

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

平成 31 年度

成果報告書

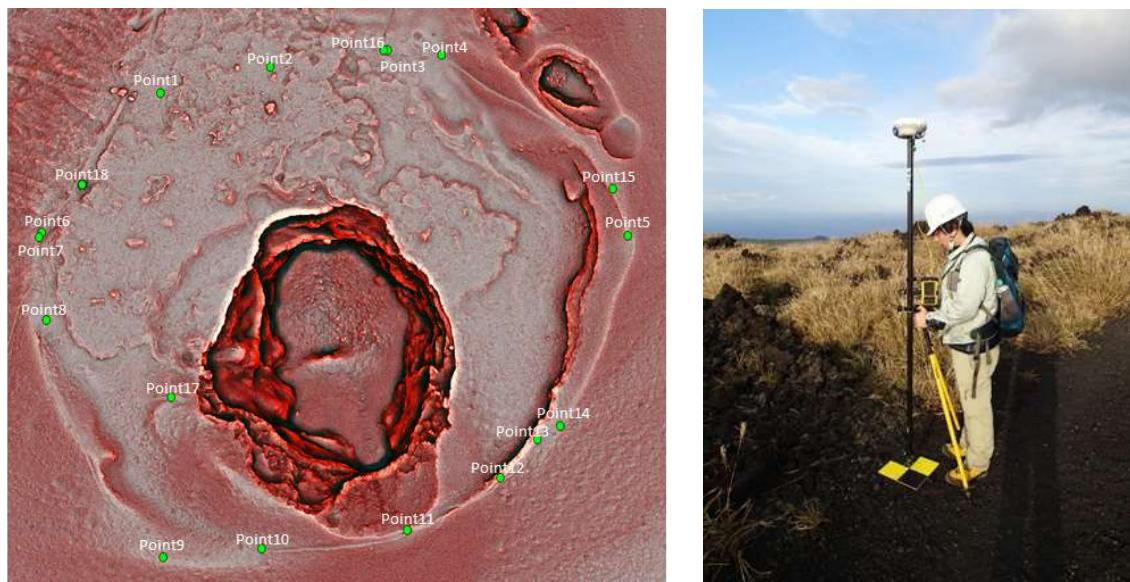
令和 2 年 6 月

文部科学省研究開発局

国立研究開発法人 防災科学技術研究所

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が実施した平成31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。

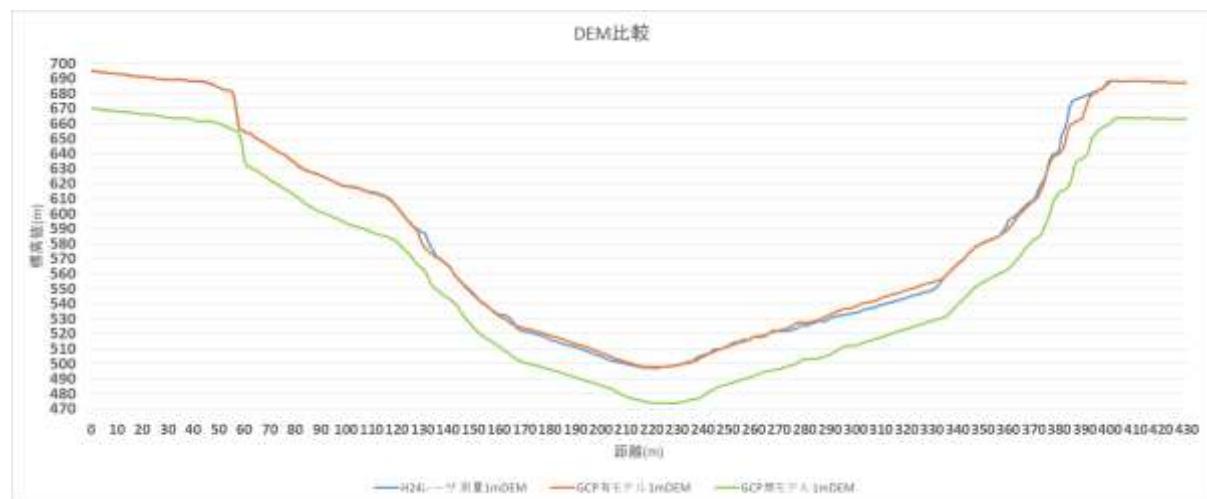
課題 D サブテーマ 1：無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発



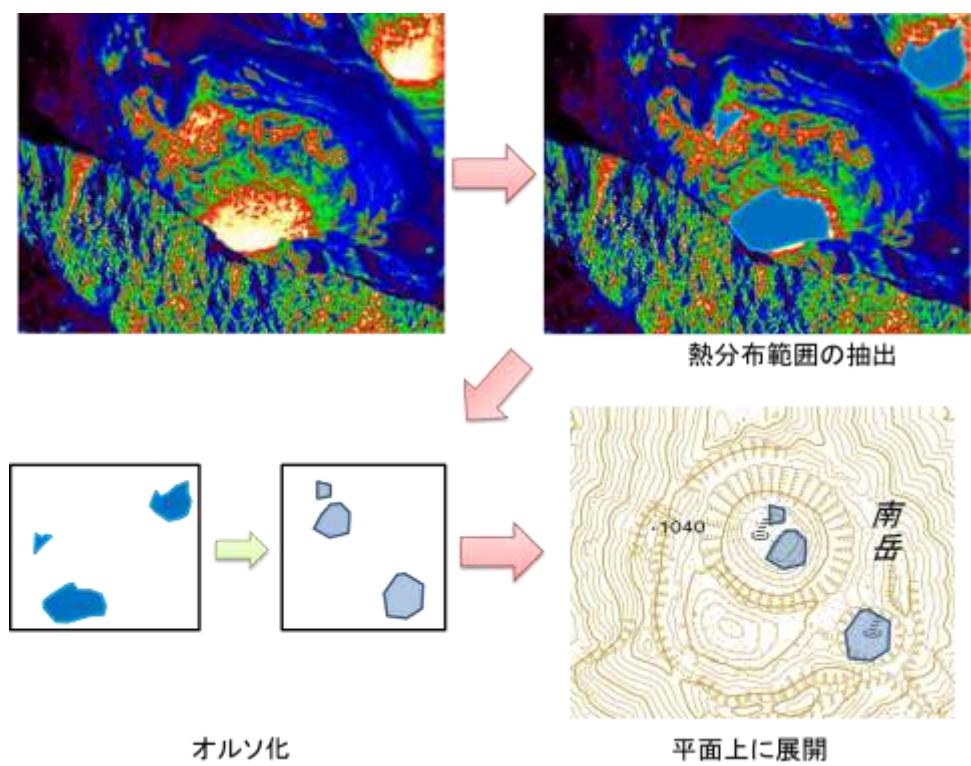
実証実験を実施した伊豆大島で作成された 3D モデルから得られた赤色立体地図(左)と、GCP として使用した対空標識における RTK-GPS 測位の様子。

GCPNo	11	12	13	14	15	16	21	22	RMS[m]
標高値[m](GCPなし)	716.81	702.24	695.66	696.29	716.70	655.79	677.41	666.12	-
標高値[m](GCPあり)	743.58	728.13	721.36	722.15	739.86	678.79	703.71	689.97	-
取得したGCP標高値[m]	743.42	728.13	721.32	722.21	739.68	678.81	703.98	689.96	-
標高値較差[m](GCPなし)	26.61	25.89	25.66	25.92	22.98	23.02	26.57	23.84	24.96
標高値較差[m](GCPあり)	0.16	0.00	0.04	0.06	0.18	0.02	0.27	0.02	0.10

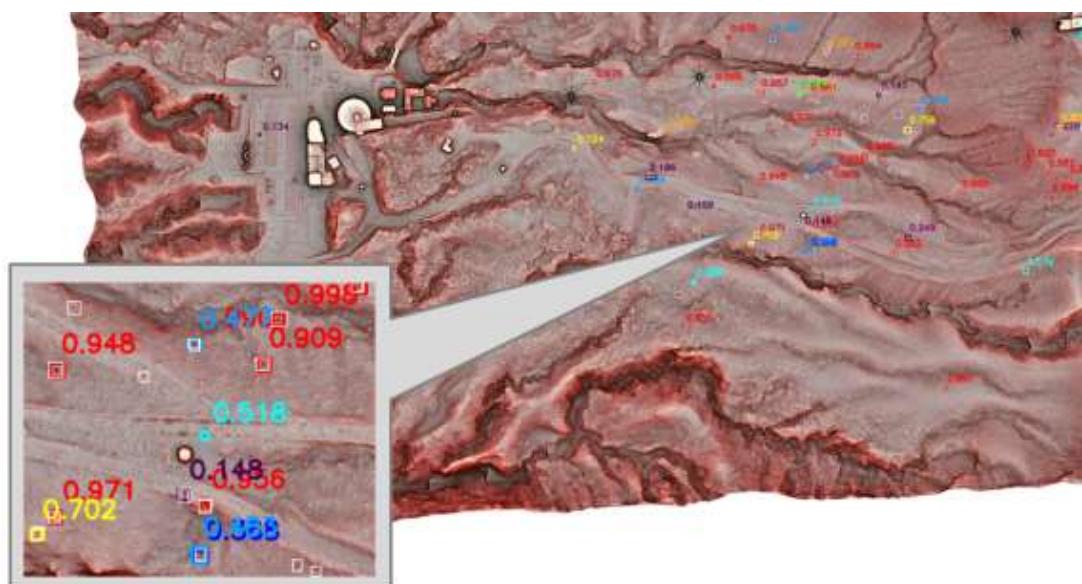
GPS 有／無モデルデータから得られた標高値と実際に取得した標高値の較差と各較差の RMS (一部抜粋)。



過去（平成 24 年）実施されたレーザ測量による DEM と今回得られた GCP 有モデル及び GCP 無モデルによる DEM の比較結果。



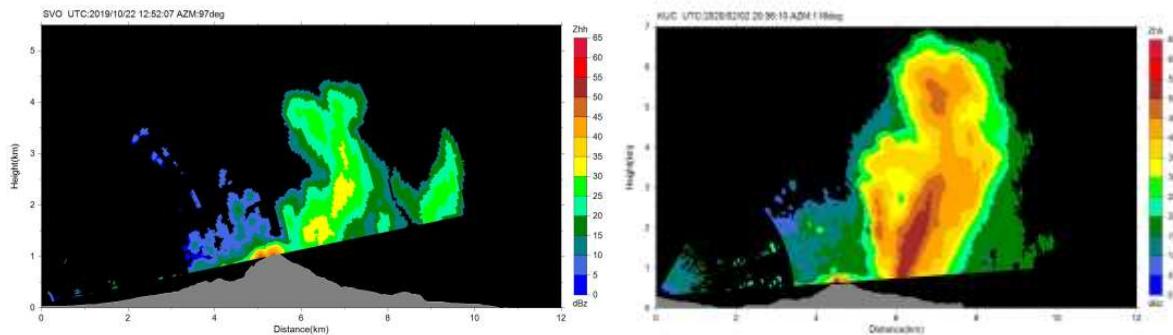
熱赤外画像を用いた熱分布範囲の自動抽出手法の検討。



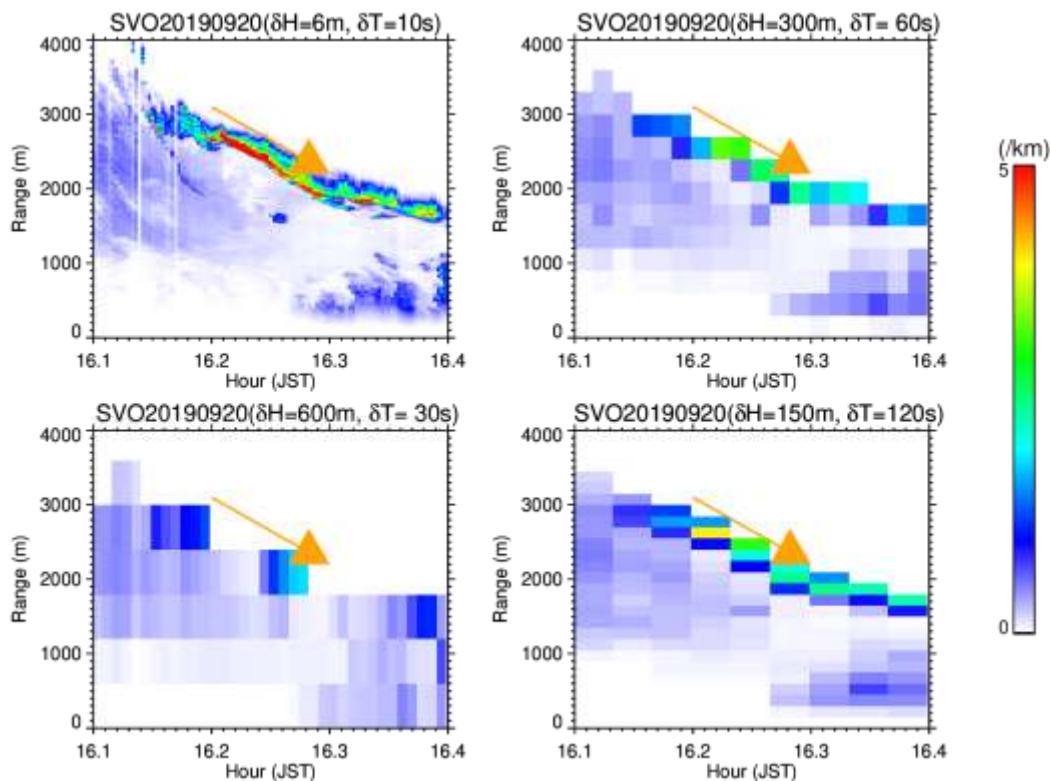
凡 例	手動判読結果	自動判読結果(信頼度)
<input type="checkbox"/> : 手動判読	<input type="checkbox"/> : 90%以上	<input type="checkbox"/> : 50-60%
	<input type="checkbox"/> : 80-90%	<input type="checkbox"/> : 40-50%
	<input type="checkbox"/> : 70-80%	<input type="checkbox"/> : 30-40%
	<input type="checkbox"/> : 60-70%	<input type="checkbox"/> : 20-30%

物体検出手法による、阿蘇火口周辺の噴石痕の自動検出結果。

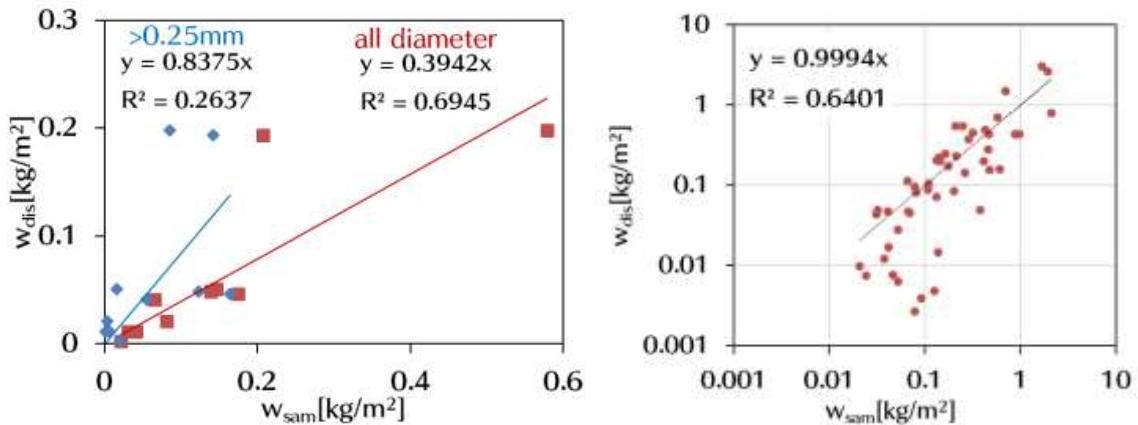
課題 D サブテーマ 2：リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発



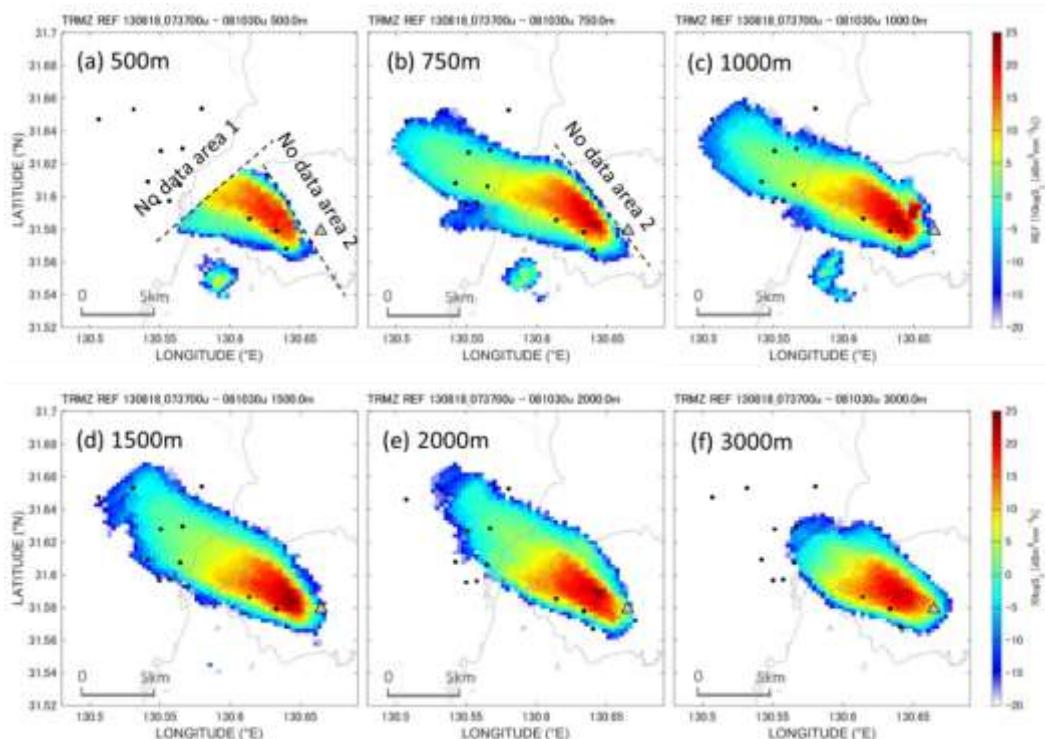
(左) 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2019/10/22 21:46 の爆発の例。(右) 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2020/2/3 5/31 の噴火の例。気象庁が噴煙高度不明、もしくは雲入りにより最高到達度が不明とした噴火において、噴煙を捉えることができた。



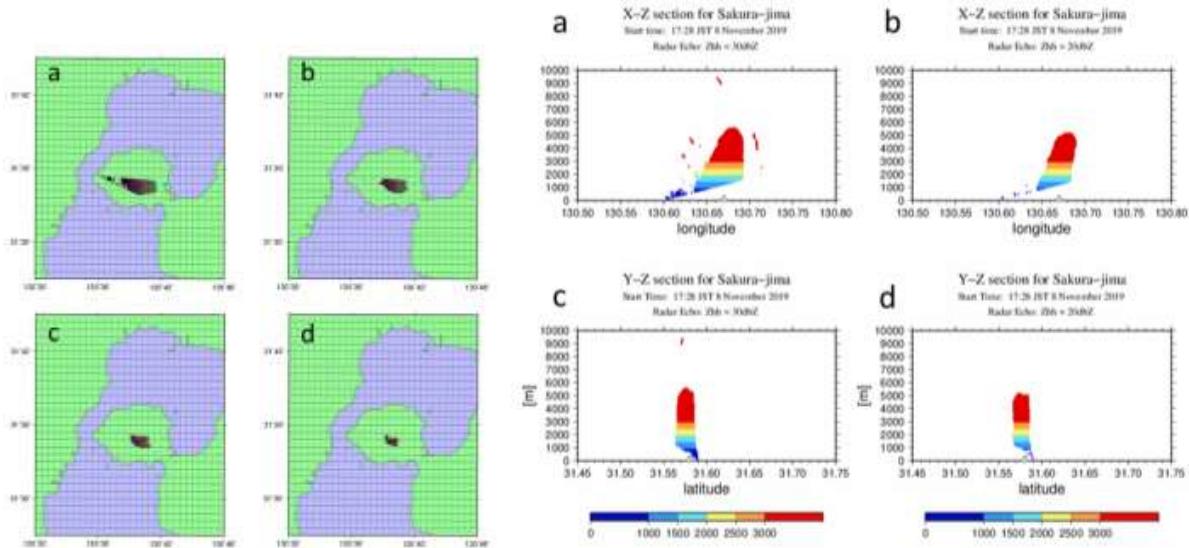
2019年9月20日16時06分から同24分までの本館ライダーによって推定されたエアロゾル消散係数の時間・距離分布。(左上)オリジナル分解能(距離分解能 $\delta H=6\text{m}$ 、時間分解能 $\delta T=10\text{秒}$)、(右上)データ量を300分の1にした場合($\delta H=300\text{m}$ 、 $\delta T=60\text{秒}$)、(左下)時間分解能を優先した場合($\delta H=600\text{m}$ 、 $\delta T=30\text{秒}$)、(右下)空間分解能を優先した場合($\delta H=150\text{m}$ 、 $\delta T=120\text{秒}$)。オレンジ矢印は9km/hで手前に進行する速度を示す。



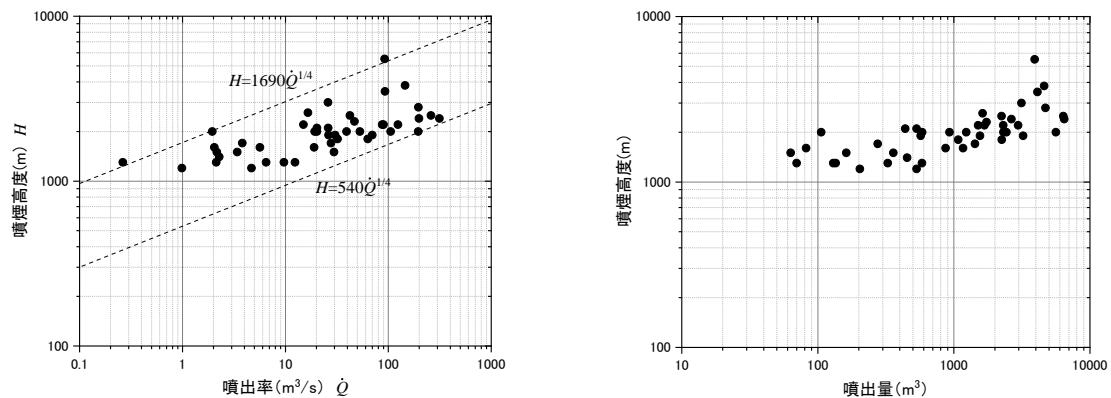
(左) 火山灰の実地観測から得られた降灰量とディスドロメータから得られた降灰量の関係。(右) 2017年5月～2019年10月期間の59イベントにおいて採取された火山灰の重量から求めた降灰量と、同時間帯に観測されたディスドロメータの観測値から経験的な式により計算された降灰量の相関。計算値は実測値の約0.1～2.3倍と推定される。



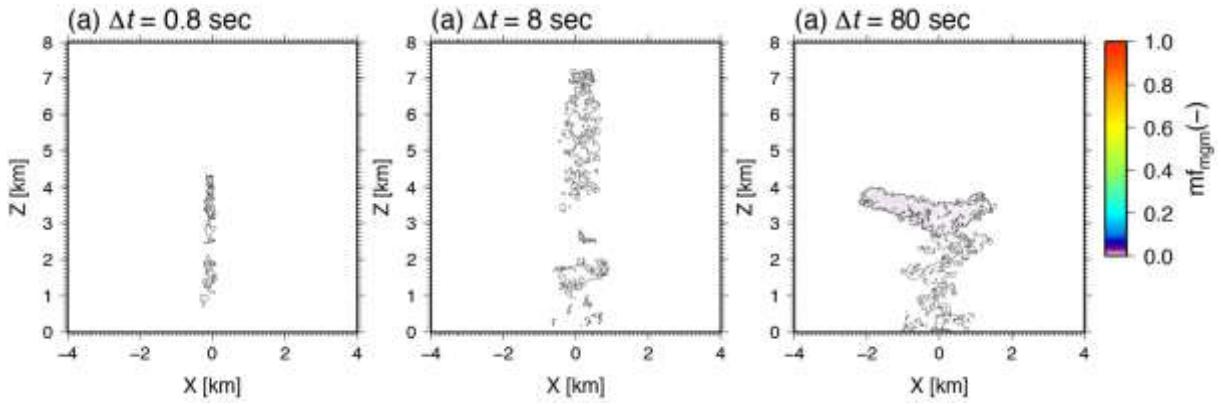
2013年8月18日桜島昭和火口からの噴火を垂水市に設置された国交省XMPレーダで観測した結果から得られた、高度500mから3000mまでの時間積算降灰量分布。



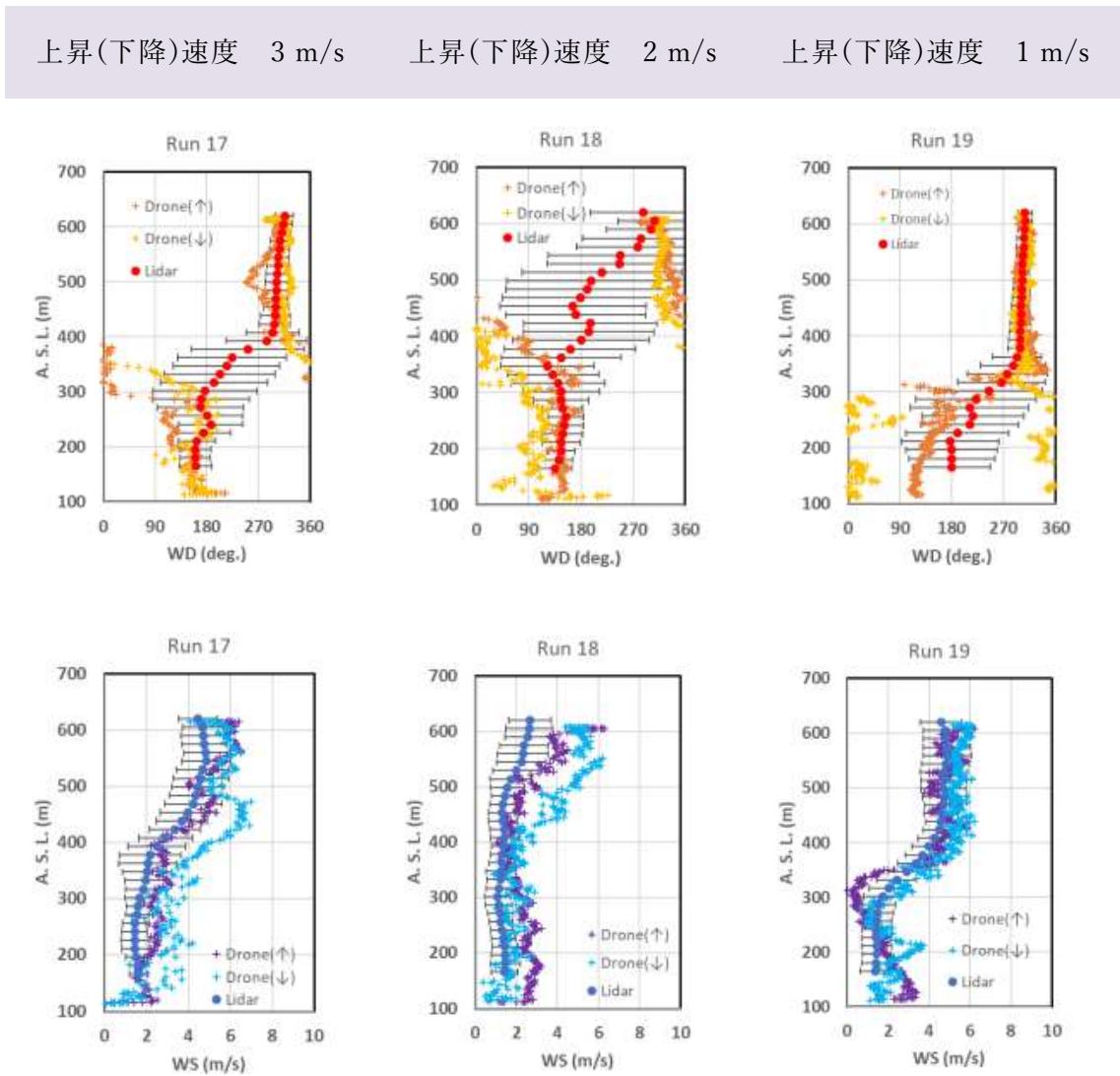
レーダーの反射強度分布から決定したPUFFモデルにおける火山灰粒子の初期座標（左：水平位置、右：鉛直断面）。左図では反射強度の閾値を(a)10dBz、(b)20dBz、(c)30dBz、(d)40dBz とし、右図では反射強度の閾値を(a)10dBz、(b)20dBz とした東西断面、(c)10dBz、(d)20dBz とした南北断面を示す。



(左) 噴煙高度と噴出率、(右) 噴煙高度と噴出量の関係について、2019年11月5日～8日に発生した噴火時のものを示す。噴出率は、地殻変動から計算される球場圧力源の体積変化量をひずみ変化の継続時間で割ったもの。噴出率または噴出量が大きいほど、噴煙高度が高くなる傾向が認められる。

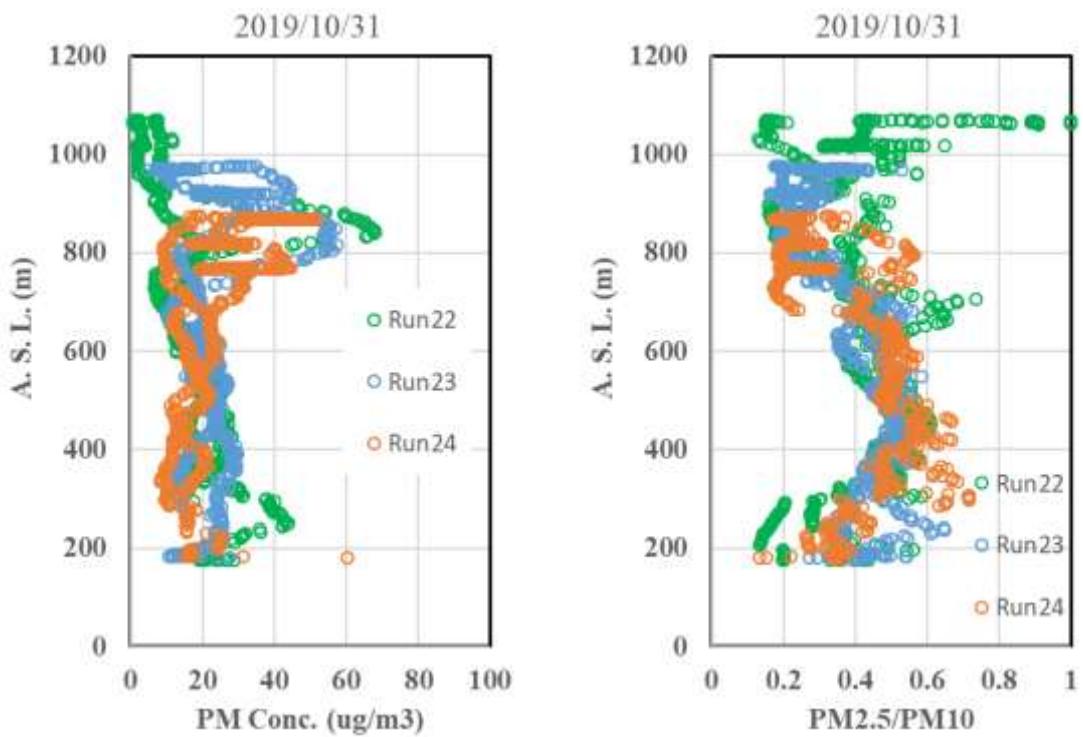


課題C3と連携して実施したブルカノ式噴火を対象とした3次元噴煙シミュレーションの結果。噴出率を一定とし、噴火継続時間変化させた場合の噴火開始から10分後の噴煙断面を示す。噴出率が噴煙高度決定の主なパラメータであるプリニー式噴火に対して、ブルカノ式噴火では同じ噴出率でも噴火継続時間が異なると噴煙高度が異なる様子が得られた。

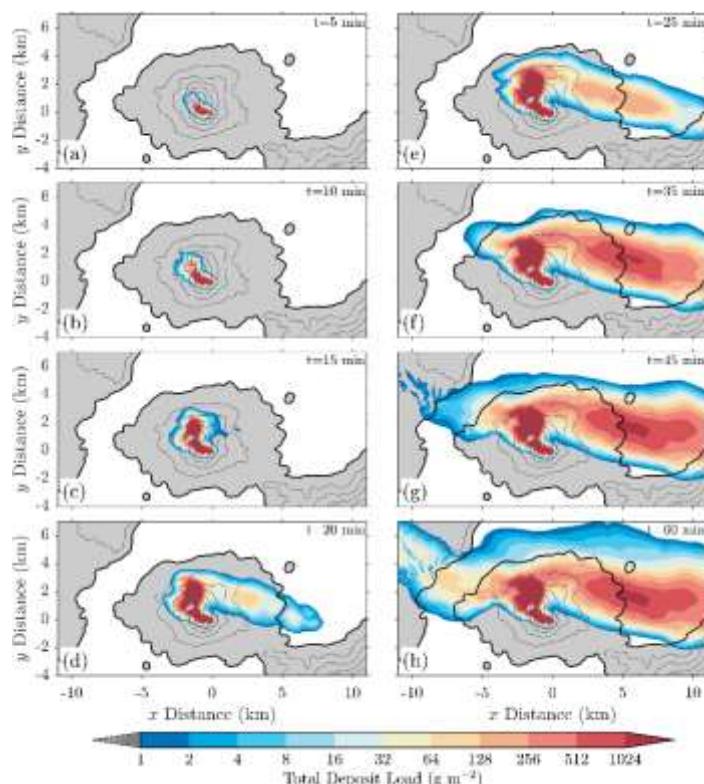


ドローン（移動計測）とライダーによる風観測結果の比較（上図：風向、下図：風速）。ドローンの移動速度が大きくなると、ライダーによる観測結果との乖離が顕著になる。

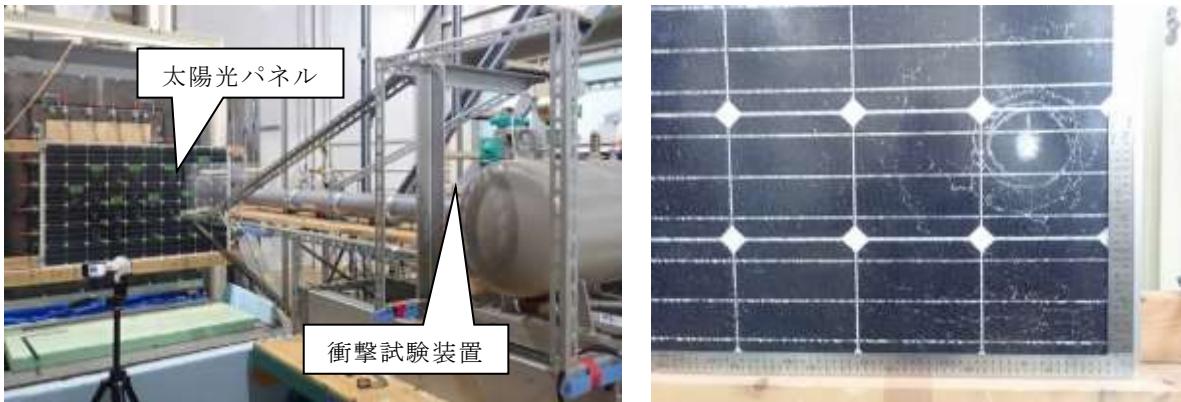
2019年10月31日 (Site B)



ドローンによる上空の PM₁₀ 濃度（左図）と微小粒子割合（PM_{2.5}/PM₁₀ の比、右図）の観測結果。2019年10月31日は高度800～1000mでPM濃度が高く、微小粒子割合から火山灰を捉えているものと推測される。



最も高い解像度の組み合わせ (WRF50m・FALL3D50m) で得られた火山灰拡散シミュレーションの結果。噴火開始後 5 分～60 分の降灰量の経過を示す。



(左) 太陽光パネルの噴石に対する耐衝撃性能試験の実験装置。(右) 衝撃後の円状にひび割れた（カバーガラスが割れた）状態。



(左) 噴石の落下性状を調べるために行われた落下実験において使用された噴石模型に組み込まれたセンサー類、(右) ドローンによる模型のつり上げと落下実験の様子。

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

The screenshot shows the homepage of the 'Mount Fuji Volcano Observation Portal' (火山観察総合ポータルサイト). The top navigation bar includes links for 'Volcano Observation', 'Volcano Information', 'Volcano News', 'Volcano Observation Data', 'Volcano Observation Tools', and 'Volcano Observation Guide'. A large banner image of Mount Fuji is on the left, with a search bar overlaid. Below the banner, a question asks 'What kind of volcano information are you looking for?'. A grid of icons represents different types of data: 'Volcano Observation Data' (volcano shape), 'Volcano Observation Tools' (person icon), 'Volcano Observation Guide' (map icon), 'Volcano Information' (leaf icon), 'Volcano News' (camera icon), and 'Volcano Observation Data' (leaf icon). Below the icons are several thumbnail images of content pages, such as 'Volcano Observation Data' for 'Volcano Observation Data' and 'Volcano Observation Tools' for 'Volcano Observation Tools'.

周知啓発教育用コンテンツ試作版として開発した「火山防災ポータルサイト」(左:トップページ、右:検索結果)。約280件の情報コンテンツにアクセスが可能。



2020年2月12日に自治体防災担当者（山梨県コアグループ担当者会議メンバー）を対象として実施された図上訓練の様子

演習事例 ①

1. 今回の図上演習の目的

- ・大規模噴火時等の協議会関係機関の対応・行動の確認、また不足事項の洗い出し
- ・対策がわからない活動の抽出と、その相談先の検討
- ・顔の見える関係づくり、及び関係の深化

演習事例 ①

4. 演習実施イメージ

【方法】

- ・模造紙と付箋紙を使います。
- ・災害対応は、自由な発想(妄想)と議員のチーム力で検討を進めてください。

【使用するもの】

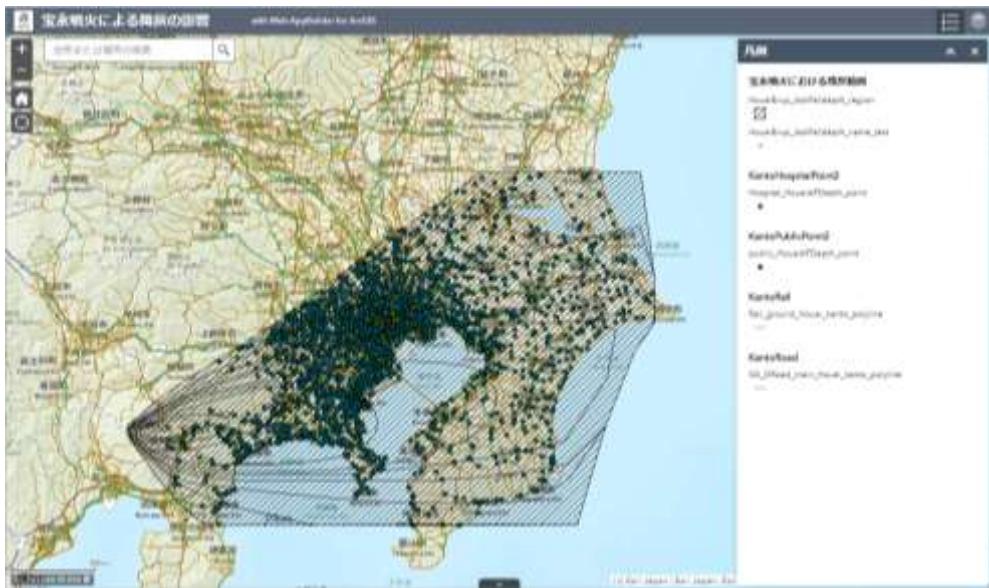
- ・黒いペン(ラッシャンペン)
- ・模造紙2枚
- ・付箋紙(黄色多量、赤色、青色)
- ・今後の対応目標シート

特別開催: 地図本、マップ
 カホルダ: 考え方などで
 多様な訓練シナリオ実施
 場所での訓練実施も可能
 となるかは想定

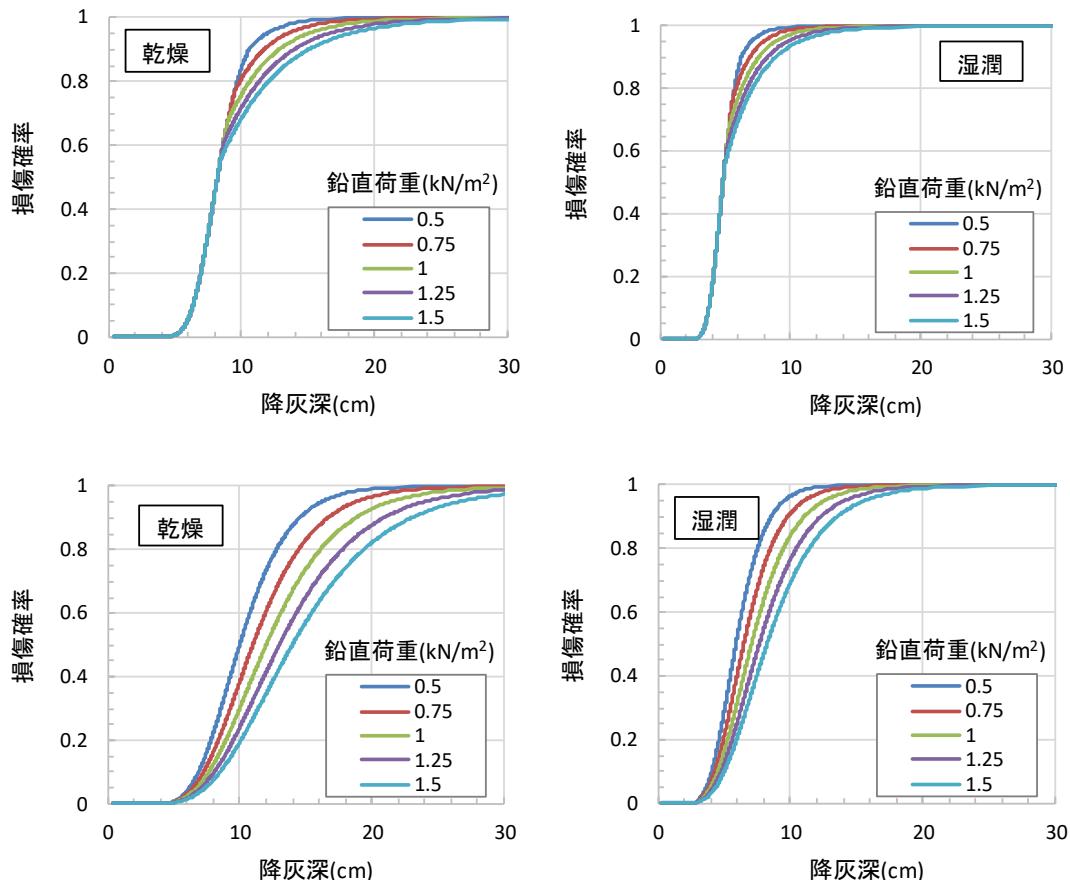
今回のテーマ
 要支援者対策

開催日程	×年×月1日(水)	×年×月3日(木)	...
事業者	地図掲示	噴煙上昇	...
噴火警戒レベル	3	5	...
市町村	■	■	...
関係機関	■	■	...

今年度作成した演習事例



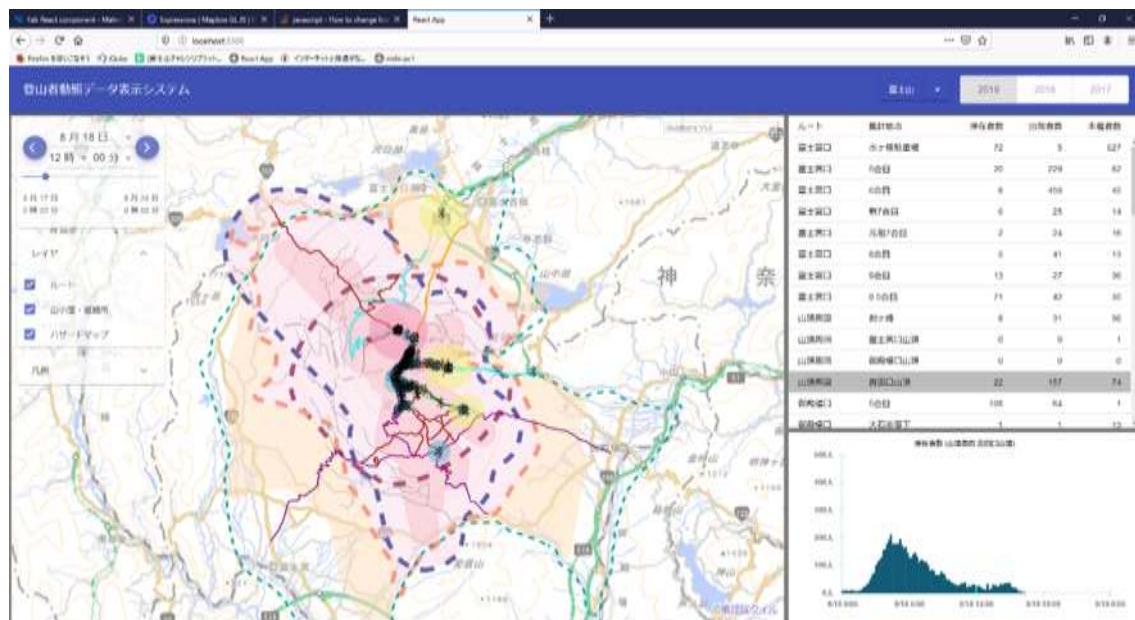
降灰被害予測コンテンツの試作版として、富士山宝永噴火を想定した降灰分布と基盤情報（鉄道、幹線道路、病院施設）をWebGIS上で重ね合わせた例。昨年度までに実施された建築設備（エアコン室外機、冷却塔）を対象とした降灰影響評価実験の結果得られた建築物の機能継続に影響を与える降灰深を閾値として使用している。



垂直積雪量を30cmとし、鉛直荷重を変化させた時の木造建物屋根の被害確率関数。
建築年が1982～2000年（上段）と2001年以降（下段）。



富士山における登山者動向把握実験（富士山チャレンジ 2019）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として使用する登山者動態データを取得した。



富士山及び御嶽山で得られた登山者動態データを可視化するツールを開発した。

はじめに

日本では火山観測研究が始まってから、まだ規模の大きな噴火を経験したことがない。災害に絡む火山現象の予報は気象庁が行うことが気象業務法によって定められている。大学や国立研究開発法人等の研究者は、火山災害の軽減のために火山噴火予測技術の高度化を目指して研究を進めており、これまで、火山噴火予知連絡会に参画するとともに、気象庁が行う火山現象の予報業務に活用する技術の向上に貢献してきた。一方、それぞれの活火山に設置されている火山防災協議会では、気象庁から出される噴火警戒レベルに応じて、当該火山のハザードマップや火山専門家等の意見を考慮し、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特徴である。気象庁から出される噴火警戒レベルは火山の活動度の評価であって、想定される噴火のハザードやリスクを考慮した被害評価ではない。本来、火山周辺の住民や登山者への安全や利益を守るために、噴火ごとに、ハザード評価とリスク評価を経た上で、安全のための対策をとるのが好ましい姿であると考えられる。

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

サブテーマ 1 では、噴火発生前後からドローンなどの無人機を用いて火口付近の地形や噴出物に関するリアルタイムの災害情報を取得する技術を開発し、それによって取得した情報や解析の結果を他課題の研究者と共有できるように準備する。サブテーマ 2 では、桜島火山をケーススタディとして、噴火前の観測データや気象情報から、予想される噴火に伴う火山灰の移動拡散・浮遊や降灰のリスクを事前に予想し、それを災害対策に活かす研究を進める。そこでは、噴火に先立って蓄積される地震エネルギーと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。

1. 課題の概要	1
2. 研究機関および研究者リスト	1
3. 研究報告	
3.1. 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	3
3.2. リアルタイムの火山灰評価手法の開発	30
3.3. 火山災害対策のための情報ツールの開発	129
4. 活動報告	
4.1. 会議録	166
4.2. 対外的発表	166
5. むすび	167

1. 課題の概要

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。

2. 研究機関および研究者リスト

所属機関	役職	氏名	担当課題
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 係長 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 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 藤田浩司 高橋志穂 成毛志乃 三浦俊介 江川 香 森 貴章 望月拓実 小宮佑登 浦山利博	3.1
国立大学法人京都大学	教授	井口 正人	3.2
国立大学法人京都大学	准教授	中道 治久	
国立大学法人京都大学	准教授	為栗 健	
国立大学法人京都大学	助教	山本 圭吾	
国立大学法人京都大学	助教	山田 大志	
国立大学法人京都大学	教授	石川 裕彦	
国立大学法人京都大学	准教授	竹見 哲也	
国立大学法人京都大学	特定研究員	Alex Poulidis	

国立大学法人京都大学 国立大学法人京都大学 国立大学法人京都大学 国立大学法人京都大学 国立大学法人鹿児島大学 国立大学法人鹿児島大学 国立大学法人鹿児島大学 国立大学法人鹿児島大学 国立大学法人筑波大学 国立大学法人神戸大学 国立大学法人東北大学 国立大学法人東京大学 国立研究開発法人国立環境研究所 一般財団法人日本気象協会 メトロウェザー株式会社 三菱スペース・ソフトウェア(株) (鹿児島大学)	教授	丸山 敬	
	特定准教授	佐々木寛介	
	特定助教	志村 智也	
	助教	古本 淳一	
	特任教授	真木 雅之	
	特任研究員	Kim Yura	
	外来研究員 (釜慶大学)	Dong-In Lee	
	外来研究員 (釜慶大学)	Suh Sun-Ho	
	教授	田中 博	
	教授	大石 哲	
	准教授	太田 雄策	
	准教授	鈴木雄治郎	
	主任研究員	清水 厚	
	主任研究員	井上 実	
	代表取締役	東 邦昭	
	博士課程学生	小堀 壮彦	
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 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 山梨県富士山科学研究所	センター長	中田節也	3.3
	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	
	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	
	主幹研究員	吉本充宏	
	主任研究員	石峯康浩	
	研究員	本多亮	
	研究員	久保智弘	
	契約研究員	堀内佑紀	

3. 研究報告

3.1 「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」

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成31年度業務目的

(2) 平成31年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 令和2年度の業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「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	役職	氏名	メールアドレス
アジア航測株式会社	先端技術研究所 室長	千葉達朗	ta.chiba@ajiko.co.jp
	国土保全技術部 課長	佐々木寿	hss.sasaki@ajiko.co.jp
	システム開発部 課長	野中秀樹	hdk.nonaka@ajiko.co.jp
	国土保全技術部 係長	藤田浩司	kf.fujita@ajiko.co.jp
	国土保全技術部	高橋志穂	shi.hirotani@ajiko.co.jp
	国土保全技術部	成毛志乃	sin.naruke@ajiko.co.jp
	国土保全技術部	三浦俊介	ssk.miura@ajiko.co.jp
	国土保全技術部	江川 香	kor.egawa@ajiko.co.jp
	システム開発部	森 貴章	tak.mori@ajiko.co.jp
	システム開発部	望月拓実	tkm.mochizuki@ajiko.co.jp
システム開発部	システム開発部	小宮佑登	yto.komiya@ajiko.co.jp
	システム開発部	浦山利博	tsh.urayama@ajiko.co.jp

(c) 業務の目的

本業務では、噴火時における無人機（ドローン等）及び航空機による火口周辺や火口周辺から離れた空域から撮影した可視画像・赤外画像等を用いて、噴石の飛散状況、溶岩流や火碎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、溶岩流や火碎流の到達範囲をマッピングして位置情報を自動的に取得し、直面する火山災害への対応への支援を念頭に、噴火の推移と災害の発生状況をリアルタイムで把握するシステムを開発する。

なお、実施期間中に噴火が起きた場合には、検討中の内容を反映する等して無人機（ドローン等）を運航して撮影した空域からの可視画像をもとに、3Dモデルを作成するなどして、ホームページで公開できるよう資料を作成することとする。作成した資料のうち、地形データを取得した場合には、本委託業務が他のサブテーマと一体となって展開する次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトにおける次世代火山研究推進事業の課題Dサブテーマ2（リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発）、課題Cサブテーマ3（シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発）へデータ提供した上で、課題Dサブテーマ3（火山災害対策のための情報ツールの開発）で情報共有される計画とする。また、最

新の現地概略情報を取得できた場合には、被災自治体等へ画像等を提供するとともに、要望をふまえて改めて現地情報を取得、提供することを想定する。

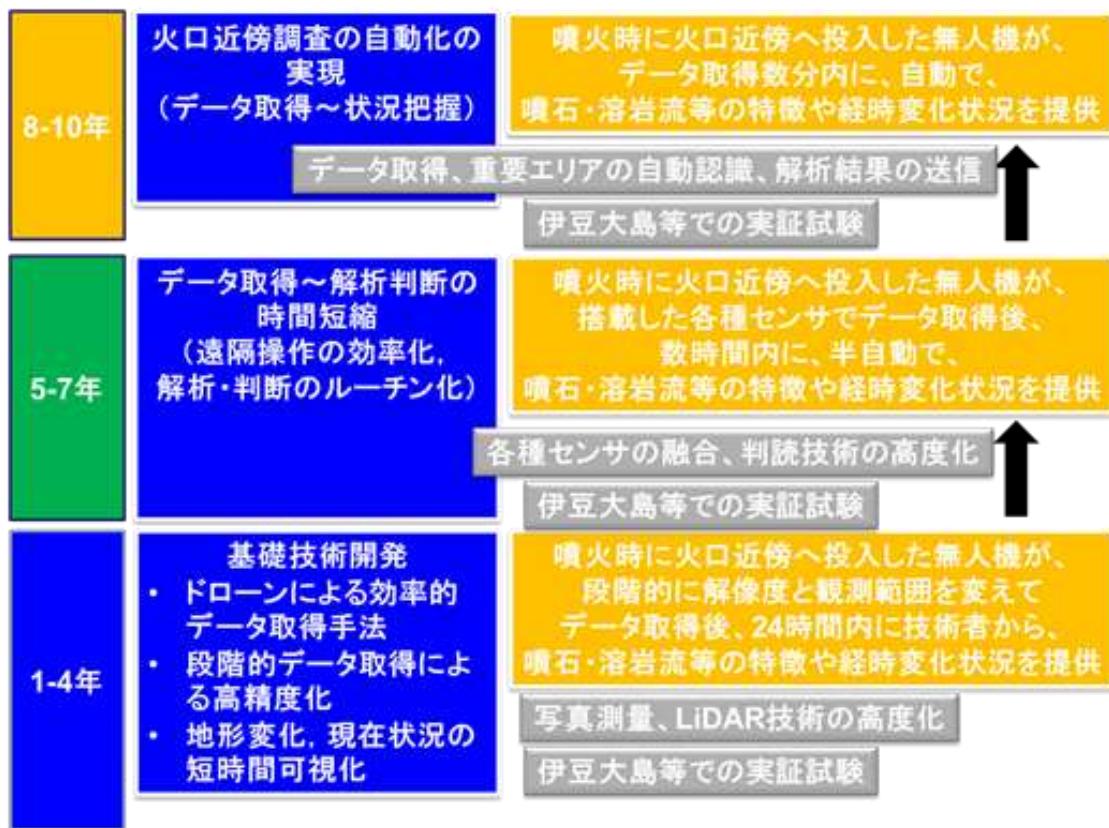


図 1 本業務の全体計画

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

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

表 1 火山災害状況把握のために活用可能な技術と特徴の優劣

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

3) 平成 30 年度 :

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

4) 令和元年（平成 31 年）度 :

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

5) 令和 2 年度 :

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

6) 令和 3 年度 :

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

7) 令和 4 年度 :

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

8) 令和 5 年度 :

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

9) 令和 6 年度：

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

10) 令和 7 年度：

高度化した無人機（ドローン等）と必要機能を組み込み改良した各種センサーを利用して、噴出物（噴石・溶岩流・火碎流など）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) 平成 31 年度業務目的

本サブテーマでは、噴火時における無人機（ドローン等）及び航空機による火口周辺や火口周辺から離れた空域から撮影した可視画像・赤外画像等を用いて、噴石の飛散状況、溶岩流や火碎流の発生状況やその到達範囲等の火山噴火の状況を迅速に把握するためのシステムを開発することを目的とする。令和元年度は、無人機（ドローン等）の観測から火山災害状況把握の基礎となる地形データの取得のため、基準点（GCP）の有無による 3D モデルの精度向上に関して実証試験を通じてとりまとめる。悪条件下における状況把握手法開発に向けて熱赤外カメラによる撮影も行う。無人機と航空機から得られるデータ比較および課題の抽出、悪条件下における状況把握手法に関する検討を行う。また、取得した画像や 3D モデルからの状況把握について、機械学習を用いて自動化するための方法を検討する。

(2) 平成 31 年度の成果

(a) 業務の要約

- 伊豆大島で実証実験を実施し、UAV での写真撮影および基準点（GCP）設置を実施した。
- 基準点（GCP）を使用した 3D モデルと使用しない 3D モデルを作成し、位置精度の違いについて解析した。また、2017 年に取得したデータとの比較を行った。
- 悪条件下（夜間）における状況把握手法開発に向けて、夕暮れ時に、UAV に搭載された可視光カメラ及び熱赤外カメラで撮影を行い、取得できる情報を確認した。
- 画像や作成モデルから状況認識する方法の検討として、機械学習等を用いた自動抽出方法について予備的な解析を実施した。

(b) 業務の実施方法

1) プロジェクトの総合推進

- 過去の成果や状況把握ルーチンの現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進する。
- サブテーマ 2 との連携：大量降灰時にドローンを活用した地形変化抽出を行い予測降灰量と照合することを目的として、地形データ精度向上の検討を実施する。
- サブテーマ 3 との連携：取得画像や作成 3D モデルを、避難・救助支援コンテンツのインプットデータとして利用するための方法を検討する。

- ・ テーマ A、C との連携：ドローンにより災害状況把握のために取得、作成した画像や数値地形データを、情報公開に有効な現地画像・3Dモデルの内容について整理する。また、ハザード予測のシミュレーション用地形データとして活用するための形式について整理する。

2) 汎用製品（ドローン）を用いた現地実証実験（伊豆大島）

- ・ 無人機（ドローン等）を用いて、写真測量技術、SfM 技術等により、抽出変化の内容・解像度の違いについて、市販の無人機等を使用した現地実証試験を通じてとりまとめる。
- ・ 基準点（GCP）を使用した3Dモデルと使用しない3Dモデルを作成し、位置精度の違いについて解析し、3Dモデルの精度向上について検討する。
- ・ 悪条件下（夜間）における状況把握手法開発に向けて、夕暮れ時に、UAV に搭載された可視光カメラ及び熱赤外カメラで撮影を行う。

3) 悪条件下での無人機（ドローン等）を用いた状況把握手法の検討

- ・ 夕暮れ時に、UAV に搭載された可視光カメラ及び熱赤外カメラで撮影された画像を用いた状況把握手法について検討する。
- ・ 撮影された単写真画像について、既存の斜め写真解析システムを用いた解析手法について検討する。

4) 画像や作成モデルから状況認識する方法の検討

- ・ 溶岩流の分布範囲を自動抽出することを目的とし、熱赤外画像を用いた自動抽出手法について検討する。
- ・ 火口近傍に飛散する噴石について、阿蘇山で作成した3Dモデルから機械学習を用いた噴石痕の自動検出を試みる。

(c) 業務の成果

1) プロジェクトの総合推進

過去の成果や状況把握ルーチンの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。

サブテーマ 2 との連携として、大量降灰時にドローンを活用した地形変化抽出を行い予測降灰量と照合することを目的として、火山活動が活発化した場合に立ち入りが規制される箇所からの飛行で得られる画像を用いるために、基準点（GCP）に関する課題を整理し、実証実験で検証した。

テーマ A、C との連携として、ドローンにより災害状況把握のために取得、作成した画像や数値地形データを、情報公開に有効な現地画像・3Dモデルの内容について検討した。また、ハザード予測のシミュレーションに使用するソフトに合わせた地形データについて検討した。

2020 年 2 月 16 日に開催された次世代火山研究・人材育成総合フォーラムでは、「無人機による特に火口付近の火山災害リアルタイム把握手法開発」として講演を行った。

2) 汎用製品（ドローン）を用いた現地実証実験

①概要

2019年11月7日～11月8日に伊豆大島の三原山中央火口と山麓を対象に実証実験を実施した。実証実験箇所を図2に示す。

三原山は、令和元年房総半島台風（台風15号）と令和元年東日本台風（台風19号）の影響を大きく受け、火口内地形に変化が生じたと考えられている山体である。本サブテーマでは、2017年にも三原山中央火口内を UAV で撮影しており、台風通過前の火口内地形データを作成していた。そこで、台風通過後の最新の火口内地形データを作成し、2時期の地形データの差分から三原山中央火口内の地形変化量を定量的に把握することを試みた。

また、撮影方法の違いが作成する地形データの精度にどの程度影響するかを定量的に把握するため、2017年時の撮影方法とは異なる方法で撮影を実施した。2017年の実証実験では基準点（GCP）を設置せずに、カメラを斜めにしたマニュアル撮影で画像を取得していた。そこで、今回の実証実験では GCP を設置して、カメラを垂直にした自動航行撮影で画像を取得することとした。実証実験の撮影コースを表2に、使用した機体と UAV 撮影状況を図3に示す。

さらに、悪条件下における状況把握手法開発に向けて、夕暮れ時に、熱赤外カメラによる UAV 撮影も行った。



図2 伊豆大島における実証実験箇所

表 2 実証実験の撮影コースと撮影方法（左：2017年、右：2019年（今回））

2017 年撮影コース(●は画像撮影位置)	2019 年撮影コース(●は画像撮影位置)
撮影方法: マニュアル 撮影方向: 斜め	撮影方法: 自動航行 撮影方向: 垂直



図 3 伊豆大島での実証実験に使用した機体(左)とUAVの撮影状況(右)

UAV:DJI 社 MATRICE210 飛行時間:15~20 分

カメラ1:ZENMUSE X4S(可視光)、レンズ:8.8mm 固定焦点

カメラ2:ZENMUSE XT2(可視光&熱赤外)、レンズ:8mm 固定焦点、スペクトル帯:7.5~13.5 μm

②基準点（GCP）の設置

これまで、UAV に搭載された GPS から取得した位置情報を用いて 3D モデル化を行ってきたが、既存の航空レーザ測量から生成した 3D モデルと比較すると、位置精度、特に高さ方向の精度に課題があった。そこで今年度は、精度の高い位置情報を用いて 3D モデル化を行うために、UAV 計測範囲に基準点（GCP : Ground Control Point）を設置し、位置精度について検討した。

基準点は、UAV 計測範囲に対して、均一になるように火口外輪の遊歩道沿いに 18 点設置した。基準点の設置位置を図 4 に示す。

基準点には、設置した 28cm 四方の対空標識や既存設備（水準点コンクリート基礎、建物など）を用いた。対空標識を図 5、設置状況を図 6 に示す。既存設備を利用した例を図 7 に示す。UAV で撮影した画像から確認できるものであれば、基準点に既存設備を活用することも可能である。

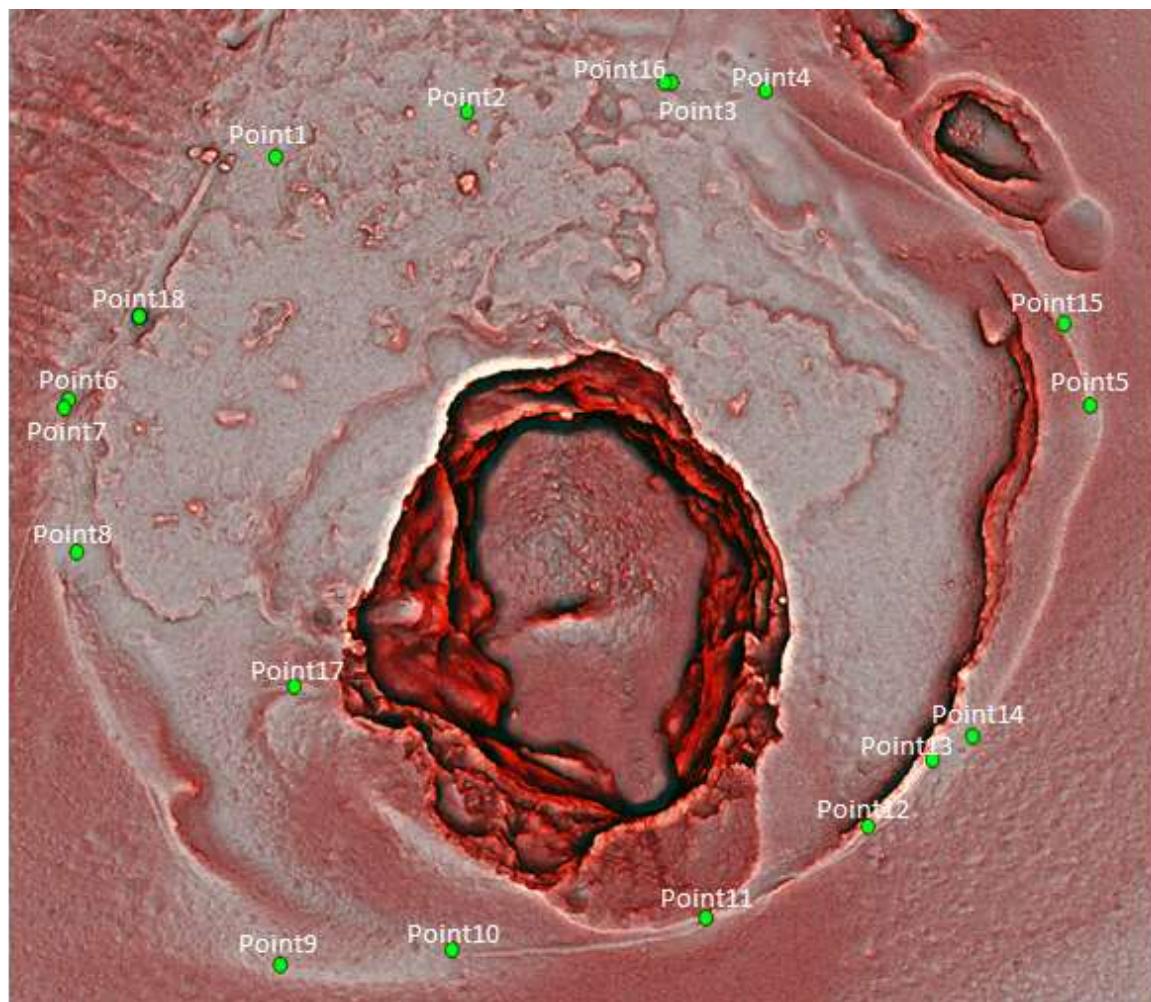


図 4 3Dモデルから作成した赤色立体地図(●はGCPの位置)

