

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3年度
成果報告書

令和4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、文部科学省の令和3年度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3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。

グラビア

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

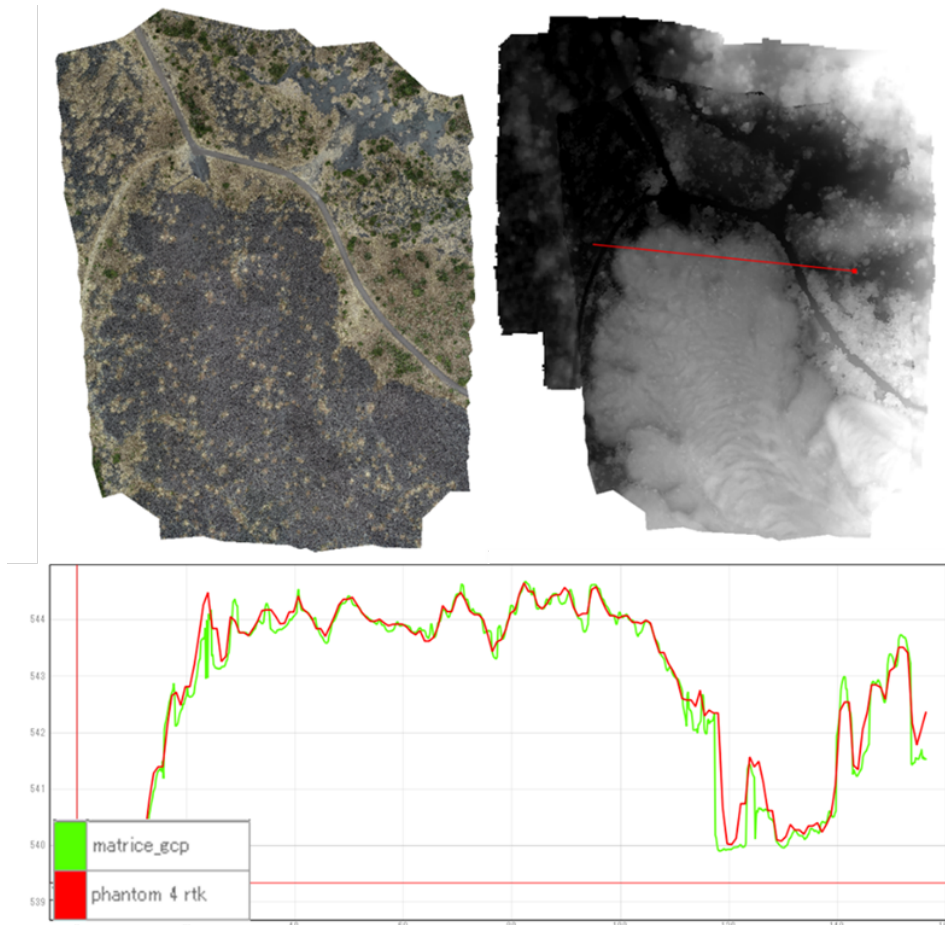


図 1 従来の UAV (Matrice210) と RTK-GNSS 搭載 UAV (Phantom4-RTK) の断面比較

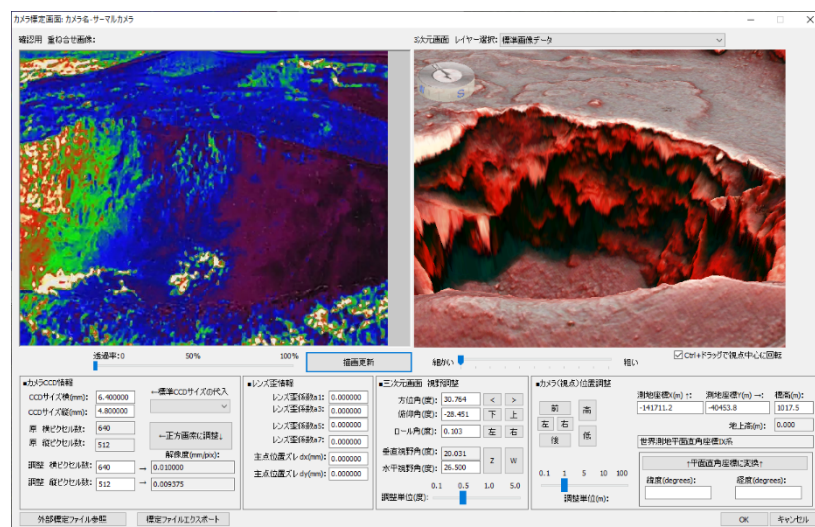


図 2 熱赤外画像および UAV から取得した情報を利用した単写真標定

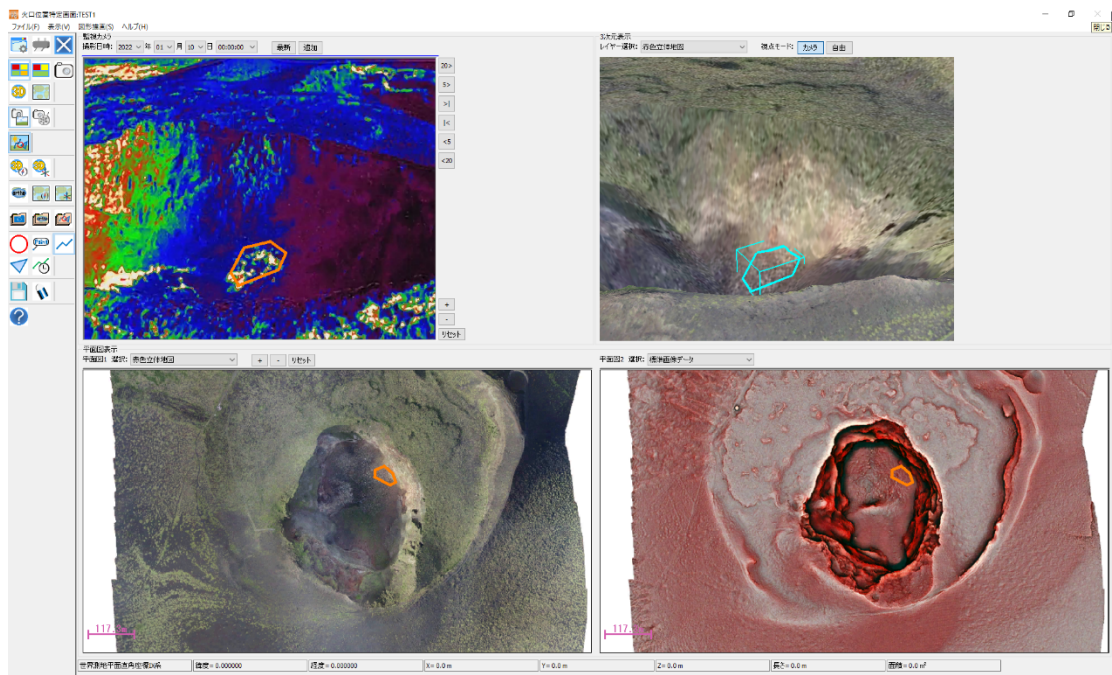


図 3 熱赤外面像と既存の DEM を用いた簡易計測

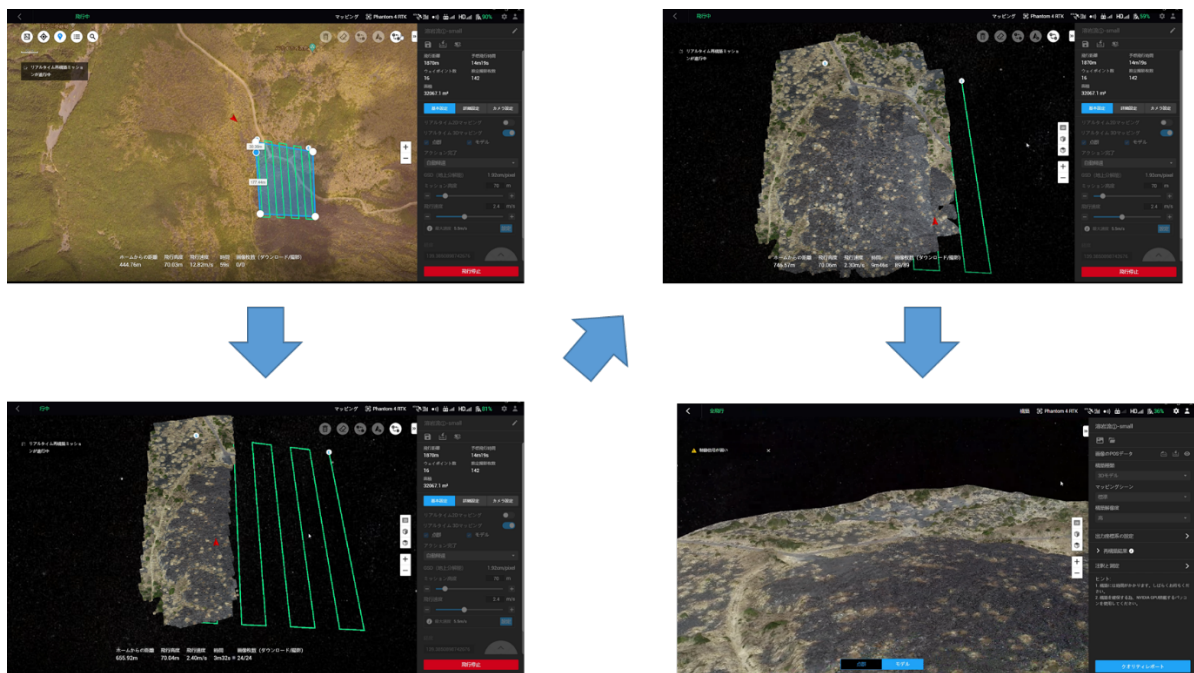


図 4 リアルタイム 3D マッピングの例

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

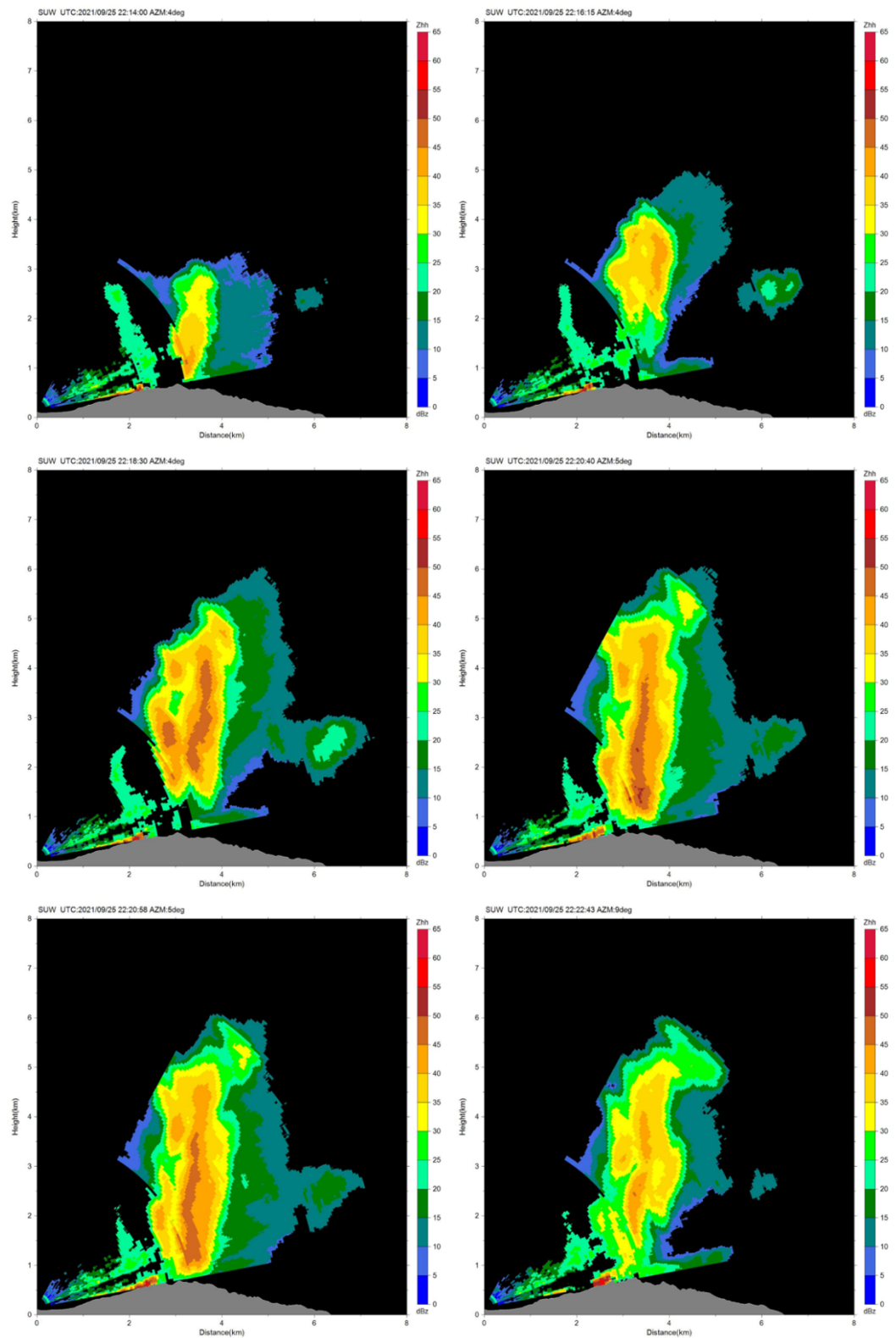


図5 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2021 年 9 月 26 日 7:14~7:23 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

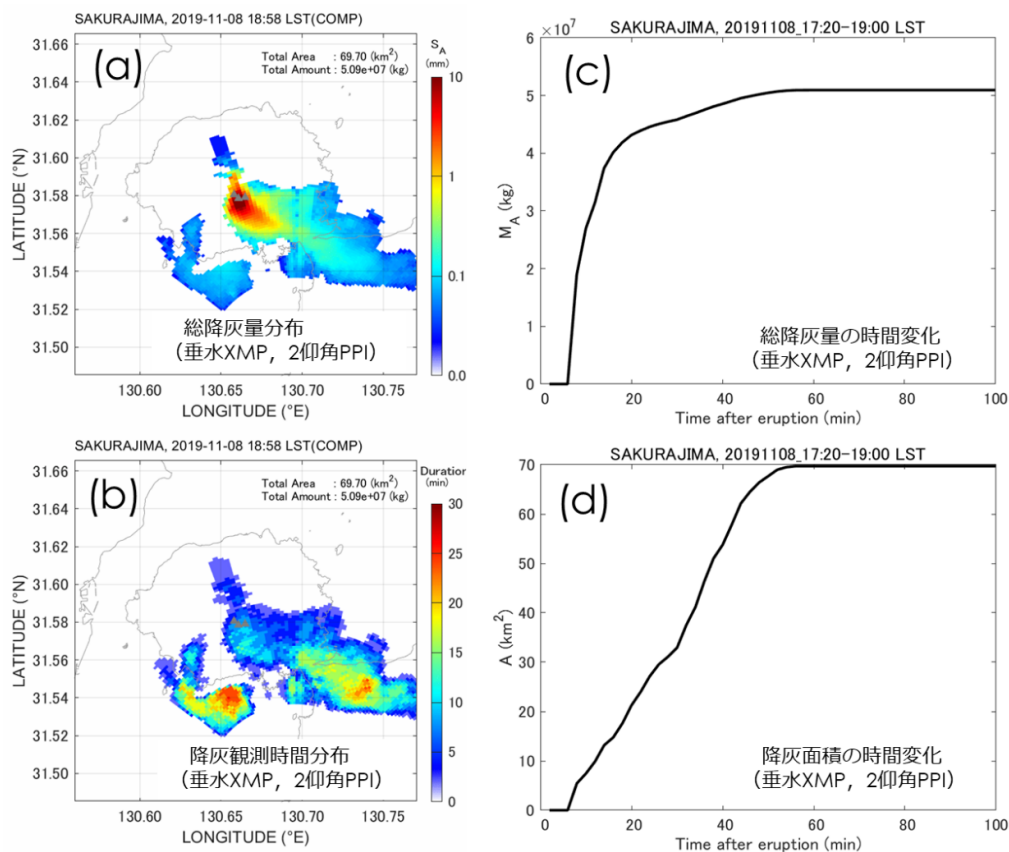


図6 国土交通省垂水 X バンド MP レーダから求めた降灰情報。(a)積算降灰量分布 (b)降灰観測時間分布、(c)総降灰量の時間変化、(d)総降灰面積の時間変化。2019 年 11 月 8 日の噴火事例。

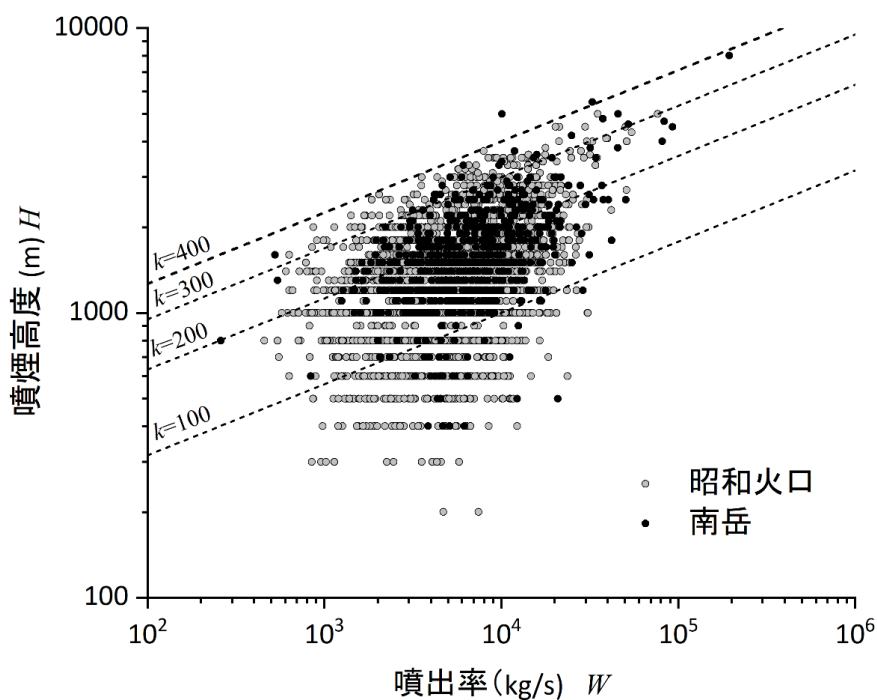


図7 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。係数 $k=100$ 、 200 、 300 、 400 とした。

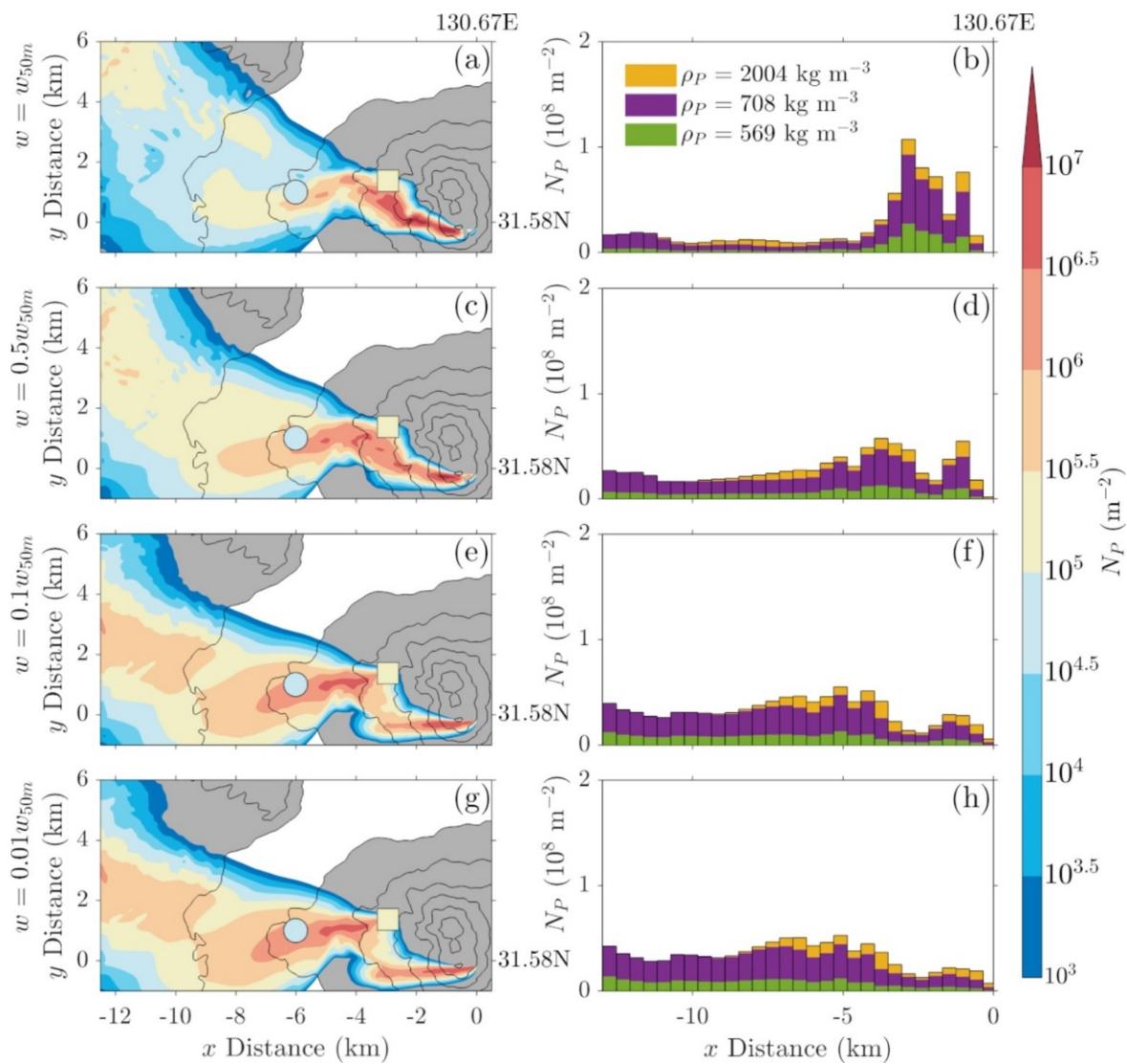


図8 FALL3D による数値シミュレーションで得られた降灰量の分布（左列）および南北方向に積算した降灰量の東西分布（右列）。火山灰の降下速度に及ぼす鉛直速度のスケールリングパラメータを変化させた4通りのケースの結果を示す。(a) (b) スケールリングパラメータが1の場合、(c) (d) スケールリングパラメータが0.5の場合、(e) (f) スケールリングパラメータが0.1の場合、(g) (h) スケールリングパラメータが0.01の場合。左列図中の四角印はディストロメータの設置点、丸印は桜島火山観測所の位置を示す。右列では、異なる粒子密度を仮定した場合の結果を示す。

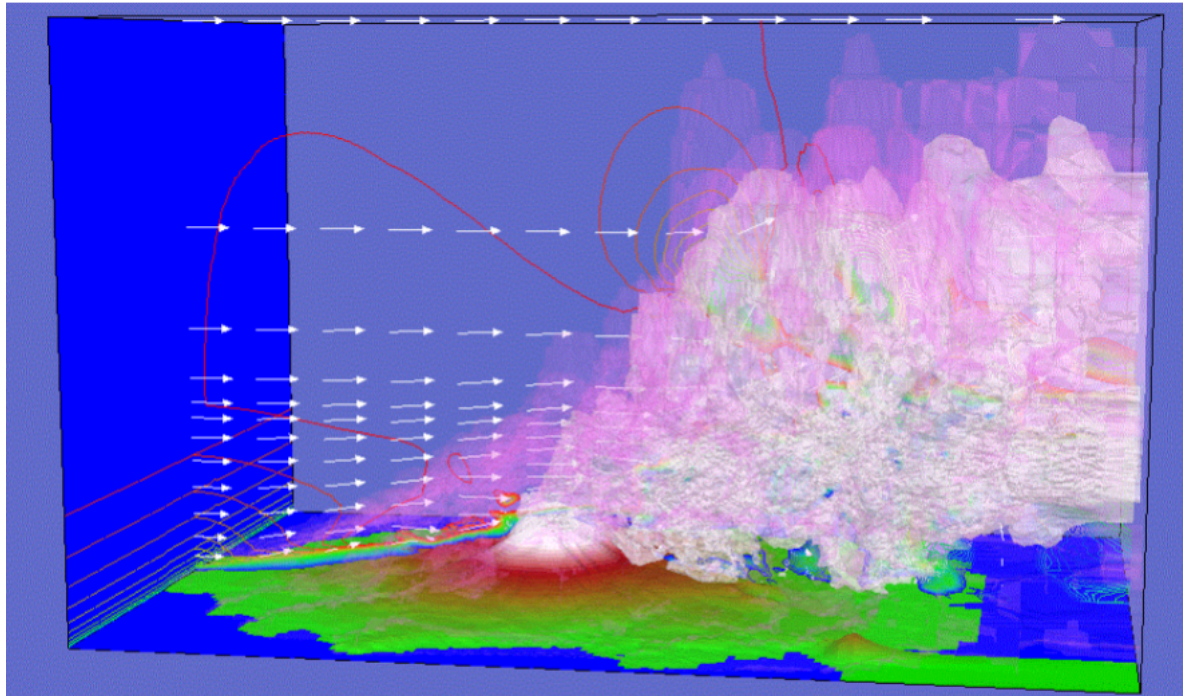


図9 周囲の大気が不安定な場合の噴煙の移流・拡散状況。流入：風速 1m/s (1/7 勾配、乱れなし)、温度 (勾配 0) 噴流：温度+20K、0.1m/s。白色の等値面は火山灰の分布を、薄桃色の等値面は温度の分布を表す。

サブテーマ3 火山災害対策のための情報ツールの開発

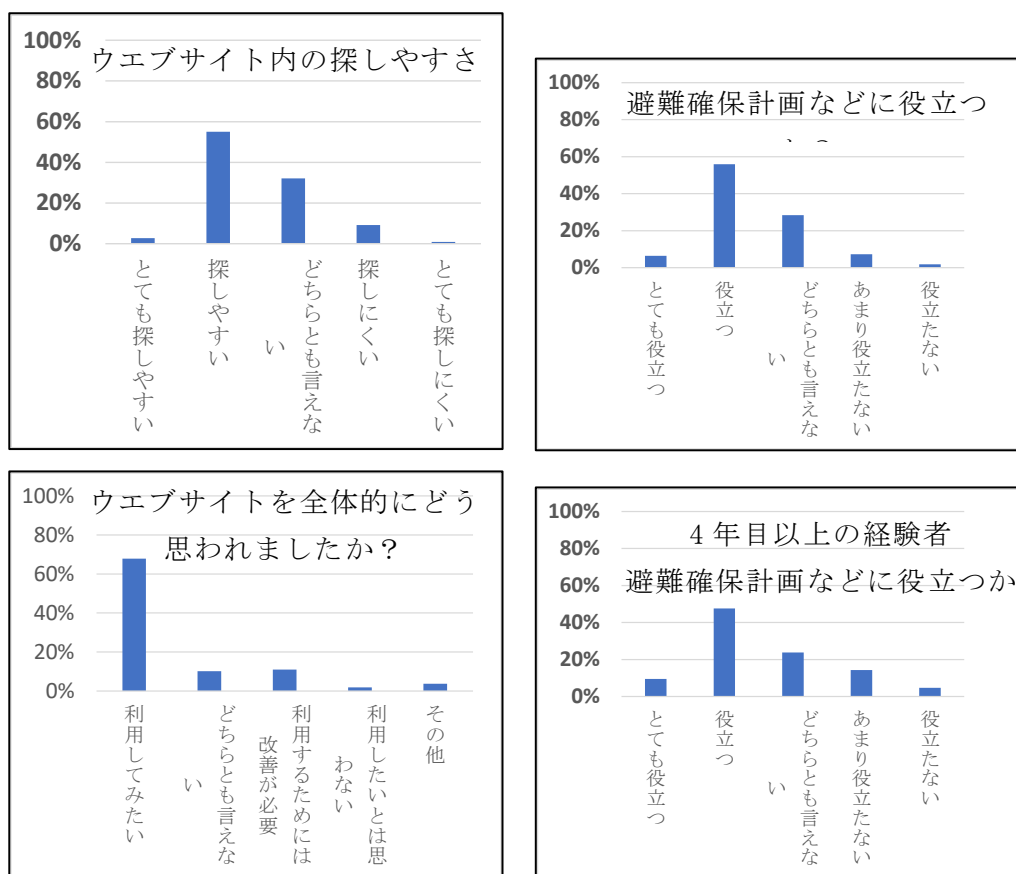
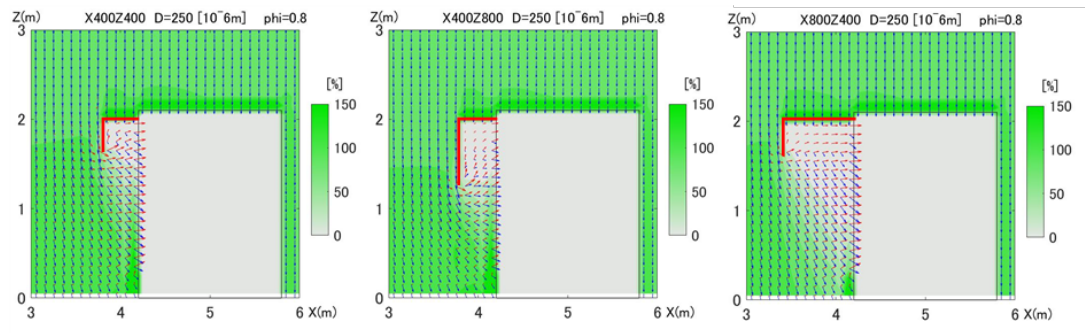


図10 周知啓発教育用コンテンツ施策版ウェブサイト（ポータルサイト）に関する自治体担当者へのアンケート結果。



図11 周知啓発教育用コンテンツ試作版における火山灰走行実験の動画コンテンツ



(タイプ A)

(タイプ B)

(タイプ C)

図 12 冷却塔にフード状簡易カバーがある場合の降灰シミュレーション。気流速度ベクトル（赤）、粒子速度ベクトル（青）、および、火山灰無次元濃度分布を示す。冷却塔中心を通る断面内。粒径 $250 \mu\text{m}$ 、球形度 0.8。

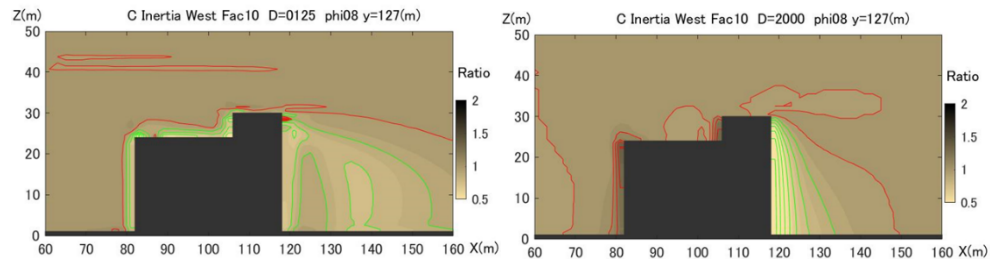


図 13 降灰の建物影響のシミュレーション結果、粒径および風向による浮遊火山灰（無次元）濃度の比較（塔屋鉛直断面）。風は左側から 5m/s を仮定。濃度の等値線は間隔が 0.1 で、1.0 以上は赤、1.0 未満は緑。風速 5m/s 。（左）粒径 $125 \mu\text{m}$ 、（右）粒径 $2000 \mu\text{m}$ 。

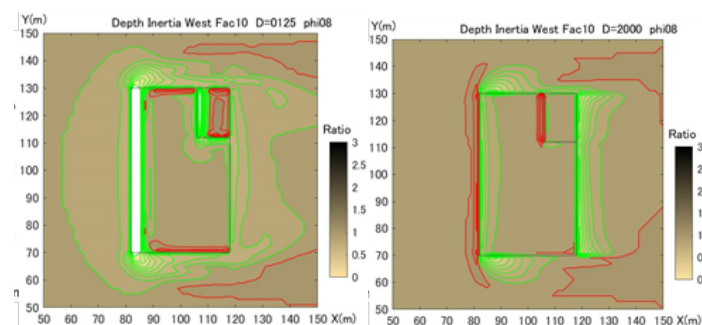


図 14 降灰の建物影響シミュレーション（同上）における、屋上および地面の無次元降灰深分布（平面図）。等値線は間隔が 0.1 で、1.0 以上は赤、1.0 未満は緑である。（左）粒径 $125 \mu\text{m}$ 、（右）粒径 $2000 \mu\text{m}$ 。

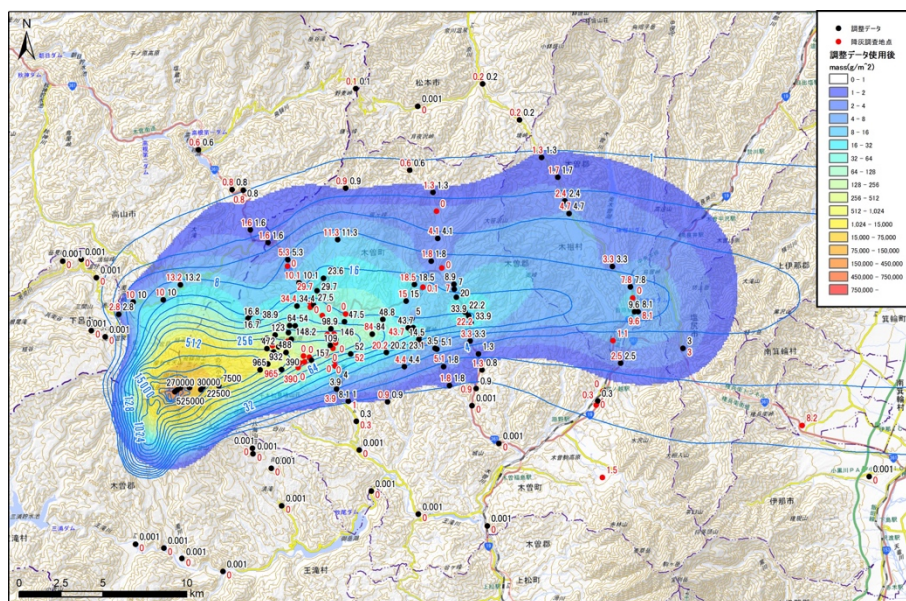


図 15 離散型降灰データから自動化システムで作成された御嶽山 2014 年噴火の等重量線図。薄青線は御嶽山降灰調査班（2014）が作成した等重量線図。



写真 1 富士山麓で実施された火山灰上走行実験。（上）カーブコースでの侵入速度の違い。（左下）牽引試験の様子。（右下）スコリア 30 cm コースにおけるスタック状態。

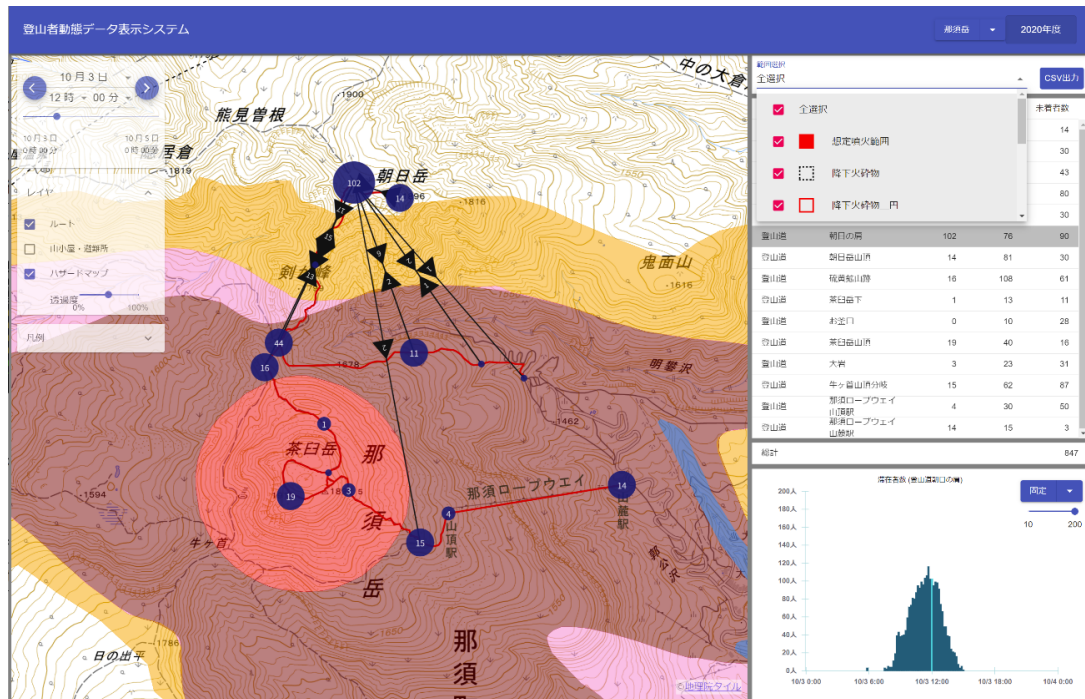


図 16 避難・救助支援コンテンツ試作版の可視化ツールによって、2020 年に那須岳で取得された登山者データの一部を表示したもの。ハザードマップによるハザード情報もレイヤー表示し、登山者データとの空間解析（ハザード範囲に何人の登山者がいるかの簡易的な曝露評価）が可能となった。

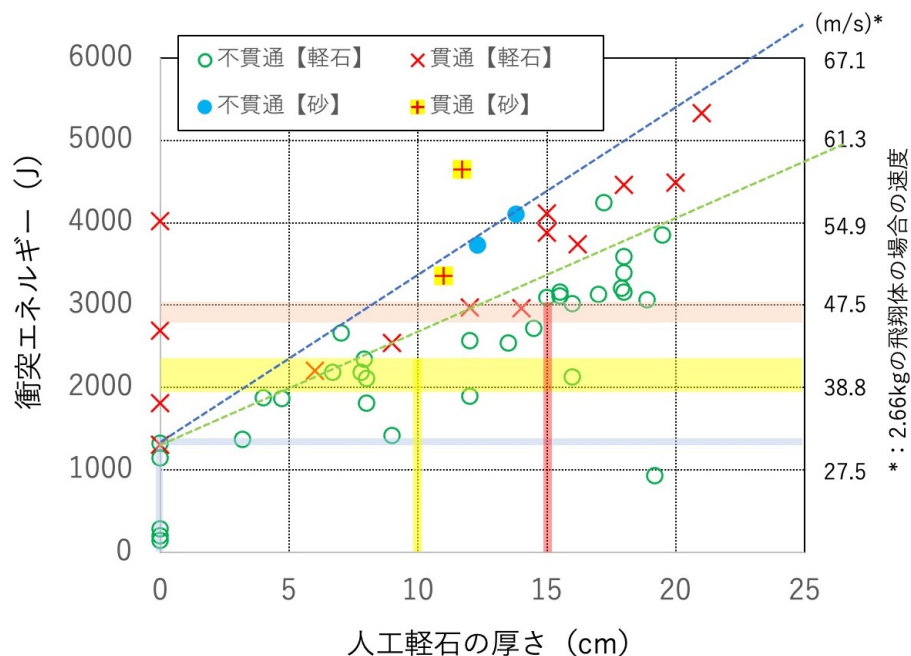


図 17 退避壕（シェルター）等の耐衝撃性に関して、人工軽石と砂を設置した木造試験体の実験結果。砂の層厚も同横軸で示した。青灰色、黄色、ピンクの横線は、それぞれ、杉板 1 枚の基本構造、杉板スタッカード構造、杉板クロス構造が吸収する衝突エネルギーレベル。

はじめに

2021 年度は、比較的海洋で起きた噴火が目立った。2021 年 8 月に小笠原海域、福岡ノ場において発生した噴火により、大量の軽石が南西諸島や本州南岸などに漂着し大きな社会問題を引き起こした。また、2022 年 1 月には、南太平洋のフンガトンガ＝フンガハーパイで巨大噴火が発生し、爆発に伴った強い大気振動により日本を含む太平洋沿岸一帯で気象津波が発生した。いずれも海域で発生した規模の大きい噴火であり、火山の近くに観測点が存在しないため、噴火の前兆や推移についてはきちんと捉えられていない。前者の福岡ノ場の噴火は火山爆発指数（VEI）4 と提案され、日本では、1929 年の北海道駒ヶ岳の噴火（VEI 4）や 1924 年の西表島北北東の海底噴火（VEI 5）以来、経験したことの無い大きな噴火であった。

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ものであり、想定される噴火のハザードやリスクをきちんと考慮する仕組みにはまだなっていない。本来は、活動評価からの直結ではなく、ハザード評価やリスク評価をきちんと経た上で、住民の生活や財産を守るための安全な対策をとるのが好ましい姿である。そのためには、日本の観測経験のない規模の大きな噴火も考慮し、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、噴火ハザードやリスクに関する情報を、本プロジェクトで開発した成果として提供できることが望ましい。

本課題 D では、火山災害に対応するため、リアルタイムで噴火状況を把握するとともに、そのデータを迅速に収集・解析し、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を一連で行う技術を開発する。防災関係機関がこれらの情報を、現行の噴火警戒レベルに加味して、防災対策に生かすという連携が可能となる。それには、噴火の観測・予測結果から、火山の状態がどのようにあり、今後どのように展開する可能性があるのか、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

1. 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	1
(b) サブテーマ 1	1
(c) サブテーマ 2	2
(d) サブテーマ 3	4
(2) 研究実施日程	5
(a) サブテーマ 1	5
(b) サブテーマ 2	5
(c) サブテーマ 3	6
2. 研究成果の説明	7
2. 1 サブテーマ 1	7
(1) 業務の内容	7
(a) 業務題目	7
(b) 担当者	7
(c) 業務の目的	7
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	8
(e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法	9
(2) 令和 3 年度の成果	11
(a) 業務の要約	11
(b) 業務の成果	11
(c) 結論	28
(d) 引用文献	29
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	29
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	29
(3) 令和 4 年度の業務計画案	29
(a) プロジェクトの総合推進	29
(b) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化	29
(c) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発	30
(d) SfM/MVS 計算時間の短縮	30
2. 2 サブテーマ 2	31
(1) 業務の内容	31
(a) 業務題目	31
(b) 担当者	31
(c) 業務の目的	31
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	32
(e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法	33
(f) プロジェクトの総合推進	33

(2) 令和3年度の成果	36
(a) 業務の要約	36
(b) 業務の成果	36
(c) 結論	128
(d) 引用文献	128
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	130
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	130
(2) 令和4年度の業務計画案	131
(a) 業務計画、実施方法	131
(b) 目標とする成果	133
2. 3 サブテーマ3	134
(1) 業務の内容	134
(a) 業務題目	134
(b) 担当者	134
(c) 業務の目的	134
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	135
(e) 令和3年度における成果の目標及び業務の方法	137
(3) 令和3年度の成果	138
(a) 業務の要約	138
(b) 業務の成果	139
(c) 結論	192
(d) 引用文献	192
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	193
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	193
(4) 令和4年度の業務計画案	194
(a) 業務計画、実施方法	194
(b) 目標とする成果	195
3. 会議録	196
(1) 課題D全体	196
(2) サブテーマ2	196
(3) サブテーマ3	196
4. むすび	197
別添1 学会等発表実績（サブテーマ1）	
別添2 学会等発表実績（サブテーマ2）	
別添3 学会等発表実績（サブテーマ3）	

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

(a) 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 国土保全技術部 国土保全技術部 国土保全技術部 システム開発部 システム開発部	千葉達朗 佐々木寿 野中秀樹 成毛志乃 田中利昌 江川 香 杉下七海 森 貴章 小森惇也	【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。	R3.4.1～ R4.3.31	5,858,90 8	1,352,0 55

(b) 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。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、火山灰拡散予測のための オンラインシステム開発の研 究を行い、火山灰予測を高精 度化させた。	R3. 4. 1～ R4. 3. 31	60,736,0 00	14,016, 000
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。	同上		
同・准教授	為栗 健	火山性微動観測を行い、噴出 率の見積もりを高精度化させ た。	同上		
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。	同上		
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。	同上		
同・教授	竹見哲也	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。	同上		
同・教授	丸山 敬	桜島周辺地域での気流の数値 シミュレーション手法を開発 した。	同上		
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。	同上		
同・准教授	志村智也		同上		

同・研究員	眞木雅之	レーダーの反射強度と降灰の粒径分布の関係を検討し、両者の間の理論式を導出した。	同上		
同・リサーチアシスタント	瀧下恒星	ディストロメータの観測を行い、降灰量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。	同上		
同・リサーチアシスタント	高橋龍平	超長周期地震動を用いた火山灰放出量を検討した。	同上		
以下、研究協力機関 筑波大学・生命環境科学研究科・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。	同上		
神戸大学・都市安全研究センター・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た。	同上		
東北大学・理学研究科・准教授	太田雄策	GNSS データを解析し、噴煙の空間分布を明らかにした。	同上		
東京大学・地震研究所・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。	同上		
国立環境研究所・地域環境保全領域・主幹研究員	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。	同上		
日本気象協会・部長	佐々木寛介	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。	同上		
同・技師長	井上 実		同上		
鹿児島大学・水産学部・准教授	西隆 昭	船舶レーダーによる噴煙観測を実施した。	同上		
高知大学・自然科学系理工学部門・教授	佐々浩二		同上		
北海道大学・名誉教授	藤吉康志		同上		

FRS コーポレーション・社長	徳島秀彦		同上		
-----------------	------	--	----	--	--

(c) 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
防災科学技術研究所 火山研究推進センター長	中田節也	【サブテーマ3】サブテーマ3の研究テーマを総合的に推進した。火山灰被害予測コンテンツ試作版の高度化のうち、離散型降灰データの分布図作成を行った。	R3. 4. 1- R4. 3. 31	10,679,106	2,464,409
同・副センター長	藤田英輔	避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化のうち、避難シミュレーションの可能性を検討した。	同上		
同・理事長補佐	宮城洋介	避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化のうち、動態把握のシステムを開発し、自治体に対して活用した。	同上		
同・研究員	棚田俊收		同上		
同・外来研究員	宮村正光		同上		
同・外来研究員	中村洋一		同上		
電力中央研究所・主任研究員	上澤真平	火山灰被害予測コンテンツ試作版の高度化のうち、離散型降灰データの分布図作成を行った。	同上		
山梨県富士山科学研究所・主幹研究員	吉本充宏	周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化作業、及び、火山灰被害予測コンテンツ試作版の高度化のための火山灰上走行実験のデータを取得した。また、避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化のための登山者避難小屋の強度実験を行った。	同上	9,003,072	2,077,632
同・主幹研究員	石峯康浩		同上		
同・主任研究員	本多 亮		同上		
同・研究員	久保智弘		同上		
同・研究員	西澤達治		同上		

大林組・技術研究所・上級主席技師	野畑有秀	降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化に必要な建物などの障害物による降灰影響を評価した。	R3. 4. 1- R4. 3. 31	4, 878, 80 2	1, 125, 8 77
同・上級主席技師	大塚清敏		同上		
同・主任研究員	諏訪 仁		同上		
東大情報学環・総合防災情報研究センター・特任教授	田中 淳	情報コンテンツ試作版の高度化に関連し、社会防災分野との連携研究やライフライン関係者との意見交換を実施した。	R3. 4. 1- R4. 3. 31	4, 913, 11 6	1, 133, 7 96
同・准教授	関谷直也		同上		

(2) 研究実施日程

(a) 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
プロジェクトの総合推進	←											→
RTK-GNSS搭載UAVの導入による計測精度向上と高速化				←							→	
夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発							←				→	
SfM/MVS計算時間の短縮			←									→

(b) 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	←											→

(c) 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 サブテーマ1

(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」

(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	分担機関	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	田中利昌
		国土保全技術部	江川 香
		国土保全技術部	杉下七海
		システム開発部	森 貴章
		システム開発部	小森惇也

(c) 業務の目的

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。

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して無人機（ドローン）等で取得した空域からの可視画像（サブテーマ内で取得したものに限らない）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。地形の3Dモデルを作成した場合には、A、C-3へデータ提供した上で、D-3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。

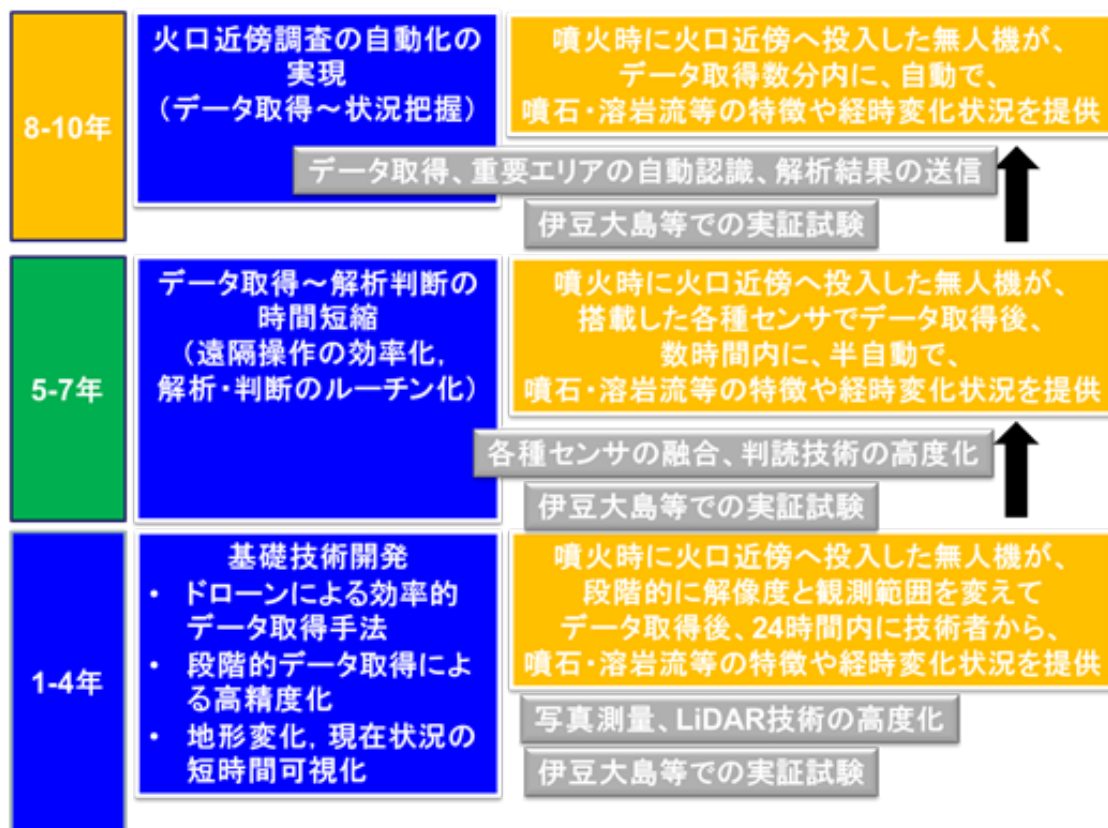


図1 本業務の全体計画

(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。

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) 平成31年度（令和元年度）：

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した。

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した。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した。

6) 令和 3 年度：

無人機（ドローン等）に搭載する機器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た。

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・改良点等を取りまとめる。

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 3 年度における成果の目標及び業務の方法

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：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。

2) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化

- 2020 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した。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た。
- 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。

3) 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。

4) SfM/MVS 計算時間の短縮

- 2020 年度は高精度の 3D 地形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た研究を行った。
- 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) 令和 3 年度の成果

(a) 業務の要約

- 伊豆大島で実証実験を実施した。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た。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た。
- 取得した斜め写真画像から写真測量技術を用いて解析する手法検討した。
- 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した。また、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した。

(b) 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 を用いた実証実験を行い、計測精度向上について検証した。

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、図に示すように、おおむね一致することが確認できた。昨年度実施した際は 40～50cm 程度のずれが生じたが、今年度は設定パラメータ等を精査して設定することで、GCP がある場合と同様の結果が得られた。

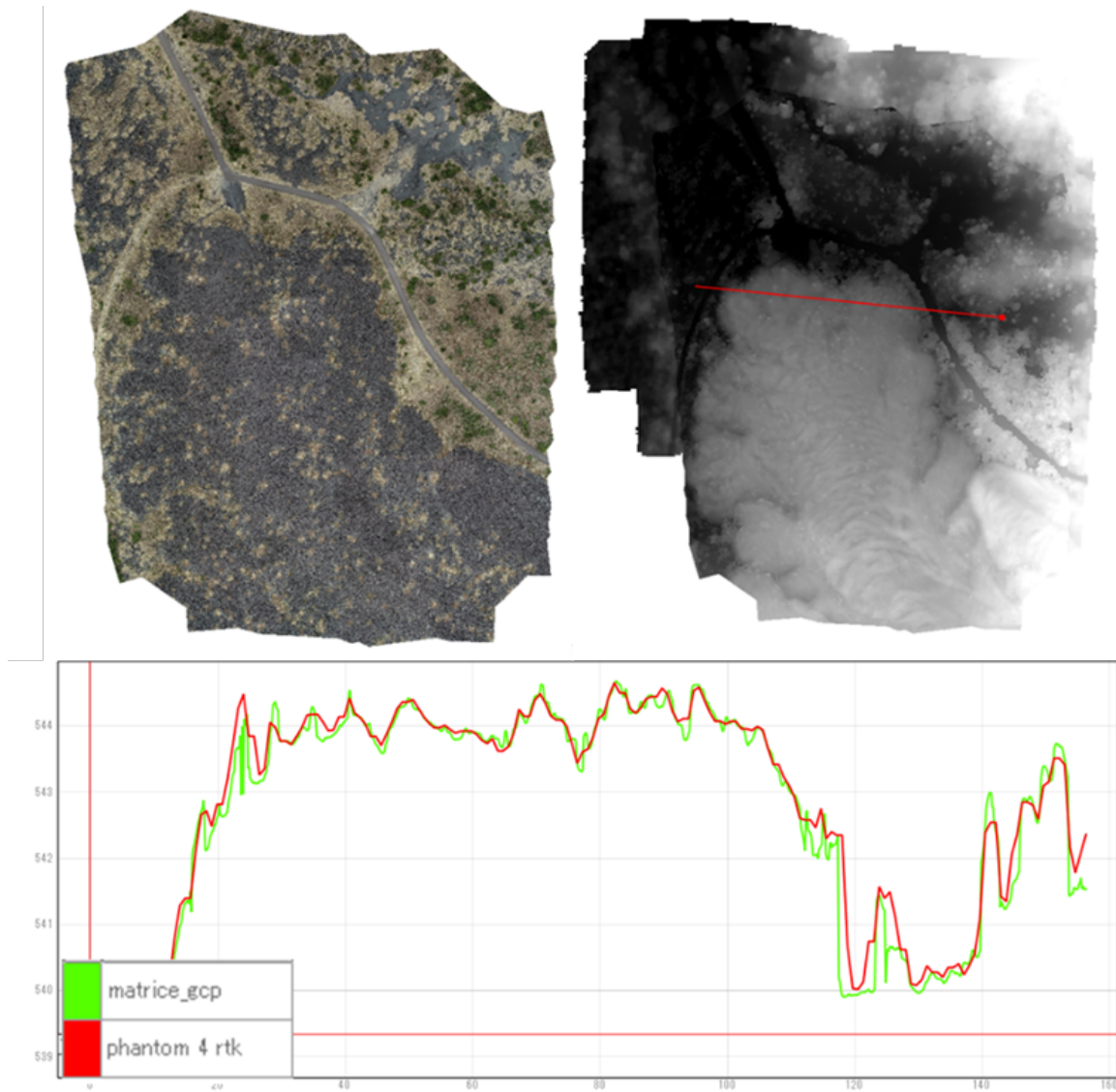


図2 従来の UAV(Matrice210)と RTK-GNSS 搭載 UAV (Phantom4-RTK) の断面比較

b) サブテーマ 3 との連携の検討

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ついて検討した。

後述する自治体へのヒアリングから、オルソ画像の体裁等は一般的なもので良いという結果を踏まえ、国土基本図（東西方向 2km、南北方向 1.5km）と同様のメッシュで分割し、画像の分解能は数 10cm、画像ファイルは TIFF 形式、位置情報ファイルは TFW として問題ないと考えられる。

また、自治体ヒアリングから、三次元データへの期待があったため、容易に閲覧できる方法を検討した。三次元データを専用ソフトではなく、Web ブラウザで閲覧できればソフトのインストールも不要で扱いやすいと考えられる。図は三次元データを Web ブラウザで表示した事例である。Web ブラウザ上に 3D データを可視化するオープンソースである Cesium を利用することで、三次元データを Web ブラウザで表示し、拡大・縮小・回転などが容易に行うことができる。オルソ画像に加え、閲覧容易な三次元データの公表も可能である。

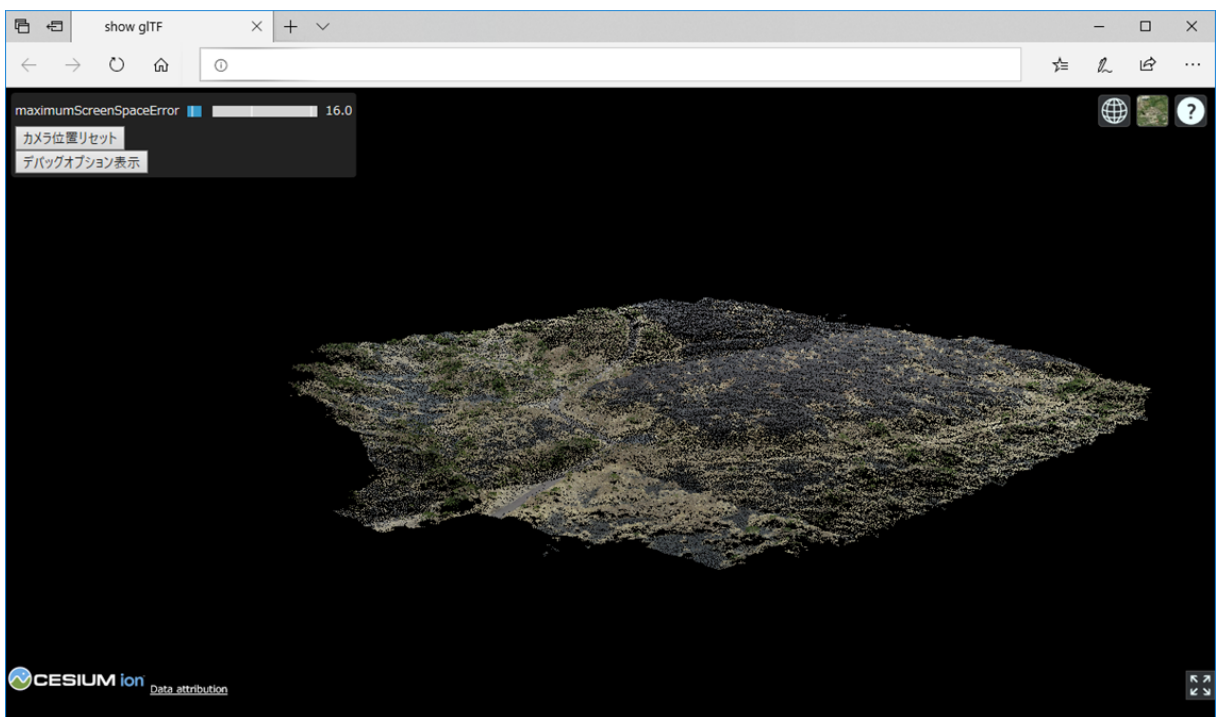


図 3 三次元データを Cesium に搭載した例（Web ブラウザ上での閲覧）

c) テーマ A、C とのデータ連携の検討

i) データ連携とフォーマット

令和 2 年度の検討でデータ連携方法を整理した。今年度は、現地で取得・処理したデータをテーマ A に集約することを目的として検討を行った。

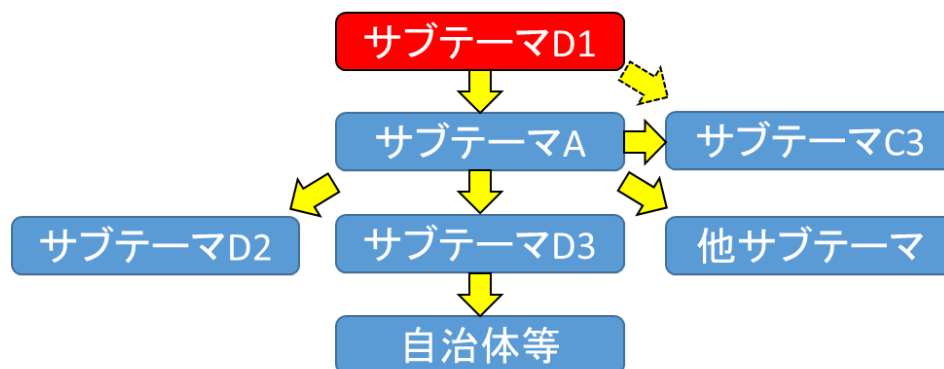


図 4 他サブテーマとのデータ連携イメージ

表 1 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 2 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

ii) テーマ A（JVDN）への集約の検討

現地で取得・処理した数値標高モデルを、現地から携帯電話回線（4G）を用いて、JVDN へアップロードする検証を行った。今回作成したオリジナルデータは 81MB であるが JVDN はアップロードできるファイルサイズの上限が 10MB のため、作成した数値標高モデルを 1m メッシュ（260KB）のファイルとして、転送時間を検証したがファイルサイズが小さいため、携帯電話回線および自社の LAN 回線ともに転送時間は約 1 秒であった（表）。

オリジナルデータ（81MB）を現地から共有することも考え、アジア航測のサーバーに転送して検証を行った。転送時間は、携帯電話回線では約 8 分 16 秒、自社の LAN 回線では約 10 秒であった（表）。

計測面積や計測回数が増加すると、オリジナルデータのデータサイズも大きくなることが予想されるため、今後は、5G 回線などを用いて現地からのアップロード時間の短縮などの検討が必要となる。

表 3 データのアップロード時間

アップロード先	サイズ	4G 回線	LAN 回線
JVDN	0.26MB	約 1 秒	約 1 秒
アジア航測サーバー	81MB	約 8 分 16 秒	約 10 秒

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う予定であった、新型コロナウイルスの影響で他のカリキュラムとの日程調整が困難となり、実施が出来なかった。

e) 取得データに関する自治体等からのニーズの把握

実証実験を行った伊豆大島の大島町においてヒアリングを行い、取得データに関するニーズを把握した。ヒアリングの中で出てきた意見としては、下記の内容があった。

- ・ 火山防災マップに「溶岩の予想区域」を示しているため、どの地点に火口ができたか、どのコースを溶岩が流下するかという情報が欲しい。
- ・ 火口の位置情報は正確である必要はなく、ざっくりと島のどのあたりかがわかれば十分である。
- ・ オルソ画像は一般的なフォーマットなら問題ないだろう。しかし、噴火の対応中は、高解像度のオルソ画像をもらっても、GIS 等で扱う時間は取れないと考えられる。
- ・ 三次元データは、噴火の状況を理解するのに有効かもしれないが、噴火時に三次元データを利用する時間はないと考えられるため、代表的な画像をパワーポイント等に貼った状態で提供してもらった方が助かる。
- ・ 高解像度のオルソ画像は、噴火初期に使う場面は少なく、どちらかというと復旧・復興の段階で使用するデータになるかもしれない。

2) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化

a) PhantomRTK を用いた計測

2022 年 1 月 17 日～1 月 19 日に伊豆大島の三原山山麓を対象に実証実験を実施した。使用した UAV は DJI Phantom4-RTK である。

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。



図 5 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 6 Phantom4-RTK 飛行風景



図 7 高精度 GNSS レシーバー D-RTK2 モバイルステーション

b) 計測範囲（飛行ルート作成）

DJI Terra のミッション（飛行ルート）作成により計測コース設計した。



図 8 DJI Terra 飛行ルート

c) 溶岩流付近(三原山)でのモデル・DSM 作成

1986 年噴火時の溶岩流付近において RTK-GNSS 搭載 UAV の Phantom4-RTK で撮影を行った。撮影した画像の枚数は、135 枚（解像度：5472×3648）である。撮影した画像から DJI Terra により地形モデルと DSM を作成した。135 枚の画像を DJI Terra で処理した際の処理時間は、高解像度モード（フル：取得した画像の解像度のまま処理）の場合で約 5 分であった。他ソフトウェアに比べ、操作手順も少なく、処理時間も短いため、高速化の面で DJI Terra を用いることは有効であることがわかった。

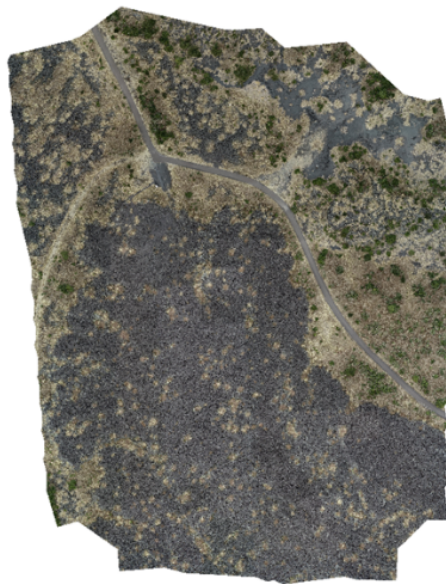


図 9 Phantom4-RTK 撮影データ作成モデル

d) 精度検証

GCP を使用せず RTK-GNSS 搭載 UAV の Phantom4-RTK で作成した地形モデルと、2020 年に Matrice210 で撮影し後処理で基準点補正を行い作成した地形モデルの差分解析を行った。

機材や撮影条件などの違いはあるが、DJI Phantom4-RTK と D-RTK2 を組み合わせることで、GCP ありと比べて、精度の差は小さく、十分な精度の地形モデルが作成できることが確認できた。

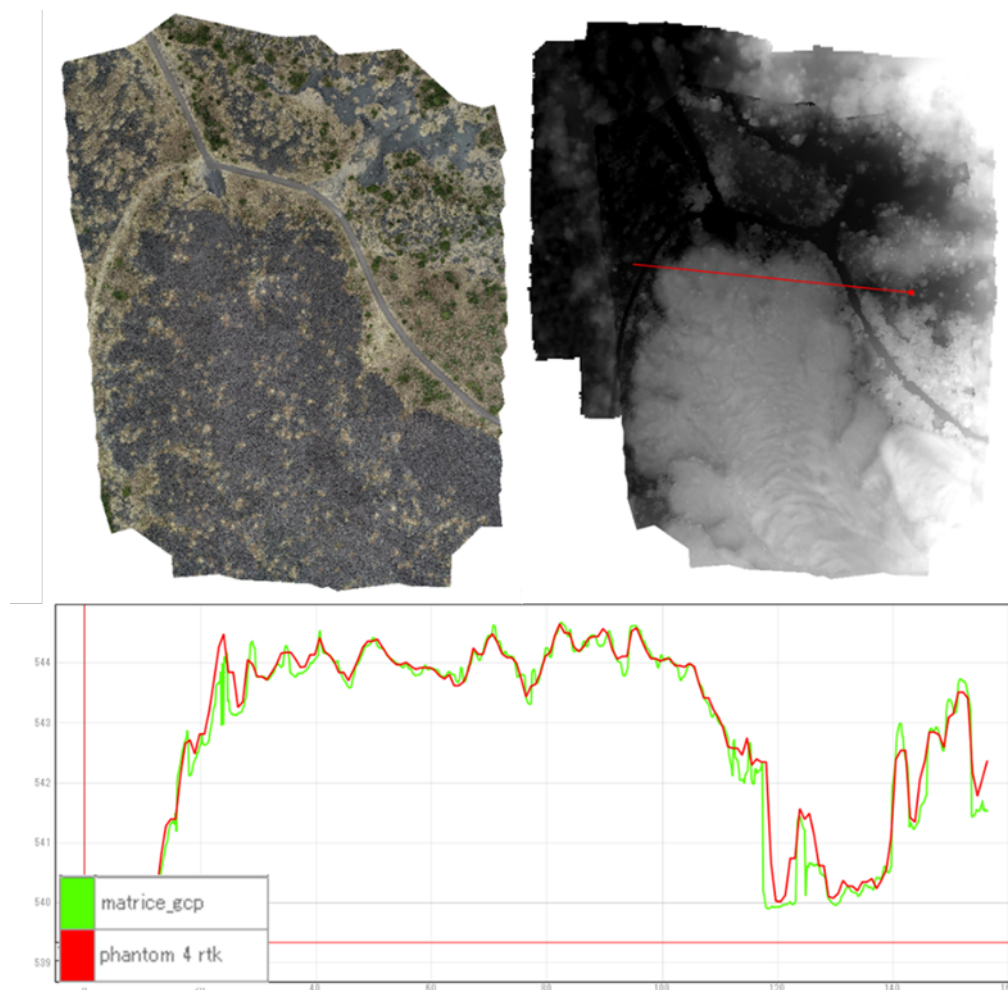


図 6 モデルの差分比較

e) GCP の取得

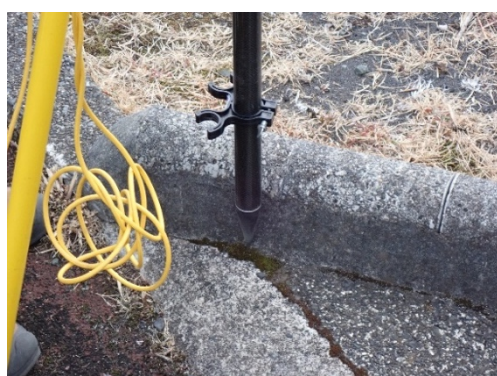
D-RTK 2 モバイルステーションを用いた RTK-GNSS 測位を行うためには、D-RTK 2 モバイルステーション設置位置の座標情報が必要となる。噴火によって、火口付近の立ち入りが不可能な場合や火口周辺の地形が大きく変化し、既往の GCP が失われるようなケースを想定し、噴火の影響を受けないと考えられる複数地点で GCP（座標情報）の取得を実施した。



地点 1



地点 2



地点 3



地点 4

図 7 GCP（座標情報）の取得

3) 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した。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した。

a) 夜間飛行の実施

Matrice210 を使用して、夜間飛行による撮影を実施した。飛行は日没後（17:30～）に実施し、噴火時の状況を想定して立入規制区域外である御神火茶屋展望台から三原山火口上空までの約 1.7km を飛行して撮影を行った。夜間には可視画像による状況把握は困難であるため、取得データは熱赤外画像とし、三原山火口内部を撮影した。これにより、夜間でも立入規制区域外から溶岩流の位置等のデータ取得が可能であることを確認できた。



図 8 夜間飛行の実施状況

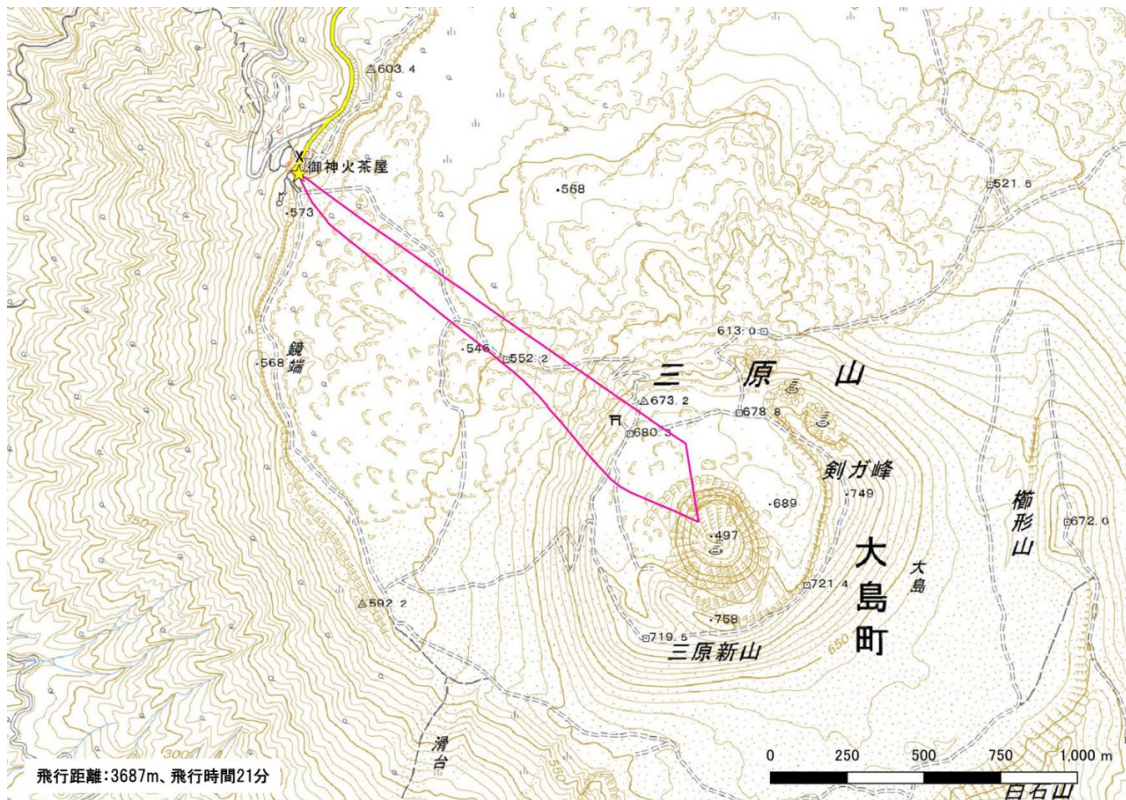


図 9 飛行ルート図（夜間飛行）

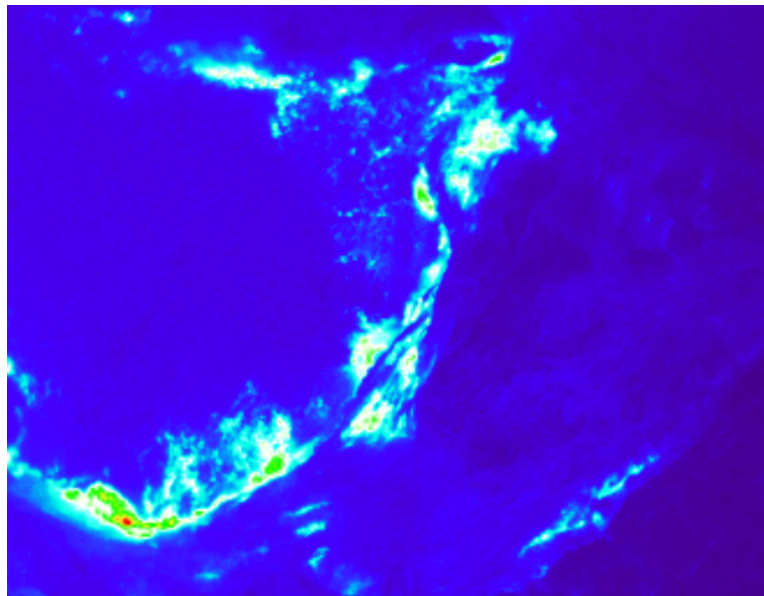


図 10 夜間飛行で取得した熱赤外画像（例）

b) 遠望撮影の実施

実際の噴火を想定し、Matrice210 を使用して立入規制区域外からの飛行による遠望撮影を実施した。離陸地点は噴火警戒レベル 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」の規制地点である御神火茶屋付近とし、i) 火口上空、ii) カルデラ内上空の 2 ルートについて飛行を行った。なお、取得画像は可視画像（動画）とした。飛行の結果、いずれのルートでも機体との接続が切れることなく、噴火発生時にも規制範囲外から撮影が可能であることが確認できた。

i) 御神火茶屋付近～三原山火口の飛行

御神火茶屋付近を離陸地点とし、三原山火口内を可視画像（動画および静止画）で斜め撮影した。昨年度は同様の区間について、事前に設定したルートを自動航行させて画像を取得したが、今年度はマニュアル操作での飛行を実現した。このことから、噴火時にも火口の状況をリアルタイムで確認しながら斜め撮影を行うことが可能であると考えられる。

ii) 御神火茶屋付近～カルデラ内上空の飛行

御神火茶屋付近を離陸地点とし、カルデラ内について可視画像（動画）で斜め撮影を行い、1986 年噴火の溶岩、B 火口列等の状況を上空から確認した。本ルートでの離陸地点からの総飛行距離は約 8km（直線距離 2.7km）であり、Matrice210 を使用した場合、4km を超える距離までの飛行が可能であることが確認できた。

