次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト
次世代火山研究推進事業

課題Ｄ：火山災害対策技術の開発

令和４年度
成果報告書

令和５年５月
文部科学省研究開発局
国立研究開発法人　防災科学技術研究所

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が実施した令和４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　　グラビア
サブテーマ 1



図 1-1　有珠山での実証実験の様子

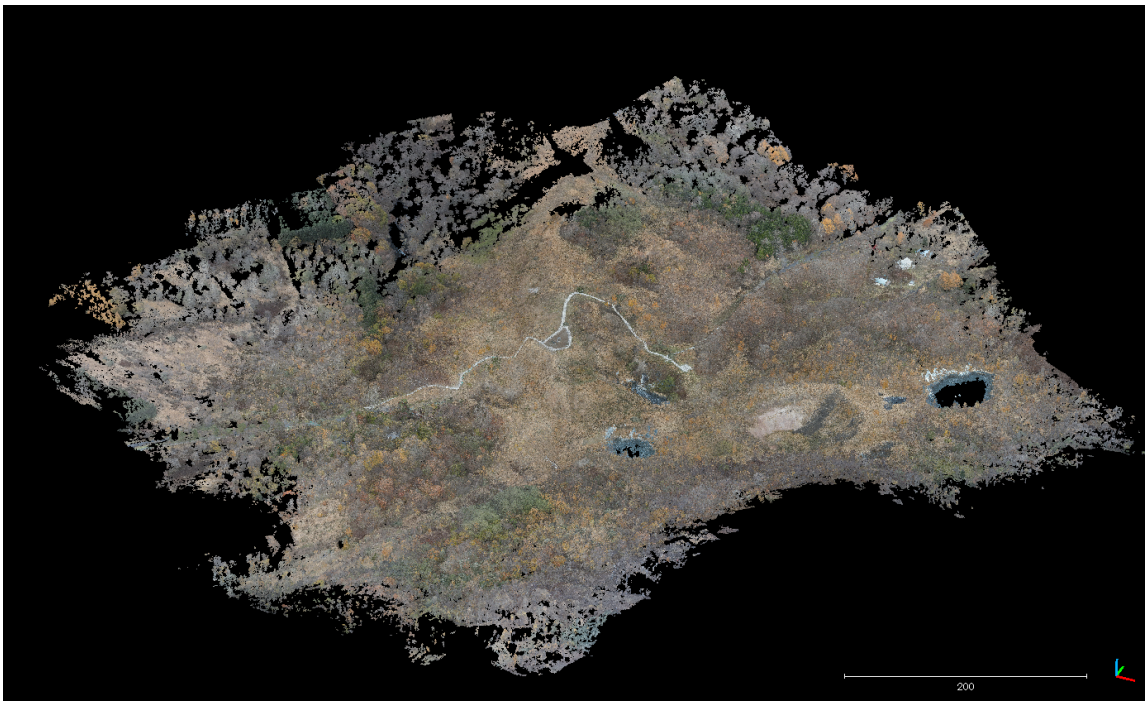


図 1-2　撮影した画像データから作成した点群データ

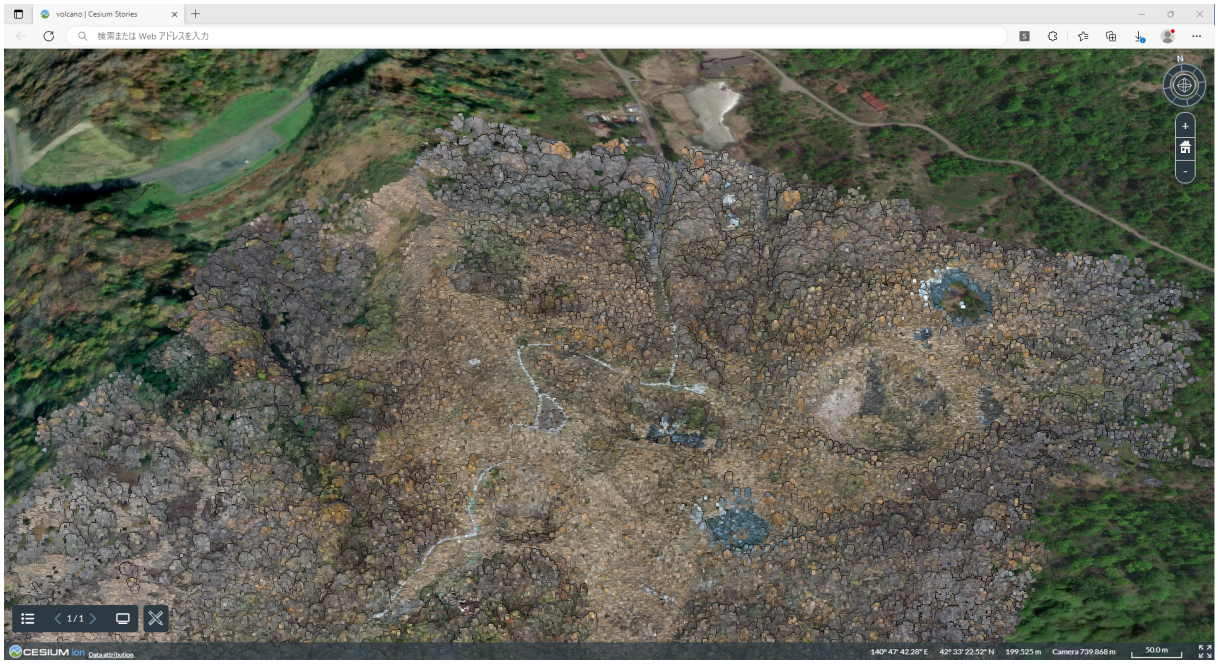


図 1-3　有珠山の三次元データを Web ブラウザ上に表示した例

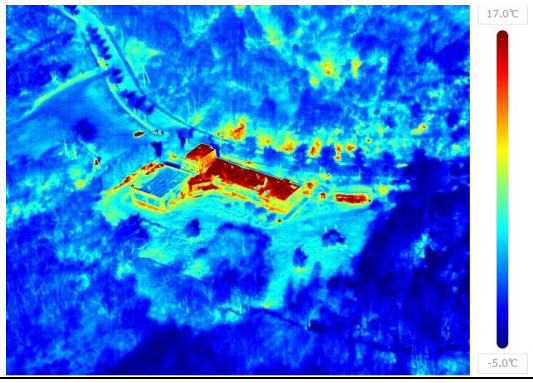
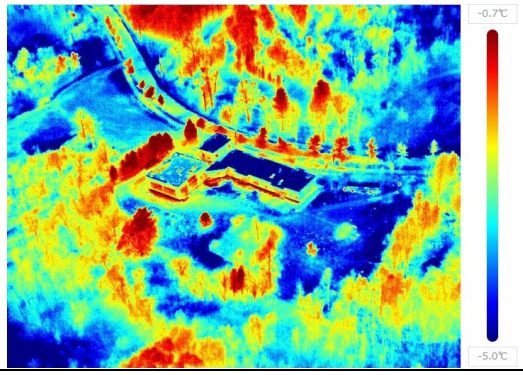
日中（可視画像）	日中（熱赤外画像）
	
夜間（可視画像）	**夜間（熱赤外画像）**
	

図 1-4　自動航行による撮影結果（建物の例）

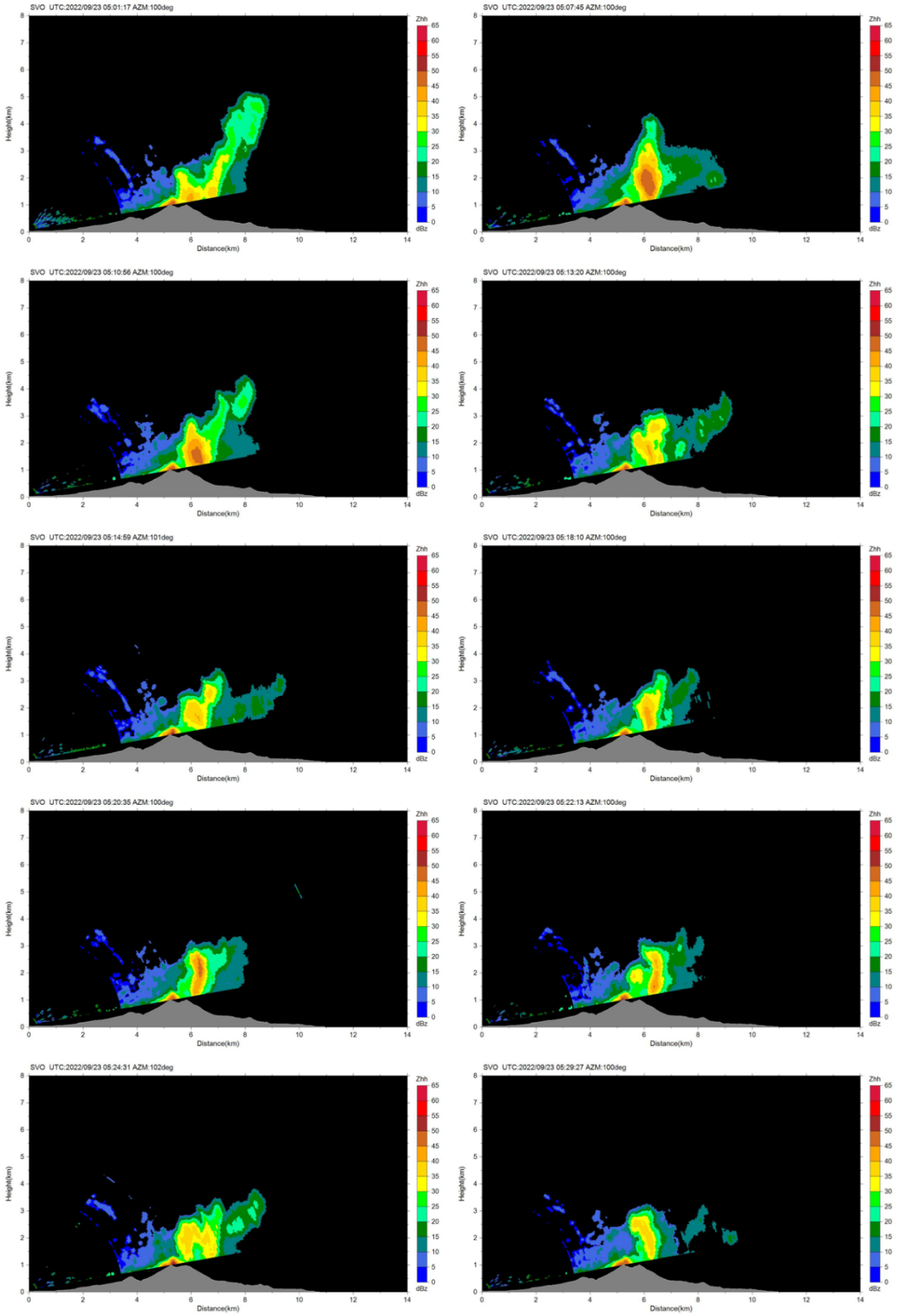


図 2-1　桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2022 年 9 月 23 日 14:01～14:58 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

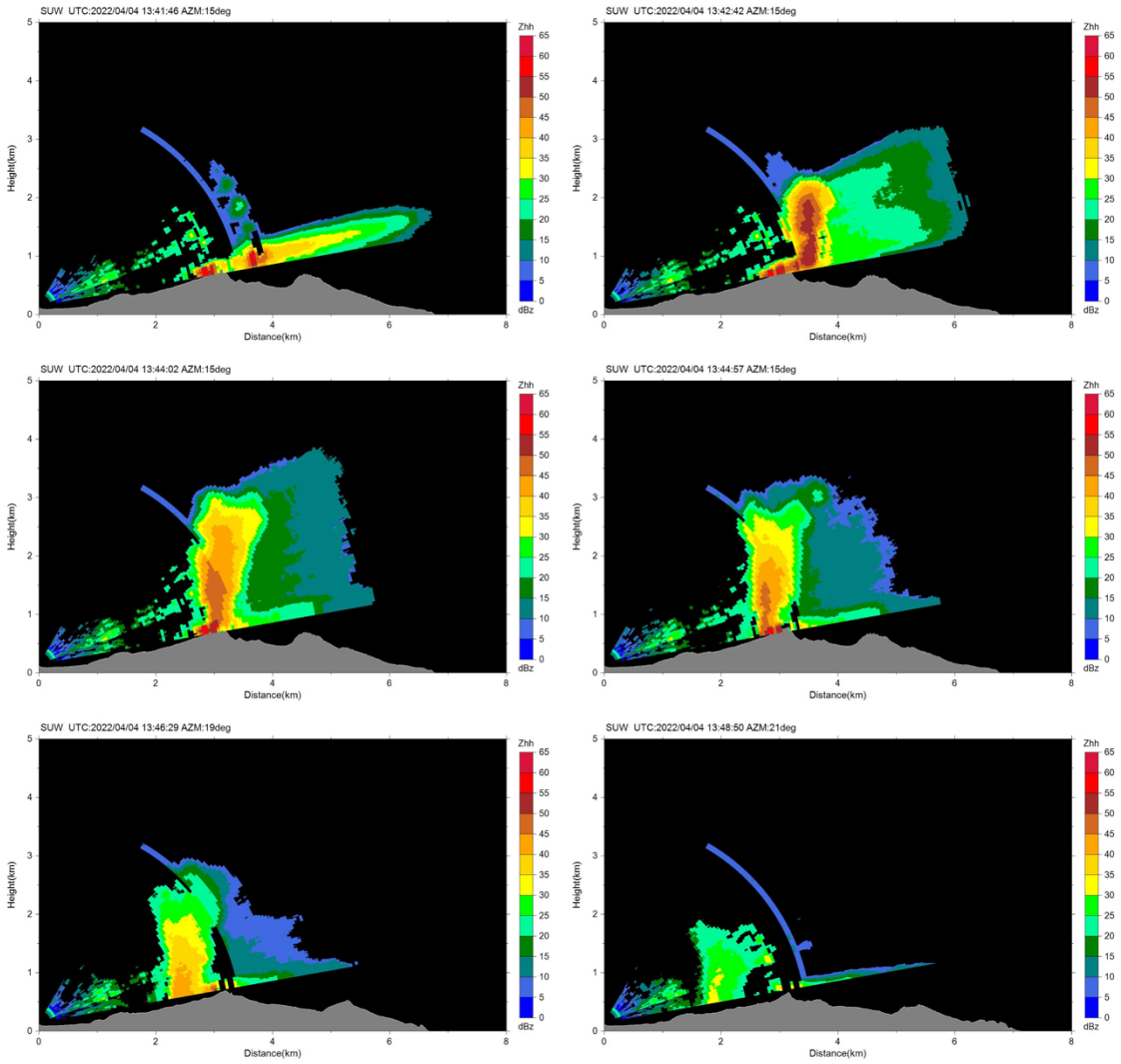


図 2-2　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2022 年 4 月 4 日 22:41～22:48 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。



図 2-3　2022 年 9 月 23 日噴火による降灰の様子。桜島島内の有村から東を望む。

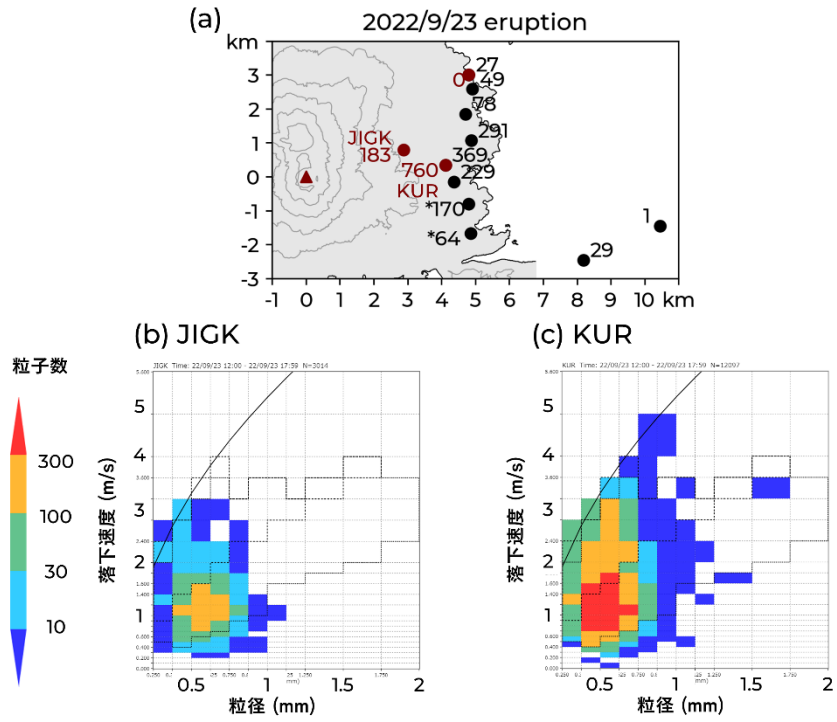


図 2-4　2022 年 9 月 23 日 13:35 にはじまった噴火による降灰の調査結果。(a) ディスドロメータとサンプル採取により得られた重量分布。単位はいずれも g/m^2。(b) JIGK、(c) KUR 観測点における、12：00 から 17：59 までの積算の粒径―落下速度区間ごとの粒子数分布。ディスドロメータ観測による。

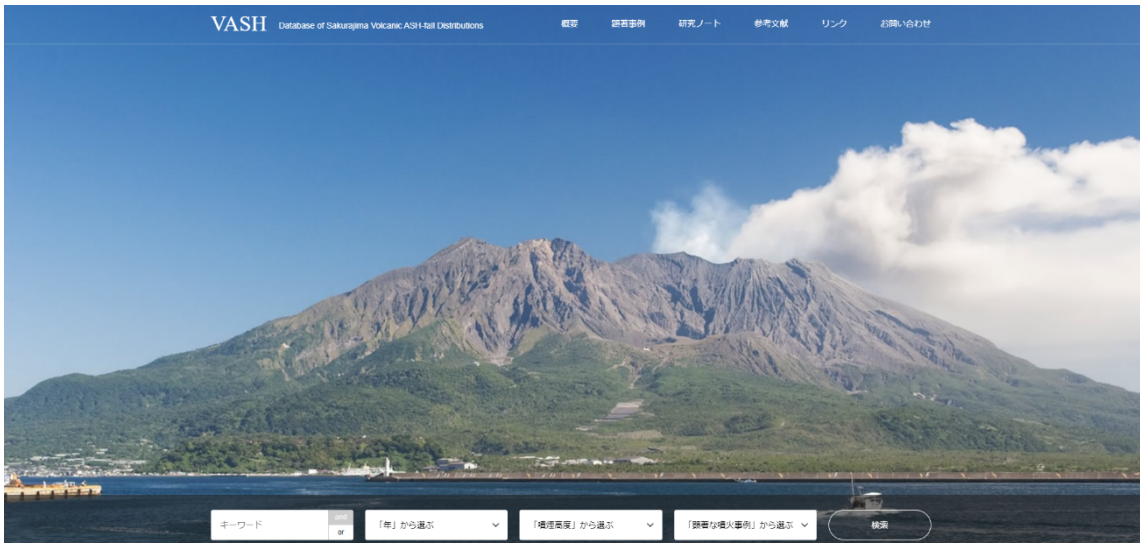


図 2-5　桜島降灰分布情報データベース（Database of Sakurajima Volcanic Ash Fall Distributions: VASH）のトップページ

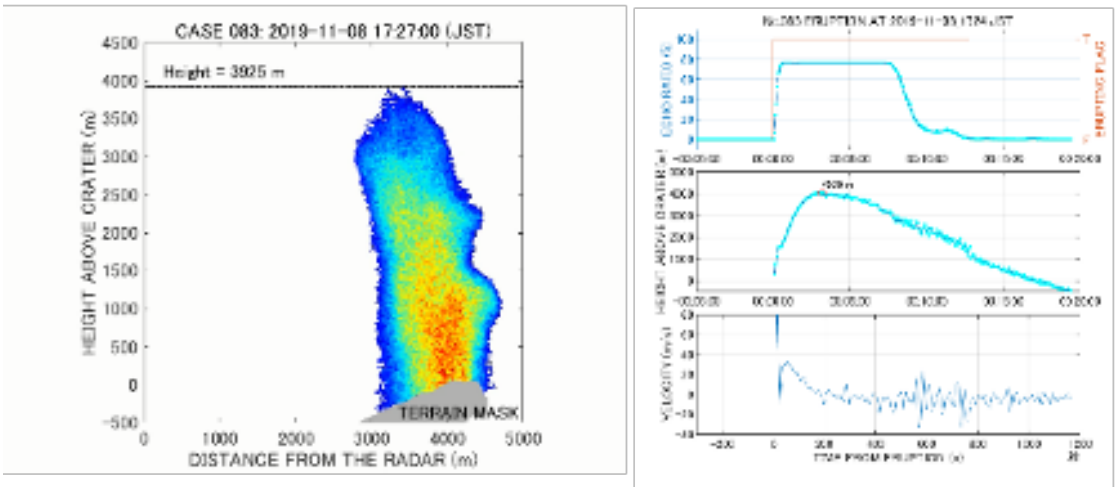


図 2-6　船舶レーダ観測から得られた２秒毎の噴煙柱の発達の様子

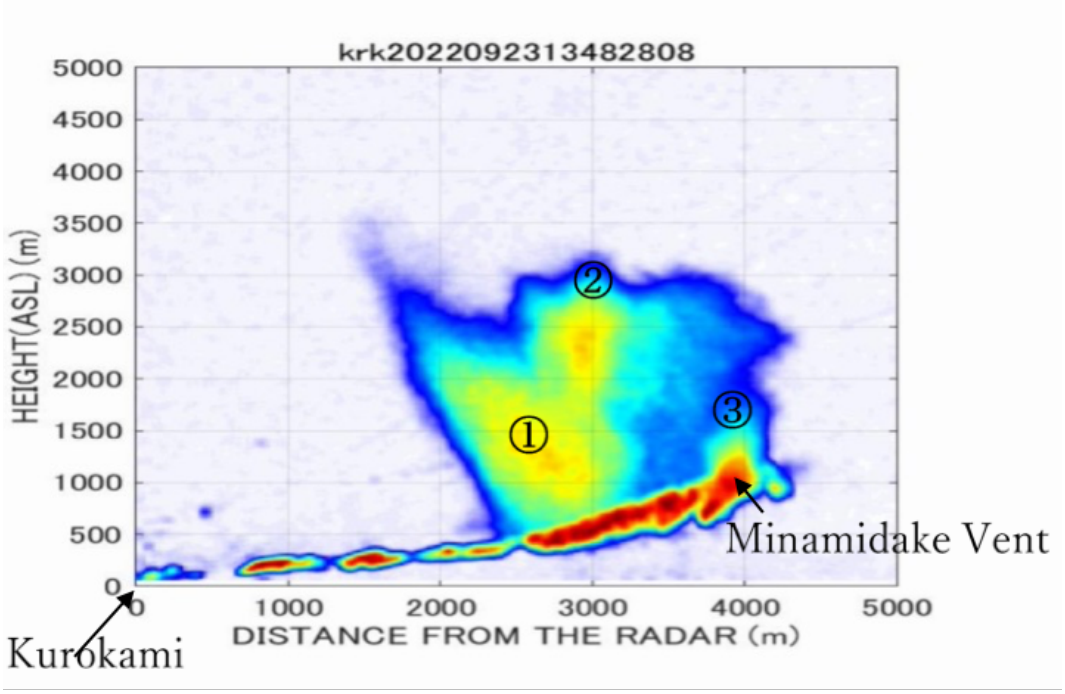


図 2-7　黒神に設置された X バンドマグネトロン船舶レーダの RHI 観測が捉えた複数回の噴火（2022 年 9 月 23 日桜島南岳火口噴火）。

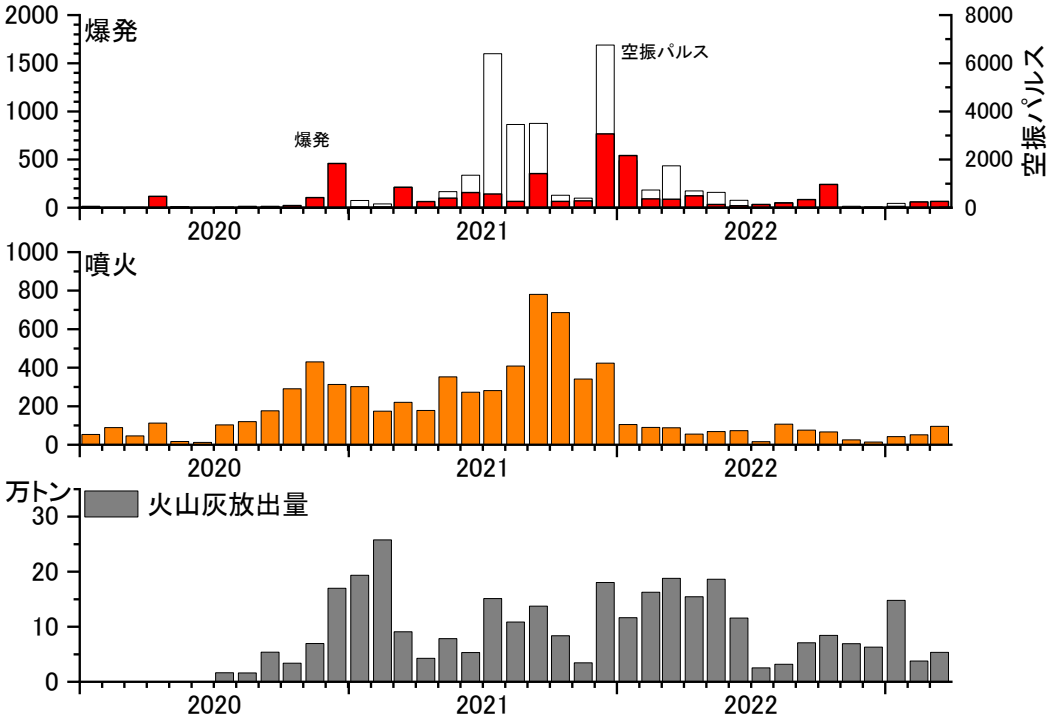


図 2-8　諏訪之瀬島の火山灰放出量推定値の推移。

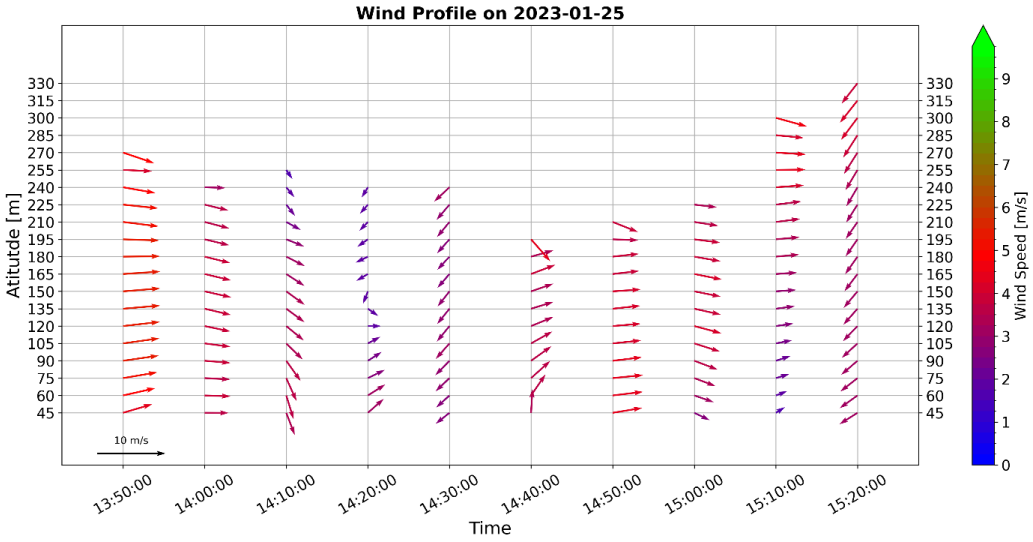
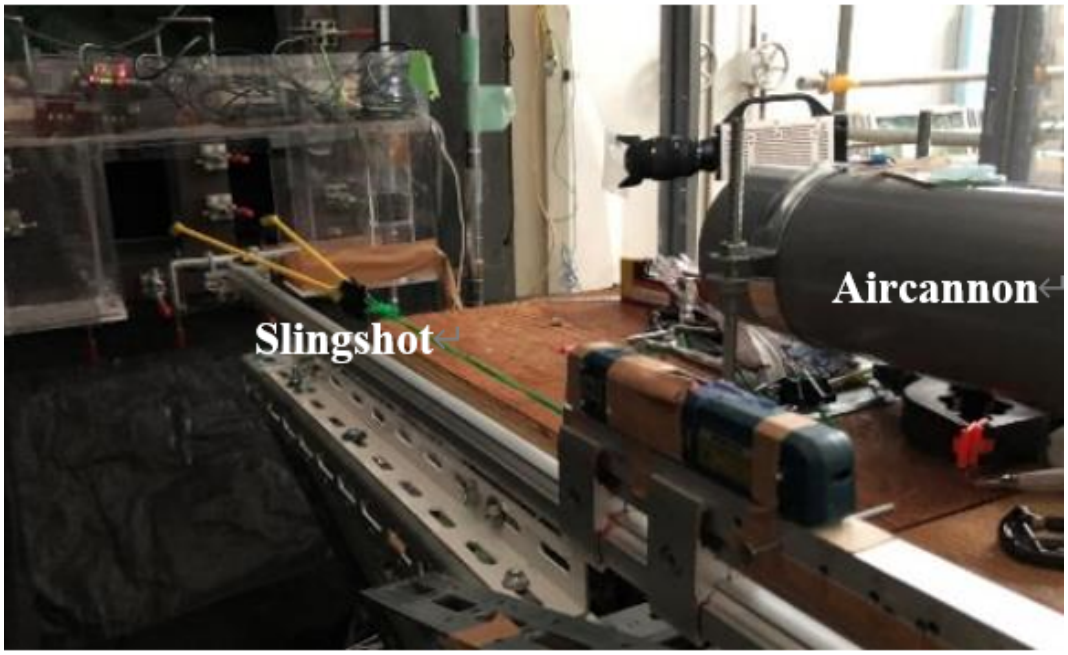