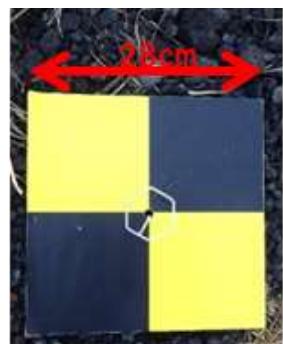


図 5 対空標識



図 6 対空標識の設置状況



図 7 既存設備を活用した基準点

設置した基準点に対して、ネットワーク型 RTK-GPS 測位（VRS 方式）を行い、精度の高い位置情報（精度：数 cm）を取得した。基準点のネットワーク型 RTK-GPS 測位の状況を図 8 に示す。

測位上の制約として、GPS 衛星から電波を受信するために上空が開けている必要がある。既存設備によっては、電波が受信できず、基準点として用いることができなかつた（図 9）。



図 8 基準点のネットワーク型RTK-GPS測位の状況



図 9 基準点として用いることができなかつた例

ネットワーク型 RTK-GPS 測位は、観測に含まれる誤差を電子基準点のリアルタイム観測データ等を利用して補正することで、精度が高い位置情報の取得する計測方法です。ネットワーク型 RTK-GPS 測位の概略を図 10 に示す。



図 10 ネットワーク型RTK-GPS測位の概略

出典：国土地理院：https://terras.gsi.go.jp/geo_info/GNSS_iroiro.html

③三次元モデルの作成

各地点での現地撮影終了後ただちにノートPCで取得画像を確認するとともに、SfMソフトウェアを用いて3Dモデルを作成した（図3）。

取得した画像データからのDSMモデル作成には、Metashape(PhotoScan)を使用した。

作成したDSMモデルは、②で述べた基準点(GCP)を使用して、位置補正を行ったものと、昨年までと同様にUAVに搭載されたGPSから取得した位置情報をそのまま用いたものを作成した。

基準点(GCP)を使用して、位置補正を行ったモデルを図11に示す。



図11 基準点(GCP)を用いて位置補正を行った三原山火口の3Dモデル

基準点(GCP)使用し位置補正を行ったモデル（以下、「GCP有モデル」とする）と、位置補正を行わずに作成したモデル（以下、「GCP無モデル」とする）でどの程度誤差が生じているのか比較を行った。

まず、図4で示した基準点(GCP)の位置で、GCP有モデルとGCP無モデルで垂直方向の較差の確認を行った。また、合わせてRMS（二乗平均平方根）を求めた。結果を表3に示す。基準点での位置補正を行っていない場合は、20m以上誤差が生じ、基準点での位置補正を行っている場合は、誤差が小さいことが分かる。

表 3 GCP有/無モデルデータのGCP標高値と取得したGCP標高値の較差と各較差のRMS[m]

GCPNo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
標高値[m]GCPなし	657.33	659.65	655.98	660.91	724.15	653.29	653.57	657.02	691.41	699.51
標高値[m]GCPあり	680.70	682.61	679.10	683.74	747.83	678.02	678.77	683.03	719.55	727.53
取得したGCP標高値[m]	680.69	682.55	679.12	683.71	747.85	677.82	678.77	683.04	719.50	727.57
標高値較差[m]GCPなし	23.36	22.90	23.14	22.80	23.70	24.54	25.21	26.02	28.09	28.05
標高値較差[m]GCPあり	0.01	0.07	0.02	0.02	0.02	0.19	0.00	0.01	0.06	0.03

GCPNo	11	12	13	14	15	16	21	22	RMS[m]
標高値[m]GCPなし	716.81	702.24	695.66	696.29	716.70	655.79	677.41	666.12	-
標高値[m]GCPあり	743.58	728.13	721.36	722.15	739.86	678.79	703.71	689.97	-
取得したGCP標高値[m]	743.42	728.13	721.32	722.21	739.68	678.81	703.98	689.96	-
標高値較差[m]GCPなし	26.61	25.89	25.66	25.92	22.98	23.02	26.57	23.84	24.96
標高値較差[m]GCPあり	0.16	0.00	0.04	0.06	0.18	0.02	0.27	0.02	0.10

また、H24 に計測を行ったレーザ測量の 1mDEM と GCP 有モデル・GCP 無モデルの 1mDEM の比較を行った。DEM の比較位置を図 12 に示す。図 13 は比較を行った断面線を示している。H24 レーザ測量結果(青線)と GCP 有モデル(赤線)の断面線位置が地形変化の影響もあるがほぼ一致している。そのため、基準点を用いて位置補正を行うことで差分解析を行えるようになることが確認できた。



図 12 三原山火口DEMデータの断面線(赤線)位置図

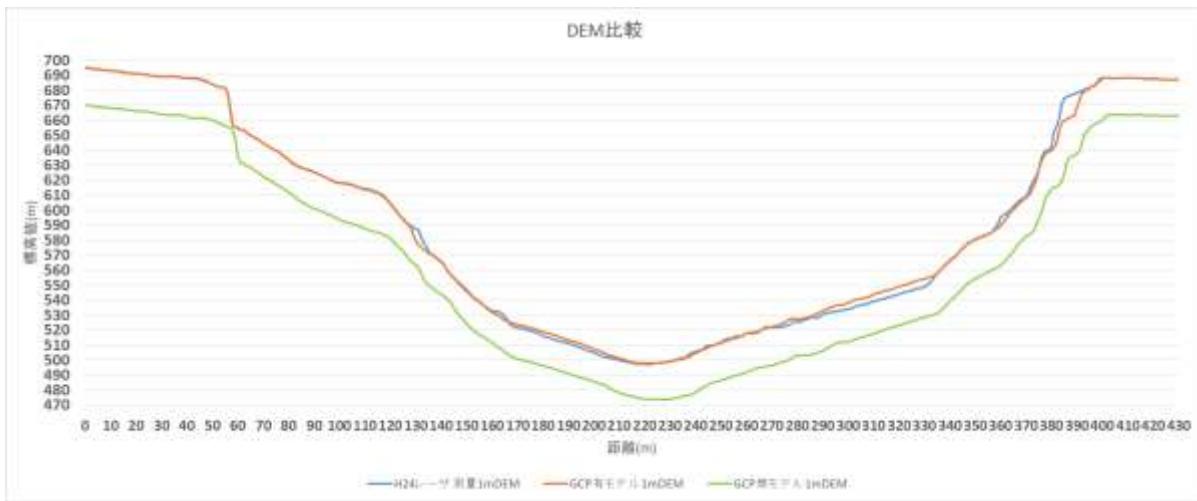


図 13 H24レーザ測量データ・GCP有モードル・GCP無モードルの1mDEM比較結果

④3次元データを用いた解析

1) 2017年取得データとの差分解析

2017年にUAVで撮影を行ったデータから作成したモデルと差分解析を行った。2017年に撮影したデータは今回撮影したデータと比べ撮影範囲が狭いため、取得した基準点(GCP)を使用することが出来なかったため、位置補正を行ったGCP有モードルから仮想GCP10点を取得し、2017年取得データのモデルに位置補正を実施した。(図 14 参照)

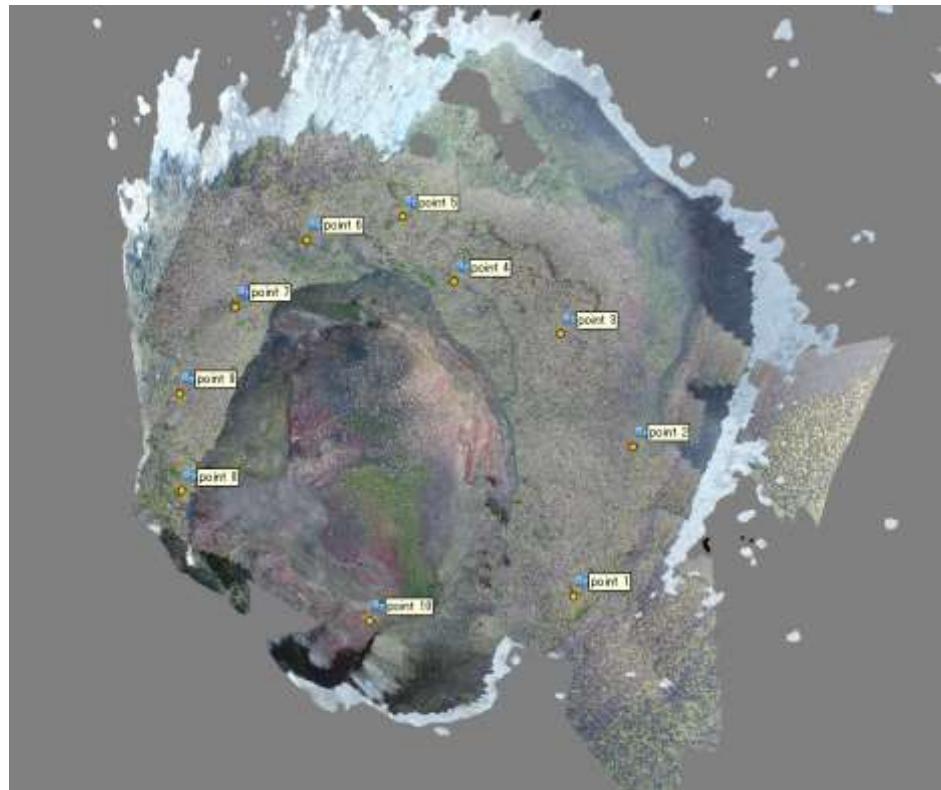


図 14 仮想GCPで位置補正を実施した2017年取得データモデル



図 15 2017年撮影データと2019年撮影データの赤色立体地図

位置補正を実施した 2017 年撮影データモデルと 2019 年撮影データモデルの 1mDEM から赤色立体地図を作成した。

赤色立体地図で形状比較を行ったところ、図 15 の黄色の丸で囲んでいる部分で 2019 年データでは崩落が起きていることが確認できた。



図 16 三原山火口DEMデータの断面線(赤線)位置図2

図 16 に示した断面線位置で各 1mDEM の断面図から形状比較を行った。図 17 に示した断面図でも図 15 で崩落していた位置を確認することが出来た。黒丸で囲っている部分で崩落が発生し、底面部に崩落した部分が積もり、盛り上がっていることが確認できた。なお、崩壊前後で火口内の容積の変化は認められなかった。

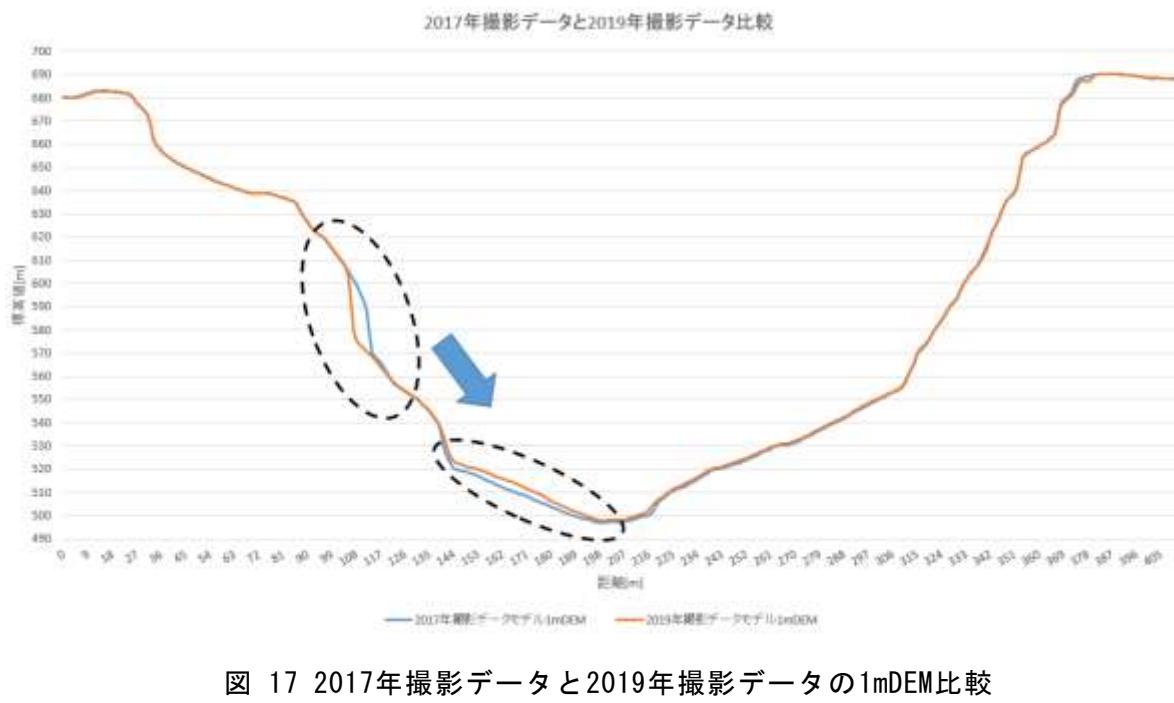


図 17 2017年撮影データと2019年撮影データの1mDEM比較

3) 悪条件下での無人機（ドローン等）を用いた状況把握手法の検討

①熱赤外カメラを用いた情報取得

悪条件下（夜間）における状況把握手法開発に向けて、夕暮れ時に、UAV に搭載された可視光カメラ及び熱赤外カメラで撮影を行い、取得できる情報を確認した。

夕暮れ時に撮影した UAV の画像（熱赤外・可視光）を図 18 に示す。熱赤外カメラの画像は、青色から赤色に向かって温度が高くなるように表示されている。日中の太陽光の影響を受け、植生に比べて熱吸収がよい溶岩流の分布範囲において温度が高くなっていることが熱赤外画像から分かる。

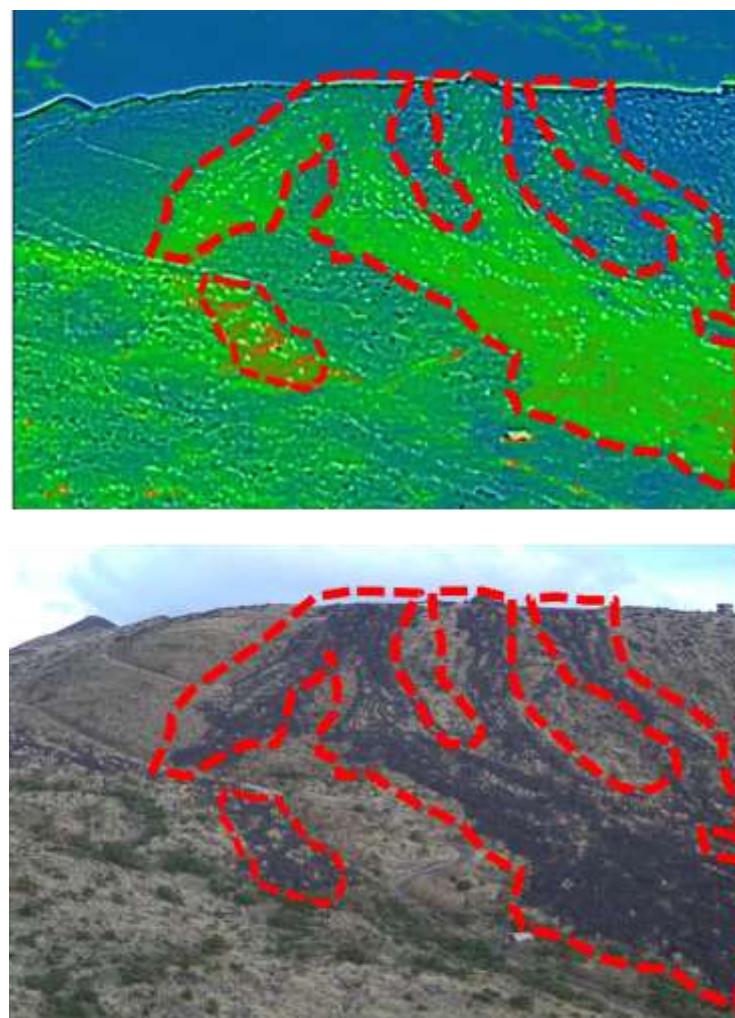


図 18 上：熱赤外カメラ、下：可視光カメラ

②熱赤外カメラと斜め写真解析システムを用いた情報取得

夜間等で可視光カメラにより噴火状況が捉えにくくなつた場合でも、熱赤外カメラを用いることで、熱情報から溶岩流の位置は把握できると思われるが、位置精度が低い問題点がある。ある一方向からの単画像では、3D モデルを作成することはできないが、単画像に対して斜め写真解析システム（LandViewerPG：アジア航測株式会社製）を用いることで、画像上の対象位置の座標情報を取得することが可能である。

このシステムでは、画像の撮影位置と撮影方向の情報（標定パラメータ）を使用して、画像と DEM の対応付けを行うことで、画像上で特定された位置の座標や 2 点間の距離、画像上で描画したポリゴンの面積を計測することができる。画像の標定パラメータは SfM ソフトウェアにおけるアライメント（空中三角測量）により短時間で算出することができる。このパラメータを直接取り込む機能を追加することにより短時間で計測環境を実現することが可能となった。

このシステムを応用し、熱赤外カメラの画像に適用することで、夜間においても溶岩流の状況（先頭位置、幅、面積など）を把握できると考えられる。

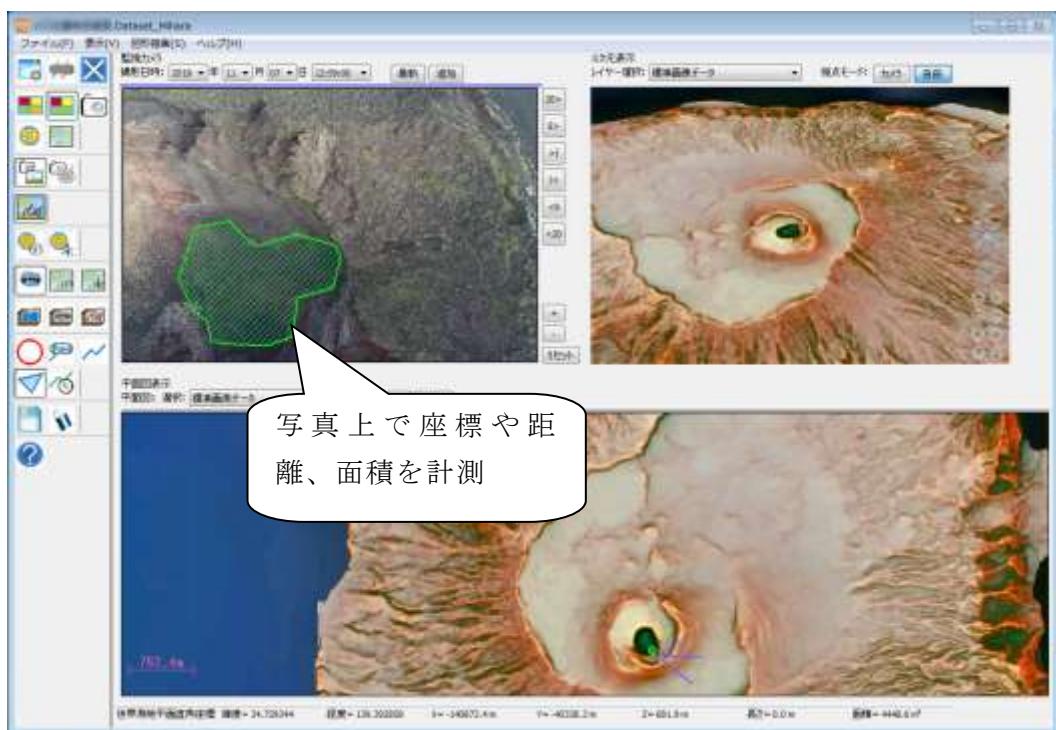


図 19 斜め写真解析システム（LandViewerPG）の画面例

4) 画像や作成モデルから状況認識する方法の検討

①溶岩流の自動認識の検討

熱赤外画像を用いて、溶岩流の分布範囲を自動抽出する手法を検討した。

UAV で取得した熱赤外画像から、色情報を用いて熱分布範囲（高温箇所）を抽出し、位置情報から熱分布範囲をオルソ化することで、平面上に展開することが可能となる。地理院地図等の平面図と重ね合わせられ、直感的に状況を把握することができると考えられる。

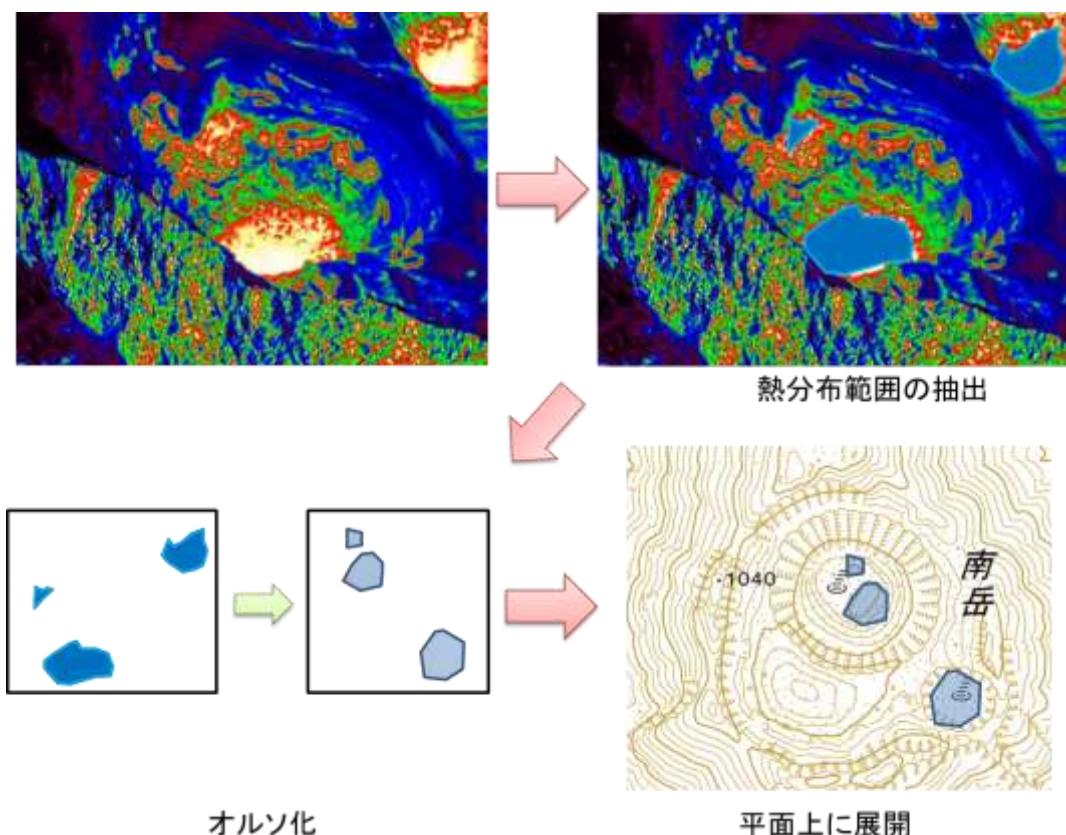


図 20 热分布範囲の抽出から平面上への展開イメージ

②噴石の自動抽出

i) 実施概要

噴火後に得られた 3 次元モデルから、機械学習を用いた噴石痕の自動検出を試みた。自動検出の実験地域は、熊本県の阿蘇山火口周辺とした。対象地域の赤色立体地図を図 21 に示す。この実験地域には、2016 年 10 月の噴火により多数の噴石痕が存在する。

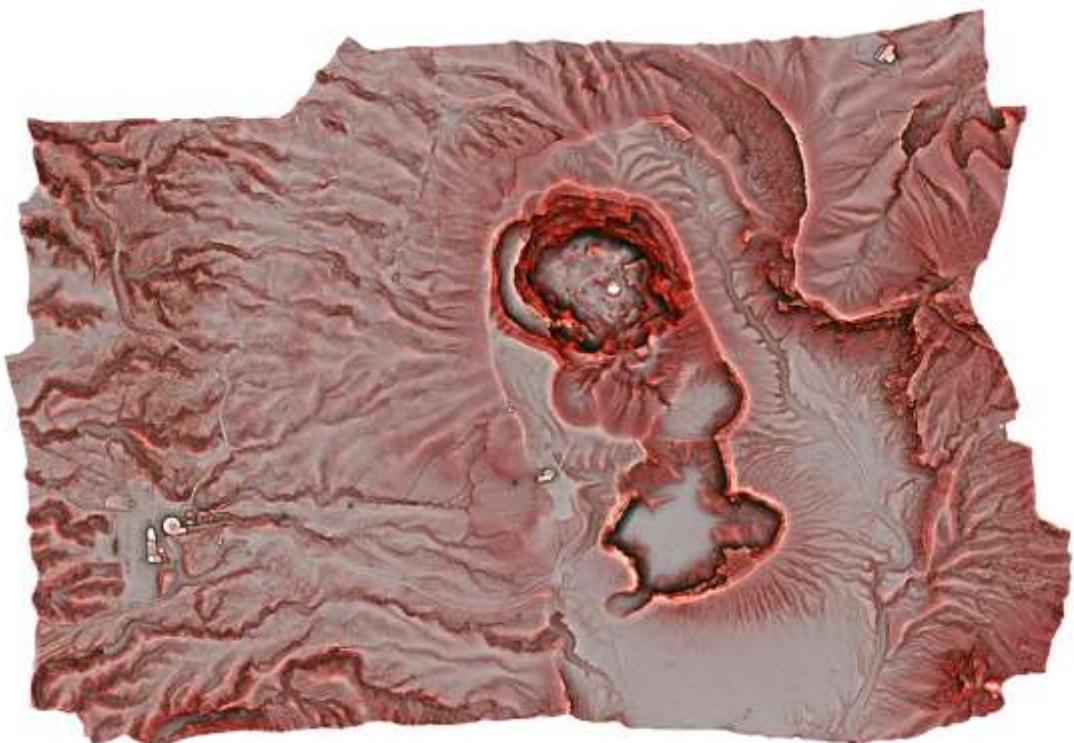


図 21 噴石痕の自動検出に使用した赤色立体地図（2017年4月作成）

ii) 噴石痕の手動判読

機械学習モデルで噴石痕の自動検出を行うため、対象地域の赤色立体地図を分割し、噴石痕の位置を手動で判読した。噴石痕の判読例を図 22 に示す。噴石痕の判読後、機械学習モデル生成に使用する学習用データセットと、モデルの精度を評価するための検証用データセットを作成した。各データセットの画像枚数・噴石痕の数を表 4 に示す。

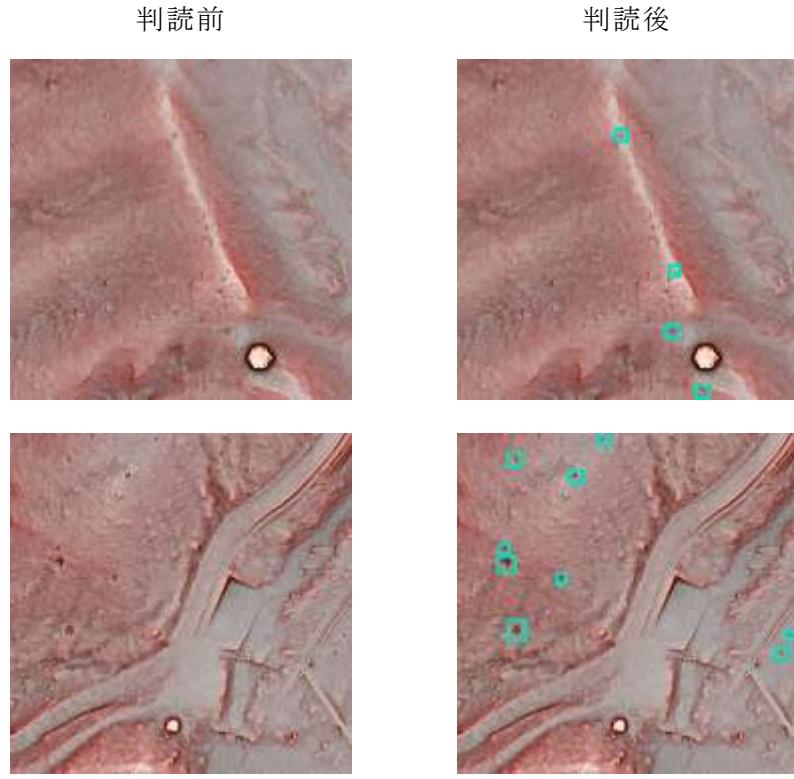


図 22 噴石痕の判読例

表 4 各データセットの詳細

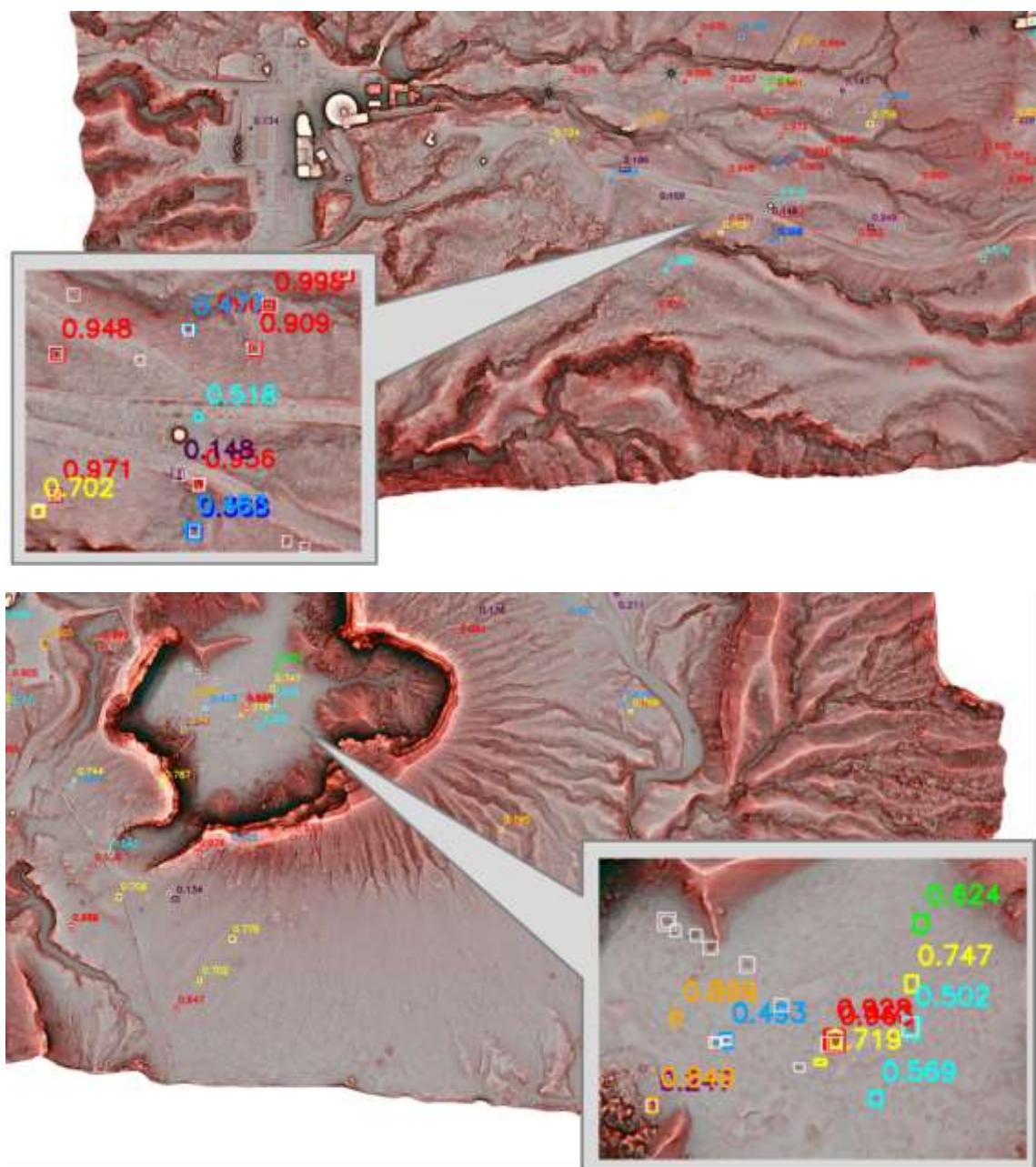
データセット名	画像枚数 (分割画像)	噴石痕を含む 画像枚数	噴石痕の数
学習データセット	152	41	175
検証データセット	95	36	169

iii) 物体検出手法による噴石痕自動検出の試行

機械学習を用いた物体検出手法の一種である RefineDet を用いて噴石痕の自動判読を試みた。物体検出手法とは、画像から検出対象を矩形で抽出する手法である。

検証データセットで自動判読した結果を図 23 に示す。図 23 において、白色の枠が人の手により検出した噴石痕、色付きの枠が自動検出した噴石痕である。

169 個ある噴石痕のうち 70 個を自動判読により検出することができ、誤って噴石痕を検出した数は 27 個であった。したがって再現率は 41.4 %、適合率は 72.2 %である。



凡 例	手動判読結果	自動判読結果(信頼度)
	□ : 手動判読	□ : 90%以上
		□ : 80-90%
		□ : 70-80%
		□ : 60-70%
		□ : 50-60%
		□ : 40-50%
		□ : 30-40%
		□ : 20-30%
		□ : 10-20%
		□ : 5-10%

図 23 噴石痕の検出結果

iv) 精度向上の検討

自動判読の精度を向上させるため、学習データを疑似的に増やすことを検討した。

学習に用いる赤色立体地図の分割画像は、上下左右に固有の特徴は見られない。そのため、学習画像に左右反転・上下反転・回転を加えることで、学習データセットの枚数を疑似的に増やした。分割画像を反転・回転させた例を図 24 に示す。

反転・回転画像を追加しない場合と、追加した場合の精度を表 5 に示す。表 5 の①②を比較すると、反転・回転画像を加えることで、検出できた噴石痕の数が増加し、誤検出数が減少した。再現率・適合率はともに反転・回転画像を加えることで向上した。反転・回転した画像を追加することで、学習される噴石痕のパターンが増え、精度が向上したと考えられる。

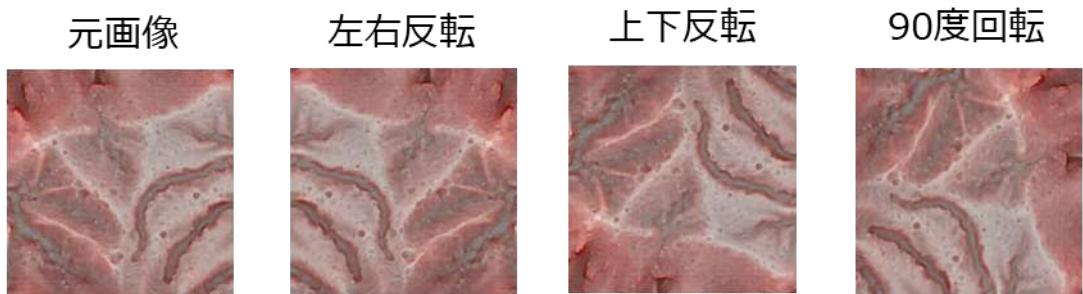


図 24 分割画像に反転・回転を適用させた例

表 5 各データセットの詳細

実験条件	反転・回転画像の追加	検出できた噴石痕数	誤検出数	再現率	適合率
①	なし	70 個	27 個	41.4 %	72.2 %
②	あり	79 個	26 個	46.7 %	75.2 %

v) 噴石痕の自動検出まとめ

機械学習を用いることで、噴石痕のうち約 4 割を自動検出することができた。また、学習画像を反転・回転させ疑似的に画像枚数を増やすことで、精度が向上することが確認できた。

今後の課題としては、精度向上が挙げられる。機械学習におけるパラメータを調整することや、学習に使用するデータの増加させることで、さらなる精度向上を図り、機械学習による自動検出の限界を検討する必要がある。

5) 他サブテーマとのデータ連携の検討

サブテーマ D1 で取得したデータについての連携方法について検討した。

サブテーマ A で作成しているデータベースには、サブテーマ D1 で取得した生データおよび加工データを格納する。画像は撮影した生データは jpg 形式、正射投影したオルソ画像 (tif 形式) が主体となる。動画を撮影した場合は、mp4 形式が基本となる。3D モデルは標準的なフォーマットが定まっていないが obj 形式などが一般的である。数値標高モデルのフォーマットは一般的な xyz 形式や geotiff 形式などが想定されるが、数値シミュレーション等で用いるフォーマットが定まっている場合には、その形式で作成し、データベースに格納することも可能であるため、今後、調整を進めていく必要がある。

サブテーマ C3 には、数値標高モデル (DEM) を提供することで、噴火後の地形を反映した溶岩流の数値シミュレーションなどを実施することが可能となる。

サブテーマ D2 には、予測降灰量と照合することを目的として数値標高モデル (DEM) を提供し、噴火前の DEM との差分から降灰厚の推定等に利用可能となる。

サブテーマ D3 には、地図に重ね合わせることが可能なオルソ画像や 3D モデルを提供することで災害状況把握に活用することができる。オルソ画像は地上分解能が 10cm 以下となり、縮尺 1/1000 程度の地図を提供することが可能となる。そのため、オルソ画像は全体を概観できる広範囲の画像と、細分割した図郭単位での提供が考えられる。今後、図郭の縮尺、ファイル形式、体裁など最適な提供方法を検討する必要がある

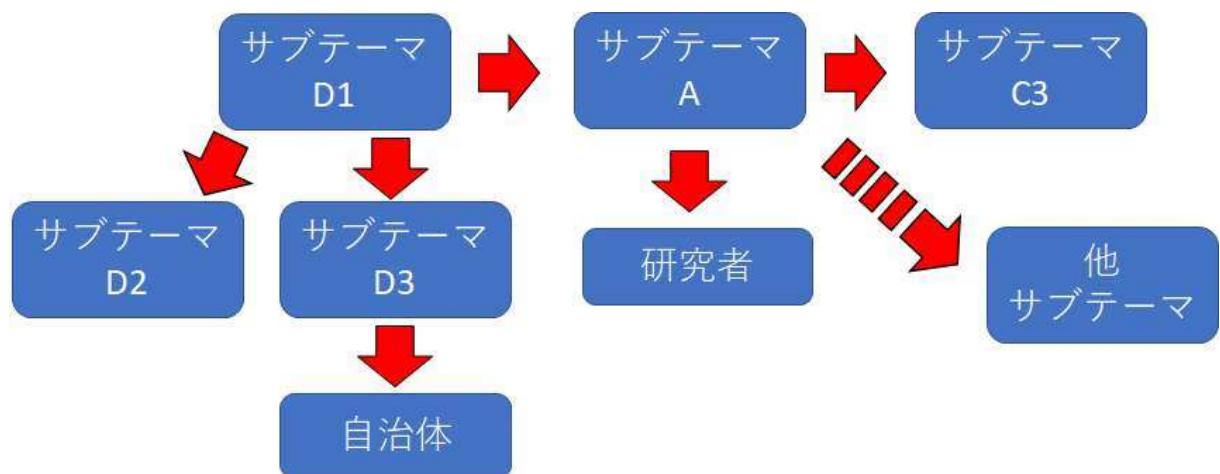


図 25 他サブテーマとのデータ連携イメージ

(d) 結論ならびに今後の課題

伊豆大島において基準点（GCP）を設置した UAV 撮影を行い、撮影した画像から 3D モデルを作成し、基準点（GCP）があることによる位置精度が向上することを明らかにした。また、2017 年度に撮影した画像に仮想基準点を設置して、2017 年度と 2019 年度の地形比較ができるようになり、火口内の崩壊を確認した。悪条件下（夕暮れ時）に撮影した熱赤外画像から溶岩流の分布範囲等の把握手法を検討した。3D モデルを作成できない場合には、斜め写真解析システムが有効である。画像から状況認識する方法として機械学習等を用いた方法を検討した。噴石の自動抽出では誤検出が多く、再現率が低い結果となった。

今後の課題として、火山噴火時に火口周辺に GCP を設置することは困難であることから、RTK-GNSS 搭載 UAV などを用いて、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。これは SfM/MVS 計算時間の短縮にもつながる。また、5~7 年目の目標である数時間以内のデータ処理完了のためには、SfM/MVS 計算時間を短縮させる手法検討が必要である。取得したデータの共有についてより現実的な連携方法の検討を進める必要がある。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
三浦俊介、望月拓実、藤田浩司、浦山利博、佐々木寿、千葉達朗 Toshihiro Urayama, Tatsuro Chiba, Takumi Mochizuki, Syunsuke Miura, Shino Naruke, Hisashi Sasaki, Kenichi Arai, and Hideki Nonaka	UAV を用いた噴火中の桜島火山の火口内状況把握 UAV-Based Structure from Motion - Multi-View Stereo (SfM-MVS) : Mapping Cliff Face of Central Crater of Mt. Miharayama, Izu Oshima, Central Japan	2019 年地球惑星科学連合大会（千葉市幕張メッセ） Unmanned Aerial Vehicle: Applications in Agriculture and Environment (Springer) https://doi.org/10.1007/978-3-030-27157-2	2019 年 5 月 27 日 2019 年 11 月
千葉達朗 Hideki Nonaka	無人機による特に火口付近の火山災害リアルタイム把握手法開発	次世代火山研究・人材育成総合フォーラム	2020 年 2 月 16 日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和2年度の業務計画案

(a) プロジェクトの総合推進

- 現地実証実験や解析結果の共有等を通して、同一課題内での連携を推進する。
- サブテーマ2との連携：大量降灰時にドローンを活用した地形変化抽出を行い予測降灰量と照合することを目的として、必要となる3Dモデルの精度・解像度等について連携して取り組む。
- サブテーマ3との連携：取得画像や作成3Dモデルを、避難・救助支援コンテンツのインプットデータとして利用するために連携して取り組む。
- 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可視画像をもとに、作成した画像や数値地形データを、情報公開に有効な現地画像・動画・3Dモデルの内容・受け渡し方法について連携して検討する。また、ハザード予測のシミュレーション用地形データとして活用するための受け渡しまでの一連の流れについて連携して検討する。
- 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、現地実証実験への開催案内と参加者募集を行う。

(b) RTK-GNSS搭載UAVの導入による精度向上

- 2019年度の研究からGCPの重要性が明らかとなったが、噴火時に火口周辺にGCPを設置することは難しい。
- そこで、最新のRTK-GNSS搭載型のUAVを導入し、伊豆大島での実証事件を行い、GCPの設置を省いた高精度現状把握手法を検討する。
- RTK-GNSS搭載型のUAVの有効性や課題について整理し、これまで検討してきた撮影・処理に関するルーチンの見直しを行う。

(c) SfM/MVS計算時間の短縮

- これまでの研究で用いてきた汎用のノートパソコンでは、SfM/MVS計算時間に数日を要していた。
- 高精度の3Dモデルをさらに短時間で作成するために、汎用のノートパソコンではなく、SfM/MVS計算に特化した専用の機器を使用した解析を実施する。

3.2 「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 10か年の年次実施計画
- (e) 平成31年度業務目的

(2) 平成31年度の成果

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

(3) 令和2年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人京都大学	教授	井口 正人	iguchi.masato.8m@kyoto-u.ac.jp
国立大学法人京都大学	准教授	中道 治久	
国立大学法人京都大学	准教授	為栗 健	
国立大学法人京都大学	助教	山本 圭吾	
国立大学法人京都大学	助教	山田 大志	
国立大学法人京都大学	教授	石川 裕彦	
国立大学法人京都大学	准教授	竹見 哲也	
国立大学法人京都大学	特定研究員	Alex Poulidis	
国立大学法人京都大学	教授	丸山 敬	
国立大学法人京都大学	特定准教授	佐々木寛介	
国立大学法人京都大学	特定助教	志村 智也	
国立大学法人京都大学	助教	古本 淳一	
国立大学法人鹿児島大学	特任教授	真木 雅之	
国立大学法人鹿児島大学	特任研究員	Kim Yura	
国立大学法人鹿児島大学	外来研究員 (釜慶大学)	Dong-In Lee	
国立大学法人鹿児島大学	外来研究員 (釜慶大学)	Suh Sun-Ho	
国立大学法人筑波大学	教授	田中 博	
国立大学法人神戸大学	教授	大石 哲	
国立大学法人東北大学	准教授	太田 雄策	
国立大学法人東京大学	准教授	鈴木雄治郎	
国立研究開発法人国立環境研究所	主任研究員	清水 厚	
一般財団法人日本気象協会	主任研究員	井上 実	
メトロウェザー株式会社	代表取締役	東 邦昭	
三菱スペース・ソフトウェア(株)(鹿児島大学)	博士課程学生	小堀 壮彦	

(c) 業務の目的

火山灰に対して噴火前の予防的対策及び噴火後の迅速な防災対策のために、火山灰ハザ

ードの予報的及び即時的評価を可能とする技術の実現を目指し、地上観測および大気中その場観測に裏付けされるリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、地震及び地盤変動観測データとシミュレーションを統合した火山灰拡散予測の高速度化技術開発、空間分解能の高い風速場把握および落下粒子特性把握による火山灰拡散予測の高精度化技術開発、連続的な噴火を対象とした火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの技術開発、噴火発生前の確率的降灰予測の技術開発を実施し、「課題D サブテーマ3：火山災害対策のための情報ツールの開発」に解析結果を出力することを目的とする。

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成28年度：

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

2) 平成29年度：

桜島、霧島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島火山においてレーダー観測を開始し既存のリモートセンシング観測を強化した。レーダーの反射強度と降灰量を比較し、両者の関係を検討した。火山灰拡散予測の高速度化のために桜島南部の観測点の傾斜計及び地震計を改修した上で、地盤変動や地震動のデータベースを整備した。また、高精度化のために、再現された風速場をドップラーライダーと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。ディスク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：

リモートセンシング観測から推定される火山灰の3次元濃度分布を可視化し、サブテー

マ 3 火山災害対策のための情報ツールの開発に解析結果を出力する。観測とモデルから推定される火山近傍の風速ベクトルを火山灰拡散シミュレーションに組み込むことにより、高精度化を図る。

5) 令和 2 年度 :

令和 2 ~ 4 年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発する。当該年度は、システム設計を行う。火山近傍での風のデータ同化による予測を試みる。

6) 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。大規模噴火による火山灰の広域拡散に対応するために、レーダーデータの合成処理手法を開発するとともに、3 次元火山灰濃度分布を多点 GNSS 観測から推定する手法の広域化を図る。移動用ライダー装置の運用について研究する。

7) 令和 4 年度 :

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

8) 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) 平成 31 年度業務目的

桜島において X バンド MP レーダー、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシ

グおよびディスクロメータを用いた地上観測からなるマルチパラメータ観測を継続して、火山灰予測に必要なパラメータを高精度化する。特に、レーダーの反射強度と噴煙量の関係を経験的および理論的に検討する。その上で、火山灰拡散予測の高速度化のために、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の高精度化を図ったのち、レーダー観測から得られる噴煙の外形情報を用いて、シミュレーションできるように、PUFF モデルを改良する。また、高精度化のために気象モデルを用いて高精細な風速場を再現する。ドローンやドップラーライダーを用いた大気中および地上における火山近傍での大気中の風向・風速観測と照合することにより、気象モデルの妥当性を検討して火山灰の拡散予測の高精度化を図る。さらに、レキの空力特性を明らかにした上で、レキの模型を用いた落下実験により、大気中のレキの動態を調べ、建築資材等を対象に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する。

(2) 平成31年度の成果

(a) 業務の要約

平成31年度に実施した業務の柱は、「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速度化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」である。即時把握技術開発においては、XバンドMPレーダー、GNSS、ライダーによるリモートセンシング観測を継続することにより、このマルチパラメータ観測システムが噴煙高度や降灰量等の即時的把握と噴煙量の推定に有効であることが示された。予測の高速度化技術においては、傾斜計及び地震計を改修することにより、噴火の発生、地震動や地盤変動データからの噴出率と噴煙高度の評価パラメータを高度化が図られた。予測の高精度化においては、火山体周辺の風速ベクトル分布を高分解能で把握することにより、降灰量の予測がさらに改善された。太陽光パネルの破壊実験のデータをサブテーマD3に引き渡した。

(b) 業務の実施方法

1) プロジェクトの総合推進

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

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

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た。前年度までの桜島を取り巻くディスドロメータに加え、4台のディスドロメータを火口から南東方向に直線状に配置したことにより、降灰量と粒径分布の距離依存性を明らかにした。また、噴火頻発期には火山灰採取のキャンペーン観測を実施した。その上で、XバンドMPレーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディスドロメータの出力値と地上降灰量の関係を多くの噴火事例について調べ、その経験的関係式の精度を向上させた。さらに、ディスドロメータにより取得された降灰粒子データベースを用い、理論的な降灰量推定式を導出し、過去の噴火事例に適用して理論的推定式の精度検証を行った。

これまでに設置した大隅半島側のGNSSに加え、大隅半島北東部のさらに桜島から離れた場所2か所にGNSSを追加設置し、桜島島外の火山灰観測の広域化を図った。GNSS観測から得られるLC搬送波位相残差及びSN比と地上降灰量との関係を調べ、関係式を提示した。また、地盤変動量から算出される火山灰放出量との関係について検討した。

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2014年以降の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作成した。

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。緊急観測等での機動的な活用を見据えてディスドロメータを整備した。

3) 火山灰拡散予測の高速度化技術開発

桜島北東部の新島観測室の既設観測井に設置されている地震計及び傾斜計について、本研究への活用のために引き上げ及び改修作業を行った。このことにより、桜島北東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した。

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。

現在の PUFF モデルは噴煙の外径を高度に依存する関数で与えているが、レーダー観測から得られる噴煙の外形情報を用いて、シミュレーションできるように、PUFF モデルを改良した。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度を 10 月と 2 月に計測し、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、モデルの妥当性評価等を実施した。

ライダーをスキャンモードにすることにより、火山灰移流状態から空間的な風の場と 3 次元的な火山灰粒子の分布を把握した。

火山近傍の風の場のデータを取り込むように火山灰拡散シミュレーション手法を改良し、ディスドロメータによって得られた粒径分布や落下速度を考慮した入力条件を設定することにより、レーダーやディスドロメータのデータ等との比較などを通して、火山灰の拡散予測の高精度化を図った。特に、地上降灰量の時間変化と比較して、精度検証・高精度化を図った。また、データ同化や高分解能シミュレーションにより、予測精度向上の可能性について検討した。研究成果を国際測地学および地球物理学連合 2019 年大会において発表した。

桜島など過去の噴火活動で落下したレキの落下速度等の空力特性を、防災研究所（宇治市）の風洞実験装置を利用して明らかにした。レキの大きさと落下速度を実験的に求めるが、実際のレキの模型を用いた落下実験により、大気中のレキの移動、回転、姿勢を明らかにした。また、屋根、窓ガラスを対象に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。

(c) 業務の成果

1) プロジェクトの総合推進

令和 2 年 2 月 6 日に東京（防災科学技術研究所東京会議室）において課題 D 全体の打ち合わせを行った。また、地球惑星科学連合大会や日本火山学会などの研究集会の時に、隨時、プロジェクトのサブテーマ間の連携について打ち合わせを行った。

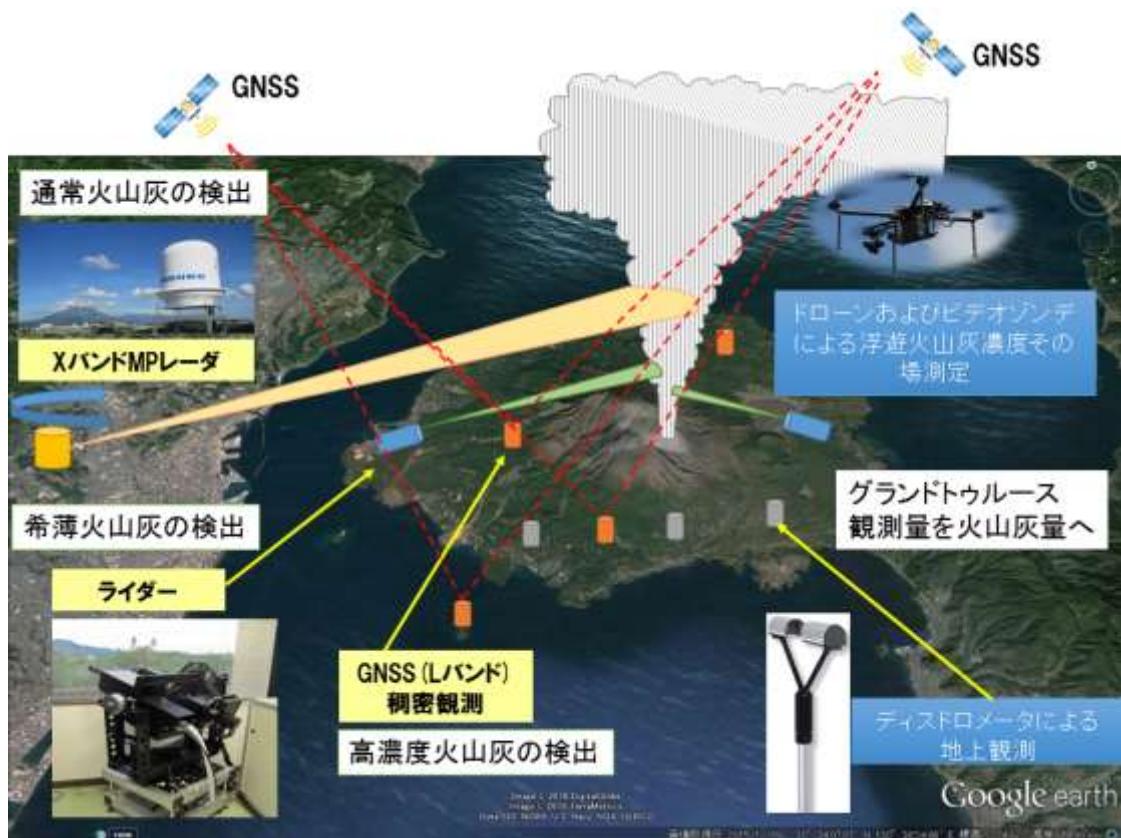


図 1 火山灰のマルチパラメータ観測の概要。

東京での打ち合わせは課題 D 全体の連携、特に、課題 D サブテーマ 3 や課題 C サブテーマ 3 との連携について議論した。特に、レキを用いたソーラーパネルの破壊実験については課題 D サブテーマ 3 や課題 C サブテーマ 3 と実験計画等の詳細な情報共有を図った。

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ク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。平成 31 年度には桜島の北東方向の大隅半島に GNSS を 2 台、また、桜島島内にディスクロメータ 4 台を増設した。

a) レーダー観測

a1) 観測の概要

21 世紀以降、噴火が発生した霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島を対象に、X バンド MP レーダーによる噴煙の連続観測を継続した。レーダーの設置場所は表 1 に示す通りである。また、走査の方位角等のパラメータは表 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	レーダーの緯度、経度
-------	-----	----	------------

			標高
霧島山	霧島市立牧園中学校	鹿児島県霧島市牧園 町宿窪田751-1	31.85784, 130.75134 標高225m
桜島	京都大学防災研究所 火山活動研究センター	鹿児島県鹿児島市桜 島横山町1722-19	31.58960, 130.60115 標高44m
桜島	鹿児島県立錦江湾高 等学校	鹿児島県鹿児島市平 川町4047	31.445607, 130.507227 標高105m
薩摩硫黄島	三島村竹島焼却所	鹿児島県鹿児島郡三 島村竹島	30.81314, 130.40938 標高65m
口永良部島	口永良部島避難所	鹿児島県熊毛郡屋久 島町口永良部島番屋 が峰207-4	30.470361, 30.176036 標高281m
諏訪之瀬島	諏訪之瀬島キャンプ場	鹿児島県鹿児島郡十 島村諏訪之瀬島	29.61125, 129.70547 標高119m

表 2 レーダーの走査モード及びパラメータ

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, 30, 35, 40	50～80	6～30
桜島（火山活動研究 センター）	設定なし	95～115	11～45
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, 25, 35, 45	115～135*	4～60*
諏訪之瀬島	10, 15, 20, 30, 40, 50, 60	設定なし	

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

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

レーダーの設置状況を図 2 及び図 3 に示す。



図 2 レーダーの設置状況。鹿児島県立錦江湾高等学校に設置したもの。

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 30km の範囲を観測することが可能である。レーダーの観測範囲を図 4 に示す。データ収録装置（PC）により、制御され、生データはハードディスクに収録される。PC により雨量データに変換され、雨量データは火山活動研究センターのサーバーに転送している。レーダーの生データはデータ量が大きいので、定期的にハードディスクを交換した。



図 3 レーダーの設置状況。霧島市立牧園中学校に設置したもの。

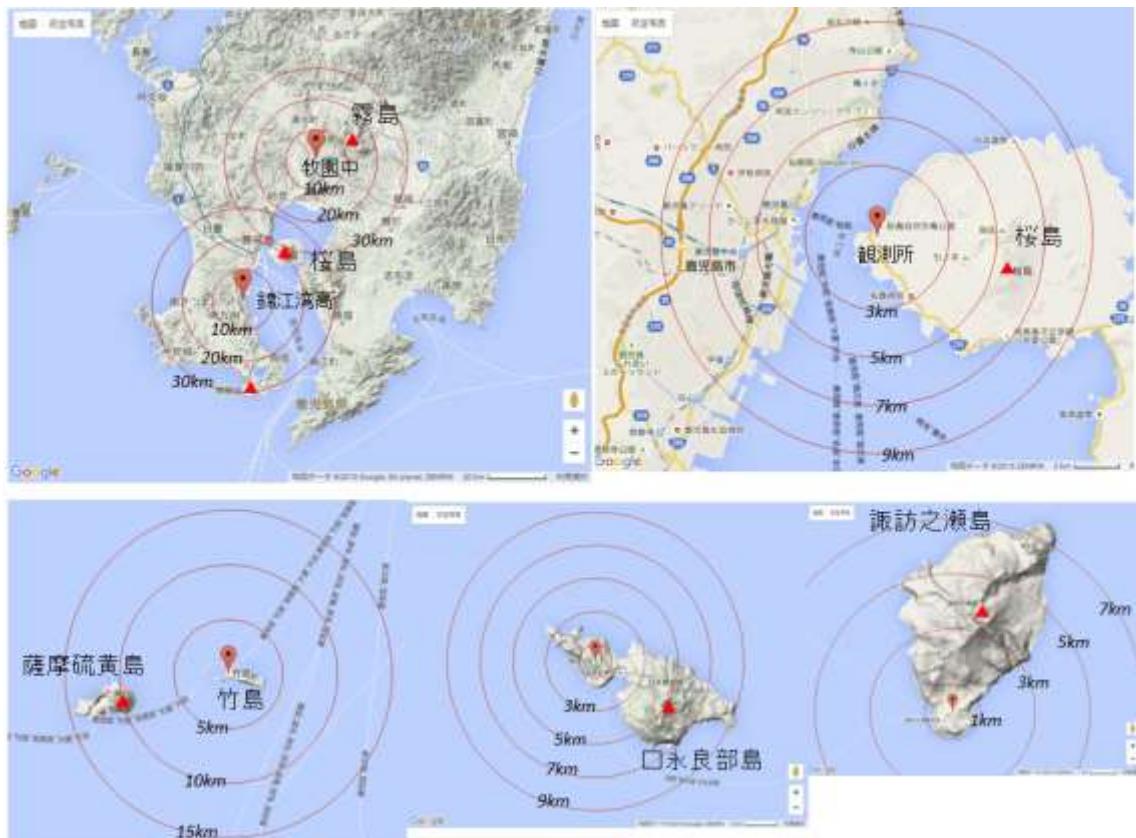


図4 霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島におけるXバンドMPレーダーの観測範囲。

前年度までは霧島新燃岳、桜島火山、口永良部島火山の噴火のうち、主に監視カメラによる目視にて噴煙到達高度が測定されている噴火について、レーダー反射強度分布と噴煙高度の比較を行ってきた。この結果、目視測定による噴煙高度とレーダー反射強度分布の対応関係が明確化した。一方、噴火は天候に左右されずに発生しており、その間もレーダー観測は実施されている。そこで、今年度は、桜島については、気象庁の監視による噴煙高度測定が不明もしくは、噴煙が雲入りとなり最高到達高度が不明な噴火のレーダー反射強度について調べた。なお、噴火時は晴天で噴煙高度が判明しているが2019年の噴煙最高高度であった11月8日17時24分の噴火についても述べる。また、口永良部島については今年度では2020年1月から2月に噴火があったので、主に天候不良時の噴火について観測結果を述べる。

a2) 桜島噴火

2019年に発生した桜島の噴火のうち、気象庁が噴煙高度不明もしくは、雲入りにより最高到達高度が不明な噴火を表3に示す。すべて南岳火口からの噴火であった。これらの噴火について、レーダー反射強度分布から噴煙を認識出来なかった噴火のみ表3にて「不明」とコメントした。また、太字で示した噴火についてはレーダー反射強度分布を図5～図14に示す。図5～図14はレーダー反射強度分布から噴煙が最高到達高度に達したと推定された時刻および方位での反射強度分布を示している。

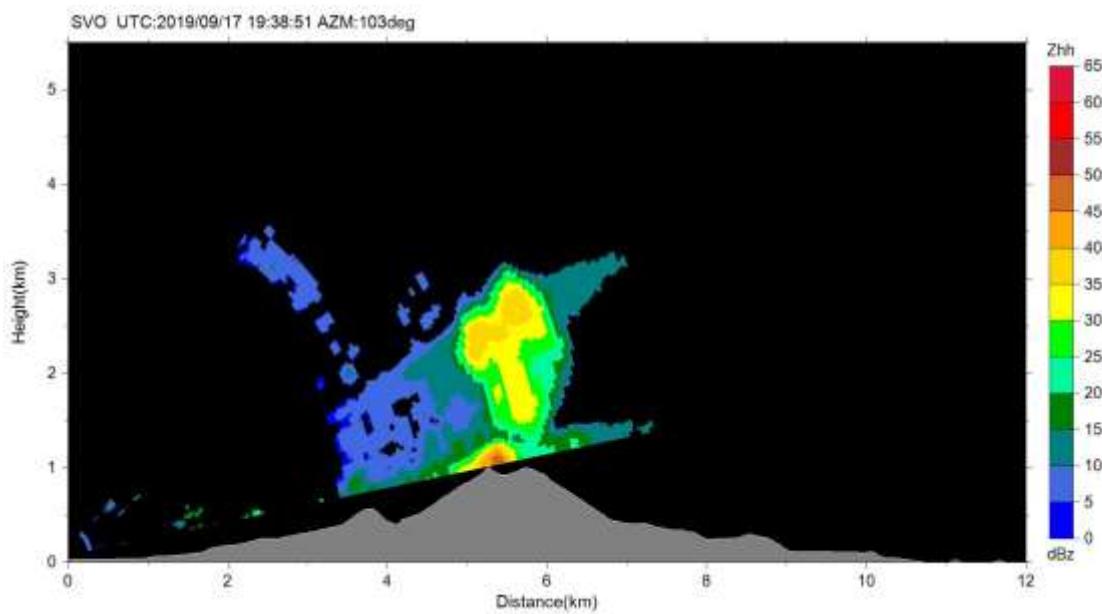


図 5 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。9/18 4:35 の爆発の例。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

