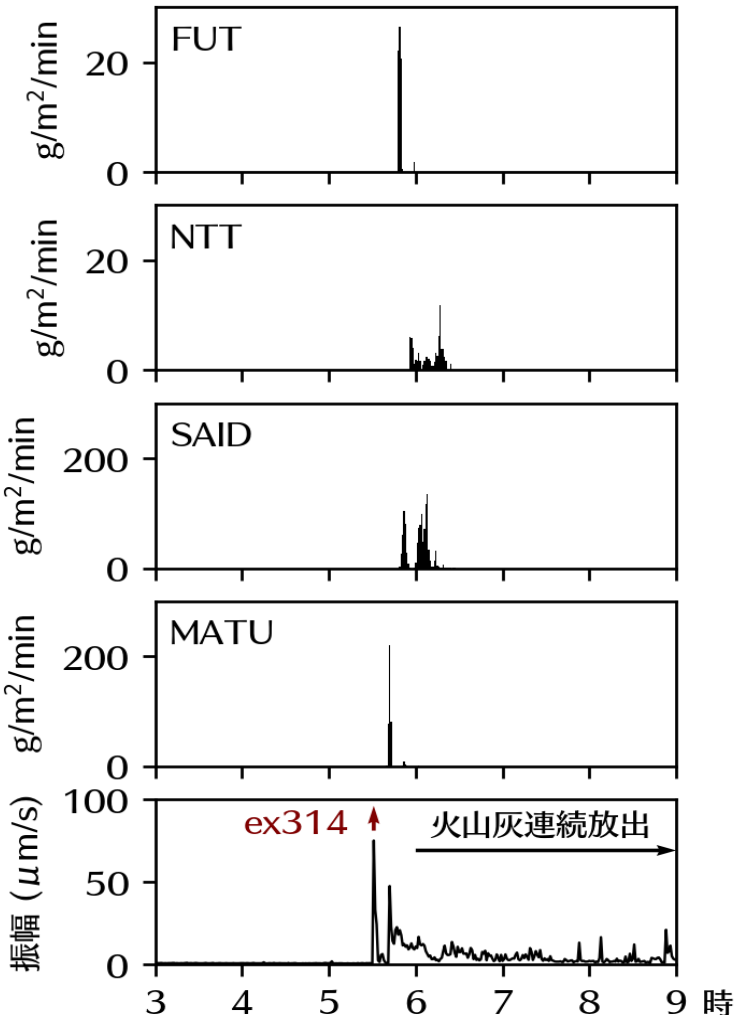


図 33　2020 年 5 月 9 日の爆発による降灰時の二俣（FUT）、長谷浜（NTT）、西道（SAID）、松浦（MATU）における降灰量と地震動の振幅。

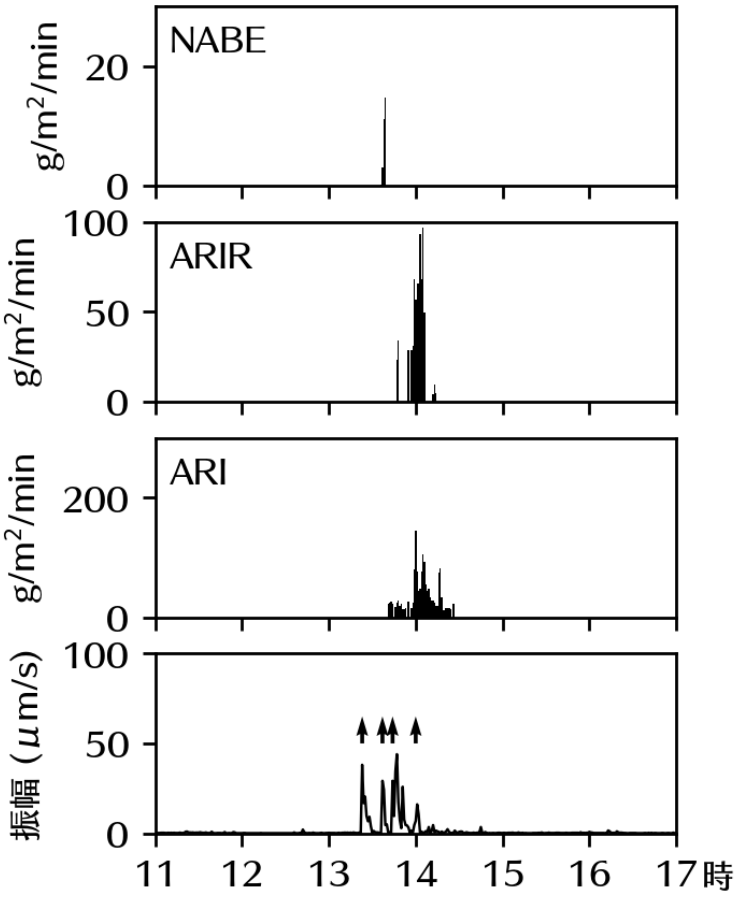


図 34　2020 年 5 月 27 日の噴火（2020 年 358-361 回目）による降灰時の鍋山（NABE)、有村川（ARIR)、古里（ARI）における降灰量と地震動の振幅。矢印は噴火を表す。

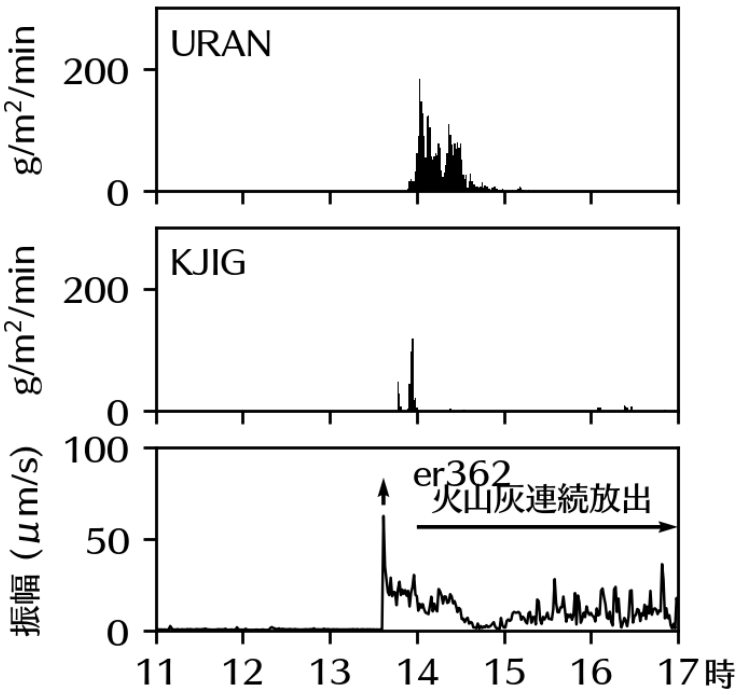


図 35　2020 年 6 月 1 日の噴火による降灰時の浦之前（URAN)、地獄河原（KJIG）における降灰量と地震動の振幅。

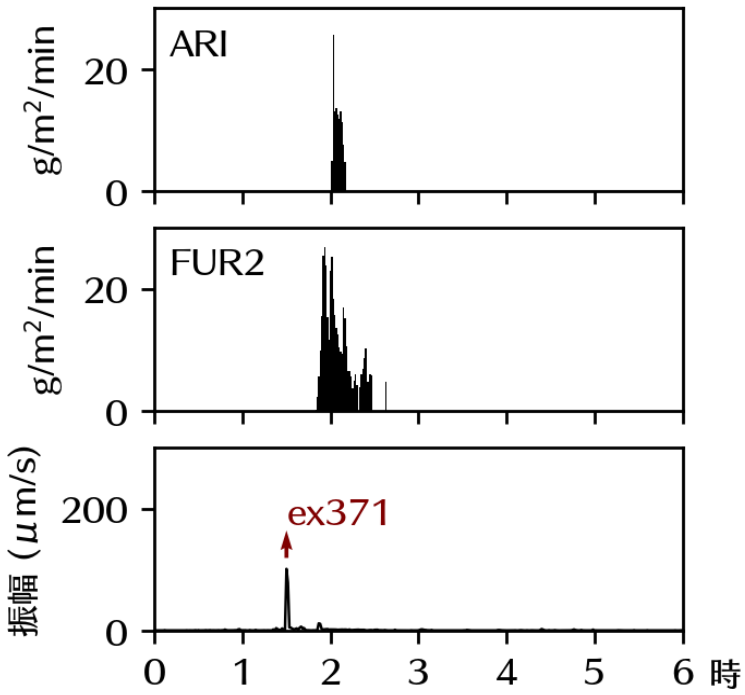


図 36　2020 年 6 月 5 日の爆発による降灰時の古里（ARI）、第 2 古里川（FUR2）における降灰量と地震動の振幅。

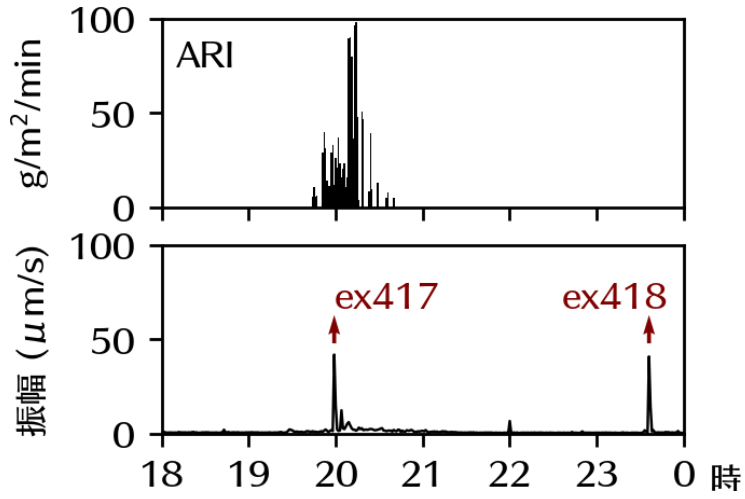


図 37　2020 年 12 月 17 日の爆発による降灰時の古里（ARI）における降灰量と地震動の振幅。

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。

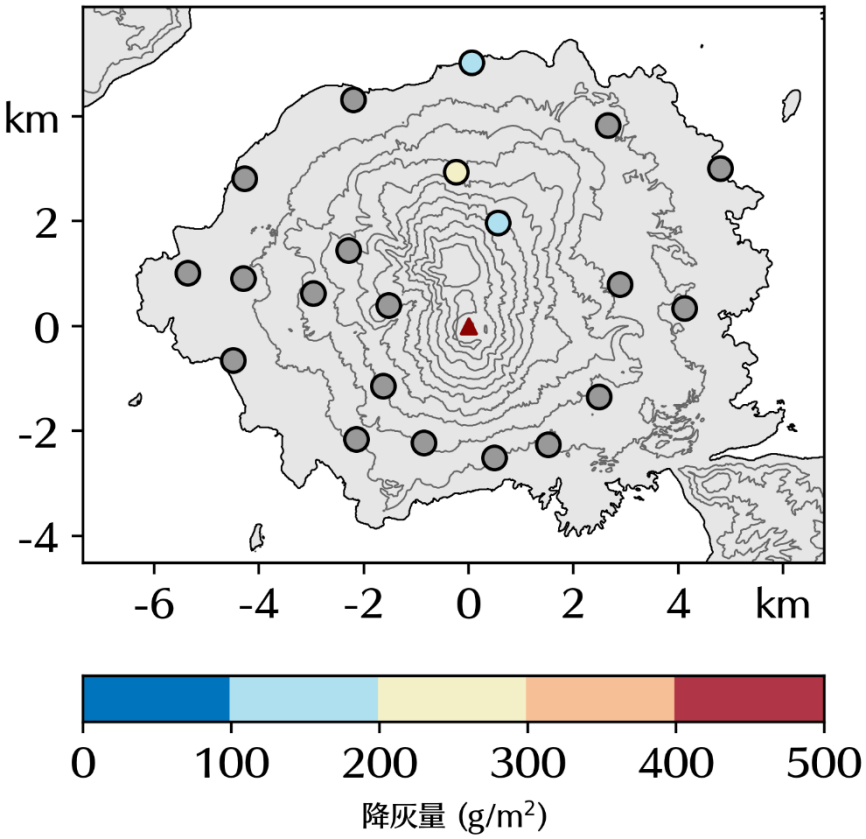


図 38　2020 年 8 月 9 日の爆発による降灰量の空間分布。灰色の地点は降灰がなかったことを示す。

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 5.5g/m^2/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。

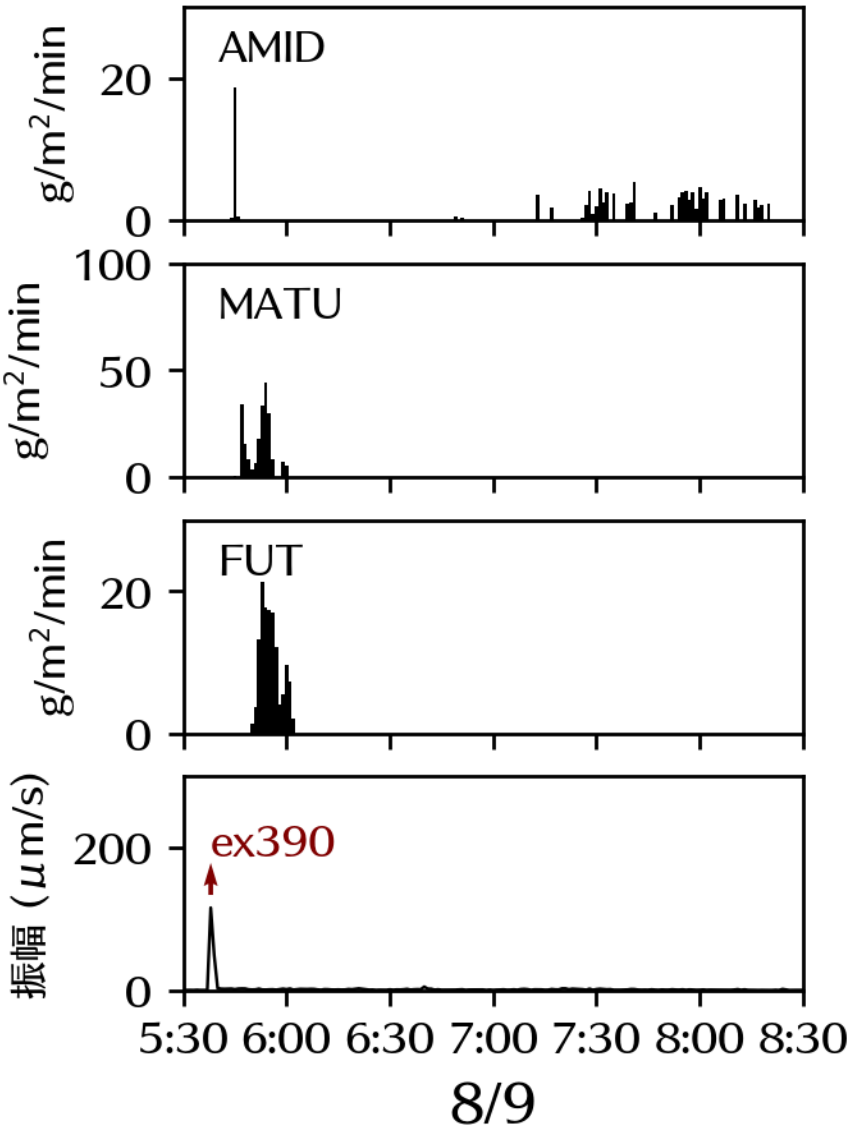


図 39　2020 年 8 月 9 日の爆発による降灰時のあみだ川（AMID）、二俣（FUT）、松浦（MATU）における降灰量と地震動の振幅。

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落下し、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。

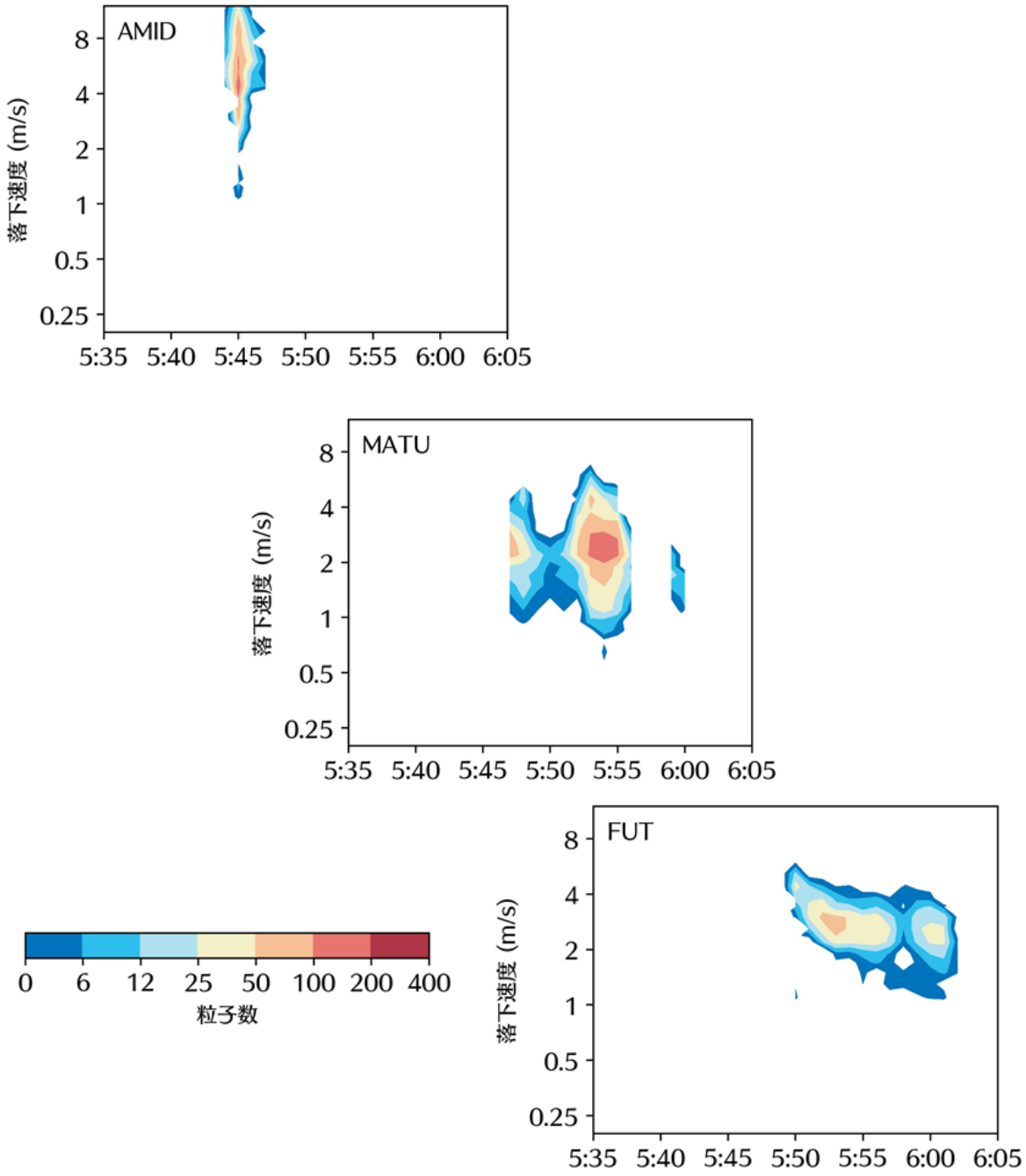


図 40　AMID、MATU、FUT 観測点のディスドロメータにより観測された火山灰粒子の落下速度頻度分布の時間変化の比較。

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。

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

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。

$$A_i=\left[180\times(30-0.5D_i)\right]\times10^{-6}\quad[\mathrm{m^2}] \tag{2-2}$$

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。

$$V(D_i)=\sum_{j=1}^{nv}V_j\cdot C_{ij}\Big/\sum_{j=1}^{nv}C_{ij}\quad[\mathrm{m\,s^{-1}}]. \tag{2-3}$$

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。

$$R_{\mathrm{A}} = \frac{\pi \rho_{\mathrm{p}}}{6} \sum_{i=1}^{nd} (V(D_i) \cdot N(D_i) \cdot D_i^3); \quad R_{\mathrm{A}} [\mathrm{kg\,m^{-2}s^{-1}}] \tag{2-4}$$

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} (= 2.5×10^3 kg m^{-3}) とした。

式(2-1)と(2-3)より、

$$R_{\mathrm{A}} = \frac{\pi}{6} 10^{-9} \rho_{\mathrm{p}} \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nv} D_i^3 \frac{C_{ij}}{A_i \Delta t}; \quad R_{\mathrm{A}} [\mathrm{kg\,m^{-2}s^{-1}}] \tag{2-5}$$

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、[mm h^{-1}]で表した降灰強度 R_A は次式で表される。

$$R_{\mathrm{A}} = 6\pi 10^{-4} \frac{\rho_{\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{b}}} \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nv} D_i^3 \frac{C_{ij}}{A_i \Delta t}; \quad R_{\mathrm{A}} [\mathrm{mm\,h^{-1}}] \tag{2-6}$$

火山灰密度 C_A は

$$C_{\mathrm{A}} = \frac{\pi}{6} 10^{-6} \rho_{\mathrm{p}} \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nv} D_i^3 \frac{C_{ij}}{A_i \Delta t V_j}; \quad C_{\mathrm{A}} [\mathrm{kg\,m^{-3}}] \tag{2-7}$$

レーダ反射因子 Z は

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

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、

$$D_{\mathrm{m}} = \frac{\sum_{i=1}^{nd} N(D_i) D_i^4 \Delta D_i}{\sum_{i=1}^{nd} N(D_i) D_i^3 \Delta D_i}; \; D_{\mathrm{m}} [\mathrm{mm}] \tag{2-9}$$

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。

$$N_w = \frac{4^4}{\pi \rho_{\mathrm{p}}} \left[\frac{C_{\mathrm{A}}}{D_{\mathrm{m}}^4} \right]; \; N_{\mathrm{w}} [\mathrm{mm^{-1} m^{-3}}] \tag{2-10}$$

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。

$$N(D) = N_0 D^{\mu} \exp(-\Lambda D) \tag{3-1}$$

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 ($mm^{-1-\mu} m^{-3}$) 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、

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

と表すこともできる。ここで、G=ΛD_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。

$$D_{\mathrm{m}} = (4+\mu)/(3.82+\mu) D_0 \tag{3-3}$$

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、μ =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、

$$N(D) = N_0 D^{\mu} \exp[-(4+\mu)(D / D_{\mathrm{m}})] \tag{3-4}$$

$$\Lambda = (4+\mu) / D_{\mathrm{m}} \tag{3-5}$$

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

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

を用いて計算することができる。M_nは、Parsivel[2]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。

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

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。

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

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。

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

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。

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

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

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

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。

$$D_0 = \frac{3.82+\mu}{\Lambda} \tag{4-7}$$

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。

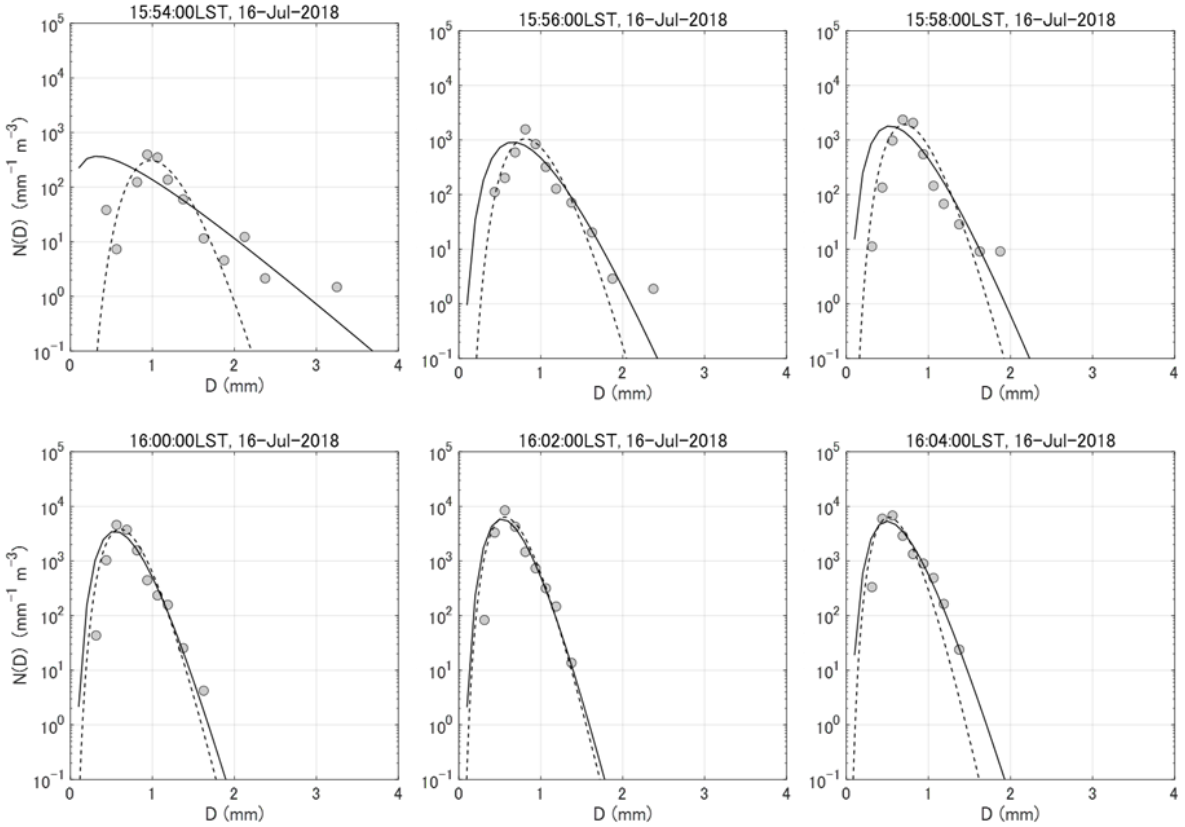


図 41 観測された PSD の時間変化の例（2018 年 7 月 16 日噴火）。白丸は観測値、実線と破線はそれぞれ完全モーメント法、非線形回帰分析から求めたガンマ曲線。

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。

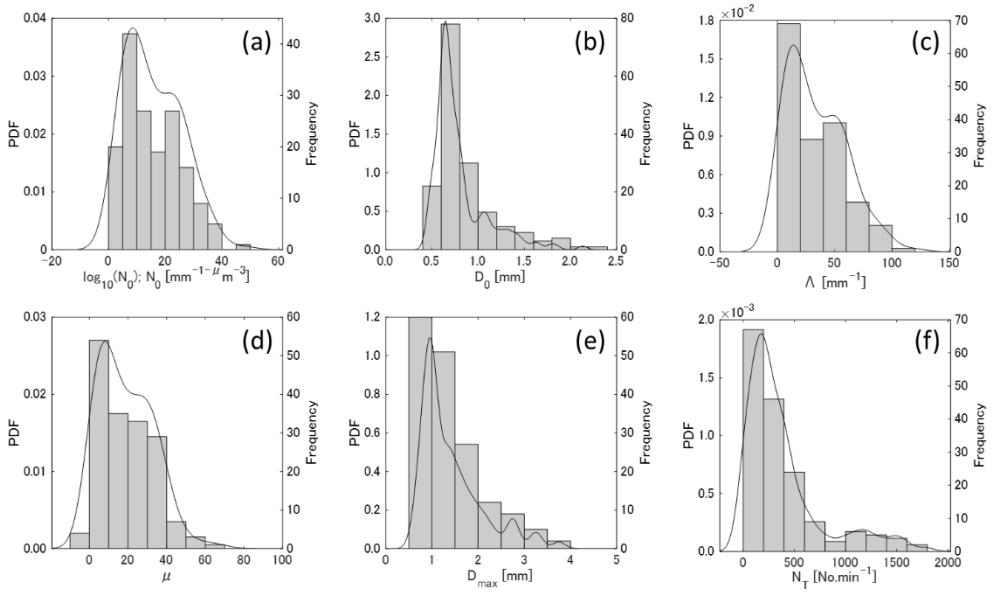


図 42　降灰粒子のガンマ PSD の 3 つのパラメータ（$\log_{10}N_0$、D_0 またはΛ、μ）の頻度分布と確率密度分布。

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}
$\log_{10}\ N_0$	$mm^{-1}\ m^{-3}$	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
$\log_{10}\ N_w$	$mm^{-1}\ m^{-3}$	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、$\rho_b = 1.25 \times 10^3\ kg\ m^{-3}$、$\rho_p = 2.50 \times 10^3\ kg\ m^{-3}$ 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。

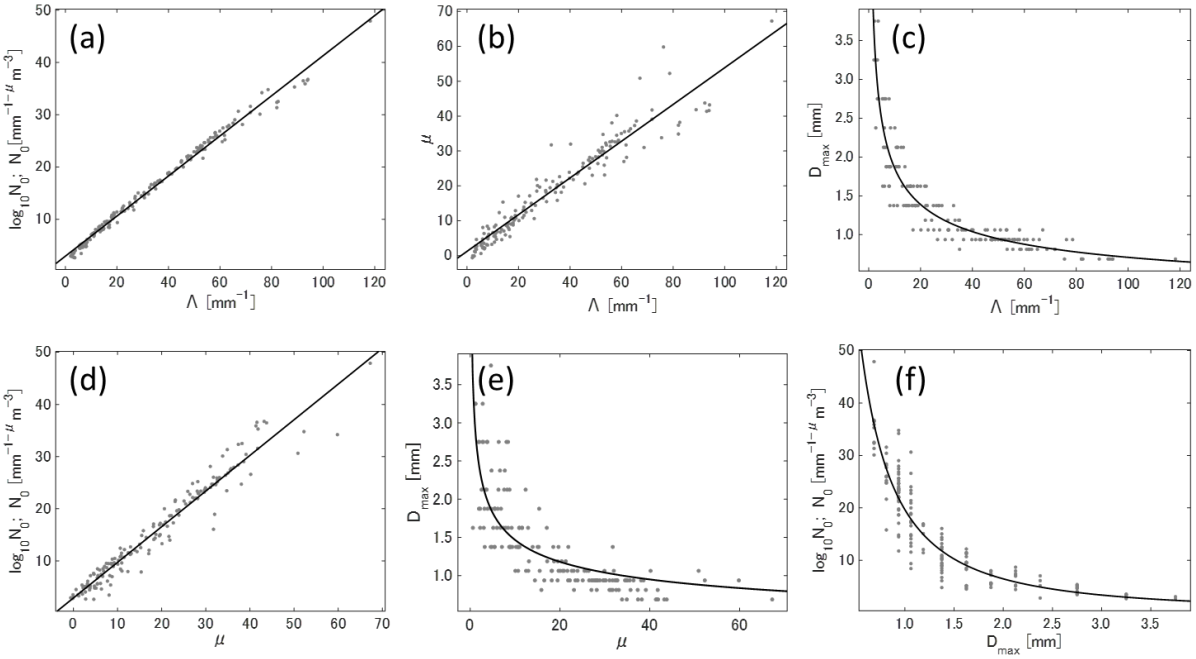


図 43　ガンマ PSD パラメータ間の相関関係。

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。

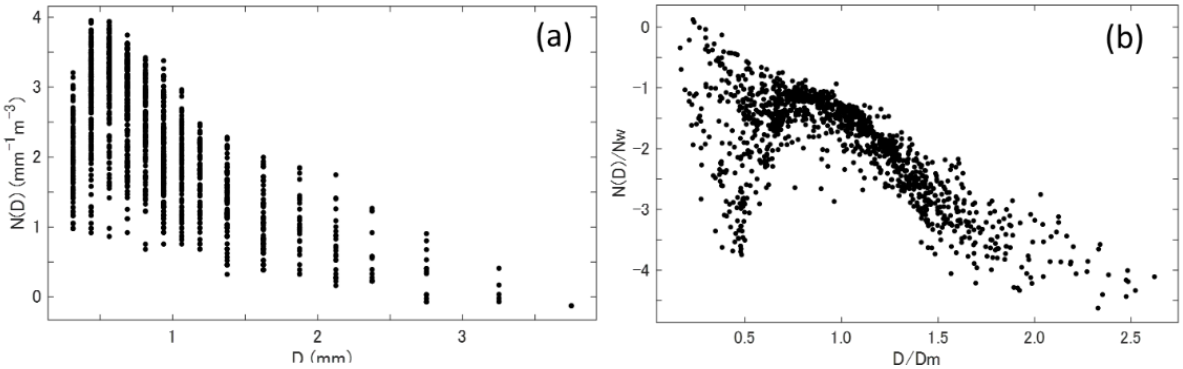


図 44　規格化する前(a)と後(b)の PSD

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。

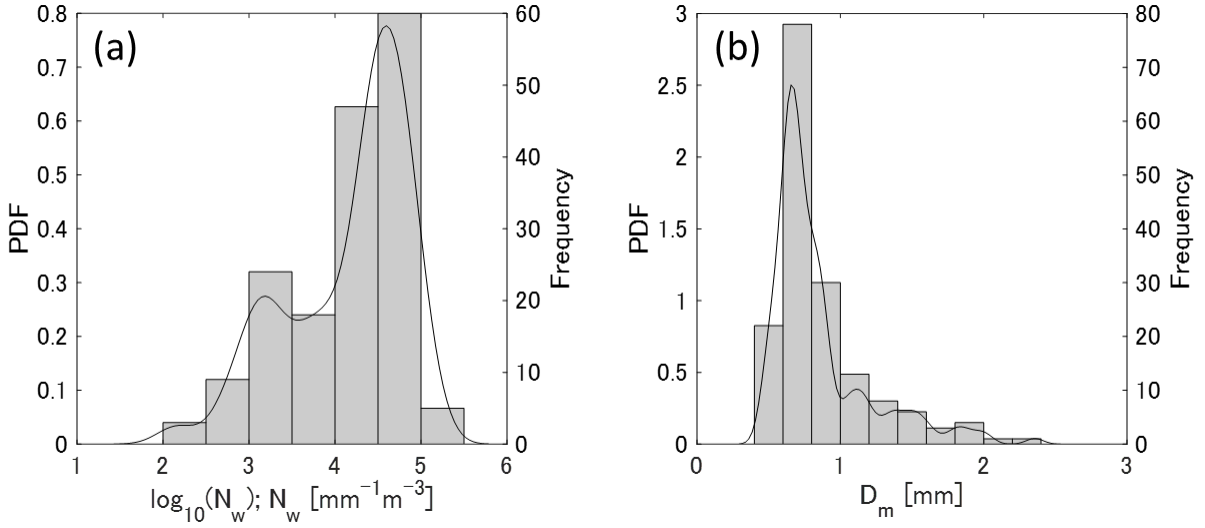


図 45　規格化切片パラメータと質量重み付き直径の頻度分布と確立密度関数

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（Nw、Dm、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 y 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

$$R_A / N_w = 2.54\times10^{-4} D_m^{4.97} \qquad \text{(e9.1)}$$

である。変形して

$$R_A = 2.54\times10^{-4} D_m^{4.97} N_w \qquad \text{(e9.2)}$$

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。

$$R_A = 2.72\times10^{-4} D_m^{5.07} N_w ; 95\%\,\text{upper limit} \qquad \text{(e9.3)}$$

$$R_A = 2.36\times10^{-4} D_m^{4.87} N_w ; 95\%\,\text{lower limit} \qquad \text{(e9.4)}$$

である。

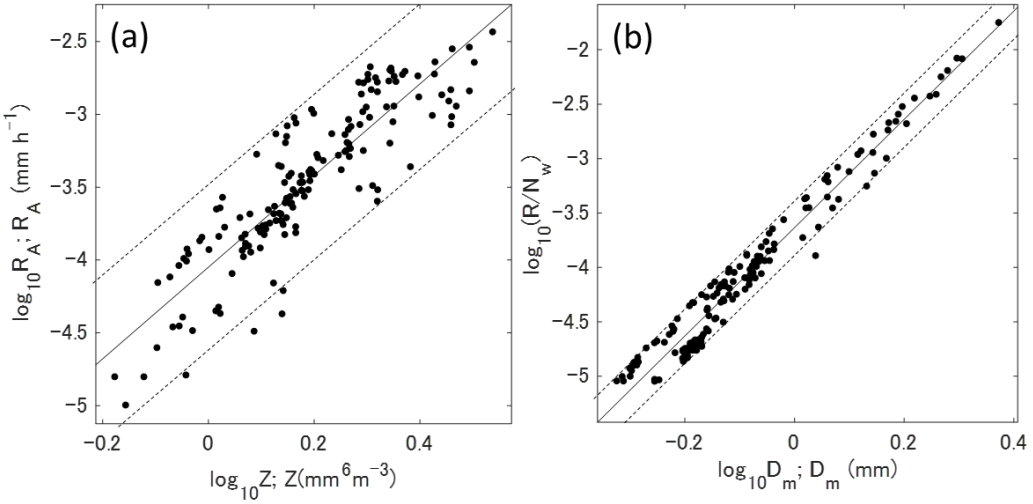


図 46　(a)R_A－Z 関係と(b)R_A/Nw－Dm 関係。

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となる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 Parsivel^2 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、福岡管区気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、福岡管区気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が、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。

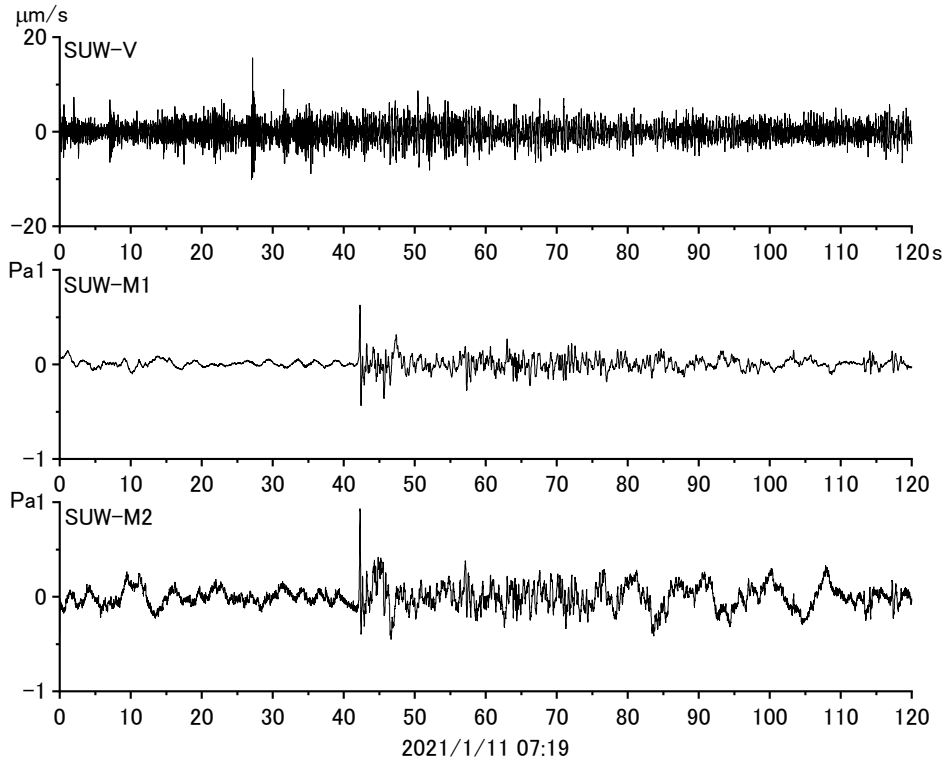


図 48　2021 年 1 月 11 日 7:19 に発生した噴火に伴う地震動（上段）および空気振動（中段、下段）

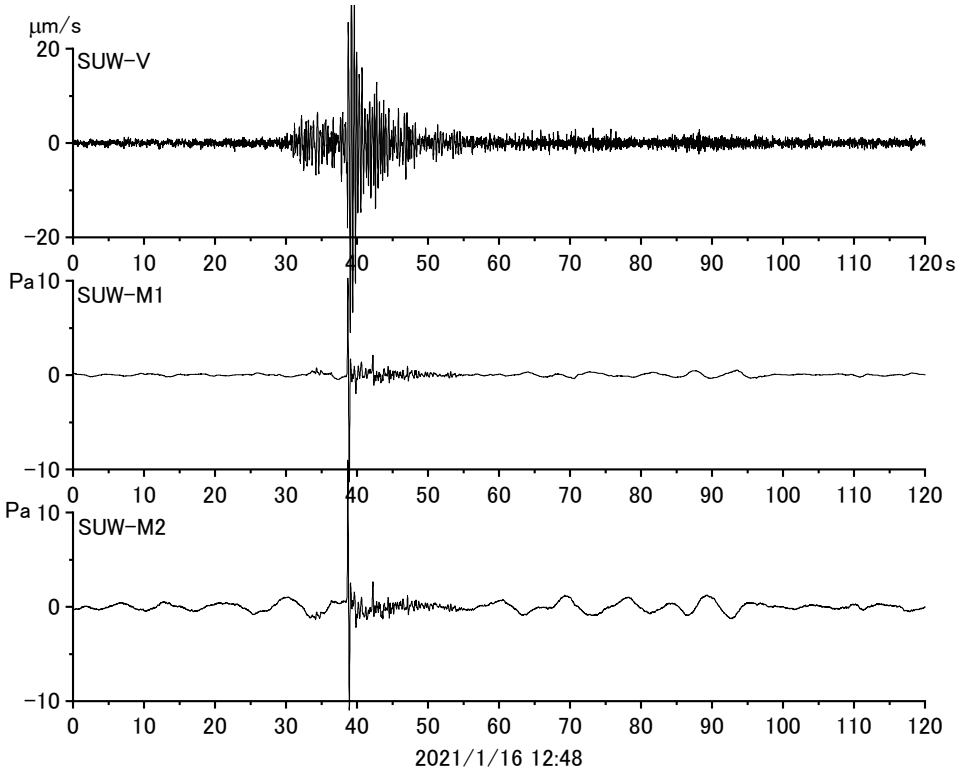


図 49　2021 年 1 月 16 日 12:48 に発生した爆発に伴う地震動（上段）および空気振動（中段、下段）。SUW-M1 は ACO のマイクロホン、SUW-M2 は SI104 によって観測された空気振動。