図 2-9　ドップラーライダーによる風速場プロファイルの時間変化。



衝撃試験装置の外観

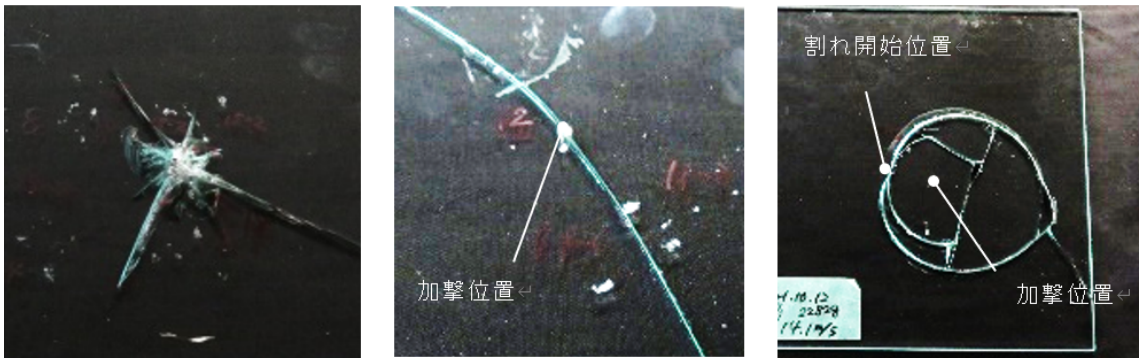


図 2-10　衝撃破壊実験によるフロートガラスの破損状況

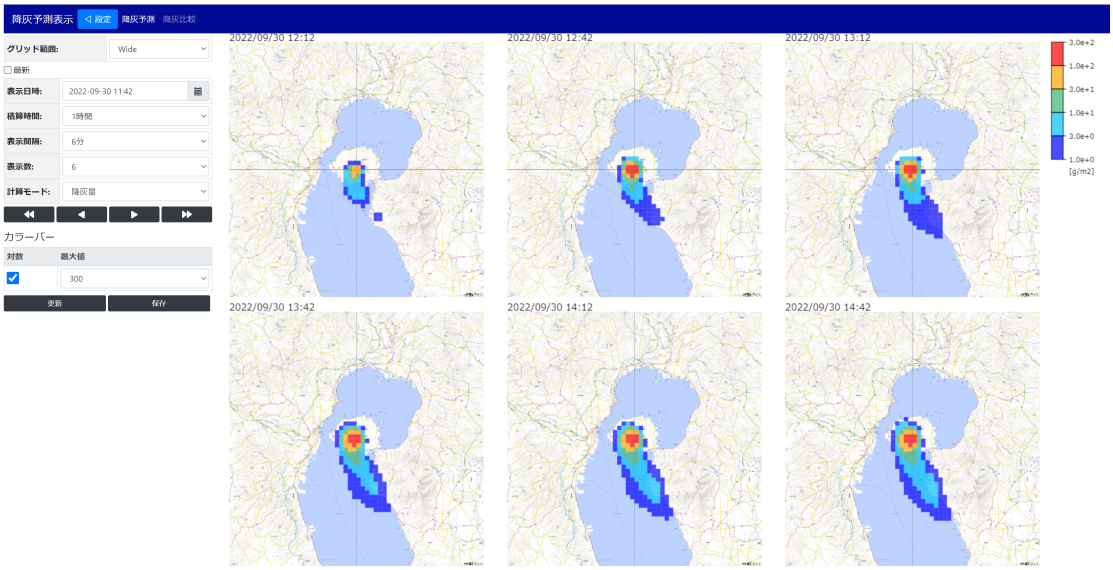


図 2-11　火山灰予測連続化シミュレータの表示画面

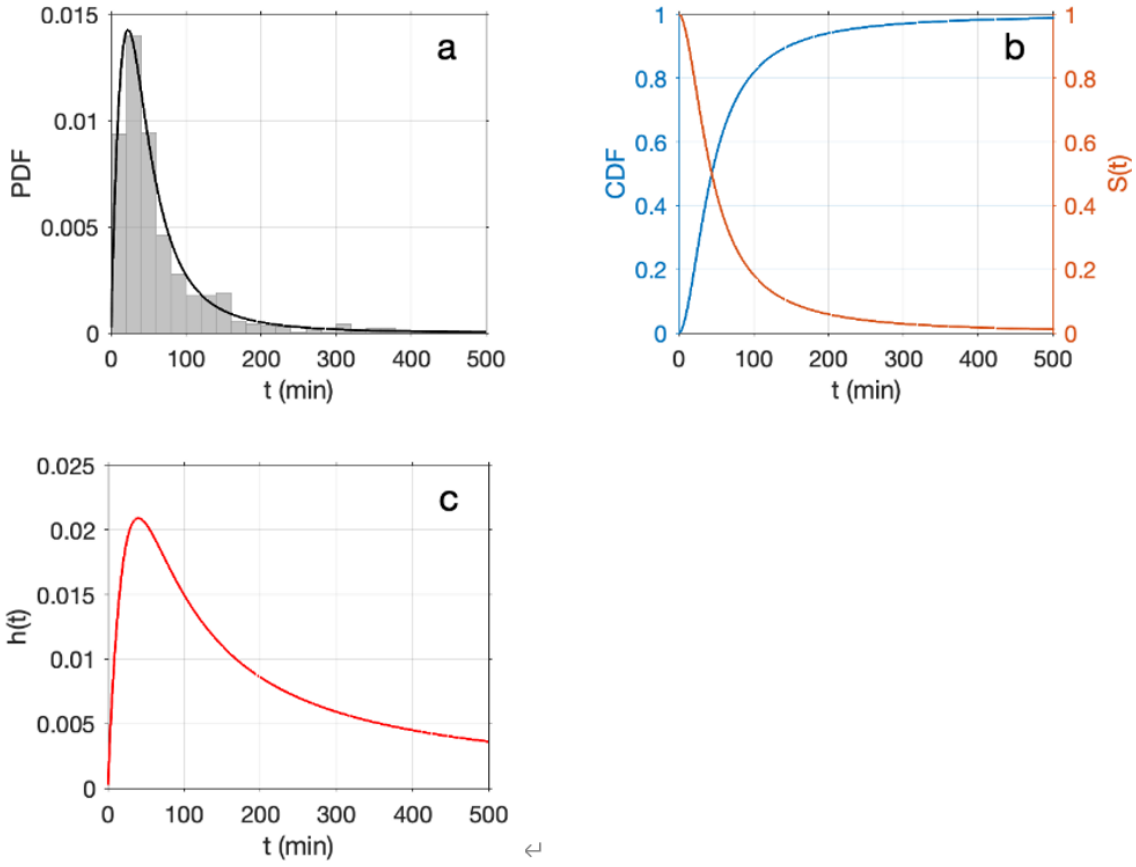


図 2-12　噴火時刻の確率的予測。a：膨張継続時間の確率密度関数。実データ（南岳）とモデル分布（Log-logistic 分布）。b：a から算出した累積分布関数（青）と生存関数（赤）。c：a と b から算出したハザード関数。



図 3-1　登別市（左）と上富良野町と美瑛町（右）へのヒアリング調査。周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化を行うため、2022 年 10 月と 2023 年 3 月に、北海道駒ケ岳、有珠山、樽前山、倶多楽、十勝岳周辺の自治体防災担当者にヒアリング調査を行った。

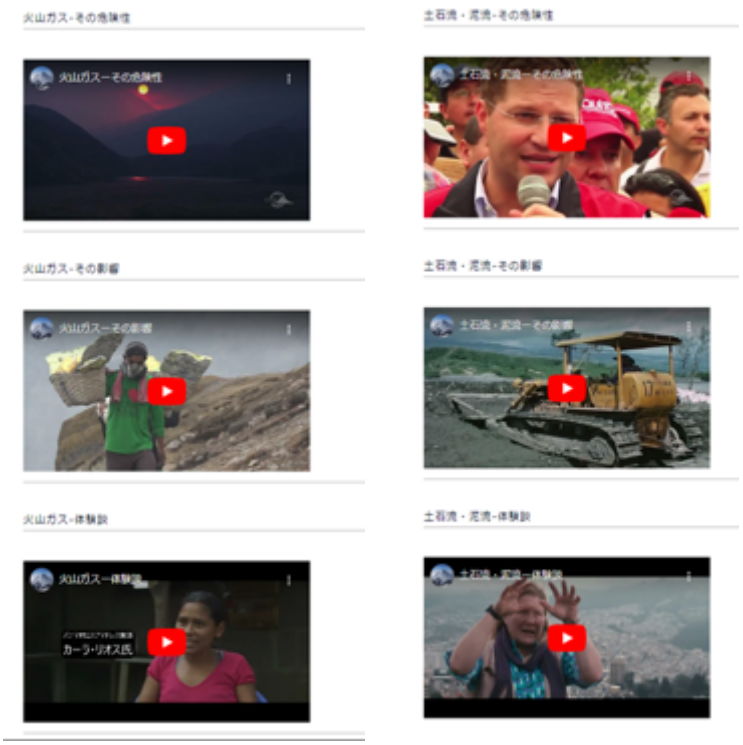
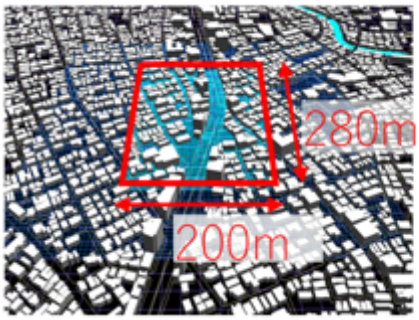


図 3-2　周知啓発教育用コンテンツのポータルサイトに、自治体担当者からのニーズが高い動画コンテンツを掲載した。Volfilm に掲載されている火山ガスや土石流・泥流などの火山現象に関する英語版動画を日本語化したもの。



計算領域構成

	東西	南北	水平解像度
領域1：	1.2km	1.2km	24m
領域2：	480m	480m	6m
領域3：	200m	280m	2m

領域高さ：500m
鉛直分解能 1m（z=0～40m）
高度40m以上は比例的に増加

図 3-3　降灰計算に用いた街区のモデル化（左）および計算領域構成（右）。2 階建て住宅程度の低層建物が密集し、その中に高さ 20～30m の中層建物が散在する東西 200m×南北 280m の範囲の実在の市街地を、東西―南北方向ともに水平分解能 2m でモデル化。

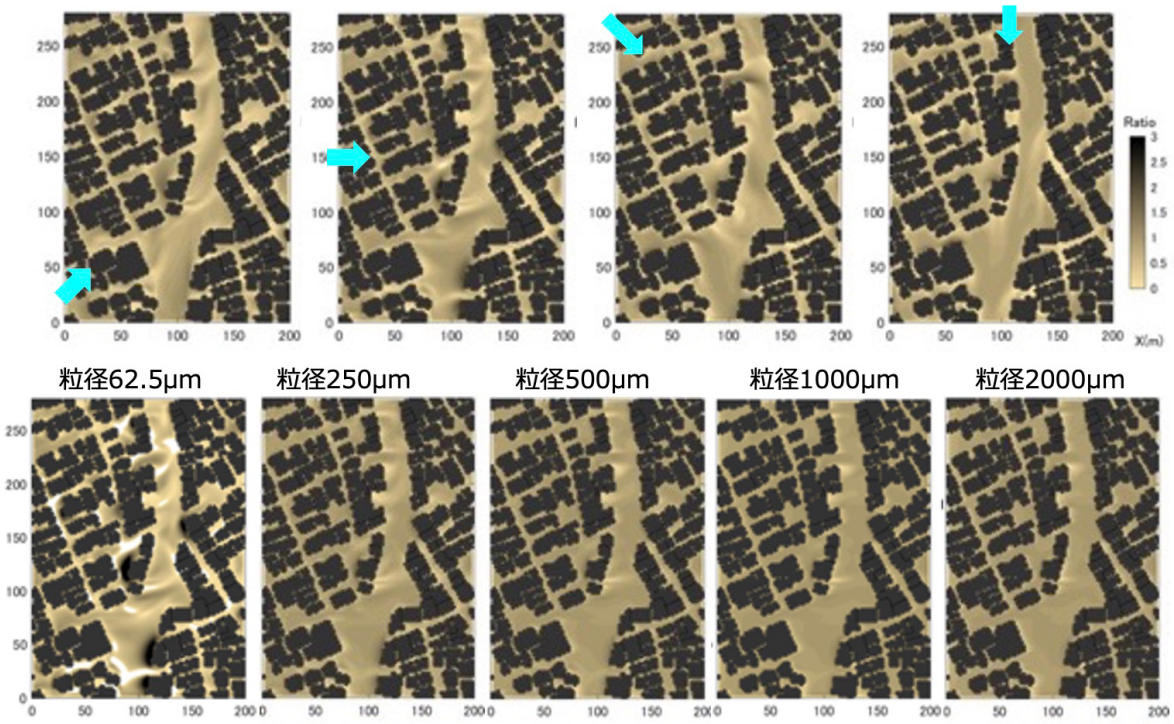


図 3-4　実在の市街地(図 3-3)での降灰密度に関するシミュレーション結果。上）粒径 125μm についての 8 つの風向に対する地表面における無次元降灰強度。下）粒径 62.5、250、500、1000、2000μm に対する無次元降灰強度

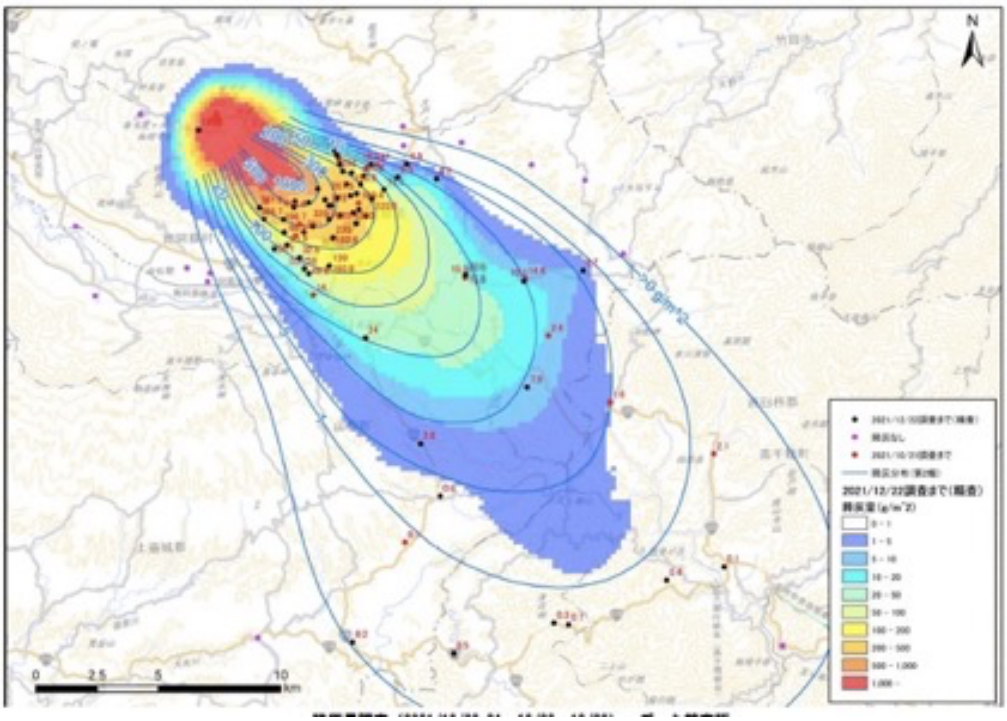


図 3-5　阿蘇火山 2021 年 10 月 20 日噴火の降灰データから自動的に描いた重量コンタ。薄青線は宮縁（2022 私信）によるコンタ。単位は g/m^2。本課題では「R による等層厚線図作成マニュアル」を作成した。



図 3-6　2022 年 9 月に御嶽山で実施した登山者動向把握実験。左は、実験対象区間である御嶽山黒沢口登山道とレシーバーの設置位置（①～⑰）。右は、御岳ロープウェイ山麓駅におけるビーコン配布風景。

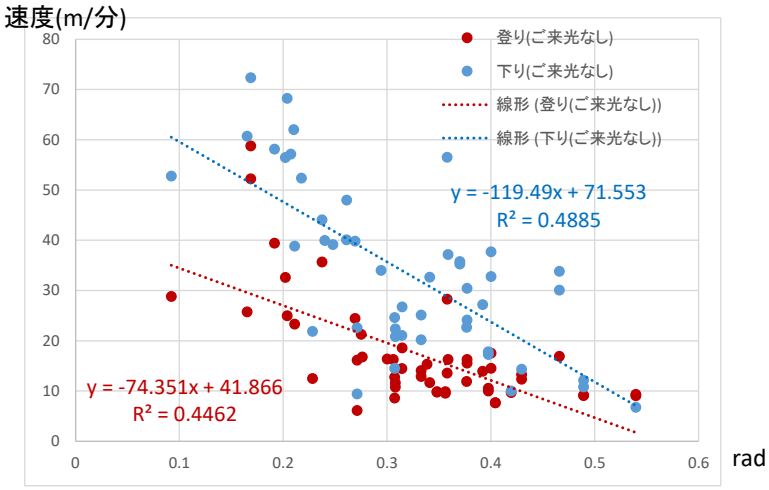


図 3-7　2018 年に実施した富士山チャレンジの登山者動向把握実験データから算出される、吉田口登山道における登山者の移動速度と斜面勾配の関係（赤：上り、青：下り）。

表 3-1　2020 年 La Soufriere 火山噴火対応タイムライン（抜粋）

日付	火山活動	主な被害	監視観測機関	防災対応機関
12 月 27 日	登山者が撮影			
12 月 29 日			衛星写真で熱源、新しい溶岩ドームを目視	記者会見で、閣僚による説明のあと、UWI-SRC による市民への説明。
12 月 30 日				NEMO が火山警戒レベルをオレンジに上げる。
1 月 26 日				ジョージタウン（火口の南東側）で住民説明会
4 月 8 日	火山性地震、山頂付近の活発な蒸気も検知			NEMO が火山警戒レベルをオレンジからレッドに上げ、大統領による避難命令発令。
4 月 9 日	AM8:41　1 回目の爆発的な噴火。2 回,3 回と。	火山灰、島の南端アイガール空港まで到達		セントビンセント・グレナディーン赤十字の責任者、ドラ・ジェームズ氏によると、今のところ負傷者や建物損壊といった被害の報告無し。
4 月 15 日	爆発的な噴火の継続。火砕流は西方山腹に流下。ラハール流下を確認。		12 日から爆発的噴火の噴煙柱崩壊によって多方向に火砕流が発生。	国連のドゥジャリク事務総長報道官は 15 日、避難民を支援するため国連の緊急対応基金から 1000 万ドル（約 1 億 800 万円）を支出すると発表。一時、住民ら計約 2 万人が避難。このうち約 4500 人がなおも避難所で生活
5 月 6 日				火山警戒レベルをオレンジに下げる。
9 月 17 日	火山活動は 4 月の噴火前よりも活動的な状態が続いている。			政府は、火山警戒レベルをオレンジからイエローに。残る避難所の住民全ての帰宅が許可。NEMO は火山活動がまだ継続していることを周知。

UWI-SRC (The Univ. of the West Indies Seismic Research Center)
NEMO (The National Emergency Management Organization)

はじめに

本課題Ｄでは、火山災害に対応するため、リアルタイムで噴火状況を把握するとともに、そのデータを迅速に収集・解析し、推移予測とハザード・被害評価、さらには対策に資する情報の提供を一連で行う技術を開発する。防災関係機関がこれらの情報を、現行の噴火警戒レベルに加味して、防災対策に生かすという連携が可能となる。それには、噴火の観測・予測結果から、火山の状態がどのようにあり、今後どのように展開する可能性があるのか、どのような被害がありうるのかも含めて、情報提供することも重要であり、そのための情報ツールを開発する必要がある。これは課題Ｄの目的であると同時に、本プロジェクト全体のアウトプットとしても重要である。

サブテーマ１では、噴火発生前後からドローンなどの無人機を用いて火口付近の地形や噴出物に関するリアルタイムの災害情報を取得する技術を開発し、それによって取得した情報や解析の結果を他課題の研究者と共有できるように準備する。本年度は、有珠山で実証実験を実施し、噴火時の監視の適用性について研究した。また、UAV で取得したデータを用いた三次元データの計測精度向上と高速化、高精度三次元データおよび画像をさらに短時間で作成する手法について研究した。

サブテーマ２では、桜島の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ている。本年度は、これまでに培われた火山灰放出量の即時把握技術、予測の高速度化及び高精度化技術をさらに発展させ、それらの予測技術をさらに高度化した。また、大規模噴火等の連続噴火に対応するためのシミュレータをオンラインシステムに実装して試験運用した。さらに、火山噴火に前駆する地盤変動時間および変化量をデータベース化した。

サブテーマ３では、これまで作成した情報コンテンツ試作版の高度化を行っている。今年度は、防災関係者から得られたニーズを基にコンテンツを改善するとともに、情報発信の在り方を検討した。降灰の都市機能への影響については、数値計算するとともに、降灰による建物の特性や被害分析を行った。過去の降灰データから阿蘇カルデラ内の降灰被害カーブを検討した。また、御嶽山で登山者動向把握実験を実施するとともに、登山者の移動の特徴を検討した。退避豪等の耐衝撃性を評価のための実験を継続した。さらに、情報コンテンツ発信の参考とするため、外国の大噴火の災害対応タイムラインを調査した。

目次

１．　研究概要の説明 1
(1) 研究者別の概要 1
(a) サブテーマ１ 1
(b) サブテーマ２ 1
(c) サブテーマ３ 4
(2) 研究実施日程 6
(a) サブテーマ１ 6
(b) サブテーマ２ 7
(c) サブテーマ３ 7

２．　研究成果の説明 8

２．１ サブテーマ１ 8

２．１．１ 業務の内容 8
(1) 業務題目 8
(2) 担当者 8
(3) 業務の目的 8
(4) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 10
(a) 平成 28 年度： 10
(b) 平成 29 年度： 10
(c) 平成 30 年度： 10
(d) 平成 31 年度（令和元年度）： 10
(e) 令和 2 年度： 11
(f) 令和 3 年度： 11
(g) 令和 4 年度： 11
(h) 令和 5 年度： 11
(i) 令和 6 年度： 11
(j) 令和 7 年度： 11
(5) 令和４年度における業務の方法 11
(a) プロジェクトの総合推進 11
(b) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化 12
(c) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発 12
(d) SfM/MVS 計算時間の短縮 12

２．１．２ 令和４年度の成果 13
(1) 業務の要約 13
(2) 業務の成果 13
(a) プロジェクトの総合推進 13
(a) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化 18

(b) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発 25
(c) SfM/MVS 計算時間の短縮..... 28
(3) 結論..... 3
(4) 引用文献..... 3
(5) 成果の論文発表・口頭発表等 3
(6) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 3
(a) 特許出願 3
(b) ソフトウェア開発 3
(c) 仕様・標準等の策定 3

２．１．３ 令和５年度の業務計画案 4
(1) プロジェクトの総合推進..... 4
(2) データ取得作業の効率化..... 4
(3) 画像や 3D 地形モデルから状況認識する方法の検討 4
(4) 解析作業の効率化..... 4
(5) データ取得から状況把握までの手順化・課題整理の検討 5

２．２ サブテーマ２ 6

２．２．１ 業務の内容..... 6
(1) 業務題目..... 6
(2) 担当者..... 6
(3) 業務の目的..... 6
(4) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 7
(a) 平成 28 年度： 7
(b) 平成 29 年度： 7
(c) 平成 30 年度： 7
(d) 平成 31 年度（令和元年度）： 7
(e) 令和 2 年度： 8
(f) 令和 3 年度： 8
(g) 令和 4 年度： 8
(h) 令和 5 年度： 8
(i) 令和 6 年度： 8
(j) 令和 7 年度： 8
(5) 令和 4 年度における業務の方法 8
(a) プロジェクトの総合推進 9
(b) 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 9
(c) 火山灰拡散予測の高速化技術開発 9
(d) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発 10
(e) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発 10
(f) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発 10

２．２．２ 令和４年度の成果 11
(1) 業務の要約 11
(2) 業務の成果 11
(a) プロジェクトの総合推進 11
(b) 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 11
(c) 火山灰拡散予測の高速化技術開発 52
(d) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発 81
(e) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発 112
(f) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発 124
(3) 結論 130
(4) 引用文献 130
(5) 成果の論文発表・口頭発表等 133
(6) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 133
(a) 特許出願 133
(b) ソフトウエア開発 133
(c) 仕様・標準等の策定 133

２．２．３ 令和５年度の業務計画案 133
(1) 業務計画、実施方法 134
(a) プロジェクトの総合推進 134
(b) 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 134
(c) 火山灰拡散予測の高速度化技術開発 134
(d) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発 135
(e) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発 135
(f) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発 135
(g) 自発的な研究活動 135
(2) 目標とする成果 136

２．３ サブテーマ３ 136

２．３．１ 業務の内容 136
(1) 業務題目 136
(2) 担当者 136
(3) 業務の目的 136
(4) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 138
(a) 平成 28 年度： 138
(b) 平成 29 年度： 138
(c) 平成 30 年度： 138
(d) 平成 31 年度（令和元年度）： 138
(e) 令和 2 年度： 138
(f) 令和 3 年度： 139

(g) 令和４年度： 139
(h) 令和５年度： 140
(i) 令和６年度： 140
(j) 令和７年度： 140
(5) 令和４年度における業務の方法 140
(a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化 140
(b) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化 140
(c) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化 141
(d) 自発的な研究活動等 141

２．３．２ 令和４年度の成果 141
(1) 業務の要約 142
(2) 業務の成果 143
(a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版 143
(b) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化 156
(c) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化 181
(3) 結論 202
(4) 引用文献 203

(5) 成果の論文発表・口頭発表等 206
(6) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 206
(a) 特許出願 206
(b) ソフトウエア開発 206
(c) 仕様・標準等の策定 206

２．３．３ 令和５年度の業務計画案 206
(1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化 206
(2) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化 206
(3) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化 207
(4) 自発的な研究活動等 207

３． 会議録 208

４． むすび 209

別添１ 学会等発表実績（サブテーマ１）
別添２ 学会等発表実績（サブテーマ２）
別添３ 学会等発表実績（サブテーマ３）

１．研究概要の説明

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

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

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

(1) 研究者別の概要

(a) サブテーマ１

所属機関・ 部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	左記の うち、 間接 経費
アジア航測株式会社 先端技術研究所 室長 国土保全技術部 課長 システム開発部 課長 国土保全技術部 国土保全技術部 国土保全技術部 国土保全技術部 システム開発部 システム開発部	 千葉達朗 佐々木寿 野中秀樹 成毛志乃 田中利昌 江川　香 杉下七海 森　貴章 小森惇也	【サブテーマ１】 サブテーマ１の研究課題の実施および総合推進を行った。 サブテーマ１の無人機を利用して火山災害をリアルタイムで把握する技術の高度化の研究を行い、有珠山での実証実験を通じて、取得データの高精度化および解析処理の迅速化に寄与する研究を進めることができた。	R4.4.1～ R5.3.31	6,027,672	1,352,055

(b) サブテーマ２

所属機関・ 部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	左記の うち、 間接 経費
京都大学・ 防災研究所・ 教授	井口　正人	【サブテーマ 2】 サブテーマ 2 の研究テーマを総合的に推進した。リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、火山灰拡散予測の高速度化技術開発、火山灰拡散予測のためのオンラインシステム開発の研究を行い、火山灰予測を高精度化させた。	R4.4.1～ R5.3.31	61,652,000	14,227,384
同・准教授	中道 治久	レーダーによる噴煙観測を行い、噴煙検知においてこの手法の妥当性を証明した。	同上		
同・准教授	為栗　健	火山性微動観測を行い、噴出率の見積もりを高精度化させた。	同上		
同・助教	山本　圭吾	地盤変動観測を行い、噴出率の見積もりを高精度化させた。	同上		
同・助教	山田　大志	火山性微動、地盤変動、空気振動観測を多角的に行い、噴出率の見積もりを高精度化させた。	同上		
同・教授	竹見　哲也	高解像度での気象モデルによる桜島周辺地域での気流の数値シミュレーションを実施し、風速データの精緻さの必要性を証明した。	同上		
同・教授	丸山　敬	桜島周辺地域での気流の数値シミュレーション手法を開発した。住宅の代表的な外装材に対してレキの衝撃試験を行い、建物に衝突し	同上		

		た際の破壊性状を明らかにした。			
同・特定教授	山路　昭彦	ドローンによる上空の風速ベクトルと火山灰・ガスの観測を行い、風速場の高精度化の観測データを取得した。	同上		
同・特定助教	石井　杏佳	火山噴火に伴う地盤変動パラメータをデータベース化し、噴火の発生時刻と規模を確率的に予測する手法を開発した。	同上		
同・研究員	眞木　雅之	レーダーの反射強度と降灰の粒径分布の関係を検討し、両者の間の理論式を導出した。	同上		
学振特別研究員 DC2	瀧下　恒星	ディスドロメータによる連続観測と降灰調査を行い、降灰量の高精度化を図るとともに、シミュレーション手法をオンラインシステムに組み込んでリアルタイム火山灰拡散予測システムを構築した。	同上		
同・リサーチアシスタント	Vico Luthfi Ipmawan	火山灰噴出率推定式をシナブン火山に適用するための検討を行った。	同上		
同・リサーチアシスタント	高橋　龍平	超長周期地震動を用いた火山灰放出量を検討した。	R4.4.1～R4.6.30		
以下、研究協力機関 筑波大学・生命環境科学研究科・教授	田中　博	火山灰拡散シミュレーション（PUFF）を行い、予測精度を向上させた。	R4.4.1～R5.3.31		
神戸大学・都市安全研究センター・教授	大石　哲	レーダーの反射強度と降灰の粒径分布の関係を検討した。	同上		

東北大学・理学研究科・准教授	太田　雄策	GNSSデータを解析し、噴煙の空間分布を明らかにした。	同上		
東京大学・地震研究所・准教授	鈴木　雄治郎	噴煙シミュレーションを行うことにより、噴出率と火山灰拡散の関係を明らかにした。	同上		
国立環境研究所・地域環境保全領域・主幹研究員	清水　厚	ライダー観測を行うことにより、桜島周辺の噴火活動に伴うエアロゾルの経年変化を明らかにした。	同上		
日本気象協会・部長	佐々木　寛介	ドローンによる上空の風速ベクトルと火山灰・ガスの観測を行い、風速場の高精度化のための観測データを取得した。	同上		
同・技師長	井上　実		同上		
三菱スペース・ソフトウェア(株)（鹿児島大学・博士学生）	小堀　壮彦	船舶レーダー観測からソースパラメータ（噴煙高度，噴煙発止らの成長速度）を推定するアルゴリズムを開発した。			
鹿児島大学・水産学部・准教授	西　　隆昭	船舶レーダーによる噴煙柱のモニタリング技術の実用化を図った。	同上		
北海道大学・名誉教授	藤吉　康志		同上		
（株）光電製作所・研究開発部長	海賀　和彦		同上		

（c）サブテーマ３

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	左記のうち、間接経費
防災科学技術研究所 火山研究推進センター長	中田節也	【サブテーマ３】サブテーマ３の研究テーマを総合的に推進した。火山灰被害予測コンテンツ試作版の高度化のうち、離散型降灰デー	R4.4.1- R5.3.31	9,637,875 円	2,224,125 円

		タの分布図作成のマニュアル作りを行った。			
同・副センター長	藤田英輔	避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化のうち、海外の大規模噴火に関する防災対応のタイムラインを検討した。	同上	同上	同上
同・研究統括	宮城洋介	避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化のうち、動態把握のシステムを開発し、自治体に対して活用した。	同上	同上	同上
同・特別研究員	棚田俊收				
同・外来研究員	宮村正光				
同・外来研究員	中村洋一				
電力中央研究所・主任研究員	上澤真平	火山灰被害予測コンテンツ試作版の高度化のうち、離散型降灰データの分布図作成のマニュアル作りを行った。	同上	同上	同上
大林組・技術研究所・上席研究員	諏訪 仁	降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化に必要な建物などの障害物による降灰影響を評価した。	R4.4.1-R5.3.31	5,079,263円	1,172,137円
大林組・技術研究所・上級主席技師	大塚清敏		同上	同上	同上
大林組・技術研究所・上級主席技師	野畑有秀		同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所富士山火山防災研究センター 主幹研究員	吉本充宏	「周知啓発教育用コンテンツの試作版」について、ヒアリング調査やアンケート調査を行い、改良を行うとともにコンテンツの充実を行った。 「避難・救助支援コンテンツの試作版」における衝突実験を行い、実験結果の分析を行った。	R4.4.1-R5.3.31	9,794,699円	2,260,315円
山梨県富士山科学研究所富士山火山防災研究センタ	石峯康浩	「周知啓発教育用コンテンツの試作版」について、ヒアリング調査やアンケート調査を	同上	同上	同上

ー 主幹研究員		行い、改良を行うとともにコンテンツの充実を行った。			
山梨県富士山科学研究所富士山火山防災研究センター 主任研究員	本多亮	「周知啓発教育用コンテンツの試作版」について、ヒアリング調査やアンケート調査を行い、改良を行うとともにコンテンツの充実を行った。	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所富士山火山防災研究センター 研究員	久保智弘	「周知啓発教育用コンテンツの試作版」について、ヒアリング調査やアンケート調査を行い、改良を行うとともにコンテンツの充実を行った。 「避難・救助支援コンテンツの試作版」における衝突実験を行い、実験結果の分析を行った。加えて、動態データから登山者の移動速度の検討を行った。	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所富士山火山防災研究センター 研究員	西澤達治	「避難・救助支援コンテンツの試作版」における衝突実験を行い、実験結果の分析を行った。	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所富士山火山防災研究センター 研究員	亀谷伸子	「周知啓発教育用コンテンツの試作版」について、ヒアリング調査やアンケート調査を行い、改良を行うとともにコンテンツの充実を行った。	同上	同上	同上
東大情報学環・総合防災情報研究センター・特任教授	田中 淳	情報コンテンツ試作版の高度化に関連し、社会防災分野との連携研究ための意見交換を実施した。	R4.4.1-R5.3.31	4,923,776円	1,136,256円
同・准教授	関谷直也		同上	同上	同上

(2) 研究実施日程

(a) サブテーマ１

研究実施内容	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
プロジェクトの総合推進	←											→
RTK-GNSS搭載UAVの導入による計測精度向上と高速化		←							→			
夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発				←						→		
SfM/MVS計算時間の短縮						←					→	

(b) サブテーマ２

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

(c) サブテーマ３

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

周知啓発教育用コンテンツの試作版の高度化	←											→
降灰被害予測コンテンツの試作版の高度化	←											→
避難・救助支援コンテンツの試作版の高度化	←											→

２．研究成果の説明

２．１　サブテーマ１

２．１．１　業務の内容

(1) 業務題目

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

(2) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
アジア航測株式会社	分担機関	先端技術研究所　室長	千葉達朗
		国土保全技術部　課長	佐々木寿
		システム開発部　課長	野中秀樹
		国土保全技術部	成毛志乃
		国土保全技術部	田中利昌
		国土保全技術部	江川　香
		国土保全技術部	杉下七海
		システム開発部	森　貴章
		システム開発部	小森惇也

(3) 業務の目的

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

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

なお、実施期間中に噴火が起きた場合には、検討中の内容を反映して無人機（ドローン）等で取得した空域からの可視画像（サブテーマ内で取得したものに限らない）をもとに、３Ｄモデルを作成するなどして、ホームページで公開できるよう資料を作成することとする。地形の３Ｄモデルを作成した場合には、Ａ、Ｃ－３へデータ提供した上で、Ｄ－３で情報共有される計画とする。また、最新の現地概略情報を取得できた場合には、被災自治体等へ画像等を提供するとともに、要望をふまえて改めて現地情報を取得、提供することを想定する。