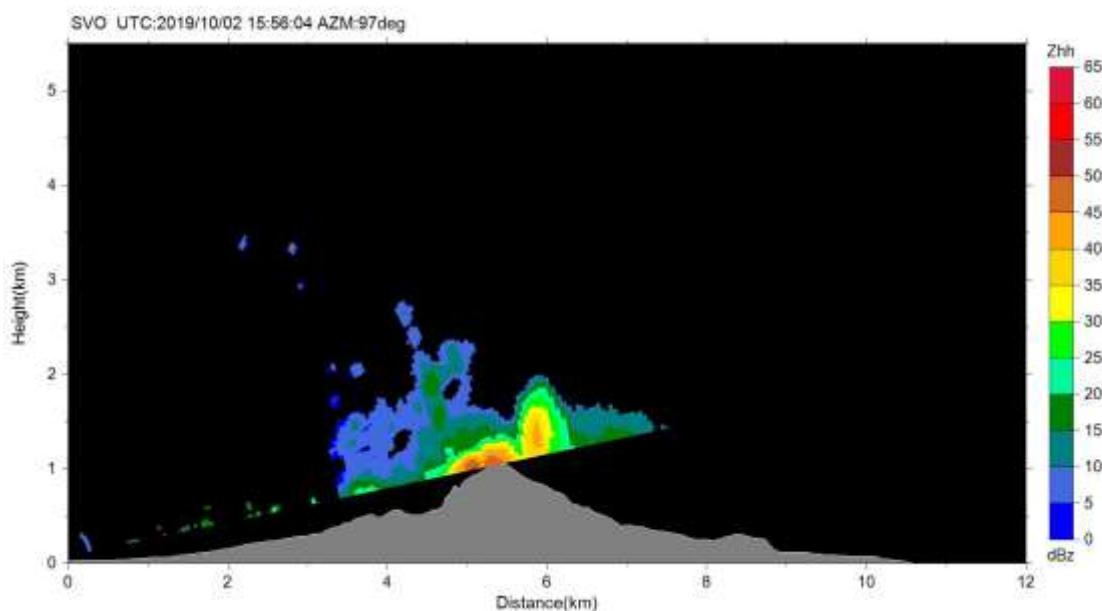


図 6 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。10/3 0:55 の爆発の例。

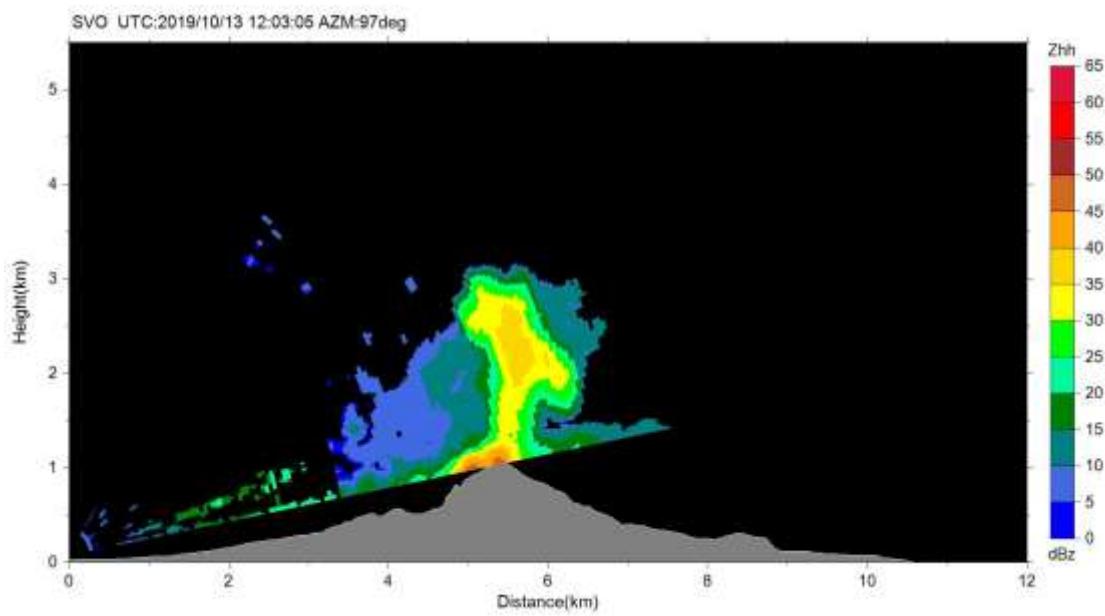


図 7 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。10/13 21:00 の爆発の例。

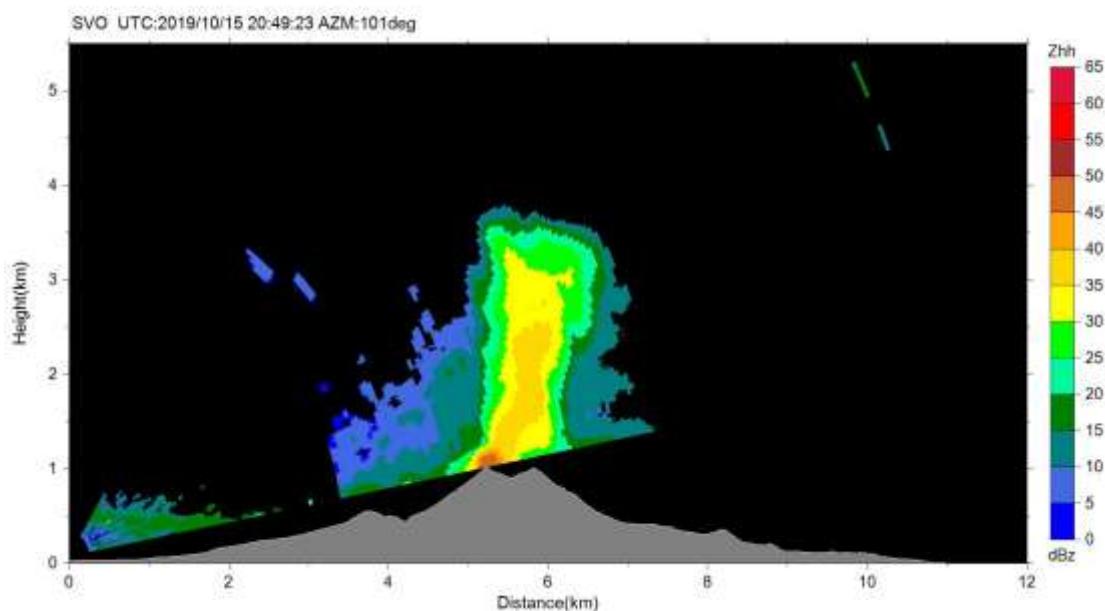


図 8 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。10/16 5:46 の爆発の例。

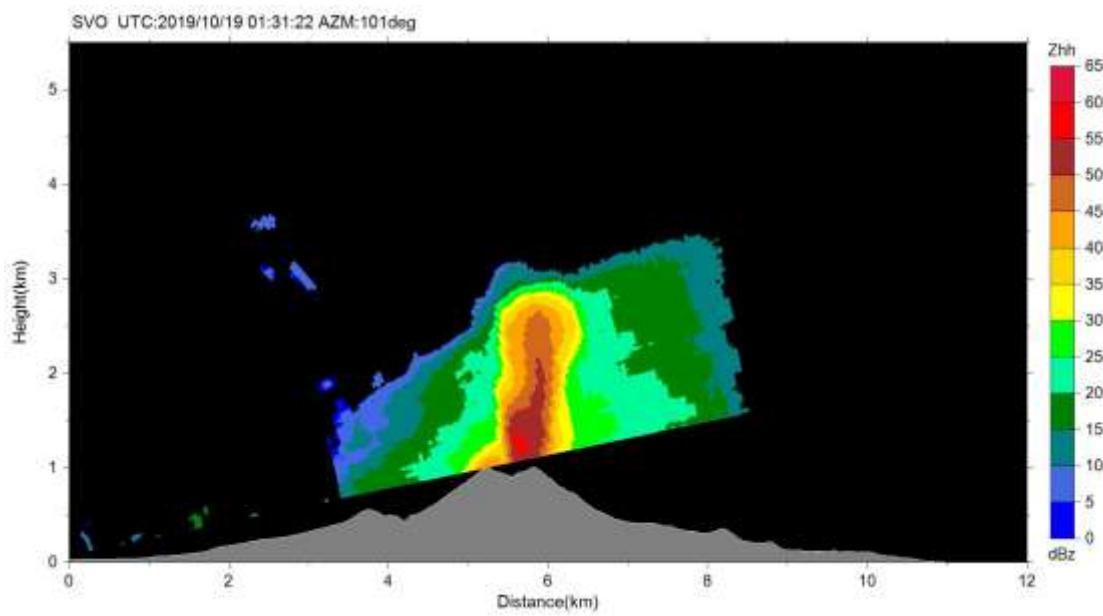


図 9 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。10/19 10:29 の爆発の例。

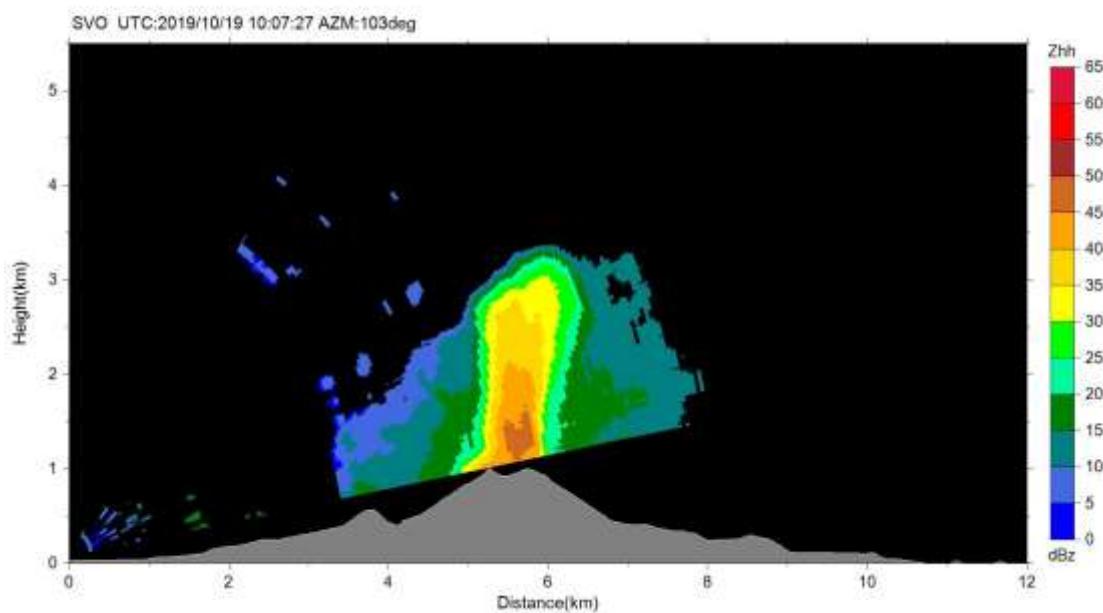


図 10 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。10/19 19:05 の爆発の例。

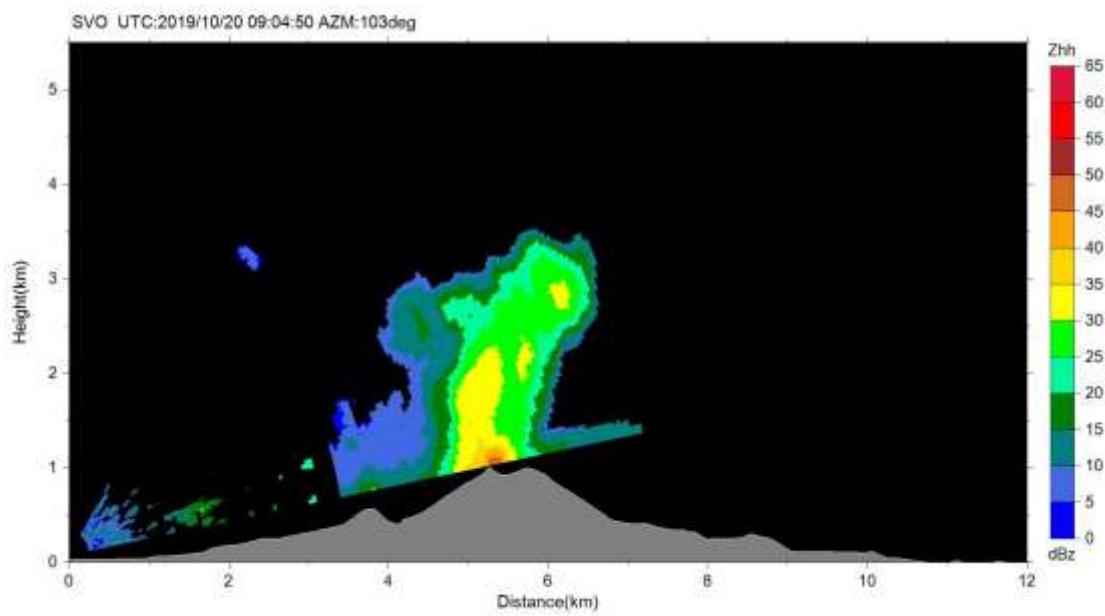


図 11 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。10/20 17:59 の爆発の例。

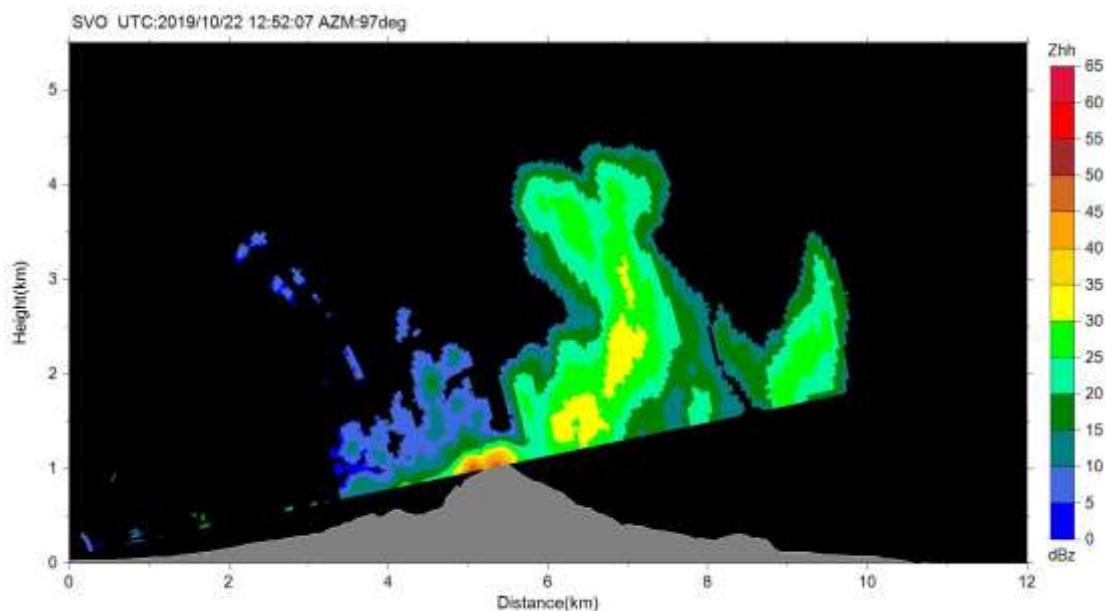


図 12 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。10/22 21:46 の爆発の例。

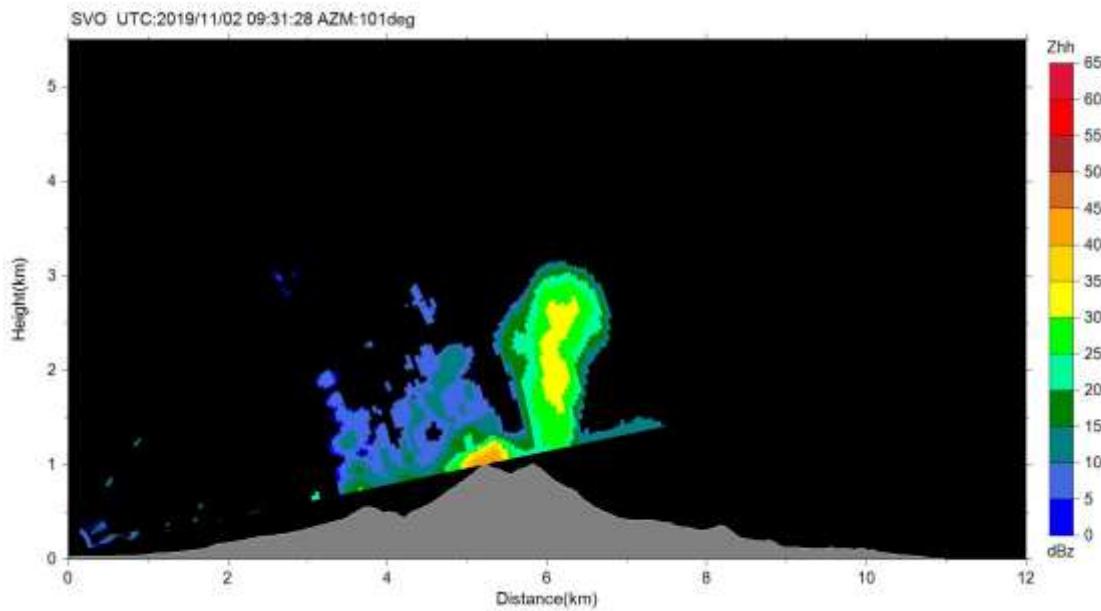


図 13 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。11/2 18:28 の爆発の例。

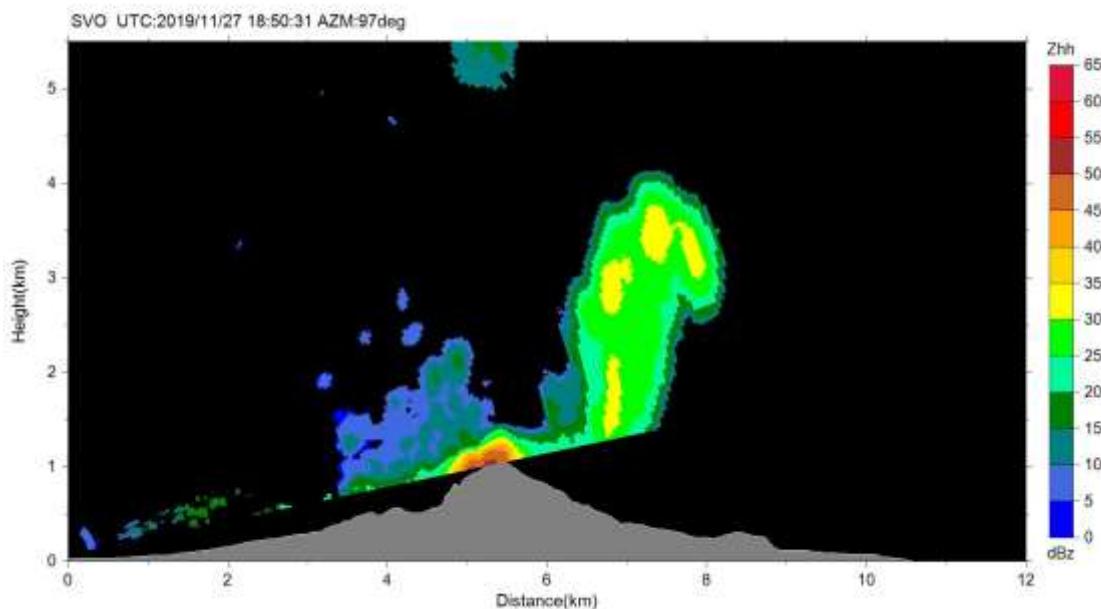


図 14 桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。11/28 3:46 の爆発の例。

図 5 は 9/18 4:35 の爆発で噴煙高度は 600 m にて雲に入って最高到達高度不明であるが、反射強度分布から到達高度は 2000 m 程度と認識できた。図 6 は 10/3 0:55 の爆発で目視では噴煙が把握出来ていないが、反射強度分布から噴煙到達高度を火口上 700 m 程度と推定した。図 7 は 10/13 21:00 の爆発で噴煙高度 300m にて雲に入ったため最高到達高度が不明であったが、反射強度分布から火口上 2000m 程度と推定した。図 8 は 10/16 5:46 の爆発であるが、噴煙高度 1500 m にて雲に入ったため最高到達高度が不明であったが、反射強度分

布から火口上 2500 m と推定した。図 9 は 10/19 10:29 の爆発で噴煙高度 500m にて雲に入ったため最高到達高度が不明であったが、レーダー反射強度分布から火口上 1800m と推定した。図 10 は 10/19 19:05 の爆発で噴煙高度 1200m にて雲に入ったため最高到達高度が不明であったが、レーダー反射強度分布から火口上 2000m と推定した。図 11 は 10/20 17:59 の爆発で噴煙高度 800m にて雲に入ったため最高到達高度が不明であったが、反射強度分布から火口上 2000m と推定した。図 12 は 10/22 21:46 の爆発で目視では噴煙が把握出来ていないが、反射強度分布から火口上 3000 m 程度と推定した。図 13 は 11/2 18:28 の爆発で噴煙高度 800m にて雲に入ったため最高到達高度が不明であったが、反射強度分布から火口上 2000m 程度と推定した。図 14 は 11/28 3:46 の噴火は噴煙高度 200 m にて雲に入ったため最高到達高度が不明であったが、火口上 3000m 程度と推定した。

表 3 桜島の 2019 年の雲入りとされた噴火のリスト

年/月/日 時:分	タイプ	噴煙高度 (m)	空振 (Pa)	図番号 or 確認結果	レーダー高度 (m)
2019/2/3 2:28	Ex	>1000	61.6		-
2019/2/10 15:18	Ex	>600	57.7		-
2019/2/27 13:39	Ex	>1200	69.8		-
2019/3/10 10:32	Ex	X	28.9	不明	-
2019/3/18 18:23	Ex	>1700	49.5		-
2019/4/7 2:51	Ex	>500	114.3		-
2019/4/25 6:38	Ex	>200	29.9		-
2019/5/1 13:00	Ex	>700	28.4	不明	-
2019/5/14 10:26	Er	>1600	7.8		-
2019/6/24 0:34	Ex	X	12.9	不明	-
2019/7/22 9:47	Ex	>1500	32.7		-
2019/9/18 4:35	Ex	>600	68.2	図 5	2000
2019/9/18 15:09	Er	>1600	3.2		-
2019/9/18 15:57	Er	>1200	X	不明	-
2019/9/20 16:04	Ex	>3400	39.6		-
2019/10/3 0:55	Ex	X	53.5	図 6	700
2019/10/7 14:01	Ex	>600	18.5		-
2019/10/13 17:29	Ex	>700	25.4		-
2019/10/13 21:00	Ex	>300	84.2	図 7	2000
2019/10/14 19:44	Ex	>600	21.7	不明	-
2019/10/16 5:46	Ex	>1500	57.4	図 8	2500
2019/10/17 22:18	Er	>1500	4.6	不明	-
2019/10/18 2:23	Er	>1200	4.1	不明	-
2019/10/18 14:25	Ex	>1800	25.5		-

年/月/日 時:分	タイプ	噴煙高度 (m)	空振 (Pa)	図番号 or 確認結果	レーダー高度 (m)

2019/10/18 20:29	Er	>1400	X	不明	-
2019/10/19 10:29	Ex	>500	55.7	図 9	1800
2019/10/19 19:05	Ex	>1200	44.6	図 10	2000
2019/10/20 0:42	Er	>1200	1.5		-
2019/10/20 4:56	Er	>1500	X		-
2019/10/20 17:59	Ex	>800	46.4	図 11	2000
2019/10/22 21:46	Ex	X	41.7	図 12	3000
2019/11/2 17:51	Ex	>1500	53.7		-
2019/11/2 18:28	Ex	>800	40.2	図 13	2000
2019/11/5 20:24	Ex	>100	4.9		-
2019/11/7 15:57	Ex	>3800	45.8		-
2019/11/18 23:31	Ex	>1300	21.4	不明	-
2019/11/28 3:46	Ex	>200	X	図 14	3000
2019/12/2 4:40	Ex	>1400	X		-
2019/12/2 10:05	Er	>1600	X		-
2019/12/6 22:53	Ex	X	X	不明	-
2019/12/9 14:08	Ex	>500	X		-
2019/12/14 14:24	Ex	>500	X		-
2019/12/17 4:46	Ex	X	X		-
2019/12/17 6:57	Ex	X	X	不明	-
2019/12/17 9:31	Ex	>2000	X		-
2019/12/17 18:08	Er	>1300	11.9		-
2019/12/17 19:41	Ex	>1500	34.9		-
2019/12/18 7:08	Er	>1000	13		-
2019/12/19 13:00	Ex	>200	34.4		-
2019/12/19 18:15	Ex	>800	79.3		-
2019/12/21 10:10	Ex	>400	20.9		-
2019/12/21 10:35	Er	>1200	1		-
2019/12/21 11:05	Er	>1200	X		-
2019/12/21 11:23	Er	>1100	X	不明	-
2019/12/21 13:45	Ex	X	20.9	不明	-
2019/12/22 0:20	Ex	>800	25.8		-
2019/12/22 10:39	Ex	X	15.9	不明	-

Typeにおいて Ex は気象庁の定義の爆発を示し、Ex ではない噴火は Er としている。X は値が不明。>は噴煙高度が記載値以上と推定される場合。レーダー確認において「不明」は反射強度の高まりの分布が噴煙形状として認識出来なかったケールを示す。レーダー高度の「-」は反射強度の有無の確認はしたが、噴煙到達高度を推定しなかったことを示す。

a3) 口永良部島噴火

口永良部島は 2019 年 2 月 2 日の噴火から約 1 年ぶりに 2020 年 1 月 11 日～12 日、1 月

17日～20日、1月23日、1月24日、1月27日、2月1日、2月3日、2月4日～5日、2月9日、2月13日、2月20日～21日に噴火した。表2に気象庁が発表した口永良部島の噴火に関する火山観測報を示す。2020年1月18日11:25までHSQスキャンモードで運用していたため、噴煙高度の議論は難しい。同年1月18日11:26以降はRHIスキャンモードで運用していたので、ここではRHIスキャンモードでのレーダー反射強度分布を表4記載の噴火から選択した図15～図28で示す噴火について述べる。

図15(1/23 7:34、噴煙高度不明)、図16(1/23、噴煙高度200m)、図18(1/24 4:23、噴煙高度100m)、図19(1/24 6:23、噴煙高度500m)、図21(2/1 11:10、噴煙高度200m)、図23(2/3 6:01、噴煙高度不明)、図24(2/4 9:40、噴煙高度200m)、図25(2/9 9:50、噴煙高度500m)、図26(2/13 12:11、噴煙高度300m)、図27(2/20 10:20、噴煙高度100m)、図28(2/21 10:58、噴煙高度200m)に噴火時のレーダー反射強度分布を示す。これらの噴火時の反射強度は山頂付近からのグランドクラッターの影響による反射強度の高まりを除いて、顕著な反射強度の高まりは見られない。また、反射強度の高まりから噴煙形状を認識出来なかった。この原因は、噴煙の中の火碎物の濃度が反射強度を高めるに不十分であったためと推察される。図17は1/23 7:34の連続噴火継続時のレーダー反射強度分布を示しており、噴煙高度は200mにて雲に入つて最高到達高度不明であった。この噴火の噴煙の到達高度は、反射強度分布から2200m程度と推定した。図20は1/27 1:47に噴火したもようとされる噴火の時の反射強度分布を示す。気象庁により噴火したもようとされ天候不良とコメントされ、当然目視による噴煙高度は不明である。反射強度分布を見ると25dBz以上の領域がレーダースキャンの範囲の海拔4000mまで広く横たわっていて、厚い雨雲がこの時に口永良部島周辺を覆っていたと思われる。その中でも、45dBz以上の領域を見ると、火口から情報に噴煙状に分布しているのが分かり、これが少なくとも噴煙の中の火碎物の濃度が比較的高い領域に対応していると思われる。よって、反射強度分布からは噴煙到達高度は少なくとも火口上800mであると推定されるが、雨雲の反射強度にマスクされているため最高到達高度の推定は困難である。図22は2/3 5:31の噴火のレーダー反射強度分布を示す。この噴火は天候不良のため噴煙高度は不明とされているが、反射強度分布から噴煙の最高到達高度を火口上6100mと推定した。

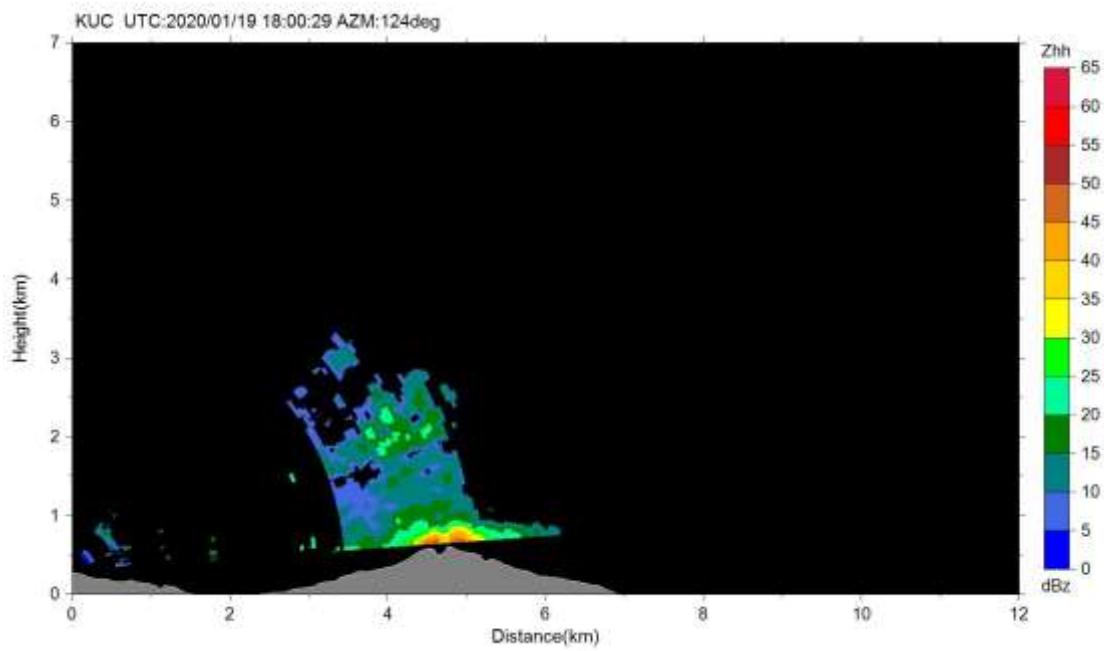


図 15 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。1/20 3:00 の連続噴火継続時の例。

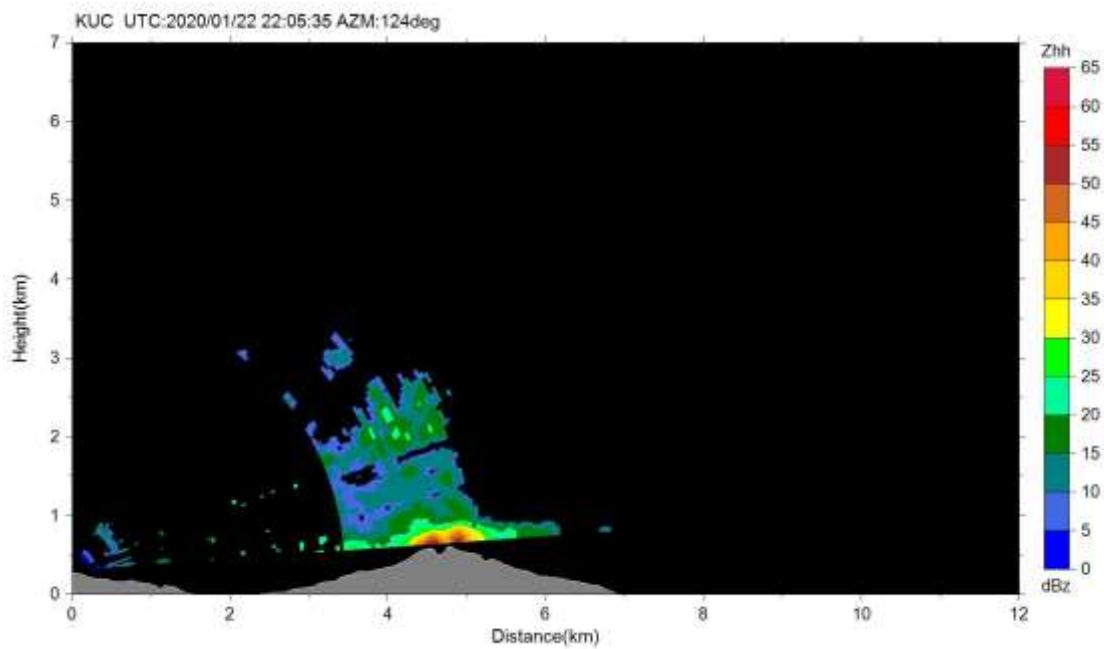


図 16 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。1/23 7:04 の噴火の例。

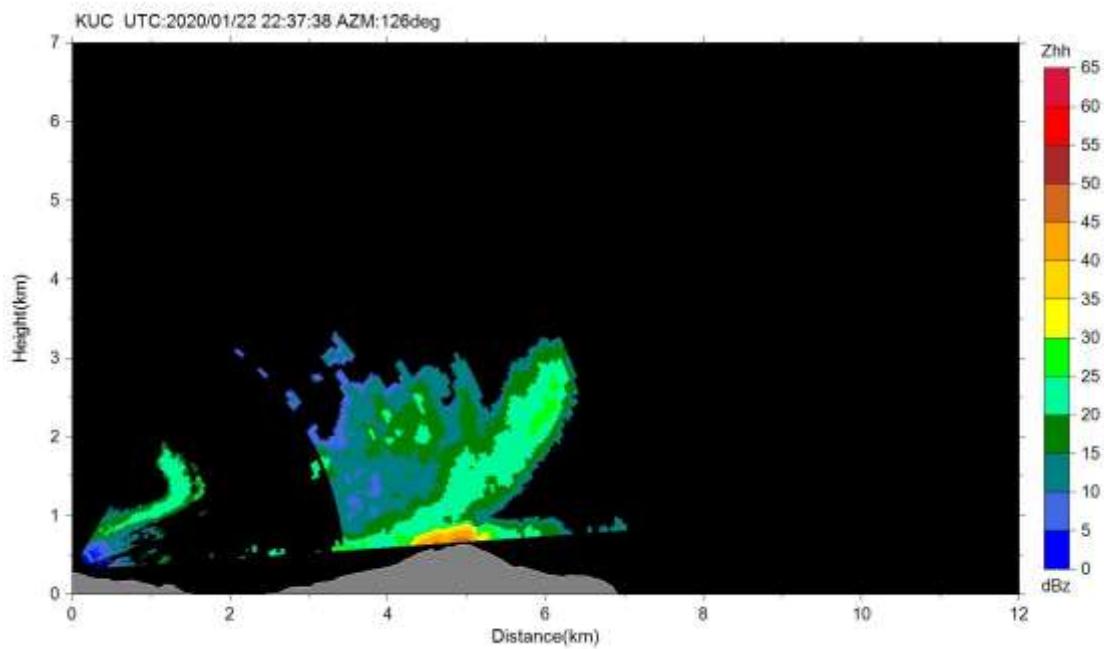


図 17 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。1/23 7:34 の連続噴火継続時の例。

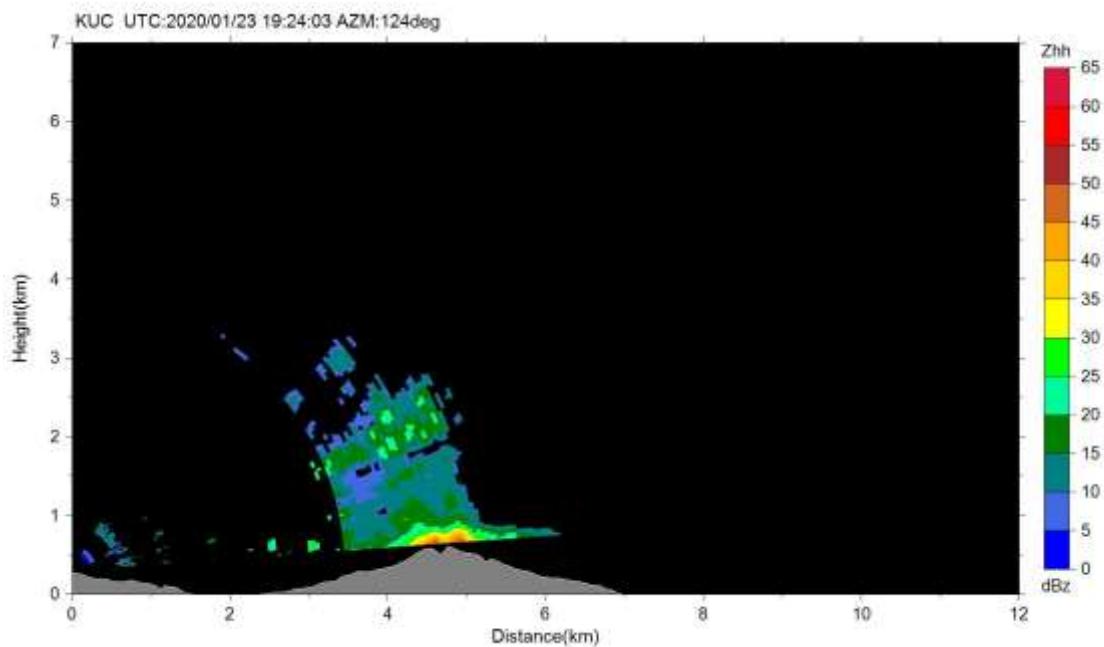


図 18 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。1/24 4:23 の噴火の例。

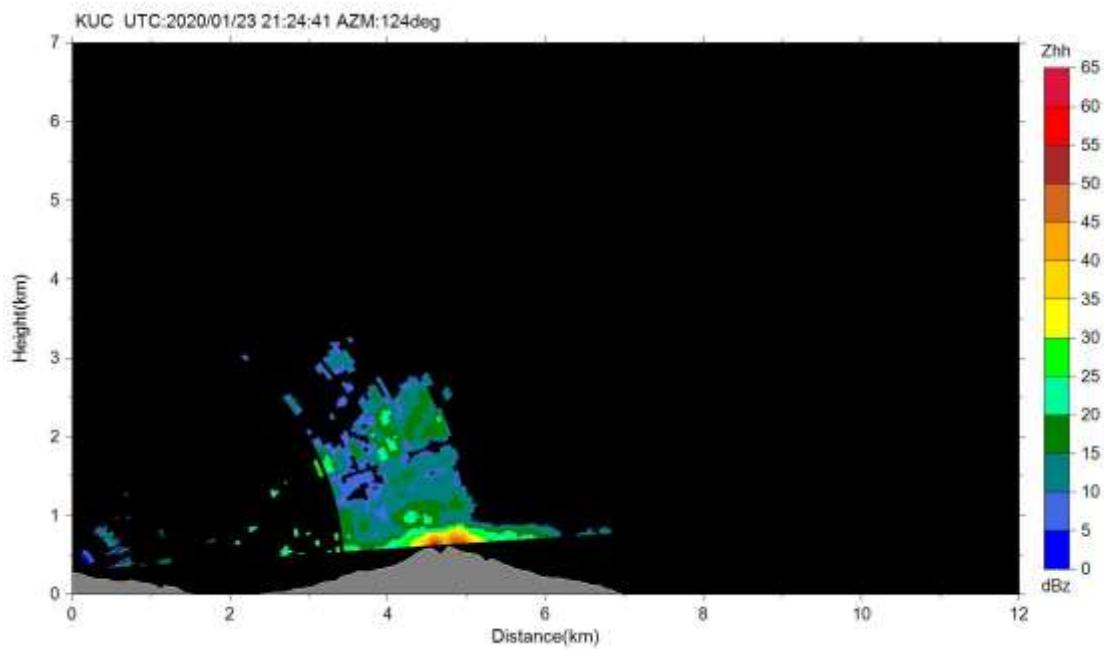


図 19 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。1/24 6:23 の噴火の例。

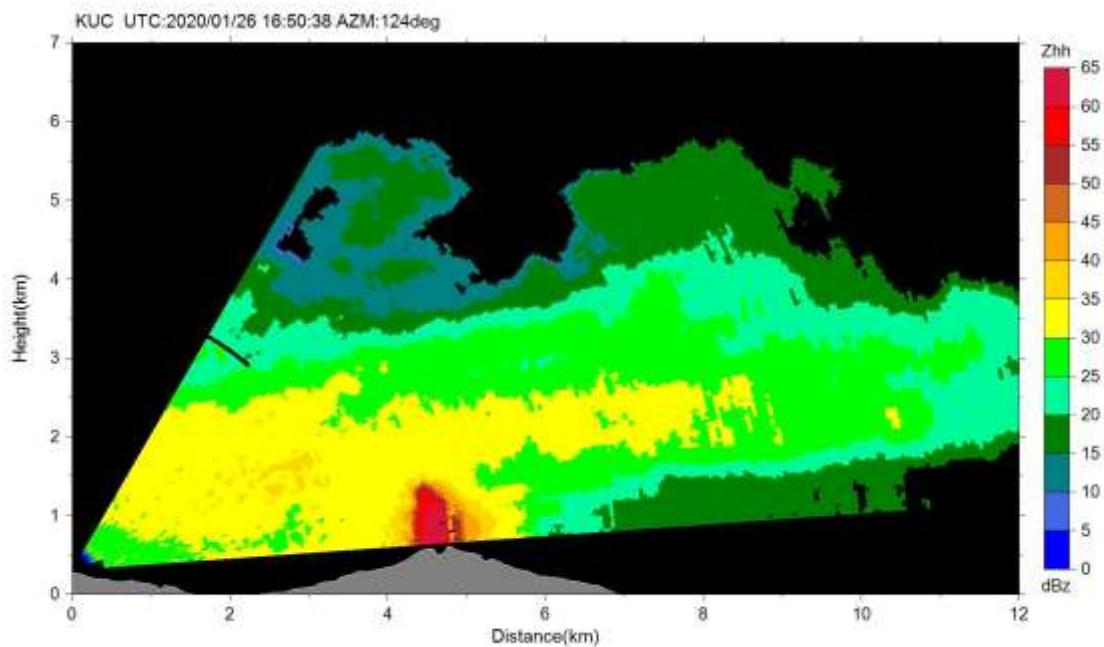


図 20 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。1/27 1:47 の噴火の例。

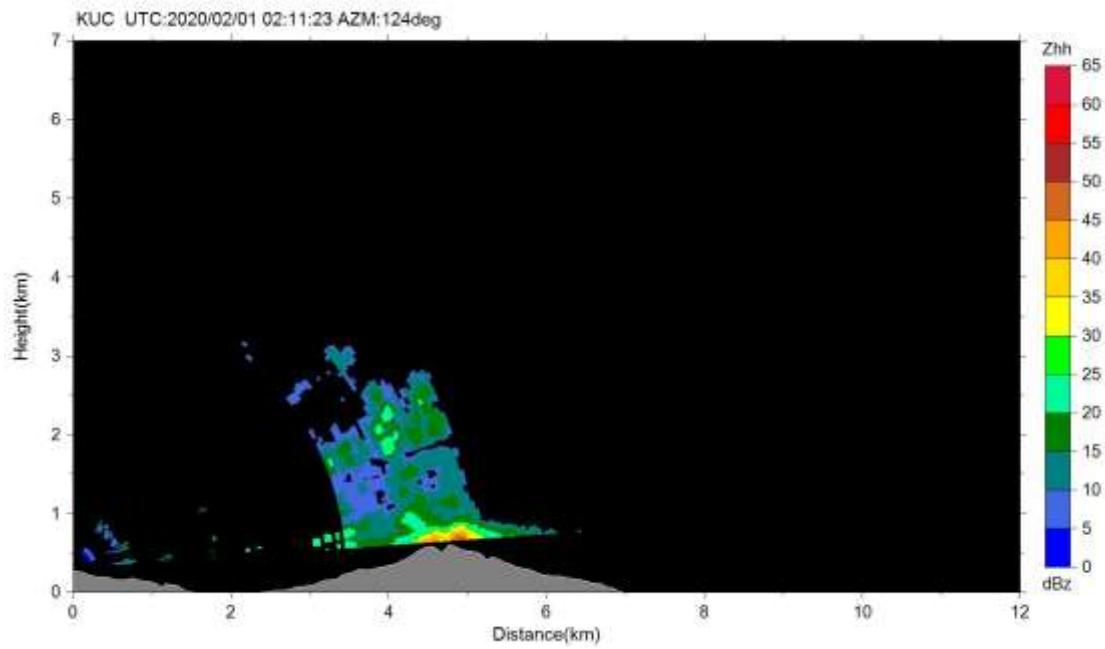


図 21 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2/1 11:10 の噴火の例。

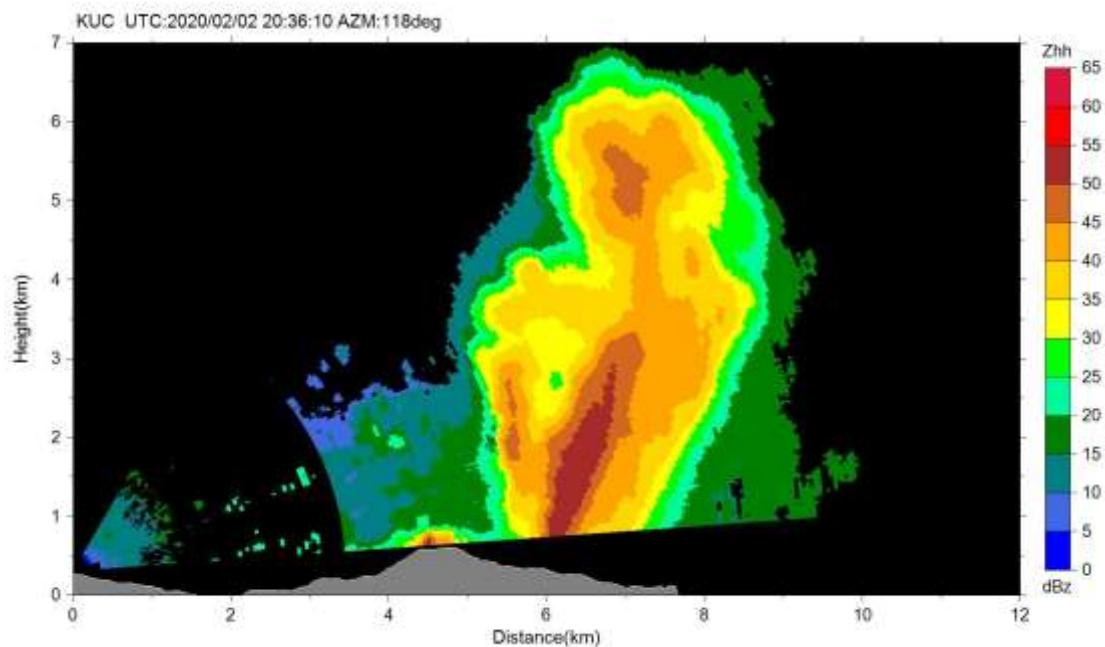


図 22 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2/3 5:31 の噴火の例。

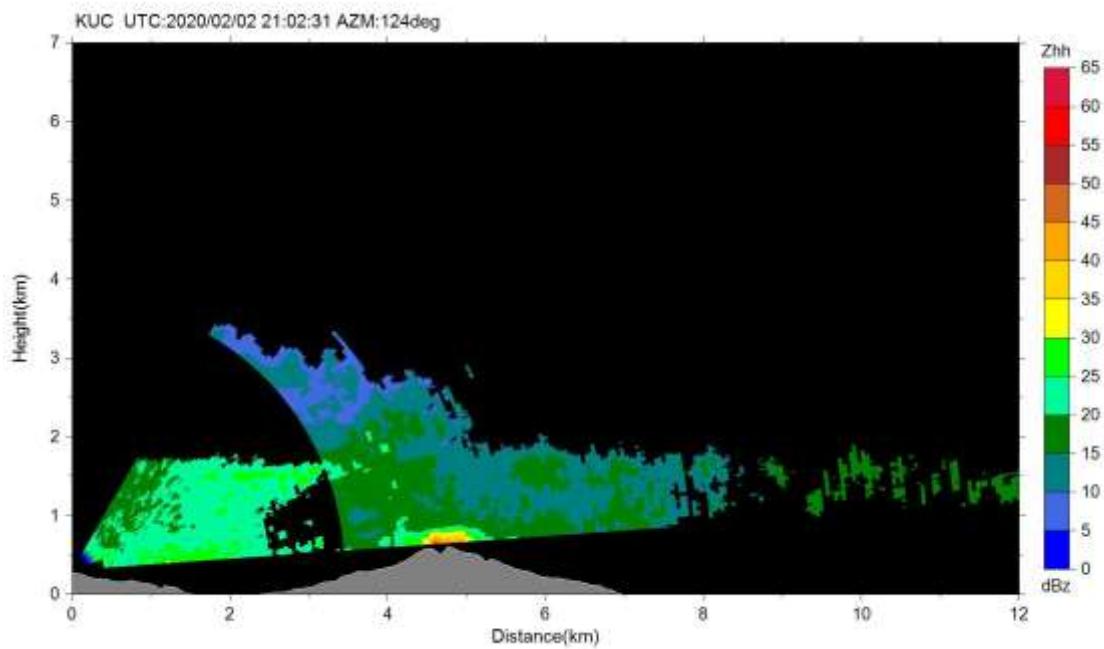


図 23 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2/3 6:01 の噴火継続時の例。

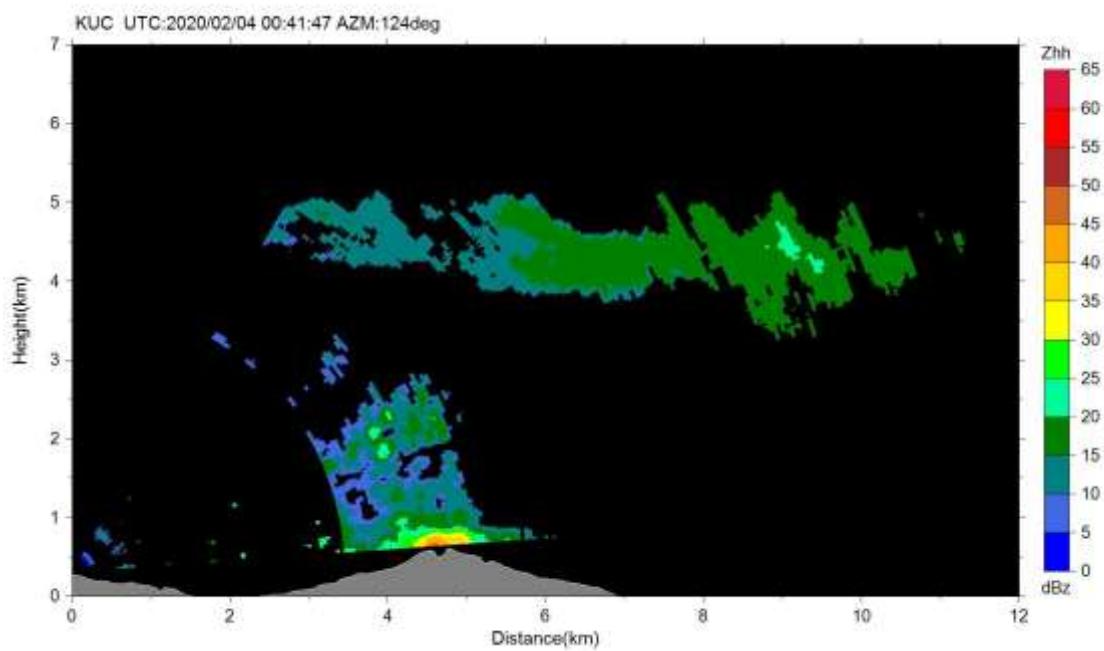


図 24 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2/4 9:40 の噴火継続時の例。

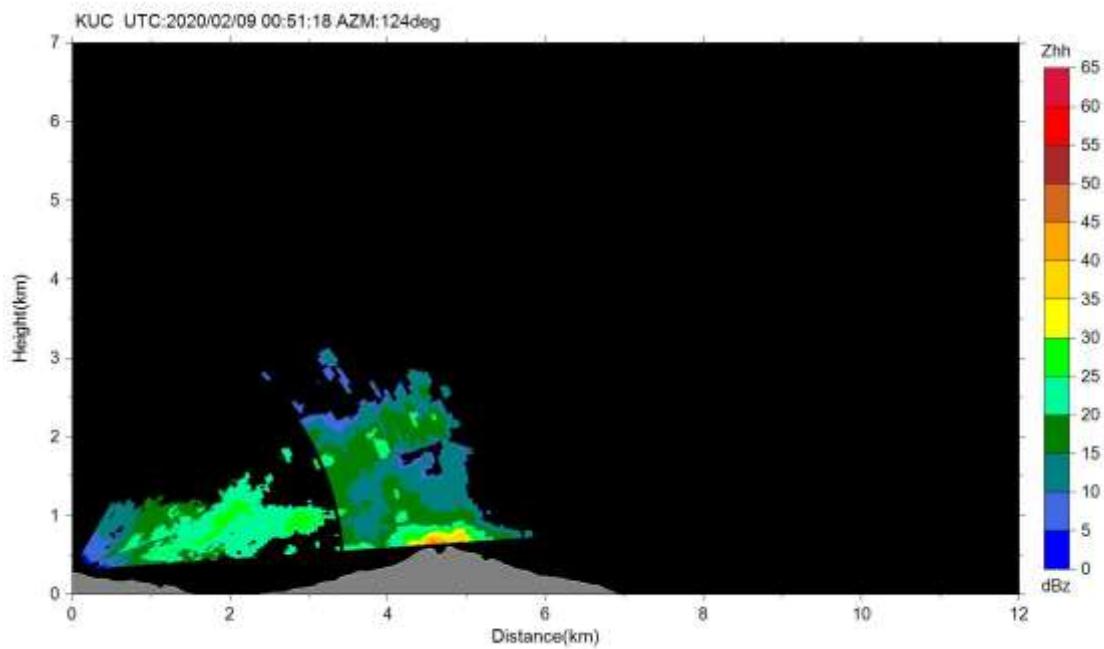


図 25 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2/9 9:50 の噴火継続時の例。

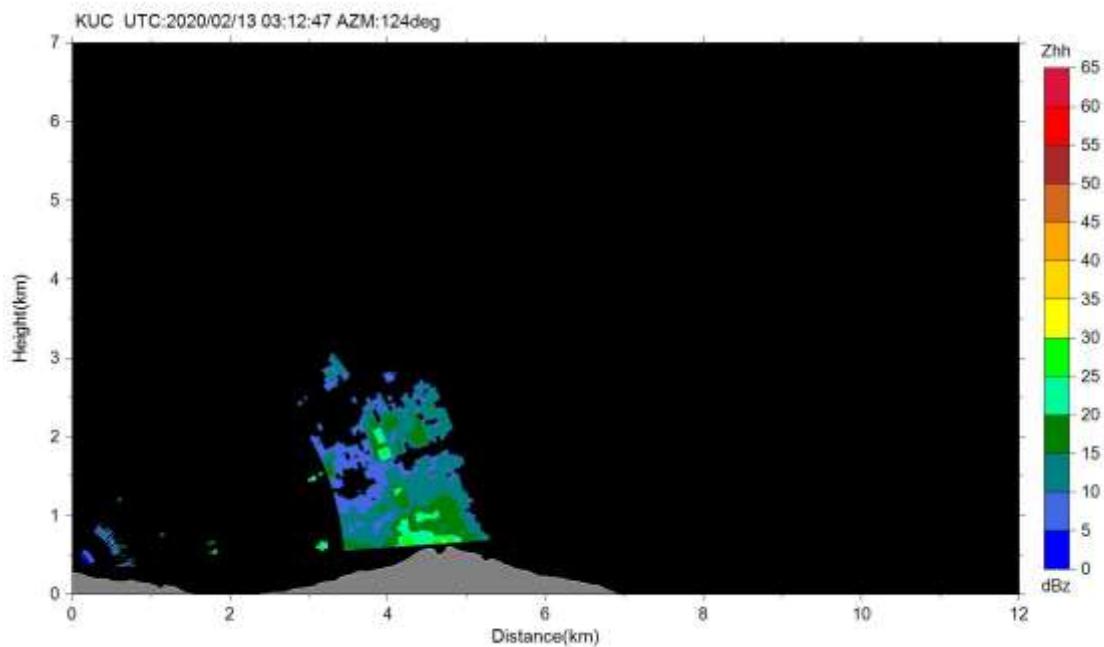


図 26 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2/13 12:11 の噴火の例。

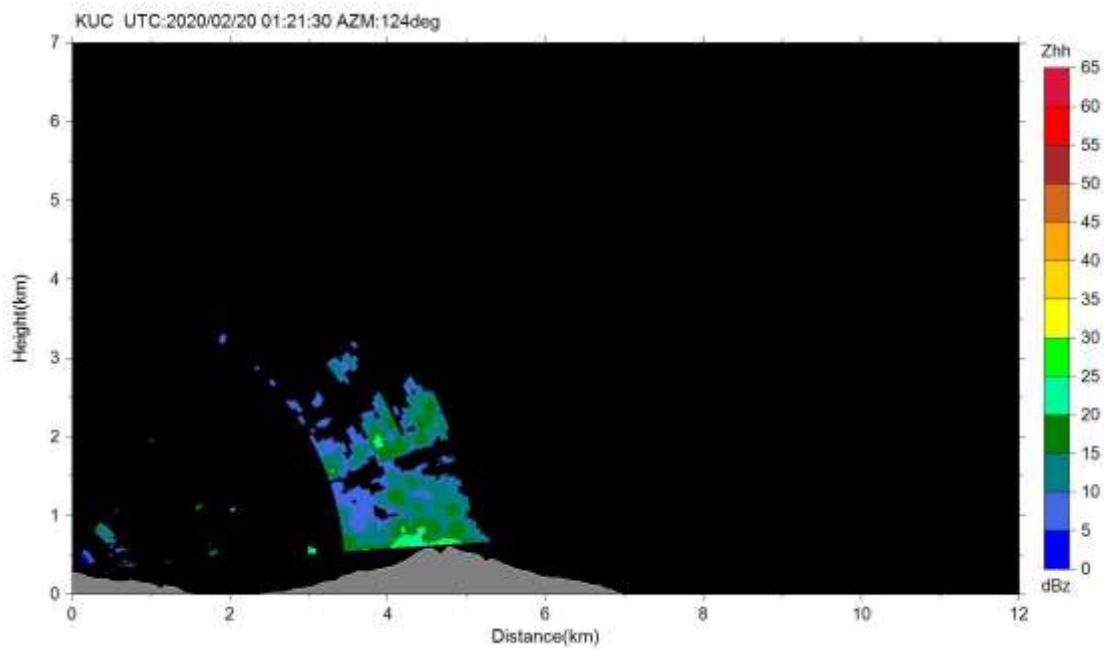


図 27 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2/20 10:20 の噴火の例。

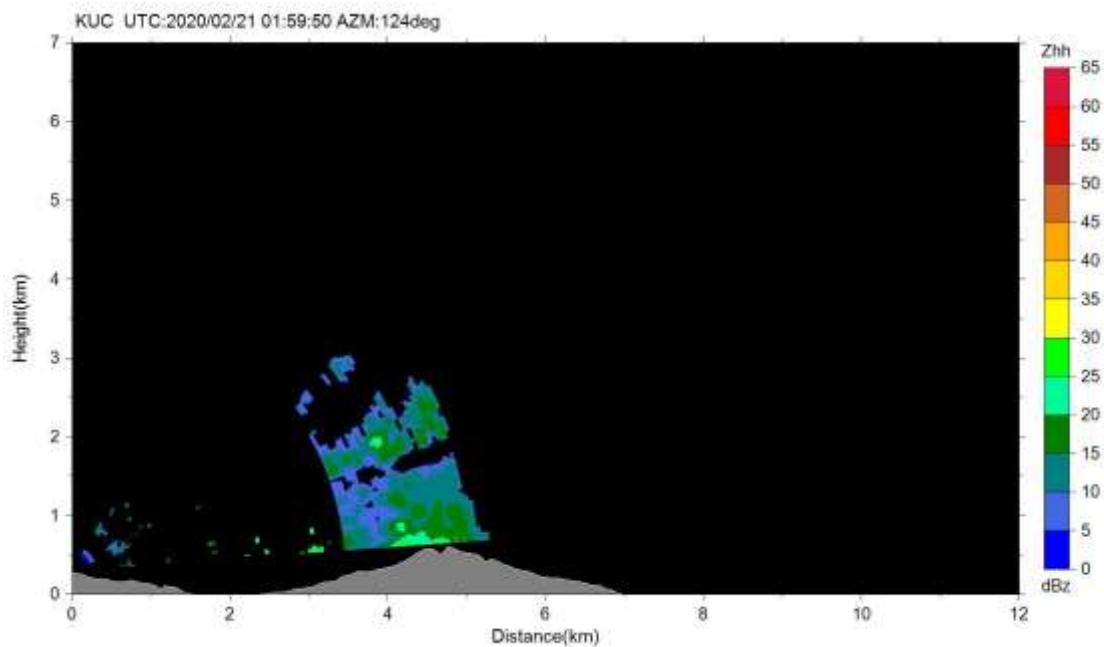


図 28 口永良部島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2/21 10:58 の噴火の例。

表 4 2020 年 1 月～2 月の口永良部島の噴火に関する火山観測報

日時	現象	噴煙 高度 (m)	レーダー 噴煙高度 (m)	備考	流向	図
2020/1/11 15:05	噴火	2000		雲に入る	東	
2020/1/11 15:35	連続噴火継続	1000			南東	
2020/1/11 21:00	連続噴火継続	600			北東	
2020/1/12 03:00	連続噴火継続	100		雲に入る	南西	
2020/1/12 07:30	連続噴火停止	不明			不明	
2020/1/17 16:59	噴火	100			南東	
2020/1/17 17:29	連続噴火継続	100			南東	
2020/1/17 21:00	連続噴火継続	100			南東	
2020/1/18 03:00	連続噴火継続	100			南東	
2020/1/18 09:00	連続噴火継続	100			南東	
2020/1/18 15:00	連続噴火継続	100			南東	
2020/1/18 21:00	連続噴火継続	100			南	
2020/1/18 21:00	連続噴火継続	100			南	
2020/1/19 03:00	連続噴火継続	100			南東	
2020/1/19 09:00	連続噴火継続	100			南	
2020/1/19 15:00	連続噴火継続	100			南	
2020/1/19 21:00	連続噴火継続	100			南	
2020/1/20 03:00	連続噴火が継続 しているもよう	不明			不明	図 15
2020/1/20 09:00	連続噴火継続	100			南東	
2020/1/20 10:30	連続噴火停止	不明			不明	
2020/1/23 07:04	噴火	200	2200	雲に入る	北東	図 16
2020/1/23 07:34	連続噴火継続	200			北東	図 17
2020/1/23 17:05	連続噴火停止	不明			不明	
2020/1/24 04:23	噴火	100			南	図 18
2020/1/24 06:23	噴火	500			北東	図 19
2020/1/27 01:47	噴火したもよう	不明	>800	天候不良	不明	図 20
2020/2/1 11:10	噴火	200			南東	図 21
2020/2/1 11:40	連続噴火継続	200			南東	
2020/2/1 15:00	連続噴火継続	200			南東	
2020/2/1 21:00	連続噴火継続	300			南東	
2020/2/1 23:20	連続噴火停止	不明			不明	

日時	現象	噴煙	レーダー	備考	流向	図
----	----	----	------	----	----	---

		高度 (m)	噴煙高度 (m)			
2020/2/3 05:31	噴火	不明	6100	大きな噴石 が火口から 600 m 到達、 火碎流が火 口の南西側 ～ 900 m 流 下	不明	図 22
2020/2/3 06:01	連続噴火が継続 しているもよう	不明		天候不良	不明	図 23
2020/2/3 09:00	連続噴火継続	300			南東	
2020/2/3 15:00	連続噴火継続	200			南東	
2020/2/3 21:00	連続噴火継続	300			南東	
2020/2/4 03:00	連続噴火継続	200			南西	
2020/2/4 08:00	連続噴火停止	不明			不明	
2020/2/4 09:40	噴火	200			南西	図 24
2020/2/4 10:10	連続噴火継続	100			南西	
2020/2/4 15:00	連続噴火継続	200			南西	
2020/2/4 21:00	連続噴火継続	100			南西	
2020/2/5 03:00	連続噴火継続	100			南西	
2020/2/5 06:30	連続噴火停止	不明			不明	
2020/2/9 09:50	噴火	500			南東	図 25
2020/2/13 12:11	噴火	300			北東	図 26
2020/2/20 10:20	噴火	100			南	図 27
2020/2/21 10:58	噴火	200			直上	図 28

噴煙到達高度は火口上からの高度で、雲入りの場合は実際の噴煙到達高度は表記の高度よりも高いと思われるが、不明である。

b) ライダー観測

ライダーとは LIDAR = Light Detection and Ranging、Laser Radar の略であり、紫外から近赤外のレーザー光を用いて、エアロゾル観測を行う技術である。桜島では、Nd:YAG レーザー(30mJ、10Hz)から発射される波長 532nm と 1064nm の光を火山噴煙に直接照射し、その後方散乱波を観測している。火山灰粒子(サブミクロン～数十 μm 程度)からのミー散乱を観測しているので、得られるパラメータは粒子の消散係数と偏光解消度である。

ライダーは桜島島内の火山活動研究センター桜島火山観測所(西)及び黒神観測室(東)に設置してある(図 38 参照)。方位角は南岳火口方向に固定し、桜島火山観測所では仰角 11°、黒神観測室では仰角 15°で観測を行っている。データを国立環境研究所へ毎時転送し、自動初期解析とグラフ化を開始した。結果を 1 日単位の図として以下のサイトで公開している。

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

b1) ライダー観測状況

2019 年 1 月から 12 月まで、桜島火山観測所本館および黒神観測室の 2箇所において、ライダーによる噴煙の連続観測を行った。両ライダーは同一の仕様で、共に 532nm、1064nm の 2 波長レーザー光を繰り返し周波数 20Hz で照射する。運用パターンは 2 秒照射+8 秒休止の 10 秒サイクルで、照射 2 秒間(40 パルス)に積算した後方散乱光強度を距離分解能 6m で最長 24km まで記録している。これにより、トラブル等がない限り時間分解能 10 秒(1 日 8640 観測)の連続自動観測が実現されている。両ライダーについて、2019 年の日別の観測時間を図 29 に示す。両地点ともほぼ通年で観測が行われているが、本館では 11 月に、黒神では 1-3 月にまとまった欠測期間がある点には注意が必要である。