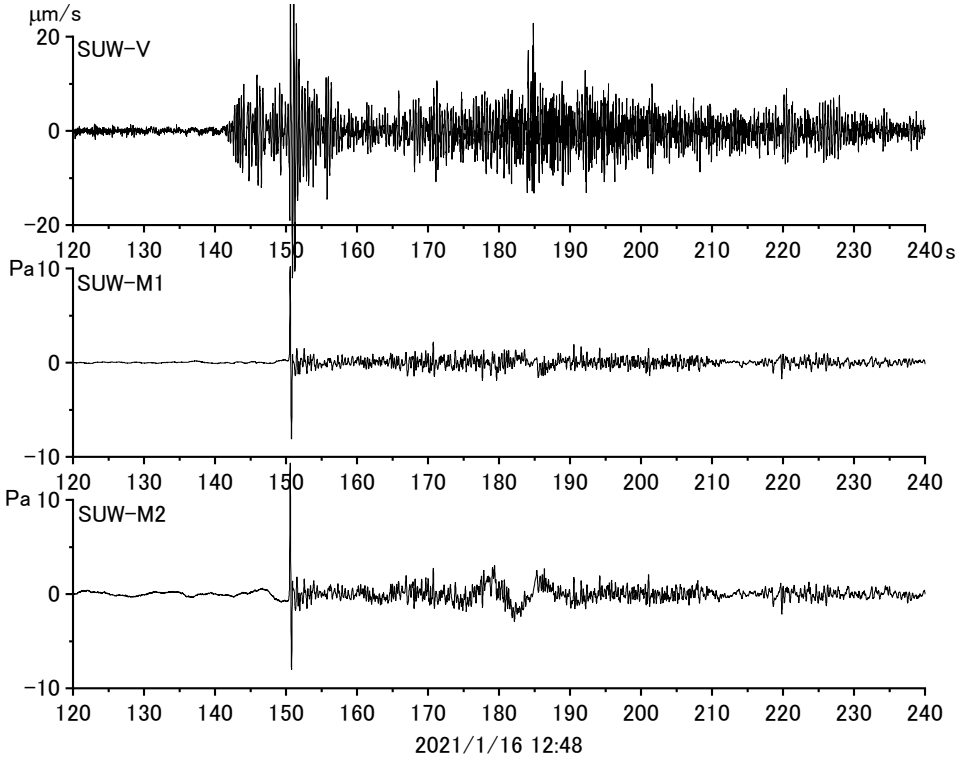


図 50　2021 年 1 月 16 日 12:50 に発生した爆発に伴う地震動（上段）および空気振動（中段、下段）。

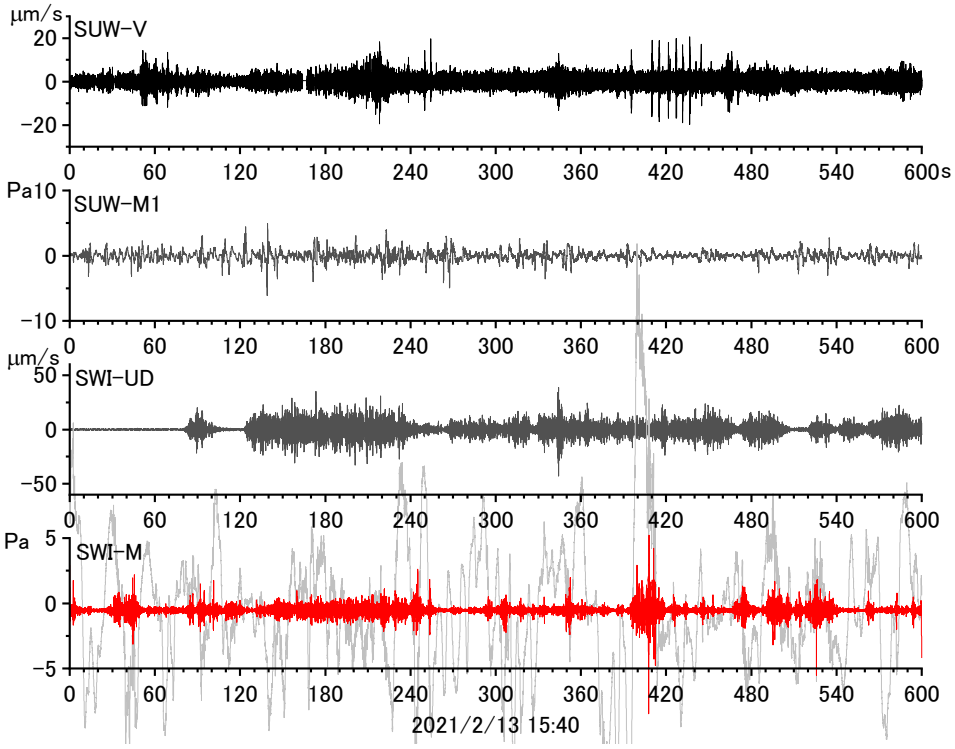


図 51　2021 年 2 月 13 日 15:42 に発生した噴火に伴う地震動（上段）および空気振動（2 段目）、以上観測点 SUW、地震動（3 段目）および空気振動（4 段目）、以上観測点 SWI。SWI の空気振動は 1Hz のハイパスフィルターを施したものである。

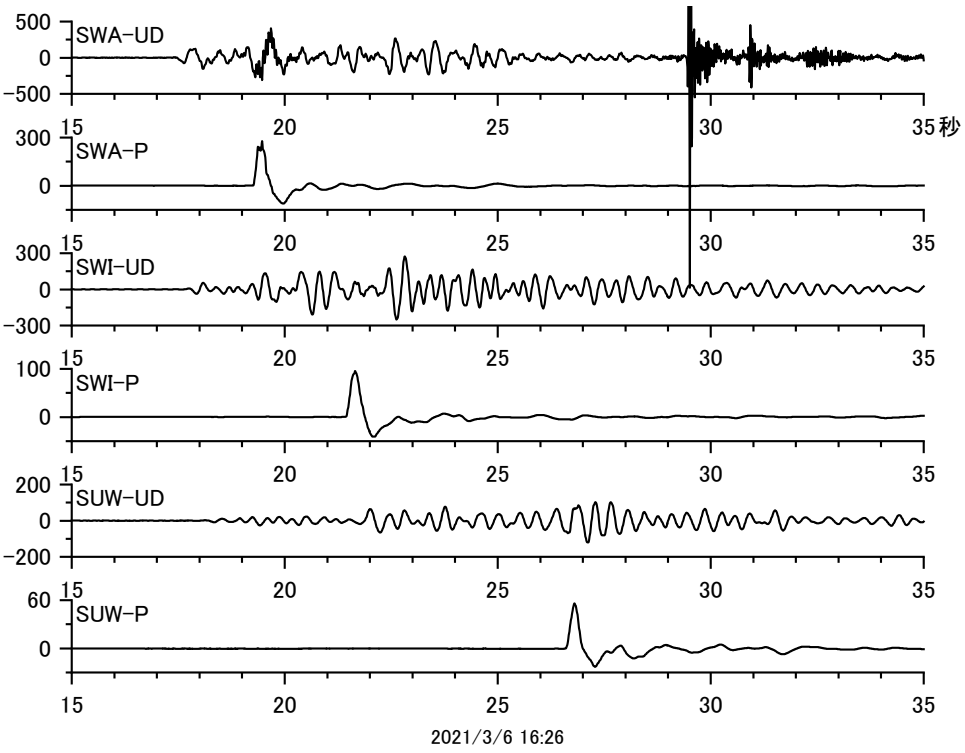


図 52　2021 年 3 月 6 日 16 時 26 分の爆発に伴う地震及び空振記録。「-UD」は地震動上下成分を、「-P」は空気振動を表す。SWA-UD の 29～30 秒に現れた高周波成分は噴石が観測点近傍に落下したことにより励起されたものである。



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 21~725 mg/kg, SO_4 は 618~3900 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 0.073m^2 を考慮すると単位面積当たりの降灰量は 1.42g/m^2 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。

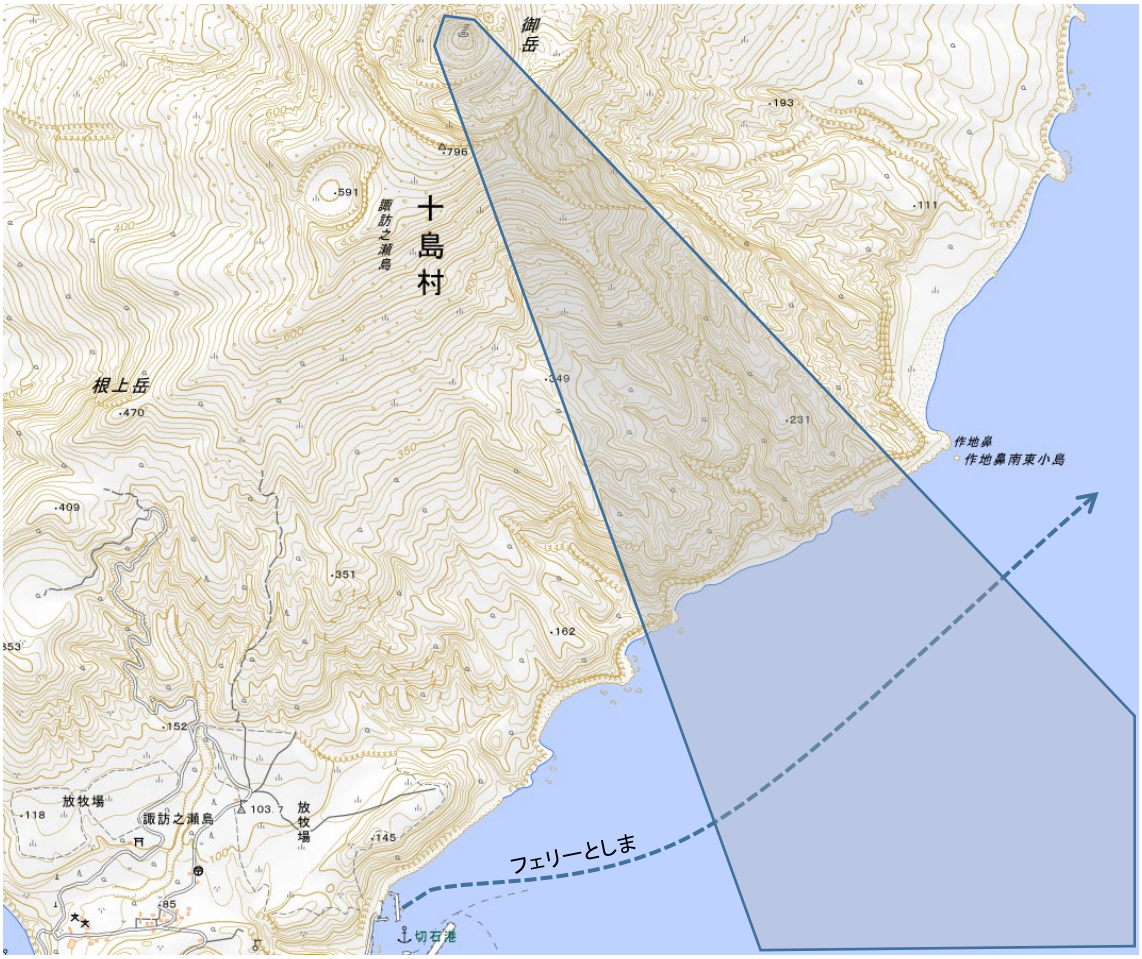


図 54　2021 年 2 月 7 日の火山灰採取地点



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を続けている（図 55)。噴煙の放出が簡潔に強くなることがある。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 においてディスドロメータを設置し（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 での採取はディスドロメータによる並行観測を実施した。



図 56　ディスドロメータ（Parsivel^2）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/m2
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	SO2 flux	SO2 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。

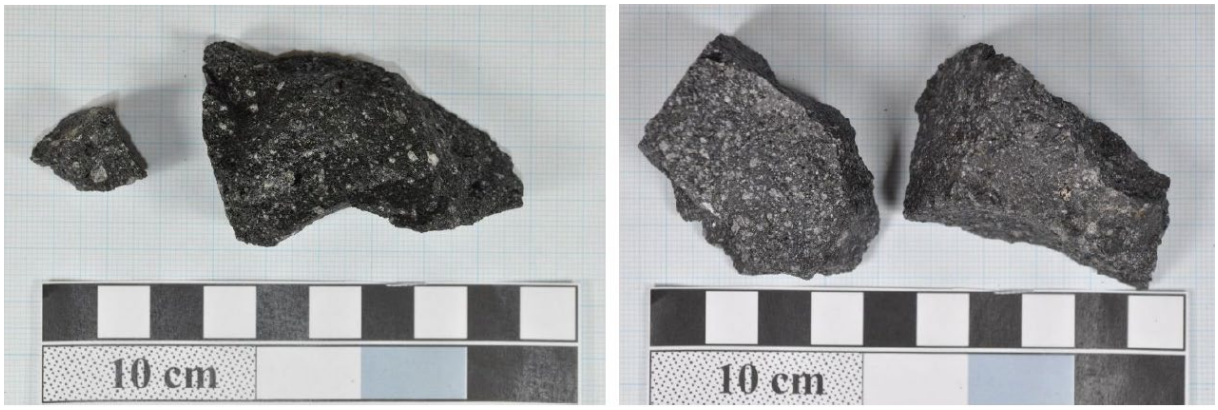


図 57 諏訪之瀬島火口周辺で採取された岩塊。（左）2021030606（2021 年 3 月 6 日御岳山頂下 A 点近傍で採取)、（右）2011072401（2011 年 7 月 24 日御岳山頂で採取)。

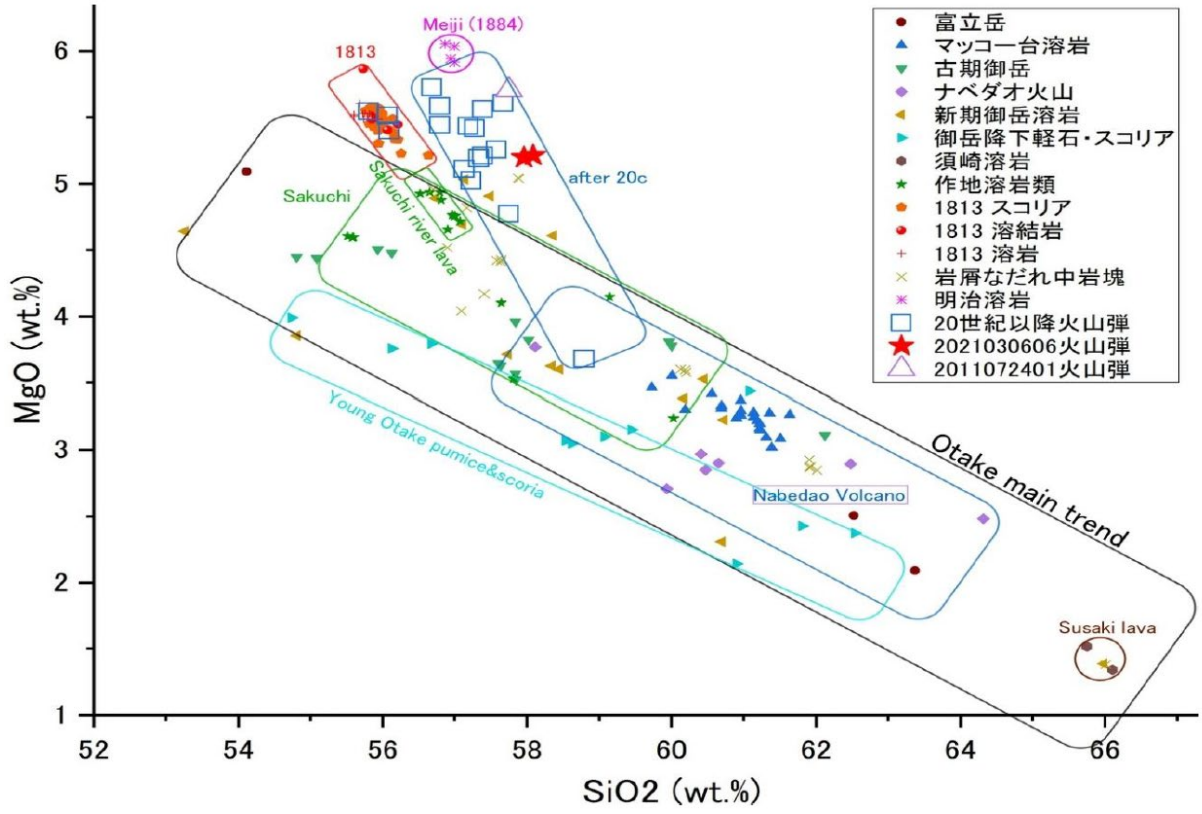


図 58　全岩化学組成（SiO_2-MgO；★：今回）

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
SiO2	57.33	57.27	57.01	57.06	57.58	57.27
TiO2	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65
Al2O3	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
Na2O	2.80	2.80	2.67	2.70	2.65	2.79
K2O	1.22	1.21	1.15	1.16	1.21	1.23
P2O5	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。

SO_2 濃度最大値：1.7 ppm

SO_2/H_2S：170±100

CO_2/SO_2：1.6±0.4（全体では 3.9、低温噴気？）

H_2/SO_2：0.022±0.008

H_2O/SO_2：n.d.

H_2O は相関が見られなかったが、H_2 は H_2O 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

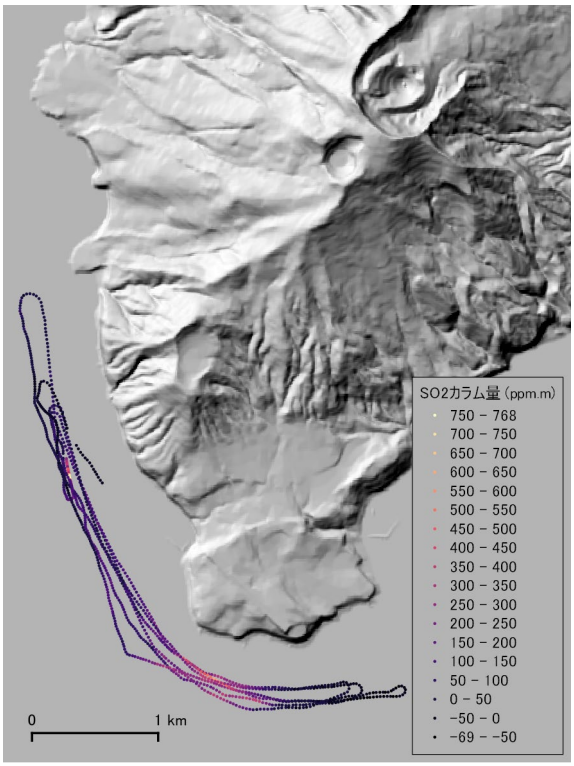


図 60　トラバース法による二酸化硫黄放出率測定の航路

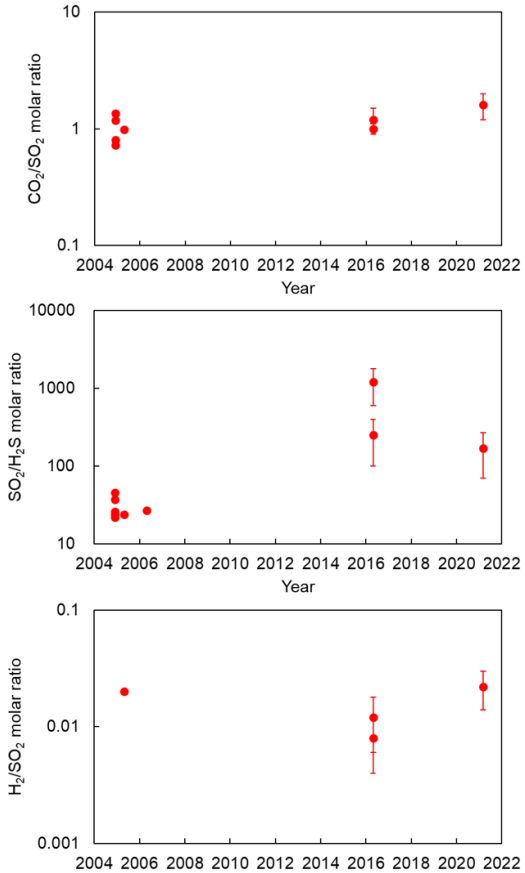


図 61　マルチガスセンサーを用いた火山ガス組成の測定結果。過去の測定と比較して示した。

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度化技術開発に 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]。

$$W_e = \alpha A + \beta \Delta V + \gamma \qquad (5\text{-}1)$$

2009 年から 2013 年までの昭和火口の噴火活動では、α =3.8×10^{-5}、β =2.6、γ =−1.03×10^{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。

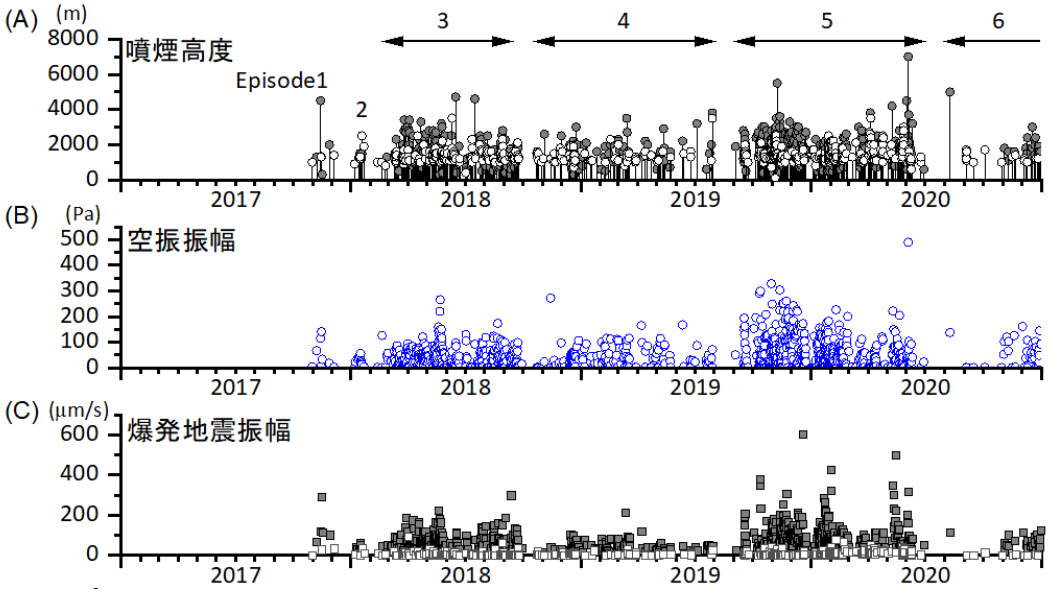


図 62　2017 年 10 月 31 日に南岳の噴火活動に回帰して以降の噴火活動。(a) 火口上噴煙高度（鹿児島地方気象台）。(b) 空振振幅。(c) 爆発地震の最大振幅。

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]。

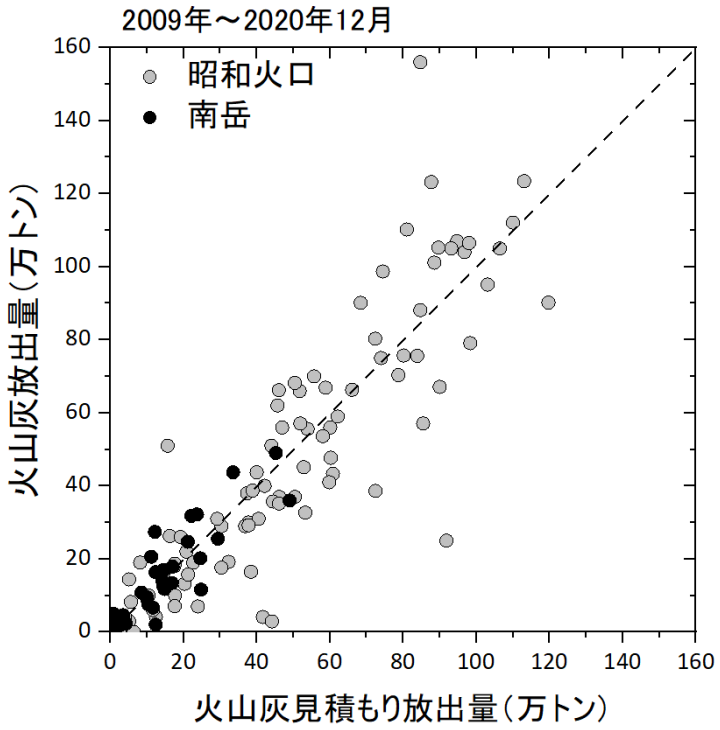


図 63　2009 年 1 月から 2020 年 12 月までの 12 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

係数については、昭和火口噴火活動期については α=3.8×10^{-5}、β=2.6、γ=-0.5×10^{5} とした。南岳噴火活動期については、β=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。

$$W_e = \beta \Delta V \qquad (5\text{-}2)$$

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。

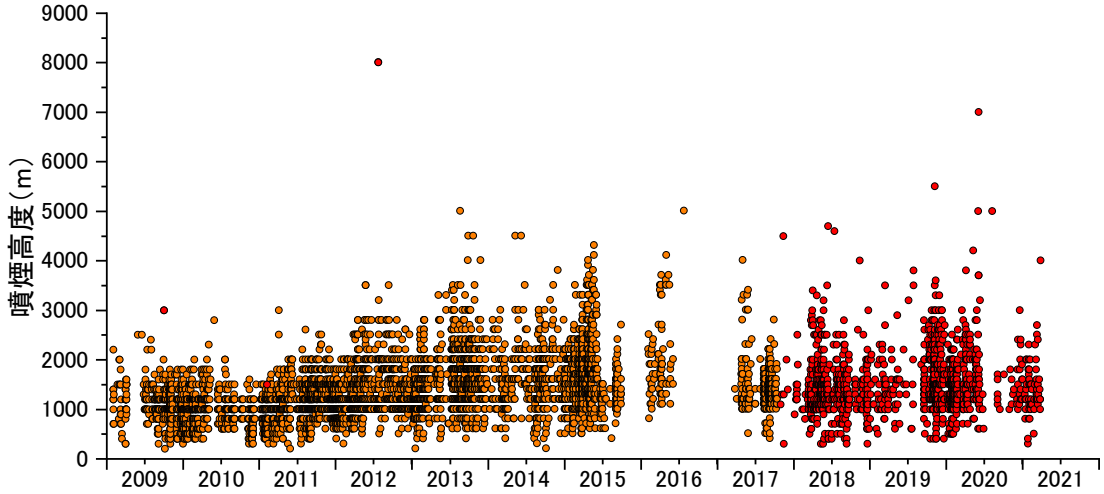


図 64　桜島の爆発に伴う噴煙高度の推移。主に、鹿児島地方気象台の観測によるが、必要に応じて、噴煙高度データを補てんした。赤丸は南岳、橙丸は昭和火口の噴火である。

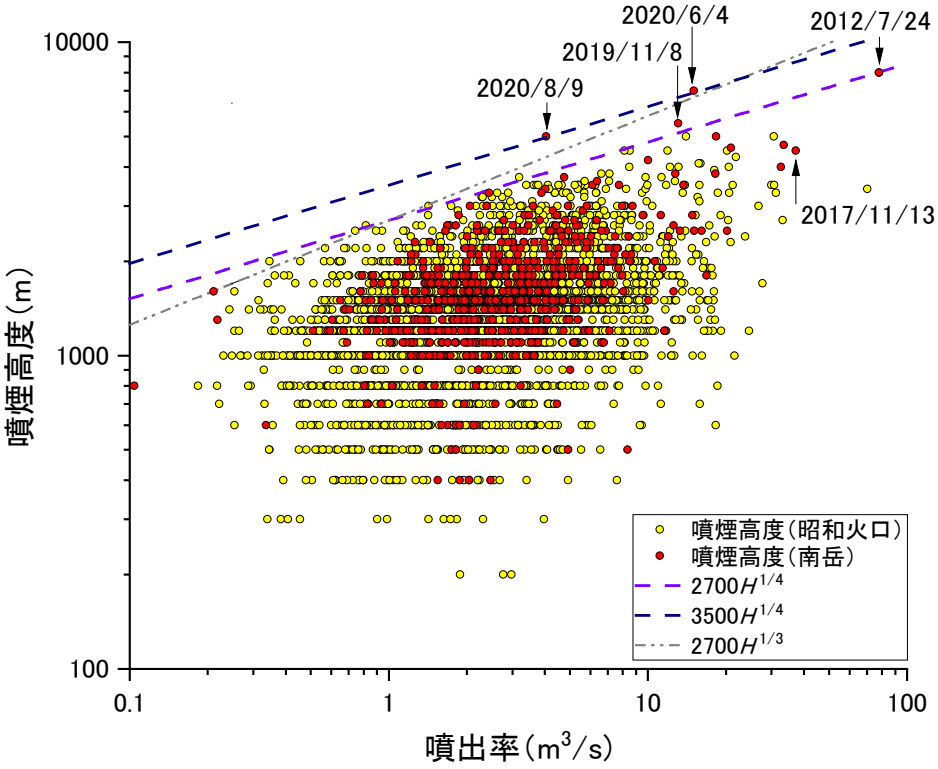


図 65　噴煙高度と噴出率の関係。

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、78m^3/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大きい。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 15m^3/s と見積もられる。噴出率は 10m^3/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。

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

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。

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

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]。

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

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艀、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、沖小島は姶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。

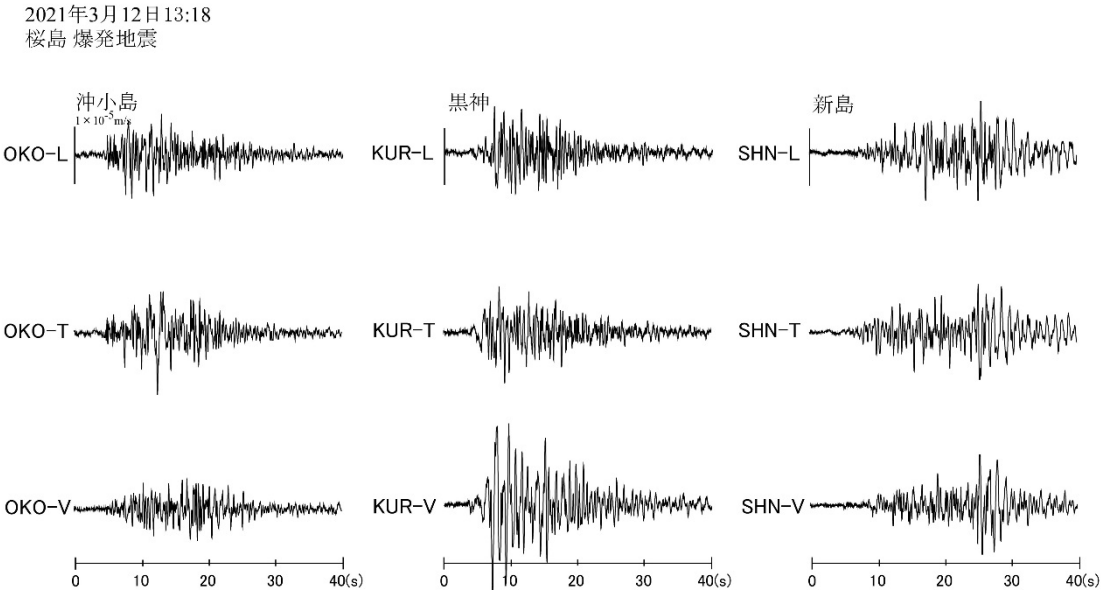


図 68　2021 年 3 月 12 日に発生した桜島南岳の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形。左列が今回設置した沖小島観測井の地震計記録、中列が平成 30 年度に設置した黒神観測井、右列が令和元年度に設置した新島観測井の記録である。上から順に、水平動の火口方向成分、水平動直交成分、上下動成分である。

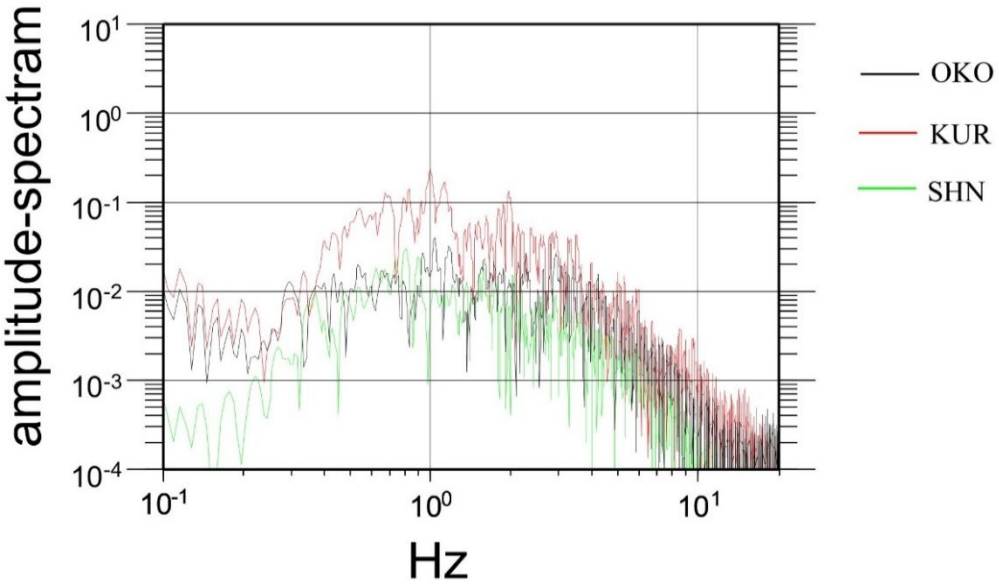


図 69　沖小島（OKO）、黒神（KUR）、新島（SHN）における爆発地震（図 68）のスペクトル。

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。

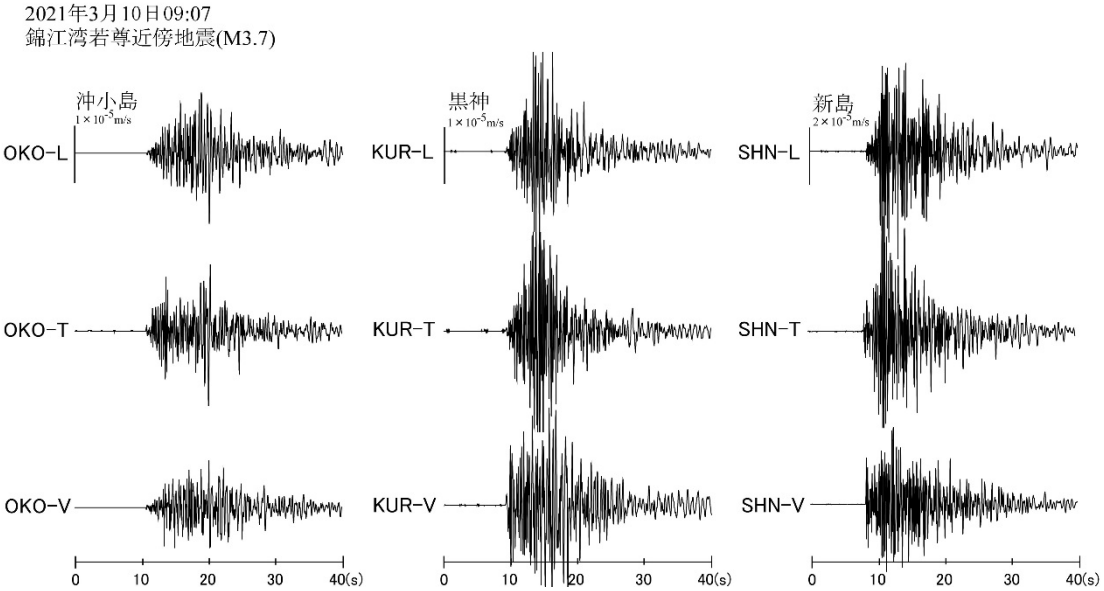


図 70　2021 年 3 月 10 日に錦江湾若尊近傍で発生した火山構造性地震の波形。

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。

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

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

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。

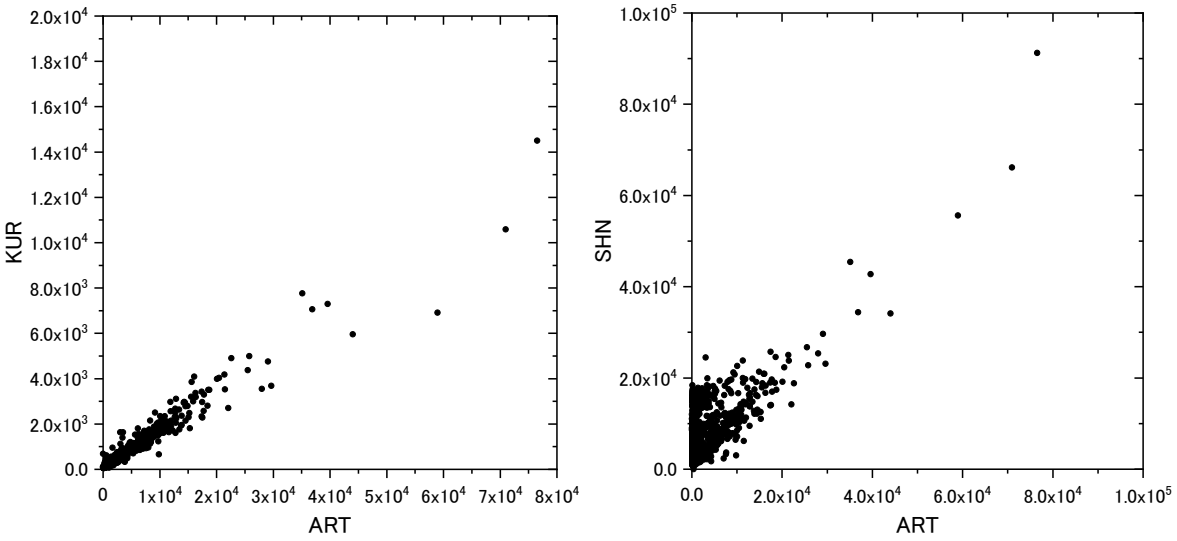


図71　2-3Hzの周波数帯域の1分毎のスペクトルの相関。左：KURとARTの関係。右：SHNとARTの関係。2020年5月27日の例。

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$0～2\times10^4$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。