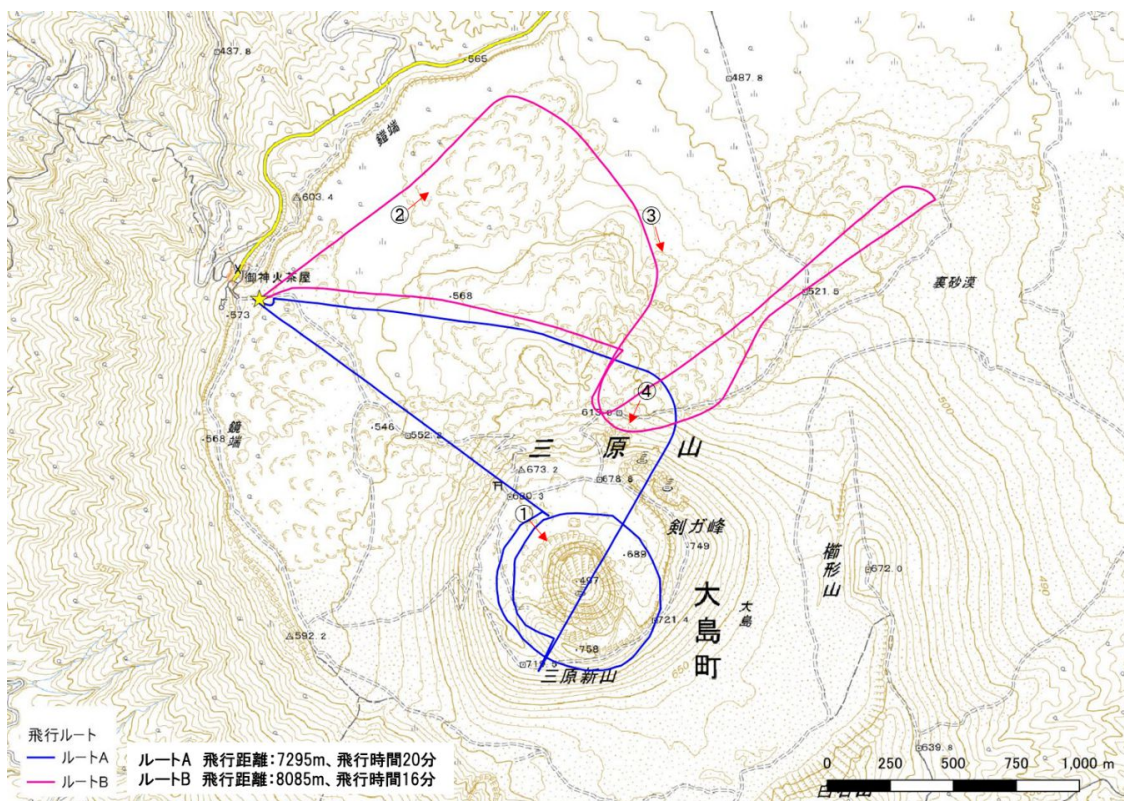


図 11 飛行ルート図（遠望撮影）

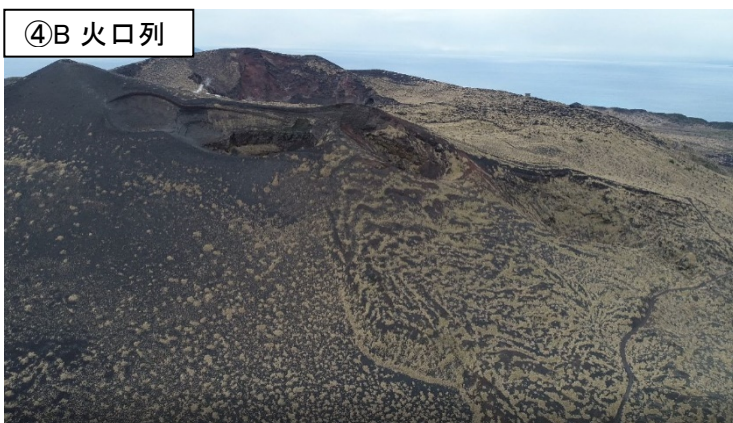
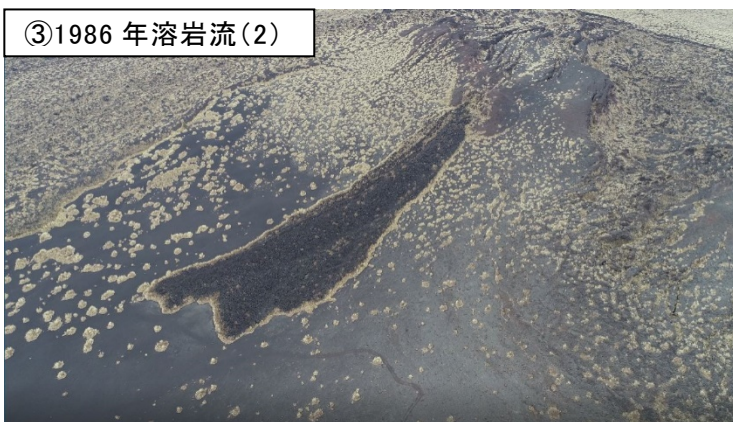
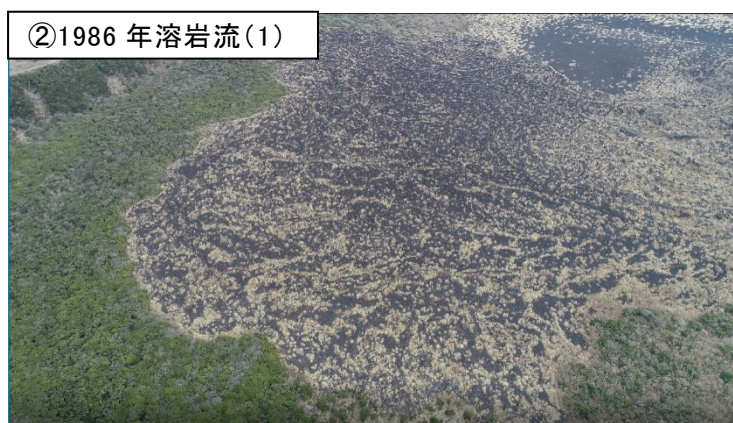
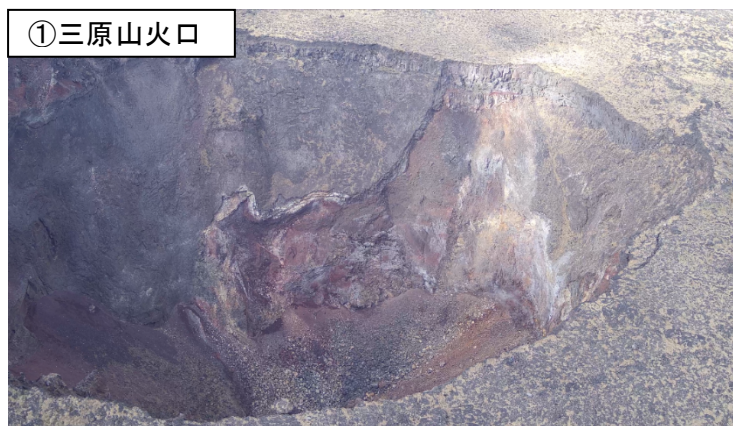


図 12 取得画像の例

c) 取得画像を用いた解析

可視画像および熱赤外画像と既存の DSM から斜め写真測量システム Landviewer PG を用いて、熱赤外画像上での簡易計測を実施した。熱赤外画像データのシステムへの搭載～単写真標定～計測を 30 分以内で実施することができた（図 13）。使用した DSM は UAV から撮影した画像を用いて作成しているため、航空機を用いたレーザ測量よりも分解能が高いことから、単写真標定の精度も向上している。

システム上では、斜め写真の高温領域などの任意地点を囲むと、平面図上へ表示される（図 14）。位置座標の取得および位置の GIS データの作成も可能である。

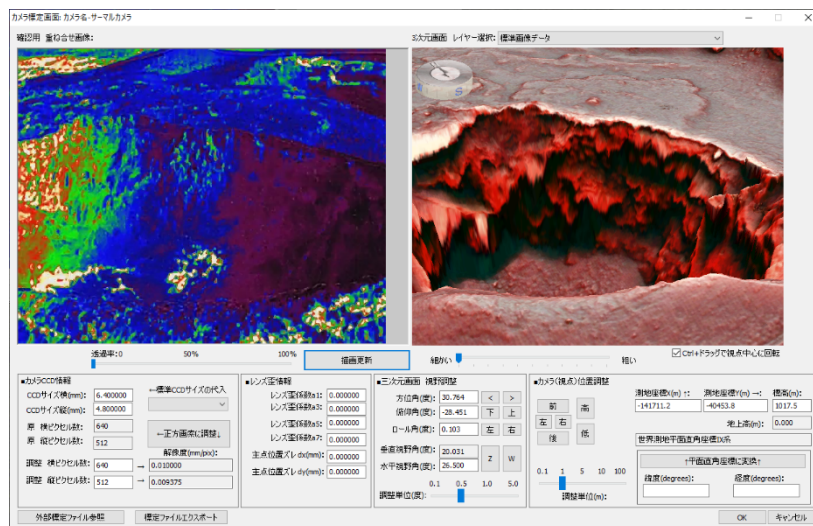


図 13 熱赤外画像および UAV から取得した情報を利用した単写真標定

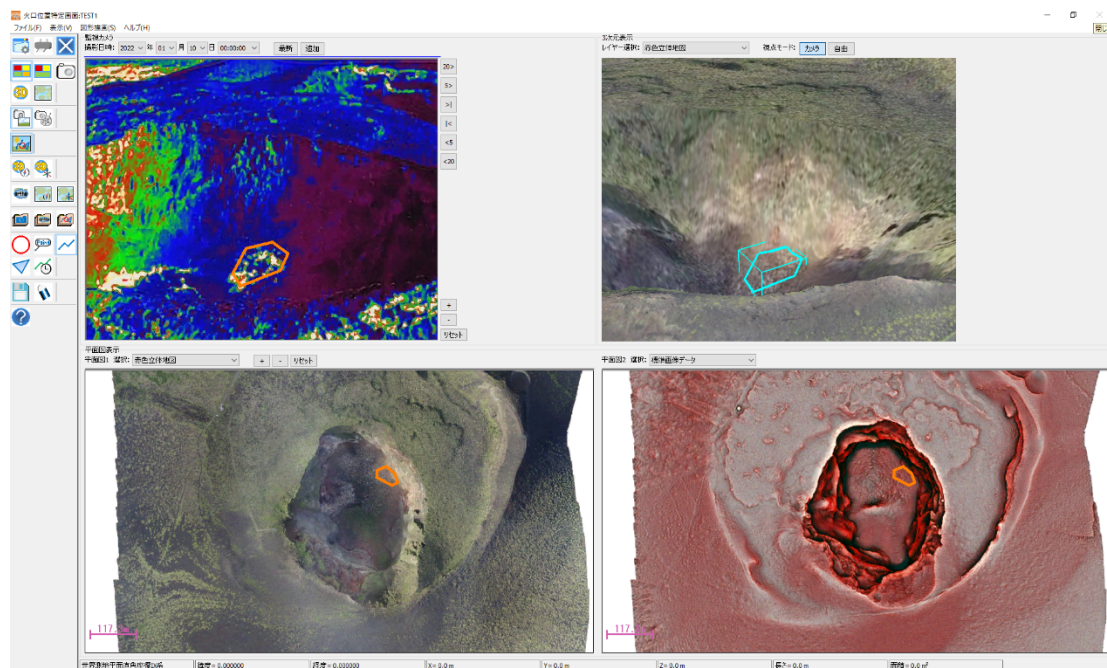


図 14 熱赤外画像と既存の DEM を用いた簡易計測

4) SfM/MVS 計算時間の短縮

a) 検証データ

DJI Terra（地形モデル作成ソフトウェア）を新規導入した。DJI Terra を用いて 3D 地形モデル作成の時間短縮を検討した。2020 年度に Phantom4-RTK で撮影した三原山火口付近の計測データを使用し、3D 地形モデル作成までの処理時間を計測した。処理に使用した画像枚数は 405 枚、画像解像度は 5472x3648pixel である。

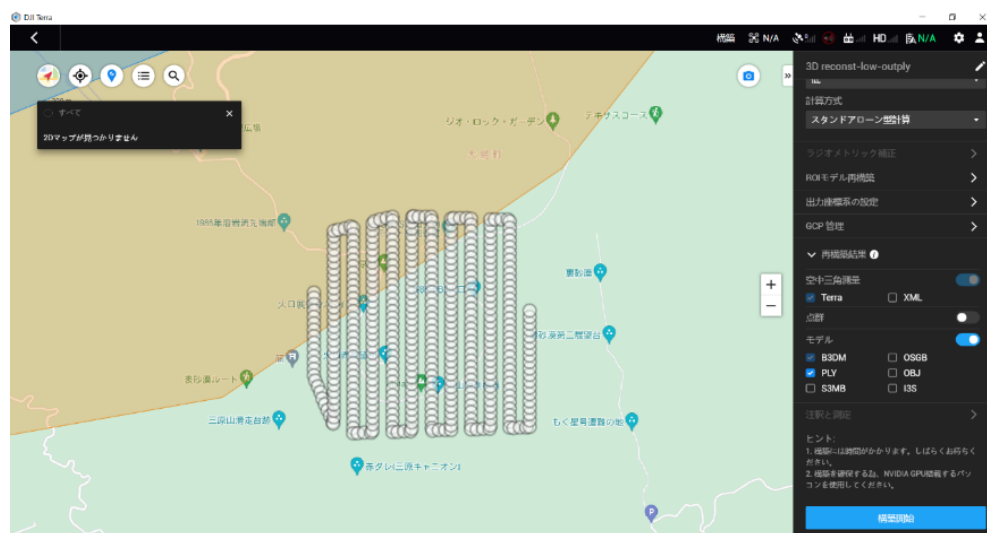


図 15 2020 年度の火口付近の計測データ（405 枚）

b) 処理時間の検証

DJI Terra では、3D 地形モデルの構築解像度を「低」「中」「高」の 3 段階でパラメータ設定が可能である。解像度による処理速度の比較を行った。「高」は入力画像の解像度、「中」は入力画像の解像度を縦横 1/2、「低」は入力画像の解像度を縦横 1/8 に縮小して処理される。なお、昨年度、市販ソフトウェア Metashape で作成した 3D モデルと比較した。

各設定解像度の比較結果として、処理時間は比例的に増えることが確認できた。最も高い解像度でも 1 時間程度での処理が可能であった。Metashape の 1/8 倍程度の時間で同程度解像度の 3D モデルを作成することを確認した。

表 5 3D 地形モデル作成までの処理時間

構築解像度（パラメータ）	処理時間	処理時間/枚
低	約 5 分	約 0.74 秒
中	約 17 分	約 2.52 秒
高	約 60 分	約 8.89 秒
Metashape	約 8 時間	約 71.11 秒

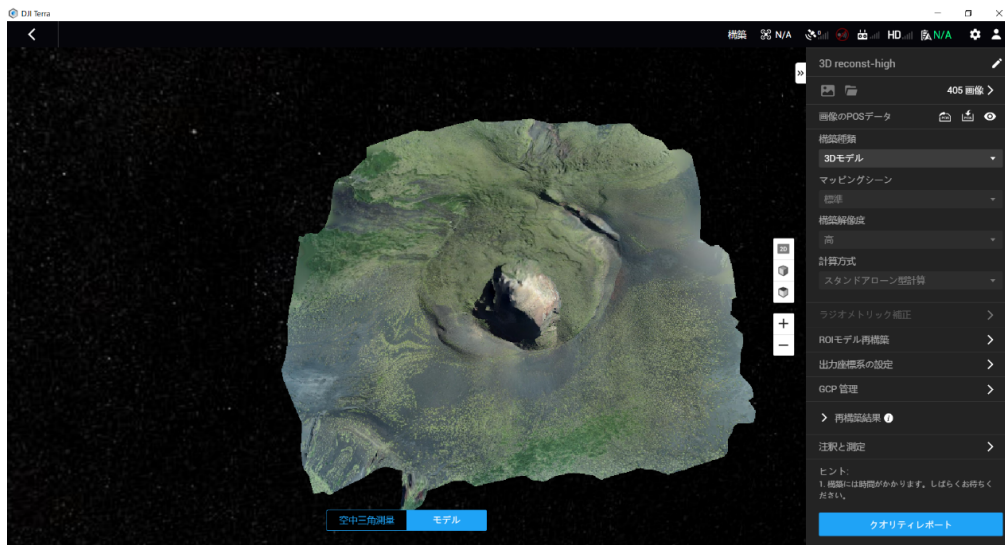


図 16 3D 作成モデル（構築解像度高）

c) リアルタイム 3D マッピングの実施

DJI Terra には、飛行中（撮影中）に地形モデルを作成するリアルタイムマッピング機能がついている。リアルタイムマッピングでは、画像解像度を下げ、UAV から DJI Terra が入った PC にデータを転送することで、処理速度を優先し、地形モデルを作成している。

離陸位置から約 600m 離れた溶岩流を撮影し、飛行中にデータが転送された箇所から地形モデルがリアルタイムで作成されることを確認した。画像解像度を 5472×3648 から 960×640 に下げ、地形モデルが作成されていた。135 枚の画像が飛行時間約 16 分の間に、地形モデルの作成まで完了していた。

リアルタイムマッピングでは、画像解像度は下がるが、飛行後に UAV からデータを抜き出し処理用 PC にデータを移す時間を短縮し、3D 地形モデルを作成できることが確認できた。

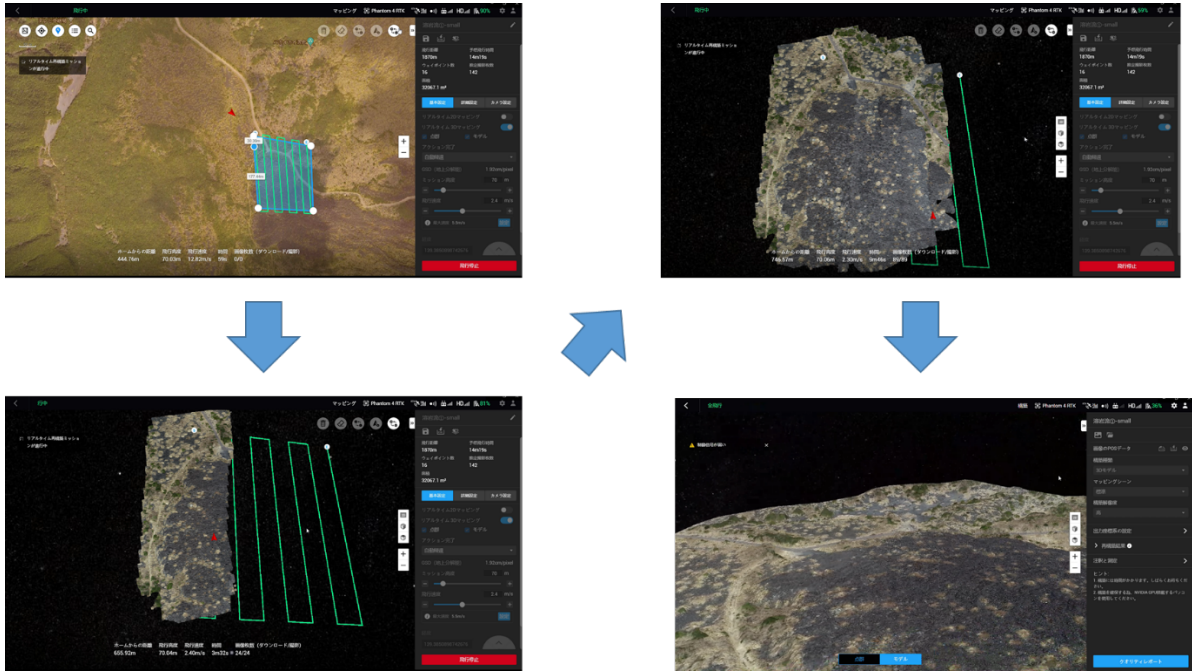


図 17 リアルタイム 3D マッピングの例

(c) 結論

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）を設置せずに三次元モデルを作成する方法を研究した。「RTK-GNSS 搭載 UAV」の Phantom4-RTK と「未搭載 UAV」の Matrice210(昨年度実施)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、若干の差はあるものの全体的な傾向としては概ね一致した。RTK-GNSS 搭載 UAV を用いることで基準点（GCP）を設置せずに三次元モデルを作成することが可能となる。

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 の長距離飛行を行い、可視光と熱赤外の画像を取得した。取得した画像は斜め写真測量システムを用いることで、高温領域などの任意地点の位置情報を取得することが可能である。

高精度な三次元モデルを短時間で作成するために、UAV の飛行と同時に三次元処理する市販ソフトウェア DJI Terra を導入した。これまで使用してきた Metashape の 1/8 倍程度の時間で同程度解像度の 3D モデルを作成することを確認した。また、飛行中に地形モデルを作成するリアルタイムマッピングは分解能が下がるものの、迅速なデータ取得が要求される場合には有効な手段と考えられる。

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 計算時間の短縮、データ共有の短縮が求められる。取得したデータの共有について、自治体等にヒアリングを行い具体的な連携方法の検討を進める必要がある。

(d) 引用文献

なし

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(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4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」および「三次元表示」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。
- テーマA、B4、Cとの連携：UAVで得られたデータの受け渡し方法について連携して研究する。現地からの迅速なデータ転送手段として5G回線を利用し、通信速度向上の研究を行う。
- 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。
- 熊本県阿蘇市においてヒアリングを実施し、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化

- 2021年度は、伊豆大島において、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実施した。
- 2022年度は、阿蘇山におい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。2021 年度に使用した RTK-GNSS 搭載 UAV は飛行時間が短い機体であったため、2022 年度は飛行時間が長い GNSS 搭載 UAV を導入し、飛行距離・飛行範囲をさらに拡大した研究を行う。

(c) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発

- 2021 年度は、伊豆大島において、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および日中の遠望撮影を実施した。
- 2022 年度は、阿蘇山において、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、日中に火口内を斜め撮影し、取得画像から斜め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導入し、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した。
- 2022 年度も同様に RTK-GNSS 搭載 UAV による垂直写真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導入し、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。2021 年度は日中の可視画像のみを対象としたが、2022 年度は夜間の熱画像も用いた研究を行う。

2. 2 サブテーマ2

(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	竹見 哲也
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	丸山 敬
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定教授	山路 昭彦
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	志村 智也
国立大学法人京都大学	共同実施機関	研究員	真木 雅之
国立大学法人京都大学	共同実施機関	RA	瀧下 恒星
国立大学法人京都大学	共同実施機関	RA	高橋 龍平
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	部長	佐々木寛介
一般財団法人日本気象協会	協力機関	技師長	井上 実
国立大学法人鹿児島大学	協力機関	准教授	西 隆昭
国立大学法人高知大学	協力機関	教授	佐々浩司
国立大学法人北海道大学	協力機関	名誉教授	藤吉 康志
FRS コーポレーション	協力機関	社長	徳島 秀彦

(c) 業務の目的

火山灰に対して噴火前の予防的対策及び噴火後の迅速な防災対策のために、火山灰ハザードの予報的及び即時的評価を可能とする技術の実現を目指し、地上観測および大気中その場観測に裏付けされるリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、地震及び地盤変動観測データとシミュレーションを統合した火山灰拡散予測の高速化技術開発、空間分解能の高い風速場把握および落下粒子特性把握による火山灰拡散予測の高精度化技術開発、連続的な噴火を対象とした火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの

技術開発、噴火発生前の確率的降灰予測の技術開発を実施し、「課題D サブテーマ 3：火山災害対策のための情報ツールの開発」に解析結果を出力することを目的とする。

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

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

3) 平成 30 年度：

南九州 5 火山におけるレーダー観測を継続した。ディスト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。令和 2 年度はそのためのデータベースを整備した。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。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。即時把握技術開発においては、X バンド MP レーダーにより南九州の 4 火山において噴煙を検知する実績が積み上がり、実用段階となった。

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 3 年度における成果の目標及び業務の方法

これまで進めてきた「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」を引き続き継続する。観測継続による新たなデータの蓄積により、噴煙の検出の定量化を図るとともに、火山灰拡散予測の高速化および高精度化を進める。令和 2～4 年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発するが、令和 4 年度に実装する連続化火山灰拡散予測シミュレータのための技術的な検討を令和 3 年度は実施する。

1) プロジェクトの総合推進

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

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてレーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業も併せて行う。これまでに桜島を取り巻くように設置したディストロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量の時間変化を把握する。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したときには火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、X バンド MP レーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例を得ることにより、その経験的関係式の精度を上げる。また、スキャン頻度が高い船舶レーダーにより噴煙を観測することにより、時間分解能の高い噴煙の上昇および移流・拡散状態を把握する。

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

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

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

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

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

課題 C 3 と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行する。これにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させる。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

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

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

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

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

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

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

(2) 令和 3 年度の成果

(a) 業務の要約

令和 3 年度においては、これまでに単発的なブルカノ式噴火の観測及び解析によって培われた火山灰放出量の即時把握技術、予測の高速化及び高精度化技術をさらに発展させたうえで、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。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においては、令和 2 年度までの観測を継続して、火山灰に関連する新たなデータを取得することにより、これらの技術をさらに高度化させることにある。新たに加わった技術開発は、船舶レーダーの活用による長時間分解能化と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による高精度化である。

(b) 業務の成果

令和 3 年度の業務の成果を 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に分けて、以下に述べる。

1) プロジェクトの総合推進

「課題 C サブテーマ 3」および「課題 D サブテーマ 3」とオンラインで打ち合わせを行った。

桜島火山防災協議会の構成メンバーである鹿児島県、鹿児島市、垂水市、九州地方整備局等と連携して大量降灰の予測、避難等の意思決定、対策のための勉強会を 7 月、8 月、10 月、11 月に開催した。

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

桜島においてレーダー、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシングおよびディストロメータを用いた地上観測からなる火山灰観測を継続した。図 1 にマルチパラメータ観測の概要を示す。レーダーは霧島山、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島にも設置されている。ライダーについては点検を外部委託するとともに、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。レーダーと GNSS についてはおおむね順調に稼働した。令和 3 年度は、スキャン速度の速い船舶レーダーを新たに桜島に導入し、観測を開始した。

ここで用いるレーダーは X バンドであり、周波数は約 9GHz、波長は約 3cm である。GNSS は L バンド帯 (L1 : 1.5GHz、L2 : 1.2GHz) を使用し、波長は、それぞれ 19cm、24cm となり、レーダーより長い。これまでの観測により、桜島において気象庁が「噴火」とする現象に対しては X バンドレーダーでその噴煙を捕捉できている。GNSS は波長が長いこと、また GNSS 衛星は汎地球的に配置されていることから、より大規模な噴煙に対して有効である。レーダーは空間をスキャンする技術であるが、GNSS では測位衛星を用いるために、噴煙の検知は衛星の位置に依存し、空間分解能ははるかに劣る。

ライダーは光を照射し、その後方散乱波を検出する技術であり、緑色の 632nm の波長を用いる。レーダー、GNSS よりもはるかに短波長である。従来エアロゾル観測に用いられてきた技術で、噴火とも言えないきわめて濃度の希薄な噴煙を検知できるのが特徴である。一方、波長が短いために、噴煙を透過することはできず、観測される後方散乱は噴煙柱の極表面の情報のみを持っている。

レーダーは噴火による噴煙をスタンダードに検出する技術、GNSS はより大規模噴煙に対応し、ライダーは希薄火山灰の浮遊を検出する技術に位置づけられる。

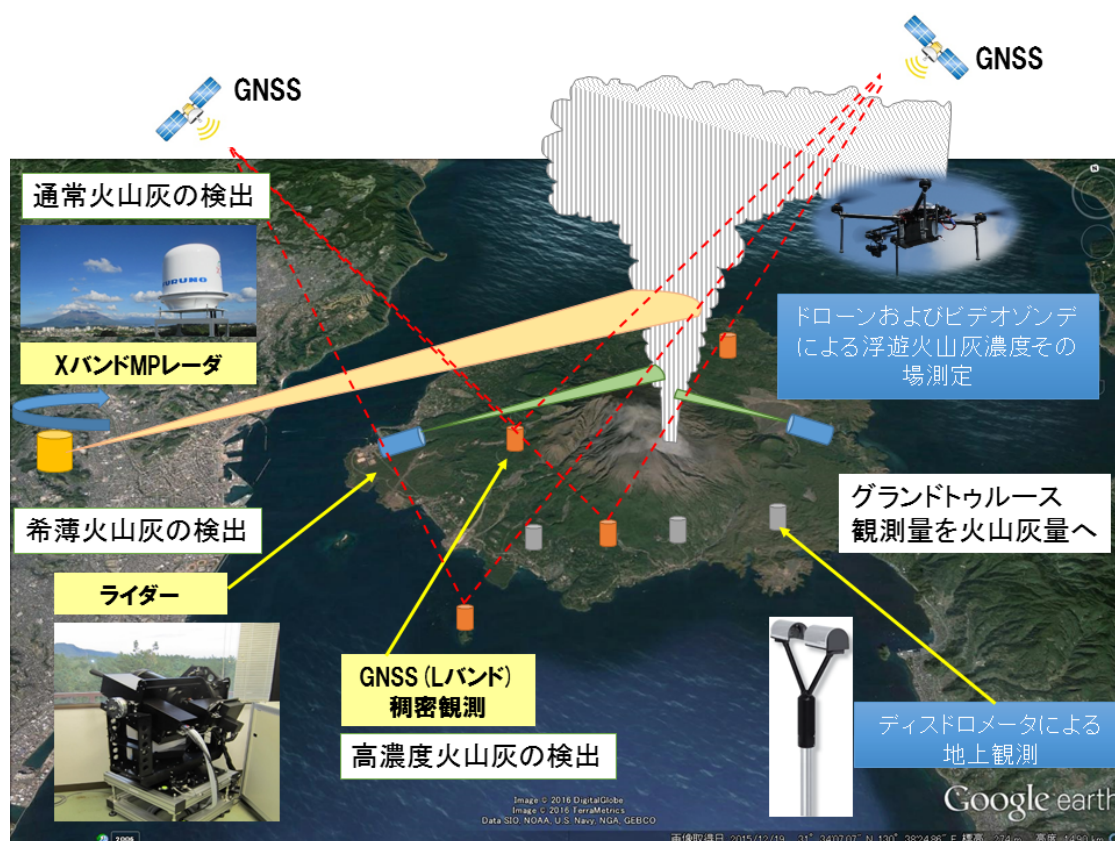


図 1 火山灰のマルチパラメータ観測の概要。

a) レーダー観測

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。ここでは、レーダーによる噴煙観測の成果について述べる。

i) 観測の概要

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	熊本郡屋久島町口 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 (2022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	10, 15, 20, 25, 35, 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**	5, 10, 15, 20, 30, 45, 60	設定なし	
諏訪之瀬島	設定なし	10~20***	10~60***

*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 月から 2021 年 8 月までセクターRHI スキャン観測をおこなった。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が、2021 年 8 月 28 日に仰角を 10-45° から 10-60° に変更した。

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多いので、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。



図3 レーダーの設置状況。霧島市立牧園中学校に設置。



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

2022 年 1 月 28 日 13 時 19 分 (UTC 時刻 4 時 19 分) に発生した噴火について述べる。この噴火は 2021 年 1 月から 2022 年 3 月までに発生した噴火の中でもっとも噴煙高度が高く、火口上 3400 m に達した (鹿児島地方気象台)。図 5 に噴火開始直後から 7 分後までのレーダー反射強度分布を示す。反射強度分布から 20dBz の等反射強度の最高高度を噴煙高度とすると、噴火開始から 2 分経過時の噴煙高度は火口上 2300 m 程度で、噴火開始から 4 分経過後に噴煙高度は火口上 3400 m 程度であることが見て取れる。この図は北から時計回りに 105 度もしくは 109 度の断面図を示しているが、時間経過とともにレーダーサイト (Distance= 0 km) から東南東方向へ離れる方向に噴煙が流れていることが見て取れる。

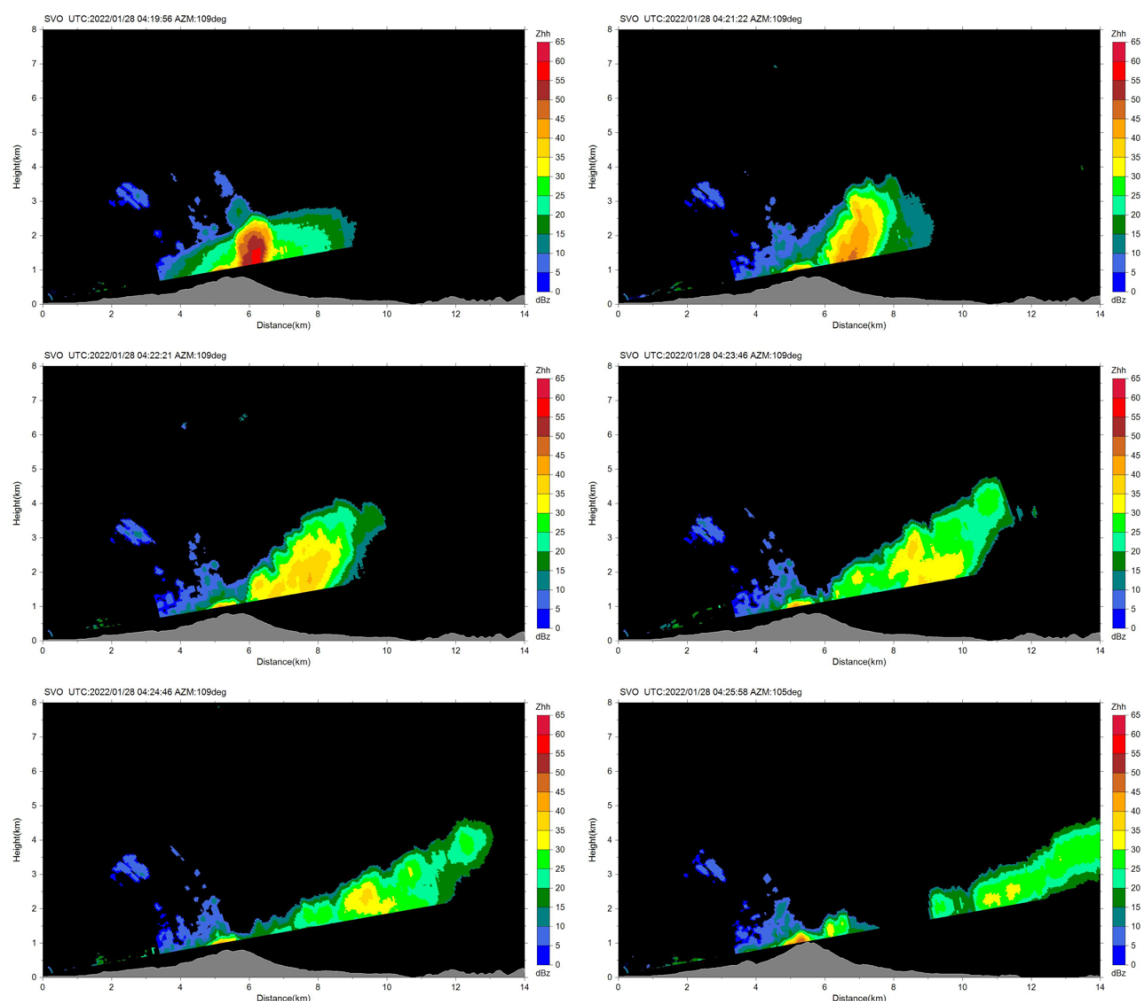


図 5 桜島火山観測所に設置したレーダーによる噴煙の反射強度分布。RHI スキャンによる。2022 年 1 月 28 日 13:19~13:26 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

iii) 諏訪之瀬島噴火

2020 年に引き続き 2021 年においても諏訪之瀬島において噴火が頻発した。気象庁が 2021 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。なお、空振振幅は京都大学が諏訪之瀬島の SWA 観測点に設置している空振計による値を用いた。噴火の時刻は SWA 観測点における空振到来時刻を示す。噴煙高度と流向は気象庁の噴火に関する観測報によるもので、噴煙高度は火口位置の標高を海拔 600 m としたときの、火口からの相対高度である。

表 3 レーダー反射強度を図示する噴火リスト

日時分	噴煙高度 (m)	レーダー噴煙 高度 (m)	空振 (Pa)	流向	図
2021/7/7 0:10:43	不明	不明	591.0	不明	図 6
2021/7/31 18:44:44	不明	不明	28.6	不明	図 7
2021/9/26 7:11:06	5400	5200	11.6	直上	図 8

2021 年の噴火において最大の空振振幅（SWA 観測点にて 591Pa）を伴った噴火は 7 月 7 日の 0:10 の噴火である。この噴火時のレーダー反射強度分布を図 6 に示す。レーダーサイト（Distance = 0 km）から 3.6 km のところに御岳火口があるが、20dBz の等反射強度の最高到達高度は海拔 1000 m である。また、20dBz の等反射強度の分布が噴煙形状をしておらず、火口付近に定在し、形状が時間変化していない。

2021 年 7 月 31 日の 18:15 に噴煙高度 3800 m の噴火が発生し、その後 18:26 から 21:09 までストロンボリ式噴火が頻発した。この時間帯のうち 18:40 から 18:46 のレーダー反射強度分布を図 7 に示す。反射強度分布は図 6 で示した反射強度分布とほぼ同じであり、20dBz の等反射強度の分布は噴煙形状をしていない。

2021 年の噴火において噴煙高度が最高値（気象庁によると火口上 5400 m、海拔 6200 m）となった噴火は 9 月 26 日の 7:11 の噴火であり、噴火時のレーダー反射強度分布を図 8 に示す。反射強度分布から 20dBz の等反射強度の最高高度を噴煙高度とすると、この時間における噴煙の最高到達高度は海拔 6000 m、つまり火口上 5200 m となり、気象庁が目視で推定した噴煙高度より若干低い。

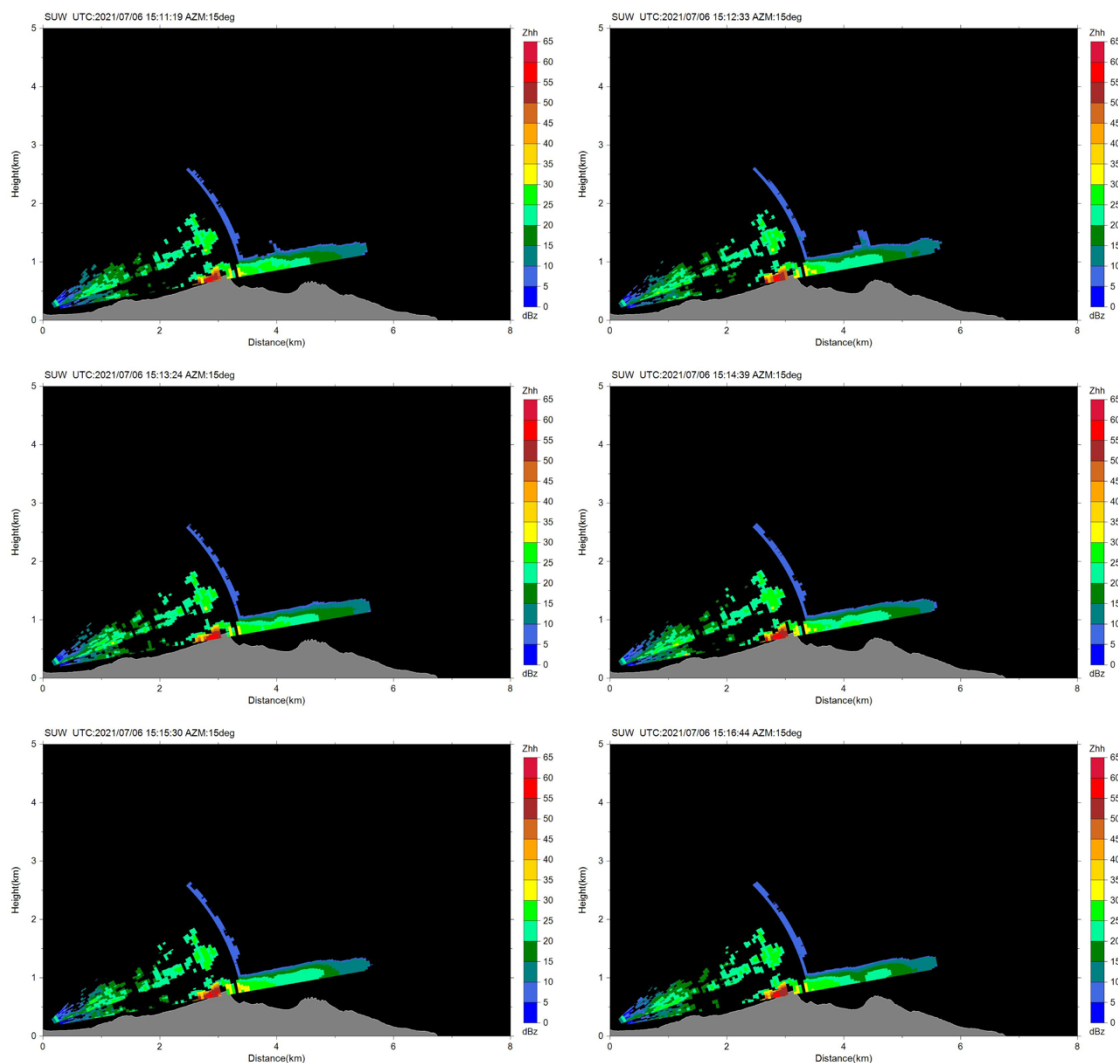


図6 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2021 年 7 月 7 日 0:11~0:17 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。反射強度が 50dBz 超える領域は地形の急峻な部分に対応しているため、地上からの反射の影響と思われる。

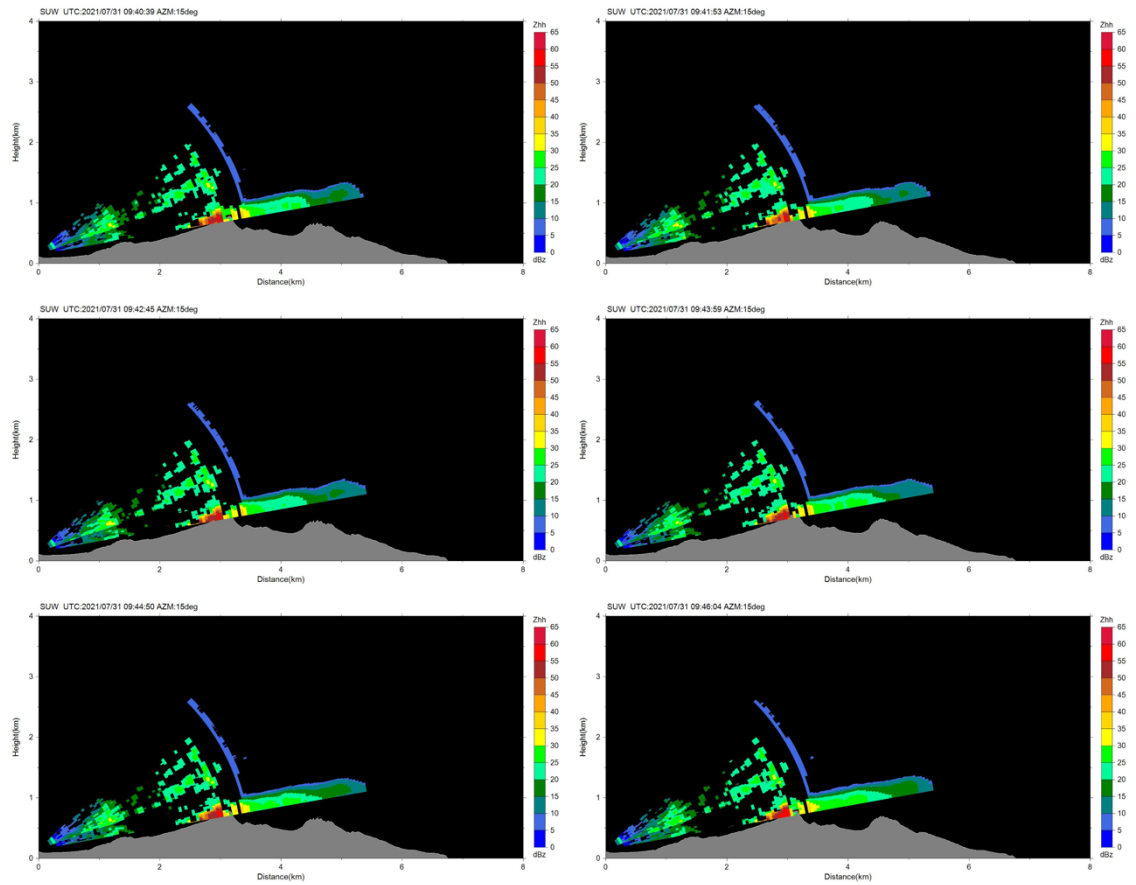


図7 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2021 年 7 月 31 日 18:40～18:46 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。反射強度が 50dBz 超える領域は地形の急峻な部分に対応しているため、地上からの反射の影響と思われる。

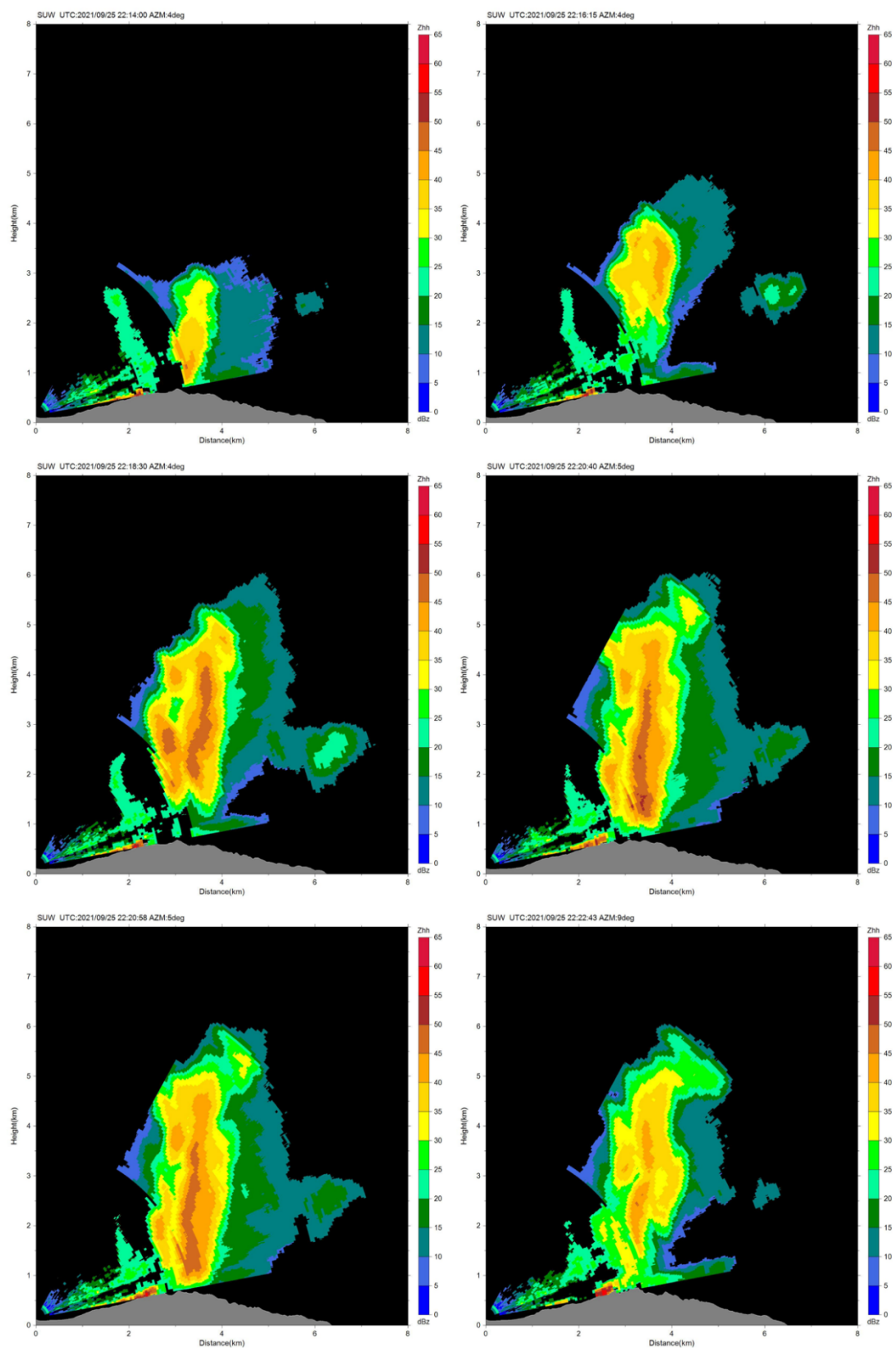


図8 諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2021 年 9 月 26 日 7:14~7:23 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

レーダー反射強度分布（図 6, 7, 8）は 3 例の噴火であるが、表 6 に示す空振振幅と比較すると、反射強度分布と噴煙形状の有無、噴煙高度や空振振幅の関係を見出すことが出来ない。一般的には、空振振幅が大きい噴火は規模の大きな噴火であるため、噴煙高度も大きい関係があるとされるが、諏訪之瀬島の 2021 年噴火活動においてはそのような関係が成り立つか不明である。そこで、レーダー反射強度の高度プロファイルと気象庁の目視観測による噴煙高度との関係、およびレーダー反射強度の高度プロファイルと空振振幅の関係を調べる。レーダー反射強度の高度プロファイルは、御岳火口の水平位置（東経 129.715°，北緯 29.642°）に固定して、海拔 800 m から 3600 m（2021 年 8 月 28 日 15:50 まで）および海拔 800 m から 6200 m まで（2021 年 8 月 28 日 15:50 から）の高度について 200 m 間隔にて Gressman 補間にて反射強度を抽出し、これを反射強度の高度プロファイルとする。なお、Gressman 補間半径を 500 m とした。2021 年 7 月 3 日から 7 月 16 日、7 月 27 日から 8 月 9 日、そして 9 月 23 日から 10 月 6 日の反射強度の高度プロファイルと噴煙高度の関係と空振振幅との関係をそれぞれ図 9, 図 10 そして図 11 に示す。図 9 において空振振幅が大きい（200Pa 以上の）噴火の多い 7 月 3 日から 7 月 10 日においては、明瞭な反射強度（20dBz 以上）が高度 1000 m 以上には見当たらず、高度 1000 m 未満に 20dBz 程度の反射強度が継続して現れている。一方、7 月 10 日から 7 月 16 日においては、噴煙高度が高く（おおむね 3000 m 以上）、空振振幅が小さい（200Pa 未満の）噴火が卓越しており、この期間には明瞭な反射強度の強さが高い高度まで現れている時間帯が複数ある。なお、7 月 13 日 14 時～15 時と 16 時～17 時の顕著な反射強度は雨雲によるものである。図 10 に示す 7 月 27 日から 8 月 9 日の期間では、空振振幅が小さく、噴煙高度が高い噴火が卓越しており、図 9 と同様に明瞭な反射強度の強さが高い高度まで現れている時間帯が複数ある。図 11 に示す 2021 年 9 月 23 日から 10 月 6 日の期間は、図 8 に示した噴煙高度が海拔 6200 m の 2021 年 9 月 26 日の噴火の発生時間が含まれており、この時間帯における反射強度は海拔 6200 m まで 20dBz 以上である。9 月 27 日の噴煙高度は海拔 3000 m 以下で、空振振幅が 300Pa 以上の噴火が卓越し、高度 1000 m 未満のみに反射強度が 20dBz 以上となっている。これら以外の時間帯においては、噴煙高度は概ね海拔 3500 m 以下で、空振振幅が概ね 200Pa 以下であり、高い高度まで 20dBz 以上となる強い反射強度を示す時間帯は 9 月 28 日と 10 月 1 日には複数あるが、それ以外の日はなかった。

図 9, 10, 11 に示した反射強度の高度プロファイルと噴煙高度や空振振幅との比較についてまとめると以下の通りである。噴煙高度が概ね 3000 m 以上で、空振振幅が概ね 200Pa 以下の噴火が卓越している時間帯においては、反射強度が 20dBz 以上が高い高度まで分布している時間が複数存在する。一方、噴煙高度が概ね 3000 m 以下で、空振振幅が概ね 200Pa 以上の噴火が卓越している時間帯においては 20dBz 以上となる強い反射強度は海拔 1000 m 以下に限定されている。

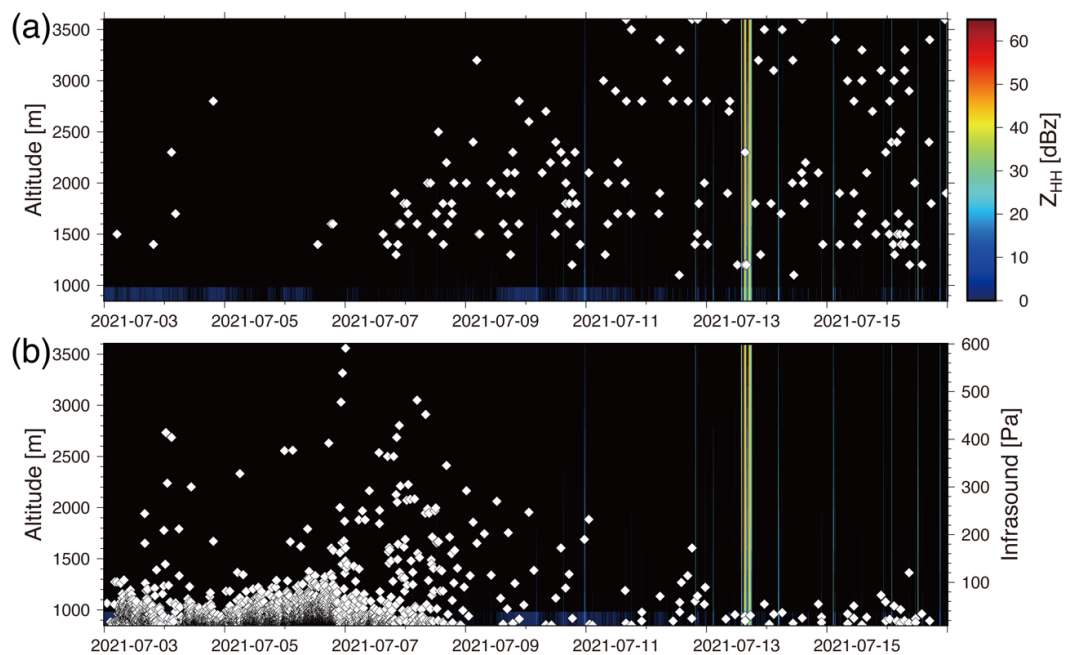


図 9 諏訪之瀬島レーダーの RHI スキャンから得られた御岳火口直上の反射強度の鉛直プロファイル (2021 年 7 月 3 日～7 月 16 日, 時刻は日本標準時)。7 月 13 日 14 時～15 時と 16 時～17 時の顕著な反射強度は雨雲によるもの。(a) 気象庁の目視観測による噴煙高度 (◇) との比較。噴煙高度は海拔高度に変換した値である。(b) SWA 観測点における空振振幅 (◇) との比較。

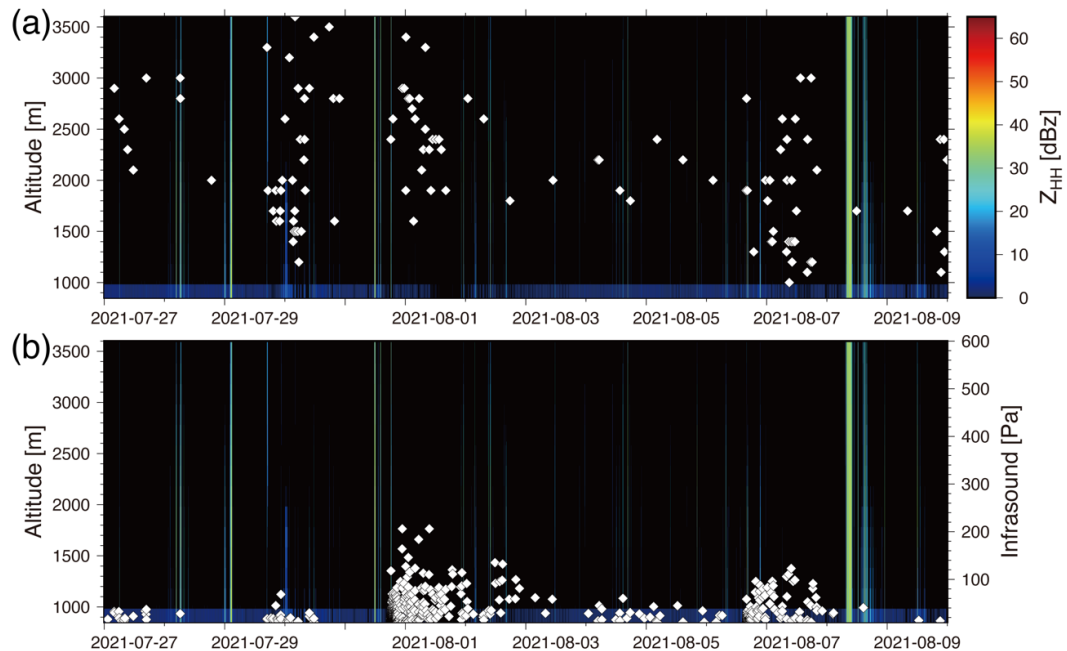


図 10 諏訪之瀬島レーダーの RHI スキャンから得られた御岳火口直上の反射強度の鉛直プロファイル (2021 年 7 月 27 日～8 月 9 日, 時刻は日本標準時)。8 月 8 日 7 時～9 時と 13 時～15 時の強い反射強度は雨雲によるもの。(a) 気象庁の目視観測による噴煙高度 (◇) との比較。噴煙高度は海拔高度に変換した値である。(b) SWA 観測点における空振振幅 (◇) との比較。

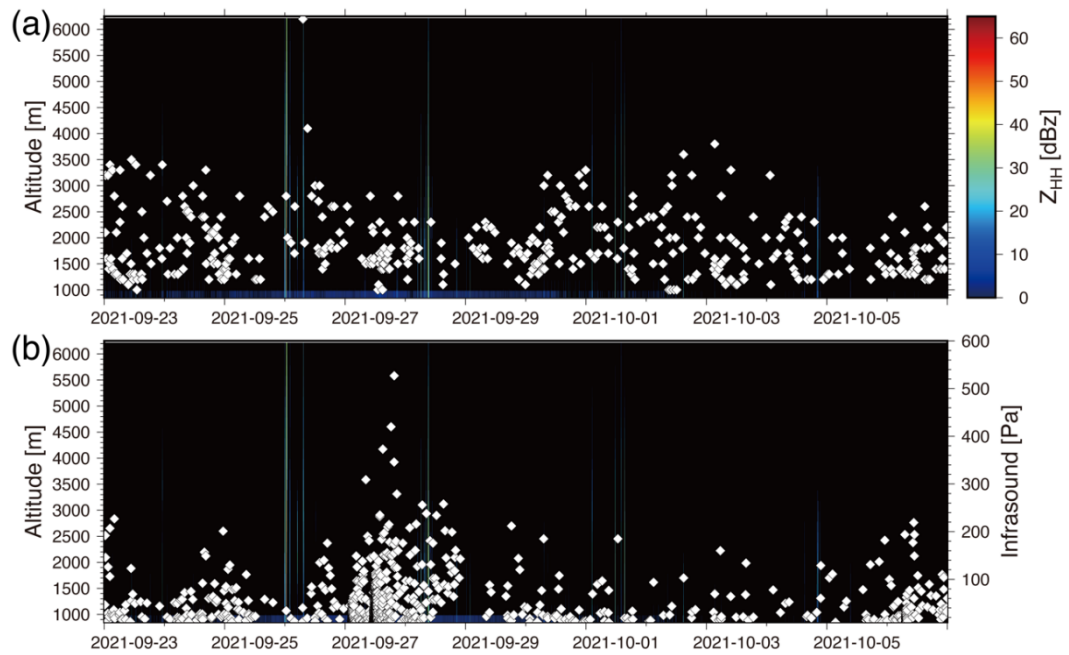


図 11 諏訪之瀬島レーダーの RHI スキャンから得られた御岳火口直上の反射強度の鉛直プロファイル（2021 年 9 月 23 日～10 月 6 日，時刻は日本標準時）。9 月 25 日 23 時から 24 時の強い反射強度は雨雲によるもの。(a) 気象庁の目視観測による噴煙高度（◇）との比較。噴煙高度は海拔高度に変換した値である。(b) SWA 観測点における空振振幅（◇）との比較。

b) ライダー観測

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した。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った。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した。

i) ライダー稼働状況

桜島火山観測所本館と黒神観測室に設置された 2 波長偏光ライダーは自動連続運転が可能な仕様となっている。それぞれの地点から南岳火口付近に向けレーザーを射出し、粒子からの後方散乱光を望遠鏡で集光して経路上の粒子分布を遠隔計測する。図 12 に、令和 3 年の日毎の観測時間を表示する。両地点とも 12 月を除きほぼ通年観測が行われ、令和 2 年よりもデータ取得率が向上した。12 月以降の両地点での欠測の理由として、消耗品として交換を行ったレーザー用フラッシュランプの初期不良が疑われたため、メーカーによる調査が行われている。

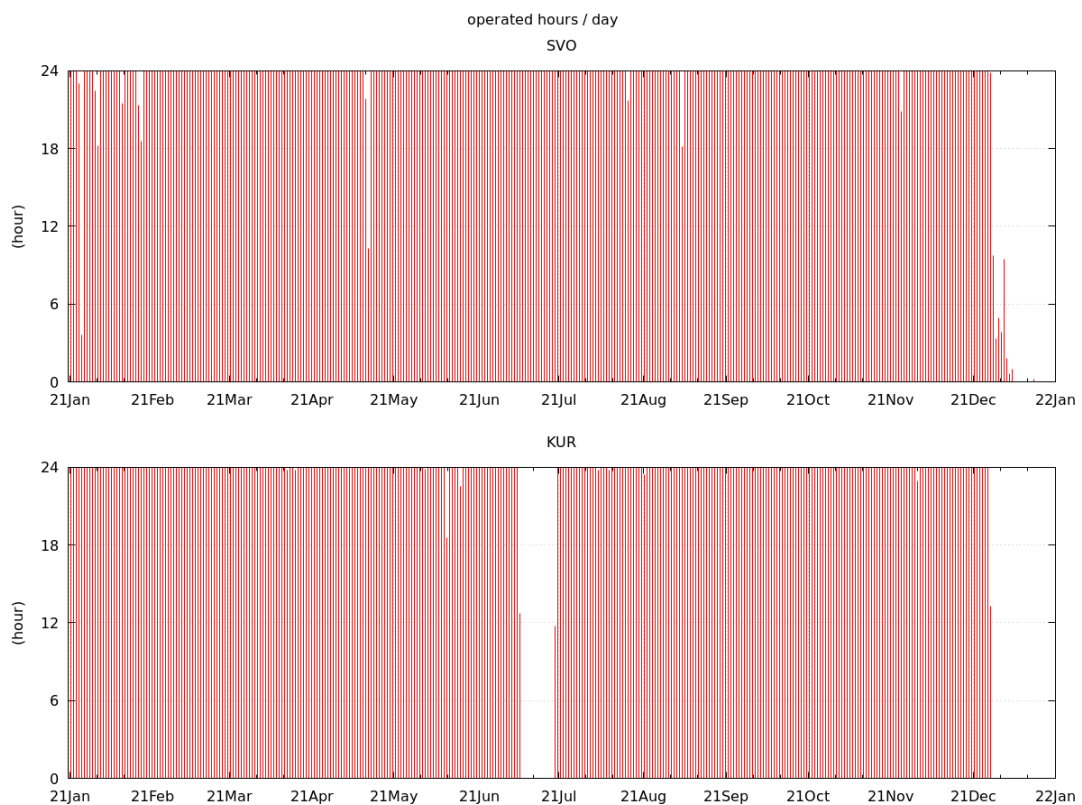


図 12 令和 3 年の観測所本館(上)および黒神観測室(下)における日毎のライダー観測時間

ii) エアロゾル消散係数の季節変化

ライダー観測により得られた視線方向のエアロゾル消散係数を月平均し、鹿児島気象台から公表されている火山情報と対比した(手法は Shimizu et al. (2021) に準ずる)。結果を図 13 に示す。観測所本館ライダーから得られた消散係数は、火口に

近い 5-6km のレンジにおいて 3-5 月にやや高い値となったほかは年間を通じて低めであった。3-5 月は噴火/爆発が令和 3 年の中では多い方で、消散係数との対応が見られる。手前側のレンジ(4km 未満)では、他の年に見られたようなエアロゾル消散係数の目立った上昇は確認されなかった。

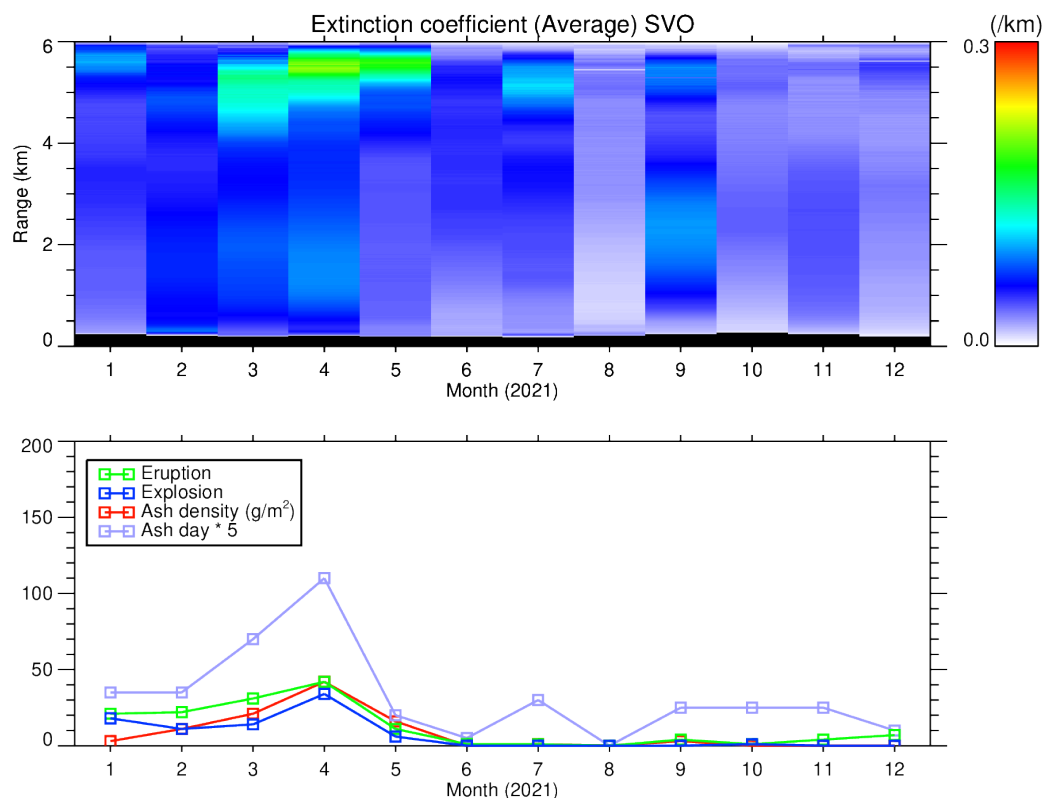


図 13 月平均 532nm エアロゾル消散係数のレンジ方向分布(上)と(下)鹿児島気象台による噴火/爆発回数、降灰日数、降灰量。

iii) ライダーによる消散係数推定の限界

ライダー観測では非常に濃い火山灰の中では送信レーザー光や後方散乱光の減衰が強いために十分な信号強度が得られず、消散係数の推定が困難となる。桜島に設置されたライダーによって消散係数の推定が可能な上限を、2018 年 6 月 16 日の強い噴火を観測した際のデータから検討した。レンジ方向に後方散乱信号強度を微分することにより、簡易的に消散係数を導出することが出来る(スロープ法)。濃い火山灰がライダーに接近してきた 30 分間の消散係数について時間・レンジ領域内での出現頻度分布を求め、その形状から観測限界を検討した。図 14 に、スロープ法から推定された消散係数の時間高度断面と、この範囲内での消散係数出現頻度分布を示す。概ね消散係数 10/km 以上で急激に出現頻度が下がることが見える。この傾向は後方散乱強度のプロファイルに対するレンジ方向のフィルターをより強めると明確になることから、観測データに含まれるノイズの影響を受ける領域と考えられる。

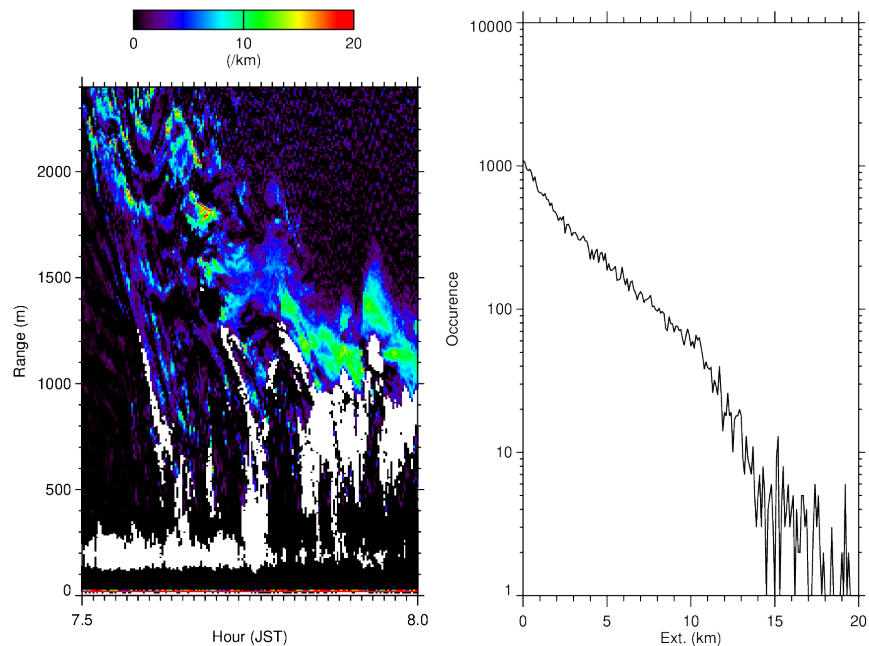


図 14 2018 年 6 月 16 日午前 7 時 30 分から 8 時のエアロゾル消散係数の時間高度断面図(左)およびその出現頻度分布(右)。左図で下層の白抜き部分は、近距離からの強い信号によって AD コンバータの変換レンジ外となり有意な計測値が得られなかった領域。

一方、10/km 以下の頻度分布はフィルターに左右されず、実際の消散係数の情報を含むものと判断できる。この結果から、ライダーによる消散係数の観測上限は 10/km とみなすことが出来る。国内の黄砂イベント時のライダーと TSP を対比した結果 (Shimizu et al., 2011) では消散係数が 1/km の時に TSP 濃度が $1\text{mg}/\text{m}^3$ であることが示されている。黄砂に比べ火山近傍における火山灰では粒経分布が大粒子側に偏っていると考えられるため、消散係数の上限 10/km は質量濃度換算で $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以上とみなすことが出来る。

iv) 地上用簡易火山灰測定装置の評価

令和 2 年度の報告書においてライダーによる消散係数と近隣の大気汚染常時監視局における SPM 濃度との対応がよいことを指摘した。ライダーは火口付近の火山灰を即時検出するために有利であるが、人間生活環境における火山灰濃度を得るために SPM などの地上粒子計測も有用と考えられる。しかしながら地方自治体による大気汚染常時監視局は数が限られており、地上粒子観測地点数を今後独



図 15 (株)mss 製の粒子数計測器。太陽電池パネルと LTE 通信により任意の場所に設置が可能。

自に増やしていくことを念頭に置いて簡易計測装置の評価を行った。図 15 は太陽電池パネルと LTE 通信モジュールを備え、粒子検出部には神栄テクノロジー(株)製の光学式ほこりセンサを利用した粒子数計測計((株)mss 製)である。これを観測所本館に設置し、約 4 ヶ月の観測を行った。ただし、計測計に日光が当たる時間帯には信頼出来る値が得られていない。これを除き、近傍の SPM 濃度と対比した散布図を図 16 に示す。一部のデータを除き、概ね計測粒子カウントと SPM の間で対応が取れている。3 地点の SPM との相関係数は 0.51-0.64 であった。今後は更に長期の観測から対応関係を検証し、日中にもデータが得られるよう遮光を改善するなどした上で、多地点での観測開始を目指す。

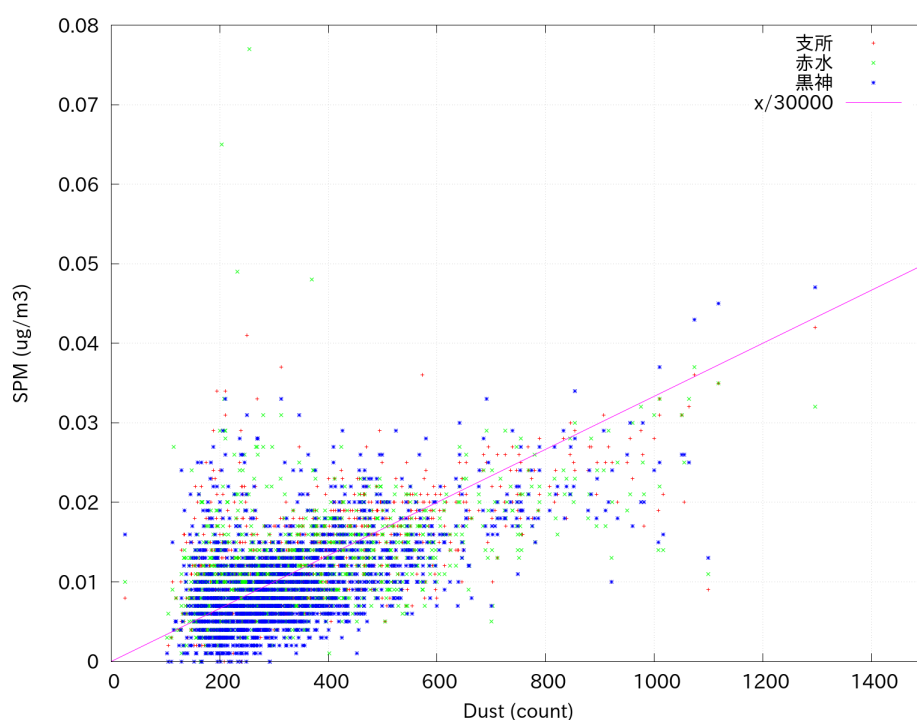


図 16 粒子数計測計(横軸)と 3 地点の SPM(縦軸)との散布図。赤、緑、青がそれぞれ桜島支所、赤水、黒神の SPM を示す。2021 年 12 月 9 日から 2022 年 3 月 31 日までの結果。

v) 今後の計画

2 地点におけるライダー観測を継続してデータ取得を行うことにより、火山灰移流拡散モデルの検証に利用可能なデータセットを作成するとともに、より長期のデータを用いた気候学的解析を行う。簡易計測装置による火山灰の測定値点数を増やす。

c) GNSS 観測

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した。

i) LC 搬送波位相遅延量の検討

本年度は 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特に高いサンプリングレート(1Hz)のデータセットを用いて実施した。使用したパスは、2020 年 8 月 9 日のイベントでパルス状の波形が観測された 7 つのパスである。これら観測点の 1Hz サンプリングの観測データに対して Gipsy-X Ver.1.0 (Bertiger et al., 2020) 解析ソフトウェアを用いて精密単独測位法 (PPP 法) による通常の測位解析を行い、1 秒毎の各衛星-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。図 17 に HARG 観測点における SVN45 に対する PPR の例を、図 18 に UTOG 観測点における SVN74 に対する PPR の例を示す。図 18 を見ると、噴火後に PPR 時系列が急速に立ち上がり、その後漸減した後に、再度急速に PPR の値が小さくなることから分かる。