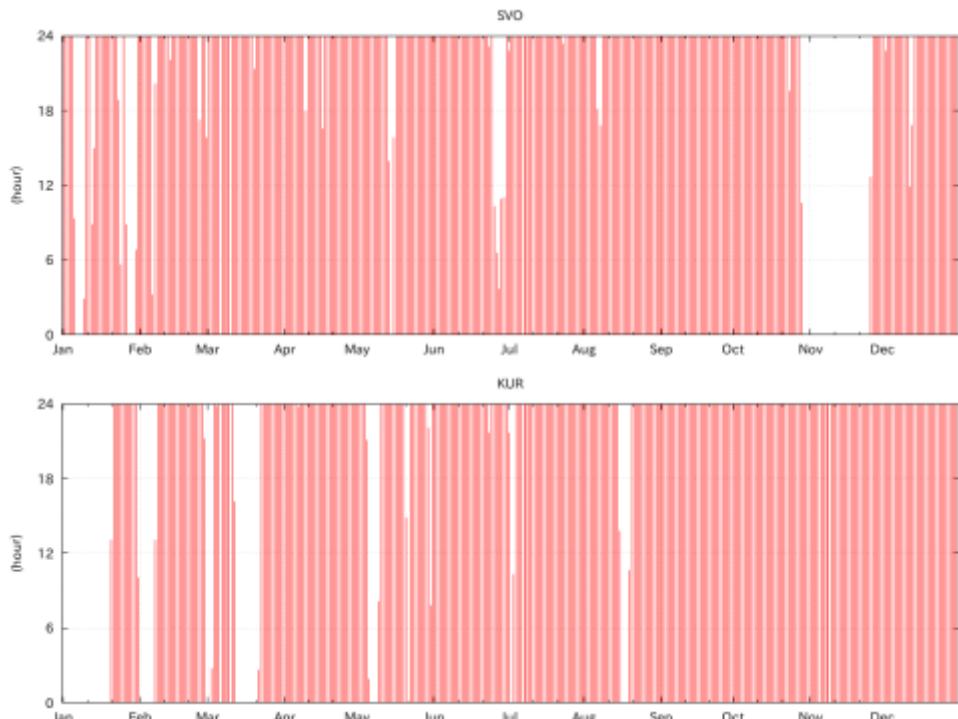


図 29 2019 年の日毎のライダー観測時間。上:本館、下:黒神。

b2) エアロゾル消散係数の季節変動

ライダーでは、観測対象の空気塊に含まれるエアロゾル全体からの後方散乱光を計測しており、一定の仮定のもとでその空気塊の消散係数を推定することが出来る。消散係数は、観測波長の光が単位距離を進む間にその強度が減衰する度合いを表す量で、地上においては視程の逆数に比例する(消散係数の大きい大気では視程が短い、つまり水平の見通しが悪い)。ライダーで観測される消散係数には噴煙由来の粒子のみならず大気汚染など全ての粒子からの寄与が含まれるが、以下では高濃度イベントでは噴煙に含まれるエアロゾルが卓越するものとしてそれ以外のエアロゾルによる寄与は考慮していない。両地点のライダーは南岳火口直上を指向して観測が行われており、測器から火口上までの距離は本館ライダーからが約 5.5km、黒神ライダーからが約 4.5km である。両ライダーから距離 6km までの 532nm 消散係数を月毎に平均し、12 ヶ月分を表示したものを図 30 および図 31 に示す。本館/黒神とも、火口直上にあたる距離において最も高い消散係数が見られ、それより手前側では絶対値は小さい。月平均の消散係数プロファイルは噴煙の平均粒子濃度とその後の移流によって決定されると考えられるため、これらに関する指標として気象庁の火山活動解説資料²⁴⁾から桜島の月別噴火・爆発回数と鹿児島地方気象台における月別降灰量・降灰日数データ、および同じく過去気象データから鹿児島地方気象台における月別風向分布データを取得し、噴火・降灰に関する情報をライダー観測結果と比較のため図 30 および図 31 下部に表示した。また風向のデータとして図 32 に月別風向出現頻度の風配図を示した(この際風速は考慮していない)。これによると、鹿児島では主に北西風を中心とした西寄りの風が年間を通じて卓越しているが、暖候期(6-9 月)には東寄りの風が出現しており、特に 7 月には南西風がよく見られた。上空 1000m 付近でも同様の風向が卓越していれば、暖候期には噴煙は火口から西側へ移流され、その他の季節には東側へ移流されやすいと考えられる。本館のライダーでは年間を通じて月平均消散係数が 0.25/km を超えるケースは見られず、季節変動の幅は比較的小さい。手前側(低高度)の消散係数は 9-10 月に大きく、これは本館ライダーと同様に桜島の西側に位置する鹿児島地方気象台における降灰量(図中の赤線)のピークと対応している。一方、黒神のライダーの結果では 4 月から 9 月にかけて消散係数が低く、それ以外の季節には 0.3/km 近い値が観測されている。特に距離 4km 付近では 7-9 月に低い値が得られており、東寄りの風が卓越している期間と一致している。また、鹿児島地方気象台における降灰量変動と黒神ライダー消散係数との関連性は弱く、異なる方角への輸送量に差があることが 2 地点ライダーの対比からも確認された。

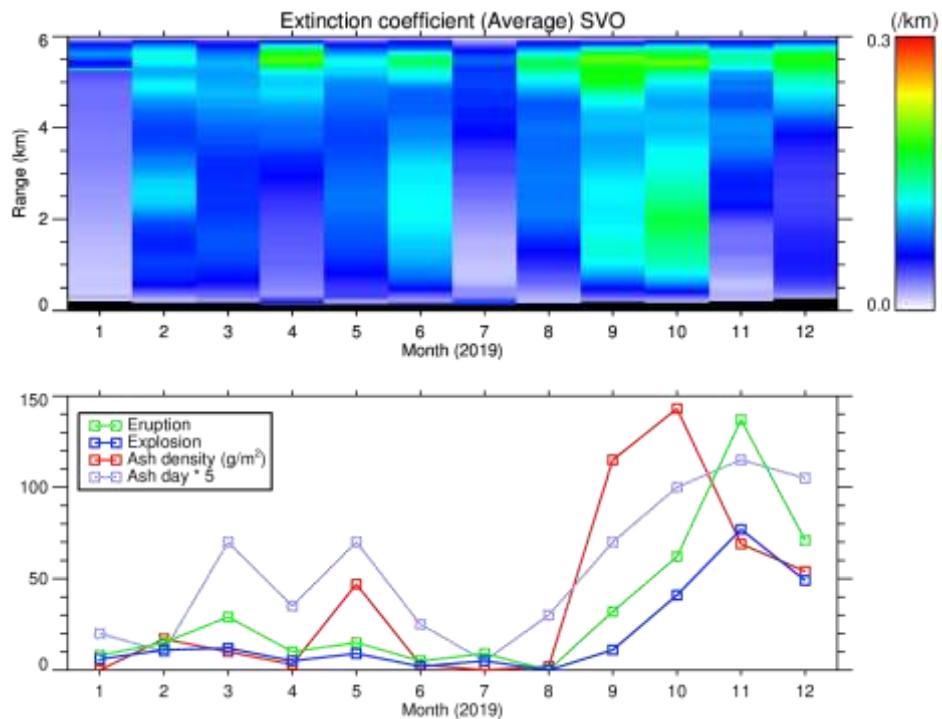


図 30 本館ライダーで観測された 2019 年の月平均エアロゾル消散係数の時間・距離分布。下段は鹿児島地方気象台による噴火回数(緑)・爆発回数(青)・降灰量(赤)・降灰日(紫、5 倍してある)の月毎の値。

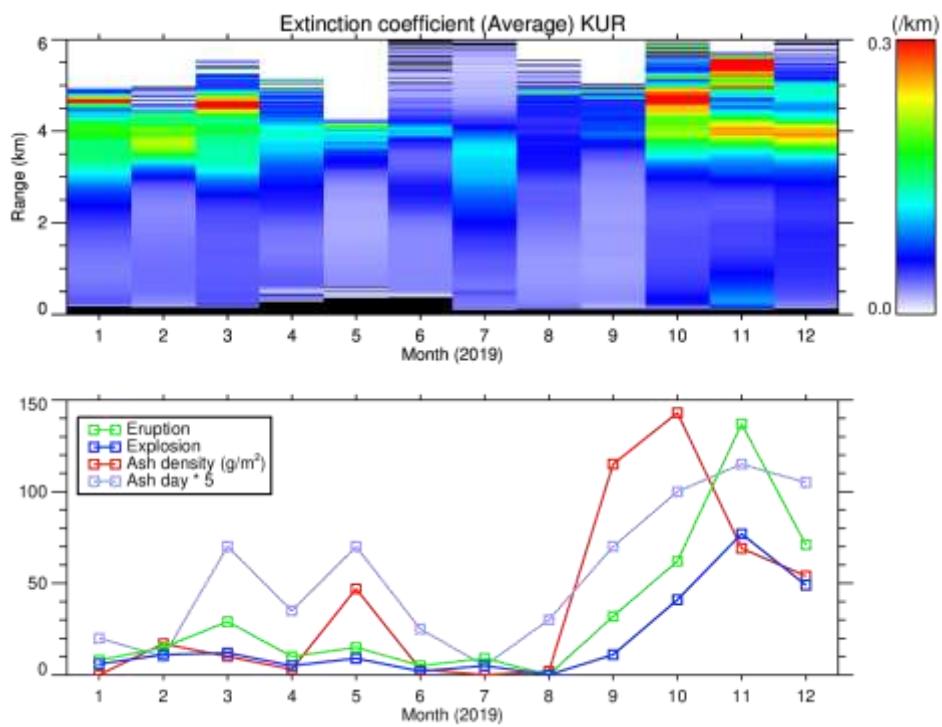


図 31 図 30 に同じ。ただし上段は黒神ライダーによる観測結果。

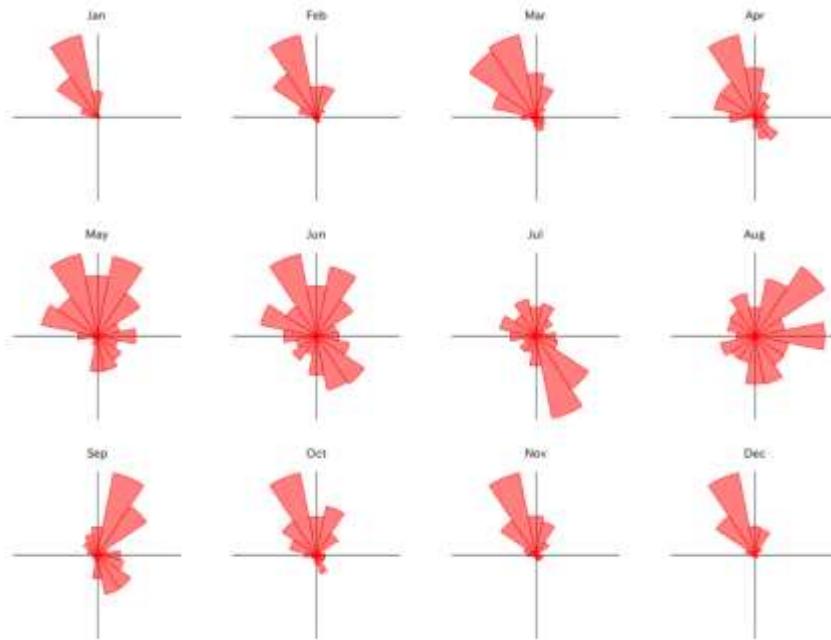


図 32 鹿児島地方気象台による月毎の風向出現頻度分布図。扇の半径が出現頻度に比例。

b3) 高濃度噴煙の時空間変動の検証に関する検討

輸送モデルによる噴煙の拡散シミュレーションをライダー観測により検証するためには、数値計算と観測とでデータの時間・空間分解能を揃えて評価を行う必要がある。ライダー観測は高時空間分解能が特徴であり、結果の分解能をどのように落とすかによって噴煙の移流・拡散状況をオリジナル通り再現できる場合とそうでない場合が生じる可能性がある。そこで、以下ではライダーデータの平均化幅を時空間方向に様々に変動させた結果から、オリジナルデータとの差異について考察した。モデルケースとして、2019年9月20日の16:04に発生した爆発的噴火を取り上げる。この時噴煙は北方向に流れ、本館ライダーではその移流の様子が観測されている。図33の左上がオリジナル(距離分解能 $\delta H=6m$ 、時間分解能 $\delta T=10$ 秒)の観測結果を示し、高濃度領域の移動をオレンジ矢印で示した。これによると高濃度領域(奥行き300m程度)は視線手前方向に6分間で900m(時速9km)で接近している。このデータについて、輸送モデルを想定して時空間分解能を300分の1に3パターンで落とす計算を行った。図33右上・左下・右下がそれぞれ($\delta H=300m$ 、 $\delta T=60$ 秒)($\delta H=600m$ 、 $\delta T=30$ 秒)($\delta H=150m$ 、 $\delta T=120$ 秒)で平均した場合の表示である。これによれば、空間分解能を落とすと(左下)、噴煙先端を連続的に表現することが難しい。逆に時間分解能を落としても空間分解能を上げられれば(右下)、中庸のケース(右上)よりも噴煙内部の濃淡まで確認でき、拡散度合いの検証などにも有用となる可能性がある。実際の数値モデルにおいてはCFL条件の制約などから時空間の分解能は必ずしも自由に決められるものではないが、数値シミュレーションの目的をライダー観測との対比に特化するような場合には、このような考察を踏まえて分解能を決定する必要があると考えられる。

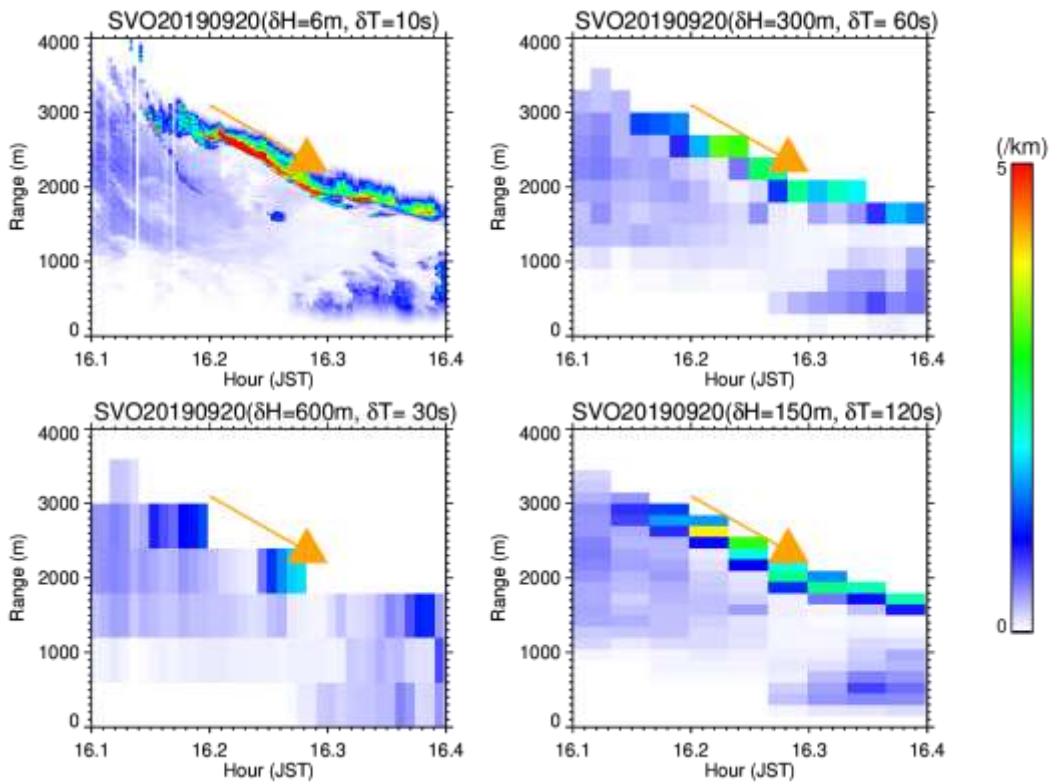


図 33 2019 年 9 月 20 日 16 時 06 分から同 24 分までの本館ライダーによって推定されたエアロゾル消散係数の時間・距離分布。(左上) オリジナル分解能(距離分解能 $\delta H=6\text{m}$ 、時間分解能 $\delta T=10$ 秒)、(右上) データ量を 300 分の 1 にした場合($\delta H=300\text{m}$ 、 $\delta T=60$ 秒)、(左下) 時間分解能を優先した場合($\delta H=600\text{m}$ 、 $\delta T=30$ 秒)、(右下) 空間分解能を優先した場合($\delta H=150\text{m}$ 、 $\delta T=120$ 秒)。オレンジ矢印は $9\text{km}/\text{h}$ で手前に進行する速度を示す。

c) GNSS 観測

GNSS 衛星からの電波は噴煙を通過すると伝播遅延が生じ、位相残差として検知されることが（Ohta and Iguchi, 2015）¹⁾ や SN 比が低下することが知られている（Larson, 2013）²⁾。桜島において発生する噴火についても噴煙高度が 4000m 以上に達する比較的規模の大きい噴火については、位相残差や SN 比の低下が観測されている。また、位相残差と SN 比にそれぞれ特徴的な変化が確認され、これらのデータに反映される物性が異なる可能性が明らかになった（Ohta and Iguchi, 2015）¹⁾。このように、GNSS 観測は噴煙の検知にも活用可能である。

桜島および桜島南岳からおよそ 50km の範囲における GNSS 観測点の配置を図 34 に示す。日本列島では西風が卓越するので、火山灰は東方向に移流することが多い。平成 29 年度には桜島の東方の大隅半島側に 4 点の、平成 30 年度には 2 点の GNSS 観測点を設置した。平成 31 年度は、大隅半島側にさらに 2 点の GNSS 観測点を増設した。令和 2 年 4 月時点において京都大学において管理する GNSS が 11 点大隅半島側において稼働している。

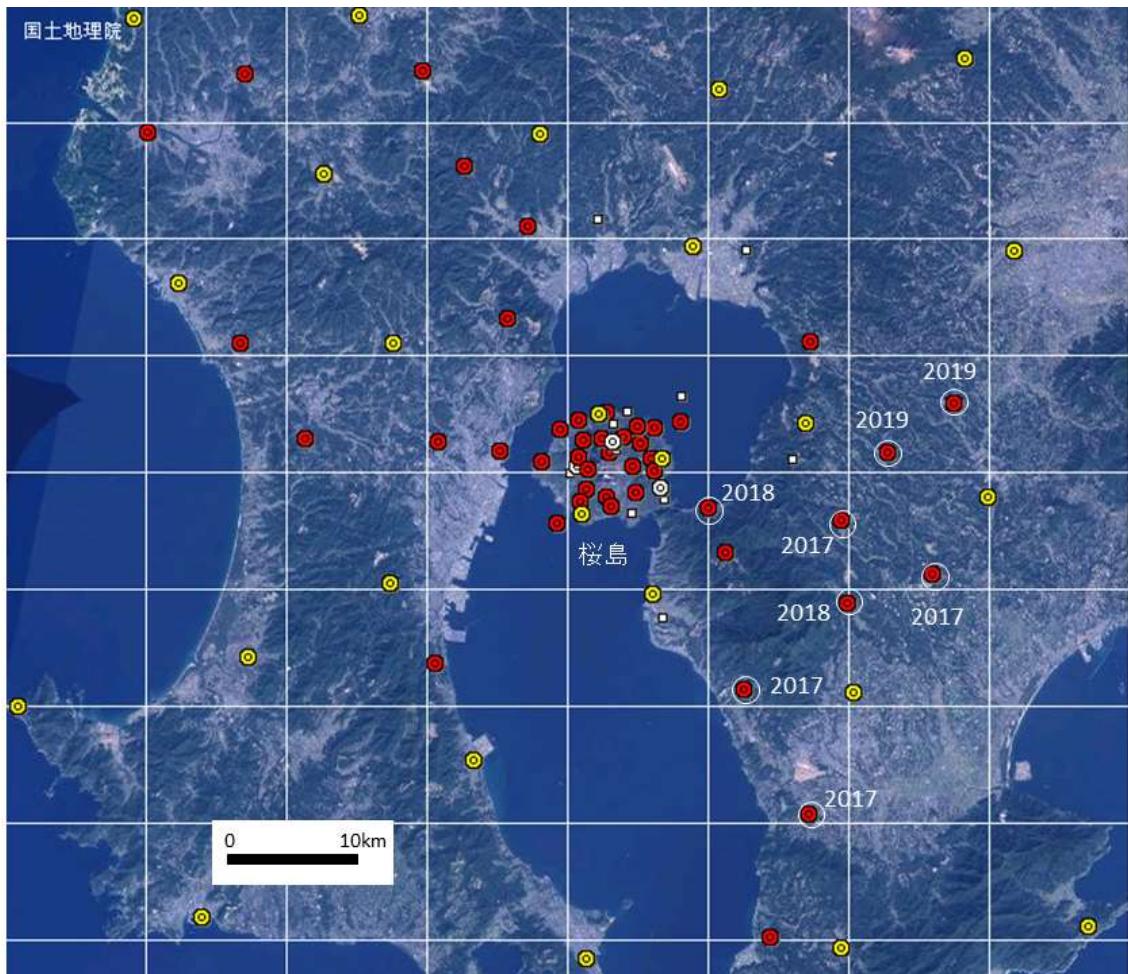


図 34 桜島およびその周辺における GNSS 観測点の配置図。黄丸は国土地理院の電子基準点。赤丸は京都大学防災研究所が設置した観測点。赤丸を白円で囲んだものが本プロジェクトで設置した観測点で、“2017”、“2018”、“2019”はそれぞれ、平成 29、30、31 年度に設置したもの음을示す。

GNSS 観測による噴煙の検知を桜島以外の火山に適用した。インドネシアのシナブン火山

はスマトラ島北部にある成層火山である。2010年8月に水蒸気噴火がおよそ1000年ぶりに発生した (Kasbani et al., 2019)³⁾。2010年には7回の水蒸気噴火が発生し、2013年9月には3年ぶりに水蒸気噴火が再開した。その後、12月には山頂に溶岩ドームが出現し、本格的なマグマ性噴火に移行した。2014年から2017年までは、山頂に溶岩ドームを形成しながらドームの崩落による火碎流が発生した。2018年2月になり、噴火活動は一時的に停止したが、2月19日 現地時間08時53分に発生した噴火は、2010年以降において最大規模の噴火となった。火山地質災害軽減センター (CVGHM) によると、噴煙は火口上5000mの高度に達し (図34)、火碎流は山頂から4900m距離まで流下した。また、衛星観測 (MODIS) からは高度16.8km以上に達したとされる (Global Volcanism Program, 2018)⁴⁾。本研究では、噴煙および火碎流をGNSSデータの位相残差データから検出することに成功した。

データは、シナブン山周辺のGNSS観測点4点 (LKWR, KBYK, MRDG, SNBG) で収録された2周波の搬送波位相データを用いた。解析ソフトウェアにはGIPSY-OASIS Ver. 6.4の精密単独測位法 (PPP) を用いた。今回の解析ではGPS衛星のみを用い、観測量としては2周波の線形結合であるLCを用いた。GPS衛星の軌道情報および時計情報にはNASA JPL(ジェット推進研究所)による最終暦を用いた。

解析ではPPPによって日毎の観測点座標値を求めつつ、合わせて各GPS衛星と観測点間のLC位相残差 (LC Post-fit Phase Residual、以下PPR) を計算した。PPRには、観測点と衛星間の情報が幅広く含まれる。特にマルチパスノイズは衛星配置に依存して日々繰り返しLC位相残差に現れる。そのため噴火が発生していない前日のデータも同様に解析を行い、その値を噴火当日の値から差し引くことでS/N比を向上させた。



図35 シナブン火山における2019年2月19日の爆発的噴火。

図36に得られたPPRの時系列を観測点配置とともに示す。図36には、得られた各観測点とGPS衛星間のPPR値のうち、明瞭な変化が認められたパスのみを示している。合わせて各観測点におけるPPRをスカイプロット上に表示したものを図37に示す。まず、山麓北側に位置するLKWR観測点では、62番衛星との間で噴火後すぐに16cmにおよぶインパルシブな位相残差が生じていることが確認できる。また、山麓西側に位置するMRDG観測点でも同じく62番衛星との間で噴火発生後5分程度経過後にPPRが8cm程度立ち上がり、その後1時間程度掛けてその値が徐々に減少していく

く傾向が確認できる。同様のゆっくりとした PPR 減少は山体から東側に離れた SNBG (シナブン火山観測所) 観測点と 41 番衛星との間でも確認できる。同観測点における PPR 値の立ち上がりは MRDG 観測点よりも早く、これは SNBG 観測点と 41 番衛星の間のパスが火口直上を通っていることと整合的である。また、SNBG、MRDG 両観測点で見られるゆっくりと減少する PPR 値の減少が山麓北部の観測点では確認できない。同噴火では噴火後に火碎流が主として山麓南側で生じたことが現地でのビデオ映像等から確認されている。SNBG および MRDG 観測点における PPR 値のゆっくりとした減少は、こうした火碎流によって巻き上げられた噴煙が長く同地域に滞留しつつ、拡散していったことを反映する結果と考えられる。

一方、山体から北側に離れた KBYK 観測点と 52 番衛星の間のパスでは、噴火後に PPR がわずかに立ち上がった後、PPR 値が得られない状態が続き、噴火後 40 分程度経過した後にそれが復帰していることが分かる（図 36、図 37）。この時の KBYK 観測点の収録データを確認すると、同時刻の間、すべての周波数における搬送波位相データのみならず、信号強度の強いコード擬似距離データすら全て欠測していることが明らかになった。これはきわめて濃度が強い噴煙によって GNSS シグナルが完全に遮蔽され、衛星信号を追尾できなくなつた可能性を強く示唆する結果である。

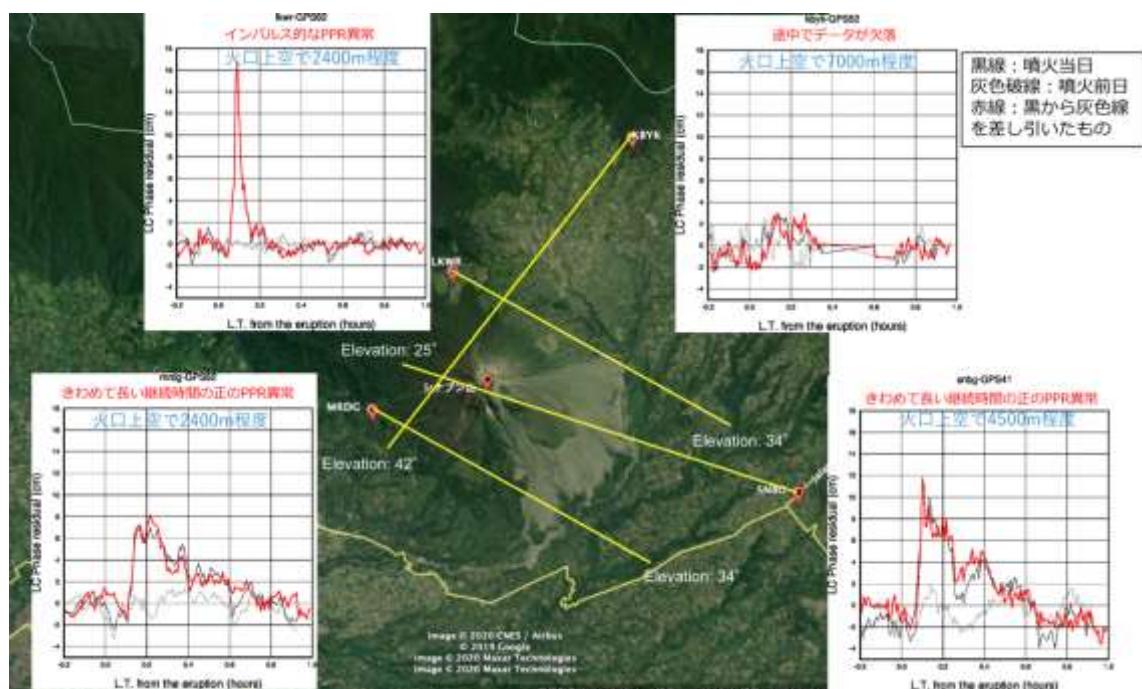
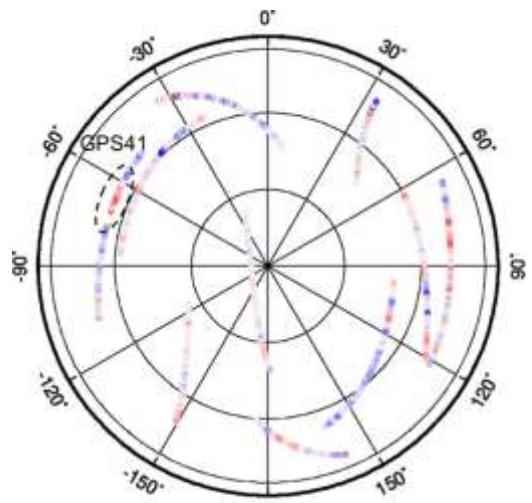
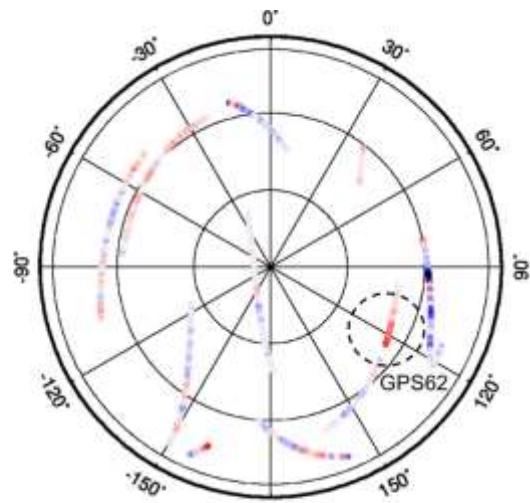


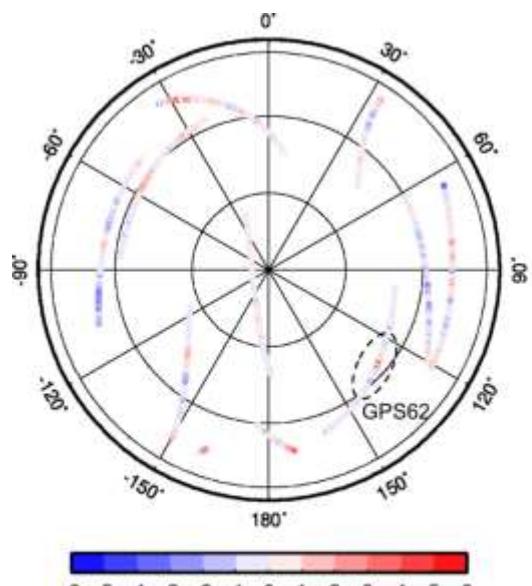
図 36 2018 年 2 月 19 日のインドネシアシナブン山噴火の GNSS による噴煙検知。図中の赤シンボルが観測点位置、黄色線が、PPR 異常が認められた衛星に対するパスの方位を示す。それらの仰角については図中に付記した。また図中の時系列の横軸は噴火発生からの時間を、縦軸は LC-PPR の値を示す。図中の黒線が噴火当日の時系列、灰色が噴火前日の時系列、赤色がそれらを GPS 衛星の周回間隔に合わせて 4 分ずらして差し引いた時系列をそれぞれ示す。



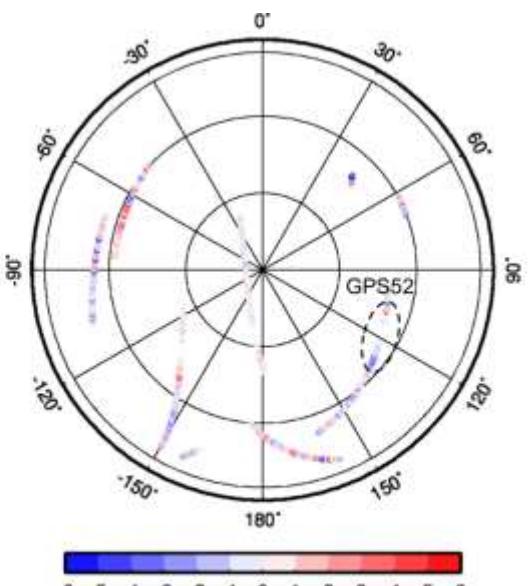
Postfit residual for $\text{snbg}(\text{cm})$



Postfit residual for $\text{mrdg}(\text{cm})$



Postfit residual for $\text{lkwr}(\text{cm})$



Postfit residual for $\text{kbyk}(\text{cm})$

図 37 LC-PPR をスカイプロット上に表示した結果。色で LC-PPR の値を示す。各図中の破線で囲んだ領域内に明瞭な PPR 異常が認められる。KBYK 観測点については、GPS52 衛星のデータが途中で欠落していることが分かる。

d) ディスクロメータによる地上観測

d1) ディスクロメータによる地上観測の概要

ディスドロメータによる地上降灰量観測を開始した。降雨観測に開発された1次元の光学式ディスドロメータ（PARSIVEL2、ドイツOTT Hydromet社製）を用いた。本装置は落下粒子によってさえぎられる光を計測することによって、粒径ごとに粒子を観測するパーティクルカウンターであり、粒径および落下速度ごとの粒子数と記録する。粒径の測定範囲は0.2mm～25mm、落下速度の測定範囲は0.2m/s～20m/sである。

ディスドロメータの桜島における位置図を図 38 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 32 クラスと落下速度毎の 32 クラス、合計 1024 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。平成 28 年度は 6 台、平成 29 年度および 30 年度にはそれぞれ 4 台のディスドロメータを設置した。ディスドロメータは粒径 0.2mm 以上の粒子を検知するので、噴火規模が小さい場合は、火山灰粒子を検知できない場合も多い。そこで、平成 31 年度は、火山灰粒子の検知数を向上させるために、これまで設置した観測点よりも南岳火口により近い、持木、古里 2、地獄河原、北岳の 4 カ所に、ディスドロメータを設置した。他のプロジェクトにより設置したものと合わせて 21 台のディスドロメータが桜島において稼働している。

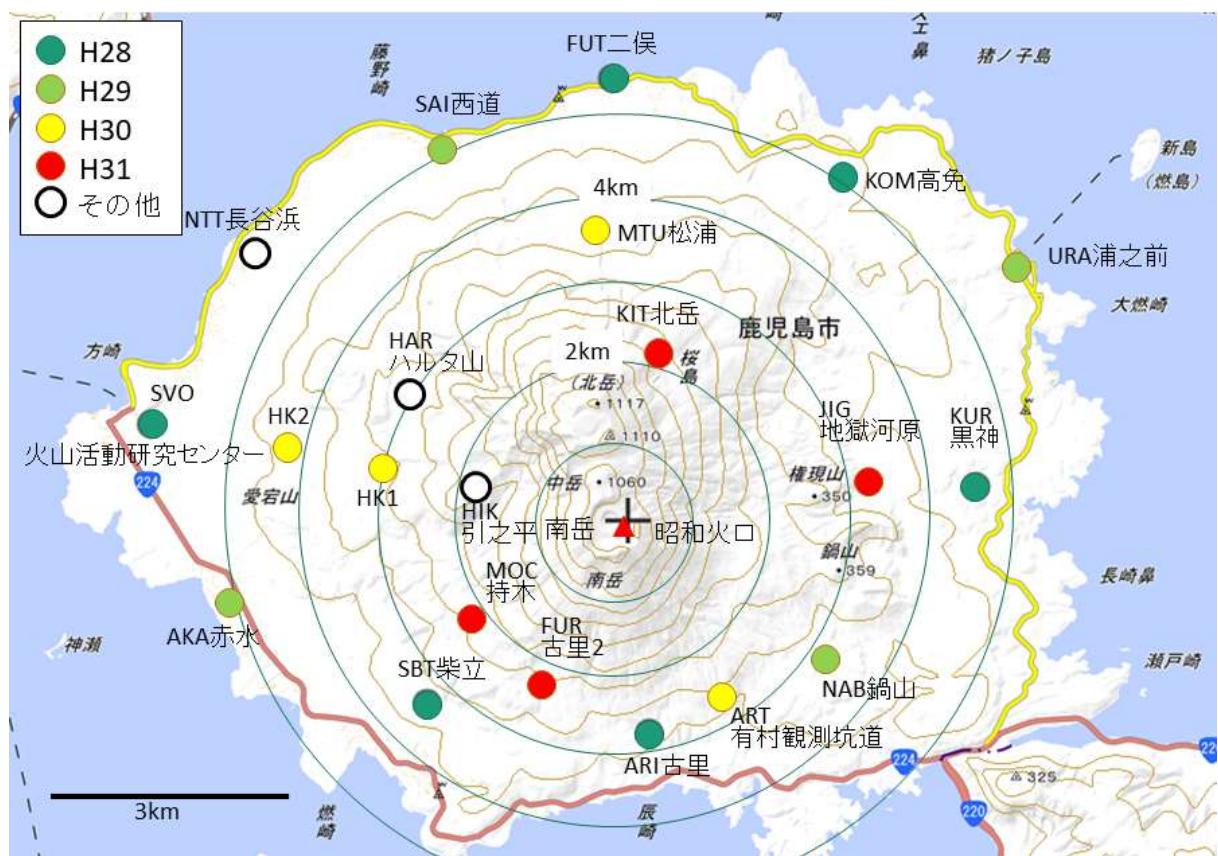


図 38 桜島におけるディスクロメータの位置図。緑丸:28 年度設置、黄緑丸:29 年度設置、黄丸:30 年度設置、赤丸 31 年度設置。白丸は他のプロジェクト。赤三角は南岳 B 火口の位置を示す。

d2) ディスドロメータ観測による降灰量の時間変化

ディスドロメータで観測される粒子の多くは、雨滴であるので、その中から降灰によるイベントを抽出した。ディスドロメータの全出力から降雨によるものを除き、さらに、明らかにノイズと考えられるものを除去した。2019年4月から2020年3月にまでに発生した噴火のうち、噴煙高度3000m以上に達したものについて、ディスドロメータの時間雨量相当量と地震動のRMS振幅を比較して、図39～図49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」とし、非ブルカノ式噴火は単に噴火とする。また、稀に発生するストロンボリ式噴火については、そのように明示した。

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。例えば、2019年7月4日10:44の爆発（図39）では、噴煙高度は3200mに達したが、NAB観測点のみで火山灰粒子が検知された。噴煙高度3000mに達した11月6日15:38の爆発（図43）では、北に位置するMAT観測点のみで火山灰粒子が検知された。2019年12月12日21:09の爆発（図49）でも噴煙高度は3000mに達したが、火山灰粒子が検知されたのは、南南東に位置するARTのみであった。

1回の噴煙放出に対して、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ある。2019年11月8日17:24に発生した爆発（図45）の噴煙高度は、2017年11月以来の南岳噴火活動期において最高の5500mに達した。南岳南東山麓の観測点ARTおよびNABにおいて観測された。特に、ARTにおいては3mm/hに達しており、多いといえる。また、噴煙高度が3000mに達した2019年12月10日1:15の爆発（図48）でもARTおよびNABにおいて観測された。

観測点HIK、HKU、HKD、SVOは南岳火口から西北西方向に直線状に配置されている（図38）。この方向に噴煙が移流するときは、火山灰量を火口からの距離によって比較できる。例を図42に示す。2019年9月20日16:04に爆発が発生し、火口上3400mの高度において雲に入った。この爆発以降、19時ごろまで、ほぼ連続的に火山灰の放出が続いた。噴煙が繰り返し放出されているので、1時間程度にわたって火山灰が検知された。単発の爆発であれば、火山灰検知の継続時間は5分程度、長くとも15分（例えば、図45）なので、2019年9月20日16:04の爆発から19時ごろまでの噴煙活動による降灰は長いといえる。降灰量を時間雨量相当量により比較すると、HIK ($\Delta=1.7\text{km}$) で4.6mm/h、HKU ($\Delta=3.0\text{km}$) で1.3mm/h、HKD ($\Delta=4.4\text{km}$) において0.5mm/hであり、SVO ($\Delta=5.6\text{km}$) では検知できなかった。火口からの距離が大きくなるにつれて、降灰量が小さくなる。

このように、噴火が連続的に発生すると降灰検知時間が長くなる。他の事例を図41に示す。2019年9月16日7:46に始まった噴火の噴煙の最高到達高度は2800mであったが、噴煙の放出は継続し、9時ごろからはストロンボリ式噴火に移行した。火山灰が検知された観測点はSBTだけであったが、8:04から8:35まで火山灰が観測された。9時ごろから始まったストロンボリ式噴火に対応する火山灰粒子は検知されていない。

一方、火山灰の噴出をdiscreteなイベントとして識別できる場合は、各観測点における火山灰粒子も異なる降灰イベントとして認識できる場合が多い。図40は2019年7月28

日の噴火の事例である。28日には17:25に爆発が発生し、噴煙は3800mの高度に達した。続いて17:54には噴火（17:25の爆発に比べて空気振動の振幅が小さい）が発生し、噴煙は3500mの高度に達した。この日は南風であったため火山灰は桜島北方の鹿児島空港にも達し、27便の航空便が欠航した。30分の時間差ではあるが、桜島島内における降灰域は異なっており、17:25の爆発（0728A）の火山灰はKOMに、17:54の噴火（0728B）の火山灰は、火口からみて真北に近いMATに降下したことがわかる。

頻繁に噴火が繰り返される場合でも、火口における噴火事象と、観測点における降灰事象を対応付けることができる。2019年11月7日の例を図44に示す。11月7日の14時から20時までに8回の噴出イベント（1107A～1107H）が識別できる。RMS振幅が一番大きい1107A（噴煙高度>3800m）の降灰はARTに加え、NABでも検知された。1107Aよりも噴煙高度は低いものの3500mに達した1107Bの火山灰はARTのみで観測され、時間雨量相当量も1107Aよりは少なかった。それ以降の噴出に対応する火山灰は、規模の小さい1107Gを除いて、観測点ARTで検知されている。

火山灰の噴出と降灰の対応関係が複雑な事例を図46に示す。2019年11月12日19時から翌日3時までに、RMS振幅から5回の噴火イベントが識別できる。このうち、1112Aと1112Dでは観測点NABにおいて火山灰粒子が検知された。一方、1112Bでは、NABでは降灰は検知されず、南岳からの方位では逆方向にあるHIKで火山灰粒子が観測された。降灰イベント1112Cには、対応する顕著なRMS振幅の増加がなかった。1112Eおよび1112Fについては、火山灰粒子が検知されていない。図47に示した2019年11月28日も複雑な対応関係の事例である。爆発イベント1128Bでは、噴煙高度3300mに達し、観測点ARTとARIで火山灰が検知された。1128D（噴煙高度2600m）ではARIのみで火山灰が検知された。ARTにおける降灰イベント1128Aは小規模なRMS振幅の増加に対応するが、1128Cに対応する顕著なRMS振幅の増加はなかった。

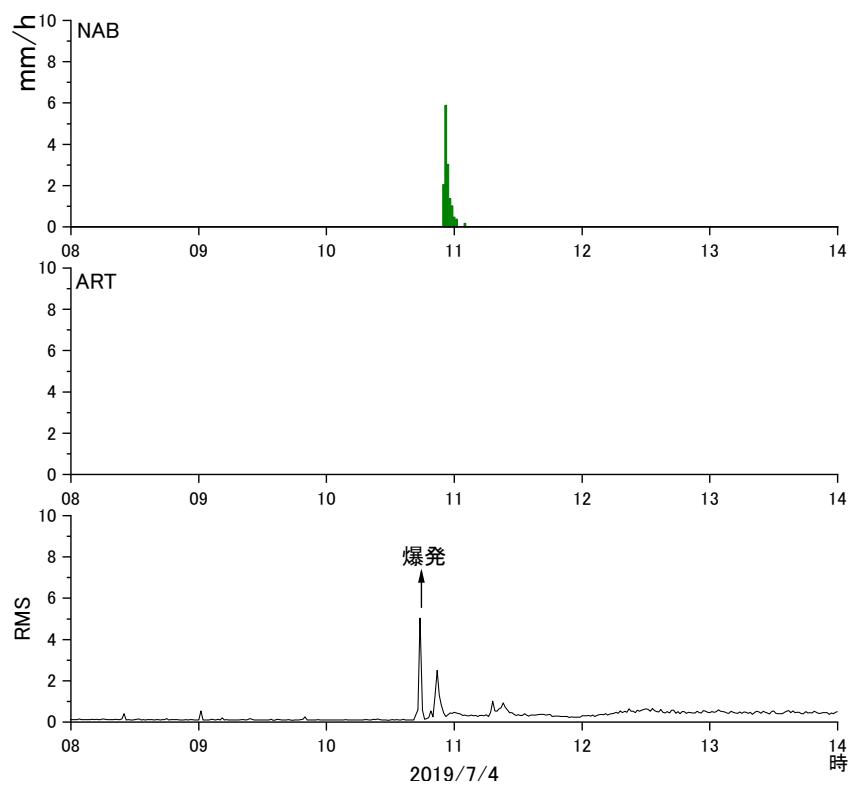


図 39 2019 年 7 月 4 日の噴火による降灰時の鍋山 (NAB) および有村観測坑道 (ART) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。RMS 振幅は有村観測坑道で計測された。

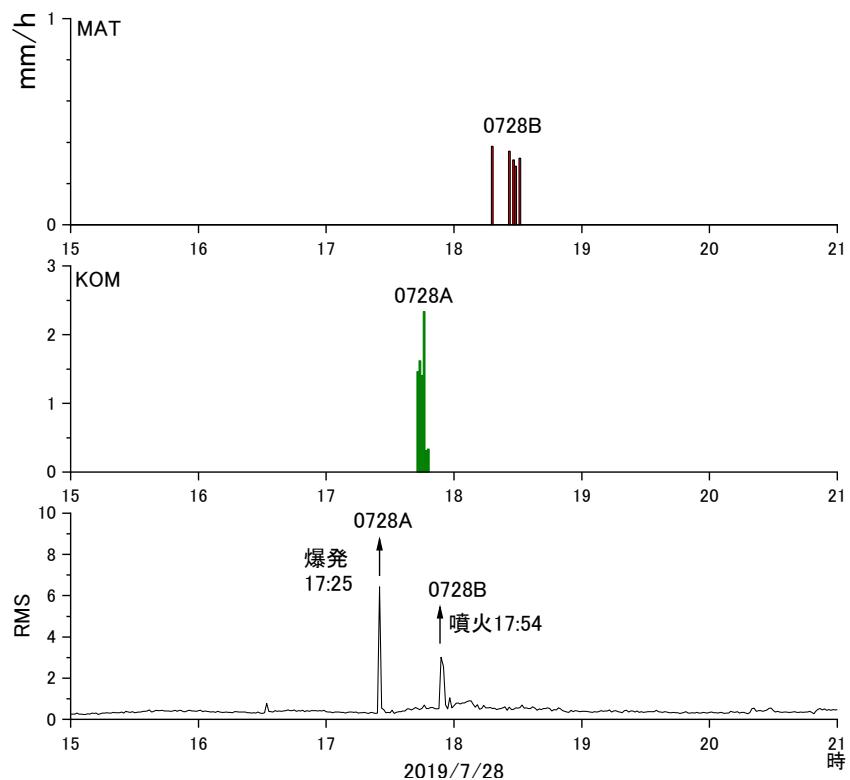


図 40 2019 年 7 月 28 日の噴火による降灰時の松浦 (MAT) および高免 (KOM) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。RMS 振幅は有村観測坑道で計測された。

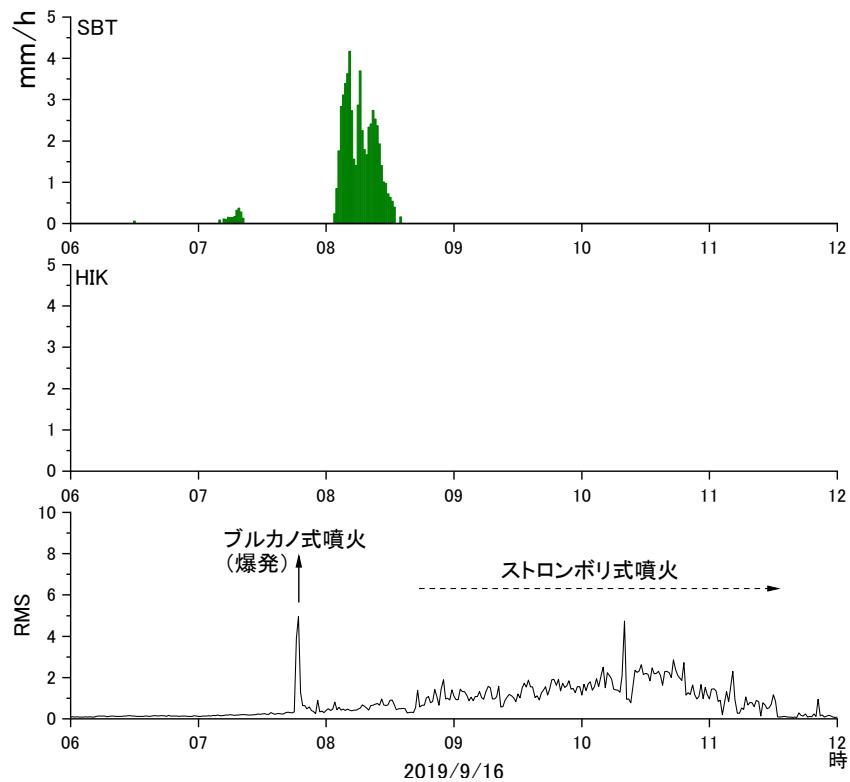


図 41 2019 年 9 月 16 日の噴火による降灰時の柴立 (SBT) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。RMS 振幅は有村観測坑道で計測された。

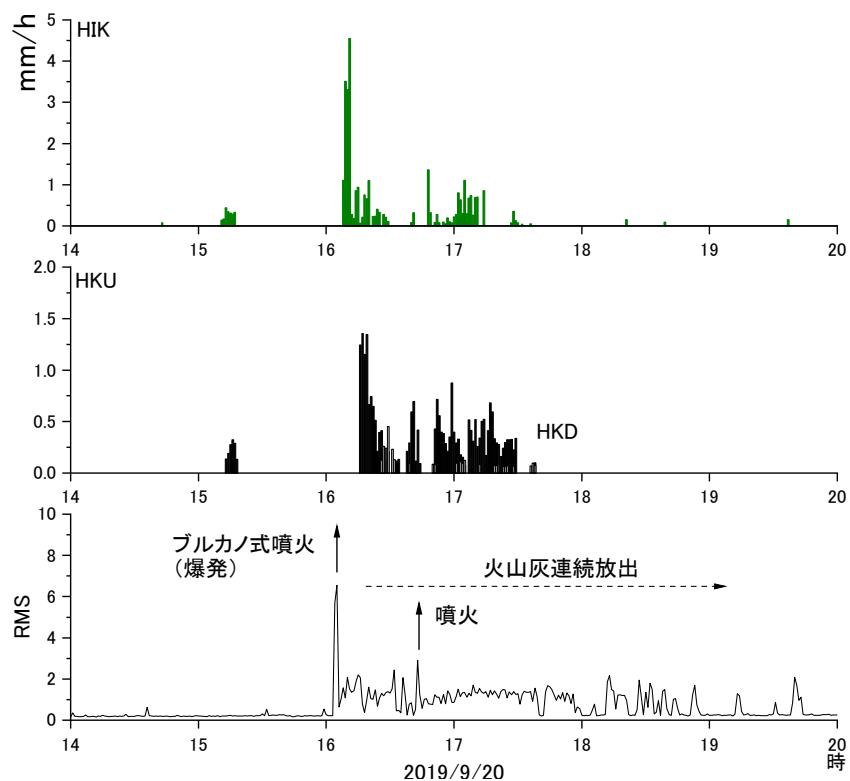


図 42 2019 年 9 月 20 日のブルカノ式噴火とそれに続く連続的な噴火による降灰時の引之平 (HIK) およびその西方 (HKU、HKD) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。RMS 振幅は有村観測坑道で計測された。

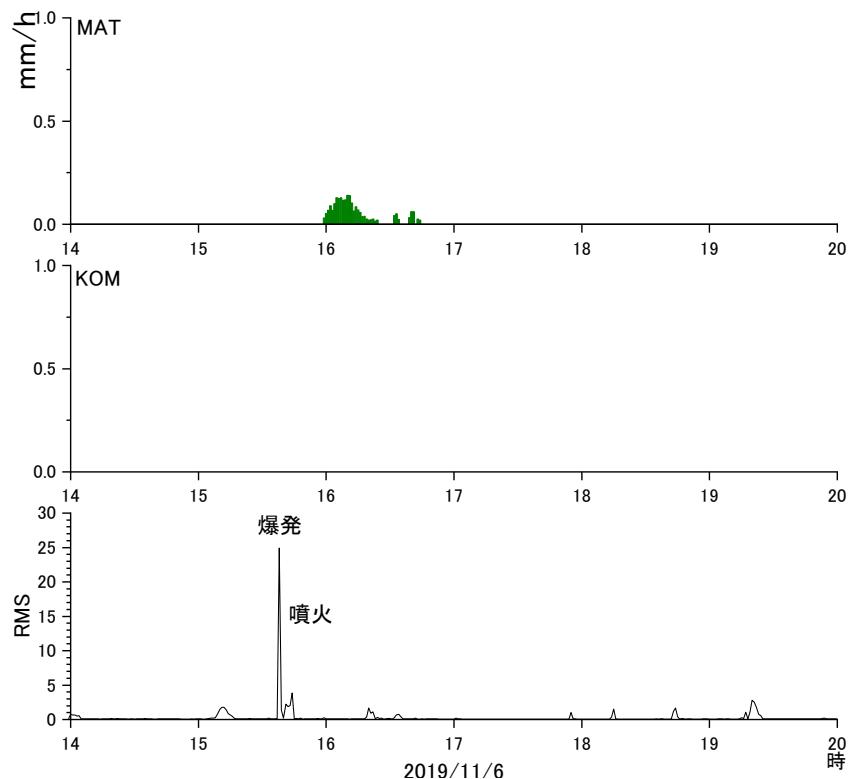


図 43 2019 年 11 月 6 日の噴火による降灰時の松浦 (MAT) および高免 (KOM) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。RMS 振幅は有村観測坑道で計測された。

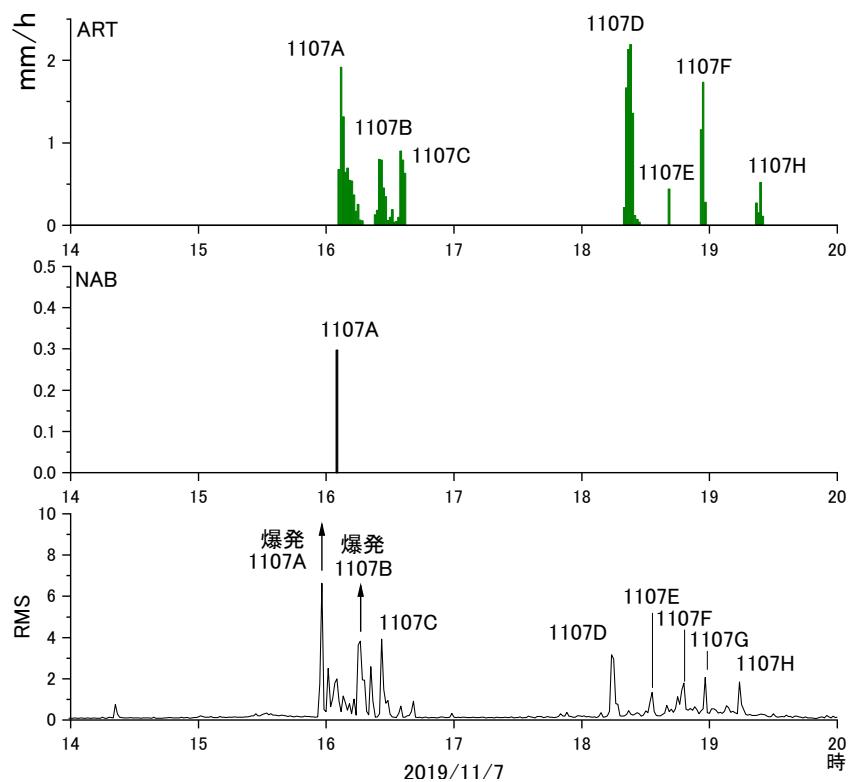


図 44 2019 年 11 月 7 日の噴火による降灰時の有村観測坑道 (ART) および鍋山 (NAB) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

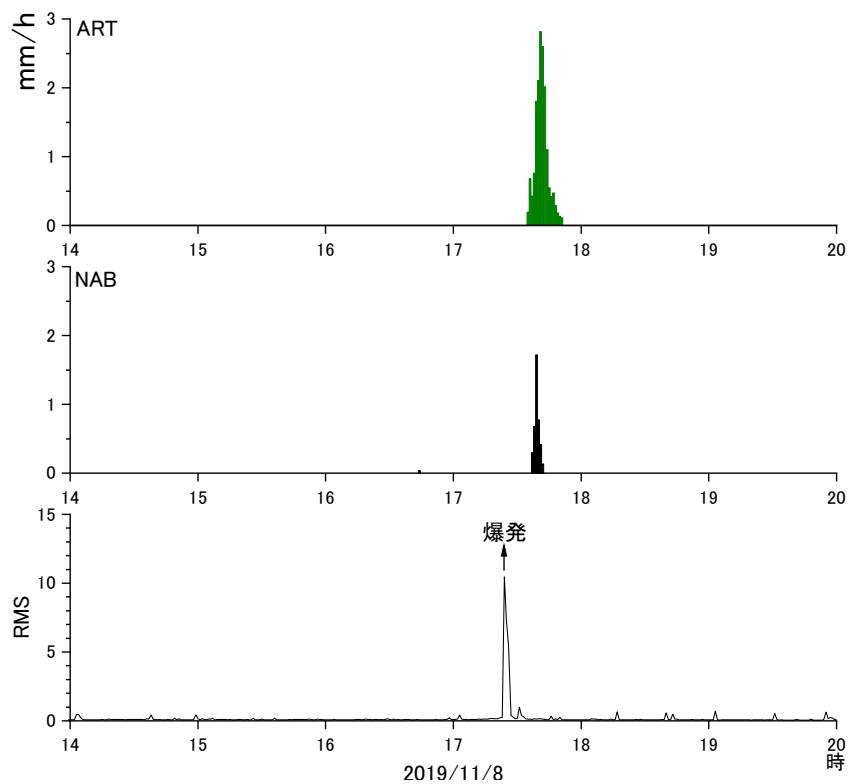


図 45 2019 年 11 月 8 日の噴火による降灰時の有村観測坑道 (ART) および鍋山 (NAB) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

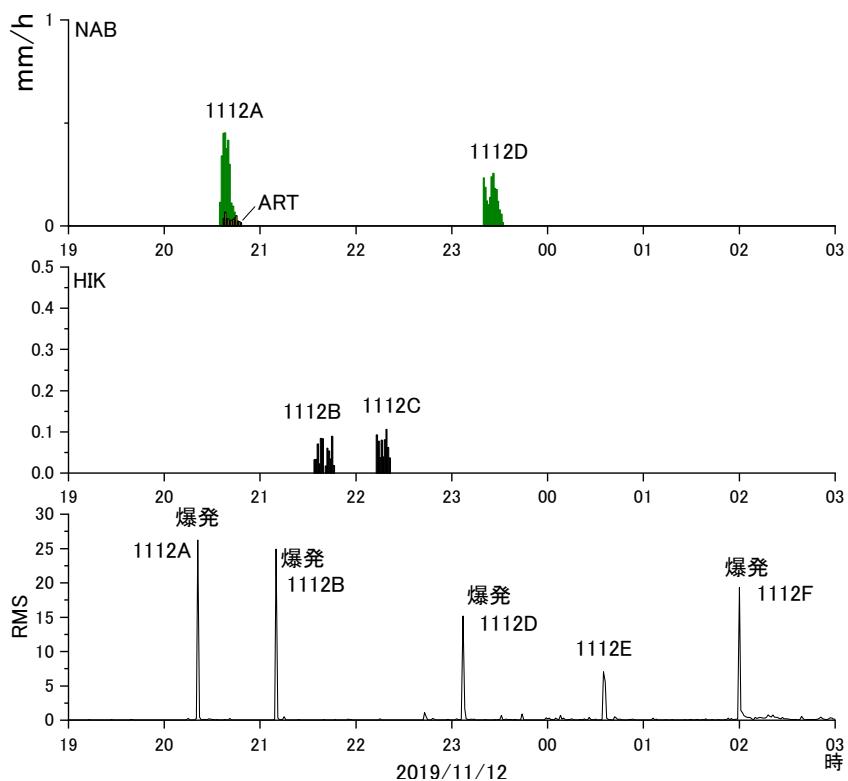


図 46 2019 年 11 月 12 日の噴火による降灰時の鍋山 (NAB) および引之平 (HIK) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

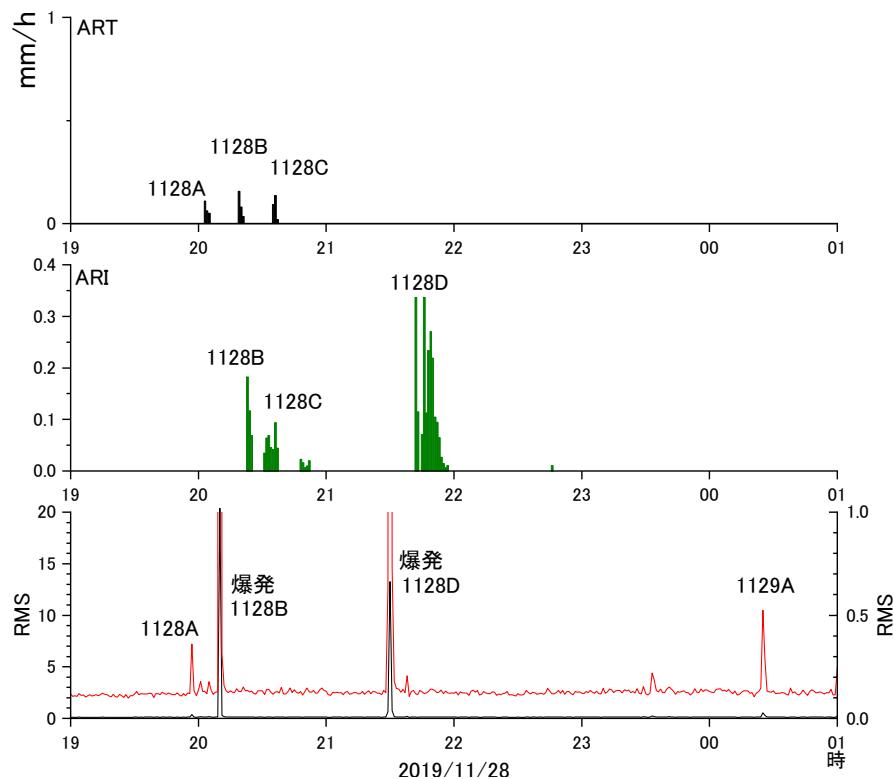


図 47 2019 年 11 月 28 日の噴火による降灰時の有村観測坑道 (ART) および有村 (ARI) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。RMS (赤線) は振幅を 20 倍に拡大したものである。

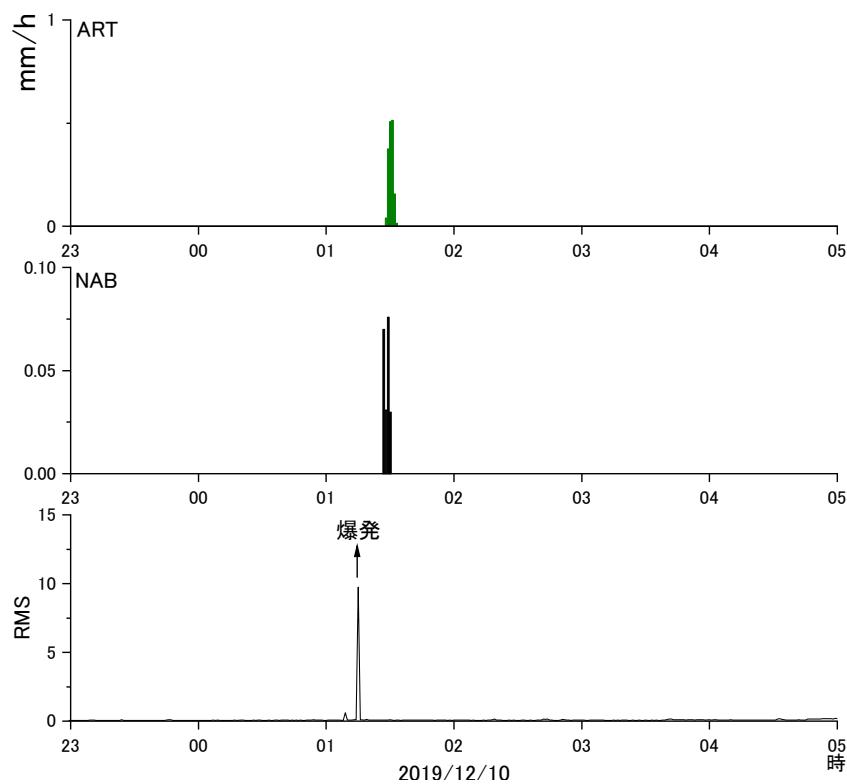


図 48 2019 年 12 月 10 日の噴火による降灰時の有村観測坑道 (ART) および鍋山 (NAB) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