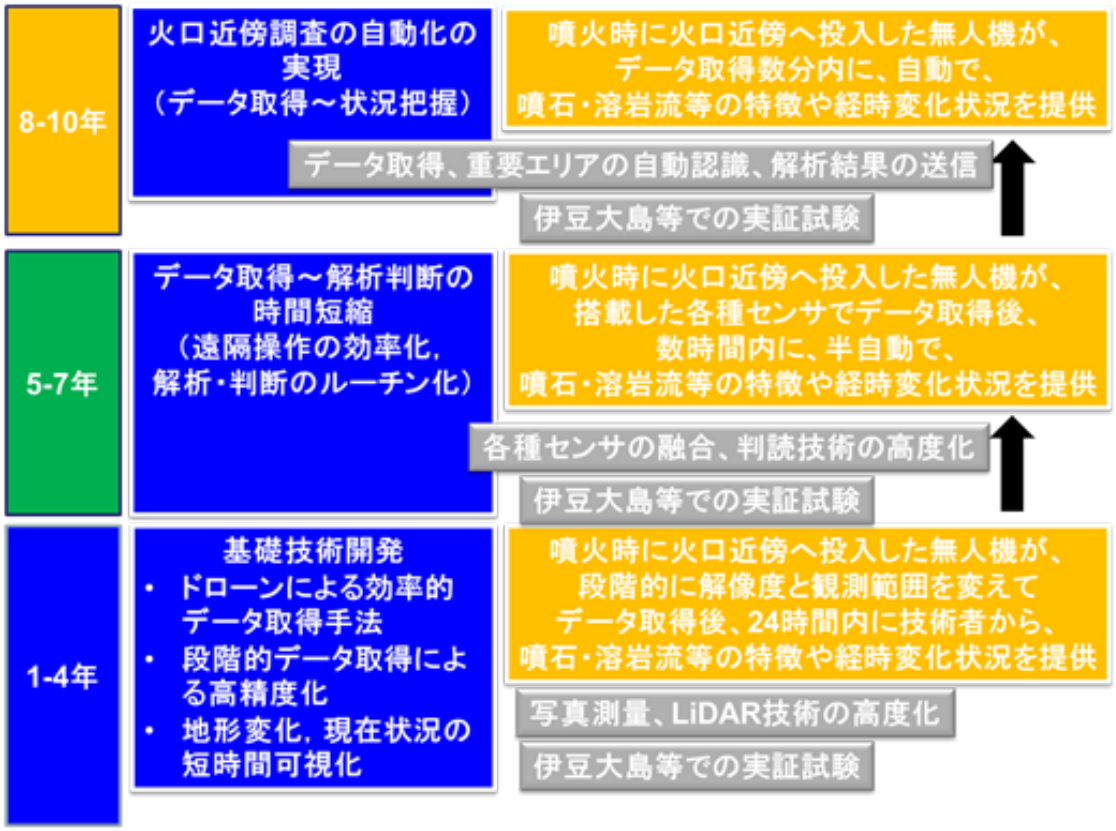


図 5　本業務の全体計画

(4) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

(a) 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。

(b) 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。

(c) 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。

(d) 平成 31 年度（令和元年度）：

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

(e) 令和 2 年度：

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

(f) 令和 3 年度：

無人機（ドローン等）に搭載する機器を利用したモデル火山における実証試験と、画像解析・データ処理技術により、経時変化抽出のための課題と解決策をとりまとめた。

(g) 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した。

(h) 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。

(i) 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。

(j) 令和 7 年度：

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

(5) 令和４年度における業務の方法

(a) プロジェクトの総合推進

- 現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進する。
- サブテーマ 2 との連携：ドローンを活用した地形変化抽出を行い、予測降灰量と照合することを目的として、数値地形モデルの迅速な作成についての実証実験を計画して実施する。
- サブテーマ 3 との連携: 各種コンテンツのインプットデータとして利用するため、ドローンで取得した画像から地図と重ねられる「オルソ画像」および「三次元表示」を迅速に作成する手法に関する実証実験を計画して実施する。

- テーマ A、B4、C との連携:UAV で得られたデータの受け渡し方法について連携して研究する。現地からの迅速なデータ転送手段として 5G 回線を利用し、通信速度向上の研究を行う。
- 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携・融合の一環として、現地で取得した画像から３Ｄ地形モデルを作成する技術の体験、民間企業における火山調査関連技術や火山防災業務の紹介等のプログラムを計画・準備した上で、開催案内と参加者募集を行う。
- 北海道洞爺湖町においてヒアリングを実施し、取得データに関する自治体等からのニーズを把握する。

(b) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化

- 2021 年度は、伊豆大島において、実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの飛行による高精度現状把握手法の開発を実施した。
- 2022 年度は、有珠山において立入規制区域外からの飛行による高精度現状把握手法の開発を計画する。噴火によって、火口付近の立ち入りが不可能な場合はもちろん、火口周辺の地形が大きく変化し、既往の GCP が失われたようなケースでも、位置やゆがみの補正をすることなく、迅速に差分計算し、噴出量などを求めることも想定して研究を進める。2021 年度に使用した RTK-GNSS 搭載 UAV は飛行時間が短い機体であったため、2022 年度は飛行時間が長い GNSS 搭載 UAV を導入し、飛行距離・飛行範囲をさらに拡大した研究を行う。

(c) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発

- 2021 年度は、伊豆大島において、実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの夜間飛行による撮影および日中の遠望撮影を実施した。
- 2022 年度は、有珠山において、実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの夜間飛行による撮影を実施し、夜間における高精度現状把握手法の開発を計画する。また、日中に火口内を斜め撮影し、取得画像から斜め写真測量技術を用いて解析する手法を開発する。

(d) SfM/MVS 計算時間の短縮

- 2021 年度は RTK-GNSS 搭載 UAV を用いてリアルタイムにデータ処理を行うソフトウェアを導入し、高精度の３D 地形モデルをさらに短時間で作成する手法について研究した。
- 2022 年度も同様に RTK-GNSS 搭載 UAV による垂直写真を用いてリアルタイムにデータ処理を行うソフトウェアを導入し、高精度の３D 地形モデルをさらに短時間で作成する手法について研究する。2021 年度は日中の可視画像のみを対象としたが、2022 年度は夜間の熱画像も用いた研究を行う。

２．１．２　令和４年度の成果

(1) 業務の要約

- 有珠山で実証実験を実施し、RTK-GNSS 搭載 UAV による撮影を実施した。また、火山の活動状況を繰り返し観測するため、自動航行・自動撮影の機能を用いて日中および夜間の斜め撮影を行い、噴火時の監視の適用性について研究した。
- RTK-GNSS 搭載 UAV で取得したデータを用いた三次元データの計測精度向上と高速化について研究した。また、高精度の三次元データおよびオルソ画像をさらに短時間で作成する手法について研究した。

(2) 業務の成果

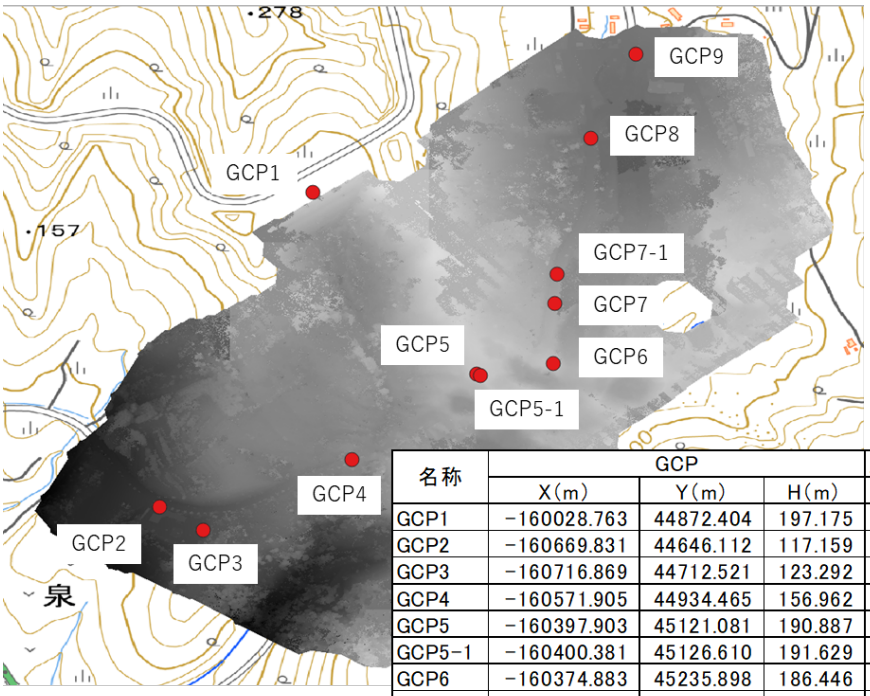
(a) プロジェクトの総合推進

現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進した。

1) サブテーマ 2 との連携

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

作成した三次元地形モデルと VRS 測量で計測した GCP の標高値に差がないことを確認した（図 6)。データ作成の詳細は後述する。



名称	GCP			三次元地形モデル	較差(m)
	X(m)	Y(m)	H(m)	H(m)	
GCP1	−160028.763	44872.404	197.175	−	−
GCP2	−160669.831	44646.112	117.159	117.506	0.347
GCP3	−160716.869	44712.521	123.292	123.524	0.232
GCP4	−160571.905	44934.465	156.962	157.220	0.258
GCP5	−160397.903	45121.081	190.887	191.035	0.148
GCP5-1	−160400.381	45126.610	191.629	191.758	0.129
GCP6	−160374.883	45235.898	186.446	186.487	0.041
GCP7	−160252.876	45237.742	174.778	174.888	0.110
GCP7-1	−160193.583	45240.411	168.431	168.588	0.157
GCP8	−159917.073	45289.133	147.185	147.311	0.125
GCP9	−159746.180	45356.361	146.970	147.097	0.127

図 6　三次元地形モデルと GCP の比較

2) サブテーマ 3 との連携

各種コンテンツのインプットデータとして利用するため、ドローンで取得した画像から地図と重ねることが可能な「オルソ画像」・「三次元データ」のフォーマットについて検討した。

昨年度までの自治体へのヒアリングから、オルソ画像のフォーマット等は一般的なもので良いという結果を踏まえ、国土基本図（東西方向 2km、南北方向 1.5km）と同様のメッシュで分割し、画像の分解能は数 10cm、画像ファイルは TIFF 形式、位置情報ファイルは TFW として問題ないと考えらえる。

今年度の自治体ヒアリングから、三次元データの利用の期待があったため、容易に閲覧できる方法を検討した。三次元データを専用ソフトではなく、Web ブラウザで閲覧できればソフトのインストールも不要で扱いやすいと考えられる。図 7 は有珠山の三次元データを Web ブラウザで表示した事例である。Web ブラウザ上に 3D データを可視化するオープンソースである Cesium を利用することで、三次元データを Web ブラウザで表示し、拡大・縮小・回転などが容易に行うことができる。また、簡易な計測も行うことが可能である。図 8 に計測機能を示す。Cesium では、オルソ画像の表示も可能である。オルソ画像の表示を図 9 に示す。Cesium に搭載可能な三次元データのフォーマットは多数あるが、LAS 形式での搭載を確認した。Cesium を用いることで、容易に計測結果（オルソ画像・三次元データ）の公表も可能である。



図 7　有珠山の三次元データを Cesium に搭載した例（Web ブラウザ上での閲覧）



図 8　Cesium の計測機能



図 9　有珠山のオルソ画像を Cesium に搭載した例（Web ブラウザ上での閲覧）

3）テーマ A、B4、C との連携

a）データ連携とフォーマット

これまでの検討でデータ連携方法を整理してきた（図 10）。数値シミュレーション等に使用する数値標高モデル（DEM）のフォーマットは Esri ASCII ラスター形式としていたが、本研究で使用している DJITerra から出力される形式が Geotiff 形式であるため、サブテーマ A および C3 に提供する形式を Geotiff 形式に変更した（表 1 および表 2）。Geotiff 形式は GIS では一般的な形式であり、海外でもこのフォーマットで提供されていることが多い。

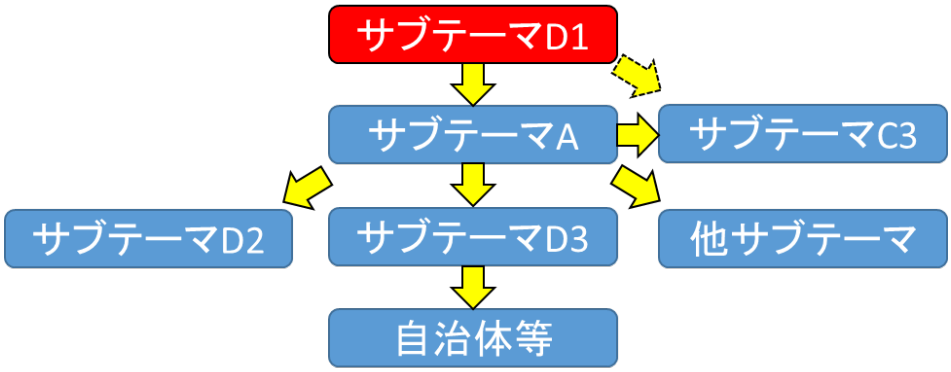


図 10　他サブテーマとのデータ連携イメージ

表 1　サブテーマ A に格納するデータ例

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

表 2　サブテーマ C3 に提供するデータの一覧

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

b) テーマ A（JVDN）への集約の検討

現地で取得・処理した数値標高モデルを、現地から携帯電話回線(5G)を用いて、データを転送する検証を行った。今回作成した Geotiff 形式の数値標高モデル（3 ㎝メッシュ、2.04GB)を、現地から共有することを想定し、アジア航測のサーバーに転送して検証を行った。4G 回線と 5G 回線の転送速度を 2 地点で計測したところ、Upload の速度は 5G 回線の方が 2 倍以上速い結果となった（表 3)。しかし、5G 回線は場所による転送速度の差が大きく、アップロード時間は 3 倍程度の差が出た（表 3)。

計測面積や計測回数が増加すると、オリジナルデータのデータサイズがさらに大きくなることが予想されるため、現地で高速かつ概略的な解析を行い、必要最低限の解析結果のみを転送するなどの工夫も必要になると考えられる。

表 3　データのアップロード時間

地点名	値	4G 回線(Mbps)		5G 回線(Mbps)		
		Download	Upload	Download	Upload	アップロード時間
地点 A	最小値	17.67	5.41	33.46	13.46	3 分 59 秒
	最大値	34.28	16.79	45.49	29.63	
	平均値	24.25	10.02	40.00	21.76	
地点 B	最小値	33.40	7.79	15.31	3.93	10 分 17 秒
	最大値	39.00	9.66	53.13	13.15	
	平均値	36.44	8.54	29.95	9.15	

4) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携として現地実証実験への参加者募集を行う予定であったが、新型コロナウイルスの影響で他のカリキュラムとの日程調整が困難となり、実施が出来なかった。

5) 取得データに関する自治体等からのニーズの把握

実証実験を行った有珠山の洞爺湖町においてヒアリングを行い、取得データに関するニーズを把握した。ヒアリングの中で出てきた意見としては、下記の内容があった。

- 有珠山は噴火の度に地形が変わるのが特徴であり、噴火前の地形データを取得することが重要である。
- 次の噴火に備えて、写真撮影・整理を行っているため、この事業で取得したデータも共有してもらいたい。
- 今回、計測を実施した西山散策路は 2000 年噴火当時と植生が変わっており、マイスターなどの普及啓発に三次元モデルが活用できるのではないか。オルソ画像を鳥瞰的に見られれば理解しやすい。

(a) RTK-GNSS 搭載 UAV の導入による計測精度向上と高速化

1) 概要

2022 年 11 月 7 日～11 月 9 日に北海道の有珠山を対象に実証実験を実施した。使用した UAV は DJI Matrice300-RTK と DJI Phantom4-RTK である。

Matrice300-RTK と Phantom4-RTK は、高精度 GNSS レシーバーの D-RTK 2 モバイルステーションと併せて使用することで、RTK-GNSS 測位を行うことができる。「RTK」とは「Real Time Kinematic（リアルタイムキネマティック)」の略で、地上に設置した「基準局」からの位置情報データによって、高い精度の測位を実現する。これに、GPS・GLONASS・Galileo といった衛星を用いた測位『GNSS 測位システム』を組み合わせることで、センチメートルレベルの高い精度で測量データを取得することが可能となり、GCP を使用することなく高精度なモデルデータを作成することができる。

Matrice300-RTK は、Phantom4-RTK に比べて最大飛行時間は約 2 倍あり、一度の飛行で広範囲の計測が可能である。Matrice300-RTK には、効率的なバッテリー充電が可能な専用のバッテリーステーションが付属されており、また、UAV に 2 つのバッテリーを搭載していることから UAV の電源を落とすことなく、バッテリーの交換が可能となっている。Matrice300-RTK は、Phantom4-RTK に比べて計測作業の効率化の面でも優れていることが分かった。

表 4　Phantom4-RTK　機体スペック

機体情報	詳細内容
機体重量	1391g
対角寸法	350mm
最大飛行速度	15m/s
最大飛行時間	約 30 分

表 5　Matrice300-RTK　機体スペック

機体情報	詳細内容
機体重量	6300g
対角寸法	895mm
最大飛行速度	23m/s
最大飛行時間	約 55 分



図 11　Matrice300-RTK のバッテリーステーション

2）計測範囲

三次元モデル作成のための Matrice300-RTK の計測範囲は、西山の火口周辺と遊歩道全体とした。また、Phantom4-RTK の計測範囲は、西山の火口周辺とした。

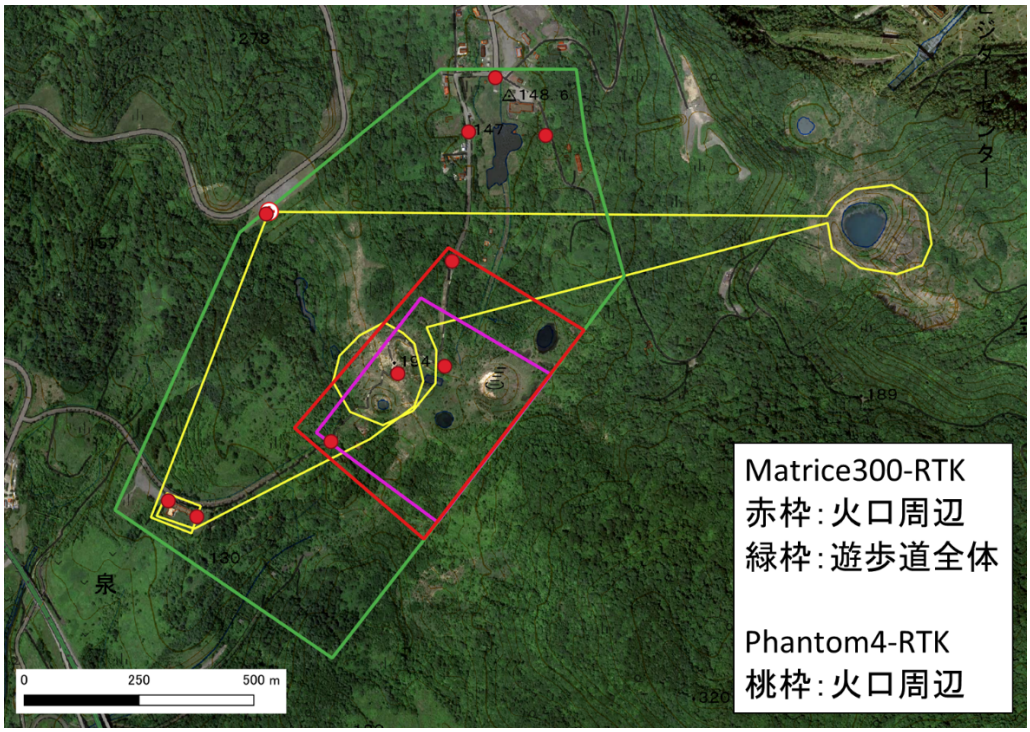


図 12　計測範囲

3) 三次元地形モデルの作成

RTK-GNSS 搭載 UAV の Matrice300-RTK と Phantom4-RTK で計測範囲の撮影を行った。Matrice300-RTK の火口周辺の撮影では、スマートオブリーク機能を用いた。スマートオブリーク機能は、計測中に対象の真下、前・後、左・右の 5 箇所からの撮影を自動的に行うものである。対象物の画像を不足なく取得でき、向きの異なる画像を組み合わせることで三次元地形モデルの精度も向上させることができる。ただし、画像枚数が多くなるため、飛行時間や三次元地形モデル作成にかかる時間は大きくなる。

撮影した画像から DJI Terra のソフトウェアを用いて、三次元地形モデルを作成した。



図 13　Matrice300-RTK の三次元地形モデル（火口周辺）



図 14　Matrice300-RTK の三次元地形モデル（遊歩道全体）

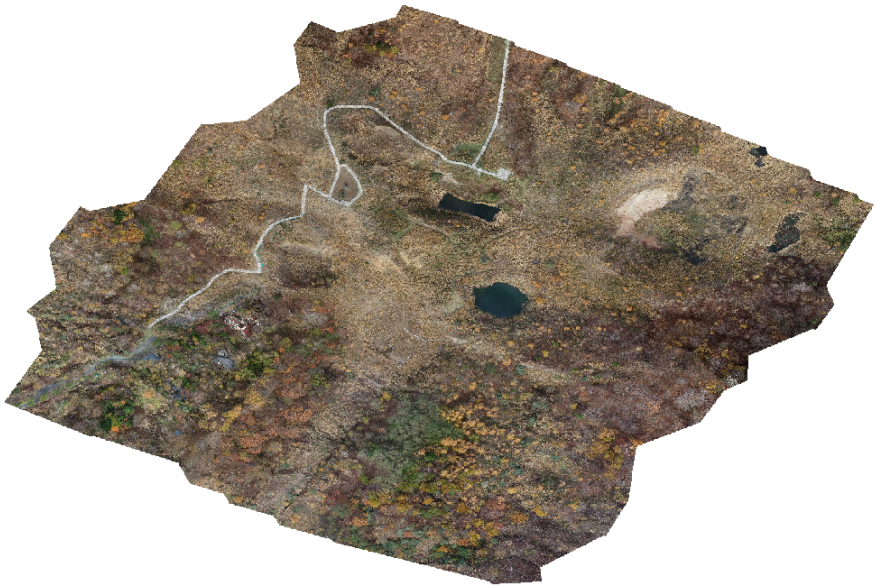


図 15　Phantom4-RTK の三次元地形モデル（火口周辺）

4）精度検証

Matrice300-RTK で作成した地形モデルと遊歩道にて VRS 測量した検証点（GCP）との比較を行った。

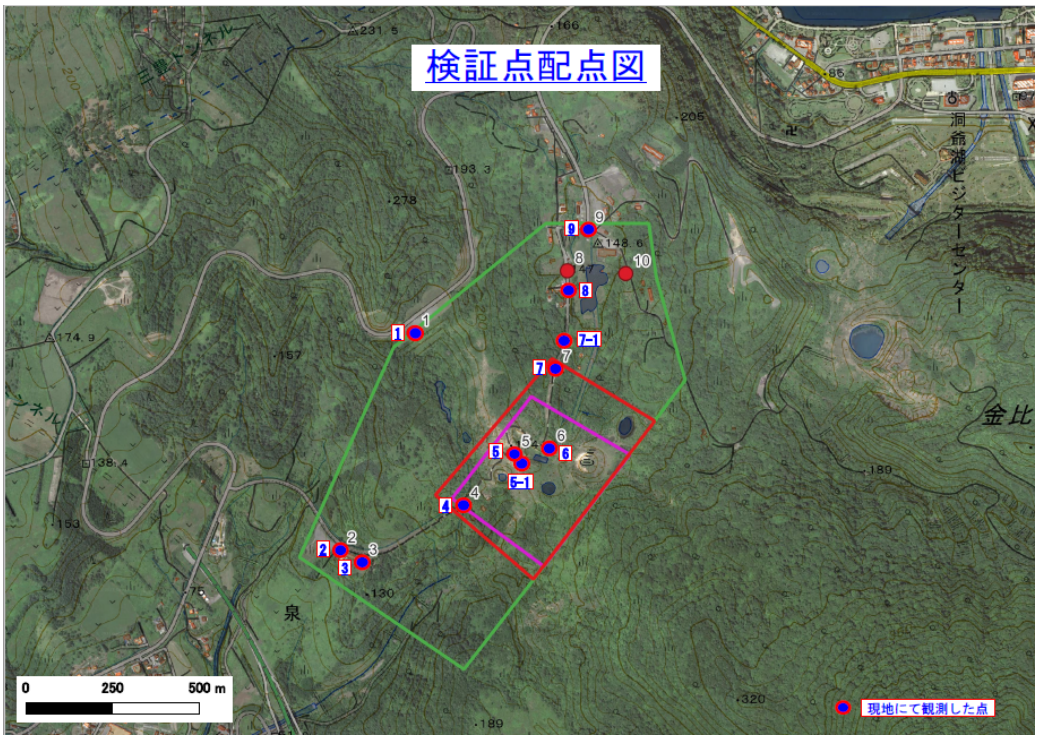


図 16　検証点配置図

表 6　検証点（GCP）の結果

名　　称	X 座 標 （m）	Y 座 標 （m）	標　　高 （m）
GCP_1	−160,028.763	44,872.404	197.175
GCP_2	−160,669.831	44,646.112	117.159
GCP_3	−160,716.869	44,712.521	123.292
GCP_4	−160,571.905	44,934.465	156.962
GCP_5	−160,397.903	45,121.081	190.887
GCP_5−1	−160,400.381	45,126.610	191.629
GCP_6	−160,374.883	45,235.898	186.446
GCP_7	−160,252.876	45,237.742	174.778
GCP_7−1	−160,193.583	45,240.411	168.431
GCP_8	−159,917.073	45,289.133	147.185
GCP_9	−159,746.180	45,356.361	146.970

Matrice300-RTK の三次元地形モデルと GCP の標高値に差がないことから、精度よく三次元地形モデルが作成できていることを確認した。遊歩道全体に比べて、火口周辺はスマートオブリーク機能を用いていることから、向きの異なる画像を含めた三次元地形モデルになっており、さらに精度がよい結果になっている。

表 7　Matrice300-RTK の三次元地形モデル（火口周辺）と GCP の比較

名称	GCP			三次元地形モデル	較差(m)
	X(m)	Y(m)	H(m)	H(m)	
GCP1	-160028.763	44872.404	197.175	-	-
GCP2	-160669.831	44646.112	117.159	-	-
GCP3	-160716.869	44712.521	123.292	-	-
GCP4	-160571.905	44934.465	156.962	-	-
GCP5	-160397.903	45121.081	190.887	190.980	0.093
GCP5-1	-160400.381	45126.610	191.629	191.672	0.043
GCP6	-160374.883	45235.898	186.446	186.484	0.038
GCP7	-160252.876	45237.742	174.778	174.858	0.080
GCP7-1	-160193.583	45240.411	168.431	168.458	0.027
GCP8	-159917.073	45289.133	147.185	-	-
GCP9	-159746.180	45356.361	146.970	-	-

表 8　Matrice300-RTK の三次元地形モデル（遊歩道全体）と GCP の比較

名称	GCP			三次元地形モデル	較差(m)
	X(m)	Y(m)	H(m)	H(m)	
GCP1	-160028.763	44872.404	197.175	-	-
GCP2	-160669.831	44646.112	117.159	117.506	0.347
GCP3	-160716.869	44712.521	123.292	123.524	0.232
GCP4	-160571.905	44934.465	156.962	157.220	0.258
GCP5	-160397.903	45121.081	190.887	191.035	0.148
GCP5-1	-160400.381	45126.610	191.629	191.758	0.129
GCP6	-160374.883	45235.898	186.446	186.487	0.041
GCP7	-160252.876	45237.742	174.778	174.888	0.110
GCP7-1	-160193.583	45240.411	168.431	168.588	0.157
GCP8	-159917.073	45289.133	147.185	147.311	0.125
GCP9	-159746.180	45356.361	146.970	147.097	0.127

Phantom4-RTK にて、同じ計測範囲で RTK あり（機能 ON）と RTK なし（機能 OFF）の精度を比較した。想定通り、RTK なし（機能 OFF）の場合は、高さ方向に数 m の誤差が発生する可能性があることを確認した。高精度の三次元モデルを作成するためには、UAV には RTK の機能が必須になってくると考えられる。

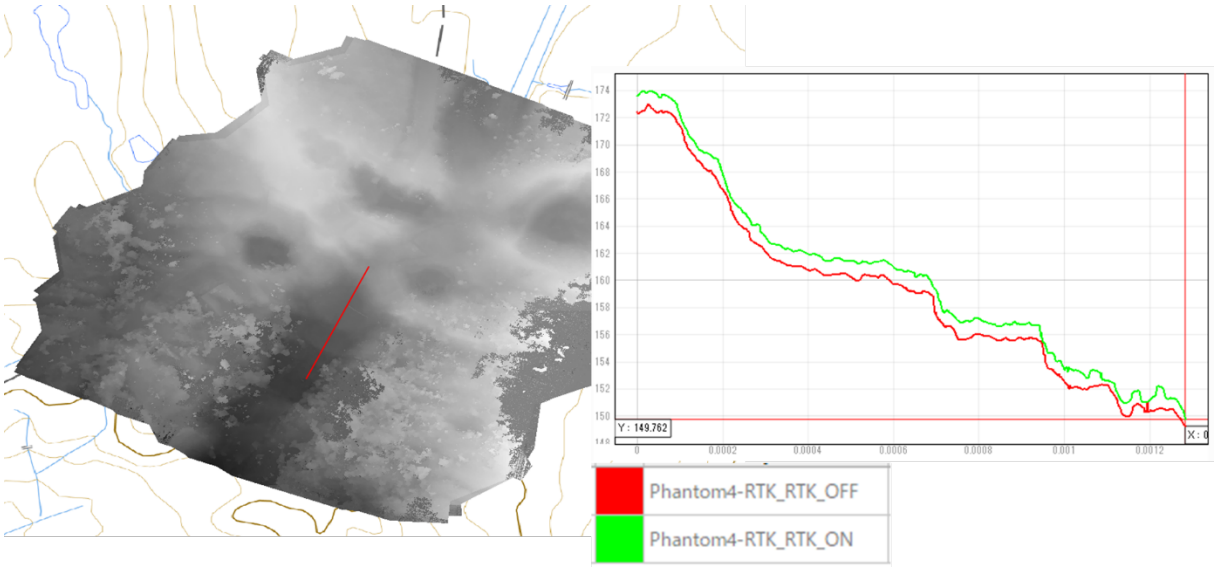


図 17　モデルの差分比較

表 9　Phantom4-RTK の RTK ありと RTK なしと GCP の比較

名称	GCP	三次元地形モデル 機能 OFF	較差（m）	三次元地形モデル 機能 ON	較差（m）
	H（m）	H（m）		H（m）	
GCP1	197.175	−	−	−	−
GCP2	117.159	−	−	−	−
GCP3	123.292	−	−	−	−
GCP4	156.962	155.837	−1.125	157.403	0.441
GCP5	190.887	189.877	−1.011	191.220	0.333
GCP5-1	191.629	190.296	−1.333	191.942	0.313
GCP6	186.446	185.355	−1.091	186.697	0.251
GCP7	174.778	−	−	−	−
GCP7-1	168.431	−	−	−	−
GCP8	147.185	−	−	−	−
GCP9	146.970	−	−	−	−

(b) 夜間飛行および遠望撮影による計測手法の開発

実際の噴火時には立入規制区域外からの撮影となり、火口上空を飛行することができないことも想定される。また、日中だけではなく夜間のデータ取得などが求められる可能性がある。このことから、2021年度は実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの夜間飛行による撮影および日中の遠望撮影を実施した。

2022年度は、有珠山において、実際の噴火を想定して、立入規制区域外からの夜間飛行による撮影を実施し、夜間における高精度現状把握手法を開発した。また、日中に火口内を斜め撮影し、取得画像から斜め写真測量技術を用いて解析する手法を開発した。

1) 自動航行による撮影手法

噴火中の火山活動の変化をとらえるためには定点観測が重要となる。また、夜間飛行ではマニュアル操作で特定の対象物を撮影することが困難である。これを踏まえ、インフラ点検等で行われている自動航行による目標物の撮影手法について、火山地形に適用可能か検証した。

検証にはMatrice300RTK（機体）およびH20T（カメラ）を使用し、「ライブミッション機能」による自動航行・撮影を実施した。ライブミッションは初回の飛行で機体の位置情報とカメラの方向・ズーム等の撮影動作を記録し、2回目以降の飛行は自動で同じルート・画角で撮影する機能であり、インフラ点検等で使用されている。また、H20Tを使用することで可視画像と熱赤外画像が同時に取得できる。



図 18　自動航行の撮影機材および夜間における作業状況

2）撮影ルート

撮影ルートを図 19に示す。西展望広場を離発着地点として、西山周辺の噴気地帯や旧とうやこ幼稚園等の建物跡を目標物として日中･夜間で自動巡回･撮影を実施した。離発着地点からの最大到達距離は0.9km、ルート全長は約2.5kmである。なお、夜間飛行については日没後（17時以降）に実施した。