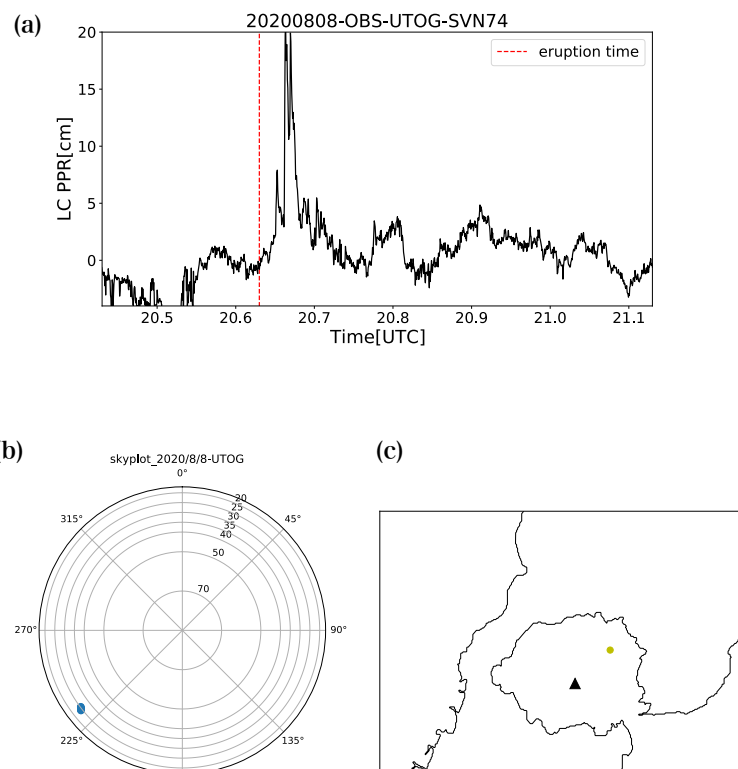


図 17 観測点 UTOG-SVN74 における 1Hz での解析結果。(a)LC PPR の時系列。横軸は時刻(UTC)、縦軸は LC PPR の値、赤点線は噴火発生時刻、(b)異常が見えている時刻における衛星の位置のスカイプロット。方位角は北を 0 とする時計周り、仰角は水平を 0 とし半径方向で表す。(c) 観測点の位置、▲は南岳。

一方、図 17 では、ピーク状に立ち上がった後、一度その値が小さくなった後に、再度 PPR の値が増加し、その後急減するという傾向が確認された。図 17、18 のいずれにおいても、PPR が異常値を示しているのはその時間にして 2-3 分以下であり、従来の 30 秒サンプリングでは、先に述べたような PPR の時間変化を捉えることは難しい。また噴煙検知で多くの実績を持つ気象レーダーにおいては、全仰角を走査するのに数分以上の時間を必要とする。これらの結果は、GNSS を用いた噴煙検知は、その高い時間分解能を活用することが重要であることを示唆する。

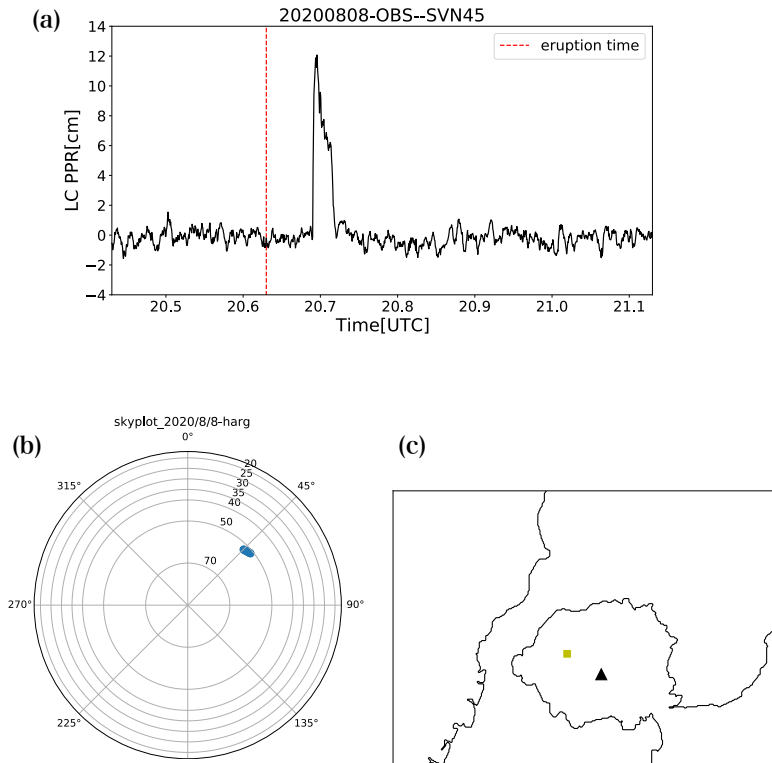


図 18 観測点 HARG-SVN45 における 1Hz での解析結果。(a) LC PPR の時系列。横軸は時刻(UTC)、縦軸は LC PPR の値、赤点線は噴火発生時刻、(b) 異常が見えている時刻における衛星の位置のスカイプロット。方位角は北を 0 とする時計周り、仰角は水平を 0 とする半径方向で表す。(c) 観測点の位置、▲は南岳。

ii) SN 比の検討

Ohta and Iguchi (2015) では、GNSS-PPR は特に水蒸気量に敏感な量である可能性を示唆していた。一方で、それらの定量評価には同論文では踏み込んだ議論は行っていない。そこで、標高に応じた飽和水蒸気量に基づいた噴煙中の温度上昇について定性的な検討を行った。2012 年 7 月 24 日の南岳噴火を例にした場合、KSHL 観測点と SVN34 衛星の間で最大 240mm の PPR 増大が確認された。同 PPR の増大は南岳付近の上空 4km 程度の情報をサンプリングしてきていることが Ohta and Iguchi (2015) で指摘されている。ここで簡単のために GPS 衛星から観測点の経路中、噴煙柱の中を通過している長さ 0.1km もしくは 1km と仮定すると、その屈折率は 240ppm および 2400ppm となる。上空 4000m の典型的な気圧 ($P_z=4000\text{m} = 616\text{hPa}$) および気

温 ($T_z=4000\text{m} = 274\text{K}$)、さらにクラウジウス・クラペイロンの式から飽和水蒸気圧 ($e_s=4000\text{m} = 6.6\text{hPa}$)を計算すると、Thayer(1974)の屈折率の定式より定常状態の屈折率を計算できる。今回の場合、定常状態の屈折率はおおよそ 207ppm となる。今回の噴煙によって生じた PPR 増大から計算された屈折率は 240ppm~2400ppm の範囲となる。この噴煙による屈折率の増大を説明するために、温度の上昇による飽和水蒸気量の増大を仮定すると、240ppm の場合で+34K, 2400ppm で+75K の温度上昇で観測値を説明できることが分かる。同試算では搬送波が噴煙柱の中を通過した長さを仮定している。より定量的な水蒸気量の計算を行うためには、トモグラフィ的手法による噴煙柱の形状把握および噴煙中の温度分布等との比較が必要となる。

Ohta and Iguchi (2015)は、2012 年 7 月 24 日の噴火時に GNSS の SN 比が 2dB 程度低下する場合があることを指摘している。一方で、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について、島内の GEONET 観測点を中心として SN 比の低下の有無を調べたが、顕著な低下を確認することはできなかった。SN 比については、受信機の種類によって、その特性が異なる可能性があることがこれまでも報告されている (Bilich et al., 2010)。これら特性の違いが噴煙検出に与える影響を評価するために、桜島島内に設置されている GEONET 0720 観測点の SN 比のデータを確認した。同観測点では、2012 年 7 月 24 日時点ではトプコン Net-G3 受信機が設置されており、2020 年 8 月 9 日時点ではトリンブル NetR9 が設置されていた。図 19、20 にそれぞれの日付の SN 比の時系列を全 GPS 衛星分示す。SN 比は衛星の仰角が高くなるほど高くなる一般的な傾向があるが、その特徴は両者で一致する。一方で、SN 比の絶対値が両者では大きく異なる。Net-G3 では 20-30dB/Hz 程度から~50dB/Hz 程度の範囲で比較的明瞭な放物線状の形状を示すが、NetR9 ではその下限が 35db/Hz 程度と高く、~50dB/Hz 程度で頭打ちをしているような SN 比の形状を示す。この比較において、2012 年時点ではアンテナは TRM29659.00、2020 年時点では TPSCR.G5 と異なるアンテナが設置されており、その厳密な比較は難しいが、両 SN 比の形状の違いは明瞭に認められる。GNSS 受信機ではゲインをコントロールするための機構等がメーカー毎に異なり、そうした受信機内部での制御によってその値、形状が異なっていることが示唆される。また、Bilich et al. (2010)は、トリンブル社製のアンテナにおいて、仰角 60 度程度以上で SN 比が落ちる(dropout) ことを指摘している。図 21 に、2020 年 8 月 9 日の 0720 観測点における PRN13 衛星の SN 比を示す。これを見ると仰角が高い領域で、SN 比が明瞭に減少していることが確認され、Bilich et al. (2010) が指摘している傾向と類似していることが分かった。これら特徴がそのまま、2020 年 8 月 9 日の噴火による SN 比減が確認できなかったことと関連しているかは継続した検討が必要だが、少なくとも SN 比を用いる場合、受信機毎の特性を事前に把握した上で活用する必要があることが明らかになった。

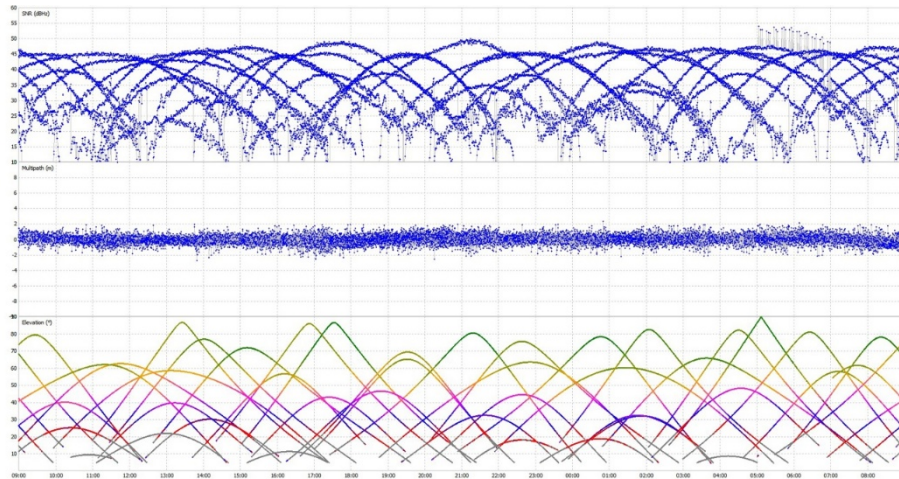


図 19 2012 年 7 月 24 日の GEONET 0720 観測点における L1 シグナルの信号強度。上から SN 比、マルチパス、衛星仰角をそれぞれ示す。

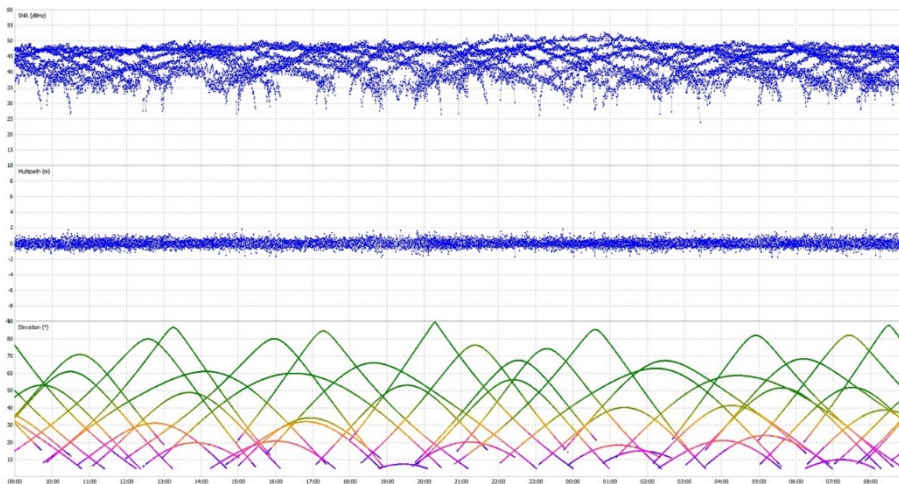


図 20 2020 年 8 月 9 日の GEONET 0720 観測点における L1 シグナルの信号強度。

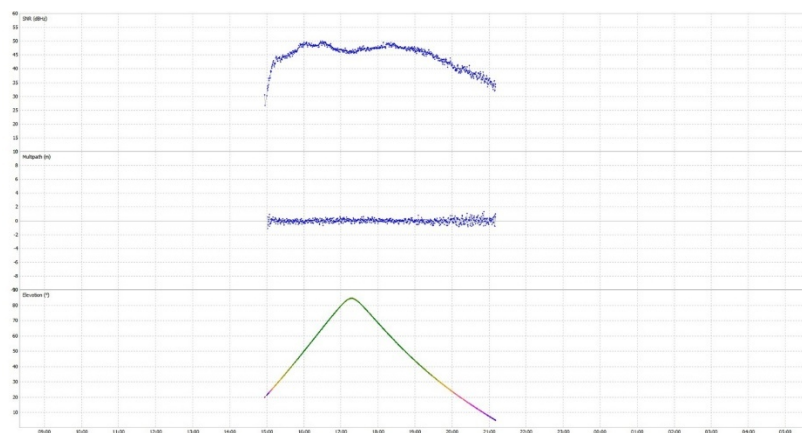


図 21 2020 年 8 月 9 日の GEONET 0720 観測点における PRN13 衛星における L1 シグナルの信号強度。上から SN 比、マルチパス、衛星仰角をそれぞれ示す。

d) ディスドロメータによる地上観測

令和2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継続した。3) a) i) に記述するように、桜島においては、2021年5月中旬以降、噴火活動が低下した。一方、諏訪之瀬島では噴火活動が繰り返されたので、キャンペーン観測を行った。

i) 観測の概要

令和2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。

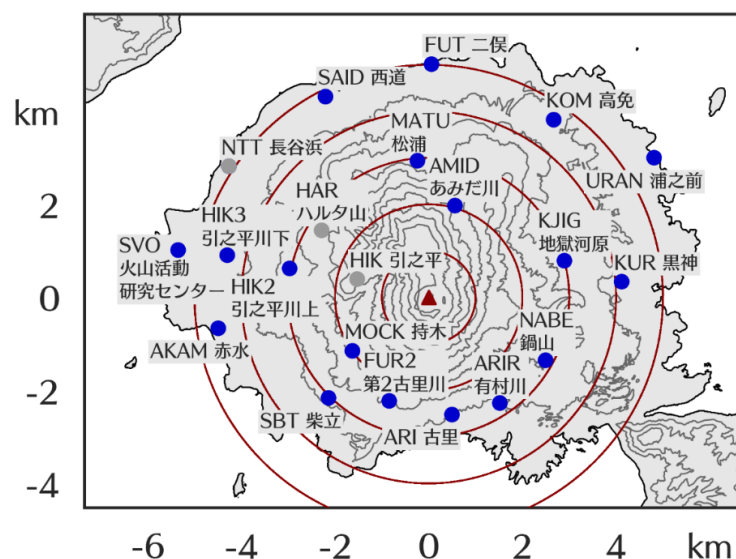


図22 桜島におけるディスドロメータの位置図。青丸は本プロジェクトにおいて設置した観測点、白丸は他のプロジェクトにおいて設置した観測点。赤三角は南岳 A 火口の位置を、赤線は南岳 A 火口から1kmごとの同心円を示す。

ii) 諏訪之瀬島における降灰量キャンペーン観測

活動が活発だった諏訪之瀬島の御岳火口から南に位置するGPS観測室(図23)前にディスドロメータを設置して降灰量のキャンペーン観測を行った(図24)。2021年3月8日から10日にかけて、また11月1日に、ディスドロメータで降灰が検知され、同時に降灰粒子のサンプル採取を行った。ディスドロメータでの観測結果は、前年度の報告書 d) ii) で求められた換算式により降灰重量に換算され、サンプル採

取により求められた降灰重量と比較された。4回の降灰イベントのうち3回では、ディストロメータから求められた降灰量がサンプル降灰量の2倍以内の精度で求められた一方で、3/9 17:15-3/10 8:00の降灰イベントでは、ディストロメータにおける降灰量がサンプルから求められた降灰量よりもはるかに過小になった（表4）。3回のイベントでは、ほとんどの粒子が重量の計算対象となる粒径-落下速度区間に収まっている（図25a, b, d）一方で、過小となったイベントは、計算対象の速度上限よりも速い速度で降下した粒子が多数検知されていて（図25c）、このことが過小評価の原因となったと考えられる。こうした傾向は、昨年度までに解析された桜島での降灰イベントでも見られた。異なる火山での噴火による降灰でも、昨年度に求められた経験的な降灰量の換算式が適用できることが示唆された一方で、換算式に改良の余地があることも再確認された。



図 23 降灰サンプルを採取した観測点の位置図。3地点のうちGPS観測室（図中「GPS」）にディストロメータを設置し、降灰採取との同時観測を行った。



図 24 11月1日14時51分にGPS観測室で撮影された噴煙。

表 4 サンプル降灰量とディストロメータ降灰量の比較

採取時刻	サンプル降灰量 (g/m ²)	ディストロメータ降灰量 (g/m ²)
2021/3/8 15:55-16:00	8.53	10
2021/3/8 16:33-16:36	10.5	6
2021/3/9 17:15-3/10 8:00	22.7	3
2021/11/1 14:58-15:05	160	121

※サンプル降灰量は諏訪之瀬島 GPS 観測室前で採取した火山灰、ディストロメータ降灰量は、粒子の落下速度と粒径を用いた経験式から求めた。

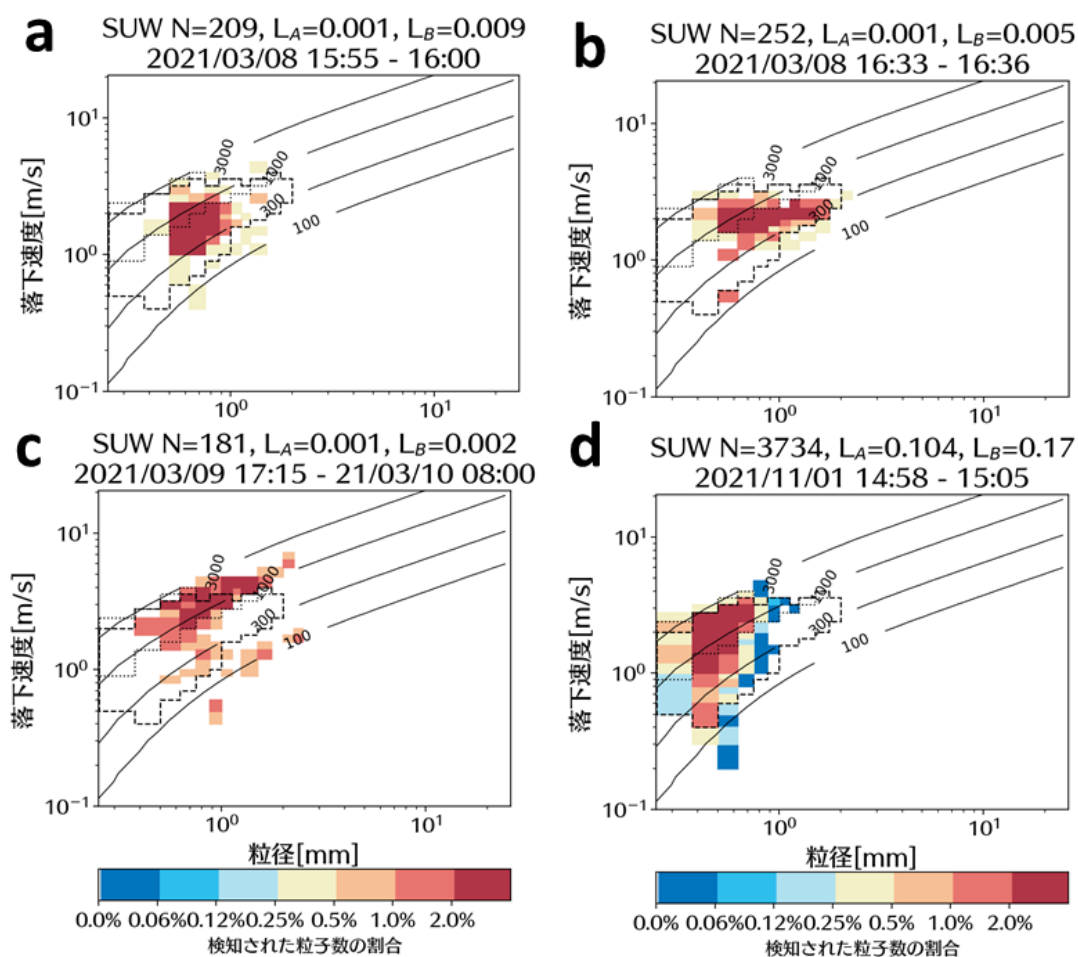


図 25 GPS 観測室前で計測された降灰粒子の粒径一落下速度分布。N は総粒子数， L_A ， L_B はそれぞれ，経験的な換算式から求められた，0.25mm 以上，0.25mm 以下の粒子重量。点線と破線はそれぞれ 0.25mm 以上，以下の粒子重量の計算対象区間で，等値線は粒子の実効密度を表す。a) 2021 年 3 月 8 日 15 : 55－16 : 00、b) 3 月 8 日 16 : 33－16 : 36、c) 3 月 9 日 17 : 15－3 月 10 日 8 : 00、d) 2021 年 11 月 1 日 14 : 58－15 : 05。

iii) 降灰量の時間変化

これまでと同様に、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。2021 年に発生した噴火のうち、噴煙高度 2500m 以上に達したものについて、令和 2 年度の報告書 d) ii) にて求めた経験式から計算されたディストロメータの降灰量と、有村観測坑道において計測された地震動の振幅を比較して、図 26, 28 に示す。いずれの噴火も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 2500m 以上に達した噴火はいずれも降灰と同時に降雨が見られなかった。

水平一様な風速場において火口から火山灰粒子が移流するとすれば、火山灰は風下においてのみ検知される。1 回の単発の噴火に対応して、1 つの観測点のみで検知される場合が最も多い。噴煙高度 2500m 以上の比較的規模の大きい噴火でも、2021 年 5 月 6 日 23:22 に発生した、高度 2500m 以上の噴煙を伴う噴火など、1 つの観測点での検知にとどまることもある。この噴火では、AMID 観測点のみで降灰が検知された（図 28c）。

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。こうした噴火は規模が大きくなるほど増え、観測期間中では、2021 年 3 月 9 日 22:26 に発生した、高度 2700m の噴煙を伴う噴火や、翌 10 日 15:20 に発生した 2500m の噴煙を伴う噴火が、それぞれ NABE, ARIR 観測点と MOCK, SBT 観測点と、2 つの観測点に降灰をもたらした（図 26b, 26c）。また、同じ方位に距離の異なる 2 つの観測点を配置したことで、距離による到達時刻や量の違いを計測できた例もある。2021 年 3 月 27 日 2:36 に発生した、噴煙高度 3200m の噴煙を伴う爆発では、火口からの距離が近いほど、噴火開始から降灰検知開始までの時間が短かった。火口から相対的に近い MATU 観測点では少量の降灰しか検知されなかった一方で、相対的に遠い SAID や FUT では多量の降灰が検知された（図 26d）。落下速度ごとに粒子数の頻度分布の時間変化を見てみると、MATU 観測点では最も早い時間に落下速度の速い粒子が少数検知されている一方、FUT や SAID では幅の広い落下速度の粒子が多数検知されている傾向が見られ、特に SAI では時間とともに落下速度の最頻値が小さくなっていく様子が見られた（図 27）。この噴火で遠くの観測点での降灰量が多かったのは、滞空時間が長い細流粒子が多量に遠方の観測点で検知されたからだと思われる。

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。2021 年 3 月 6 日 23:45 に発生した噴火では、2700m 以上の噴煙を伴う噴火が発生し、KJIG, AMID, MATU の 3 観測点で降灰が検知された（図 26a）。2020 年 3 月 30 日 4:33（図 28a）に発生した噴煙高度 2700m の噴火では、KUR, ARIR, ARI の 3 観測点で降灰が検知された。ARIR と ARI に関しては主要な降灰検知が噴火開始から 3 時間以上経過しており、噴

火開始時に放出された火山灰が降下したというよりも、それに続く連続的な火山灰放出によってもたらされた火山灰粒子が降下したと考えられるものの、噴火前後での顕著な振幅変化は見られなかった。

こうした火山灰連続放出が地震動振幅の変化から窺えることもある。2021 年 4 月 5 日 6:41 の噴火では、噴火開始後から数時間にわたり振幅の増加傾向が見られ、火山灰連続放出があったと考えられる。各観測点での降灰量の時間変化から、噴火開始直後に放出された火山灰が検知されたのは ARI, FUR2 観測点で、それに続く連続放出で放出された火山灰が検知されたのは ARI, MOCK, KJIG 観測点だと考えられる (図 28b)。

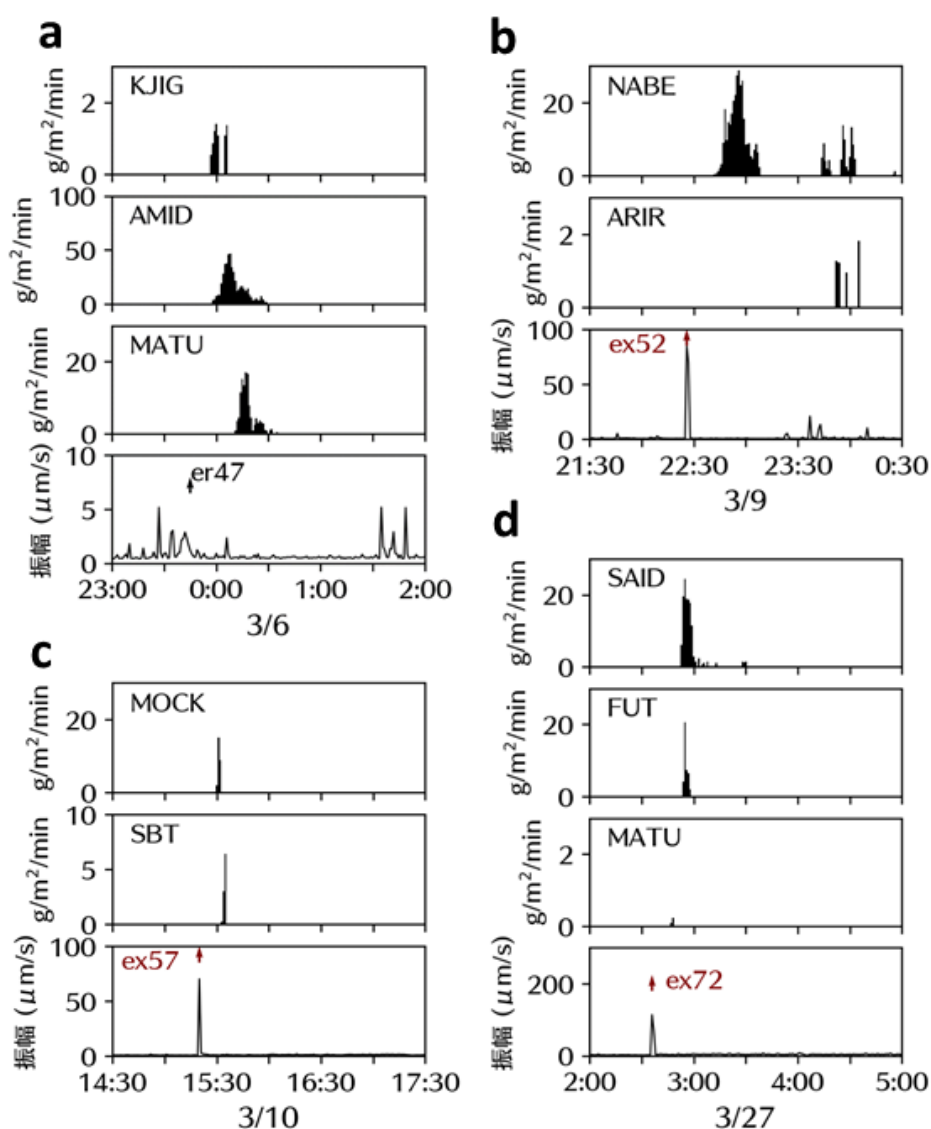


図 26 ディストロメータにより観測された降灰量と地震動振幅の時間変化の比較。上向きの矢印は爆発を表す。a) 2021 年 3 月 6 日の噴火、b) 2021 年 3 月 9 日の爆発、c) 2021 年 3 月 10 日の爆発。d) 2021 年 3 月 27 日の爆発。

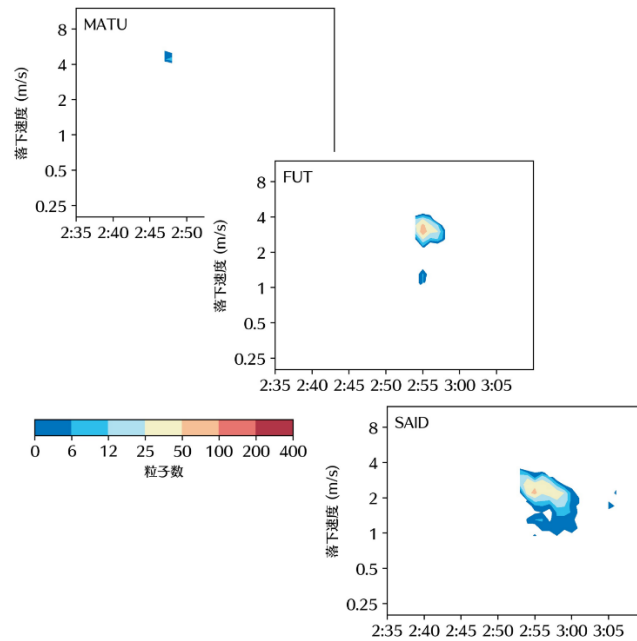


図 27 MATU、FUT、SAID 観測点においてディストロメータにより観測された火山灰粒子の落下速度の頻度分布時間変化。2021 年 3 月 27 日噴火。

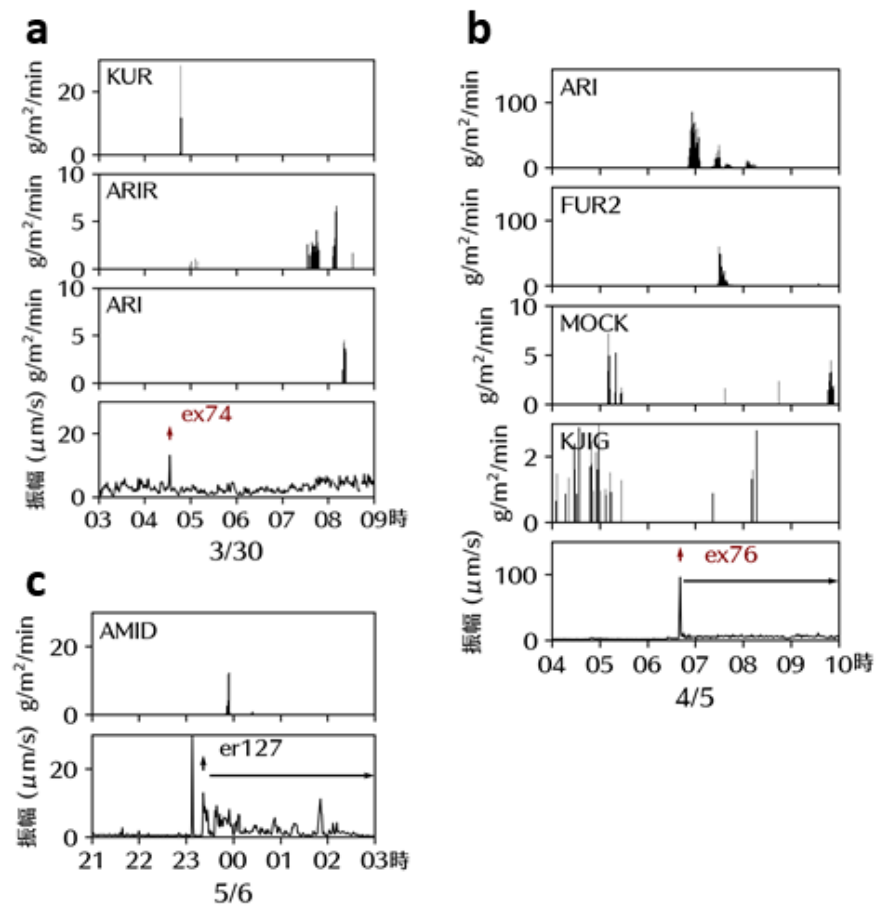


図 28 ディストロメータ観測から推定された降灰量と地震動振幅の時間変化の比較。上向きの矢印は爆発を、右向きの矢印は火山灰連続放出を表す。a) 2021 年 3 月 30 日の爆発、b) 2021 年 4 月 5 日の爆発、c) 2021 年 5 月 6 日の噴火。

e) レーダー観測による火山灰推定の高度化

レーダによる降灰量推定は、いわゆる RA-ZA 関係式 (RA は降灰強度、ZA はレーダ反射因子) を用いておこなわれる。RA-ZA 関係式を求める方法として、実際に観測された降灰量とレーダ観測値の間の経験式を求める方法 (工学的的方法) が用いられてきた (真木・他、2019)。近年、京都大学防災研究所は、桜島に展開された計 21 台の光学式ディストロメータ (Parsivel²) を展開し、落下する火山灰粒子の粒径分布の観測データを蓄積している。粒径分布の情報が得られると、散乱計算から理論的な RA-ZA 関係式を導出すること (理学的的手法) が可能になる。Maki et al. (2021) は、ディストロメータで観測された顕著な 6 噴火事例の粒径分布の情報から、理論的な RA-ZA 関係式を求めた (令和 2 年度報告書)。求められた RA-ZA 関係式は噴火事例によって変動した。この変動は、レーダによる降灰量推定の誤差の原因となるために、その理由を明らかにする必要がある。このため、今年度は、2018 年から 2020 年の 3 年間に発生した、噴煙高度が 1000m 以上の噴火事例 (計 801 事例) のディストロメータの観測データを抽出した。ここでは、抽出条件、抽出方法、抽出されたデータの解析方法について述べる。最後に解析結果の一例を紹介する。RA-ZA 関係式の変動の本格的な解析は令和 4 年度を予定している。

i) 降灰データの抽出

図 29 にディストロメータの観測データの処理手順を示す。処理手順は、大きく分けて【観測 PSD データの編集】、【解析用 PSD データの抽出】、【抽出条件ファイルの作成】がある。なお、PSD は Particle Size Distribution (粒径分布) の略である。

【観測 PSD データの編集】では、まず、データ収録フォーマットをチェックし修正する。これは、21 台のパーシベルの中にはフォーマットが異なるものがあるため、自動でフォーマットをチェックし修正するプログラムを作成した。次に、Parsivel2 の観測データを管理する都合上、各観測点の 1 年間分のデータを 1 つのファイルに編集する。編集されたデータを「年間 PSD データ」と呼ぶ。「年間 PSD ファイル」には降水粒子のデータやノイズデータ等が含まれているので、次の【解析用 PSD データの抽出】が必要となる。

【解析用 PSD データの抽出】は、「年間 PSD ファイル」から降灰粒子のデータを抽出する作業である。抽出に当たっては、【抽出条件ファイルの作成】で用意した「噴火リスト」を参考にする。「噴火リスト」は、鹿児島地方気象台で作成される桜島噴火情報 (噴火時日時、噴煙高度、噴煙の向きなど) と国交省の垂水 XMP で観測されたレーダエコーの情報 (降雨エコーの有無、エコー分布の特徴など) が記載された csv ファイルである。「噴火リスト」を参考にして「年間 PSD データ」から抽出される PSD データを「噴火 PSD データ」と呼ぶ。抽出は、matlab スクリプト 'scr_parsivel_retrieve_iku.m' により自動的におこなわれるが、その際、次の条件が満たされるようにデータが抽出される (図 30 参照)。まず、「噴火リスト」に記載された噴火時刻 (TE) から、初めて PSD データが観測された時刻までの時間を Δt_1 とし、 Δt_1 が 1 hour (デフォルトは 1 hour) 以内の場合、そのデータは降灰粒

子のデータと判定し、抽出開始時刻を決定する。抽出終了時刻は、データが連続して Δt_2 時間以上（デフォルト値は $\Delta t_2=10$ min とする）観測されない期間の最初の時刻とする。「噴火 PSD データ」のフォーマットは「年間 PSD データ」のフォーマットと同じである。

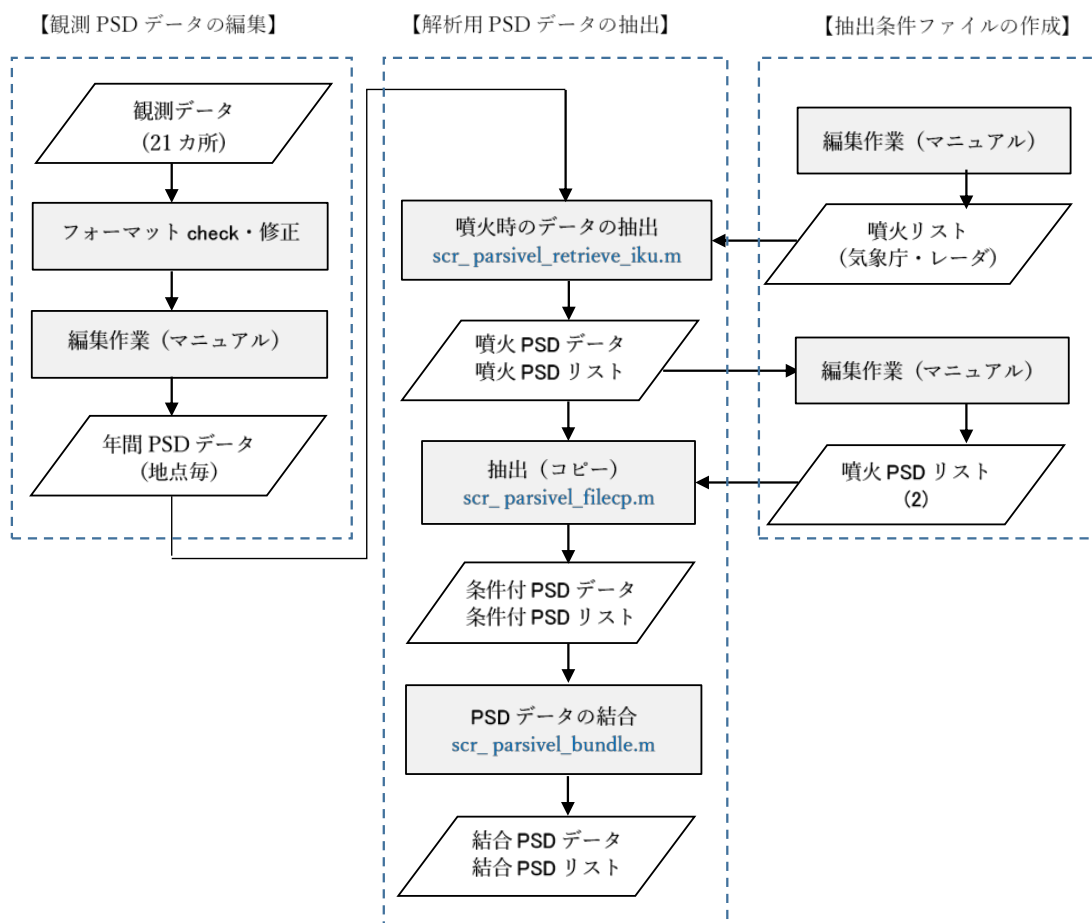


図 29 光学式ディストロメータ (Parsivel²) により観測された粒径分布データから降灰時のデータを抽出する手順。

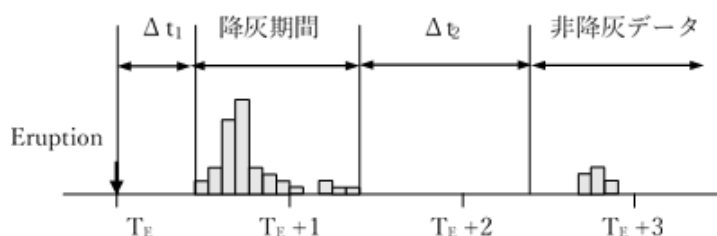


図 30 降灰の開始と終了の定義を説明する模式図。TE は噴火時刻、 Δt_1 と Δt_2 はそれぞれ PSD データの記録がない時間。

注意すべき点は、このようにして抽出されたデータには降水データが混在している可能性があるため、「噴火 PSD データ」＝「降灰 PSD データ」とは言えない。収録データが降灰データだったとしても、更に、降灰データが記録されていたとしても、

ディストロメータの位置が降灰域の境界付近だった場合、記録されている時間が短かくデータの代表性が失われている可能性がある。このようなデータは解析対象から取り除く必要がある。

「噴火 PSD データ」から解析に必要な降灰データのみを取り出すスクリプトが、`'scr_parsivel_filecp.m'` である。選定されたデータを「条件付 PSD ファイル」と呼ぶ。選定に際しては「噴火 PSD リスト 2」を参考におこなわれる。「噴火 PSD リスト 2」は、「噴火 PSD データ」と一緒に作成される「噴火 PSD リスト」を手作業で編集して、不要なデータを削除したファイルである。選択できる条件として、年、観測点、噴煙高度、降灰観測時間、降雨の有無、降灰分布パターンがある。解析結果は「噴火 PSD リスト 2」の正確さに依存するために、「噴火 PSD リスト 2」の作成にあたっては十分に注意する必要がある。なお、「条件付 PSD データ」のフォーマットは「年間 PSD データ」、「噴火 PSD データ」のフォーマットと同じである。

プログラム `'scr_parsivel_bundle.m'` は `'scr_parsivel_filecp.m'` により選定された「条件付 PSD データ」を結合するスクリプトで、結合されたデータを「結合 PSD データ」と呼ぶ。「結合 PSD データ」は、全期間、全地点、全噴煙高度などのデータを解析してその統計値を求めたい場合に利用される。「結合 PSD データ」のフォーマットは「年間 PSD データ」、「噴火 PSD データ」、「条件付 PSD データ」のフォーマットと同じである。

ii) 降灰 PSD データの解析プログラム

図 31 は抽出された降灰 PSD データの解析手順と得られる結果を説明する流れ図である。降灰粒子の粒径分布 (PSD) の特徴を明らかにすることと定量的降灰量推定式を求めることを目的としていくつかのプログラムを作成した。プログラムは、本報告書の ii) 降灰データの抽出で述べた「噴火 PSD データ」、「条件付 PSD データ」、「結合 PSD データ」のいずれかを入力データとし、1 分毎の PSD、落下速度、ガンマ PSD パラメータ、積分パラメータ等を求めて図化する。更に、PSD パラメータ間の相関解析から RA-ZA 関係式などの降灰量推定式を求める。図の各プログラムの名称と機能を表 5 にまとめた。`'scr_parsivel_dpri.m'` は、PSD データの解析の中心となる matlab スクリプトファイルである。プログラム名の最初に `'f_'` が付いているプログラムは、`'scr_parsivel_dpri.m'` の中で呼び出される関数ファイルである。PSD パラメータを求めるアルゴリズムの詳細は Maki et al. (2020) を参照。

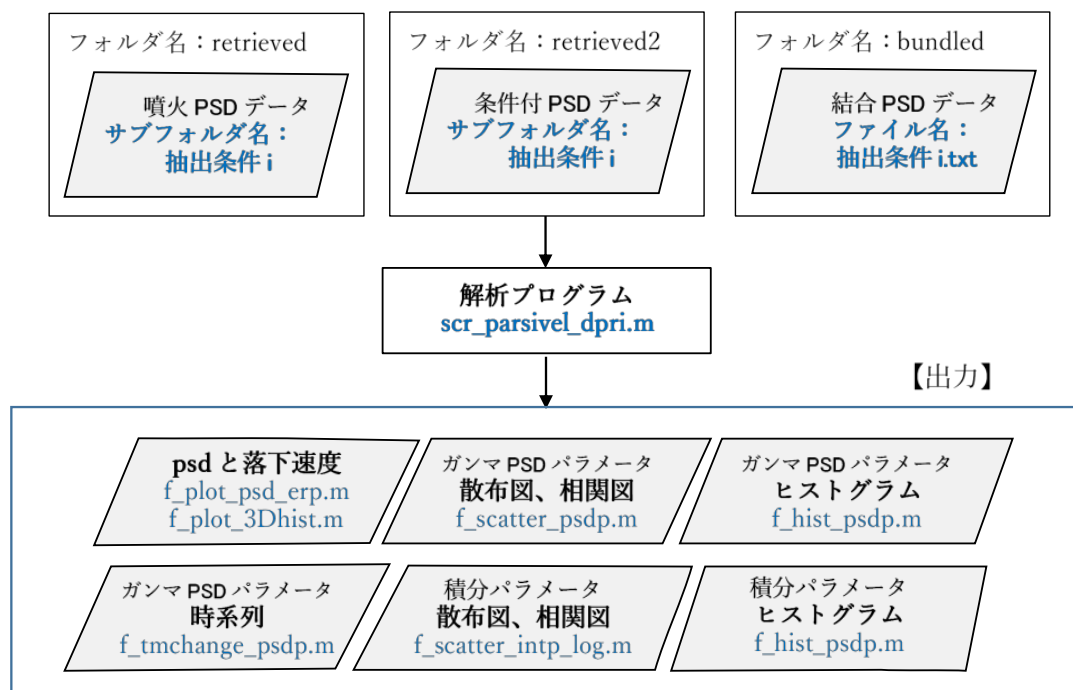


図 31 抽出された降灰データの解析手順と得られる結果を示す流れ図。

表 5 作成した PSD 解析プログラムの一覧

Matlabプログラム	機能
scr_parsivel_dpri.m	PSDデータの解析の中心となるmatlabスクリプトファイル
f_plot_psd_erp.m	観測されたPSDとガンマPSD近似（1分毎）
f_plot_3Dhist.m	粒子の落下速度の三次元ヒストグラムとべき乗回帰直線
f_tmchange_psdp.m	PSDパラメータの時系列図
f_scatter_intp.m	積分パラメータ間の散布図
f_scatter_psdp.m	ガンマPSDパラメータ間の散布図
f_hist_psdp.m	PSDパラメータのヒストグラム

iii) 解析結果

表 6 に scr_parsivel_retrieve_iku.m により抽出された「噴火 PSD データ」の噴火事例数（地点総数とサンプル総数）を示す。但し、降雨データは除外している。抽出は各年、各噴煙高度でおこなった。2018 年から 2020 年の 3 年間の全観測地点で抽出された「噴火 PSD データ」は 801 噴火事例（2089 点、67635 サンプル）であった。「噴火 PSD データ」のうち、降灰時間が 10 分以上観測された事例を選び出した結果を表 7 に示す。3 年間の全観測地点で抽出された「噴火 PSD データ」は 405 噴火事例（988 点、63357 サンプル）であった。噴煙高度が 3000m 以上の場合は、27 噴火事例（65 地点、2432 サンプル）である。以降に示す解析結果は表 7 のサンプルデータを使用している。

表 6 scr_parsivel_retrieve_iku.m により抽出された「噴火 PSD データ」。数値は、噴火事例数（地点総数、サンプル総数）。

	Eruption column height			Total
	1000–2000 m	2000–3000 m	≥ 3000 m	
2018	193 (475, 17477)	38 (79, 1729)	9 (17, 291)	240 (572, 19497)
2019	177 (463, 21816)	75 (160, 2313)	17 (40, 325)	269 (664, 24454)
2020	217 (636, 17426)	62 (161, 4276)	13 (55, 1982)	292 (853, 23684)
Total	587 (1574, 56719)	175 (400, 10631)	39 (112, 2598)	801 (2089, 67635)

表 7 scr_parsivel_filecp.m により選択された「条件付き PSD データ」（条件：観測時間 10 分以上）。数値は噴火事例数（地点総数、サンプル総数）。

	Eruption column height			Total
	1000–2000 m	2000–3000 m	≥ 3000 m	
2018	95 (223, 16491)	20 (41, 1544)	5 (8, 262)	120 (272, 18297)
2019	82 (203, 20832)	41 (72, 1933)	11 (15, 250)	134 (290, 23015)
2020	98 (292, 16091)	42 (92, 4034)	11 (42, 1920)	151 (426, 22045)
Total	275 (718, 53414)	103 (205, 7511)	27 (65, 2432)	405 (988, 63357)

図 32 は地点毎の降灰観測総時間と観測された噴火総事例数である。火口の南から南東方向で観測数が多くなっていることがわかる。また、火口の西側ではあるが、火口に近い HIK では多くなっている。これに対して、火口の北西側では少なくなっている。

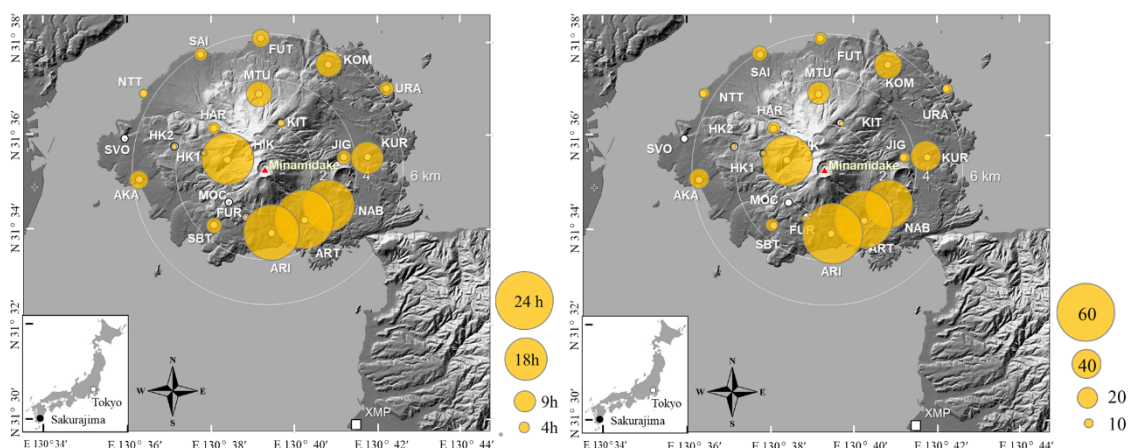


図 32 「条件付 PSD データ」の地点毎の総降灰観測時間（左図）と総噴火事例数（右図）。

多くの噴火事例で観測された PSD データを用いた RA-ZA 関係式および CA-ZA 関係式を求めた。ここで、CA は火山灰の空間密度である。図 33 は噴煙高度 1000m 以上

の全噴火事例について求めた RA-ZA 関係式および CA-ZA 関係式である。得られた関係式は

$$RA = 7.16 \times 10^{-2} ZA^{0.735}; RA \text{ (kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}), ZA \text{ (mm}^6 \text{ m}^{-3})$$

$$CA = 1.71 \times 10^{-5} ZA^{0.646}; CA \text{ (kg m}^{-3}), ZA \text{ (mm}^6 \text{ m}^{-3})$$

である。なお、降灰粒子の密度は $2.5 \times 10^3 \text{ (kg m}^{-3})$ を用いている。RA-ZA 関係と CA-ZA 関係を比較すると、前者に比べて後者のばらつきの方が大きい。ばらつきの程度は、同じ ZA に対して、RA、CA とともに 1 桁程度の変動がある。

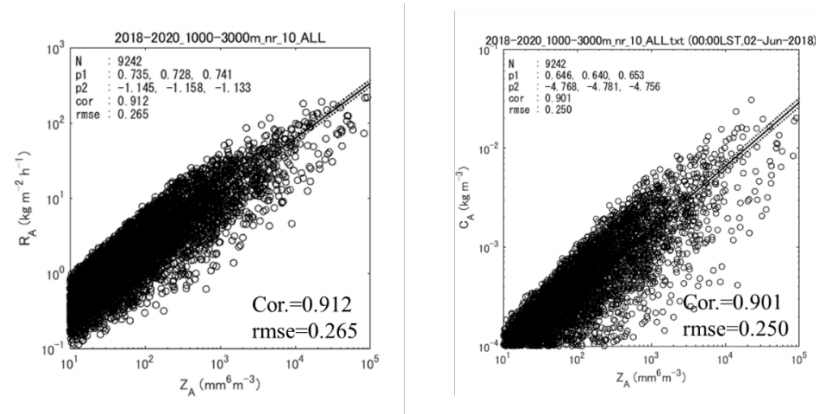


図 33 噴煙高度が 1000m 以上の全噴火事例の「条件付 PSD データ」から求めた RA-ZA 関係式（左図）と CA-ZA 関係式（右図）。

図 34 は、噴煙高度が 1000m–2000m、2000m–3000m、3000m 以上の噴火事例のそれぞれの場合の RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式である。結果を見ると、両関係式は、1000m–2000m と 2000m–3000m では大きく変わらないが、3000m 以上の噴火事例の場合には、両関係式の y 切片の値が他の高度に比べて小さくなる傾向が認められる。この理由として噴火の規模が大きくなる（噴煙高度が高くなる）と、大きな粒子が放出されるためと考えられる：大きな粒子は ZA の値は直径の 6 乗に比例するのに対して、RA は直径の $3 + \alpha$ 乗（ α は落下速度に関係するパラメータで 1 以下）に比例し、CA は直径の 3 乗に比例するためである。

得られた RA-ZA 関係式を用いると、レーダ観測から降灰量分布を求めることが可能になる。その例を図 35 に示す。解析した噴火事例は 2019 年 11 月 8 日 17:24 の桜島噴火の例で、噴煙高度は 5700m（気象庁発表）であった。用いたデータは 2 仰角の PPI データで、降灰の観測頻度は 1 分毎である。レーダから推定された総降灰量は約 5.1 万トン、総降灰面積は約 70 km² である。レーダ情報の利点は、降灰の量の情報に加えて降灰の分布の情報が得られる点である。図 35(a)には、火口付近で降灰量が最も多く、風下である南東方向に降灰域が伸びている様子が示されている。興味深いのは、降灰量と降灰の観測時間が必ずしも対応していない点である。降灰量は風下に行くに従って少なくなるのに対して、降灰時間は風下に行くに従って長くなり火口から約 10km のところで最長となっている。桜島のすぐ南沖に弱いエコーが見られる。弱い降雨によるものかも知れない。総降灰量の時間変化を見ると、

最初に急激に増え、その後ゆるやかに増えて最大値まで達している。一方、総降灰面積はほぼ直線的に増えている。

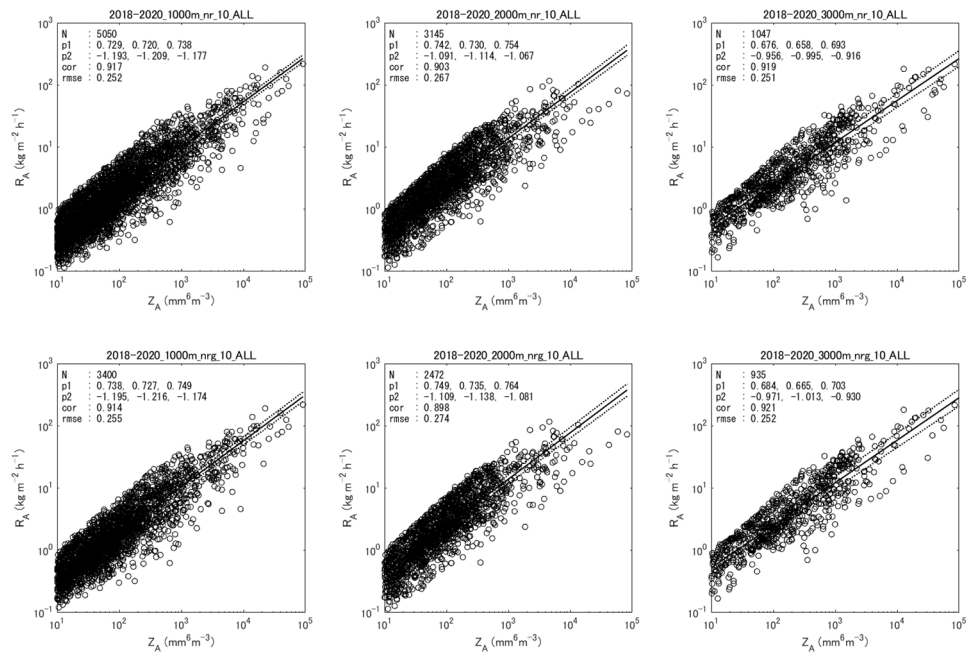


図 34 噴火高度別に求めた RA-ZA 関係式（上段の図）と CA-ZA 関係式（下段の図）。
左図：噴煙高度は 1000m－2000m、中央図：2000m－3000m、右図：3000m 以上。

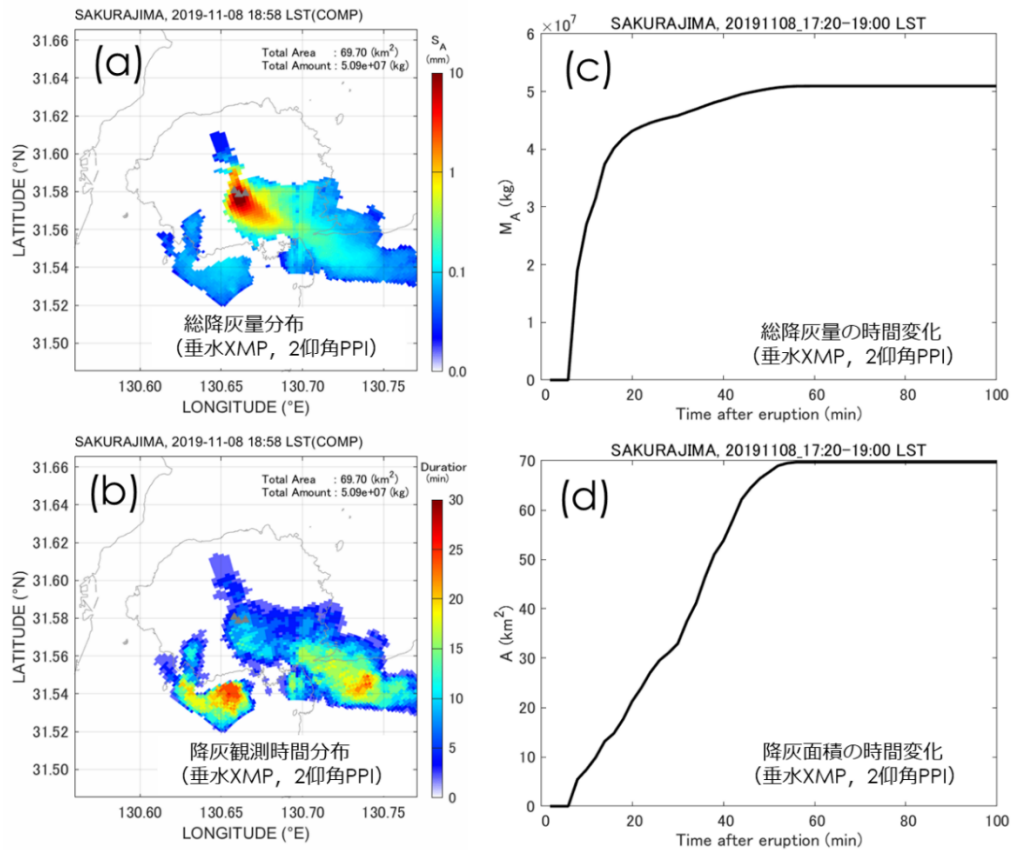


図 35 国土交通省垂水 X バンド MP レーダから求めた降灰情報。(a) 積算降灰量分布 (b) 降灰観測時間分布、(c) 総降灰量の時間変化、(d) 総降灰面積の時間変化。2019 年 11 月 8 日の噴火事例。

iv) まとめと展望

今年度は、桜島に設置されたディストロメータにより、2018 年から 2020 年の 3 年間に収集された PSD データを用いて、RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式を求めた。使用したサンプル数は、405 噴火事例 (988 点、63357 サンプル) である。得られた RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式の変動が大きく、同じ ZA の値に対して RA、CA の推定値が 1 桁違うことがあり得る。従って、今回得られた関係式を実際のレーダ観測に用いる場合には、推定誤差に注意しておく必要がある。ただし、長期間の積算された RA や CA を求める場合には RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式の変動の影響は少なくなると考えられる。

RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式の変動の理由として、粒径分布の変動、粒子の密度の変動(本解析では一定値とした)、密度の変動に関して落下速度が変動すること、などが考えられる。推定精度向上の最も単純な方法は、噴火事例毎に求めた RA-ZA 関係式と CA-ZA 関係式を使うことである。これは、レーダ雨量の推定精度を地上で観測された雨量で補正する(解析雨量)という考え方である。桜島の場合にはこの方法が可能であろう。国内外の他の火山にも適用できる関係式を求める為には、粒径分布や密度の変動をもたらす要因を調査する必要がある。

f) 船舶レーダによる噴煙観測

船舶レーダは船の安全な航行のために用いられるレーダである。その特徴の一つに、ファンビームを射出するスロットアンテナが採用されていることが挙げられる。これは、海上を揺れながら航行する船舶の周りの障害物や他の船舶を検知するためである。また、障害物を素早く検知するためにスロットアンテナを高速度で回転させる点も船舶レーダの特徴の一つである。真木・他（2020）は、アンテナの回転軸を 90° 傾け、火口方向に向けて縦回転させることにより噴煙柱の発達過程の観測に船舶レーダが利用できるのではと考えた（図 36）。京都大学防災研究所の一般共同研究（2018 年～2019 年）の中で実施した桜島での試験観測の結果は、船舶レーダは 1.25 秒間隔で噴煙柱の発達の様子を捉えることに成功し、更に、弱い雨の中での噴煙柱を検出できる可能性があることが確かめられた。これらの成功をもとに、複数台の船舶レーダによる噴煙柱のモニタリング技術の実用化を目指した研究が 2021 年度から開始された。船舶レーダは一般の気象レーダと比べて安価であること、耐久性に優れていること、輸送や設置が容易であることから、本研究では、複数台の船舶レーダによる噴煙柱の同時観測技術の実用化を目指している。以下、本報告では、船舶レーダの仕様、データ処理について述べ、2021 年度に実施した機動観測の結果および噴煙柱の観測結果の例を紹介する。

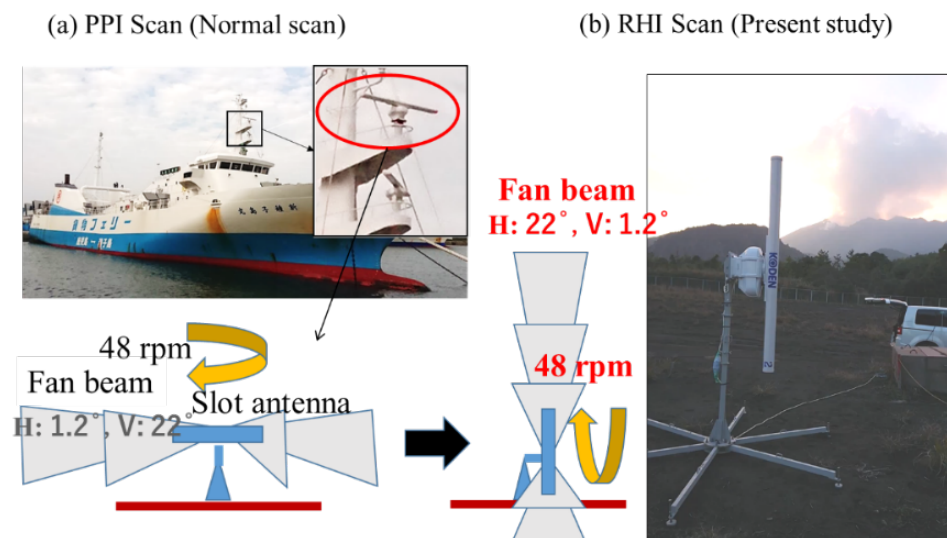


図 36 (a) 通常の船舶レーダのアンテナスキャンモード。(b) 噴煙柱の観測用のアンテナスキャンモード。

i) 船舶レーダの主な仕様

使用した船舶レーダは、FRS コーポレーションが所有するマグネトロンタイプの X バンド船舶レーダ、北海道大学が所有するマグネトロンタイプの X バンド船舶レーダ、鹿児島大学・(株)光電製作所の固体素子タイプの X バンド船舶レーダ 2 台である。FRS コーポレーションのレーダは、2021 年 5 月 7 日に京都大学防災研究所桜島ハルタ山観測点に設置され、同年 7 月末まで観測がおこなわれた（図 37a）。北海道大学のレーダは 2021 年 6 月 4 日に京都大学防災研究所桜島黒神観測点に設置さ

れ通年観測がおこなわれた（図 37b）。鹿児島大学・(株)光電製作所の固体素子タイプのレーダのうち 1 台（400W）は、2021 年 5 月 14 日に京都大学桜島火山観測所の屋上に設置され、通年観測がおこなわれた（図 37c）。もう 1 台の固体素子レーダ（100W）は、車に搭載されて機動的な噴煙柱の観測に用いられた（後述）。



図 37 複数台の船舶レーダによる噴煙柱の定点観測。(a) 京都大学防災研究所桜島ハルタ山観測点に設置された FRS コーポレーションの船舶レーダ。(b) 京都大学防災研究所桜島黒神観測点に設置された北海道大学の船舶レーダ。(c) 京都大学防災研究所桜島火山観測所屋上に設置された鹿児島大学・光電製作所の船舶レーダ。

図 38 にマグネトロンタイプの船舶レーダの構成を示す。レーダは本体（送受信機・アンテナ、レーダ制御パネル）と観測画像収録ユニットから構成される。画像収録ユニットは、研究用に追加されたユニットで、レーダ本体から送られてくる画像データを PC のハードディスクへ保存する。表 8 にマグネトロンタイプの船舶レーダの主な仕様を示す。レーダの波長は 3cm、アンテナは長さ 2m のスロットアンテナ、ビーム幅は水平 1.2° 、垂直 22° のアンテナの回転速度は 48rpm である。これらの仕様により、成長する噴煙柱の鉛直構造を方位角 22° 、仰角 1.2° のビーム幅で、48rpm（1.25 秒毎）の時間分解能で観測することが可能となっている。

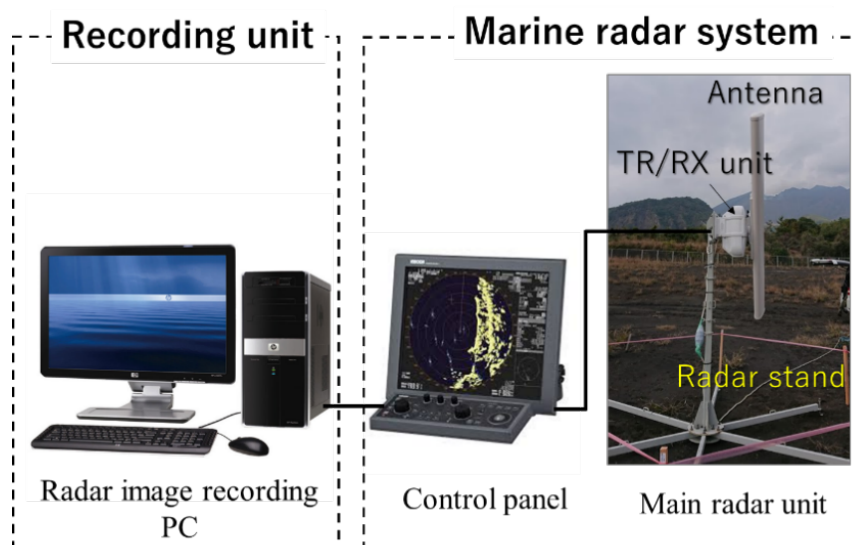


図 38 マグネトロンタイプの船舶レーダの構成。

表 8 マグネトロンタイプの X バンド船舶レーダ（北海道大学）の主な仕様

Antenna	Length	197 cm
	Beam width	H: 1.2°, V: 22°
	Scan speed	24, 48 rpm
	Polarization	H
Transmitter	Frequency	9410 ± 30 MHz
	Peak power	25kW, Magnetron
	Pulse width	0.08, 0.2, 0.3, 0.6, 1.2 μs
	PRF	2000 Hz
	Range resolution	12, 30, 45, 90, 180 m
Receiver	IF (bandwidth)	60 MHz (5, 15 MHz)
	Noise figure	≤ 6 dB
Monitor	Size	19 inch colour LCD
	Resolution	1280 × 1024 pixel
	Range accuracy	8 m

近年、周波数の有効利用と保守の利便性からマグネトロンレーダに代わって固体素子レーダが実用化されている。図 39 に固体素子レーダの基本システム構成を示す。表 9 に主な仕様を示す。マグネトロンレーダと大きく異なるのは送信形式である。マグネトロンレーダでは高出力の単一パルスを利用するのに対して固体素子レーダでは低出力の長パルスを利用し、パルス圧縮技術を用いることでマグネトロンと同等のレンジ分解能を得ている。但し、レーダの近傍の数 km レンジでは長パルスが使えないのでマグネトロンレーダと同様に短パルスでの観測である。固体化レーダシステムの構成や制御用アプリケーションソフトの詳細は、「火山噴火機動観測レーダの基本設計」（2019 年 3 月、非公開）に記載されている。また、遠隔操作などの将来の運用に関しても記載されている。

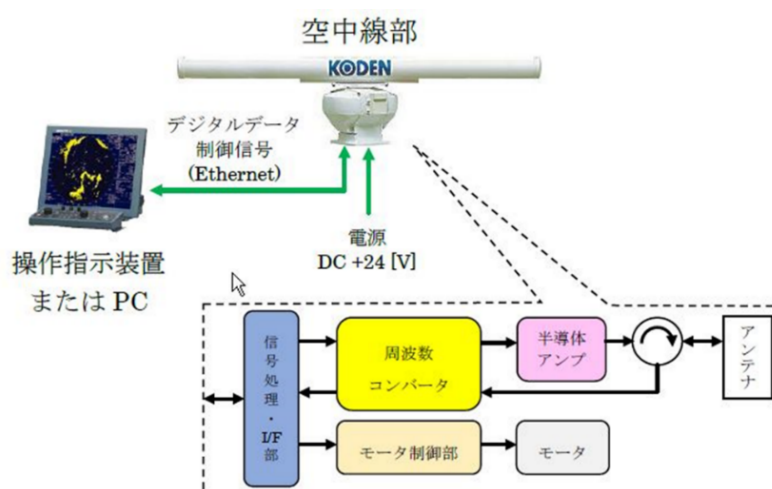


図 39 固体素子船舶レーダの基本構成

表 9 固体素子タイプの X バンド船舶レーダの主な仕様

項目	仕様	備考
アンテナ型式	オープンアンテナ	アンテナサイズ 6ft, 9ft (公称値)
送信出力 (尖頭値)	100 W \pm 50 % / 400 W \pm 50 %	
送信周波数	9380~9420 MHz	P0N : 9390 \pm 10 [MHz] Q0N : 9410 \pm 10 [MHz]
周波数安定度	± 2.0 ppm	
アンテナ回転数	24 or 48 rpm	0.250 or 0.125 deg/s
送信パルス幅	P0N : 0.08~1.2 μ sec Q0N : 5~18 μ sec	P0N : 24~360 m Q0N : 1500~5400 m
掃引周波数幅	Q0N : 5, 10, 15 MHz	
繰り返し周波数	450~2600 Hz	
探知距離レンジ (設定可能範囲)	0.125~64 NM (100 W) 0.125~96 NM (400 W)	0.2~118.5 km (100W) 0.2~177.8 km (400W)
最小探知距離	40 m 以内	
距離分解能	40 m 以内	
距離精度	8 m またはレンジの 1 % 以内	
ドップラー周波数精度	TBD	
電源電圧	定格 直流 +24 [V]	
消費電力	100 W 以下 (100 W) 150 W 以下 (400 W)	空中線部のみ
質量	29 kg 以下 (100 W) 33 kg 以下 (400 W)	空中線部のみ
使用温度範囲	-25~+55 $^{\circ}$ C	空中線部のみ
防水	IPX6	空中線部のみ

ii) データ処理

マグネトロンタイプの船舶レーダの噴煙柱観測データは bmp 形式の画像ファイルである。受信電力に対応する輝度値が 0-255 のデジット値で記録されている。画像データのノイズ処理、時系列画像の解析から、噴火時刻、噴煙柱のエコートップ、噴火継続時間等の情報が求められる。これらのデータ処理の詳細は真木・他 (2020) に記載されている。

一方、固体素子船舶レーダの観測データは受信電力値で、ksd という拡張子のファイル (以下、KSD ファイルという) に格納されている。1 つの KSD ファイルには方位角複数周回分の情報が含まれており、長さは可変である。また、ファイル先頭の方位角は 0° とは限らず、方位角 1 周分 ($0\sim 360^{\circ}$) のデータが複数のファイルに

跨って格納されている場合がある。そこで、KSD ファイルに含まれる観測データを方位角 1 週 ($0\sim 360^\circ$) 毎に分割して NetCDF ファイルに保存する Matlab ベースのプログラム (ksd2nc.m) を作成した。ksd2nc.m には、方位角 1 周分のデータが複数の KSD ファイルに跨っている場合には、これらを結合する機能を備えている。使用している固体素子船舶レーダはプロトタイプのレーダでいくつかの制約がある。その一つに、通信環境によってレーダからのデータ受信時に欠測が生じる可能性がある点である。ksd2nc.m は、このような場合でも正常に動作するように作られている。なお、ksd2nc.m は KSD ファイル内のデータが方位角の回転に沿って整列していることを前提としている。NetCDF に変換されたレーダデータは、ANT3D に組み込まれた関数 plot_ppixy.m で描画することができる。また、NetCDF に変換された PPI データから 80×80 km 以内の降灰量分布情報を準リアルタイムで求めることも可能であるが、このためには固体素子レーダ用の降灰量推定式 (RA-ZA 関係式) を確立する必要がある、今後の課題である。

iii) 機動観測

船舶レーダの利点の一つに輸送・設置が容易であることが挙げられる。そこで、船舶レーダによる噴煙観測の機動性を確認するために、車による陸域での機動的な観測を試みた。試験観測は 2021 年 9 月 30 日におこなわれた。バンタイプのレンタカーを用意し、その中にレーダ本体、アンテナ固定用支柱、計測用 PC、バッテリーなどを積み込み、桜島の南岳火口方向を見渡せる場所へ移動して観測をおこなった。事前に調査した複数箇所の観測場所候補地から、桜島島内の古里公園駐車場、野尻川左岸の旧土石流観測所駐車場、鹿屋市の輝北うわば公園駐車場を選定し、機動観測の「予行演習」をおこなった (図 40)。レーダの組み立てから観測開始までの時間は 50~60 分であった。このうち、ほとんどの時間 (40~50 分) はアンテナ支柱の組立てとレーダ本体の固定作業に費やされた。この作業を効率化できれば、観測場所へ移動後、約 30 分以内で観測を開始できるであろう。バッテリーは市販の車用 24V バッテリー 4 台を用い、半日程度の連続観測が可能であることを確認している。リチウム電池や携帯用発電機などの利用も考えられる。太陽光発電については経費および設置の観点から現時点では機動観測には不適であろう。