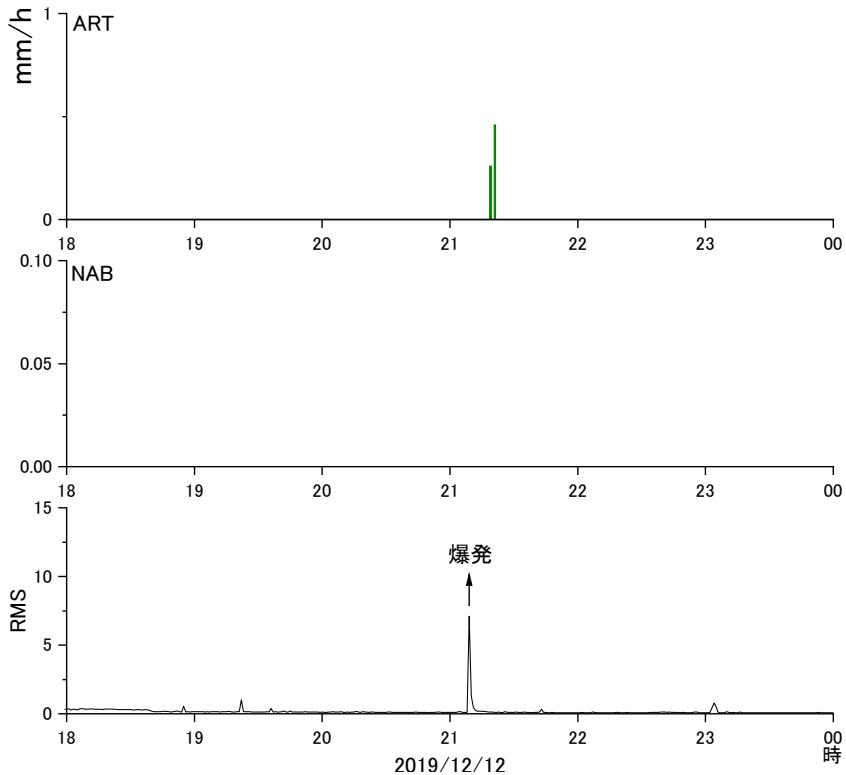


図 49 2019 年 12 月 12 日の噴火による降灰時の有村観測坑道 (ART) および鍋山 (NAB) における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅

d3) ディスドロメータによる降灰量の見積もり

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

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

本年度は、ディスドロメータの近傍で採取された単位面積当たりの火山灰の重量と比較することにより、降灰開始から火山灰を採取した時間までにディスドロメータが検知した粒径ごとの粒子数を火山灰重量へ換算する経験式を求めた。

ディスドロメータにより観測された粒径ごとの粒子数から算出される降灰量 w_{dis} は、粒径と落下速度のクラスごとに計算される粒子ごとの重量と検知された粒子数の積の総和に、検知されない細粒な粒子の重量を加えることにより求まると考えられる。

$$w_{dis} = c_{correct} \sum_{i=1} \sum_{j=1} N_{i,j} \rho_{i,j} V_i \frac{0.18 \times 0.03}{0.18 \times 0.03} + \gamma \quad (2)$$

ただし、 $c_{correct}$ は補正係数、 ρ_{ij} 、 N_{ij} は粒径と落下速度のクラスに対応する粒子の実効的な密度とその粒子数、 V_i は粒径クラスに対応する粒子の体積、 γ はディスドロメータにより検知されない、粒径 0.25mm 未満の粒子の重量である。観測により得られる N_{ij} を入力条件とする (2) 式に対して、採取した火山灰の単位面積当たりの降灰量を拘束条件とすることにより、(2) 式の係数を求めることができる。

同じ粒径における落下速度の違いは粒子の形状や凝集の程度による実効的な密度の違いに対応すると考え、 ρ_{ij} を終端速度の理論式から求める。火山灰粒子の形状を回転楕円体と仮定すると、終端速度 v_t と火山灰粒子の密度 ρ_p の関係は、抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_a によって接続される以下の連立方程式(Suzuki, 1983)⁵⁾により表される。

$$\begin{aligned} v_t &= \sqrt{\frac{4gd\rho_p}{3C_D\rho_a}} \\ C_D &= \frac{24}{R_a} F^{-0.32} + 2\sqrt{1.07 - F} \\ R_a &= \frac{\rho_a v_t d}{\eta_a} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 g は重力加速度、 η_a 、 ρ_a は大気の粘性率と密度、 a 、 b 、 c は粒子の最長軸、中間軸、最短軸の長さで F は粒子の長短比 $(b+c)/2a$ 、 d は代表径 $(a+b+c)/3$ である。(3)式は(4)式に変形できる。

$$v_t = \frac{\rho_p g d^2}{9\eta_a F^{-0.32} + \sqrt{81\eta_a^2 F^{-0.64} + \frac{3}{2}\rho_a \rho_p g d^3 \sqrt{1.07 - F}}} \quad (4)$$

v_t と d がそれぞれディスドロメータにより観測された落下速度と粒径に等しく、 η_a 、 ρ_a が 20°C での大気の値である 1.6×10^{-5} Pas、 1.205 kg/m^3 とし、Freret-Lorgeril et al. (2019)⁶⁾ が計測したストロンボリ火山の火山灰粒子の粒径と長短比の相関図より長短比を

$$F = 0.81 + 0.03 \log_2(d / 1000) \quad (5)$$

とすると、粒径および終端速度に依存する火山灰粒子の密度は図 50(a) のように計算される。さらに、ディスドロメータにより観測された落下速度および粒径が、それぞれ、(3)式の終端速度および粒子の代表径に等しいとして、それらのクラス毎の粒子数をプロットしたものが図 50(b) である。

2019 年 3 月～9 月に発生した噴火のうち 11 のイベントについて、求められた ρ_{ij} と暫定的な補正係数を(2)式に代入して w_{dis} を計算し、採取した火山灰の単位面積当たりの降灰量 w_{sam} と比較した。両者の関係を図 51 に示す。なお、ディスドロメータの検出限界を考慮した 0.25mm 以上の粒径を考慮しない方の相関が強い。これは、0.25mm 未満の粒子であっても、大気中を降下する過程では凝集して、0.25mm 以上の粒子として振る舞っている可能性や細粒粒子の高密度降下による遮蔽効果により、見かけ上粗粒粒子として検知される一次元ディスドロメータの原理上の問題に起因していると考えられる。

図 50(b) に示すように、粒子が検知された粒径および落下速度に対応する実効密度は、 $0.7 \sim 5040 \text{ kg/m}^3$ の範囲に得られたが、実効密度の最小値は James et al. (2003)⁷⁾ が採取して測定した凝集粒子の密度 $83 \sim 200 \text{ kg/m}^3$ を下回り、最大値は火山灰粒子単体の密度 2640 kg/m^3 を上回るなど、現実的でない値も得られている。下限値については 500 とした場合が、最も強い相関関係を示したので、実効密度の下限値を 500 kg/m^3 とした。

以上の検討から、ディスドロメータにより観測される粒径及び落下速度の組み合わせクラスごとの粒子数から、単位面積あたりの降灰量 w_{obs} は以下の式を用いて求められる。

$$w_{obs} = 2.15 \sum_{i=1} \sum_{j=1} \rho'_{i,j} \pi d_i^3 V_i \frac{N_{i,j}}{0.0324} \quad (6)$$

上式により計算された単位面積あたりの降灰量と、同時間帯に採取された、2017年5月から2019年10月に採取された59のイベントにおける火山灰重量から求めた降灰量の相関を図52に示す。計算値は実測値の約0.1~2.3倍と推定される。

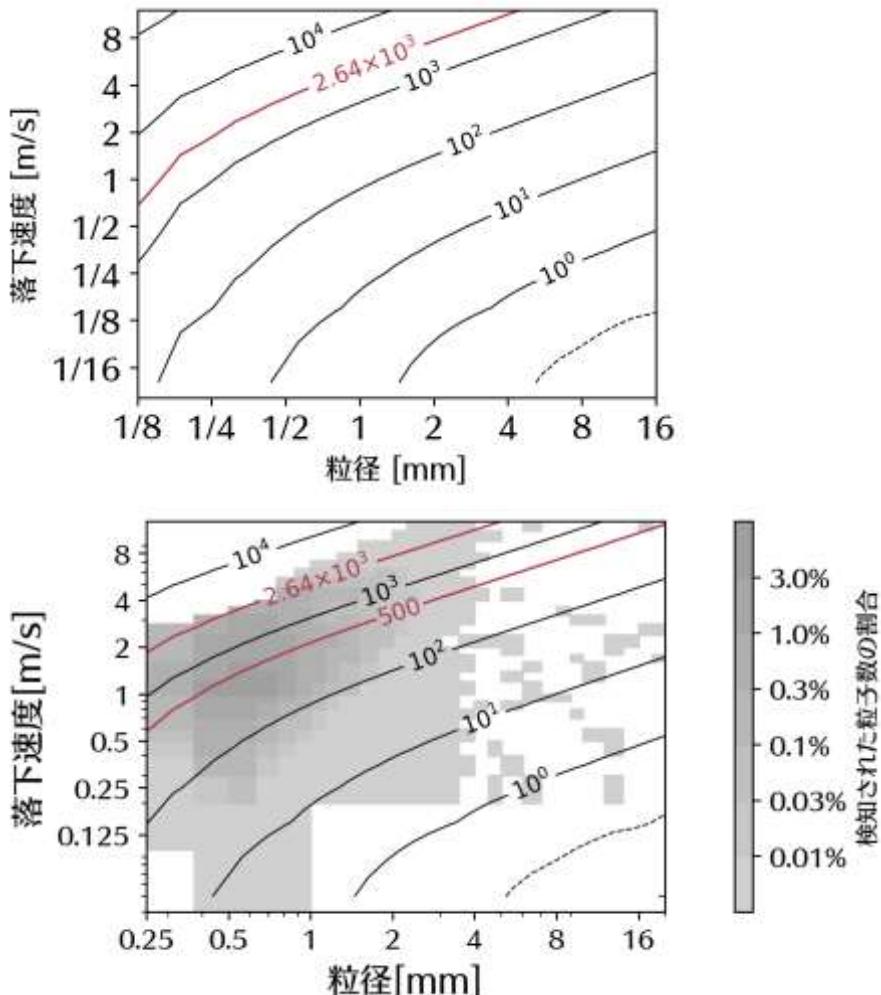


図 50 (a) 計算された火山灰粒子の密度の分布。(b) (a)に実際に検知された粒子数の分布を重ねた分布。等価線が計算された粒子密度 [kg/m^3]を、青いプロットが実際に検知された粒径、速度区間を表す。赤い等価線は粒子の実効密度が $500 \text{ kg}/\text{m}^3$ および $2.64 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ となる粒子の粒径と落下速度の関係を表す。

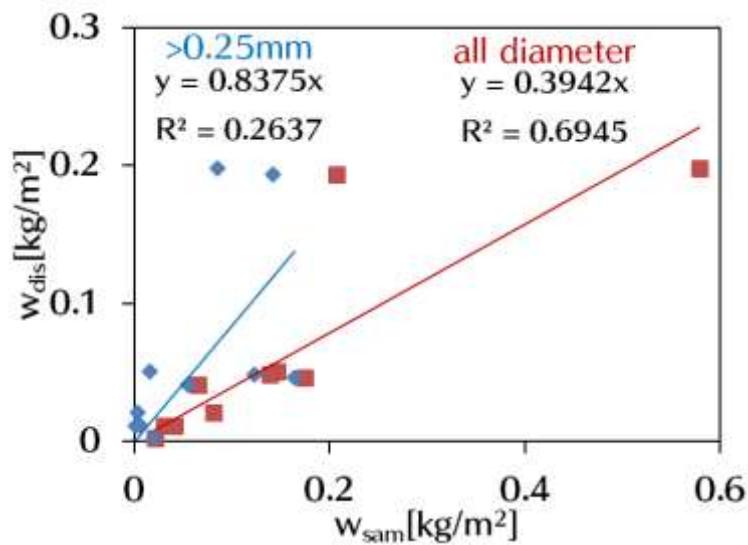


図 51 火山灰の実地観測から求められた降灰量とディスドロメータから求められた降灰量の関係。赤い四角と近似直線が全ての粒径の降灰量とディスドロメータ降灰量の関係、青い菱型と近似直線が粒径 0.25mm 未満の降灰量とディスドロメータ観測から計算された降灰量の関係を表す。

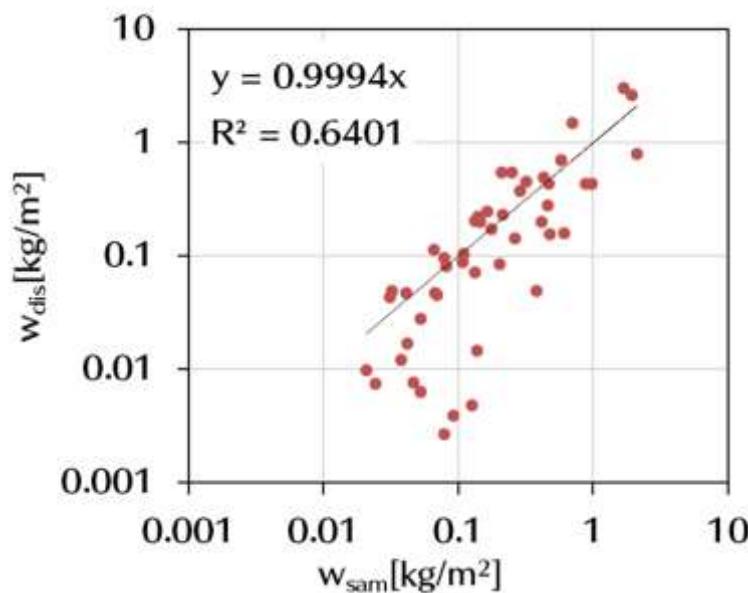


図 52 採取された火山灰重量から求めた降灰量と、同時間帯に観測されたディスドロメータの観測値から経験的な式により計算された降灰量の相関。

d4) 降灰量のキャンペーン観測

比較的大規模の大きい噴火により多量の降灰があった時は、現地におけるサンプリングによる降灰量の観測を行った。図 53 は 2019 年 7 月 28 日の噴火の事例である。28 日には 17:25 に爆発が発生し、噴煙は 3800m の高度に達した。続いて 17:54 には噴火（17:25 の爆発に比べて空気振動の振幅が小さい）が発生し、噴煙は 3500m の高度に達した。この日は南風であったため火山灰は桜島北方の鹿児島空港にも達し、27 便の航空便が欠航した。鹿

児島空港付近の降灰量は、 50g/m^2 程度であり、桜島北部の多い場所に比べると 1/5 程度であった。

図 54 は 2019 年 9 月 16 日 7:46 に始まった噴火の事例である。この噴火では噴煙頂部の高度は最大で 2800m まで達したが、長時間にわたって火山灰を放出した。9 時ごろに移行したストロンボリ式噴火での噴煙高度は 1000m 程度と低い。降下火山灰は桜島の南西部から南東部の広い範囲で観測された。最も多いのは、桜島南西部の東桜島町観音崎の山手側である。多いところでは降灰量が 2000g/m^2 を超えており、広い範囲で 1000g/m^2 以上となっている。7:46 から 9 時ごろまでの移流方向は南西であり、多くの火山灰は、8:30 ごろまでに降下した（図 41）。9 時以降のストロンボリ式噴火のフェーズでは移流方向が南となり、降灰域が南東に広がったものと考えられる。



図 53 2019 年 7 月 28 日 17:25 の爆発及び 17:54 の噴火による降灰分布。図中の数字は現地でのサンプリング調査による単位面積当たりの降灰量。



図 54 2019 年 9 月 16 日 7:46 に始まったブルカノ式噴火とその後のストロンボリ式噴火によって放出された火山灰の降灰分布。太い破線は降灰の主軸方向。赤丸は $2000\text{g}/\text{m}^2$ 以上、オレンジの丸は $1000\sim2000\text{g}/\text{m}^2$ 、黄色は $500\sim1000\text{g}/\text{m}^2$ 、緑色は $100\sim500\text{g}/\text{m}^2$ 、青丸は $100\text{g}/\text{m}^2$ 、未満の降灰観測点を示す。現地におけるサンプリング調査による。

d5) 降灰量の空間分布

図 55 に示すように、いくつかの噴火については火口から同じ方向で異なる距離にある HIK、HKU、HKD、SVO において降灰が観測されている。異なる距離における時間雨量相当量を比較して図 56 に示す。爆発は 17:44 に発生し、噴煙は高度 1400m に達した。観測点 HIK (火口からの距離 1.7km) では 17:54 には火山灰粒子が検知されているが、降灰量が急増したのは 17:57 である。火口からの距離 3.0km にある HKU では 18:00 から降灰が検知されている。さらに、距離 4.4km にある HKD では 18:14 に降灰が検知された。火山灰粒子を感知した時間はいずれの観測点でも 5~8 分程度である。

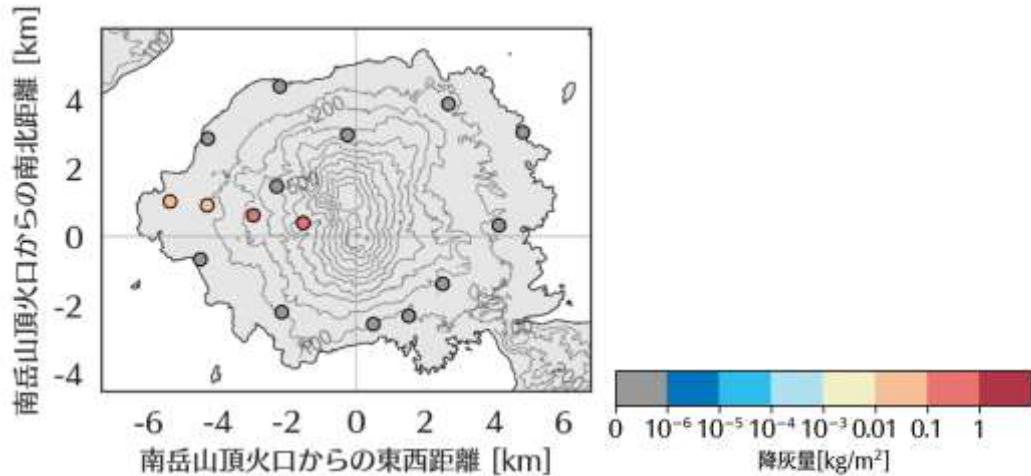


図 55 2019 年 9 月 17 日 17:44 の爆発に伴う降灰量の空間分布。降灰量は X 式により見積もった。

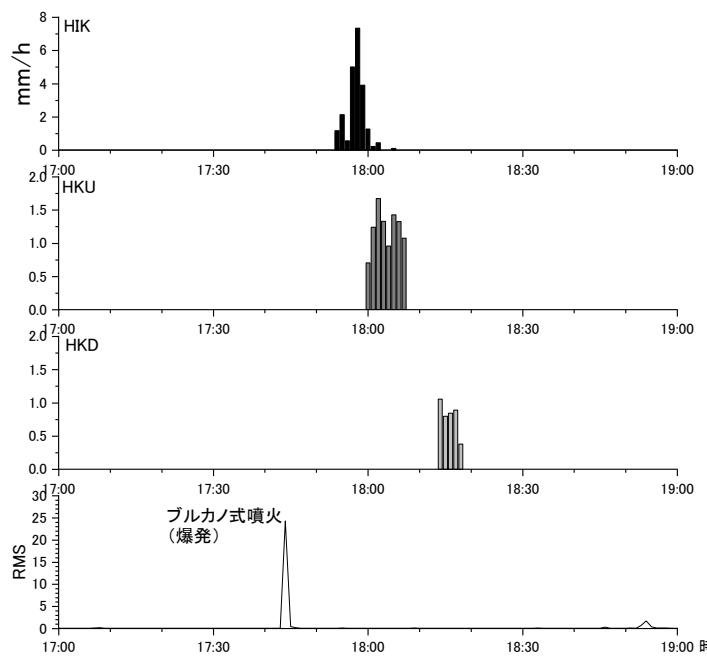


図 56 2019 年 9 月 17 日 17:44 の爆発に伴う時間雨量相当量の時間変化。南岳火口からの距離は 1.7km (HIK)、3.0km (HKU)、4.4km (HKD) である。

次にこれらの観測点における火山灰粒子の落下速度の頻度分布を比較する (図 57)。HIK

では 17:57 から粒子数が急増しているが、落下速度は最大で 8m/s となっている。また、粒子数のピークは 5m/s にある。その後、時間の経過とともに、落下速度の最大値及び最頻値とも低下し、18:00 以降の最頻値は 1.5m/s 程度にある。落下速度が低下する時間変化は HIK および HKD でも見られるが、火口から遠方になるほど、落下速度が小さくなる傾向がある。落下速度の大きい粒子は火口近傍に落下し、速度の小さい粒子は遠方まで到達することが観測から確認できた。

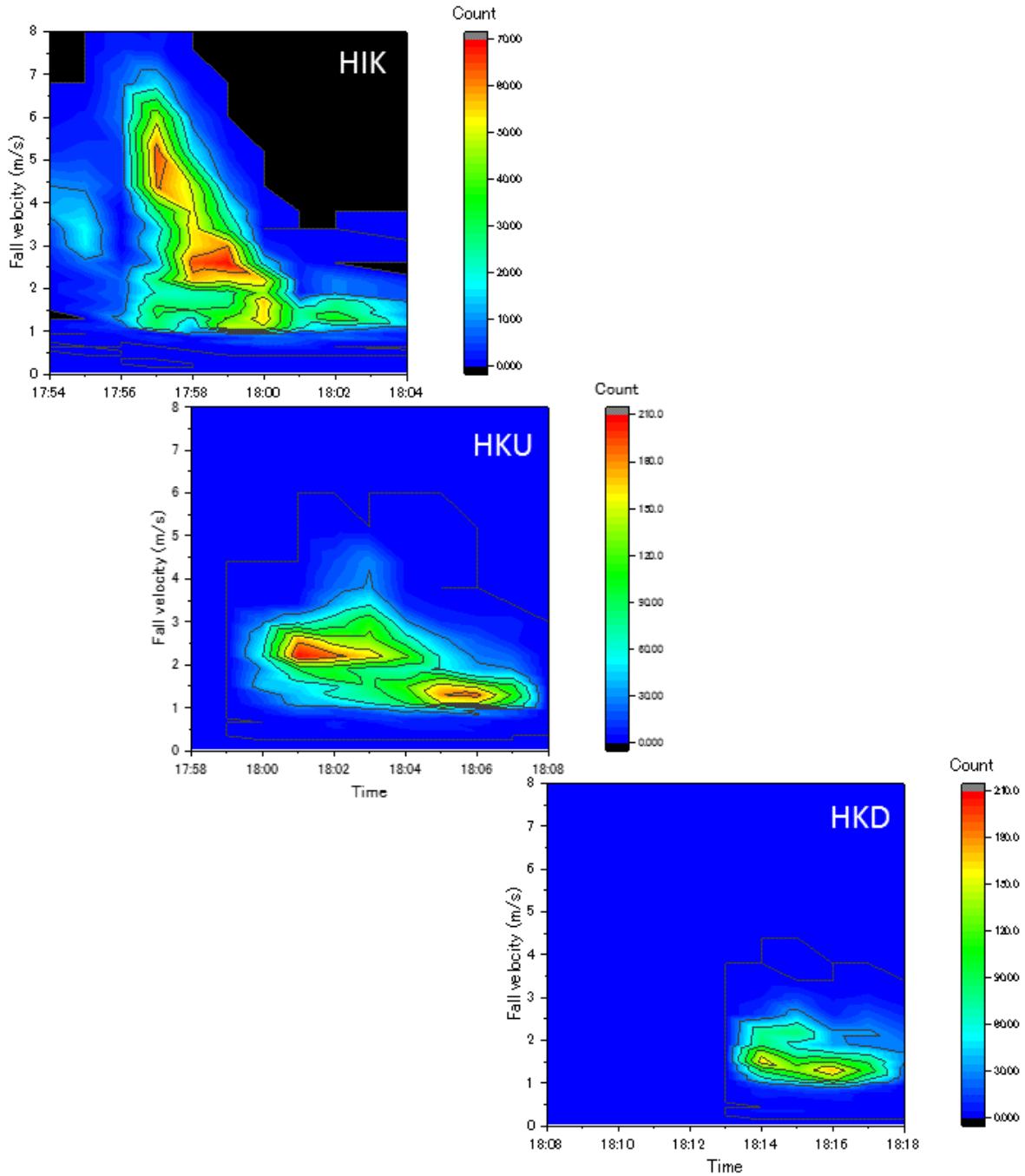


図 57 HIK、HKU、HKD におけるディスクロメータにより観測された火山灰粒子の落下速度の頻度分布の比較。

e) レーダー観測による火山灰推定の高度化

気象レーダによる定量的降灰量推定手法の研究について、本年度の研究成果を含むこれまでの研究の総括をおこなった。以下、気象レーダデータの品質管理 (QC)、降灰量推定式 (工学的手法)、降灰量推定式 (理学的手法)、解析例、まとめと今後の課題の順に説明する。

e1) 気象レーダデータの品質管理 (QC)

気象レーダにより推定される降灰量には様々な理由により誤差が生じる。それらの誤差は、気象レーダシステムに起因する測定誤差と降灰現象に起因する誤差に大別できる。表5に気象レーダシステムに起因する測定誤差とその処理方法についてまとめた。処理の多くはレーダ気象学の降水量推定手法において用いられているものである。表にあげた「バイアス誤差」はレーダ受信機のキャリブレーションに起因する誤差で、降灰からの受信信号（電力値）の過大評価あるいは過小評価につながる。バイアス誤差の最も単純な補正方法は、散乱断面積が既知のターゲット（例えば、アルミ球やコーナーリフレクタなど）をレーダで観測し、その観測値と理論値を比較する方法である。本研究では、降水量推定手法の研究に用いられる手法を用いた。すなわち、ディスドロメータにより測定された雨滴粒子の粒径分布から計算されるレーダ反射因子をグランドトゥルースデータとして、気象レーダにより観測されたレーダ反射因子を補正する方法である。「ビーム遮蔽誤差」は、レーダビームが山岳などの地形によりその一部あるいは全部が遮蔽されることにより生じる誤差である。遮蔽率が大きくなっている場合には、ビームの地形による幾何学的な遮蔽率を計算することでレーダ反射因子の補正が可能である(Shakti et al. 2013)⁸⁾。「降灰・降雨減衰誤差」はレーダビームの伝搬経路にある降灰や降雨が送信電波および受信電波を減衰させることによって生じる誤差で、降灰強度の過小評価をもたらす。降雨減衰の補正方法に関してはこれまで数多くの方法が提案されている。古典的な方法は観測された反射因子と減衰量の経験式から繰り返し法により減衰を補正する方法である(Hildebrand 1978)⁹⁾。より洗練された方法として、偏波パラメータを用いた自己無撞着法(Bringi et al., 2001)¹⁰⁾が降雨減衰の補正に用いられている。降灰による電波の減衰は降灰粒子の誘電率が小さく降雨による減衰に比べて小さいので波長が5cmのレーダではほぼ無視して良いであろう。降灰量の推定精度をどこまで求めるかによるが、波長が3cmのレーダでも第一近似として無視できるであろう。「レンジサイドロブエコー誤差」は、パルス圧縮レーダで発生する現象である。特に、噴火直後の噴煙柱を観測するときに、噴煙柱の強いエコーを中心にレーダビーム方向に放射状の疑似エコーが発生する場合がある。レンジサイドロブエコーは真のエコーと混在し、降灰量と降灰域の過大評価をもたらす。2013年の桜島噴火を調べたところ、高度3000mを超す噴火の全ての場合にレンジサイドロブが発生していた。補正方法としては、信号処理機に組み込まれたフィルターにより、ハード的にレンジサイドロブを低減する方法もあるが、本研究で使用した国交省のXMPレーダにはその機能がないために、ソフト的に補正を試みた(本年度実施)。具体的にはメジアンフィルター、オープン・クローズフィルター、窓関数フィルターを用いてレンジサイドロブを除去した。図58にその結果を示す。なお、窓関数としてはベル型窓関数を用いた。噴火直後のエコーを見ると、下降直上の強いエコーとそのエコーを中心にレーダからレンジ方向に放射線状に伸びるエコー（レンジサイドロブエコー）が現れている。また、エコーの分布の特徴として空隙や斑

点状のエコーが特徴的である。メジアンフィルター、オープン・クローズフィルターを施した後の図を見ると、これらの空隙や斑点状のエコーが除去され滑らかなエコーパターンとなっている。しかしながら、レンジサイドロブエコーは処理し切れていない。窓関数フィルターによりレンジサイドロブエコーが除去されたことがわかる。「グランドクラッターエコー誤差」は、降灰エコーが山地や海面からのエコーに隠されてしまうために生じる誤差である。単純な補正方法としてはマスキング処理が用いられる。信号処理に組み込まれた MTI (moving target indicator) が使用される場合もある。

表 5 気象レーダシステムに起因する測定誤差要因と処理方法

誤差要因	説明	処理方法
バイアス	受信機のキャリブレーション不良による受信電力の測定誤差	・基準ターゲットの観測 ・ディスドロメータを利用した方法
ビーム遮蔽	地形によるビーム遮蔽による受信電力の低下	・遮蔽率を考慮した補正
降灰・降雨減衰	ビーム伝搬途中の降灰や降雨による受信電力の減衰	・古典的方法 ・自己無撞着法
レンジサイドロブエコー	パルス圧縮レーダで発生する放射状のエコーによる誤差	・画像処理 ・レンジサイドロブフィルター
グランドクラッターエコー	山地斜面や海面から帰ってくる強い反射エコーによる誤差	・画像処理（マスキング） ・MTI フィルター

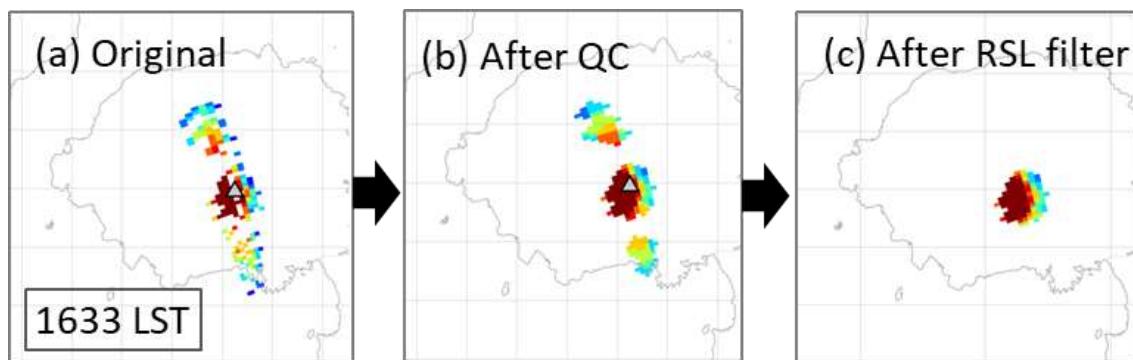


図 58 レーダデータの品質管理とレンジサイドロブの除去結果。

もう一つの誤差要因である降灰現象に起因する誤差とその処理方法について表 6 にまとめた。「降灰量推定式」による誤差は降灰粒子の粒径分布の変動に起因する誤差である。詳細は省くが、これは、降灰強度 R_A が粒径の 3.5 乗に比例するのに対してレーダ反射因子 Z は粒径分布の 6 乗に比例するためである。補正方法としては、地上のグランドトゥルースデータ、例えばディスドロメータで測定された降灰強度を用いる方法がある。レーダ気象学では、降雨強度推定式に雨滴の粒径分布の変動に敏感ではない偏波レーダパラメータ

(偏波間位相差や反射因子差) を用いる方法が提案されている。しかしながら、降灰強度に関しては偏波レーダパラメータを用いる方法は確立されていない。「微物理学的誤差」は、降灰粒子の凝集や雲粒や雨粒との合併などに起因する散乱特性の変化による誤差で、通常、降灰強度が過大評価される。補正方法として、レーダ気象学で用いられている粒子判別の手法が利用できるかも知れない。Kim et al. (2019)¹¹⁾は、降灰粒子と降水粒子の偏波レーダパラメータの統計的特徴を調べ、メンバーシップ関数を用いた粒子判別を試みている。現時点では、降灰エコーと離れた場所にある強い降水エコーの区別には成功しているが、弱い降水エコーや降雨と混在した降灰との区別には成功していない。「不検出降灰」は降灰の鉛直分布が時間によって変化するために発生する。レーダビームの高度が噴煙高度よりも高い時（例えば、噴火直後の噴煙柱の発達段階や噴煙の衰弱期）にしばしばみられる。補正方法としては、3次元スキャンデータの利用がある。「不検出降灰」の例については、本報の結果で紹介している。地上付近の降灰をリアルタイムで観測したい場合には、低仰角の2仰角PPIデータを合成する方法がある。

表 6 降灰現象に起因する誤差と処理方法

誤差要因	説明	処理方法
降灰量推定式	降灰粒子の粒径分布の変動に起因する誤差	・ディスクロメータによる調節 ・偏波パラメータの利用？
微物理学的誤差	凝集、湿った降灰粒子などに起因する受信電力の増加	・偏波パラメータを利用した粒子判別（未確立）
不検出降灰	降灰の高度変化によりレーダで検出できない領域が生じる	・3次元データの作成 ・2仰角法による地表近くの降灰量

e2) 降灰量推定式（工学的手法）

工学的降灰量推定式は、地上の降灰量の測定値とレーダで観測されたレーダ反射因子を比較することによって求められる経験式である。これまで、2013年8月18日の桜島噴火、2016年10月8日の阿蘇中岳噴火について時間積算降灰量と時間積算反射因子の関係式を報告した。しかしながら、瞬間瞬間の降灰強度 R_A と反射因子 Z の関係式、いわゆる R_A-Z 関係式については精度良い関係式は求められなかった。その理由は、従来の人手による降灰量サンプリング方法では R_A のデータが得られないためである。そこで、1分間毎の R_A を測定できるディスクロメータと1分間毎の Z を測定できる国交省XMPレーダを用いて R_A-Z 関係式を求めた。 R_A-Z 関係式は噴火のタイプや規模に依存すると考えられるので、計6事例の桜島噴火について R_A-Z 関係式を求めた。その結果を表7に示す。表の R_A と Z の単位はそれぞれ [$\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$]、[mm^6m^{-3}] であることに注意。

表 7 桜島噴火 6 事例の R_A-Z 関係式

事例 No.	噴火発生時刻 yyyy/mm/dd hh:mm	噴煙高 (m)	流向	火口	R _A -Z関係式
1	2018/5/15 08:08	2500	T	南岳	$R_A = 5.64 \times 10^{-2} Z^{0.837}$
2-1	2018/5/22 19:48	不明	不明	南岳	$R_A = 6.90 \times 10^{-3} Z^{0.847}$
2-2	"	"	"	"	$R_A = 2.67 \times 10^{-2} Z^{0.704}$
3	2018/5/30 08:01	2500	E	南岳	$R_A = 8.45 \times 10^{-2} Z^{0.520}$
4	2018/6/10 11:35	3500	T	南岳	$R_A = 4.02 \times 10^{-2} Z^{0.638}$
5	2018/6/16 07:19	4700	W	南岳	$R_A = 3.90 \times 10^{-2} Z^{0.670}$
6	2018/7/16 15:38	4600	W	南岳	$R_A = 3.74 \times 10^{-2} Z^{0.731}$
All	—	—	—	—	$R_A = 4.97 \times 10^{-2} Z^{0.629}$

e3) 降灰量推定式（理学的手法）

理学的降灰量推定式は、降灰粒子の粒径分布と形状から理論的に導き出される R_A-Z 関係式である（平成 30 年度報告書）。降灰粒子の平均的な粒径分布は次の指數分布で表すことができる。

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D), \quad 0 \leq D \leq D_{\max} \quad (7)$$

Takaoka et al. (2019)¹²⁾ はパーシベルで観測された 6 事例の桜島噴火に伴う降灰のデータから、

$$N_0 = 1.39 \times 10^4 \quad (8)$$

$$\Lambda = 4.64 R_A^{-0.143} \quad (9)$$

と表されることを示した。ここで、 $N_0 [\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}]$ 、 $\Lambda [\text{mm}^{-1}]$ はそれぞれ、指數粒径分布の切片パラメータ、傾きパラメータと呼ばれる。なお、(3)の降灰強度 R_A の単位は $[\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}]$ であることに注意。詳細は省略するが、粒径分布が (7)、(8)、(9) 式で表されるとき、次式の理論的な降灰強度の式が求められる。

$$R_A = 1.36 \times 10^{-5} Z^{0.739}; \quad R_A [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}], \quad Z [\text{mm}^6 \text{m}^{-3}] \quad (10)$$

図 59 は、理学的手法で求めた降灰強度推定式 (4) と工学的手法で求めた降灰強度推定式 (表 7) を比較した図である。図の Exponential PSD は指數分布の粒径分布を仮定して求めた理論的 RA-Z 関係式である。Average of 6 eruptions は 6 つの噴火事例の平均的な工学的 RA-Z 関係式である。そのほかの日付を付した曲線は噴火事例毎に求めた工学的 RA-Z 関係式である。理学的 RA-Z 関係式はほかの RA-Z 関係式と比べて RA を過大評価することがわかる。これは指數分布を仮定しているためと考えられる。一方、工学的 RA-Z 関係式は、噴火事例によっては平均的な RA-Z 関係式から大きく外れる場合がある。例えば 5 月 15 日の噴火や 7 月 16 日の噴火事例である。これは降灰粒子の粒径分布が各事例によって異なつ

ているためと考えられる。

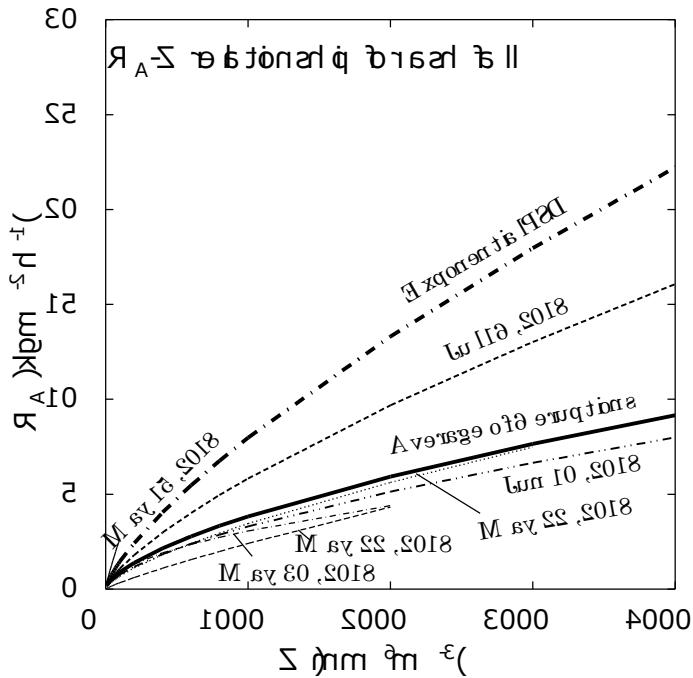


図 59 様々な R_A -Z 関係式の比較。

e4) 解析例

前術したように、降灰の鉛直分布は時間によって変化するために、単一仰角の PPI 観測では降灰分布を捉えられない場合がある。ここでは、三次元解析結果の例を紹介する。図 58 は 2013 年 8 月 18 日の桜島昭和火口の噴火事例のレーダー解析結果である。垂水に設置された国交省 XMP レーダーの三次元データを処理して求めた、高度 500m から 3000m までの時間積算降灰量分布が示されている。図中の No data area1 および No data area 2 はそれぞれ、ビーム高度が噴煙高度よりも低いために生じたエリア、地形によるビーム遮蔽エリアである。図中の黒点は国交省などが噴火の翌日に実施した地上降灰量のサンプリング点である。時間積算降灰量分布の計算に用いた式は工学的な手法に基づく SA-SZ 関係式(真木・他、2019)¹³⁾である。各高度の降灰量分布を比較すると、高度 500m では No data area のために一部の降灰量分布しか求められていない。高度 750m から高度 1000m では、桜島火口の西側に分布する降灰域に大きな違いはない。高度が高くなるに従って鹿児島市内の降灰域が小さくなっている。これは、噴煙高度の時間変化によるものであろう。図 61 に各高度における総降灰量と総降灰面積の時間変化を示す。図 60 で述べた降灰面積と総降灰量の高度毎の時間変化が明瞭に表れている。

e5) まとめと今後の展望

本報告では、本年度の成果を含むこれまで実施した定量的降灰量推定に関する研究成果をまとめた。特に、レーダーによる降灰量推定に及ぼす誤差要因を整理し、その解決方法についても触れた。降灰量推定手法に関する研究は当初の計画通り進められ、本年度、実用に耐えうる推定式の提案ができたと考える。現時点での推定式の精度は 100% 程度であろ

う。今後も引き続き、降灰量の推定精度を向上させる必要がある。例えば、桜島の場合、レーダデータとディスドロメータデータとの調節による精度向上が期待される。また、これまで取り組んできたがまだ成功していない偏波レーダパラメータの利用がある。さらに、これまで対象としていなかった連続的噴火に伴う降灰量の推定や降水時の降灰量推定などの研究を進めていく必要がある。

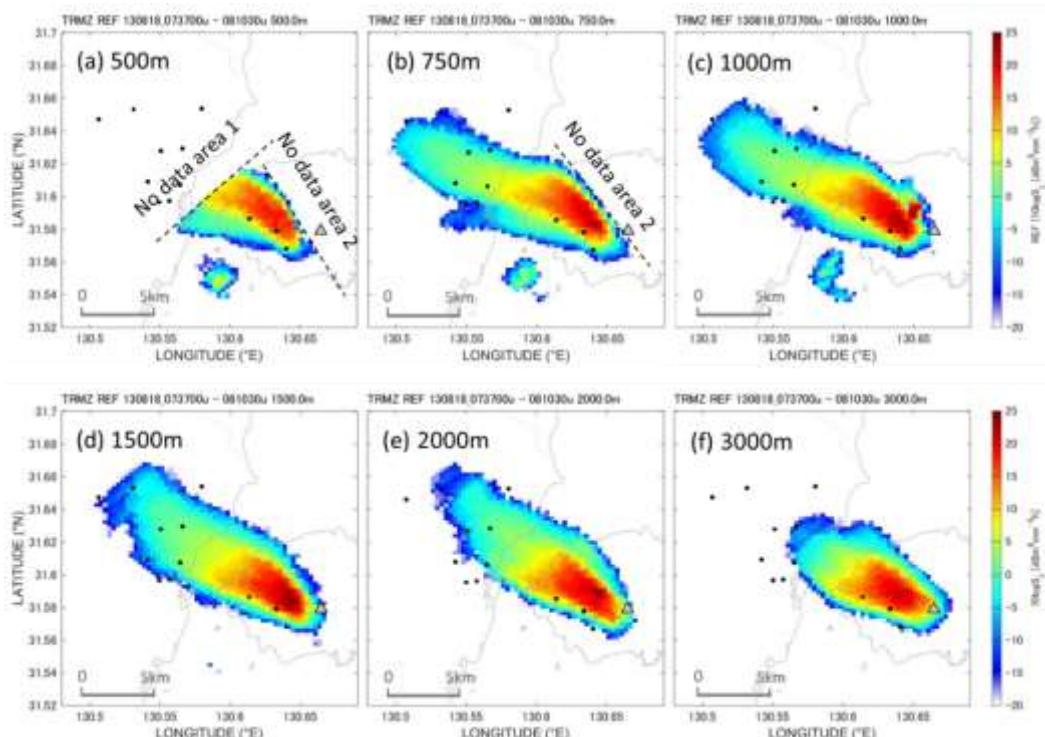


図 60 時間積算降灰量分布の高度による違い（真木・他、2019）。

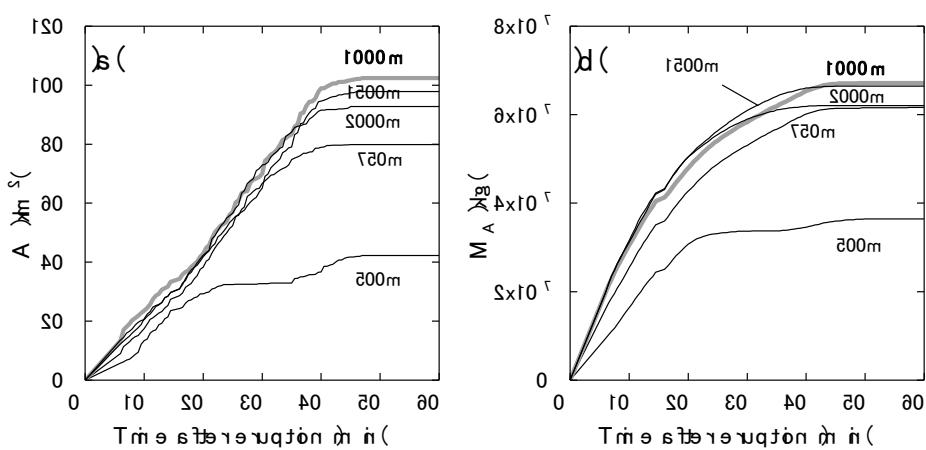


図 61 高度毎の(a)降灰面積の時間変化と(b)総降灰量の時間変化（真木・他、2019）。

3) 火山灰拡散予測の高速度化技術開発

a) 火山灰拡散シミュレーションにおける火山灰粒子の初期座標の設定

本サブテーマでは火山灰拡散予測の高速度化技術開発に PUFF モデル (Tanaka et al., 2002)¹⁴⁾を用いてきた。PUFF モデルは、火口直上に火山灰粒子を多数配置し、風速場に沿う移流、拡散、重力による降下を考慮して、粒子の移動を追跡するものであるが、火山灰粒子の初期値は、火口上の噴煙の最高到達高度まで均質に配置して、計算されている。また、2014 年 2 月にインドネシアのケルート火山で発生した噴火を踏まえ、傘雲の形成を考慮した火山灰拡散シミュレーションに改良し、噴煙高度の増加とともに水平方向の拡散係数 (C_h) が、増加するような次式を提案した（平成 29 年度報告書）。

$$C'_h = C_h \times \left[1 + \frac{z}{z_0} \exp \left\{ - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \right] \quad (11)$$

一方、噴煙は風に流されながら上昇し、大気の取り込みなどにより複雑な形状をとる。より正確に火山灰粒子を追跡するためには、火山灰粒子の初期座標を噴煙の形状に沿って配置する必要がある。噴煙の形状自体は可視画像により把握することは容易であるが、噴煙柱の中の火山灰粒子の密度は可視画像からはわからない。そこで、X バンド MP レーダーにより観測される反射強度から推定してみる。レーダーの反射強度は、以下のように記述され、粒径の 6 乗に粒子数を乗じた値を粒径に沿った積分値によりあらわすことができる。反射強度は火山灰粒子の密度を反映していると考えることができる。

真木・他 (2019)¹³⁾ の降灰速度 (R_A) と反射強度 (Z) の関係を以下のように定式化した。

$$R_A = \alpha Z^\beta; R_A [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}], Z [\text{mm}^6 \text{m}^{-3}] \quad (12)$$

β は 真木・他 (2019)¹³⁾ に従い 0.35 とした。 α は、レーダーに捕捉された噴煙の総重量と反射強度の総和が整合するように決定した。

2019 年 11 月 8 日 17:24 の爆発により噴出した噴煙は図 62 のように、桜島火山観測所に設置されたレーダーのセクター RHI スキャンにより方位角を変えながら観測されているので、反射強度の分布を 3 次元的に得ることができる。図 62 に示したレーダー観測のスキャン期間 (17:24:36～17:25:41、噴火直後の約 1 分) に対応する有村観測坑道のひずみ変化から噴煙の総重量を 10,000 トンと見積もられ、上式に従って反射強度に応じた重量を空間的に配分した。火山灰を含む噴煙の反射強度の閾値を 10dBz、20dBz、30dBz、40dBz の 4 種類に設定し、火山灰の噴煙を反映したものを図 63～図 65 に示した。これを火山灰粒子の初期座標として PUFF モデルによるシミュレーションを行った。

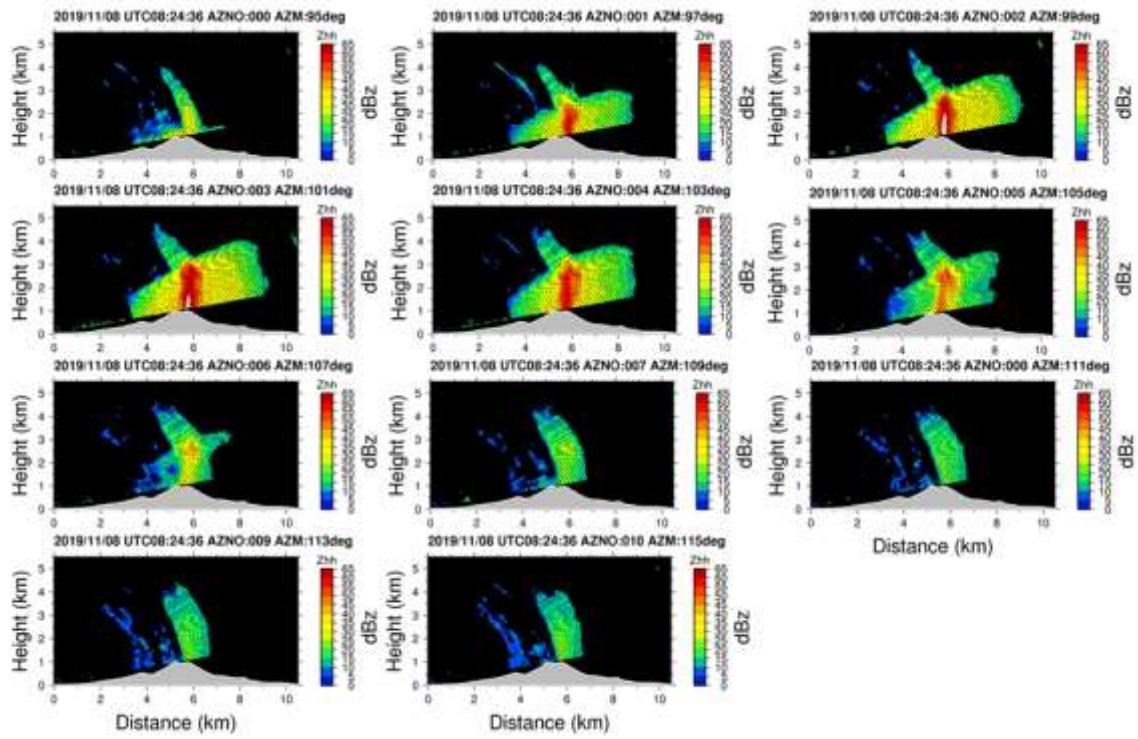


図 62 2019 年 11 月 8 日 17:24 の桜島の爆発による噴煙の RHI スキャン画像。スキャンする方位角毎（95 度から 155 度）に示す。

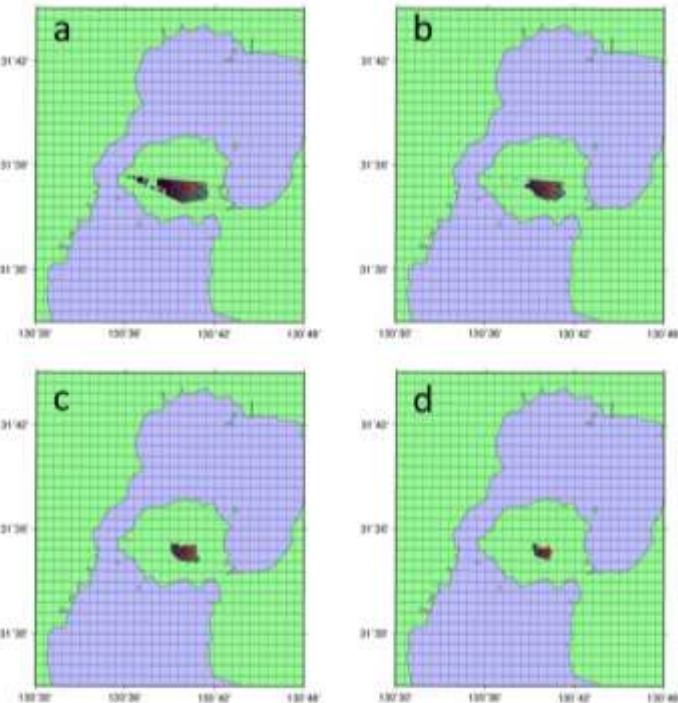


図 63 レーダーの反射強度分布から決定した PUFF モデルにおける火山灰粒子の初期座標（水平位置）。反射強度の閾値を 10dBz (a)、20dBz (b)、30dBz (c)、40dBz (d) にした場合。

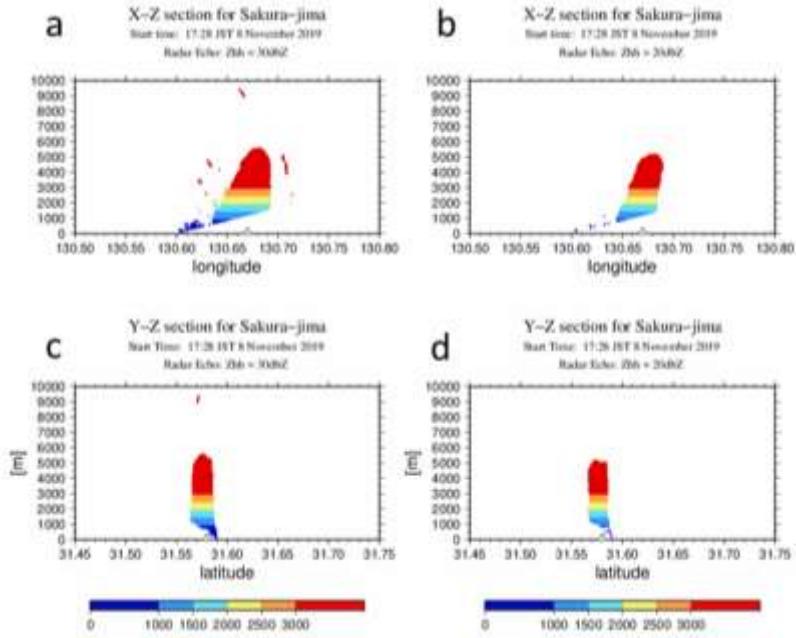


図 64 レーダーの反射強度分布から決定した PUFF モデルにおける火山灰粒子の初期座標(鉛直断面)。反射強度の閾値を 10dBz (a)、20dBz (b) とした東西断面、10dBz (c)、20dBz (d) にした南北断面を示す。

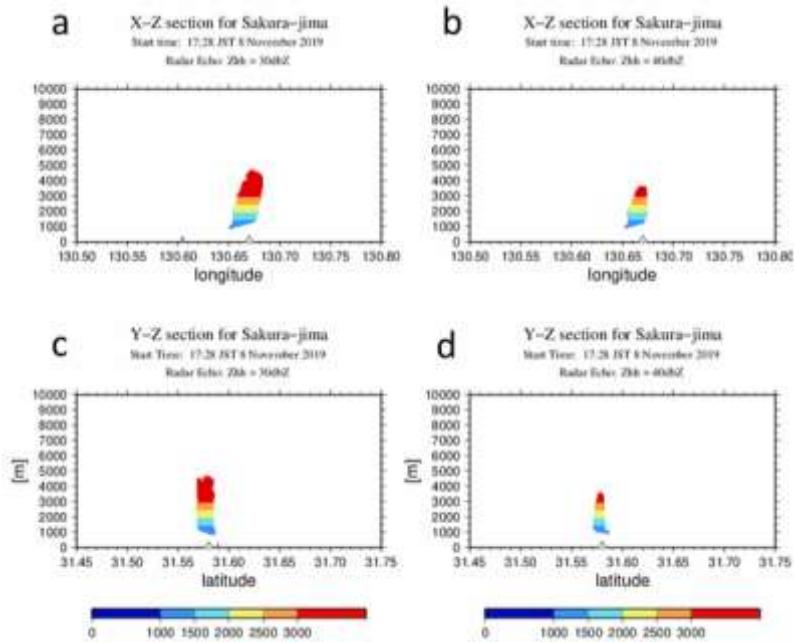


図 65 レーダーの反射強度分布から決定した PUFF モデルにおける火山灰粒子の初期座標(鉛直断面)。反射強度の閾値を 30dBz (a)、40dBz (b) とした東西断面、30dBz (c)、40dBz (d) にした南北断面を示す。

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

火山灰放出量は地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーと相関があることが知られており、火山灰放出重量（ W ）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 ）に対して以下の関係がある。

$$W_e = \alpha A + \beta \Delta V + \gamma \quad (13)$$

2009 年 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)¹⁵⁾。ここで、 γ は當時微動を考慮した補正項である。昭和火口の噴火活動は 2015 年 6 月までは、頻繁に発生したが、7 月以降は噴火活動が低下し、2016 年 7 月 27 日から 2017 年 3 月 24 日までは噴火が発生していない。2017 年 4 月以降、噴火は頻繁に発生したが、10 月 31 日の噴火からは南岳において噴火が頻発するようになり、この火山活動は現在（2010 年 3 月）に至るまで続いている。そこで、噴火活動期の違いにおける火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーの関係を検討した。

図 66 に 2009 年 1 月から 2019 年 12 月までの 11 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)¹⁵⁾。

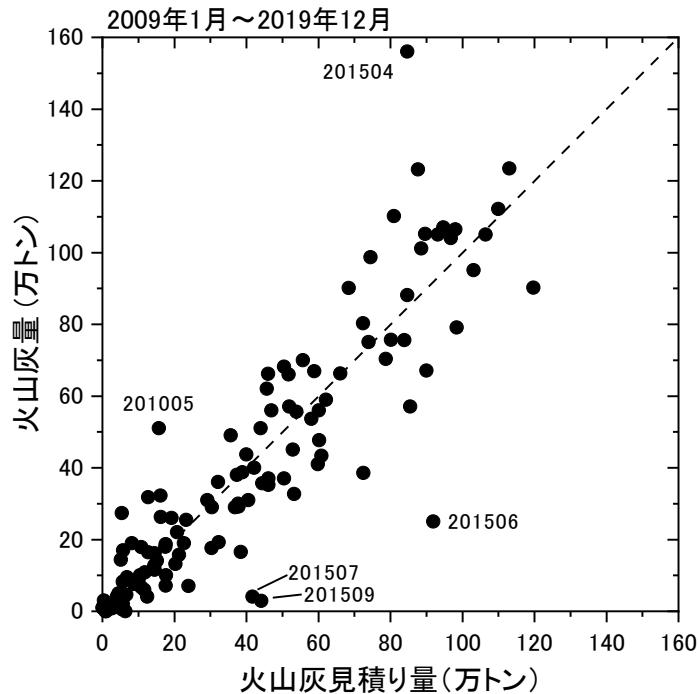


図 66 2009 年 1 月から 2019 年 12 月までの 11 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

係数については、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -0.5 \times 10^5$ とした。噴火活動期に依存せず、同じ経験式で火山灰放出量を推定できることがわかる。ただし、2015 年 4 月、6 月、7 月、9 月は経験式からずれが大きい。2015 年 1 月から 6 月までは昭和火口における噴

火活動が活発で、4月には昭和火口噴火活動期において最大となる156万トンの火山灰が放出された。経験式からの見積もりが過小評価となっている。一方、2015年6月の火山灰放出量は25万トンと見積もられている。2015年6月の鹿児島市における月間降水量は1300mmに達しており最大の月間降水量になっている。降灰観測点における火山灰が部分的に降雨により流されて少なく評価された可能性もある。

b) 圧力源の体積変化と噴煙高度との関係の検討

上記の経験式(13)は、桜島の個々のブルカノ式噴火にも適用可能である。この場合、(13)式の第2項の地盤変動による寄与が大きいので、火山灰放出重量は、地盤変動を励起する圧力源の体積変化に対して以下のように近似できる。

$$W_e = \beta \Delta V \quad (14)$$

噴煙高度が推定できれば、火山灰拡散シミュレーションを行うことができるので、噴火に伴うひずみ及び傾斜変化と噴煙高度の関係を2009年2月～2020年3月に発生した噴火について検討した。このうち、噴煙高度が明らかになっており、鹿児島地方気象台が噴煙高度を発表し（雲入りを除く）、5ナノストレイン以上のひずみ変化が有村観測坑道において検知され、かつひずみ変化の継続時間が5分以上続いた噴火は4225回発生している。南岳火口方向とそれに直交する方向のひずみ変化から微小球状圧力源を仮定して、圧力源の深さと体積変化量を求め、ひずみ変化の継続時間で体積変化量を割ったものを噴出率とした。噴煙高度と噴出率の関係を図67に示す。

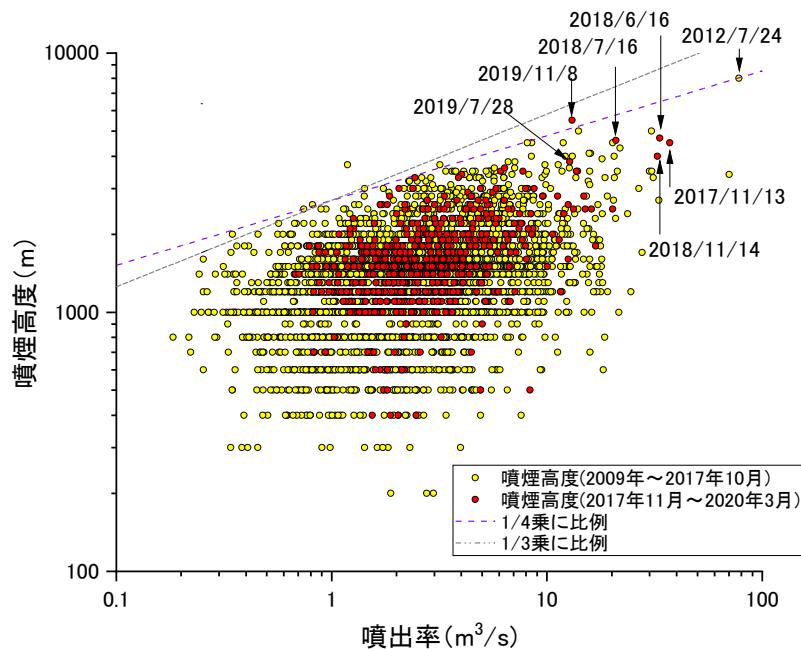


図67 噴煙高度と噴出率の関係。2009年2月～2017年10月までの噴火を黄丸、2017年11月から2020年3月までの噴火を赤丸で示した。概ね黄丸が昭和火口における噴火、赤丸が南岳の噴火を表す。

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、 $78\text{m}^3/\text{s}$ 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・他、2014）¹⁶⁾。噴

煙高度が 5000m に達した 2013 年 8 月 18 日および 2016 年 7 月 26 日の噴火の噴出率は大きい。噴出率は $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下のものが圧倒的に多いが、噴煙高度との間に相関が認められる。噴煙高度 (H) には噴出率 (\dot{V}) に依存する上限が認められ、上限の直線を以下のように決定されている。

$$H = 2700\dot{V}^{1/4} \quad (15)$$

2019 年 4 月から 2020 年 3 月までの南岳の噴火の中では、11 月 8 日の噴火において噴煙高度は 5500m に達しており、噴出率は $13\text{m}^3/\text{s}$ と見積もられた。これらの値は、ほぼ、(15) 式の直線状にあり、噴煙高度は(15)式を超えることがないことが確認できた。したがって、期待される噴煙高度の最大値として(6)式から得られる噴煙高度を用いて火山灰拡散シミュレーションを行うことが可能である。本プロジェクトにおいて使用する PUFF モデルにおいては、以下の経験式を用いて噴出率から噴煙高度 (z_2) を決定し、PUFF モデルにより火山灰の移流・拡散をシミュレーションしている (Tanaka and Iguchi, 2019)²⁴⁾。

$$z_2 = z_1 + bW_e^{1/4} \quad (16)$$

なお、 z_1 は火口の標高であり、 b は経験的に 400 が与えられている。

c) 噴出率評価の高精度化

図 67 に示した噴出率は、有村観測坑道の火口方向および直交方向のひずみ変化の比から圧力源（茂木モデル）の深さを決めたのち、圧力源の体積変化量を求め、さらにひずみ変化時間で割ったものである。ひずみ記録は強く潮汐の影響を受けるので、経験的に決められた潮汐定数をもとに潮汐変化を計算する BAYTAP-G (Tamura et al., 1991)¹⁷⁾ に海洋潮汐の効果を考慮したハイブリッド潮汐補正法により、潮汐補正を行っている。そのため、補正後データの間隔は 1 分である。一方、多くのひずみ変化は 1 分程度でその変化は終わっている（例えば、図 68）。したがって、高精度に噴出率を求めるためには 1 分サンプリングデータでは、時間分解能が不足している。