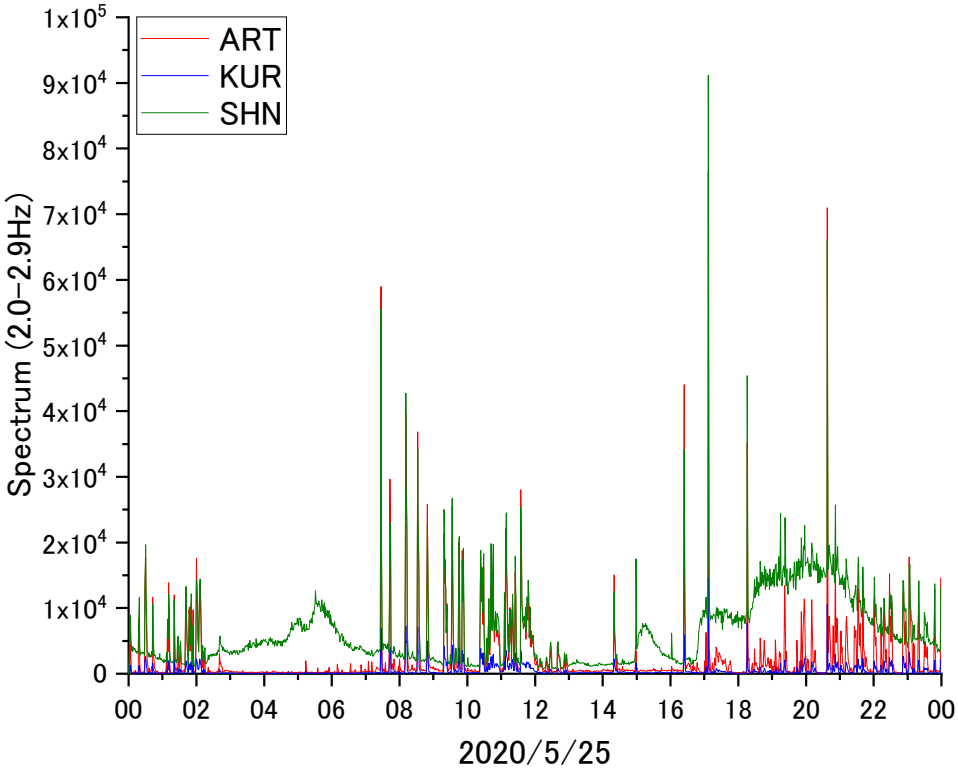


図 72　ART、KUR、SHN における 2～3Hz の周波数帯域の振幅の時間変化。1 分毎にプロットした。

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。

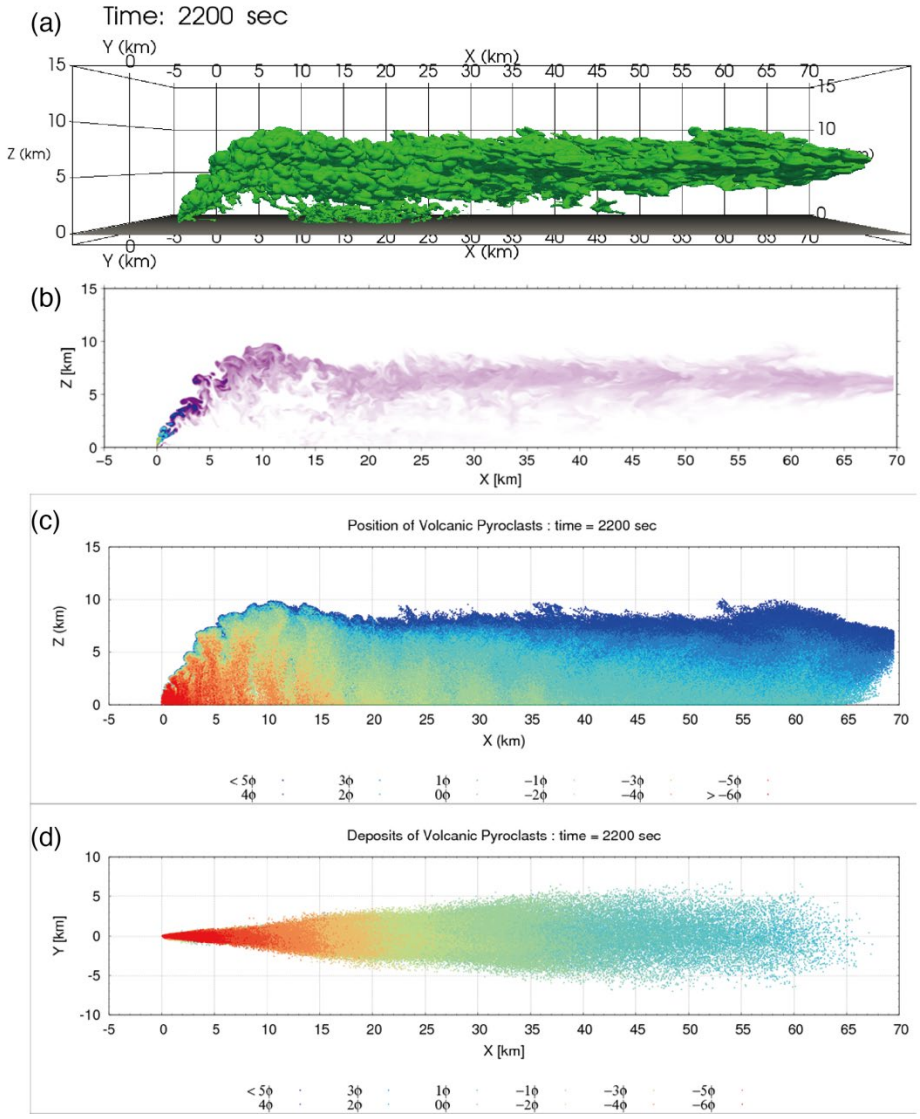


図 73　サブプリニー式火山噴煙の３次元数値シミュレーション結果。(a)噴出物濃度0.2wt%等値面の鳥瞰図。(b)噴煙断面における噴出物濃度分布。(c)大気中の火山灰粒子分布。(d)地表への火山灰降灰分布。(c)と(d)における色は火山灰の粒径を示す。

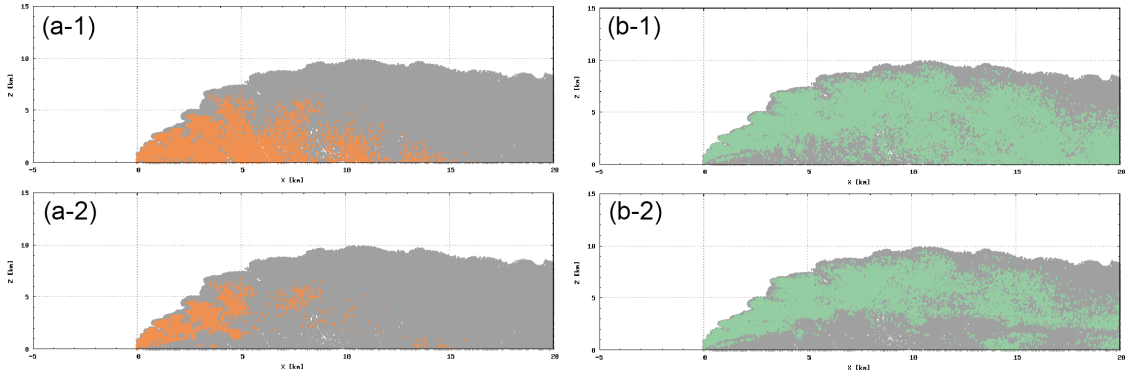


図 74　サブプリニー式噴火における火山灰粒子シミュレーション。粒径が 8〜16　mm の火山灰の(a-1)全粒子分布と(a-2)噴煙内分布。粒径が 1〜2　mm の火山灰の(b-1)全粒子分布と(b-2)噴煙内分布。

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、昨年度の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。

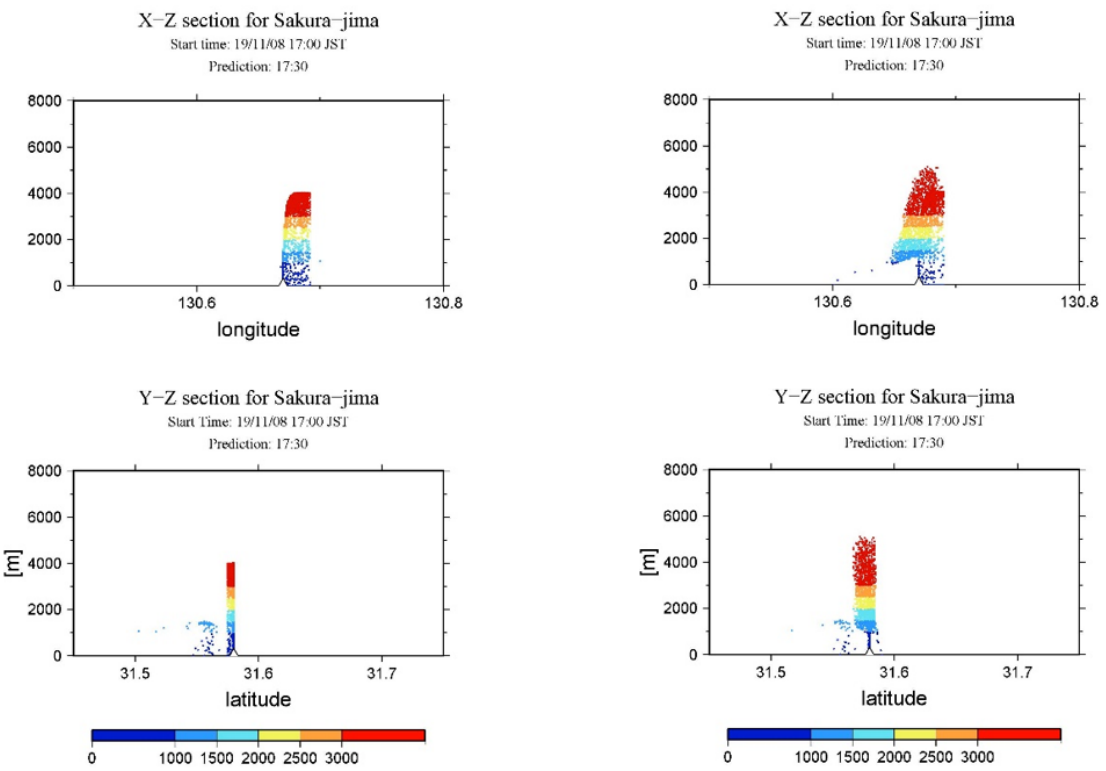


図 75　（左）PUFF モデルにより予測された噴煙の東西鉛直断面（上）と南北鉛直断面（下）の分布図。（右）MP レーダーの観測値を同化して修正された噴煙の同鉛直断面図。

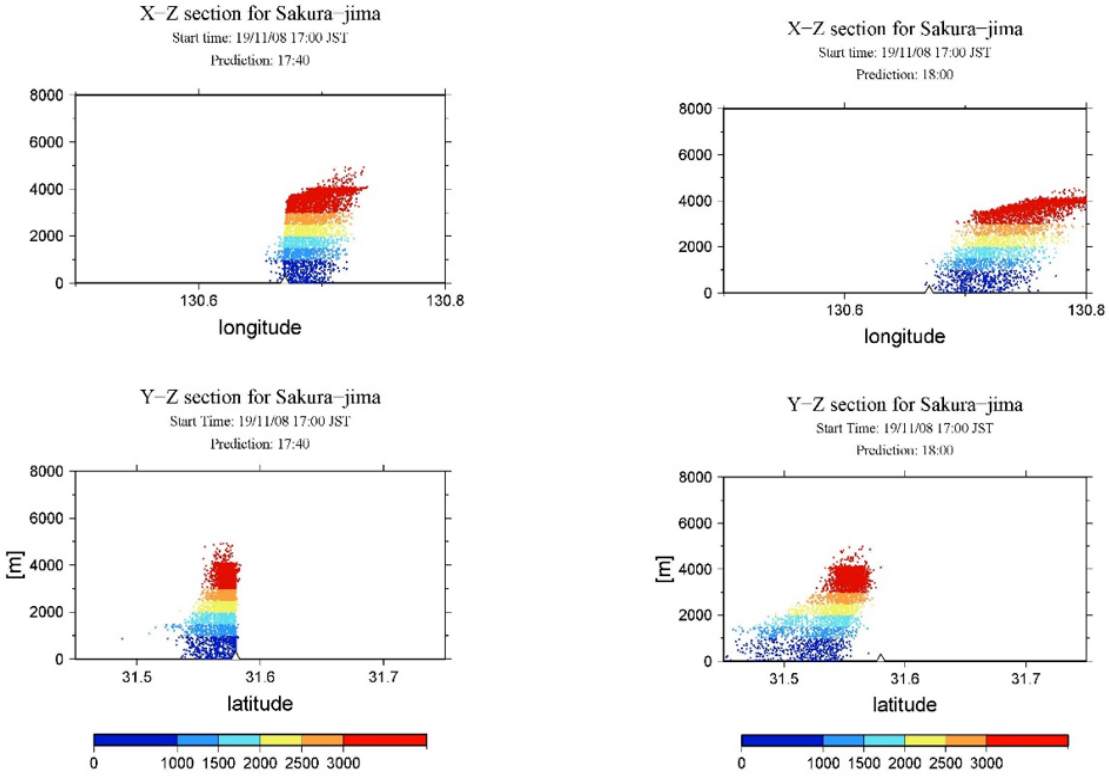


図 76　PUFF モデルに MP レーダーの観測値を同化して修正された噴煙の予測。（左）噴火 16 分後の 17:40 JST.　（右）噴火 36 分後の 18:00 JST.

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ることで、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(g/m^2)の等値線、2 は 100(g/m^2)の等値線を示す。火口から南東に向かって 100(g/m^2)の降灰があり、10(g/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。

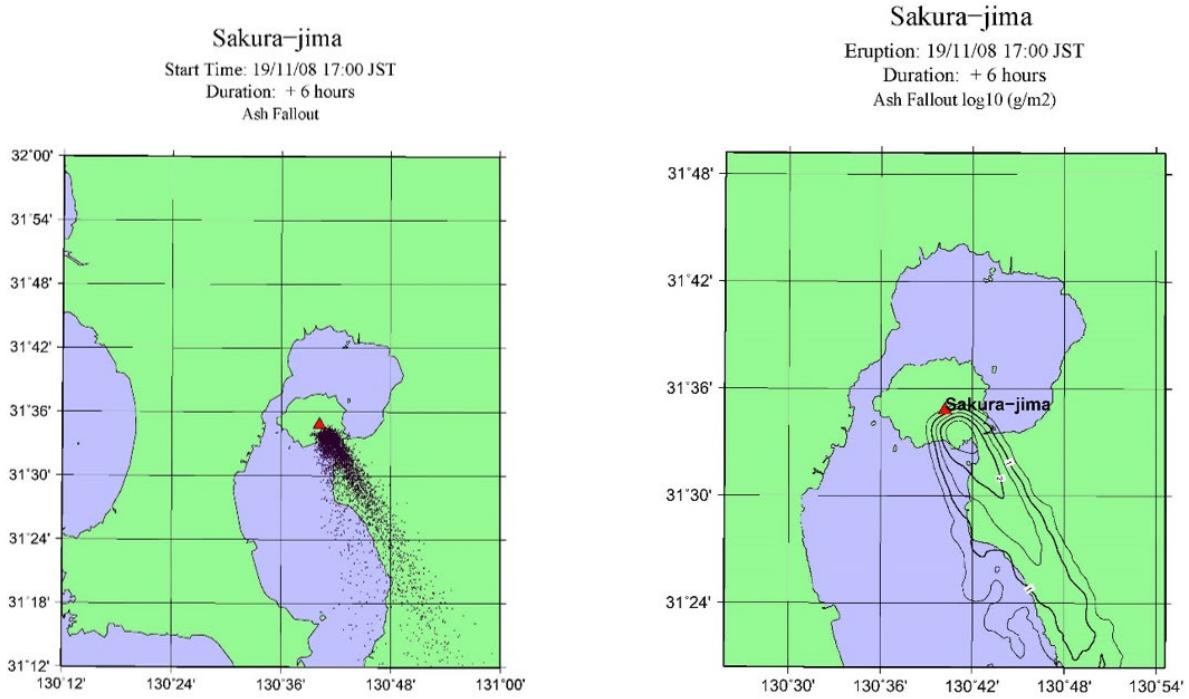


図 77　PUFF モデルに MP レーダーの観測値を同化して修正された噴煙の予測から得られた降灰分布。（左）噴火から 6 時間後までの降灰粒子の分布。（右）噴火から 6 時間後までの降灰量(g/m^2)の分布で、等値線は常用対数の値を表し、1.0 は 10(g/m^2)の等値線を示す。

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。ディスドロメータでは粒径、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、水平方向に一様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、海抜 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ド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：

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

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 m/s^2, ρ_p=2640 kg/m^3, η_a=1.8 × 10^{-5}, ρ_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、ディスド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）ディスドロメータによる地上観測、ii） ディスドロメータによる降灰量の見積もりにおいて、ディスド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、ディスド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。

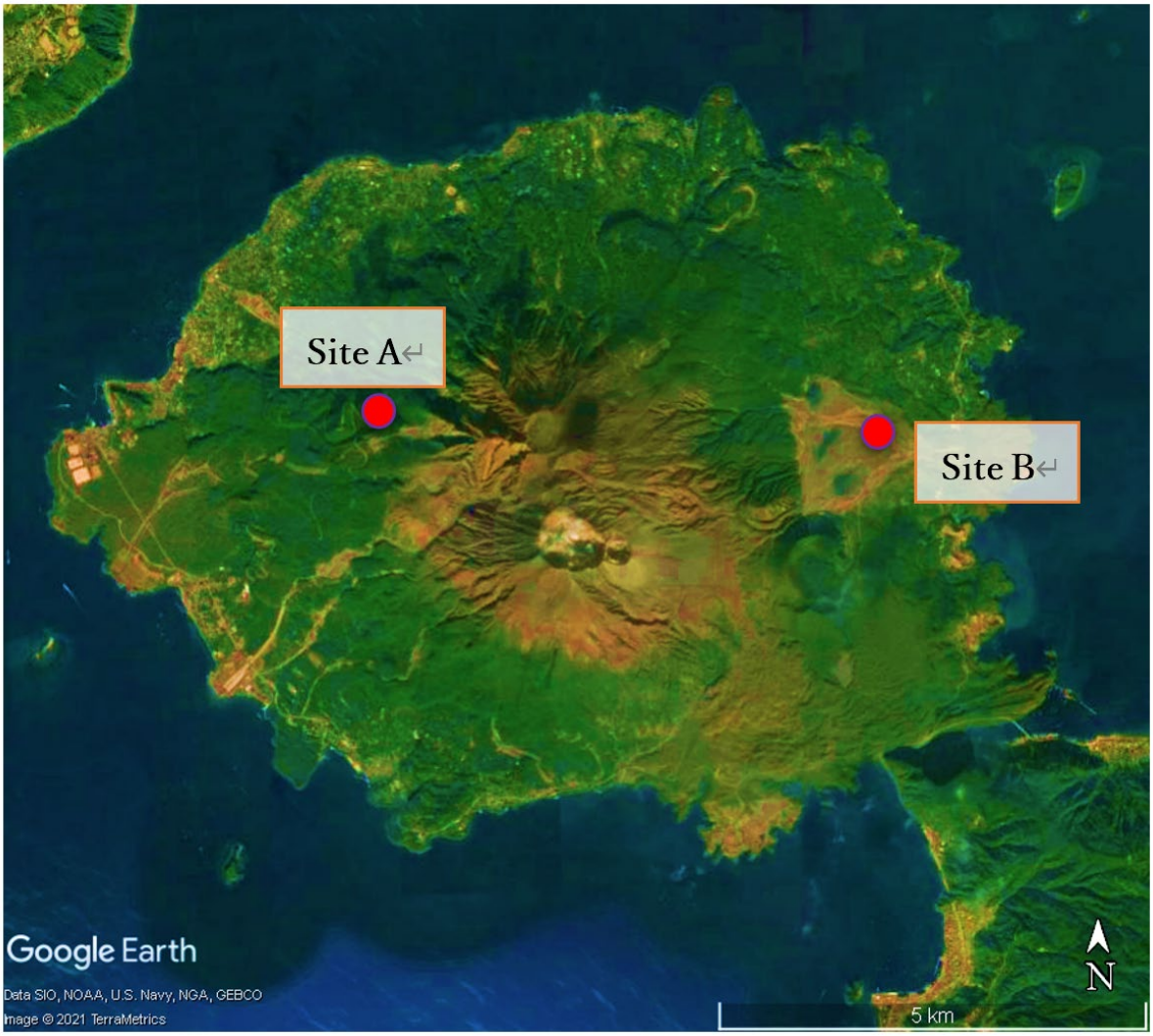


図 78 調査地点（Site A；ハルタ山、Site B；黒神地獄河原）

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)。

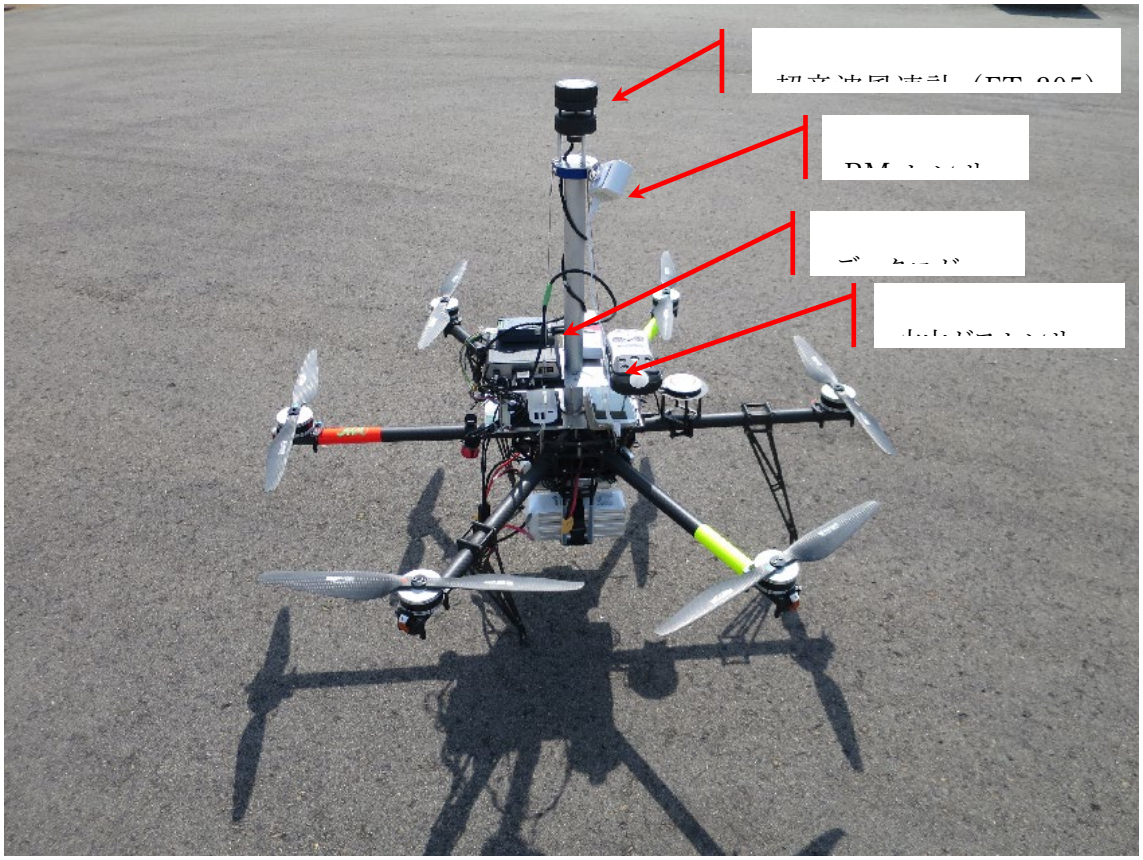


図 79　調査で使用したドローン外観

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、上空にい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。

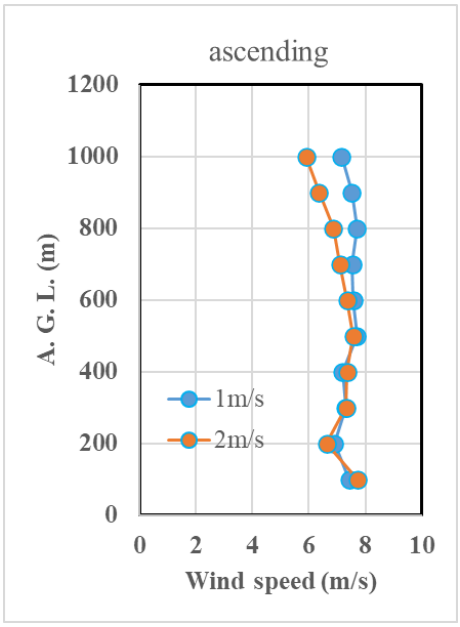
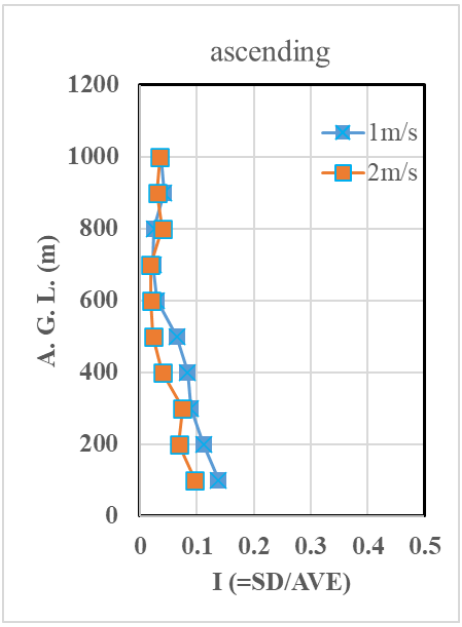
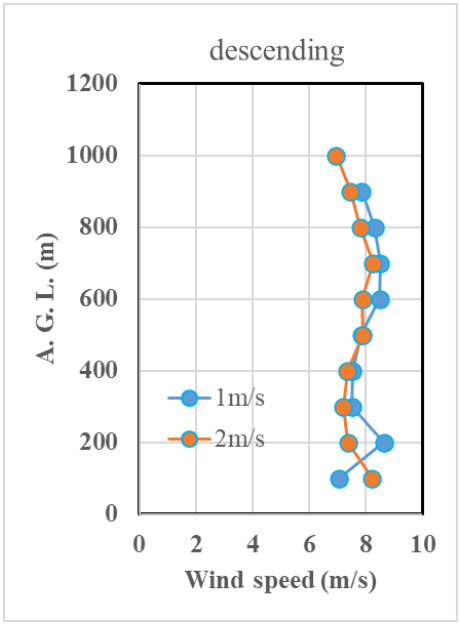
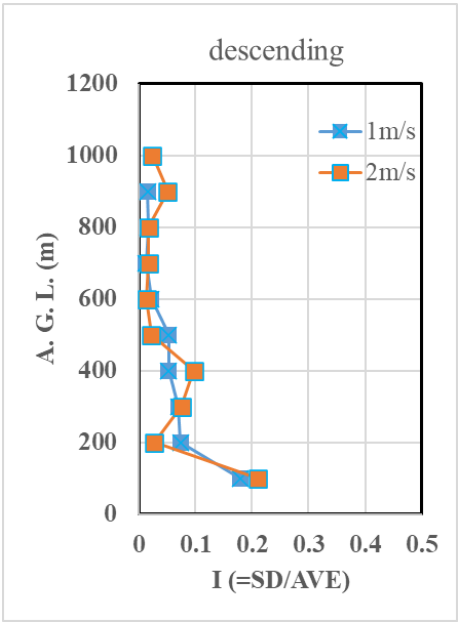
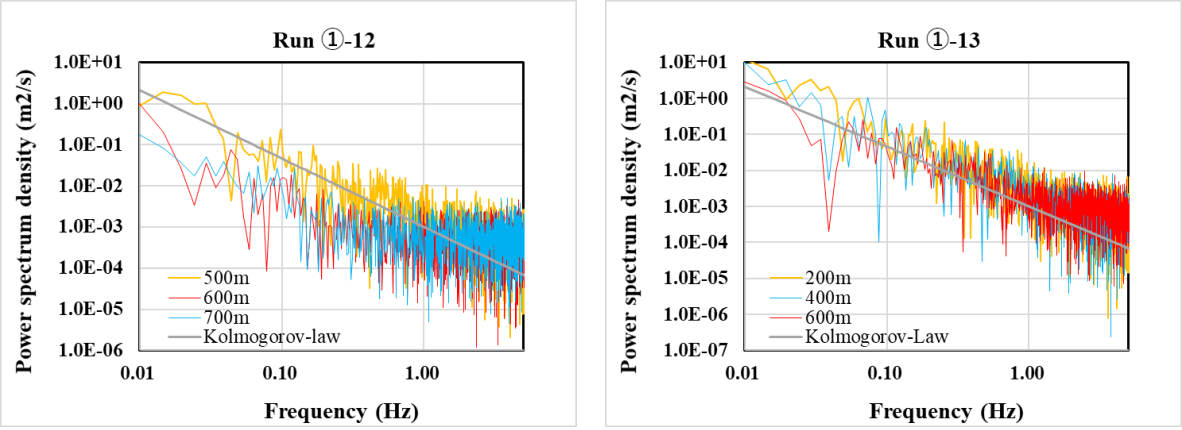
	平均風速	乱流強度
上昇時		
下降時		

図 80　ドローンによる風速・乱流観測結果（移動観測）



(a) (b)

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(PM_{10})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、H_2S についてはすべての Run で検出下限値以下（<0.1ppm）であった。SO_2 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 SO_2 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。

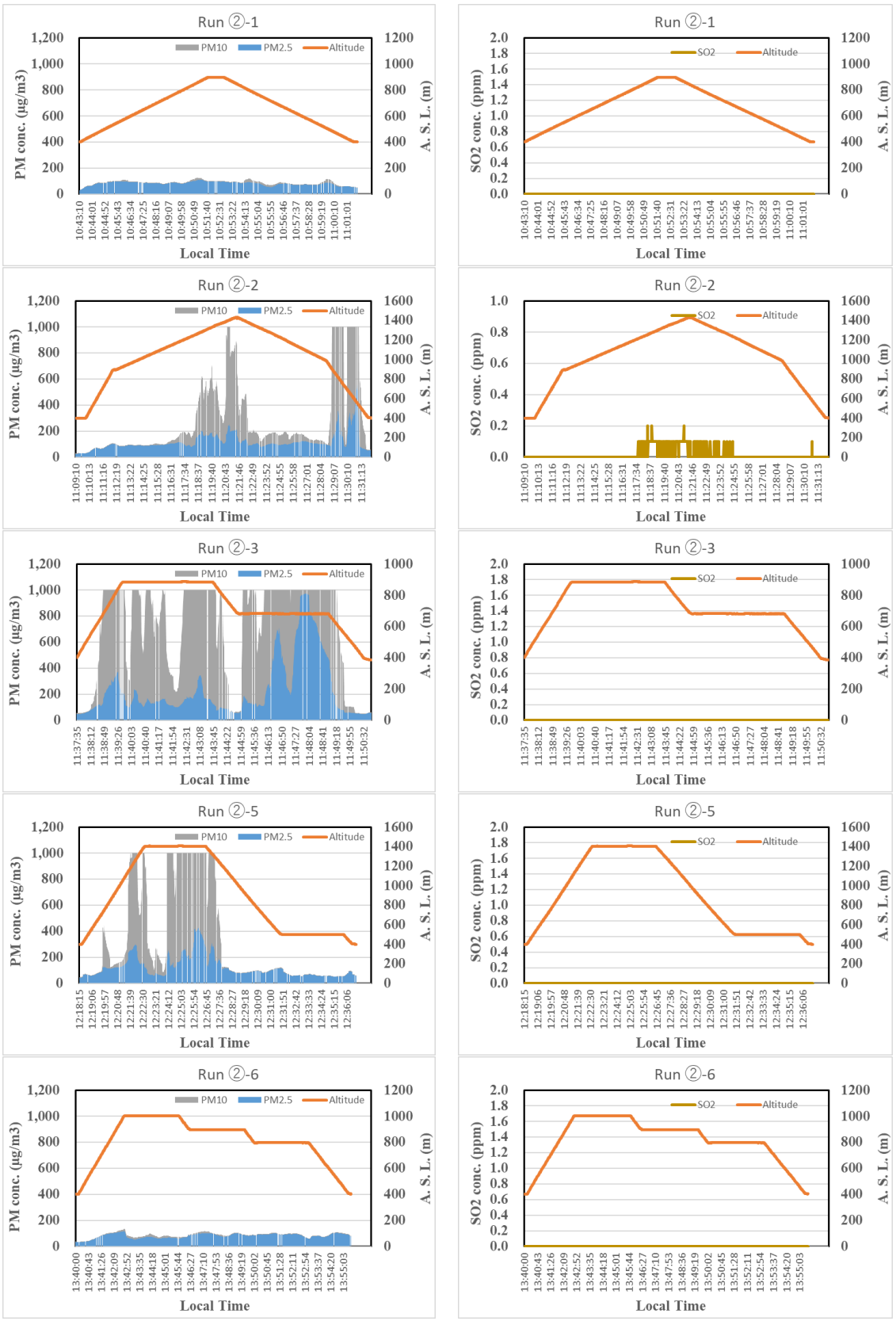


図 82 ドローンによる桜島周辺の火山灰・火山ガスの観測結果（左図：PM　右図：　SO_2）

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。

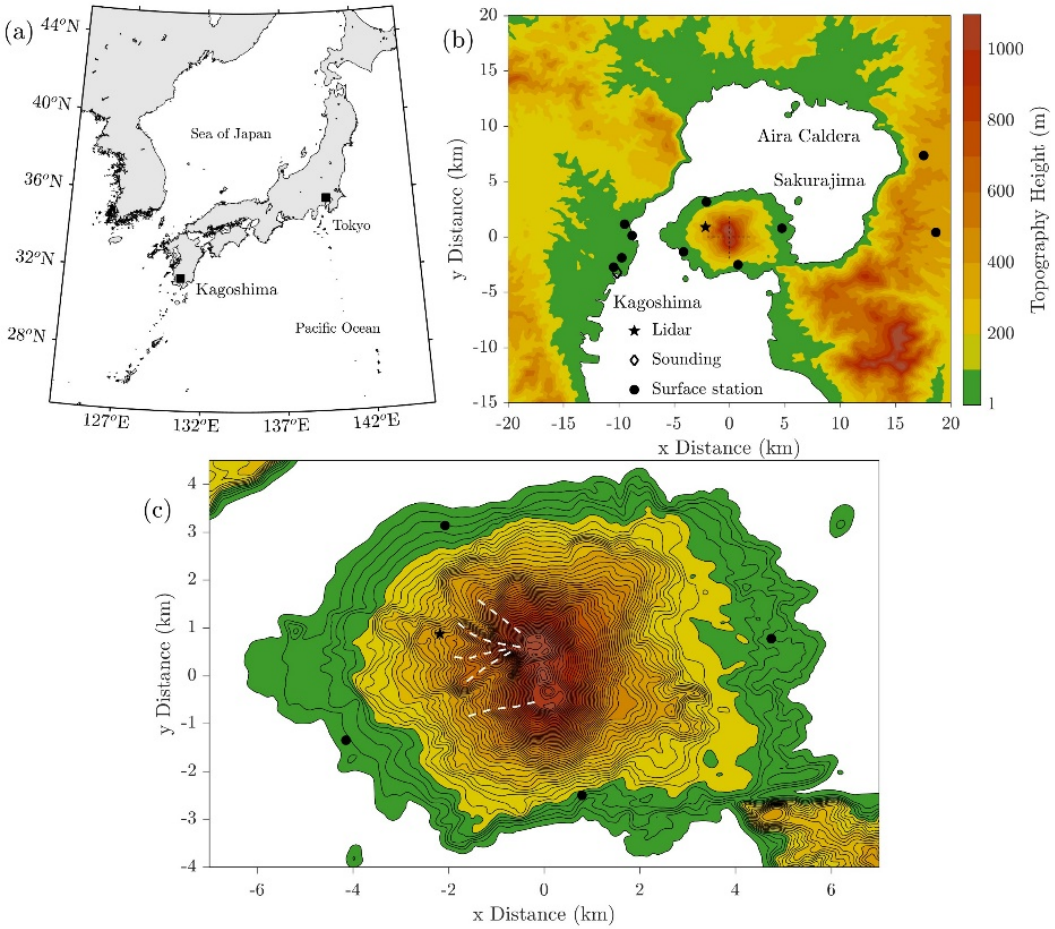


図 83　(a) 日本地図と鹿児島の位置、(b) 桜島および周辺地形、(c) 桜島の地形

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 GTOPO30 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 GTOPO30 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 GTOPO30 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。

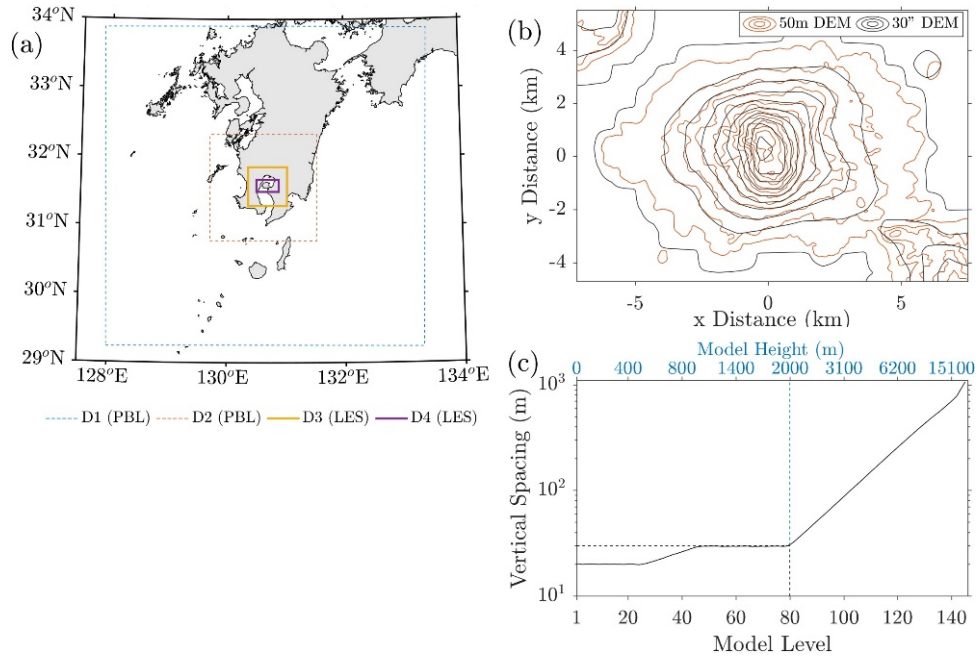


図 84 (a) WRF モデルの計算領域 (D1, D2, D3, D4)、(b) 国土地理院 50 m メッシュ数値地図から作成したモデル地形の標高の等値線（橙色）および GTOPO30 から作成した地形の標高（黒色)、(c) 鉛直層数と鉛直格子間隔の関係