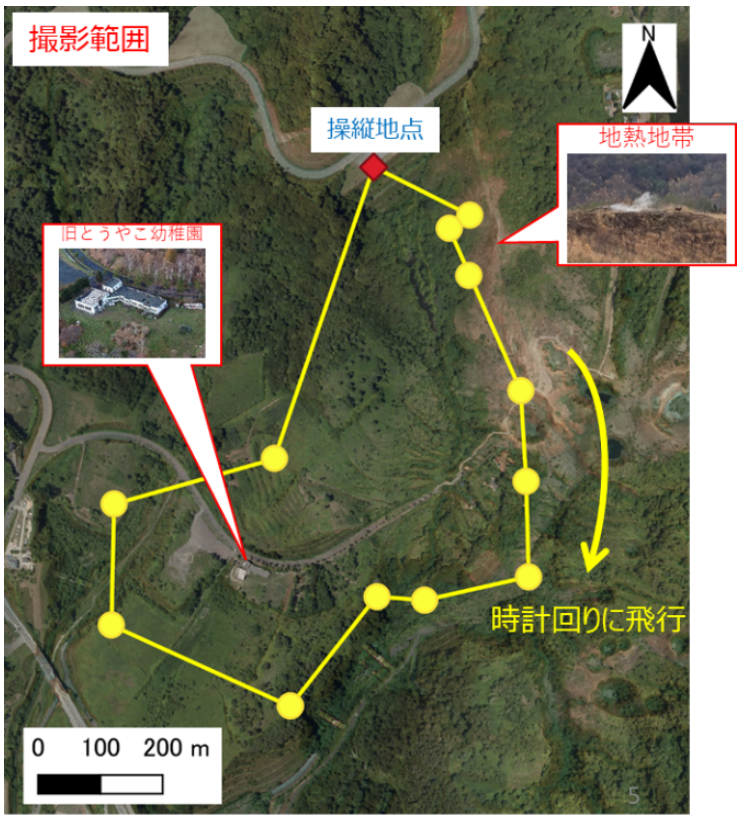


図 19　自動航行での飛行ルート図

3）撮影結果

検証の結果、自然地形に対しても自動航行・撮影によって定点からの画像取得ができることが確認できた（図 20、図 21）。

地熱地帯の撮影では、日中の可視画像では噴気の位置から大まかな位置を確認できるが、夜間は対象箇所の確認が困難であった。一方で、熱赤外画像からは日中・夜間ともに地表面の高温域を判別することができた。

建物の撮影では、日中の可視画像からは建物の損傷状況（噴石により屋根に空いた穴など）を確認できるが、夜間は確認が困難であった。熱赤外は建物と地表面の比熱の違いから、日中・夜間ともに可視画像と同様に建物の損傷状況を確認できた。

以上から、自動航行による撮影(日中・夜間)は、火山でも適応可能であるといえる。特に夜間における自動航行・自動撮影は、火山噴火時の調査（噴石の落下位置を迅速に把握するなど）に有効であると考えられる。

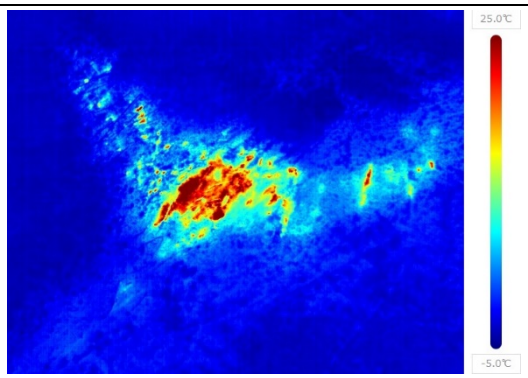
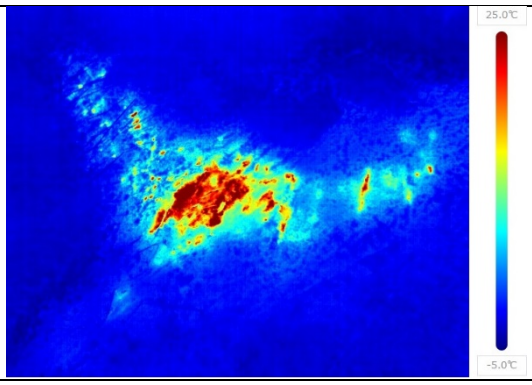
日中（可視画像）	日中（熱赤外画像）
	
夜間（可視画像）	夜間（熱赤外画像）
	

図 20　自動航行による撮影結果（地熱地帯の例）

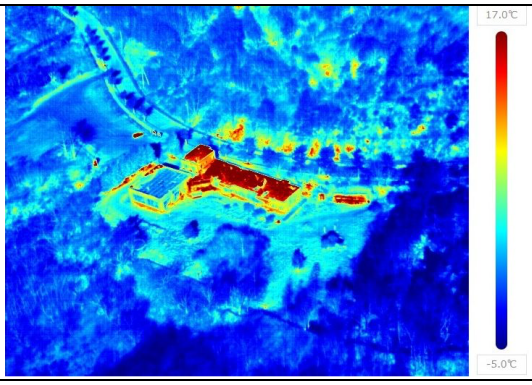
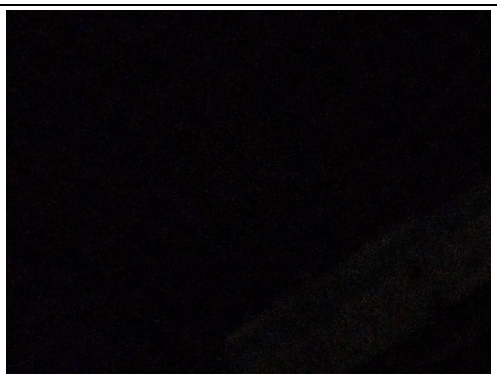
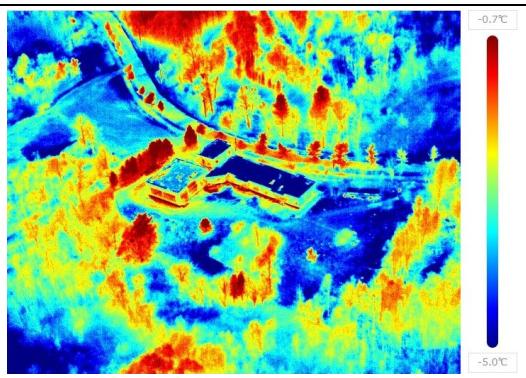
日中（可視画像）	日中（熱赤外画像）
	
夜間（可視画像）	夜間（熱赤外画像）
	

図 21　自動航行による撮影結果（建物の例）

(c) SfM/MVS 計算時間の短縮

1) 検証データ

Phantom4-RTK および Matrice300-RTK で有珠山の火口付近を撮影し、計測データを DJI Terra と PIX4D を使用して三次元地形モデルおよびオルソ画像作成までの処理時間を計測した。処理に使用した画像枚数と画像解像度は、撮影条件を変えて設定した。

2) 処理時間の検証

DJI Terra を使用して 3D 地形モデル構築を行った。DJI Terra では、3D 地形モデルの構築解像度を「低」「中」「高」の 3 段階でパラメータ設定が可能である。

「高」は入力画像の解像度、「中」は入力画像の解像度を縦横 1/2、「低」は入力画像の解像度を縦横 1/8 に縮小して処理される。昨年度に、解像度による処理時間を比較した結果では、低：中：高＝1：3：30 の割合で処理時間が変わった。

本年度は、DJI Terra に加えて PIX4D と PIX4D react を使用して、三次元地形モデルとオルソ画像の構築にかかる処理時間を検証した。

PIX4D は、三次元地形モデルを構築できるソフトウェアである。PIX4D react は緊急対応および公共安全機関向けの 2D 高速マッピングを目的とするソフトウェアで、短時間でオルソ画像が構築できるとされている。

処理に用いた PC 端末のスペックを表 10 に示す。DJI Terra に用いた PC 端末はリアルタイム 3D 地形マッピングの処理を考慮し、比較的に高性能な PC を使用した。

各撮影条件の構築結果として、PIX4D react は比較的短時間でオルソ画像を作成できることが確認できた。一方で、PIX4D は 3D 地形モデルも構築するため処理に数時間かかることが確認できた。したがって、数値標高モデルを必要とせず、オルソ画像のみが迅速に必要になる場合は、2D 高速マッピング用ソフトの利用が望ましい。なお、処理時間はソフトウェア共に、画像枚数に対して比例的に増えることが確認できた。

なお、可視画像と同時に撮影した熱画像からの処理も試みたが、熱画像は分解能が低く、ラップ率も不十分であったため、モデル作成ができなかった。熱画像から三次元モデル作成するためには、低高度で高ラップ率となる熱画像用の飛行計画を立案、撮影する必要がある。

表 10　処理に用いた PC 端末のスペック

	DJI Terra	PIX4D・PIX4D react
CPU	Xeon E-10885M	AMD Ryzen 7 2700X
RAM	128GB	32GB
GPU	Quadro RTX3000	-

表 11　三次元地形モデル作成までの処理時間

No	撮影条件	撮影カメラ	撮影枚数(枚)	DJI Terra (3D 地形モデル構築)	DJI Terra (オルソ画像構築)	PIX4D (3D 地形モデル構築)	PIX4D react (オルソ画像構築)
1	スマートオブリーク 斜め写真なし	P1	163	―	―	約 3.0 時間	約 5 分
2	スマートオブリーク 斜め写真あり	P1	747	約 5 時間	約 50 分	約 9.0 時間	約 17 分
3	高度 100m	P1	196	約 1 時間	約 35 分	約 3.0 時間	約 5 分
4	高度 100m 斜め写真あり	P1	213	―	―	約 3.5 時間	約 6 分
5	高度 100m	H20T	485	約 40 分	約 16 分	約 4.5 時間	約 7 分
6	遊歩道全体	P1	735	約 3.0 時間	約 1 時間 45 分	約 8.5 時間	約 17 分

―：処理していない

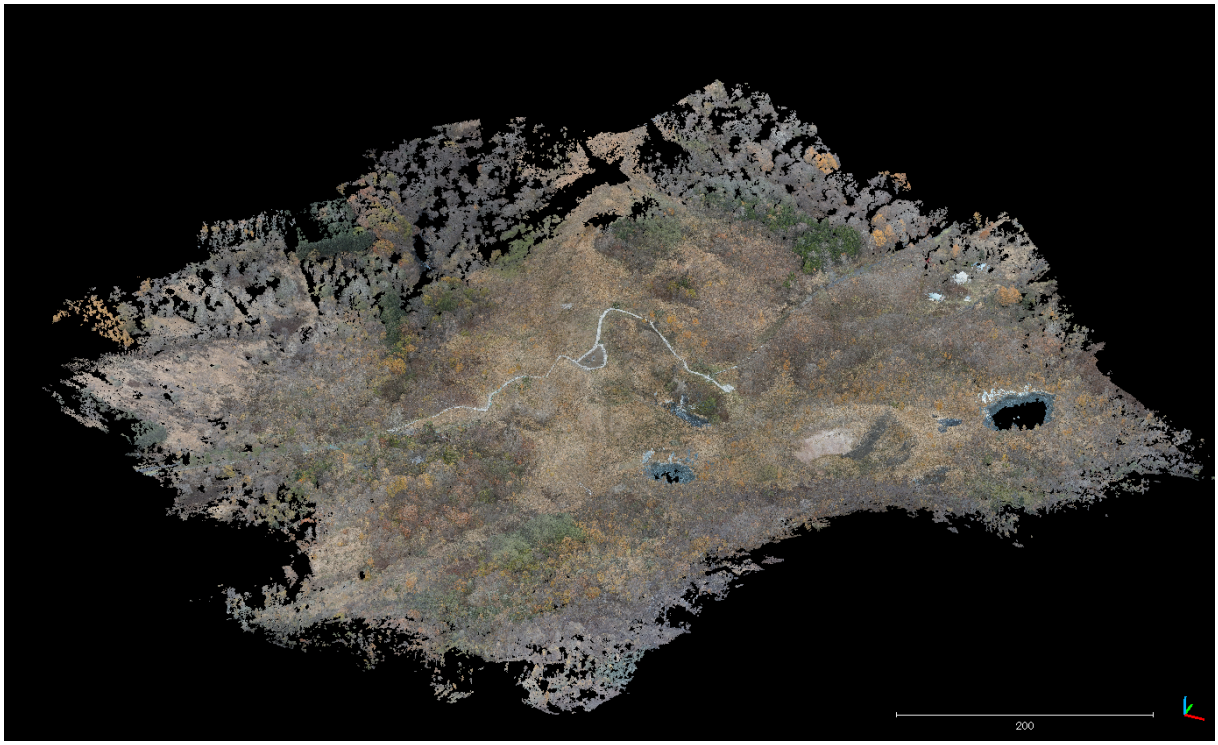


図 22　DJI Terra 生成点群（No.2）

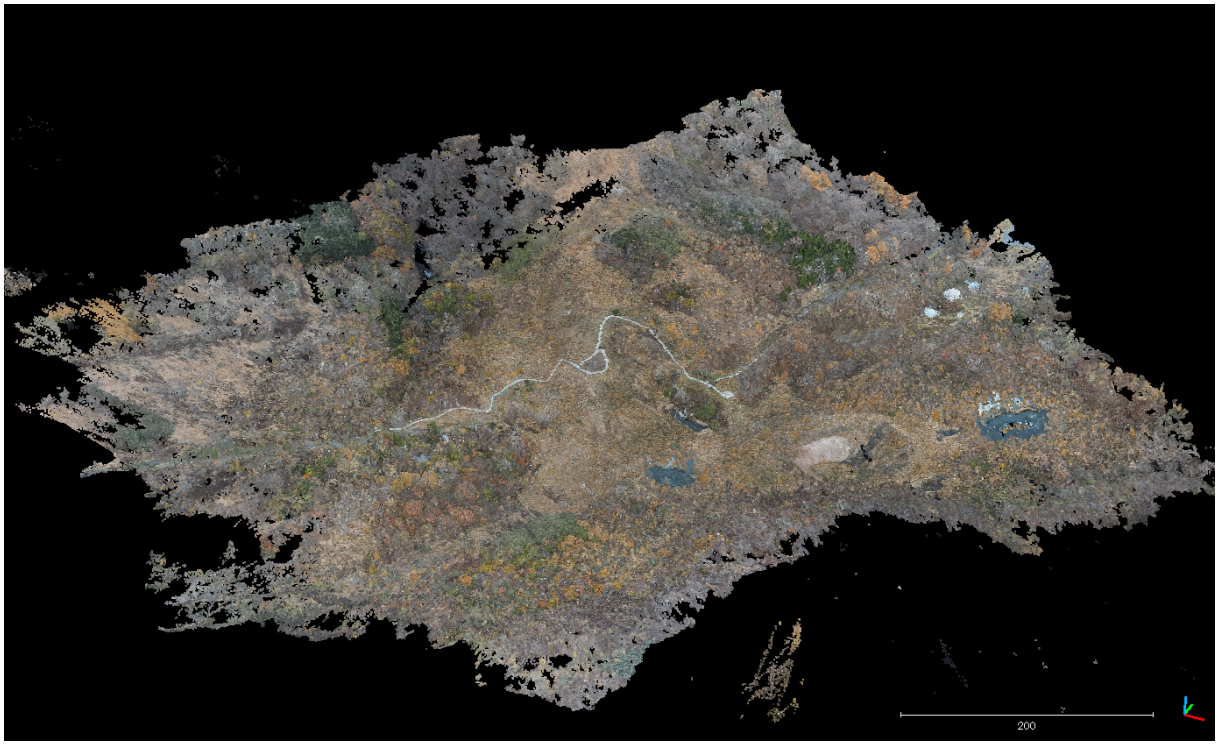


図 23 Pix4D 生成点群（No.2）

3) リアルタイム 3D マッピングの実施

DJI Terra には、飛行中（撮影中）に三次元地形モデルを作成するリアルタイムマッピング機能がついている。リアルタイムマッピングでは、画像解像度を下げ、UAV から DJI Terra がインストールされている PC にデータを転送することで、処理速度を優先し、地形モデルを作成している。

DJI がリアルタイム 3D マッピングをサポートするドローン機体は Phantom4-RTK（送信機）、Phantom4ProV2.0, Phantom4Pro+V2.0 である。本年度に導入した Matrice300-RTK は、サポート対象外であるため検証ができなかった。本検証では Phantom4-RTK でリアルタイム 3D マッピングを実施した。

図 24 に赤枠と桃枠で示す範囲を計測範囲として撮影し、飛行中にデータが転送された箇所から地形モデルがリアルタイムで作成されることを確認した。画像解像度を 5472×3648 から 960×640 に下げ、地形モデルが作成されていた。

表 12　リアルタイム 3D マッピング処理時間

撮影条件	撮影枚数	処理時間
最低限範囲	76	飛行時間**約 12 分**の間に、三次元地形モデルの作成まで完了。
理想範囲	123	飛行時間**約 20 分**の間に、三次元地形モデルの作成まで完了。



図 24　リアルタイム 3D マッピングの計測範囲

(3) 結論

有珠山において、RTK-GNSS 搭載 UAV を用いた撮影を行い、基準点（GCP）を設置せずに三次元モデルを作成する方法を研究した。「RTK-GNSS 搭載 UAV」の Matrice300-RTK と Phantom4-RTK を用いて同一エリアの撮影を行い、比較検証を行った。Matrice300-RTK のスマートオブリーク機能を使用することで、精度よく三次元地形モデルが作成できていることを確認した。RTK ありと RTK なしの精度を比較したところ、RTK なしでは高さ方向に数 m の誤差が発生する可能性があるため、高精度の三次元モデルを作成するためには、UAV に RTK の機能が必須になる。

インフラ点検等で行われている自動航行による目標物の撮影手法について、火山地形に適用可能か検証したところ、問題なく自動航行・撮影(日中・夜間)によって定点からの画像取得ができることを確認した。特に夜間における自動航行・自動撮影は、火山噴火時の調査（噴石の落下位置を迅速に把握するなど）に有効であると考えられる。

SfM/MVS の計算時間を短縮するため、計測データを DJI Terra、PIX4D、PIX4D react を使用して三次元地形モデルおよびオルソ画像作成までの処理時間を計測した。PIX4D react は比較的短時間でオルソ画像を作成できる一方、PIX4D は 3D 地形モデルも構築するため処理に数時間かかる。数値標高モデルを必要とせず、オルソ画像のみが迅速に必要な場合は、2D 高速マッピング用ソフトの利用が望ましい。飛行中（撮影中）に三次元地形モデルを作成するリアルタイムマッピングは UAV の機種が限定されるものの、UAV の飛行終了後までに三次元モデルを作成することができた。

(4) 引用文献

なし

(5) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(6) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

(a) 特許出願

なし

(b) ソフトウェア開発

なし

(c) 仕様・標準等の策定

なし

２．１．３　令和５年度の業務計画案

(1) プロジェクトの総合推進

- サブテーマ２との連携：ドローンを活用した地形変化抽出を行い、予測降灰量と照合することを目的として、数値地形モデルの迅速な作成について効率化を図ることで実施する。
- サブテーマ３との連携: 各種コンテンツのインプットデータとして利用するため、ドローンで取得した画像から地図と重ねられる「オルソ画像」および「三次元表示」を迅速に作成する手法の効率化を図ることで実施する。
- テーマA、B4、Cとの連携:UAVで得られたデータ（作成した3D地形モデル等）の受け渡し方法について連携して研究する。
- 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携・融合の一環として、現地で取得した画像から３Ｄ地形モデルを作成する技術の体験、民間企業における火山調査関連技術や火山防災業務の紹介等のプログラムを計画・準備した上で、開催案内と参加者募集を行う。
- アプリケーション開発・解析結果の提供等を通して、同一課題内での連携を推進する。

(2) データ取得作業の効率化

- 2022年度は、有珠山にて飛行時間が長いGNSS搭載UAVを導入し、飛行距離・飛行範囲をさらに拡大した研究を行った。
- これまでの検討により、現地でのデータ取得を適切にできなかった場合に課題が生じることがわかっている。そこで、2023年度は、3D地形モデル作成前に取得画像の状態を確認するための補助アプリケーションを試作し、データ取得作業の効率化（時間短縮）に関する研究を行う。

(3) 画像や3D地形モデルから状況認識する方法の検討

- 2019年度に、火口近傍に飛散する噴石について、阿蘇山で作成した3D地形モデルからAIを用いて噴石跡の自動抽出を試みた。
- 2023年度は、AIを用いて噴石跡抽出の精度向上や噴石以外（溶岩流等）の事象抽出を試み、状況の自動認識を高度化することを検討する。また、抽出した結果を地図上に重ね合わせることを考慮した出力を検討し、他テーマとの連携を図る。

(4) 解析作業の効率化

- 2022年度は、有珠山にてRTK-GNSS搭載UAVを用いて、リアルタイムにデータ処理を行うソフトウェアを導入し、高精度の3D地形モデルをさらに短時間で作成する手法について研究した。3D地形モデル作成に要する時間の短縮は図れたものの、一定の処理時間は必要であることが課題として残った。
- 2023年度は、3D地形モデル作成せずに抽出できる情報として、単写真測量とAIを組み合わせ変化状況の抽出を試みる研究を行う。これにより、早期に提供できる情報の高度化を図る。

(5) データ取得から状況把握までの手順化・課題整理の検討

- 2020年度、2021年度に伊豆大島、2022年度に有珠山と現地実証実験を試みてきた。
- 2023年度は、これまでの現地実証実験の知見をもとに、データ取得から状況把握までの手順化と課題抽出の整理を行う。

２．２　サブテーマ２

２．２．１　業務の内容

(1) 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」

(2) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	井口　正人
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	中道　治久
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	為栗　健
国立大学法人京都大学	共同実施機関	助教	山本　圭吾
国立大学法人京都大学	共同実施機関	助教	山田　大志
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	竹見　哲也
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	丸山　敬
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定教授	山路　昭彦
国立大学法人京都大学	共同実施機関	研究員	真木　雅之
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定助教	石井　杏佳
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特別研究員 DC2	瀧下　恒星
国立大学法人京都大学	共同実施機関	RA	Vico Luthfi Ipmawan
国立大学法人京都大学	共同実施機関	RA	高橋　龍平
国立大学法人筑波大学	協力機関	教授	田中　博
国立大学法人神戸大学	協力機関	教授	大石　哲
国立大学法人東北大学	協力機関	准教授	太田　雄策
国立大学法人東京大学	協力機関	准教授	鈴木　雄治郎
国立研究開発法人国立環境研究所	協力機関	主任研究員	清水　厚
一般財団法人日本気象協会	協力機関	部長	佐々木寛介
一般財団法人日本気象協会	協力機関	技師長	井上　実
国立大学法人鹿児島大学	協力機関	准教授	西　　隆昭
国立大学法人高知大学	協力機関	教授	佐々　浩司
国立大学法人北海道大学	協力機関	名誉教授	藤吉　康志

(3) 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。

(4) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

(a) 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。

(b) 平成 29 年度：

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

(c) 平成 30 年度：

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

(d) 平成 31 年度（令和元年度）:

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

(e) 令和 2 年度：

令和 2～4 年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発する。令和 2 年度はそのためのデータベースを整備した。これらのデータベースは、火山灰噴出率、レーダー噴煙高度、高解像度風速場、降下火山灰量である。噴出率の評価については、観測坑道をはじめとする桜島の高精度観測により、かなり実用的なものになった。即時把握技術開発においては、X バンド MP レーダーにより南九州の 4 火山において噴煙を検知する実績が積み上がり、実用段階となった。

(f) 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た。データベースの構成要素である火山灰噴出率、レーダー噴煙高度、高解像度風速場、降下火山灰量の高精度化が図られた。また、大規模噴火等の連続噴火に対応するためのシミュレータの改良設計を行った。

(g) 令和 4 年度：

引き続き、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を進める。データベースの構成要素である火山灰噴出率、レーダー噴煙高度、高解像度風速場、降下火山灰量の高精度化を図る。また、大規模噴火等の連続噴火に対応するためのシミュレータをオンラインシステムに実装し、試験運用を開始する。令和 5～7 年度に予定した噴火発生前の降灰確率の予測研究を 1 年前倒して着手する。

(h) 令和 5 年度：

引き続き、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。

(i) 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。

(j) 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。

(5) 令和 4 年度における業務の方法

これまで進めてきた「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速度化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」を引き続き継続する。観測継続による新たなデータの蓄積により、噴煙の検出の定量化を図るとともに、火山灰拡散予測の高速度化および高精度化を進める。令和 2～4 年度は、長時間継

続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発するが、令和4年度は連続化火山灰拡散予測シミュレータをオンラインシステムに実装し、試験運用を開始する。さらに、令和5～7年度に予定した噴火発生前の降灰確率の予測研究を1年前倒して着手する。

(a) プロジェクトの総合推進

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

(b) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

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

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

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

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。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。

(c) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

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

課題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。

(d) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

桜島を対象にドローンを用いて上空の風速ベクトルおよび火山灰・火山ガスの計測調査を年間 2 回程度実施する。主にドローンによる上空の乱流計測の可能性調査および桜島上空の火山灰・火山ガス濃度分布の実測データの蓄積に取り組む。

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

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

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

(e) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

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

(f) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

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

２．２．２　令和４年度の成果

(1) 業務の要約

令和４年度においては、これまでに単発的なブルカノ式噴火の観測及び解析によって培われた火山灰放出量の即時把握技術、予測の高速度化及び高精度化技術をさらに発展させたうえで、噴出率の時間変化を取り扱うことにより、長時間継続する噴火活動に対処する手法を開発した。リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、火山灰拡散予測の高速化技術開発、火山灰拡散予測の高精度化技術開発においては、令和３年度までの観測を継続して、火山灰に関連する新たなデータを取得することにより、これらの技術をさらに高度化させることにある。新たに加わった技術開発は、船舶レーダーの活用による高時間分解能化と非定常な乱流場の計算を行うことのできるキャノピーモデルを用いたラージエディシミュレーションによる高精度化である。

また、大規模噴火等の連続噴火に対応するためのシミュレータをオンラインシステムに実装して試験運用を開始し、その妥当性を検証するとともに課題を明らかにした。さらに、桜島における過去の地盤変動データを整理し、火山噴火に前駆する地盤変動継続時間および圧力源の体積変化量と噴火に伴う体積変化量をデータベース化した。このデータベースをもとに、前駆地盤変動継続時間と圧力源の体積変化量の確率分布を明らかにした。

(2) 業務の成果

令和４年度の業務の成果を 1）プロジェクトの総合推進、２）リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、3）火山灰拡散予測の高速化技術開発、4）火山灰拡散予測の高精度化技術開発、5）火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発、6）噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発に分けて、以下に述べる。

(a) プロジェクトの総合推進

「課題Ｃ　サブテーマ 3」および「課題Ｄ　サブテーマ 3」とオンラインで打ち合わせを行った。また、12 月に桜島大規模噴火に関する研究集会を開催した。

桜島火山防災協議会の構成メンバーである鹿児島県、鹿児島市、垂水市、九州地方整備局等と連携して大量降灰の予測、避難等の意思決定、対策のための勉強会を６月に開催した。

(b) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

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

ここで用いるレーダーは X バンドであり、周波数は約 9GHz、波長は約 3cm である。GNSS は L バンド帯（L1：1.5GHz、L2：1.2GHz）を使用し、波長は、それぞれ 19cm、

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

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

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

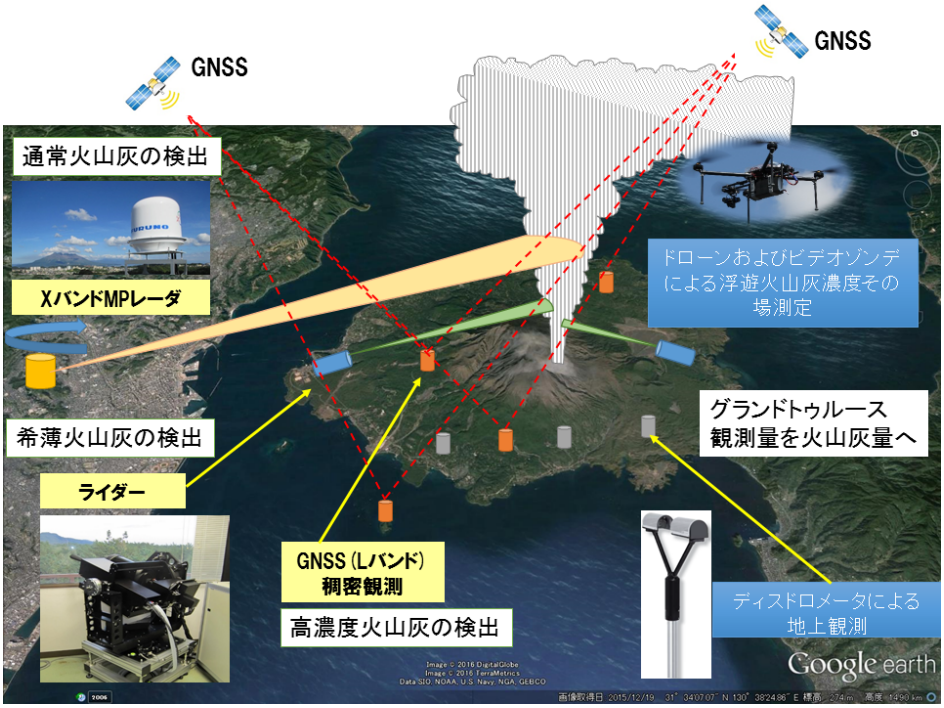


図 1　火山灰のマルチパラメータ観測の概要。

1）X バンド MP レーダー観測

21 世紀以降、噴火が発生した霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島を対象に、X バンド MP レーダーによる噴煙の連続観測を 2017 年 8 月から現在まで継続している。ここでは、レーダーによる噴煙観測の成果について述べる。

a）観測の概要

21 世紀以降、噴火が発生した霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島を対象に、X バンド MP レーダーによる噴煙の連続観

測を 2017 年 8 月から現在まで継続している。レーダーの設置場所は鹿児島県内 6 カ所で表 1 に示す通りである。また、走査の仰角と方位角のパラメータを表 2 に示す。

表 1　レーダー基地局の場所

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

表 2　レーダーの走査モード及びパラメータ（2023 年 4 月 1 日現在）

火山名	HSQ スキャン	セクターRHI スキャン	
	仰角（°）	方位角（°）	仰角範囲（°）
霧島山	10，15，20，25，35，40	設定なし	
桜島 （火山活動研究センター）	設定なし	95～115	10～57
桜島 （錦江湾高等学校）	2，5，10，15，20，25，30	設定なし	
薩摩硫黄島	5，10，15，20，30．45，60	設定なし	
口永良部島	5，10，15，20，30，45，60	設定なし	
諏訪之瀬島	設定なし	10～20*	10～60*

HSQ スキャンは、水平面での走査、セクターRHI スキャンは鉛直断面での走査である。
*口永良部島は 2018 年 8 月から 2021 年 8 月までセクターRHI スキャン観測をおこなった。諏訪之瀬島は 2020 年 8 月以降、セクターRHI スキャンで観測を継続しているが、2021 年 8 月 28 日に仰角を 10-45° から 10-60° に変更した。

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



図 1　レーダーの設置状況。鹿児島県立錦江湾高等学校に設置したもの。



図 2　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



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。

b) 桜島噴火

2022 年 9 月 23 日 13 時 35 分（世界時刻午前 4 時 35 分）に開始した噴火について述べる。この噴火は開始から 1 時間に渡って噴火が継続し、その間に大量の火山灰を放出した。桜島の黒神町一帯に 200～800 g/m^2 の降灰量が確認された(本報告書)。一方、噴煙高度は 1700m とそれほど高くはなく、山麓における空振値は 1 Pa 未満であった（鹿児島地方気象台)。図 4 に噴火開始直後から 23 分後までのレーダー反射強度分布を示す。反射強度分布から 20dBz の等反射強度の最高高度を噴煙高度とすると、噴火開始から 9 分経過時の噴煙高度は火口上 2500 m 程度に達し、噴火から 23 分後においても同じ噴煙高度であることが見て取れる。これは、噴出率の時間変化がほとんど無いことを示唆している。この図は北から時計回りに 100 度の断面図を示しているが、時間経過とともにレーダーサイト（Distance= 0 km）から東南東方向へ離れる方向に噴煙がゆっくり流れていることが見て取れる。

次に、図 5 に噴火開始から 25 分後から 54 分後までのレーダー反射強度分布を示す。噴火開始から 25 分経過時（14:01、 UTC5:01）の噴煙高度は火口上 4000 m 程度に達したが、その後、噴煙高度は低下して、噴火開始から 45 分後(14:13、UTC5:13)から 54 分後（14:29、 UTC5:29）では火口上 2000 m 程度で一定であった。この図は北から時計回りに 100 度、101 度および 102 度の断面図を示しているが、時間経過とともにレーダーサイト（Distance= 0 km）から東南東方向へ離れる方向に噴煙が流れていることが見て取れる。

2022 年 9 月 23 日 13 時 35 分に開始した噴火は、噴火開始後 25 分後あたりの時間を除いて噴煙高度は 2000～2500 m と高いわけではないが、噴火の継続時間が 1 時間以上と長いことが大量の火山灰放出につながったことが分かった。