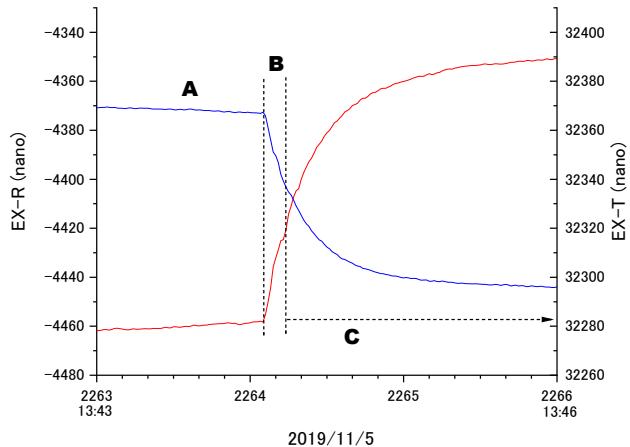


図 68 1 秒サンプリングによるひずみ変化（有村観測坑道）。2019 年 11 月 5 日 13:44 の爆発に伴うひずみ変化。ハイブリッド潮汐補正済みのデータを示す。

1 秒間隔でサンプリングされたひずみ変化を詳細に見てみると、図 68 に示すように、噴火発生直後のひずみ変化は、直線的にひずみ変化が進行する部分（図 68 の区間 B）と指数関数的に変化が減少する部分（区間 C）に分けられる。指数関数的に変化が小さくなる部分は粘弾性効果によるものと推測できるが、噴火開始直後の直線的な変化は噴出率に関係

すると考えられる。そこで等速でひずみが進行する区間Bにおけるひずみ速度から圧力源の体積変化速度を求め、それを噴出率とした。

図69に噴煙高度と噴出率の関係を示す。ここでは、気象条件が大きく変わっていない、2019年11月5日～8日に発生した噴火について示す。噴出率が大きいほど、噴煙高度が高くなる傾向が認められる。図67に示した分値データに基づく噴出率の評価と最も異なる点は、噴出率が1桁ほど大きく見積もられることである。噴出量との噴煙高度の関係を図70に示す。噴出量が大きいほど、噴煙高度が高くなる傾向が認められる。

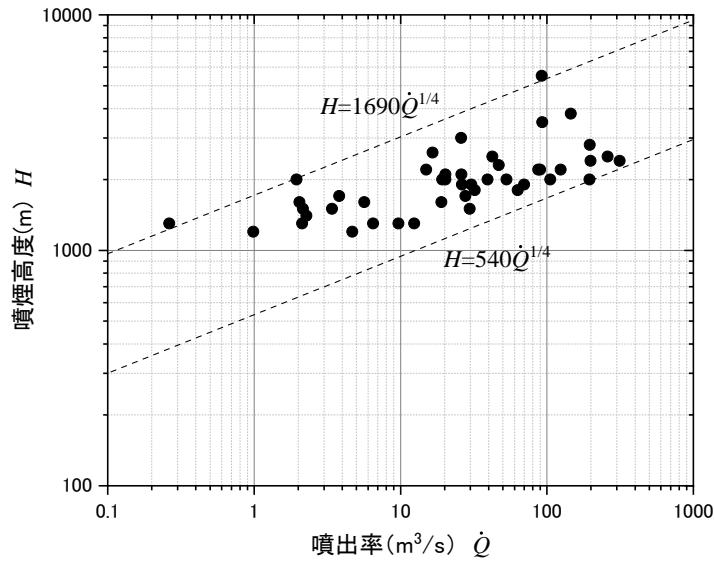


図69 噴煙高度と噴出率の関係。2019年11月5日～8日に発生した噴火について示す。

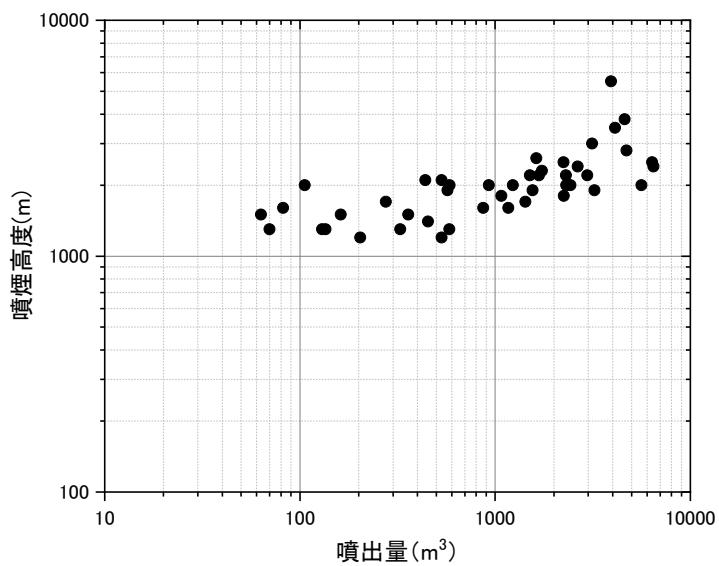


図70 噴煙高度と噴出量の関係。

d) 地震及び地盤変動観測の高精度化

(13)式は有村観測坑道のひずみ変化から決定した式であるが、今後、それ以外の観測点の地震及び地盤変動データを用いて、火山灰放出重量の見積もりを高精度化させるための検討を行う必要がある。

平成 31 年度は桜島北東部の新島において埋設型地震計・傾斜計の改修を行った(図 71)。

改修のための旧機器の引き上げ作業は 2019 年 10 月 30 日から開始し 11 月 4 日に完了した。11 月 5 日～9 日にかけて孔内の洗浄を行った。11 月 10 日にダミー通し試験を行ったが深度 200m 付近からダミーを垂直に下ろすことができなかった。そこで、深度 200m 付近に固定具を使って埋設型地震計・傾斜計を固定することとした。再設置作業は 2020 年 1 月 13 日～17 日に行い、深度 200.88m において機器を固定した(図 72)。固定具は Peek 管に圧力をかけることでケーシング壁面と機器を固定するものであるが、Peek 管の圧力抜けがあるため傾斜計の記録はいまだ不安定な動きが多い。Peek 管の圧力を維持する再調整を行う必要がある。なお、設置時に傾斜計の機器としての性能は正常であることが確認されている。



図 71 新島観測井の位置図。



図 72 固定具を使った埋設型地震計・傾斜計の再設置作業状況。

埋設型地震計の記録の例を示す。図 73 に 2020 年 2 月 1 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を示す。左が今回設置した新島観測井の地震計記録で、右が平成 30 年度に設置した黒神観測井の記録である。新島観測井は黒神観測井と比較すると南岳火口からの距離が 2 倍以上あるため初動付近は不明瞭であるが、爆発過程の重要な情報を含む主要動については記録がなされている（黒神観測井の 10 秒前後および新島観測井の 15 秒前後）。図 74 に新島、黒神（平成 30 年度機器改修）、有村（平成 29 年度機器改修）観測井における 2 月 1 日に発生した爆発地震の上下動成分のスペクトルを示す。3 観測井とともに爆発地震の特徴である 0.5~3Hz 付近の低周波にピークを持つ。前述のとおり新島観測井は南岳火口から距離があるためスペクトル全体で振幅が小さいが、黒神、有村観測井と同様な周波数の記録がなされている。図 75 に錦江湾若尊近傍で 2020 年 1 月 29 日に発生した火山構造性地震の波形記録を示す。M1.5 の微小地震であるが新島観測井では P 波、S 波が明瞭に記録されている。今回の新島観測井の地震計更新作業により始良カルデラのマグマ溜まり周辺における詳細な地震活動の把握、始良カルデラから桜島へのマグマ供給に関する研究が進展すると考えられる。

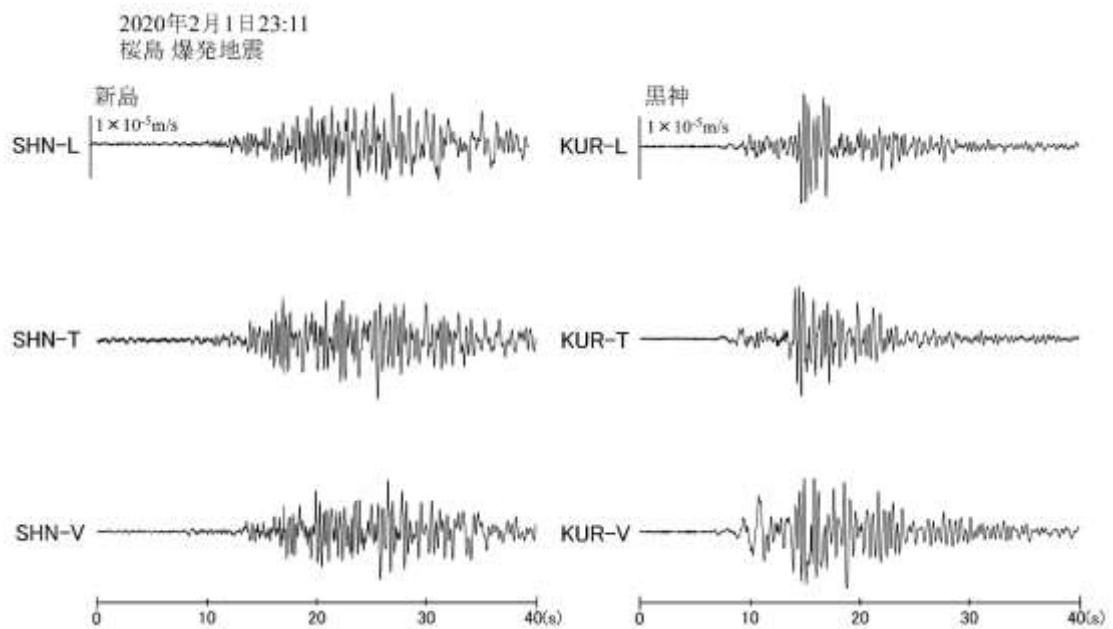


図 73 桜島南岳の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形。

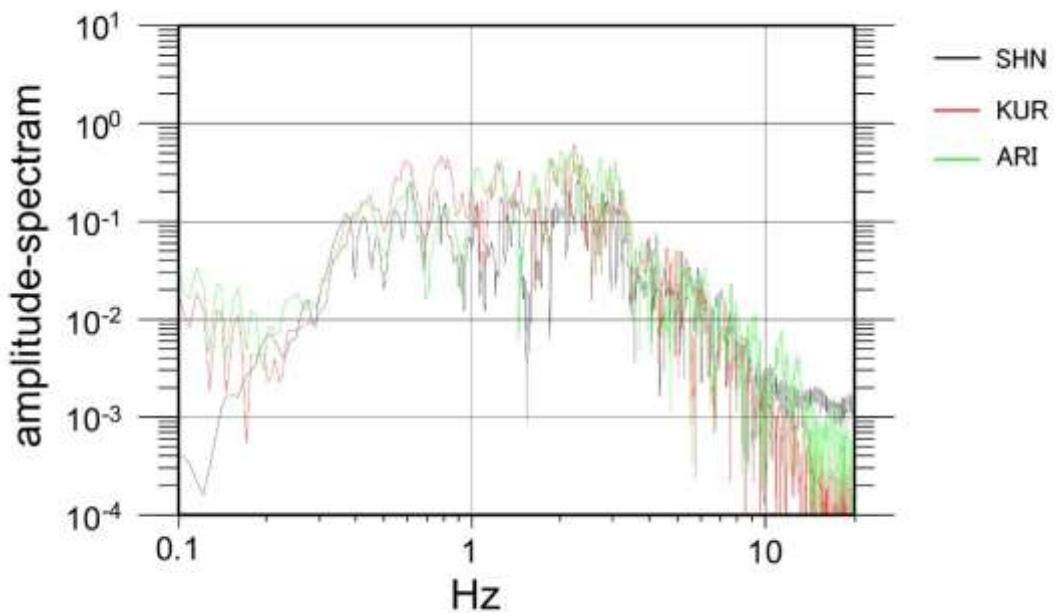


図 74 新島 (SHN)、黒神 (KUR)、有村 (ARI) における爆発地震 (図 73 のイベント) のスペクトル。

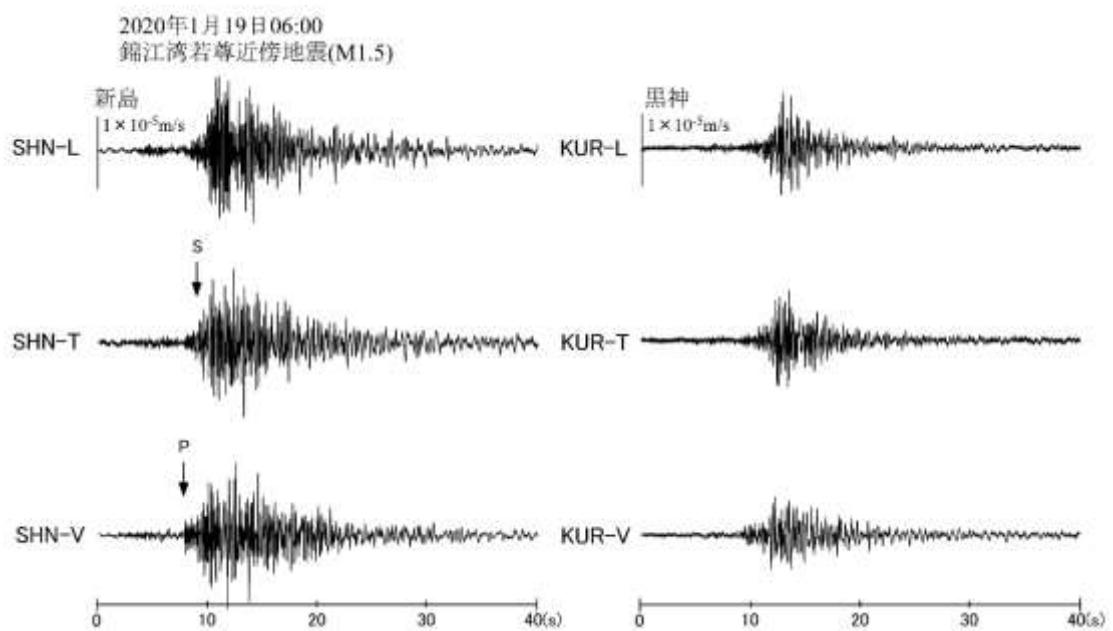


図 75 鹿児島湾北部海域の若尊火山近傍において発生した火山構造性地震の波形。

d) 噴煙シミュレーションによる噴煙高度の検討

噴煙ダイナミクスが火山灰拡散に与える影響を調べるため、グループ C3 と連携し、ブルカノ式噴火を対象とした噴煙シミュレーションを実施し、引き続き計算例を蓄積した。プリニー式噴火では噴出率が噴煙高度を決定する主なパラメータであるが、シミュレーションの結果、ブルカノ式噴火では同じ噴出率でも噴火継続時間が異なると噴煙高度が異なる様子を捉えることができた(図 76)。また、噴出率・噴出速度・火口半径を変えたパラメータスタディを行ったところ、無次元噴煙高度が無次元噴火継続時間で決まるという予備的な結果を得た(図 77)。無次元継続時間が 0.1 より短い場合にはブルカノ式噴火、1 より長い場合はプリニー式噴火の噴煙高度で説明でき、0.1~1 では遷移状態を示した。

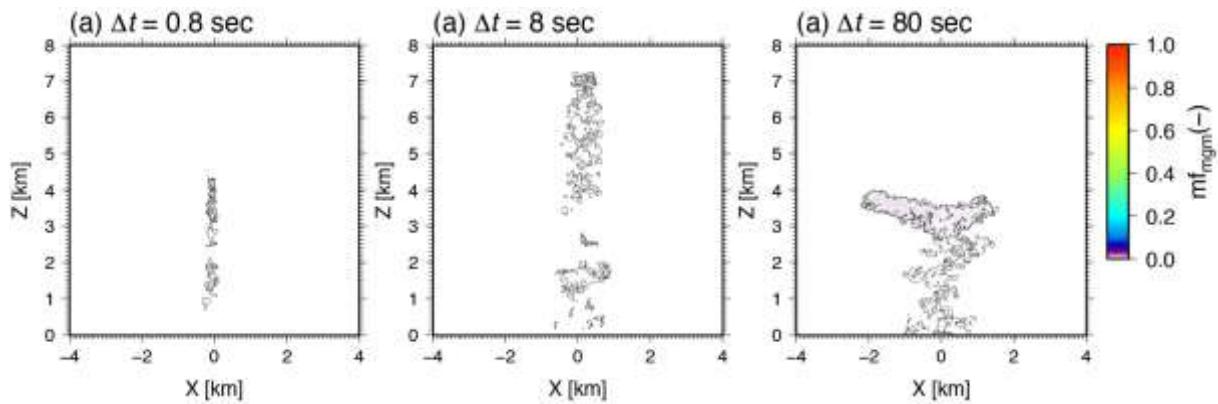


図 76 ブルカノ式火山噴煙の3次元数値シミュレーション結果。噴出率を $1.25 \times 10^5 \text{ kg/s}$ を共通の値とし、噴火継続時間を 0.8, 8, 80 秒と変化させた場合の、噴火開始から 10 分後の噴煙断面。

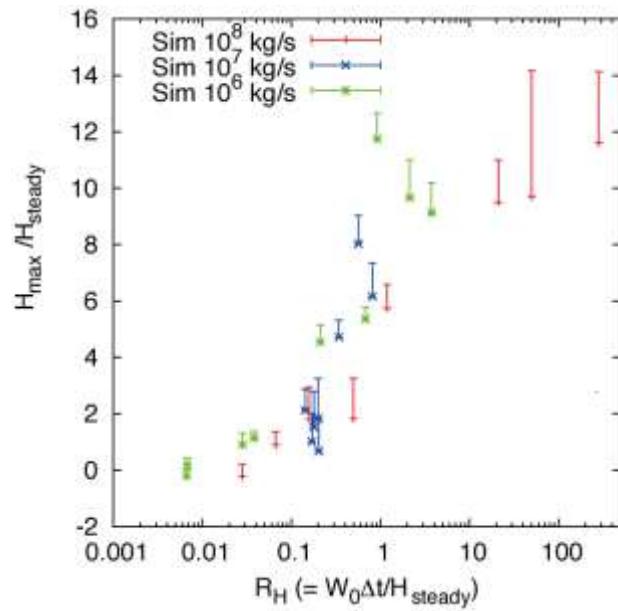


図 77 ブルカノ式火山噴煙のパラメータスタディ結果。無次元化した噴煙継続時間と噴煙高度の関係。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

a) 風速ベクトルのその場観測

a1) 調査期間・地点

調査は図 78 に示す、桜島地獄河原 (Site A および Site B)、有村局舎 (Site C) で実施した。調査期間は以下の通りである。

- ① 2019 年 10 月 30 日～31 日
- ② 2020 年 2 月 26 日～27 日

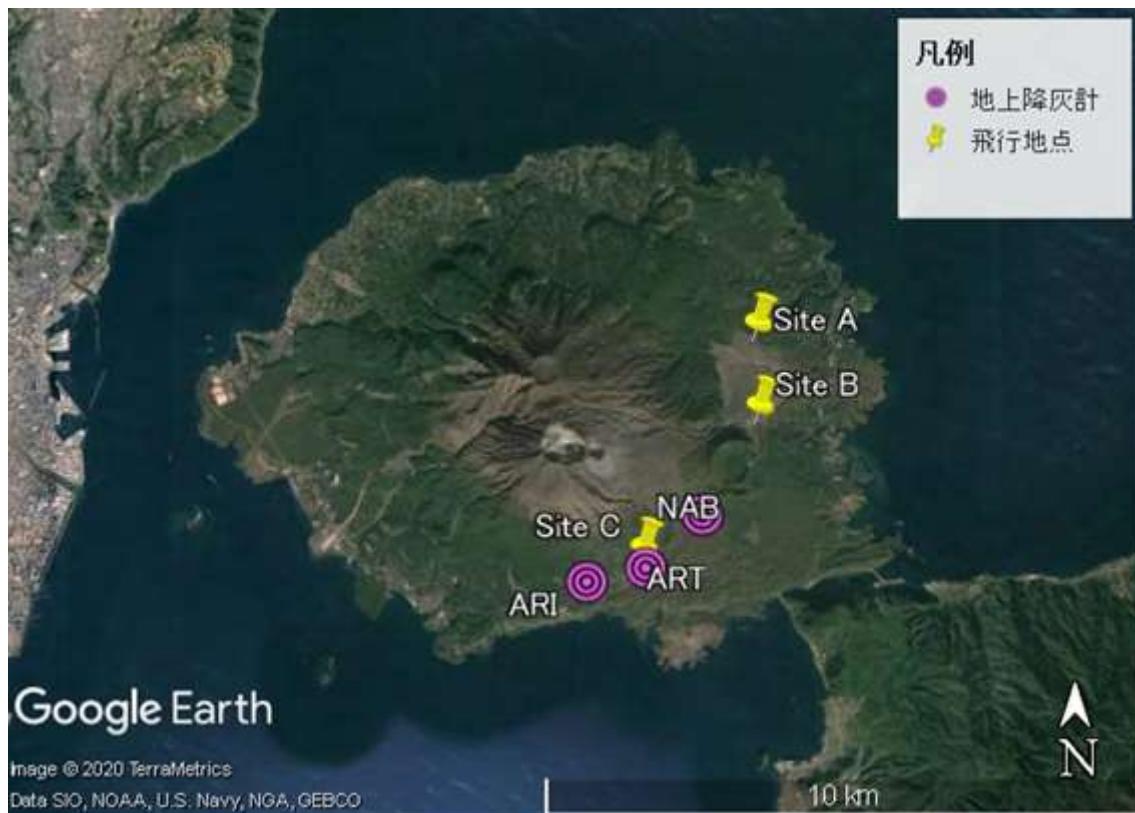


図 78 調査地点(Site A～Site C: ドローンによる観測地点 ARI, ART, NAB: 地上降灰計観測地点)。

a2) ドローンとドップラーライダーによる上空の風速ベクトルの並行観測

a2. 1) 調査方法

a2. 1. 1) ドローンによる計測

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。機体中心に 40 cm のポールを立て、先端に 2 次元超音波風向風速計 (FT702; FT-Technologies) を搭載した。データは 1 Hz でデータロガーに収録し、フライト終了後に回収した。

フライト方法は、指定高度^{*1}で 1 分間ホバリング、または指定速度^{*2}で上昇・下降しながら計測の 2 通りで行った。

*1 指定高度(地上高) 100m, 200m, 300m, 400m, 500m

*2 指定速度 3m/s, 2m/s, 1m/s

a2. 1. 2) ドップラーライダーによる計測

ドップラーライダーは三菱電機製 DIABREZZA_W (図 79) を使用した。ドローンの離着陸地点から約 30m 離れた位置に設置し、3 秒毎にデータを取得した。



図 79 ドップラーライダー外観(三菱電機(株)HP より)

a2. 2) 調査結果

a2. 2. 1) 調査概要

調査は 2019 年 10 月 30 日に桜島地獄河原 (Site A) で実施した。本調査にかかるドローンのフライト概要は表 8 のとおりである。

表 8 フライト概要

Run	観測日時	離陸時刻	着陸時刻	指定高度	備考
17	2019/10/30	14:00:20	14:07:32	500m (14:03:23-14:07:32)	3m/s で 500m まで往復
18	2019/10/30	14:10:10	14:20:04	500m (14:14:34-14:20:04)	2m/s で 500m まで往復
19	2019/10/30	14:24:15	14:41:45	500m (14:32:34-14:33:34)	1m/s で 500m まで往復
20	2019/10/30	14:44:00	14:55:00	500m (14:46:33-14:47:33) 400m (14:48:17-14:49:17) 300m (14:50:01-14:51:01) 200m (14:51:38-14:52:38) 100m (14:53:15-14:54:15)	指定高度で 1 分間ホバリング

a2. 2. 2) 風速ベクトルのホバリング計測

図 80 に、ドローンにより指定高度でホバリングして取得した風向風速データとドップラーライダーによる測定結果を比較した。各高度のデータは、ドローンについては 1 分間、ライダーについては、フライト時間中の平均値および標準偏差 (エラーバー) を表している。なお、ドローンによる風速値にはプロペラ旋回風の影響により、+0.5 m/s のバイアスが生じることが判明しているため、この補正を行っている。

この結果より、海拔 520 m のドローンによる風速がやや大きいことを除くと、風向風速の計測結果はライダーの結果とよく一致していることがわかる。

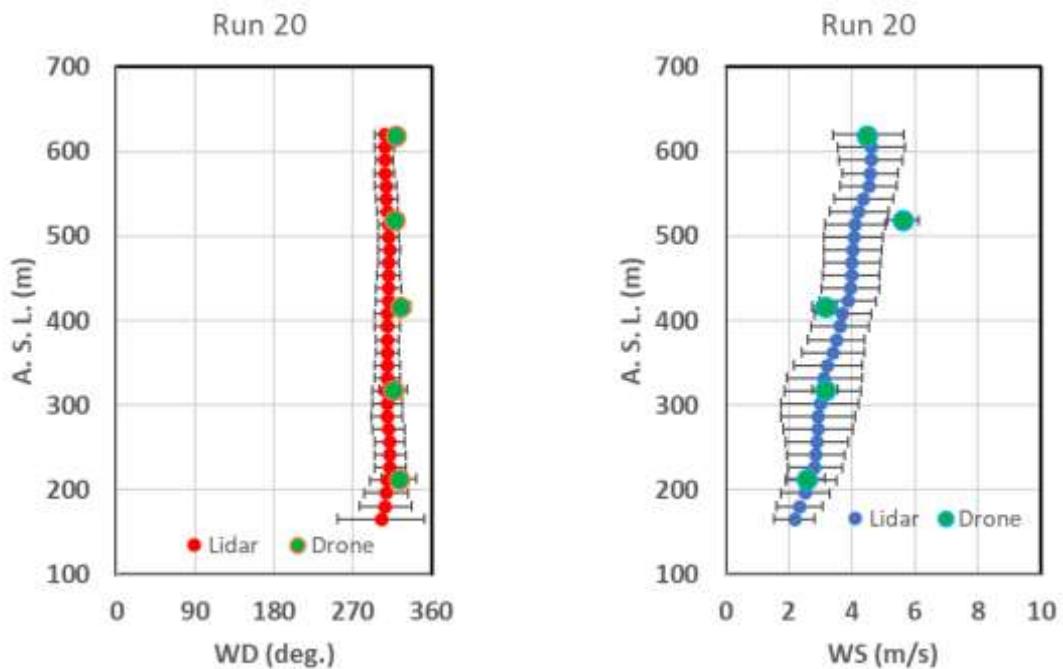


図 80 ドローン(ホバリング)とライダーによる風観測結果の比較 (左図: 風向 右図: 風速)

a2. 2. 3) 風速ベクトルの移動観測

ドローンにより指定速度で上昇・下降しながら計測した風向風速をドップラーライダーの観測結果と比較した (図 81)。ライダーについては、フライト時間中の平均値および標準偏差、ドローンの測定値については 1 秒毎のデータをプロットしたものである。なお、図中の(↑)のプロットはドローンが上昇中、(↓)のプロットは下降中に計測したデータであることを示す

図 81 より、移動速度が 1 m/s の場合 (Run 19) では風向風速とともにライダーの観測値とよく一致していることがわかる。移動速度が 3 m/s の場合 (Run 17) は、風向についてはライダーと良く一致しているが、風速については、上昇時と下降時に差が見られ、特に下降時に測定された風速が過大となる傾向が見られた。移動速度が 2 m/s の場合 (Run 18) は、海拔 400 m より上層で、風向・風速ともライダーとの乖離が顕著であった。ただし、この Run では 400 m 以上の風が弱く、ライダーの風向も大きくバラついている点に留意する必要がある。

a3) ドローンによる上空の火山灰観測

a3. 1) 調査方法

マルチコプター (SPIDER-CS6; ルーチェサーチ株式会社) に PM センサー (ヤグチ電子工業株式会社) を搭載し、地上から上空 1000 m までの PM 濃度を 1 Hz で計測した。Site B では指定高度でホバリングしながらデータを取得 (2019 年 10 月 31 日および 2020 年 2 月 26 日)、Site C ではホバリング計測に加え、一定速度で上昇・下降しながら時系列データを計測した (2020 年 2 月 27 日)。

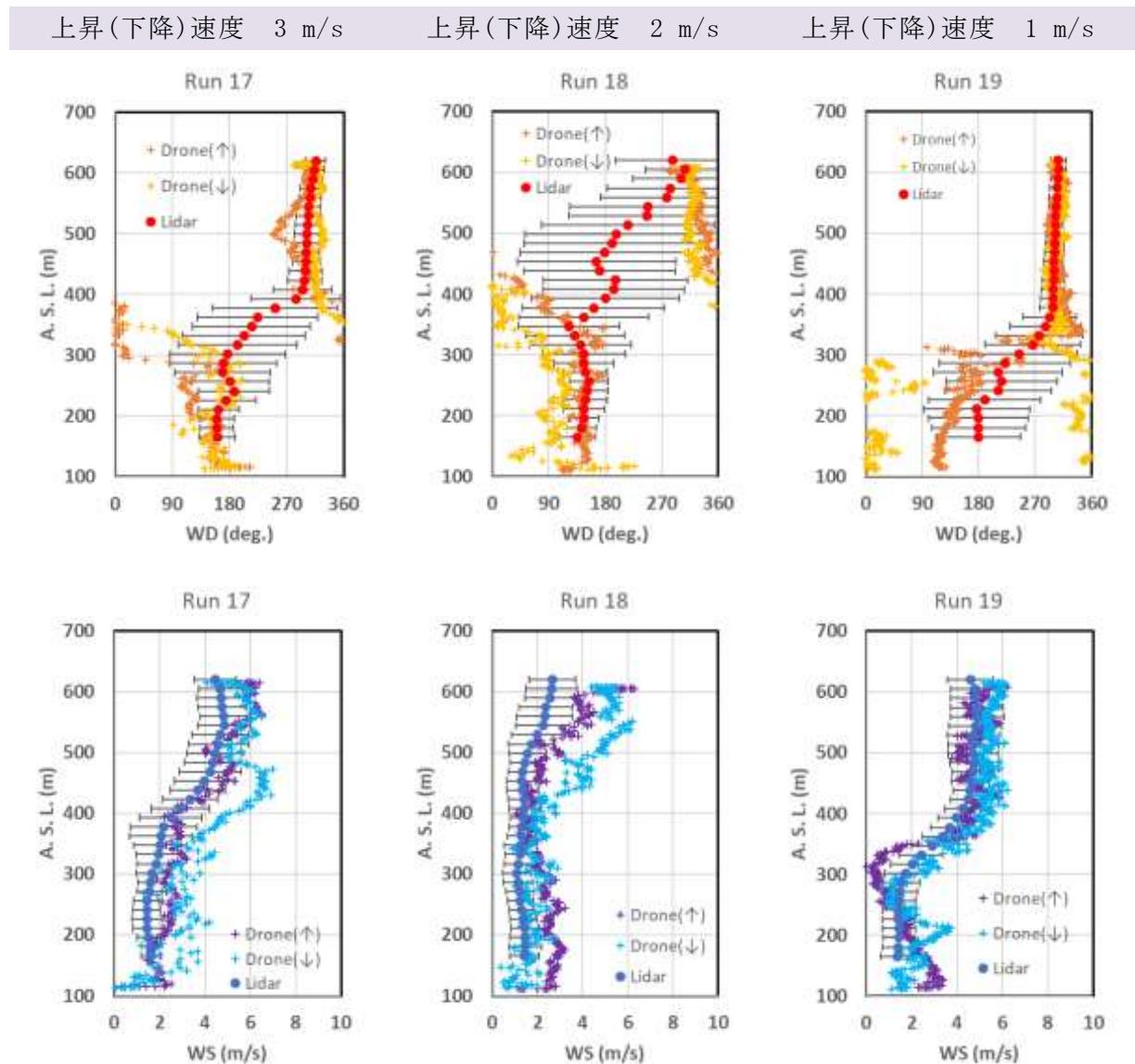


図 81 ドローン(移動計測)とライダーによる風観測結果の比較(上図: 風向、下図: 風速)

a3.2) 観測結果

a3.2.1) 鉛直プロファイル

図 82 に、Site B で観測した PM 濃度 (PM_{10}) と微小粒子の割合 ($PM_{2.5}/PM_{10}$ 比) の鉛直プロファイルを整理した。ここでは、指定高度への往復過程で計測されたデータも含まれている。なお、離陸後 30 秒間および着陸前 10 秒間のデータは地表の巻き上げ粉じんの影響を受けている可能性があるため除外した。

図 82 より、2019 年 10 月 31 日の観測事例では高度 800 m~1000 m で PM 濃度が高い層が見られた。微小粒子の割合 ($PM_{2.5}/PM_{10}$ 比) に着目すると、上下の層よりも微小粒子割合がやや低いことから、この高濃度帯は粗大粒子である火山灰を捉えているものと推測される。

2019 年 10 月 31 日 (Site B)

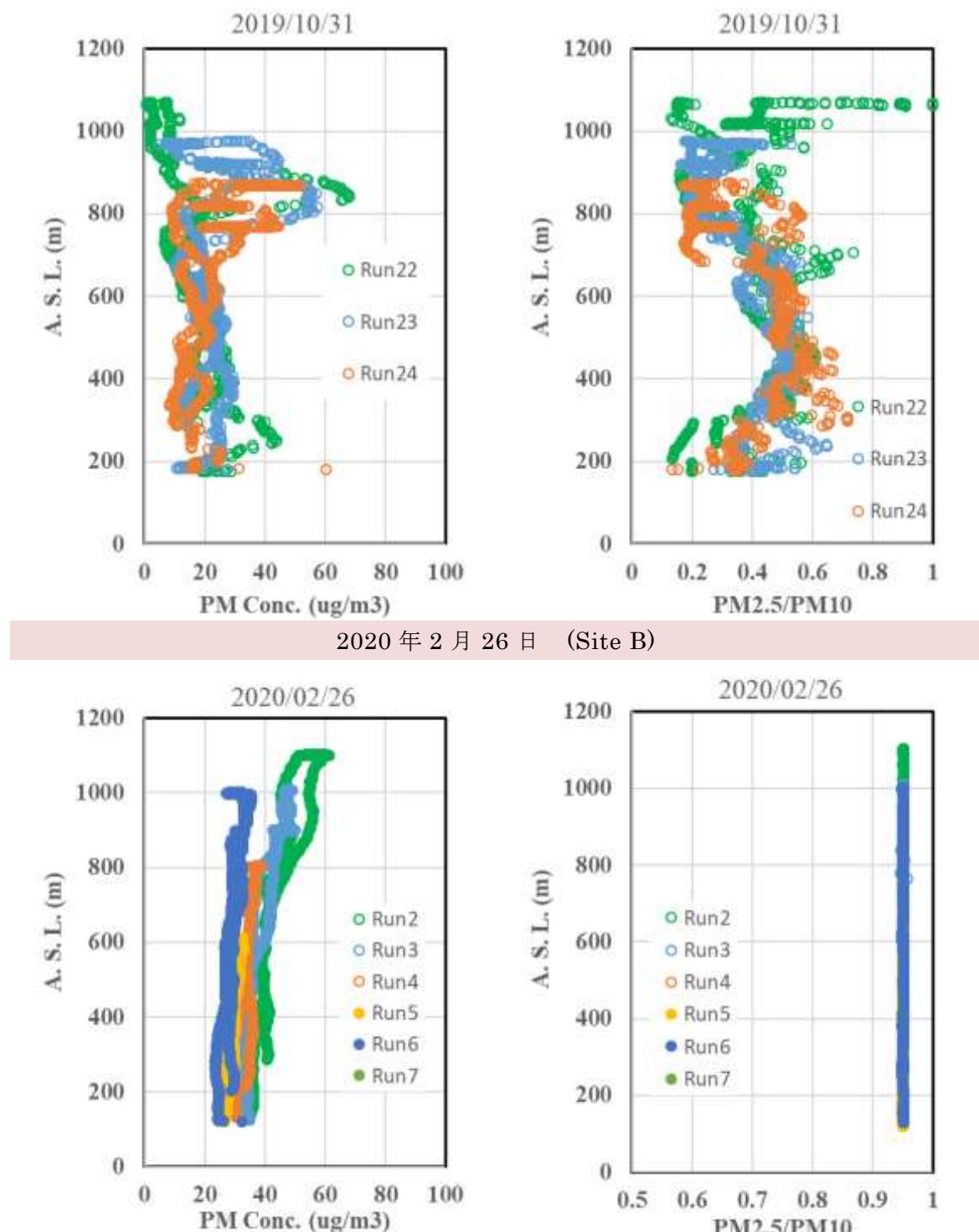


図 82 ドローンによる上空の PM_{10} 濃度(左図)と微小粒子割合(右図)の観測結果(Site B)。

一方で 2020 年 2 月 26 日の事例では以下の特徴が見られることから、計測された PM は火山灰ではなく、大気汚染物質としての PM($\approx \text{PM}_{2.5}$)であったと考えられる。

- 各 Runにおいて、鉛直方向の PM_{10} 濃度勾配は小さく全層でほぼ一様の濃度になっている。
- Run 間の PM_{10} 濃度の差が小さく、 $20\sim60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の範囲に収まっている。
- $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比が 0.9 を超えており、微小粒子がほとんどである。

a3. 3) 時系列濃度変化

2020年2月27日に実施した観測では観測中に比較的大規模な噴火が発生し、風下地点に該当する Site C周辺では上空を噴煙ブルームが通過し降灰が確認された（図 83）

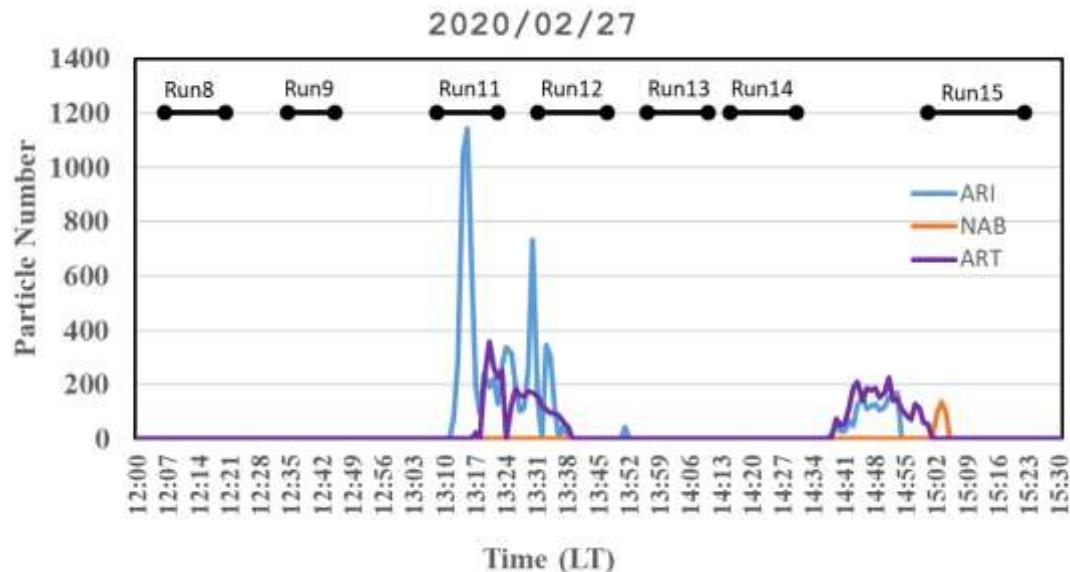


図 83 降灰計による地上の粒子個数濃度観測データ。Run 番号は Site C で実施したドローン観測のフライト時間帯を表す。

図 83 より、降灰量は数分程度の短い時間で大きく変動していることから、ここでは Site C で実施した Run 11, Run 12, Run 15 で観測された PM 濃度を時系列データとして整理した（図 84）。Run 11 は地上高度 700 m, 500 m、Run 12 は地上高度 900 m, 800 m、Run 15 は 1.5 m/s で上昇・下降しながら観測を行った。なお目視によると、地上高度 1000m のフライトでも噴煙そのものはドローンより上空にあった。

図 84 より各 Run ともにいくつかの高度で PM の高濃度ピークが見られるが、いずれも継続時間は短く半減期は数分程度であった。このことからも、噴煙ブルーム直下の PM 濃度は時間変動が非常に大きいことがわかる。また、PM 高濃度ピーク時は PM_{2.5} の変動は小さく、PM₁₀ の上昇が顕著であることとから、計測されている粒子は火山灰由来であるものと判断される。

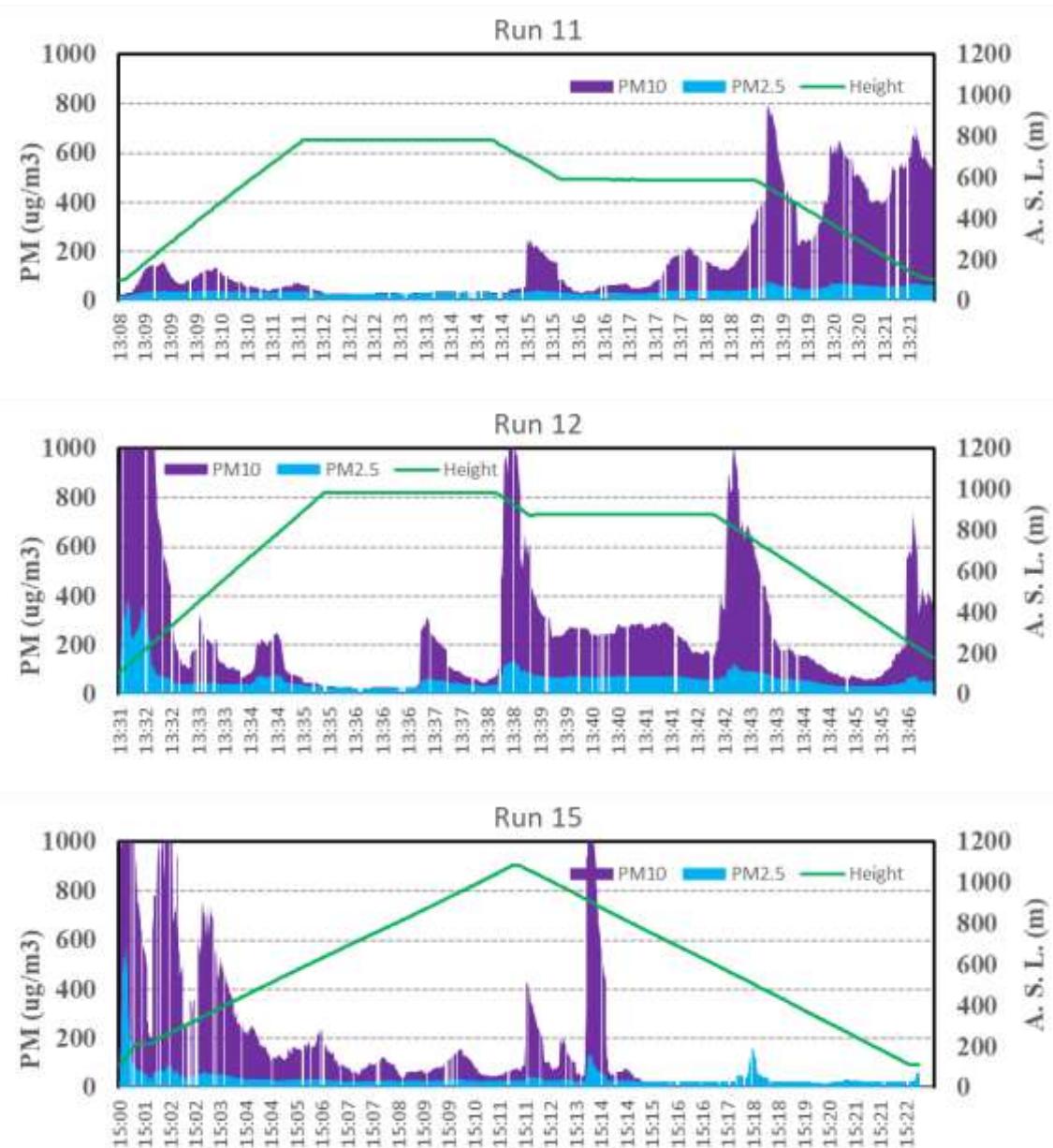


図 84 ドローンによる上空の PM 濃度時系列観測結果 (2020 年 02 月 27 日 Site C)。

b) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーション

メソ気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF) モデルを用いて、桜島火山および周辺の複雑地形を高解像度で表現することで、地形の微細構造に起因した火山近傍の詳細な風速場を数値シミュレーションにより再現する。また、火山灰拡散モデルを用いて、気象モデル WRF のシミュレーションで得られた風速場を入力条件とし、桜島噴火特性のパラメータを設定し、火山灰拡散の再現・予測シミュレーションを行う。

2018 年度において、水平格子幅 70 m での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た。また、この高分解能シミュレーションの結果を受け、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。2019 年度においては、複雑地形周りの風速場の再現性によって降灰量の再現性がどのように影響を受けるのかを調べる。特に、降灰の再現・予測シミュレーションを定量的に表現するため、適切な噴煙モデル変数の条件設定について調べた。

b1) 数値モデルの設定

本研究では、気象場の再現には領域気象モデル WRF Version 4 (Skamarock et al. 2019)¹⁸⁾ を用いる。WRF モデルの計算領域の設定を 86 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。

火山灰の拡散・沈着のシミュレーションには、火山灰輸送・沈着モデル FALL3D (Folch et al. 2009)¹⁹⁾ を用いた。また、噴煙プリュームのモデルには 1 次元定常モデルの FPLUME (Folch et al., 2016²⁰⁾; Macedonio et al., 2016²¹⁾) を用いた。FALL3D および FPLUME の設定は、Pouliidis et al. (2019a²²⁾; 2019b²³⁾) と同様とした。

解析対象としたのは、2017 年 6 月 6 日の桜島噴火の事例とした (図 86)。この噴火は、6 月 6 日 7:56 (日本時間、以下時刻は同様) に昭和火口から発生した。

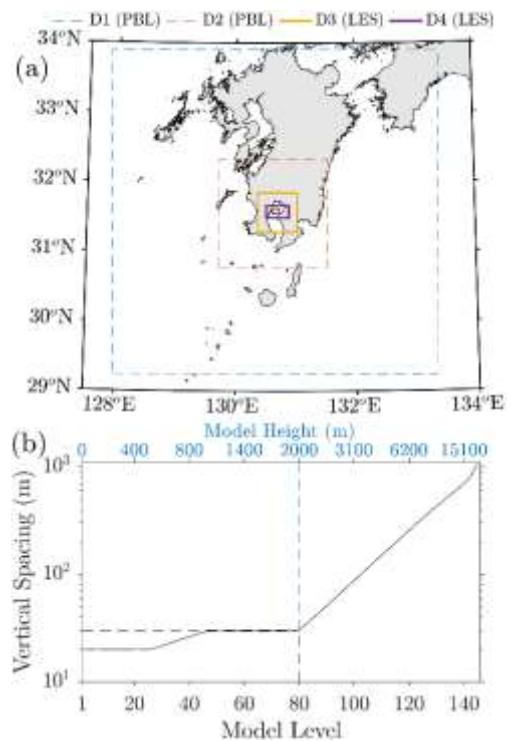


図 85 (a) WRF モデルの計算領域、および (b) モデルの鉛直レベル毎の鉛直格子間隔

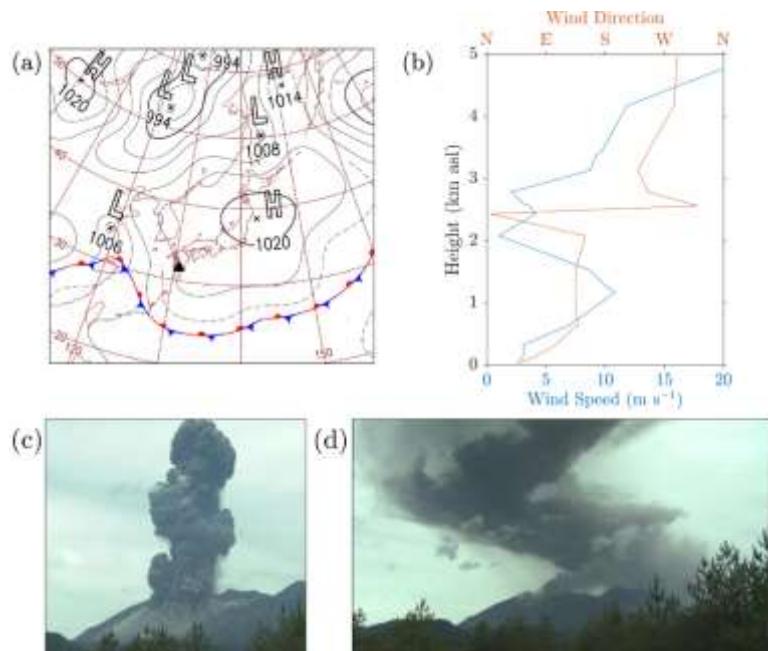


図 86 解析対象とした 2017 年 6 月 6 日の桜島噴火の気象状況 ((a) 天気図、(b) 風速・風向の鉛直分布) および噴煙プリューム ((c) 噴火 1 分後、(d) 噴火 10 分後)

b2) 結果

まず、WRF モデルでシミュレートされた気象場を示す。図 87 は、噴火開始時刻 6 月 6 日

7:56 を含む 6~9 時の 3 時間で時間平均した風速場および乱流場を示す。この日の総観規模の気象状況は、南海上に梅雨前線が停滞しており、日本列島は高気圧に覆われていた。大気下層 2 km では南東風、2 km より上空では西風が卓越する状況であった。図より、南東風が桜島火山に接近すると、火山を迂回したり乗り越えたりする気流や、乗り越えた気流が火山下流側で鉛直方向上下に変動する状況が再現されていることがわかる。また、山を迂回したり上下方向に変動したりする状況において、気流の乱れが大きいこともわかる。こういった複雑な風速場や乱流場は、火山灰の拡散に大きな影響を及ぼすため、いかにして精緻に表現できるかが鍵となる。

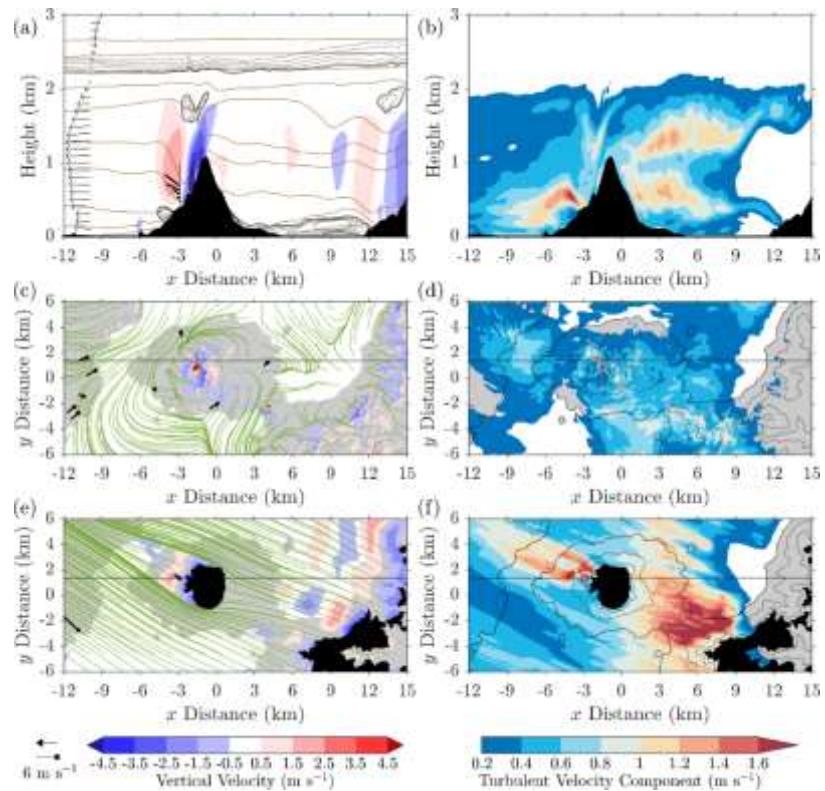


図 87 シミュレーションおよび観測で得られた気象場(2017 年 6 月 6 日 6~9 時の 3 時間の平均場)。1 列目: ハルタ山ライダー観測サイトの位置に沿った東西鉛直断面図。(a) WRF 鉛直速度 (カラー陰影)・WRF 温位 (等値線)・風 (ベクトル: WRF; 黒実線: ライダー)、(b) WRF による乱流強度。2 列目: 最下層での水平断面図。(c) WRF 鉛直速度 (カラー陰影)・WRF 流線 (緑実線)・観測風 (地上観測) (ベクトル)、(d) WRF 乱流強度。3 列目: 海抜高度 600 m での水平断面図。(e) (c) と同様、ただし観測風はライダーおよび高層気象観測による、(f) (d) と同様、ただし色付き丸印はライダー観測による。

次に、WRF による風速場データを入力条件として FALL3D/FPLUME により火山灰拡散シミュレーションをした結果を示す。図 88 は、パラメータ設定の違いによるプリューム特性の違い、および異なる解像度でシミュレートされた降灰量を示す。まず、パラメータの調整により、最適なプリューム特性を検討し、拡散モデルに入力した。その後、異なる解像度の WRF モデル/FALL3D モデルにより拡散シミュレーションを実行し、その結果を図示して

いる。WRF が 1050 m・FALL3D が 600 m 解像度の場合、降灰量はなめらかに分布しており、詳細な濃淡は認められない。また、観測と比べると、火山周辺のコントラストは再現されていないことが分かる。WRF・FALL3D の解像度を上げていき、最も高解像度の組み合わせである WRF が 50 m・FALL3D が 50 m の場合になると、降灰量のコントラストが明瞭になり、火口周辺での分布の細かさも明瞭となっていることが分かる。降灰観測と比べても、場所によるコントラストが良く再現されていることが分かる。

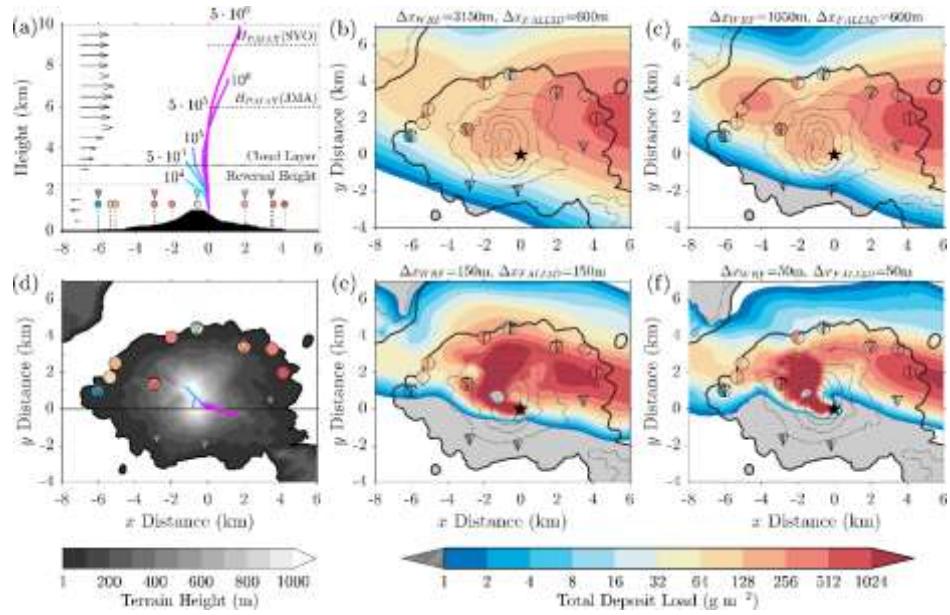


図 88 異なる噴出率を仮定した場合のプリューム特性：(a) 鉛直断面、(d) 水平分布。(a) のベクトルは、鹿児島高層気象観測による風速。(d) のカラーの印は、観測による積算降灰量（カラースケールは右下の凡例）。異なるモデル解像度によりシミュレートされた降灰量：(b) WRF 解像度 3150 m、FALL3D 解像度 600 m、(c) WRF 解像度 1050 m、FALL3D 解像度 600 m、(e) WRF 解像度 150 m、FALL3D 解像度 150 m、(f) WRF 解像度 50 m、FALL3D 解像度 50 m。

最も高い解像度の組み合わせ（WRF 50 m・FALL3D 50 m）で得られた火山灰拡散シミュレーションの結果を示す。図 89 は、噴火開始後 5 分から 60 分までの降灰量の経過を示す。大気下層 2 km での南東風、2 km より上空での西風に影響を受け、火山灰が高度別に異なる気流で移流されることにより、降灰量が時間毎に異なるパターンを示すことが分かる。このように時間毎に大きく降灰パターンが変化するのは、図 87 で示したような火山周りの複雑な風速場・乱流場の影響を強く受けることで、火口から複雑なパターンで降灰が生じるためである。

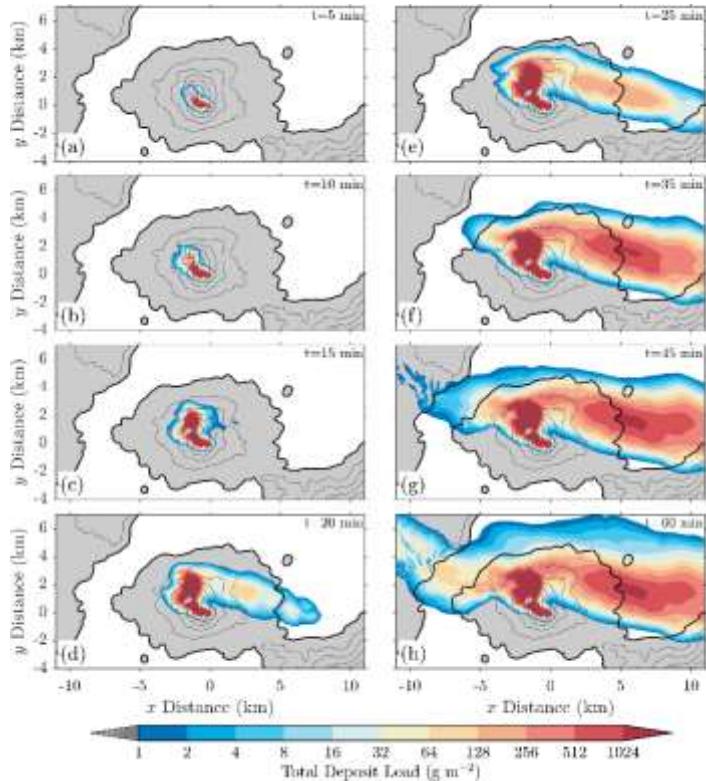


図 89 WRF 50 m・FALL3D 50 m の解像度の場合に得られた降灰量の時間推移。初期時刻からの経過時刻を各パネルの右上に表示。

最後に、降灰の時間推移を観測地点別に観測値と計算値を比較した結果を図 90 に示す。ハルタ山、高免、二股の 3 地点でのディストロメータによる観測時系列により、モデル計算値を比較した。WRF 3150 m・FALL3D 600 m の低解像度の場合には、観測値に比べると、モデル計算では立ち上がりが早く、時間による降灰量の変動も小さい。解像度が上がるにつれて、立ち上がり時刻が遅くなり、時間的な変動幅も大きくなる。最も解像度が高い WRF 50 m・FALL3D 50 m の場合には、立ち上がり時刻は時間変動幅が、ハルタ山・高免において大きく改善されていることが分かる。ただし、二股地点での再現性は、解像度を上げることによる向上は認められない。地点による局所的な風況や乱流特性が微妙に異なることが影響しているものと考えられる。

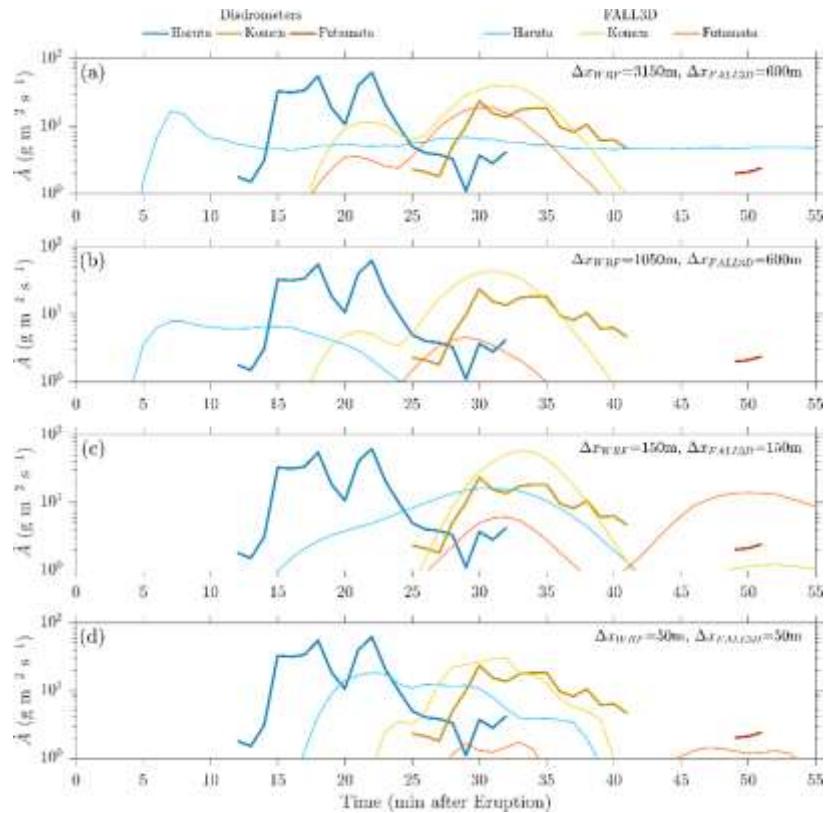


図 90 ハルタ山（青）、高免（黄）、二股（赤）における降灰量の時系列。太い実線はディスドロメータによる観測値、細い実線は計算値を示す。計算値は、異なる解像度の結果をパネル毎に示す。

b3) まとめ

本研究では、水平格子幅 50 m という高解像度での気象モデル・火山灰拡散モデルによるシミュレーションを実行し、低解像度の計算結果と比較することにより、高解像度シミュレーションの価値を明らかにした。その結果、高解像度シミュレーションにより、空間的にコントラストを持った降灰分布、地形や気流の微細構造に対応した拡散形態、時間的な降灰変化などが、より精緻に表現されることが分かった。ただし、定量的にどの程度改善できるかどうかについては、残された課題である。2018 年度に実施した予測実験の結果も含めて考慮すると、観測データを逐次同化しながら、高解像度モデルにより、定量的な表現の改善を図ることが大事である。この問題意識のもと、データ同化による予測実験を検討中である。

c) 噴石の風力特性

平成 31 年度には、落下した噴石が衝突した際の衝撃により太陽光パネルに生じる被害状況を明らかにするため、防災研究所所有の衝撃試験装置を使って衝撃実験を行った。実験は実物の太陽光パネルに噴石を衝突させ、噴石の種類・質量・速度などの変化により、破壊性状がどのように変化するかを明らかにした。次に、ドローンを用いてセンサーを組み込んだ噴石模型を自然風中で持ち上げて落下実験を行い、噴石の落下性状を明らかにして空力特性を求めた。また、非定常な乱流場を計算することのできるラージエディシミュレーションを用いた数値解析により火山周囲の変動風速場の再現を行った。

c1) 噴石の衝撃実験（太陽光パネルの噴石に対する耐衝撃性能試験）

昨年度行った屋根に対する噴石の衝撃試験に引き続き、本年度は太陽光パネルに対する衝撃試験を行った。太陽光パネルは住宅の屋根や地面上に設置されており、噴火に際しては噴石の直撃を受けて被害が発生しやすい設備である。衝撃試験には桜島で採取された噴石（図 91）を用い、衝撃試験装置（図 92）を用いて太陽光パネル（図 92, 93）に衝突させた。太陽光パネルは、設置位置の緯度により設置角度が異なるが、今回の実験では衝撃力が最も大きくなると考えられるパネル面に対して噴石が垂直に当たるように、衝撃試験装置の前方に垂直に太陽光パネルを設置した（図 92）。試験に用いる噴石は桜島の黒髪地獄河原付近で採取した直径約 5 mm～10 mm 程度のものを用いている。採取された噴石は、黒色で硬く密度も大きな「溶岩片」と、主に気泡があり、柔らかくて密度の小さい褐色の「軽石」の 2 種類に大別できるので、この 2 種類の噴石を用いて質量と衝突速度を変化させて太陽光パネルの破壊の様子を明らかにした。衝撃試験に際して溶岩片は、衝突速度が小さい場合は太陽光パネルへの衝突によっても碎けることはなく、碎けなかつた場合には、同じ噴石を用い、衝突速度を上げていって異なる速度で試験を行った。ただし、形状は不整形なため、同じ噴石を用いても衝突姿勢は異なる結果となった。一方、軽石は今回行った衝突条件の範囲で、全ての場合で衝突の際に碎けたため、毎回異なる噴石を衝突させて試験を行った。太陽光パネルの表面は強化ガラスで覆われており、1 か所でも割れると全面にひびが入るため（図 94）、その時点で異なる健全なパネルに取り換えて衝突試験を行った。また、ひびが入らない限り衝突位置を変え、前回衝突した位置から約 15 cm（1 セル）程度離れた異なる位置に衝突させて試験を行った（図 93 参照）。

c2) 試験結果

軽石を衝突させた場合には、今回試験では質量 3～19g、体積 3～25cm³、速度 13～54m/s の範囲で行ったが、運動エネルギー、運動量ともに最大の値を持つ場合（質量 18g、体積 23cm³、速度 38m/s）あるいは、最大の速度を持つ場合（質量 8g、体積：6cm³、速度 54m/s）でも、太陽光パネルは表面を覆うカバーガラスの表面に小さな傷がつくものの、割れなかつた。溶岩片を衝突させた場合には、今回試験では質量 10～22g、体積 4～9cm³、速度 8～33m/s の範囲で行ったが割れる場合があった。その際、運動エネルギー、運動量ともに最小の値を持つ場合、質量 10g、体積 4cm³、速度 13m/s でカバーガラスが割れた。



a. 軽石

b. 溶岩片

図 91 衝撃試験に用いた噴石

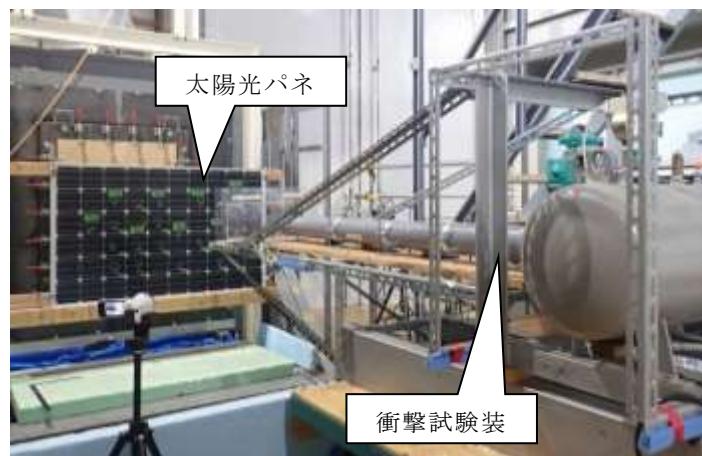
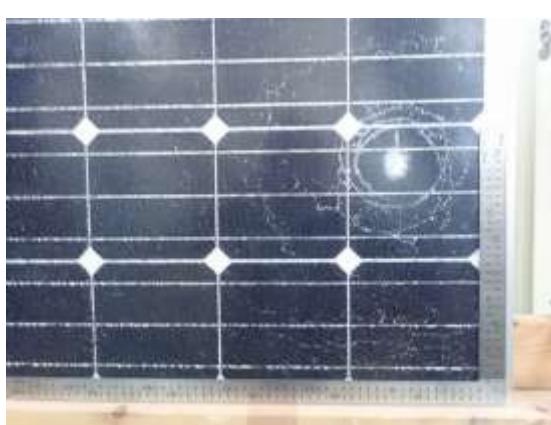