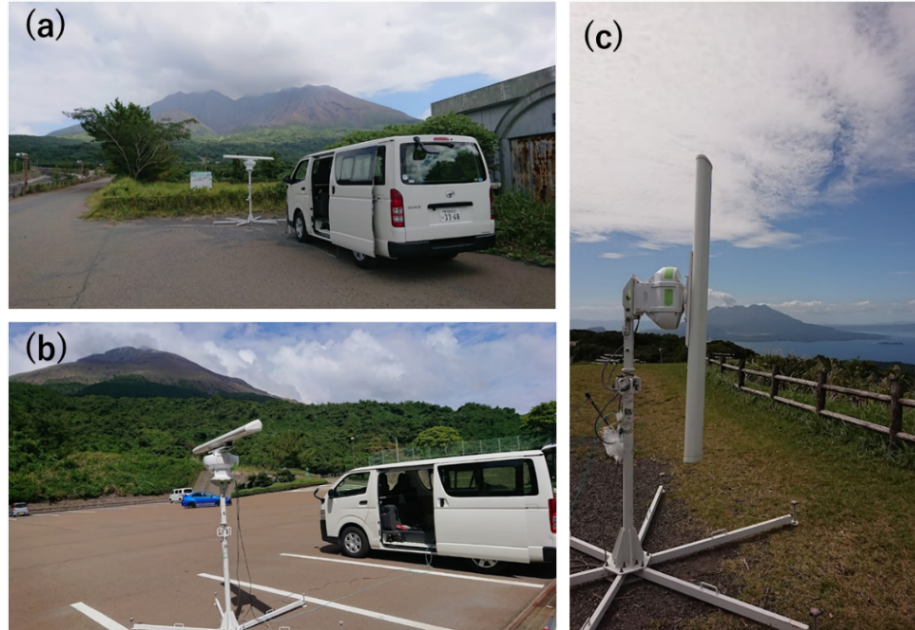


図 40 固体素子船舶レーダによる陸域での機動的降灰観測の「予行演習」(2021 年 9 月 30 日)。(a)旧野尻川土石流観測所駐車場 (桜島)、(b)古里公園駐車場 (桜島)、(c)輝北うわば公園駐車場 (鹿屋市)。

iv) 観測結果

2021 年度は例年に比べて桜島の噴火回数が少なかった。ここでは、2021 年 1 月 28 日 13:19 に発生した噴火の観測例を紹介する。気象庁によれば、この噴火は南岳 B 火口で発生し、噴煙高度は 3400m であった。噴石が 4 合目まで飛散するのが確認され、噴煙は南東方向に流れた。桜島火山観測センター (SV0) に設置された鹿児島大学・光電製作所の固体素子レーダはこの噴火の様子を捉えた。図 41 に観測された噴煙柱の発達の様子を 10 秒間隔の時系列で示す。実際の時系列は約 2.5 秒間隔である。図によれば、噴火後の噴煙柱の立ち上がる様子とその後の連続して放出される弱い噴煙が示されている。噴煙高度が気象庁の発表より低いのは、レーダビームの方向が東だったのに対して、噴煙の移流方向が南東であったために噴煙柱の本体がレーダビーム外に移動したためである。

この噴火事例では、噴火直後に噴石が飛散したことが気象庁により報告されている。この噴石を船舶レーダは捉えていた。図 41 は噴火直後のエコーの時系列を 2.5 秒間隔で表示した図である。白い楕円で囲ったところに複数の噴石のエコーが確認出来る。いくつかの仮定をおけば、エコーの軌跡の解析から噴石の大きさを推定することが可能であろう。本事例は、山形大学の高速度カメラ撮影でも捉えられており、両者の比較解析が可能である。

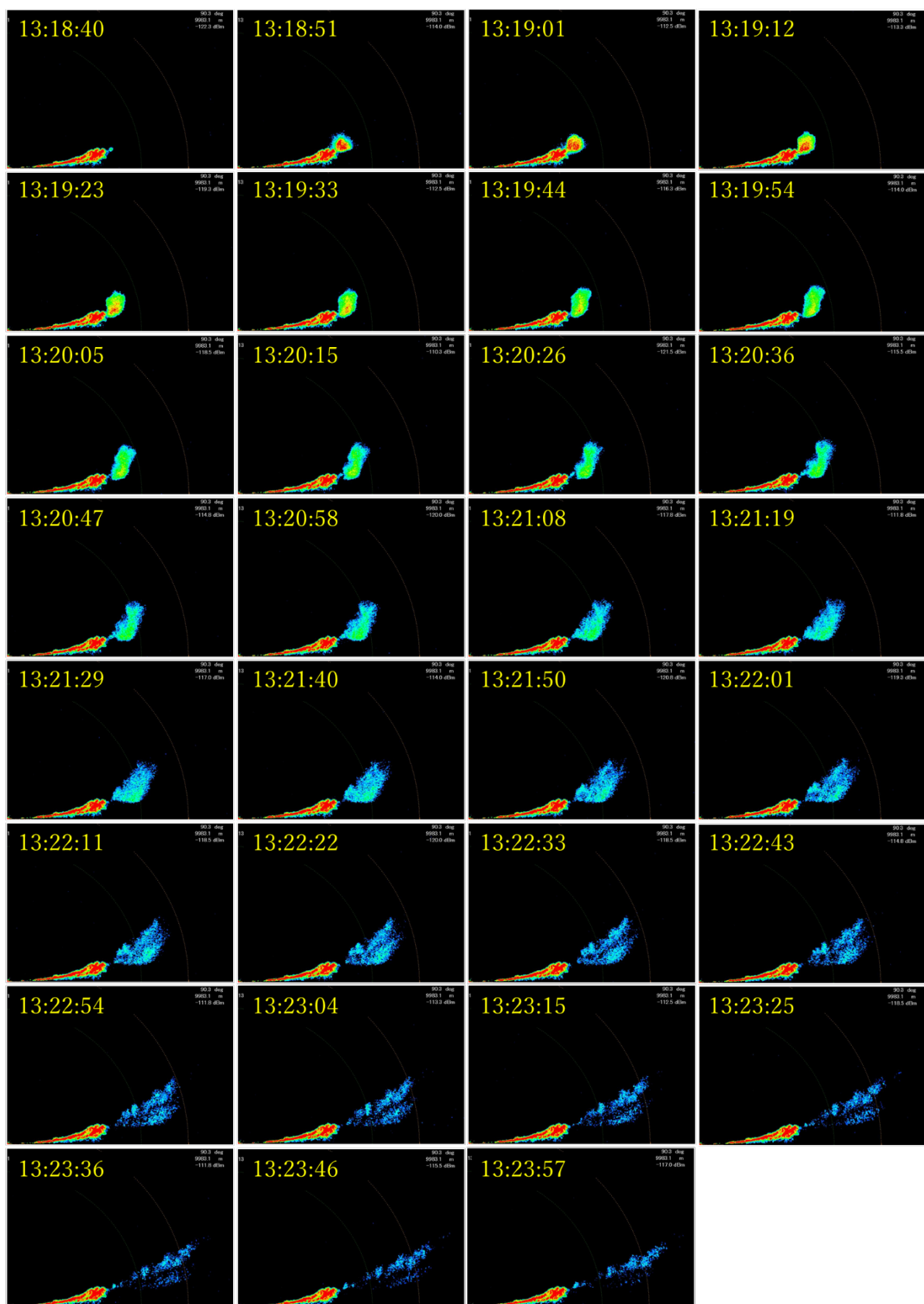


図 41 京都大学桜島火山観測所に設置された鹿児島大学・光電製作所の固体体素子船舶レーダが捉えた 2022 年 1 月 28 日の噴火。

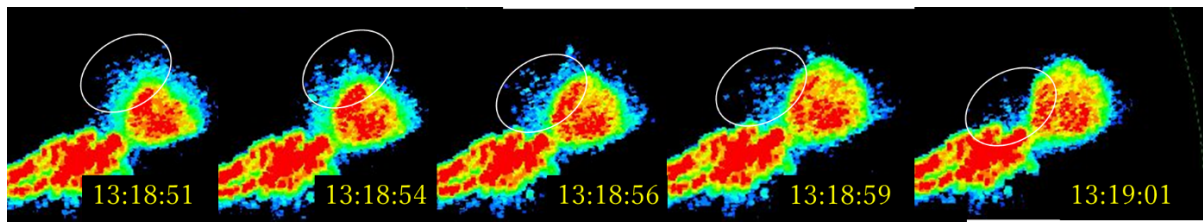


図 42 固体素子船舶レーダが捉えた噴石エコー。2022 年 1 月 28 日の噴火。

v) まとめと展望

本報告では、複数台の船舶レーダによる噴煙柱の定点観測と機動観測について述べた。噴火の回数が例年に比べて少なかったために、捉えられた噴火事例はわずかであった。2022 年 1 月 28 日の噴火（噴煙高度 3400m）を固体素子レーダで捉えることに成功した。2018 年および 2019 年の観測では、マグネトロンタイプの船舶レーダが噴煙柱を捉えられることを確認していたが、今回、固体素子レーダでも、噴煙柱の発達過程や噴石の検出が可能であることが確かめられた。固体素子レーダはマグネトロンタイプのレーダと比較して、収録データが受信電力であること、送信機の寿命が長い、ノート PC でデータ収録ができるなどの利点があり、機動的な観測に向いている。今後の課題として、固体素子レーダによる定量的な降灰量の推定手法の開発がある。このためには、小型 X バンド MP レーダとの同時観測や地上のディストロメータとのアジャストなどが考えられる。実用化に向けてのもう一つの課題は収録データ量が膨大になる点である。現在のシステムでは、7TB/1 ヶ月のハードディスクが必要である。来年度は、噴火の自動検出や検出後のデータの自動収録方法について検討し、リアルタイムでの噴火情報の配信につなげたい。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島島内にある観測点の改修作業や過去データの再検討により、地盤変動及び火山性微動振幅データから火山灰放出率を求める推定式を高精度化した。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した。また、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

桜島火山における 2021 年以降のデータを加えて、火山灰放出量推定式を再検討した。また、火山灰重量放出率に着目し、噴煙高度との関係を検討した。

i) 2022 年 3 月までの桜島の噴火活動

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)。

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

2009 年から 2013 年までの昭和火口の噴火活動では、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -1.03 \times 10^5$ と近似されている (Iguchi, 2016)^{4, 10)}。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 30 日の噴火からは南岳において噴火が頻発するようになった。

2017 年 11 月以降の桜島南岳の噴火活動を鹿児島地方気象台の観測による火口上噴煙高度、空振振幅、爆発地震の最大振幅、地盤変動により図 43 に示す。2022 年までの噴火活動は、7 つの Episode に分けられる。最も活動的であったのは、2019 年 9 月に始まり、2020 年 6 月まで続いた Episode5 である。その後、2020 年後半から 2021 年 5 月までの Episode6、2021 年第 4 四半期から 2022 年 2 月までの Episode7 が現れているが、Episode5 に比べて噴火発生頻度も少なく、爆発強度も小さい。

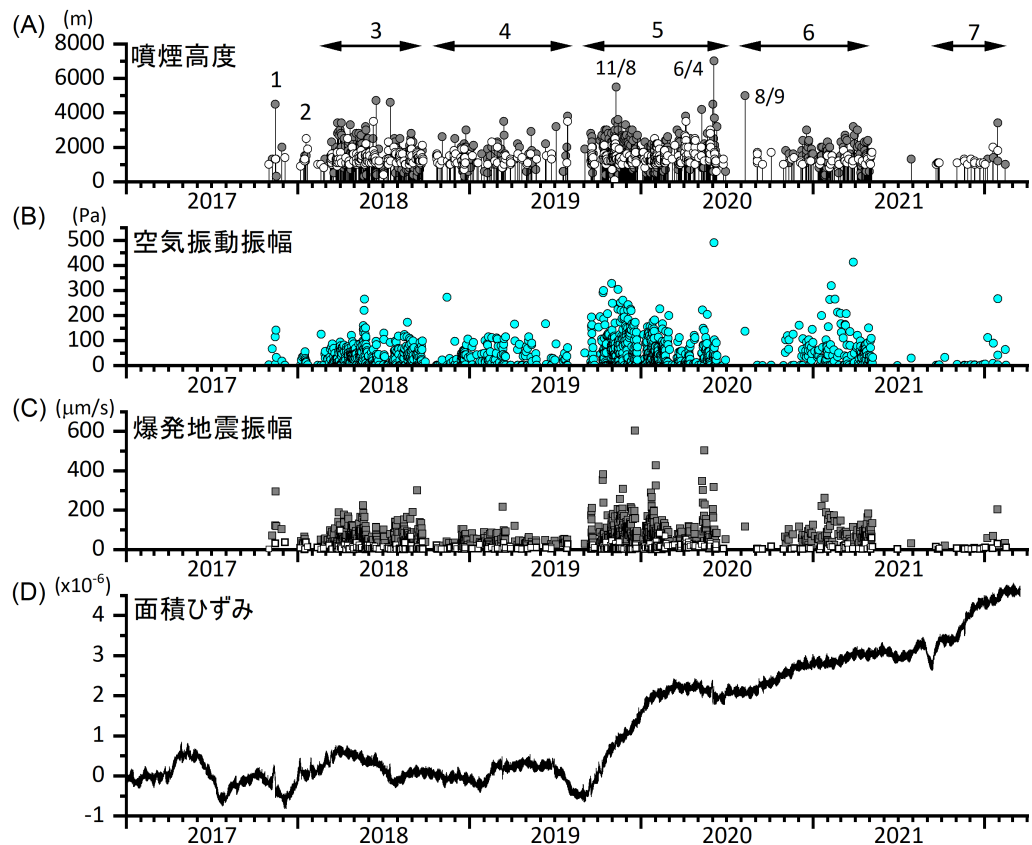


図 43 2017 年 11 月以降の南岳の噴火活動の推移．(A)鹿児島地方気象台の発表する火口縁上噴煙高度，(B)有村観測坑道における空気振動振幅．(C)有村観測坑道における爆発地震の最大振幅．(D)ハルタ山観測坑道における面積ひずみ（火口方向ひずみ＋直交方向ひずみ）の変化．

ii) 火山灰放出量の推定式の検討

2022 年 3 月までのデータを含めて、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再検討した。

図 44 に 2009 年 1 月から 2022 年 3 月までの 13 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)。係数については、昭和火口噴火活動期については $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -0.5 \times 10^5$ とした。南岳噴火活動期については、 $\beta = 2.2$ とした方が火山灰放出量をうまく説明できる。噴火活動期によって、係数を変える必要が指摘できる。2021 年以降の噴火については、噴火の規模が小さく、降灰量も少ないので、これまでの推定式を同様に適用可能である。

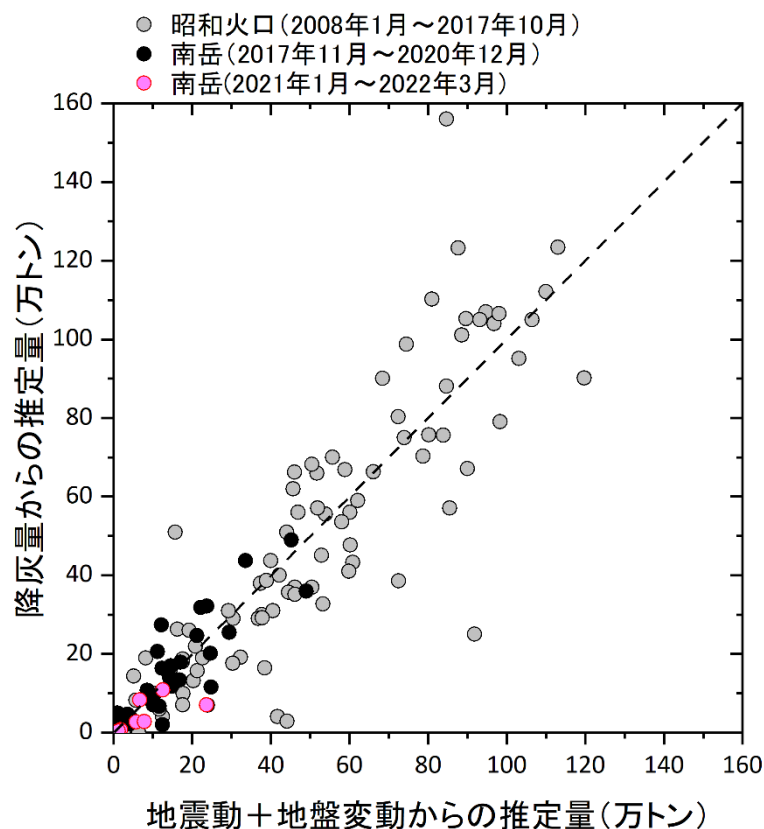


図 44 2009 年 1 月から 2022 年 3 月までの 13 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

b) 火山灰放出率と噴煙高度の関係の検討

これまでは噴火に伴う地盤変動を励起する圧力源の体積変化率と噴煙高度の関係を検討してきたが、式 (1) から火山灰放出率を求めることができるので、火山灰放出率と噴煙高度の関係を検討する。

i) 桜島における噴煙高度の推移

2009 年 2 月～2022 年 3 月に桜島の昭和火口か南岳火口において発生した噴火の噴煙高度の推移を図 45 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) に基づき 8000m とした。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火口縁上 4800m と決定した (令和 2 年度報告書)。

昭和火口噴火活動期には噴煙高度が徐々に高くなった。その後に発生した南岳噴火の噴煙高度は、昭和火口噴火より高い傾向がみられる。南岳噴火では Episode5 に当たる期間が最も噴煙高度が高いが、その後、低下している。

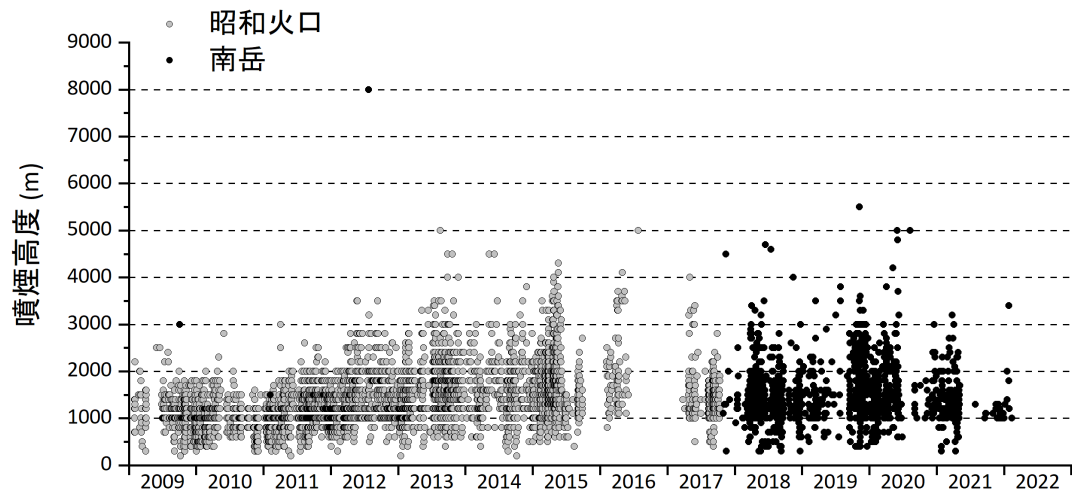


図 45 桜島の爆発に伴う噴煙高度の推移。主に、鹿児島地方気象台の観測によるが、必要に応じて、噴煙高度データを補てんした。黒丸は南岳、灰丸は昭和火口の噴火である。

ii) 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係

図 45 に示した噴火のうち、有村観測坑道において 5 ナノストレイン以上のひずみ変化が検知され、かつひずみ変化の継続時間が 5 分以上続いた爆発は 4062 回発生している。式 (1) から火山灰重量放出率を求め、ひずみ変化の継続時間で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 46 に示す。

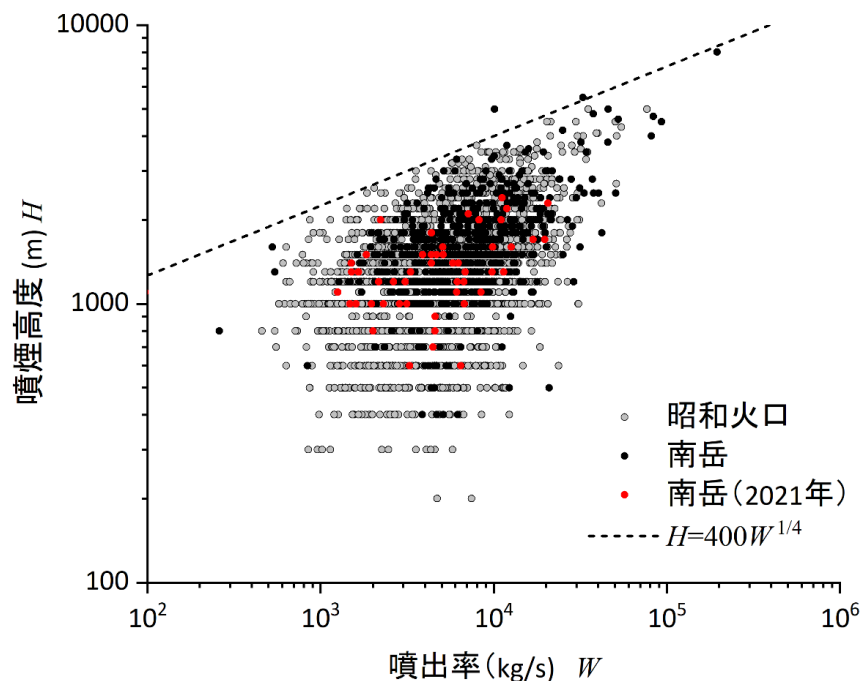


図 46 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。最近の 2021 年 1 月から 2022 年 3 月までの噴火については赤丸で示した。

2009 年から 2022 年 3 月までの期間では、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、195,000kg/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）。次いで、2017 年 11 月 13 日に南岳に発生した爆発の噴出率が大きく、93,100kg/s に達した。この爆発の噴煙高度は、レーダー観測から 4500m と推定されている。2020 年 6 月 4 日の爆発の噴煙高度は 4800m と推測されるが、噴出率は 37,600kg/s と見積もられる。このように噴煙高度が 4000m 以上に達した爆発では噴出率が大きく、噴出率と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（ W ）に依存する上限が認められ、上限の直線は以下のように決定される。

$$H = 400W^{1/4} \quad (2)$$

2020 年 8 月 9 日に発生した爆発の噴出率は 10,100kg/s であったが、噴煙高度は 5000m に達しており、上限式を超えている。この爆発は、梅雨明け後に初めて発生した爆発であり、白色と灰褐色の噴煙が合わさっており、水蒸気爆発の特性を持つ。このことから、通常のマグマ性噴火よりも高い高度まで噴煙が達した可能性が考えられる。

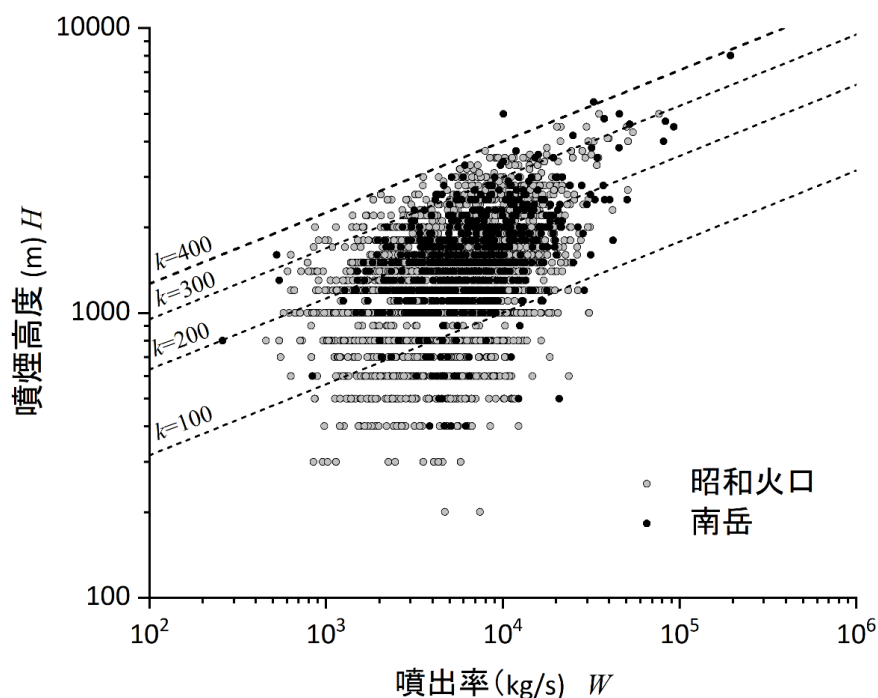


図 47 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。係数 $k=100$ 、200、300、400 とした。

次に、式（2）を以下のように一般化し、係数 k を検討する。

$$H = kW^{1/4} \quad (3)$$

図 46 に係数 $k=100$ 、200、300、400 としたものを書き加えて、図 47 に示す。ほとんどの爆発について係数 k は 100～400 の範囲にあり、平均的には $k=200$ と評価される。

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

令和3年度は、桜島北西部のハルタ山観測井の傾斜計および地震計の改修を行うことにより、火山灰噴出率の精度向上を図った。

i) ハルタ山観測井の傾斜計および地震計の改修作業

平成29年度の新島観測井（桜島南部）、平成30年度の黒神観測井（桜島東部）、令和元年度の新島観測井（桜島北東部）、令和2年度の沖小島観測井（桜島南西部）の埋設型地震計（固有周期1秒）と傾斜計の改修を行ってきた。令和3年度は引き続き、桜島西部のハルタ山観測井（図48(a)）において埋設機器の回収作業を行った。

機器引き上げおよび改修作業は令和3年9月15日から開始し、9月27日に完了した。9月15日～9月18日にかけて旧機器の引き上げ、9月19日～9月25日にかけて孔内洗浄およびダミー通し試験を行い、ダミーの孔底部着底を確認した。9月26日、9月27日に改修機器の挿入作業を行い（図48(b)）、キー溝深度289mにて着底を確認した。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。

(a) 実施場所



(b) 設置機器



図48 (a)ハルタ山観測井の位置図、(b)改修機器設置時の写真。

改修後の埋設型地震計の記録例を示す。図49(a)は2022年1月28日に発生した桜島南岳山頂火口の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形である。平成29年度改修の古里観測井（桜島南部）、平成30年度改修の黒神観測井（桜島東部）と合わせて示す。いずれの観測井においても、爆発地震の初動から数秒間には火道最上部における膨張・収縮過程を反映する地動が記録されている。図49(b)に同地震の上下動成分のスペクトルを示す。ここでも、先行して改修した古里および新島観測井の地震記録と比較した。爆発地震は低周波成分に富むが、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。今年度改修を行ったハルタ山観測井と古里観測井は南岳山頂火口からのほぼ同距離であるが、機器の埋設設置深はハルタ山が289m、古里が90mと違いがある。いずれの地震動記録においても、約10～15秒付近に最大振幅を持つが、古里観測井ではより振幅が大きくなっている。また、スペクトルを比較すると、1Hz付近は同程度の振幅であるが、古里観測井の3Hzより高周波成分はハル

タ山観測井より振幅が大きくなっている。これは、古里観測井がハルタ山観測井より設置深度が浅いため、地表面や浅部の site 特性の影響を受けている可能性が考えられる。

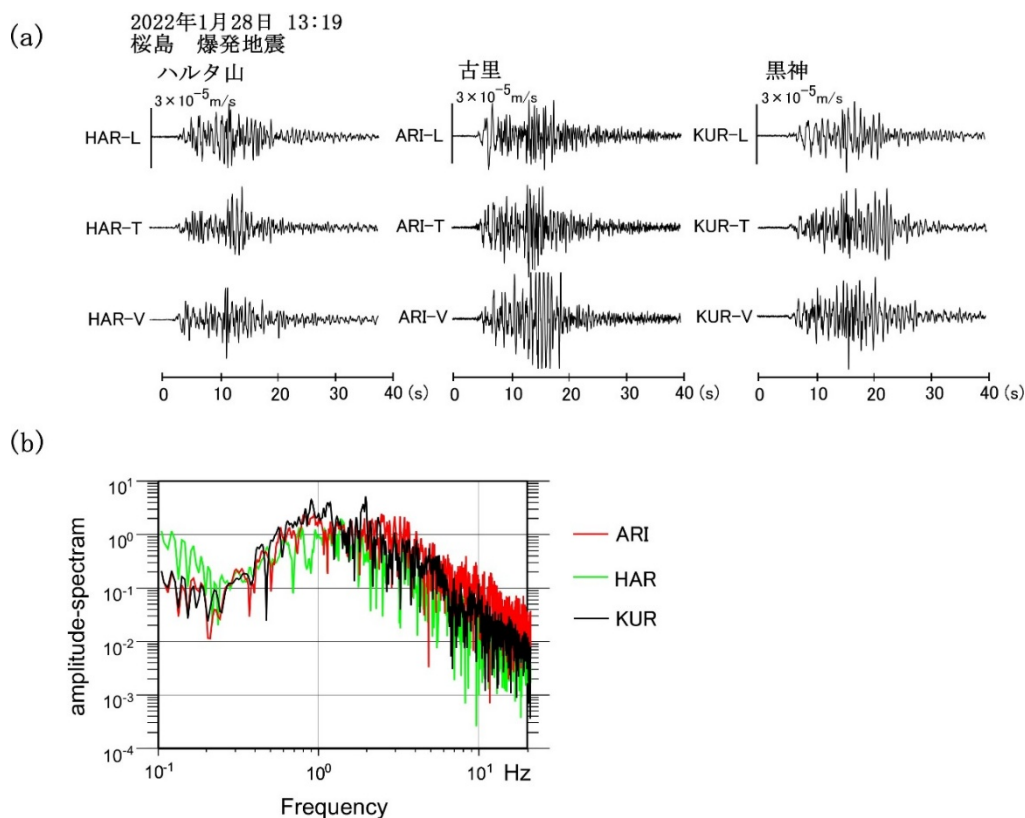


図 49 (a)2022 年 1 月 28 日に発生した桜島南岳の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形。左列が今回設置したハルタ山観測井 (HAR) の地震計記録、中列が平成 29 年度に設置した古里観測井 (ARI)、右列が平成 30 年度に設置した黒神観測井 (KUR) の記録である。上から順に、水平動火口方向成分、水平動直交成分、上下動成分である。(b)ハルタ山 (HAR)、古里 (ARI)、黒神 (KUR) における爆発地震のスペクトル。

図 50 に 2022 年 1 月 12 日に南岳山頂火口直下 1.0km 付近で発生した火山構造的 (A 型) 地震のハルタ山観測井における波形記録を示す。この地震のマグニチュードは 0.3 と微小地震であるが、3 観測井において P 波および S 波は明瞭に記録されており、非常によい S/N 比で記録されている。火山性地震の高周波振動についても高精度で観測が可能であることが言える。

ii) ハルタ山観測井を用いた火山灰放出率の見積もり

火山灰放出重量は、2-3Hz の周波数帯の地震動スペクトルと地盤変動を励起する圧力源の体積変化から求めることができる (Iguchi, 2016)。用いられたのは有村観測坑道における地震動であった。

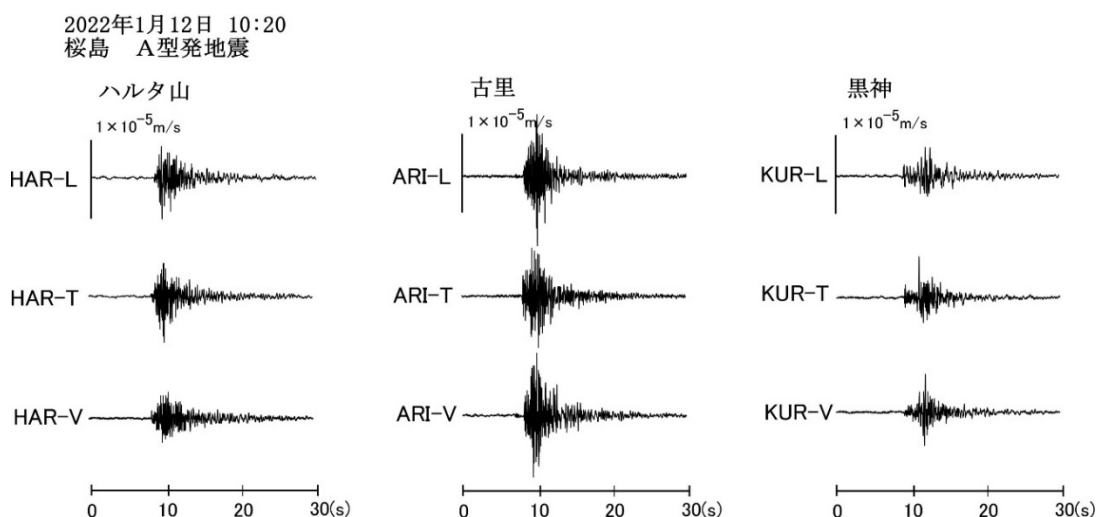


図 50 2022 年 1 月 12 日に南岳山頂火口直下で発生した火山構造性地震の波形。

有村観測坑道における地震動の場合、係数 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、として火山灰放出率が求められている。ここでは、本年度において改修を行なったハルタ山観測井における係数 α を見積もってみる。

ここでは、有村観測坑道と同様に桜島南部にある古里観測井（南岳火口から 2.6km）をレファレンス点としてハルタ山観測井における 2-3Hz の周波数帯のスペクトルを比較した。2022 年 1 月に発生した数分の継続時間を持つ 4 例の小規模な噴火に伴う微動について比較し、図 51 に示した。4 例の噴火微動について 1 分間平均の 2-3Hz 帯のスペクトル、13 例を示した。ハルタ山と古里のスペクトル振幅比について相関はよく、振幅比の平均は 0.57 となる。したがって、ハルタ山観測井の地震動を用いれば、 $\alpha = 6.7 \times 10^{-5}$ とすればよい。係数 α の相違は、震源距離、地震波の伝搬経路、site effect によって決まる。経験的に観測点ごとに係数 α を決めることは可能であり、多点の係数 α を用いることにより、観測点への依存性を軽減することが可能である。

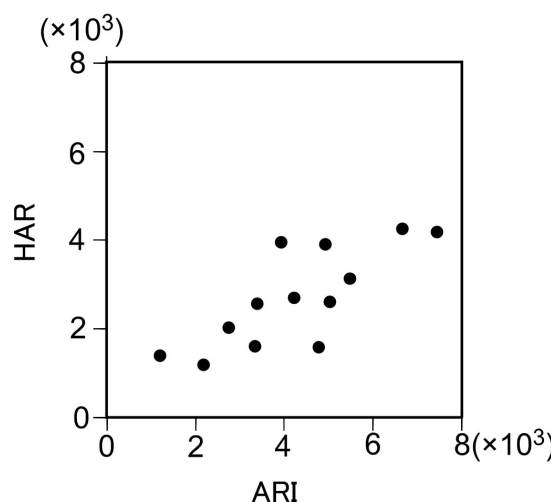


図 51 ハルタ山観測井（HAR）と古里観測井（ARI）の 2-3Hz の周波数帯域の 1 分毎のスペクトルの相関。

d) 超長周期地震による火山灰放出量の見積もりの試み

噴火に伴う火山性微動のスペクトルの周波数 2-3Hz 帯の振幅値と、噴火に伴う地盤の収縮変化から推定された地盤変動源における体積変化量から火山灰放出率を推定できる (Iguchi, 2016)。ここでは、卓越周期が数十秒の超長周期地震 (Very-long-period イベント, 以後 VLP イベント) を用いて火山灰放出率の推定を試みる。

i) 超長周期地震

噴火に伴う VLP イベントの波形解析から震源における体積変化量が議論されている (例えば, Chouet et al., 2005 のポポカテペトル火山のブルカノ式噴火)。噴火に伴う地震や地盤変動のソースにおける体積変化量は火山灰放出率 (放出量) と関係があるが、VLP イベントについて火山灰放出率 (放出量) との議論はまだなされていない。そこで、ここでは、VLP イベントと火山灰放出率 (放出量) との議論の前段階として、桜島の VLP イベントの振幅値と、伸縮計記録から茂木モデルを用いて推定された体積変化量 (Iguchi, 2016) との比較をする。

まず、桜島島内に設置されている広帯域地震観測点 (AR1, AR5, HIK, KMT5, KUR2) の記録を用いて、2018 年 7 月 1 日から 2019 年 3 月 31 日に桜島南岳にて発生した 267 の噴火に伴う地震波形から VLP イベントの検出を行った。噴火時の地震記録において、フィルターを施さない波形にて P 波初動到達時刻の 20 秒前から立ち上がり時刻から 80 秒後の 100 秒間をシグナル時間帯と定義し、P 波初動到達時刻の 150 秒前から 50 秒前の時間帯をノイズ時間帯と定義する。そして、それぞれの時間帯について上下動成分と水平動 2 成分についてスペクトルを計算し、0.05~0.1Hz の周波数帯域についてシグナル時間帯の振幅スペクトル平均値をノイズ時間帯の振幅スペクトルの平均値で割った値を SN 比と定義して、SN 比が 3 以上をある観測点の 3 成分とも満たし、別の観測点でもこの条件を満たす場合に VLP イベントが検出されたとする。その結果、20 個の VLP イベントが検出された。

ii) 解析

次に、VLP イベントの振幅値を求める手順を示す。まず、地震波形に 0.05~0.1Hz のバンドパスフィルタを施す。そして、目視にてシグナルが認められた時間を含むように時間窓を設定して、波形を切り出し、VLP シグナル波形とする。そのため、VLP シグナル毎に時間窓の長さは異なる。そして、VLP シグナル波形からエンベロープ波形を計算して、時間積分して総和を求める。求めた総和を各成分の積算振幅値と呼ぶ。以上の手順を、各観測点の各成分について行う。そして、前述の SN 比が 3 以上の成分について積算振幅値の平均値を求める。

まず、VLP イベントの複数の観測点の上下動成分の積算振幅値の平均値と該当する噴火に伴う伸縮計の変化から推定された体積変化量の関係を図 52 に示す。また、3 成分の積算振幅値の平均値と該当する噴火に伴う伸縮計の変化から推定された体積変化量の関係を図 53 に示す。上下動成分および 3 成分の積算振幅値の平均値と体積変化量は正の相関が認められ、直線回帰を行ったところ、3 成分の積算振幅値

の場合の方が、決定係数が若干高いことから、上下動よりも3成分の方が積算振幅値の平均値と体積変化量は正の相関が良いと言える。

以上により、噴火に伴うVLPシグナルの積算振幅の平均値と伸縮計記録から推定される体積変化量には正の相関があると言える。体積変化量は火山灰放出量と比例関係にある(Iguchi, 2016)。したがって、VLPシグナルから火山灰放出量の推定手法を検討していくことが火山灰放出量のモニタリングに資すると言える。特に、火山灰放出量の推定に有用な観測坑道設置の伸縮計が存在しない火山において、広帯域地震観測を行っている場合の火山灰放出量モニタリングを想定して、VLPシグナルと火山灰放出量の関係の導出を今後行っていく必要がある。

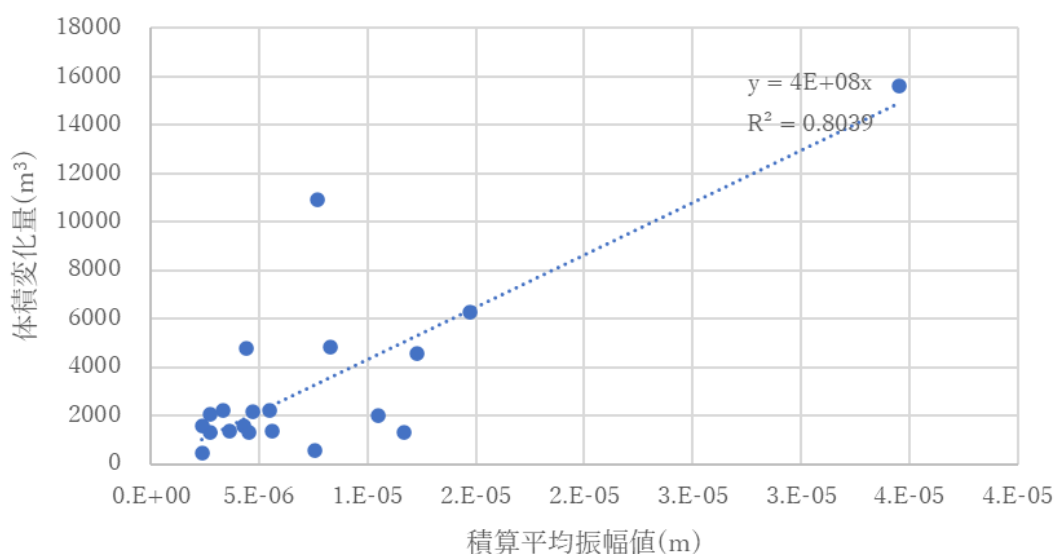


図 52 上下動成分の積算振幅値の平均値と伸縮計記録から計算された体積変化量との関係

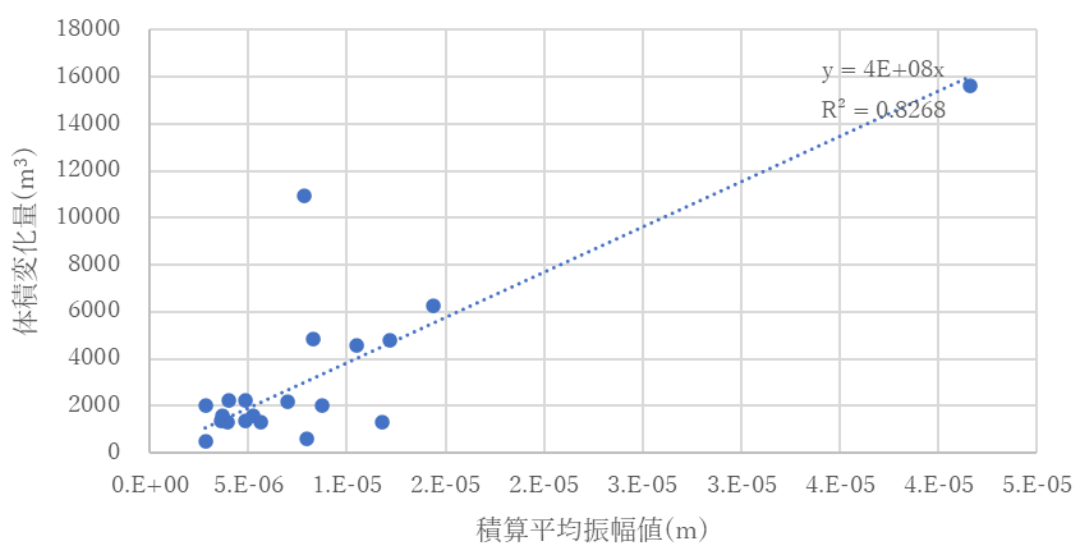


図 53 3成分の積算振幅値の平均値と伸縮計記録から計算された体積変化量との関係

e) 火山灰放出量推定式の桜島以外の火山への適用

桜島火山の噴火を対象にした火山灰放出量の推定式は、長期の噴火活動期間について適用可能であることが確かめられた。これを他の火山に適用し、推定式適用の拡張を図る。ここでは、長期間、噴火活動を続けている吐噶喇列島の諏訪之瀬島と、インドネシアのシナブン火山の噴火を対象にする。

i) 諏訪之瀬島火山

諏訪之瀬島は、九州の南方、吐噶喇列島のほぼ中央に位置する成層火山である。1813年には大規模噴火が発生し、1883-1884年には溶岩を流出した。20世紀以降は、御岳山頂から北東に開いた馬蹄形カルデラ内に火砕丘を形成するブルカノ式噴火とストロンボリ式噴火を繰り返している。2000年12月に火砕丘の北東側に新火口を形成して一時的に噴火活動は活発化したが、その後、噴火活動は低下傾向にあった。しかし、2020年12月から爆発活動が再び激化し、活発な爆発活動を続けている。

ここでは、2021年に発生した爆発のうち、福岡管区气象台により噴煙高度が3000m以上に達したと観測された噴火について、噴火微動の振幅と火山灰放出重量の関係を検討した。

桜島に比較して、諏訪之瀬島における検討には以下の問題がある。1つは、全方位を覆う降灰観測点がないこと、もう1つは高精度の地盤変動観測点がないことである。桜島においては、南岳から50km以内に62点の降灰観測点があるが、諏訪之瀬島では島の南麓に4点の降灰観測点があるのみである。そこで、(3)式を用いて、噴煙高度から放出率を求め、火山性微動の継続時間を掛けることにより、火山灰放出量とした。ここでは桜島の平均的な値 $k=200$ を用いた。また、(1)式において地盤変動の効果を表す第2項を無視することにより、火山灰放出量を推定した。地震動については、桜島と同様に、2~3Hzの周波数帯域を用いた。

噴煙高度から算出した火山灰放出量と火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量を比較して図54に示す。同図においては、(1)式の地盤変動の項を無視するため、噴煙高度から求めた火山灰量に合うように、係数 α を桜島の200倍として算出した。8月28日と9月26日の噴火を除い

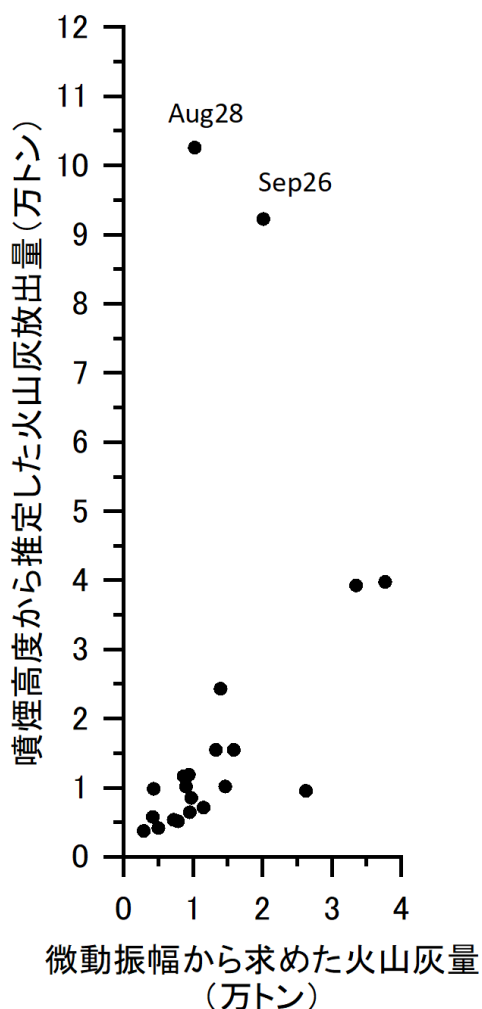


図 54 噴煙高度から算出した火山灰放出量と火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量の関係。

て両者の間にはよい相関関係がみられるので、火山性微動を用いることにより、火山灰放出量を推定することが可能である。例外とした8月28日と9月26日の噴火では、噴煙高度がそれぞれ、4800mと5400mに達しているので、火山灰量が大きく見積もられた。元々、(3)式を用いて噴煙高度から火山灰量を見積もることは誤差が大きくなること、噴煙高度は気象条件等にも依存することが考えられる。

2021年には噴煙高度が3000m以上となる噴火が26回発生したが、そのうち25回は気象庁が「噴火」と定義する空振振幅が10Pa未満（榑戸原、 $\Delta=4.0$ km）で、噴煙高度1000m以上の爆発力の弱い噴火である。一方、空振振幅が10Pa以上のものは「爆発」と定義されている。「爆発」は概して噴煙高度が低く、1000m以下のものが多数を占める。また、「爆発」に伴う噴煙に対しては、レーダーエコーが検出できないことも多いことから、「爆発」は多量の火山灰を含むとは考えにくい。一方、「爆発」に伴う地震動の振幅は、初動付近を除いて、「噴火」とオーダー的には大差がないため、係数 α を桜島の200倍とする(1)式の適用は、「噴火」に限定的なものであり、「爆発」については係数 α を別途検討する必要がある。

ii) シナブン火山

シナブン火山はインドネシア・スマトラ島北部、トバ湖の北にある成層火山である。火山体は溶岩流と火砕流堆積物からなる。17世紀以降、噴火は発生していなかったが、2010年8月下旬に新たな噴火活動が始まった。2010年8月と9月の噴火はすべて、水蒸気爆発であった。その後、しばらく静穏であったが、2013年9月に2回目の水蒸気爆発の活動が再開し、噴出する火山灰に新鮮なマグマ物質が含まれるようになったのち、12月には山頂に溶岩ドームが出現した。2014年に入ると溶岩ドームは流下を始め、溶岩流を形成するとともに、溶岩ドームの崩落は火砕流を頻繁に発生させた。2014年と2015年の噴火のほとんどは、溶岩ドームの崩落による火砕流であった。ところが、2015年11月ごろから、桜島や諏訪之瀬島の噴火と同様に、噴煙柱のみを形成し、火砕流を伴わない噴火が発生するようになり、2016年以降は、噴煙放出のみの噴火の発生回数が急増した。

火砕流は火山砕屑物が火山体の斜面を流れ下る現象であることから地震動を励起しやすく振幅の大きい火山性微動を伴う。一方、噴煙放出型の噴火では、火山性微動の振幅が1/5程度に小さいことから、火山性微動と火山灰放出の関係を検討するためには、火砕流と噴煙放出型の噴火では、異なる扱いをする必要がある。ここでは、まず、噴煙高度が火口縁上3000m以上に達した噴煙放出型の噴火を解析することにする。

シナブン火山には桜島のような降灰観測点はない。また、高精度の地盤変動観測点もない。ここでは、諏訪之瀬島に倣い、(3)式を用いて、噴煙高度から放出率を求め、噴火に伴う火山性微動の継続時間を掛けることにより、火山灰放出量とした。また、諏訪之瀬島と同じように $k=200$ とした。また、(1)式において地盤変動の効果を表す第2項を無視することにより、火山灰放出量を推定した。地震動については、山頂から2.6 km北にあるLaw Kavar観測点の短周期地震計のデータの2~3Hzの

周波数帯域を用いた。シナブン火山においても桜島、諏訪之瀬島と同様に、2～3Hzの周波数帯域の地震動が卓越している傾向がみられる。

噴煙高度から算出した火山灰放出量と火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量を比較して図 55 に示す。図 55a においては、(1) 式の地盤変動の項を無視しているため、噴煙高度から求めた火山灰量に合うように、諏訪之瀬島と同様に係数 α を桜島の 200 倍として算出した。シナブン火山の場合、噴煙高度から算出した火山灰放出量と火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量の間に関連関係が見られない。また、両者の間に 1 桁の差がある。そこで、噴煙高度から火山灰放出率を推定する式においてに $k=300$ とした場合の両者の関係を図 55b に示した。相関には改善は見られないが、どちらの火山灰放出量も概ね 1 万トン以下の範囲に収まり、オーダーとしては一致した。両者の相関がよくないことの原因として (3) 式は噴出率に対して噴煙高度の 4 乗を計算するものであることから、大きな誤差を伴うことがあげられる。また、シナブン火山の地震記録はすべて FM テレメータによるアナログ記録であり、振動記録の一部ではあるが、振幅の大きい微動は振り切れてしまい過小見積となる（諏訪之瀬島の記録はデジタル記録であり、火山噴火の振動程度では振り切れない）。シナブン火山では、 $k=300$ とした方が地震動から推定する火山灰放出量をうまく説明できる。 k が大きい方が、同じ噴出率に対して高い高

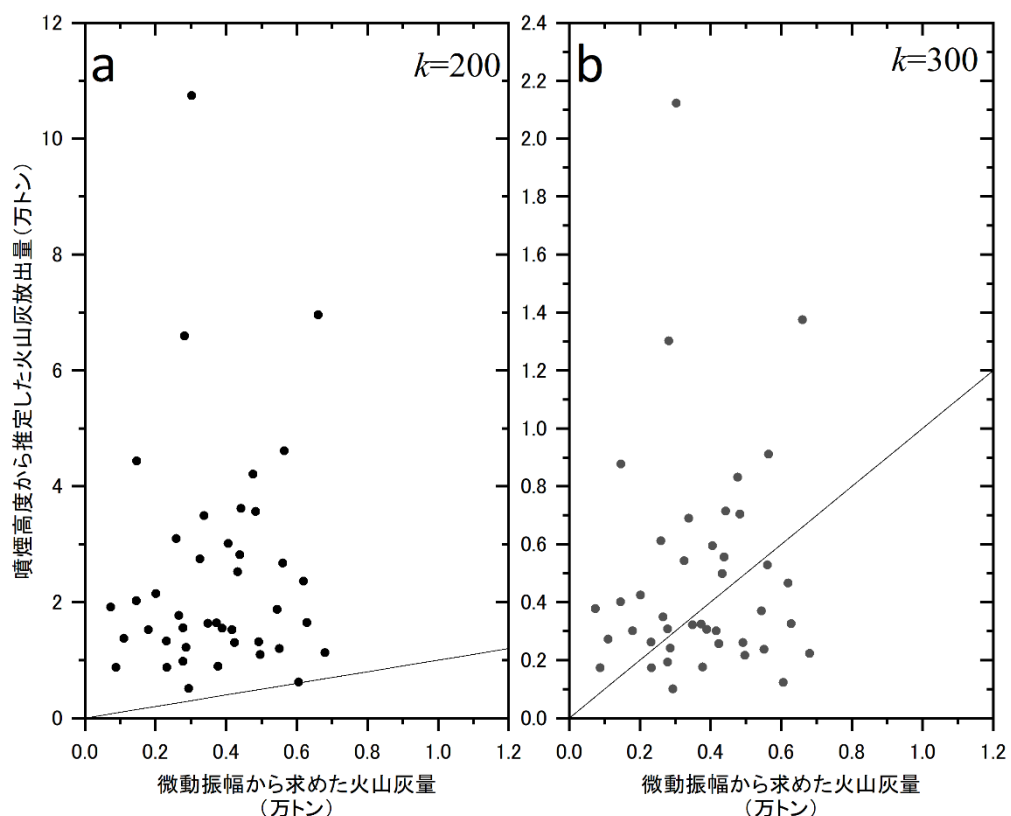


図 55 火山性微動振幅のみの推定式から求めた火山灰放出量と噴煙高度から算出した火山灰放出量の関係。a) $k=200$ 、b) $k=300$ 。直線は両者の比が 1:1 となる場合を示す。

度まで噴煙が到達することを意味するので、諏訪之瀬島よりも赤道直下(北緯 3 度)にあるインドネシアにあるシナブン火山の噴煙が上昇しやすいのかもしれない。この理由の 1 つとして大気中の水蒸気量があげられるが、海域にある諏訪之瀬島でも大気中の水蒸気量が多いと推測されることから、詳細な検討が必要である。また、シナブン火山は、溶岩ドームの崩落も繰り返し発生しており、山頂またはその直下の極浅部に熱源を持っている。火口における熱量の違いを反映しているのかもしれない。いずれにしても噴煙高度から噴出率を推定するのはオーダーに及ぶ誤差を伴うので、変動しやすい大気中の影響を受けない地震動を用いて火山灰放出率の時間関数を推定した方がよいのかもしれない。

f) 噴煙シミュレーションによる噴煙高度の検討

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。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た。

i) 火山灰粒子の噴煙からの離脱

爆発的噴火における火山灰輸送と堆積の予測のため、課題 C3 と連携し、数値研究を実施した。短時間で噴煙放出をするようなブルカノ式噴火を対象とし、火山噴煙挙動とそれに伴う火山灰輸送の再現を試みた。課題 C3 で開発・改良を進めている 3 次元モデル SK-3D では、圧縮性流体力学スキームで計算される速度場にトレーサー粒子を乗せることで火山灰が大気中に運ばれ、噴煙から離脱すると終端速度で降下する様子を再現できる。大気風がない状態を初期条件とし、噴出時間を 0.1 秒～

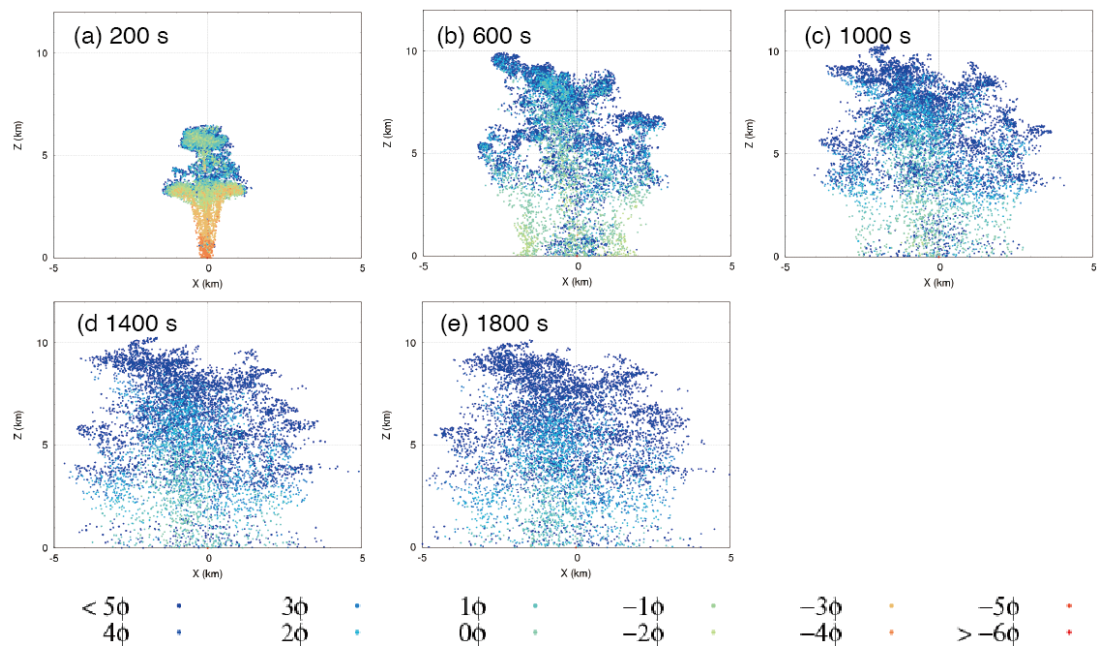


図 56 ブルカノ式火山噴煙の 3 次元数値シミュレーション。大気中における火山灰粒子分布の時間発展を示す。色は火山灰粒子のサイズ (ϕ スケール) を表す。

100 秒程度の噴煙シミュレーションを実行した結果、火山灰粒子サイズによって到達高度や降灰分布が異なる様子を再現した。噴出時間が 10 秒の条件では、比較的大きな火山灰粒子は噴火開始から数 100 秒で 5km より低い高度から降下を始めた（図 56）。一方、細かな粒子は高度 10km 程度まで達し、その後時間をかけ降下した。終端速度が小さい非常に小さい粒子は大気中に滞留し、計算時間 1800 秒内では地表に達しなかった。

ii) 噴火時間の依存性

噴火継続時間を変えた場合、噴煙高度は非線形に変化した（図 57）。噴出量総量を固定し、噴火継続時間を 0.1 秒、10 秒、100 秒と変化させた。そのため、噴出率 (kg/s) が異なる。また、噴出速度をマッハ数 1 と固定したため、火口半径が異なる。計算の結果、噴火継続時間が 0.1 秒から 10 秒になると噴煙高度は 5km から 10km に増加した。噴火継続時間が 100 秒まで長くなると、噴煙高度は 7km へと低下した。それに伴い、火山灰輸送の高度と火山灰の堆積分布が変化した。計算条件によっては空間分解能が低く計算結果にグリッド依存性があること、細かな粒子が堆積するまでには更に長時間の計算が必要であるなどの課題も明確になった。

これらのシミュレーションから得られた結果は、様々な噴火条件に対する噴煙高度と火山灰堆積分布についてのデータベースに追加される。

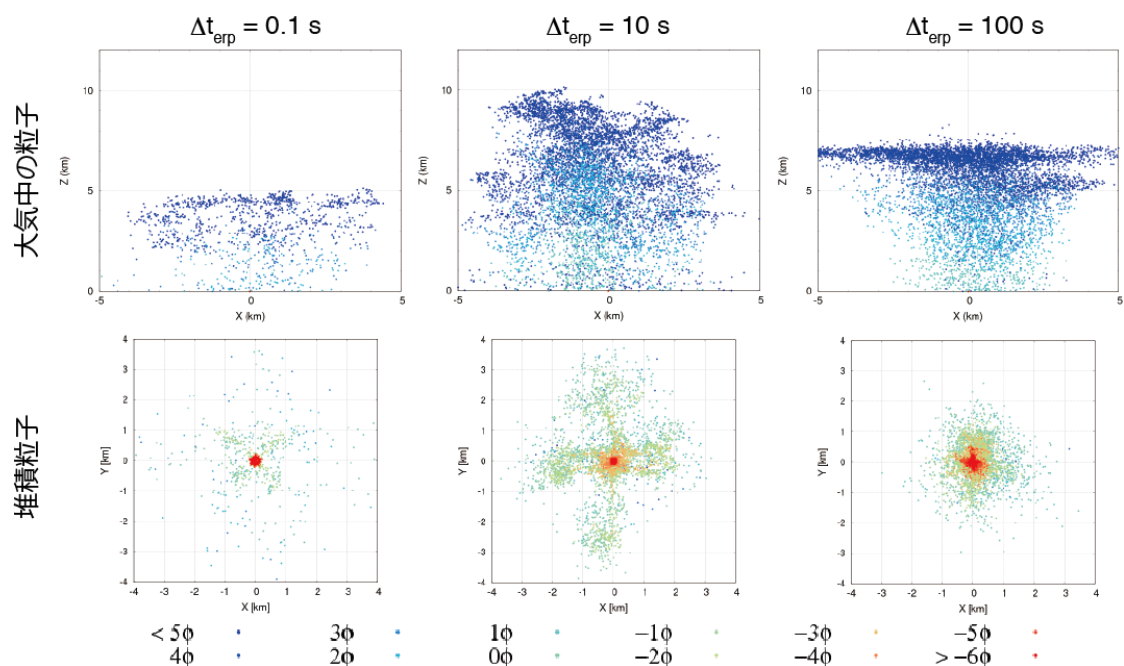


図 57 噴火継続時間を変えた場合のブルカノ式火山噴煙の 3 次元数値シミュレーション。大気中における火山灰粒子分布と堆積分布を示す。

g) 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

i) PUFF モデルによる火山灰の輸送拡散予測の問題の背景

火山灰粒子の運動をラグランジュ的に追跡する PUFF モデルは、航空安全を目的として開発されたモデルであり、火口から数百キロの範囲への輸送拡散を予測するモデルである。最初のモデルは噴煙高度を入力パラメータとして火口に円柱状の噴煙コラムを立て、それが気象庁から提供されるリアルタイムの風によってどのように拡散するのかを数値予報モデルとして予測した。初期の円柱状の噴煙はその後、傘雲などに変形させるなどの改良が加えられた。Tanaka and Iguchi (2019) はこの PUFF モデルに桜島周辺の地震計や傾斜計からリアルタイムで算出される噴出率と噴煙高度を組み合わせることで、噴火開始時刻に噴出率と噴煙高度を自動入力する PUFF モデル予測システムへと拡張した。

しかし、地震計等による噴煙高度の推定には大きな誤差が含まれる。気象庁から配信される風のデータもリアルタイムで自動化する際には解析値ではなく近未来の予報値が用いられるため大きな誤差を含むことになる。そこで、Tanaka et al. (2020) では MP レーダーデータによる噴煙の 3 次元的な分布の実測を PUFF モデルの数値予測に同化する試みがなされた。PUFF モデルの初期値が推定値でなく、現地での実測値に置き換えられたことは、予測精度の面で画期的な改善と言える。対象とした事例は 2019 年 11 月 8 日 17:24 UTC の桜島噴火であり、20dBz 以上の反射強度を持つ MP レーダーデータが用いられた。地震計等から推定された噴出率と噴煙高

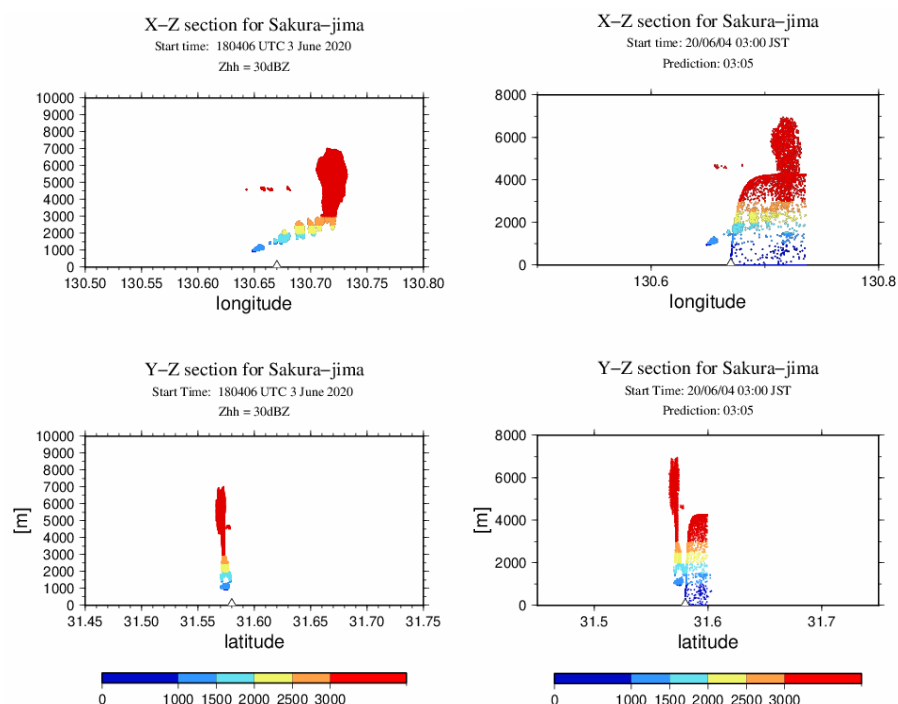


図 58 2020 年 6 月 3 日 17:59 UTC の桜島噴火の東西(X-Z)南北(Y-Z)断面。色は高度を示す。MP レーダーの観測値(左)に PUFF モデル予測を重ねた結果(右)の同化法の例。

度を用いた噴煙予測の分布に、同時刻に MP レーダーで観測された噴煙粒子を足し 2 で割るような最も原始的なデータ同化が取り入れられた。実測データがモデル予測に同化されたという意味では画期的であるが、将来的には粒子フィルターなどの最新のデータ同化技術の導入が課題として指摘された。

ii) 粒子フィルターによるデータ同化手法の導入

そこで、2021 年度の研究テーマとして、火山灰輸送拡散モデル PUFF に、MP レーダーの観測データを同化して予測精度を向上させるために、この粒子フィルターによるデータ同化手法の導入が検討された。粒子フィルターとは Bayes の定理に基づいて粒子の位置の尤度を計算し、観測とかけ離れた尤度の低い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という手法である。対象とした事例は 2020 年 6 月 3 日 17:59 UTC の桜島噴火であり、30dBz 以上の反射強度のデータが用いられた。図 58(左)は MP レーダーから得られた噴煙の鉛直断面である。この日は雨天で 20dBz では全域に雨滴が見られた。40dBz では噴煙のコアだけが検出されることを利用して MP レーダーの 30dBz のデータに尤度解析を行い、尤度の低い粒子は雨滴と判定して噴煙のみを抽出した。このレーダーによる実測に PUFF モデル予測データを重ねたものが図 58(右)の鉛直断面である。継続的な噴火により火口から風下に延びる噴煙が重なっている。MP レーダーは実測ではあるがスナップショットであり見えない領域もあるので、地震計等から推測される噴出率等にも重要な観測

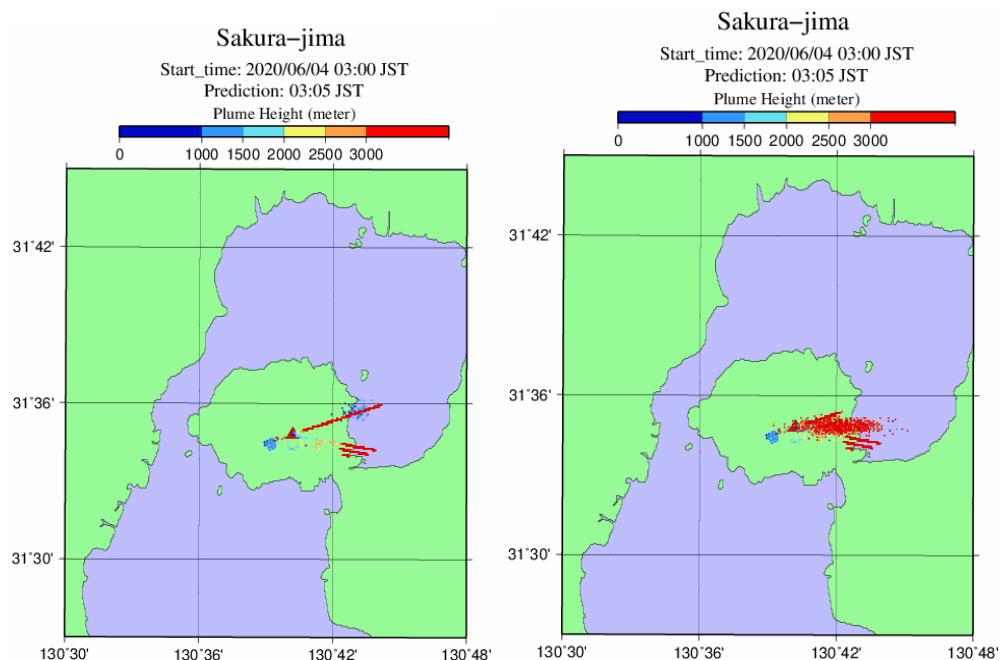


図 59 2020 年 6 月 3 日 17:59 UTC の桜島噴火の水平分布。色は高度を示す。MP レーダーの観測値に PUFF モデル予測を重ねた同化法（左）の結果と、粒子フィルターによるデータ同化法（右）の結果の比較。

情報が付加されているため、両者を最適解として同化することが理想となる。先行研究で行ったような予測と観測を足して 2 で割るような簡単な同化では、東西断面のように両者が重なっている場合は良いが、南北断面のように全く重ならない場合には問題となる。天気予報モデルでは予報のアンサンブルメンバーが観測値と全く重ならない時にはデータ同化法として深刻な問題となるが、火山灰粒子ではそのような事例が頻繁に起こると推測される。

本研究では先行研究で初めて導入された同化手法を粒子フィルターにより改善し、予報精度の改善が試みられた。図 59(左)はモデル予測（火口から線状に延びる線）と MP レーダー観測（半島付け根の塊）を重ねたもので、両者は全く重ならない。そこで図 59（右）では、観測粒子は残し、モデル粒子に対しては尤度計算を行い、尤度の低い粒子を削除する代わりに尤度の高い領域に新たな粒子を再生産するという粒子フィルターのアルゴリズムを導入した。粒子の総数は同化前後で同じとした。観測と同様にモデル予測も重要な情報を持っているとの同化の特徴が反映されている。図 60 は粒子フィルターを用いてデータ同化を行った後の火山灰の鉛直断面である。観測とモデル予測の両方の情報が反映された結果となっていることが分かる。

モデル予測が現地観測と合わない事例は火山灰噴煙予測には頻繁に見られるようである。その際にも、予測と観測の両方の特徴を反映した粒子フィルターは有効な同化手法と言える。今回の事例は手法の開発のための 1 事例の紹介であったが、今後の課題は MP レーダーが提供する複数枚のスナップショットを実測値として一連のモデル予測データに同化することである。

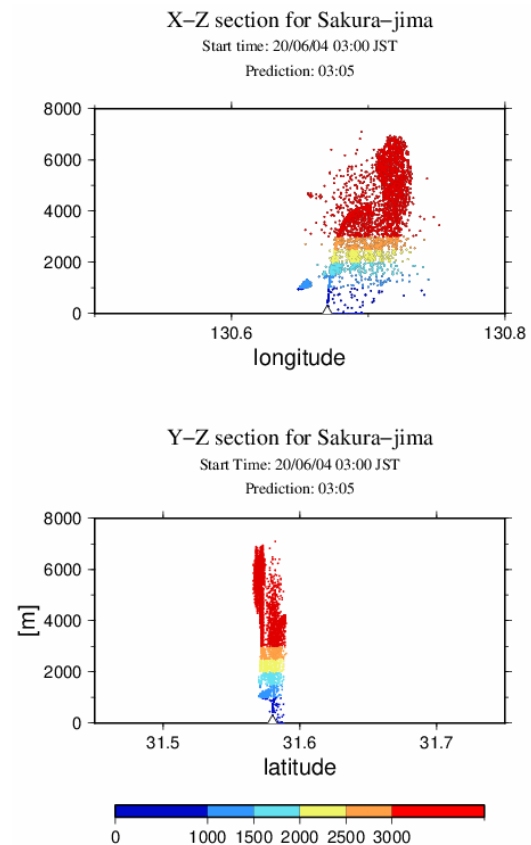


図 60 2020 年 6 月 3 日 17:59 UTC の桜島噴火の鉛直断面。色は高度を示す。粒子フィルターによるデータ同化法の結果。

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した。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した。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した。ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度を計測し、鉛直プロファイルを把握した。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した。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した。ディストロメータは火山灰粒子の落下速度も計測できるので、観測された落下速度から見かけの粒子比重を求めることにより、火山灰粒子の凝集の程度をさらに多くのデータを用いて評価した。

a) 風速ベクトルのその場観測

桜島を対象にドローンによる上空の風ベクトルおよび火山灰・火山ガス調査を実施した。さらに並行してドップラーライダーを用いて風の連続観測を行い、風の乱流強度の鉛直プロファイルの計測も行った。

i) 調査概要

調査は図 61 に示すハルタ山 (Site A)、黒神地獄河原 (Site B) および有村 (Site C) で実施した。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を表 10 および表 11 に示す。

・調査期間① 2021 年 9 月 27 日 (月) ~ 9 月 30 日 (木) の 4 日間

・調査期間② 2021 年 11 月 15 日 (月) ~ 11 月 18 日 (木) の 4 日間

なお、観測期間中に降灰を伴う噴火が発生せず、上空の火山灰・火山ガスデータを取得することはできなかった。

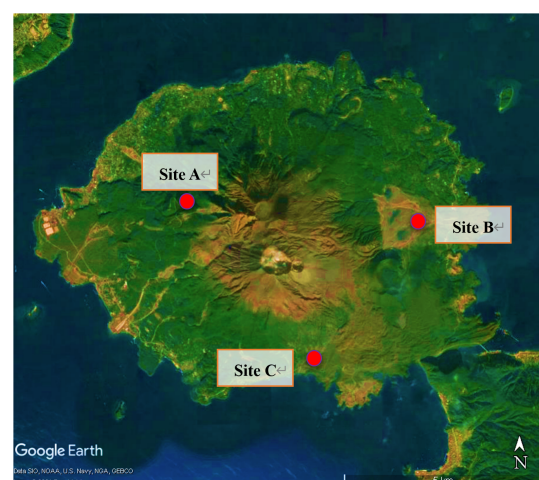


図 61 調査地点 (Site A: ハルタ山, Site B: 黒神地獄河原, Site C: 有村)