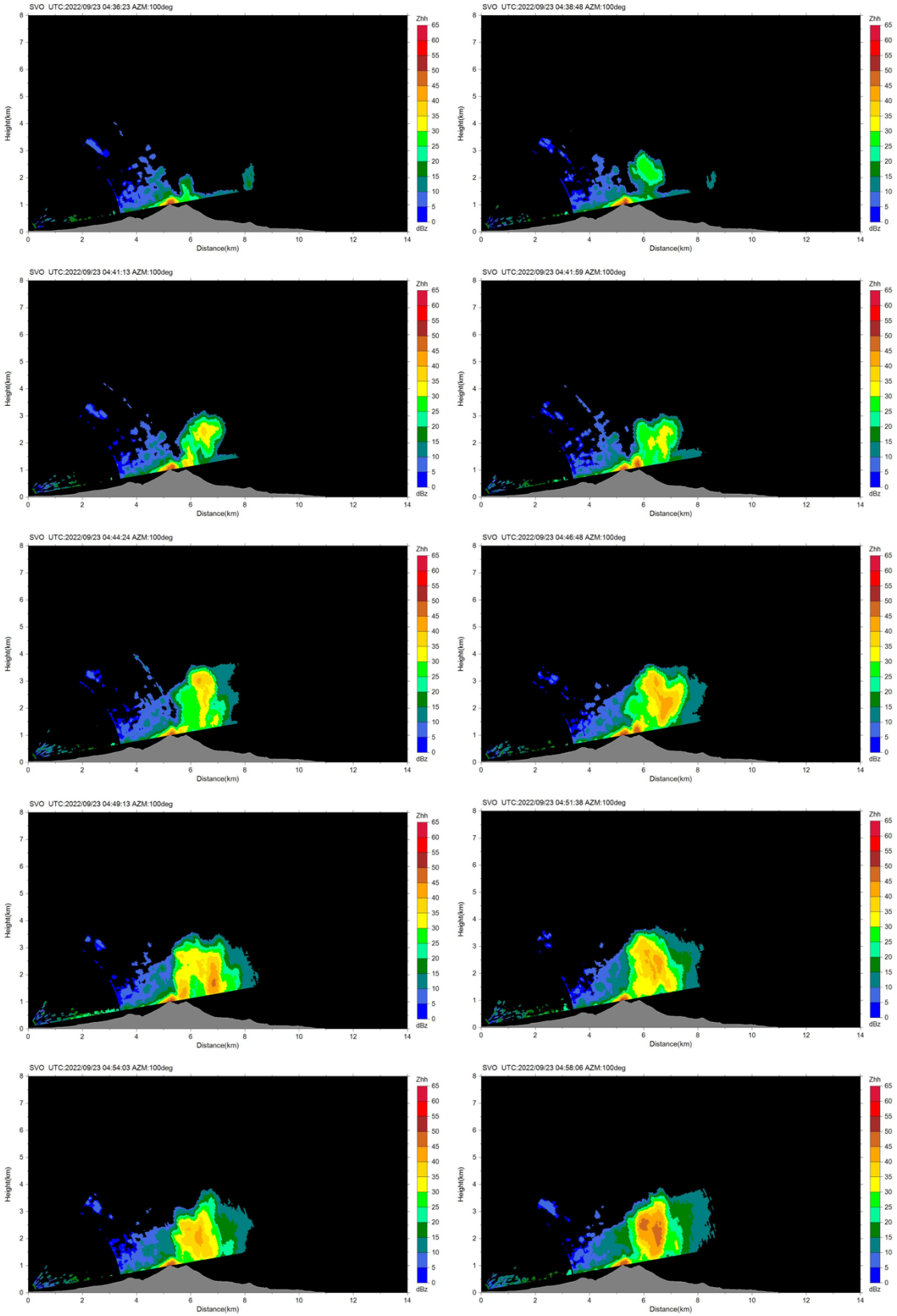


図 4　桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2022 年 9 月 23 日 13:36～13:58 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

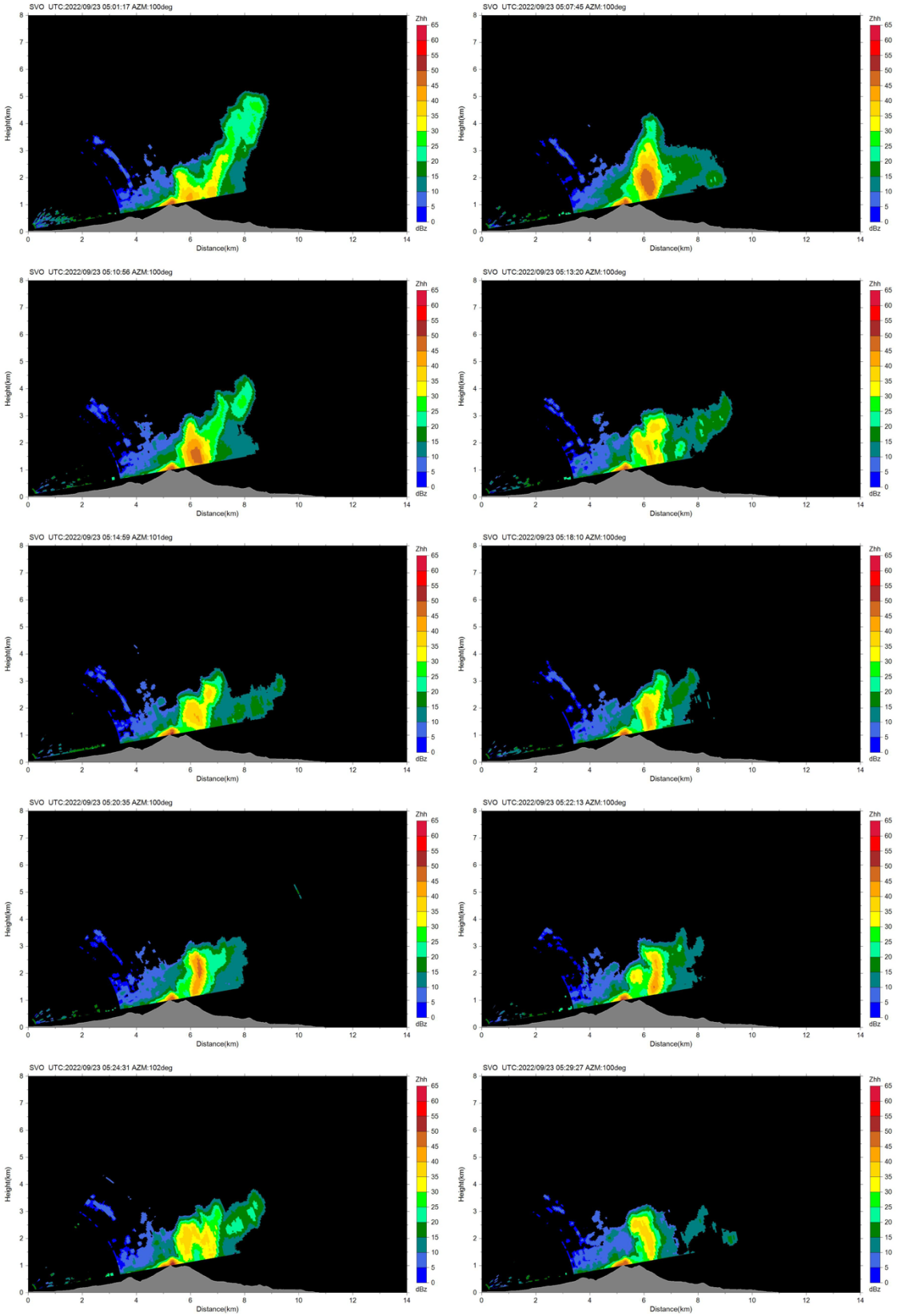


図 5　桜島火山観測所レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2022 年 9 月 23 日 14:01～14:58 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

c）諏訪之瀬島噴火

2021 年に引き続き 2022 年においても諏訪之瀬島において噴火が頻発した。気象庁が 2022 年に発表した諏訪之瀬島の噴火に関する火山観測報のうち本報告書にてレーダー反射強度分布を示す噴火を表 3 に示す。なお、空振振幅は京都大学が諏訪之瀬島の SWA 観測点に設置している空振計による値を用いた。噴火の時刻は SWA 観測点における空振到来時刻を示す。噴煙高度と流向は気象庁の噴火に関する観測報によるもので、噴煙高度は火口位置の標高を海抜 600 m としたときの、火口からの相対高度である。

表 3　2022 年の諏訪之瀬島の噴火のうちレーダー反射強度を示した噴火

年月日時分	噴煙高度 (m)	レーダー噴煙高度 (m)	空振 (Pa)	流向	図
2022/4/4　22:41:20	3300	2600	20.2	南	図 6
2022/5/28　6:24:23	1000	不明	153.0	南西	図 7
2022/9/3　1:34:22	不明	不明	340.0	不明	図 8

2022 年の噴火において最大の噴煙高度の噴火は 4 月 4 日 22:41 の噴火で、噴煙高度は 3300 m であった。この噴火時のレーダー反射強度分布を図 6 に示す。レーダーサイト（Distance = 0 km）から 3.6 km のところに御岳火口があり、20dBz の等反射強度の最高到達高度は海抜 3200 m である。火口からの相対高度は 2600 m であり、気象庁の報告の噴煙高度より低い。レーダー反射強度に表れないような噴煙柱の上部において火砕物の存在が希薄であったために生じたズレの可能性がある。気象庁の報告による流向は南であるが、レーダーの反射強度の分布からも噴煙が南方向、つまりレーダーサイトに時間とともに噴煙が移動しているのが見て取れる。

2022 年 5 月 28 日 6:24 に噴煙高度 1000 m の噴火が発生した。この噴火時のレーダー反射強度分布を図 7 に示す。御岳火口の上において、20dBz の等反射強度の最高到達高度は海抜 1000 m である。また、20dBz の等反射強度の分布が噴煙形状をしておらず、火口付近に定在し、形状が時間変化していない。20dBz の等反射強度の高度は、御岳火口からの相対高度で 400 m であり、気象庁の報告の 1000 m よりかなり小さい。これはレーダー反射強度に表れないような火砕物が希薄な噴煙である可能性がある。

9 月 3 日 1:34 の強い空振を伴う噴火の発生、つまり爆発の発生が報告されている。しかし、噴煙の状況は不明であった。この時の噴火のレーダー反射強度分布（図 8）から御岳火口の上において、20dBz の等反射強度の最高到達高度は海抜 1000 m である。また、20dBz の等反射強度の分布が噴煙形状をしておらず、火口付近に定在し、形状が時間変化していないことは図 7 に示す 5 月 28 日 6:24 の噴火と同様である。この時の噴火においても、これはレーダー反射強度に表れないような火砕物が希薄な噴煙である可能性がある。

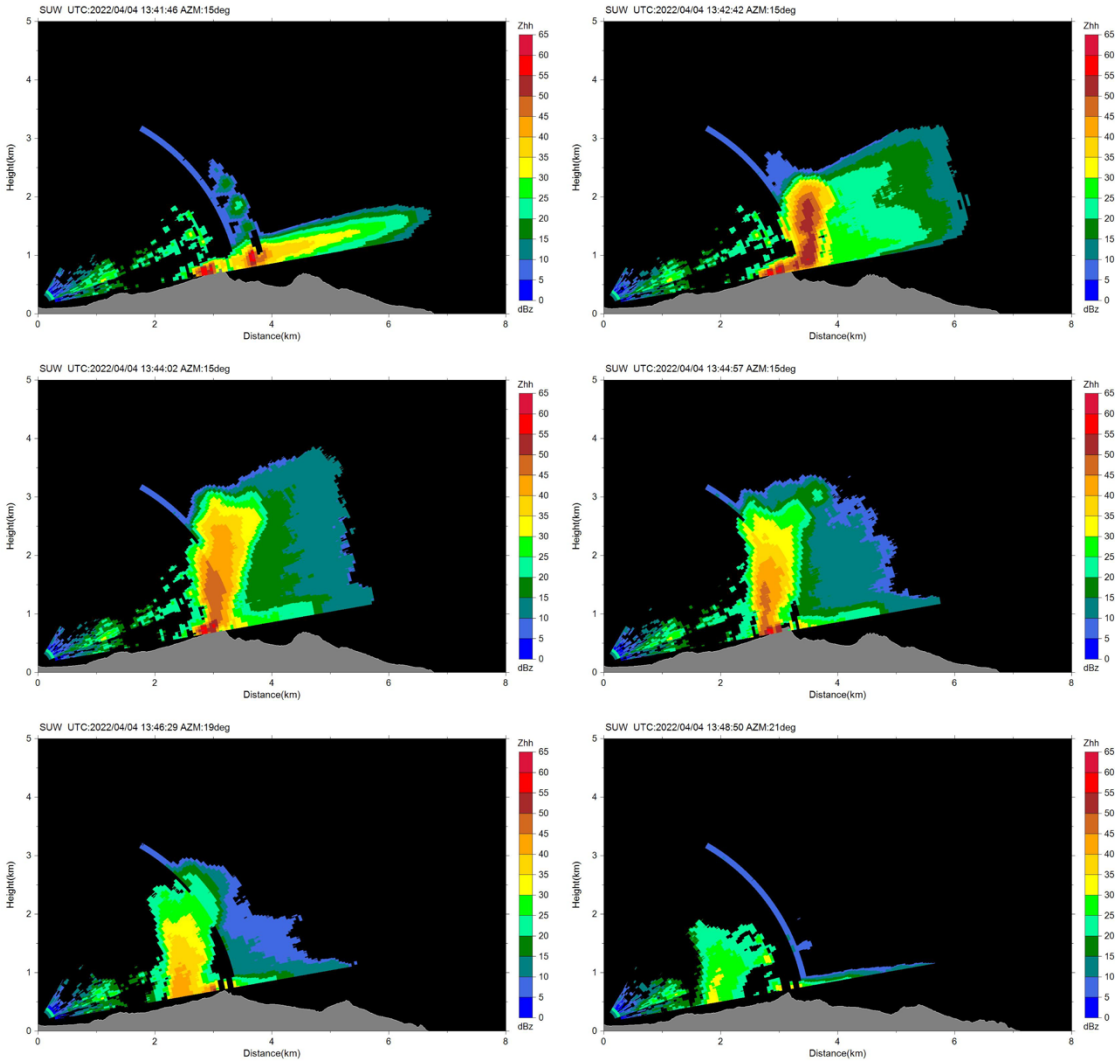


図 6　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2022 年 4 月 4 日 22:41～22:48 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。反射強度が 50dBz 超える領域は地形の急峻な部分に対応しているため、地上からの反射の影響と思われる。

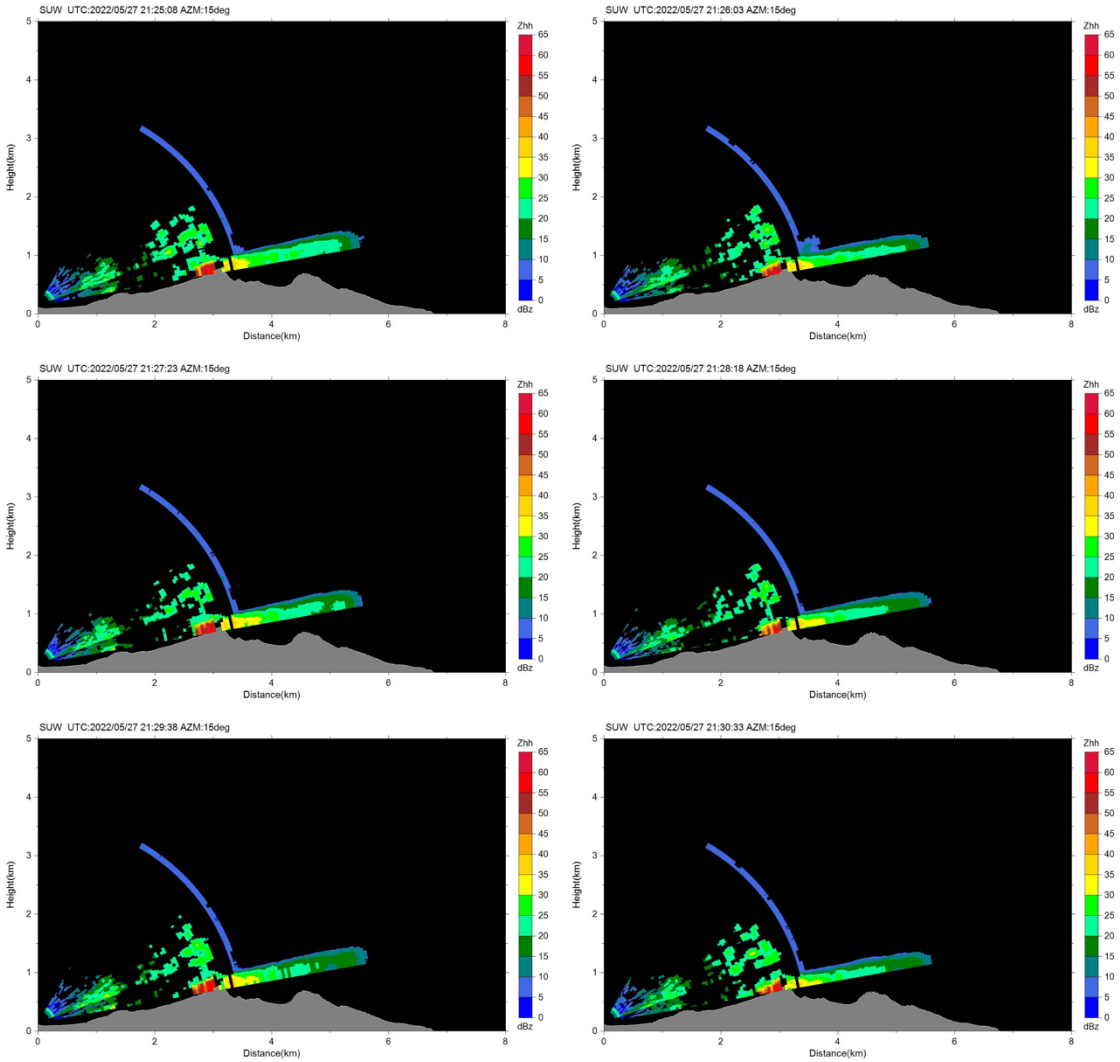


図 7　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2022 年 5 月 28 日 6:25～6:30 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。反射強度が 50dBz 超える領域は地形の急峻な部分に対応しているため、地上からの反射の影響と思われる。

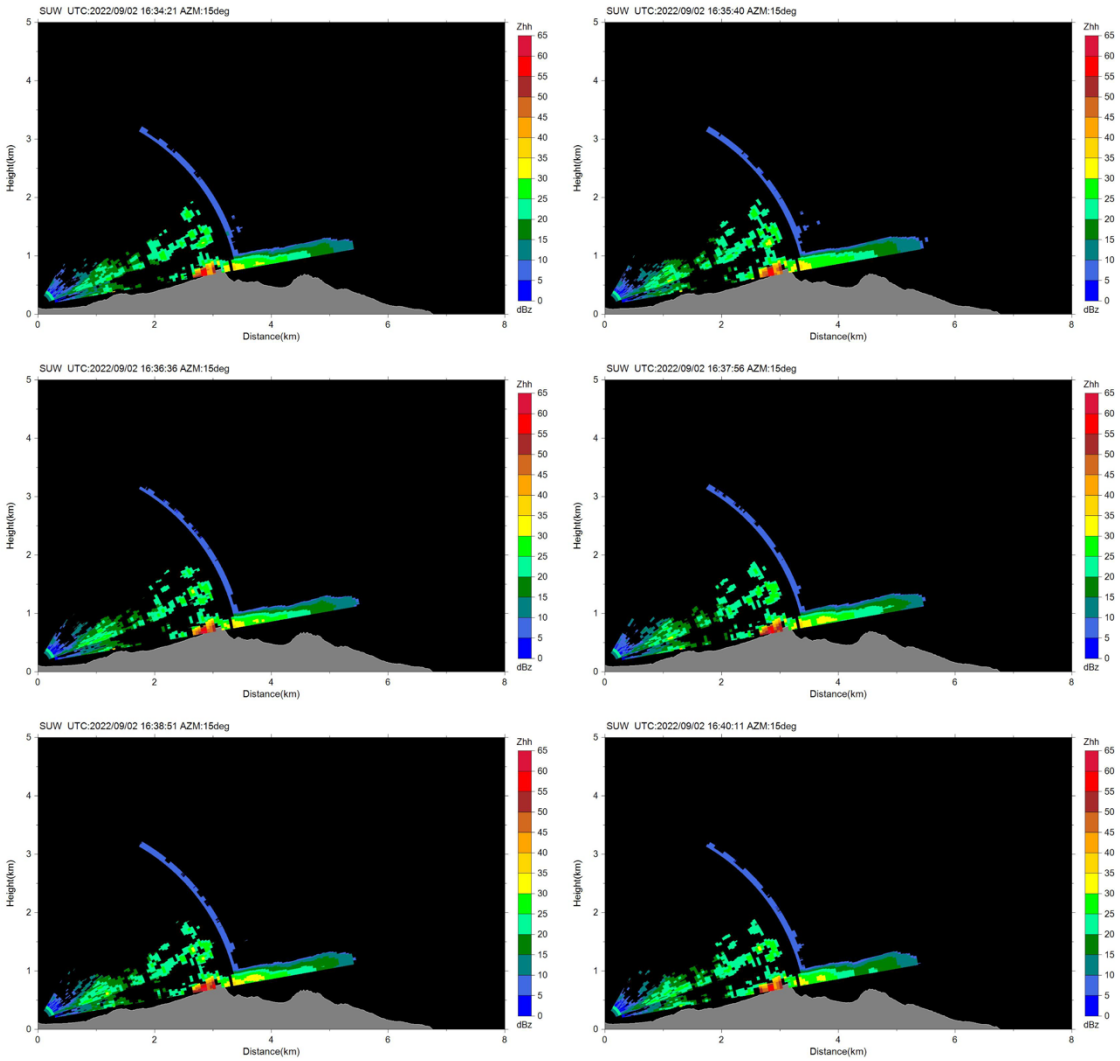


図 8　諏訪之瀬島レーダーによる RHI スキャンによる反射強度分布。2022 年 9 月 3 日 1:34～1:40 のレーダーによる噴火映像。図記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

昨年度報告した 2021 年 7 月 7 日、7 月 31 日と 9 月 26 日の噴火の事例と同様に、表 3 に示す噴火についてレーダー反射強度分布と空振振幅と比較すると、反射強度分布と噴煙形状の有無、噴煙高度や空振振幅の正比例の関係を見いだせない。一般的には、空振振幅が大きい噴火は規模の大きな噴火であるため、噴煙高度も大きくなる。つまり、レーダー反射強度分布においても明瞭な高まりが見られるはずである。しかし、諏訪之瀬島の 2021 年以降の噴火活動においてはそのような関係は成り立つことないと言える。そこで、2021 年以降の諏訪之瀬島の噴火についてレーダー反射強度と空振パルス振幅との関係の調査を行った。

まず、諏訪之瀬島の火口座標（129。715° E、29。642° N）において、海抜高度 900 m から 6100 m の間を Cressman 内挿にてレーダー反射強度を抽出した。空振計記録において 10Pa 以上の増圧位相振幅の空振パルスを対象とした。そして、2021 年 6 月 26 日 8 時から 2022 年 1 月 22 日 9 時までを対象に、1 時間毎に 1 時間における

積算反射強度因子と空振パルスの最大振幅値および、積算反射強度因子と空振パルスの積算振幅値の比較をそれぞれ図 9 と図 10 に示す。比較にあたっては、諏訪之瀬島において時間雨量 1 mm 以上の時間帯のレーダー及び空振データは除外した。

最大空振振幅が大きい時間帯では積算レーダー反射強度が小さく、積算レーダー反射強度が大きい時間帯では最大空振振幅が小さい傾向がある。この期間において最大空振振幅の最大値となったのは 7 月 7 日 0 時 10 分の空振パルスであり、7 月 7 日 0 時～1 時における積算レーダー反射強度は 48 mm^6/m^3 である。一方、積算レーダー反射強度が最大値となったのは 7 月 13 日 15 時～16 時で、この時間帯における最大空振振幅は 29Pa であった。なお、積算レーダー反射強度が 100 mm^6/m^3 未満で空振振幅が 100Pa 未満の時間帯においては、小振幅の空振パルスが頻発しており、ストロンボリ式噴火が頻発していたと解釈できる。この時間帯を除外すれば、空振振幅が大きい時間帯（最大値 300Pa 以上）では積算レーダー反射強度が小さく（10^5 mm^6/m^3 未満）、気象庁が報告している噴煙高度は火口縁上 2000 m 未満である。一方、空振振幅が小さい時間帯（最大値 200Pa 以下）では積算レーダー反射強度が大きい時間帯があり、このような時間帯では噴煙高度が 3000 m を超える噴火があった。

これらのことから、空振振幅の大きい噴火は火山灰放出量が少なく、噴煙高度が低い。一方、空振振幅が小さい噴火は火山灰放出量が多く、噴煙高度が高いと言える。ストロンボリ式噴火が発生している時間帯を含めると、レーダー反射強度が小さい時間帯では、火山灰量が少ないと考えられ、火山ガス放出量が多い噴火が卓越、つまり新鮮なマグマによる噴火が卓越していると解釈できる。一方、レーダー反射強度が大きい時間帯では、火山灰放出量が多く、火山ガス放出量が少ない噴火が卓越、つまり脱ガスが進行したマグマによる噴火が卓越していると解釈出来る。

レーダー反射強度と最大空振振幅について出現時間パターンをから諏訪之瀬島の噴火の状態遷移をまとめた（図 11）。レーダー反射強度と噴煙高度が大きく、空振振幅が小さい噴火が卓越する状態とレーダー反射強度と噴煙高度が小さく、空振振幅が大きい噴火が卓越する状態が日単位もしくは週単位で交互に状態遷移していた。また、レーダー反射強度と噴煙高度が大きく、空振振幅が小さい噴火が発生直後からそれらすべてが小さいストロンボリ式噴火が卓越する状態を経て反射強度が小さく、噴煙高度が小さく、空振振幅が大きい噴火が卓越する状態に数時間の遷移が 7 月 31 日 18：15 以降に見られた。この遷移において、脱ガスが進行したマグマが噴火で放出された後に、新鮮なマグマによりストロンボリ式噴火が起こり、ブルカノ式噴火に移行したこと示唆している。

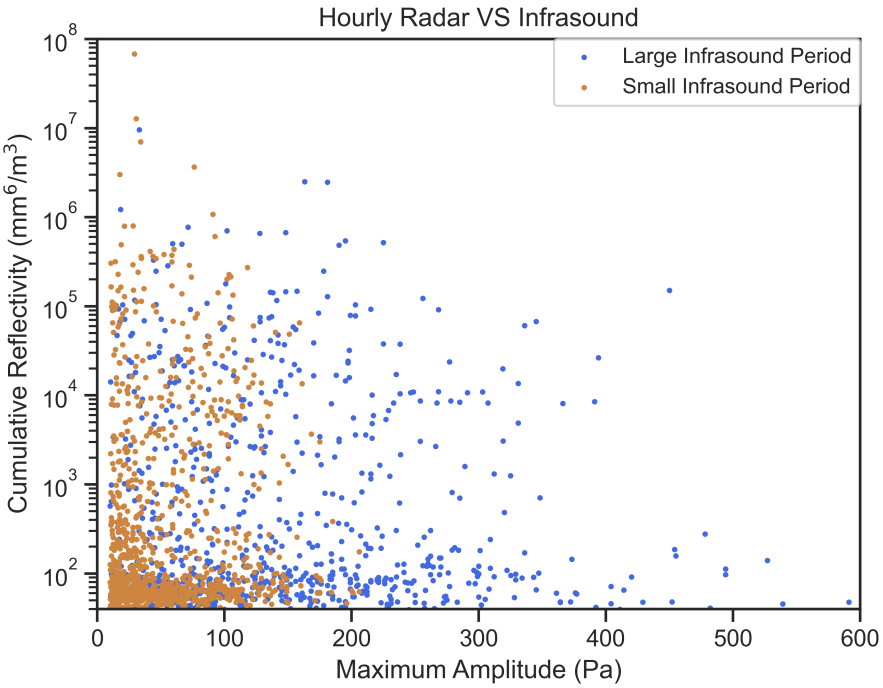


図 9　1 時間の時間窓における空振パルスの正振幅の最大値と積算レーダー反射強度因子。1 時間の時間窓において 200 Pa 以上の振幅の空振パルスが複数存在する時間帯を Large Infrasound Period とし、それ以外の時間帯を Small Infrasound Period とし、それらの時間帯に対応する値を青丸と茶丸にて示す。

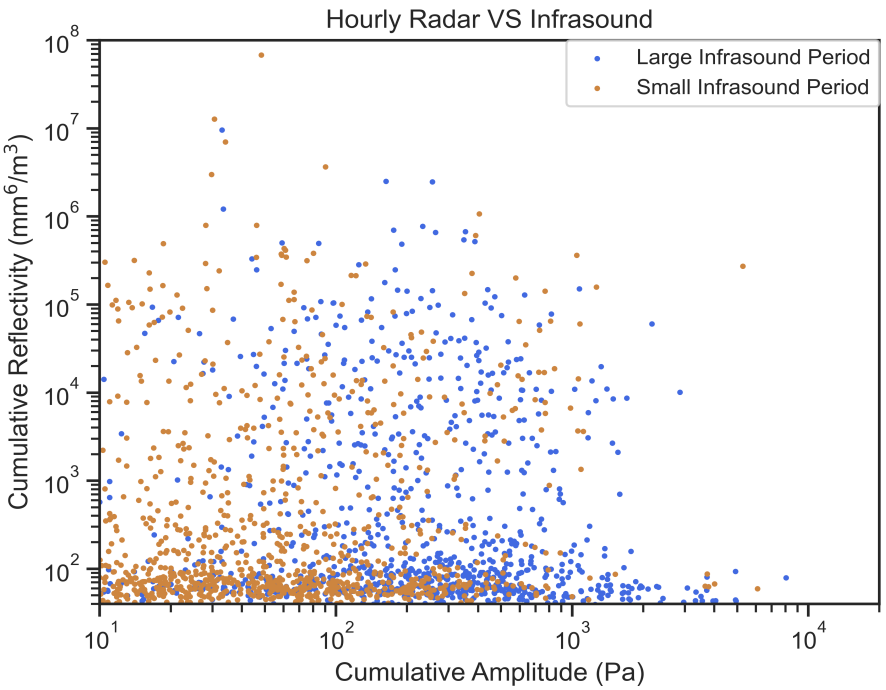


図 10　1 時間の時間窓における空振パルス振幅の積算値と積算レーダー反射強度因子。1 時間の時間窓において 200 Pa 以上の振幅の空振パルスが複数存在する時間帯を Large Infrasound Period とし、それ以外の時間帯を Small Infrasound Period とし、それらの時間帯に対応する値を青丸と茶丸にて示す。

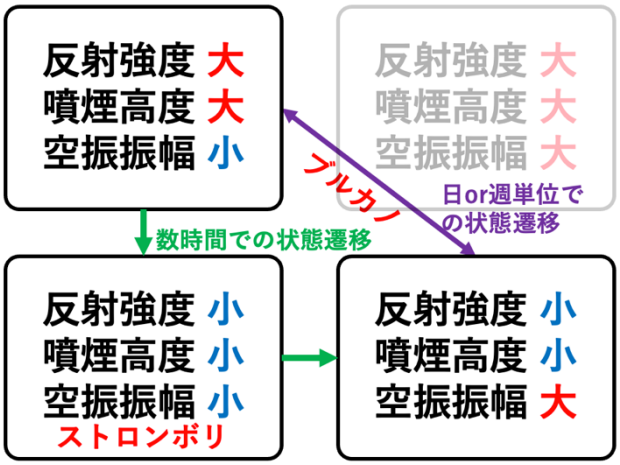


図 11　2021 年 6 月 26 日から 2022 年 1 月 22 日の諏訪之瀬島の噴火の状態遷移。

2）ライダー観測

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

a）令和 4 年のライダー稼働状況

桜島火山観測所本館と黒神観測室に設置された 2 波長偏光ライダーは自動連続運転が可能な仕様となっている。それぞれの地点から南岳火口付近に向けレーザーを

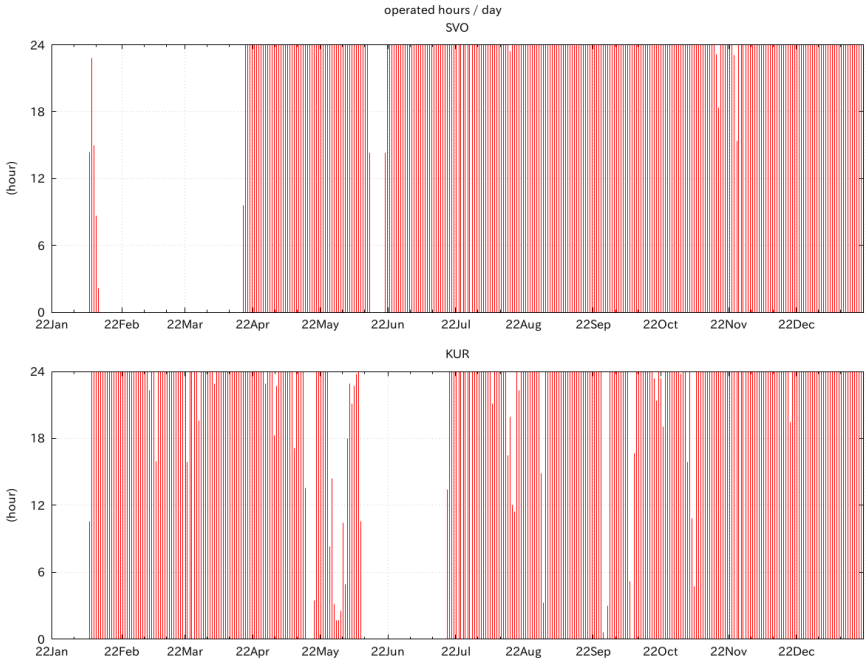


図 12　2022 年の観測所本館（上）および黒神観測室（下）における日毎のライダー観測時間。

射出し、粒子からの後方散乱光を望遠鏡で集光して経路上の粒子分布を遠隔計測する。図 12 に、令和 4 年の日毎の観測時間を表示する。年頭に観測所本館で長期の欠測があり、6 月頃には黒神観測室でも停止期間が見られた。いずれも噴火自体が少ない期間であったためデータ解析に大きな支障はなかったが、黒神では欠測期間以外でも 1 日あたりのデータ量が不足する日も多く、安定して観測を続けるためレーザーの入れ替え等を検討する時期が迫っていると考えられる。

b) エアロゾル消散係数の季節変化

ライダー観測により得られた視線方向のエアロゾル消散係数を月平均し、鹿児島気象台から公表されている火山情報と対比した（手法は Shimizu et al.(2021)1)に準ずる)。結果を図 13 に示す。観測所本館ライダーから得られた消散係数は、火口に近い 5-6km のレンジにおいて 8 月以降継続して高かった他、鹿児島気象台で降灰量が最大となった 9 月にライダーでも近距離まで高い消散係数が見られ、東寄りの風を受けた移流の実態が捉えられた。なお噴火が少ない 3 月や 5 月にも高めの消散係数が現れており、これは鹿児島上空に到達した黄砂(気象台が発表するものに限らない)の影響が考えられる。消散係数のピーク値が噴煙によるものよりも低いことなどを利用して黄砂粒子の影響を解析から除外する手法を検討することも今後必要である。