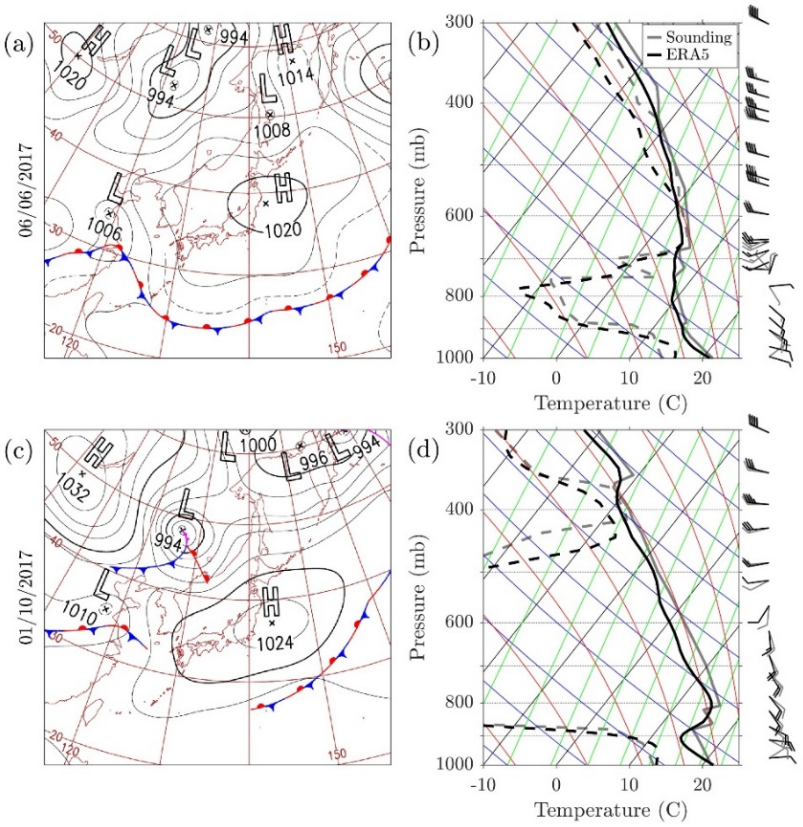


図 85　解析対象とした 2017 年 6 月 6 日の気象状況（(a) 天気図、(b) 高層気象観測）および 2017 年 10 月 1 日の気象状況（(c) 天気図、(d) 高層気象観測）

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（海抜高度）での風速場を見てみる（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。

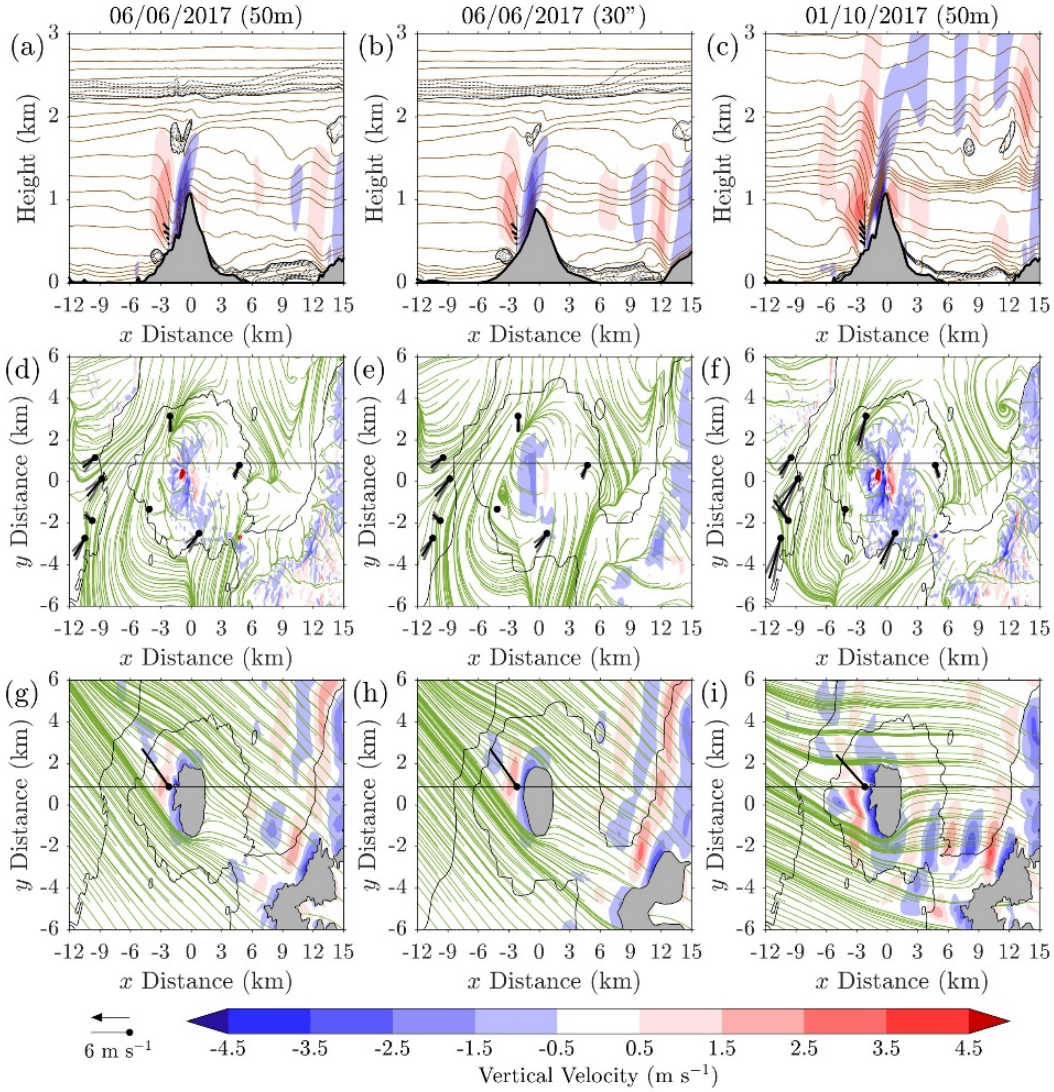


図 86　シミュレートされた気流場と観測された風（ただし 0600-0900　JST の 3 時間平均）。（a），（d），（g）6 月事例（50 m メッシュ DEM の場合），（b），（e），（h）6 月事例（30 秒メッシュ DEM の場合），（c），（f），（i）10 月事例（50 m メッシュ DEM）。1 列目：ドップラーライダー観測地点を通る鉛直断面での鉛直風（カラーシェード；青は下降、赤は上昇）、等温線（茶色）、ドップラーライダー観測風（ベクトル）。2 列目：地上での鉛直風（カラーシェード）、流線（緑色）、地上観測風（ベクトル）。3 列目：2 列目の図と同様であるが、海抜高度 600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

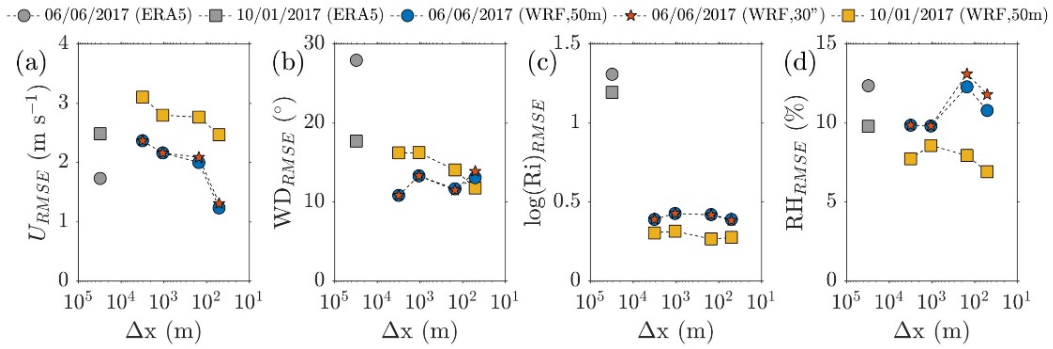


図 87　高層気象観測値に対する ERA5 および WRF 出力値の平均二乗誤差（RMSE)。地上から海抜高度 10 km までの範囲で、9 時のデータについて算出したもの。横軸に水平格子間隔（Δx）を示す。(a) 水平風速（U)、(b) 風向（WD)、(c) リチャードソン数（対数にして示す）（log(Ri)）、(d) 相対湿度（RH)。6 月 6 日の事例、10 月 1 日の事例について、ERA5 解析値、WRF 計算ケースそれぞれ異なる色で示している。

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を海抜高度 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、不確定性が顕著になる。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。

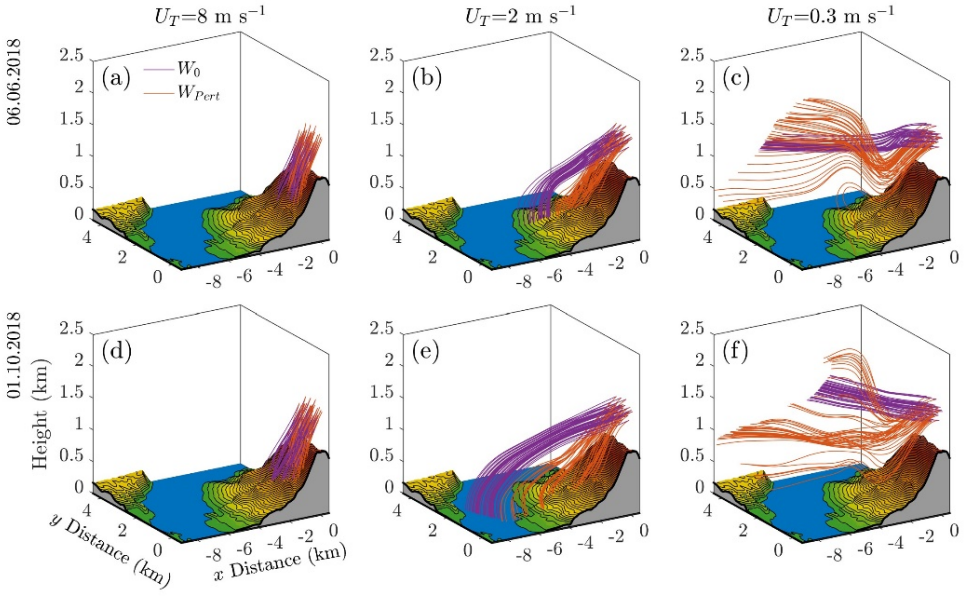


図 88　注入高度（H_I）500 m（海抜高度）にした場合の粒子の軌跡。（上段）6 月事例、（下段）10 月事例で、異なる終端速度（U_T）の場合を示す：(a)，(d)，8 m s^{-1}，(b)，(e)，2 m s^{-1}，(c)，(f)，0.3 m s^{-1}。鉛直速度を 0 と仮定した場合（W_0；紫色）および WRF 出力値の鉛直速度を用いた場合（W_{Pert}；赤色）を示す。

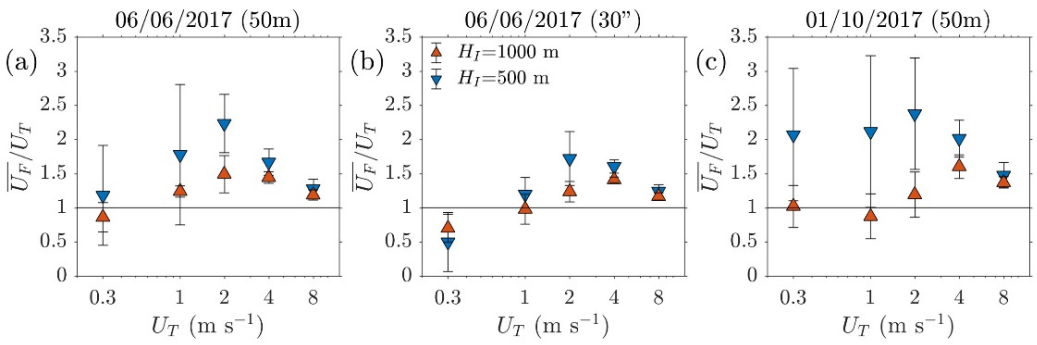


図 89　粒子の終端速度に対する落下速度の比（U_F/U_T）を終端速度 U_T について示す。(a) 6 月事例（50m メッシュ DEM の場合)、(b) 6 月事例（30 秒メッシュ DEM の場合)、(c) 10 月事例（50m メッシュ DEM の場合）について、粒子の注入高度H_Iが 1000 m の場合（赤三角）と 500 m の場合（青三角）の結果を示す。

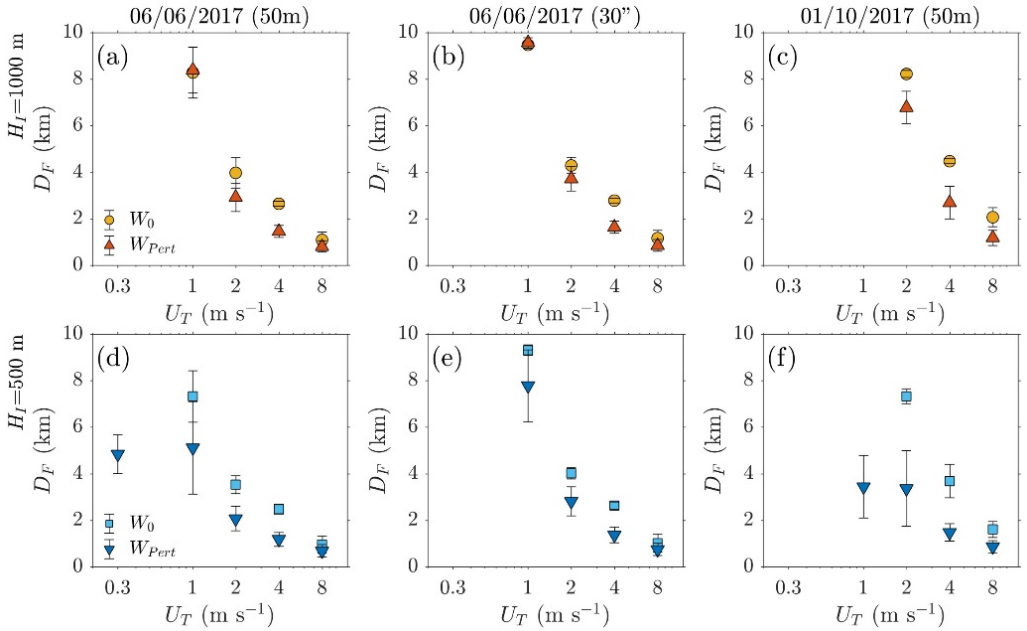


図 90　全粒子の落下地点の平均距離。(a), (d) 6 月事例（50m メッシュ DEM の場合）、(b), (e) 6 月事例（30 秒メッシュ DEM の場合）、(c), (f) 10 月事例（50m メッシュ DEM の場合）で、1 列目は注入高度H_I=1000 m、2 列目は 500 m とした結果。また、WRF の鉛直風速を使った場合とゼロとした場合について異なる印で示している。

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。

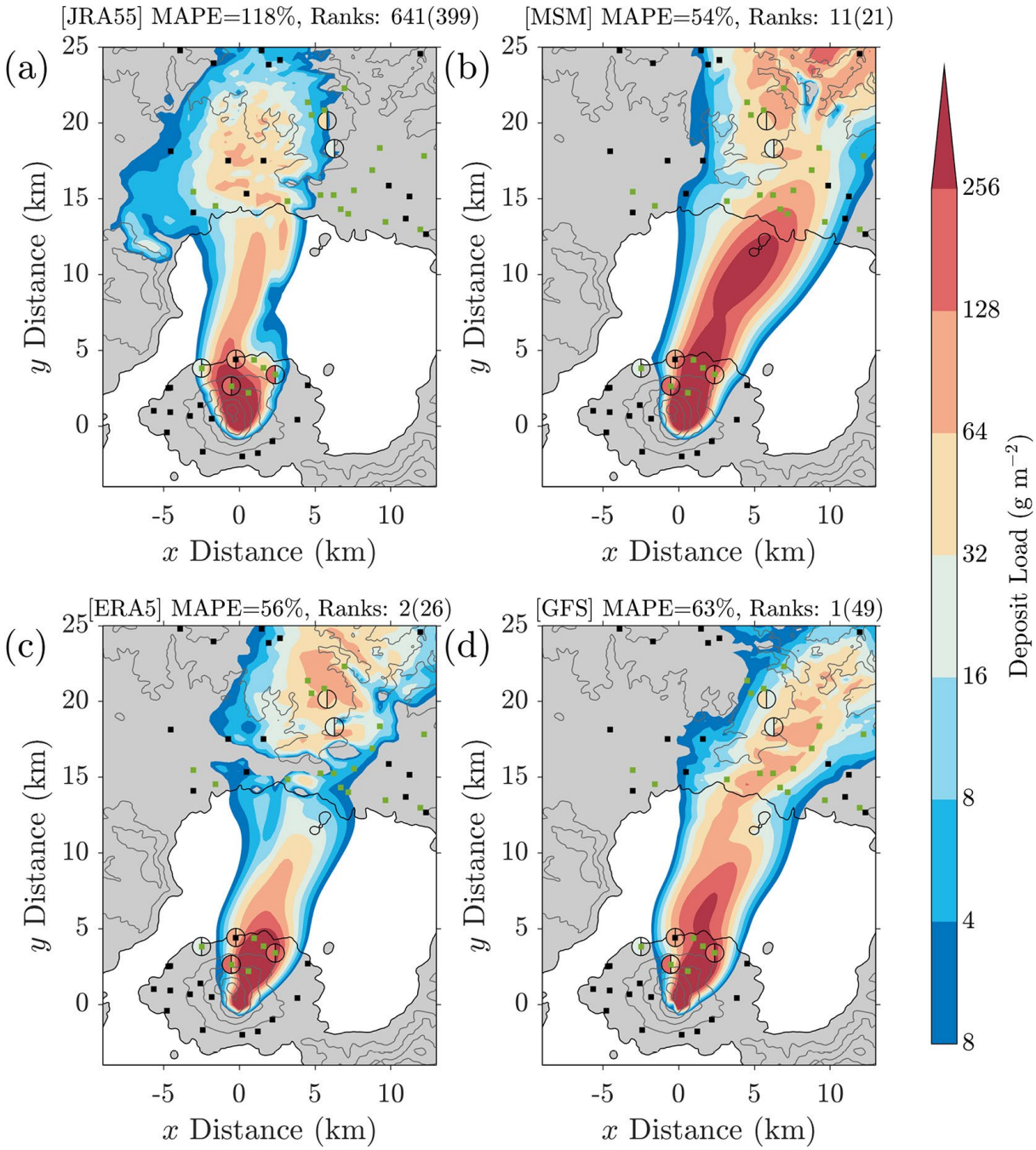


図 91　異なる気象モデルに基づく降下火山灰量の予測結果（Poulidis et al., 2021）[7]。単位面積当たりの降灰量をカラースケールで示した。(a) JRA55、(b) MSM、(c) ERA5 および (d) GFS 気象入力データ。 括弧内に各ケースのパラメータ（PBL スキーム、プルームモデル、TGSD、終端速度スキーム、および凝集）を示す。〇は火山灰サンプリングの位置で、〇の左側に観測量を右側に予測値をカラースケールで示した。□はディスドロメータと鹿児島地方気象台の聞き取り調査地点の場所で、緑と黒は降灰の有無を示す。

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

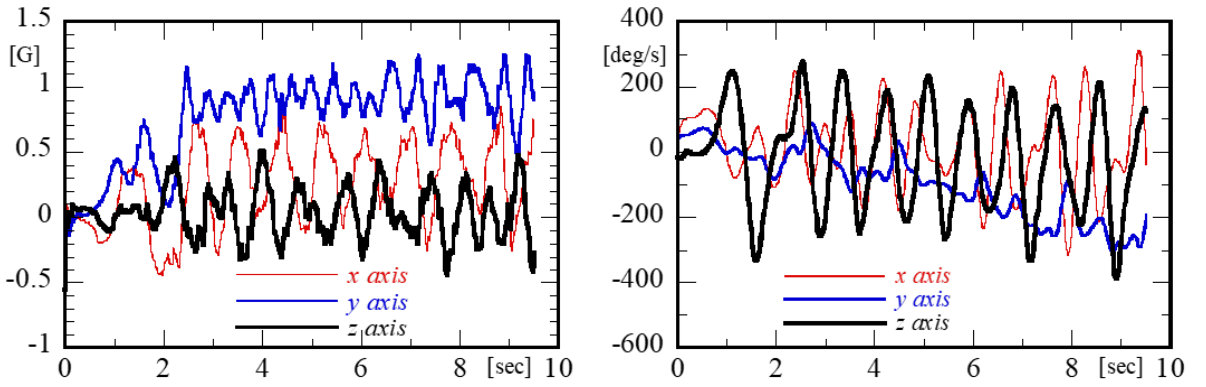
c）噴石の風力特性

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力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。



加速度　　角速度

図 92　センサーからの出力記録例

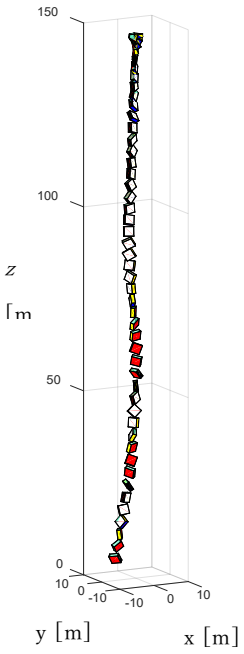


図 93
落下運動(Case A2)

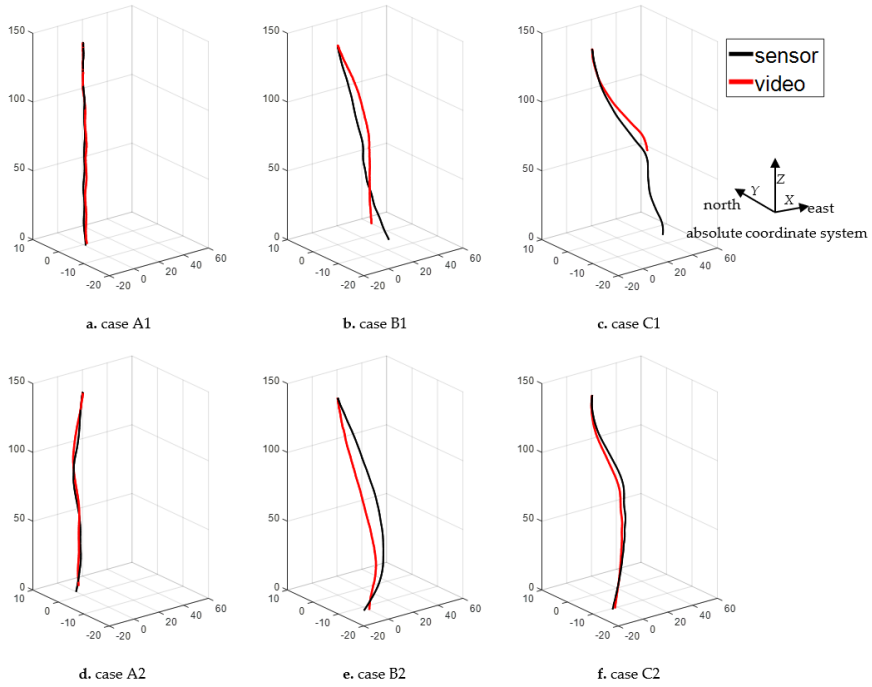
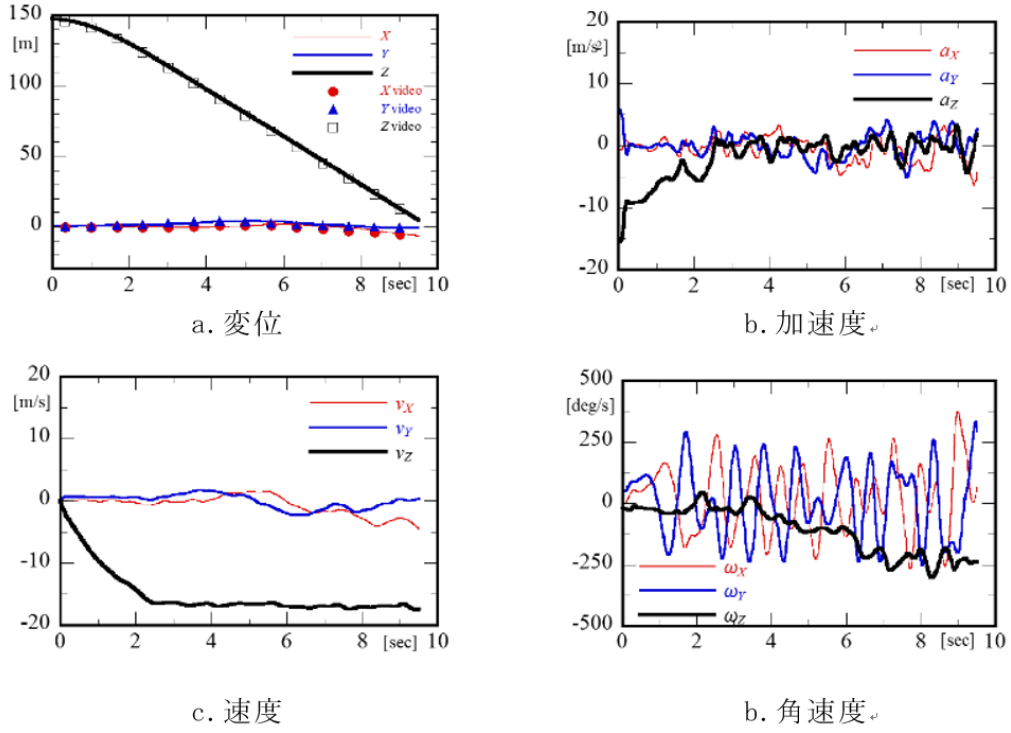


図 94　落下実験を行ったすべての落下軌道

ii）解析結果

図 92 に示した模型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。



a. 変位　　b. 加速度

c. 速度　　b. 角速度

図 95　落下運動の解析例

得られた結果から模型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。

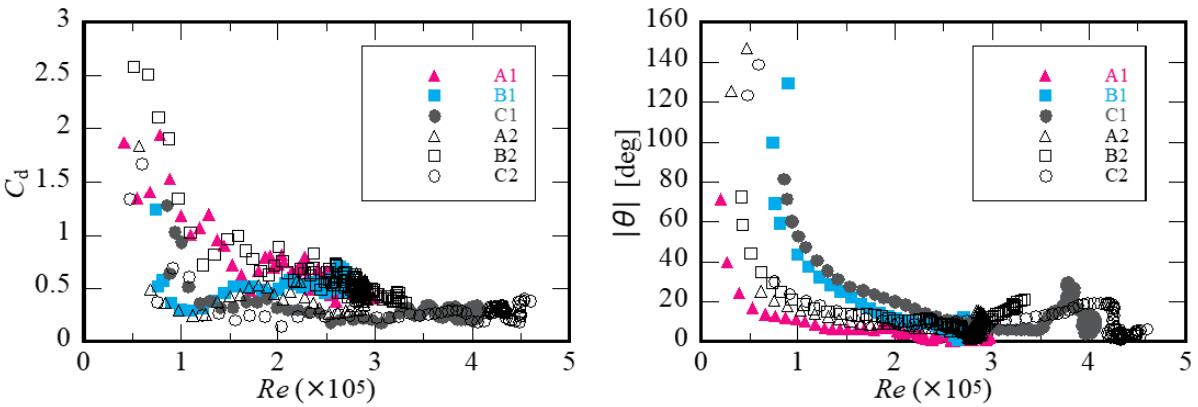


図 96　空力特性

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

これまでは、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性地震や火山構造性地震（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。

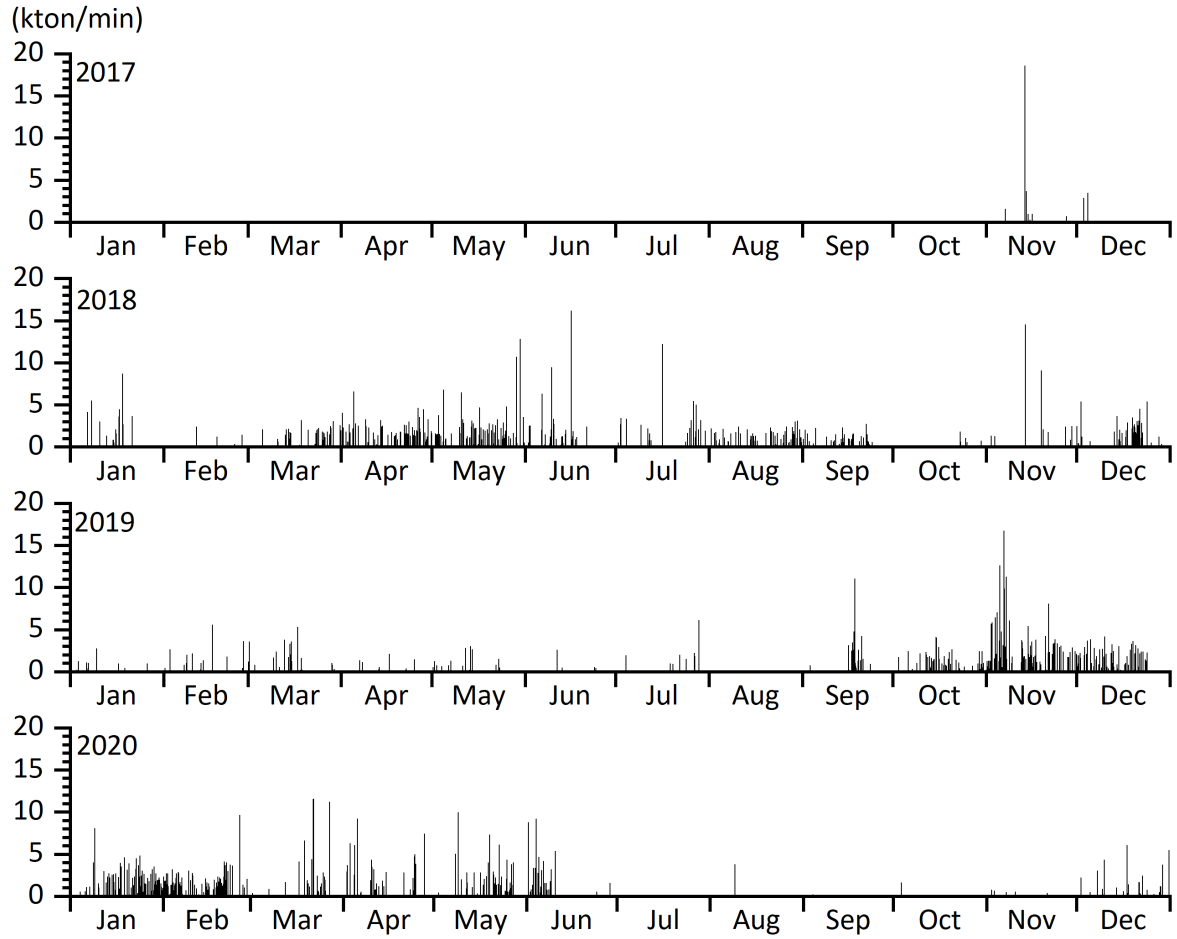


図 97　噴出率の時系列。1 分毎にプロットした。

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。海抜高度 1200m から 5400m までを 200m ごとに反射強度を抽出した。海抜高度 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。海抜高度 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。

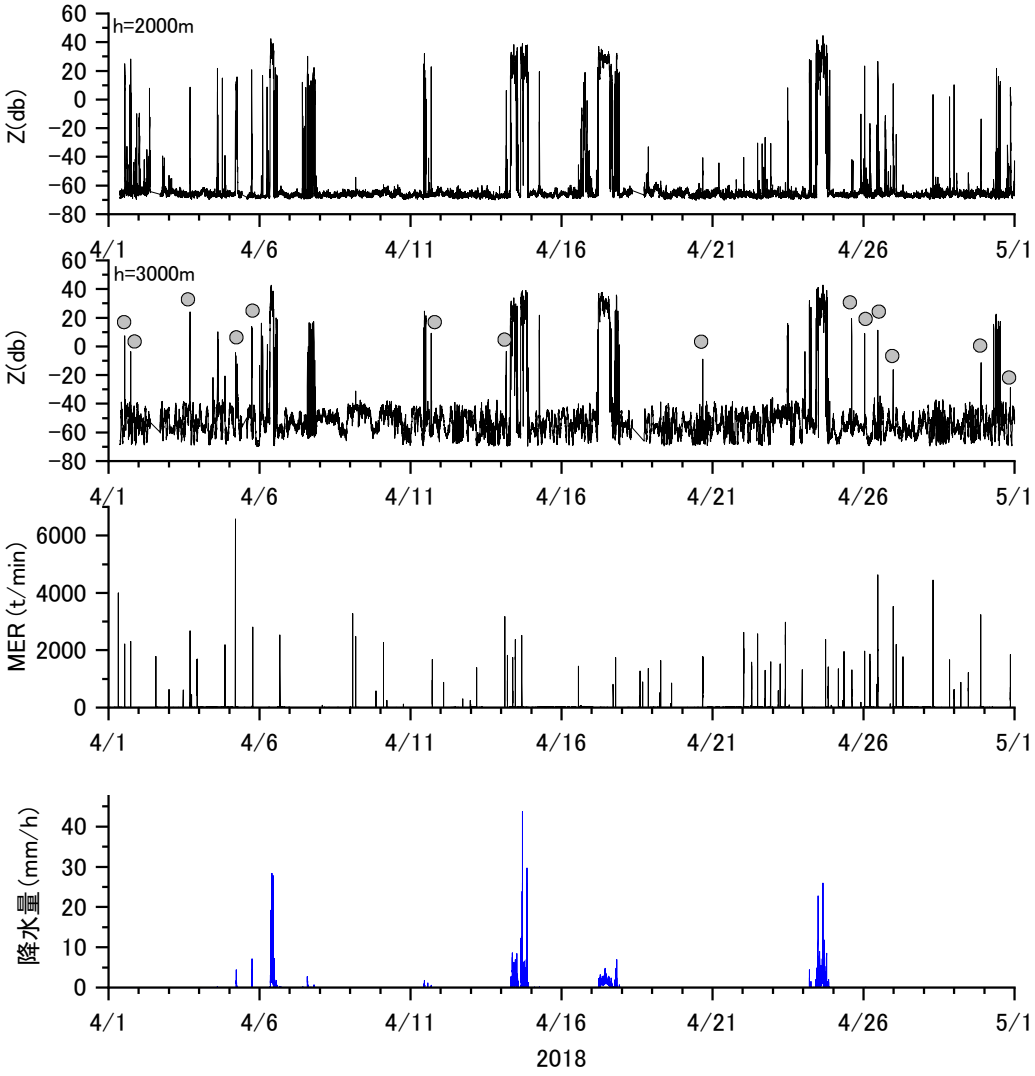


図 98　海抜高度 2000m および 3000m における反射強度の時間変化。3 段目は火山性微動振幅及び圧力源の体積変化から算出した火山灰噴出率。4 段目はディスドロメータにより観測した降水量（桜島火山観測所）を示す。

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。

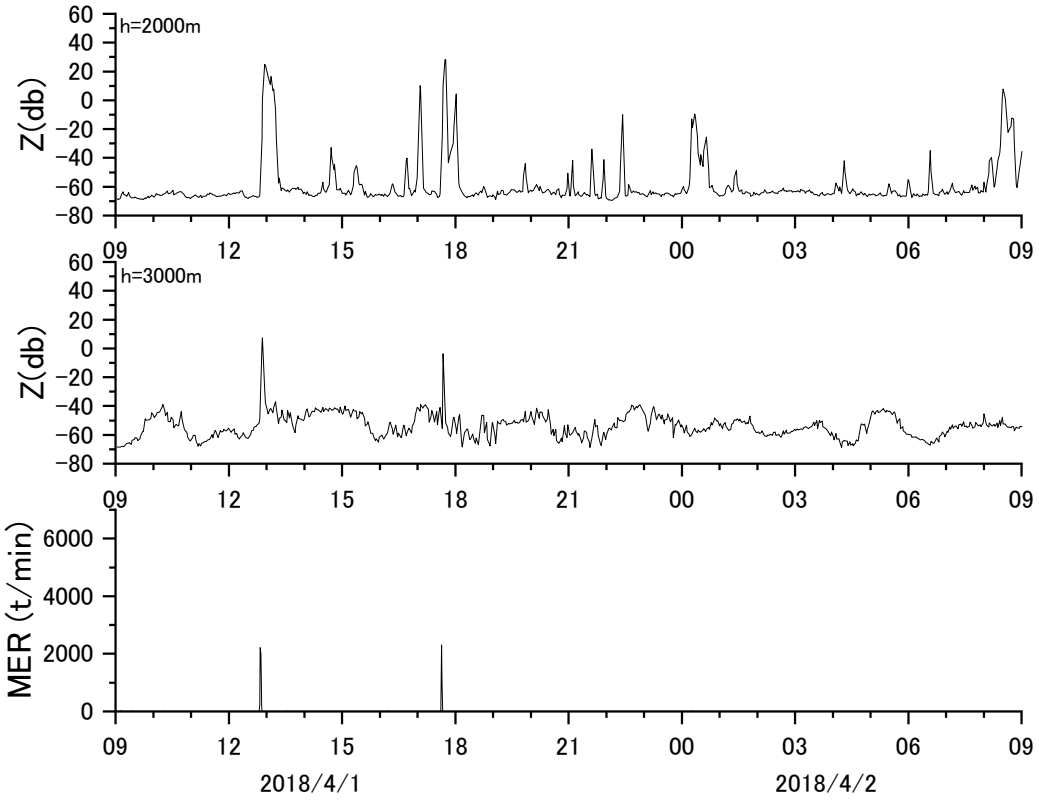


図 99　海抜高度 2000m および 3000m における反射強度の時間変化。3 段目は火山性微動振幅及び圧力源の体積変化から算出した火山灰噴出率。2018 年 4 月 1 日 9 時～翌日 9 時までの時系列を示す。