表 10 ドローンフライト概要（調査期間①）

Run	観測日時	観測地点	離陸時刻	着陸時刻	フライト内容
1	2021/09/27	ハルタ山	11:47:19	11:53:32	4 分間ホバリング (150m)
2			13:28:02	13:36:04	7 分間ホバリング (100m)
3			13:39:50	13:50:39	10 分間ホバリング (50m)
4	2021/09/28	ハルタ山	10:00:04	10:06:49	4 分間ホバリング (150m)
5		黒神地獄河原	14:48:30	15:01:58	10 分間ホバリング (300m)
6			15:10:00	15:21:10	8 分間ホバリング (200m)
7			15:29:00	15:41:05	10 分間ホバリング (100m)
8			15:43:48	15:57:01	3 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
9	2021/09/29	黒神地獄河原	10:24:08	10:37:30	10 分間ホバリング (300m)
10			10:58:30	11:09:05	8 分間ホバリング (200m)
11			11:18:30	11:29:00	10 分間ホバリング (100m)
12			11:34:55	11:46:30	4m/s で 1000m まで上昇, 2 分間ホバリング, 2m/s で下降
13			11:52:36	12:02:20	2 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
14	2021/09/30	有村	10:20:17	10:33:44	10 分間ホバリング (300m)
15			10:41:07	10:53:35	10 分間ホバリング (200m)
16			11:02:35	11:14:15	10 分間ホバリング (100m)
17			11:27:20	11:40:17	4m/s で 1000m まで上昇, 2 分間ホバリング, 2m/s で下降
18			11:46:58	12:01:06	4m/s で 1000m まで上昇, 3 分間ホバリング, 2m/s で下降
19			13:12:00	13:22:30	3 分間ホバリング (400m, 100m)
20			13:27:40	13:39:50	3 分間ホバリング (500m, 200m)
21			13:48:40	13:59:25	3 分間ホバリング (600m) 1 分間ホバリング (300m)

表 11 ドローンフライト概要（調査期間②）

Run	観測日時	観測地点	離陸時刻	着陸時刻	フライト内容
22	2021/11/15	有村	12:31:00	12:49:51	5 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
23			13:50:55	14:05:35	5 分間ホバリング (300m, 200m) 1 分間ホバリング (100m)
24			14:11:30	14:22:08	5 分間ホバリング (200m) 3 分間ホバリング (100m)
25			14:29:30	14:38:15	3 分間ホバリング (200m, 100m)
26			14:41:50	14:54:20	10 分間ホバリング (150m)
27	2021/11/16	黒神地獄河原	11:32:00	11:49:12	1m/s で 0～500m を往復
28			12:45:05	12:57:53	3 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
29			13:38:40	13:48:55	2 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
30			14:08:05	14:17:48	2 分間ホバリング (300m, 200m)
31			15:01:30	15:11:05	2 分間ホバリング (300m, 200m, 100m)
32	2021/11/17	有村	10:09:40	10:21:20	10 分間ホバリング (100m)
33			10:44:30	10:57:10	10 分間ホバリング (200m)
34			11:08:00	11:17:50	6 分間ホバリング (300m)
35			11:24:40	11:36:20	10 分間ホバリング (100m)
36			11:48:05	11:55:55	5 分間ホバリング (200m)
37			13:06:20	13:19:20	4m/s で 1000m まで上昇, 2m/s で下降
38			13:26:30	13:35:30	2m/s で 0～500m を往復
39			13:38:50	13:47:50	5 分間ホバリング (300m)
40	2021/11/18	有村	10:54:18	11:08:15	2m/s で 0～800m を往復
41			11:13:00	11:24:42	10 分間ホバリング (100m)
42			11:28:20	11:36:07	5 分間ホバリング (200m)
43			11:40:00	11:51:45	8 分間ホバリング (300m)
44			12:17:30	12:32:05	4m/s で 1000m まで上昇, 2m/s で下降
45			12:44:02	12:54:47	1m/s で 0～300m を往復

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40cm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。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10Hz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。さらに、統合気象センサ（iMet-XQ2；InterMet Systems）を搭載し、気温、湿度、気圧の計測を行った。ドローンの外観を図62に示す。



図 62 調査で使用したドローンの外観（SPIDER CS-6）

ドップラーライダーは、三菱電機製の DIABREZZA W シリーズ（LR-E1S5SB）を使用した。今回は、当日のドローン観測地点に合わせ、その近傍にドップラーライダーの設置・撤収を毎日実施した。観測高度は、45m～330mを対象として鉛直方向に15m間隔、計測時間は2秒間隔として連続観測を行った。ドップラーライダーの外観を図63に、主要性能を表12に示す。

表 12 調査に使用したドップラーライダーの主要性能

項目	性能
観測距離	40～250m(実際の観測距離はエアロゾル濃度等によって変化する。)
高度分解能	20m, 25m, 30m(最小 4 mごと)
走査パターン	スイッチ切替え方式
ビーム走査方向	0° (北) / 90° / 180° / 270° / 鉛直
レンジ数	20 / 40レンジ切替え
出力／表示データ	・水平風向風速の各レンジごとの分布 ・鉛直風の各レンジごとの分布 ・10分間平均風向風速データ
風速観測範囲	0～60m/s
風向風速更新周期	最速 2 s以内
レーザ波長	1.55μm帯の単一波長(JIS C 6802 クラス1Mに相当)
外部温度・湿度範囲	-20～+40℃, 0～100%RH
耐環境性	IP67, 重塩害仕様
本体寸法・質量	・W550×H550×D550(mm) (突起物は除く) ・50kg
電源条件	DC+24V ±10%
適合規格	CEマーク, RoHS

RH : Relative Humidity, RoHS : Restriction of Hazardous Substances

※) 三菱電機技報 Vol.89 No.3 2015 より引用



※) 三菱電機取扱説明書より引用

図 63 調査に使用したドップラーライダーの外観 (三菱電機製 DIABREZZA W)

iii) 調査結果

ドローンのフライトには、**エラー！参照元が見つかりません。**0 および表 11 のフライト概要に示したように、一定高度でホバリングしながら観測するケースと上昇・下降しながら観測するケースの 2 種類ある。ここでは、ホバリングしながら観測した 39 ケースを対象として、ホバリング中の平均風速、風速の標準偏差および乱流強度についてドローンおよびドップラーライダーの観測値の比較を行った。図 64 に 2021 年 9 月 29 日の Run13 のドローン観測の結果を示す。地上から 300m, 200m, 100m

の 3 高度で 2 分間ずつホバリングを行ったケースである。また、図 65 に同日のドップラーライダー観測の結果を示す。このケースでは、風速 8m/s 程度の東風であったことが分かる。

ホバリングの時間は、表 13 に示すように 1 分～10 分の間に分布して一定ではない。このため、平均化の時間を 2 分間に設定し、ホバリング時間が 2 分間を超える場合は複数のケースに分割することとした。この結果、50 ケースのホバリング数に対して解析対象のケース数は 114 となった。なお、平均化の時間はケース数の確保も考慮して設定したものである。

表 13 観測高度別、ホバリング時間別の観測ケース数の一覧

観測 高度	ホバリング時間（分）										合計
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
50m									1		1
100m	1	4	5		1		1			6	18
150m					1						1
200m		4	4		5		1	1		2	17
250m											0
300m		4	2		3	1		1		2	13
合計	1	12	11	0	10	1	2	2	1	10	50

ドローン観測およびドップラーライダー観測による平均風速、標準偏差および乱流強度を比較した結果を図 66 に示す。図の横軸がドローン観測値、縦軸がドップラーライダー観測値である。平均風速は決定係数が 0.94 程度とよく一致しており、標準偏差、乱流強度ともバラつきがやや大きいものの一定の関係性が見られた。

次に、平均風速と乱流強度の関係について比較した結果を図 67 に示す。図の横軸は平均風速、縦軸は乱流強度であり、左上の図がドローン観測、右上の図がドップラーライダー観測の結果である。図中の黄色三角で示したプロットは、平均風速 0.5m/s 毎に区分し、その区分毎に求めた乱流強度の平均値である。ドローン観測では、平均風速の増大に伴い乱流強度が低下するという特徴が捉えられており、定性的には妥当と言える結果が得られた。下側に示した図は、上側の図の黄色三角を折れ線でつないで比較したものである。両者の変化傾向はよく類似しており、乱流強度はドローン観測の方が系統的にやや小さい値となっている。

以上より、ドローンによる観測値が概ねドップラーライダーの観測値と一致していることが確かめられた。また、バラつきはあるものの乱流強度の観測が可能であることが明らかとなった。今後は、上昇下降中のドローンによる乱流強度の観測や今回と異なる気象条件での観測を実施し、乱流強度観測の定量的評価を進める必要があると考えられる。

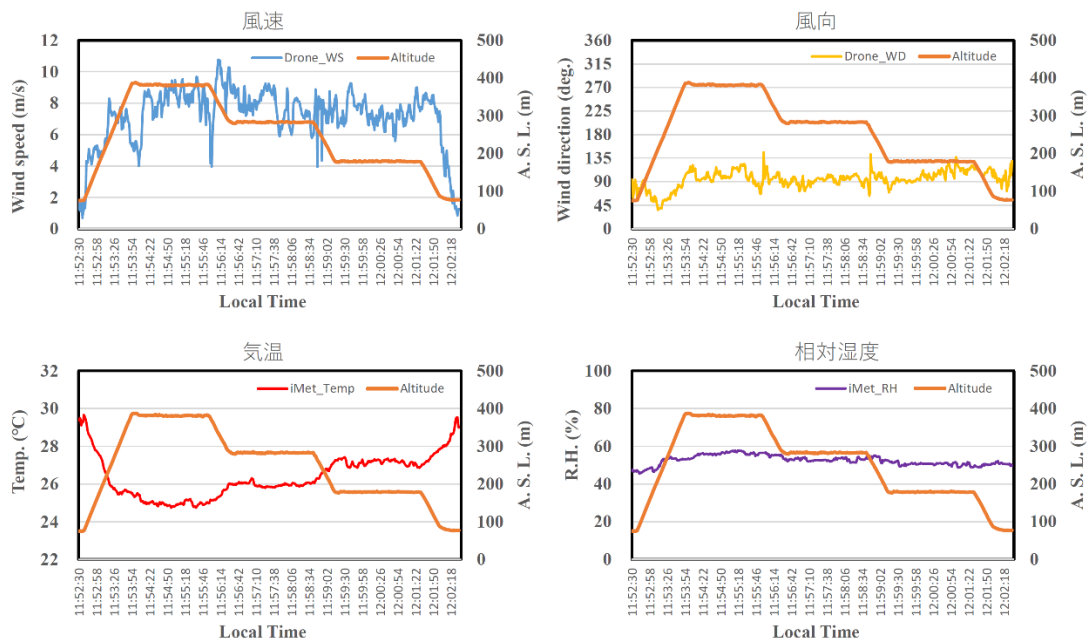


図 64 ドローンによる観測結果 (Run13 黒神地獄河原地点, 2021 年 9 月 29 日)

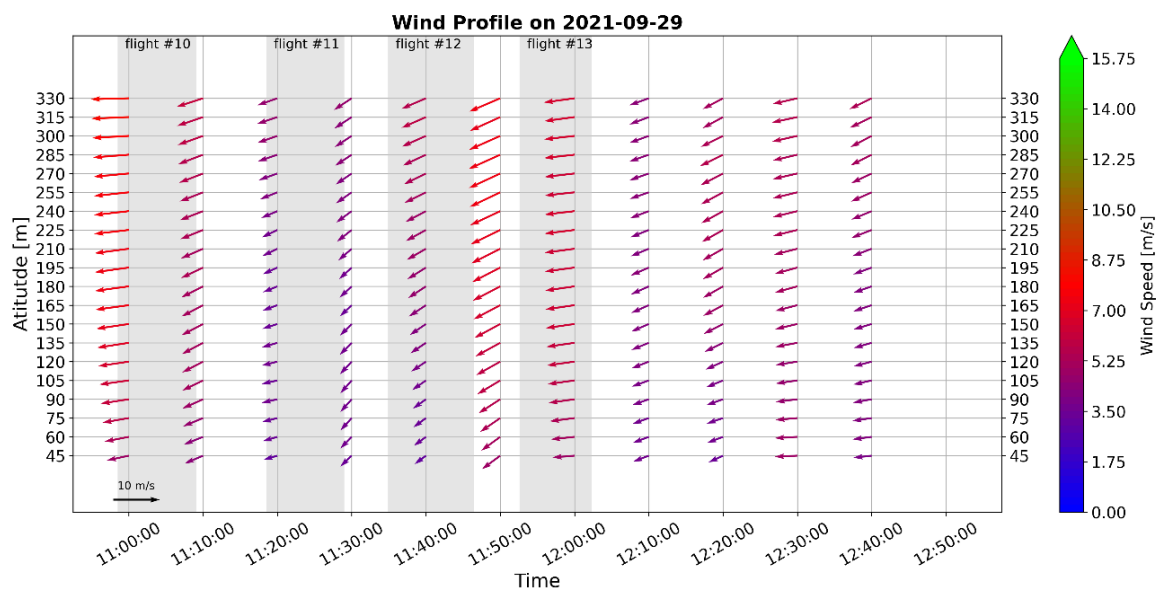


図 65 ドップラーライダーによる観測結果 (Run10~13 黒神地獄河原地点, 2021 年 9 月 29 日)

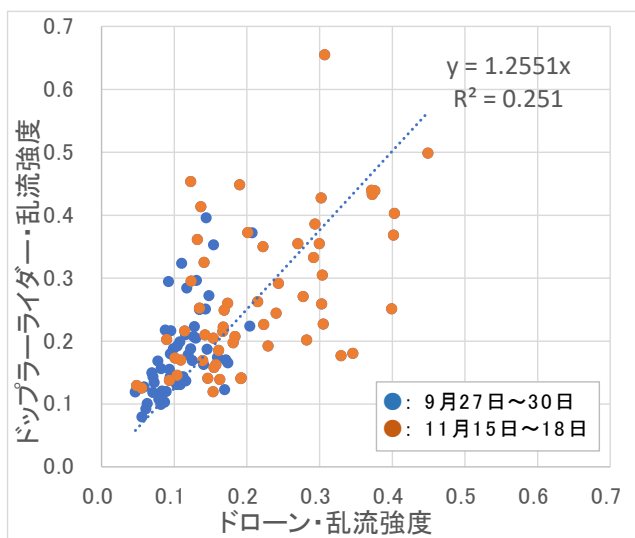
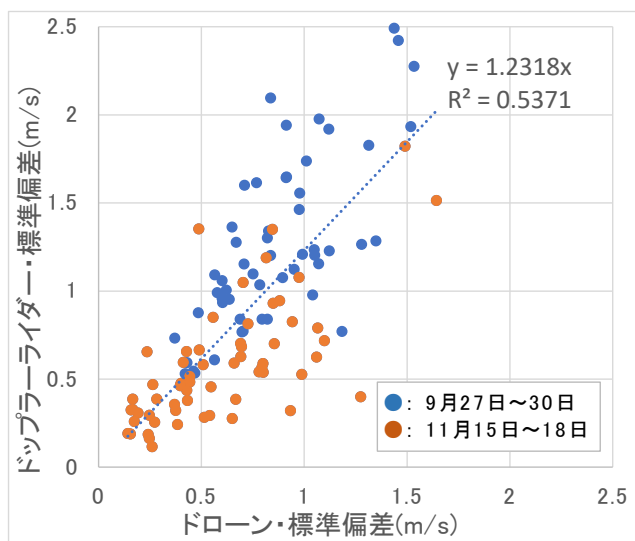
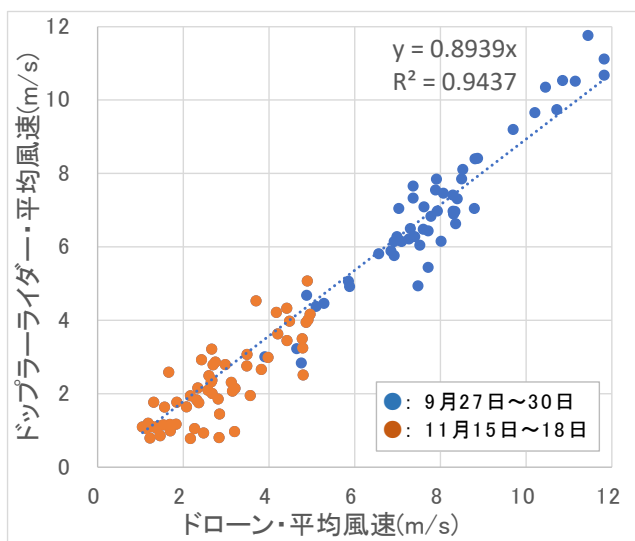


図 66 ドローン観測とドップラーライダー観測の平均風速、標準偏差、乱流強度の比較

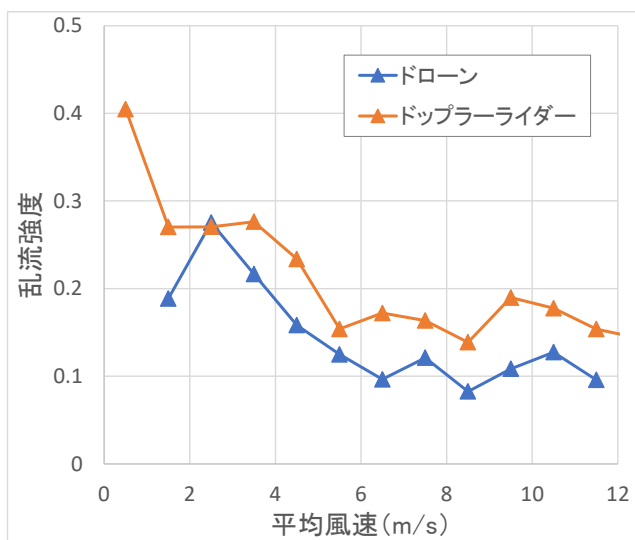
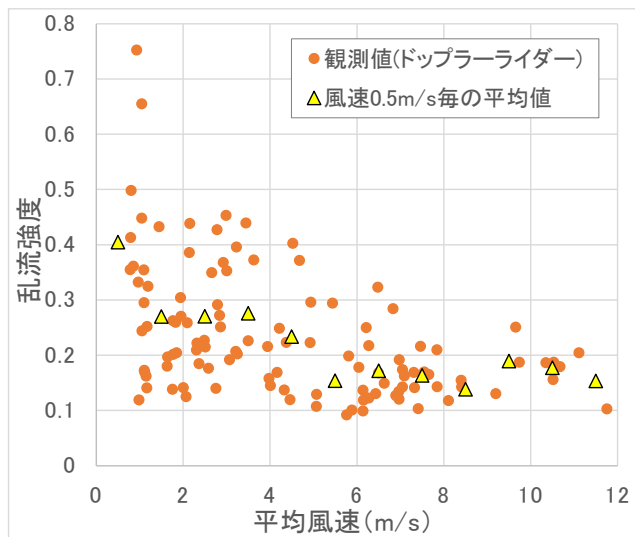
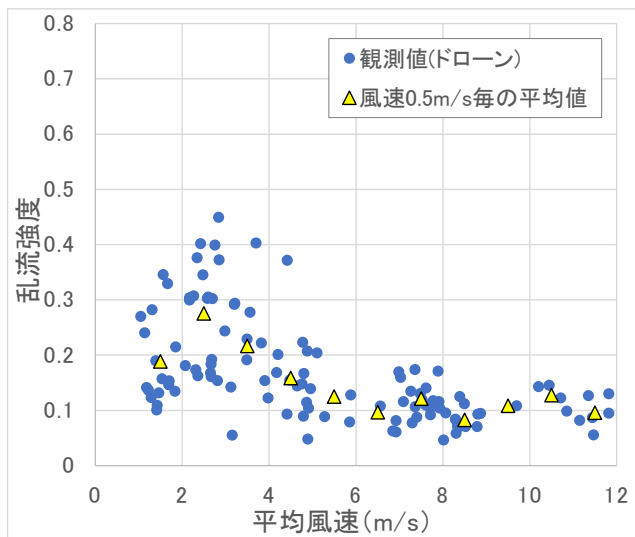


図 67 平均風速と乱流強度との関係。ドローン観測とドップラーライダー観測の比較

b) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーション

ここでは、メソスケール気象現象をターゲットとした数値気象モデル 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や気象場を数値シミュレーションにより明らかにすることを目的としている。

i) 桜島の微地形

これまで、WRF モデルを使った高分解能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。さらに、高分解能シミュレーションにおいて、桜島および周辺地形の複雑さを精緻に再現した上（図 68）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た。図 68 を見ると、桜島および周辺地域の地形には、現業気象予報モデルの解像度（5 km ないし 2 km）では表現しきれないような微細な構造があることが分かる。

令和 3 年度は、引き続き気象モデルの高分解能化によって生じる気流の変動性状、特に鉛直運動が降灰パターンに及ぼす影響を評価した。

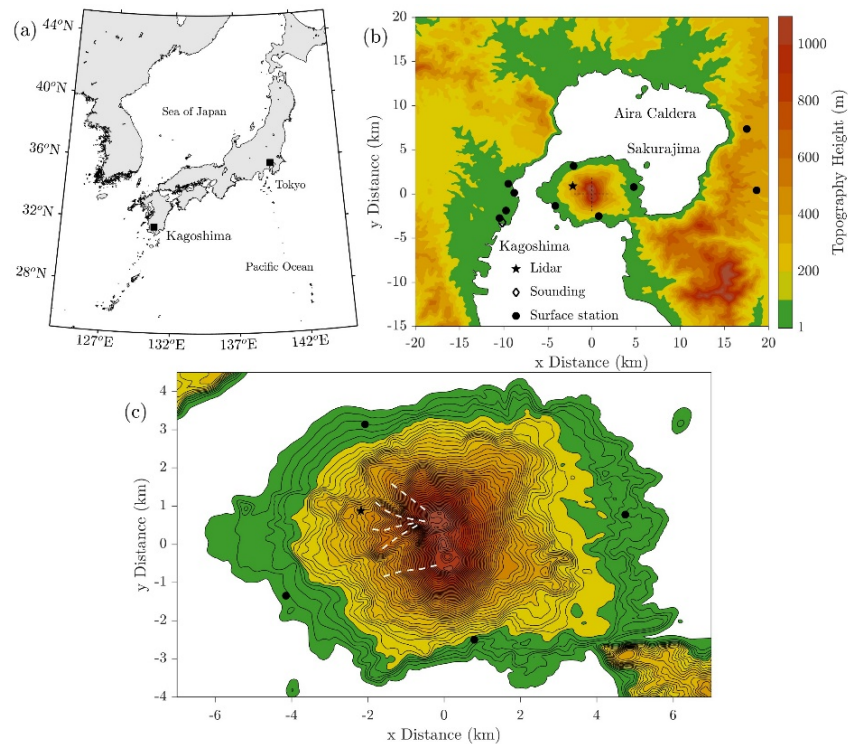


図 68 (a) 鹿児島島の位置、(b) 桜島および周辺地形、(c) 桜島の地形。

ii) 数値モデルの設定

本研究では、気象場の再現に領域気象モデル WRF Version 4 (Skamarock et al. 2019)を用いる。WRF モデルの計算領域の設定を図 69 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。これら数値実験の設定は、2020 年度に実施したものと同様である。火山灰の輸送には、FALL3D (Folch et al. 2009) を用いた。

解析対象としたのは、2017 年 10 月 1 日の桜島噴火の事例とした。この事例に係る地上天気図および風速や大気安定度の鉛直分布を図 70 に示す。

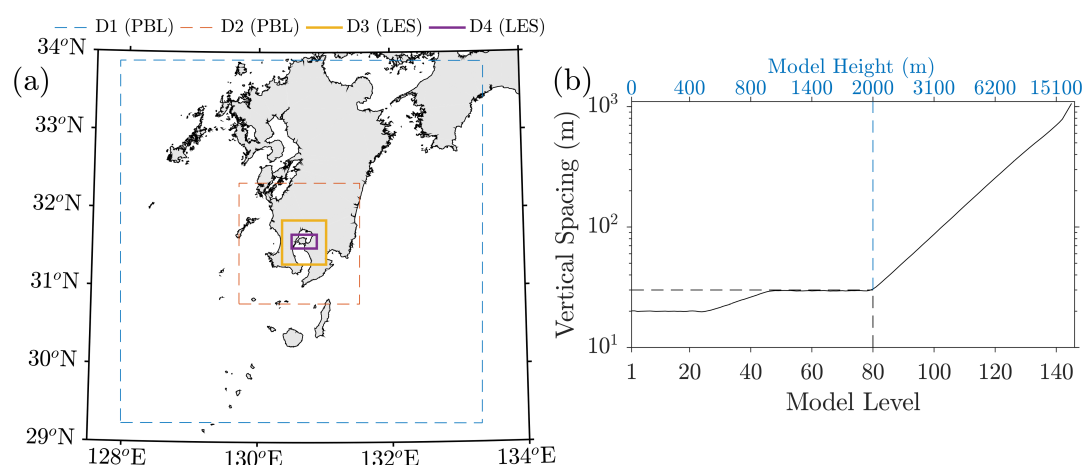


図 69 (a) WRF モデルの計算領域 (D1, D2, D3, D4), (b) 鉛直層数と鉛直格子間隔の関係

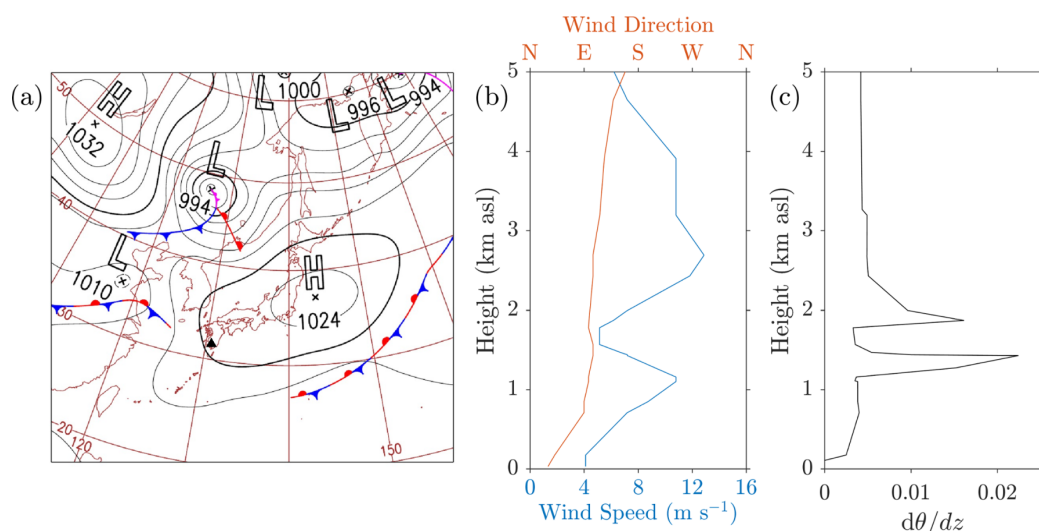


図 70 2017 年 10 月 1 日の気象状況：(a) 天気図、(b) 風（風速：水色；風向：橙色）の鉛直分布、(c) 温位の鉛直勾配（大気安定度）の鉛直分布。

iii) 結果

WRF モデルによる数値シミュレーションで得られた 2017 年 10 月 1 日の 6~9 時 (3 時間平均値) の乱流運動エネルギー (TKE) および風の様子を図 71 に示す。鉛直断面図を見ると、大気下層で東風が卓越する状況において、東風が桜島を乗り越える際、下流側 (火口の西側) でおろし風のように風速が強化されていることが分かる。火口のさらに下流側には上向きの運動が認められ、ハイドロリック・ジャンプに似た現象が生じていることが分かる。こういったハイドロリック・ジャンプが生じている状況において、TKE の数値が大きくなっていることから、気流の変動性が極めて高いと言える。水平断面図を見ると、地上風は桜島の火口付近を迂回するような流れ場となっており、これは海拔高度 600 m においても同様に現れている。これらの流れ場の特徴を気象モデルで再現できたのは、2020 年度に調べた通り、気象モデルの高分解能化により地形を精緻に表現することが可能となり、地形に励起されたハイドロリック・ジャンプや地形を迂回する流れが数値的に再現可能となったためである。また、TKE に分布に表現されるように、地形に励起される流れ場は非定常性が高くなり、火山灰の拡散や沈着にも影響を及ぼす。

このような鉛直運動による降灰の影響を調べるため、FALL3D 計算において火山灰の降下速度の違いによる感度実験を行った。具体的には、鉛直速度に対して 1 倍、0.5 倍、0.1 倍、0.01 倍のスケーリングパラメータを乗じた上で火山灰の鉛直移流項を計算した。その結果を図 72 の左列に示す。1 倍の場合、火山灰の降下速度が大きいため、火口近傍の沈着量が多くなる。スケーリングパラメータを小さくするほど、火山灰の降下速度が小さくなっていき、火口から離れた地点での沈着量が多くなる傾向にあることが分かる。異なる火山灰の密度を仮定して火口からの沈着量を計算すると、どの場合の密度であっても、スケーリングパラメータが大きい場合には火口付近の沈着量が多く、スケーリングパラメータが小さくなるほど火口から離れた場所での沈着量が増加する傾向にある (図 72 右列)。また、密度が小さくなるほど、より離れた場所での沈着量が増加していることも分かる。このように、鉛直速度が火山灰の沈着量に及ぼす影響は大きいことが分かり、これは先述の通り、山岳周りの鉛直運動が激しく変化することが関与している。

iv) まとめ

本研究では、気象モデルを水平格子幅 50 m という高解像度化することにより、桜島および周辺地域の地形を詳細に表現することを可能とし、地形の複雑性に起因する気流の変動やそれに伴う火山灰の拡散や沈着への影響を明らかにした。特に、地形に励起される鉛直運動に着目し、火山灰への沈着に鉛直速度の影響が顕著に表れることを示した。一般的に、山岳を越える流れ場の特徴は、大気の成層状態や風速の鉛直分布の考慮した安定度パラメータであるフルード数によって分類される。火山灰の拡散や沈着には鉛直運動が大きく影響を及ぼすことから、沈着量の違いはフルード数によってある程度整理できることが示唆される。こういった知見は、降灰量の推定や予測にも活用できると言える。

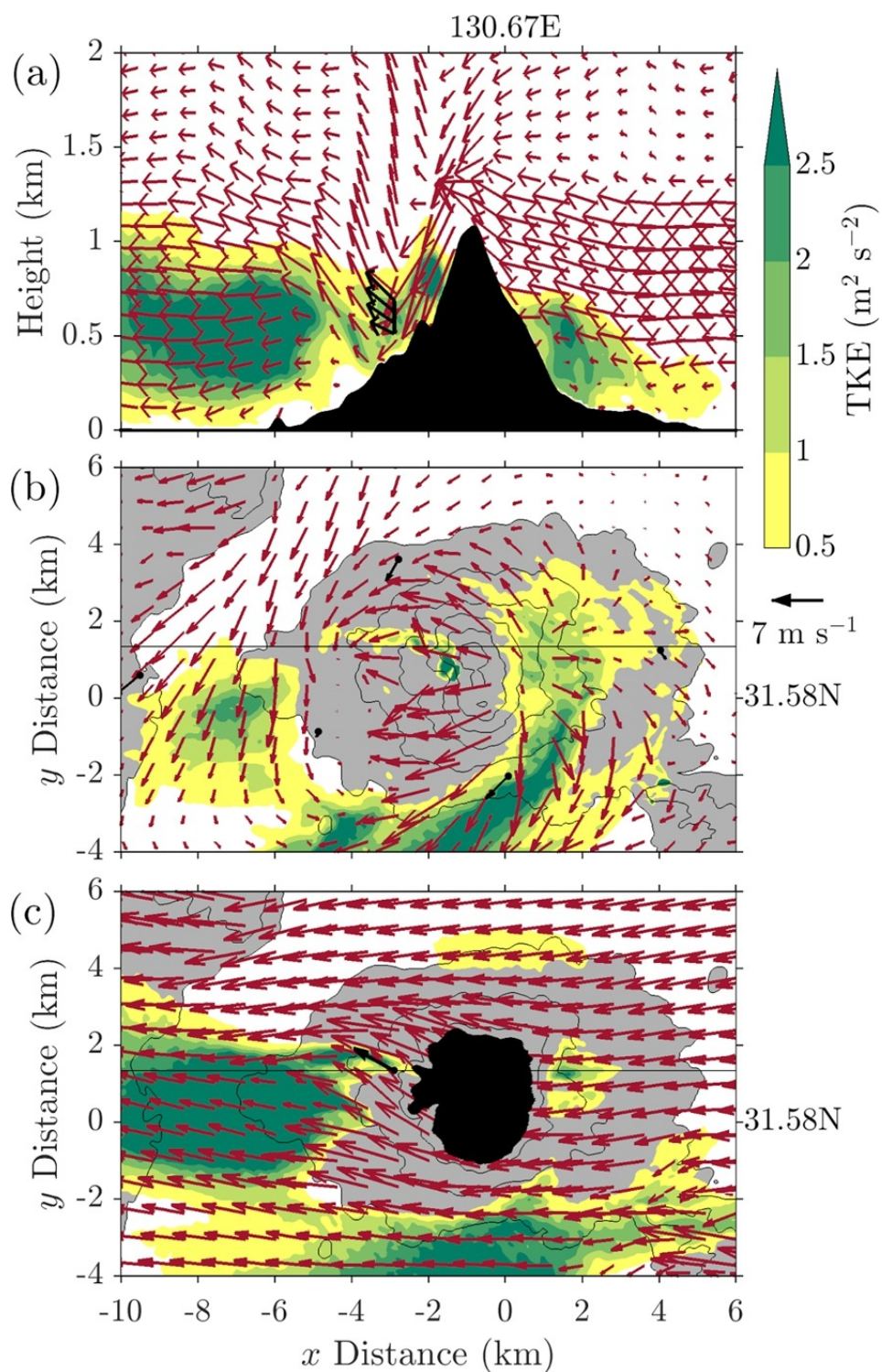


図 71 数値シミュレーションによる乱流運動エネルギー（カラー）および風（赤色ベクトル）。黒のベクトルは観測値を表す。(a) ハルタ山のライダー観測地点を通る東西・鉛直断面図、(b) モデル最下層高度での水平分布図、(c) 海拔高度 600 m での水平分布図。数値はすべて、0600-0900 JST の 3 時間平均値である。

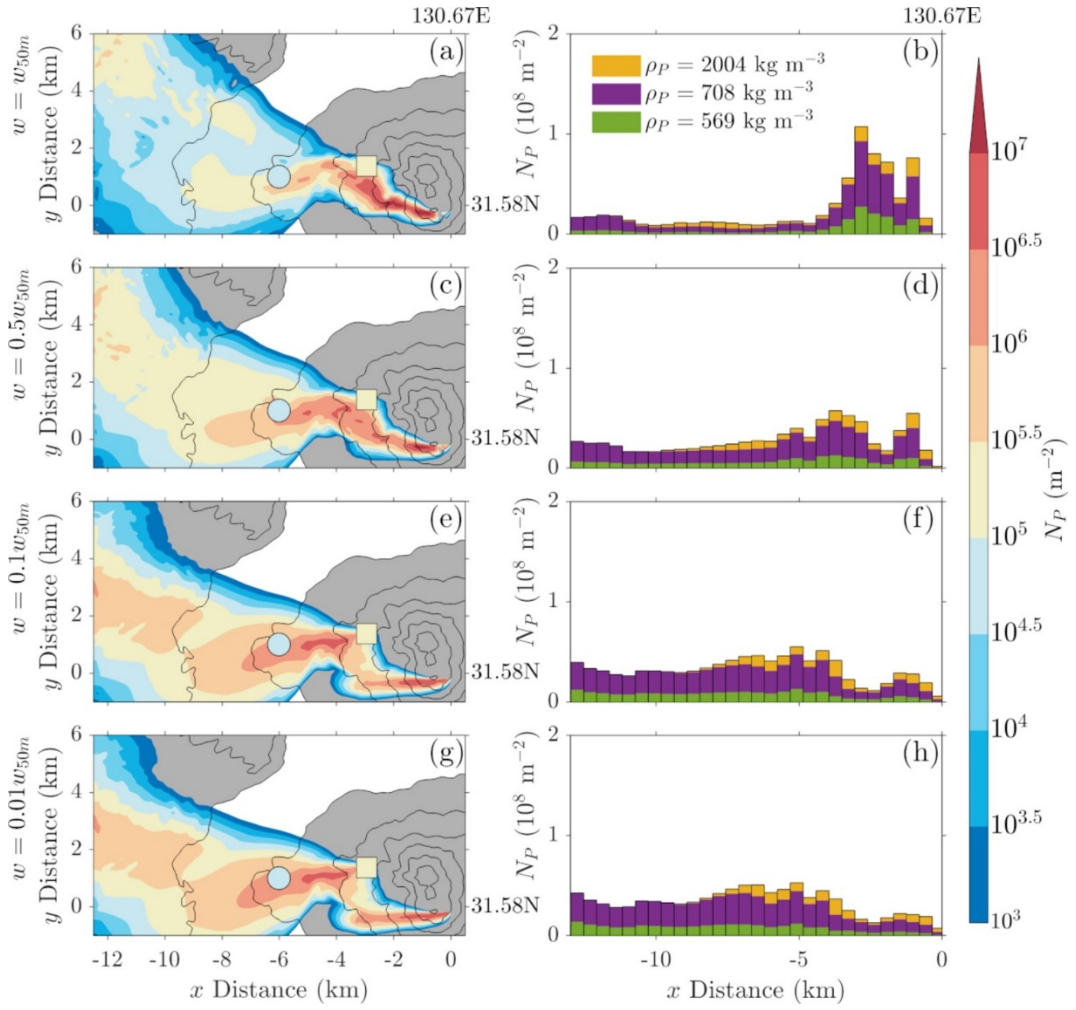


図 72 FALL3D による数値シミュレーションで得られた降灰量の分布（左列）および南北方向に積算した降灰量の東西分布（右列）。火山灰の降下速度に及ぼす鉛直速度のスケールパラメータを変化させた 4 通りのケースの結果を示す。(a) (b) スケールパラメータが 1 の場合、(c) (d) スケールパラメータが 0.5 の場合、(e) (f) スケールパラメータが 0.1 の場合、(g) (h) スケールパラメータが 0.01 の場合。左列図中の四角印はディストロメータの設置点、丸印は桜島火山観測所の位置を示す。右列では、異なる粒子密度を仮定した場合の結果を示す。

c) ラージエディシミュレーションによる火山周囲の気流性状

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した。

i) 計算手法の開発

火山周辺の気流をさらに高精細化させるため、非定常な乱流場の計算を行うことのできるラージエディシミュレーションを用いた気流解析手法を開発した。ここで開発した手法は、以下の機能を有する。

- ・気象場の影響を取り込むことができるように、WRF から得られる気象場を境界条件として用いることができる。
- ・地形の凹凸を取り込むことができるように曲線座標系に基づく計算格子を用いることができる。
- ・キャノピーモデルを用い、地表面の植生や構造物など気流を乱す粗度の影響を取り込むことができる。

構築した計算手法の概要を表 14 にまとめる。

表14 開発した計算手法の概要

*** RIAM-COMPACT数値モデル 1) を改変**

- ・数値計算手法：有限差分法
- ・乱流モデル：Large-Eddy Simulation(LES)
- ・流れの支配方程式：フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式と、ブシネスク近似に基づいたナビエ・ストークス方程式、および、エネルギー方程式(温度方程式)
- ・計算アルゴリズム：部分段階法 2) に準じる
- ・時間進行法：オイラー陽解法
- ・圧力に関するポアソン方程式：SOR法
- ・空間項の離散化：2次精度中心差分、ただし、対流項：補間法3)に基づいた3次精度風上差分。3次精度風上差分の数値拡散項の重みは河村-桑原スキームタイプ 4) の $\alpha=3.0$ に対して $\alpha=0.5$
- ・LESのSGSモデル：渦粘性近似モデル 5)

- 1) Uchida, T. and Takakuwa, S., Large-Eddy Simulation-Based Assessment of the Risk of Wind Turbine Failures Due to Terrain-Induced Turbulence over a Wind Farm in Complex Terrain, *Energies*, 12(10), 1925, 2019.
2) Kim, J. and Moin, P., Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations, *J. Comput. Phys.*, Vol. 59, pp. 308-323, 1985.
3) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション改訂版, 養賢堂, 2014.
4) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K., Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, *Fluid Dyn. Res.*, Vol. 1, pp. 145-162, 1986.
5) Smagorinsky J., General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Equations., *Mon. Weather Rev.*, Vol. 91, pp. 99-164, 1963.

数値的に再現した自然風の持つ乱れを再現した変動風速場を、桜島付近を再現した計算領域の境界条件として与えて計算を行い、地形および地面粗度による乱流場が再現できることを確認した。(図 73)。

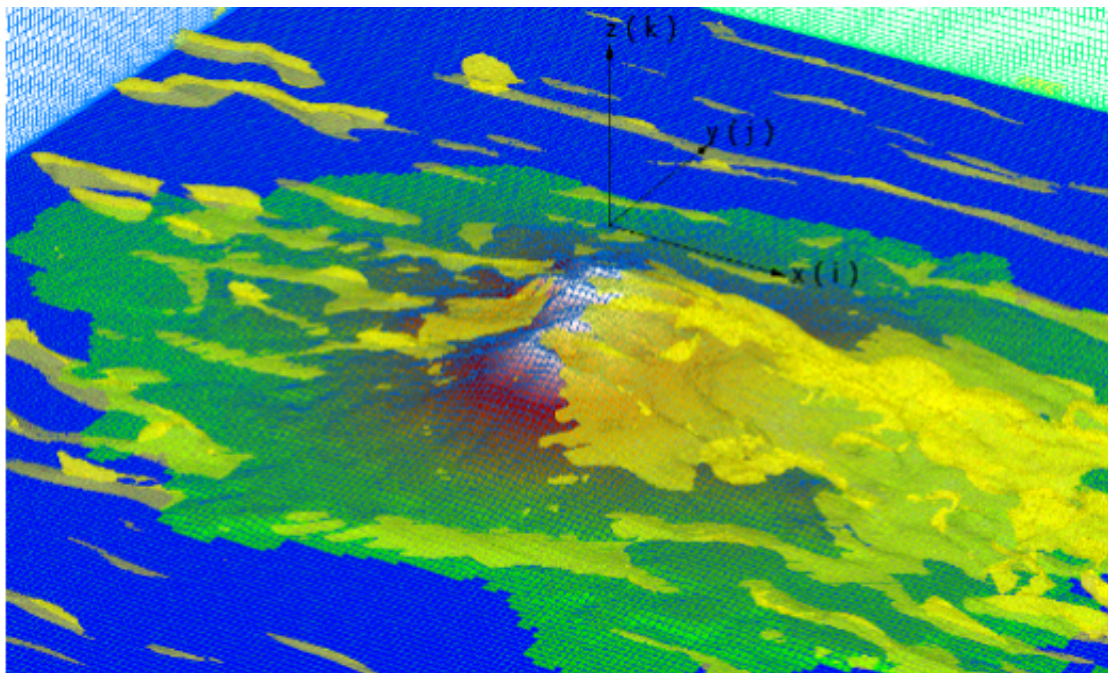


図 73 自然風のもつ乱れを再現した流入風を用いた桜島周囲の気流の再現計算

ii) 大気安定度による噴煙の変化

開発した計算手法を用いて、噴火時の噴煙の移流・拡散状況を検討した。現実の噴煙の移流・拡散状況は、気象状態に左右され変化する。特に、大気の安定度による変化が大きいため、その影響を数値計算で再現することを試みた。図 74～76 は大気の安定度を変えて、桜島の地形に適用した例である。

その結果、構築した計算手法により、大気の安定度の違いにより現実には生じる形状の違いに対応した噴煙の移流・拡散性状の違いを再現することができた。

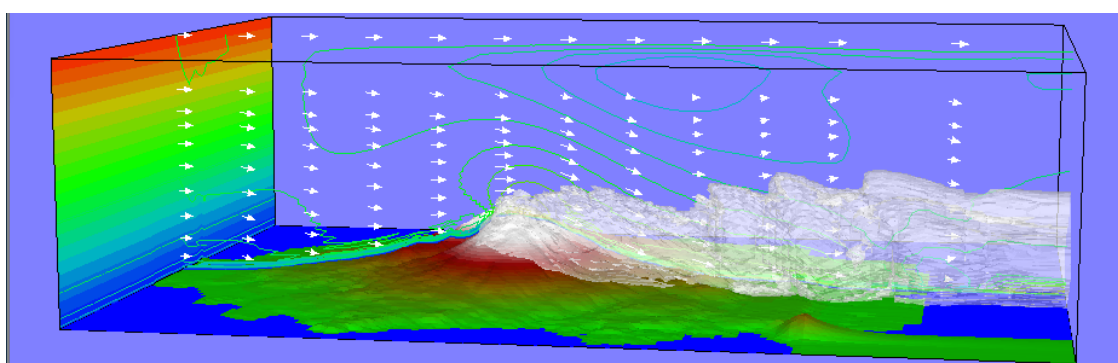


図 74 周囲の大気が安定な場合の噴煙の移流・拡散状況。流入：風速 0.5m/s (1/7 勾配、乱れなし)、温度 (+ 勾配: -5K~0K)、噴流：温度+20K、0.2m/s。

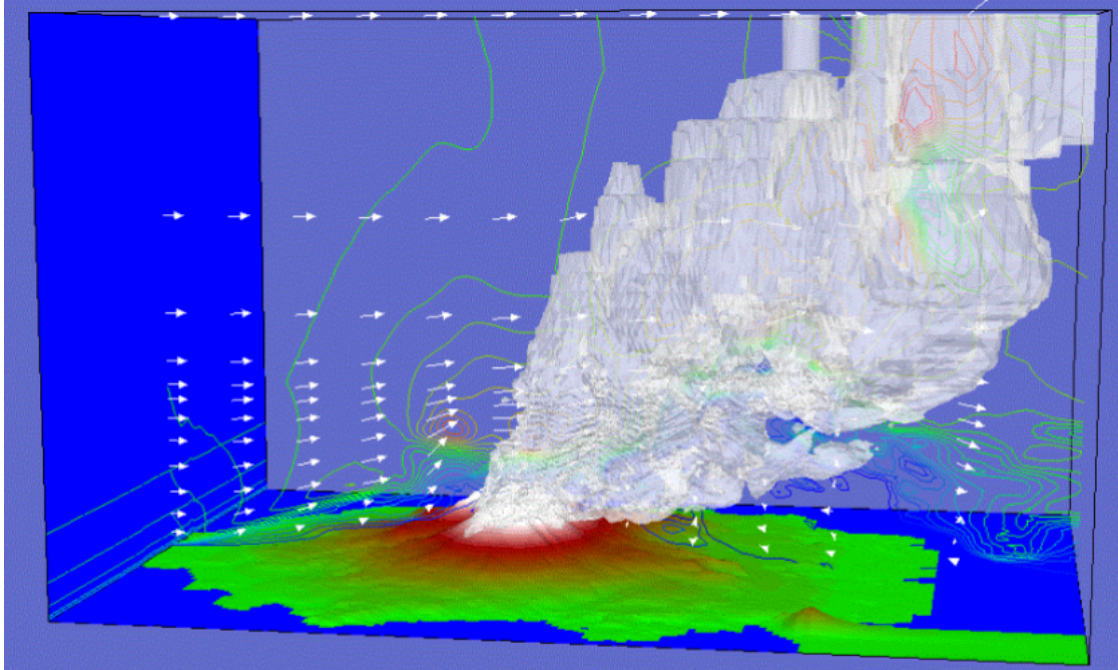


図 75 周囲の大気が中立の場合の噴煙の移流・拡散状況。流入：風速 1m/s (1/7 勾配、乱れなし)、温度 (勾配 0) 噴流：温度+20K、0.1m/s。

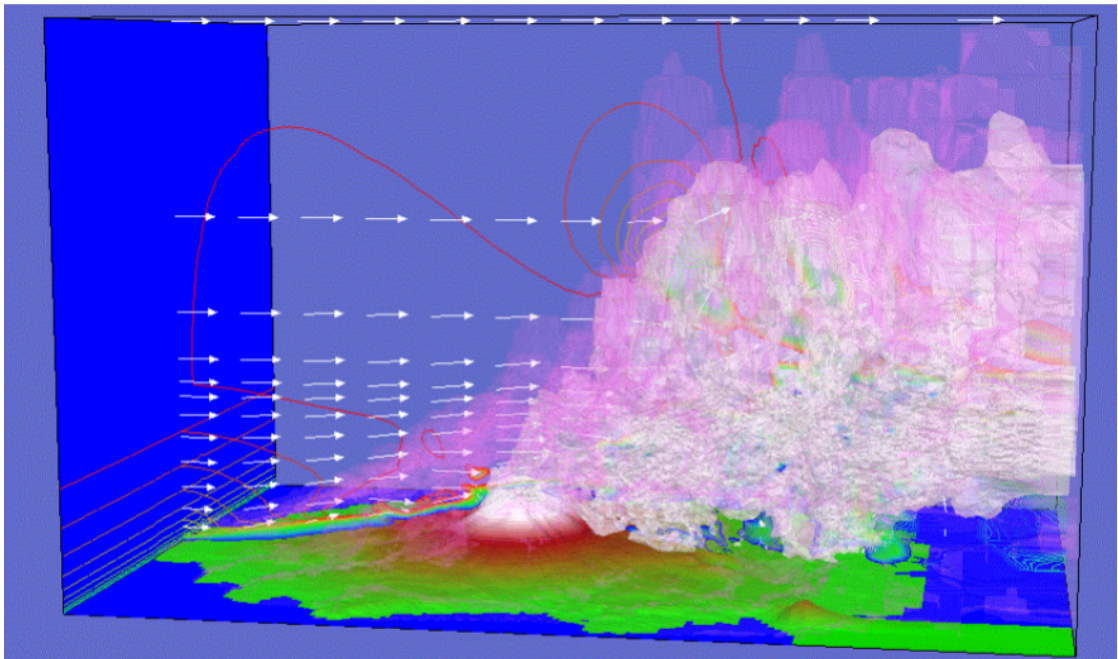


図 76 周囲の大気が不安定な場合の噴煙の移流・拡散状況。流入：風速 1m/s (1/7 勾配、乱れなし)、温度 (勾配 0) 噴流：温度+20K、0.1m/s。白色の等値面は火山灰の分布を、薄桃色の等値面は温度の分布を表す。

2) 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した。オンラインで集約したデータは地震及び地盤変動データから計算される噴出率、レーダー観測により得られる火口直上の反射強度、地上風速データ、ディストロメータ観測による火山灰の粒径・落下速度毎の粒子数である。また、気象モデルの気象場を WRF により高分解能化した気象場データは随時、データベースに追加した。ディストロメータ観測データを課題 A の JVDN へ自動送信した。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した。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した。

a) 噴出率の時系列

噴出率は、式 (1) を用いて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図 77 に示した。対象とした期間は噴火活動が南岳に回帰した 2017 年 11 月以降、2022 年 3 月までである。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。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。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。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。

噴火活動が活発な状態は、2020 年 6 月まで続いたが、それ以降、噴出率は小さく、概ね 5 千トン/分未満である。特に、2020 年 6 月中旬から 11 月、2021 年 5 月中旬以降は、噴出率が 0 に近い。

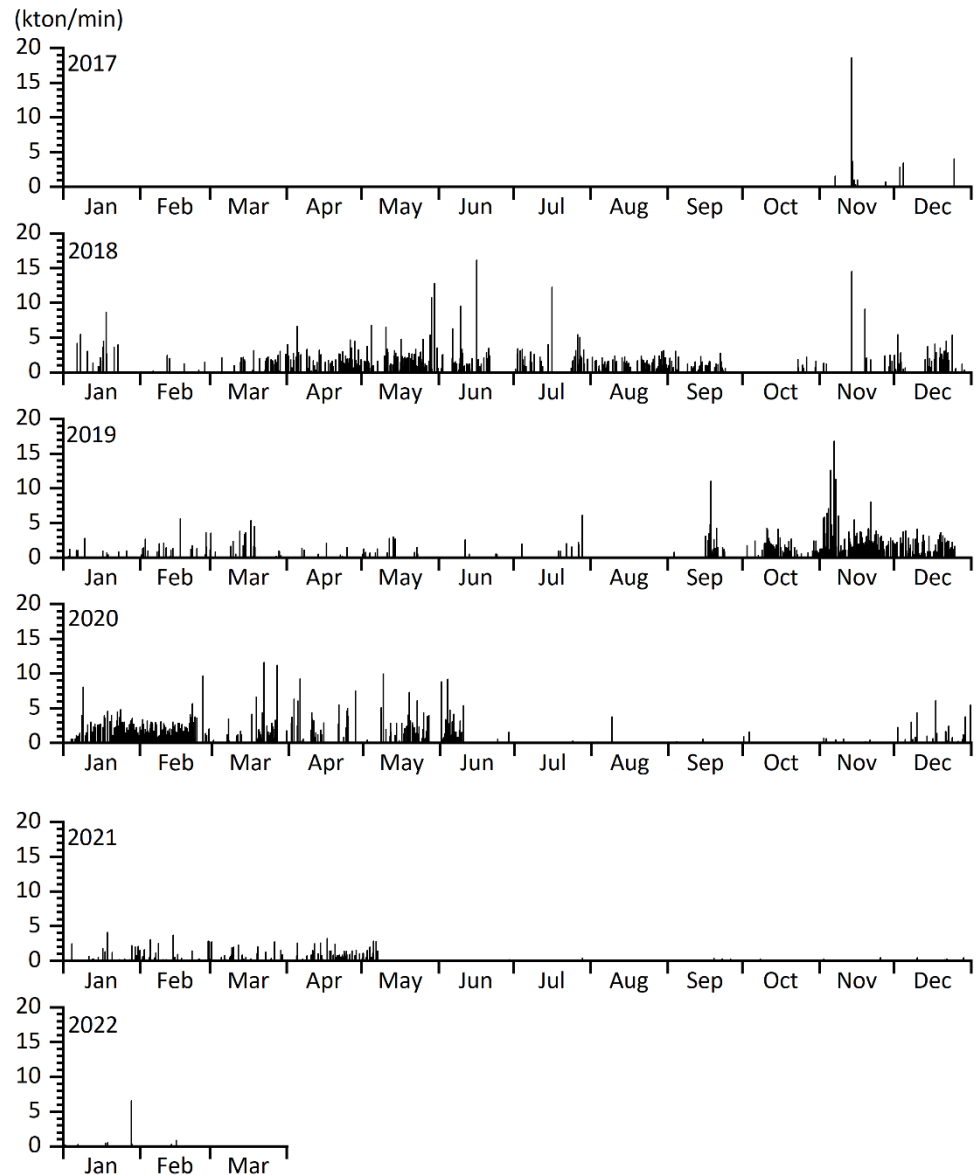


図 77 噴出率の時系列。1 分毎にプロットした。

b) 風速場の時系列

2020 年までの期間について、高解像度風速場のデータベース (NetCDF) を作成した。

i) 高解像度風速場の計算

火山近傍の風速場は、地形の影響を強く受けることが知られている。Poulidis et al., (2017) は、領域気象モデル WRF Version 4 (Skamarock et al., 2019) を用いて気象モデルから得られる風速場を高精細化し、風下側では下降流が卓越し、風速が 50% 増加することを示した。さらに、降灰量予測の影響を見積もった。そこで、火山灰移流拡散の連続シミュレーションにおいても WRF により高精細化された気象場を用いる。

WRF モデルの計算領域の設定を図 78 に示す。一番外側の領域を Domain 1 とし、内側に Domain 2 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。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。

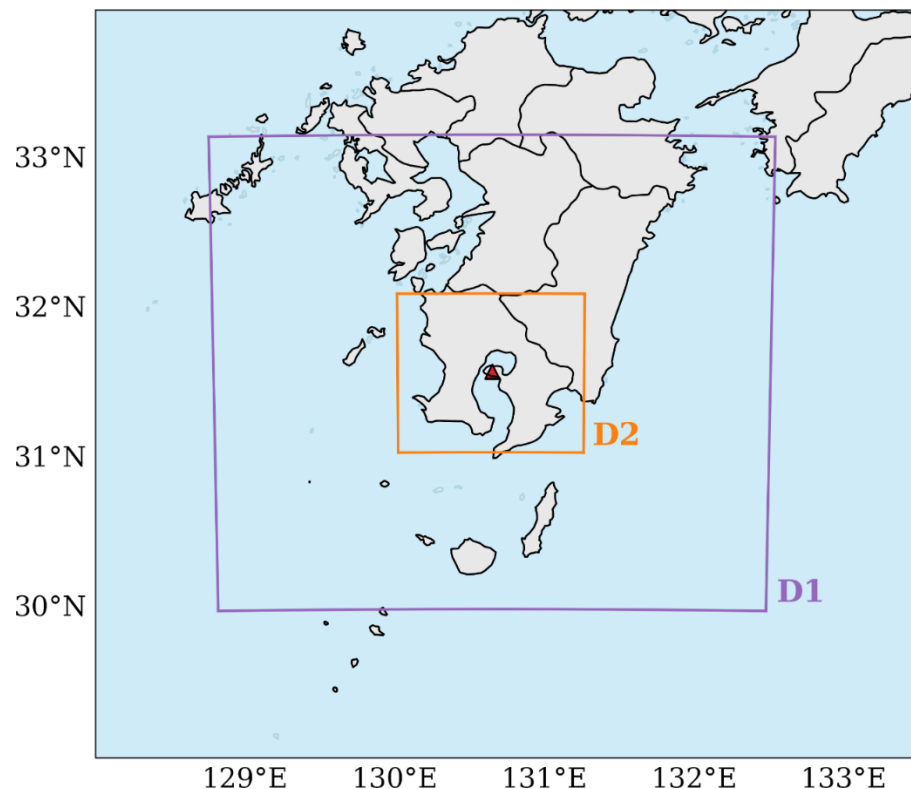


図 78 WRF モデルの計算領域

ii) 高解像度風速場の事例

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

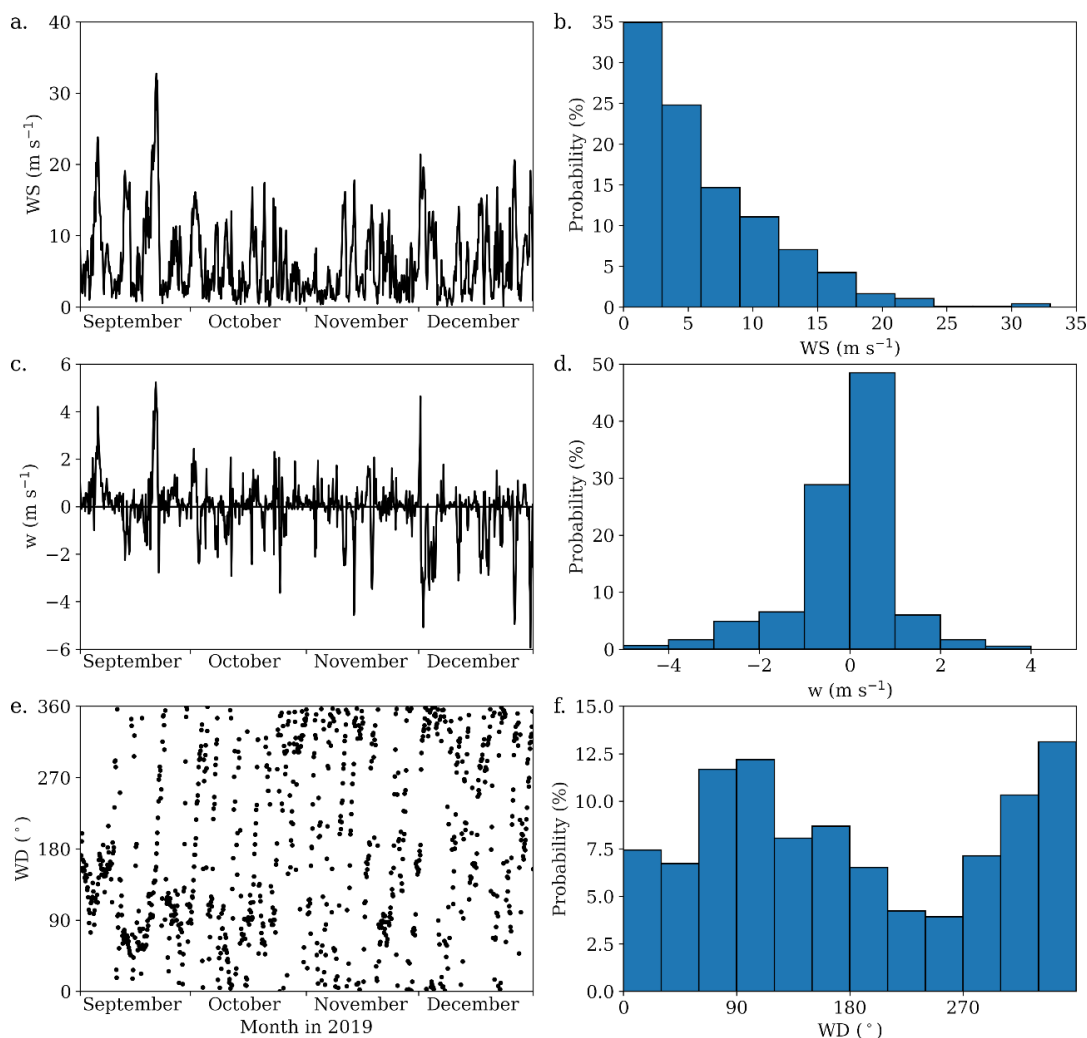


図 79 南岳の南東 0.5km、高度 1000m 付近における 2019 年 9 月～12 月の風速場。左列は上から水平風、鉛直風、風向である。右列はそれらの確率分布を示す。

c) 火山灰移流・拡散シミュレータの連続化の設計検討

火山灰の拡散・降下については、噴出量、噴煙の高さ、高さに応じた粒度分布を持つ柱状モデル、終末速度など、多くのシミュレーションが行われてきた。これらのパラメータのうち、噴出量は降下火山灰量を決定づける最も重要なパラメータであるにもかかわらず、総噴出量と噴火の継続時間のみ与えられ、噴出率の時間変化は考慮されていない。これは、噴火の過程を噴出率の視点から詳細に把握することが困難であったことによる。短時間で終息するブルカノ式噴火では噴出量を impulsive に与えることにより、降下火山灰量を予測することができる。一方、数時間から日単位で長時間続く噴火やブルカノ式噴火が頻発する場合は、火山学の課題として噴出率の時間変化を、また、気象学の課題として噴火継続中における風向、風速の変化を考慮する必要がある。ここでは、長時間継続する噴火にも対応できるように、連続的にデータの得られる地震計およびひずみ計の記録を入力条件とし、火山灰拡散シミュレータを連続的に稼働させて単位時間当たりの降下火山灰量および積算量を常時評価することのできるシミュレーションシステム設計の検討を行う。

i) 連続化のための基本的な考え方

火山灰の移流・拡散シミュレータは様々なパラメータを含むが、降下火山灰量の空間分布に最も大きな影響を与えるのは、火山灰の噴出量と風速場である。準リアルタイムで連続的にシミュレータを稼働させるためには、火山灰の噴出量と風速場を連続的に与え続ける必要がある。風は大気の循環であるので、元々、風向・風速は連続量であるが、火山灰量はこれまで噴火イベントごとの量として扱われてきた。これを単位時間当たりの噴出量の時間関数に拡張する。桜島火山の昭和火口における火山灰噴出量は地震観測から得られる火山性微動振幅と地盤変動観測から見積もられる圧力源の体積変化量の線形結合により近似される (Iguchi, 2016)。観測手法が robust な火山性微動および地盤変動データを用いることにより、連続的に噴出率を評価できる。風速場については世界の気象機関から公開されている予測値を用いればよい。ただし、火山近傍における風速場は、地形の影響により複雑なので、高精細化が必要となる。

火山灰の移流拡散の連続化シミュレーションシステムの概要を図 80 に示す。このシステムでは、移流拡散シミュレーションを一定間隔で繰り返す。そのために、噴出率の時間関数をシミュレーションの繰り返し時間間隔で離散化した値を噴出率として扱い、継続時間はシミュレーションの繰り返し時間間隔とする。個々のシミュレーションから算出される降灰量を位置毎に加算して、降灰量積算値の空間分布を求める。

火山灰噴出率の時間関数は、有村観測坑道における地震動と火口方向および直交方向のひずみ変化から式 (1) により計算される 1 分ごとの火山灰放出量である。火山灰放出量から噴煙高度を経験式により算出し、火口直上から噴煙頂部の高度まで火山灰を配置する。噴煙の拡散効果を考慮しつつ、風速場の予測値をもとに移流と火山灰粒子の重力降下を計算し、地上降灰量を求める。

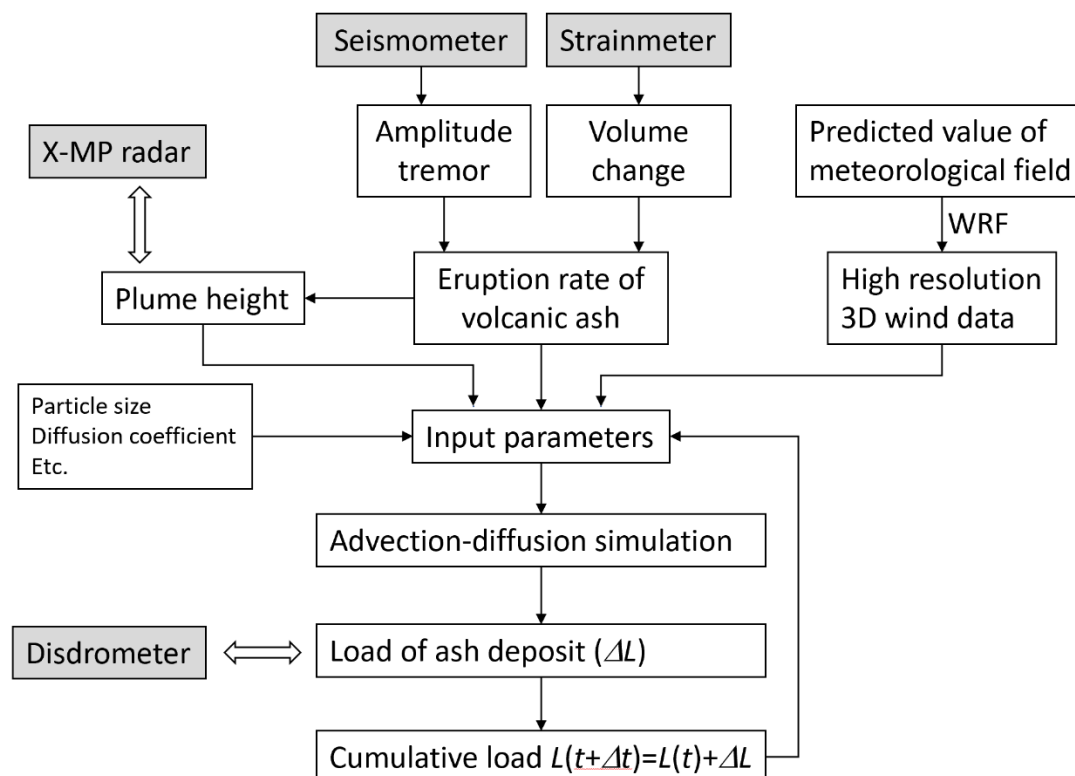


図 80 火山灰移流・拡散シミュレータの連続化のためのプロセスとデータのフロー

ii) 噴煙高度および降灰量の実測値との検証

シミュレーションに用いた噴煙高度をレーダー観測による噴煙高度と照合する。レーダーから得られる噴煙の反射強度は大気中における火山灰濃度の分布を表している (Maki et al., 2016)。反射強度分布は火山灰濃度分布で、火口から大気に注入される火山灰の噴出率そのものではないが、火口直上に形成された噴煙柱をシミュレータの初期値とすれば、噴出率から計算される噴煙高度は、レーダーにより得られる反射強度の強い部分の最高高度を用いて検証可能である。シミュレーションにより得られた地上降灰量は、ディスドロメータによる火山灰粒子のカウントと照合できる。ディスドロメータは粒径・落下速度クラスごとの火山灰粒子数を観測でき、これらのデータから降下火山灰重量を見積もることができる (Takishita et al., 2021)。ディスドロメータは降灰量の連続観測を可能とするので、シミュレーションにより得られた降灰予測値の検証に用いることができる。桜島においては 21 台のディスドロメータが稼働しており (図 22)、あらゆる火山灰の流向に対して対応できる。

d) 火山灰移流・拡散シミュレータの連続化のためのプロセス繰返し時間間隔の検討

移流・拡散シミュレーションは、風速場にしがった火山灰粒子の移動、拡散係数で表現される噴煙の拡散、重力による火山灰粒子の落下を考慮したものであり、ラグランジュ的手法とオイラー的手法に大別される。ラグランジュ的手法は火山灰粒子の移動を風速場と重力場に沿って追跡したものであり、拡散係数は、粒子の移動のあい

まいさとして表現される。火山灰放出率は、火山灰粒子の数もしくは火山灰粒子 1 個当たりの重量により表現され、降下火山灰量は地表に到達した火山灰粒子の数もしくは火山灰粒子 1 個当たりの重量密度により表現される。一方、オイラー的な手法では、火山灰濃度を属性として持つグリッドが三次元空間に配置され、風速場と重力場を反映したグリッド間の火山灰のフラックスを評価する。火山灰放出率は、噴煙に相当するグリッドにおける濃度の増加量であり、降灰量は地表に相当するグリッドにおける濃度の増加量である。いずれの場合も、微小な時間ごとの逐次計算を繰り返す事により、三次元的に不均質で時間変化する風速場を反映したシミュレーションが可能であり、これまでに多くの実績がある。ここでは、汎用ワークステーションを用いて、ラグランジュ的手法とオイラー的手法について、火山灰移流・拡散シミュレータのプロセス所用時間を調べ、連続化のための技術的な検討を行った。

使用したワークステーションの仕様は以下のとおりである。Windows10 上で仮想マシンを立ち上げ、以下の構成とした。

表 14 ワークステーションの仕様

CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz この内、プロセッサ 4 個を仮想マシンに割り当て
メモリ	8GB
HDD	64GB（仮想環境なので足りなければ後で追加可能）
OS	AlmaLinux 8.4

i) ラグランジュ的手法

ラグランジュ的気手法としては、PUFF (Tanaka and Yamamoto, 2002) を用いて、試験を行った。

シミュレーションは、噴火日時及び噴煙高度は固定とし、粒子数を 10000、5000、1000、500、100 とした時の計算にかかる時間がどの程度かかるかを調査した。元々のプログラムでは計算後の画像生成に大部分の時間が費やされる事がわかっていたため、このシミュレーションでは画像は降灰マップ(fall.gif)のみとし、さらに計算部分と分けて調査を行った。

この際、粒子数を 10000 とした所、プログラムが異常終了した。調査してみると、最大粒子数を 5000 としてプログラムされていたため、この制限を 50000 としている。また、時間分解能は 5 分であり、粒子を追跡する時間は 6 時間に固定されている。

プロセスの所要時間を表 15 に示す。シェルにて date を用いて計測しているため 1 秒以下は誤差範囲であり、上記条件ではどれでもほぼ差が見られなかった。

また、この計算時間の内の大半は、風速場の計算に費やされており、粒子の追跡計算はほぼ一瞬で終わっている事から、粒子数を多少増やした所で処理時間にはほぼ影響を及ぼさないと考えられる。なお、試験的に粒子数を 50000 としてみたが、

結果は同じであった。つまり、PUFF での計算時間は粒子数に依存するが、10000 個程度では大差がないという結果が得られた。

表 15 粒子数と計算所要時間

粒子数	計算時間 (秒)	画像生成時間 (秒)
10000	6	1
5000	7	0
1000	6	1
500	6	0
100	7	0

※計算時間はシェルの date を用いて計測したので、秒単位となっている。

PUFF による処理時間は粒子数のみに依存する。火山灰量は粒子 1 個当たりの重量に割りあててため、大規模噴火の場合、粒子 1 個当たりの重量を重くすればよい。また、大規模噴火で噴煙高度が高くても、粒子の初期座標を高い高度に設定するだけである。よほど多量の粒子数を設定しない限り、処理はとても軽い。これは、地形を考慮しない風速場のデータのみを取り込んで計算しているためである。

以下、PUFF を連続化降灰量予測シミュレーションと実行するために、考慮すべき点及び追加機能を列記する。

①火山灰粒子の地上への到達

現行の PUFF は高度 0m 以下になった粒子を降灰量に換算するが、地形を考慮した降灰判定に変更する必要がある。また、地上に到達した時刻をタイムスタンプとして付加する必要がある。

②風速場データ

現行の PUFF は、気象庁が公開する GPV データを元に風速場を内挿して計算しているが、高解像度風速場は netCDF 形式で作成したので、風速場データ Import 形式を netCDF に対応する必要がある。

③粒子数、降灰量

現行の PUFF は、粒子 1 個当たりの重量を固定し、粒子数を変えることにより火山灰噴出率を表現している。噴出率が小さい場合、粒子数が 100 個以下となり、本来降灰があるべき地表に粒子が到達しないこともあり得る。シミュレーションされた降灰量はディストロメータで観測される降灰量により、評価する計画であるので、噴出率が小さい噴火でもディストロメータ観測点付近に数個程度の粒子が落下するような総粒子数の設定が必要である。このためには、噴出率に応じて、総粒子数を変える工夫が必要である。

④時間分解能

現行の PUFF のタイムステップは 5 分に固定されており、各種プログラムに埋め込まれている。本研究の実験結果から、タイムステップを 1 分にして、時間分解能を向上させることも可能である。

⑤シミュレーションによる降灰量データ

現行の PUFF では、最新の結果のみデータとして保存される。連続化シミュレータでは、個々のシミュレーションから得られる降灰量の積算値を扱うので、タイムステップごとの降灰量を保存しておく必要がある。

ii) オイラー的手法

オイラー的な手法では、火山灰濃度を属性として持つグリッドが三次元空間に配置され、風速場と重力場を反映したグリッド間の火山灰のフラックスを評価する。火山灰放出率は、噴煙に相当するグリッドにおける濃度の増加量であり、降灰量は地表に相当するグリッドにおける濃度の増加量である。微小な時間ごとの逐次計算を繰り返すことにより、三次元的に不均質で時間変化する風速場を反映したシミュレーションが可能である。

ここでは Fall3D を試験した。Fall3D は、GitLab にて公開されているプログラムで、現在の最新バージョンは 8.1.1 (Folch et al., 2020) である。

<https://gitlab.com/fall3d-distribution>

ここから、fall3d-8.1.1.tar.gz をダウンロードし、構築したプログラムを使用してシミュレーションを行った。

Fall3D は、netCDF 形式の気象データと設定ファイル(.inp)により動作する。設定ファイルの項目の多くはデフォルト値を用いた。シミュレーションは、噴火日時を固定とし、噴煙高度とグリッドサイズを変えることにより、計算所要時間を調べた。シミュレーションのための噴煙高度とグリッドサイズの組合せによるケースは表 16 に示すとおりである。

表 16 ケースごとの噴煙高度とグリッドサイズ

ケース	グリッドサイズ X, Y, Z (km)	グリッド分解能 (m)	グリッド数	噴煙高度 (m)
1	36×36×10	水平 1500m 鉛直 500m	11,520	8000
2	36×36×10	水平 1500m 鉛直 500m	11,520	3500
3	18×18×5	水平 600m 鉛直 200m	22,500	3500
4	18×18×5	水平 300m 鉛直 100m	180,000	3500

シミュレーションする時間長は PUFF に合わせて 6 時間とした。また、時間分解能 3 分とした。地震動および地盤変動から算出される火山灰放出率とディストロメータの記録間隔は 1 分であるので、シミュレーションの時間分解能も 1 分にした