図 92 衝撃試験装置を用いた衝撃実験の様子



図 93 衝突試験に用いた太陽光パネル。噴石を衝突させてもカバーガラスが割れなかった場合、位置を変えて（白丸で示している中央部に衝突させた）衝突試験を行った。



a. ひびの入り方



b. 衝突位置付近の拡大図

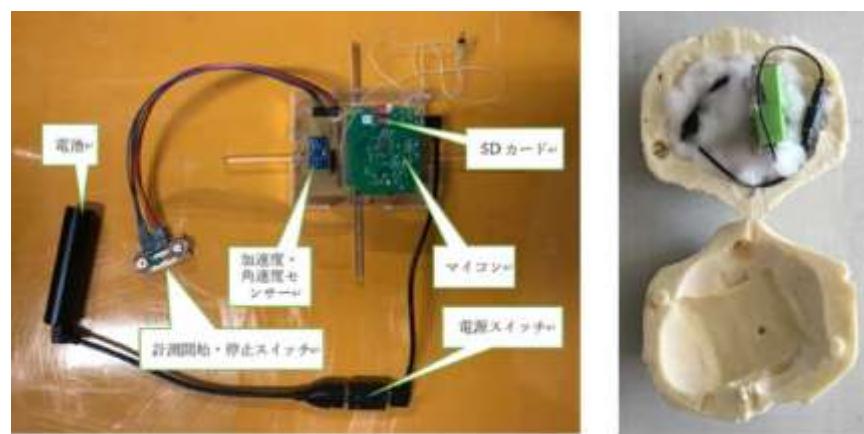
図 94 噴石の衝撃後の状況(カバーガラスが割れた状態)。衝突位置では放射状のひびと、少し離れた位置に円周状のひびが見られる。その他、パネル全面に細かなひびが入る。

C3) 噴石の落下性状の直接測定と風速場の再現計算

噴石の落下性状を調べるために、加速度センサーと角速度センサー、気圧計を組み込んだ発泡ウレタン製の噴石模型を作成し(図 95, 96)、ドローンに吊り下げて約 150m 上空まで持ち上げ(図 97)、落下実験を行った。マイクロコンピューターを使って模型の落下時の加速度と角速度、気圧の変化を SD カードに記録し(図 98)、模型の地面への落下後に回収して解析した。落下の様子は周囲に配置した 4 台のビデオカメラを使って撮影し、画像解析ソフトにより落下時の動きを 3 次元的に求めた(図 99)。当日の天気は快晴で風が弱く実験地点が桜島の風下側になる風向で、ドップラーライダーの観測結果によると付近では風速数 m/s の風が吹いていた。噴石の運動を解析するためには、噴石が落下する際の周囲の風速場の情報が必要となるが、ドップラーライダーによる観測は鉛直上方、線上にしか観測データが得られない。そこで、落下運動の予測にも用いることができるよう、非定常な乱流場を計算することのできるラージエディシミュレーションを用いた数値解析により桜島周辺の変動風速場の再現計算(図 100)も行った。



図 95 落下実験に用いた噴石模型。



センサ（加速度・角速度、および、気圧計）を模型内部に組み込む

- ・加速度計（MPU-9250：9軸センサモジュール）
加速度： $\pm 8G$ 、角速度： $\pm 1000^\circ/\text{sec}$
- ・気圧計（GY-BMP280 3.3：高精度大気圧センサモジュール）
気圧： $300 \sim 1100\text{hPa}$ 、温度： $-40 \sim 85^\circ\text{C}$

図 96 噴石模型に組み込まれたセンサー類。



図 97 ドローンによる模型のつり上げ。

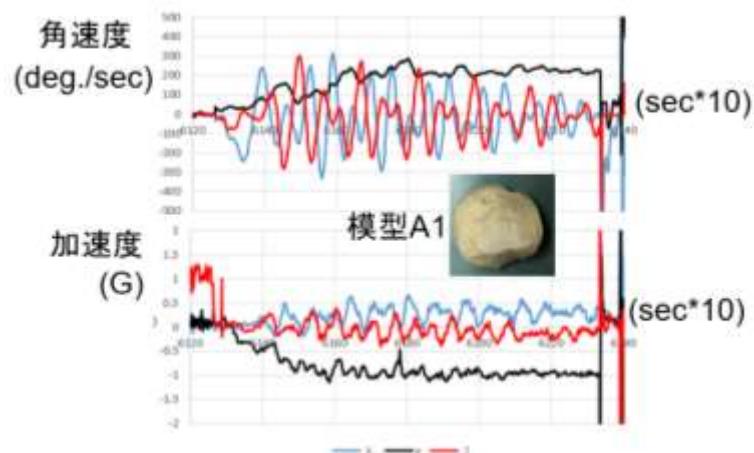


図 98 センサーの記録。

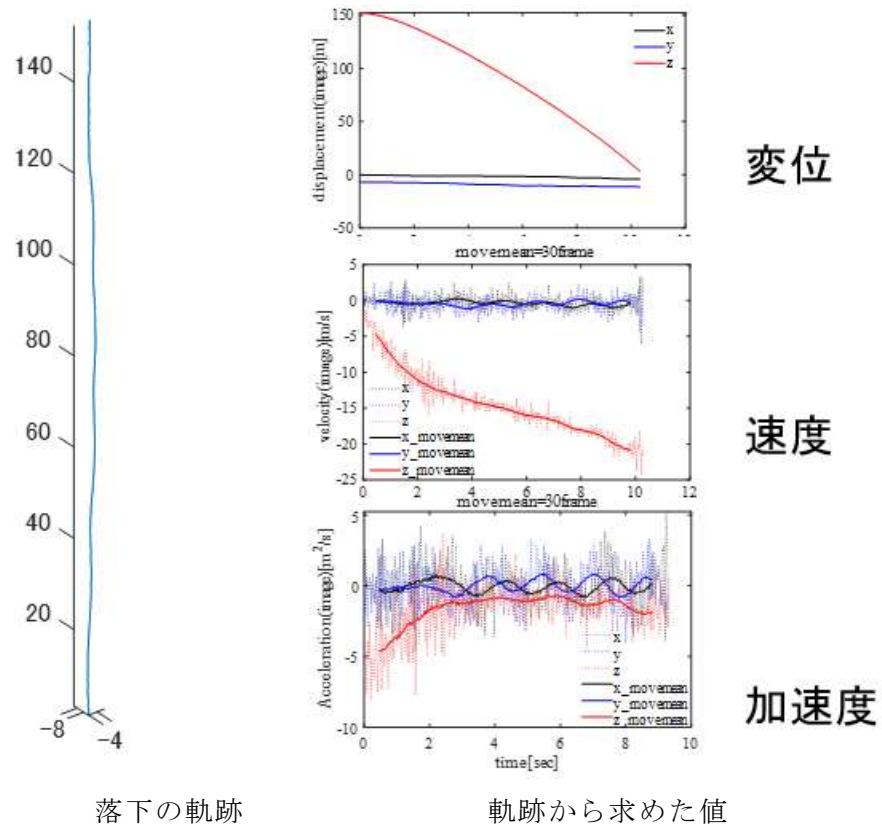


図 99 ビデオ画像の解析結果（重心の運動）。

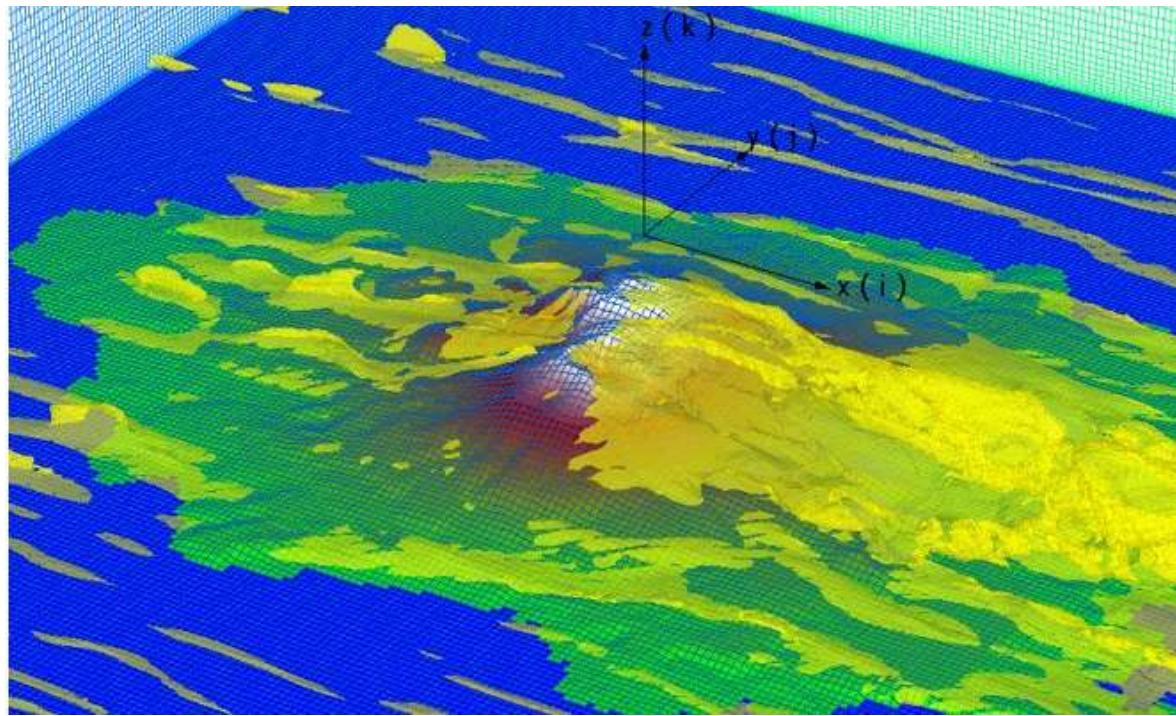


図 100 数値シミュレーションにより再現された桜島周辺の変動風速場（西風の場合、瞬間値）

(d) 結論ならびに今後の課題

桜島など多くの火山において観測することにより、X バンド MP レーダーによる噴煙観測が信頼できる観測手法として実用的であることが示された。とくに、冠雲により噴煙が目視できない状態においては極めて有効であり、人工衛星による観測よりもはるかに即時性に優れる。また、地上降灰量とレーダー反射強度を比較することにより両者をつなぐ経験式を提示できた。これは、気象観測におけるレーダー雨量の評価に相当する技術であり、今後、事例を積み重ねることにより、火山観測におけるレーダー降灰量の評価技術として実用化が期待できる。

ライダー、レーダー、GNSS の異なる波長を用いたリモートセンシング観測を統合した観測システムにより、様々な火山灰濃度を想定した火山灰観測が可能となった。先に述べたように、レーダー観測は桜島でよく発生する規模の噴火において実用的である。また、ライダーはきわめて希薄な火山灰に対しても有効であることが示された。これまでのところ X バンドのレーダー波が噴煙を透過できないような大規模な噴火は発生していないが、大規模噴火の発生時には X バンドより長い波長 (L バンド) を用いた GNSS が有効となろう。

本課題で提案する火山灰拡散予測システムは、これまでの火山観測において長い間培われてきた地震観測及び地盤変動観測データをもとに噴出率、さらに噴煙高度を推定し、火山灰拡散シミュレーションを行うことに最大の特徴があり、世界でも唯一のシステムである。噴煙高度の観測をベースにする予測手法に比べ、地震観測及び地盤変動観測データをもとに噴出率と噴煙高度を推定するメリットは、1) 处理を高速化できること、2) 観測量が必ず得られること、3) 噴煙高度と噴出率の関係が Morton の提示した噴出率の $1/4$ 乗則に従うとすれば、噴煙高度から噴出率を推定する場合に比べ、誤差を圧倒的に小さく抑えられることである。

WRF シミュレーションにより、風速ベクトルなどの既存気象モデルを空間的に高精細化し、火山灰拡散シミュレーションを行った。山頂を超えた風下側の鉛直運動や鉛直シアーアーを高分解能の風速ベクトル場で表現することにより、火山灰の降下域と降灰量を高精度で予測することに成功している。さらに、ハザード予測から被害予測までに研究を拡大できた。火山灰の降下では、建物や設備の破壊のような直接的な被害は想定しにくいが、レキの場合は破壊による被害が定量化できた。この実験結果はサブテーマ 3 に共有してある。

本研究プロジェクトにおいては、5 年目から 7 年目の第 2 期において、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発し、風速ベクトルと降灰量についてデータ同化を行ながら火山灰拡散シミュレーションを行う。短時間で終息するブルカノ式噴火では、平均的な噴出率をもとにそれに関連するリモートセンシングのデータを考慮して、火山灰拡散シミュレーションを行えばよいが、長時間継続する噴火では、噴出率が変化し、噴出率の時間関数の評価が重要となる。噴出率の変化により、レーダー等の観測データや地上降灰量に時間変化が現れる。長時間になれば、風の場も変化していくことになる。オンラインシステムに取り込む主たるデータは、火山灰の噴出率及び噴煙高度を推定するための地震動及び地盤変動データと、風データの同化のために新規に導入する上空の風観測のためのドップラーライダーおよび降灰量データの同化のためのディスクロメータから出力されるデータである。高分解能の風速ベクトル場を得るためのシミュレーションには一定の時間を要するのは避けられない。よって、高空間分解能風速ベクトル場は、過去の多数の風速

場に基づいて WRF によりそれぞれの高分解能風速場を計算して、プレアナリシス・データベースを作成した上で、ドップラーライダーによる上空風向・風速観測値や地上風向・風速観測値あるいは気象庁 GPV から予測される風速場にもとづいて最適な高分解能風速場をプレアナリシス・データベースから抽出し、データ同化も活用しながら、高分解能での風速予測場を得る。さらに、連続噴火に伴う地盤変動速度や火山性微動振幅を地上降灰量の時間変化と比較して、噴出率を決定するパラメータの調整を行うことにより降灰量のデータ同化を行う。プレアナリシス・データベースの量によるが、抽出においては AI の活用を検討する。

(e) 引用文献

- 1) Ohta, Y., Iguchi, M.: Advection diffusion of volcanic plume captured by dense GNSS network around Sakurajima volcano: A case study of the Vulcanian eruption on July 24, 2012, Earth Planets, Space, Vol. 67, 157, DOI 10.1186/s40623-015-0324-x, 2015.
- 2) Larson, K. M.: A new way to detect volcanic plumes, Geophys. Res. Lett., Vol. 40, 11, pp. 2657-2660, 2013.
- 3) Kasbani, Gunawan, H., McCausland, W., Pallister, J., Iguchi, M., Nakada, S., The eruptions of Sinabung and Kelud volcanoes, Indonesia, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 382, 1-5, 2019.
- 4) Global Volcanism Program, Report on Sinabung (Indonesia) (Crafford, A.E., and Venzke, E., eds.). Bulletin of the Global Volcanism Network, 43:4. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201804-261080>, 2018.
- 5) Suzuki, T., A theoretical models for dispersion of tephra. Arc volcanism: Phys. Tectonics. In: Shimozuru, D., Yokoyama, I. (Eds.), pp. 95-113, 1983.
- 6) Freret-Lorgeril, V., Donnadieu, F., Eychenne, J., Soriaux, C., Latchimy, T., In situ terminal settling velocity measurements at Stromboli volcano: Input from physical characterization of ash. J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 374, pp. 62-79, 2019.
- 7) James, M. R., Lane, S. J., Gilbert, J. S., Density, construction, and drag coefficient of electrostatic volcanic ash aggregates. J. Geophys. Res., Vol. 108, p. 2435, 2003.
- 8) Shakti, P. C., M. Maki, S. Shimizu, T. Maesaka, D.-S. Kim, D.-I. Lee, H. Iida, Correction of Reflectivity in the Presence of Partial Beam Blockage over a Mountainous Region Using X-Band Dual Polarization Radar. J. Hydrometeor., 14, 744-764, 2013.
- 9) Hildebrand, P. H., Iterative correction for attenuation of 5 cm radar in rain. J. Appl. Meteor., Vol. 17, 508-514, 1978.
- 10) Bringi, V. N., T. D. Keenan, and V. Chandrasekar: Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation, A self-consistent method with constraints. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 39, 1906-1915, 2001.
- 11) Kim, Y., M. Maki and M. Iguchi, and D.-I. Lee, Classification of precipitation and volcanic clouds using operational X-band polarimetric radar parameters, Extended abstract, 39th Conf. Radar Meteorology, 5pp, 2019.
- 12) Takaoka, R., M. Maki, S. Fukushima, M. Iguchi, D. Miki, T. Kozono, T., Characteristics of particle size distribution of falling ash particles from Sakurajima, 39th Conf. Radar Meteorology, 6pp, 2019.
- 13) 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, 第64巻, pp. 219-241, 2019。

- 14) Tanaka, H. L., Yamamoto, K., Numerical simulation of volcanic plume dispersal from Usu volcano in Japan on 31 March 2000 using PUFF model, *Earth Planets Space*, Vol. 54, pp. 743–752, 2002.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M. (1991) A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, 104, 507–516.
- 18) 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. doi:10.5065/1dfh-6p97, 2019.
- 19) Folch, A., A. Costa, and G. Macedonio, FALL3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash, *Comput. Geosci.*, 35, 1334–1342, 2009.
- 20) Folch, A., A. Costa, and G. Macedonio, FPLUME-1.0: An integral volcanic plume model accounting for ash aggregation, *Geosci. Model Dev.*, 9, 431–450, 2016.
- 21) Macedonio, G., Costa, A., Folch, A. (2016) Uncertainties in volcanic plume modeling: A parametric study using FPLUME. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 326, 92–102. doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.03.016.
- 22) Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi, Experimental high-resolution forecasting of volcanic ash hazard at Sakurajima, Japan, *Journal of Disaster Research*, 14, 5, 786–797, doi:10.20965/jdr.2019.p0786, 2019.
- 23) Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi, The effect of wind and atmospheric stability on the morphology of volcanic plumes from vulcanian eruptions, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, Vol. 124, pp. 8013–8029, doi:10.1029/2018JB016958, 2019.
- 24) Tanaka, H., Iguchi, M.: Simulations of volcanic ash plume dispersal for Sakura-jima using real-time emission rate estimation, *Jour. Disast. Res.*, 14, 160–172, 2019.
- 25) 気象庁, 桜島の火山活動解説資料(令和元年12月)
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/19m12/506_19m12.pdf
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年 月日
----	----	-----	-----------

Iguchi, M., Nakamichi, H., Tanaka, H., Ohta, Y., Shimizu, A., Miki, D.	Integrated monitoring of volcanic ash and forecasting at Sakurajima volcano, Japan	Journal of Disaster Research, 14, 5, 798–809, doi: 10.20965/jdr.2019.p0798	2019年 6月
Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi	Experimental high-resolution forecasting of volcanic ash hazard at Sakurajima, Japan	Journal of Disaster Research, 14, 5, 786–797, doi:10.20965/jdr.2019.p0786	2019年 6月
Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi	The effect of wind and atmospheric stability on the morphology of volcanic plumes from vulcanian eruptions	Journal of Geophysical Research-Solid Earth, Vol. 124, pp. 8013–8029, doi:10.1029/2018JB016958	2019年 4月
Suzuki, Y. J., Iguchi, M.	Determination of the mass eruption rate for the 2014 Mount Kelud eruption using three-dimensional numerical simulations of volcanic plumes	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 382, 42–49	2019年 9月
Shimizu, H. A., Koyaguchi, T., Suzuki, Y. J.	The run-out distance of large-scale pyroclastic density currents: A two-layer depth-averaged model	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 381, 168–184	2019年 9月
Suzuki, Y. J., Costa, A., Koyaguchi, T.	Control of vent geometry on the fluid dynamics of volcanic plumes: insights from numerical simulations	Geophysical Research Letters, accepted	2020年

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年 12月
Kim, Y., M. Maki, and D.-I. Lee	Data that effectively demonstrate the benefits of a 3D CAPPI algorithm	Data in Brief, doi: 10.1016/j.dib.2019.104116	2019年 9月
Suh, S.-H., M. Maki, M. Iguchi, D.-I. Lee, A. Yamaji, and T. Momotani	Free-fall experiments of volcanic ash particles using a 2-D video disdrometer	Atmos. Meas. Tech., 12, 5363–5379, doi:10.5194/amt-12-5363-2019	2019年 10月
Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi	An experimental forecasting technique for the ash hazard from Sakurajima volcano, Japan	日本地球惑星科学連合 2019年大会, MZZ50-04	2019年 5月 26 ～30日
Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi	A case of experimental deterministic forecasting for the ash hazard from Sakurajima volcano, Japan	27th IUGG General Assembly, Montreal, Canada, IUGG19-0354.	2019年 7月 8 日～18 日
Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi	Morphological characteristics of volcanic plumes from Sakurajima volcano, Japan, and the effect of wind and atmospheric stability	27th IUGG General Assembly, Montreal, Canada, V04p-158.	2019年 7月 8 日～18 日
中道治久・清水厚・下村誠・Syarifuddin Magfira・井口正人	桜島におけるXバンドMPレーダーとライダー同時噴火観測と	日本地球惑星科学連合 2019年大会, MIS16-02	2019年 5月 26 ～30日

	口永良部島噴火のレーダー観測		
瀧下恒星・井口正人・園田忠臣	落下速度観測から推定された桜島ブルカノ式噴火の噴煙からの火山灰粒子分離高度と粒径分布	日本地球惑星科学連合 2019 年大会, MIS16-P04	2019 年 5 月 26 ~30 日
Suzuki, Y. J., Costa, A., Koyaguchi, T.	The control of vent geometry on the dynamics of volcanic plumes	EGU General Assembly 2019, EGU 2019-4372, ポスター発表	2019 年 4 月
Suzuki, Y. J., Costa, A., Koyaguchi, T.	Simulating dynamics of explosive very large eruptions	27 th IUGG General Assembly, V04 p-16	2019 年 7 月
新堀敏基・鈴木雄治郎・入山宙・石井憲介・佐藤英一・藤田英輔	移流拡散モデルによる大規模噴火を想定した降下火碎物予測の課題(その 3)噴煙ダイナミクスモデルに基づく初期条件	日本火山学会 2019 年秋季大会, P117	2019 年 9 月
西條祥・小屋口剛博・鈴木雄治郎	降下火碎物インバージョンに向けた火碎物供給源モデルの開発	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月
佐々木寛介・井口正人・井上 実・依田隆志	ドローンを活用した火山観測手法の実証	第 60 回大気環境学会年会	2019 年 9 月 18 日~20 日
丸山 敬・劉美 智・佐々木寛介・井上 実・井口正人・藤田英輔・西村宏昭	噴石模型を用いた噴石の落下性状の観測	2019 年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2020 年 2 月 20 日~21 日
Kim, Y., M. Maki and M. Iguchi, and D.-I. Lee	Characteristics of polarimetric radar parameters of dry volcanic ash cloud	日本地球惑星科学連合 2019 年大会予稿集, MIS16-P07	2019 年 5 月
Kim, Y., M. Maki and M. Iguchi, and D.-I. Lee	Classification of precipitation and volcanic clouds	Extended abstract, 39th Conf. Radar Meteorology, 5pp	2019 年 9 月

	using operational X-band polarimetric radar parameters		
Takaoka, R., M. Maki, S. Fukushima, M. Iguchi, D. Miki, T. Kozono, T. Miwa, and T. Maesaka	Characteristics of particle size distribution of falling ash particles from Sakurajima obtained from laser-optical particle size velocity disdrometer observation data	Extended abstract, 39th Conf. Radar Meteorology, 6pp	2019年9月
Poulidis, A., Takemi, T., Iguchi, M.	The Role of Atmospheric Vertical Velocity in the Transport and Deposition of Volcanic Ash	2019年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2020年2月20日～21日
井口正人	桜島南岳第3活動期の特徴	2019年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2020年2月20日～21日
瀧下恒星・井口正人・Poulidis, A.・園田忠臣	落下速度観測による桜島ブルカノ式噴火の降下火山灰の噴煙分離高度分布推定の試み	2019年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2020年2月20日～21日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和2年度業務計画案

①プロジェクトの総合推進

本委託業務に関連する、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトにおける次世代火山研究推進事業の「課題C サブテーマ3 シミュレーションによる噴火ハザード予測手法の開発」およびサブテーマ3と連携を図りつつ、研究集会を開催する。

②リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてレーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業も併せて行う。前年度までに桜島を取り巻くように設置したディスクロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量と粒径分布の距離依存性を明らかにする。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したときには火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、XバンドMPレーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディスクロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例を得ることにより、その経験的関係式の精度を上げる。

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

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

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

③火山灰拡散予測の高速度化技術開発

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

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

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

④火山灰拡散予測の高精度化技術開発

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

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

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

太陽光パネルへの衝撃試験で用いた噴石は、桜島の火口から 5km 程度離れたところで見られる程度の大きさであり、桜島の大きさを考えると、海岸付近の人家のある所まで飛来する噴石の大きさと考えられる。今後、今回の研究で得られた風速場および噴石の空力特性等を用いた飛散の再現計算を行い、噴石の到達範囲と衝撃力を求め、ハザード予測に活用したい。必要となる噴石の空力特性の把握に関しては、今年度の噴石落下実験では周囲の風速が数 m/s 程度と弱い風であったために、噴石模型の落下時の相対風速は、噴石の落下速度だけから求めて大きな誤差は生じないと考えられる。しかしながら、強風時の噴石の落下運動を予測するためには、風速場も同時に知る必要があり、山の大きさに比べて小さなスケールの変動を再現する必要がある。これは噴石の落下運動だけではなく、火山灰等の飛散分布も予測にも必要なものであり、風速場の再現計算に関して、次年度以降にも引き続き研究を進める予定である。

これらの研究成果を第 11 回火山都市会議および火山学及び地球内部化学協会学術総会 2021 年大会（2 月）において発表する。

⑤火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

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

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

3.3 「火山災害対策のための情報ツールの開発」

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成31年度業務目的

(2) 平成31年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 令和2年度の業務計画案

- (a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の開発
- (b) 降灰被害予測コンテンツ試作版の開発
- (c) 避難・救助支援コンテンツ試作版の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「火山災害対策のための情報ツールの開発」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
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	センター長	中田節也	nakada@bosai.go.jp
	研究統括	宮城洋介	m_vousuke@bosai.go.jp
	研究員	棚田俊收	tanada@bosai.go.jp
	客員研究員	宮村正光	miyamura@cc.kogakuin.ac.jp
	客員研究員	中村洋一	ynakamu@cc.utsunomiya-u.ac.jp
株式会社大林組 技術本部 技術研究所	上級主席技師	野畠有秀	nobata.arihide@obayashi.co.jp
	上級主席技師	大塚清敏	otsuka.kiyotoshi@obayashi.co.jp
	主任研究員	諏訪仁	suwa.hitoshi@obayashi.co.jp
山梨県富士山科学研究所	主幹研究員	吉本充宏	myoshi@mfri.pref.yamanashi.jp
	主任研究員	石峯康浩	ishimine@mfri.pref.yamanashi.jp
	研究員	本多亮	honda@mfri.pref.yamanashi.jp
	研究員	久保智弘	tkubo@mfri.pref.yamanashi.jp
	契約研究員	堀内佑紀	fsp-j@mfri.pref.yamanashi.jp

(c) 業務の目的

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

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

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

3) 平成 30 年度：

- ・周知啓発教育用コンテンツの基盤となる火山災害に関する調査や情報収集を行った。
- ・常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。
- ・自治体を対象とした火山対策の比較・分析を行った。
- ・都市部の施設に対する降灰影響評価実験として、冷却塔を対象とする降灰実験を行った。
- ・平成 29、30 年度に実施された降灰影響評価実験の結果を受け、都市部の施設における建築設備の損傷度評価法の開発に着手した。
- ・登山者動向把握実験へ参加し、得られた登山者動態データの火山防災対策への利用に関して検討した。

4) 平成 31 年度：

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

5) 令和 2 年度：

- ・周知啓発教育用コンテンツの試作版を高度化する。
- ・降灰被害予測コンテンツの試作版を高度化する。
- ・避難・救助支援コンテンツの試作版を高度化する。

6) 令和 3 年度 :

- ・周知啓発教育用コンテンツの試作版を利用したアウトリーチ活動等を行う。
- ・降灰被害予測コンテンツの試作版を利用した実証実験を行う。
- ・避難・救助支援コンテンツの試作版を利用した実証実験を行う。

7) 令和 4 年度 :

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

8) 令和 5 年度 :

- ・各種コンテンツの汎用化に着手する。

9) 令和 6 年度 :

- ・各種コンテンツの汎用化を進める。

10) 令和 7 年度 :

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

(e) 平成 31 年度業務目的

平成 29 年度及び平成 30 年度に引き続き、未整備の火山ハザードマップのデジタル化を行う。さらにこれらデジタル化したハザードマップについて WebGIS 等で表示できるようにし、平時の利活用について検討を進める。

これまで行った自治体を対象としたヒアリング調査やアンケート調査の結果を基に、周知啓発教育用コンテンツの試作版を開発する。本コンテンツ試作版として、自治体防災担当者が火山災害及び火山防災に関して手軽に学べるテキストや、関連する情報等を取得できる総合的なポータルサイトの開発を進める。また、本コンテンツ試作版を協力機関の自治体防災担当者に試用してもらい、使用に関する感想や要望等のさらなるニーズを収集する。協力機関以外の自治体へも、内閣府が主催する火山防災協議会等連絡連携会議の場で周知する。

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、降灰被害予測コンテンツの試作版を開発する。本コンテンツ試作版の開発に当たっては、建築物の機能継続に影響を与える降灰深の閾値を設定する。またその閾値を他課題で得られる降灰観測データや降灰シミュレーションの結果と併せて GIS 上で表示できるようとする。その際、これまで実施した降灰影響評価実験による結果の妥当性確認を行う。降灰量に対する木造建築物の屋根の安全性について検討する。大規模噴火による都市機能への影響について文献調査を行い、火山ハザード事象毎に都市機能を支える各施設やインフラへの被害を整理する。

登山者の避難・救助支援コンテンツ開発のために、平成 29 年度及び平成 30 年度に引き続き、富士山における登山者動向把握実験（富士山チャレンジ）に参加し、登山者動態データを取得する。得られた登山者動態データを地図上で可視化することができる避難・救助支援コンテンツ試作版を開発し、火山災害対策への活用について検討する。

次世代火山研究推進事業の周知広報活動として、国内外で開催された学会（JpGU、日本火山学会、及び IUGG）におけるブース展示、査読付き論文（Journal of Disaster Research）での特集号の企画と公開、英語版のプロジェクト紹介動画やパンフレットの作成、英語版のプロジェクト紹介ホームページの開設を行う。

(2) 平成 31 年度の成果

(a) 業務の要約

周知啓発教育用コンテンツ試作版として「火山防災ポータルサイト」を開設した。本サイトでは前年度までに収集した約 300 の情報素材を分類し、検索が可能となるようにキーワードをつけて登録を行った。また、自治体の防災担当者が火山災害及び火山防災に関して手軽に学べるテキストを作成した。本コンテンツ試作版を自治体防災担当者に実際に試用してもらい、使用時の感想や要望等の収集を行った。

前年度までに実施した降灰影響評価実験の成果を基に、降灰被害予測コンテンツの試作版を開発した。本コンテンツ試作版の開発にあたり、前年度までの実験結果の妥当性を確認した。本コンテンツ試作版では実験の成果を基に建築物の機能継続に係る降灰深の閾値を設定し、その閾値を降灰観測データや降灰シミュレーションの結果と併せて GIS 上で表示できるようにした。その他文献などから引用した道路や電気等インフラに対する降灰の影響も GIS 上で重ねることで、簡易的ではあるが降灰による複合的被害予測が可能となつた。また、降灰量に対する屋根の安全性を評価するために、木造建築物の屋根に注目し、降灰深と屋根の損傷確率の関係を評価した。また文献調査を行い、降灰量と都市施設やインフラへの機能障害の関係を示す基礎資料を作成した。

登山者の避難・救助支援コンテンツ開発のために、前年度までに引き続き、富士山における登山者動向把握実験（富士山チャレンジ）に参加し、4 日間で約 11,000 人の登山者動態データを取得し、移動速度や混雑状況に関する解析結果を得た。また、避難・救助支援コンテンツ試作版として、本データをインプットデータとする可視化ツールを開発した。本ツールでは得られた動態データの他に登山道や山小屋などの情報も併せて地図上で表示させることができることから、平時の地域防災計画や避難計画の作成等事前防災に役立てることが可能となった。また災害発生時の活用についても検討を起こった。

前年度に引き続き、各種コンテンツ及びアウトリーチ活動等での利用を想定したハザードマップのデジタル化（GIS 化）を、岩木山、栗駒山、秋田焼山、鳥海山、乗鞍岳について実施した。GIS 版ハザードマップの用途として、250m メッシュによる火山ハザードマップデータベースの構築と、開発中の情報ツール（各コンテンツ）での利用が可能である。また、前年度に引き続き内閣府の総合防災情報システムに活用された。

次世代火山研究推進事業の周知広報活動として、国内外で開催された JpGU、日本火山学会、IUGG の 3 つの学会においてブース展示を行った。また、査読付き論文である *Journal of Disaster Research* (Vol. 14, No. 4&5) において本プロジェクトの研究成果を集めた特集号を企画し公開した。本プロジェクトの紹介用動画、パンフレット・リーフレットの英語版を作成し、これらにアクセスが可能な英文紹介を含むホームページを開設した。

(b) 業務の実施方法

周知啓発教育用コンテンツ試作版として、火山防災ポータルサイトを開設する。本サイトには前年度までに収集した情報素材を登録し、キーワード検索もできるようにする。ユーザーである自治体防災担当者に実際に試用してもらい、今後の高度化に反映さえるべく感想や要望等を収集する。

前年度までに実施した実験の結果に基づいて建築物の機能継続に影響を及ぼす降灰深の閾値を設定し、降灰シミュレーションの結果と併せて GIS 上で表示できる降灰被害予測コンテンツ試作版を開発する。また、降灰量に対する屋根の安全性評価について、木造建築物の屋根に対して検討を行う。また、降灰量と都市部の施設やインフラなどに機能障害を及ぼす関係を明らかにするため文献調査を行う。

避難・救助支援コンテンツ試作版のインプットデータとなる登山者動態データ取得のため、富士山における登山者動向把握実験（富士山チャレンジ）に参加する。また、避難・救助支援コンテンツ試作版として、得られた動態データを地図上で可視化するツールを開発する。本コンテンツの防災利用に関して検討を行う。

各コンテンツ及びアウトリーチ活動等での利用を想定したハザードマップのデジタル化（GIS 化）も前年度に引き続き実施し、その活用についても検討を進める。

次世代火山研究推進事業の周知広報用のブース展示、論文特集号の公開の実施と、英語版のプロジェクト紹介動画、パンフレット・リーフレットの作成、英語版のプロジェクト紹介用ホームページの開設を行う。

(c) 業務の成果

1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の開発

1-1) 火山防災ポータルサイトの開設

今年度、富士山周辺自治体の防災担当者（環富士山火山防災連絡会（回答数 46））及び、北海道駒ヶ岳周辺自治体の防災担当者（回答数 8）を対象に火山防災を進めるためのアンケート調査とヒアリング調査を行った（図 1、2）。図 1 より、自治体防災担当者自らが学ぶために、動画や対象とする火山の特徴に関する情報を必要としていることが分かる。また図 2 より、防災担当者が住民等を対象とした講演を行う際に、動画や写真、対象とする火山の特徴に関する情報を必要としていることが分かり、ヒアリング調査からも「現象に関するシミュレーションの結果や動画といった情報は非常に有益であり、防災に関する講演などで使えるので整備してもらえると活用できる。」といった意見が見られた。また、北海道駒ヶ岳周辺自治体へのヒアリング調査から、「定期的に気象庁の情報を確認することはない」、「北海道大学大島弘光研究支援推進員が開発した火山防災情報表示システム¹⁾（図 3）を活用して、火山情報以外の風水害に関する情報なども合わせて定期的に確認している」といった回答があった。また、火山に関する情報への要望として、「山ごとで考えると、機関によって情報がバラバラなのでまとめてもらえるとよい。」といった意見があり、さらに災害対応での降灰に関する情報について、「直後の予測や今後の広がりなどの情報が欲しい」といった意見や「土砂災害や道路などに影響するので活用できる」といった意見が得られた。

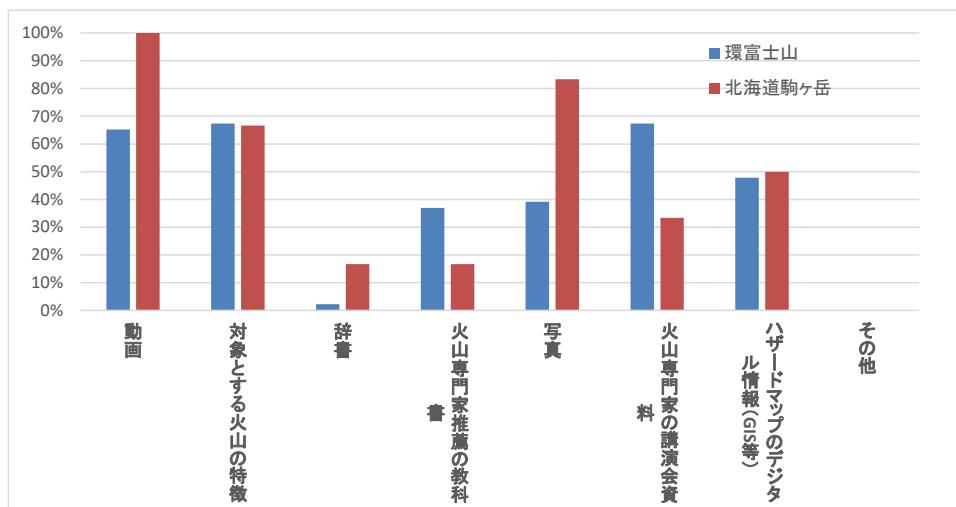


図 1. 防災担当者が自分で学ぶために必要な素材について

※回答数を基に標準化したもの

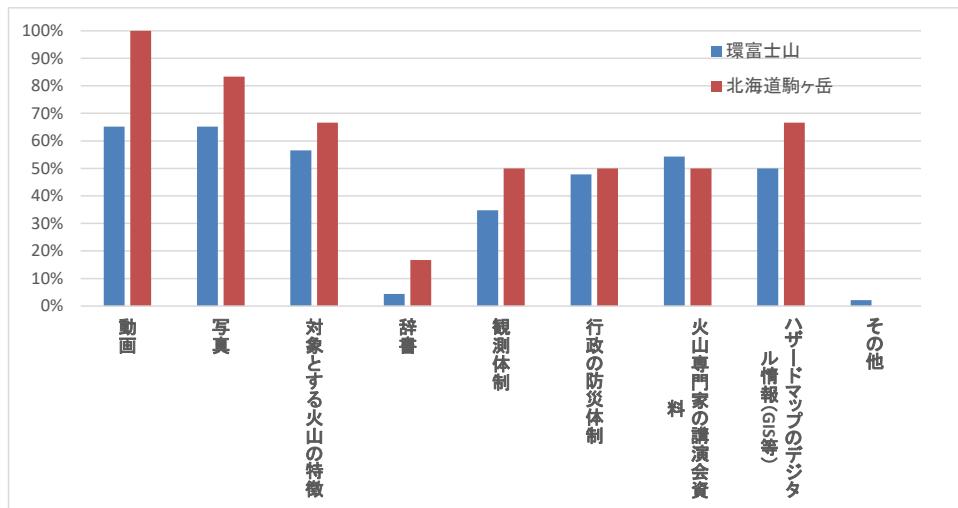


図 2. 防災担当者が防災講演を行う際に必要な資料・情報について
※回答数を基に標準化したもの

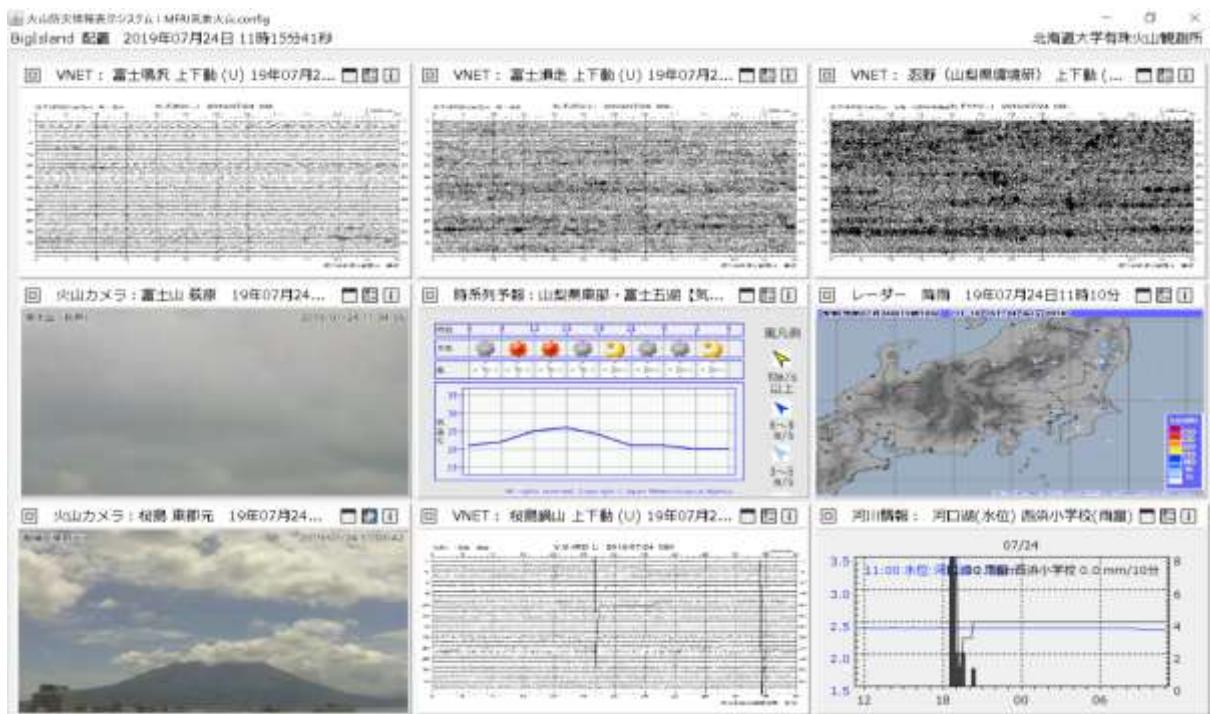


図 3. 火山防災情報表示システム¹⁾

前年度までに実施した自治体を対象としたヒアリング調査やアンケート調査の結果と上述した今年度の結果を基に、周知啓発教育用コンテンツ試作版を開発した。本コンテンツ試作版は、自治体防災担当者からの様々なニーズ（例えば、情報へアクセスしづらい、探し難い、住民向け説明用の素材が欲しい等）に応えるべく、火山（現象、災害、防災等）に関する様々な情報（データ、資料、画像、動画、教科書等）にワンストップでアクセスすることが可能なポータルサイト（火山防災ポータルサイト）を開設した。開設したポータルサイトを図4に示す。



図 4. 周知啓発教育用コンテンツ試作版として開発した「火山防災ポータルサイト」
(左 : トップページ、右 : 検索したページ)

図 4 に示したサイトでは、昨年度までに収集した 284 件の様々な情報素材を「地域防災計画」、「火山現象」、「火山災害」、「関係法令」、「火山災害の体験談」「防災講演のための情報」に分類し、検索が可能となるようにキーワードをつけて登録を行った。また、自治体の防災担当者自身が手軽に学ぶための教材として、また火山災害及び火山防災に関して住民説明会等で使用するための素材として、93 枚のスライドを新たな情報素材として作成した。このテキストは、火山災害の要因となる 16 の現象（小さな噴石・火山灰、大きな噴石、火碎流、溶岩流、泥流・土石流、融雪型火山泥流、山体崩壊・岩屑なだれ、洪水、地すべり・斜面崩壊、火山ガス・噴煙、津波、空振、地震、地殻変動、地熱変動、地下水・温泉変動）について公的機関で公表されている資料を基に「現象の説明」、「映像資料」、「被害」、「対策」の 4 項目について画像や映像を交えながら整理した（図 5）。なお、自治体防災担当者がさらに深く学習できるよう出展を明記した。また、ヒアリングやアンケート調査等で要望の多かった図上訓練等について、火山防災協議会等の研修の際に活用可能な演習事例 2 事例の資料（図 6）を作成した。

本コンテンツ試作版を複数の自治体防災担当者に実際に試用してもらい、今後のコンテンツの高度化に反映するべく感想や要望等の収集を行った。その中には、「見難い」や「情報が探し難い」といった感想があったため、具体的にどのような構成であれば見易く、情報が探し易いかをユーザーと相談し、次年度のアップデートにおいて反映させる。

火山災害要因 ⑤ 溶岩流

1. 現象

- 溶岩流は火山の火口から噴出した溶岩が高温のまま粘性の高い流体として山腹斜面を流下する現象である。
- 流下速度は地形や溶岩の温度・組成によるが、比較的ゆっくり流れるので歩行による避難が可能な場合もある。

引用: 火山防災マップ作成指針2-3-5（内閣府、消防、国土交通省水管理・国土保全局砂防部、気象庁）を一部変更
http://www.bousai.go.jp/kazan/shiryu/pdf/20130404_mapshishin.pdf

引用: 気象庁ホームページ 主な火山災害「溶岩流」
<https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/volsgaia/saigai.html>

火山災害要因 ⑤ 溶岩流

2. 現象の映像イメージ

内閣府 防災情報のページ
【動画】登山者の心得～火山災害から命を守るために～
▶警戒すべき現象 【溶岩流】 (00:02:02から)



引用: 内閣府 火山防災に関する普及啓発映像資料
http://www.cao.go.jp/lb_012/tozansha_02.html

29

火山災害要因 ⑤ 溶岩流

3. 被害

- 溶岩流は進行方向上の農地、林地、住宅地等を完全に埋没、焼失させる。
- 日本の火山は安山岩質マグマを噴出する火山が多いため、溶岩流の粘性は比較的高く、時間をかけて流下することから避難することが可能である。

被害例

- 1914年◆桜島大噴火◆村落埋没、焼死。死者58名。農作物大被害等。
- 1983年◆三宅島噴火◆住宅の埋没・焼失約400棟。山林耕地等に被害。
- 1986年◆伊豆大島噴火◆全島民等約1万人島外避難。

引用: 火山防災マップ作成指針2-3-5（内閣府、消防、国土交通省水管理・国土保全局砂防部、気象庁）を一部変更
http://www.bousai.go.jp/kazan/shiryu/pdf/20130404_mapshishin.pdf

引用: 気象庁ホームページ 月別火山災害（北関東）
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kyouseinen/kyouseinen_table.pdf

火山災害要因 ⑤ 溶岩流

4. 対策

溶岩流による災害を軽減するため、様々な手法の溶岩流制御が行なわれている。

- 溶岩流の先端部に放水して冷却させ、粘性を増大させて溶岩の堤防をつくり、その方向への流下を止め。（1983年◆三宅島／1986年◆伊豆大島）
- 内陸の火山など大量の水がないところでは、人工的な堤防を構築して溶岩流の流れを止めるか向きを変える。（1950年◆伊豆大島◆コンクリートブロックを使った路路変更の試み）

引用: 火山防災マップ作成指針2-3-5（内閣府、消防、国土交通省水管理・国土保全局砂防部、気象庁）を一部変更
http://www.bousai.go.jp/kazan/shiryu/pdf/20130404_mapshishin.pdf

引用: 気象庁ホームページ 月別火山災害（北関東）火山活動歴史資料（2002年11月、防災メモ「溶岩流」）を一部変更
https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_y_ac_doc/sapporo/02m11/100_02m11memo.pdf

30

図 5. 本年度作成したテキストの一例

演習事例 ①

1. 今回の図上演習の目的

- 大規模噴火時等の協議会関係機関の対応・行動の確認、また不足事項の洗い出し
- 対策がわからない活動の抽出と、その相談先の検討
- 顔の見える関係づくり、及び関係の深化

演習事例 ①

4. 演習実施イメージ

【方法】

- 模造紙と付箋紙を使います。
- 災害対応は、自由な発想（妄想）と班員のチーム力で検討を進めてください。

【使用するもの】

- 黒いペン（ラッシャンペン）
- 模造紙2枚
- 付箋紙：黄色多量、赤色、青色
- 今後の対応目標シート

練習日時 x年9月1日(木) x年12月3日(土) ...

事業者	噴火警戒レベル	地震階	噴煙上昇
市町村	未	3	5
関係機関			

練習場所：港まち、スケーラルな環境などで、多様な訓練シーンや実施場所での訓練実施を可能とする仕組み

今回のテーマ
要支援者对策

80 83

図 6. 本年度作成した演習事例

1-2) 研修プログラムの開発

今年度の自治体防災担当者を対象とした研修として、2020年2月12日に山梨県コアグループ担当者会議で富士山の噴火警戒レベルが上がったことを想定した住民避難について図上訓練を行った。この中で、富士北麓地域から噴火の影響が少ない地域へ避難するにあたり、利用できる幹線道路が限られることと一斉に避難することで渋滞発生の恐れがあることなどの課題が把握できた。これは、富士山周辺に限ったことではなく、桜島等のほかの火山においても起こり得る可能性があるため、今後自治体防災担当者が火山災害対策を検討するうえで重要な課題となることが確認できた（写真1）。



写真 1. 2020 年 2 月 12 日に実施した図上訓練の様子

1-3) 火山防災イベントカレンダー

前年度までに実施されたヒアリング調査から、防災担当者のニーズとして各都道府県の避難訓練などの防災イベントに関する情報の共有が挙げられた。このニーズに応えるべく、フリー素材²⁾を利用して、「火山防災イベントカレンダー」(図 7)を構築し、中部甲信越地域の火山防災担当者間で利用を開始した。このカレンダーに自治体の防災担当者や研究者が防災訓練や防災・減災に関するイベントを入力することで、近隣の取り組みを確認することができるとともにお互いに連絡を取り合い、見学や情報交換などを行うことができる。



図 7. 火山防災イベントカレンダー

2) 降灰被害予測試作版の開発

2-1) GIS 上で表示される降灰被害予測

これまでに行った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の結果、噴火ハザードの内、特に首都圏を含む都市部において最も広範囲に影響を及ぼす「降灰」に関して、多くの自治体で対応経験もなく十分な対策がとられていないことが明らかになった。また、「降灰情報は土砂災害や道路被害など災害対応につながるため必要である」とのニーズが得られた。これら課題やニーズに対応できるように、主に都市部における降灰による被害予測を地図情報として提供するための降灰被害予測コンテンツ試作版を開発した。本コンテンツ試作版では、前年度までに実施した建築設備（エアコン室外機と開放型冷却塔）を対象とした降灰影響評価実験の結果に基づき設定された、建築物の機能継続に影響を与える降灰深を、降灰シミュレーションの結果等と併せてGIS上で表示することができる。図8に、富士山宝永噴火（1707年）のシミュレーションによって得られた火山灰分布と降灰深³⁾を用い、本研究によって得られた建築物の機能継続に影響を与える降灰深を併せてGIS上で表示する。これらの関係から、降灰による建築物への影響を評価することができる。例えば、災害対応で重要となる病院や行政施設などの建築物への被害を予測することが可能となる。そしてこの情報を然るべき防災機関に伝えることで、降灰に起因する災害対応に役立てることができると考えられる。

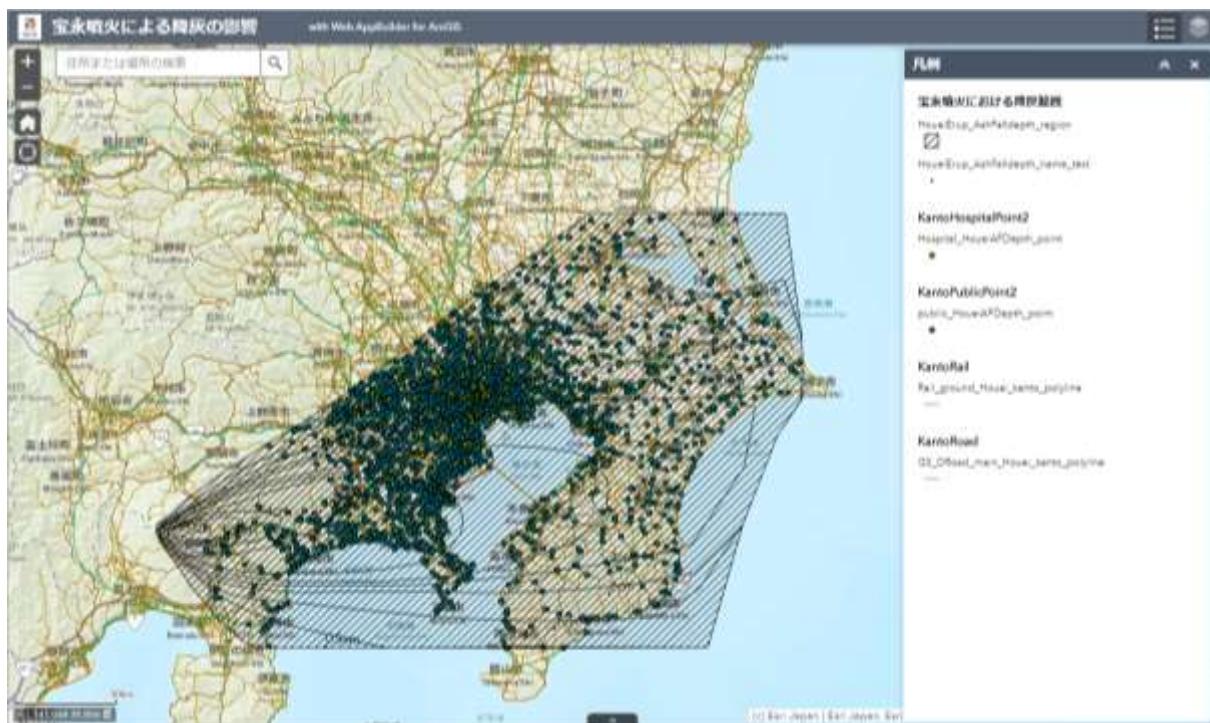


図8. 富士山宝永噴火を想定した降灰分布と基盤情報(鉄道、幹線道路、病院施設)を
WebGIS上で重ね合わせた例

発電所などの電力施設は、災害時において重要な役割を持つ。ここでは公開されている電力施設に関する資料⁴⁾を整理し、それを基に電力ネットワークのGISデータを整備した。これを図8と同様に降灰分布と重ねることによって、これらの施設に影響する降灰深を特定すれば、降灰による被害が発生する可能性のある電力施設を把握することができる（図9）。

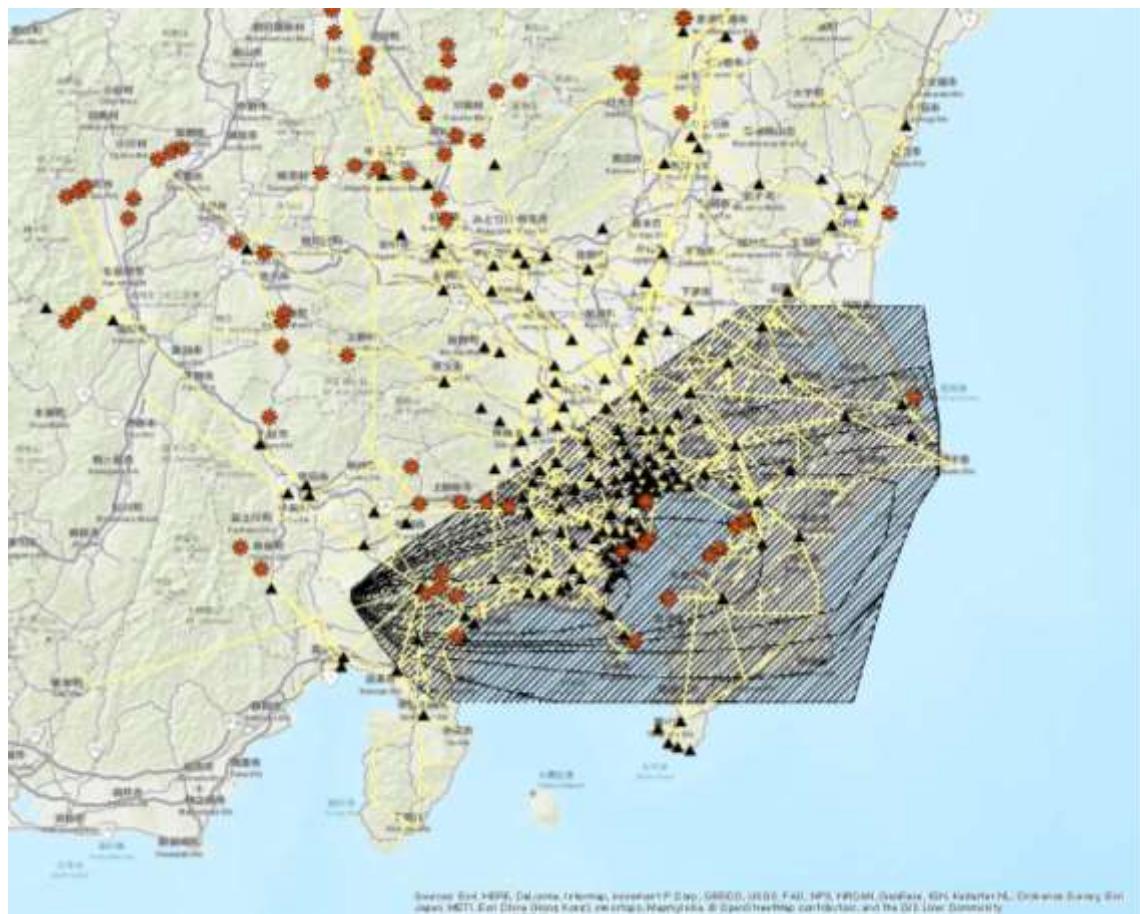


図9. 富士山宝永噴火を想定した降灰分布と関東地方の電力施設ネットワークをWebGIS上で重ね合わせた例

図8と図9のように、基盤となる情報をGISデータとして整備し、これまでの降灰影響評価実験結果や文献調査などから得られる降灰深の閾値を使用することで、簡易的ではあるが降灰による都市部の施設やインフラなどに対する複合的な被害予測が可能となった。

2-2) 空調吸気口への火山灰流入に関する考察と実験結果の妥当性の確認

前年度までに行われた空調設備を対象とした降灰影響評価実験における供給降灰量と設備機器に吸入される火山灰の量の関係を定量的に評価し、実験結果の妥当性を確認した。換気を含む空調設備の稼働では、機器あるいは室内への外気取入れを伴う。エアコンの室外機や冷却塔では熱交換のため、換気は屋内CO₂濃度などを一定に保つための外気の取入れである。空調設備の外気取入れ口（吸気口）は、通常図10(a)のように機器の側面に設けられ、排気口は機器の上部に設けられる。また機器が直接屋外に暴露されておらず、建物外壁の吸気口から室内ダクトを介して熱交換機に至る場合でも、外気の吸気口は建物の側壁に設けられる（図10(b)）。

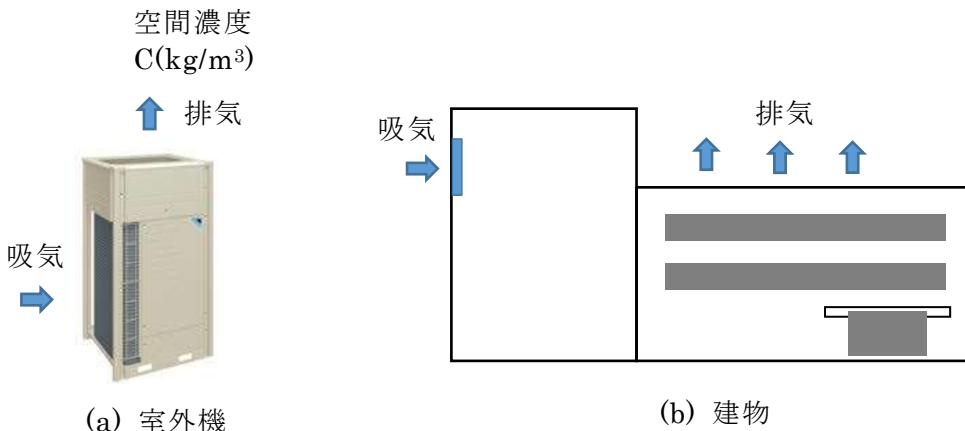


図10. 設備機器や建物の吸気口と排気口の配置のよくある例

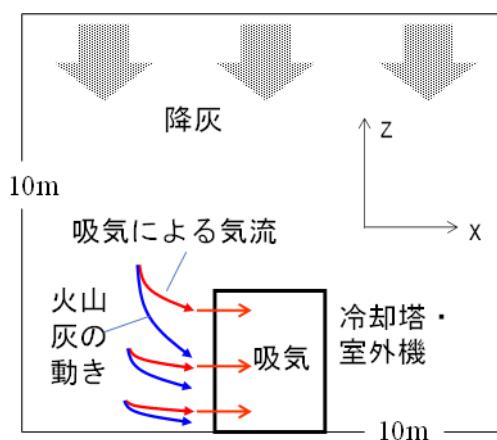


図11. 空調設備に対して火山灰を降らせた時の吸気による気流（赤矢印）と実際の火山灰の動き（青矢印）のイメージ

落下中の火山灰粒子は実際には図11に示すように慣性力の影響により、その運動は機器直近の気流の変化には即座には追随できず、気流の変化にやや遅れた動きをすると考えられることから、ここでは空調設備への火山灰の吸収に関し、慣性を持った火山灰粒子の吸気気流への追随性とそれによる吸気口への侵入量の影響に対する検討を、数値計算的手法を用いて行った。その結果、吸気口への侵入量の計算に、粒子の運動方程式から得られる粒子速度を用いる場合と、気流速度+終端落下速度を用いる場合とでは、両者間に少なからず差が出ることがわかった。その差は、慣性力に対する空気抵抗力が相対的に大きくなる小さい粒子（非球形で空気抵抗が大きくなる粒子）では小さく、すなわち気流の変化への追随性が高く、逆に慣性力に対する空気抵抗力が相対的に小さくなると、気流の変化への追随性が高くなことがわかった（このことは、軽い粒子ほど空気に乗って吸い込まれやすいという直感や経験とも合致する）。

前年度までの降灰影響評価実験において降灰深の閾値を求めるにあたり、後者の（気流速度+終端落下速度を用いる）考え方沿って累積の火山灰吸引量と降灰深の関係を導いたが、本検証の結果粒子の運動方程式を考慮することで、得られる（障害が出始める）降灰深がやや大きくなる可能性があることが示された。

2-3) 降灰荷重による木造建物屋根の安全性の検討

降灰被害予測コンテンツにおける降灰深の閾値の設定に関連して、前年度は鉄筋コンクリート造（RC造）及び鉄骨造の構造物に対して建築基準法で定められた屋根の積雪荷重を計算し、積雪荷重の換算による限界降灰深を求め降灰量に対する屋根の安全性について評価を行った。今年度は木造建築物の屋根の安全性について検討を行い、安全率の変動を考慮した屋根の被害関数を提案した。ここでは、積雪荷重の短期許容応力度の安全率と雪による屋根被害を考えた時の積雪荷重の安全率を用いて、換算積雪荷重をそれぞれ計算し、降灰荷重に置換して建物屋根の限界降灰深を評価する。

木造建物屋根の短期許容応力度とそれに対する安全率が建築年により異なるため、ここでは 1982～2000 年及び 2001 年以降の 2 ケースを対象に、限界降灰深を求める。例として、強度換算積雪荷重を用いて垂直積雪量を 25～45cm に変化させた時の鉛直荷重 N と限界降灰深 da の平均値 $E[da]$ の関係を図 12 に示す。