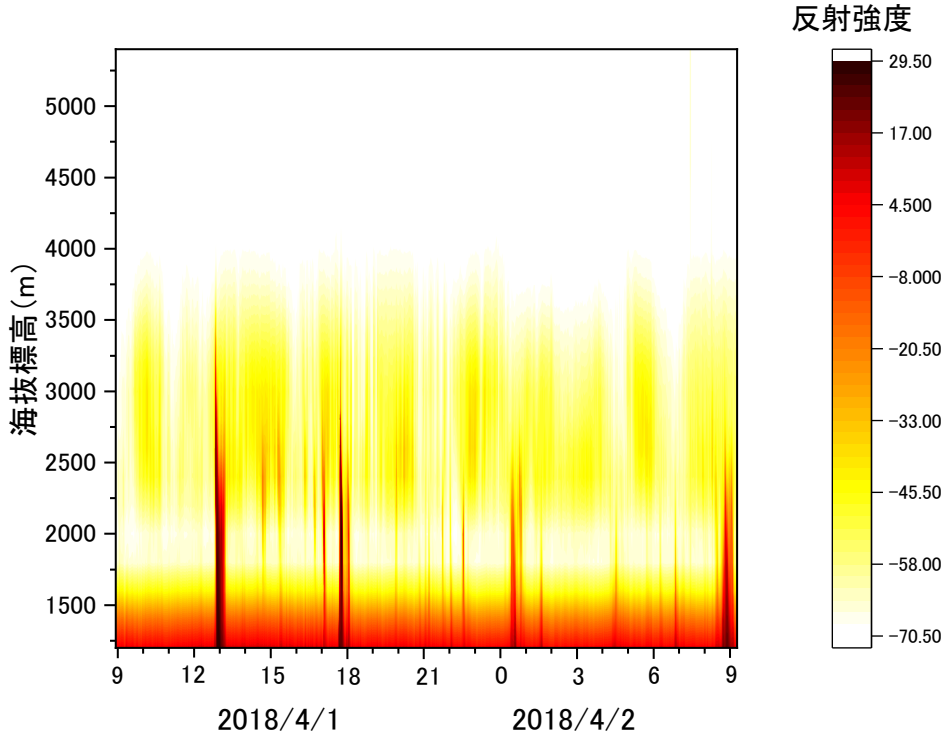


図 100　反射強度鉛直プロファイルの時間変化。2018 年 4 月 1 日 9 時～翌日 9 時まで。

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、噴煙高度が海抜 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。

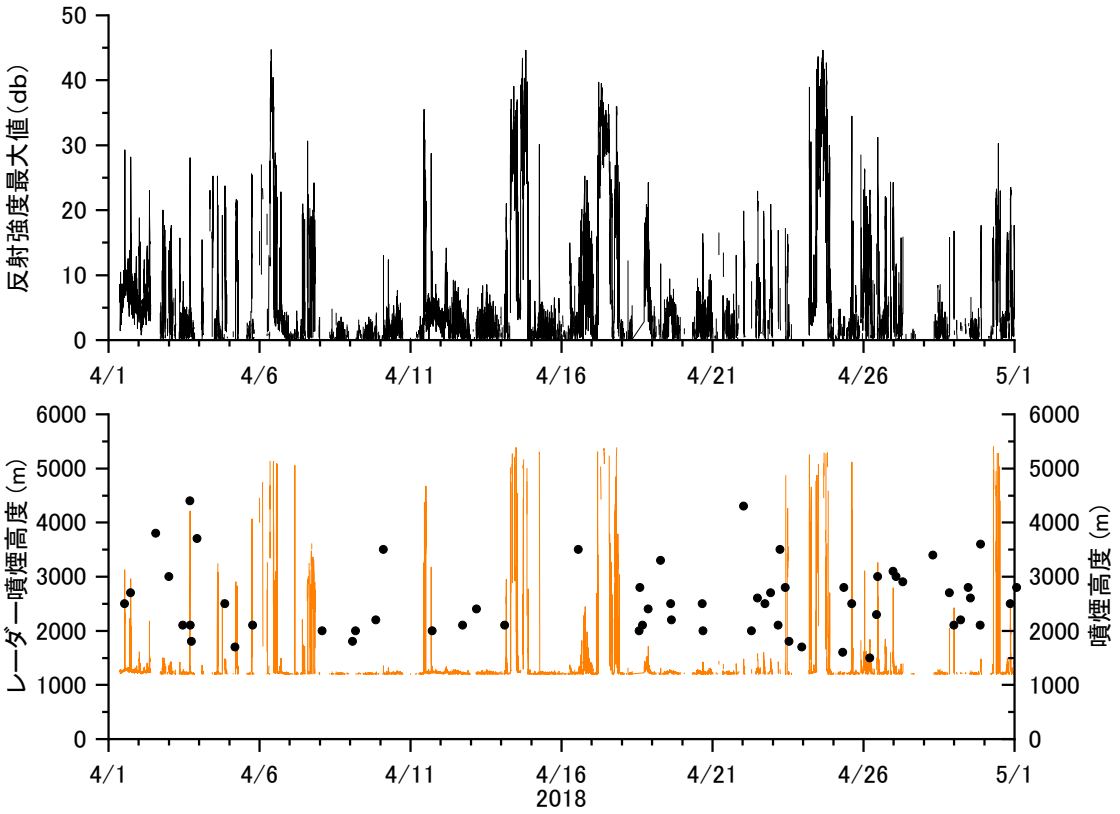


図 101　レーダー観測から求めた鉛直プロファイル上の反射強度の最大値とレーダー噴煙高度。●は鹿児島地方気象台による観測値。噴煙高度は海抜高度としてプロットした。

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。

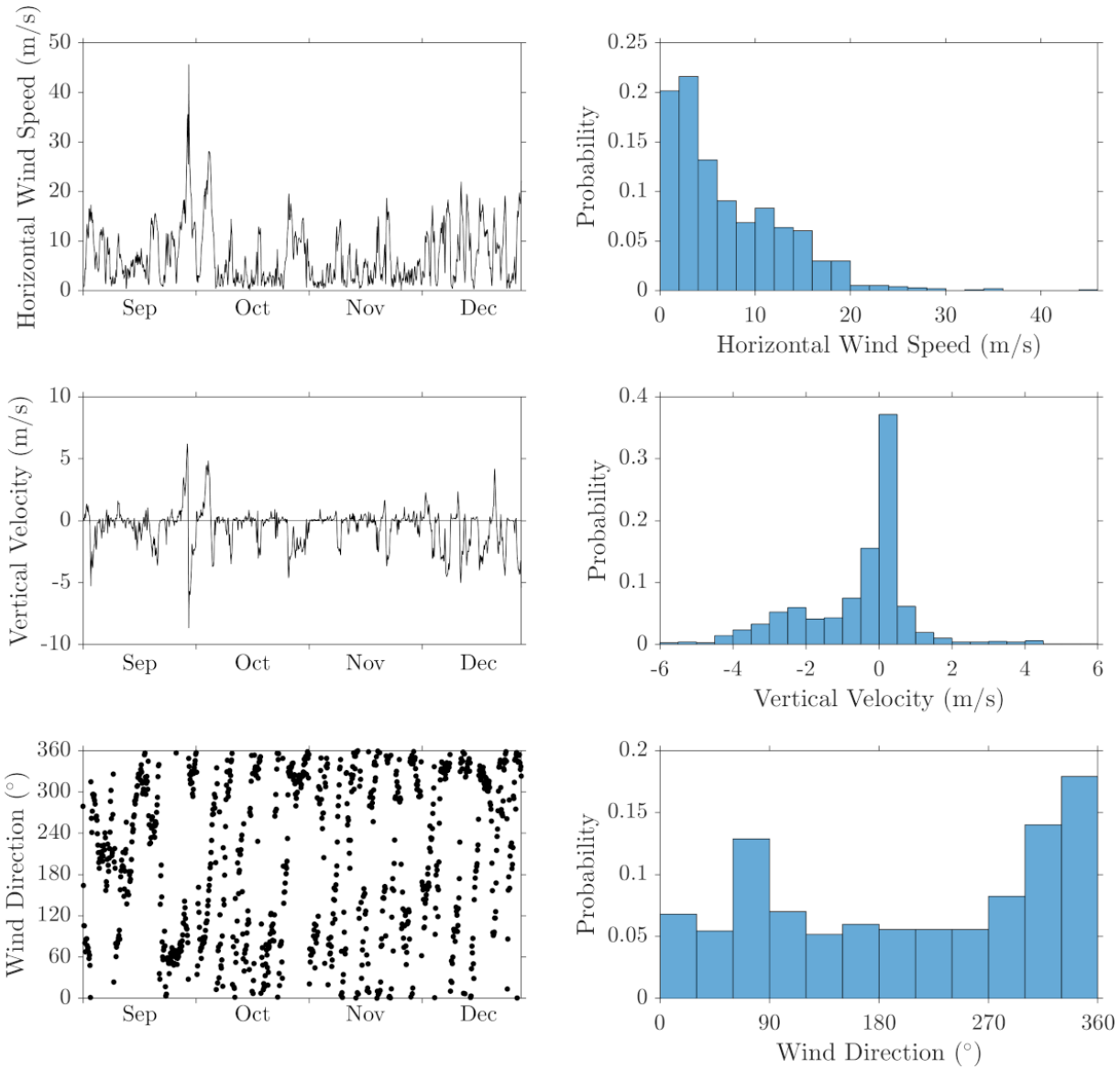


図 102　南岳の南東 0.5km、高度 1000m 付近における 2019 年 9 月～12 月の風速場。左列は上から水平風、鉛直風、風向である。右列はそれらの確率分布を示す。

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。

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

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

ディスド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)ディスド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ド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抜 2000m の高度においてみられる。海抜 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。

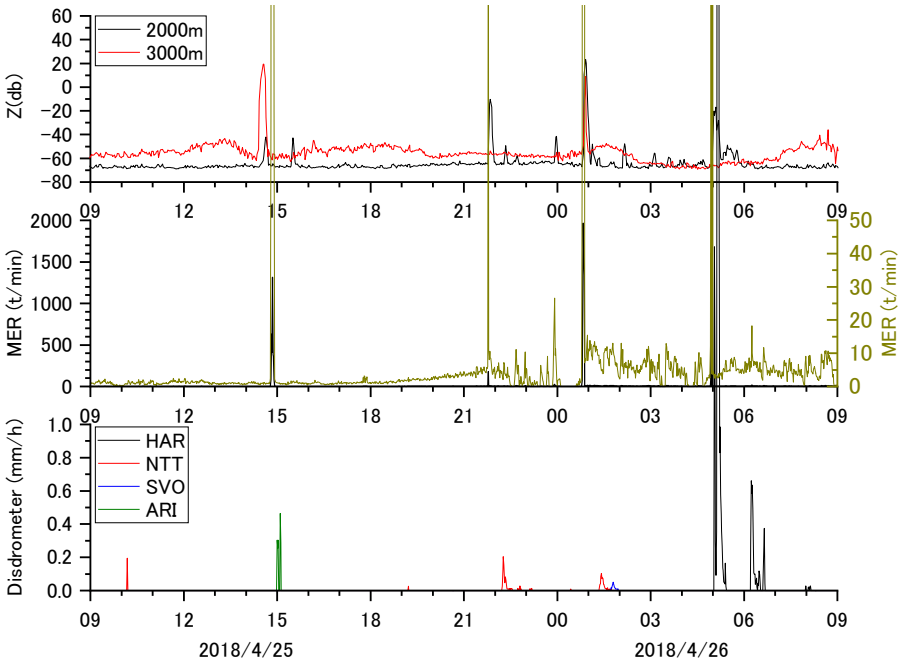


図 103　レーダーの反射強度（海抜高度 2000m および 3000m）、火山灰の噴出率、降灰量の関係。火山灰の噴出率については、拡大したスケールを右軸に示した。

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 SVO 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、ディスドロメータは、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、ディスド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段階に達するとともに、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ー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ド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 FALL３D 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., Nol. 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:10.5065/1dfh-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、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

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ド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、ディスド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。

ディスド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、ディスド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。

２．２　火山災害対策のための情報ツールの開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

課題Ｄ　火山災害対策技術の開発
サブテーマ３　火山災害対策のための情報ツールの開発

(b) 担当者

所属機関	役職	役職	氏名
国立研究開発法人　防災科学技術研究所　火山研究推進センター	課題責任機関	センター長	中田節也
		研究統括	宮城洋介
		研究員	棚田俊收
		客員研究員	宮村正光
		客員研究員	中村洋一
株式会社大林組　技術本部技術研究所	参加機関	上級主席技師	野畑有秀
		上級主席技師	大塚清敏
		主任研究員	諏訪仁
山梨県富士山科学研究所	参加機関	主幹研究員	吉本充宏
		主幹研究員	石峯康浩
		主任研究員	本多亮
		研究員	久保智弘
東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター	参加機関	特任教授	田中　淳

(c) 業務の目的

本業務では、火山災害に関わる自治体の防災担当者らが、災害発生時に適切な初動対応及び防災活動を行うことを支援するための「火山災害対策のための情報ツール（以下、「情報ツール」という。）」を開発することを目的とする。情報ツールとは火山災害対策のために必要となる情報を出力する各種コンテンツからなり、本業務ではこれらコンテンツの開発を中心に行う。開発するコンテンツは、専門家が自治体の防災担当者に対して情報を伝える際に使用されるコンテンツや、降灰による都市部の施設やインフラの被害を予測するコンテンツ等である。この情報ツールは、本事業の課題 A（各種観測データの一元化）で開発される一元化共有システムのデータベースに保存される他の課題及びサブテーマで得られる解析結果等の研究成果を活用し、火山防災協議会において火山専門家が地方自治体等へ助言する際にも利用される。開発に当たっては初期段階からユーザーである自治体や火山防災協議会に参加している火山専門家等と連携して取り組む。

(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：
・ 過去の火山災害及び降下火山灰に関する文献調査、情報収集を行った。
・ 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。
・ 自治体を対象とした火山対策の現状を調査した。
・ 都市部の施設に対する降灰影響評価実験の実験計画を作成した。

2) 平成 29 年度：
・ 過去の火山災害と降灰についての文献調査、情報収集結果の整理と分析を行った。
・ 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。
・ 自治体を対象とした火山対策の現状調査と結果の比較・分析を行った。
・ 都市部の施設に対する降灰影響評価実験を行った。
・ 登山者動向把握実験へ参加した。

3) 平成 30 年度：
・ 周知啓発教育用コンテンツの基盤となる火山災害に関する調査や情報収集を行った。
・ 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。
・ 自治体を対象とした火山対策の比較・分析を行った。
・ 都市部の施設に対する降灰影響評価実験として、冷却塔を対象とする降灰実験を行った。
・ 平成 29、30 年度に実施された降灰影響評価実験の結果を受け、都市部の施設における建築設備の損傷度評価法の開発に着手した。

・ 登山者動向把握実験へ参加し、得られた登山者動態データの火山防災対策への利用に関して検討した。

4）平成 31 年度：
・ 常時観測火山 5 火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。
・ 周知啓発教育用コンテンツの試作版として火山防災ポータルサイトを開設した。
・ 前年度までに実施した降灰影響評価実験結果の妥当性を確認し、降灰被害予測コンテンツの試作版を開発した。
・ 降灰量に対する木造建築物の屋根の安全性について評価した。
・ 文献調査を行い、火山現象が社会活動に及ぼす影響を整理した。
・ 避難・救助支援コンテンツの試作版（登山者動態データの可視化ツール）を開発した。
・ 登山者動向把握実験に参加し、避難・救助支援コンテンツ試作版のインプットデータを取得し、本コンテンツ試作版の活用について検討した。
・ 国内外の学会におけるブース展示、論文で研究成果を特集、プロジェクトの紹介動画とパンフレット・リーフレット（英語版）を作成、英語版の紹介用ホームページを開設するなど、次世代火山研究推進事業の周知広報活動を行った。

5）令和 2 年度：
・ 周知啓発教育用コンテンツの試作版について、前年度開発した試作版について自治体防災担当者にヒアリングやアンケート調査を行い、課題を把握するとともに、新たなニーズを把握し、その結果を基に高度化を実施した。
・ 降灰被害予測コンテンツの試作版の高度化に関し、都市部の施設に対する降灰影響評価のため、エアフィルタを対象とする降灰実験を行った。
・ 降灰被害予測コンテンツの試作版について、防災担当者を対象とした火山灰対策の勉強会を行い、降灰対策に必要な情報の把握と降灰被害予測コンテンツへのニーズを把握した。
・ 避難・救助支援コンテンツの試作版の高度化に関して、那須岳における登山者の動向把握を行い、可視化した動態データを周辺自治体の防災担当者らと共有した。
・ 避難・救助支援において重要となる避難施設の耐衝撃性について、既存の建物への耐衝撃性を向上させるための実験を行い、補強方法の提案に資する結果を得た。

6）令和 3 年度：
・ 周知啓発教育用コンテンツを利用したアウトリーチ活動等を踏まえ、動画学習コンテンツを充実させるなどコンテンツの高度化を図り、防災担当者が避難確保計画策定に活用できるように整備する。
・ ３コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、前年度の調査データを詳細に分析するとともに、ヒアリングおよび研究者を集めた研究会等を実施する。

・ 降灰被害予測コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、コンテンツの高度化を図る。これまで実験結果をまとめ、建物機能被害の損傷曲線の提案し、都市部への降灰被害予測コンテンツを改善する。
・ 避難・救助支援コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、コンテンツの高度化を図る。これまでに開発した可視化ツールの改修を行う。
・ 退避壕等の耐衝撃実験を実施し、建物の耐衝撃性能の補強方法について検討を行う。

7）令和 4 年度：
・ 周知啓発教育用コンテンツを利用したアウトリーチ活動等を踏まえ、コンテンツの高度化を図る。
・ 降灰被害予測コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、コンテンツの高度化を図る。
・ 避難・救助支援コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、コンテンツの高度化を図る。

8）令和 5 年度：
・ 各種コンテンツの汎用化に着手する。

9）令和 6 年度：
・ 各種コンテンツの汎用化を進める。

10）令和 7 年度：
・ 周知啓発教育用コンテンツの社会実装として、テキストを作成する。
・ 降灰被害予測コンテンツの社会実装として、自治体に対するアクションプランを提案する。
・ 避難・救助支援コンテンツの社会実装として、自治体の避難計画への反映を行う。

(e) 令和２年度業務目的

1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

前年度までに開発した周知啓発教育用コンテンツ試作版を高度化する。現試作版は自治体防災担当者を対象としたヒアリング調査やアンケート調査から得られたニーズや課題に対応するべく開発されたが、今年度は実際に試作版を試用した上での潜在的なニーズや課題に対応するべく開発を進め、高度化を図る。具体的には、試作版として開発したポータルサイトに含まれる情報コンテンツや機能をニーズに応じて増やす。また本コンテンツでアクセスが可能な自治体防災担当者向けの研修プログラムについてパッケージ化し、実際にそのプログラムを使った研修を実施する。

2) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

前年度までに開発した降灰被害予測コンテンツ試作版を高度化する。現試作版は平成29年度及び平成30年度に実施した建築設備を対象とした降灰影響評価実験の成果を基に、降灰による建築物の損傷・被害に関する降灰深の閾値を設定し地図上で他の情報と重ねて表示できるようにしたものだが、今年度はさらに建物に対する影響を評価するうえで重要となる換気用エアフィルタを対象にした降灰影響評価実験を実施する。

また、本コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、一般住民（登山者など）を対象として、ネットを利用した大規模降灰に関するアンケート調査を実施する。

3) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

前年度までに開発した避難・救助支援コンテンツ試作版を高度化する。現試作版は平成29、30年度及び令和元年度に実施された富士山及び御嶽山における登山者動向把握実験で得られた登山者の動態データを地図上で可視化しハザードシミュレーションの結果と組み合わせることで人的被害推定を行えるものであった。今年度は栃木県那須岳において同様のシステムを利用した登山者動向把握実験を実施する。得られた登山者の動態データを本コンテンツ試作版で可視化し、那須岳周辺自治体の防災担当者らに試用してもらい、データの防災利用について検討を進め、検討結果を開発に反映させることでコンテンツの高度化を図る。

さらに、避難計画の作成や避難・救助活動において重要な施設である退避壕（シェルター）等の耐久性を評価することを目的として、模擬火山岩塊を使用した衝突実験をまずは試験実験から実施する。

(2)令和２年度の成果

(a) 業務の要約

このサブテーマ課題では、３つのコンテンツからなる情報ツールの開発を行った。①「周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化」においては、自治体防災担当者を対象としたヒアリング調査やアンケート調査から得られたニーズや課題に対応するべく試作版を試用した上での潜在的なニーズや課題に対応するべく開発を進め、高度化を図った。②「降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化」においては、建物に対する影響を評価するうえで重要となる換気用エアフィルタを対象にした降灰影響評価実験と、大規模降灰による建築屋根への降灰影響評価を行った。加えて、パソコンへの降灰影響評価実験を実施した。また、情報発信の在り方を検討するために、一般住民（登山者など）を対象として、ネットを利用した大規模降灰に関するアンケート調査を実施した。③「避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化」については、那須岳において登山者動向把握実験を実施し、可視化した動態データを周辺自治体の防災担当者らと共有した。また、登山者のための退避壕等の耐久性を評価するために、模擬火山岩塊を使用した衝突実験を実施した。今年度情報ツールを利用（※試行を含む）した自治体を表１に示す。

表１　情報ツールを利用（試行を含む）した自治体

自治体名	コンテンツ	対象火山	備考
山梨県	周知啓発教育用コンテンツ	富士山	試行
函館市	周知啓発教育用コンテンツ	北海道駒ケ岳	試行
鹿部町	周知啓発教育用コンテンツ	北海道駒ケ岳	試行
七飯町	周知啓発教育用コンテンツ	北海道駒ケ岳	試行
森町	周知啓発教育用コンテンツ	北海道駒ケ岳	試行
伊達市	周知啓発教育用コンテンツ	有珠山	試行
壮瞥町	周知啓発教育用コンテンツ	有珠山	試行
那須町	周知啓発教育用コンテンツ	那須岳	試行
北海道	周知啓発教育用コンテンツ	道内火山	試行
岐阜県	周知啓発教育用コンテンツ	県内火山	試行
神奈川県	周知啓発教育用コンテンツ	県内火山	試行
群馬県	周知啓発教育用コンテンツ	県内火山	試行
富山県	周知啓発教育用コンテンツ	県内火山	試行
大分県	周知啓発教育用コンテンツ	県内火山	試行

(b) 業務の成果

1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

a) 周知啓発教育コンテンツ

前年度開発した周知啓発教育用コンテンツ試作版について、高度化を行うために北海道駒ケ岳周辺の自治体(森町、鹿部町、七飯町、函館市)、有珠山周辺の自治体(伊達市、壮瞥町)、及び栃木県那須岳周辺の自治体（那須町）の防災担当者に周知啓発教育用コンテンツ試作版を使用してもらい、利便性や防災担当者自身が火山防災を学ぶ際や住民に周知するために必要なコンテンツ、昨年度作成したテキストのニーズ、防災担当者用イベントカレンダー、観測情報へのニーズについてアンケート調査及びヒアリング調査を行った(写真１)。



写真１　2020 年 10 月に実施したヒアリングの様子(左：北海道駒ケ岳周辺、右：壮瞥町)

それぞれのヒアリング項目から得られた結果を以下に示す。

周知啓発用コンテンツについて

- ✓ 自分の火山から探すので、情報も火山ごとに整理してほしい。
- ✓ 災害の体験談も火山ごとにわかるとよい。
- ✓ 火山ごとの年表の情報(噴火史など)があるとよい。
- ✓ 避難確保計画の策定にあたり、似たような火山を探して、そこの計画をまねたりする。そのため、火山の特徴を火山との距離や都市構造などを基にグルーピングした情報があるとよい。
- ✓ 降灰が起こると住んでいる街がどうなるか伝えるためのコンテンツが欲しい。例えば 2011 年新燃岳噴火で長井雅史氏が撮影した動画や AR/VR を活用したものなど。
- ✓ 住民に火山の危険を伝えるための効果的なシミュレーション動画のような資料が欲しい。例えば、津波であれば、浸水シミュレーションの動画があるように火山でもあるとよい。火山灰が広がる様子の動画があるとよい。
- ✓ 検索した結果で、画像と資料の違いがわからない(同じものを掲載しているのであれば、どちらかでいいのでは)。
- ✓ 火山の啓発動画や各地域の動画素材などがあるとよい。→動画を充実してほしい。
- ✓ 鹿児島市の YouTube チャンネルが参考になった。
- ✓ 法律については、活火山法があってそこから避難確保計画のように階層化して表示してほしい。
- ✓ 画像を小さくしてもいいからリンクがわかりやすいようにしてほしい。

- ✓ 各協議会で避難確保計画について話し合っていると思うが、そこでどういった話になったかの概要がわかるとよい。
- ✓ 用語集があるといい
- ✓ スマホやタブレットでも利用できるとよい。

テキストについて

- ✓ 動画でのレクチャーがあるとよい。時間は長くても 30 分くらい、可能であれば 15～20 分程度。机の上で座りながら見て学ぶことができる。
- ✓ 専門家のおすすめテキストや資料などは難しい。用語集や見て学べるビデオ学習のようなコンテンツが良い。
- ✓ 大きい噴石と小さい噴石のサイズの違いについてはわからない。
- ✓ 火山ごとに起こりうる現象が整理されているとよい。また、火山ごとのまとめサイトのようになっているとよい。
- ✓ 火山性地震と火山性微動の違いが判らないので、そういったことも学べるサイトがいい。また、火山性微動のほうが危険なことがわかるがそういったことが一連の動画のような形でわかる資料が欲しい。
- ✓ 火山ごとに火口と都市、宿泊施設、医療施設、介護施設などの距離について、グルーピングされている情報があるとよい。また、そのグループごとの市町村の地域防災計画などもあるとよい。
- ✓ 内容は中学 2 年生くらいでわかるものにしてほしい。
- ✓ 火山灰が降るとどうなるかの情報があまりないので、欲しい。
- ✓ 各現象について、説明だけとイメージだけに分けてもよい。イメージ・動画を充実させてほしい。
- ✓ 現在 PPT ファイルが分割されているが、一括でダウンロードしたい。PPT ファイルについては、住民向け講座で使用したい。
- ✓ 桜島で行った訓練や HUG についても情報があるとよい。

防災担当者用イベントカレンダーについて

- ✓ ぜひ使ってみたい。
- ✓ Q&A のようなサイトがあるとよい。例えば、防災担当者同士でわからないことや不明なことを掲示板に書くとその回答がほかの担当者や専門家から回答がもらえるもので、関係者のみが閲覧するサイト。防災担当者間での交流サイトのようなもの
- ✓ アクセスができない。EDGE のためタイムアウトしてしまう。
- ✓ 利用方法がスマホの場合が多いため、スマホでも利用できるとよい。

観測情報について

- ✓ カメラ情報があるとよい。北海道整備局のものは更新やメンテをしてもらえないので、使えなくなっているので、カメラ情報があるとよい。
- ✓ 地震波形や地殻変動などはわからない。日々の地震の回数などの情報が良い。
- ✓ 火山防災情報表示システム(大島・他、2017)は火山カメラや波形が写らなくなったので、気象情報のみ表示している。
- ✓ 協議会 WEB は見ない。気象台からくる定期情報のみ。

これらヒアリングから得られた結果を整理し、各項目について以下のニーズと課題を把握することができた。

周知啓発用コンテンツについて

- ✓ 情報を山毎に整理する。
- ✓ 避難確保計画を支援するために、火山の特徴を火山との距離や都市構造などを基にグルーピングした情報を作成。
- ✓ 降灰をイメージさせる AR/VR のようなコンテンツや動画コンテンツの充実が必要。
- ✓ 情報の階層化をきちんとする(特に法律など)。

テキストについて

- ✓ レクチャー動画(15 分程度のもの)
- ✓ 火山ごとに起こりうる現象を整理したもの。
- ✓ 他火山で行っている訓練についての具体的な情報。
- ✓ 内容は中学 2 年生くらいが理解できるもの。

防災担当者用イベントカレンダーについて

- ✓ ブラウザーや端末によらず利用できるようにする。
- ✓ Q&A サイトのように困っていることと回答が共有できるサイトがほしい。

観測情報について

- ✓ カメラ情報を重要視している。
- ✓ 地震の回数や増えている事、減っていることが一目でわかるもの。

これらヒアリングの結果を受けて、周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化を行った。高度化への改修では、火山ごとに容易にアクセスできるようにトップページの改修と動画コンテンツの充実を図った(図１，２)。防砂担当者用イベントカレンダーについてもブラウザーによらずスマホでも利用できるようにした。観測情報については、Python により定期的に気象庁の火山カメラ映像を取得するスクリプトを作成し、現在富士山研の内部で試験運用し、最新 2 時間のカメラ映像を動画にして、閲覧できるようにした(図３)。



図１　周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化のために改修したページ(左)と火山防災を学ぶための動画コンテンツ(右)

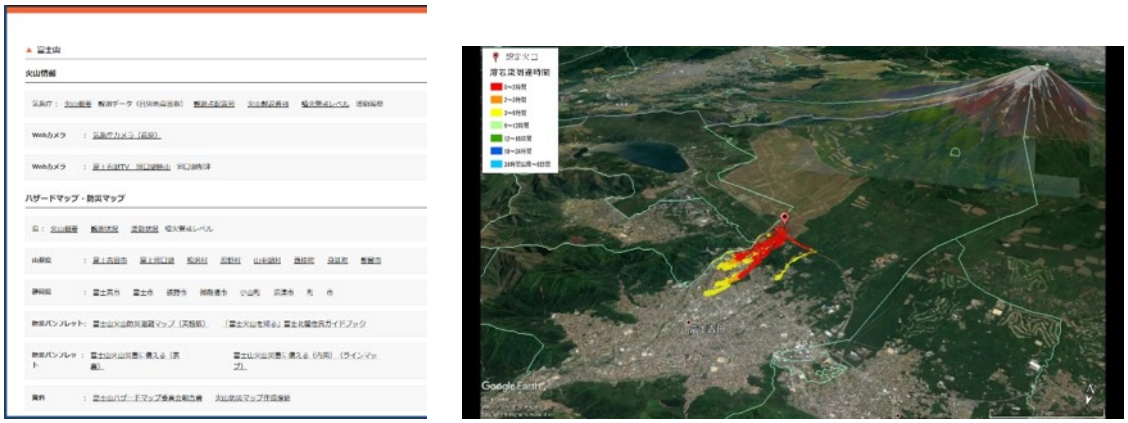


図２　周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化のために火山ごとに情報を整理した例(左)。2020 年 3 月に公表された富士山噴火による小規模溶岩流のシミュレーション動画(右)。



図３　Python で作成した気象庁の火山カメラの情報を利用した閲覧ページ

さらに今年度は火山研究人材育成コンソーシアム構築事業とも連携し、2020 年 10 月 20 日に実施された火山防災特別セミナーに参加し、6 道県（北海道、岐阜県、神奈川県、岐阜県、富山県、大分県）の防災担当者を対象に演習を行い、本研究課題で昨年作成したテキスト課題を把握した。演習では、都道府県の防災担当者が担当する火山で突発的な噴火が発生し、その際に知事へ現状などのレクを A4 紙 5 枚程度で行うことを想定し、約 20 分程度の中での資料作成を通じて必要な情報がそろっているか、どういった情報がさらに必要かといった点を主に検討した(写真２)。




写真２　テキストを活用した演習の様子

演習実施後、アンケートを実施し、参加した都道府県の防災担当者７名からの結果を以下の図４、５に示す。

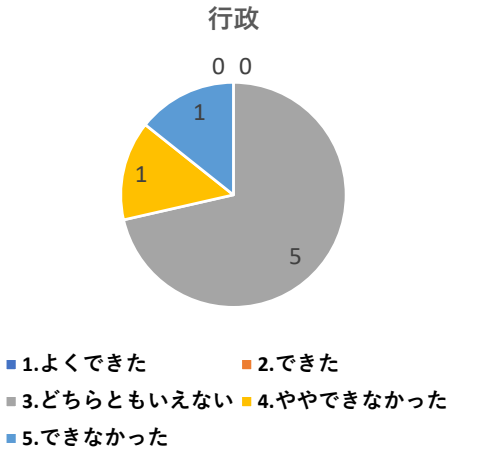


図４　テキストを活用して時間内に知事レク資料の準備ができたか？

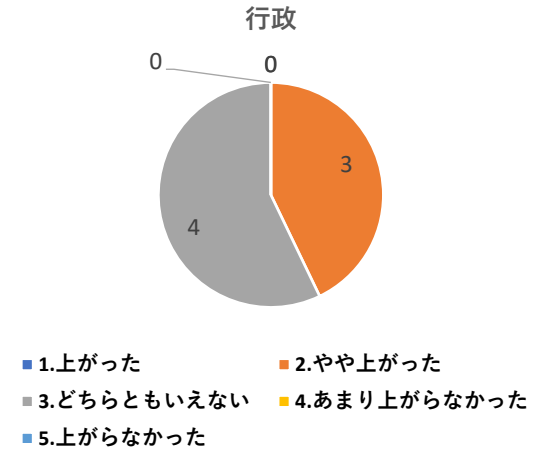


図５　演習前に比べて災害時対応（知事レク資料作成）に関する理解度が上がったか？

図４、５から、今回行った演習では知事レクを行うために想定などが十分ではなかったことを確認した。また、今回の演習で使用したテキストについて、不足している点確認したところ、以下のコメントをもらった。

✓　担当者用の資料としては、非常に有意義であると思う。知事プレゼン用としては、あまりに抽象的すぎるので、不足している点は、水蒸気噴火。

- ✓ 各機関により、必要な資料の作り方に違いがある。そのため、アレンジしやすい、素材的な利用がし易いものだと活用しやすいと思いました。
- ✓ 知事に渡す資料としては、もっと要点を絞った単的な資料が求められるので、そうしたものがあると、そのまま使いやすい。（今回の資料は手持ちに良いが、そのままでは出しづらい）。
- ✓ 資料が整いすぎているかもしれない。実際には情報が断片的にしか伝わってこないと思う。
- ✓ 知事レク資料ではなく、勉強のための資料としては参考になると思います。
- ✓ 降灰など現象ごとの住民等への注意などの呼びかけ例があると、とても役立つと思います。

今回の演習から、作成したテキストは当初自らで火山防災を学ぶことを中心としていたが、もう少しブラッシュアップすることで、災害対応において知事や上司への説明する際の資料として利用できる可能性があることが確認できた。

また、今後の演習に関する要望についても伺い、以下の回答が得られた。

- ✓ 住民用を想定して同じような演習を実施してほしい。
- ✓ 災害対策本部会議用の資料作成。
- ✓ 適切に情報伝達する注意点など。時間があれば図上訓練。
- ✓ 今回の演習は非常に参考になった。想定を詳細にすれば、市町村の火山担当へのワーキングなどにも活用できると思った。ぜひブラッシュアップして、各都道府県にも提供してほしい。
- ✓ 「こんな資料があったらいいな」を持ちよる。

これらの回答から、図上訓練や災害発生時に必要となる対応を具体的にした訓練などを要望していることが分かった。今後このような訓練が実施できるようなコンテンツも用意していく必要があると考えられる。

さらに自治体防災担当者の研修パッケージ化については、2021 年 1 月 21 日に「ドリルマップに基づく具体的な防災対応検討」として、新型コロナウィルス感染防止対策をとり、図上訓練を実施した。この図上訓練では、今後訓練を実施するうえでは、新型コロナウィルス感染防止対策が重要となることから、新型コロナウィルス感染防止策を考慮して 70 名程度入れる会場に市町村担当者のテーブルを適切な距離だけ離し、さらに各市町の状況が県のテーブルで閲覧できるように Zoom と iPad などの ICT 技術を活用して、実施した。また、こういった火山防災協議会単位の訓練では火山専門家も通常は参加するが、新型コロナウィルス感染防止のため、東京の専門家などの現地での参加が難しいことから、専門家とも Zoom を使い、状況を確認できる環境を用意して実施した。



写真３　新型コロナウィルス感染防止を講じた図上訓練について。（左上：市町村のテーブル、右上：県のテーブル、左下：専門家との接続、右下：県のテーブルでの市町村の様子）

今回の訓練では、Zoom のアカウントを２つ使用し、一つでは専門家と会場を自由に撮影して配信できるように iPad を活用して、専門家からの要望に応じながら各テーブルの状況などを撮影できるようにした。もう一つのアカウントでは、市町村と県とを実際の際外対応のように Zoom で接続して使用した。各市町のテーブルにはスタンドに設置した iPad により各市町のテーブルの様子を撮影し、県にはノート PC を置くことで、各市町の状況も把握できるようにした。今回は広いホールで実施したが、この方法であれば、離れた複数の会議室を使った訓練も実施することができ、三密を回避するとともにより実際の災害対応に近い形での訓練とすることができる。このように、これまで６回実施してきた内容を基に今年度研修パッケージを作成した。今後作成したパッケージを周知啓発用コンテンツにアップするとともにブラッシュアップしていく必要がある。

b）常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化

前年度までに引き続き、国内常時観測火山の内５火山（アトサヌプリ、雌阿寒岳、十和田、日光白根山、弥陀ヶ原）のハザードマップをデジタル化（GIS 版のハザードマップを作成）し、GIS ソフトで閲覧や空間解析が可能となった（図６）。

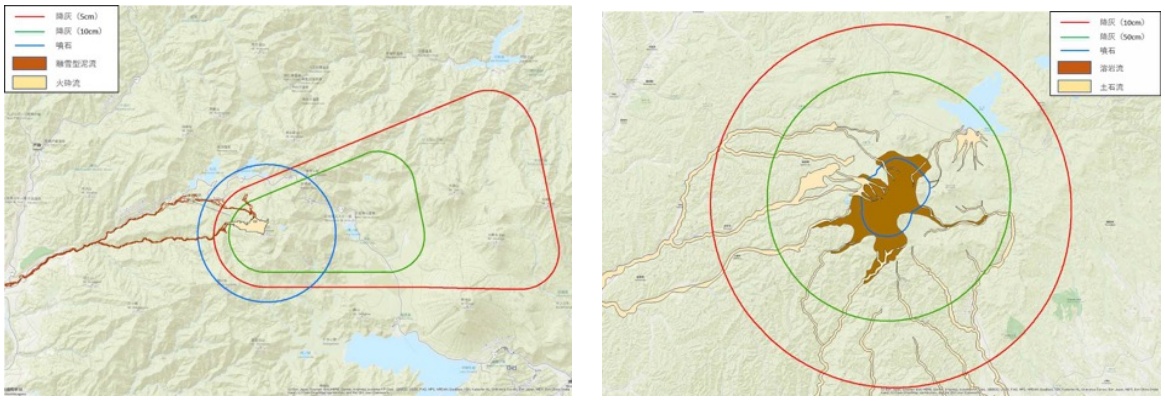


図６　デジタル化した雌阿寒岳（左）及び日光白根山（右）の GIS 版ハザードマップ。

GIS 版ハザードマップデータは、他の社会基盤情報（交通インフラや建物、行政区域他）と重ね合わせることで、簡易的な曝露評価及び被害評価を行うことができる。本事業ではこれまで国内 40 火山における GIS 版ハザードマップを作成しており、全国の常時観測火山における網羅的な曝露評価が可能となった（河野・他、2020）。

また、2021 年 1 月 27 日付けで内閣府防災担当から全国の火山防災協議会事務局に向けて、火山ハザードマップのオープンデータ化を依頼する事務連絡が発出された。これに伴い、GIS 版ハザードマップに関する問い合わせが 2 件あり、その内東京都に対して三宅島及び伊豆大島の GIS 版ハザードマップデータの一部を提供した。

2)降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

a) エアフィルタの降灰影響実験

本年度は、エアフィルタの降灰実験を行い、降灰深に対するフィルタの損傷の確認を行った。

i)実験の目的と実験装置

建物屋内環境の維持には、空調と合わせて換気が重要である。外気が建物内に直接取り入れられるため、降灰時には火山灰の室内への侵入が起こりうる。換気吸気口にはエアフィルタが設けられることが多く、火山灰の捕集によるフィルタの通風抵抗の増加（圧力損失の増加）による換気量不足がおこりうる。フィルタ交換がなしに使用し続けると、送風ファン圧によってエアフィルタの破損の可能性があり、火山灰が室内に侵入する。ここでは、火山灰の供給量とフィルタの圧力損失の関係、フィルタ破損時の圧力損失レベル、フィルタによる火山灰の捕集量あるいはフィルタを透過する割合などに着目した。