いが、Fall3D は時間分解能を時間単位でしか指定できない。1 分は 0.016666... となり割り切れないため、計算上の誤差となり、指定することが出来ない。そこで、ここでは時間分解能 3 分 (0.05 時間) とした。

Fall3D は並列処理が可能な設計となっており、多コアの CPU であれば複数スレッドを同時に走らせることで、時間の短縮が可能となっている。今回の仮想環境 (表 14) では、4 つのコアを割り当てているので、コア数 1~4 の並列計算も試みる。これにより、どの程度の CPU が必要であるかを想定する事が出来る。

シミュレーションに使用する気象データは、本研究で作成した netCDF 形式の高解像度気象データを用いた。この気象データは yyyy-mm-dd_HHMMSS.nc というファイル名で 3 時間毎に生成されているが、Fall3D では、気象データを 1 つのファイルとして与える必要があるため、6 時間のシミュレーションを行うため、ncrcat コマンドを用いて 3 つのファイルを 1 つに結合した。

Fall3D では以下の 4 つのプロセスがある。

表 17 Fall3D を構成する 4 つのプロセス

プロセス	内容
SetTgsd	カテゴリ粒子または放射性核種の種の粒子総粒子サイズ分布 (TGSD) を生成
SetDbis	気象モデルグリッドから FALL3D 計算領域に気象変数を補間
SetSrc	様々な種の放出源項を生成します。また、アプリアリ粒子凝集と TGSD カットオフを実行
Fall3d	FALL3D ソルバーを実行
All	上記4つを順次実行

シミュレーションでは、All を用いてまとめて解析を行うが、各工程での時間がわかると、どこに最も時間がかかっているのかを判別出来るので、これらの工程毎の時間もわかるようにしている。

SetDbis により気象データを読み込んで内挿等を行う過程で気象データを読み込むが、最初の 1 回目のみ 1 分程余分に時間がかかる。これは Linux システムのファイルキャッシュが働いているためであり、この影響を排除するためには毎回再起動する必要性が生じる。Fall3D 用の結合気象データを作成した後は、2 回目以降と同様の時間となることが実験により判明した。連続化運用時にはバックグラウンドで気象データ結合プロセスを実行すればいいので、解析時には 2 回目以降と同様の時間がかかる事になる。そこで、ここでは、1 回目を無視し、2 回目以降のシミュレーション結果を示す。

各ケースと CPU 数の条件下のシミュレーションの所要時間を表 18 に示す。

表 18 各ケースと CPU 数の条件下のシミュレーションの所要時間

ケース	CPU 数	解析時間 (s)	SetTgsd (s)	SetDbs (s)	SetSrc (s)	Fall3d (s)	時間 比率
1	1	27	0	2	1	24	1.00
	2	19	0	3	1	15	0.70
	3	16	0	3	1	12	0.59
	4	14	1	3	1	9	0.51
2	1	28	1	2	1	24	1.00
	2	19	0	3	1	15	0.67
	3	17	1	3	1	12	0.60
	4	13	0	4	0	9	0.46
3	1	119	2	2	1	116	1.00
	2	73	0	3	1	69	0.61
	3	55	0	3	1	51	0.46
	4	48	1	3	1	43	0.40
4	1	3743	0	4	1	3738	1.00
	2	2160	0	5	1	2154	0.57
	3	1553	1	5	0	1547	0.41
	4	1225	0	5	1	1219	0.32

※時間比率は、CPU 数 1 に対する時間比率である。

以上の結果から CPU 数を増やすと確実に効果があることがわかる。計算を並列化させても、最終的にはまとめて 1 つにしてファイルに出力するという工程があるので、ベースとなる時間以下にはならないこともあり、直線的に効率が上がるわけではないが、CPU 数が多いのが有効であることは確かである。

また、グリッド数が多いほど時間がかかることもわかる。パターン 1 と 2 はグリッド数が同じであるため、解析時間も同じ事からも証明される。ただし、グリッド数の増加以上に解析時間が増えていることもわかる。

CPU 数 4 の場合のグリッド数と解析時間を表 19 に示す。

表 19 グリッド数と解析時間の関係

ケース	グリッド数	解析時間 (s)	グリッド数比率	解析時間比率
1、2	11,520	13	1.00	1.00
3	22,500	48	1.85	3.69
4	180,000	1225	15.63	94.23

ケース 4 のグリッド数は、ケース 1、2 の約 15 倍であるが、解析時間は 94 倍かかっている。この比較から、単純にグリッド数の増加だけが解析時間増加の原因では

ないことがわかる。それ以外の要因として考えられるのは、出力ファイル生成に要する時間である。

そこで、それぞれのケースについて結果ファイル (*.res.nc) のサイズを比較して、表 20 に示す。この比較では、ファイルサイズの増加は、ほぼグリッドサイズの増加と一致している事がわかる。しかし約 90Mbyte の結果ファイルを出力するのに何分もかかるとは考え難く、解析時間長に関わっている事がわかった。

表 20 ケース 4 における解析対象時間長とプロセス時間の関係

解析対象 時間長 (時間)	Fall3dプロ セス時間(s)	解析対象 時間当たり プロセス時 間 (s)	出力レコ ード数	総出力 レコード数	1 レコー ド当たり プロセス 時間 (s)
1	53	53	20	210	0.252
2	114	54	40	820	0.139
3	312	104	60	1830	0.170
4	532	133	80	3240	0.164
5	833	166	100	5050	0.164
6	1219	203	120	7260	0.167

結果ファイルは 1 解析毎 (3 分) 毎に出力されるが、出力形式が netCDF 形式であるため、毎回全て書き直されている。1 回目は 1 レコード、2 回目は 2 レコードを書き出すが、1 時間では、1~20 の和の回数レコードを出力する。すなわち、n レコードは、 $n / 2 * (n + 1)$ レコードを出力する。これを表 20 の総出力レコード数に示した。Fall3d のプロセス時間と、総レコード数は比例関係にあり、Fall3d のプロセス時間を総レコード数で割った値(表 20 の 1 レコード当たりプロセス時間)はおおよそ 0.16s となる。本試験では、CPU 数を 4 までしか設定していないのでこれ以上の高速化は見込めない。ケース 4 は 3 分毎の繰返し計算を実行できない。

PUFF と比較した場合、シミュレーション時間等は圧倒的に長くかかってしまうが、降灰量にも地形が考慮されており、プログラムの新たに作り込む部分は非常に少なく済みそうである。

iii) 連続化を踏まえた PUFF と Fall3D の比較検討

火山灰粒子濃度をグリッド毎にシミュレートする Fall3D の方が、ディストロメータ観測点における降灰量の検証がやりやすい。また、NetCDF 形式である高解像度気象データをそのままインポートできることもメリットとなる。

一方、Fall3D は、プロセス時間が長いデメリットはある。最近の桜島において発生する小規模噴火であれば、解析対象時間は 1 時間を見込めば十分であり、大規模噴火では解析対象時間を長くする必要があるが、この場合は、グリッド数を減らし

てよい。解析対象時間とグリッド数をチューニングすることにより、最適な条件を決定できる見込みがある。また、小規模噴火と大規模噴火用の Fall3D を並行して稼働させることもできる。

e) 高精細化気象場の抽出手法検討

本計画で検討する連続化された火山灰拡散シミュレータは、3 分おきにシミュレータを起動し解析を行うことを想定している。この時間分解能での時間発展をリアルタイムで計算することのできる風速場は、気象庁の提供する 5km メッシュの MSM データである。本計画におけるオンラインシステムで予測対象とする、小規模な火山噴火における火山灰の分散は、山岳地形に起因する風速場の影響を大きく受ける。そうした影響を考慮するには、MSM の風速場でも解像度が低い。空間方向の解像度がより高い風速場をリアルタイムで計算するのは困難であるため、あらかじめ用意された高解像度の風速場から、現況に最も近いものを選択して計算に使用するのが適切だと考えた。そこで、MSM データの比較結果に基づいて、リアルタイムの風速場に最も近い高解像度の風速場をデータベースから選択する方法を検討した。

i) MSM データから高解像度風速場取得手順

高解像度風速場データは、WRF (Weather Research and Forecasting) モデルのバージョン 4 (Skamarock et al., 2019) を使用して計算されている。ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析データセット (ERA5: 水平分解能 31 km, 鉛直方向 137 層, 時間分解能 1 時間) を初期条件として、高分解能化の計算を行い、鉛直 0.3 km (376×426 点), 時間分解能 20 分, 鉛直方向に 58 層 (地表から海拔 1km までは 50m の格子間隔, 50hPa (海拔約 21km) の領域上端付近では 1km の格子間隔) のデータとなっている。

高解像度風速場を抽出する手順は以下のとおりである。

1. 予測対象時刻における MSM データから、850, 700, 600, 500, 400hPa 面 (それぞれ海拔約 1500, 3000, 4500, 6000, 7500m) での、水平方向に火口近傍 9 地点における東西・南北方向の風速の値を取得し、データ長 90 個のデータセットを用意する。
2. データベースに含まれた参照時刻における同高度・同地点の東西・南北方向の風速の値を取得し、各時刻においてデータ長 90 個のデータセットを用意する。
3. 予測対象時刻と各参照時刻におけるデータセットの RMSE を計算し、RMSE が最小となる参照時刻を求める。
4. 参照時刻における高解像度データを取得し、降灰シミュレーションに代入して予測計算を行う。

ii) 妥当性の検証

この抽出手法の妥当性を評価するために、用意したデータセットを仮想的な参照データベースとリアルタイムデータに分割し、選定を実行した。参照データベースは2018年7月2日12:00から2019年12月30日18:00までの627回の時刻におけるデータで、リアルタイムデータは2018年1月1日9:00から2018年7月2日9:00までの209回の時刻におけるデータである。最小二乗誤差(RMSE)が1.3m/sだった、仮想リアルタイムデータと参照データを図81に示す。MSMによる残差評価により、よく似たWRFデータを抽出することができた。得られた最適解のRMSEは、仮想的なリアルタイムデータの8割以上において3m/s以内となり(図82)、この手法で、あらかじめ用意された参照データベースから高解像度な風速場を抽出する妥当性が示された。

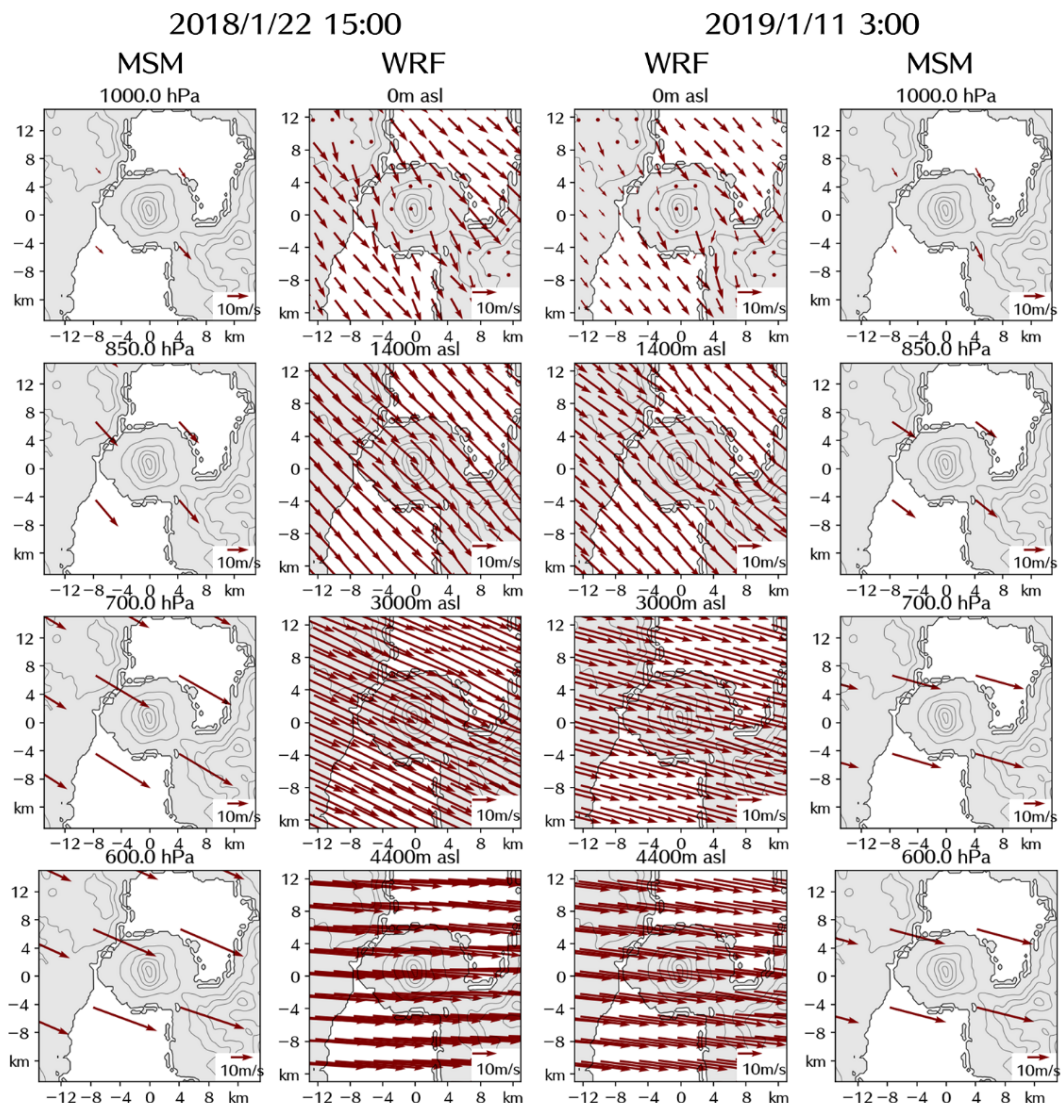


図 81 RMSE が 1.3m/s だった仮想リアルデータと最適参照データとの比較。

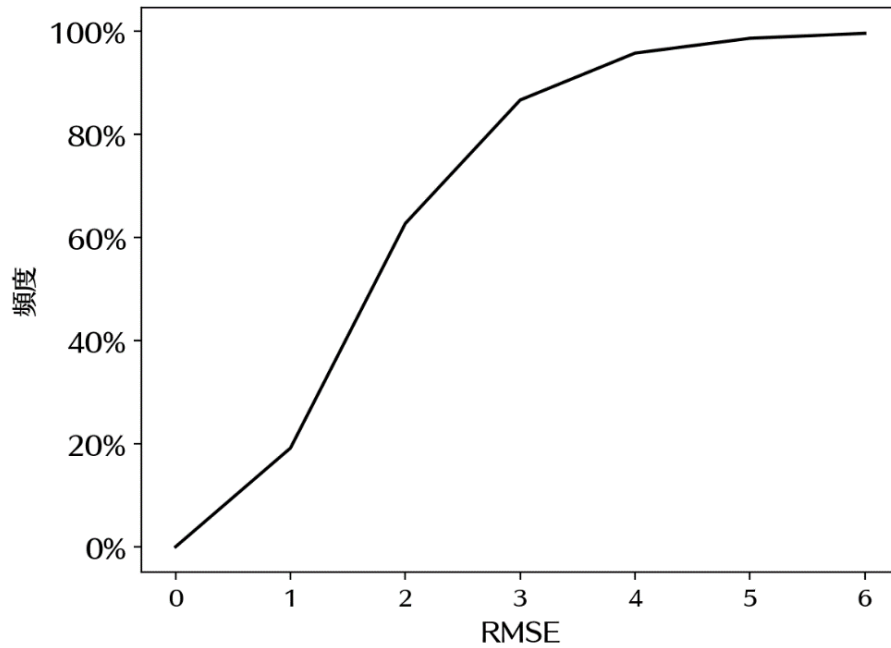


図 82 仮想的なリアルタイムデータに対して求められた最適参照データの RMSE。

(c) 結論

火山灰拡散シミュレーションの連続化のための技術検討により、令和 4 年度にデータのオンライン化をベースとするシミュレーターの連続化の実装の目途が立った。これまで、実施してきたリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、火山灰拡散予測の高速化技術開発、火山灰拡散予測の高精度化技術開発は令和 3 年度の研究により、さらに高度化され、その一部の成果は連続化シミュレータの設定条件とシミュレーション結果の検証に組み込むことができる。

(d) 引用文献

- 1) Shimizu A., Iguchi M., Nakamichi H. (2021) Seasonal Variations of Volcanic Ash and Aerosol Emissions around Sakurajima Detected by Two Lidars. *Atmosphere*, 12 (3), 326.
- 2) Shimizu A., Sugimoto N., Matsui I., Mori I., Nishikawa M., Kido M. (2011) Relationship between Lidar-derived Dust Extinction Coefficients and Mass Concentrations in Japan. *SOLA*, 7A, 1-4.
- 3) 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.
- 4) Ohta, Y., Iguchi, M., Advective diffusion of volcanic plume captured by dense GNSS network around Sakurajima volcano: a case study of the vulcanian

- eruption on July 24, 2012, *Journal: Earth, Planets and Space*, Volume 67:157, DOI: 10.1186/s40623-015-0324-x, 2015.
- 5) Thayer, G. D., An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Sci.*, 9(10), 803-807, doi:10.1029/RS009i010p00803, 1974.
- 6) Bilich, A., Mader, G. L., National Geodetic Survey, GNSS absolute antenna calibration at the National Geodetic Survey, 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR, September 21-24, 2010.
- 7) 真木雅之・鈴木郁子・井口正人・Shakti P.C.: 気象レーダによる降灰量推定—2013年8月18日桜島噴火の Z-RA 関係式—、火山、64, 219-241、2019.
- 8) Maki, M., R. Takaoka, M. Iguchi 2021: Characteristics of particle size distributions of falling volcanic ash measured by optical disdrometers at the Sakurajima volcano, Japan. *Atmosphere* 2021, 12(5), 601; <https://doi.org/10.3390/atmos12050601>.
- 9) 真木雅之・小堀壮彦・西 隆昭・藤吉康志・徳島秀彦・佐藤英一・井口正人・爲栗健: 船舶レーダによる桜島火山の噴煙柱モニタリング、—2018年の観測結果—、京都大学防災研究所年報、63B、136-148、2020.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Chouet, B., Dawson, P. and Arciniega-Ceballos, A., Source mechanisms of Vulcanian degassing at Popocatepetl Volcano, Mexico, determined from waveform inversions of very long period signals, *J. Geophys. Res.*, 110, B07301, doi:10.1029/2004JB003524, 2005.
- 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*, Volume 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*, Volume 11, No. 11, 1240, 2020.
- 15) 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.

- 16) Folch, A., Costa, A., Macedonio, G., Fall3d: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Comput. Geosci.*, Volume 35, pp.1334-1342. doi:10.1016/j.cageo.2008.08.008, 2009.
- 17) Poulidis, A. P., Takemi, T., Iguchi, M., Renfrew, I. A., Orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash: A case study of Mt. Sakurajima, Japan, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Volume 122, pp.9332-9350, 2017.
- 18) Maki, M., Iguchi, M., Maesaka, T., Miwa, T., Tanada, T., Kozono, T., Momotani, T., Yamaji, A., Kakimoto, I., Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke, *Jour. Disast. Res*, Volume 11, pp.15-30, 2016.
- 19) Takishita, K., Poulidis, A-P., Iguchi, M., In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107442, 2021.
- 20) 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.
- 21) Folch, A., Mingari, L., Gutierrez, N., Hanzich, M., Macedonio, G., Costa, A., FALL3D-8.0: a computational model for atmospheric transport and deposition of particles, aerosols and radionuclides - Part 1: Model physics and numerics, *Geosci. Model Dev.*, Volume 13, pp.1431-1458, 2020.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等
別添「学会等発表実績」のとおり。

(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

(2) 令和 4 年度の業務計画案

令和 4 年度は、令和 2 年度から 4 年度までの第 2 期の最終年度に当たる。令和 4 年度は火山灰が連続的に放出される状況に対応するために、火山灰拡散予測を連続稼働させるための業務を実施する。また、プロジェクト研究の将来的な社会実装を目指した自治体の防災担当者向けのセミナーを実施するなど、成果の普及に努力する。

(a) 業務計画、実施方法

業務は、以下の 6 項目について実施する。噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発は令和 5 年度から実施する予定であったが、1 年前倒しして遂行する。

1) プロジェクトの総合推進

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

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてレーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業も併せて行う。これまでに桜島を取り巻くように設置したディストロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量の時間変化を把握する。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したときには火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、X バンド MP レーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例を得ることにより、その経験式の精度を上げる。また、複数台の船舶レーダーによる噴煙柱の観測を実施し、既設レーダーの観測データと比較することにより、噴火ソースパラメータの推定を試みる。降灰量-反射強度関係式を適用して、噴火毎の降灰分布と総降灰量を求める。レーダーデータ解析プログラムを改良する。

これまでに設置した GNSS による噴煙観測を継続する。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、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画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あるいは緊急観測に協力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

桜島北部にある北岳の既設観測井に設置されている地震計について、本研究への活用のために引き上げ及び改修作業を行うとともに、北東の高免から南西の柴立に地震計・傾斜計を移設する。これにより、桜島北部および南西方面の火山性微動振幅も考慮することにより、噴出率推定式を高精度化する。また、諏訪之瀬島やインドネシアのシナブン火山について、火山灰噴出率推定式を桜島以外の火山に拡張するための検討を継続する。

課題 C 3 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

桜島を対象にドローンを用いて上空の風速ベクトルおよび火山灰・火山ガスの計測調査を年間 2 回程度実施する。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む。

気象モデルや流体計算モデルを利用し、高分解能での火山灰の拡散シミュレーションを進める。現地の実測データを取り込むことにより、火山灰拡散や降灰のシミュレーションの予測精度の向上を図る。

火山周囲の気流や形状の影響を受けて変化する火山レキの空力特性を取り込んだレキの飛散モデルを、令和 3 年度に開発した火山周辺の気流予測の計算手法に組み込む。また、住宅の代表的な外装材に対してレキの衝撃試験を行い、建物に衝突した際の破壊性状を明らかにする。これにより、噴石の落下・衝突による被害リスクを評価する。

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

オンラインで取り込んだ観測データを入力条件とする火山灰拡散予測シミュレータの連続化のためのシステムをワークステーションに構築する。FALL3D8.0 をシミュレーションエンジンとして連続化のための改良を行う。時々刻々変化する気象場については、WRF により高精細化した気象場のうちから現況の気象モデルの予測値に最も適合するものを抽出する。小型 X バンド MP レーダー観測による噴煙高度やディスドロメータにより得られた降灰量とシミュレーション結果を照合する。

6) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

桜島における過去の地盤変動データを整理し、火山噴火に前駆する地盤変動継続時間および圧力源の前駆体積変化量と噴火に伴う体積変化量の関係をデータベース化する。このデータベースをもとに、噴火の発生時刻と規模を確率的に予測する手法を開発する。

自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。

(b) 目標とする成果

地震・地盤変動の観測データから得られる火山灰噴出率と高解像度風速場データを参照することにより、火山灰拡散予測シミュレータを連続稼働させ、常時、火山灰予測ができる体制を構築する。また、レーダーデータとディストロメータデータを取り込み、照合できるようにする。

2. 3 サブテーマ3

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「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	機関種別	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	実施機関	センター長	中田節也
		副センター長	藤田英輔
		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
		研究員	西澤達治
		研究員	田中 淳
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
		准教授	関谷直也
		准教授	関谷直也
電力中央研究所	協力機関	主任研究員	上澤真平

(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（令和元年度）：

- ・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した。
- ・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、インフラ関係者を集めた研究会等を実施した。
- ・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した。
- ・離散型降灰データから等層厚線図を自動的に描く作業を行い、伊豆大島火山の降灰災害カーブを作成した。
- ・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った。
- ・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った。

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やアンケート調査を踏まえ、コンテンツの高度化を図る。
- ・インフラ関係各社の防災担当者で大規模降灰の対策について意見交換する。
- ・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、降灰の建物への影響について実験結果とシミュレーションから評価し、コンテンツの高度化を図る。
- ・降灰ハザードの評価の面から、降灰データからの降灰量見積もり及び降灰被害カーブについて検討する。
- ・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。その際、過去に実施した登山者の動態データを可視化するツールを開発するとともに、地元自治体の避難対策などに活用する。

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に着手する。

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 3 年度における成果の目標及び業務の方法

①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。前年度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、前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、昨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あつめた研究会等を実施する。

②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。昨年度は建物のフィルター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。

今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。

③避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

今年度は、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との把握など）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、前年度に引き続き、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、①～③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) 令和3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を解析し、その課題に対応する開発を行なった。すなわち、火山防災対策協議会の資料や富士山麓で行われた火山灰上走行実験の動画、及び、IAVCEI で提供している防災ビデオの日本語ナレーション化した動画などのコンテンツを加え高度化を図った。また、富士山の宝永噴火のような大規模降灰時にインフラ関係会社が必要とする情報や研究者が提供可能な情報などについて意見交換を行った。

②「降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化」においては、前年度までに実施した空調設備や空気フィルターなど建物に対する降灰影響評価実験結果を評価するために、降灰による建築屋などの障害物の降灰影響をシミュレーションで評価した。また、降灰のハザード評価をするために、離散型の降灰観測データから等層厚線図の自動描画化と火山

灰体積の見積もる方法を開発した。この手法による過去の降灰データが揃っている伊豆大島火山について、1500 年間分の等層厚線図を作成し、降灰被害カーブを作成した。

③「避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化」については、那須岳において昨年度実施した登山者動向把握実験結果を GIS 上で表示するシステムを開発し、可視化した動態データを用いて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、本年度も模擬火山岩塊を使用した衝突実験を実施し、耐衝撃性能について評価した。さらに、火山災害時の避難シミュレーションについて、評価する指標ややり方について検討を行なった。

(b) 業務の成果

3 つの情報ツールコンテンツについて本年度得られた成果 1)～3) を順次列挙する。

1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

今年度は、前年度改良したウェブサイトの利活用性について、アンケート調査を行うとともに、継続して実施している北海道駒ヶ岳周辺自治体と有珠山周辺自治体を対象にヒアリング調査を実施した。加えて、今年度は火山災害を経験した宮崎県、宮崎県高原町、熊本県阿蘇市、鹿児島県霧島市、鹿児島県鹿児島市にも火山災害で必要となる情報について、ヒアリング調査を実施し、平時から活用する情報について姶良村、那須町、三宅村、八丈島町に電話による聞き取り調査を実施した。また、前年度のヒアリング調査やアンケート調査から動画コンテンツの充実について、ニーズが高かったことから、今年度も動画コンテンツの充実を図った。また避難確保計画等で利用できる情報のニーズも高かったことから、今年度は避難確保計画を策定するにあたり、参考とする山を探すための情報として、常時観測火山周辺の都市構造について簡易分析を行った。

a) アンケート調査

アンケート調査は、火山防災強化推進都道県連盟¹⁾と火山防災強化市町村ネットワーク²⁾に参加している 23 都道県及び、151 市町村の防災担当者に試作版火山防災総合ポータルサイトの URL (Basic 認証の ID/PW を含む) とアンケート用紙 (又は Google フォームによる回答) をそれぞれの事務局である山梨県及び鹿児島市を通じてメールで実施した。アンケート調査は 2021 年 7 月から 8 月中旬まで行い 109 件の回答を得た。回答は組織ではなく防災担当者個人として依頼した。アンケート調査では、防災担当年数 (通算)、カテゴリー数、情報量、利用しやすさ、避難確保計画や防災計画で利用できるかについて、調査を行った。防災担当年数は、1 年未満 : 18%、1～3 年 : 46%、3～5 年 : 26%、5～8 年 : 6%、8～10 年 : 0%、10 年以上が 4% となり、3 年程度の方が半数以上の回答が得られた。

図 1 に「6 つのカテゴリー (地域防災計画・避難計画、火山現象、災害事例、関係法令、火山災害の体験談、防災講演のための情報) に分類されていますが、カテゴリーの数はどうですか」、図 2 に「ご自身が本ウェブサイトで火山 (現象、災害、防災) について学ぼう

と思った場合、情報量はどうですか?」、図3「ご自身が火山について住民等にお伝えしようと思った場合、情報量はどうですか?」の結果を示す。これら結果から、ウェブサイト全体の情報量はおおむね防災担当者にとって十分な情報量であると考えられる。次に図4に「本ウェブサイトは見やすいですか?」、図5に「本ウェブサイトは必要な情報が探しやすいですか」の利活用性についての結果を示す。この結果から、ウェブサイトの構成や使用性について防災担当者にとって良いものとなっていることが分かる。

実務での利用について、図6に「避難確保計画や防災計画を策定する際、本ウェブサイトは役立ちそうですか」、図7「本ウェブサイトを閲覧してみて、全体的にどう思われましたか?」の回答を示す。この結果から、実務でも利用できることが分かったが、図7の「利用するためには改善が必要」が2番目に高い値となっており、一部の防災担当者が実務で利用するためには改善が必要と感じていることが分かった。一方、実務での必要性について、数年間の経験を得ることにより、必要な情報など具体的にわかってくるため、ここでは例年2, 3年での異動を想定し、それ以降の4年目以上(21件)で改めて集計した。

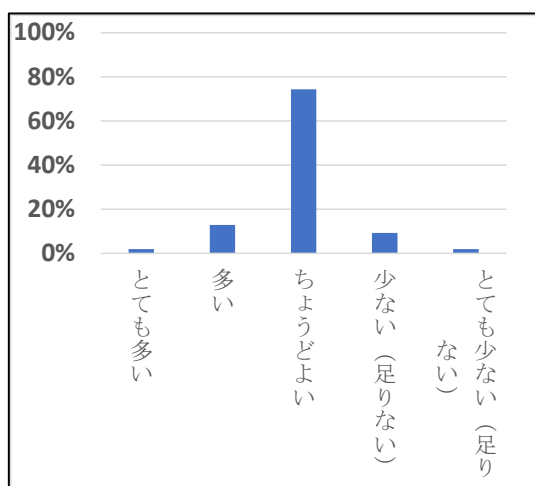


図1 カテゴリー数

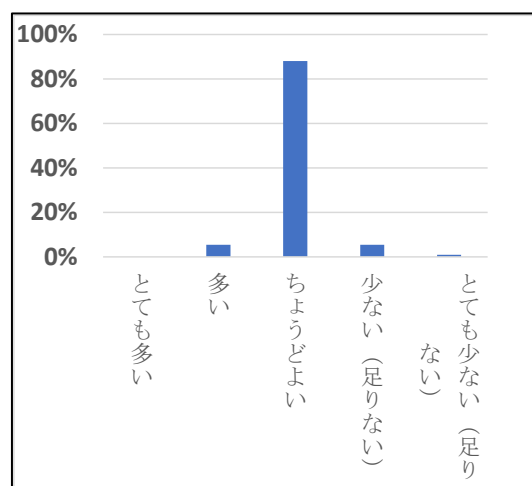


図2 独自の学習のための情報量

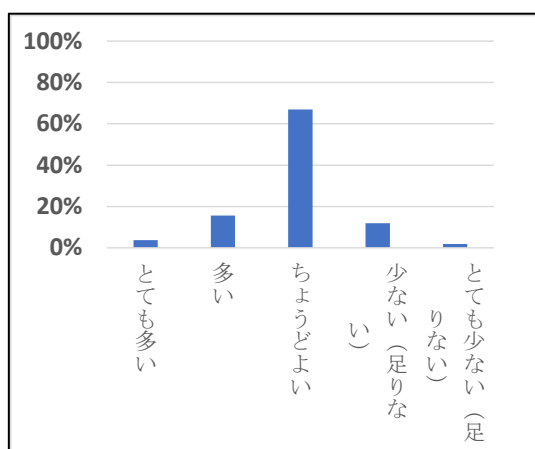


図3 住民に伝える際の情報量

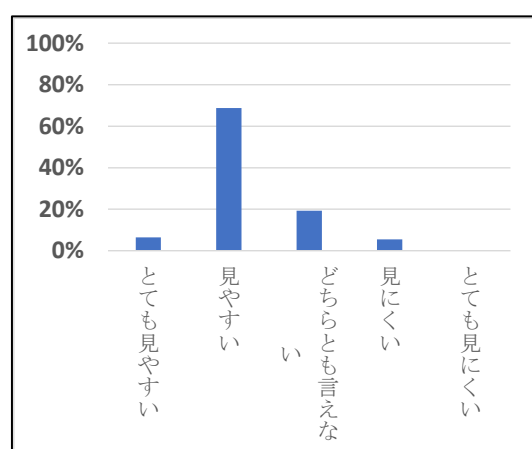


図4 ウェブサイトの見やすさ

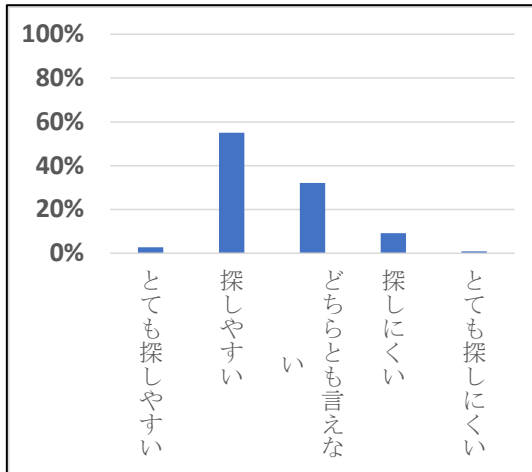


図5 ウェブサイト内の探しやすさ

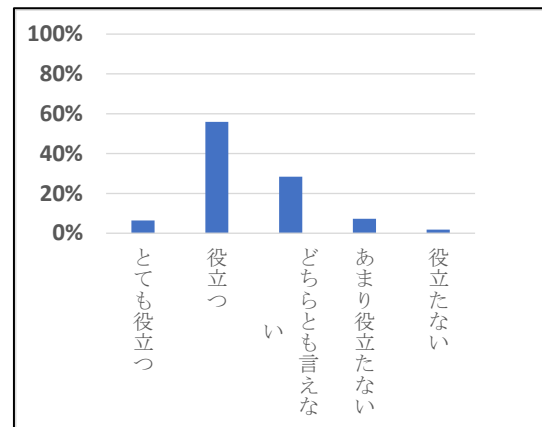


図6 避難確保計画などに役立つか

図8に4年目以上における「避難確保計画や防災計画を策定する際、本ポータルサイトは役立ちそうですか」の結果を示す。図8から、図6では「あまり役に立たない」と「役に立たない」を合わせて2%程度であったが、図8では19%となった。このような結果から実務で活用できるサイトにするためには内容の充実などを図るなどの改善が必要であることが分かった。

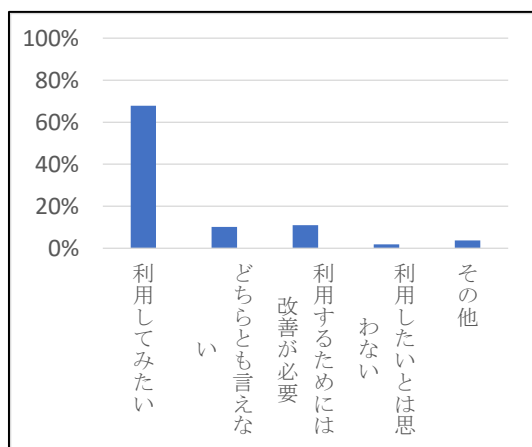


図7 全体的にどう思われましたか

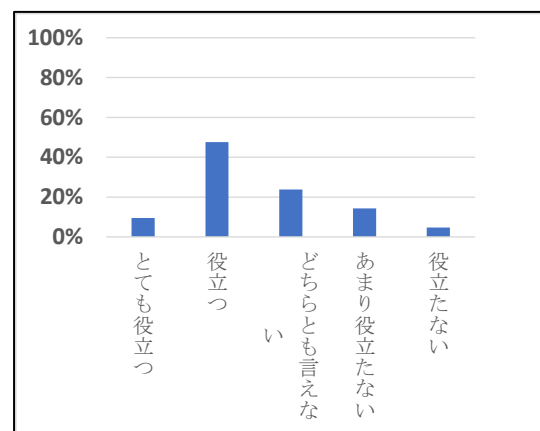


図8 4年以上：避難確保計画などに役立つか

b) ヒアリング調査

ヒアリング調査については、引き続き周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化を行うため、北海道駒ヶ岳周辺の自治体（森町、鹿部町、七飯町、函館市）、及び有珠山周辺の自治体（壮瞥町）の防災担当者に加えて、今年度は宮崎県、宮崎県高原町、鹿児島市、阿蘇市、阿蘇火山博物館にヒアリング調査を行った（写真1）。北海道駒ヶ岳周辺の自治体、宮崎県、及び有珠山周辺の自治体では、火山灰上を車が走行できるかといった情報のニーズや過去の災害対応の資料などのニーズを確認することができた。次に宮崎県と宮崎県高原町では、新燃岳2011年、2017年、2018年噴火の対応などについてヒアリング調査を行った。その結果、火山灰の層厚などに関する情報をGISなどに取り込める形で提供すると宮

崎県の防災システムで利用可能であること、過去の噴火対応などの経験をもとに現在の訓練シナリオを作成していること、火山灰への対応などの情報を得た。また、噴火災害の資料の提供を受けた。鹿児島市では桜島避難訓練にも参加し、島内の避難方法や避難情報の共有方法などについて情報を得た。さらに、阿蘇市と阿蘇火山博物館では阿蘇山 2021 年 10 月の噴火の対応やその時の情報についてヒヤリングするとともに阿蘇火山博物館からは噴火時の映像などの提供を受けた。今回のヒアリング調査では周知啓発教育用コンテンツに必要な情報に加え、降灰被害予測コンテンツに関連する火山灰に関する情報について調査を行った。今回のヒアリング調査から火山災害の訓練を行う際、シナリオ作成は火山災害を対応した経験者が作成していることから、経験者がいない自治体などでは、過去の火山災害のクロノロジー情報などがあるとシナリオ作成に役立つことが分かった。また、火山ガスの臭いが麓で感じられたり、降灰があった際には、健康被害に対する問い合わせが増加することから、健康被害についての情報を必要としていることも分かった。今後、周知啓発教育用コンテンツを改良するにあたり、ヒアリング調査から得られたニーズを追加していく予定である。また、今回のヒアリング調査で得られた資料などは下記に述べるように周知啓発教育用コンテンツに加えていく。



写真 1 2021 年 11 月に実施したヒアリングの様子(左：宮崎県庁、右：熊本県阿蘇市)

次に電話による聞き取り調査として、これまでヒアリングを行う中で火山ごとの情報が必要という意見が得られていたことから、今年度は内陸火山として浅間山について嬭恋村、那須岳について那須町、島嶼火山として三宅島について三宅村、八丈島について八丈町の 4 町村を対象に普段利用している火山に関する情報について調査を行った。今回の調査では事前に周知啓発用コンテンツに掲載する情報案を提示し、その情報に対して過不足などについて直接防災担当者に聞き取りを行った。事前に提示した周知啓発用コンテンツの掲載案について、浅間山の一部を例として表 1 に示す。今回行った 4 町村からは、提示案の内容でおおむねよいという回答を得た。また台風シーズンにおける噴火なども考えている市町村があり、そのため GPV 気象情報の情報もあるとよいという意見が得られた。今後はこの聞き取り調査の結果も参考に周知啓発用コンテンツの更新を行う予定である。

表 1 浅間山における周知啓発用コンテンツの情報案の一部

浅間山火山防災ポータルサイト（案）		
I II III	IV	URL
火山情報		
気象庁		
	火山概要	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/306_Asamayama/306_index.html
	観測点配置図	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/306_Asamayama/306_Obs_points.html
	火山活動解説資料	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly_vact_vol.php?id=306
	浅間山の噴火警戒レベル	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/level/PDF/level_306.pdf
	浅間山の噴火警戒レベル判定基準	https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/level_kijunn/306_level_kijunn.pdf
	浅間山の噴火警戒レベル判定基準の解説	https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/level_kijunn/306_level_kaisetsu.pdf
	浅間山の火山活動状況	https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/activity_info/306.html
	浅間山の火山観測データ	https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/open-data/open-data.php?id=306
	気象庁が噴火警報等で用いる用語集	https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/kazanyougo/mokuji.html
	浅間山 噴火回数表（1868-2019）	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/306_Asamayama/306_er_count.html
	浅間山 火山ガス放出の推移	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/306_Asamayama/306_So2emission.html
	火山ガス予報	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/kouhai/jishin/volgasf.html
	過去に発表した火山に関する情報（浅間山）	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/volinfo/volinfo.php?info=ALL&id=306
	降灰予報の発表状況	http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/kouhai/jishin/ashfall.html
	降灰予報	https://www.jma.go.jp/bosai/map.htm#5/37.979/135/&contents=ashfall
	火山登山者向けの情報提供ページ	http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/activity_info/306.html
	火山への登山のしおり 長野県版	https://www.data.jma.go.jp/nagano/shosai/tozannoshiori/document/1_climbing%20bookmark.pdf
	浅間山 有史以来の火山活動	https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/306_Asamayama/306_history.html
	日本活火山総覧（第4版）（浅間山）	https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/45_Asamayama.pdf
防災科学技術研究所		
JVDN(Japan Volcanological Data Network)		
	マップベース	https://jvdm.bosai.go.jp/app/pages/index.html?root=dataView&lang=ja
	浅間山	https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja/%e6%b5%85%e9%96%93%e5%b1%b1
	火山活動連続観測網 VIVA ver.2	http://vivaweb2.bosai.go.jp/viva/v_index.html
	火山活動連続観測網 VIVA ver.2 浅間山観測データ	https://vivaweb2.bosai.go.jp/viva/v_dataлист_asam.html
	火山ハザードマップデータベース	http://vivaweb2.bosai.go.jp/v-hazard/
国土地理院		
	GNSS	国土地理院による火山周辺地域における地殻変動観測の概況 https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/kazan_index.html
	合成開口レーダによる経過観測	https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/ASAMA/SAR-indexsar_keika.htm
	浅間山火口の航空機SAR画像	https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/ASAMA/SAR-imagesar.htm
	火山災害対策用図	https://saigai.gsi.go.jp/3/20190807asama/asama_taisaku.pdf
	地理院地図	
	火山基本図（基図）	http://maps.gsi.go.jp/?ll=36.407157,138.519809&z=15&base=std&vs=c1j0l0u0#14/36.408539/138.523178/&ls=vbm%7Cvbm_d_bm&blend=0&disp=11&lcd=vbm_d_bm&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m
	火山災害対策用図	https://maps.gsi.go.jp/#14/36.399144/138.522148/&base=std&ls=std%7C20190807asama_kazantaisaku%7C20190807asama_sekisyoku%7Cexperimental_anno&blend=00&disp=1101&lcd=20190807asama_sekisyoku&vs=c0j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m
	干渉SAR 南行	http://maps.gsi.go.jp/?ll=36.407157,138.519809&z=15&base=std&vs=c1j0l0u0#14/36.399696/138.533049/&base=ort&ls=ort%7Curgent_volcano_asamayama_p019_20141028_20201103_u07r_sbass&blend=0&disp=11&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m
	干渉SAR 北行	http://maps.gsi.go.jp/?ll=36.407157,138.519809&z=15&base=std&vs=c1j0l0u0#14/36.399696/138.533049/&base=ort&ls=ort%7Curgent_volcano_asamayama_p126_20150417_20200619_u09r_sbass&blend=00&disp=111&lcd=urgent_volcano_asamayama_p126_20150417_20200619_u09r_sbass&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m
	火山土地条件図	-
産業技術総合研究所		
	浅間山火山地質図	https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/asama/index.html
	鳥瞰図	https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/asama/map/volcmmap0006.html
	解説	https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/asama/text/exp06-1.html
	1万年噴火イベントデータ集 浅間山	https://gbank.gsj.jp/volcano/cgi-bin/volcanic.cgi?id=043
利根川水系砂防事務所		
	浅間山	https://www.ktr.mlit.go.jp/tonesui/tonesui_index011.html

c) 動画コンテンツの充実

動画コンテンツの充実として、これまで自治体の防災担当者に行ってきたヒアリング調査から火山灰対策や火山灰被害による情報のニーズが高かった。そのため、降灰被害を経験した宮崎県高原町の協力を得て、新燃岳 2011 年噴火の際の記録 DVD 映像や降灰被害や噴火の様子の写真などコンテンツとして掲載した（図 9）。



図 9 高原町から提供された動画資料のページ

次に火山防災担当者へのヒアリング調査などからは火山灰対策に関する情報のニーズが高いことがわかる。これは、噴火後には降灰した状況での避難を行う必要があり、降灰した状況での車両走行性能についても自治体防災担当者の関心が高い。そこで、動画コンテンツとして、後述する山梨県が主体となって実施した火山灰走行実験について、その実験結果をまとめて解説した動画を作成し、コンテンツとしてサイトに掲載した（図 10）。



図 10 火山灰走行実験の動画コンテンツ

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については、防災担当者には火山現象を理解するための動画などが必要となることから、火山専門家の視点からスミソニアン（Smithsonian）のウェブサイト（<https://www.si.edu/>）で公開されている火山現象の動画が役立つため、この動画について

今年度いくつかの現象の動画の日本語字幕とナレーションを入れた日本語版を作成し、コンテンツとして閲覧できるようにした（図 11）。



図 11 火山現象の動画コンテンツ

d) 都市構造の簡易分析

前年度ヒアリング調査から防災担当者が避難計画や避難確保計画策定を進めるにあたり、参考にするべき火山の抽出が困難な状態であることが明らかとなった。参考にするべき火山の抽出には、似たような都市構造や地形を持つ火山を分類する必要がある。そこで、似たような都市構造や地形を持つ火山をグルーピングすることを目的として、活火山周辺の都市構造について簡易分析を行った。

活動火山対策特別措置法では、集客施設（ロープウェイ駅、ホテルなど）や要配慮者施設において、避難確保計画を策定する必要があるとしている。そこで、火山噴火が発生した場合、影響がありそうな範囲にある上記施設が策定の対象となる。まず初めに対象施設について今回代表的なものとしてロープウェイ施設、ホテル、福祉施設（特養、養護老人ホーム、障害者支援施設）に加え、病院施設とした。次に範囲については、本来避難確保計画は、火山ハザードマップを基に危険区域内の施設を対象とするが、ここでは簡易的に噴火発生直後に影響の大きい噴石が届く範囲を基に火口から 3 km、6 km と仮定してその中に含まれる施設について GIS を使い、検討を行った。また、住民の避難などを考えた場合、麓の人口規模が影響するため、火口から 3 km、5 km、10 km の人口について国勢調査を用いて検討を行った。

使用したデータは国土数値情報³⁾や e-Stat⁴⁾などから入手した。人口については今回主に山間部などが中心になることから 1 km メッシュデータとし 2015 年国勢調査を用いた。福祉施設については、国土数値情報の福祉施設データ平成 27 年度（石川県については平成 23 年度）を用いた。それ以外のホテルや病院については、基盤地図情報⁵⁾を基に「病院」と名称のあるものを対象とした。活火山の火口位置については気象庁のホームページ⁶⁾を基に常時観測火山の火口位置とした。ここで火口が複数あるケースは、そのどちらかの火口からの数値が大きいほうを採用した。富士山については想定火口の範囲が広く⁷⁾、噴火し

た際の影響などについて複雑でほかの火山との比較が難しいため、今回の検討では除外した。同様に硫黄島については、主に関係者のみ滞在していることからここでは除外した。対象とした火山とその範囲について図 12 に示す。

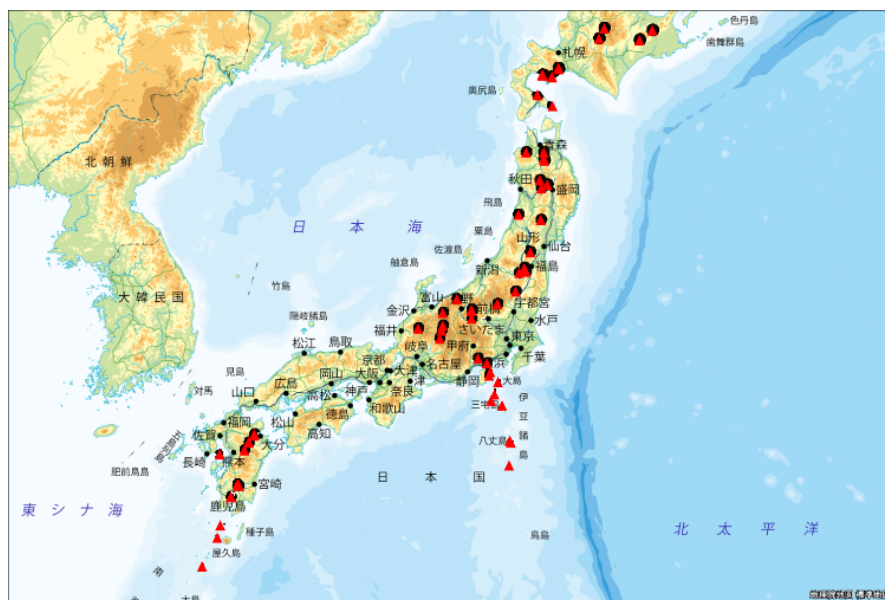


図 12 対象火山とその位置について

前述した内容について、GISを使い調査した結果を表 2 に示す。都市構造のグルーピングについては、火山周辺の環境と人口を基に分類の検討を行った。まず火山周辺の環境については、災害時の避難方法を考え、島嶼部、火口から 10 km 以内に一部に海がある（海近接）、内陸の 3 ケースとした。次に人口については、人口規模によって避難にかかる時間に影響があることから、5km 以内にほとんど人がいない（規模 1）、3 km 以内に 5000 人以上（規模 2）、5 km 以内に 5000 人以上（規模 3）、10 km 以内に 5 万人以上（規模 4）、それ以外（規模 5）の 5 つとした。また複数に該当する場合は危険度を考慮して、規模 3、4 のいずれかを優先して割り与えた。さらに、避難確保計画において、対象が観光客と登山者では基本的な違いがないが、避難確保計画の策定側の視点で考えると対象とする火山を訪れる人の規模が火口から 5 km 以内へのアクセス方法によって影響する。このため、ロープウェイ施設が火口から 3 km 以内にある火山を火口近傍までアクセス可能な火山（観光）とし、それ以外を登山向け火山とした。また、避難確保計画を策定する際に前述の通り、ホテルなどの集客施設の有無も重要になることから、5 km 以内の宿泊施設の数を調査した。要支援者施設としては、病院施設と福祉施設を対象としており、これは避難に時間がかかることから、5 km 以内の施設数を調べ、それら施設の有無についてまとめた。

表 2 の中で、桜島については現在噴火警戒レベル 3 となっており、入山ができないことから、観光指標については検討をしなかった。また、阿蘇山については、2016 年まではロープウェイがあったが、阿蘇山中岳 2016 年噴火でロープウェイ施設が被害を受けて^{x)}現在はないが、有料道路によって火口のすぐ近くまで行くことができるため、「観光」と判断した。

今回は簡易分析として実施したため、今後はこの表でまとめた情報で防災担当者が利用できるかなど、次年度以降のヒアリング調査などを通じて検証を行っていく予定である。

表 2 各火山の都市構造簡易分析結果

火山名	人口			人口規模	地形	病院・福祉施設			観光指標	ロープウェイ	ホテル
	3km	5km	10km				福祉施設	病院			
アトサヌプリ	952	453	300	5	内陸	あり	1	1	登山	なし	3
雌阿寒岳	11	0	1358	1	内陸	なし	0	0	登山	なし	0
大雪山	0	41	251	1	内陸	なし	0	0	観光	あり	1
十勝岳	0	3	0	1	内陸	なし	0	0	登山	なし	2
樽前山	0	0	221	1	内陸	なし	0	0	登山	なし	0
倶多楽	2107	5268	18674	3	海近接	あり	1	3	観光	あり	10
有珠山	1687	9567	30632	3	海近接	あり	3	1	観光	あり	7
北海道駒ヶ岳	0	134	17649	5	海近接	なし	0	0	登山	なし	0
恵山	1122	1200	1525	5	海近接		2	0	登山	なし	0
岩木山	9	1224	8025	5	内陸	なし	0	0	観光	あり	0
八甲田山	14	30	36	1	内陸	なし	0	0	観光	あり	1
十和田	369	67	161	5	内陸	なし	0	0	登山	なし	3
秋田焼山	2	72	77	1	内陸	なし	0	0	登山	なし	0
岩手山	0	151	14764	5	内陸	なし	0	0	登山	なし	1
秋田駒ヶ岳	2	40	6143	5	内陸	なし	0	0	観光	あり	1
鳥海山	0	0	642	1	内陸	なし	0	0	登山	なし	0
栗駒山	24	51	92	1	内陸	なし	0	0	登山	なし	1
蔵王山	0	538	2954	5	内陸	なし	0	0	観光	あり	8
吾妻山	0	537	2123	5	内陸	なし	0	0	登山	なし	9
安達太良山	0	1349	5102	5	内陸	なし	0	0	観光	あり	11
磐梯山	234	6882	11316	5	内陸	あり	1	0	観光	あり	9
那須岳	15	85	6970	1	内陸	なし	0	0	観光	あり	1
日光白根山	0	244	219	5	内陸	なし	0	0	観光	あり	3
草津白根山	346	1678	24420	5	内陸	なし	0	0	観光	あり	12
浅間山	0	296	36678	5	内陸	なし	0	0	登山	なし	1
新湯焼山	0	0	233	1	内陸	なし	0	0	登山	なし	0
弥陀ヶ原	313	0	186	5	内陸	なし	0	0	登山	なし	2
焼岳	33	1075	1626	5	内陸	なし	0	0	登山	なし	13
乗鞍岳	21	662	1114	5	内陸	なし	0	0	登山	なし	6
御嶽山	0	31	890	5	内陸	なし	0	0	観光	あり	1
白山	0	0	0	1	内陸	なし	0	0	登山	なし	1
箱根山	499	8394	53431	4	内陸	あり	1	1	観光	あり	45
伊豆東部火山群	20074	44606	16981	2	海近接	あり	3	2	観光	あり	32
伊豆大島	389	1037	6439	5	島	なし	0	0	登山	なし	2
新島	2149	81	519	5	島	なし	0	0	登山	なし	0
神津島	1891	0	519	5	島	なし	0	0	登山	なし	0
三宅島	1219	422	841	5	島	なし	0	0	登山	なし	0
八丈島	6054	1559	0	4	島	なし	0	0	登山	なし	3
青ヶ島	178			5	島	なし	0	0	登山	なし	0
鶴見岳・伽藍岳	830	21716	122416	4	海近接	あり	9	6	観光	あり	12
九重山	29	354	7872	5	内陸	なし	0	0	登山	なし	11
阿蘇山	36	2213	25368	5	内陸	あり	2	1	観光	あった	1
雲仙岳	912	8949	65693	3	海近接	あり	0	5	登山	なし	5
霧島山	130	90	23033	5	内陸	あり	1	0	登山	なし	0
桜島	647	3273	131287	4	島	あり	0	1	入山不可	なし	0
薩摩硫黄島	130	0	0	5	島	なし	0	0	登山	なし	0
口永良部島	0	0	0	5	島	なし	0	0	登山	なし	0
諏訪之瀬島	73	0		5	島	なし	0	0	登山	なし	0

e) 社会防災分野との連携

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、昨年度の調査データを詳細に分析した。富士山噴火に伴う首都圏での降灰は多くの人々がイメージできているが、具体的な影響については考えられていない点などを分析し、降灰被害予測に関しては、社会的影響に踏み込んだ噴火災害イメージの社会啓発が求められることが明らかになった。そこで、今年度は、社会的影響の検討に進む一步として、ライフライン企業との意見交換会を実施した。加えて、火山防災用映像 VolFilm 日本語版について、テレビ番組制作者の意見を聞く場を設け、ナレーションの読み上げ速度や主語の明示頻度、用語の日常使用との整合性などの面から意見交換をした。また、噴火時にどのような情報に対する社会的需要が発生するのかの参考とするため、新聞記事の内容分析を実施した。このうち、ライフライン企業との意見交換会ならびに噴火災害に関する新聞記事の内容分析を詳述する。

i) ライフライン機関との意見交換

社会に役立つ火山研究の方向を探るうえで、災害時の社会生活に大きな影響を与えるライフライン機関との相互理解を深めるために、富士山噴火災害の概要、ライフライン各社の火山対策の現状と課題ならびに各社が今後防災対策を展開する上で必要となる情報に関する意見交換を行った。

意見交換会は、2021年9月22日にZOOMによるリモートで実施した。ライフライン企業側の参加者は、JR東日本、東京ガス、東京電力、NTT東日本ならびにDocomoの各社の防災担当者計13名であった。火山研究者として防災科学技術研究所から3名、東京大学大学院情報学環から1名参加した。

表3 ライフライン企業との意見交換会に対する事前質問内容

1. 富士山の降灰対策について
1) 予防対策
1-1) 各社が対策を検討している降灰による自社サービスへの影響
1-2) 内閣府が発表している降灰シミュレーションに追加が望まれるデータや様式
1-3) 重要施設やネットワークへの予防対策の可能性と必要となる補足情報やデータ
2) 警報段階での対策
2-1) 営業エリアの活動の制限など警報段階で実施する可能性のある対策
2-2) 警報等について情報提供から現象の発生までに必要な時間的な余裕
2-3) 発生確率、継続時間など警報等に求められる追加情報
3) 応急復旧期の対策
3-1) 噴火に伴う被害発生後の対策ならびに他の災害との対策の異同
3-2) 復旧要員の安全確保のため警報等に求められる時間的な余裕
2. 噴火災害全般について
1) 火砕流や溶岩流、泥流などその他の火山現象で期待する情報
2) 富士山以外で関心のある火山

まず、意見交換会での質疑を効率的に進めるために、予め表 3 に示した富士山の降灰対策の実施状況ならびに火山噴火災害全般に関する質問等を送付し、回答を得た。得られた回答をもとに、火山研究者側から富士山火山災害の特徴と課題ならびに降灰シミュレーション・降灰影響実験について説明した後に、ライフライン機関の防災担当者と火山研究者との意見交換を行った。

意見交換の主な内容は以下の通りであった。

降灰の影響について

- ・富士山の大規模な噴火の前には月単位の先駆現象がありそうなので、ライフライン機関の要員計画等準備は可能と思われる。
- ・噴火の継続時間がライフライン機関として対策をとるうえで重要である。しかし、現状ではひとつの噴火活動の盛衰はある程度分かるが、イベント全体としての終息判断は難しいと考えられる。
- ・海等開放水域の水質汚染等への関心がライフライン機関に高かったが、その影響は少ないと予測される。
- ・降灰下での応急対応要員等の安全確保策の必要性が議論され、火山灰は粒径からみて通常の不織紙マスクで対応可能と考えられるなど具体化が図られた。
- ・ライフライン機関としては、一般需要家が窓を閉め切ることによってCO₂濃度の上昇など安全面の課題も想定していることが指摘された。
- ・復旧戦略としては、降灰による影響は確率的なので、実際に被害が発生した個所に対して復旧を行うというライフライン機関側の基本方針が共有された。

降灰シミュレーションについて

- ・停車してしまうと、相互乗り入れ等他区間にも影響が波及してしまうので、早めのオペレーションが必要である。その観点から、ライフライン機関としては、緊急時のリアルタイム予測はありと有効。
- ・火山研究として、噴煙中の高さがわかれば、量的降灰予測も可能であり即時に情報生産は可能。気象庁も降灰予測をするだろうが、「やや多量」など質的表現の可能性。
- ・降灰シミュレーションの提供は、本プロジェクトで目標としている2 km～5 km メッシュであれば、ライフライン機関側としても自社の設備と対応をつけることができるので、有用である。

降灰実験について

- ・電子機器への影響について、本プロジェクトのPCの動作確認実験結果を紹介した。
- ・ライフライン機関としては、通信に依存する分が大きいとの実情が紹介され、火山研究の中に通信への影響検討している事例やGPSが降灰の影響を受けることがある事例が共有された。
- ・本プロジェクトでの実験は期間的にできないが、通信線への影響や給湯器等のフィルターのない吸気孔をもつ設備への影響など今後の検討事項が示された。

情報共有のための制度

- ・ライフライン機能は相互に依存しており、噴火現象だけではなく需要や規制にも規定される。そのためライフ機能としては地域ごとに、道路の除灰、避難指示の発令、復旧順位など統一的な対応を議論する場が必要であるとの指摘があった。

なお、令和4年度以降においても引き続き議論の場の設定をライフライン機関と検討する。

ii) 海底火山噴火時の報道から見た情報需要

海底火山の噴火が相次ぎ、社会の耳目を集めた。そこで、噴火時にどのような情報に対する社会的需要が発生するのかの参考とするため、2021年フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害ならびに2020年福徳岡ノ場噴火災害時の新聞記事内容を分析した。なお、この結果は、次世代火山研究推進事業令和3年度研究集会にて「海底火山噴火災害と社会について：所感　ーメディアの関心からー」と題し、概要を発表した。

内容分析の対象と方法

分析対象としたのは、朝日新聞デジタルで、以下のキーワードによる検索をかけて該当した記事である。通常の内容分析では、複数紙を対象とすることが多いが、政治関連ではないことから全体像をつかむために1紙とした。2021年フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害については、「トンガ」をキーワードとして、また2020年福徳岡ノ場噴火災害については、「福徳岡ノ場」をキーワードとして検索した。その結果、トンガ海底火山については249件が、また福徳岡ノ場については49件が抽出された。なお、福徳岡ノ場については、より多くの記事を抽出するため「小笠原　噴火」でも検索したが、西之島の噴火が加わっただけで抽出記事数は変わらなかった。

これらの抽出記事を読み、その見出しと内容をグルーピングし、後述するコーディングを行った。対象とした、朝日新聞デジタルの記事は、会員向けと非会員向けに分かれており、非会員向けは記事全文を見ることができる。他方、会員向けは記事によっては、記事の途中まで全文は読めないものも少なくない。このうち本分析で用いたのは非会員一般向けの記事の範囲であり、内容をコードディングしていく上で、見出しのウェイトが高くなる。

コーディング作業として、その第1層として、「噴火現象」、「災害誘因」、「被害」、「対応」ならびに「その他」に分けた。「噴火現象」と「災害誘因」については、『災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）の推進について（建議）』（平成31年1月30日 科学技術・学術審議会）にある「地震・火山噴火という自然現象が引き起こす地震動、津波、火山噴出物、斜面崩壊などの災害誘因が、自然や社会に潜在的に存在する脆弱性などの災害素因に働きかけ、これらの誘因と素因の組み合わせと相互作用の状態に応じて様々な規模の災害が発生する」に従った。第2層以下は、理論モデルに依拠した演繹的コーディングシートは用意せず、特徴的なキーワードを余りまとめずに付与して全体像を把握していくいわば帰納的なアプローチをとった。その意味で、モデルに基づく仮説の妥当性を検証するという仮説検証型ではなく、全体の構造を仮説的に見出すことを目的とした仮説発見型ということになる。

また、通常の量的内容分析では仮説を知らされていない複数者がコーディング作業を行い、その複数者の分類の判断結果の一致率を取る。しかし、本分析では、コーディング作

業は田中が行った。その意味では量の多少から仮説を検証する量的内容分析ではなく、対象とする記事内容の構造を明らかにしようとする質的分析に該当する。

2021 年フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害についての内容分析の結果

2021 年フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害についての結果を表 4-1 と 4-2 に示した。表中の（ ）内の数値は件数で、参考までにその後に典型的な記事の見出しを付した。たとえば、「1. 噴火（29 件）」は、大分類に当たる噴火の現象に関する記事が 29 件であることを示す。次の「発生（2）」は細分類で、「トンガの海底噴火、噴煙は半径 260 キロに広がる」といった発生を伝える記事が 2 件あったことを示す。

2021 年フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害については表 2 に示した通りで、全体で 249 件が抽出された。その中で、大分類では、日本沿岸でも観測された「気象津波」関係の記事が 74 件と最も多く、249 件の 3 割近くを占めた。ついで「被害」が 55 件、「支援」が 51 件と続き、「噴火」は 29 件と 1 割強だった。ただし、気象津波の細分類に「漁業被害」など被害 11 件を含めている。これを大分類の被害に移すと被害が 66 件、気象津波が 63 件となり、被害が最も多くなる。

大分類の「被害」には、被害全般に関する記事が 17 件と多いが、死者 3 名という内容や邦人に被害なしという人的被害関連が合わせて 5 件、トンガで被害をもたらした降灰被害に特化した記事 5 件となる。その中で、通信（12 件）やコロナ感染実態や感染防止など複合災害として注目されている記事（12 件）の多さが注目される。通信は、現地と連絡が難しくなり、被害の全容が把握できないなど初動に大きな影響を与えた。それだけではなく、ガス事業や鉄道事業など他のライフライン機能を維持する上でも重要であり、ライフラインのなかでも電気と並んで基盤となっている。火山噴火災害の被害想定において、通信への影響評価は重要である。

表 4-1 2021 年フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害についての内容分析結果（1）

<u>1. 噴 火 （29 件）</u>
発生（2）：トンガの海底噴火、噴煙は半径 260 キロに広がる
海没（3）：「トンガの火山島、陸地の大部分が消失か」
現象（7）：地球かけ巡る衝撃波、巨大すぎる傘型噴煙
気候（5）：気温下げるガス、放出少なめ 気候への影響、限定的か
将来の噴火（7）：大規模噴火、もし日本で起きたら？
体験談（3）、予知（1）、誤報（1）
<u>2. 気象津波 （74 件）</u>
観測（9）：岩手・久慈で 1.1 メートル 各地で津波観測、トンガ諸島の噴火影響
発生メカニズム（5）：トンガ噴火「気象津波」か 増幅し日本に、海底地形も影響？
漁業被害（9）：種子島で養殖ブリ大量死 トンガ噴火で潮位影響か
トンガ津波被害（4）：津波で被害か、「全住宅が倒壊」の島も
警報発表・解除（4）：奄美・トカラ列島に津波警報、太平洋側広域に注意報
警報見直し（6）：海外での大噴火、「津波調査」周知 気象庁、2 時間以内に
避難実態（8）：深夜のサイレン、よぎった大震災の記憶 「とにかく逃げる」避難所へ
避難課題（11）：未明の津波避難、悩める指示 「寝耳に水」避難者わずか

影響(5)：日本航空が 27 便を欠航 仙台空港や奄美大島、徳之島の発着便

影響共通テスト(7)：追試終え、全日程終了 異例続きの共通テスト

その他(6)：赤と白の「津波フラッグ」知ってますか？

3. 被害 (55 件)

全般(17)：トンガ国会議長「衛星電話つながらない」「手遅れになる前に水を」

降灰(5)：島に積もる火山灰、壊滅的状况も

死者(3)：トンガ政府が初の声明、3 人の死亡確認

邦人(2)：「トンガの邦人約 40 人無事」外務省幹部 現地は衛星携帯でやりとり

通信(12)：海底ケーブルに地滑りか「復旧に 3 週間」

複合コロナ(12)：トンガで 5 人感染、ロックダウン 帰国者以外で初

その他(4)：噴火の夜、トンガで流れたラブソング 人々の心つないだ地元ラジオ局

気象津波に含まれる細分類の中で、最も多かったのは津波避難の実態や課題への言及で、19 件となる。今回の気象津波に関して警報・注意報が発表されたが、発表状況や課題、気象庁の見直しなど合わせて 10 件見られる。このほか気象津波がもたらした種々の社会的影響も多い。航空機等の影響 5 件に加えて、共通テストへの影響が 7 件と多く伝えられている。

発生メカニズムに関しては気象津波という災害誘因がその現象の珍しさもあってか、記事数は 5 件あった。ただし、全体的にみると、気象津波によってもたらされた被害や影響、避難への関心が高いという傾向は顕著である。

表 4-2 2021 年フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害についての内容分析結果(2)

4. 支援 (51 件)

海外(21)：NZ・豪、トンガ支援へ哨戒機派遣

日本(14)：トンガ支援で海自輸送艦「おおすみ」出港へ 飲料水や高圧洗浄機など

ラグビー関係(10)：ラグビーの縁 トンガへ支援金

その他(6)：活火山ふもとの町、ふるさと納税からトンガ支援 「お互い様の精神」

5. その他 (40 件)

カボチャ(7)：カボチャにそろばん、実は深い日本とのゆかり 火山噴火のトンガ

北京五輪(5)：米領サモアの旗手、寒さに負けずテカテカで行進

皇室(3)：皇室とトンガ、深い縁 両陛下が訪問

ラグビー(3)：神戸 4 T、今季初白星

心配(7)：「津波が来る」途切れた電話 トンガ出身マへさん、釜石で故郷案じる

俳句・川柳(6)：論壇委員が選ぶ今月の 3 点

災害リスク(2)：トンガの災害リスクは世界 2 位？

その他(7)：「人知で計り知れないのは一緒」 震災被災地で噴火災害を振り返る

同様に、「噴火」現象に関わる記事は 29 件と多くはない。細分類で見ると、「発生」を伝える記事 2 件、海没を伝える記事 3 件となっている。比較的多いのが巨大な噴煙中など噴

火で生じた「現象」の記事が7件であるが、大規模噴火であることから「気候」への影響に特化した記事も5件ある。早い段階で気候に与える影響は限定的という評価が伝えられた。また日本近海での大規模な海底噴火の可能性も含む、将来の噴火について7件あった。予知に分類した記事は、直前の小規模噴火が前触れだったのかどうかの判断に関するもので、誤報は、「トンガで再噴火」という記事が取り消されたものだった。

大分類「支援」は、諸外国が実施した支援21件と日本が行った支援14件が中心となっている。ラグビーがつなぐトンガと日本との関係に基づく民間支援も10件と多い。大分類「その他」として分類した多くは、トンガと日本との関係を描くことで、身近な国で起きた災害であることを示そうという試みと読み取れる。ラグビーのほか、北京五輪の開会式、カボチャの結ぶ縁などの切り口から描かれている。また、俳句・川柳の欄に投稿された句にもトンガでの海底噴火が読み込まれるほど、広く社会の関心を集めたと言える。

以上の結果をまとめつつ、フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害を伝える記事を見ると、被害への関心とその被害をもたらした災害誘因である気象津波への関心が高い。もちろん、今回の事例では、前述の通り、全球的な気候への影響について、火山専門家より早めにその恐れが低いことが情報発信された。このため、気象津波に集中する結果となったのであり、次回には気候への影響が大きくなる可能性はある。いずれにせよ、メディアの関心は、実際に顕在化した被害に向けられる実態があること、また共通テスト等社会に注目される社会活動に対する影響が大きく伝えられていることが示唆される。このことは、噴火時期によってあらゆる社会活動に影響が生じる可能性があり、その影響評価はある程度事前になさしておく必要があることになる。

2020年福徳岡ノ場噴火災害についての内容分析の結果

2020年福徳岡ノ場噴火災害についての結果を表5に示した。ここでも表中の()内の数値は件数を意味し、また典型的な記事の見出しを例示した。福徳岡ノ場での噴火事例については、49件が抽出された。

表5 2020年福徳岡ノ場噴火災害についての内容分析結果

1. 噴 火 (11件)
海没(3): 福徳岡ノ場の新島が海没 朝日新聞社機が確認
観測(4): 大量の軽石の原因、海底火山を観測
予測(2): 絶海の「現れては消える島」 今回どうなる?
解説(2): (ののちゃんのDO科学) 海の中にも火山があるの?
2. 軽 石 (34件)
観測(2): 軽石、三宅島沖にも 朝日新聞社機で確認
予測(3): 軽石、今後どうなる? 気泡に水入れば沈むが…
漂流シミュレーション(4): 軽石、沖縄漂着後は本州接近か スパコンで予測
被害全般(2): (社説) 軽石の漂着 被害の拡大に備えよ
漁業・観光被害(11): 大量の軽石で漁船750隻が出漁できず 魚の大量死も
対策(3): 軽石防げ、港にフェンス 神津・御蔵島、本格的漂着に備え
影響—選挙(2): 軽石、選挙へ影響懸念 沖縄、撤去作業を開始
影響—停電(4): 軽石「島全体が停電危機」 鹿児島・与論、タンカー接岸できず

影響－辺野古工事(2)：辺野古工事、軽石漂着で中断

原発(1)：原発への影響は？規制委は注意呼びかけ

3. その他 (4件)

10 大ニュース(1)、天声人語(1)、論説 (2)

表5に示した通り、大分類「1. 噴火」が11件であるのに対して、災害誘因にあたる「2. 軽石」は34件と約7割を占めた。

大分類「噴火」では、海上保安庁の観測結果や航空機からの観察などが含まれる細分類「観測」が4件、新島が「海没」したことを伝える記事が3件、解説としたのは、「福岡ノ場、地下のマグマに別のマグマが流入か 大規模噴火の要因に」という一般記事と「(のちゃんのDO科学)海の中にも火山があるの？」という子供向け解説記事の2件である。予測には「都心から1300キロ 絶海の「現れては消える島」 今回どうなる？」を予測した記事が2件であった。

観測や予測は、噴火そのものよりも災害誘因とみなした大分類「軽石」でも、たとえば「軽石、今後どうなる？ 気泡に水入れば沈むが」など多く取り上げられた。中でも漂流シミュレーションは「軽石、沖縄漂着後は本州接近か スパコンで予測」など4件が掲載されている。この軽石に関しては、直接的な被害をもたらした、社会の耳目を集めたからである。被害としては被害全般を伝える2件に加え、「大量の軽石で漁船750隻が出漁できず魚の大量死も」など漁業や観光への被害が11件と最多であった。

このほか、軽石が燃料補給を妨げて「島全体が停電する危険性も」「噴火でできた大量軽石、影響が拡大」といった細分類「停電」が4件、「原発」への影響が1件、「辺野古工事、軽石漂着で中断」といった辺野古工事への影響を伝える記事が2件など、社会的影響も多く取り上げられていた。この中で原発は「漂流する軽石、原発への影響は？冷却に海水、規制委は注意呼びかけ」と規制庁発の注意呼びかけを紹介している。なお、分類上は「被害全般」に入れた記事の一部でも同様の注意呼びかけを伝えている。

なお、これらを災害誘因ではなく、大分類「被害」として独立させることも可能であるが、フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害では、気象津波という特定の災害誘因による被害を「災害誘因」と分類したことで整合させるために「災害誘因」に分類した。かりに大分類「被害」とすれば、「被害全般」以降25件が「被害」となり、災害誘因「軽石」は9件となる。ただし、いずれにせよ、被害をもたらした災害誘因の直接的被害や社会的影響が多いという本質は変わらない。

なお、大分類「その他」には「今年もいろいろあった科学ニュース」の中にノーベル賞や変異株と並んで、この他論説の中で、東京23区で震度5強の直下型の地震などとともに、今回の福岡ノ場での噴火を取り上げている。

福岡ノ場噴火事例の記事傾向を全体的にみれば、災害誘因にあたる「軽石」関連の記事が最多であり、漁業被害など実際の被害が詳しく取り上げられている。ただし、辺野古の工事への影響や原発への影響に関する記事が掲載されている点にも留意が必要であろう。

海底噴火災害についての内容分析のまとめ

以上のように、社会的関心をマスメディアの掲載記事からみてきた。火山噴火時には、火山研究コミュニティが対応に迫られる可能性のある論点と言える。今回の両事例ともに、

被害への関心とその被害をもたらした災害誘因である気象津波と軽石への関心が高い。このことは、メディアの関心は、実際に顕在化した被害に向けられる実態があることを示唆する。将来の噴火災害時においても、被害とその原因となる災害誘因に関する報道が志向される可能性がある。なかでも被害としては、人的被害が最も注目されるが、今回の両事例からみると、多くの人に波及する被害や社会的影響が取り上げられている。

そのひとつが、通信障害や停電である。通信障害や停電は波及効果が大きいことから噴火以外の他の災害時にも大きく伝えられる。火山噴火に伴う被害想定においては、通信と電力に対する影響と通信障害や停電に伴う社会的波及を評価しておく必要があると言えよう。もうひとつ、社会的影響の中として辺野古工事や共通テストへの影響が取り上げられていた。辺野古工事など特定の地域でのみ生じるものの、大きな政治的な論点に関する影響や共通テストなどのように時期は限定されるが全国的に関心の高いイベントへの留意が求められる。