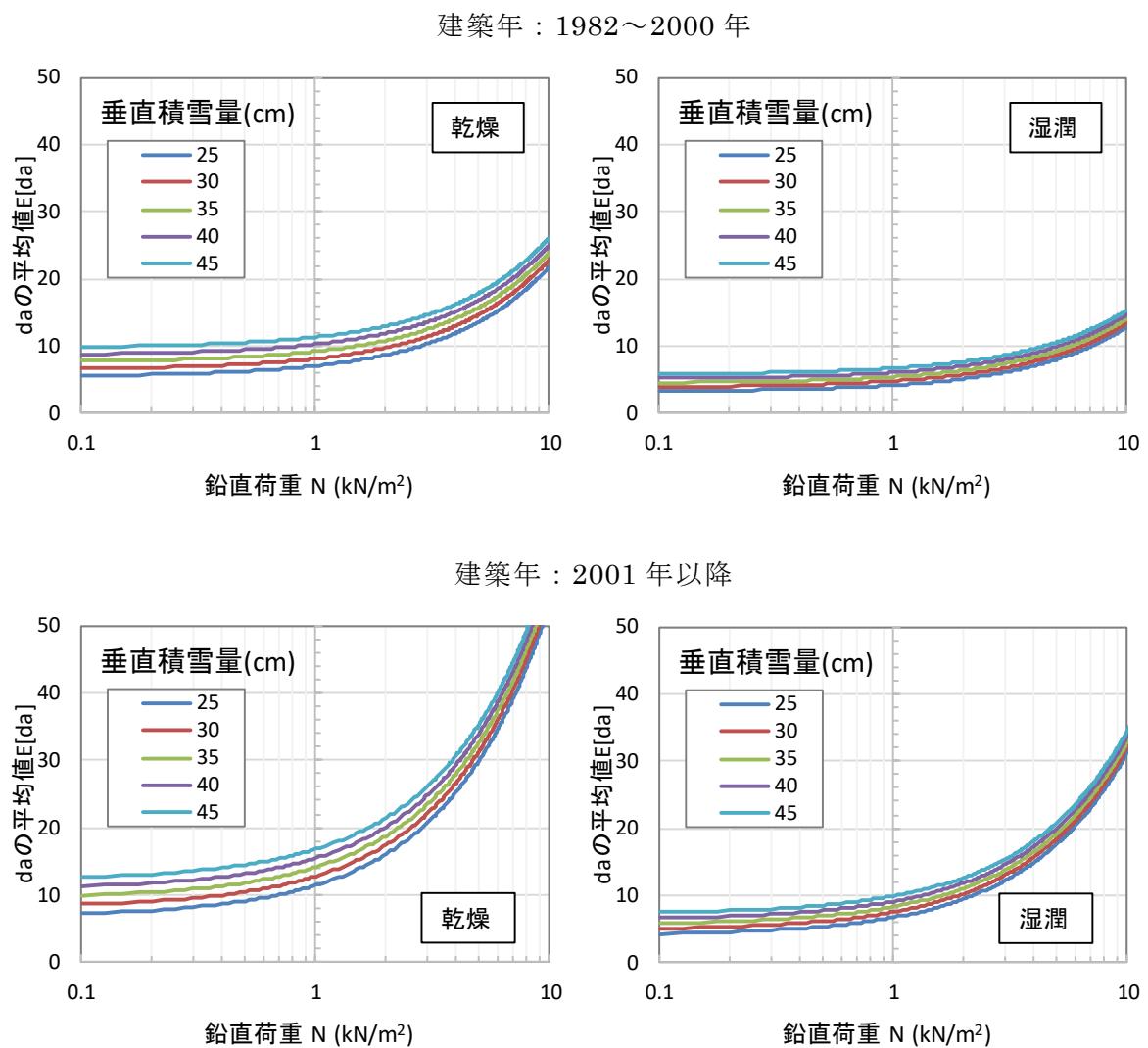


図12. 鉛直荷重 N と限界降灰深 da の平均値の関係

一方、設計時の積雪荷重を上回る荷重が作用する場合、強度換算積雪荷重の代わりに崩壊換算積雪荷重を用い、その際の限界降灰深dmの平均値E[dm]と垂直積雪量dsと変動係数V[dm]を図13に示す。

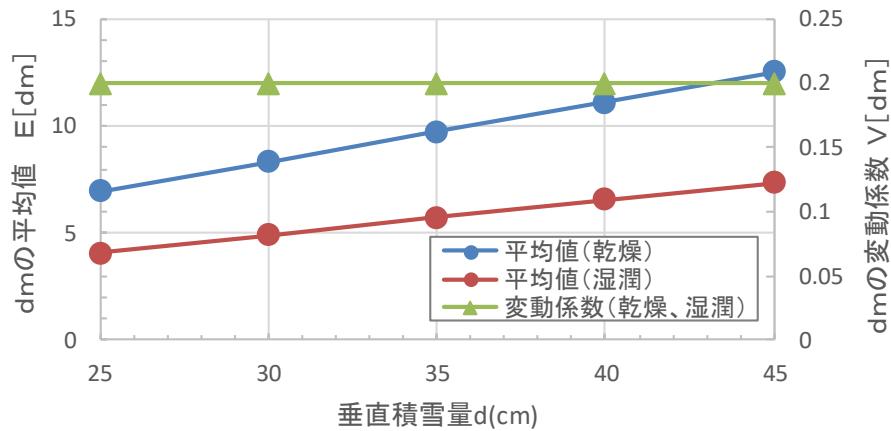
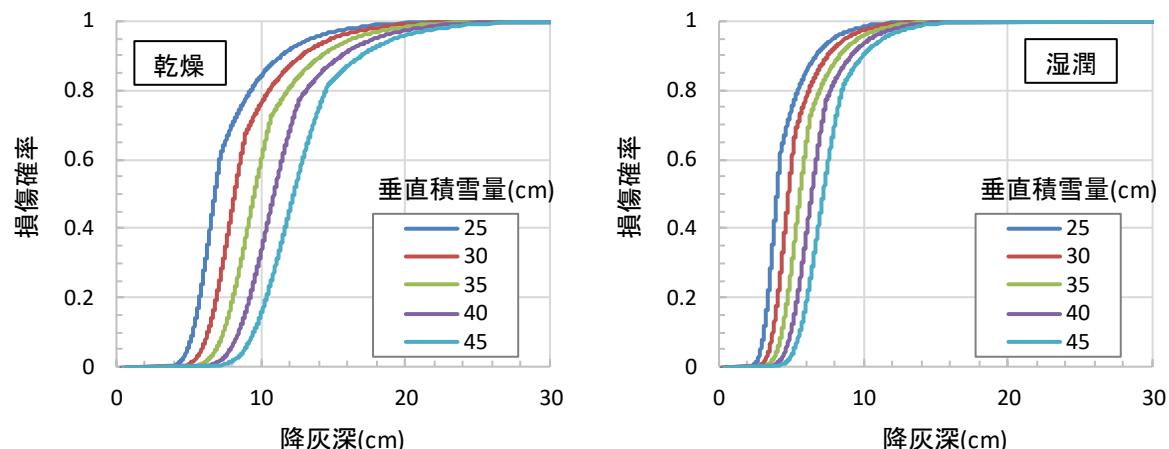


図13. 垂直積雪量dsと限界降灰深dmの関係

建築年が1982～2000年と2001年以降の2ケースを対象に、鉛直荷重を1.0(kN/m²)に固定して垂直積雪量を25～45(cm)に変化させたとき、屋根の被害確率関数は図14となる。次に、垂直積雪量を30(cm)に固定して鉛直荷重を0.5～1.5(kN/m²)に変化させたとき屋根の被害確率関数は図15となる。屋根の損傷確率は、積雪荷重の垂直積雪量が大きいほどまたは鉛直荷重が大きいほど低下する。降灰が乾燥状態と湿潤状態を比較すると、湿潤状態の降灰の単位重量は乾燥状態より大きいため湿潤状態の損傷確率が高くなる。建築年1982～2000年と建築年2001年の損傷確率を比較すると、建築年1982～2000年の損傷確率が高くなっている。これは、建築年1982～2000年における短期許容応力度の安全率の平均値E[a]が建築年2001年と比較して小さいためである。

建築年：1982～2000年



建築年：2001年以降

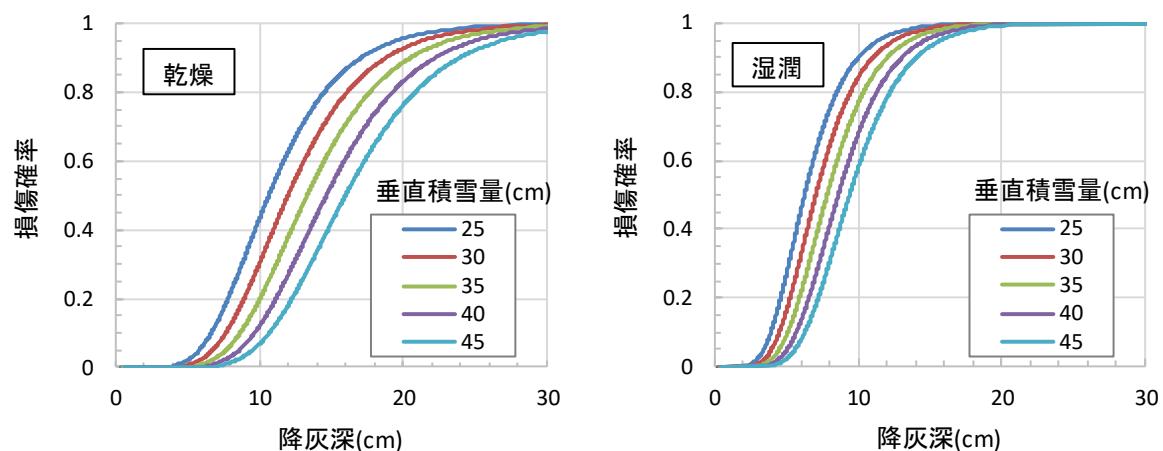
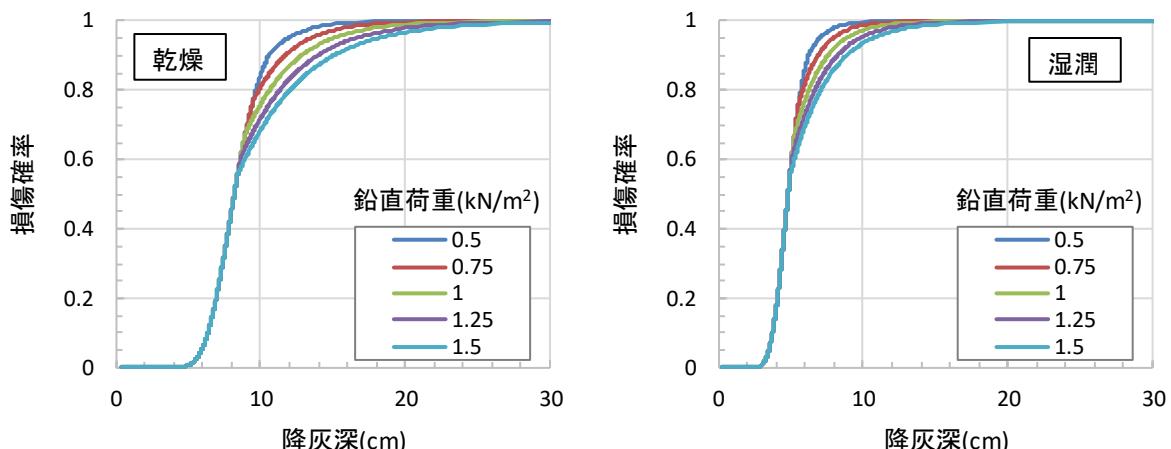


図14屋根の被害確率関数（鉛直荷重 1.0kN/m^2 ）

建築年：1982～2000年



建築年：2001年以降

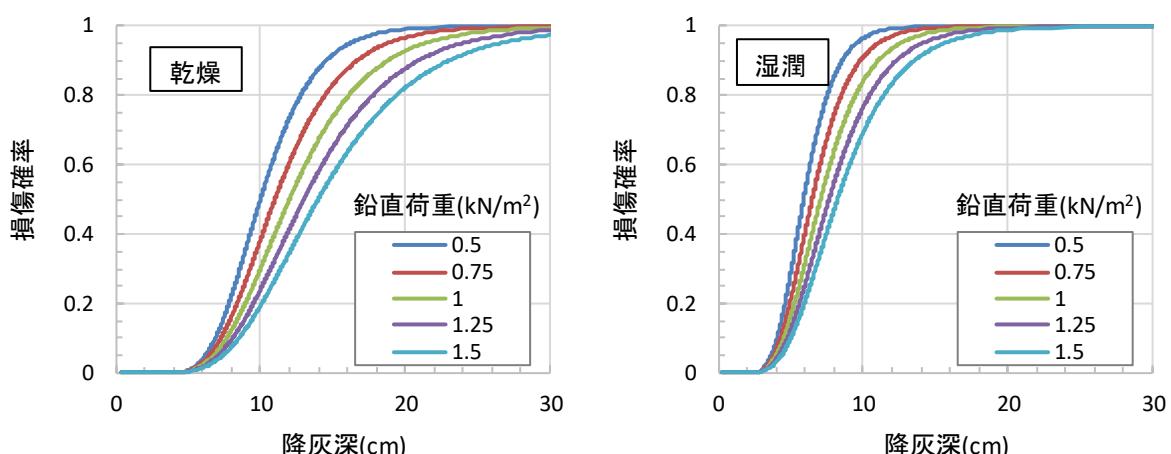


図15. 屋根の被害確率関数（垂直積雪量30cm）

2-4) 火山現象による社会活動への影響の検討

大規模噴火による都市機能への影響評価は多岐にわたっていることから、降灰被害予測コンテンツにおける閾値設定の参考にするため、火山噴火による被害報告や実験に関する137件の文献を収集し、火山現象が社会活動に及ぼす影響を整理した。そして、定量的に評価が可能である降灰深と被害（障害発生）との関係を対数正規分布で回帰することで、各々の被害の信頼度曲線の構築を行った。

整理した内容は、国内外で発生した火山噴火被害事例に加えて、近年の国や地方自治体等が作成した被害想定を含む火山防災マップなどを対象に、表1の火山現象に対する表2の対象物の受けける影響についてである。

表1. 火山現象の種類

降下火碎物(降灰等)	新しい火口の開口
火碎流(火碎物密度流)	火山に起因する津波
溶岩流	大気現象(空振・火山雷・ブラスト)
岩屑なだれ(山体崩壊等)	地殻変動
火山泥流(火山性土石流)	火山性地震
噴火により発生する飛来物(噴石)	熱水および地下水の異常
火山ガス	

表2. 火山現象により影響を受ける対象物

建物	建物
	建築設備
ライフライン	電力
	上水道
	下水道
	通信
交通	道路
	鉄道
	航空
	船舶

ここでは、例として降下火碎物（降灰等）による電力施設への影響と、噴火より発生する飛来物（噴石）による建築物への影響について整理した内容を記す。なお、ここで言う「降下火碎物」とは、風の影響を受け遠方まで運ばれながら降下する火山碎屑物のことであり、粒径や形、表面の性状などから表3のように細分され、降下テフラまたはテフラとも呼ばれている。また「噴石」は、一般的に噴出したマグマが空気中で冷えて固まった物の内、その形状や構成している岩石などから「火山弾」、「軽石（スコリア）」、「火山岩塊」などに分類される（粒径は考慮されない）。

表3. 火碎物の分類

粒径	特定の外形 を持たない	特定の外形 を持つ	多孔質
64 mm以上	火山岩塊	火山弾など	噴石、軽石 など
2~64 mm	火山礫		
2 mm以下	火山灰		

まず電力施設への障害発生事例のある降灰量を図 16 に示す。凡例の「停電」には火山灰の荷重による断線が含まれ、「その他」には、タービンの孔食や灰の付着による発火などが含まれる。障害が発生した最小の降灰量は 0.1 cm程度で同程度の降灰量で除灰作業も行われている。収集した事例の中での降灰量が最大の 90 cmとなった 1994 年のラバウル火山の事例では、樹木や家屋の倒壊により電線が断線された⁵⁾。降灰量が増加するとともに発生が増加する障害は、電力設備のフラッショーバ（後述）、フラッショーバに伴う停電、太陽光発電の発電量の低下、送電線の切断による影響などが挙げられる。留意すべき点として、降灰量が同程度であった場合、火山灰が湿潤状態である方が障害が発生しやすい傾向がある、ということがある⁵⁾。

電力施設への降灰の影響で多いフラッショーバとは絶縁体の表面付近の意図しない放電で、碍子等の絶縁体に付着した火山灰に通電することにより発生するものである。2008 年のチャイテン火山での事例では、延長 68km の区間に 0.2~5cm 程度の降灰があり、軽度の霧雨の後にフラッショーバが発生し、これらの区間では清掃を断念し電線を交換した⁶⁾。碍子の火山灰に対する絶縁耐力試験は多数行われており、粒径の小さな火山灰が湿潤状態で碍子に接触した場合にフラッショーバが発生しやすいという結果が得られている^{7)・8)}など。

また、発電所、変電所において、吸気系から火山灰が侵入しタービンの摩耗が発生している^{6)・9)}など。1995 年のルアペフ火山の事例では、トンガリロ川流域のランギポ水力発電所の集水域に粗粒玄武岩質安山岩の火山灰が堆積し、翌年の点検において噴火活動があった約 7 か月で、通常の 15 年分に相当する摩耗が生じていたことが確認された^{6)・10)}。1999 年から断続的に噴火を繰り返したトゥングラワでは、2006 年にアゴヤン水力発電所のタービン（羽根）が火山灰により摩耗していることが確認された（写真 2）。アゴヤン水力発電所では 21 年間で 4 回タービンの羽根の交換が行われている⁹⁾。火山灰の研磨性については、次のような事例もある。1976 年のオーガスティン火山の噴火では、天然ガス火力発電所のタービンが火山灰によって研磨され、元々付着していた腐食層が取り除かれたことによって、発電効率がかえって上昇した¹¹⁾。

太陽光発電への影響として、2011 年の新燃岳の事例では、大学の太陽光発電パネルに降灰があり発電量が通常よりも 60%程度落ちたが（通常の発電量の 40%程度）、降雨により火山灰が除去されると発電量は回復した⁸⁾。火山灰による太陽電池モジュールの発電量低下特性について、川畠ほか（2016）⁵⁾で検証が行われており、降灰量がおよそ 0.005 cm で発電量は半減し、およそ 0.03 cm でほぼ 0 となるという結果が得られている。



写真2. アゴヤン水力発電所での火山灰によるタービンの摩耗の様子⁸⁸⁾

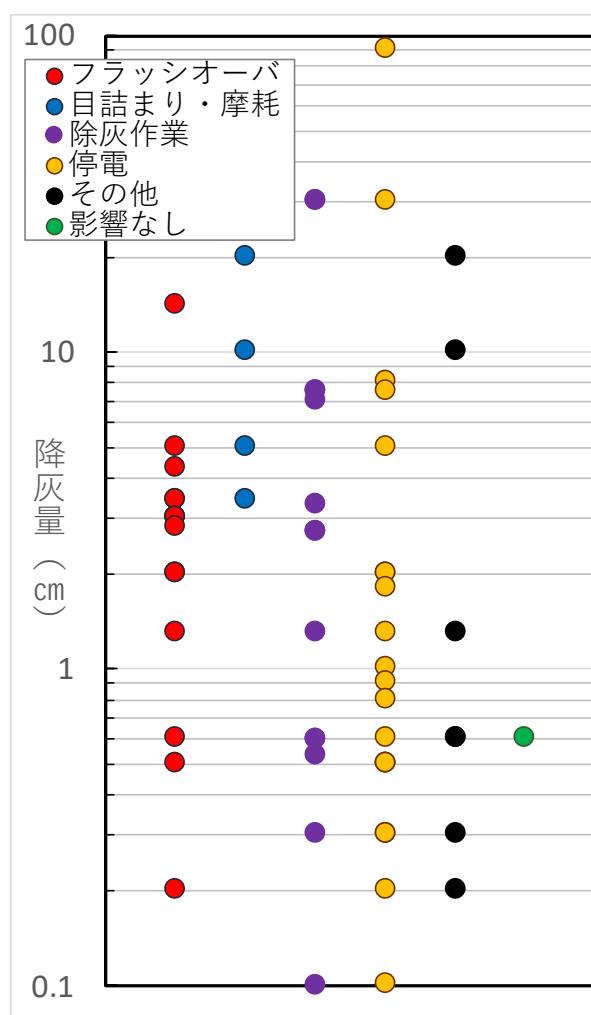


図16. 電力施設への障害発生事例のある降灰量

次に、電力施設において障害が発生する降灰深を評価するために、降灰深と障害発生の累積確率との関係を、確率分布（対数正規分布）を用いて回帰する。電力施設への被害要

素毎に評価したものを図 17 に示す。被害データの個数が少ないケースもあるが、降灰深と被害発生の累積確率の関係は、対数正規分布を用いて概ね回帰されている。

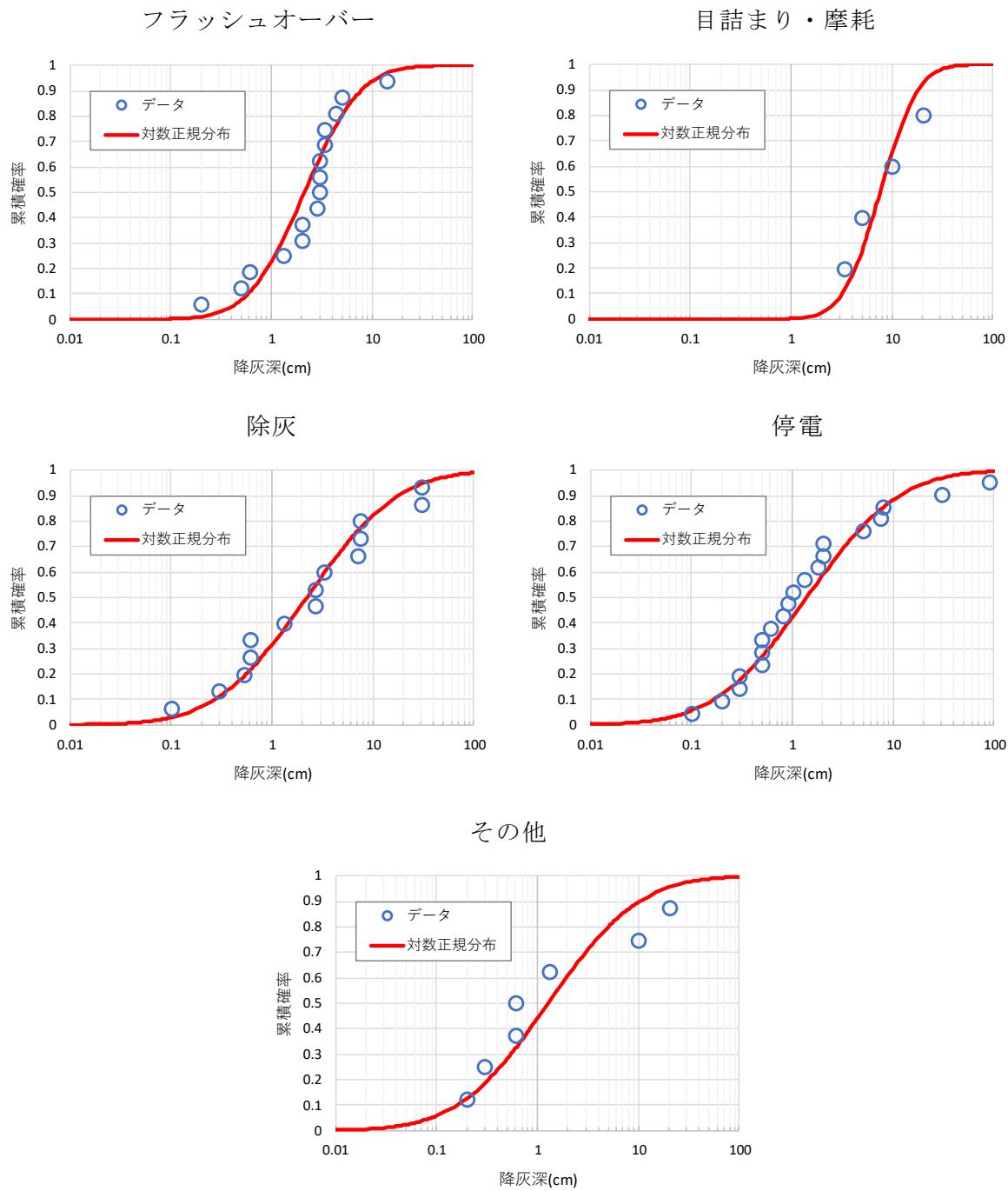


図17. 電力施設を対象とした降灰深と累積確率の関係

また、電力の他のライフライン（上水道、下水道、通信）と交通（道路、鉄道、航空）の各要素を対象に、降灰深と被害発生の累積確率の関係を図 18 に示す。

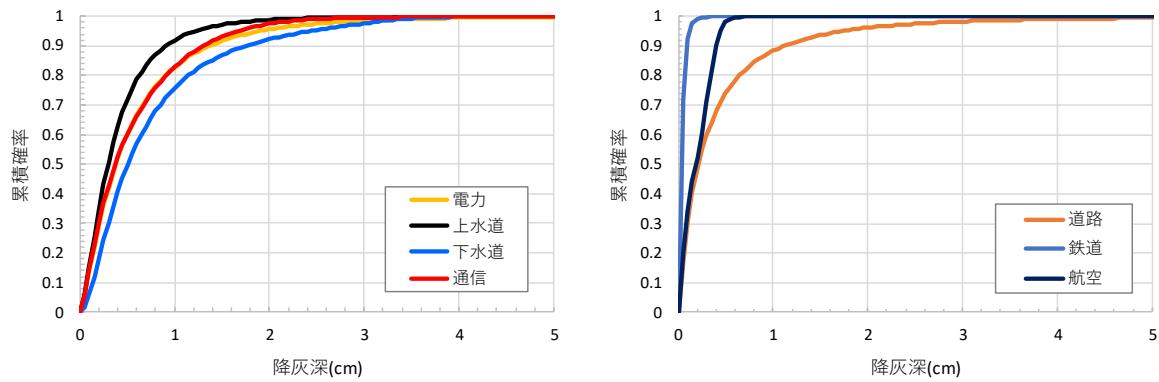


図18. ライフラインと交通を対象とした降灰深と累積確率の関係

次に、ライフラインと交通について被害発生の累積確率が 0.5 と 0.9 の場合の降灰深を計算すると、図 19 のようになる。これによると、鉄道の被害発生の降灰深が最も低くなり、下水道の被害発生の降灰深が高い傾向が見られる。

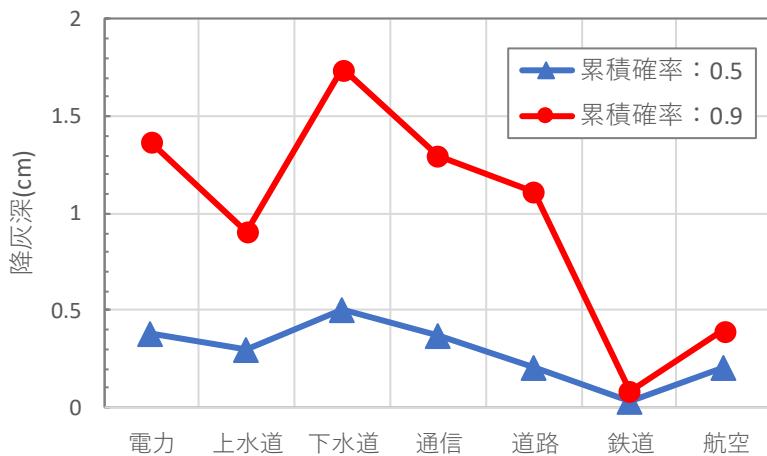


図19. 累積確率に対応した降灰深

この結果は、内閣府の「大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ」による
ライフラインと交通を対象にした降灰による影響の閾値¹²⁾と概ね調和的である。

次に、障害発生事例における噴石の粒径を図 20 に示す。噴石の建物及び建築設備への影響は、主に噴石の飛来による屋根や壁などの損傷であった。対象文献のうち粒径が最大の噴石による事例は、1966 年の桜島の噴火の際、粒径 2m、約 5 トンの噴石が噴出源の南岳火口から約 3.2km 離れた古里温泉に飛来し、ホテルの 1 階玄関屋根を突き破り地下室の床まで達した¹³⁾。一方、最小の粒径による事例は、2011 年の新燃岳の噴火の際、粒径 1.5 ~2cm の噴石が噴出源から 14km 離れた小林市のソーラーパネルに落下し、パネルが損傷した¹⁴⁾。また、1783 年の浅間山では噴石が落下の衝撃で割れ、高温の内部が露出したことにより建物等 52 棟が焼失し、高温のままの軽石が 1.2m 堆積したため 83 棟が焼失した¹⁵⁾。同様の噴石による火災は建物以外でも発生しており、1914 年の桜島噴火では、火口から 4.7km 離れた森林の下草が噴石の落下により燃え、1883 年のクラタカウ火山の事例では火口から 70~80km 離れた場所の布に噴石の熱で穴があいた¹¹⁾。

内閣府による「活火山の退避壕等の充実に向けた手引き」¹³⁾では、2014 年の御嶽山の噴火を受けて、退避壕等の噴石の衝撃耐力試験が行われている。大きさがこぶし大 (10 cm ~50 cm 程度)、重さが約 1.3~160kg 程度の火山岩塊が 100m/s の速さで落下してくることを想定し、木造屋根、コンクリートへの衝撃を検討している¹³⁾。そこでは、木造屋根にアミラド繊維敷物を 2 枚重ねすることによって質量 2.66kg の飛翔体が貫通せず、コンクリートには、どの粒径であっても噴石が貫通しないことが実験的に示された¹³⁾。さらに、敷砂の衝撃吸収能力の検討も行われ、噴石と同程度の厚さのある敷砂があると、緩衝材としてより有効に作用することが確認された¹³⁾。

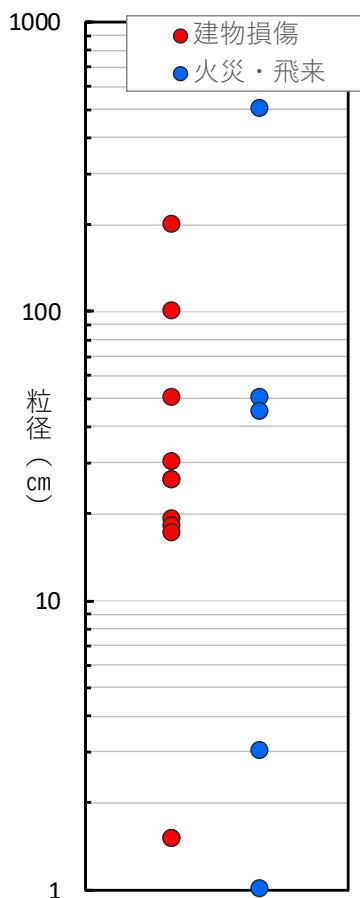


図20. 噴石による障害発生事例のある粒径

上述した降灰被害の手法を用いて、噴石による被害（建物損傷と火災・飛来）を対象に、噴石の粒径と累積確率の関係の回帰結果を図 21 に示す。噴石と被害発生の累積確率の関係は、火山灰の降灰深と累積確率の関係と同様に、対数正規分布を用いて概ね回帰される。

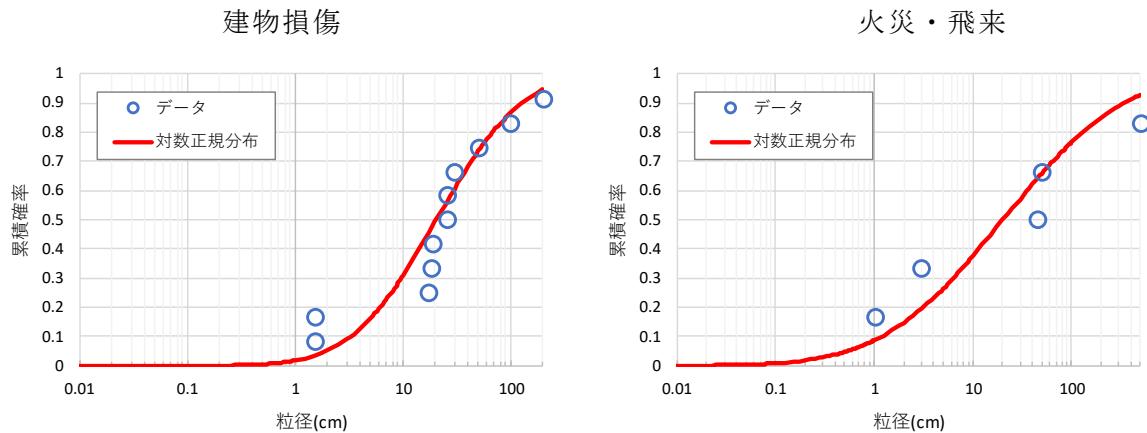


図21. 噴石の粒径と累積確率の関係の回帰

以上の結果をまとめると、噴石の粒径と被害発生の累積確率の関係は図 22 のようになる。

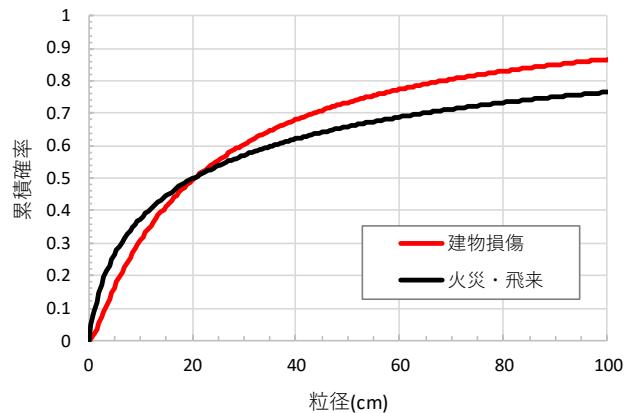


図22. 噴石の粒径と累積確率の関係

3) 避難・救助支援コンテンツ試作版の開発

前年度までに引き続き、富士山における登山者動向把握実験（富士山チャレンジ）に参加し、登山者動態データを取得した（写真 3）。



写真 3. 富士山チャレンジ 2019 の様子（左：富士山パーキングでのビーコン配布、右：五合目でのビーコン回収）

今年度は 2019 年 8 月に延べ 4 日間で約 11,000 人の登山者動態データを取得し、登山者の移動速度や混雑状況に関する解析結果を得た（図 23）。



図 23. 富士山チャレンジの参加者の様子（左：2019 年 8 月 18 日 2 時、右：2019 年 8 月 25 日の登山者一人の移動情報）

また、避難・救助支援コンテンツ試作版として、本データをインプットデータとする可視化ツールを開発した（図 24）。本ツールでは得られた動態データを使って、各レシーバーに対する滞在者数、出発者数、未着者数を表示することができる（図 25）。また登山道や山小屋などの地図情報やハザードマップ等によるハザード情報も併せて地図上で表示させることができることから、平時の地域防災計画や避難計画の作成等事前防災に役立てることが可能となった。また災害発生時の活用についても検討を行った。

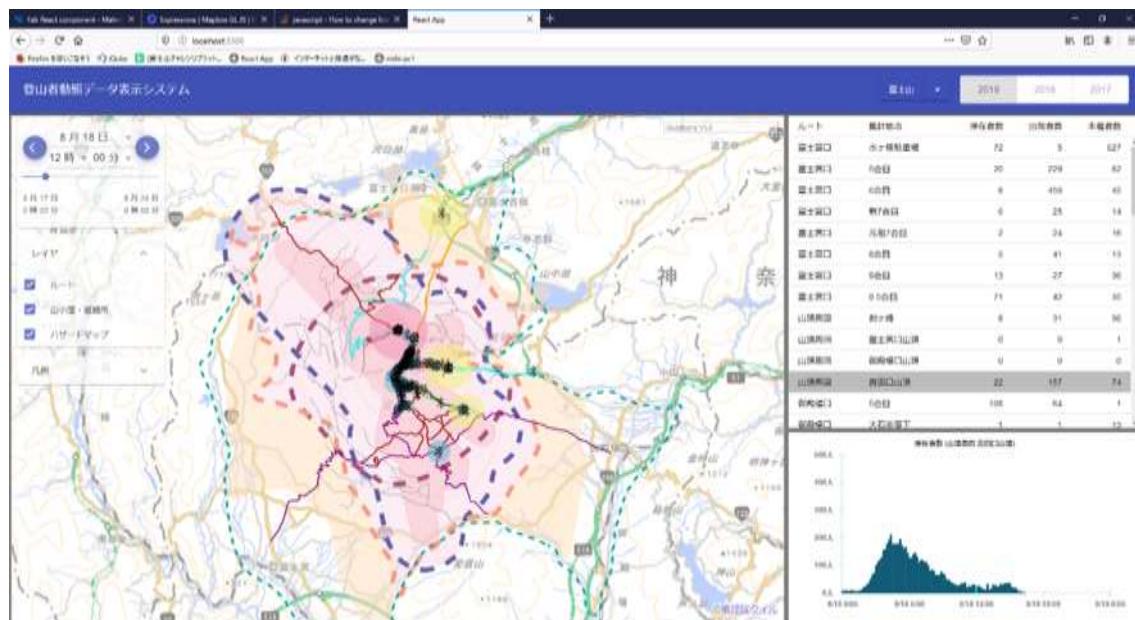


図 24. 登山者動態データの可視化ツール

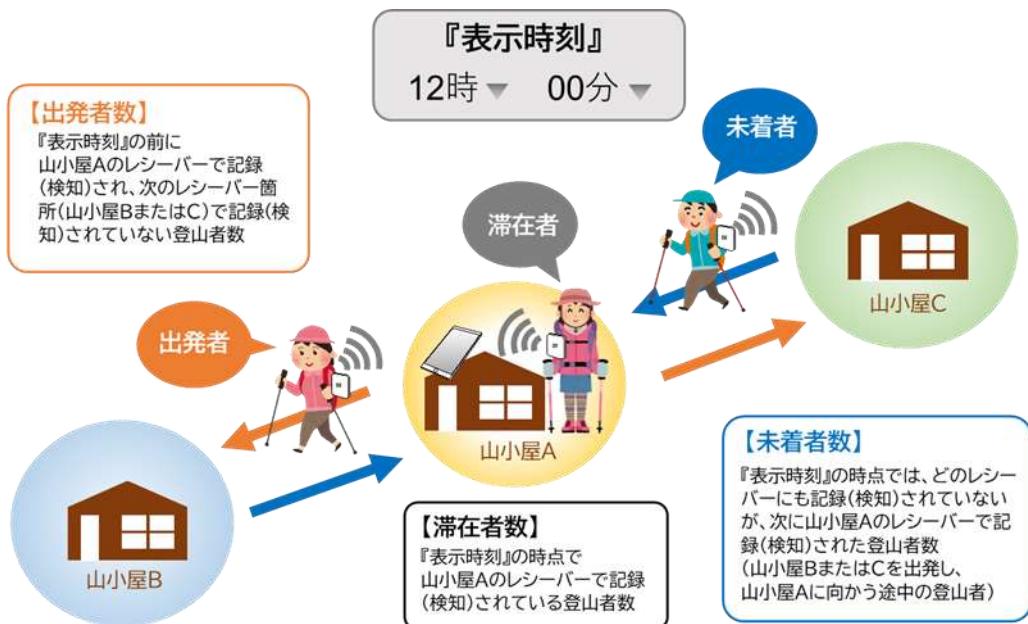


図 25. 可視化ツールで表示可能な登山者情報

4) 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化

前年度に引き続き、常時観測火山の内 5 火山（岩木山、栗駒山、秋田焼山、鳥海山、乗鞍岳）のハザードマップのデジタル化を実施した。これにより、WebGIS 等で閲覧することや他の情報と重ね合わせることで簡易的なリスク評価なども行うことができるようになった。また、開発中の各種コンテンツ試作版の基盤データとして取り入れた。図 26 に以前デジタル化した北海道駒ヶ岳のハザードマップを WebGIS にしたものを見せる。この図を基に北海道駒ヶ岳の周辺自治体の防災担当者にヒアリングを行ったところ、こういった WebGIS での情報があることで、住民への周知や防災講演で活用できるといった意見があった。

本事業ではこれまでに合計 35 火山の GIS 版ハザードマップが得られており、内閣府の総合防災情報システムに取り込まれ火山ハザードの表示に活用されている。

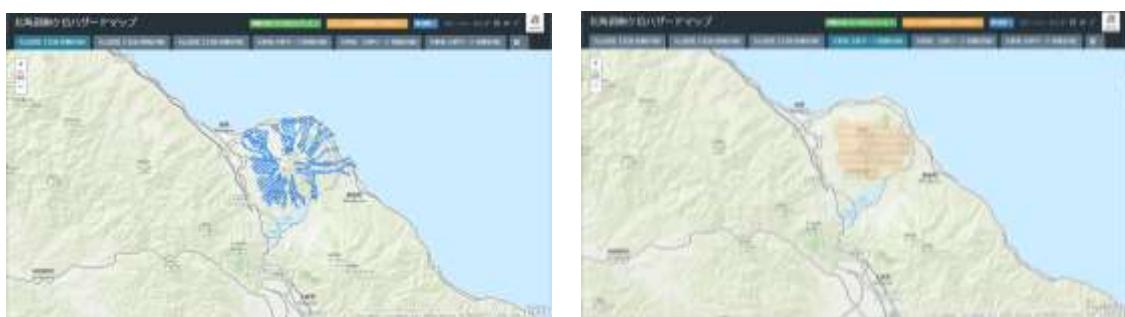


図 26. WebGIS 化した北海道駒ヶ岳のハザードマップ(左：土石流警戒区域 A、右：火災サージ警戒区域 A)

さらに、デジタル化した火山災害のハザードマップをリスク評価で利用しやすくするために、ハザードマップの情報を 250m メッシュでリサンプリングし、データベースの構築を行った。はじめにこれまでに整備したデジタル化ハザードマップについて、各火山のハザード情報を整理した（表 3）。次に整理したハザードからメッシュデータで整備するにあたり、ハザードの有無を割り与える配列（12 柄）を定義し、250m メッシュの中心点における各火山ハザードの有無（無：0 有：1）として、GIS を使いハザード情報のデータベースを構築した（図 27）。例えば、表 4 にから伊達市におけるハザードは北海道駒ヶ岳、有珠山、樽前山の列で、降灰ハザードを示す配列番号 5 に有：1 があることから、3 つの火山に由来する降灰の影響があることが分かる。

これにより、既存の地震ハザード情報が 250m メッシュデータ¹⁶⁾で整備されているため、今回作成した 250m メッシュデータと組み合わせることで地震災害も考慮したマルチハザードの評価を行うことができる。したがって、自治体の防災担当者は、通常、火山災害以外にも地震や風水害と災害対応も行う必要があることから、これらの災害に関して共通の情報基盤を用意しておくことは、今後、マルチハザードの災害対応や対策を検討するうえで重要なデータとなる。

表 3. ハザードマップで示されている各火山のハザードと配列位置（抜粋）

配列番号	01	02	06	07	08	03	10	04	05	09	11	13	12	
常時観測火山	想定タイプ	想定火口	火碎流・火 熱風	火山泥流	融雪型火山 泥流	溶岩ドーム	溶岩流	火山ガス	噴石	降灰	土石流等	岩雨なだれ (斜面崩壊)	天然ダムに よる水没	巨大地滑り・山 崩れ
アトサブリ		2000	2001		2001		2001		2000		2000			噴石・降灰10cm以上 1、噴石 : 2
越後栗岳	小さな噴火	2012				2012				2012	2012	2012		
大きな噴火	2012	2012			2012		2012		2012	2012	2012			降灰50cm:1、10cm:2、火碎サージ:1、火 碎流:2
大雪山	なし													
十勝岳	グランド火	2010	2010			2010		2010		2010	2010	2010		
樽前山	中・大規模	2016	2016			2016				2016	2016			噴出岩塊・噴石、降雨型泥流: 泥流
俱多楽	2014				2014					2014	2014			
有珠山	山頂	2002	2002	1995 (2002±	2002				2002	2002	2002			火碎サージ:1、火碎流:2
	山麓	2002							2002					
北海道駒ヶ岳	危険区域をA	2010	2010		2010				2010	2010	2010	2010		
	小規模	2001							2001		2001			
恵山	中規模	2001	2001		2001					2001				火碎流1:1、2:2、3:3
	大規模	2001	2001											
岩木山	水蒸気噴火	2015		2015					2015	2015				
	マグマ噴火	2015	2015			2015	2015	2002		2015	2015	2015		
八甲田山 (大 岳)	小規模	2014								2014				
	中規模	2014	2014		2014					2014	2014	2014		
	大規模	2014	2014		2014					2014	2014	2014		
八甲田山 (地 獄沼)	小規模	2014		2014						2014	2014	2014		
	中規模	2014		2014						2014	2014	2014		
十和田	小規模	2018								2018	2018			
	中規模	2018	2018							2018	2018			
	大規模	2018	2018		2018	2018								
秋田焼山	小規模		2018	2018		2018	2018		2018		2018	2018		
	中規模	2018	2018		2018	2018			2018		2018	2018		
	大規模	2018	2018		2018	2018			2018		2018	2018		
岩手山	水蒸気噴火								1998	1998	1998	1998		
	マグマ噴火	1998	1998		1998				1998	1998	1998	1998		



図 27. 北海道における 250m メッシュで整備したハザード情報(左: 北海道における 250m メッシュの降灰ハザード、右: 伊達市役所におけるハザード情報の表示例)

表 4. 整備した北海道市役所におけるリスク情報の表示例

市役所等	CODE	esan	esan_chuk	esanDai	Hkomagatake	usu	usu_sanroku	TarumaeSho	TarumaeChu	TarumaoDai	Gutar
函館市役所	6240552813	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000
北斗市役所	6240558233	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000
室蘭市役所	6340377743	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000
伊達市役所	6340566842	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00001000000000	00001000000000	00000000000000	00000000000000	00001000000000	00000000000000
洞爺湖町役場	6340666111	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00001000000000	00001000000000	00000000000000	00000000000000	00001000000000	00000000000000
豊別市役所	6341409832	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00001000000000	00000000000000
苦小牧市役所	6341746812	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00000000000000	00001010100000	00000000000000

5) 次世代火山研究推進事業の周知広報活動

平成 31 年（令和元年）5 月に千葉県で開催された JpGU Meeting 2019（日本地球惑星科学連合 2019 年大会）、同年 9 月に兵庫県で開催された 2019 年度日本火山学会秋季大会、同年 7 月にカナダのモントリオールで開催された IUGG 2019（国際測地学・地球物理学連合総会）の 3 つの学会において、次世代火山研究推進事業の周知広報を目的としたブース展示を行い、学会に参加した多くの研究者に本プロジェクトの成果を紹介した（写真 4）。



写真 4. IUGG2019 におけるブース展示。

査読付き論文である *Journal of Disaster Research* で本プロジェクトの研究成果を集めた特集号を企画し、2 卷（Vol. 14, No. 4 と No. 5）に渡って公開された（写真 5）。

本プロジェクトを紹介する動画とパンフレット・リーフレットの英語版を作成した。動画は youtube や上記学会のブースで公開され、パンフレット・リーフレットも上記ブースで配布された（写真 5）。



写真 5. *Journal of Disaster Research* の特集号（Vol. 14, No. 4）と、英語版のパンフレットとリーフレット。

また、本プロジェクトを紹介するホームページ¹⁷⁾を開設し、上記パンフレットやリーフレットをダウンロードすることが可能で、上記動画を閲覧することもできる。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 31 年度の当初目標である以下の 4 点については、ほぼ達成できた。

- ・常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化
- ・周知啓発教育用コンテンツ試作版の開発
- ・降灰被害予測コンテンツ試作版の開発
- ・避難・救助支援コンテンツ試作版の開発

今年度も常時観測火山 50 火山の内 5 火山における紙ベースのハザードマップをデジタル化（シェープ形式へ変換）し、WebGIS 等で表示することが可能になった。これで合計 35 火山の GIS 版ハザードマップが得られ、一部は開発中の各種コンテンツ試作版に取り入れられた。今後は、引き続き残っているハザードマップのデジタル化を進める。

前年度までに実施されたヒアリング調査やアンケート調査の結果に基づき、自治体防災担当者からのニーズに対応ための、周知啓発教育用コンテンツ試作版として「火山防災ポータルサイト」を開設した。本コンテンツには、前年度までに収集した 284 件の火山に関する情報素材が含まれ、検索機能も付されるなど容易にアクセスが可能となっている。また、火山災害や火山防災について学ぶことのできるテキストや研修プログラムの一つである演習事例なども含まれる。今年度から複数の自治体防災担当者に実際に試用してもらい、使用時の感想や要望等の収集を行った。今後はより多くの自治体防災担当者に試用してもらい、収集された感想や要望等を反映させる形でコンテンツの高度化を図る。

前年度までに実施された降灰影響評価実験の結果に基づき、都市部の降灰予測を考慮した対策に役立てるために、降灰被害予測コンテンツ試作版を開発した。本コンテンツでは、実験の結果に基づいて設定された建築物の機能継続に影響を及ぼす降灰深の閾値を、降灰シミュレーションの結果得られる火山灰分布と併せて GIS 上で表示することで被害予測が可能となる。今年度はこの閾値の設定に関連して、降灰量に対する木造建築物の屋根の安全性についても評価を行った。今後は、降灰深の閾値設定に必要な新たな降灰実験を実施する。また、本コンテンツから出力される被害予測情報のユーザーへの提供の仕方についても検討を進める。

前年度に引き続き今年度も登山者動向把握実験（富士山チャレンジ）に参加し、富士山における登山者の動態データを取得した。また取得した動態データをインプットデータとして地図上で可視化するツール（避難・救助支援コンテンツ試作版）を開発した。今後は那須岳で登山者動向把握実験を実施し、その成果をインプットデータとして可視化ツールを自治体防災担当者に実際に試用してもらい、避難計画の作成や避難施設の設置の参考にするなど、本コンテンツを事前防災に活用していく。

開発中の情報ツール（各コンテンツ試作版）を試用してもらう自治体数を増やし、より多くの意見や要望等を収集し、それらを反映させ、3 つのコンテンツの高度化を図っていく。

(e) 引用文献

- 1) 大島弘光・他, 準リアルタイム火山防災情報表示システムの開発, 日本火山学会, P-130, 2017
- 2) UNICALE, <https://www.unicale.com/>
- 3) 内閣府(防災担当), 富士山ハザードマップ検討委員会中間報告, http://www.bousai.go.jp/kazan/fujisan/h_map/kentou/interim_report/index.html, 2014
- 4) 東京電力パワーグリッド, 当社における系統情報について, <https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/system/> (2020/1/15 確認)
- 5) 内閣府 大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ: 降灰による影響の想定の考え方(ライフライン/建物・設備分野)案, 1-19, 2019
- 6) Wardman, J.B., Wilson, T.M., Bodger, P.S., Cole, J.W. and Stewart, C.: Potential impacts from tephra fall to electric power systems: a review and mitigation strategies, Bull. Volcanol., 74 (10), 2221-2241, 2012
- 7) 追川政人, 横川和治: 浅間山噴火による降灰の分析と電車線設備への影響, 鉄道と電気技術, 16, 5, 45-48, 2005
- 8) 川畠秋馬, 入佐俊幸, 上妻生朗: 火山灰汚損がいしの漏れ電流特性, 電気学論文集, B, 115, 956-963, 1995
- 9) Wilson, G., Wilson, T.M., Deligne, N.I. and Cole, J.W.: Review Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 286, 148-182, 2014
- 10) Zorn, E. and Walter, T. R.: Influence of volcanic tephra on photovoltaic (PV)-modules: an experimental study with application to the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland, Journal of Applied Volcanology, 5:2, 2016
- 11) Blong, R.J.: Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions, Academic Press Australia, 424 pp, 1984
- 12) 中央防災会議 防災対策実行会議 大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ: 大規模噴火時の広域降灰対策について(報告案), 2020.3
- 13) 内閣府(防災担当): 活火山における退避壕等の充実に向けた手引き, 1-111, 2015
- 14) Magill, C, Wilson, T.M. and Okada, T.: Observations of ashfall impacts from the 2011 Shinmoedake eruption, Japan, Earth Planets Space, 65 (6), 677-698, 2013
- 15) 浅間火山防災協議会: 浅間火山のハザードマップの解説, 2018
- 16) 防災科学技術研究所, 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 17) 次世代火山研究推進事業の紹介ホームページ(英語版), <http://vivaweb2.bosai.go.jp/kazan-pj/next-generation-volcano-pj-2019-jun>

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

論文（査読あり）

1. Nakada, S., Miyagi, Y., Kubo, T., and Fujita, E, Conveying volcano information effectively to stakeholders – a new project for promotion of next generation volcano research, J. Disaster Res., Vol. 14, pp623-629, 2019

学会発表

1. 宮城洋介, 中田節也, 吉本充宏, 久保智弘, 本多亮, 堀内佑紀, 田中義朗, 2019, 噴火発生時の避難や救助活動を支援するコンテンツの開発, 地球惑星科学連合 2019 大会(千葉市), 2019/5/27
2. 河野裕希, 久保智弘, 宮城洋介, 棚田俊收, 2019, デジタル版ハザードマップデータベースの構築とその利活用について, 地球惑星科学連合 2019 大会(千葉市), 2019/5/27(ポスター)
3. 宮城洋介, 中田節也, 宮村正光, 吉本充宏, 久保智弘, 本多亮, 堀内佑紀, 野畠有秀, 大塚清敏, 諏訪仁, 2019, 次世代火山研究推進事業における「対策研究」の進捗, 日本火山学会, 2019/9/27
4. 久保智弘, 宮城洋介, 中田節也, 藤田英輔, 宮村正光, 2019, 降灰被害予測コンテンツの開発に関する研究, 地球惑星科学連合大会, SVC35-07, 2019. 5
5. Kae Tsunematsu, Eisuke Fujita, Tomohiro Kubo, Yousuke Miyagi, Mitsuhiko Yoshimoto, Ryo Honda and Yoshiro Tanaka, 2019, Ballistic Risk Assessment of Climber Movement on Mountains, International Union of Geodesy and Geophysics, 2019.7
6. Setsuya Nakada, Yousuke Miyagi, Tomohiro Kubo and Eisuke Fujita, 2019, How Should Effective Volcanic Information Conveyance to Stakeholders be? -New Project for Next Generation Volcano Research Promotion-, International Union of Geodesy and Geophysics, 2019.7
7. Setsuya Nakada, Eisuke Fujita and Yousuke Miyagi, 2019, Aims and progress of the current national project for the next generation volcano research, conscious of crisis response, VOBP 4 workshop, 2019.11
8. 久保智弘, 野畠有秀, 諏訪仁, 大塚清敏, 宮村正光, 2019, 火山噴火における降灰を対象とした被害予測コンテンツ試作版の開発, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), 11087, pp.189-190, 2019.9
9. 大塚清敏, 野畠有秀, 諏訪仁, 久保智弘, 宮村正光, 2019, 建物空調の冷却塔を対象とした降灰実験 その 1 実験概要, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), 20015, pp.29-30, 2019.9
10. 野畠有秀, 大塚清敏, 諏訪仁, 久保智弘, 宮村正光, 2019, 建物空調の冷却塔を対象とした降灰実験 その 2 実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), 20016, pp.31-32, 2019.9
11. 諏訪仁, 大塚清敏, 野畠有秀, 久保智弘, 宮村正光, 宮城洋介, 2019, 空調用室外機の降灰実験, JCOSSAR2019, OS1-9B, 2019.10

12. 久保智弘, 吉本充宏, 本多亮, 堀内佑紀, 宮城洋介, 2019, 自治体防災担当者を対象とした 試作版周知啓発用コンテンツの開発について, 日本火山学会講演予稿集, B3-06, 2019.9
13. 久保智弘, 宮城洋介, 河野裕希, 2019, 火山ハザードマップデータベースの構築について, 日本火山学会講演予稿集, P105, 2019.9
14. 吉本充宏, 本多亮, 久保智弘, 宮城洋介, 田中義朗, 福崎昭伸, 安永隆一, 畠中雅弘, 2019, 富士山における登山者把握の取組 “富士山チャレンジ”, 日本火山学会講演予稿集, P106, 2019.9

その他の講演会・展示会・シンポジウム等

1. 宮城洋介、那須町における防災、那須中央中学校土曜授業（防災教育）、2019/9/7
2. 吉本充宏, 火山としての富士山、その特異性, 一般, 山梨県富士山科学研究所, 2019/4/13
3. 吉本充宏, 富士山の噴火と万が一に備えて, 勝山小学校 P T A, 勝山小学校, 2019/4/18
4. 吉本充宏, 富士山噴火の特徴と富士山ハザードマップ改定における検討事項について, 山梨県火山防災担当者, 山梨県富士山科学研究所, 2019/5/15
5. 吉本充宏, 富士山の火山噴火とその災害, 山梨県警, 山梨県富士山科学研究所, 2019/5/23
6. 吉本充宏, 北海道駒ヶ岳火山の噴火と災害, JICA 中南米火山担当者研修, 北海道森町, 2019/6/11
7. 吉本充宏, 火山噴火とその災害北海道駒ヶ岳の将来の噴火に備えて, 北海道駒ヶ岳火山防災協議会「駒ヶ岳火山防災講演会」, 北海道鹿部町, 2019/6/11
8. 吉本充宏, "富士山噴火模擬実験、富士山が噴火したときの行動を考えよう！", 勝山小学校 5 年生, 勝山小学校, 2019/6/26
9. 吉本充宏, 富士山の噴火と災害, 旅行医学会サマー医学セミナー, 東京（お茶の水ソラシティカンファレンスセンター）, 2019/7/6
10. 吉本充宏, 富士山の噴火と災害, 旅行医学会サマー医学セミナー, 大阪（梅田スカイビルタ）, 2019/7/7
11. 吉本充宏, "「富士山の火山噴火とその災害」噴火したらあなたはどうしますか？", 富士宮・富士市民, 富士宮市役所, 2019/7/10
12. 吉本充宏, 火山噴火と災害-活火山とどう向き合うか-, 御嶽山火山マイスター及び一般市民, 長野県木曽町役場三岳支所, 2019/7/20
13. 吉本充宏, 北海道駒ヶ岳の噴火とその災害, 北海道鹿部中学校教諭, 北海道鹿部中学校, 2019/10/3
14. 吉本充宏, 富士山の災害, 富士山世界遺産国民会議評議員, 富士山世界遺産国民会議虎ノ門オフィス, 2019/10/29
15. 吉本充宏, 富士山の火山噴火とその災害, 茅ヶ崎市堤上下自主防災会役員, 山梨県富士山科学研究所, 2019/11/2
16. 吉本充宏, 富士山噴火模擬実験-富士山が噴火したときの行動を考えよう！-, 勝山小学校 6 年生・保護者, 勝山小学校, 2019/11/5

17. 本多亮、火山防災について、山梨県富士山科学研究所、磯子消防団、2019/11/10
18. 吉本充宏、火山としての富士山、富士吉田市内企業経営者、富士急ハイランドリゾートホテル、2019/11/18
19. 吉本充宏、富士山が噴火したらどうする？～火山災害と防災教育～、南都留地区教員、南都留教育会館、2019/11/21

マスメディア（テレビ、新聞等）

1. 4/18、山梨日日新聞 朝刊、「富士山チャレンジ 2017」でえら得た登山者の動向データなどについての解説
2. 5/28、山梨日日新聞 朝刊、富士山研の宝永山についての調査についての解説
3. 6/3、UTY ニュースの星 18:15～、富士山の観光と防災についての解説
4. 6/15、函館新聞 朝刊、北海道鹿部町での出張講義 火山防災講演会について
5. 6/18、朝日新聞 朝刊、北海道鹿部町での出張講義 火山防災講演会について
6. 6/24、朝日新聞 朝刊、特集記事「山登り 噴火時の備えを」において避難についての解説
7. 7/12、岳南朝日新聞 朝刊、静岡県富士宮市での出張講義 「富士山の火山噴火とその災害-噴火したらあなたはどうしますか？」について
8. 8/20、UTY ニュースの星 18:15～、ハザードマップの見直しについての解説（雁ノ穴）
9. 11/26、山梨日日新聞 朝刊、特集記事「守る命」において富士山噴火についての解説
10. 12/30、UTY 10:00～、噴火に備える-富士山防災対策の今
11. 1/15、防災プラス Vol.10, No.226、「火山災害-柔軟に対応できる心構えと備えに向けて-」について寄稿
12. 1/16、山梨日日新聞 週刊「こびっと」、特集「美しい富士山なぜこの形に？」において富士山の成り立ちについて解説

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

- 1)特許出願
なし
- 2)ソフトウェア開発
なし
- 3) 仕様・標準等の策定
なし

(3) 令和2年度業務計画案

(a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

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

(b) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

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

また、本コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、一般住民及び自治体を対象とした大規模降灰に関するアンケート調査を実施する。国内では鹿児島市を、国外ではフィリピンを対象地域とする。

(c) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

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

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

4. 活動報告

4.1 会議録

- ・課題 D 平成 31 年度全体会議

日時：令和 2 年 2 月 6 日

場所：フクラシア東京

内容：各サブテーマの進捗状況と今年度計画、サブテーマ間連携、課題間連携について議論を行った。また次年度の計画についても共有を図った。

4.2 対外的発表

- ・次世代火山研究推進事業平成 31 年度研究集会

日時：令和 2 年 2 月 15 日

場所：東京大学地震研究所

内容：次世代火山研究推進事業平成 31 年度研究集会において各課題の成果と到達目標について発表した。

- ・次世代火山プロジェクト総合フォーラム

日時：令和 2 年 2 月 16 日

場所：一橋講堂

内容：次世代火山プロジェクト総合フォーラムにおいて、各課題の概要と成果についてポスター発表を行った。

5. むすび

本研究課題では、火山災害に対応するため、リアルタイムで噴火の状況を把握するとともに、そのデータを迅速に解析し、その後の推移予測とハザード・被害評価、さらには対策に資する情報の提供までを一連で行う技術を開発している。平成31年度には、平成28年度に開始した次世代火山研究推進事業の中間評価を受けた。そこでは、本課題については、SとA評価であり、所期の計画目標に達しており、妥当な成果を得ている（サブテーマ2については所期目標を上回っている）とされた。また、各課題の実施手法も妥当であり、今後も取組に発展性が期待されるとされた。

平成31年度は、サブテーマ1においては、伊豆大島において基準点を設置したUAV撮影を行い、画像から作成した3D地形モデルの位置精度が向上することを明らかにした。また、2017年度に撮影した画像に仮想基準点を設置して、2019年度撮影の地形との比較ができるようになった。さらに、熱赤外画像から溶岩流の分布範囲等の把握や、取得画像から機械学習等で噴石などによる噴火ハザードの認識が可能であることが示された。画像データについては、課題Aへデータ一元化システムへの引き渡し（リンク）が図られた。今後、中間評価で指摘されたように、データ解析時間のさらなる短縮に向けた方策や、ドローン運用に係る制約への対応策についても検討し、研究開発を進めていくことが期待される。

サブテーマ2においては、平成31年度の業務の柱は、「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速度化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」であった。即時把握技術開発においては、XバンドMPレーダー、GNSS、ライダーによるリモートセンシング観測を継続することにより、このマルチパラメータ観測システムが噴煙高度や降灰量等の即時的把握と噴煙量の推定に有効であることが示された。予測の高速度化技術においては、傾斜計及び地震計を改修することにより、噴火の発生、地震動や地盤変動データからの噴出率と噴煙高度の評価パラメータを高度化が図られた。予測の高精度化においては、火山体周辺の風速ベクトル分布を高分解能で把握することにより、降灰量の予測がさらに改善された。太陽光パネルの破壊実験のデータをサブテーマ3に引き渡した。サブテーマ2で開発する火山灰拡散予測システムは、これまでの火山観測において長い間培ってきた地震観測及び地盤変動観測データをもとに噴出率、さらに噴煙高度を推定し、火山灰拡散シミュレーションを行うことが最大の特徴があり、世界で唯一のシステムである。本サブテーマにおいては、次世代人材育成コンソーシアムだけでなく他分野の研究者との連携が図られた。今後、中間評価で指摘された、大規模噴火に備えた検討や、他の火山への一般化の可能性についても念頭に置いて技術開発を進めていくことが期待される。

サブテーマ3においては、常時観測火山5火山のハザードマップ・デジタル化を行いWebGIS等で表現活用することが可能になった。前年度までに調査した自治体防災担当者のニーズに対応するため、周知啓発教育用コンテンツ試作版「火山防災ポータルサイト」を開設した。また、前年度までに実施された降灰影響評価実験の結果に基づき、都市部の降灰予測を考慮した対策に役立てるために、降灰被害予測コンテンツ試作版を開発した。今後、被害を与える降灰深の閾値を、降灰シミュレーションの結果得られる火山灰分布と併せてGIS上で表示することで被害予測が可能となる。さらに、登山者動向把握実験に引き続き参加し、富士山における登山者の動態データを取得するとともに、その動態データを

地図上で可視化するツール（避難・救助支援コンテンツ試作版）を開発した。これらの情報コンテンツには、今後、サブテーマ2から提供される太陽光パネル破壊実験などの噴石落下実験の成果が組み入れられる予定である。今後、中間評価で指摘された、開発した情報ツールを利活用してもらえるよう、さらにニーズへの対応を含めて検討・工夫をする必要がある。

このように各サブテーマは、中間評価での指摘事項を踏まえてそれぞれ改善を試みており、平成31年度目標を概ね達成している。また、本課題内における関連や他課題および人材育成コンソーシアムとの連携についても配慮した研究がなされた。