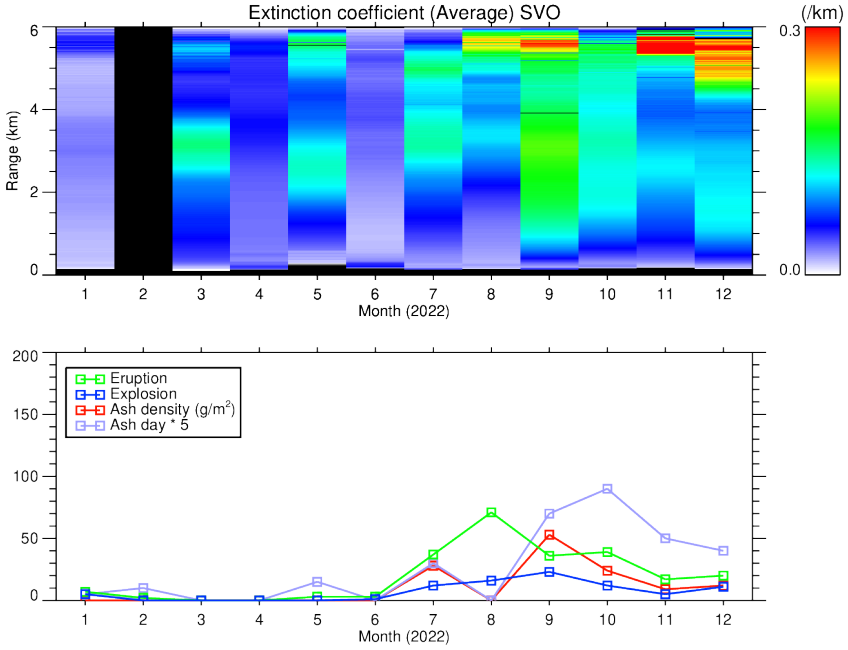


図 13 (上)月平均 532nm エアロゾル消散係数のレンジ方向分布と(下)鹿児島気象台による噴火(緑)/爆発(青)回数、降灰量(赤)、降灰日数(紫)。

今後は、2 地点におけるライダー観測を継続してデータ取得を行うことにより、火山灰移流拡散モデルの検証に利用可能なデータセットを作成するとともに、より長期のデータを用いた気候学的解析を行う。観測所本館に設置された浮遊粒子簡易計測装置による粒経別濃度(PM10、 PM2.5、 PM1)の解析を通じて降灰粒子のサイズと輸送経路等の関連について明らかにする。

3) GNSS 観測

2021 年度に解析を行った GNSS 搬送波位相残差（LC PPR）の結果と気象レーダー反射強度を比較し、その特性についての評価を行った。対象としたイベントは 2013 年 8 月 18 日の噴火時の気象レーダの反射強度（Maki et al.、 2019）を比較対象として用いた。図 14 にそれらの比較結果を示す。噴火直後の 16 時 35 分時点における図 14(a)の気象レーダの反射強度から、火口のすぐ西側に噴煙起因と見られる強度が強い領域が存在する。また図 14(b)に示した LC PPR の異常を示すパスのみが存在するセルの分布から、火口の西側と南西側に異常領域が分布することが確認できる。また図 14(c)に示した異常を示したパスの個数分布を見ると、火口の南西側で異常を示すパスが複数存在していることが確認され、両者の間で調和的な結果が得られた。また、噴煙が検知できる時間について比較を行ったところ、同イベントにおいては、気象レーダーでは噴火発生から 1 時間程度、LC PPR でのパルスの継続時間は 20 分程度であった。これらの相違は、噴煙の拡散に対する両センサーの感度の違いを反映していると考えられる。

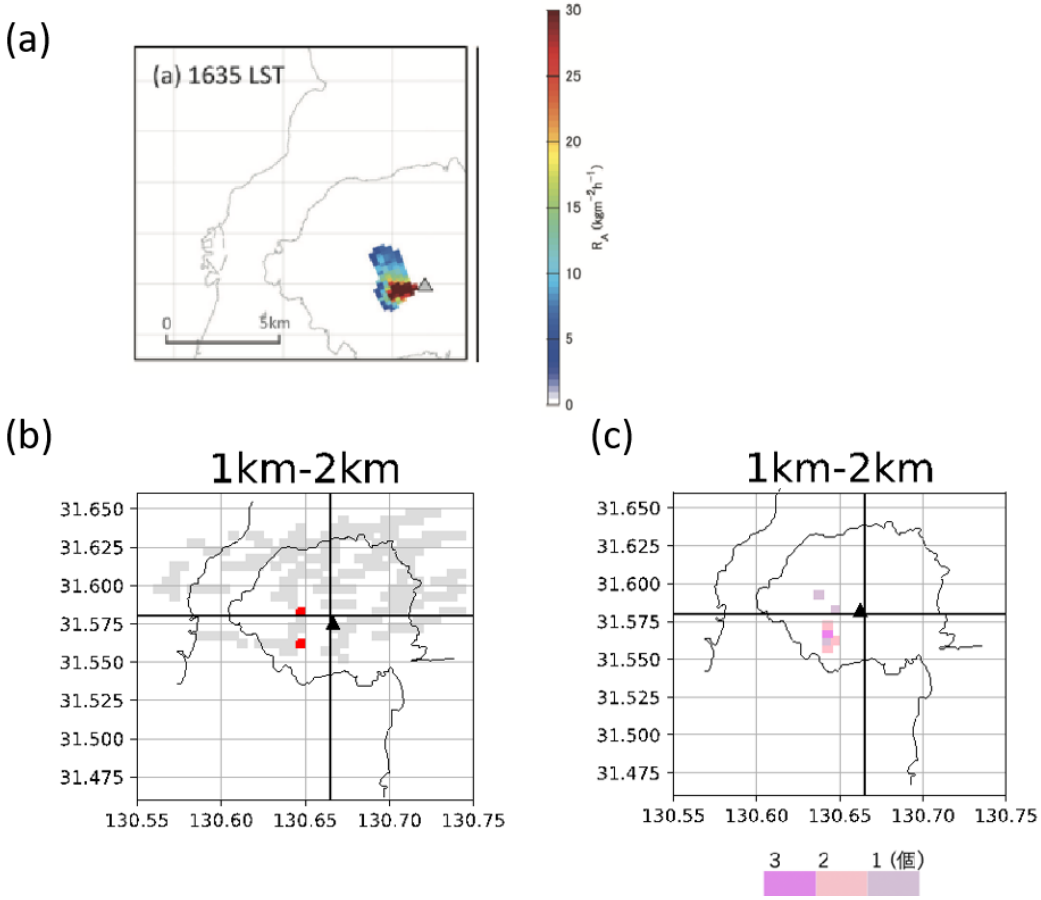


図 14　2013 年 8 月 18 日の噴火直後(16 時 35 分、噴火から 4 分後)における気象レーダと GNSS LC PPR の時空間分布の比較。(a) 気象レーダーの反射強度（ Maki et al. 2019)、(b) LC PPR の異常を示すパスのみが存在するセルの分布、(c) LC PPR の異常を示したパスの個数分布。

また、LC PPR で異常と判定されたパスの値と気象レーダの反射強度の比較を行った結果を図 15 に示す。比較できるデータ自体が少ないものの、両者の間には正の相関が示された。GNSS の搬送波は気象レーダよりも波長が長いため、噴煙中の水蒸気や火山灰に付着している水により感度があると考えられる。しかし、今回の比較では両者の間に一定の相関が見られ、同様の物理量を反映した結果である可能性がある。この結果は今後、両者の相互比較例を増やすことで、GNSS LC PPR が観測している物理量をより特定できる可能性を示唆する。

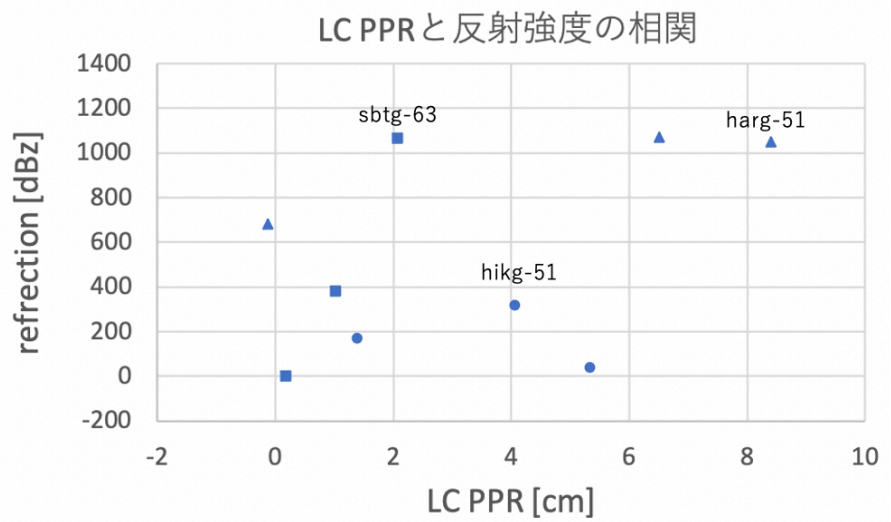


図 15　2013 年 8 月 18 日 16 時 40 分から 16 時 42 分における 3 本の視線方向（観測点 SBTG-GNSS SVN63 衛星、観測点 HARG-GNSS SVN51 衛星、観測点 HIKG-GNSS SVN51 衛星）の LC PPR の値と気象レーダの反射強度の比較。横軸は LC PPR の値、縦軸はパスの経路上の気象レーダの反射強度をそれぞれ示す。

4) ディスドロメータによる地上観測

令和 3 年度に引き続き、ディスドロメータによる地上降灰量観測を継続した。桜島においては、2021 年 5 月中旬以降、噴火活動が低下したが、時々、降灰量の多い噴火も発生したので、キャンペーン観測を行った。

a) ディスドロメータによる地上観測の概要

地上降灰量観測には降雨観測のために開発された 1 次元の光学式ディスドロメータ（PARSIVEL2、ドイツ OTT Hydromet 社製）を用いた。本装置は落下粒子によってさえぎられる光を計測することによって、粒径ごとに粒子を観測するパーティクルカウンターであり、粒径および落下速度ごとの粒子数を記録する。粒径の測定範囲は 0.25mm～26mm、落下速度の測定範囲は 22.4m/s 以下である。

ディスドロメータの桜島における位置を図 16 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、レーザー振幅に加え、粒径毎の 30 クラスと落下速度毎の 32 クラス、合計 960 クラスに分けた粒子数が 1 分毎に記録される。いずれの観測点もオンラインによるデータ取得が可能である。他のプロジェクトにより設置したものを合わせて 21 台のディスドロメータが桜島において稼働している。

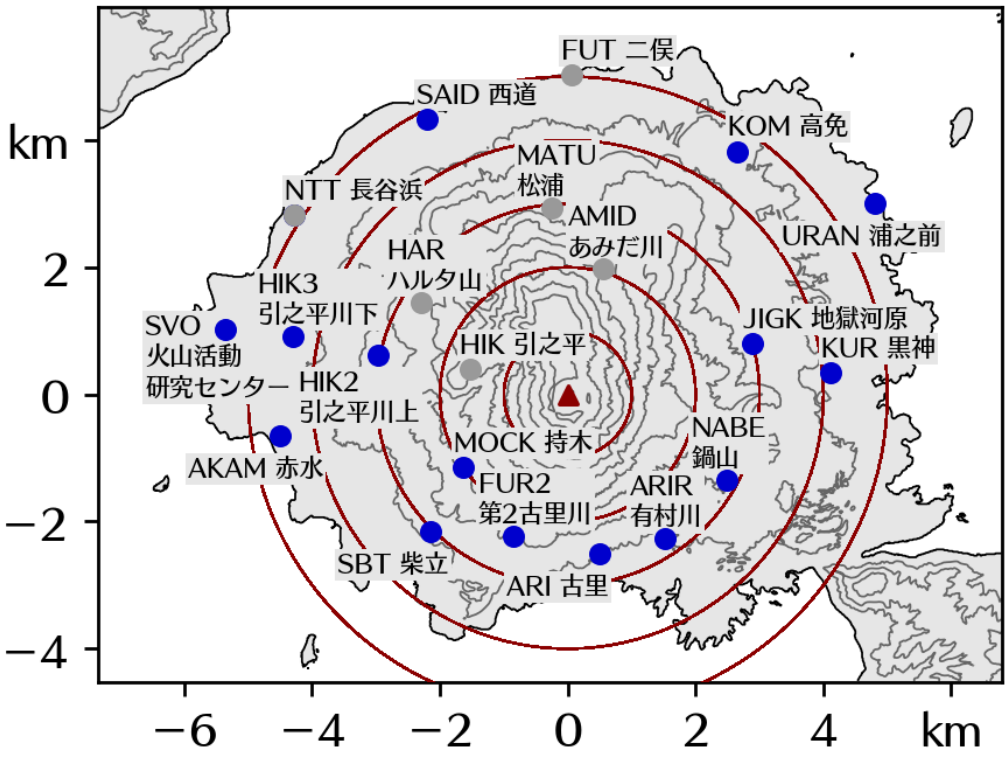


図 16　桜島におけるディスドロメータの位置図。青丸は本プロジェクトにおいて設置した観測点、灰丸は他のプロジェクトにおいて設置した観測点。赤三角は南岳 A 火口の位置を、赤線は南岳 A 火口から 1km ごとの同心円を示す。

b) 降灰量のキャンペーン観測

桜島島内において多量の降灰がもたらされた 2022 年 6 月 27 日、同 7 月 24 日、同 9 月 23 日の噴火発生後に、ディスドロメータの観測点やその他の地点で、降灰粒子のサンプル採取を行った。ディスドロメータでの観測結果を、令和 2 年度の報告書 d2)で求められた換算式により降灰重量に換算し、サンプル採取により求められた降灰重量と比較した。

2022 年 6 月 27 日 12:21 噴火は噴煙高度 1500 m で流向は北東だった（図 17)。計測された降灰量分布を図 18a に、AMID 観測点と MATU 観測点でのディスドロメータにより計測された積算の粒径―落下速度分布をそれぞれ図 18b、c に示す。ディスドロメータ計測とサンプル採取の両方が行われた MATU 観測点では、ディスドロメータ計測から計算された降灰量がサンプル採取により求められた降灰量の 0.75 倍だった。2022 年 7 月 24 日 20:05、翌 25 日 1:45、4:45、6:31 噴火に発生した噴火は噴煙高度がそれぞれ 300 m で雲入り、1200 m、不明、2200 m で雲入りだった。流向はそれぞれ直上、北東、不明、直上だった。噴火発生期間中にディスドロメータ計測が行われ、4 回の噴火が全て終了した 25 日 10 時から次の噴火が発生した 19 時の間に島内 5 地点でサンプル採取が行われた（図 19)。計測された降灰量分布を図 18a に、ディスドロメータにより 24 日夜間に計測された KOM、JIGK、KUR 観測点での積算の粒径―落下速度分布をそれぞれ図 20b、c、d に、25 日朝に計測された URAN、JIGK、KUR での計測結果を図 20e、f、g に示す。ディスドロメータ観測とサンプル最初の両方が行われた KOM、URAN、KUR の各観測点では、ディスドロメータ計測から計算された降灰量がサンプル採取により求められた降灰量のそれぞれ 1.1 倍、3.5 倍、0.18 倍だった。2022 年 9 月 23 日 13:35 に発生した噴火（図 21）は噴煙高度 1700m で流向は直上だった。計測された降灰量分布を図 22a に、JIGK 観測点と KUR 観測点でのディスドロメータにより計測された積算の粒径―落下速度分布をそれぞれ図 22b、c に示す。ディスドロメータ計測とサンプル採取が両方とも行われた KUR 観測点では、ディスドロメータ計測から計算された降灰量がサンプル採取により求められた降灰量の 2.1 倍だった。

降灰量が大きく過小評価となった KUR 観測点での 25 日朝の計測結果(図 5g)は、重量の計算対象から外れた粒径―落下速度区間の粒子がほとんどであり、これが過小評価の原因になったと考えられる。また、同じ時間帯における JIGK 観測点(図 5f)の計測結果は、KUR 観測点での結果と同様に、検知された粒子の多くが、換算式が計算対象とする区間よりも落下速度の速い粒子だった。そのため、換算式から計算された重量が、粒子が計測された粒径、落下速度の回転楕円体粒子だと仮定して計算される重量に対して 0.21 倍と非常に小さい値となっており、KUR 観測点と同様に、サンプル採取から推定される降灰量よりも小さかったことが予想される。



図 17　2022 年 6 月 27 日 12:19 噴火の様子。

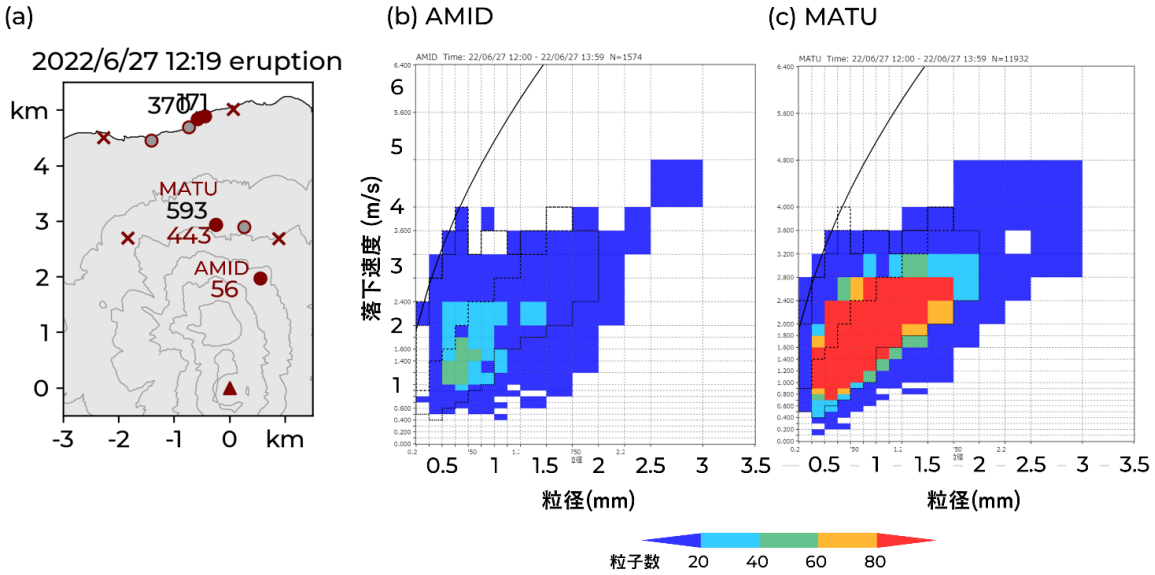


図 18　2022 年 6 月 27 日 12：19 噴火による降灰の調査結果。(a) ディスドロメータとサンプル採取により得られた重量分布。赤丸はサンプル採取またはディスドロメータ観測によって重量が計測された観測点、灰丸は、重量は計測されなかったが路上に堆積していることが目視で確認された地点、×は路上に堆積していないことが目視で確認された地点。赤字はディスドロメータの観測結果から換算された重量、黒字はサンプル採取から換算された重量で、単位はいずれも g/m^2。(b) AMID、(c) MATU 観測点における、2022 年 6 月 27 日 12 時 00 分から同 13 時 59 分における積算の粒径―落下速度区間ごとの粒子数分布。縦軸と横軸の範囲は(b)、(c)で共通。点で囲まれた領域は重量の計算対象となる粒子の粒径―落下速度区間を表す。



図 19　2022 年 7 月 24 日から 25 日にかけての噴火で路上に堆積した火山灰の様子。KUR 観測点から北東の桜島一周道路上の地点で撮影。

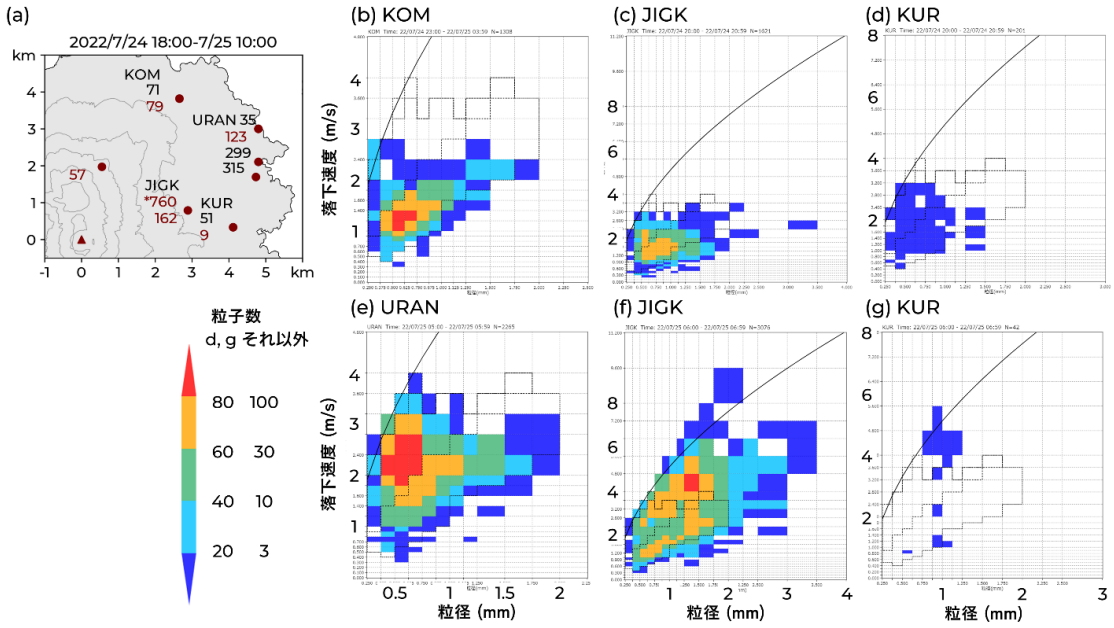


図 20　2022 年 7 月 24 日午後から翌 25 日午前にかけて発生した 4 回の噴火による降灰の調査結果。(a) ディスドロメータとサンプル採取により得られた重量分布。赤丸はサンプル採取またはディスドロメータ観測によって重量が計測された観測点。赤字はディスドロメータの観測結果から換算された重量、黒字はサンプル採取から換算された重量、アスタリスク付き数値は回転楕円体近似によって計算された重量で、単位はいずれも g/m^2。(b) KOM、 (c) JIGK、 (d) KUR、 (e) URAN、 (f) JIGK、 (g) KUR 観測点における、粒径―落下速度区間ごとの粒子数分布。(b)は 24 日 22:00 から翌 25 日 3:59 まで、(c)、 (d)は 24 日 20:00 から 20:59 まで、(e)は 25 日 5:00 から 5:59 まで、(f)、 (g)は 25 日 6:00 から 6:59 までの積算分布。点で囲まれた領域は重量の計算対象となる粒子の粒径―落下速度区間を表す。



図 21　2022 年 9 月 23 日噴火による降灰の様子。桜島島内の有村から東を望む。

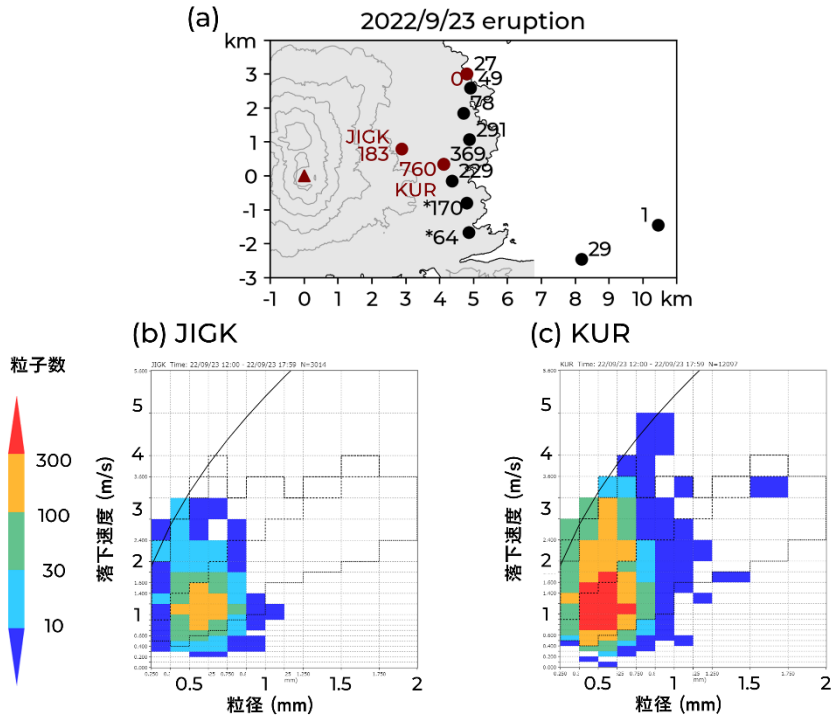


図 22　2022 年 9 月 23 日 13:35～16:40 に発生した噴火による降灰の調査結果。(a) ディスドロメータとサンプル採取により得られた重量分布。赤丸と赤字はディスドロメータによって重量が計測された観測点と重量。黒丸と黒字はサンプル採取によって重量が計測された観測点と重量。アスタリスク付き数値は採取環境が悪く精度の低い参考値。単位はいずれも g/m^2。(b) JIGK、(c) KUR 観測点における、12：00 から 17：59 までの積算の粒径―落下速度区間ごとの粒子数分布。点で囲まれた領域は重量の計算対象となる粒子の粒径―落下速度区間を表す。

c) ディスドロメータ観測による降灰量の時間変化

2022 年度に発生した噴火のうち、噴煙高度 2500m 以上に達したものは 12 例あった（表 4)。これらの噴火は降灰と同時に降雨はない。これらの噴火について、令和 2 年度の報告書 d)ii)にて求めた経験式から計算されたディスドロメータの降灰量を有村観測坑道において計測された地震動の振幅と比較して図 23、24 に示す。

これらの 12 事例のうち、火口近傍の複数の観測点において火山灰が検知されたのは 7 事例であった。複数地点で降灰が検知された噴火では、火口からの距離からの地点ほど降り始める時刻が早く量も多い事例（図 23c、d、i）や、距離が同程度で、火口からの方角によって量が大きく異なる事例（図 23f)、火口からの方角の違いにより、距離のより遠い地点により多量の火山灰が早く到達した事例（図 23a）がみられた。

4 地点で降灰が検知された噴火 h では、火口から東北東に位置する JIGK でまず微量の降灰が検知され、その後それぞれ北東、北北東、北に位置する URAN、AMID、MATU で同時に降灰が検知され始めた(図 24)。URAN は最初に最も多量な降灰が検知され、AMID はそこから 20 分程度遅れてこの地点で最も多量の降灰が検知された。MATU は AMID から少し遅れてより少量の粒子を検知した。これらの観測事実から、降灰は北東で最も多量に不利、その後より少量の粒子が反時計回りに降下していったことが推定される。

噴火 k における JIGK での降灰は、12 事例の中で最も降灰の継続時間が長く、1 時間以上にわたって火山灰が降り続けた。これは、噴火開始時刻の多量の火山灰放出の前後の数時間にわたって地震動の最大振幅の増加傾向が見られることから、火山灰連続放出をとらえたと考えられる。

表 4　噴煙高度 2500m 以上の噴火（2022 年 4 月～2023 年 3 月）

噴火記号	噴火開始時刻	噴煙高度	火口	流向	検知地点数
a	2022/7/17 18:52	2800	B	T	2
b	2022/7/25 6:31	>2200	B	T	1
c	2022/8/2 0:55	2800	B	N	2
d	2022/8/9 6:35	2500	B	NE	2
e	2022/8/11 11:58	2500	B	E	0
f	2022/9/30 11:44	2800	B	T	2
g	2022/12/2 3:40	3200	B	SE	1
h	2022/12/3 19:29	3000	B	NE	4
i	2022/12/10 0:02	2700	B	SE	2
j	2023/3/4 21:57	2800	B	SE	1
k	2023/3/6 14:04	2700	S	E	3
l	2023/3/7 10:01	2500	S	SE	1

火口の「B」は南岳山頂 B 火口を、「S」は昭和火口を表す。流向は 8 方位で表し、「T」は直上を表す。

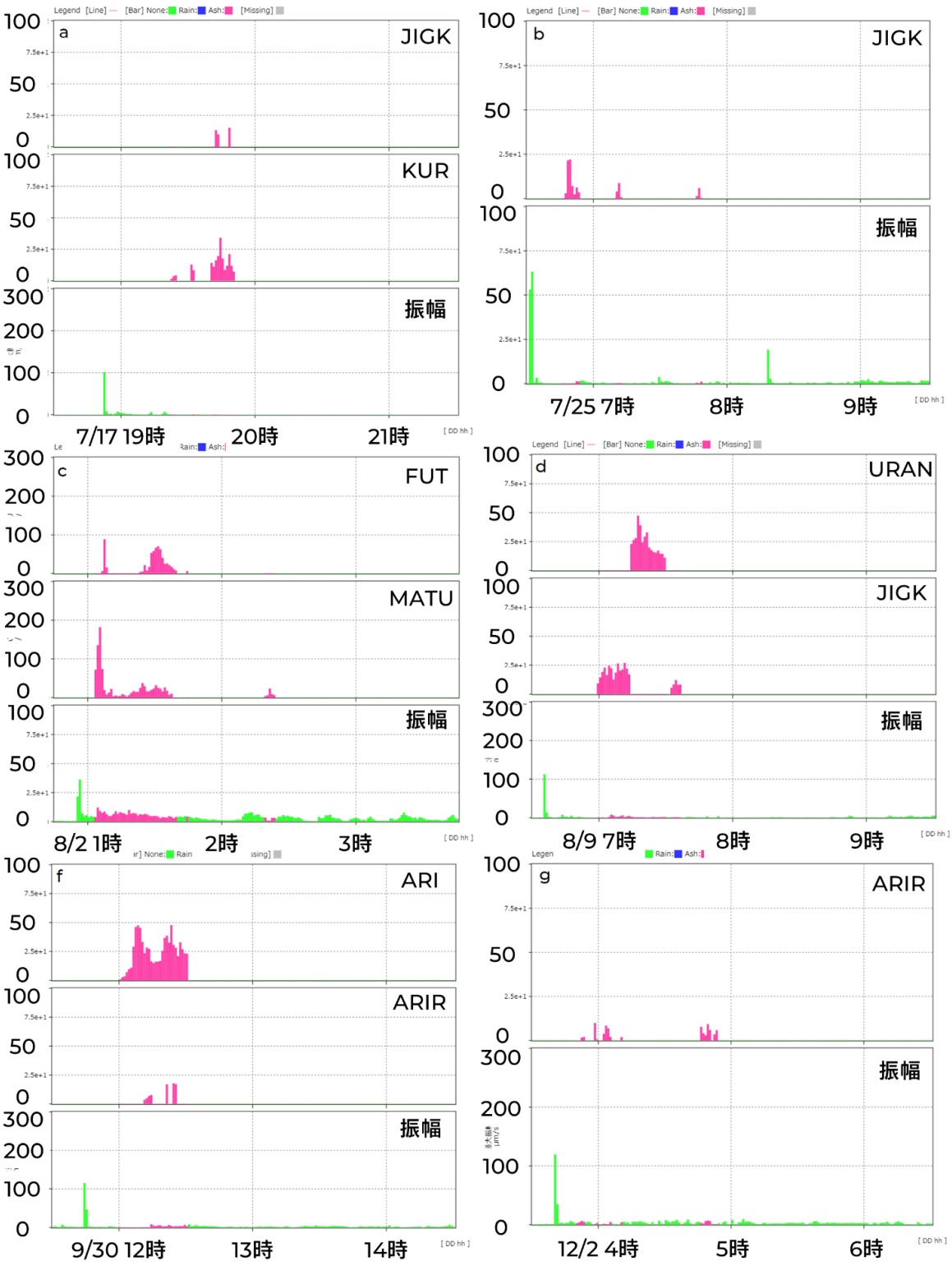


図 23　噴火 a-g による降灰が検知された地点における降灰量（下段以外）と地震動（下段）の最大振幅。左上の記号が噴火記号を表す。噴火 e では降灰が検知されなかった。右上の記号が地点を表す。降灰量の単位は g/m^2/min、振幅の単位は μ m/s。灰色で塗りつぶされた時間帯は欠測。振幅が横軸の左端から 30 分間で最大値を取っている時刻が噴火開始時刻。