このように社会に注目される社会活動に対する影響が大きく伝えられことは、今回の両事例ともに国内での人的被害がなかったため、相対的に大きく伝えられたという側面もある。しかし、噴火災害による被害や社会的影響ならびにそれらと結びつく噴火現象に高い関心が寄せられたこともまた事実であろう。火山によって、噴火時期によって、あらゆる社会活動に想定外の影響が生じる可能性がある。種々の業界や業態での被害や影響を、より広い主体との連携のもと、解明していくことが求められる。

2) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

a) 降灰に関する数値計算による検討

過年度実施した空調室外機や冷却塔の降灰影響実験では、一様な降灰状況や火山灰粒子に慣性力が働かないという理想化した条件で、機器の動作に影響を与える降灰深が評価された。実際には、降灰中の火山灰粒子には慣性力が働くため、空調機による火山灰吸引量に影響する可能性がある（図 13）。今年度は、冷却塔をモデル化し慣性力を考慮した数値計算によって、吸込量と降灰深との関係の再評価を行った。さらに、吸気口へのフード状の簡易カバーについて、火山灰侵入軽減対策としての設置の効果の有無についても調べた。

空調室外機は建物の屋上や側壁などに置かれるが、機器近傍での降灰状況は、実際には建物により変動を受けた風の影響を受ける（図 14）。空調機への火山灰侵入は水平方向の吸気気流によって起こるので、浮遊火山灰の空間濃度が重要であるが、ここでは、単純形状の建物を想定し、降灰への建物影響について慣性力を考慮した降灰計算によって調べた。

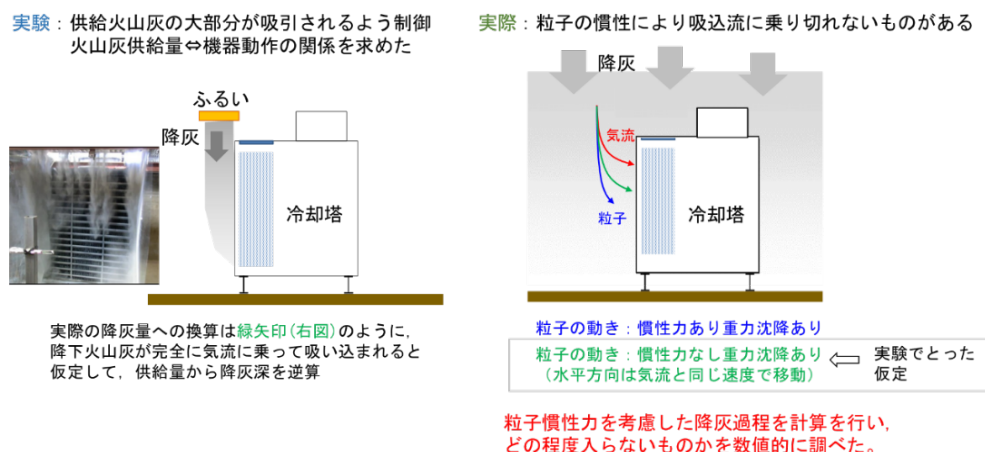


図 13 実験と実際の降灰

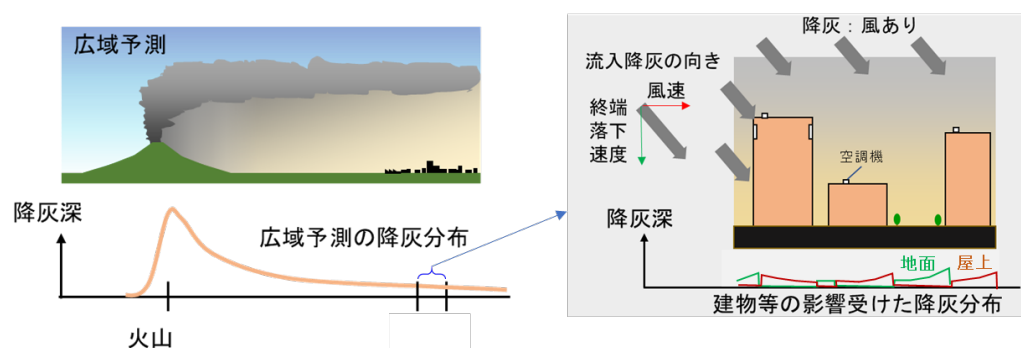


図 14 広域の降灰と建物近くの狭い範囲の降灰

i) 火山灰の空調機への吸引量の再評価

図に計算領域と冷却塔のモデル化、実験に用いた冷却塔の写真を示す。冷却塔のモデルは、実験に用いたものに合わせた寸法とした。中央の図の薄青のハッチの箇所が吸気口である。計算領域は1辺10mの立方体とした。

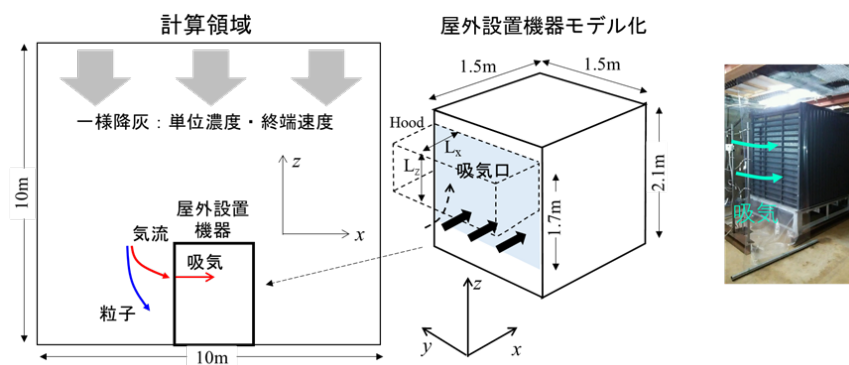


図 15 計算領域（左）、冷却塔モデル化（中）、実験に用いた冷却塔（右）

冷却塔の吸気気流を図に示す。吸い込み力の影響は、吸気口からだいたい1m程度の範囲内で有意と認められ、およそこの範囲の粒子が吸引力の影響を受けるとみられる。

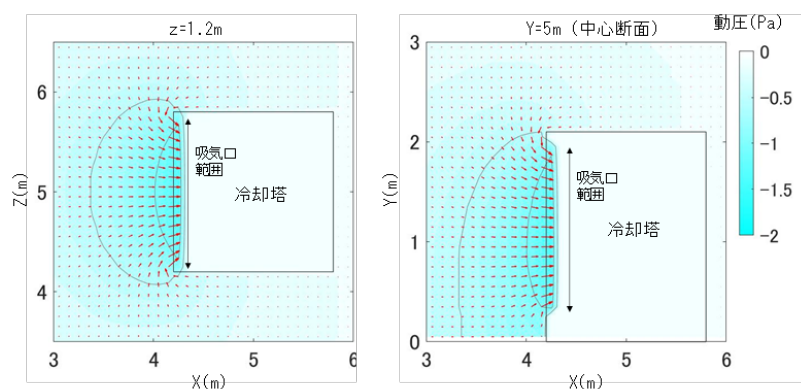


図 16 冷却塔の吸気による動圧(コンター)および気流(ベクトル, 1格子化間隔が1.5m/s)

実験における火山灰吸引を模擬した計算結果を図に示す。厳密な比較検証ではないが、吸引量は実験と対応しており、目安として計算は妥当な範囲にあると考えられる。

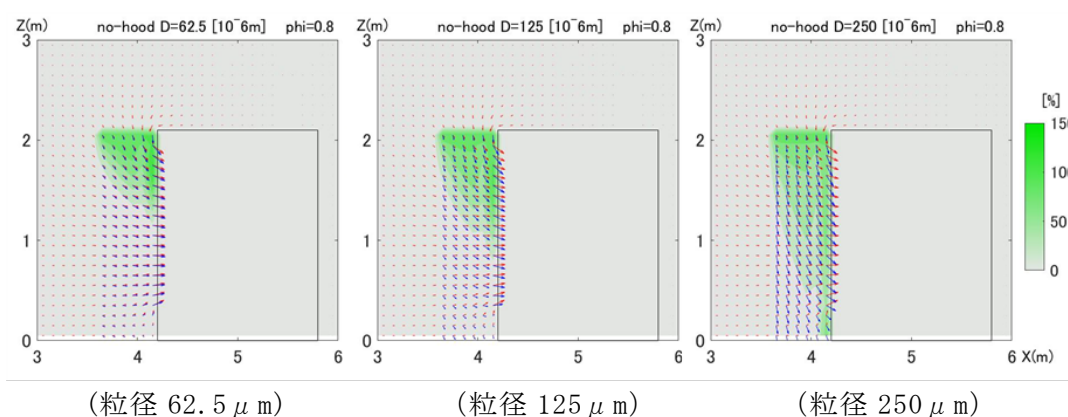


図 17 冷却塔実験に相当する条件での計算結果

冷却塔の中心断面における気流ベクトル（赤）、火山灰粒子ベクトル（青）、浮遊火山灰無次元濃度（緑色のコンター）を図に示す。無次元濃度は、計算領域上端から終端速度で落下してくる単位濃度の火山灰に対する相対濃度を表している。図には、粒径 $62.5 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ 、 $500 \mu\text{m}$ が示されている。 $62.5 \mu\text{m}$ の粒子は気流によく追従しているが、粒径が大きくなると、粒子の速度と気流の速度の差が急速に大きくなるのがわかる。

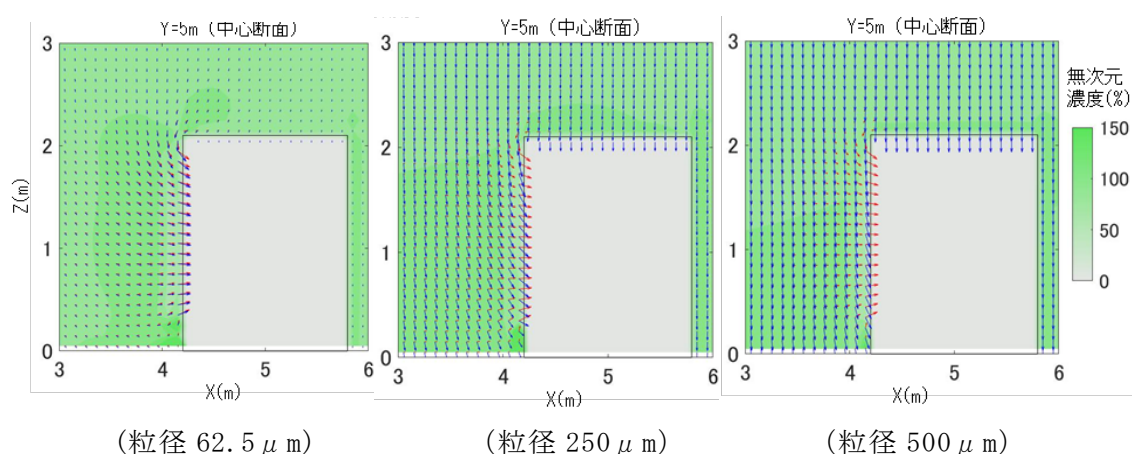


図 18 気流速度ベクトル（赤）、粒子速度ベクトル（青）火山灰無次元濃度分布冷却塔中心を通る断面図。

空調吸気口への火山灰吸引量について、粒子の慣性力を考慮した場合の、考慮しない場合に対する比率 α を求めた。結果を図に示す。慣性力を考慮では、しない場合と比べ全ての粒径について比率 α は 1 よりも有意に小さい。球形度は、粒子の表面積に対する粒子と同じ体積を持つ球の表面積の比率で球は 1、火山灰は 0.8 前後が多いとされる。いずれの球形度でも比率 α は単調に減少しており、同じ粒径では、球形度が大きいほど（球に近いほど）比率が小さい。過年度の実験で慣性力を考慮せず見積られた降灰深さは過少に評価された可能性があり、機器に影響を与える降灰深がもう少し大きい可能性が示唆される。

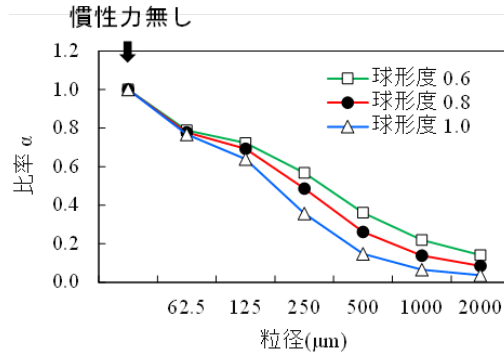


図 19 火山灰吸引量の慣性力を考慮しない場合に対する比率．粒径および球形度による違いを示す．

フード状の簡易カバー設置の効果について検討した。図の吸気口に書かれた破線のような矩形の簡易的なもので、吸気口の前面直上に取り付けられる。全く任意的であるが、図 15 の L_x 、 L_z の組合せとして、 $(L_x, L_z) = A(400\text{mm}, 400\text{mm})$ 、 $B(400\text{mm}, 800\text{mm})$ 、 $C(800\text{mm}, 400\text{mm})$ の A、B、C の 3 タイプを考えた。こうした対策に関する検討を行う理由としては、火山灰吸引量を減少できれば影響が出るのを遅らせることができ、場合によっては被害を回避できる可能性もある。さらに、噴火災害は低頻度の災害であるため、特別にしつらえられた装置でなくとも、簡便なもので一定の効果が得られるのであれば、対策として広く実施される可能性が高いと考えられるからである。

フード状カバーを設置した場合の無次元濃度、気流および粒子の速度ベクトルを、粒径 $250\text{ }\mu\text{m}$ について図に示す。カバーの設置により吸気口前面の火山灰濃度が、部分的なものもあるにせよ全てのケースで減少している。いずれのタイプでも粒径が大きくなるにつれ、フード下の低濃度の範囲が急速に増加した。フードのタイプ別では、タイプ C が低濃度の範囲が最も広い。

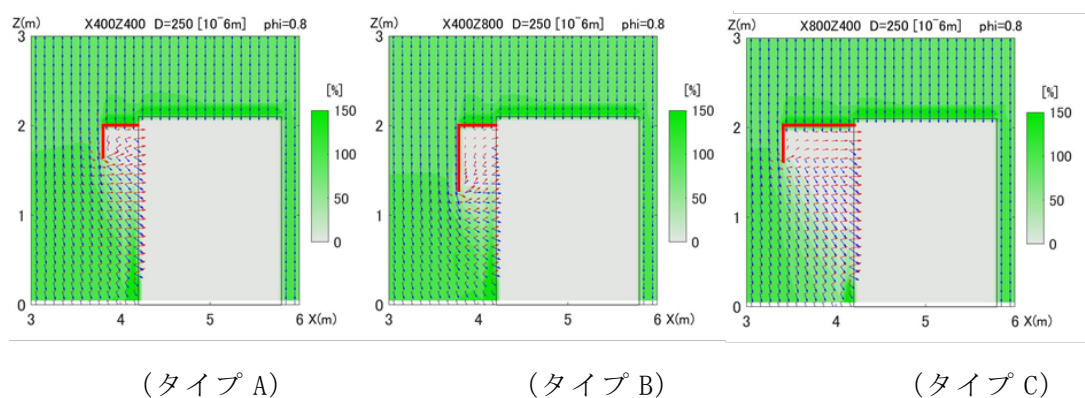


図 20 フード状簡易カバーがある場合の気流速度ベクトル（赤）、粒子速度ベクトル（青）および火山灰無次元濃度分布．冷却塔中心を通る断面内．左から順にフードタイプ A、B、C．粒径 $250\text{ }\mu\text{m}$ ．球形度 0.8.

フード状カバーの有無およびタイプの違いによる慣性力なしフード無しに対する火山灰吸引量の比率 α を図に示す。いずれの球形度でもタイプ A、B、C の順に小さくなるフード状カバーは火山灰の空調機器への侵入抑制に一定の効果があることがわかった。

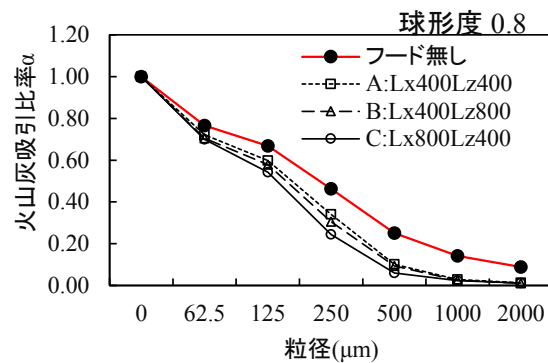


図 21 慣性力無しの場合に対する，粒子球形度，フード状カバーの有無およびタイプによる吸引口への火山灰吸引比率．球形度 0.8．横軸の 0 は慣性力なしの場合を表している。

ii) 降灰への建物影響（単純形状・単体建物）

ここでは、数値計算によって降灰への建物影響について検討する。特に、空調への影響において重要な火山灰の空間濃度および建物および周辺の降灰深に着目する。空調機器が実験での仮定のように一様な降灰の中で水平面上に置かれた場合と比べ、建物影響がある場合、どの程度の幅があるのかを調べる。複数の建物がある場合については、令和 4 年度の作業において引き続き検討する。

計算に用いた建物モデルを図エラー！ 参照元が見つかりません。（右）に示す。比較的多く見られる 6～7 階建て程度の大きさの建物とした。屋上の北東の隅には塔屋を設けた。気流の風速は地上高度についての指数 0.2 の指数関数に従うとした。流入気流は地上 10m で 2.5、5.0、7.5m/s とした。

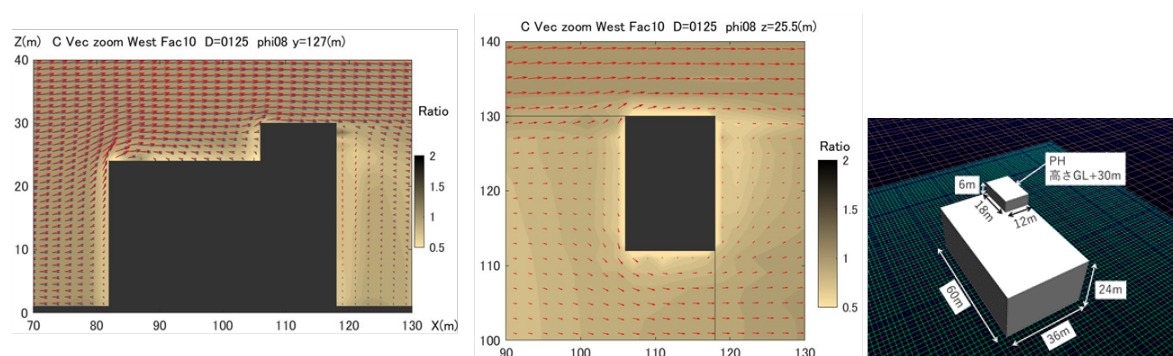
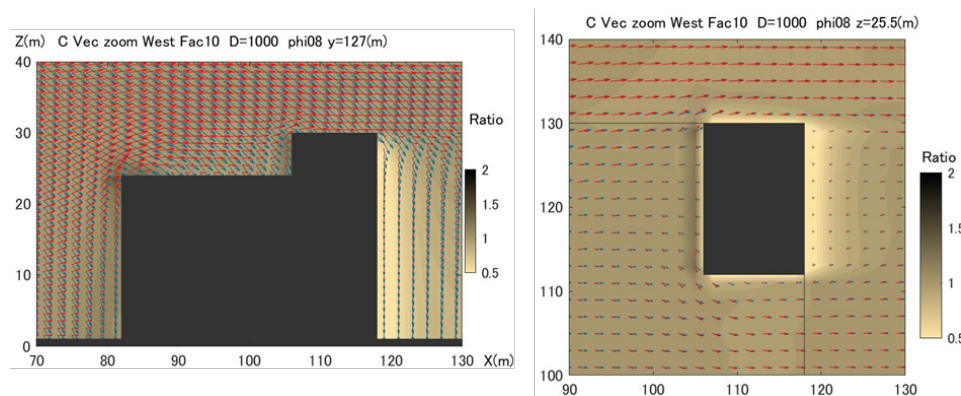


図 22 気流、粒子の速度ベクトルおよび火山灰の無次元濃度分布．赤は気流ベクトル、青緑は粒子ベクトル．塔屋中心を通る東西一鉛直断面（左）、屋上 1.5m 高度の水平断面（中）無次元濃度の定義は本文参照．粒径 125 μ m．右端は建物モデル．

本研究での降灰計算の特徴を示すため、粒径 $125\ \mu\text{m}$ 、 $1000\ \mu\text{m}$ について、気流と粒子のベクトルを図に示す。赤い矢印が気流ベクトル、青緑矢印が火山灰粒子ベクトルである。粒径 $125\ \mu\text{m}$ では、比較的気流とあった運動をしている。粒径 $1000\ \mu\text{m}$ では、気流と粒子速度との差が目立つ。慣性力を考慮した計算の特徴的な面である。



図（続き） 粒径 $1000\ \mu\text{m}$

粒径による火山灰濃度の違いを西風、東風の両方について示す。図は、無次元濃度で、粒径 125 、 $2000\ \mu\text{m}$ についてである。粒径が小さいと建物を避ける傾向がある。粒径が大きくなるにつれ、風上側前面の濃度が 1.0 より大きくなり、同時に風下側の壁面近傍の濃度は減少、低濃度の範囲が狭くなる。建物風上側と風下側の濃度差が大きくなっていく。

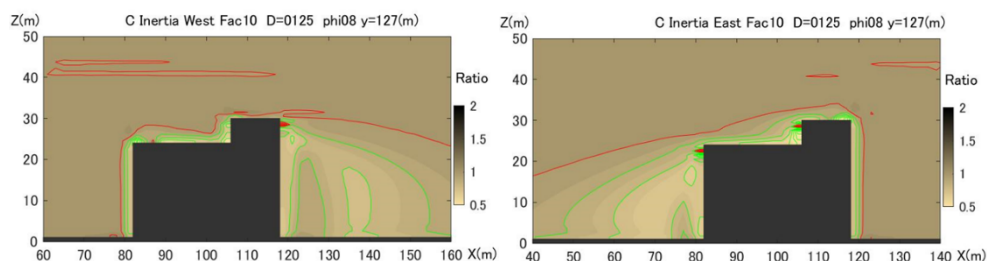
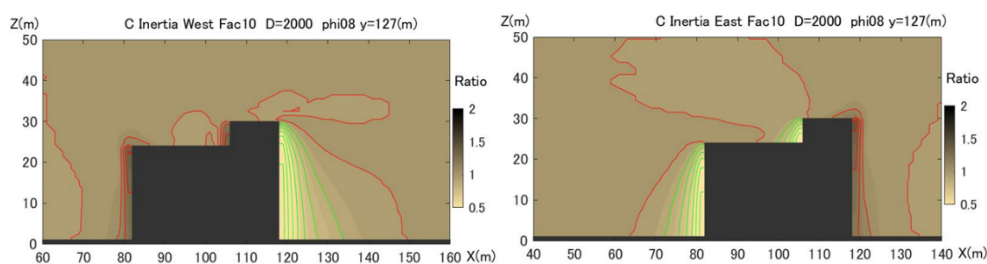


図 23 粒径および風向による浮遊火山灰無次元濃度の比較。塔屋中心を通る東西一鉛直断面。無次元濃度の等値線は間隔が 0.1 で、 1.0 以上は赤、 1.0 未満は緑。風速 5m/s 、西風（左）、東風（右）、粒径 $125\ \mu\text{m}$ 。



図（続き） 粒径 $2000\ \mu\text{m}$

図に屋根及び地面の無次元降灰深分布（水平一様な降灰に対する相対値）を西風、東風について示す。等値線は間隔が 0.1 で、1.0 以上は赤、1.0 未満は緑である。塔屋の西側（図の左が西）では、粒径が小さいと西風、東風ともに 1.0 以下であるが、粒子が大きいと西風の場合は 1.0 以上で、東風では 1.0 以下という差ははっきりしている。地面では、風下側には降灰深が相対的に少ない範囲が風下に伸びている。大きな粒子になると、建物風上側での火山灰の堆積が多くなっている。

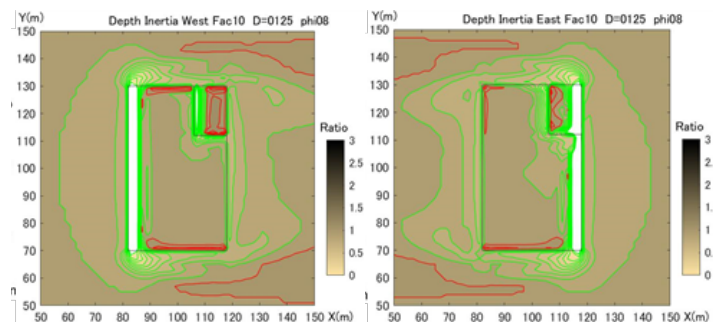
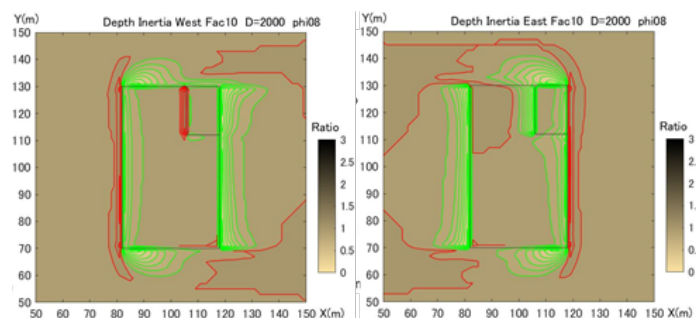


図 24 屋上および地面の無次元降灰深分布．等値線は間隔が 0.1 で、1.0 以上は赤、1.0 未満は緑である。風速 5m/s、西風（左）、東風（右）、粒径 125 μ m.



図（続き） 粒径 2000 μ m

慣性力の有無による浮遊火山灰空間濃度比較を西風について図に示す。慣性力考慮の有無の比較を粒径 62.5 μ m と 2000 μ m について示す。粒径 62.5 μ m では、慣性力の有無による違いは小さいが、2000 μ m では差が顕著で、慣性力考慮の方が風上側、風下側の濃度分布の非対称性がはっきりしている。降灰深についても同様であった。

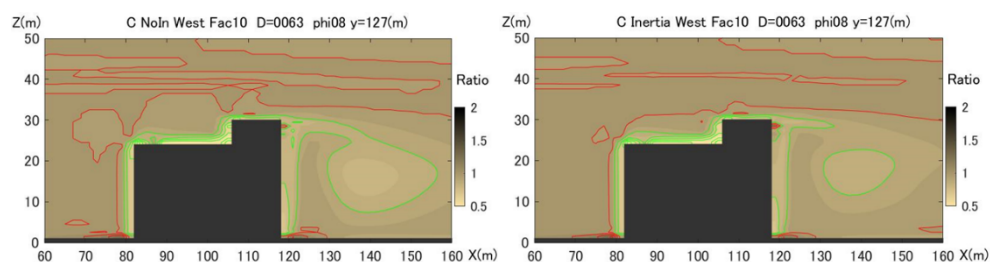


図 25 慣性力考慮の有無の比較．塔屋中心における浮遊火山灰の無次元濃度の東西－鉛直断面、慣性力無し（左）、慣性力あり（右）．西風 5m/s、粒径 62.5 μ m

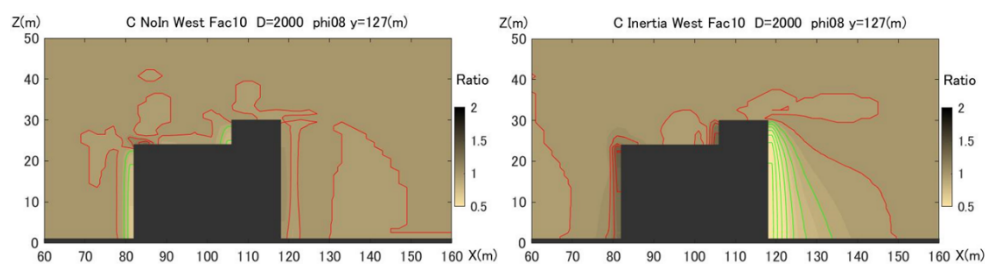


図 (続き) 粒径 $2000\ \mu\text{m}$

風速の違いによる降灰状況の違いについて示す。風速は、流入気流で地上高度 10m での風速が 2.5m/s 、 5.0m/s および 7.5m/s の 3 段階、粒径は $125\ \mu\text{m}$ 、 $2000\ \mu\text{m}$ である。西風について示す。

図は火山灰無次元濃度である。風速が大きくなるにつれ、建物風下側の後流域の低濃度の領域が風下向きに広がっている。風上側では、風速の増加による建物や塔屋風上側の火山灰濃度の増加が認められる。

図は屋根および地面の降灰深分布である。屋根上では、いずれの粒径でも、火山灰堆積の範囲が風速の増加に伴って全体として風下側にずれる傾向が見られる。また、建物風下側の地面では、降灰が相対的に少ない範囲が風速の増加とともに風下側に拡大している。図示しないが粒径 $2000\ \mu\text{m}$ では、風速の増加による風上側の建物近くの地面や塔屋前面の屋上での降灰深の増加が見られる。

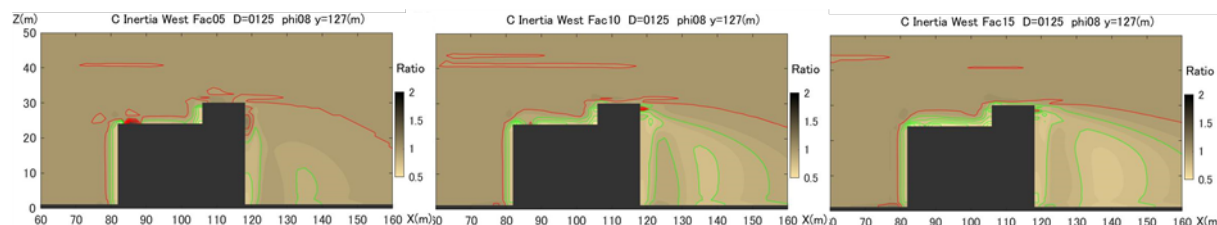


図 26 風速による浮遊火山灰の無次元濃度の分布の違い。塔屋中心を通る東西一鉛直断面内の分布を示す。風は西風で風速は 2.5m/s (左), 5.0m/s (中), 7.5m/s (右)。粒径は $125\ \mu\text{m}$ 。

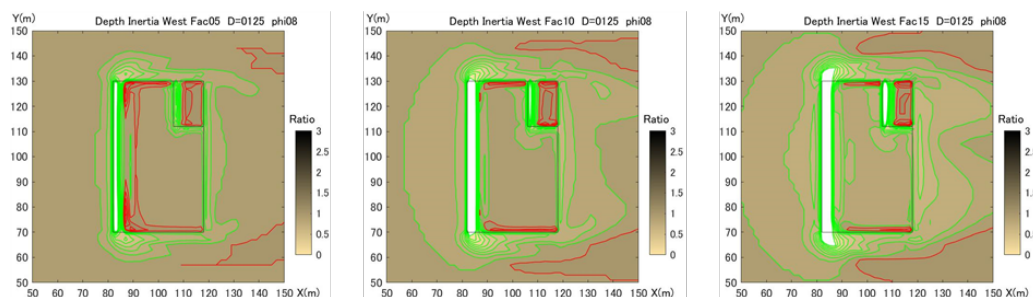


図 27 風速による屋根および地面の無次元降灰深の分布の違い。風は西風で風速は 2.5m/s (左), 5.0m/s (中), 7.5m/s (右)。粒径は $125\ \mu\text{m}$ 。

iii) まとめ

本研究では、冷却塔への火山灰吸引量、および降灰に対する建物影響について、数値計算の方法を用いて検討した。特に、粒子の運動の慣性力の影響に着目した。

冷却塔については、過年度に行った降灰実験から求められた機器の動作に影響を与える降灰深の再評価を行った。その結果、降灰中の火山灰粒子の慣性力の影響により、粒径への依存性があるものの実験に基づいて得られた降灰深は、やや過小に評価された可能性があることが示された。さらに、簡易的なフードによる火山灰侵入量の抑制効果の有無や程度について調べた。その結果、簡易的なものであってもフード状の覆いは空調機器への火山灰侵入に一定の効果があることが示された。

浮遊火山灰の空間濃度分布に対する建物影響について調べた。さらに災害復旧に関係する地表や屋上への積灰も対象に含めた。建物は単純形状の単体建物とした。風向、風速、粒径によって具体的な詳細に関する違いはあるものの、空間濃度、降灰深ともに建物の場所により、水平一様な降灰条件に比べて、0～1.4、1.5 程度の変動があることが示された。

b) 降灰荷重による建物屋根への検討

長期に生じる力（常時（自重など））及び短期に生じる力（積雪時、暴風時、地震時）に対して建築基準法に従って構造設計を行った鉄骨造地上1階建ての倉庫を対象に、降灰時の安全性確認を行う。ここで、積雪荷重は垂直積雪深 30cm の地域（関東などの非多雪地域）を対象とする。既往の検討では積雪荷重を降灰荷重に置き換えて単純に安全性を評価していたが、実際の建物は、風、地震、雪の荷重の組み合わせや応力のみならず変形によっても安全性が確認されているため、単純に雪荷重を灰荷重に置き換えただけの評価とは異なる可能性がある。検討ケースは、中柱無し（ケース 1）と、短辺方向（Y 方向）において大梁のたわみを低減させるため中柱を設置した中柱有り（ケース 2）の 2 ケースとする（表）。各ケースについて、屋根伏図を図 1、3D パース図を図 2、降灰荷重に対する検討対象の軸組図（Y 方向）を図 3 に示す。ケース 2 において、印の部分为中柱となる。

表 6 検討ケース

	中柱の有無	大梁のスパン長さ (m)
ケース 1	中柱無し	30.0
ケース 2	中柱有り	15.0

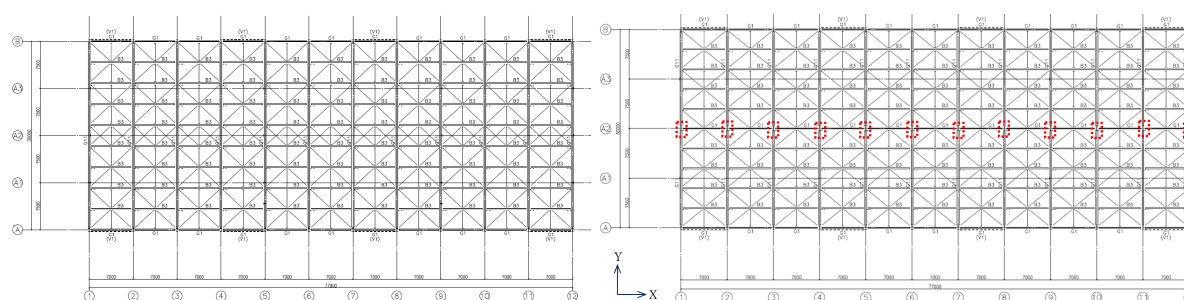


図 28 屋根伏図（左：ケース 1、右：ケース 2）

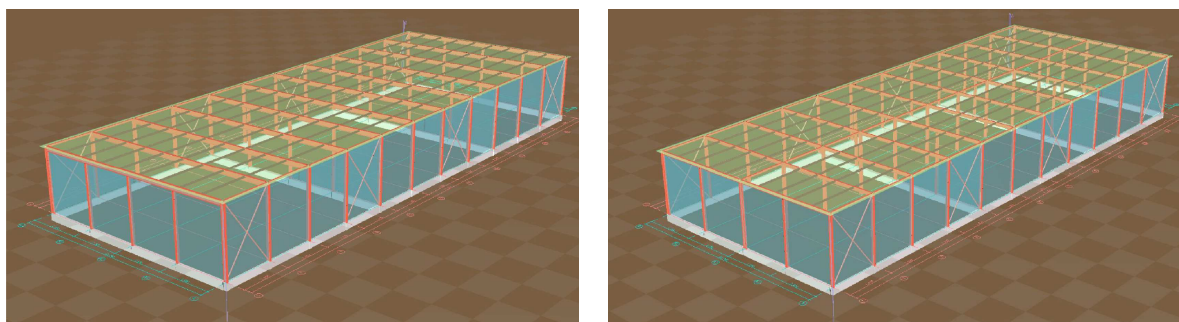


図 29 3D パース図（左：ケース 1、右：ケース 2）

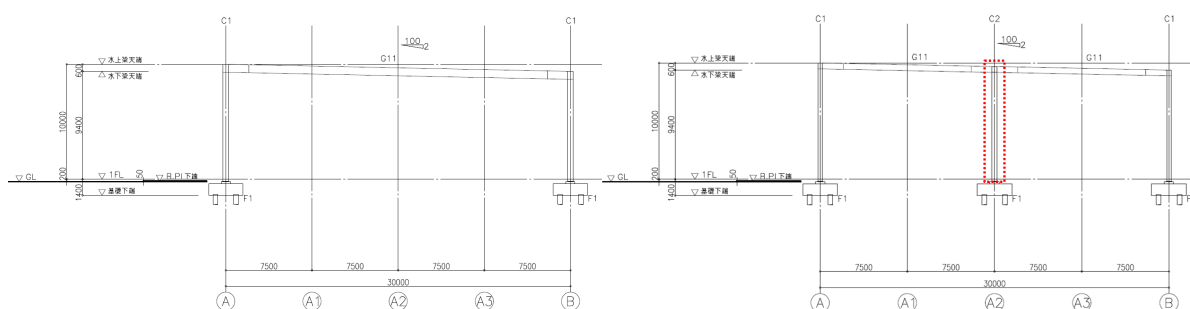


図 30 降灰荷重に対する検討対象の軸組図（Y 方向）（左：ケース 1、右：ケース 2）

降灰荷重が部材（小梁、大梁、柱）に作用したとき、応力度とたわみの両方の規定値を満足するように限界降灰深を評価すると、ケース 1 が図、ケース 2 が図となる。ここで、火山灰は乾燥状態と湿潤状態とし、フレームの限界降灰深は大梁と柱の限界降灰深の最小値で定義する。

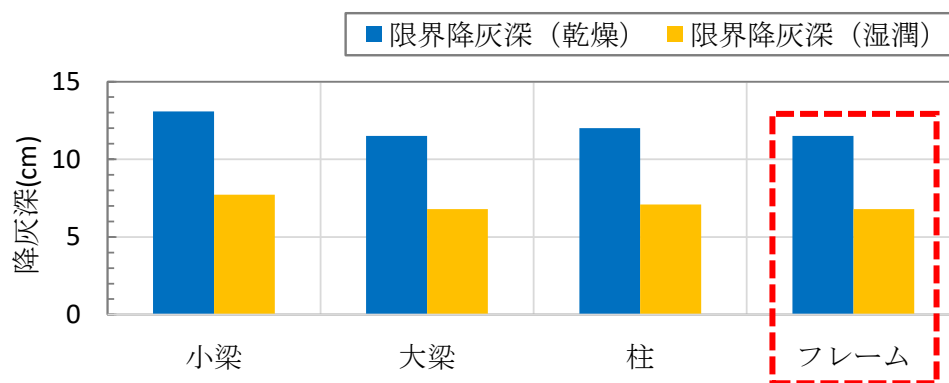


図 31 限界降灰深（ケース 1）

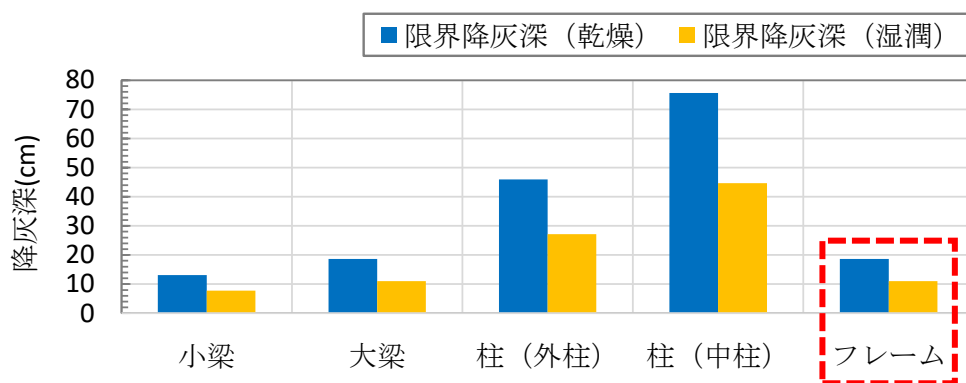


図 32 限界降灰深 (ケース 2)

フレームの限界降灰深は、火山灰が乾燥状態と湿潤状態について表となる。ケース 2 の限界降灰深は、ケース 1 と比較して約 1.6 倍大きくなる。従って、降灰荷重による大梁のたわみは、中柱を設置することにより効果的に低減できる。

表 7 フレームの限界降灰深 (cm)

	中柱の有無	火山灰	
		乾燥状態	湿潤状態
ケース 1	中柱なし	11.5	6.8
ケース 2	中柱有り	18.6	11.0

つぎに、倉庫屋根の鉛直荷重を用いて屋根の被害確率関数を評価する^{9, 10, 11)}。積雪荷重を計算するときの垂直積雪量を 30、35、40、45 (cm) に変化させると、鉛直荷重と限界降灰深の平均値の関係は、火山灰が乾燥状態と湿潤状態について図 18 となる。

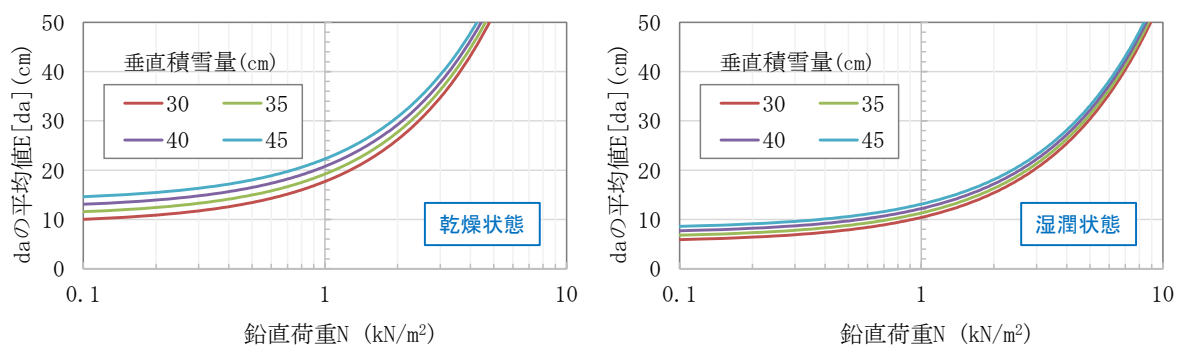


図 18 鉛直荷重と限界降灰深の平均値の関係

火山灰が湿潤状態のとき、各ケースの倉庫屋根の鉛直荷重を用いて被害確率関数を評価すると、図 19 となる。図中には、表のフレームの限界降灰深に対する被害確率を表示している。ケース 1 においてフレームの限界降灰深に対する被害確率は約 0.4 となるが、ケース 2 において被害確率は約 0.92 となり被害確率を安全側に評価している。

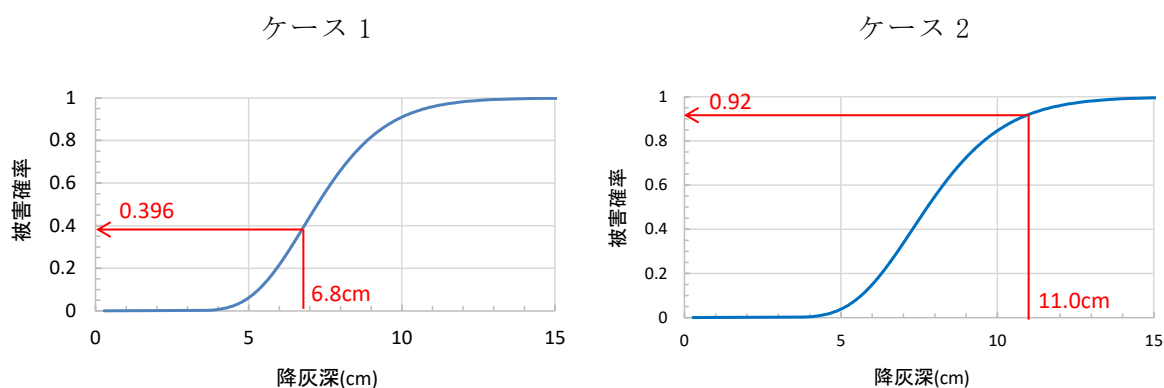


図 19 フレームの限界降灰深に対する被害確率

鉛直荷重を用いた建物屋根の被害確率関数は、大梁の限界降灰深がたわみ規定値で決定されるとき（ケース 1）は限界降灰深を概ね平均的に評価するが、大梁の限界降灰深が応力度規定値で決定されるとき（ケース 2）は限界降灰深を過少（安全側）に評価することを示した。従って、降灰荷重による部材及びフレームの限界降灰深を評価するときは、短期許容応力度の規定値のみならずたわみの規定値の設定が重要になる。たわみの規定値は部材のスパン長さで決定されるため、今後は部材のスパン長さを考慮した限界降灰深の評価法を検討する必要がある。

c) 病院の機能被害

病院の機能被害についての文献調査を行った。病院の代表的な 3 機能である診療、生活、供給を維持する要素は多岐にわたり、その要素のいずれかが停止すると機能損失に結びつくことが多いことがわかった。次年度以降も検討を継続していく予定である。

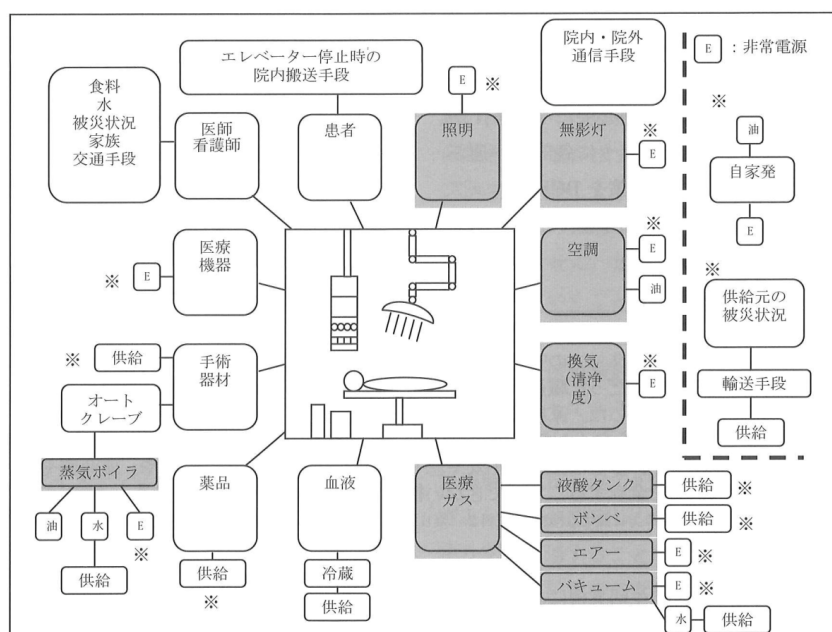


図 20 手術機能維持のためのサプライチェーン¹²⁾

d) 離散的降灰データの平面的分布図化

i) 手法と目的

本研究では、噴火調査によって得られる多点の降灰データ（離散型データ）から、等層厚線図を自動的に描き、任意の点における降灰ハザードを評価するシステムを開発することが目的である。

噴火による降灰の等層厚線図は、同じデータ（位置情報と降灰量）を使っても、作画する人のセンスによって異なり、分布の様相やそれによって算出される総噴出量にも違いが生じることがある。そのため、個人の主観によらず等層厚線図を客観的に描画することができそれを共有することができれば、より客観的で迅速性のある防災情報となる。また、過去のある一定期間におきた噴火による降灰の等層厚線図を重ねて得られる積算値や頻度から機械的処理によって、任意の地点における降灰ハザード曲線を作ることが可能となる。

ここでは Yang and Bursik(2016)¹³⁾の方法を用い、伊豆大島火山における過去 1500 年間の噴火の降灰データ(小山・早川, 1996)¹⁴⁾からパソコン上で等層厚線図を自動的に描画する作業開発を行った。そこでは、電力中央研究所が収集・整理した伊豆大島過去噴火の降灰分布図地点データを用いた。Yang and Bursik の方法では、トレンドモデルとそれからのズレをクリッキングで補正し精度を上げる方法が用いられる。この手法による精度を評価するために、すでに等層厚線図が描かれている御嶽山 2014 年噴火について、御嶽山降灰合同調査班 (2014)¹⁵⁾が収集したデータを用いて、本研究による結果と既存の等層厚（重量）線図との比較、及び、そこから算出される総噴出量を比較した。

使用したプログラムは Yang et al. (2018)¹⁶⁾を研究協力者の上澤真平氏が改良したものをを用いた。

ii) 御嶽山 2014 年噴火のデータでの確認作業

Yang and Bursik のモデルは機械学習による重回帰モデルであり、火口からの距離と火山灰厚の関係から導き出されるトレンドモデルに、観測点間と層厚差の関係を回帰的に求め、任意のグリッドに対してズレの補正（すなわちクリッキング）を行うものである。

火口位置と風向

火口位置と風向は、観測点の位置情報と火山灰厚のデータから Yang et al. (2018) のプログラムによって求められる。火口位置が既知の場合はそれを用いる。図 24 には、データから求められた火口位置と風向（降灰分布の主軸）であるが、トレンドモデルで使用するモデルが「べき乗則」か「指数関数」かによってやや異なる解が得られる（下のトレンドモデルの項を参照）。

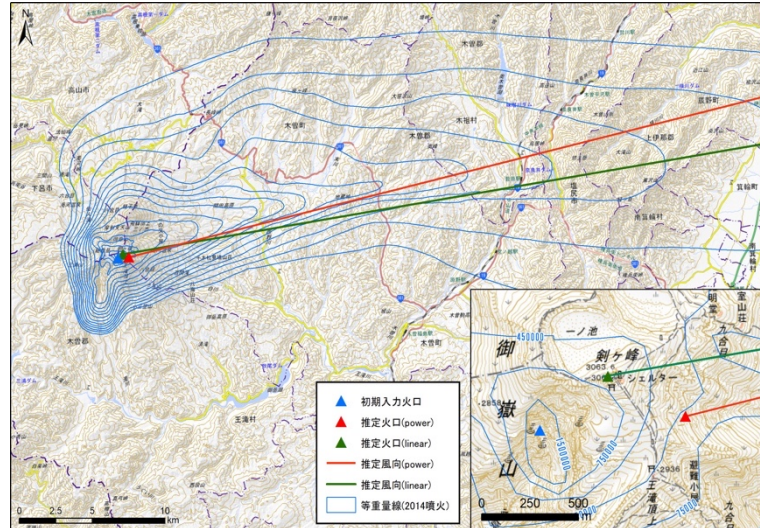


図 24 計算で得られる推定火口位置および主軸（風下風向）。データから火口位置と風向推定を行えるが、火口位置が既知の場合にはそれを用いる。薄青色は御嶽山合同調査班（2014）¹⁵⁾ の等重量線図を示す。

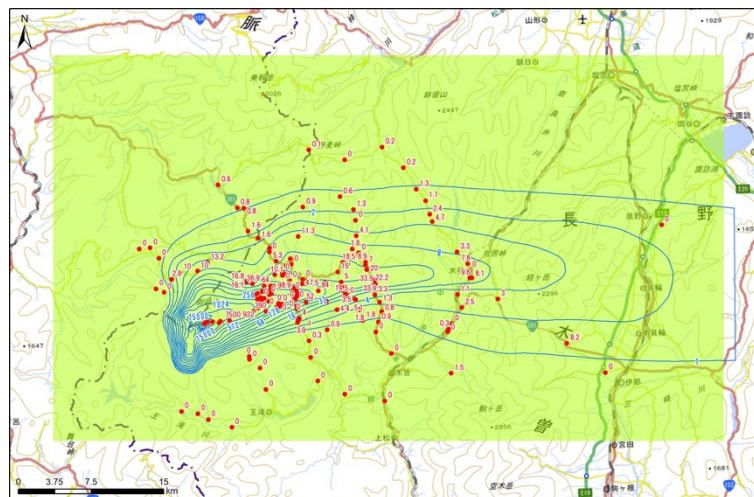


図 25 本研究で用いた御嶽山 2014 年噴火のラスター作成範囲

作成範囲とセルサイズの設定

観測値 0 を含む観測点全体を網羅する範囲として設定した作業範囲を図 25 に示す。セルサイズを小さくすると分解能が良くなる。セルサイズによる結果の違いを確認するため、100m、200m、500m、1000m と設定して設定による誤差を確認し、ここでは、セルサイズを 100m とした（図 25）。

トレンドモデル

層厚（対数）と火口-観測点間の直線距離、及び、火口-風下距離（観測点から風軸に対して垂線をたらし、その交点と火口の距離）の関係（図26）を、複数の指数関数かべき乗則で回帰し、おおよその屈曲点位置（距離）をそれぞれ segdist & segddとして設定する。御嶽山の場合はそれぞれ7000と6000になる。

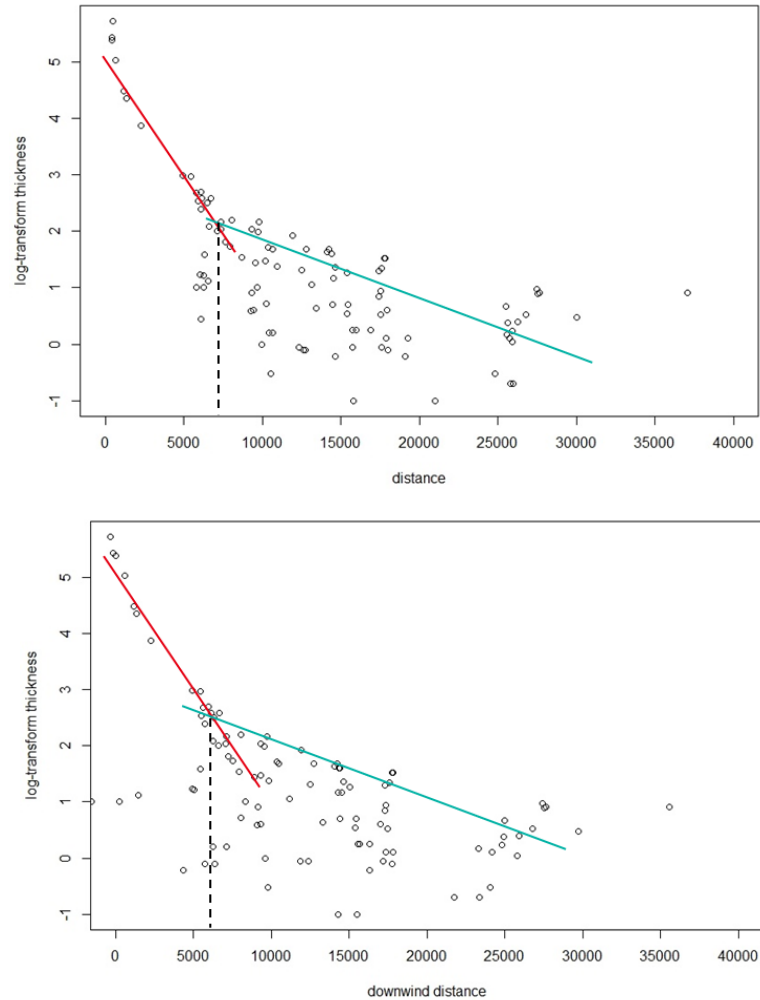


図 26 御嶽山 2014 年噴火の対数層厚（縦軸）と火口からの距離（横軸）の関係。直線距離（上図）、風下変換距離（下図）。屈曲点 (segdist と segdd) はそれぞれ 7,000 と 6,000。

クリッキングの設定

クリッキングに先立ってバリオグラム変数 `width.val` と `cutoff.val` を定める必要がある。`width.val` は観測点間どうしの距離とそれらの観測値の差を示した分散集合体（バリオグラム）を、一定の距離間隔で平均化するもので、その最小間隔（距離）が `width.val` で、一般的には出力セルサイズの半分に設定する。バリオグラムの全体幅が `cutoff.val` であり、ほぼ全観測データを網羅できる値に設定する。ここでは `width.val` と `cutoff.val` をそれぞれ 50 と 40000 と設定した。さらに、バリオグラムにおける分散点を近似するモデル (`var.model`) を 20 近いモデルから採用する。モデルの違いによる差はあまり大きくないので、ここでは `var.model` は「指数関数」とした（図 27）。このようにして、トレンドモデルからのズレをクリッキングで補正する手続きができたことになる（図 28）。

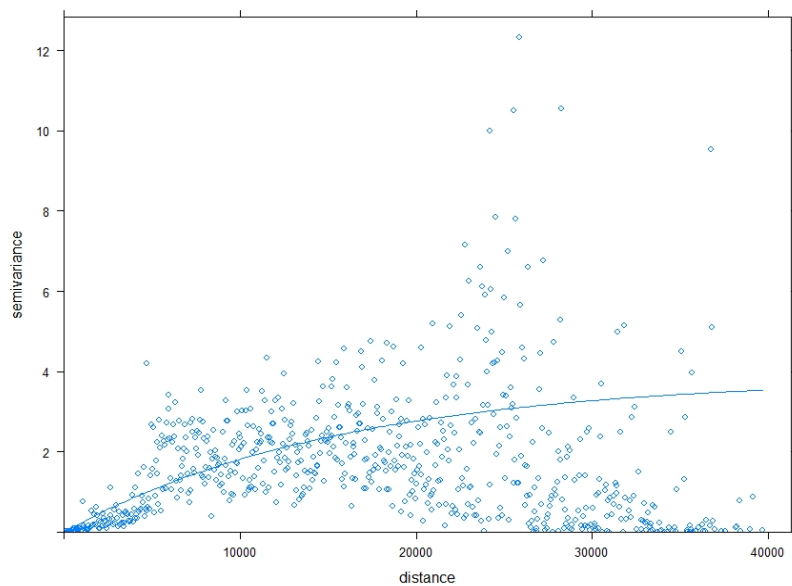


図 27 セミバリオグラムの出力結果。var.model は指数関数（青曲線）。

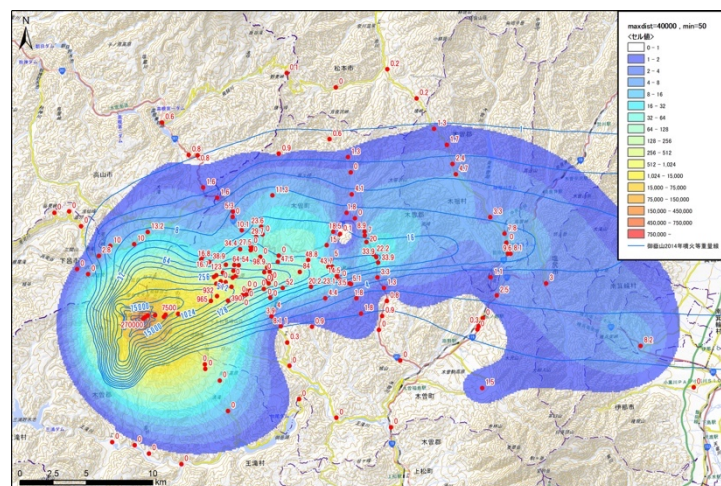


図 28 検索範囲と最小サンプリング数の設定による結果の比較。ここでは最大間隔 maxdist を 40,000m、最小間隔 min を 50 とした。

調整

本プログラムでは、観測値を対数変換して処理するため、降灰値ゼロの地点を反映できない。また、現地の観測データの中には、地質調査者の経験などの違いによって、全体としては不調和なデータも含まれている場合がある。これらの課題を解決するため、①周囲の観測点と比較して明らかに不自然なデータは削除して対応した。②また、対数によって層厚は表現され計算されるため、下限に設定する等重量線の外側にある観測点（場合によっては仮想点）の値を0.001とした（図29）。調整後の結果を図30に示す。

図 30 の結果を御嶽山降灰合同調査班（2014）¹⁵⁾による等重量線図と比較すると、火口から観測点が多い部分まではほぼ再現できるが、東端に関しては観測点が不足している

ことからうまく再現できない。また、北側の分布に関しても再現性がやや劣っているが、合同調査班の報告においても観測値と等重量線が整合的でない。

ラスタデータセルサイズと降灰厚のセル値の積によって噴出量を求めた。等層厚線図から計算される噴出量は、合同調査班によると約 38～145 万トンであるが、今回の自動か描画プログラムでは 60 万トンとなりそれなりに整合的であるといえる。

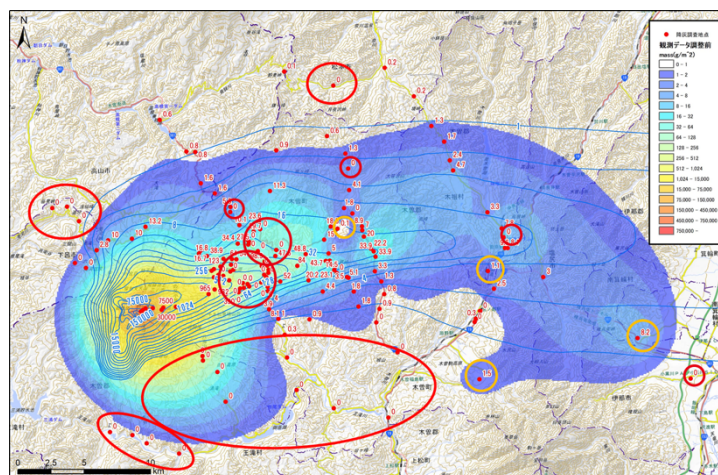


図 29 観測データ調整前の結果と不自然なデータ（赤丸）の分布状況。周囲に比べて明らかに異常な観測点や群が存在する。これらを削除して得られた結果が図 30。

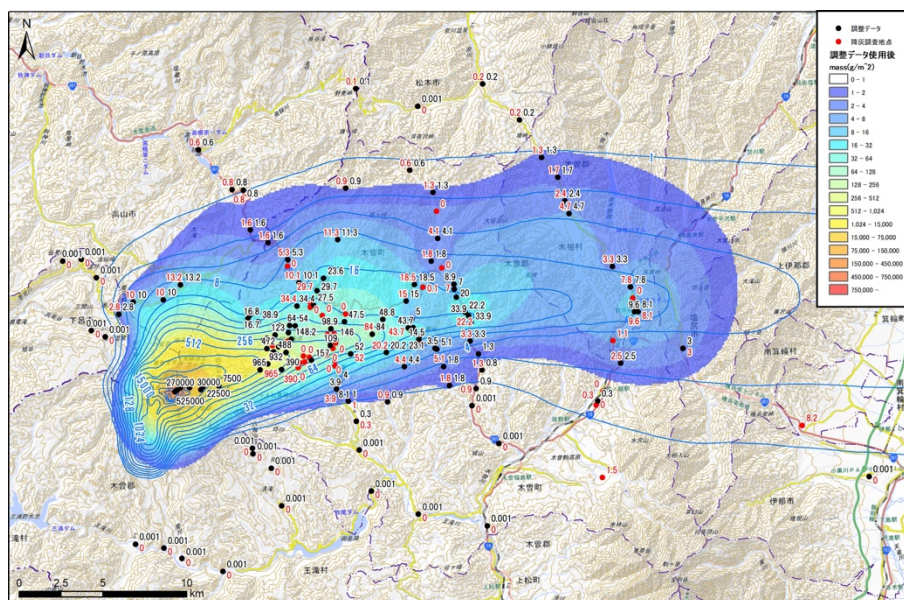


図 30 調整後に計算された御嶽山 2014 年噴火の等重量線図

iii) 伊豆大島火山への適応

観測点データ（CSV 形式）と Yang et al. (2018)¹⁷⁾ の SLV 法を用いて推定した火口位置、風下方向（主軸）角度を用い、Yang and Bursik¹⁴⁾ の手法で伊豆大島の過去 1500 年間に起きた 24 噴火の等層厚線図の作成を行った。各種パラメータを火山学的に調整した。す

なわち、観測データ数や偏りによって調整をする必要があり、以下のフロー(図 31)に従って調整を行なった。すべての調整において、セミバリオグラムモデル (var.model) を exponential と circular の内、誤差の少ない方を採用。SVL で主軸がうまく推定できなかった場合は、主軸を手動で付与して推定する(調整 1)。さらに分布の形に問題がある場合には、セグメントを小さくすると推定が可能となるケースがあるので、segdist と segdd を 100 に設定して等層厚線図の推定を行った(調整 2)。結果として調整 2 に関しては、調整 0 と同じ結果となった。調整 1 で推定に問題があるケースについては、小山・早川(1996)の等層厚線図を参考に、コンター上に矛盾のない観測点を付与して推定を行った(調整 3)。調整 3 は観測点が十分でないために起こる現象であり、過去噴火について少ない観測点データを用いて自動化する上での課題である。

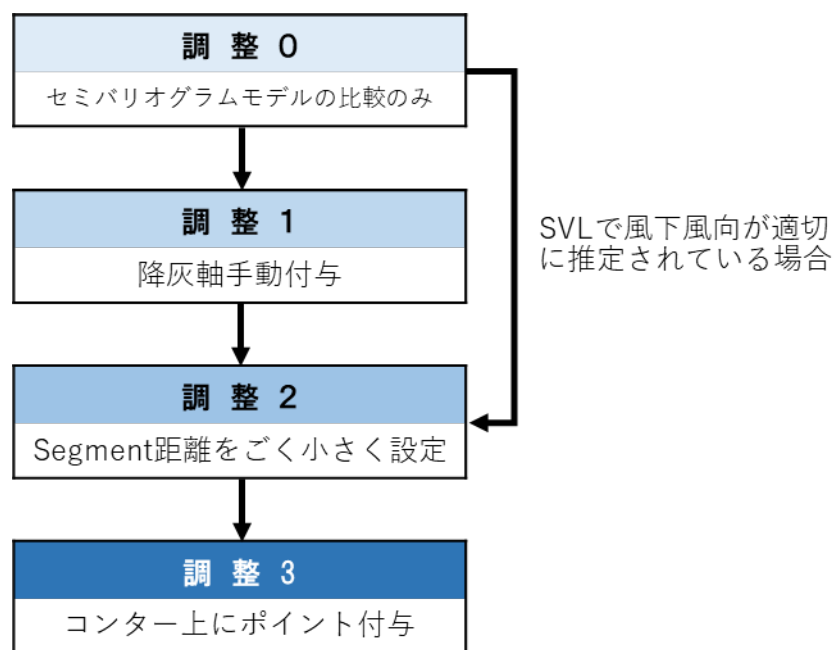


図 31 等層厚線図作成時の調整フロー

調整 0 で完了したものが 19 テフラ

調整 1 で完了したものが 9 テフラ

調整 3 で完了したものが 11 テフラ

以下に、調整 0、調整 1、調整 3 のテフラの例を図 32、33、34 に示す。

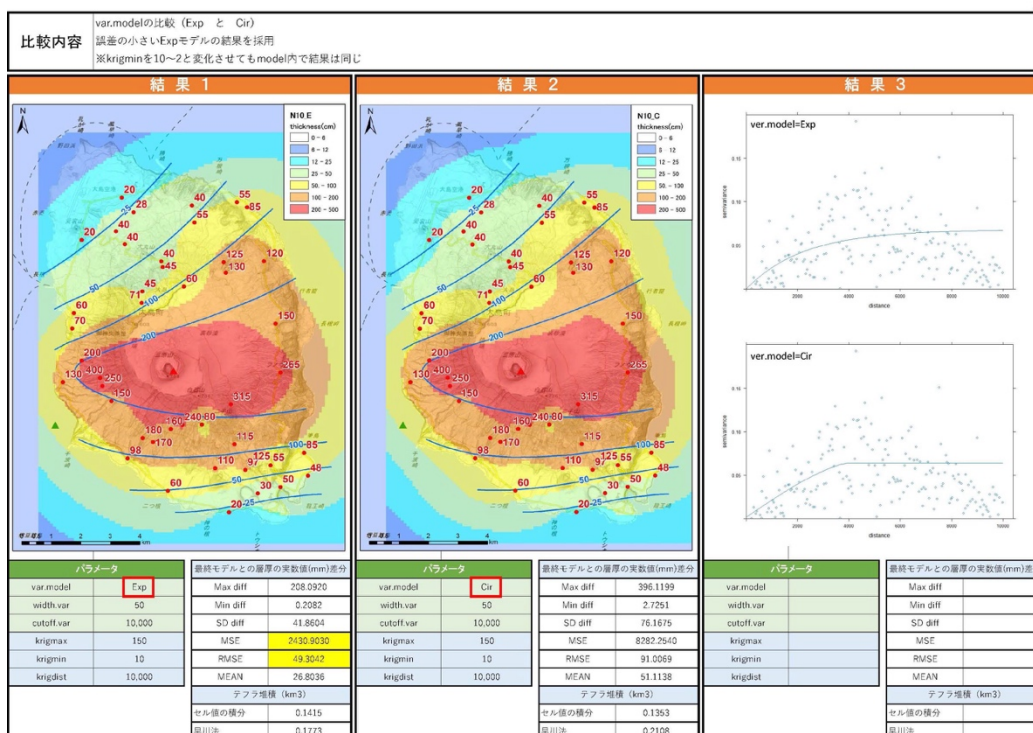


図 32 調整 0 の自動等層厚線図の例 (N1.0 テフラ)。結果 1、2 はそれぞれ Exponential と Circular のセミバリオグラフモデルを示す。バリオグラフは右側の上下図に相当。

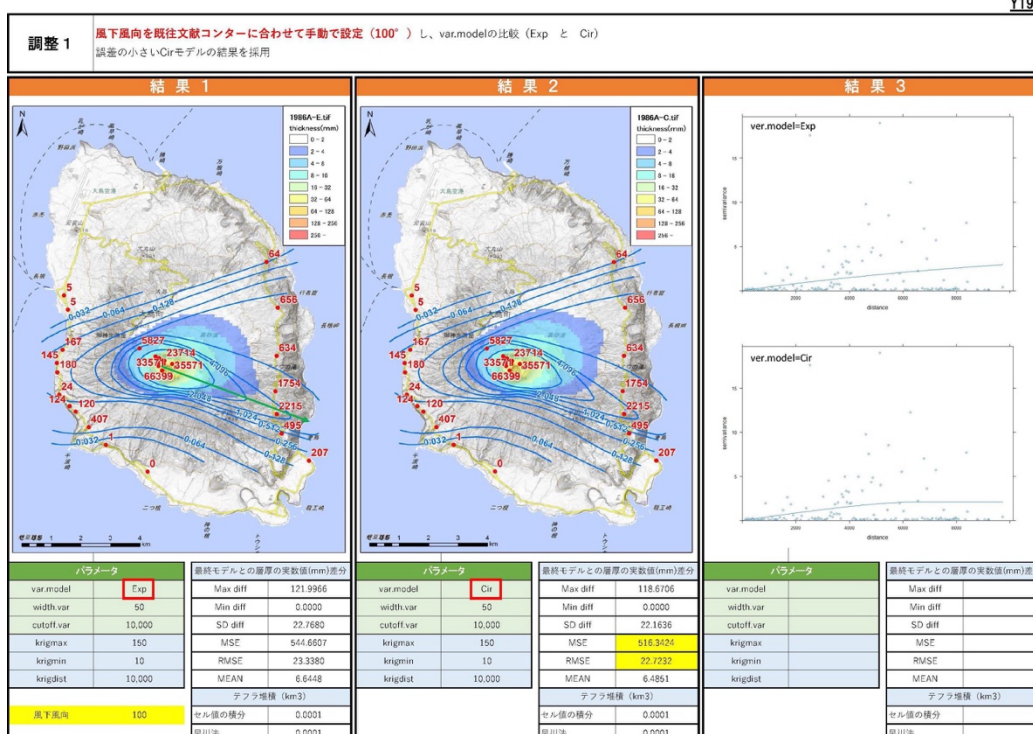


図 33 調整 1 の自動等層厚線図の例 (1986 テフラ A)。主軸を手動で付与。

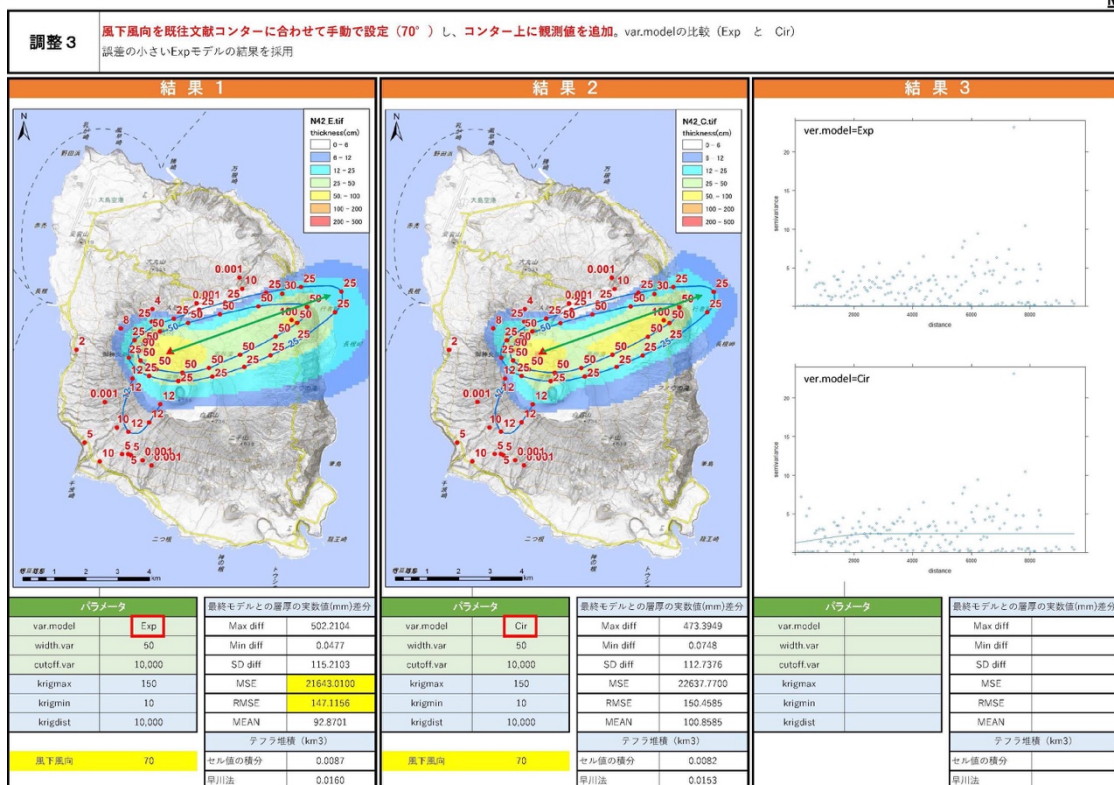


図 34 調整 3 の自動等層厚線図の例 (N4.2 テフラ)。小山・早川 (1986)¹⁴⁾ の等層厚線図を参考に主軸を与え、コンタ上にポイントを付与。

iv) 自動化等層厚線図からの体積見積もり

作成されたラスターデータを用いてテフラ毎の噴出量 (体積) を算出した。ここではラスターデータのセルサイズと降灰厚のセル値の積の総和によって求めた。24 噴火について算出された結果から噴出量階段図の作成し、小山・早川 (1996)¹⁴⁾ の噴出量と比較した (図 35)。なお、体積から質量の変換には、火山灰密度は $1,000\text{kg/m}^3$ を用いた。