図７、図８に空調換気システムの例を示す。図７では、排気口に送風ファンが設置してあり、室内の空気が強制的に屋外に排気され、それによる室内の圧力低下を補うよう吸気口から外気が自然に取り込まれる。吸気口には多くの場合、微細な塵などを除去するためのエアフィルタが取り付けてある。図８では、外気がファンにより強制的に取り入れられ、空調機を通過した空気は室内を通り、天井の還気口から吸引され天井内のダクトを通って屋外に排出される。ここでは、空調機と送風ファンの直前に間にエアフィルタが設置される。

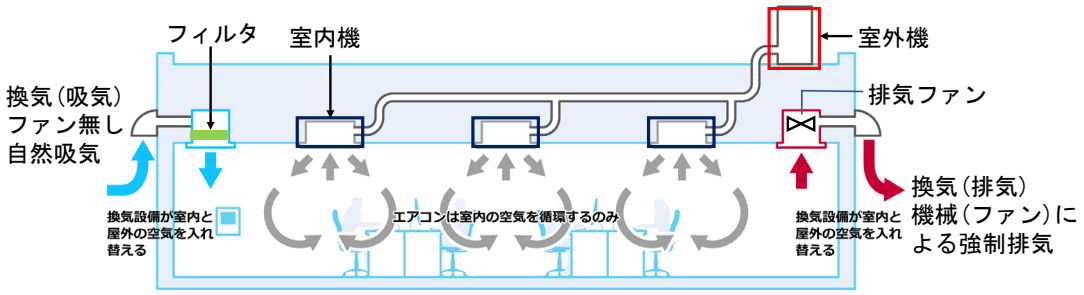


図７　建物空調・換気の例（第３種空調）強制排気と自然吸気

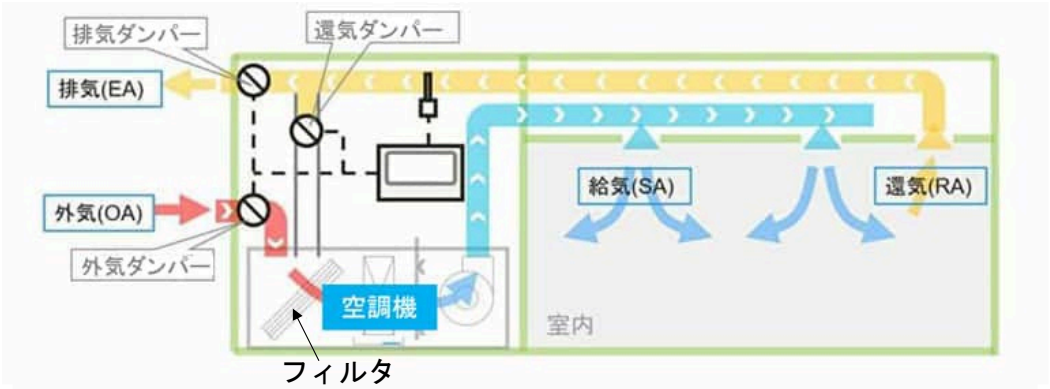


図８　空調・換気の例：換気と空調が同一の系統

ii) これまでの実験

エアフィルタへの火山灰影響については、火力発電所のガスタービン吸気口のエアフィルタに対する実験がある（山元・他、2016）。そこでは、プレ（粗）、中性能、高性能の3種類フィルタが扱われ、それぞれの単体、プレ＋中性能、および、プレ＋中性能＋高性能の組合せについて、フィルタ要交換圧力損失に至るまでの火山灰供給量、時間、フィルタ火山灰保持量を求めており、流量不足とフィルタ破損の関係についても述べられている。山元・他では、屋外側からプレ、中性能、高性能フィルタの順で実験され、火山灰は殆どプレと中性能フィルタの直列設置によってほぼ除去されることを示した。

ここでは、プレフィルタと中性能フィルタを直列的に組み合わせたもののみを対象とすることにした。表２に用いたフィルタを示す。実際の建物では、いずれかのフィルタが単体で用いられることはない。また、山元・他では粒径125μm以下の火山灰を用いたが、桜島の火山灰を用い、粒径(<250μm)は山元・他よりも粗い。この火山灰はこれまで空調機実験に用いたものであり、その粒度分布を図９に示した。

表２　実験に用いたエアフィルター

	プレフィルタ	中性能フィルタ
製品グレード	質量法85%グレード品	比色法90%グレード品
製品名,型番	ディアマットG85 (ガラス繊維フィルタ)	ミラセルMCS-S9－EF2Z/A
フィルタ寸法	610×610×50mm	594×594×292mm
定格風量	56m^3/min	56m^3/min
フィルタ圧力損失	44～147Pa	155～294Pa

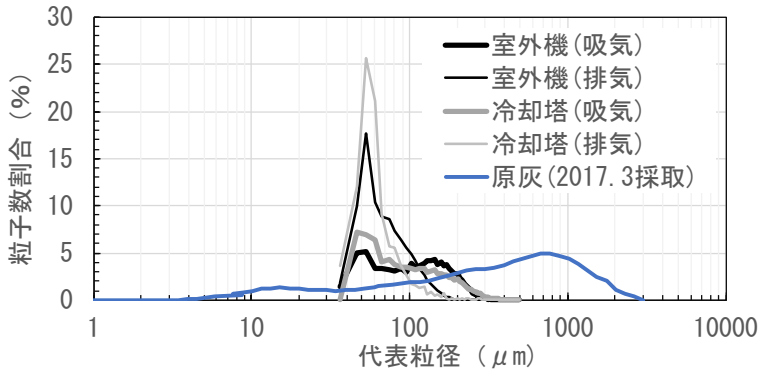


図９　実験に用いた火山灰の粒径頻度分布。図中で「原灰」とあるもの。室外機・冷却塔実験において計測された飛散粒子径も併記。

iii) 実験方法と装置

日本産業規格 JIS B 9908「換気用エアフィルタユニット・換気用電気集じん器の性能試験方法」に準拠した試験ダクトにフィルタを取り付けて、火山灰を供給し、フィルタの性能変化（圧力損失、粉じん保持量）を調べた。また、降雨時を想定した水分ミストと火

山灰を同時に供給しフィルタの性能変化を調べた（図 10）。フィルタ破損による圧力損失に到達するまで火山灰を供給し、破損に至った時間と火山灰供給量を調べた。

火山灰の乾燥は、大林組東日本ロボティクスセンター（所在地：埼玉県川越市）において乾燥炉で行った。

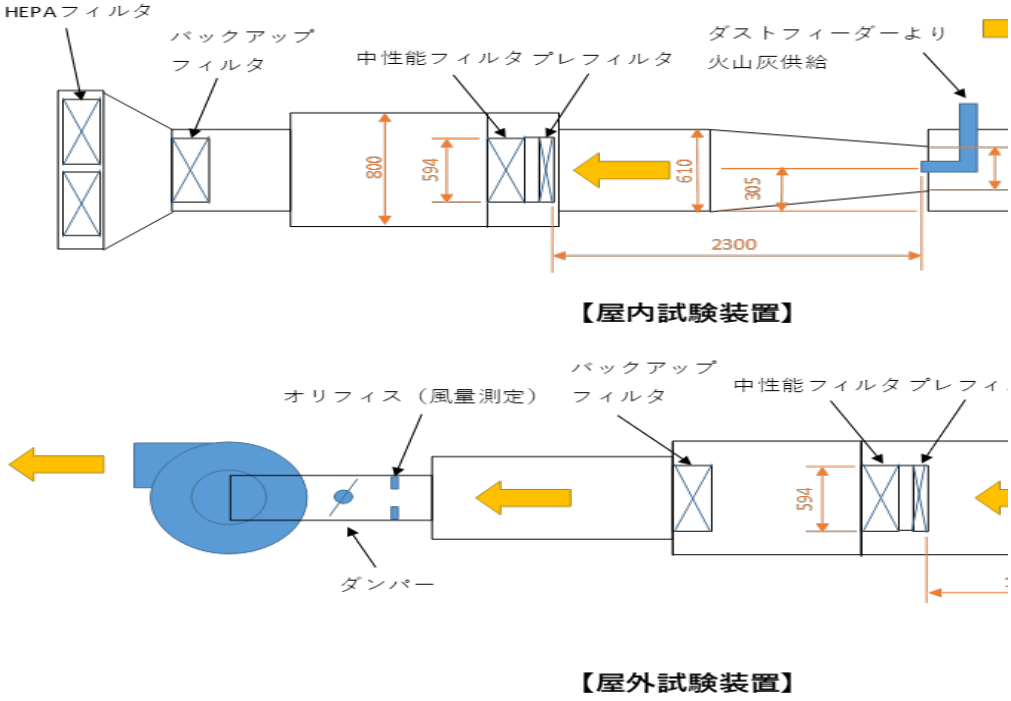


図 10 実験装置の概要

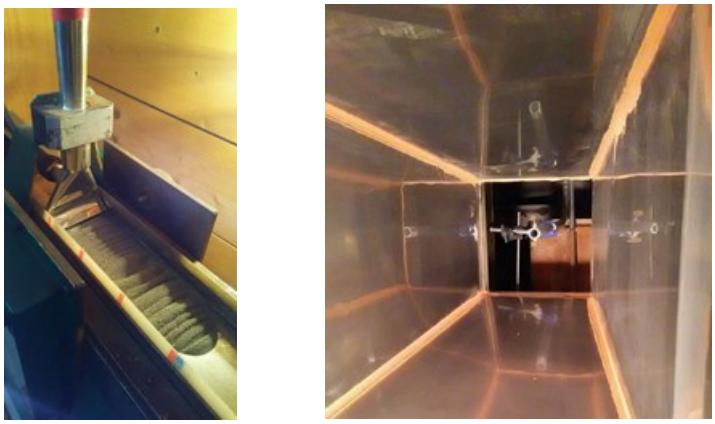


写真 4　ダストフィーダー。火山灰の吸い込み（左）、風路内への噴出口

実験は 2020 年 11 月 16～12 月 2 日の期間に、日本エアフィルタ株式会社内進和テック株式会社研究棟（神奈川県平塚市）で実施した。屋内装置を用いる実験 1～5（後述）では、風路にフィルタを設置し、ダストフィーダーから所定の時間供給量で火山灰を供給した。フィルタは上流側にプレフィルタ、下流側に中性能フィルタを配置。風洞の下流端部

付近には、実験室内への粉塵の飛散を回避するためにバックアップフィルタおよびHEPAフィルタが取り付けてある。

装置は、風路内の火山灰濃度(kg/m^3)が所与の値になるように供給量を調整できる仕様となっている。風量は定格の56m^3/min(風洞内風速は約2.5m/s)とし、インバータ制御で一定に保たれた。圧力損失はフィルタ前後の圧力計測から求めた。ダストフィーダーには、AFIフィーダ（トレイ式）を用いた。火山灰は、写真４に示すように、ベルトコンベア上から吸気と共に吸い上げ、チャンバー内で拡散させた後にノズルによって風洞内で気流に平行に下流に向かって噴出させた。

屋外実験装置も吸い込み型の風洞である。水噴霧を使う湿潤実験や火山灰の量が多くなる破損実験では屋外の装置を用いた。火山灰の供給は屋内実験と同じダストフィーダーを用いた。風量の制御は、新品フィルタの定格風量時の初期圧損に合わせて風量を設定し、オリフィス板の差圧値が一定になるようにダンパー開度を調整した。

試料火山灰は粒度平均落下速度Uが2m/s程度、堆積状態の見かけの密度 ρ=1600kg/m^{3}程度である。時間降灰深F(mm/h)と空間濃度C(kg/m^3)との関係は、

$$F = C \times U / \rho \times 10^3 / 3600$$

で示される。落下速度2m/sは、図８の「原灰」の粒径分布に対して、Dare (2015)に基づく粒子の抗力係数による終端速度の加重平均から求めた。試料の違いから単純な比較は難しいが、山元・他の実験では空間濃度70、700、7000mg/m^{3}すなわち時間降灰深0.34、3.4、34mm/hを用いたが、本研究では、空間濃度を70、420、1005mg/m^{3}すなわち降灰強度0.34、2.0、5.0mm/hとした。それぞれ、フィルタ試験の参照濃度、遠位領域の代表濃度、遠位領域での強めの濃度に相当する。実験は表３に示すように、全７ケースである。このうち６ケースは乾燥状態、１ケースは湿潤状態である。ダクト内の送風量は、56m^3/min（面風速2.5m/s、流れの断面 0.61m×0.61m=0.373m^{2}程度)とした。面風速は流量を流れの断面積で除した値である。

表３　実験ケース

番号	圧力損失条件	火山灰条件	火山灰濃度 mg/m3	時間降灰深 mm/h
実験1	最終	乾燥	70	0.34
実験2	最終	乾燥	420	2
実験3	最終	乾燥	1005	4.8
実験4	最終 1/3	乾燥	1005	4.8
実験5	最終 2/3	乾燥	1005	4.8
実験6	最終	湿潤	420	2
実験7	破壊	湿潤	1005	4.8

実験 1～3 は、フィルタ交換が必要となる圧力損失（最終圧力損失）に至るまでの火山灰供給量等を空間濃度別に見るもので、3 段階の空間濃度（70、420、1005kg/m^3）を設けた。今回用いる実験装置は空間濃度によって供給量を制御する仕様になっている。

実験４、５では、実験２で得られたフィルタ要交換圧力損失値を参照し、実験 2 の要交換圧力損失値の 1/3、2/3 到達まで火山灰を連続的に供給した。これにより、通過抵抗の時間変化の直線性の有無などを調べる。実験６の湿潤状態では、火山灰への付着が起きやすい弱い降雨(Wilson et al.)を想定した。火山灰供給は、フィルタの要交換の圧力損失まで行うことにした。目詰まりによりフィルタの圧力損失が増加すると、換気ファンの送風圧（静圧）により、フィルタの歪みや固定枠からのはずれ、ろ材の破れといった破損が生じる恐れがある。そのため実験 7 では、フィルタの破損までの火山灰供給量等を調べた。

iv) 実験結果

実験結果をまとめたものを表４に示す。

表４　エアフィルター降灰影響実験結果のまとめ

番号	圧力損失条件	火山灰条件	火山灰濃度	時間降灰深	初期圧損 Pa		試験終了圧損Pa		試験時間	火山灰	火山灰保持量 g	
			mg/m3	mm/h	プレ	中性能	プレ	中性能	min	供給量 g	プレ	中性能
実験1	最終	乾燥	70	0.34	52	166	62	294	1360	5331.3	261.1	4257.4
実験2	最終	乾燥	420	2	55	164	64	296	225	5292.0	259.9	4198.9
実験3	最終	乾燥	1005	4.8	52	168	60	296	96	5402.9	248.0	4233.2
実験4	最終 1/3	乾燥	1005	4.8	50	168	66	210	60	3376.8	169.2	2635.1
実験5	最終 2/3	乾燥	1005	4.8	50	168	68	258	90	5065.2	262.8	3933.6
実験6	最終	湿潤	420	2	55	165	75	294	160	3763.2	104.2	3516.0
実験7	破壊	湿潤	1005	4.8	53	155	66	3200	530	29828.4	225.0	26950.5

図 11 に実験 7 を除く 6 ケースについて、プレ及び中性能フィルタの初期状態と火山灰供給終了時のフィルタの圧力損失を示した。初期圧損（圧力損失）と実験終了圧損の差が火山灰の捕集による圧力損失増加分を表している。中性能フィルタの実験１、２、３および６は最終圧損（要交換圧損）到達時で、圧損の増加分はおよそ 140Pa 程度である。実験４、５は初期から要交換までの圧力損失増加分の 1/3、2/3 時点で実験を終了したものであるが、ほぼ設定どおり行われていることが確認できる。プレフィルタは、中性能フィルタに比べ初期状態からの圧力損失の増加がかなり小さい。図 12 に、実験１～６における、火山灰供給量、プレ及び中性能フィルタによる火山灰保持量を示す。いずれのケースでもプレフィルタは中性能フィルタに比べ火山灰保持量は圧倒的に少ない。今回使用した程度の粒径範囲の火山灰では、中性能フィルタによって大部分が補足されることがわかる。

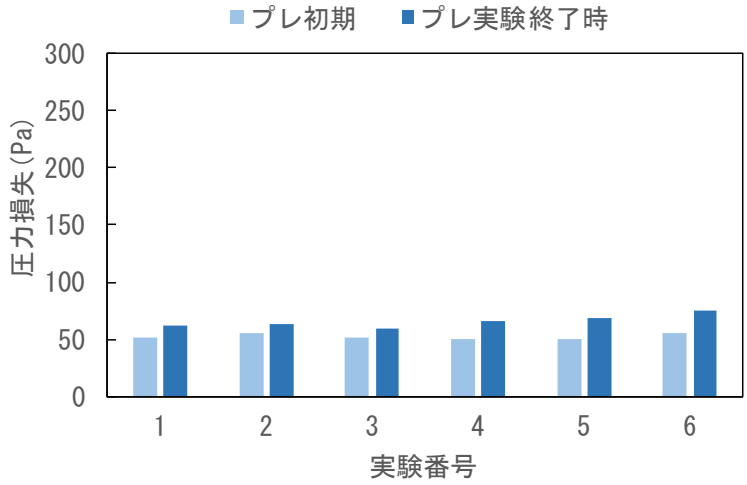


図 11a　プレフィルタの初期圧力損失と実験終了時の圧力損失（実験１～６）

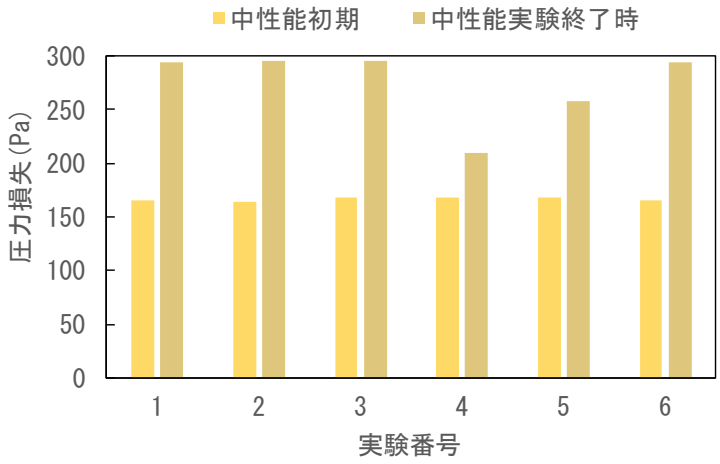


図 11b　中性能フィルタの初期圧力損失と実験終了時の圧力損失（実験１～６）

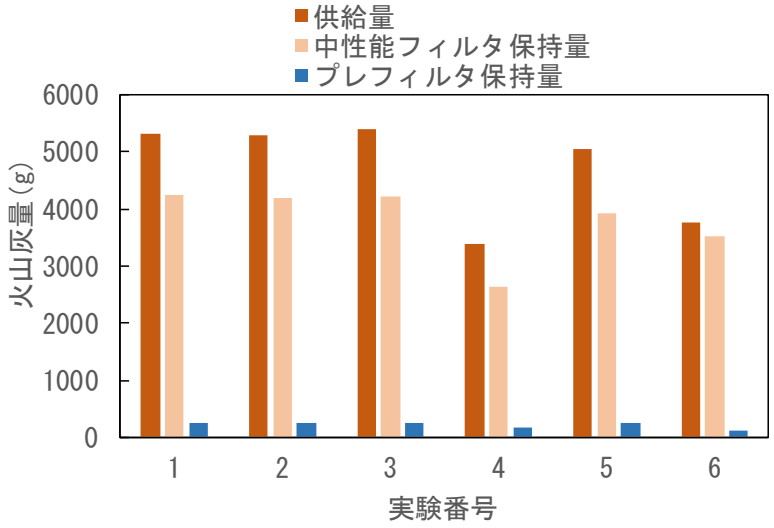


図 12　火山灰供給量と最終圧損時のフィルタによる火山灰保持量

v）火山灰供給濃度による違い（実験１、２、３）

実験１～３において、実験終了圧力損失（メーカー推奨のフィルタ交換圧損）に至った時点での火山灰保持量は、プレフィルタで 248.0～261.1g、中性能フィルタで 4198.1～4257.4g であった（表４）。一方、プレフィルタは、火山灰の多くが通過してしまい、圧力損失の上昇は小さかった。

圧力損失の時間経過を図 13 に示す。いずれも時間経過とともに圧損の増加率が次第に増す傾向にある。また、表４に示すように、要交換状態に達するまでの時間は、空間密度の増加とともに短くなっている。濃度と最終圧損到達までの時間は、フィルタの面風速が一定の場合、図 14 に示すようにほぼ反比例の関係にある。実験装置では、圧力損失の増加があっても流量（面風速）を維持するよう制御されている。

実験終了時のプレフィルタおよび中性能フィルタの外観をそれぞれ写真５、６に示す。

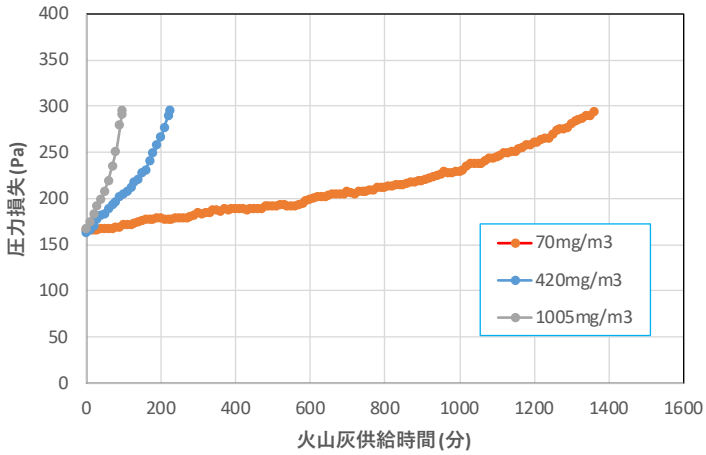


図 13　火山灰供給時間と圧力損失の関係（火山灰濃度による比較）

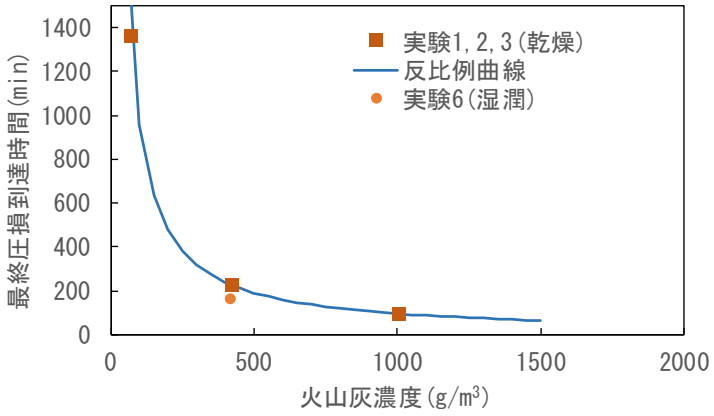


図 14　火山灰濃度と最終圧損(中性能フィルタ要交換圧損)までの所要時間(分)との関係

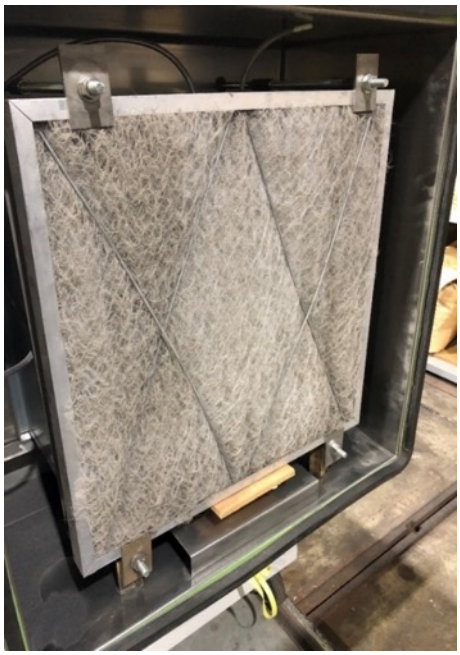


写真５　試験終了後のプレフィルタ

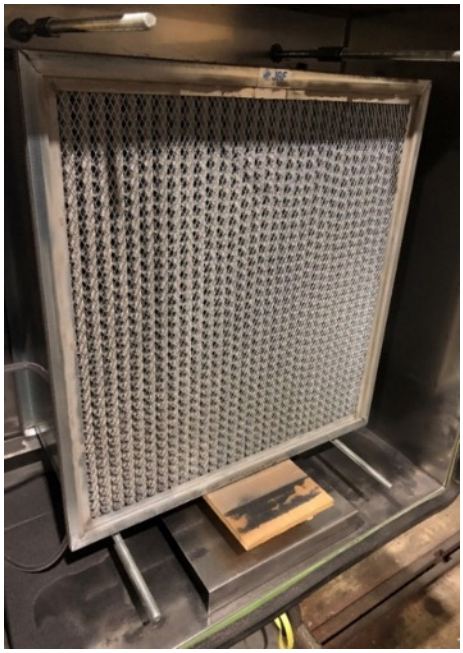


写真６　試験終了後の中性能フィルタ

vi）試験終了時圧損（実験３、４、５）

フィルタ要交換圧損までの圧損増加分と火山灰保持量との関係をみるため、実験３、４、５におけるフィルタの火山灰保持量を比較した。ここでも、火山灰保持の大部分を占める中性能フィルタのみを示す。表４に示した火山灰供給濃度 1005mg/m^{3}における実験終了圧力損失(実験３)、およびその 1/3(実験４)、2/3（実験５）に至った段階での火山灰保持量に関しては、フィルタの火山灰保持量を計量するにはフィルタをダクトから取り外して行う必要があり、計量後にフィルタを再設置して実験が不可能である。そのため、同一のフィルタによる経過を見たものではないことを注記しておく。圧力損失増分と火山灰保持量との関係を図 15 に示す。

図 16 には実験 3、4(最終圧損の 1/3)、5(最終圧損の 2/3)における圧力損失の時間変化を示す。実験 4(1/3)、実験 5(2/3)曲線は、第１義的には実験 3 曲線にある程度乗っているが、供給開始 60 分以降で実験 5 での圧損増加が実験３と比べやや遅くなっている。実験５で火山灰の保持量が、実験３、４、５間の圧力損失増分の割合から予想されるものよりも多いことから、フィルタろ材からの火山灰の脱落が実験３、４より多かった可能性がその理由として考えられる。

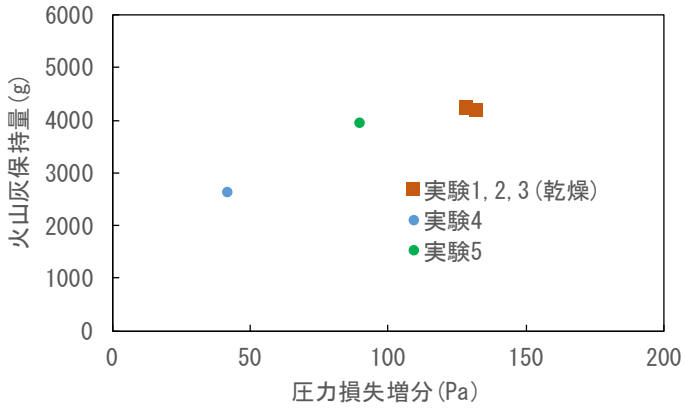


図 15　火山灰保持量と圧力損失増加分

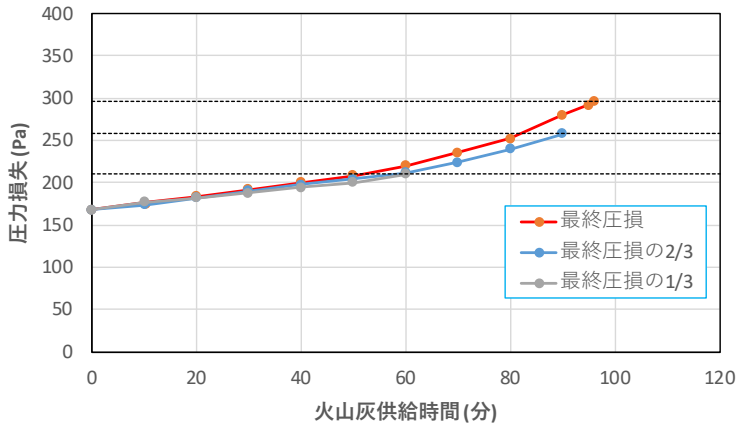


図 16　火山灰供給時間と圧力損失の関係（火山灰濃度による比較）

vii）乾燥灰と湿潤灰の違い(実験６)

火山灰供給濃度 420mg/m^3 に対し、湿潤火山灰と乾燥状態、それぞれによる火山灰保持量、圧力損失の増加過程の比較を行った。写真７、８にそれぞれ、屋外実験装置および火山灰と水分の供給状況を示す。湿潤灰は火山灰供給量約 1410g/h に対して送水量約 600g/h であり、供給源における火山灰に対する水分の割合は含水率換算で約 30%であった。フィルタ到達時の含水の割合の正確な把握は難しいが、H28 年度に行った室外機実験における湿潤灰との外見上の比較から、30%よりはかなり低い割合であったと推測される。

中性能フィルタの圧力損失の経時変化を図 17 に示す。中性能フィルタの要交換圧損段階での保持量は、乾燥火山灰（実験２）の 4198g に対し、湿潤火山灰で 3516g と、乾燥状態の約８割程度となった（表５）。プレフィルタについては、実験終了段階で乾燥火山灰の４割程度であった。圧力損失の時間変化（図 17）については、明らかに湿潤実験の方が上昇の進行が速い。また、乾燥、湿潤のいずれも圧力損失の時間変化曲線は途中から勾配が大きくなるが、いずれにおいても 220～230Pa 辺りに変曲点が認められる。先の実験３、４、５の比較のところでも触れたように、フィルタ内ではろ材への付着と（フィルタ枠内への）一部落下が同時に起こっているとみられる。変曲点における圧力損失値に乾

燥・湿潤で大きな差がないことから、湿潤火山灰では水分によってろ材への粘着性が増す結果、脱落する火山灰が相対的に少なくなり、結果的に少ない供給火山灰量でもフィルタの目詰まりが促進され、乾燥灰に対して圧損の上昇を早めた可能性が考えられる。



写真７　屋外試験装置　湿潤灰試験

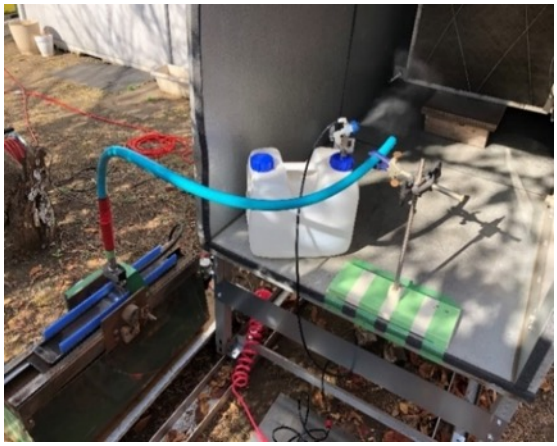


写真８　水分スプレー及びダストフィーダー

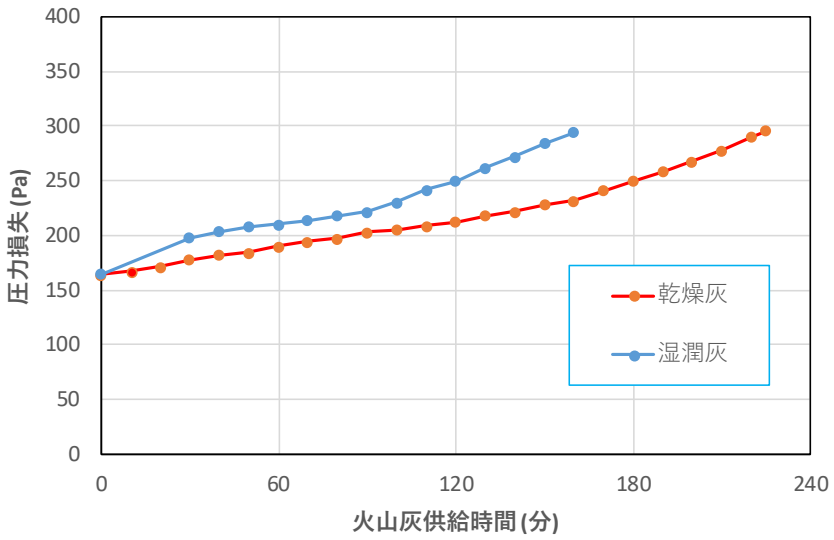


図 17　火山灰供給時間と圧力損失の関係（火山灰の状態による比較）

表５　湿潤・乾燥火山灰比較実験（表４からの抜粋）

番号	圧力損失	火山灰	火山灰濃度	初期圧損 Pa		試験終了圧損		試験時間	火山灰	火山灰保持量 g	
	条件	条件	mg/m3	プレ	中性能	プレ	中性能	min	供給量 g	プレ	中性能
試験2	最終	乾燥	420	55	164	64	296	225	5292.0	259.9	4198.9
試験6	最終	湿潤	420	55	165	75	294	160	3763.2	104.2	3516.0

火山灰はダストフィーダーから青色のホースを介して風洞内噴出され、水分は予め加圧した水タンクにミスト噴霧用のノズルを付けそこから、できるだけ火山灰と混合するように噴出させた。

viii）破壊実験（実験７）

実験７での破損時の保持量は 26950.5g で、実験 3 での保持量 4233.2g の約 6.4 倍であった（表４）。圧力損失の時間変化を図 17 に示す。破損時の圧力損失は 3200Pa であり、実験 3 におけるメーカー設定の最終圧力損失値約 290Pa（フィルタ要交換、表２参照）の 10 倍以上である。圧力損失の時間変化の状況についてみると、圧力損失 300Pa 辺りまでは実験３、 実験７と同様にほぼ同じ経過をたどっている。実験７ではその後の時間経過とともに圧力損失の増加速度（増加率）が次第に大きくなり、ろ材上部に隙間ができた段階で通気がよくなり圧力損失値が横ばいとなる。後者の時点を破損発生とした。
写真９、10 に示すように、破損は、ろ材上部の隙間発生、ろ材折り部の目開き発生が原因である。

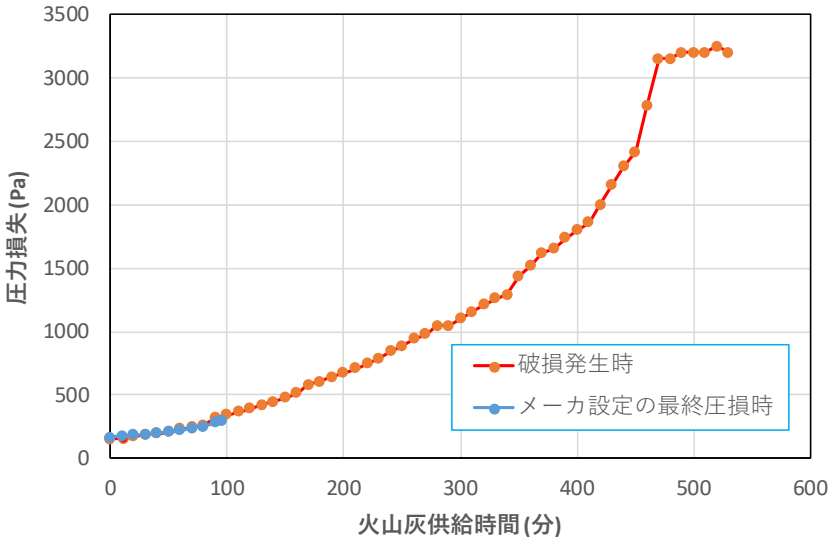


図 18　火山灰供給時間と圧力損失の関係（破壊実験時）

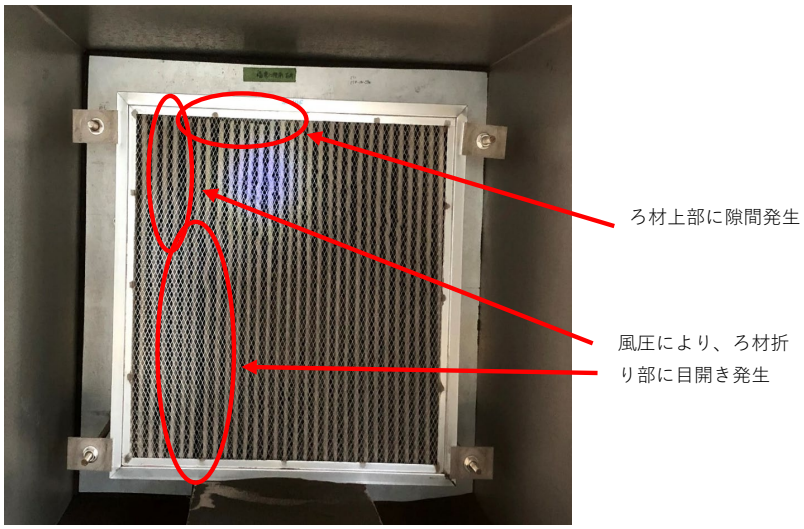


写真９　破壊実験時の中性能フィルタ破損箇所

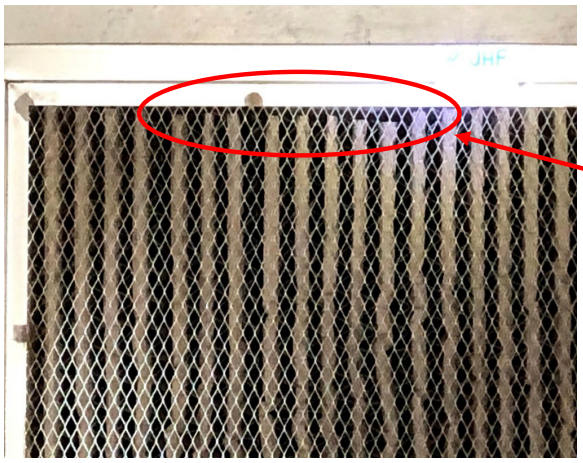


写真 10　破壊実験時の中性能フィルタ破損箇所（拡大）

ix）火山灰の質量収支・通過率

実験における火山灰の質量収支を表６に示す。表の中で落下火山灰とあるのは、風洞の床に落下した量であり、床から回収して計量された質量である。このうち「プレ前」は、風洞内でプレフィルタに達する前に落下した量である。「中性能後」は中性能フィルタを通過した量を表している。「不明分」は、火山灰供給量からフィルタによる火山灰保持量と落下火山灰の和を差し引いた残差であり、回収できなかった量である。

ダストフィーダーから供給された火山灰がプレフィルタに到達する前に風洞の床に落下する割合を「フィルタ非到達率」としている。落下火山灰のうち、中性能後のものはフィルタ系を通過した火山灰の量である。フィルタに到達しないものも含めて、供給火山灰量全体に対する中性能後の割合を「バルク透過率」、供給火山灰量からプレフィルタに到達しなかった落下火山灰（プレ前）を差し引いた量は実質的にフィルタに流入した火山灰量であるが、これに対する落下火山灰（中性能後）はフィルタの透過率であり「フィルタ透過率」とする。また、火山灰供給量に対する「不明分」の割合を「不明率」とした（表７）。

表６　実験における火山灰の質量収支

番号	圧力損失条件	火山灰条件	火山灰濃度	試験風量	試験時間	火山灰供給量	火山灰保持量 g			落下火山灰 g		不明分
			mg/m^3	m^3/min	min	g	プレ	中性能	合計	プレ前	中性能後	g
実験1	最終	乾燥	70	56	1360	5331.3	261.1	4257.4	4518.5	794.8	1.9	16.1
実験2	最終	乾燥	420	56	225	5292.0	259.9	4198.9	4458.8	802.6	0.7	29.9
実験3	最終	乾燥	1005	56	96	5402.9	248.0	4233.2	4481.2	883.7	2.2	35.8
実験4	最終 1/3	乾燥	1005	56	60	3376.8	169.2	2635.1	2804.3	542.6	5.5	24.4
実験5	最終 2/3	乾燥	1005	56	90	5065.2	262.8	3933.6	4196.4	834.2	3.2	31.4
実験6	最終	湿潤	420	56	160	3763.2	104.2	3516.0	3620.2	148.2	0	-5.2
実験7	破壊	乾燥	1005	56	530	29828.4	225.0	26950.5	27175.5	2346.0	483.5	-176.6