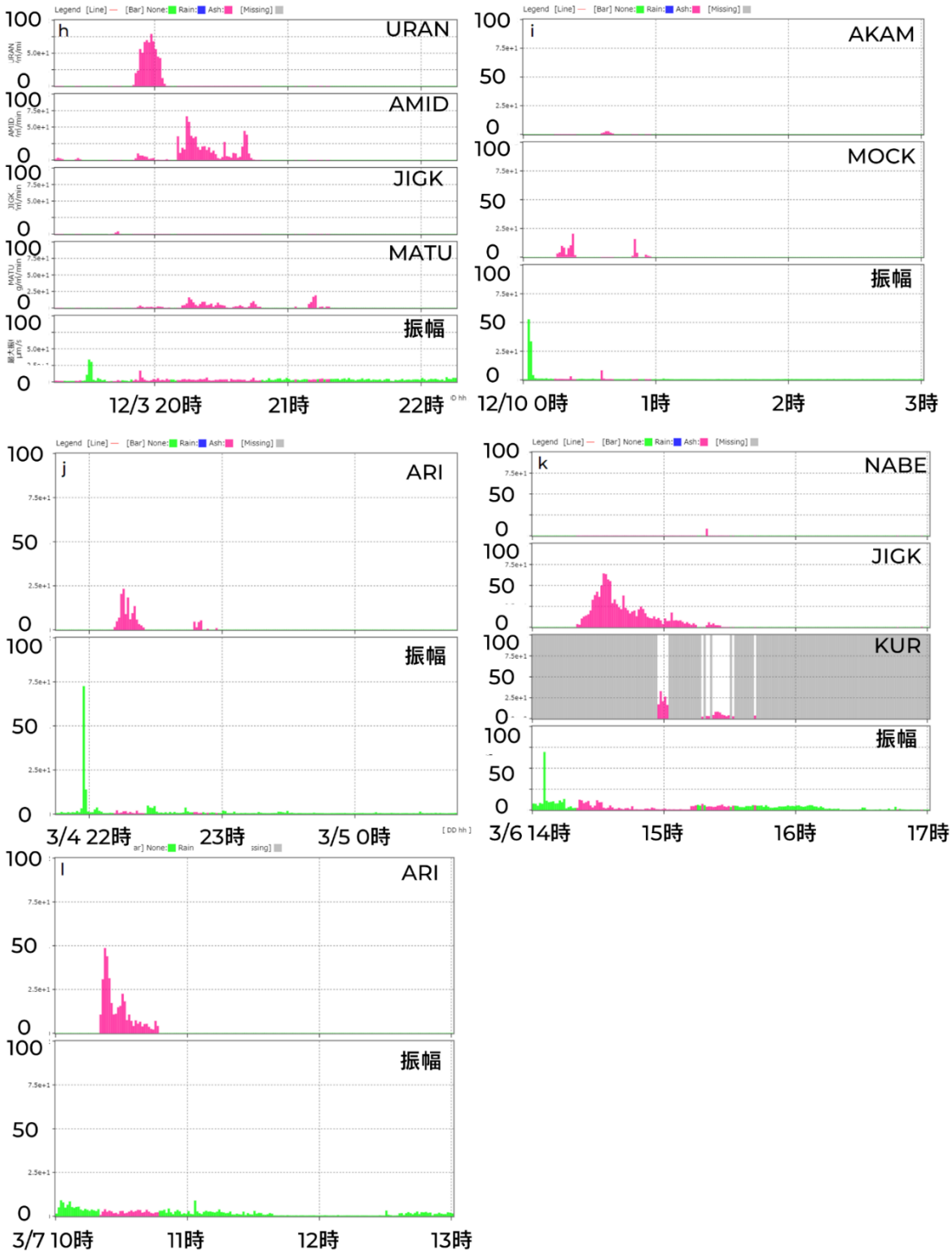


図 24　噴火 h-1 による降灰が検知された地点における降灰量（下段以外）と地震動（下段）の最大振幅。左上の記号が噴火記号を表す。噴火 e では降灰が検知されなかった。右上の記号が地点を表す。降灰量の単位は g/m^2/min、振幅の単位は μ m/s。灰色で塗りつぶされた時間帯は欠測。振幅が横軸の左端から 30 分間で最大値を取っている時刻が噴火開始時刻。

5) レーダ観測による火山灰推定の高度化

様々な気象レーダの観測データから過去の顕著な噴火事例の降灰情報を求めた。噴煙柱の成長過程が高時間分解能の船舶レーダにより可視化され、噴煙高度と噴煙の上昇速度を自動的に推定できるようになった。噴煙柱の鉛直構造は SVO に設置された X バンド MP レーダの RHI 観測から調べられ、上空でレーダエコーが強まる事例があることがわかった。これは噴煙粒子の凝集によるものと推定された。凝集過程は地上のディスドロメータの観測からも確認された。粒子凝集は同じ大きさの固体粒子と比べて密度は小さくなり落下速度が遅くなる。このため、凝集粒子の降灰強度は同じ粒径分布を持つ固体粒子の降灰強度に比べて小さくなる。このことは、固体粒子の密度と落下速度から導かれた降灰強度推定式を凝集粒子に適用すると降灰強度を過大評価することになる。一方、凝集が水を介して固まっている場合、すなわち「湿った凝集粒子」の場合、誘電率は乾燥した固体粒子に比べて大きくなる。このため「湿った凝集粒子」のレーダ反射強度の観測値は大きくなる。従って、乾燥固体粒子を仮定して求められた降灰強度推定式を「湿った凝集粒子」に用いると降灰強度を過大に評価することになる。これと類似した現象が湿った雹や霰でも観測されることが知られている。現在、使用している降灰強度推定式は乾燥した固体粒子を仮定して導き出された式であることから、推定された降灰量は過大評価されている可能性がある。今後、凝集を定量的に評価し降灰量推定の推定精度を改善する必要がある。

過去の顕著な桜島噴火事例の降灰情報をデータベース化するために、様々なレーダの観測データを収集し解析を開始した。国土交通省の垂水 X バンド MP レーダからは、二仰角 PPI 法により降灰量分布、降灰時間分布、総降灰量、総降灰面積が求められる。噴煙柱の発達の様子や鉛直構造は船舶レーダと SVO の X バンド MP レーダ観測から求められる。ディスドロメータからは降灰粒子の粒径分布、落下速度、積分パラメータ間の相関などが求められる。これらの事例解析の結果は web 上で公開した。

事例解析に使用しているレーダデータ三次元解析ツール（Analytical Tools for Three-Dimensional Weather Radar Data of Eruption Clouds:ANT3D）を GUI 化した。次世代火山プロジェクトへの公開は 2023 年度になるが、これにより、気象レーダを専門としない、次世代研究プロジェクトの研究者・大学院生や火山防災の実務者でも噴煙の解析が可能になる。

6) 過去の噴火事例の解析と結果の WEB 公開

事例解析から得られた降灰情報は桜島降灰分布情報データベース（Database of Sakurajima Volcanic Ash Fall Distributions: VASH）に登録されレンタルサーバ上で公開される（https://vash.jp/）。VASH のトップページを図 25 に示す。VASH は市販のテンプレートを基に作られており、検索機能を備えている点が大きな特徴である。トップページの下部に 4 つの検索用ボタンがあり、噴火の年月、噴煙高度などの他に噴石、火砕流、空振などのキーワードを指定することで該当する噴火を抽出することができる。また、顕著な噴火事例として大規模な噴火や被害をもたらした噴火を抽出出来るボタンも用意されている。噴火情報の登録と管理は噴火事例 ID を用いておこ

なう。独自に用意されたテンプレートを使って一括登録・管理することも、個々の噴火事例についてマニュアルで登録・管理することも可能になっている。



図 25　桜島降灰分布情報データベース（Database of Sakurajima Volcanic Ash Fall Distributions: VASH）のトップページ。

VASH を通じてどのような情報が得られるかを、2019 年 11 月 8 日 17 時 24 分に発生した桜島噴火を例に紹介する。鹿児島地方気象台の火山班の記録によれば、この噴火は南岳火口で発生した爆発的噴火で噴煙柱の最高高度は火口から 5700 m であった。ASH のトップページで噴火発生の年月日から検索すると図 26 に示したような、当該噴火の基本情報（第一階層の情報）が表示される。この噴火は、19-0245 という ERUPTION ID がつけられている。この ID は便宜上に付けられたもので、最初の 2 桁の数値は西暦の下二桁である。ハイフン以降の 4 桁の数値はその年の噴火の通し番号で、鹿児島地方気象台が公開している噴火リストの通し番号と一致する。

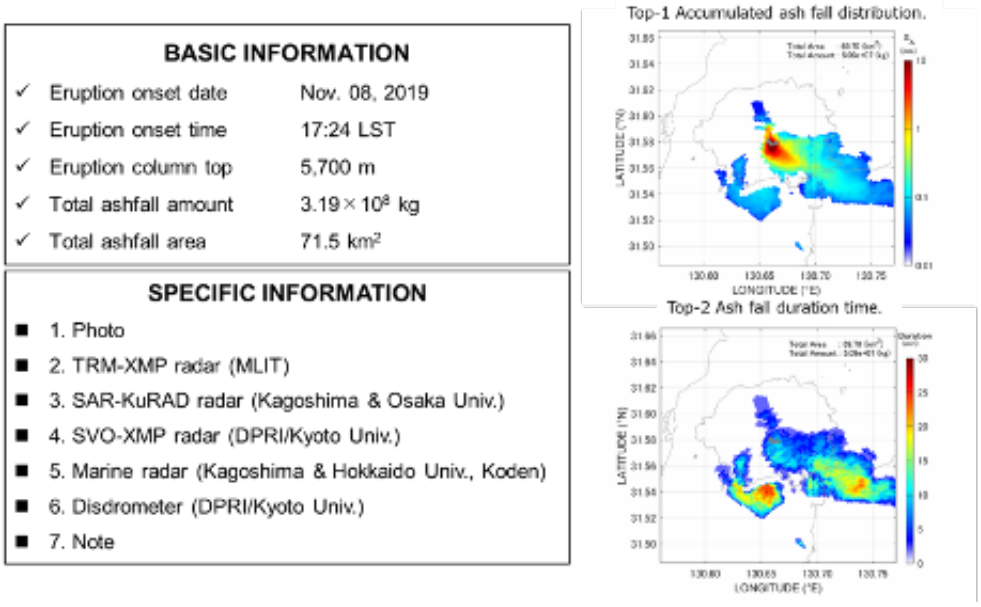


図 26　VASH の第一階層の降灰情報画面。

噴火の基本情報として、噴火年月日と時刻、気象庁発表の噴煙高度、国交省垂水レーダから求められた総降灰量と総降灰面積が表示されている。更に、降灰分布が視覚的にわかるように、国土交通省の垂水 X バンド MP レーダ観測から求めた降灰量分布図と降灰時間分布図が表示されている。

図 26 には、詳細な情報(第二階層の情報と呼ぶ)の有無も表示されている。例えば、噴煙の写真、国交省 XMP レーダデータの三次元解析結果や大学や研究機関のレーダデータの解析結果、船舶レーダより観測された噴煙柱の発達の様子、ディスドロメータ観測から得られた降灰粒子の情報等である。これらの情報は必ずしも全ての噴火について用意されている訳ではないが、閲覧が可能な情報にはリンクがはられ第二階層の降灰情報をダウンロードすることができる。第二種の降灰情報の多くは動画ベースである。動画を誌上で表現することは困難であるため各動画には url 情報を付加した。これにより、VASH のユーザは一般的な閲覧ソフトウェアを用いて動画を見ることができる。なお、本論文の付録に動画のスナップショット画面を掲載した。

図 26 の「SPECIFIC INFORMATION」に列記した項目の具体例を以下に示す。

a) Photo

図 27 は噴火直後の噴煙の発達の様子をタイムラプス動画である。動画は熊本大学の飯野准教授から提供されたもので、錦江町と垂水市の二カ所から撮影された 1 分毎のコマ撮り画像である（飯野・金柿, 2008)。噴火直後の火口から真上に成長する噴煙柱とその後の風に流されて垂水方向に広がっていく噴煙の様子が捉えられている。



図 27　左：垂水から撮影した噴火の動画（https://vash.jp/images/skr19-0245_photo-01.mp4)。右：錦江台から撮影した噴火の動画。https://vash.jp/images/skr19-0245_photo-02.mp4。熊本大学飯野博士提供。

Web カメラの噴煙画像は、京大防災研、気象台、大隅河川国道事務所、南日本新聞などでも撮影・公開されている。様々な地点から撮影された噴煙画像は噴火の様子を理解するのに有効であることから、所有者の許可を得てこれらの画像も VASH で収集・公開する予定である。

b) TRM-XMP

図 28 は垂水 X バンド MP レーダ（本論文では TRM-XMP と名付けた）の観測データの解析結果である。二仰角 PPI 法から求められた降灰量分布と降灰観測時間の分布が動画で示されている。動画によれば、降灰量の分布は火口付近ほど多く 10mm 以上の降灰深となっている。時間の経過とともに降灰域は風下である南東方向に弱まりながら伸びている。興味深いのは、降灰継続時間は火口付近では 10 分程度であるのに対し、火口から約 8 km 離れた所で約 25 分と長くなっている点である。

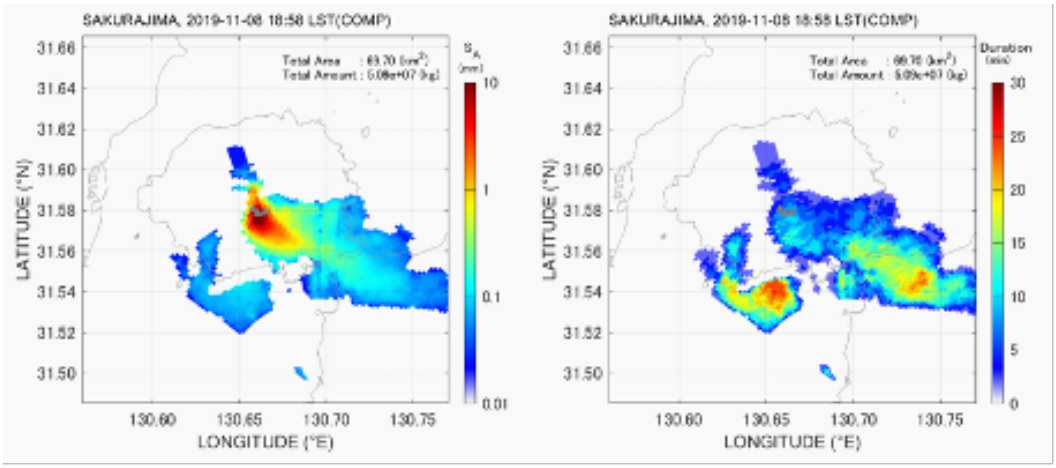


図 28　左：2 仰角 PPI 法から求めた TRM-XMP レーダの降灰量分布情報（https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_mlit-01.mp4）。右：降灰観測時間の分布（https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_mlit-02.mp4）。

図 29 は総降灰量と降灰面積の時間変化の図である。総降灰量は噴火から 20 分後位まで急速に増加し、その後の 30 分は緩やかに増加している。噴火から 50 分経過すると降灰量の増加は認められない。噴火継続時間は噴火から噴火後 50 分までほぼ直線的に増長している。

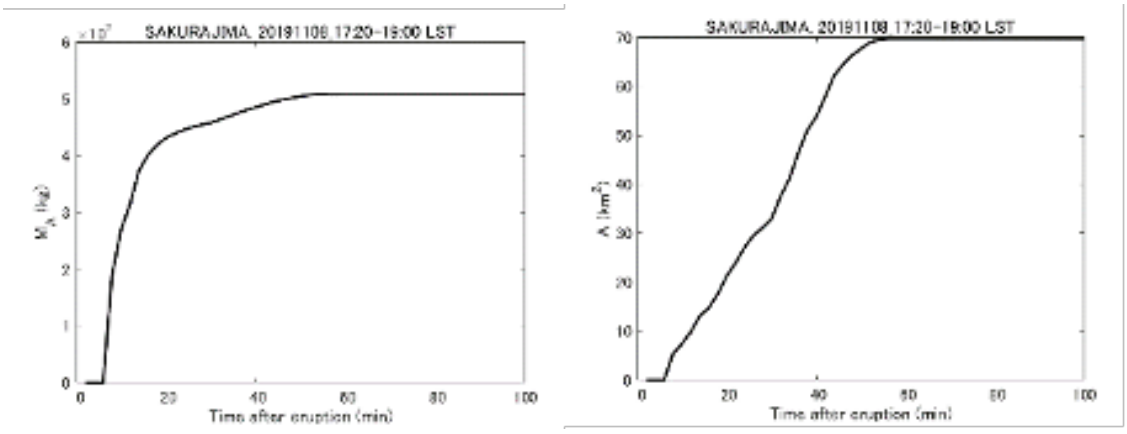


図 29　左：総降灰量の時間変化。右：総降灰面積の時間変化。

c) SAR-KuRAD

鹿児島大学と大阪大学が共同でおこなっている Ku バンドドップラーレーダの観測情報である。当該レーダによる桜島火山の観測は 2017 年と 2022 年であるため、本事例の観測データは無い。観測範囲が鹿児島市の中心部をカバーしており、噴煙が西へ流れるケースが増える夏期の噴火の降灰情報が期待される。

d) SVO-XMP

図 30 は京都大学防災研究所桜島火山観測所 X バンド MP レーダ（本論文では SVO-XMP と呼ぶ）の観測データの解析結果である。噴煙の鉛直構造の時間変化が動画で示されている。動画は計 11 方位角の鉛直観測断面のデータを積算して 1 枚の鉛直断面上に表示している。この方法により、セクター観測範囲内での噴煙の鉛直方向の発達を一枚の画面で把握することが出来る。レーダ反射因子とドップラー速度の二種類のデータが表示されており、レーダ反射因子からは噴煙の量に関する情報が、ドップラー速度からは噴煙粒子の鉛直方向の動きに関する情報が得られる。

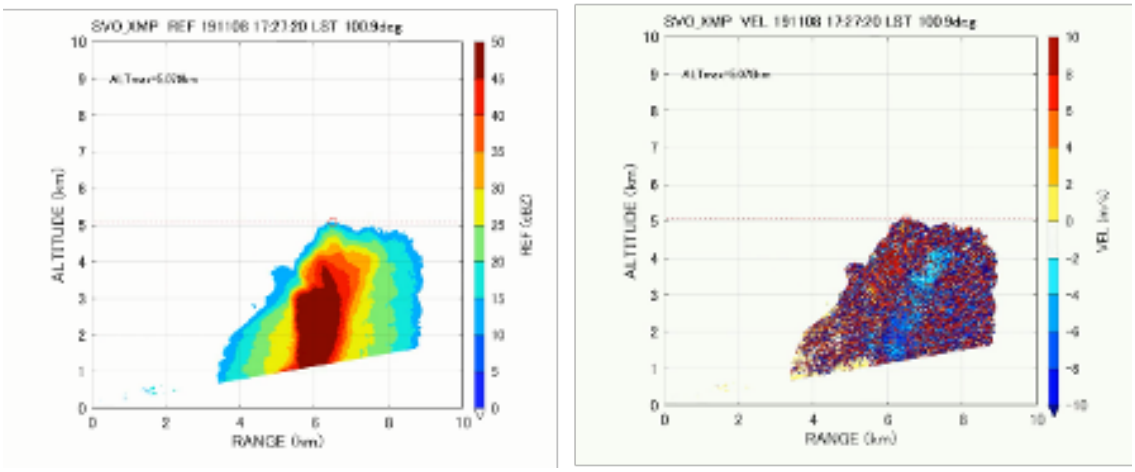


図 30　SVO-XMP の RHI 観測から得られた噴煙柱の発達の様子。左：積算レーダ反射因子（https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_svo-03.mp4）。右：積算ドップラー速度（https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_svo-04.mp4）。

e) Marine radar

鹿児島大学・光電製作所、北海道大学、FRS の船舶レーダ観測情報が掲載される。図 30 に示した噴煙の鉛直構造の観測時間間隔が約 2 分毎であるのに対して、船舶レーダの観測時間間隔は約 2.5 秒と短いことが最大の特徴である。これにより、噴火直後の変化の激しい噴煙柱の成長過程を捉えることが可能である。また、噴石などが飛散する様子も捉えられる可能性がある。図 31 は黒神観測点に設置された船舶レーダ観測から得られた噴煙柱の動画である。噴火後、噴煙柱が鉛直方向に発達後、火口から約 4000m の高度に達する様子が示されている。Kobori et al. (2022) の手法を用いて求めた噴煙高度と噴煙の上昇速度の時間変化が図に示されている。それによれば、噴火直後の爆発で噴煙は 80m/s を越える速度で上昇し、その 20 秒後

に次の噴火が発生し最大で約 30m/s の速度で上昇する。噴煙が 4000m の高度に達するのは噴火から約 3 分後であった。

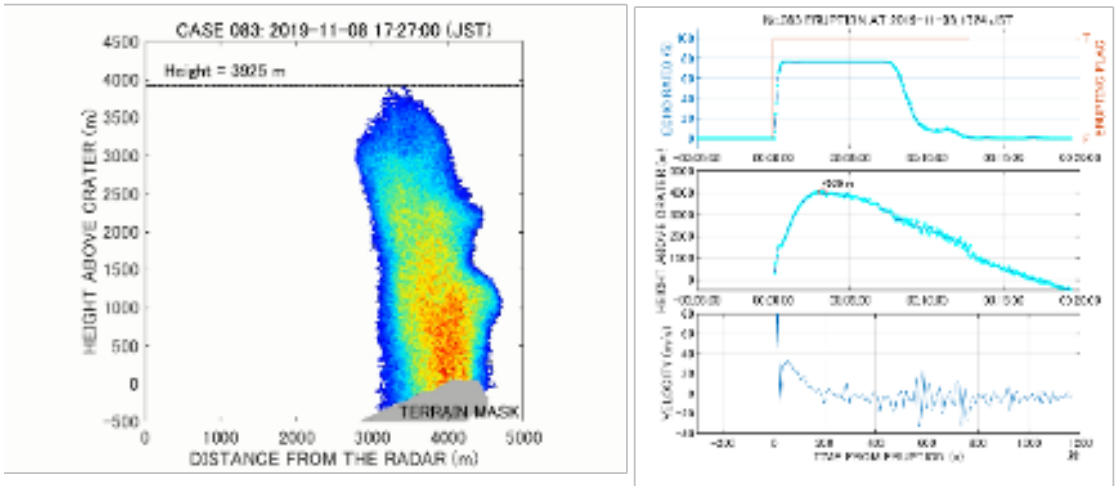


図 31 左：船舶レーダ観測から得られた 2 秒毎の噴煙柱の発達の様子（https://vash.jp/images/skr19-0245_marine-01.mp4）。右：噴煙柱トップの高度と上昇速度の時間変化（https://vash.jp/images/skr19-0245_marine-02.png）。

f) Disdrometer

図 32 は京都大学防災研究所のディスドロメータ観測データの解析結果である。計 6 種類の情報が示されている。上段左の図は降灰粒子の落下速度に関する情報で、有村坑道（ART）点に設置された Parsivel[2] により 17 分間の降灰粒子のデータが収集された。べき乗式を仮定して求めた降灰粒子の落下速度（V）と粒径（D）との関係式は

$$V = 4.08D^{0.586}$$

であった。これは雨滴の落下速度に近い関係式である。上段右の図は粒径分布の情報で、ガンマ分布で近似した 1 分毎の粒径分布が重ね合わせて示されている。中断左は粒子の総個数（N_T）、ガンマ分布の各パラメータ（N_w，D_m，μ）の時間変化である。中段右は粒径分布と降灰強度の時系列グラフである。下段左と右の図は定量的降灰量推定式である。得られた関係式は降灰粒子の粒径分布から得られる理論式である。どちらの散布図も変数間のばらつきが大きいが、

$$R_A = 2.26 \times 10^{-2} Z_A^{0.993}$$

および

$$C_A = 1.46 \times 10^{-7} Z_A^{1.33}$$

が得られた。これらの関係式はレーダによる定量的降灰量推定に必要不可欠な式である。

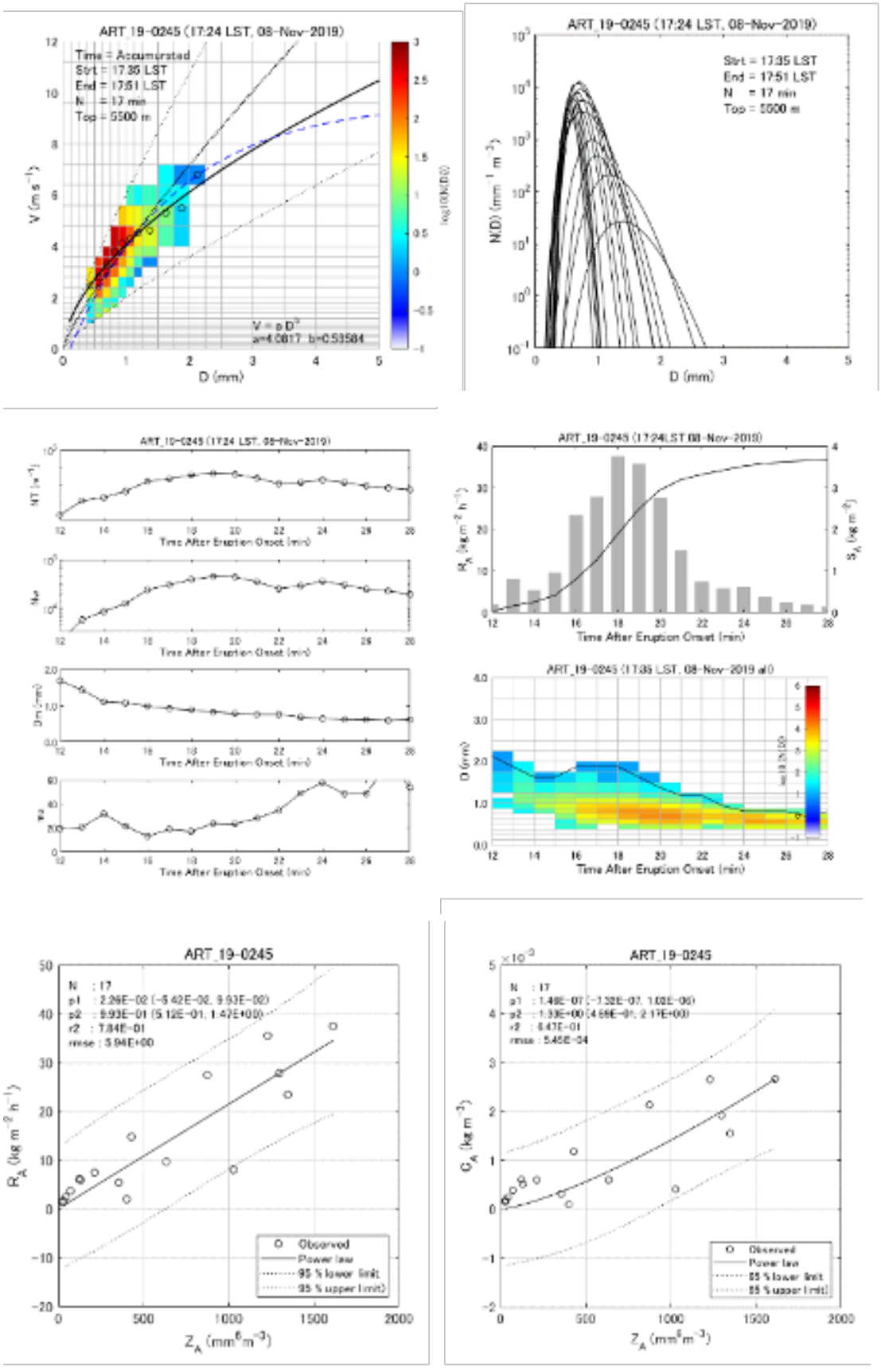


図 32　ディスドロメータから得られる降灰情報の例。

7) 複数台の船舶レーダによる噴煙柱の観測

爆発的火山噴火の際に形成される噴煙柱の内部構造と発達過程を調べるために、X バンドの船舶レーダを桜島島内設置して、噴火の連続観測を実施した。使用したレーダは 3cm 波長の固体素子船舶レーダ 2 台と 3cm 波長マグネトロンレーダ 1 台である。各レーダの配置と観測エリアを図 33 に示す。SVO、黒神、有村の 3 方向から桜島南岳火口上空で発生する噴煙柱の鉛直断面の観測をおこなった。方位角方向のレーダビーム幅は約 22 度、スキャン時間間隔は約 2 秒で噴煙柱内のレーダ反射強度分布のデータを取得した。

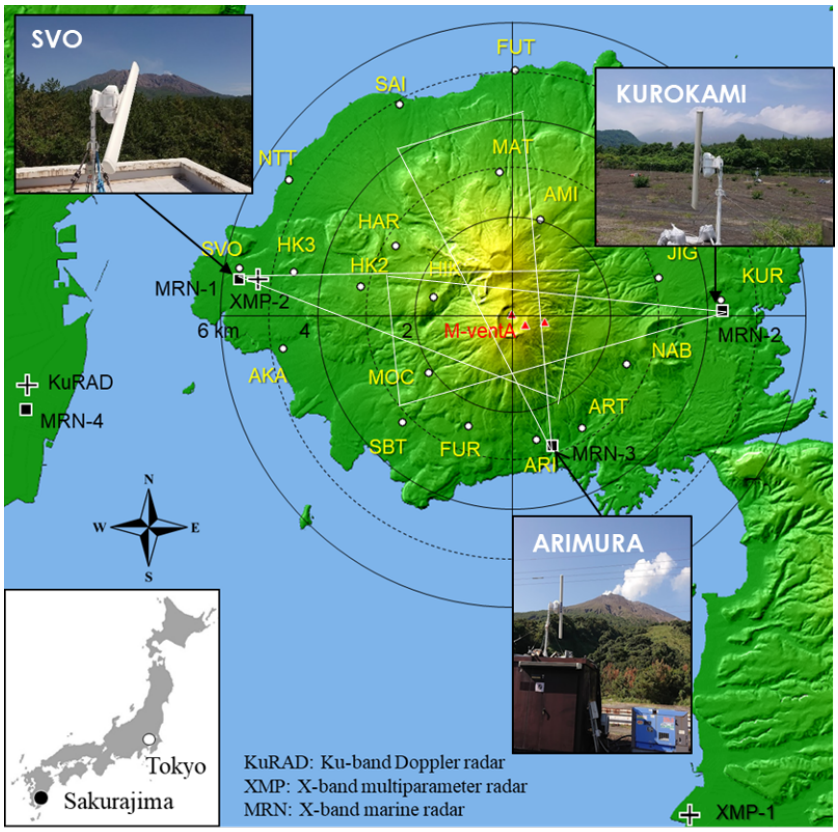


図 33　桜島と X バンド船舶レーダの設置場所および観測エリア。白いまる丸印は光学式ディスドロメータの設置場所。

2022 年 4 月から 12 月末までに、計 224 回の噴火を観測した。ただし、有村に設置したレーダの観測は 9 月～12 月の期間である。船舶レーダで観測された顕著な噴火事例として、以下の 3 事例を紹介する。

a) 事例 22-0023（2022 年 7 月 24 日）：噴火警戒レベルを 5 へ引き上げた噴石

噴火時に放出された噴石が 2.4km を超えたために、気象庁が警戒レベルを 4 から 5 に引き上げた噴火事例である。黒神に設置した船舶レーダは噴石が飛散される様子を捉えていた。図 34 に 5 秒毎の得られた RHI 上の噴石エコーの変化を示す。1 台の船舶レーダによる観測では噴石エコーの水平方向の位置が不明であるため、噴石の正確な飛距離はわからない。