今回得られた 1500 年間の積算噴出量は $6.5 \times 10^{11}\text{kg}$ であり、小山・早川 (1996) で報告されている積算値 $2.2 \times 10^{12}\text{kg}$ の 3 分の 1 以下となる。調整 0 である N1.0 テフラの重量が、本研究では $142 \times 10^9\text{kg}$ である (図 32) のに対し小山・早川では $698 \times 10^9\text{kg}$ と大きな違いを生んでいる。また、観測点数が多く、かつ調整 0 のテフラ (例えば、図 33) がほとんどである 1986 年噴火の噴出総量は本研究で $13.9 \times 10^9\text{kg}$ であるのに対して小山・早川は $8.3 \times 10^9\text{kg}$ である。これは、自動描画の重量の方が 1.6 倍と多いながらも、両者はそれなりに近い値である。小山・早川 (1996) は体積の見積もりには Hayakawa (1985)¹⁷⁾ を用いているが、本研究において、自動等層厚線図作成時のセル値の総和を体積としており、コンタが描けていない島外の海域部分の影響が大きな違いを生んだと考えられる。さらに、自動化等層厚線図による階段図では、小山・早川 (1996) が見出した N1.0 の噴火時から見られる噴出率の変化が明瞭でなくなる。総噴出量の違いや、後者に関しては、今回の等層厚線図作成法のデメリットとメリットを考慮して慎重に検討する必要がある。

以上のことを考えると、観測点の少なさ、特に火口近傍での観測点の有無が、自動化等層厚線図と地質学者が描く等層厚線図とに大きな違いを生じさせていると思われる。

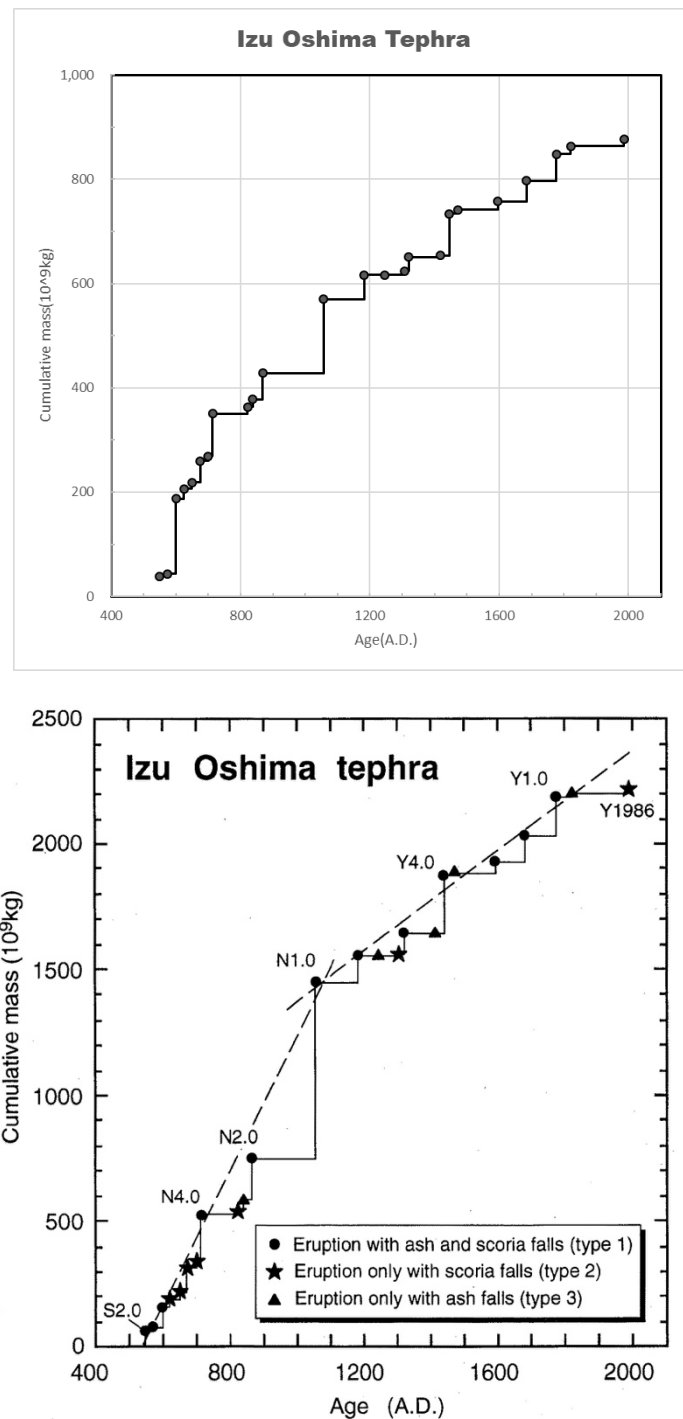


図 35 本研究の噴出量積算階段図（上）と小山・早川（1996）¹⁴⁾（下）との比較

v) 主要地点における降灰被害カーブ

自動化等層厚線図を用いて、伊豆大島の島内の主要な地点（図 36）における降灰被害カーブを作成した。作成に当たっては、上澤ほか（2019；2020）^{18, 19)}のツールを用い、取り扱う範囲を 100～1500 年間で 100 年区切りの年超過確率（頻度）を算出するように修正して用いた。また、年超過頻度を算出するため、一連の噴火イベントは 1 つの年噴火として統合して用いた。例えば、1986 年噴火は 5 枚のテフラが、Y6.0（1183 年噴火）は 3 枚スコリアと 1 枚のテフラが識別されている。これらの複数テフラの存在する年噴火については、作業上、それらの噴火年の全テフラを重ね合わせて使用した。重ね合わせた等層厚線図の例を図 37 に示す。



図 36 降灰被害カーブを検討した伊豆大島の主要 13 地点の分布

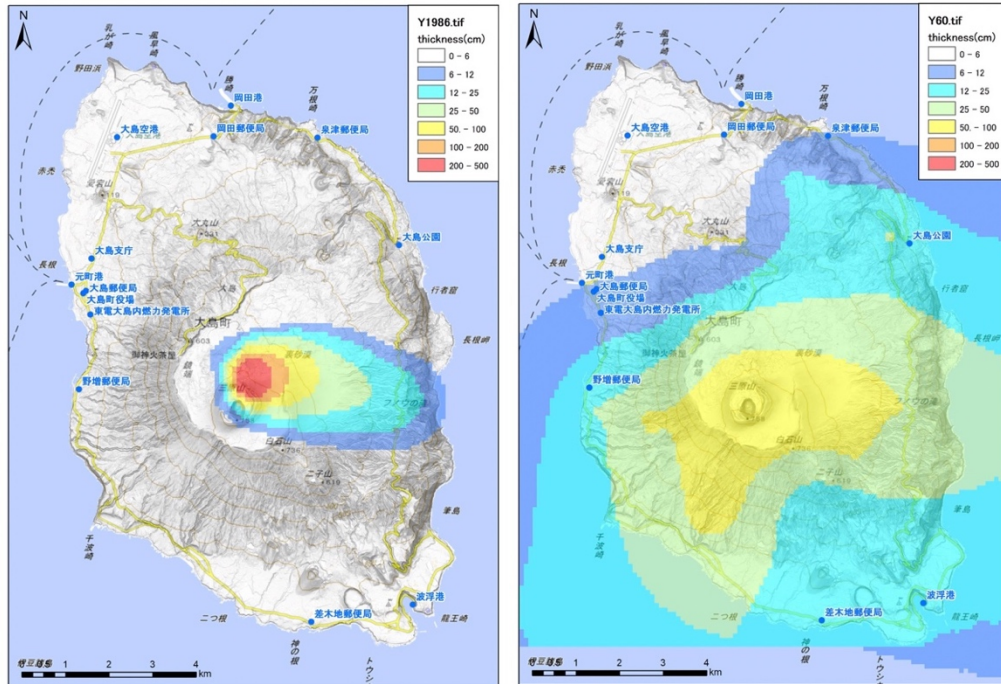


図 37 降灰被害カーブ作成のために複数の関連イベントを年毎に統合した等層厚線図の例。左は 1986 年噴火、右は Y6.0 噴火。

算出した年超過頻度をグラフ化し図 38 に示す。降灰リスクは島の中央から南部にかけて大きく、これらの地域は山頂火口に近く、特に、風下側の大島公園においては、検討した 13 地点中で最も高い。一方、島の北部にあたる岡田港、さらには、大島空港において降灰リスクが小さいことが読み取れる。

vi) 結論

離散的降灰データを用いて、その等層厚線の平面的分布図化の自動化を行った。自動化に当たっては、観測点の位置情報と火山灰厚（あるいは重量）のエクセルシートを入力データとして用意するだけであるが、プログラムを走らせるに当たっては、検索範囲やセルサイズの指定、トレンドモデルでの指数関数/べき乗則選択、クリッピング作業のための観測点間距離-観測値差分関係図（バリオグラム）における最小間隔やモデル選択などの手作業が必要となるため、入力データから完全に自動で結果が出せるまでには至っていないのが現状である。観測点が偏りなく、数が十分にあることが良い結果を得ることにつながる。また、等層厚線の内側により異常に小さい数値の観測点を外したり、降灰量が対数変換されるため、降灰限界付近では降灰量をゼロではないできるだけ小さな値をダミー的に入れる作業が必要となる。御嶽山の例（図 29）で見たように、異常点の削除はプログラムを走らせて出力結果を見ながら判断する作業がどうしても必要となる。

御嶽山 2014 年噴火の降灰データを用いて作成した等層厚線図は、御嶽山降灰合同調査班（2014）¹⁵⁾の結果と比較的近い結果が得られ、それから算出される噴出量も調和的なものであった。伊豆大島火山においては、過去 1500 年間の 24 噴火イベントの降灰データを用いて、等層厚線図を作成し小山・早川（1996）¹⁴⁾の結果と比較した。また、任意の地点

で降灰被害カーブが描けることを示した。これは今後の地域開発や避難計画策定において参考にできるものであろう。

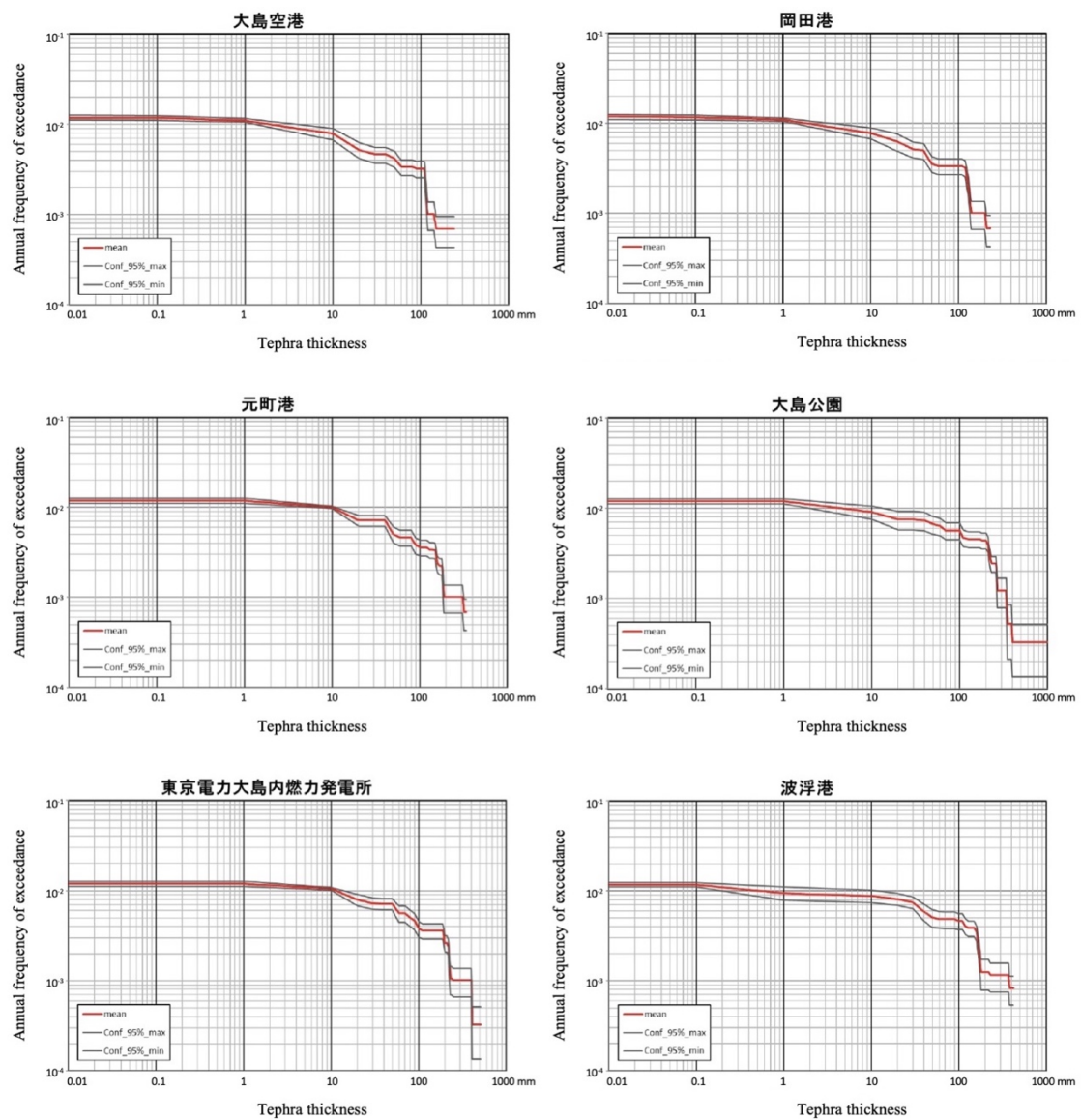


図 38 伊豆大島の主要 6 箇所（大島空港、岡田港、元町港、大島公園、東京電力大島発電所、波浮港）における火山灰の被害カーブ。縦軸は年超過確率、横軸は火山灰層厚を示す。

e) 火山灰上走行実験

降灰した状況での車両走行性能については、噴火後避難に関連して自治体防災担当者の関心が高い(1)参照)。また、降灰被害予測コンテンツでも道路の脆弱性評価などに関連して車両走行性能の情報は重要な意味を持つ。今回、山梨県が主催する「火山灰堆積時における車両走行等の体験事業」に参加し、火山灰堆積時の車両走行性能に関する情報を収集した。本事業は、堆積した火山灰の粒径や層厚が制動距離や走行に与える影響について検証するため、山梨県が国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所の協力を得て、山梨県富士吉田市にある富士北麓公園に実際に実験コースを施工し、2021年10月22日～11月8日の日程で実験を実施したものである。実験期間中、地方公共団体、消防、警察、ライフライン関連会社など約70団体が各種車両を持ち込んで走行テストを実施した。実験に使用されたコースを写真3に示す。コースは平坦直線、傾斜、カーブの3コースで粒径や層厚を変えた合計19パターンの路面が用意された。傾斜コースの斜度については、過去のテストにおける設定勾配が10～12%と極端な急勾配であったことから、富士吉田市内の代表的な通り勾配である5%を設定した。火山灰は、粒径1mm以下の富士山の細粒火山灰、2mm程度の桜島の粗粒火山灰、5～10mmの富士山1707年噴火の宝永スコリアを用意した。平坦直線コースは、それぞれの粒径の火砕物を1cm、5cm、10cm厚で敷いたコースを設定し、細粒火山灰については、乾燥したコースの他に、湿潤状態のコースも設定した(写真2)。スコリアについては20～30cm厚のコースも設定した。傾斜コースは、細粒火山灰とスコリアの5cm、10cm厚の4パターン設定した。カーブコースは、R=30のカーブで平面と勾配2.5%下りカーブに1cm厚の細粒火山灰を敷き詰めたコースを設定した。車両は、車重や駆動方式の違いによる影響を見るために9車種を実験に使用した。また、駆動輪に金属チェーンないし樹脂チェーンをつけての試験も実施した。これらのコース上で制動試験、牽引試験、走破試験を実施した。

実験の結果、制動距離については、写真3に示すように時速30km/hで行った実験では通常のアスファルト路面に対して、制動距離が伸びることが確認された。次に走行性能としてカーブへの侵入速度が速いと滑ってしまった(写真4)。これは路面に火山灰が堆積したことによって路面の摩擦抵抗が下がったことに起因するためと考えられる。そのため、火山灰が堆積した路面の摩擦性能についても実験を実施した。実験は平坦コースで乾燥したスコリア1cm、中粒火山灰1cm、細粒火山灰1cm、細粒火山灰を数ミリの4コースで、ブレーキをかけた状態で車をけん引して動き出すときのけん引力を計測して摩擦係数を計測した(写真5)。計測した摩擦係数について、火山灰上では0.41～0.66程度になり、舗装路のドライ路面において0.8前後、ウェット路面で0.6～0.4であることから、火山灰上ではタイヤの摩擦係数が下がりウェット路面に近い状態になるため、カーブでのコースアウトや制動距離が伸びる結果となったと考えられる。なお、この牽引による摩擦係数を計測する実験については、実験時間が十分に確保できなかったため、軽自動車とコンパクトカーの2種類、4コースのみでの実験となっている。

走破性については、スコリア30cmのシビアな条件のコースをFF車やFR車、4WD車で走行して検証を行った。その結果、FF車やFR車ではコースを走破することができず、途

中でスタックすることが分かった。また、写真6は軽自動車のRR車であるが、4WDの切り替えスイッチがあり、4WD機構を有効にすると脱出することができた。



写真2 敷設した火山灰走行実験のコースについて



写真3 制動実験の様子



時速：30～35km



時速：40～45km

写真4 カーブコースでの侵入速度の違いについて



写真5 牽引試験の様子



写真6 スコリア 30 cm コースでの様子

3) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

a) 登山者データ可視化ツールの改修

i) 改修の主なポイント（図 39～41）。

- ・前年度までに、富士山（2017～2019 年）、御嶽山（2019 年）、那須岳（2020 年）で実施した登山者動向把握実験で得られた登山者データの表示が可能になった。
- ・ツール上で他の地図情報（山小屋等、ハザードマップによるハザード情報）と併せてレイヤー表示が可能になった。
- ・レイヤー表示されるハザードデータの透過度を任意で調整することが可能になった。
- ・登山者データの内、「出発者数」と「未着者数」を地図上に表示されるようになった。
- ・移動中の登山者のデータについて、移動方向を示す矢印と数字で表示されるようになった。
- ・ハザードマップによるハザード情報と登山者データを空間解析することで、ハザード範囲内の登山者数を集計することが可能になった。
- ・空間解析の結果（登山者数の集計結果）を図表で表示し CSV 形式で出力ができるようになった。

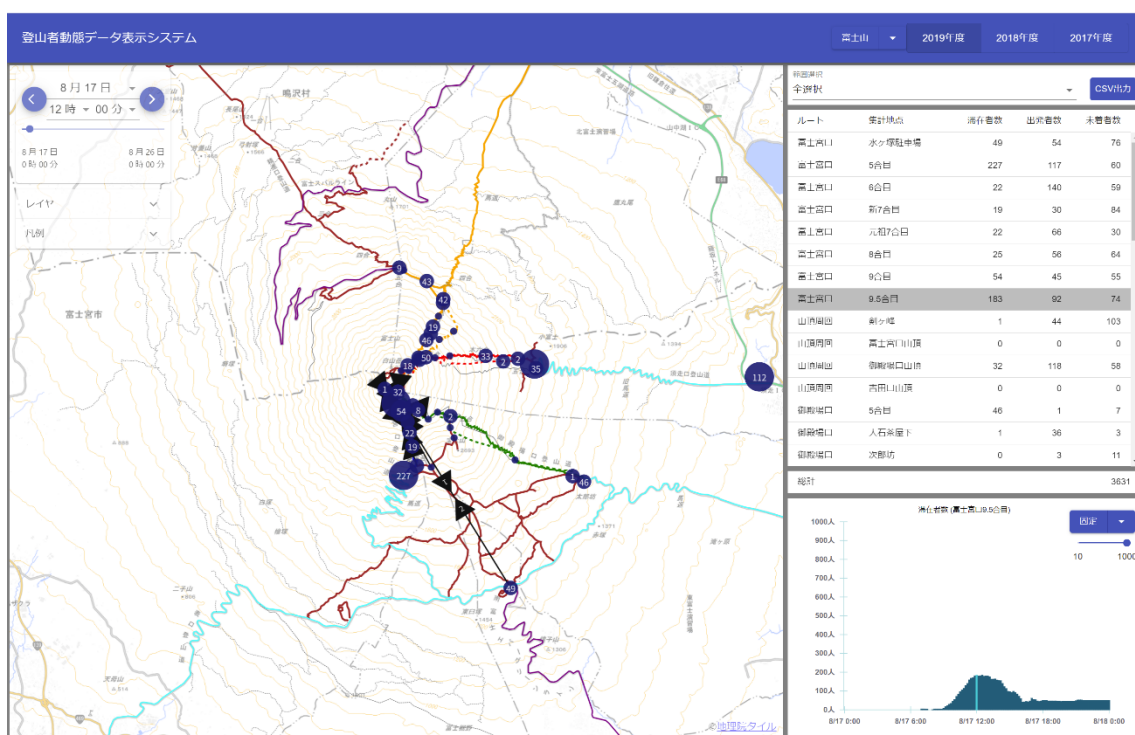


図 39 可視化ツールによって、2019 年に富士山で取得された登山者データの一部を表示したもの。

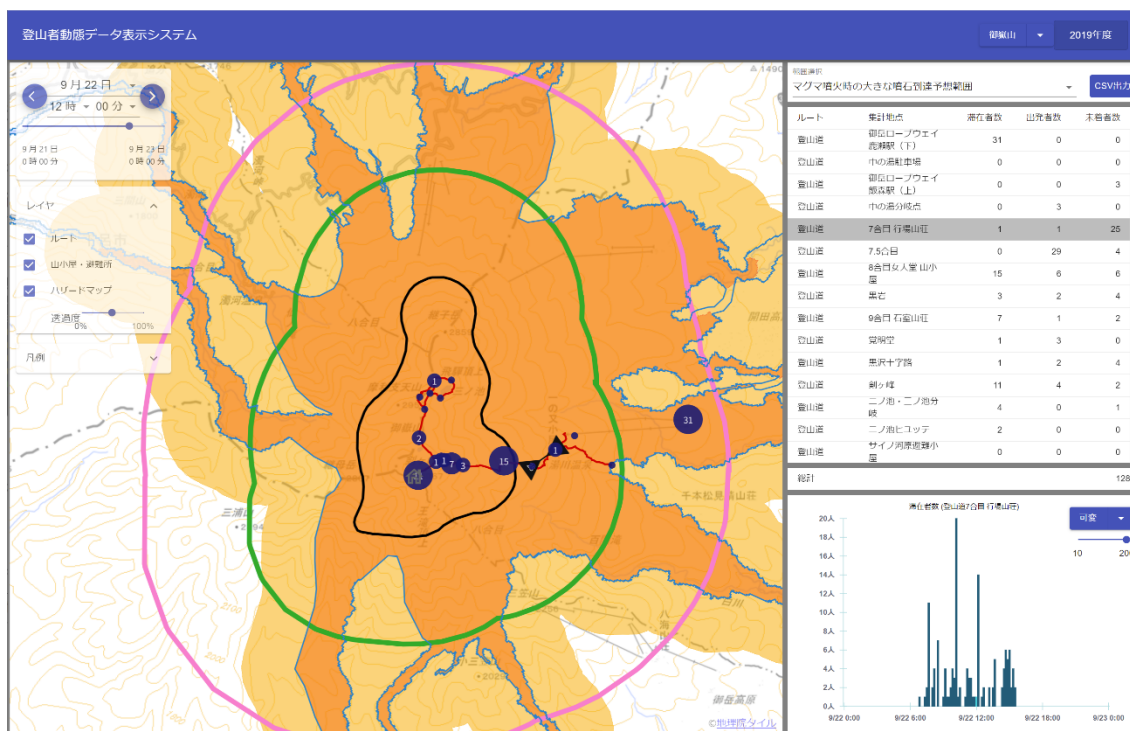


図 40 可視化ツールによって、2019 年に御嶽山で取得された登山者データの一部を表示したもの。ハザードマップによるハザード情報もレイヤー表示し、登山者データとの空間解析（ハザード範囲に何人の登山者がいるかの簡易的な曝露評価）が可能となった。

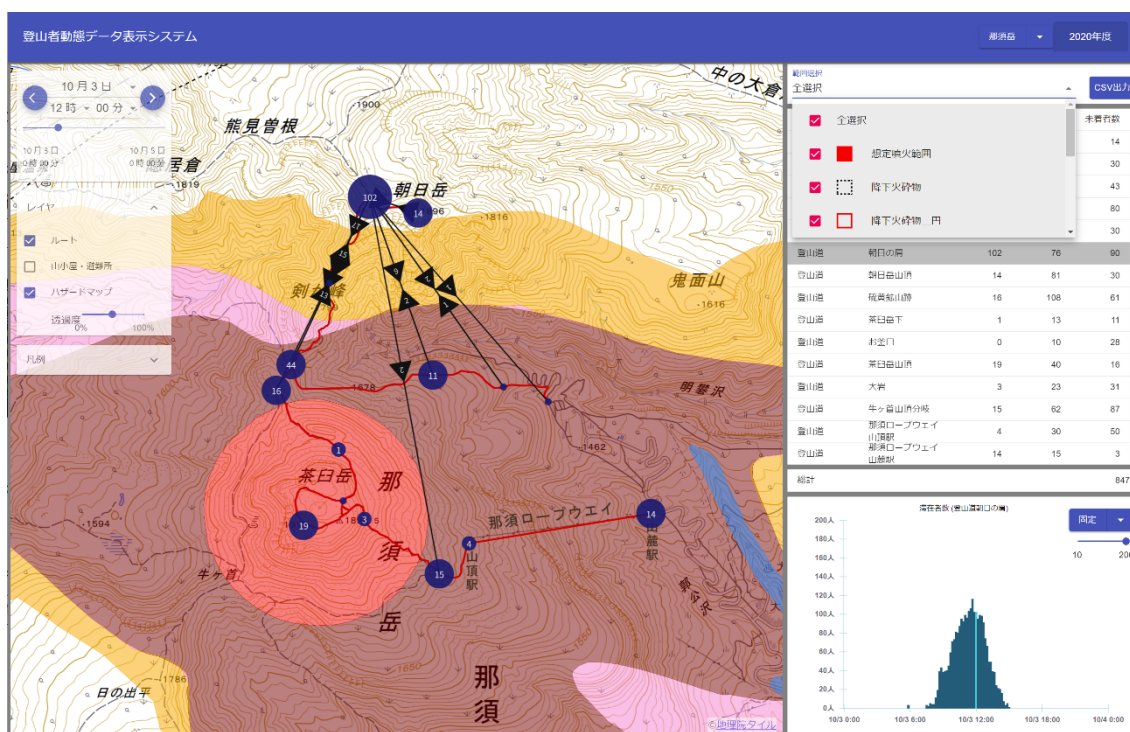


図 41 可視化ツールによって、2020 年に那須岳で取得された登山者データの一部を表示したもの。ハザードマップによるハザード情報もレイヤー表示し、登山者データとの空間解析（ハザード範囲に何人の登山者がいるかの簡易的な曝露評価）が可能となった。

ii) 本ツールを利用した登山者データの防災利用

この、改修版の可視化ツールを使い、那須岳周辺自治体（那須岳火山防災協議会コアグループ会議）及び長野県と、これまで取得してきた登山者データの分析結果について共有をした（ただし、コロナ禍の影響もあって富士山に関しては共有調整がつかなかった）。またこの分析結果に基づいて検討を行い、各自治体に対して登山者データの防災利用に関する提案を行った。とりわけ那須岳火山防災協議会に対しては、那須岳で取得された登山者データの分析結果を訓練シナリオに盛り込んだ、防災訓練を実施した（写真7）。



写真7 2021 年度に那須岳火山防災協議会コアグループ会議を対象として実施された防災訓練の様子。

本取組み（提案、訓練）を通して、噴火時に避難が必要となる登山者数の規模感を把握することができ、避難計画の改訂に向けて以下のような検討を行う際の参考とすることができた。

- ・登山者の避難輸送・救助・搜索活動に必要なマンパワーや優先箇所の検討
- ・ヘルメットの配備箇所と数の検討

- ・「地点別避難ルート」「緊急下山ルート」の検討
- ・登山者のための避難所に関する検討
- ・登山者の確認・救護活動拠点に関する検討

iii) 結論ならびに今後の課題

今年度は、令和元年度に開発した避難・救助支援コンテンツ試作版の改修を行い、レイヤー表示機能や曝露評価のための空間解析機能などの機能を追加した。また、本試作版及びこれまで御嶽山、那須岳で実施した登山者動向把握実験の結果を周辺自治体と共有し、登山者データ及びその解析結果の防災利用について提案を行った。特に那須岳火山防災協議会コアグループ会議に対しては、解析結果をバックデータとして訓練シナリオに盛り込んだ防災訓練を実施し、避難計画の改訂に向けた様々な検討を行うことができた。

次年度は、御嶽山と那須岳でこれまでと異なる条件での登山者データを取得し、富士山周辺自治体を含めて、さらなる登山者データ及びその解析結果の防災利用について提案し、活用に向けた検討を行う。なお、那須岳火山防災協議会コアグループ会議を対象とした防災訓練は継続して実施する。

b) 退避壕（シェルター）等の耐衝撃性実験

前年度から引き続き、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。今年度は建築物への衝撃力を緩和することを目的とした耐衝撃性能の補強方法について検討を行った。補強方法については、標高の高い山小屋などで容易に手に入る軽石と砂を使った補強法の検討を行った。対象とした構造物は木造建物と鉄筋コンクリート造を対象として実施した。

実験方法はこれまでと同様に山田他(2019)²⁰⁾を基に図 42 及び、写真 8 に示す衝突実験装置を使用して、試験体に軽石（スーパーソル L1、ガラス発泡資材事業協同組合）または砂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/m³）を使い、射出速度を変化させて、実験を行った。木造建物は山小屋の屋根を模した杉材製試験体（基本構造、図 43）を作成し、鉄筋コンクリート造については、ボックスカルバート構造を想定し²¹⁾、工場で養生した試験体を用いた。土嚢袋の設置方法については前年度の試実験により検討を行っており、その設置方法で実験を行った。今年度の実験は、2021 年 4 月 26 日から 28 日及び 6 月 21 日から 23 日、2022 年 3 月 23 日から 25 日に防衛大学校で実施した。

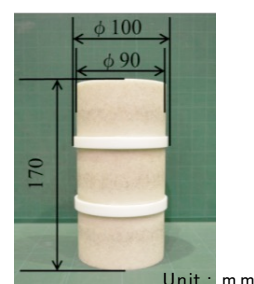
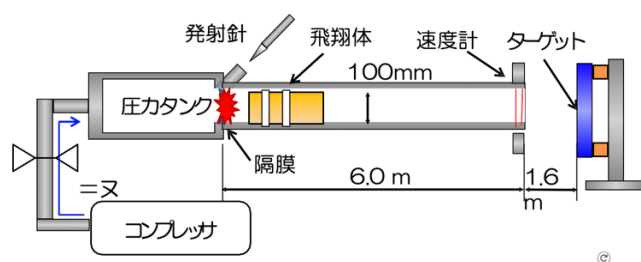


図 42 実験装置概要と飛翔体

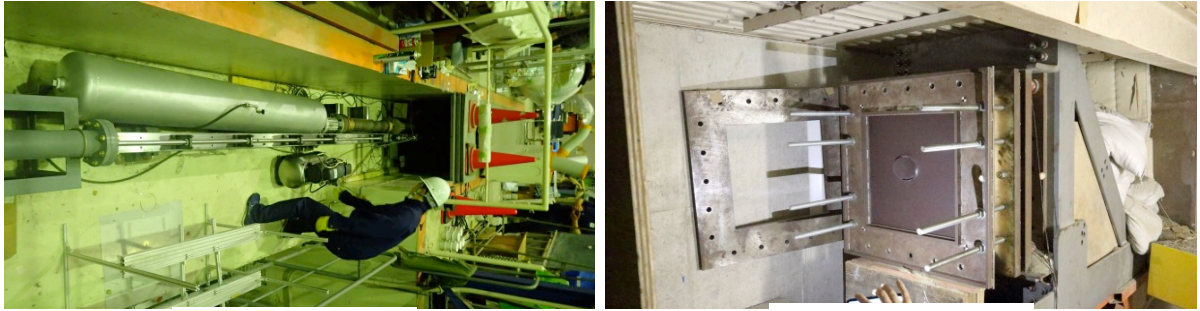


写真 8 高速投射型衝撃破壊試験装置

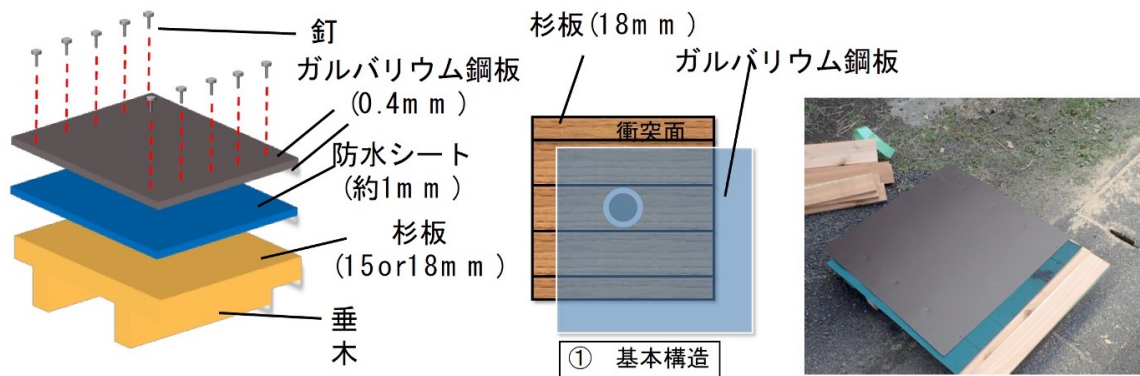


図 43 試験体の基本構造

はじめに木造建物の実験結果について、模擬投出岩塊衝突試験を速度と人工軽石の厚さと砂を変化させて実施した。実験後の試験体の様子を写真 9、10 に示し、結果を図 44 に示す。図 44 から人工軽石、砂ともに厚さを増加させると衝撃吸収効果が上昇し、人工軽石よりも砂の方が、衝撃吸収効果が高いことが分かった。また、これまでの実験結果との比較として、杉板 2 重（スタック構造：木目が平行な積層、図 44 の黄色横線）と人工軽石厚 10 cm、杉板 2 重（クロス構造：木目が直交する積層、図 44 のピンク横線）と人工軽石厚 15cm とがそれぞれ同等の衝撃エネルギー吸収効果を持つことが分かった。加えて、約 12 cm 厚の人工軽石を配置した場合は約 2570 J (44 m/s) まで貫通せず、約 19.5 cm 厚の人工軽石を配置した場合は 3850 J (53.8 m/s) まで貫通しない。これは、杉板 1 枚からなる山小屋の基本構造の「貫通限界」が 1300 J (31 m/s：山田他(2019)²⁰⁾、図 44 の青灰色横線)であることから、人工軽石の衝撃吸収効果によって、12 cm 厚の軽石で約 2 倍、19 cm 厚で約 3 倍向上となり、人工軽石設置の効果が確認できた。



写真 9 軽石を置いた実験（人工軽石 15cm、飛翔体速度 54m/s）の前（左）と実験後（右）

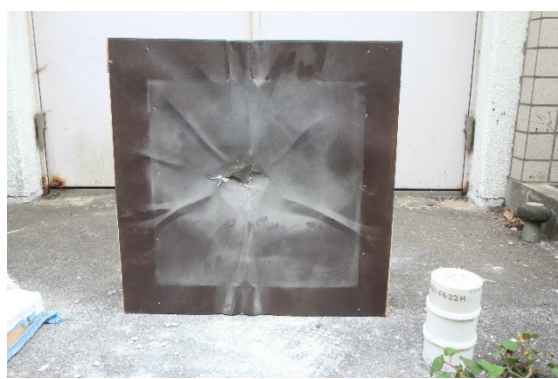


写真 10 砂を置いた実験（砂 13.8cm、飛翔体速度 55.6m/s）の前（左）と実験後（右）

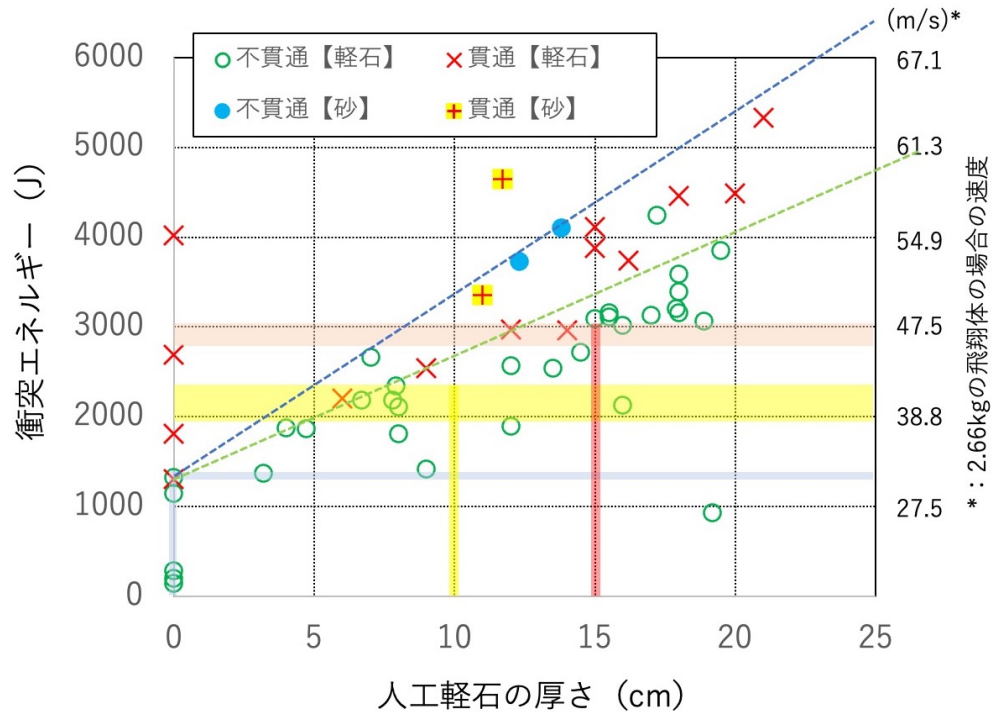


図 44 人工軽石と砂を設置した木造試験体実験結果。砂の層厚も同横軸で示した。青灰色、黄色、ピンクの横線は、杉板 1 枚の基本構造、杉板スタック構造、杉板クロス構造、それぞれが吸収する衝突エネルギーレベル（山田他、2019²⁰）。

次に鉄筋コンクリート造を対象にした実験結果を示す。鉄筋コンクリート造への衝突では、裏面剥離を防ぐ必要がある。そこで、鉄筋コンクリート造に人工軽石を載せた場合の衝撃吸収効果を検証するための実験を行った。なお、今年度は来年度以降本格的に実験を行うための試実験として行った。試実験では、前述の人工軽石を使い、厚さ 150 mm の鉄筋コンクリート造の試験体に速度を 96～118m/s の範囲で変えて、軽石がない条件を 3 回、軽石を設置した条件で 5 回実施した。実験結果の一例として写真 12 に人工軽石の厚さ 110mm、飛翔体速度 110m/s とした場合の結果を示す。この写真から、衝突面にはそれほどひび割れは発生していないが、裏面ではひび割れがみられひび割れ 5 mm と大きく、裏面剥離に近い被害が確認できた。今年度は試実験として次年度本実験を行うための実験条件の検討などを中心に行ったため、ひび割れの深度などや裏面剥離の度合いなどについては十分精査できていないが、来年度以降実験ケースを増やして検討する予定である。

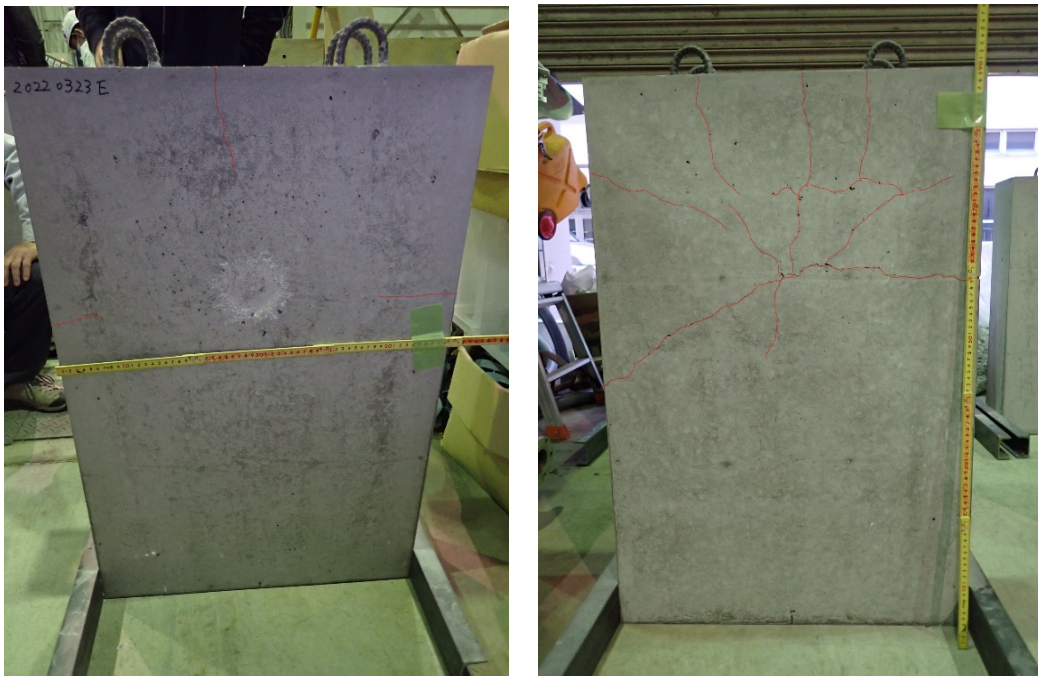


写真 12 鉄筋コンクリート造の試験体に人工軽石を置いた実験（軽石 110mm、飛翔体速度 110m/s）の衝突面（左）と裏面（右）

c) 避難シミュレーションの検討

火山災害は、その起因現象に応じてハザード発生の時間や領域が異なるため、避難計画の策定にあたってはそれぞれの特性を鑑みて作成する必要がある。避難シミュレーションを実施する前段階として、現象毎の避難シミュレーションのための視点について体系的に取りまとめを行った。火山災害別に被害が及ぶ距離や到達時間を勘案した避難方式を選定し、それに応じた避難経路・段階的避難の考え方を整理した（表 8）。これら得られたデータから考察すると、本評価を行うためには、マルチエージェントシミュレーションによる評価が適していること、また、シミュレーションの効果測定として、避難完了率を指標とすることを提案した。

表 8 噴石、溶岩流、降灰に対する避難方法のまとめ

	噴石	溶岩流	降灰
避難の根拠	いのちを守るため	いのちを守るため くらしを守るため	(主に) くらしを守るため
避難対象範囲	影響想定範囲(ハザードマップ等)	影響想定範囲(ハザードマップ等)	降灰の被害が甚大な範囲(生活困難となる範囲)
避難タイミング	発生直後	発生後～到達する前まで	発生後～影響が及ぶ前まで
避難手段	徒歩または最も早く危険を回避できる手段	徒歩または車両等	車両等
避難方式	一斉避難	一斉避難/段階的避難	一斉避難/段階的避難

避難完了率の概念図を図 45 に示す。横軸に避難開始からの時間、縦軸に避難完了率を記しているが、避難対象とする対象(例えば人口)のうち、経過時間ごとにどの程度の対象の避難が完了したかを示す避難完了率を縦軸に取る。通常であれば、時間の経過とともに避難完了率は上昇するが、例えば渋滞などの障害の発生により、避難完了率の停滞などが起こる。図 46 は、避難経路に閉塞箇所がある場合の例で、避難対象(緑・オレンジ・黄色)が渋滞している状態から経路の拡充を行うことによって渋滞が緩和されていることが見て取れる。実際の交通量などにおいて、このような経路の渋滞緩和の施策によりどの程度効果が見込めるかなど、避難シミュレーションにより定量的な評価を実施することを今後の方向性とすることを提案する(図 47)。なお、火山災害としては、課題 C3 で実施される噴石・溶岩流・火砕流シミュレーションなどの計算結果と合わせることで評価を実施することを検討する。

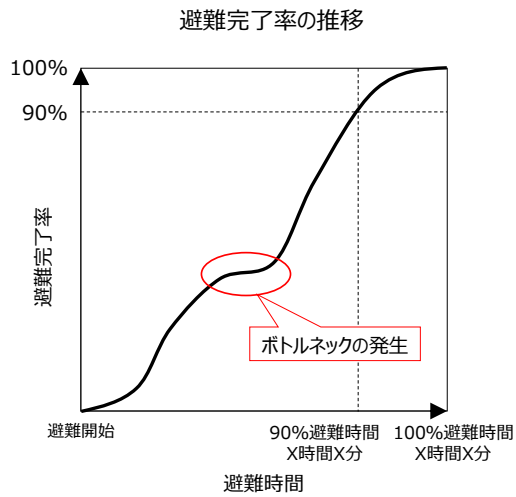


図 45 避難完了率の推移のグラフイメージ

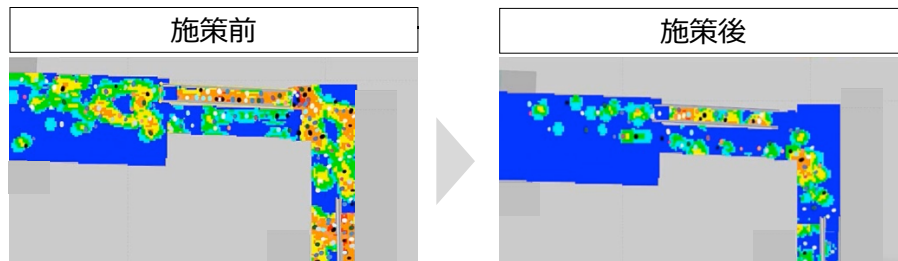


図 46 マルチエージェントによる避難シミュレーション活用のイメージ

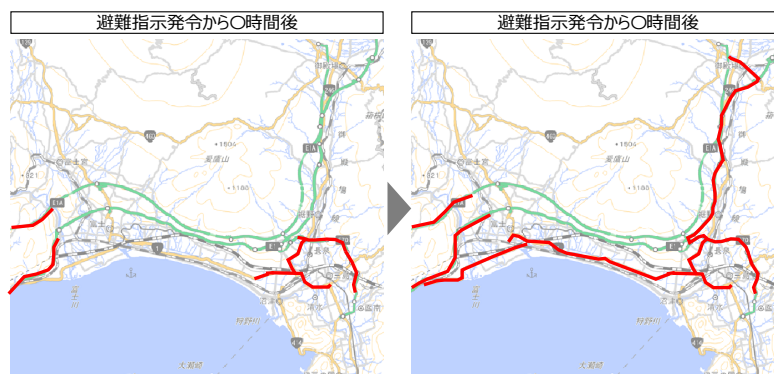


図 47 ミクロ交通流シミュレーションによる避難交通の時系列変化の可視化イメージ

(c) 結論

情報ツールの3コンテンツ試作版について昨年度に続き高度化が進められた。特に本年度は、①周知啓発・教育用コンテンツに関しては、ユーザーである自治体関係者へのアンケートや現場での結果に対応し、実際の災害対応や火山灰上走行実験の動画や IAVCEI が作成している啓発動画の日本語版などのコンテンツを加えるとともに、インフラ関係会社と現場で要求されるハザード情報について意見交換を行った。②降灰被害予測コンテンツでは、これまで実施した降灰による建物への影響を評価する上で、建物自身による降灰挙動を評価することの必要性がシミュレーションから明らかになった。また、降灰ハザード自身を評価する方法として離散型降灰データから分布を自動的に描く手法を検討した。さらには、富士山麓において実施された火山灰上走行実験によって、降灰の交通への影響を評価する上で重要な知見が得られた。③避難・救助支援コンテンツにおいては、那須岳などの登山者の動向把握のための可視化ツールが改修された。また、登山者などの待避壕や避難小屋の耐衝撃実験が継続され、それら構造物の噴石に対する強度評価が可能になった。また、居住区域での火山災害避難シミュレーションの可能性とその評価の仕方について検討した。これらの成果を踏まえ、令和4年度までに情報ツール試作版の高度化をさらに進め、令和5年度以降の防災現場での活用を目指したい。

(d) 引用文献

- 1) 火山防災強化推進都道県連盟、
<https://www.pref.yamanashi.jp/shinchaku/kazan/0107/kazanrenmeiseturitu.html>
- 2) 火山防災強化市町村ネットワーク、
https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/kazan/kazanbousaikyokasityouson_network.html
- 3) 国土交通省、GIS ホームページ、<https://nlftp.mlit.go.jp/index.html>
- 4) e-Stat、地図で見る統計、<https://www.e-stat.go.jp/>
- 5) 国土交通省 国土地理院、基盤地図情報サイト、<https://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 6) 国土交通省 気象庁、全国の活火山の活動履歴等、
https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/vol_know.html#rireki
- 7) 山梨県 富士山火山防災対策協議会：富士山ハザードマップ（令和3年3月改定）、<https://www.pref.yamanashi.jp/kazan/hazardmap.html>
- 8) 日本建築学会火山災害対策特別調査委員会、2018、「火山災害対策特別調査委員会」活動報告書、日本建築学会
- 9) 諏訪仁、野畑有秀、大塚清敏、久保智弘、宮村正光、宮城洋介：降灰荷重による建物屋根の被害確率関数、日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集、2020
- 10) 建築行政情報センター、日本建築防災協会：2015年版建築物の構造関連技術基

準解説書、全国官報販売協同組合、2015

- 11) 社会資本整備審議会 建築分科会 建築物等事故・災害対策部会：建築物の雪害対策について報告書、2014 年 10 月
- 12) 日本医療福祉設備協会 規格・指針委員会：日本医療福祉設備協会企画 病院設備設計ガイドライン(BCP 編)、2012.12 より引用
- 13) Yang, Q. and Bursik, M. (2016) A new interpolation method to model thickness, isopachs, extent, and volume of tephra fall deposits. Bull. Volcanol., 78(10):68
- 14) 小山真人・早川由紀夫 (1996) 伊豆大島火山カルデラ形成以降の噴火史。地学雑誌、105 (2), 133-162 doi.org/10.5026/jgeography.105.2_133
- 15) 御嶽山降灰合同調査班 (2014) 御嶽山 2014 年 9 月 27 日噴火による降灰分布。火山噴火予知連絡会会報、119 号、96-101。
- 16) Yang, Q., Bursik, M. I., and Pitman, E. B. (2018) A new method to identify the vent location of tephra fall deposits based on thickness or maximum clast size measurements (SVL). <https://vhub.org/resources/4377>
- 17) Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada Volcano. Bull. Earthq. Res. Inst., 60, 507-592.
- 18) 上澤真平・土志田潔・竹内晋吾・三浦大助 (2019) 我が国の降下火山灰データベースを用いた確率論的降灰ハザード評価 (jst.go.jp)。2019 年火山学会予稿集、B3-02, https://doi.org/10.18940/vsj.2019.0_86
- 19) Uesawa, S., Toshida, K., Takeuchi, S. and Miura, D. (2020) Probabilistic assessment of tephra fall hazards in Japan using a tephra fall distribution database. 11 February 2020, PREPRINT (Version 1) available at Research Square, <https://doi.org/10.21203/rs.2.23106/v1>
- 20) 山田浩之, 立山耕平, 本多亮, 吉本充宏, 藤井敏嗣, 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, 64, p.243-251.
- 21) 山田浩之, 佐々木寿, 成毛志乃, 小笠原永久, 2016, 噴石衝突実験による鉄筋コンクリートシェルターの安全性検討、日本火山学会講演予稿集、B2-09

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(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

(4) 令和4年度の業務計画案

令和4年度は、令和2年度から4年度までの第2期の最終年度に当たる。令和4年度は高度化中の情報ツール、3コンテンツ試作版についてさらに高度化を進める。

(a) 業務計画、実施方法

業務として、以下の4項目の内、特に、前3項目について実施する。

①周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

本年度は中間報告年度であることを鑑み、これまでに開発してきた周知啓発教育用コンテンツ試作版を高度化する。昨年度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、動画や写真などのデジタルコンテンツと災害対応の記録等をコンテンツとして掲載する。また、引き続き火山ごとに情報を整理するとともに対象火山の情報や避難確保計画に関する情報を容易に調べることができるようにするとともに、火山灰対策に関する情報を整理してコンテンツに加える。いくつかの火山防災協議会における検討資料も公開可能なものを掲載する。さらに、引き続き、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、さらなる高度化のために、引き続きニーズや課題をアンケート調査などから把握する。

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、火山防災に関して防災関係機関へのヒアリング、ディスカッション等を実施する。

②降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

本年度は中間報告年度であることを鑑み、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。昨年度までに実施してきた降灰による建築物の損傷・被害に関する降灰深の閾値評価や建物空調設備およびフィルター被害の結果を含めて建物機能被害評価法を再検討し、都市部への降灰被害予測コンテンツの改善を実施する。今年度は降灰による屋根への影響評価事例を増やすことで、要因となるパラメータを整理する。また都市部における積灰空間分布を確認するため、数値シミュレーションにより建物が積灰分布にどのような影響を及ぼすか街区での積灰空間分布の検討を行う。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。

昨年度、伊豆大島火山における過去1500年間の降灰量データを用いて実施した降灰ハザード評価に引き続いて、他の活火山地域においても降灰ハザード評価が可能かどうかを検討し、降灰の被害評価法の結果と合わせて降灰予測コンテンツの中身とすべく整備する。

③避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

本年度は中間報告年度であることを鑑み、これまでの富士山、御嶽山、那須岳における登山者動態データの分析を行い、可視化ツールを用いた登山者動態解析結果の防災利用について関連自治体へ提案する。そのために、これまでに収集したデータを用いて、避難計画に必要な登山者の移動速度について検討を行う。また、今年度実施される御嶽山における登山者動向把握実験に協力し、そこで得られたデータも分析に用いる。

さらに、前年度に引き続き、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、今年度は鉄筋コンクリート造建築物へ模擬火山岩塊を使用した衝突実験を実施する。

また、海外における最近の火山災害対応をタイムラインとしてまとめ、我が国における火山災害対応と情報発信のあり方の考え方をまとめる。さらに、昨年度の避難シミュレーションにおける避難経路や段階的避難の考え方の検討を踏まえて、次のステップとして、火山災害イベントツリーの整理に着手し、火山ハザード現象と想定される災害事象と空間・時間の整理を行い、後年度の避難シミュレーション実施の計画立案を行う。

④自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。

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、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画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あるいは緊急観測に協力することを可能とする。

(b) 目標とする成果

本年度中に高度化を進める情報ツール、3コンテンツ試作版については、平成5年度以降に社会実装の段階に移行する。試作版の高度化と社会実装には大きな段差がある訳ではないが、これまでのように基礎的な情報素材の収集を行うのではなく、自治体の防災担当者や火山防災協議会に加わる専門家、さらには、インフラ関係者に実際に活用してもらい、使い勝手や過不足について修正を行うステージになる。そのため、情報の出し方についても防災研究者や現場と連携していく必要があり、令和5年度以降の社会実装ステージに移行できると考えられる。

3. 会議録

(1) 課題 D 全体

日時：2021 年 7 月 5 日 13:00-14:00

場所：オンライン

内容：進捗状況打ち合わせ会議

（その他、課題責任者間ではメールによる意見交換を多頻度で実施した。）

(2) サブテーマ 2

日時：2021 年 12 月 21～22 日

場所：TKP ガーデンシティ 鹿児島中央

内容：令和 3 年度の研究進捗状況について

(3) サブテーマ 3

日時：2021 年 6 月 11 日 10:00-12:00

場所：オンライン

内容：第 1 回打ち合わせ会議（令和 3 年度の予定について）

日時：2021 年 8 月 27 日 13:00-15:00

場所：オンライン

内容：第 2 回打ち合わせ会議（令和 3 年度の進捗状況について）

日時：2021 年 11 月 24 日 10:30-12:00

場所：オンライン

内容：第 3 回打ち合わせ会議（令和 3 年度の進捗状況について）

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、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研究技術の開発を実施している。本年度は、7年目評価の前年にあたり、課題Dのそれぞれのサブテーマが着地点を意識した研究を実施した。各サブテーマが自ら立てた研究計画に沿って順調に進んでいると考えられる。

サブテーマ1では、RTK-GNSS搭載UAVにより基準点の無設置で三次元モデル作成が可能となった。また、約2km離れた地点から、可視光と熱赤外の画像から任意地点の位置情報や温度情報を取得することができた。さらに、市販ソフトウェアDJI Terraの導入によって、UAV飛行と同時に三次元処理が可能となり、これまでの約1/8程度の時間で3Dモデルを作成することができた。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、取得したデータの自治体等との共有について具体的な連携を進める必要がある。

サブテーマ2では、火山灰拡散シミュレーションの連続化のための技術検討により、令和4年度にデータのオンライン化をベースとするシミュレーターの連続化の実装の目途が立った。これまで、実施してきたリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、火山灰拡散予測の高速化技術開発、火山灰拡散予測の高精度化技術開発は令和3年度の研究により、さらに高度化され、その一部の成果は連続化シミュレータの設定条件とシミュレーション結果の検証に組み込むことができる。

サブテーマ3では、周知啓発・教育用コンテンツに関しては、自治体関係者のニーズに対応し、災害対応、火山灰上走行実験などの動画を追加した。防災社会分野と連携してインフラ関係会社のニーズ把握を行った。降灰被害予測コンテンツでは、建物による降灰挙動を評価することの必要性把握するとともに、降灰データから分布図を自動描画する手法を検討した。火山灰上走行実験から降灰時の交通への影響の知見を得た。さらに、避難・救助支援コンテンツでは、登山者動向把握可視化ツールを改修し、噴石への耐衝撃実験から登山者用待避壕の強度評価を行った。令和5年度以降の防災現場でのこれら情報ツールの活用を目指す。

このほか、本課題内における連携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進められている。

様式第 2 1

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	発表した時期	国内・外の別
		（学会等名）		
UAVによる微地形測量 伊豆大島裏砂漠での風食量計測（口頭発表）	千葉達朗・佐々木寿・森貴章・望月拓実	日本火山学会2021年度秋季大会（オンライン大会）	2021年10月	国内
機械学習を用いた噴石着弾痕の自動抽出の検討（ポスター発表）	佐々木寿・小宮佑登・野中秀樹・千葉達朗	日本火山学会2021年度秋季大会（オンライン大会）	2021年10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	発表した時期	国内・外の別
		（学会誌・雑誌等名）		
コラム 火山とドローン	佐々木寿	地盤工学委員会火山工学研究小委員会編「噴火災害に備えて～火山工学の視点から避難等の対応を分かりやすく解説～」、35ページ	2022年3月	国内

様式第 2 1

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
PUFF Model Prediction of Volcanic Ash Plume Dispersal for Sakurajima Using MP Radar Observation (口頭)	田中博・中道治久・井口正人	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月	国内
Numerical simulation of wind flow around Sakurajima with eruption (口頭)	丸山敬・井口正人・小宮拓海	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月	国内
降下火山灰粒子のレーダ気象学的研究 (口頭)	真木雅之	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月	国内
火砕物供給関数の推定に向けて：火砕物の到達高度	鈴木雄治郎	日本火山学会秋季大会	2021年10月	国内
阿蘇中岳2021年10月20日噴火の3次元数値シミュレーション	鈴木雄治郎	日本火山学会秋季大会	2021年10月	国内
Weather radar observations of volcanic eruption clouds (口頭)	Masayuki Maki	International Conference on Weather Forecast and Hydrological Application of Radar	2021年11月	国外
粒径分布観測データに基づく降灰量推定式 (口頭)	真木雅之・井口正人	桜島大規模火山噴火総合研究グループ研究集会	2021年12月	国内
桜島火山のレーダ降灰量分布のデータベース化 (口頭)	真木雅之・中道治久・井口正人	京都大学防災研究所研究発表講演会	2022年2月	国内
Benefits of high-resolution downscaling experiments for assessing strong wind hazard at local scales in complex terrain (口頭)	Tetsuya Takemi	AOGS 18th Annual Meeting (AOGS2021) Virtual Conference	2021年8月	国外

[illegible]

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
Atmospheric vertical velocity – a crucial component in understanding proximal deposition of volcanic ash	Poulidis, A. P., Biass, S., Bagheri, G., Takemi, T., Iguchi, M.	Earth and Planetary Science Letters	2021/7/15	国外
Characteristics of particle size distributions of falling volcanic ash measured by optical disdrometers at the Sakurajima volcano, Japan	Maki, M., R. Takaoka, M. Iguchi	Atmosphere	2021年5月	国外
Visualizing weather radar data from volcanic eruption clouds	Maki, M., Y. Kim	Data in Brief	2021年9月	国外
The impact of topography on the initial error growth associated with moist convection	Wu, P.-Y., Takemi, T.	SOLA	2021年7月	国内
Automatic onsite imaging of volcanic ash particles with VOLCAT: Towards quasi-real-time eruption style monitoring	Takahiro Miwa, Nobuo Geshi, Jun'ichi Itoh, Toshikazu Tanada, Masato Iguchi	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2021年8月	国外
Estimating the velocity of pyroclastic density currents using an operational dual-PRF radar	Magfira Syarifuddin, Susanna F. Jenkins, Benoit Taisne, Satoru Oishi, Ahmad Basuki, Masato Iguchi	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2022年4月	国外
In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan	Kosei Takishita, Alexandros P. Poulidis, Masato Iguchi	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2022年1月	国外

Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, as revealed by non-eruptive deflation	Masato Iguchi, Taishi Yamada, Takeshi Tameguri	Frontiers in Earth Science	2022年3月	国外
Aerodynamic characteristics and genesis of aggregates at Sakurajima Volcano, Japan	Diaz Vecino, M. C., Rossi, E., Freret-Lorgeril, V., Fries, A., Gabellini, P., Lemus, J., Pollastri, S., Poulidis, A. P., Iguchi, M., Bonadonna, C.	Scientific Reports	2022年2月	国外
桜島の火山災害と噴火予測のための観測研究	為栗健	想林	2021年5月	国内
船舶レーダによる桜島火山の噴煙柱モニタリングー2018年の観測結果ー	真木雅之・西隆・Kim Yura・井口正人・為栗健・藤吉康志・徳島秀彦・佐藤英一・海賀和彦・林大介・長屋勝博・高松政彦・山路昭彦	船舶レーダによる機動的火山噴火監視技術の確立と火山防災への利用, 30G-01	2021年12月	国内
X-Band 固体化船舶レーダの火山灰観測への適用	西隆昭・真木雅之・小堀壮彦・遠藤寛治・海賀和彦・井口正人	船舶レーダによる機動的火山噴火監視技術の確立と火山防災への利用, 30G-01	2021年12月	国内
1955年以降の桜島南岳活動期の火山災害	井口正人・山田大志	京都大学防災研究所年報	2021年10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。

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「火山災害対策のための情報ツールの開発」
機関名:国立研究開発法人 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	発表した時期	国内・外の別
		(学会等名)		
建物設備吸気口への火山灰流入に対する粒子慣性力影響(ポスター)	大塚 清敏、野畑 有秀、諏訪 仁、久保 智弘、宮城 洋介、宮村 正光	地球惑星科学連合2021大会(オンライン)	2021年5月	国内
木造建築物屋根の噴石衝突安全に関する実験的検討(ポスター)	立山 耕平、山田 浩之、本多 亮、久保 智弘、吉本 充宏	地球惑星科学連合2021大会(オンライン)	2021年5月	国内
試作版周知啓発用コンテンツの改良(ポスター)	久保 智弘、吉本 充宏、宮城 洋介、本多 亮、石峯 康浩	地球惑星科学連合2021大会(オンライン)	2021年5月	国内
那須岳における登山者動向把握実験(口頭)	宮城 洋介、吉本 充宏、石峯 康浩、本多 亮、久保 智弘	地球惑星科学連合2021大会(オンライン)	2021年5月	国内
那須岳における登山者動向把握実験(ポスター)	宮城洋介、吉本充宏、石峯康浩、久保智弘、本多亮、田中義朗	地球惑星科学連合2021大会(オンライン)	2021年6月	国内
火山岩塊による山小屋への影響に関する研究(口頭)	久保智弘、吉本充宏	2021年度日本建築学会大会	2021年9月	国内
エアフィルタに関する降灰実験(口頭)	大塚 清敏、野畑 有秀、諏訪 仁、久保 智弘、宮城 洋介、宮村 正光	2021年度日本建築学会大会	2021年9月	国内
投出岩塊衝突に対する被覆人工軽石の衝撃吸収効果に関する検討(口頭)	吉本充宏・久保智弘、本多 亮・西澤達治、立山耕平・木村 陸・山田浩之	日本火山学会2020年度秋季大会(オンライン)	2021年9月	国内
富士山チャレンジデータを活用した登山者動態データ分析ー勾配と登山及び下山にかかる時間の検討ー(口頭)	久保 智弘、吉本 充宏、本多 亮、宮城 洋介、田中義朗	日本火山学会2021年度秋季大会(オンライン)	2021年10月	国内
試作版周知啓発用コンテンツのアンケート調査について(ポスター)	久保 智弘、吉本 充宏、宮城 洋介	日本火山学会2021年度秋季大会(オンライン)	2021年10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	日本火山学会2021年度秋季大会(オンライン)	2021年10月	国内
Recent volcanic activity in Japan and Geoparks (口頭)	Setsuya Nakada	International Webinar on Earth Sciences, by State Islamic University of Mataram	2021年11月	国外
Human-induced hazard vs. natural hazard: microplastic and volcanic pumice drifting in the sea (口頭)	Setsuya Nakada	9th International Conference on UNESCO Global Geoparks (Jeju)	2021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
Rapid alteration of fractured volcanic conduits beneath Mt Unzen	Tim I. Yilmaz, Fabian B. Wadsworth, H. Albert Gilg, Kai-Uwe Hess, Jackie E. Kendrick, Paul A. Wallace, Yan Lavallée, James Utley, Jérémie Vasseur, Setsuya Nakada, Donald B. Dingwell	Bulletin of Volcanology	2021年5月	国外
Measurement of Aerodynamic Characteristics Using Cinder Models through Free Fall Experiment	Meizhi Liu, Takashi Maruyama, Kansuke Sasaki, Minoru Inoue, Masato Iguchi, Eisuke Fujita	Atmosphere	2021年5月	国外
火山災害対応における認知バイアスを克服するための訓練ツール	今野 裕三, 高島 帆風, 小檜山 雅之, 吉本 充宏, 久保 智弘	地域安全学会論文集	2021年9月	国内
2014年御嶽山噴火災害発生時のTwitterデータ分析	宮城洋介、藤田英輔	自然災害科学	2021年11月	国内
Intermittent Growth of a Newly-Born Volcanic Island and Its Feeding System Revealed by Geological and Geochemical Monitoring 2013–2020, Nishinoshima, Ogasawara, Japan	Fukashi Maeno, Atsushi Yasuda, Natsumi Hokanishi, Takayuki Kaneko, Yoshihiko Tamura, Mitsuhiro Yoshimoto, Shun Nakano, Akimichi Takagi, Minoru Takeo, Setsuya Nakada	Frontiers in Earth Science	2021年12月	国外
Increment in the volcanic unrest and number of eruptions after the 2012 large earthquakes sequence in Central America	Gino González, Eisuke Fujita, Bunichiro Shibasaki, Takumi Hayashida, Giovanni Chiodini, Federico Lucchi, Izumi Yokoyama, Karoly Nemeth, Raúl Mora-Amador, Aaron Moya, Gustavo Chigna, Joan Martí, Dmitri Rouwet	Scientific Reports	2021年12月	国外
Episode 4 (2019–2020) Nishinoshima activity: abrupt transitions in the eruptive style observed by image datasets from multiple satellites	Takayuki Kaneko, Fukashi Maeno, Mie Ichihara, Atsushi Yasuda, Takao Ohminato, Kenji Nogami, Setsuya Nakada, Yoshiaki Honda, Hiroshi Murakami	Earth, Planets and Space	2022年2月	国外
噴出物による直接的災害	中田節也	日本自然災害学会編「自然災害科学・防災の百科事典」	2022年2月	国内
噴火のエネルギーと規模	中田節也	日本自然災害学会編「自然災害科学・防災の百科事典」	2022年2月	国内
火山噴火に対する意識:「登山者」と首都圏住民へのアンケート調査をもとに,	安本真也・関谷直也	東京大学大学院情報学環紀要情報学研究・調査研究編, No.38, 39–77	2022年3月	国内

学 会 等 発 表 実 績(その2)

委託業務題目「火山災害対策のための情報ツールの開発」
機関名:国立研究開発法人 防災科学技術研究所

3. その他の講演会・展示会・シンポジウム等

	内容	発表者	対象と場所	年月日
1	富士山ハザードマップの改定について	吉本充宏	山梨県内の報道関係者, NHK甲府放送局	2021/4/17
2	富士山ハザードマップについて	吉本充宏	山梨県河川砂防管理担当学会議, 山梨県防災新館	2021/4/20
3	火山噴火とその災害	吉本充宏	山梨県消防学校上級幹部科, 山梨県消防学校	2021/4/23
4	富士山噴火特徴とハザードマップ	吉本充宏	山梨県災害警備専科入校生, 山梨県警察学校	2021/5/13
5	富士山噴火特徴とハザードマップ	吉本充宏	山梨県消防学校 幹部(係長クラス)	2021/5/19
6	火山としての富士山 地域社会にできる連携と備え	吉本充宏	南都留地区社会教育委員連絡協議会, 忍野村生涯学習センター	2021/5/20
7	ハザードマップ改定について	吉本充宏	富士吉田市住民説明会	2021/5/22
8	富士山噴火特徴とハザードマップ	吉本充宏	富士吉田署警備課職員, 山梨県富士山科学研究所	2021/5/24
9	ハザードマップの改定について	吉本充宏	山梨県の報道関係者, NHK甲府放送局	2021/5/29
10	ハザードマップの改定について	吉本充宏	コアグループ会議, 都道府県会館	2021/6/2
11	富士山ハザードマップ改定について～的確に避難するために～	吉本充宏	富士河口湖町小中学校PTA連合会, 勝山ふれあいセンター	2021/6/2
12	富士山ハザードマップ改定について	吉本充宏	山中湖村村民, 山中湖村	2021/6/08
13	富士山ハザードマップ改定について	吉本充宏	西桂町区長他, 西桂町役場	2021/6/18
14	富士山噴火に備えて 火山ハザードマップとその活用法	吉本充宏	山梨県職員新任職員, 山梨県防災新館	2021/7/13
15	火山としての富士山とその災害	吉本充宏	日本地すべり学会関東支部, オンライン	2021/8/10
16	富士山噴火とその災害	吉本充宏	富士吉田警察署, 富士吉田警察署	2021/9/8
17	吉本充宏, 火山噴火とその災害	吉本充宏	小金井市市民及び職員, 小金井市民公民館東分館	2021/10/12
18	富士山が噴火したときの行動を考えよう!	吉本充宏	富士吉田市PTA連合会, 山梨県富士山科学研究所	2021/10/17

19	富士山が噴火したときの行動を考えよう！	吉本充宏	富士河口湖町教員，勝山小学校	2021/10/28
20	火山噴火とその災害	吉本充宏	中部地方整備局砂防事業担当者会議，富士山科学字研究所	2021/11/1
21	自然災害を考える～地震、火山噴火を中心に～	久保智弘	小金井市市民及び職員，小金井市民公民館東分館	2021/11/10
22	富士山の噴火に備えて	吉本充宏	富士吉田市立吉田中学校PTA，富士吉田市立吉田中学校	2021/11/13
23	富士山の火山防災対策	吉本充宏	東京大学大学院情報環総合防災情報研究センター，東京大学本郷キャンパス	2021/11/15
24	火山灰体制路面における車両走行実験	吉本充宏	コアグループ会議，山梨県富士山科学研究所	2021/11/17
25	富士山噴火とその災害	吉本充宏	県警本部警備部警備第3課，山梨県警察学校	2021/11/26
26	富士山の噴火に備える	吉本充宏	NPOかわさき市民アカデミー，川崎市生涯学習プラザ	2021/12/9
27	富士山の噴火と災害の特徴	吉本充宏	(一社)山梨県建設コンサルタンツ協会，山梨県立文学館	2021/12/16
28	富士山の噴火に備えて～過去から学ぶもの～	吉本充宏	山梨県PTA，ふじさんホール	2021/12/19
29	吉本充宏，富士山の噴火に備えて	吉本充宏	都留文科大学学校教育学科地学ゼミ学生，都留文科大学	2021/12/24
30	火山噴火とその災害	吉本充宏	那須観光事業者向けセミナー，那須町文化センター	2022/1/14
31	富士山の火山噴火とその災害	吉本充宏	富士吉田市防災士会，山梨県富士山科学研究所	2022/1/15
32	富士山における噴火、防災、減災などについて+B33	吉本充宏	国立公園満喫プロジェクト，オンライン	2022/1/27
33	火山灰・スコリア堆積路面における走行車両走行性能実験～荒廃した道路で自家用車は使えるのか？	西澤達治	山梨県富士山科学研究所令和3年度研究成果発表会（オンライン公開）	2022/2/26
34	富士山の噴火に備えて	吉本充宏	富士見台中学校生徒及び保護者、教員，富士見台中学校	2022/3/15
35	富士山噴火とその影響	吉本充宏	関東地方非常通信協議会，山梨県富士山科学研究所	2022/3/25

4. マスメディア（テレビ、新聞等）

	内容	発表者	媒体名と場所	年月日
1	富士山噴火正しく避難を	富士山研	山梨日日新聞朝刊	2021/5/23
2	「富士山噴火 備えが重要」	富士山研	読売新聞朝刊	2021/5/23
3	富士山噴火 被害学ぶ	富士山研	朝日新聞朝刊	2021/6/7
4	前進！やまなし，富士山ハザードマップ改定	富士山研	YBSテレビ	2021/7/12
5	Mt. Fuji' s Threat to Tokyo	富士山研	NHK WORLD-JAPAN, 「BOSAI」	2021/7/17
6	富士山の噴火マップ	富士山研	山梨日日新聞朝刊	2021/9/23
7	もしも富士山が噴火したら…正しく備える火山防災	富士山研	tvk（テレビ神奈川），カナフルTV（神奈川県 広報）	2021/9/26
8	富士山のギザギザには知られざる魅力がいっぱい！“境目の面白さ”を知る富士山博士！	富士山研	YBSラジオ，ワイルド鑑定団	2021/10/15
9	近隣避難も渋滞ネック 富士山噴火訓練 想定2倍の時間 観光地 移動に課題	富士山研	山梨日日新聞朝刊	2021/11/28
10	富士山噴火を想定した体験会 火山灰走行実験	富士山研	山梨日日新聞朝刊	2021/11/30
11	PTA役員らが富士山噴火学ぶ	富士山研	山梨日日新聞朝刊	2021/12/20
12	「がんこちゃんと学ぶ富士山噴火」	富士山研	NHK甲府，NHKヤマナシ・クエスト	2022/1/14
13	富士山が噴火したらどうなるのか？がんこちゃんと学ぶ富士山噴火	富士山研	NHK甲府，NHKニュースかいドキ	2022/1/14
14	富士山「正しく避難」へ備えを	富士山研	山梨日日新聞	2022/1/16
15	富士山噴火に備える 甲府放送局の取り組み	富士山研	N H K	2022/1/24
16	もしもで考える…なるほど！納得塾」，富士山噴火とその備え	富士山研	BSフジ	2022/2/19
17	富士山の火山防災対策	富士山研	YBSラジオ	2022/2/25
18	富士山噴火 新しい避難計画の中間報告 住民の避難は原則「徒歩」の方針示す	富士山研	N e w s かいドキ	2022/3/30
19	逃げ遅れ回避のために	富士山研	山梨日日新聞	2022/3/31