表７　火山灰のフィルタ透過率

番号	フィルタ非到達率	バルク通過率	フィルタ透過率	不明割合
	(%)	(%)	(%)	(%)
実験1	14.908	0.036	0.042	0.302
実験2	15.166	0.013	0.016	0.565
実験3	16.356	0.041	0.049	0.663
実験4	16.068	0.163	0.194	0.723
実験5	16.469	0.063	0.076	0.620
実験6	3.938	0.000	0.000	-0.138
実験7	7.865	1.621	1.759	-0.592

フィルタ非到達率については、ダストフィーダー噴出口から供試体までの距離が、室内実験装置が 2.3m、屋外装置が 1.2m であるため、実験１～５と実験６、７間の差はこうした距離の差によると見られる。さらに、実験６、７の差は湿潤、乾燥の違いに起因していると考えられる。実験１～６では、透過率いずれのケースでも 1%を大きく下回っており、特に湿潤実験ではほぼ０である。火山灰のほとんどが中性能フィルタによって捕集されることがわかる。この結果は山元・他の実験結果と整合的である。実験７では、透過率が 1%を大きく超えている。フィルタのろ材上部での隙間の発生や、ろ材折り部の目開きなどによる火山灰の漏洩が起こり、火山灰が急激に侵入し始めたことによると推察される。

x）考察

先行実験結果との相違

山元・他の実験と比較すると、実験条件は異なるものの、プレフィルタと中性能フィルタの組合せによって、フィルタを通過しようとする火山灰の大部分を捕捉できるという共通の結果が得られた。しかしながら、保持量と要交換までの所要時間に有意な差があり、全体として、本研究における方が要交換になるまで長時間を要し、フィルタ内の保持量も多い。その要因としては、フィルタによる塵埃の捕集の仕組み、使用した火山灰の違いが考えられる。山元・他の実験では、火山灰として入戸火砕流堆積物を人工的に粉砕したものが使用され、本研究では天然の桜島火山灰が使用されている。粒径の範囲や、粒子の形状が異なるなどしてフィルタのろ材への付着の特性に違いがあり、それらが、結果が相互に異なる部分の要因となった可能性はある。

実際の降灰と実験結果

表４によると、フィルタ要交換圧力損失になるまでの時間が、実験２では 225 分であるので、比較的短時間でフィルタの濾過性能の健全性が維持されなくなる可能性がある。要交換圧損未満の状態では中性能フィルタで火山灰のほぼ全ては除去できていたが、圧力損失が大きくなるとろ材に付着した火山灰の再飛散により、室内への火山灰の侵入が徐々に増えて行くことが考えられる。数字の上では時間降灰深２mm/h が半日続いたとすると（積算降灰深 24mm）、数字の上ではフィルタ交換が２～３回必要ということになる。しかしながら、降灰中はフィルタの交換は円滑に行えず、仮に、フィルタを使い続けると実験７に示したようにいずれ破損に至る。

表８に各実験ケースにおける、火山灰濃度、実験時間、時間降灰深、積算降灰深を示す。実験１～３から、降灰の強度に関係なくおよそ積算降灰深 8mm 程度で中性能フィルタの要交換レベルに達することがわかる。湿潤時はやや小さい 5～6mm 程度である。フィルタの破損の積算降灰深は約 44mm である。これは、時間降灰深が 1～2mm/h の状況では 22～44 時間（１から２日）である。積算降灰深が 40～50mm 程度までは、中性能フィルタが破損に至る可能性は低いといえる。

表８　各実験ケースにおける積算降灰深等

番号	圧力損失条件	火山灰条件	火山灰濃度	時間降灰深	試験時間	積算降灰深
			mg/m^3	mm/h	min	mm
実験1	最終	乾燥	70	0.34	1360	7.71
実験2	最終	乾燥	420	2	225	7.50
実験3	最終	乾燥	1005	5	96	8.00
実験4	最終 1/3	乾燥	1005	5	60	5.00
実験5	最終 2/3	乾燥	1005	5	90	7.50
実験6	最終	湿潤	420	2	160	5.33
実験7	破壊	乾燥	1005	5	530	44.17

b）降灰荷重による建物屋根への検討

富士山の宝永噴火のように首都圏に影響のある大規模降灰に関して、木造建物などへの影響が検討され始めている。ここでは、積雪荷重の短期許容応力度に対する余裕率と大雪の屋根被害における積雪荷重に対する安全率を用いて、建物屋根の限界降灰深を評価して被害確率関数を作成した。つぎに、構造種別ごとの被害確率関数を計算し、大規模降灰に対する建物屋根の損傷確率を評価した。

積雪荷重の短期許容応力度の余裕率と大雪の屋根被害における積雪荷重の安全率を考慮して、構造種別が木造建物、RC 造建物、S 造建物ならびに S 造建物（折板屋根）に対応した被害確率関数を作成した。

次に、富士山噴火による降灰シミュレーション結果（中央防災会議防災対策実行会議 大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ、2020 による）における６地点（御殿場市、秦野市、小田原市、横浜市、相模原市、新宿区）を対象に、火山灰が乾燥状態と湿潤状態について構造種別に応じた建物屋根の損傷確率を評価した。建物屋根の損傷確率は風向により大きく異なり、ケース１（西風卓越）では御殿場市と秦野市における建物屋根の損傷確率が高くなっている。一方、ケース２（西南西風卓越）では相模原市における建物屋根の損傷確率が最も高く、新宿区においても木造建物と S 造建物（折板屋根）の損傷確率が高くなることを示した。

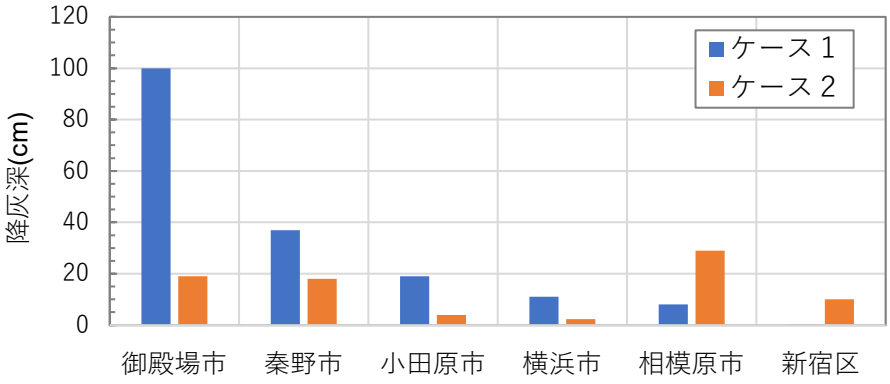


図 19　２ケースにおける６地点における降灰深（中央防災会議防災対策実行会議　大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ、2020 による）

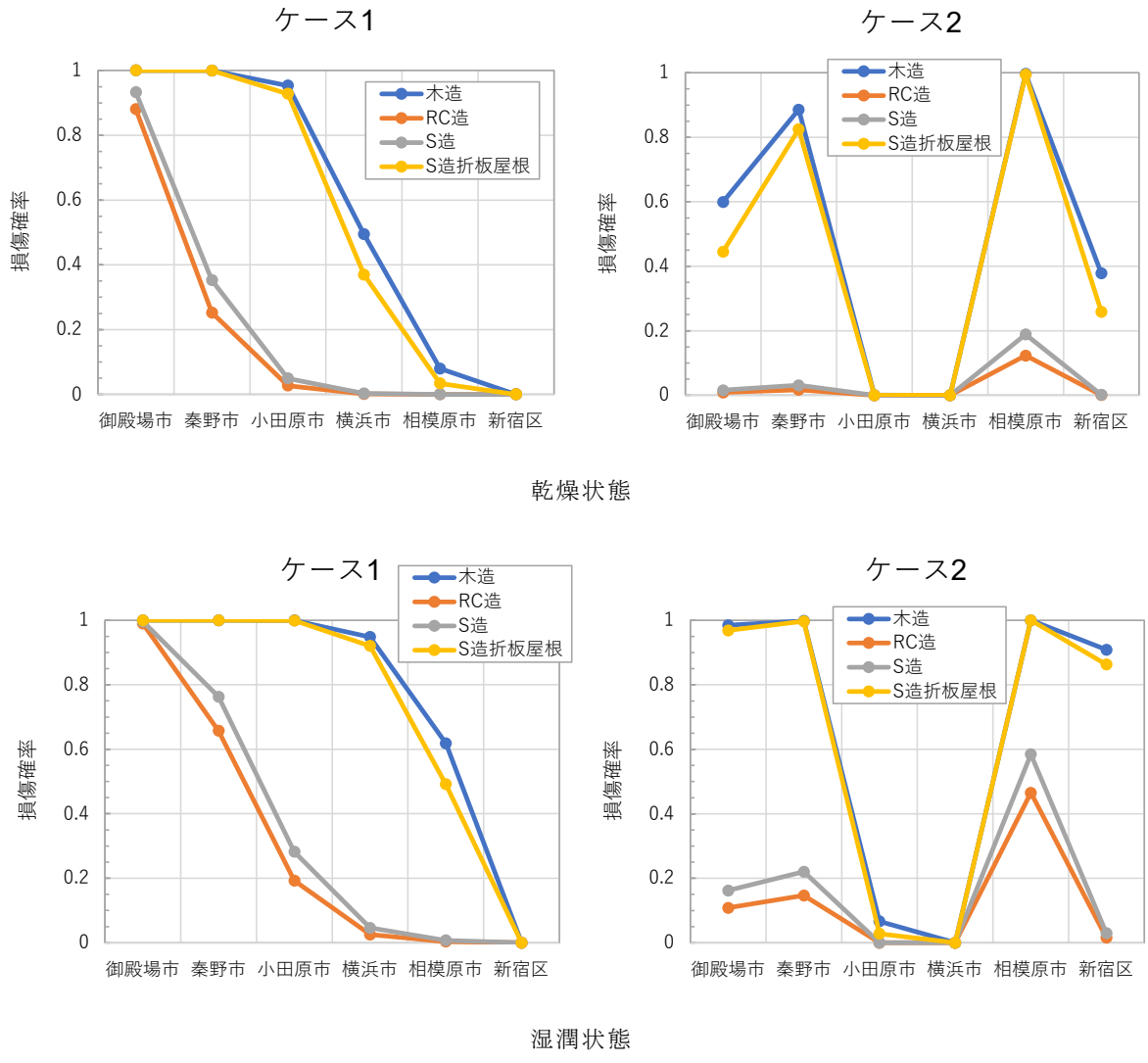


図 20　建物屋根の損傷確率

c)パソコン機器への降灰影響実験

今年度は火山灰によるパソコン機器への影響についても実験を行った。これまでに電子機器を対象に火山灰による影響の実験は行われていたが、鹿児島市でのヒアリング調査などからは、それほど影響がないことがうかがえた。一方、新型コロナウィルス感染拡大の影響を受けて、新しい生活様式では、ICTを活用した生活や業務の重要性が増し、ICTが社会の中でより重要なインフラとなり、IT機器がなくては生活ができないといっても過言ではない状況になってきている．そのため、これまでの降灰実験で余った桜島の火山灰を使い、簡易な実験装置を作成し、予備実験を行った。今回行った予備実験は火山灰が降り注ぐ中パソコンを使用する状況は非現実的であることから、遠方で且つ建物内で使用しているときに火山灰が室内に入ってくる状況を想定した(図21)。このため、使用した火山灰は250μmにふるい、乾燥したものを使用した。

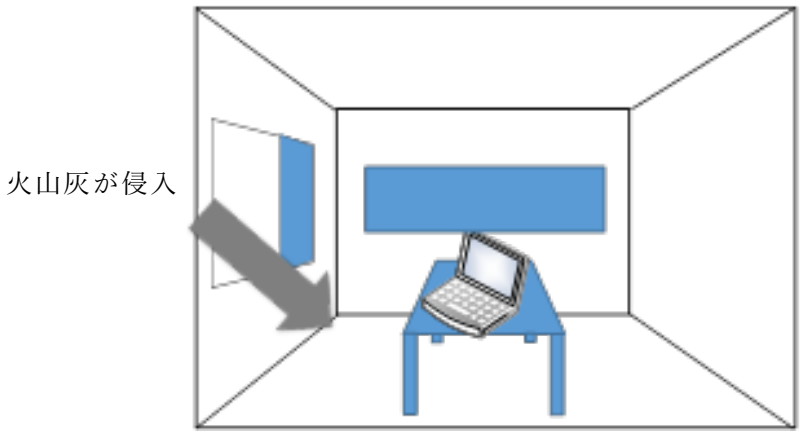


図 21　予備実験の想定図

先行研究のGordon et al.(2005)では、PC機器への実験を行う際、密閉した空間に灰を降らせて、実験を行っている。今回の予備実験では、その方法を参考に写真11に示すように密閉した容器に試験体を入れて、さらに容器内で火山灰と空気が循環するようにサーキュレータを用いて循環させ、さらに落ちた火山灰が舞い散るように容器内(38.5cm×64cm×41cm)にファンを設置し、実験を行った.ここでは、予備実験のため、試験体が故障するかどうかについてのみ着目し、故障は起動不良とした。また、平時のPC利用を想定して、予備実験では、PCを1日約8時間程度起動させ、起動中は無限ループで常時HDDに書き込みするプログラムを起動し、常にCPUとHDDが起動する状態とした。今回実験に使用したPCはOSの更新に伴い、不要となった中古のPCを使用し、今回はノートPC(NEC製)、デスクトップPC(HP製)を各1台使用した。このため、実験に使用するPCはすでに数年使用されたものである。また、Gordon et al.(2005)ではキーボードの裏に火山灰は侵入することによる影響があったとしたが、キーボードなどの入力装置は外部接続が可能なため、ここでは、影響は検討しない。



写真11　実験装置

このような条件の下で予備実験を行い、その結果、ノートPCは12日間、デスクトップPCは19日間実験を行い、ノートPCで5日後から6時間起動すると電源が落ちる症状があらわれたが、その後起動できたことから、起動不良となることはなかった．一方、デスクトップPCでは電源が落ちるといったことや起動不良は見られなかった。また、2つのPCともにUSBを利用することができた。

次に実験終了後のノートPCとデスクトップPCの外部と内部の様子を写真12、13に示す。それぞれの内部で灰の侵入は見られたが、ファンやHDD、CPU等には影響がみられなかった。これは、最近のパーツは気密性が高いためと考えられる。同様に容器内で撹拌用に使用していたファンにも影響はなかった。



写真12　ノートPCの外部（上段）と内部（下段）の様子



写真13　デスクトップPCの外部(上段)と内部(下段)の様子

今回の予備実験では起動不良となることはなかったが、使用した火山灰は新鮮なものでないため、火山灰が持つ化学的特徴による基盤への影響は別途検討する必要がある。

d)防災担当者の降灰対策調査

平成30年度までのヒアリング調査やアンケート調査の結果、噴火ハザードの内、特に首都圏を含む都市部において最も広範囲に影響を及ぼす「降灰」に関して、多くの自治体で対応経験もなく十分な対策がとられていないことが明らかになった。また、防災担当者へのヒアリングからも降灰について土砂災害や道路被害など災害対応につながる情報のため、必要とするニーズが得られた。このため、前年度は降灰による都市部への被害予測を地図情報として提供する降灰被害予測コンテンツ試作版を開発した。今年度は、本コンテンツ試作版の高度化を行うために、自治体の防災担当者がどのような降灰対策についてどのような対策を用意しているかや、降灰が日常的となっている鹿児島市での対策について、防災担当者間で情報共有が行えるように勉強会を実施した(写真14)。この勉強会では、富士北麓地域の防災担当者と鹿児島市の防災担当者をオンラインでつなぎ、鹿児島市の現状の対策、山梨県から火山防災強化推進都道県連盟が作成している降灰対応マニュアルについて、降灰被害調査について、本コンテンツの試作版について話題提供を行い、降灰対策で必要な情報や今後の研究に関する要望などの議論を行った。



写真 14　第 1 回火山灰対策の勉強会

勉強会での議論の結果、以下のコメントを得た。

降灰被害予測コンテンツについて

✓　現在 1 ㎞メッシュの降灰被害であるが、もう少し解像度の高い情報が欲しい。
✓　リアルタイム性がある情報が欲しい。
✓　県の防災システムにこういった情報は入らないのか。
✓　現在宝永噴火を基に首都圏対象だが、他地域や様々な気象条件での影響が知りたい。

研究への要望について

✓　降灰時における車両走行実験
✓　降灰時の避難方法を考える際に必要となる降灰による建物被害について研究していただきたい。
✓　農作物への被害について

今回実施した勉強会で得られた自治体防災担当者からのニーズを基に必要な情報を収集することや実験などによって検証を行い、降灰被害予測コンテンツを高度化させていく必要があることが分かった。

e）大規模降灰に関するアンケート調査

降灰被害予測コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、一般住民（登山者など）を対象として、インターネットを利用した大規模降灰に関するアンケート調査を実施し、分析を行った。

i） 調査概要

人々の噴火時の降灰に対する意識を明らかにするため、２つのアンケート調査を実施した。その概要が表９である。

一つ目の調査は、首都圏に在住する住民の富士山噴火に対する意識を明らかにすることを目的として実施した。対象は、東京都または神奈川県に在住する WEB モニターである。ここでは、東京都と神奈川県それぞれについて、20～60 代の男女で均等割付を行い（１セル 250 サンプル）、5,000 サンプルを回収した。

二つ目の調査は、首都圏に限らず、全国の登山者に対して火山噴火に対する意識を明らかにすることを目的として実施した。ここでの「登山者」の定義は容易ではないため、便宜上、深田久弥の著書『日本百名山』に紹介された山に登山した経験がある人、とした。この百名山は登山者にとっては有名であり、登山が好きな人であれば一度は登ったことがある山と考えられるからである。さらに本調査では、火山噴火に対する意識を明らかにするため、さらに条件を絞り、この百名山の中でも噴火警戒レベルが運用されている山に、2015 年以降に登山したことがある人を調査対象とした。この 2015 年は 9 月に御嶽山が噴火し、多くの登山者が犠牲になった年である。ここを一つの区切りとした。つまり、調査対象者は火山に登山経験があるため、東京都や神奈川県に在住するような、火山が身近ではない一般住民と比較しても知識があると考えられる人である。こちらの調査は、サンプル数を確保するために、割付などは一切行なわず、2,000 サンプルを回収した。なお、百名山で噴火警戒レベルが運用されている山の一覧は表 10 である。

表９　調査実施の概要

調査方法	WEB 調査
調査対象	東京都または神奈川在住の 20～60 代の男女 （楽天インサイトの WEB モニター）
調査期間	2021 年 3 月 23 日～25 日
有効回答	5,000 サンプル （東京都・神奈川県それぞれ、20～60 代の男女で均等割付）
調査方法	WEB 調査
調査対象	百名山で噴火警戒レベルが運用されている山に 2015 年（御嶽山噴火）以降に登山したことのある全国の 15～99 歳の男女（＝「登山者」）

	（楽天インサイトの WEB モニター）
調査期間	2021 年 3 月 19 日～23 日
有効回答	2,000 サンプル（割付等はなし）

表 10　百名山かつ噴火警戒レベルが運用されている山の一覧

	山名 （最寄りレベル運用火山）		山名 （最寄りレベル運用火山）		山名 （最寄りレベル運用火山）
1	阿寒岳（雌阿寒岳）	11	磐梯山（磐梯山）	21	穂高岳（焼岳）
2	大雪山（大雪山）	12	那須岳（那須岳）	22	焼岳（焼岳）
3	十勝岳（十勝岳）	13	雨飾山（新潟焼山）	23	乗鞍岳（乗鞍岳）
4	岩木山（岩木山）	14	妙高山（新潟焼山）	24	御嶽山（御嶽山）
5	八甲田山（八甲田山）	15	火打山（新潟焼山）	35	富士山（富士山）
6	岩手山（岩手山）	16	奥白根山（日光白根山）	26	白山（白山）
7	鳥海山（鳥海山）	17	草津白根山（草津白根山）	27	九重山（九重山）
8	蔵王山（蔵王山）	18	浅間山（浅間山）	28	阿蘇山（阿蘇山）
9	吾妻山（吾妻山）	19	剱岳（弥陀ヶ原）	29	霧島山（霧島山）
10	安達太良山（安達太良山）	20	立山（弥陀ヶ原）		

ii）調査結果

登山者の概況（調査２より）

まず、調査２の対象者が、2015 年以降に登った山について複数回答で問うた結果が図 21 である。35.51%の人が富士山に登山した経験があり、阿蘇山、立山と続く。最も少ないのは火打山で全体の 1.6%の人であった。

また、年間に平均して登山する回数について問うた結果が図 22 である。本調査対象者の約半数の 52.0%は１回未満と答えており、残り 48.0%の人が平均して年に１回以上登山している。

デモグラフィック要因としての性別、年代はそれぞれ図 23、24 の通りである。

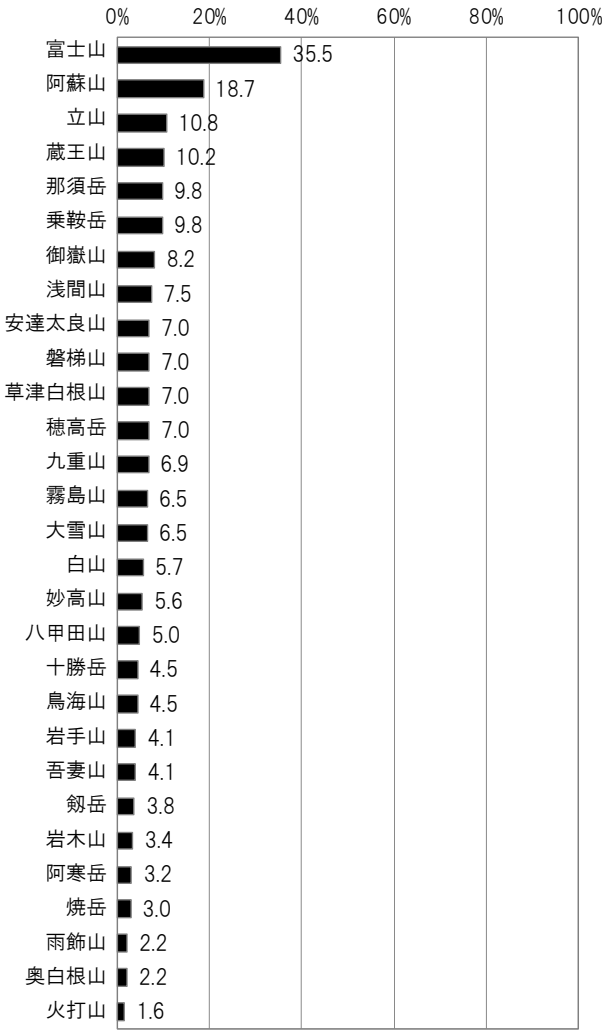


図 22　調査対象者が 2015 年以降に登った山
（複数回答、n=2,000）

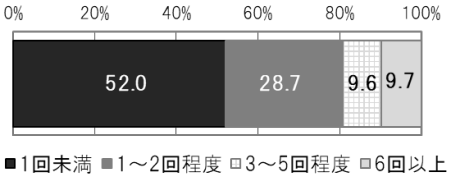


図 23　1 年間の登山回数（n=2,000）

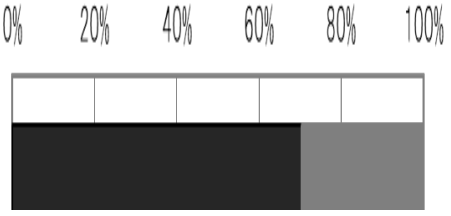


図 24　調査対象者の性別（n=2,000）

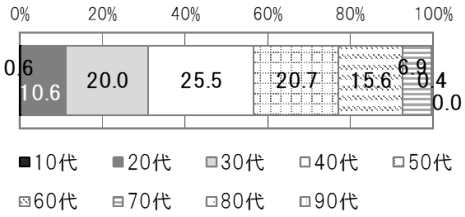


図 25　調査対象者の年代分布
（n=2,000）

一般住民と「登山者」の知識

では、一般住民と「登山者」の間で、火山に関する知識の差はあるのか。そこでまず、調査１、調査２のいずれにおいても火山に関する情報について「あなたは、次のことを知っていますか」と問うた。その結果が図 26 である。ほとんどの項目で「登山者」の方が「聞いたこともあるし、意味も知っている」割合が多かった。火山の近所に居住していなければあまり馴染みのない、噴火警報や噴火警戒レベルなどに関して、一般住民は約４割前後が「聞いたこともあるし、意味も知っている」と答えており、「登山者」は６割以上が「聞いたこともあるし、意味も知っている」と答えている。なお、「ハザードマップ」に関してのみ、両者の間でほとんど差はみられなかった。

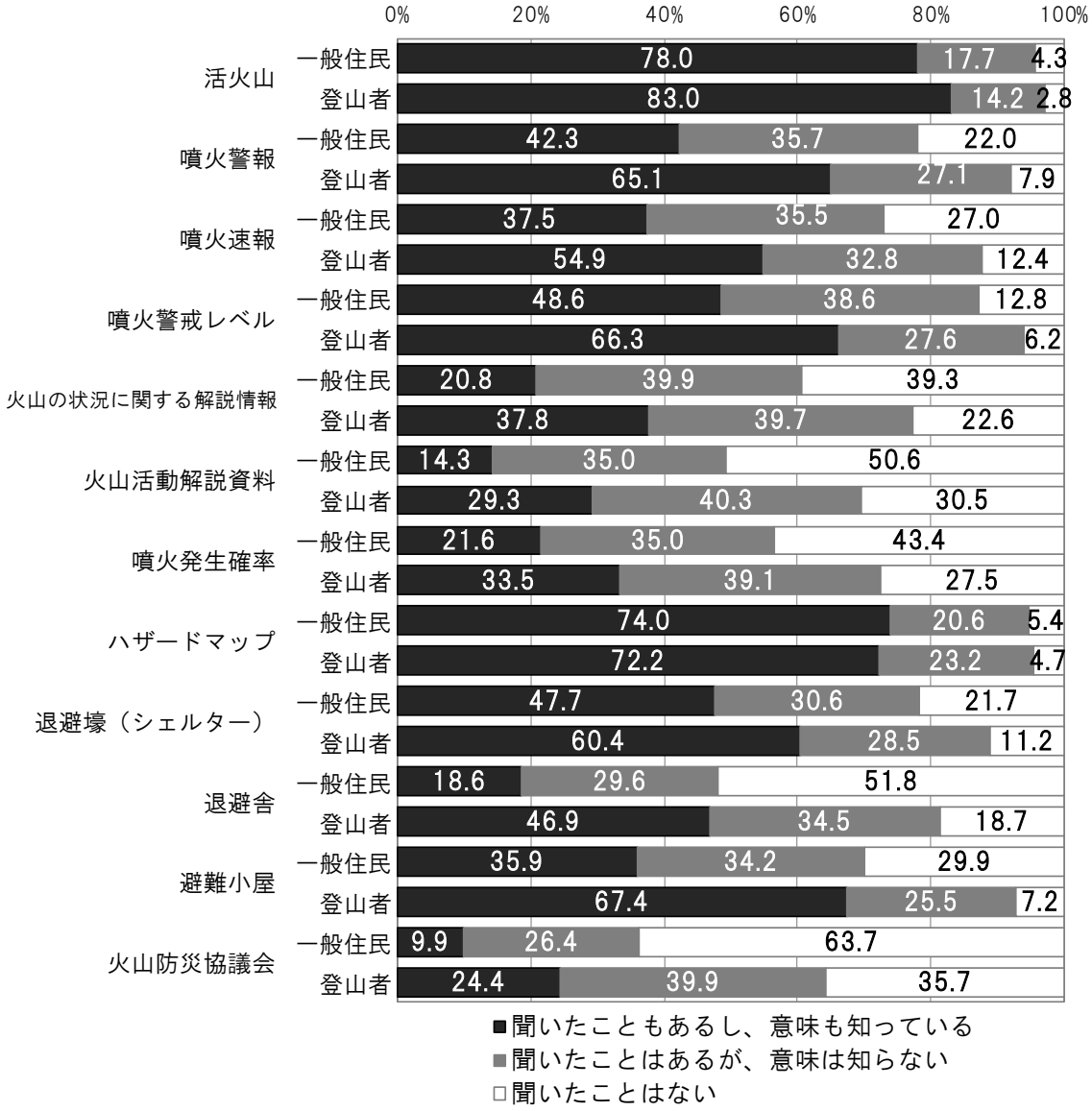


図 26　調査対象者の情報認知（一般住民 n=5,000、登山者 n=2,000）

次に、調査１、調査２のいずれにおいても火山に関する用語について「あなたは、次のことを知っていますか」と問うた。その結果が図 27 である。「噴石」「溶岩流」「火

山灰」などは一般住民、「登山者」のいずれにおいても「知っている」割合は変わらないが、それ以外の項目では「登山者」の方が「知っている」割合が多い。

これらの結果から、「登山者」が一般住民よりも火山に関して知識があると考えられる。もちろん、この結果は単純な認知を問うたにすぎず、かつ用語を「知っている」と答える人でもその知識が正しいかどうかはこの結果からはわからない。だが、火山に登ることがある「登山者」の方が、東京都や神奈川県の住民という、日常生活において火山と接する機会の少ない人びとと比較したときに、認知が高いことは自明であろう。当然、「登山者」は火山に登る前に準備として、コースや山について調べる。その過程で、火山に関して認知があがると考えられる。

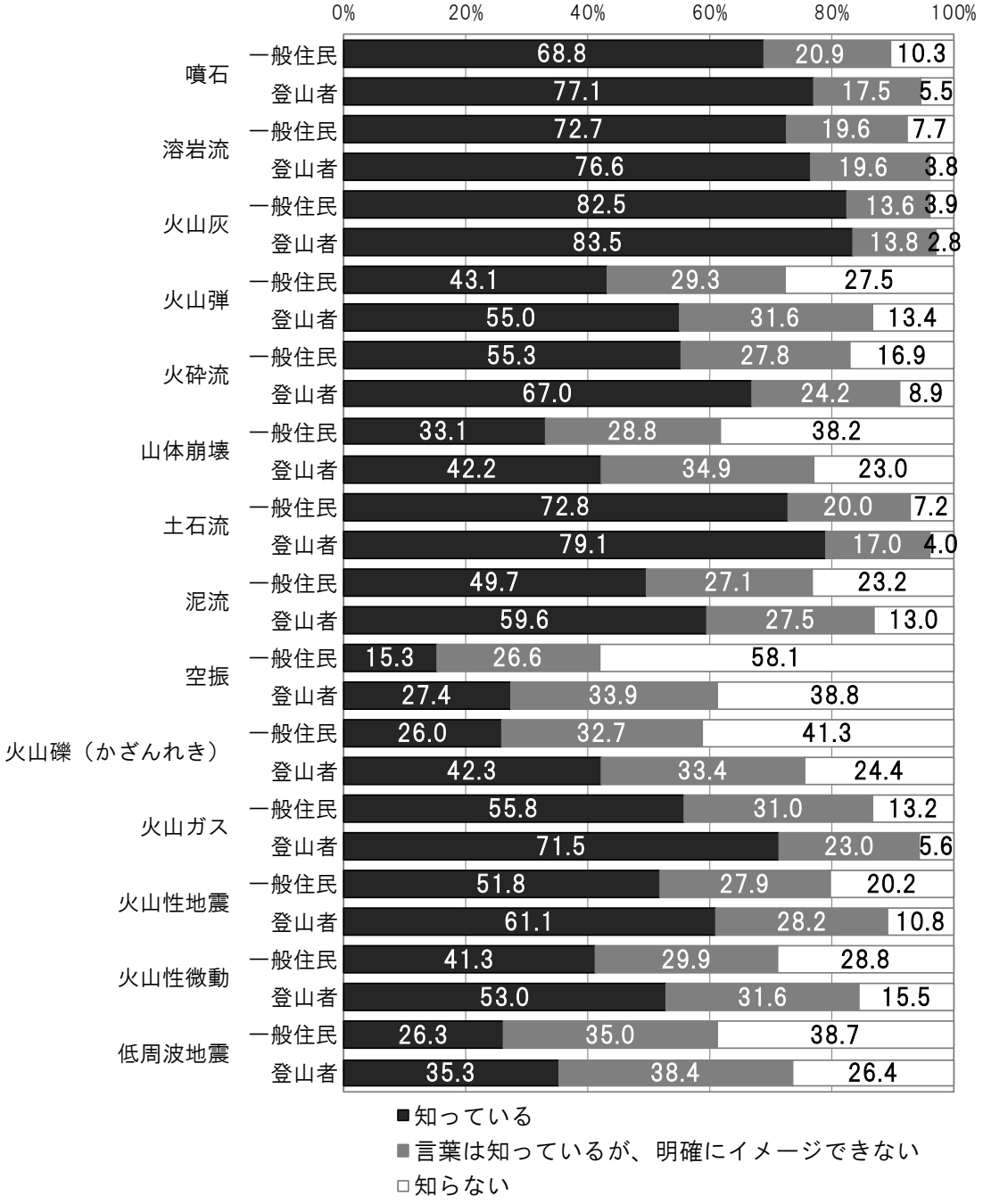


図 27　調査対象者の用語認知（一般住民 n=5,000、登山者 n=2,000）

一般住民と「登山者」の富士山噴火に対するイメージ

では、これらの一般住民と「登山者」の間で、富士山噴火に対してどのようなイメージがあるのか。「富士山が大規模噴火するとどういう状況になると思いますか」と富士山周辺域と首都圏でどのような状況になるかを自由記述で回答してもらった。その結果について、テキスト分析ソフトである、KH Coder を用いて分析を行った。本稿ではそこでの頻出語から傾向を明らかにする。なお、データクリーニングの段階で「分からない」という回答が多かったため、強制抽出する語として「分からない」「わからない」「わかりません」「分かりません」「わからん」「分からん」（以上、全て表記の揺れとして「わからない」で吸収）を指定し、抽出を行った。

まず、富士山が大規模噴火した時の、その周辺域の状況のイメージについてである。東京都や神奈川県の住民の自由記述における頻出語上位 30 語が表 11 である（5,000 段落、5,726 文、使用総抽出数：21,004、使用異なり語数：1,662）。一方、「登山者」の自由記述における頻出語上位 30 語が表 12 である（2,000 段落、2,172 文、使用総抽出数：7,690、使用異なり語数：1,069）。

いずれにも共通していることとして、出現回数をふまえて約 5 人に 1 人は「火山灰」もしくは「溶岩」に言及している。また、「火砕流」に言及している人も多く、火山噴火のイメージとして、1991 年に発生した雲仙普賢岳の噴火による被害のような状況を富士山周辺域の状況としてイメージされていると考えられる。こうした現象以外にも「避難」「火事」への言及、さらには「住める」つまり、住むことが出来なくなる、と考えている人が多い。その一方で「わからない」と回答している人も多く、これは知識があると考えられる登山者でも一般住民でも同程度の頻度であった。

また、一般住民では「マグマ」への言及が、「登山者」では「噴石」「土石流」「ガス」への言及が比較して多かった。

つぎに、富士山が大規模噴火した時の、首都圏の状況のイメージについてである。東京都や神奈川県の住民の自由記述における頻出語上位 30 語が表 13 である（5,000 段落、5,539 文、使用総抽出数：21,268、使用異なり語数：1,860）。一方、「登山者」の自由記述における頻出語上位 30 語が表 14 である（2,000 段落、2,146 文、使用総抽出数：7,361、使用異なり語数：1,020）。

こちらは多少の出現順位に大小はあるが、ほとんど共通している。「火山灰」が最も多く、火山灰が降ること、積もることは多くの人がイメージしている。そして、それに基づく交通障害や停電などのインフラの停止、パニックなどの発生などが考えられている。また、地震が首都圏でも発生すると考えられている。そして、こちらでも「わからない」と答える人は一定程度存在し、これは先と同様に知識があると考えられる登山者でも一般住民でも同程度の頻度であった。

以上のように、火山に関して知識があるといえる「登山者」であってもそこまで一般住民と差はないことが明らかになった。また、首都圏で大規模な富士山噴火が発生したとしても、火山灰が降ることは多くの人がイメージできている。だが、それによってどのような影響が出るのかはあまり考えられておらず、せいぜい、東日本大震災時の東京での移動者が混乱しているといった程度のイメージで考えられている。経験したことがないため、過去の災害のイメージに引っ張られてしまっている。

表 11　一般住民の富士山噴火時の周辺域に対するイメージの頻出語上位 30 語

	抽出語	出現回数		抽出語	出現回数		抽出語	出現回数
1	火山灰	1062	11	流れる	242	21	噴火	175
2	溶岩	943	12	思う	240	22	状態	170
3	被害	723	13	住める	233	23	火山	160
4	壊滅	578	14	マグマ	215	24	灰	151
5	火砕流	468	15	生活	205	25	周辺	145
6	避難	366	16	噴石	197	26	災害	144
7	火災	293	17	人	196	27	影響	140
8	出る	286	18	地震	191	28	大変	130
9	わからない	267	19	火事	188	29	土石流	130
10	発生	262	20	降る	179	30	状況	129

表 12　「登山者」の富士山噴火時の周辺域に対するイメージの頻出語上位 30 語

	抽出語	出現回数		抽出語	出現回数		抽出語	出現回数
1	溶岩	399	11	火災	89	21	降る	53
2	火山灰	395	12	出る	88	22	大変	53
3	被害	254	13	流れる	81	23	住める	51
4	壊滅	212	14	土石流	80	24	状態	49
5	火砕流	210	15	周辺	66	25	人	48
6	発生	133	16	地震	66	26	影響	46
7	火山	127	17	噴火	60	27	ガス	44
8	噴石	123	18	火事	56	28	思う	43
9	わからない	115	19	覆う	56	29	甚大	40
10	避難	102	20	生活	54	30	全滅	40

表 13　一般住民の富士山噴火時の首都圏に対するイメージの頻出語上位 30 語

	抽出語	出現回数		抽出語	出現回数		抽出語	出現回数
1	火山灰	2255	11	機能	250	21	噴煙	141
2	被害	523	12	思う	245	22	インフラ	133
3	降る	518	13	飛ぶ	240	23	パニック	133
4	影響	511	14	機関	207	24	降り積もる	130
5	交通	454	15	地震	197	25	噴火	125
6	灰	439	16	混乱	183	26	交通網	122
7	麻痺	363	17	積もる	183	27	停止	113
8	わからない	299	18	降り注ぐ	152	28	停電	108
9	出る	291	19	降灰	149	29	壊滅	102
10	生活	261	20	首都	141	30	発生	101

表 14　「登山者」の富士山噴火時の首都圏に対するイメージの頻出語上位 30 語

抽出語	出現回数	抽出語	出現回数	抽出語	出現回数
1 火山灰	945	11 地震	74	21 インフラ	52
2 麻痺	179	12 出る	66	22 降り積もる	51
3 交通	165	13 機関	64	23 パニック	50
4 被害	165	14 生活	62	24 交通網	49
5 降る	162	15 飛ぶ	62	25 降灰	49
6 影響	133	16 降り注ぐ	59	26 都市	49
7 機能	131	17 停止	56	27 覆う	48
8 わからない	103	18 壊滅	55	28 停電	42
9 首都	86	19 積もる	55	29 噴煙	42
10 灰	76	20 混乱	54	30 思う	41

一般住民の富士山噴火時の対応

最後に一般住民の富士山噴火時の対応について問うた。調査にあたっては、下記条件を提示した上で、「富士山が大規模噴火したとき、あなたはどうしますか」とたずねた。

・富士山が大規模噴火して広域で降灰があった場合、首都圏では短時間で死者・負傷者が発生する可能性は低いと考えられます。しかし、以下のような影響は長期間（数週間～数か月）続くおそれがあります。
・大規模噴火後１～３時間程度で、首都圏全域が降灰で視界不良となり、自動車の運転困難、鉄道の運行停止、飛行機の運行停止（羽田空港・成田空港まで降灰が到達した場合は飛行機が運行しない）により、移動が困難になる。
・その後１日～数日間の降灰で自動車の通行が困難となり、食料等の物流が停止する地域がある。
・降り積もった火山灰と雨により、電柱の器機がショートし各地で停電が発生する地域がある。
・停電の発生等により、通信の途絶、断水、下水道の停止等ライフラインにも影響が発生する地域がある。
・降灰 30cm 以上（降雨時）の場合には重みにより木造家屋が倒壊する地域がある。

その結果、東京都と神奈川県のいずれの約３割が「避難する」と答えた（図 28）。避難先としては、「避難する」と答えた人のうち半数以上が「自分の住んでいる都県以外に避難したい」と答えており（図 29）、さらに、詳細に避難先を問うと「祖父母、父母、子どもなどの家」など直系親族を頼って避難すると言っている人が多い（図 30）。つまり、広域避難先は全国様々な地域におよぶ。そして、その際利用するといっている交通手段は、公共交通機関の他に自家用車が多い（図 31）。公共交通機関を使って自らが居住する都県以外に避難する、と答えた人はアンケートに回答した人の約 10%、自家用車を使う、と答えた人は全体の約 5%であり、交通網が混乱することが目に見えている。

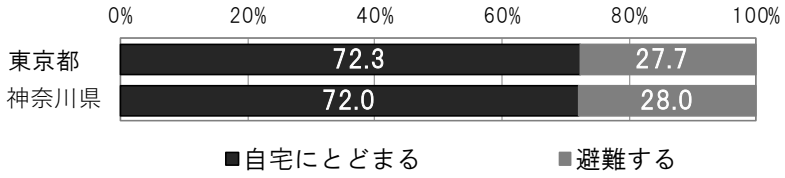


図 28　富士山噴火時の避難の有無（東京都、神奈川県それぞれ n=2,500）

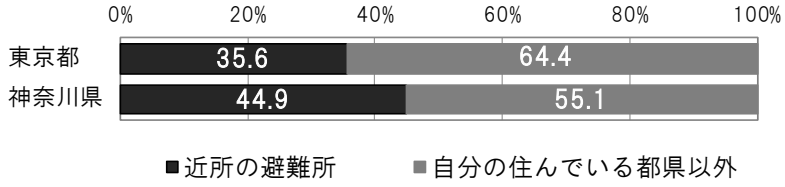


図 29　避難先が同一都県か否か（東京都 n=693、神奈川県 n=699）

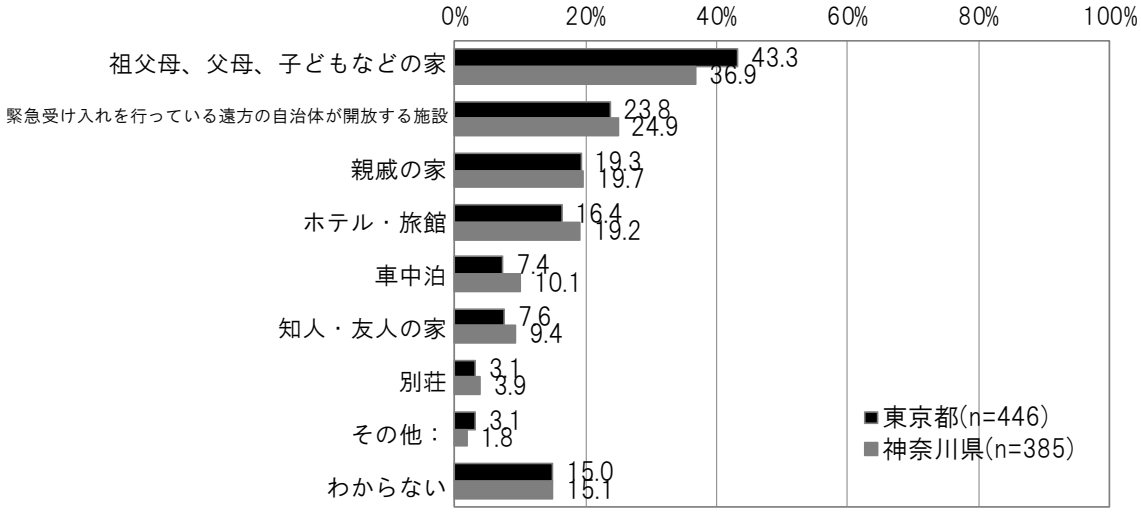


図 30　具体的な避難先（東京都 n=446、神奈川県 n=385）

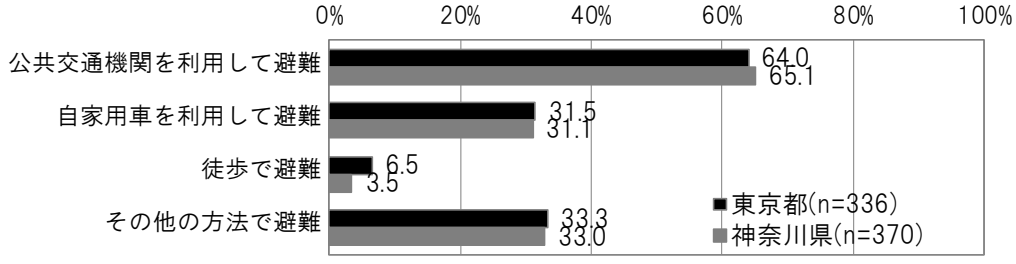


図 31　具体的な避難手段（東京都 n=336、神奈川県 n=370）

3）避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

a）　那須岳における登山者動向把握実験

本コンテンツ開発のための基礎データとしてこれまで富士山と御嶽山で取得してきた登山者データについて、今年度は 2020 年 10 月３日（土）、４日（日）の二日間、那須岳において登山者データ取得のための登山者動向把握実験を実施した（写真 15）。この時期は紅葉も始まり、天候に恵まれた週末には１年間で最も多くの登山客・観光客（以下登山者とする）が那須岳を訪れる時期である。





写真 15　ビーコン配布・回収作業の様子。

本実験の手法は、登山者に小型（5cm 四方程度）のビーコン（写真 16）を配布し、それを持って登山をしてもらう。そして、あらかじめ登山道にある道標等（図 32）に設置したレシーバー（写真 17）でビーコンを持った登山者の動きを検知するものである。



写真 16　登山者に配布するビーコン



写真 17　登山道等に設置するレシーバー（スマートフォン、バッテリー、ケース）

実験対象となる登山道は①峠の茶屋～峰の茶屋～茶臼岳山頂ルート、②峠の茶屋～峰の茶屋～朝日岳山頂ルート、③那須ロープウェイ山麓駅～山頂駅～茶臼岳山頂ルートの３つを

設定し、ロープウェイ山麓駅と山頂駅を含めて全 15 か所にレシーバーを設置した（図 33）。



図 32　道標へレシーバーを設置



図 32　レシーバー設置位置図

本実験では二日間で延べ 2000 名の登山者の動態データを取得し、リアルタイムで登山者の移動速度や混雑状況に関する情報を得ることができ、那須岳登山者の行動パターンの一部が明らかになった。また噴火を想定した場合のビーコンを配布した登山者の動向（大まかな数とおおよその位置の）把握に要する時間を調査した。その結果、１時間でビーコンを配布した登山者全体の 75%、２時間で約 90%の動向を把握することができた。

取得した登山者データとシェープファイル形式に変換した那須岳ハザードマップを GIS 上で重ねることで、噴火を想定した場合の登山者の曝露情報（ある時間に発生した噴火によって何人くらいの登山者が噴火ハザードに曝されているか）が得られ、登山者に関する簡易的な曝露評価を行った（図 33）。

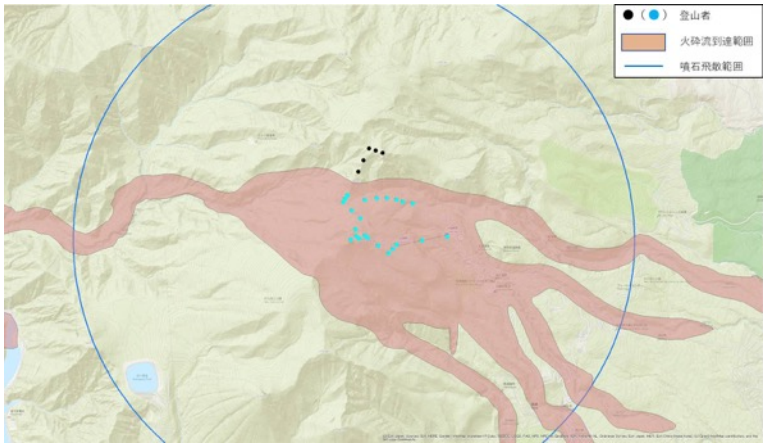


図 33　2020 年 10 月 3 日 12 時 00 分時点の登山者情報を示した図。黒丸（と青丸）は登山者 539 名のおおよその位置を示す。ここでは、那須岳ハザードマップで推定されている火砕流本体と重なる登山者（300/539）を青丸で示す。

実験の結果及び曝露評価の結果は那須岳火山防災協議会及び自治体（栃木県、那須町）と共有し、データの防災利用（例えば、登山者の避難を想定した訓練シナリオへの利用や避難計画の見直しにおける人的被害推定の把握など）について検討を始めた。なお、実験の実施にあたって栃木県や那須町の職員にも協力していただき、那須町及び那須岳火山防災協議会の後援を受けて実施された。

b）登山避難施設の耐衝撃性について

また、今年度は避難・救助支援において重要となる避難施設の耐衝撃性について、既存の建物への耐衝撃性を向上せるための実験を行った。実験は、2021 年 3 月 11 日に防衛大学校で実施した。今回は試験実験のため、山田・他(2019)と同様に図 34 及び、写真 18 に示す衝突実験装置を使用して、山小屋の屋根を模した杉材製試験体(基本構造、図 35)に軽石（スーパーソル L1、ガラス発泡資材事業協同組合）を土嚢袋に入れて前面に配置し、噴石に見立てた飛翔体(砥石：重量 2.66kg、密度 2421kg/m^3)を使い、射出速度を変化させて、実験を行った。

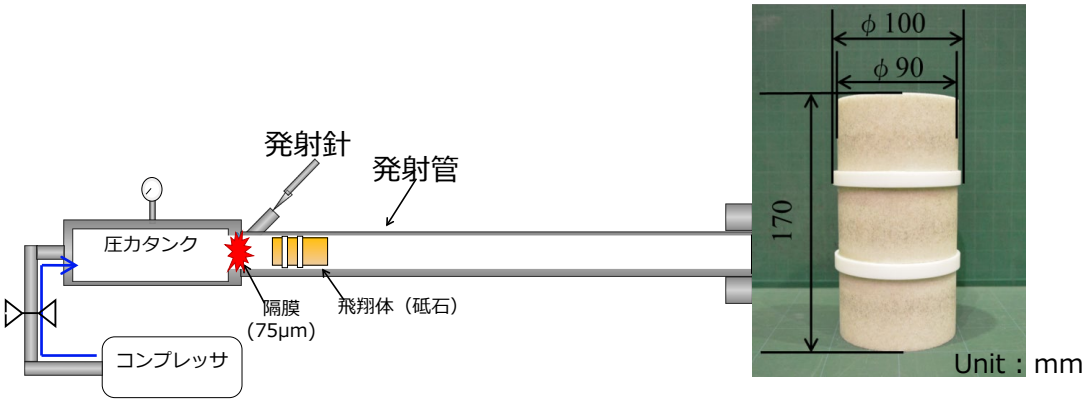


図 34:実験装置概要と飛翔体

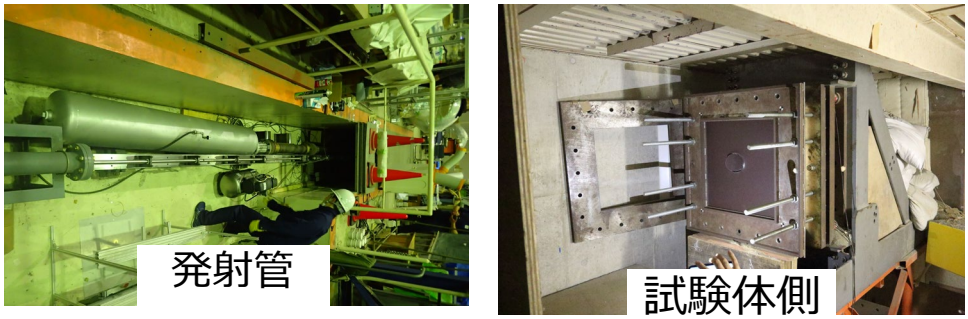


写真 18　高速投射型衝撃破壊試験装置

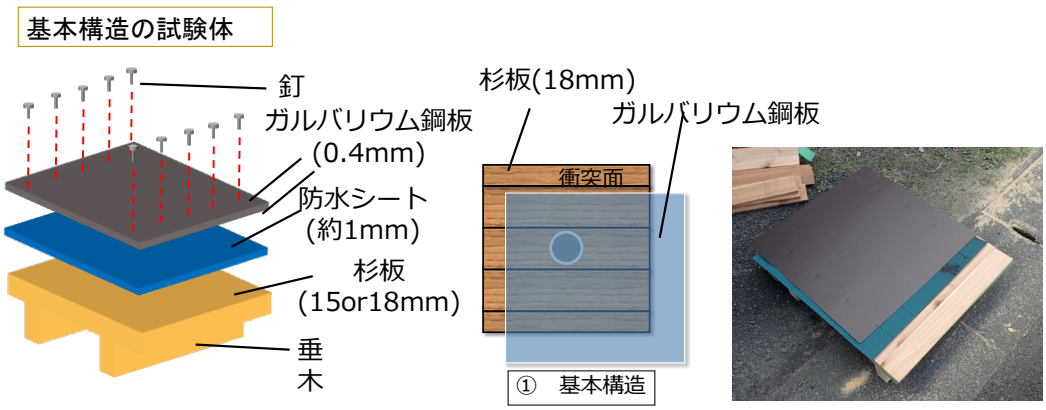


図 35　試験体の基本構造

実験の結果、写真 19、20、表 15 に示すように試験体の前面に 12cm 厚さの軽石を配置することによって、配置しない場合に比べて約 1200J、重量 2.66kg の飛翔体の場合約 10m/s に相当する耐衝撃性が向上することが分かった。



写真 19　軽石を置いた実験の前(左)と実験後(右)



写真 20　軽石を置いた実験後の試験体 TK05（左：正面、右：裏面）

表 15　模擬噴石衝突実験の結果の例

ケース番号	TK01	TK02	TK03	TK04	TK05	TK06
杉板厚	18mm	18mm	18mm	18mm	18mm	18mm
構造	基本構造*	基本構造*	基本構造*	基本構造+ 120mm 軽石	基本構造+ 120mm 軽石	基本構造+ 120mm 軽石
速度[m/s]	14.7	32.3	31.6	37.7	43.97	47.3
衝突エネルギー[J]	288	1386	1329	1890.3	2571.4	2975.6
貫通の有無	変形	突き刺さる	貫通	変形	変形	貫通

*基本構造の結果は山田・他（2019）から引用

(c) 結論ならびに今後の課題

令和２年度の当初目標である以下の３コンテンツ試作版の高度化については、ほぼ達成できた。

i) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

前年度までに開発した周知啓発教育用コンテンツ試作版を高度化した。現試作版は自治体防災担当者を対象としたヒアリング調査やアンケート調査から得られたニーズや課題に対応するべく開発されたが、今年度は実際に試作版を試用した上での潜在的なニーズや課題に対応するべく開発を進め、高度化を図った。具体的には、試作版として開発したポータルサイトに含まれる情報コンテンツや機能をニーズに応じて増やした。また本コンテンツでアクセスが可能な自治体防災担当者向けの研修プログラムについてパッケージ化し、実際にそのプログラムを使った研修を実施した。同じく本コンテンツからアクセスが可能な常時観測火山のハザードマップについて、２火山（日光白根山、弥陀ヶ原）を対象に含まれるハザード情報をデジタイズし、GIS等で直接利用できる形にした。これらデジタル化したハザードマップはアウトリーチ活動等で利用される他、下記降灰被害予測コンテンツ内でも活用された。今後は、より多くの自治体防災担当者に実際に試用してもらい、収集された感想や要望等を反映させる形でコンテンツの高度化を図る。

ii) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

前年度までに開発した降灰被害予測コンテンツ試作版を高度化した。現試作版は平成 29 年度及び平成 30 年度に実施した建築設備を対象とした降灰影響評価実験の成果を基に、降灰による建築物の損傷・被害に関する降灰深の閾値を設定し地図上で他の情報と重ねて表示できるようにしたものだが、今年度はさらに建物に対する影響を評価するうえで重要となる換気用エアフィルタを対象にした降灰影響評価実験を実施した。本実験では既往の研究を補完すべく条件を決め、フィルタに対する降灰の影響を調査した。その結果、フィルタに物理的な損傷が発生するのは、最終圧損となる降灰深に対して裕度があることが分かった。さらに、降灰による建物屋根への影響を評価するため、鉄筋コンクリート造、鉄骨造と木造構造物の屋根について、積灰に対する安全性の比較を行い、シミュレーションによる降灰分布に対する損傷確率を示した。今後は、実際の建物例を対象に検討して安全性評価の事例を具体的に示す。

また、噴火対応経験のある自治体（鹿児島市）を含む複数の自治体による、火山灰対策に関するオンラインでの実務者勉強会を実施し、火山灰対応や対策に必要な情報、研究者へのニーズを把握した。さらに、本コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、一般住民（登山者）を対象として、ネットを利用した火山現象の認知度や大規模降灰に関するアンケート調査を実施した。その結果、一般住民も登山者も、富士山噴火による降灰をある程度意識しているもののその影響や対応をイメージしていないなど、本プロジェクトからの情報発信において考慮すべき課題が見られる。今後、これらの結果を踏まえた情報発信のあり方を検討していくために、関係者での意見交換や勉強会の開催が必要である。

iii) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

前年度までに開発した避難・救助支援コンテンツ試作版を高度化した。現試作版は平成29、30年度及び令和元年度に実施された富士山及び御嶽山における登山者動向把握実験で得られた登山者の動態データを地図上で可視化しハザードシミュレーションの結果と組み合わせることで人的被害推定を行えるものであった。今年度は栃木県那須岳において同様のシステムを利用した登山者動向把握実験を実施し、得られた登山者の動態データを本コンテンツ試作版で可視化し、那須岳周辺自治体の防災担当者らに試用してもらい、データの防災利用（地域防災計画や避難計画の作成、避難施設や避難指示看板の設置、避難経路の指定等）について検討を進め、検討結果を開発に反映させることでコンテンツの高度化を図ることができた。次年度は、過年度までに取得した富士山及び御嶽山における登山者データと併せて、3つの火山周辺自治体及び火山防災協議会に対してこれら結果の防災利用（登山者の避難を想定した訓練シナリオへの利用や避難計画の見直しにおける人的被害推定の把握など）について提案し、活用に向けた検討を行う。

さらに、避難計画の作成や避難・救助活動において重要な施設である退避壕（シェルター）等の耐久性を評価することを目的として、模擬火山岩塊を使用した衝突実験を実施した。今年度はまず試験実験から実施した。

開発中の上記３コンテンツ試作版を試用してもらう自治体を増やし、より多くの意見や要望等を収集しそれを反映させる形で各コンテンツの高度化を図っていく。

(d) 引用文献

1) 中央防災会議防災対策実行会議大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ，2020．大規模噴火時の広域降灰対策について-首都圏における降灰の影響と対策-、～富士山噴火をモデルケースに～（報告）．降灰シミュレーションのパラメータと計算結果．令和2年4月．
2) Dare, R. A., 2015. Sedimentation of volcanic ash in the HYSPLIT dispersion model. CAWCR Technical Report, No. 079, 26pp.
3) Gordon, K. D., et al., 2005. Effects of volcanic ash on computers and electronic equipment. Natural Hazards, vol. 34, pp. 231-262.
4) 河野裕希・他，2020．火山ハザードマップを用いた曝露評価(要旨)．火山学会2020秋季大会，ポスター発表．
5) 大島弘光・他，2017．準リアルタイム火山防災情報表示システムの開発(要旨)．日本火山学会秋季大会，P-130，ポスター発表．
6) 山田浩之・他，2019．噴石衝突に対する木造建築物屋根の簡易構造補強．火山，vol. 64，pp. 243-251.
7) 山元孝弘・他，2016．吸気フィルタの火山灰目詰試験．地質調査総合センター研究資料集、No.629.

8) Wilson T. M. et.al., 2012. Volcanic ash impacts on critical infrastructure. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C, vol. 45, pp. 5-23.

(e) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準などへの策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3)令和３年度業務計画案

(a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

引き続き開発した周知啓発教育用コンテンツ試作版を高度化する。今年度までに行ったヒアリング調査やアンケート調査から得られたニーズや課題に対応し、本コンテンツの高度化を図るとともに、本コンテンツを使ったアウトリーチ活動に向けた準備を行う。

具体的には、今年度のヒアリング調査やアンケート調査から把握した動画コンテンツの充実や防災担当者の初任者などを対象とした動画学習コンテンツを充実させる。また、火山ごとに情報を整理して、対象とする火山の情報を容易に調べることができるようにするとともに、防災担当者が課題としている避難確保計画策定に資する形に整備する。一方、本コンテンツを広く日本国内の防災担当者に周知するためのアウトリーチ活動を行い、本コンテンツのさらなるニーズや課題をアンケート調査などから把握する。

また、本業務で開発する３つのコンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、今年度の調査データを詳細に分析するとともに、ヒアリングおよび研究者を集めた研究会等を実施する。

(b) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

これまでに開発してきた降灰被害予測コンテンツ試作版を高度化する。現試作版は平成29年度及び平成30年度に実施した建築設備を対象とした降灰影響評価実験の成果を基に、降灰による建築物の損傷・被害に関する降灰深の閾値を設定し地図上で他の情報と重ねて表示できるようにしたものである。本年度は建物のフィルタを対象とした降灰実験を実施し、被害に関する閾値を検

討した。

来年度は降灰による屋根への影響をより分かりやすい形で提供すべく、実際の建物例をもとに検討し安全性評価を具体的に示す。また都市部における積灰評価に資するため、数値シミュレーションにより建物が降灰や積灰分布にどのような影響を及ぼすかの基礎的な検討を行い、都市への降灰シミュレーションへの展開を検討する。さらに、これまで実験による建物空調設備およびフィルター被害の結果をまとめ、建物機能被害の損傷曲線を提案するとともに、過去の被害事例に基づく都市機能被害の損傷曲線と組み合わせることで、機能被害を明示し都市部への降灰被害予測コンテンツを改善する。

また、将来の噴火が予想される伊豆大島火山を対象に、過去1500年間の主要噴火の降灰データをもとに、伊豆大島島内の主要拠点施設や道路での降灰ハザード曲線を作成し、上記の損傷曲線を考慮しながら、避難対策に役立つ情報コンテンツを検討する。

(c) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

来年度は、富士山、御嶽山、那須岳で実施した登山者動向把握実験で昨年度までに得られた登山者データを、令和元年度に開発した、GIS上で他の地図情報と併せて登山者の簡易的な曝露評価を行うための可視化ツールを改修する。この、改修版の可視化ツールを使い、3火山周辺の自治体及び火山防災協議会と実験の結果を共有し、結果の防災利用（訓練シナリオへの利用、避難計画等の見直しにおける被害想定の把握など）について検討を行う。

また、富士山、御嶽山、那須岳において取得した登山者データから、仮想的な場所と時間帯における噴火を想定した場合に、より効率的で迅速な避難や救助法が数値解析シミュレーションで可能かどうかを検討する。

さらに、今年度に引き続き、避難計画の作成や避難・救助活動において重要な施設である退避壕（シェルター）等の耐衝撃性を評価するために、模擬火山岩塊を使用した衝突実験を実施する。今年度は建築物への衝撃力緩和を目的とした耐衝撃性能の補強方法について検討を行う。

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・リーダーが緊急観測の実施を決定した際は、(a)～(c)で実施する調査及び情報収集について、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．会議録

【課題Ｄ全体】

日　時：2020 年 11 月 11 日午後 3 時～５時
場　所：かごしま市民福祉プラザ 中会議室（鹿児島市）
議　事：

- 今年度の業務進捗
- 来年度の業務計画
- 課題間の連携

【サブテーマ１】

日　時：2020 年 7 月 27 日
場　所：アジア航測株式会社
議　事：

- 伊豆大島の実証実験の打ち合わせ
- RTK-GNSS 搭載 UAV に関する打ち合わせ

日　時：2020 年 10 月 28 日
場　所：アジア航測株式会社
議　事：

- 実証実験で取得したデータ解析に関する打合せ

日　時：2021 年 1 月 28 日
場　所：アジア航測株式会社
議　事：

- 来年度の業務計画

【サブテーマ２】

日　時：2020 年 8 月 24 日
場　所：京都大学防災研究所火山活動研究センター
議　事：

- ドローンによる風速場観測と実験の打ち合わせ

・ 風速場取り込みに関する打ち合わせ

日　時：2020 年 12 月 9 日
場　所：京都大学防災研究所火山活動研究センター
議　事：

・ GNSS データ解析による噴煙検知に関する打ち合わせ

日　時：2021 年 3 月 15 日
場　所：Zoom による開催
議　事：

・ 火山灰拡散シミュレーションのレーダーデータ同化への検討

日　時：2021 年 3 月 30 日
場　所：京都大学防災研究所火山活動研究センター
議　事：

・ レーダーを用いた噴煙検知の定量化について今後の進め方の検討

【サブテーマ３】
日　時：2020 年 11 月 4 日
場　所：Zoom による開催
議　事：今年度の業務進捗

・ 今年度の残りの業務予定
・ 来年度の業務計画

日　時：2021 年 2 月 2 日
場　所：Zoom による開催
議　事：

・ 来年度実施計画概要
・ 配分額の調整

４． むすび

本研究課題では、火山災害に対応するため、リアルタイムで噴火の状況を把握するとともに、そのデータを迅速に解析し、その後の推移予測とハザード・被害評価、さらには対策に資する情報の提供までを一連で行う技術を開発している。本プロジェクトも前半の５年を本年度で終え、後半の５年間に突入する。そこでは各課題がこれまでの開発の準備から、開発した技術の高度化と実装に向けての取り組みにグレードアップすることとなる。

令和２年度は、サブテーマ1においては、伊豆大島でRTK-GNSS搭載UAVを用い、基準点を設置せずに３Ｄモデルを作成する方法を研究した。地上基準点で補正した手法と比較すると、火口周辺では10m程度、溶岩流では40～50cm程度のずれが生じており、引き続き計測方法については検証が必要である。また、伊豆大島の噴火警戒レベル３「カルデラ内および山頂火口から約２kmまでの範囲への立入規制」が発表された場合にも、立ち入り禁止範囲外から撮影できることを確認した。さらに、高精度な三次元モデルを短時間で作成する精度と処理時間を、SfM/MVS計算に特化した専用機器と、汎用PC及び市販ソフトウェアとを比較した。その結果、専用機器を用いて低精度だが迅速に三次元モデルを作成し、平行して汎用PC及び市販ソフトウェアを用いて高精度の三次元モデルを作成することが望ましいと結論された。今後、RTK-GNSS搭載UAVを用いて、安全を確保しつつ、３Ｄモデルの精度を向上させる技術開発とSfM/MVS計算時間をさらに短縮させる手法検討が必要である。

サブテーマ２においては、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た。X バンド MP レーダーよる噴煙観測が実用的な段階になったといえる。また、ディスドロメータによる粒径分布把握をリアルタイム降灰量のデータとすることができる段階に達するとともに、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。すなわち、ライダー、レーダー、GNSS を用いたリモートセンシング観測を統合した観測により、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。また、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発のためのデータベースを整備した。その中で、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となった。さらに、火山灰拡散シミュレーションでは、山頂を超えた風下側の鉛直運動や鉛直シアー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。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。

サブテーマ３においては、３つのコンテンツ試作版を高度化した。すなわち、周知啓発教育用コンテンツ試作版では、実際に試作版を試用した上での潜在的なニーズや課題に対応するべく開発を進め、高度化を図った。降灰被害予測コンテンツ試作版では、建物に対する影響を評価するうえで重要となる換気用エアフィルタを対象にした降灰影響評価実験を実施し、フィルタの物理的な損傷が発生するまでに、降灰深に関して裕度があることが分かった。また、複数の自治体に対して、火山灰対策に関するオンラインでの実務者勉強会を実施し、火山灰対応や対策に必要な情報、研究者へのニーズを把握した。さらに、本コンテンツによる情報発信の在り方を検討す

るために、一般住民（登山者）を対象として、ネットを利用した火山現象の認知度や大規模降灰に関するアンケート調査を実施し、本プロジェクトからの情報発信において考慮すべき課題が抽出された。もう一つの避難・救助支援コンテンツ試作版では、那須岳において登山者動向把握実験を実施し、得られた登山者の動態データを可視化し、周辺自治体の防災担当者らに試用してもらい、データの防災利用について検討を進めた。

このように各サブテーマは、本プロジェクト前半終了の５年目の成果は概ね目標を達成してきており、」サブテーマ２では後期目標の一部もすでに実施している。また、本課題内における関連や他課題および人材育成コンソーシアムとの連携についても配慮した研究がなされた。

様式第２１

学　会　等　発　表　実　績

委託業務題目「課題Ｄ：火山災害対策技術の開発
サブテーマ：「無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発」」

機関名:アジア航測株式会社

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
UAVを用いて作成した地形モデルの精度向上について　-三原山山頂火口を対象に-、ポスター発表	森 貴章、三浦 俊介、望月 拓実、成毛 志乃、野中 秀樹、佐々木 寿、荒井 健一、藤田 浩司、浦山 利博、千葉 達朗	JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月	国内
活火山の火口周辺の地形計測の高精度化に関する諸問題	千葉 達朗、佐々木 寿、荒井 健一、森 貴章、望月 拓実、三浦 俊介、藤田 浩司、浦山 利博、野中 秀樹、佐野実可子、成毛 志乃	JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月	国内
火山噴火と緊急撮影について	千葉 達朗	火山防災特別セミナー	2020年10月	国内
噴火中の火口地形計測に関する諸問題－伊豆大島三原山の火口をUAVで探る－	千葉 達朗	桜島火山60周年記念研究集会	2020年11月	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
3.3.2測量分野におけるドローンの応用と利活用事例　〔4〕UAV撮影による加工の３次元モデル作成	浦山 利博	続・ドローン産業応用のすべて: 進化する自律飛行が変える未来(オーム	2020年8月	国内

様式第２１

学　会　等　発　表　実　績

委託業務題目「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

機関名京都大学　防災研究所

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 （学会等名）	発表した時期	国内・外の別
落下速度観測から推定された桜島ブルカノ式噴火の降下火山灰の噴煙分離高度分布（口頭）	瀧下恒星・井口正人・Poulidis Alexandros P・園田忠臣	地球惑星科学連合大会	2020年7月	国内
Xバンド船舶レーダを用いた火山噴石の検出実験（口頭）	真木雅之・西隆昭・中谷 剛・Kim Yura・小堀壮彦・徳島秀彦・藤吉康志・為栗健・井口正人・遠藤寛治・海賀和彦	地球惑星科学連合大会	2020年7月	国内
Detection of the volcanic plume by 19 February 2018 eruption of Mount Sinabung deduced from GNSS post-fit phase residual analysis（口頭）	太田雄策・井口正人・Gunawan Hendra・Umar Rosadi・Estu Kriswati	地球惑星科学連合大会	2020年7月	国内
桜島火山での噴煙成長過程定量化の試み（口頭）	山田大志・井口正人・藤田英輔	地球惑星科学連合大会	2020年7月	国内
ディスドロメーターによる降灰観測（口頭）	佐藤英一・井口正人	地球惑星科学連合大会	2020年7月	国内
GPS 搬送波位相遅延量を利用した噴煙検知－2013年8月18日桜島噴火の解析－（口頭）	朝倉由香子・西村太志・太田雄策 加納将行・井口正人	日本火山学会秋季大会	2020/10/9	国内
二次元ビデオディスドロメーターによる降灰観測 （初期解析結果）（口頭）	佐藤英一・瀧下恒星 井口正人	日本火山学会秋季大会	2020/10/9	国内
2波長偏光ライダーによる桜島火山灰の通年観測（口頭）	清水厚・井口正人・中道治久	日本気象学会2020年秋季大会	2020/10/30	国内
桜島火山でのディスドロメータによる降灰量のリアルタイム観測（口頭）	瀧下恒星・井口正人・Poulidis, A.P.	京都大学防災研究所　研究発表講演会	2021/2/24	国内

加速度センサと角速度センサを用いた噴石模型の落下運動の測定（口頭）	劉美智・丸山敬・佐々木寛介・井上実・井口正人・藤田英輔・西村宏昭	京都大学防災研究所　研究発表講演会	2021/2/24	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Control of vent geometry on the fluid dynamics of volcanic plumes: Insights from numerical simulations	Suzuki, Y. J., Costa, A., Koyaguchi, T.	Geophysical Research Letters	2020年4月	国外
PUFF Model Prediction of Volcanic Ash Plume Dispersal for Sakurajima Using MP Radar Observation	Hiroshi L. Tanaka,Haruhisa Nakamichi and Masato Iguchi	atmosphere	2020年11月	国外
A Computational Methodology for the Calibration of Tephra Transport Nowcasting at Sakurajima Volcano, Japan	Alexandros P. Poulidis,Atsushi Shimizu,Haruhisa Nakamichi and Masato Iguchi	atmosphere	2021年1月	国外
High-Resolution Modeling of Airflows and Particle Deposition over Complex Terrain at Sakurajima Volcano	Tetsuya Takemi,Alexandros P. Poulidis and Masato Iguchi	atmosphere	2021年3月	国外
Seasonal Variations of Volcanic Ash and Aerosol Emissions around Sakurajima Detected by Two Lidars	Atsushi Shimizu,Masato Iguchi and Haruhisa Nakamichi	atmosphere	2021年3月	国外
Tephra4D: A Python-Based Model for High-Resolution Tephra Transport and Deposition Simulations—Applications at Sakurajima Volcano, Japan	Kosei Takishita,Alexandros P. Poulidis and Masato Iguchi	atmosphere	2021年3月	国外

In Situ, Rotor-Based Drone Measurement of Wind Vector and Aerosol Concentration in Volcanic Areas	Kansuke Sasaki,Minoru Inoue,Tomoya Shimura and Masato Iguchi	atmosphere	2021年3月	国外
Integrated study on forecasting volcanic hazards of Sakurajima volcano, Japan	Iguchi, M., Nakamichi, H., Tameguri, T.	Journal of Disaster Research	2020年3月	国内
Model sensitivities in the case of high-resolution Eulerian simulations of local tephra transport and deposition	Poulidis, A. P., Iguchi, M.	Atmospheric Research	2021年1月	国外
Analyses of Three-dimensional Weather Radar Data from Volcanic Eruption Clouds	Masayuki Maki, Yura Kim, Takehiko Kobori, Kohin Hirano, Dong-In Lee, Masato Iguchi	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2021年3月	国外

（注１）発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。
（注２）本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「課題D3：火山災害対策のための情報ツールの開発」

機関名　防災科学技術研究所

1．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）		発表者氏名	発表した場所 （学会名等）	発表した時期	国内・外の別
火山における登山者動向・動態データの防災利用	ポスター	宮城洋介、中田節也、吉本充宏、久保智弘、本多亮	地球惑星科学連合2020大会（オンライン）	2020年7月	国内
火山における登山者動向・動態データの防災利用	ポスター	宮城洋介, 中田節也, 吉本充宏, 久保智弘, 本多亮	地球惑星科学連合2020大会（オンライン）	2020年7月	国内
防災担当者を対象とした試作版周知啓発用コンテンツの開発	口頭	久保智弘, 吉本充宏, 堀内佑紀, 本多亮, 石峯康浩, 宮城洋介	地球惑星科学連合2020大会（オンライン）	2020年7月	国内
冷却塔を対象にした降灰実験	ポスター	大塚 清敏、野畑 有秀、諏訪 仁、久保 智弘、宮城 洋介、中田 節也、宮村 正光	地球惑星科学連合2020大会（オンライン）	2020年7月	国内
草津白根山2018年噴火による火口近傍の被害調査について	口頭	久保智弘, 吉本充宏	2020年度日本建築学会大会	2020年9月	国内
都市機能に影響を及ぼす降灰被害の調査	口頭	野畑 有秀、諏訪 仁、大塚 清敏、久保 智弘、宮村 正光、宮城 洋介	2020年度日本建築学会大会	2020年9月	国内
降灰荷重による建物屋根の被害確率関数	口頭	諏訪 仁、野畑 有秀、大塚 清敏、久保 智弘、宮村 正光、宮城 洋介	2020年度日本建築学会大会	2020年9月	国内
建物設備の外気取入れへの火山灰流入に関する考察	口頭	大塚 清敏、野畑 有秀、諏訪 仁、久保 智弘、宮村 正光、宮城 洋介	2020年度日本建築学会大会	2020年9月	国内
火山ハザードマップを用いた曝露評価	ポスター	河野裕希、宮城洋介、藤田英輔、岩井一朗、高橋佳子、中田節也	火山学会2020秋季大会(オンライン)	2020年10月	国内
富士北麓地域における学校での火山防災教育について～教員を対象としたアンケート調査結果～	口頭	久保智弘, 吉本充宏, 藤巻圭吾, 古屋和仁, 宮城洋介	日本火山学会2020年度秋季大会（オンライン）	2020年10月	国内
パソコンを対象とした降灰の影響に関する予備実験	ポスター	久保智弘, 吉本充宏, 宮城洋介	日本火山学会2020年度秋季大会（オンライン）	2020年10月	国内
Current state and future goals of reseach on volcanic disaster in Japan	ポスター	Setsuya Nakada, Eisuke Fujita, Yuichi Morita, Fukashi Maeno	American Geophysical Union Fall Meeting（オンラン）	2020年12月	国外

2．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
拡張現実を用いた富士山火山ハザードマップ	小檜山 雅之, 赤堀 竜海, 吉本 充宏, 久保 智弘	地域安全学会論文集	2020年9月	国内
火山岩塊による火口近傍建物被害と即時被害調査用シートの開発	久保智弘、吉本充宏	日本建築学会技術報告集	2020年10月	国内
Subsurface Resistivity Imaging of Nasudake (Chausudake) Volcano Determined from Time Domain Electromagnetic Survey (TDEM)	Toshikazu Tanada & Yoichi Nakamura	Journal of Disaster Research, 15, 735-744	2020年10月	国内(国際誌)
火山噴火の降灰による建物被害評価法	諏訪　仁,大塚清敏, 野畑有秀	大林組技術研究所報 No.84,2020	2020年12月	国内
空調室外機および冷却塔の降灰実験	大塚清敏, 野畑有秀, 諏訪仁, 久保智弘, 宮村正光, 宮城洋	日本建築学会技術報告集	2021年2月	国内
火山災害のリスク評価を活用した火山防災	中村洋一、河野裕希、棚田俊收	防災科学技術研究所　研究報告	2021年2月	国内
那須岳地域の新たな火山防災に向けて－噴火シナリオとリスク評価の検証結果から－	中村洋一、鈴木美香、棚田俊收	防災科学技術研究所　研究報告	2021年3月	国内

（注1）発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。

（注2）本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。