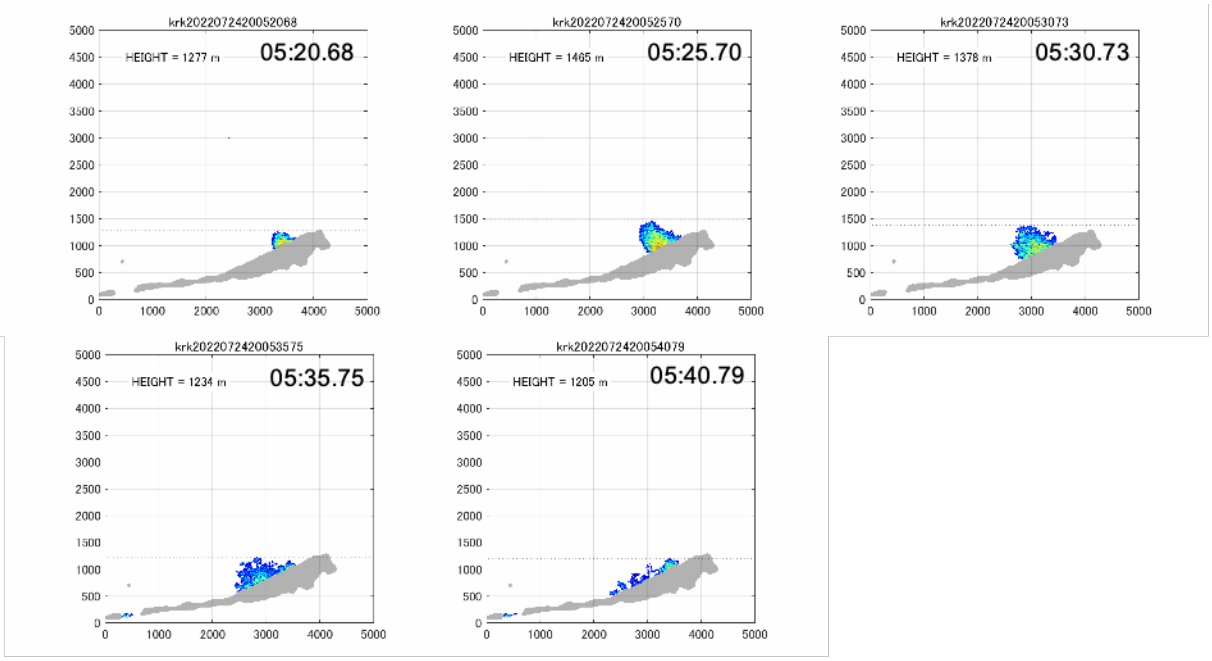


図 34　X バンドマグネトロン船舶レーダの RHI 観測が捉えた噴石エコーの時間変化（2022 年 7 月 24 日桜島南岳火口噴火）。

b）事例 22-0142（2022 年 9 月 15 日）：火山豆石が桜島火山観測所（SVO）で観測された小規模噴煙

地上に堆積する火山噴出物の粒径や性質の情報は土石流の危険度予測モデルの高度化に重要である。本噴火事例は、SVO に設置した固体化船舶レーダが火山豆石の形成から落下までを捉えた事例である。図 35 に示すように、噴火は小規模であったが、噴煙がレーダから高度約 2000m の高さを移流する際に強められ、SVO に落下している。落下速度の情報から豆石の粒径を推定出来るかもしれない。また、SVO に設置された X バンドマルチパラメータレーダの観測データや光学式ディスドロメータの観測データも得られており、噴出物のマルチセンシング解析が期待される。

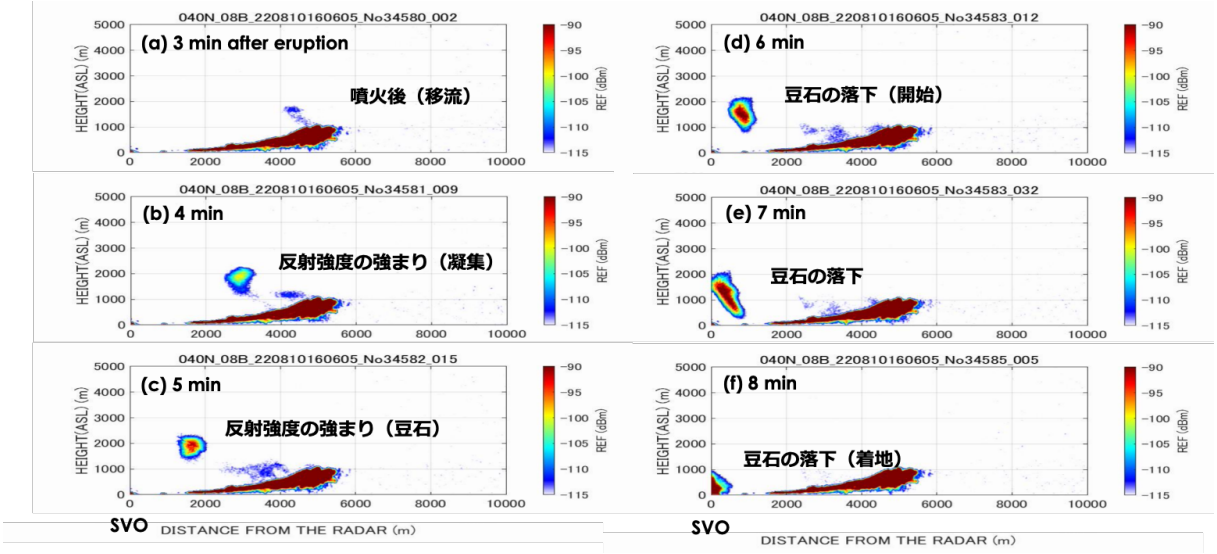


図 35　X バンドマグネトロン船舶レーダの RHI 観測が捉えた豆石エコーの時間変化（2022 年 9 月 15 日 15 時 29 分、桜島南岳火口噴火）。

c）事例 22-0147（2022 年 9 月 23 日）：複数回の繰り返し噴火

桜島の噴火はブルカノ式噴火と呼ばれる単発の噴煙放出現象が典型的とされるが、噴煙放出が繰り返され、噴火が連続的に発生してるように見える場合もある。本事例では 30 分の間に少なくとも 6 回の噴煙放出が船舶レーダにより識別できた（図 36）。

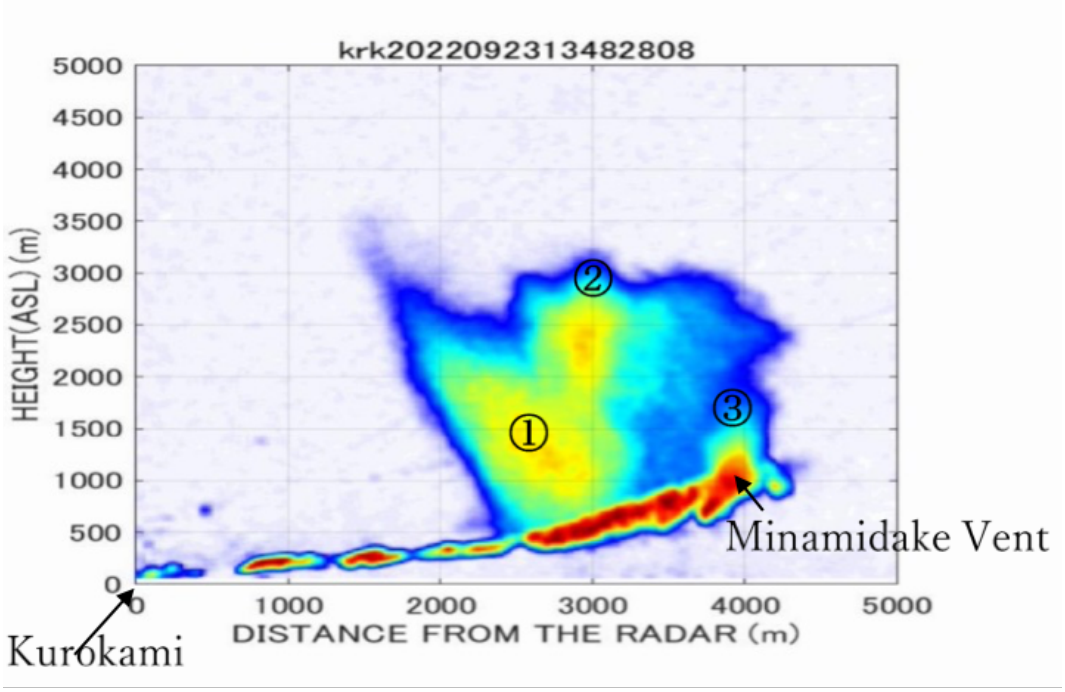


図 36　黒神に設置された X バンドマグネトロン船舶レーダの RHI 観測が捉えた複数回の噴火（2022 年 9 月 23 日桜島南岳火口噴火）。

X バンド船舶レーダを用いた噴煙のモニタリングの有効性を調べるための観測を実施した。用いたレーダはマグネトロンタイプのレーダ 1 台（黒神観測点）と固体素子タイプのレーダ（それぞれ、SVO と有村川右岸）である。長期の連続観測の結果、次の知見が得られた。

- 気象庁のレポートに挙げられた噴火事例で噴煙高度が 1000m 以上の噴火は全てモニタリング可能であった。
- 降雨や雲がかかっている場合にも噴煙柱を観測することができる場合があった。これは、可視情報を基本とする従来の手法に比べて優れている点の一つである。
- 約 2 秒間隔のスキャンにより噴火直後の噴煙中柱の発達過程を詳細にモニタリング切るとがわかった。
- 上記の機能により、噴石エコーの検出、豆石を降らせた噴煙エコーや複数回の発生する爆発噴火を捉えることに成功した。
- 今後の課題として、噴火ソースパラメータの推定アルゴリズムの確立、データ処理の準リアルタイム化、火山防災への利用などが挙げられる。

8) レーダデータ解析プログラムの改良

レーダデータの解析プログラムは公開されているものがいくつかあるが、京都大学防災研究所附属火山活動研究センターでは三次元レーダデータ解析ツール（Analytical Tools for Three-dimensional Weather Radar Data of Eruption Clouds: ANT3D）を使用している。ANT3D は MATLAB をベースとして構築されており、2012 年から鹿児島大学と京都大学防災研究所で開発が進められた。本報告書に掲載されている事例解析の結果は ANT3D を用いて得られたものである。ANT3D には様々な解析ツールが用意されているが、利用するためには MATLAB 本体とプログラミングの気象レーダに関する知識が必要であり、利用にあたっては敷居が高いものになっている。そこで、火山学の研究者や学生、防災担当者が対話型で各種レーダデータの読み込み機能やプロット機能などの汎用機能を利用できるように ANT3D の GUI 化を進めている。これを、「GUI 三次元気象レーダ解析ツール（ANT3D_GUI）」と呼ぶ。今年度は ANT3D_GUI に対して以下の機能追加及び改良を行った。

① 積算降灰量計算機能

② セクターRHI 観測データ処理機能

③ GUI 機能の改良

本業務で用いた MATLAB のバージョンは MATLAB R2021a Update 8 で、実行に必要な MATLAB Runtime は以下から無料でダウンロードできる。

https://ssd.mathworks.com/supportfiles/downloads/R2021a/Release/8/deployment_files/installer/complete/win64/MATLAB_Runtime_R2021a_Update_8_win64.zip

追加機能と改良点は以下の通りである。

a) 積算降灰量計算機能

- 国土交通省の垂水 X バンド MP レーダの PPI 観測データから積算降灰量分布図、降灰時間分布図、総降灰量時系列図、総降灰面積時系列図を作成する機能が追加された（図 37、図 38、図 39）。
- 図を png 形式でファイルに保存する機能が追加された。
- 積算降灰量分布図と降灰時間分布図についてはアニメーションファイル（mp4 形式およびアニメーション gif 形式）を作成し保存する機能が追加された。

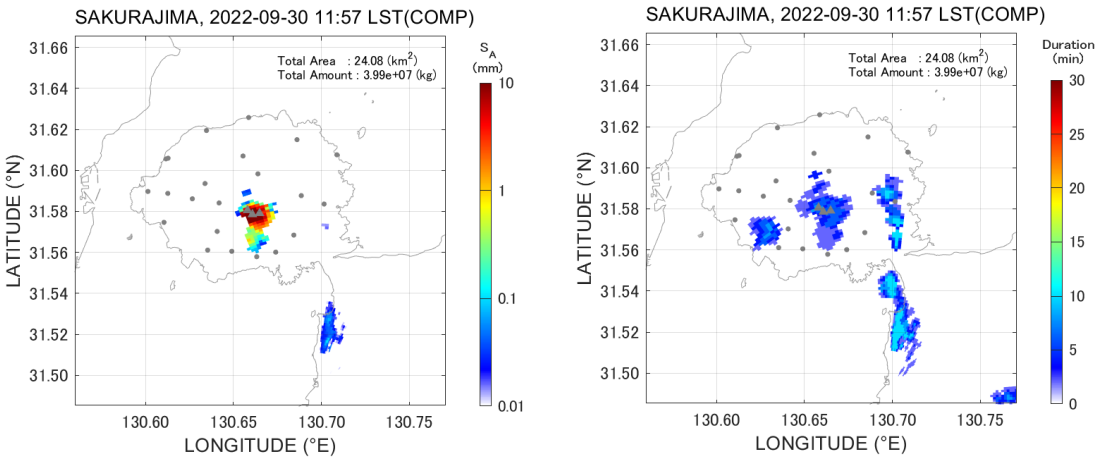


図 37 積算降灰量分布図（上）、降灰時間分布図（下）の例。

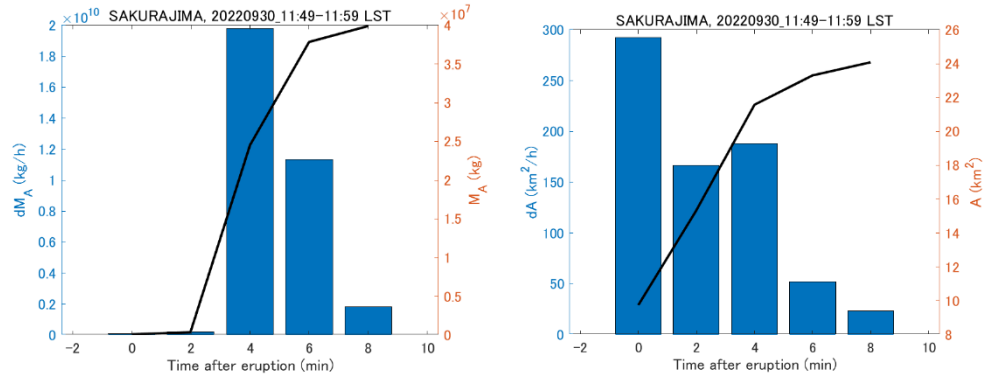


図 38　総降灰量時系列図（上）、総降灰面積時系列図（下）の例。

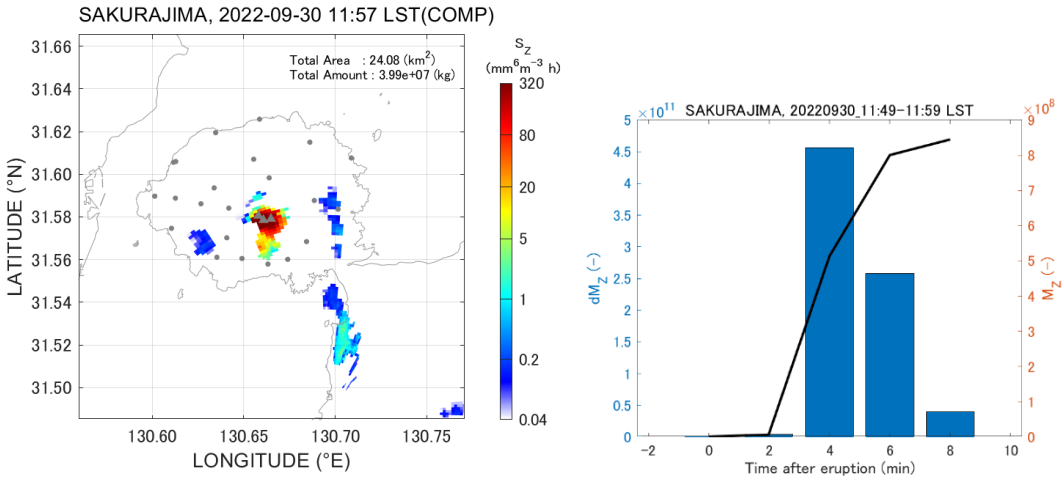


図 39　反射因子分布図（上）、総反射因子時系列図（下）の例。

b）セクターRHI 観測データ処理機能

- 指定した方位角およびレーダパラメータの RHI 画像（png 形式）を作成する機能が追加された（図 40）。
- 方位角およびレーダパラメータはそれぞれ一つあるいは複数を指定できるようになった。
- 出力された静止画からアニメーションファイル（mp4 形式）を作成し保存する機能が追加された。
- 1 セクタースキャン内の全ての RHI データの積算値を計算し 1 枚の積算 RHI 図にする機能を追加する（図 41）。
- 作図するレーダパラメータはそれぞれ一つあるいは複数を設定できる。
- 出力された積算 RHI 図からアニメーションファイル（mp4 形式およびアニメーション gif 形式）を作成し保存する機能が追加された。
- 積算 RHI 図から求められる噴煙高度の時系列ファイル（csv 形式）を保存する機能が追加された。

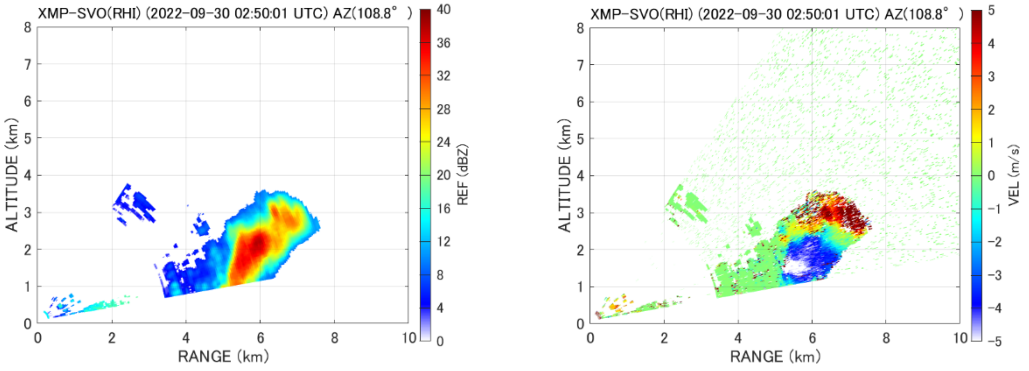


図 40　各方位角方向の RHI 画像の作成例。

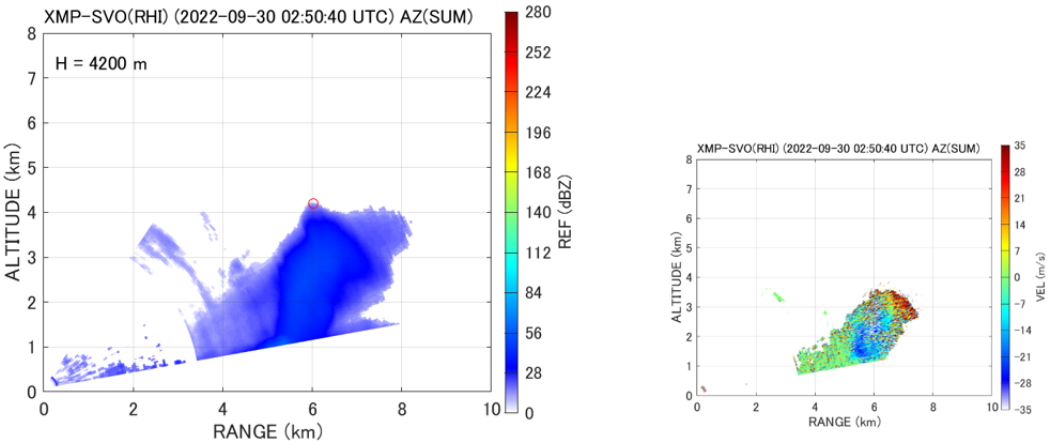


図 41　セクターRHI スキャンデータの積算画像の作成例。

c）GUI 機能の追加

- マウスを用いた CAPPI 鉛直断面の指定

  現状の三次元 CAPPI 表示プログラム（以降、CAPPI_VIEWER という）は、2 点の緯度・経度の数値をキーボードから入力することで CAPPI の鉛直断面を作成することができるが、これをマウスにより 2 点を指定する方式に改良した（図 42)。

  マウスで一番目に指定した点が CAPPI 鉛直断面の左下隅の座標となるように図を作成した（図 43)。作成した図はファイルに保存することができる。

  指定した 2 点の座標の数値は出力図の水平軸の両端に記載した。

- 入力データのドラッグ・アンド・ドロップ対応

  ANT3D_GUI では、指定されたフォルダに入力データファイルをコピーし、年月日時分秒の数値で指定した範囲のデータを解析するようになっている。これを、マウスを使って解析ファイル（複数）を選択し、あらかじめ設定された作業用フォルダへドラッグ・アンド・ドロップでコピーできるように改良した。

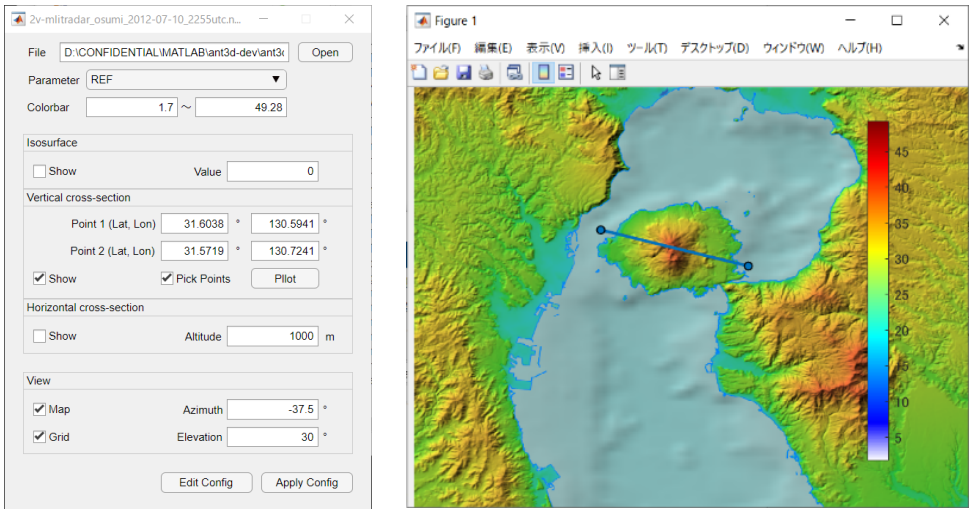


図 42　マウスを用いた CAPPI 鉛直断面の指定。

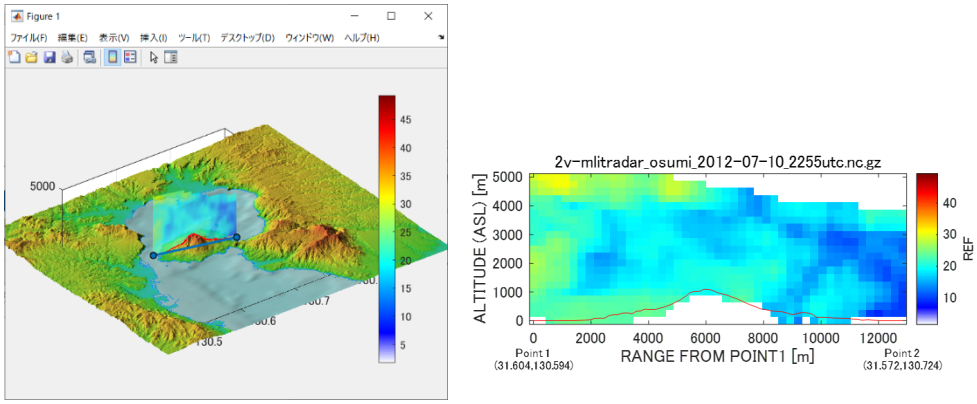


図 43　CAPPI 鉛直断面の表示。

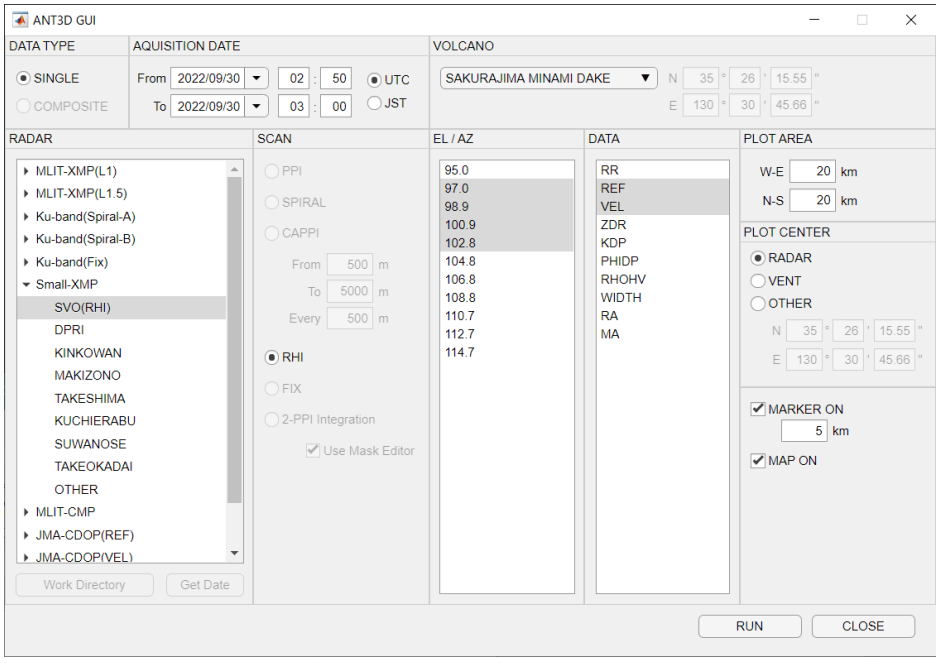


図 44　セクターRHI 観測データ処理機能の実行手順。

作業用フォルダにコピーされた入力データファイルは新たな入力ファイルがドラッグ・アンド・ドロップでコピーされるまで保存し、消去する場合には確認メッセージを表示するように改良した。

(c) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島島内にある観測点の改修作業や過去データの再検討により、地盤変動及び火山性微動振幅データから火山灰放出率を求める推定式を高精度化した。また、火山灰噴出率推定式を桜島以外の火山に拡張するために、長期間の噴火活動を継続している諏訪之瀬島やインドネシアのシナブン火山の火山性微動を解析し、推定式の拡張性について検討した。また、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させた。

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

桜島火山における 2022 年以降のデータを加えて、火山灰放出量推定式の適用性を再検討した。また、火山灰質量放出率と噴煙高度の関係についても再検討した。

a) 2022 年 3 月までの桜島の噴火活動

昭和火口では、2006 年 6 月と 2007 年 5 月に噴火が発生し、2008 年 2－4 月にはマグマ性噴火に移行した。2009 年から噴火回数が激増した。昭和火口における噴火は 2015 年 6 月まで、頻繁に発生したが、7 月以降は噴火活動が低下し、2016 年 7 月 27 日から 2017 年 3 月 24 日までは噴火が発生していない。2017 年 4 月以降、噴火は頻繁に発生したが、10 月 30 日の噴火からは南岳において噴火が頻発するようになった。

2017 年 11 月以降の桜島南岳の噴火活動を鹿児島地方気象台の観測による火口縁上噴煙高度、空振振幅、爆発地震の最大振幅、地盤変動により図 45 に示す。2022 年までの噴火活動は、8 つの Episode に分けられる。最も活動的であったのは、2019 年 9 月に始まり、2020 年 6 月まで続いた Episode5 である。その後、2020 年後半から 2021 年 5 月までの Episode6、2021 年第 4 四半期から 2022 年 2 月までの Episdoe7 が現れているが、Episode5 に比べて噴火発生頻度も少なく、爆発強度も小さい。2022 年 5 月から噴火が発生するようになり、8 月以降、噴火回数が増加した(Episode8)。Episode8 において爆発は 137 回、噴火は 167 回発生しており、回数としては多いが、過去の活動に比べて、噴煙高度は低く、空振振幅と爆発地震振幅も小さく、小規模であるといえる。一方、地盤変動は 2023 年 1 月ごろから膨張速度が速くなっており、南岳火口下におけるマグマの蓄積は進行してるといえる。

Episode8 における噴火の多くは南岳において発生したが、2023 年 2 月と 3 月には昭和火口においても噴火が発生している。2018 年以降、5 年ぶりである。噴火の様式はすべて「噴火」であり、空気振動の振幅は小さく、火山灰の噴出を主体とする噴火活動であった。噴煙高度の最大値は 2700m であった。

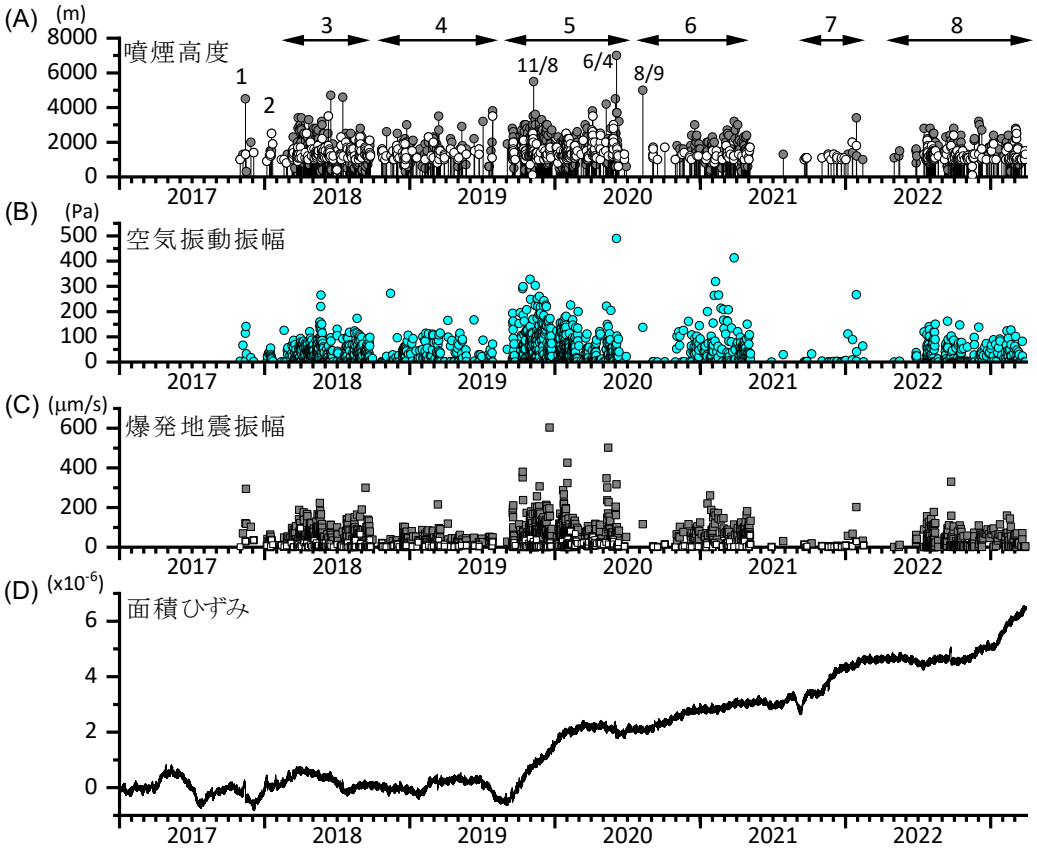


図 45　2017 年 11 月以降の南岳の噴火活動の推移。数字は Episode の番号を示す。(A) 火口縁上噴煙高度(鹿児島地方気象台発表)。灰丸は爆発、白丸は噴火を示す。(B)有村観測坑道における空気振動振幅。(C) 有村観測坑道における爆発地震の最大振幅。灰色の□は爆発、白□は噴火を示す。(D)ハルタ山観測坑道における面積ひずみ(火口方向ひずみ＋直交方向ひずみ)の変化。

b) 火山灰放出量の推定式の検討

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

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

2009 年から 2013 年までの昭和火口の噴火活動では、α =3.8×10^{-5}、β =2.6、γ =-1.03×10^{5} と近似されている(Iguchi, 2016)[(4) (j)]。ここで、γ は常時微動を考慮した補正項である。

2009 年以降の昭和火口噴火と 2017 年以降の南岳噴火のデータに、2023 年 3 月までのデータを含めて、火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーの関係を再検討した。

図 46 に 2009 年 1 月から 2023 年 3 月までの 14 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震･微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係を示す。月ごとの火山灰放出量は、鹿児島県内 62 点における降灰量の実測値から推定され

たものである(Iguchi, 2016)。係数については、昭和火口噴火活動期については α =3.8×10^{-5}、β =2.6、γ =−0.5×10^{5} とした。南岳噴火活動期については、β =2.2 とした方が火山灰放出量をうまく説明できる。噴火活動期によって、係数を変える必要が指摘できる。2022 年 1 月から 2023 年 3 月までの噴火については、噴火の規模が小さく、降灰量も少ないが、これまで通り推定式を適用することがおおむね可能である。

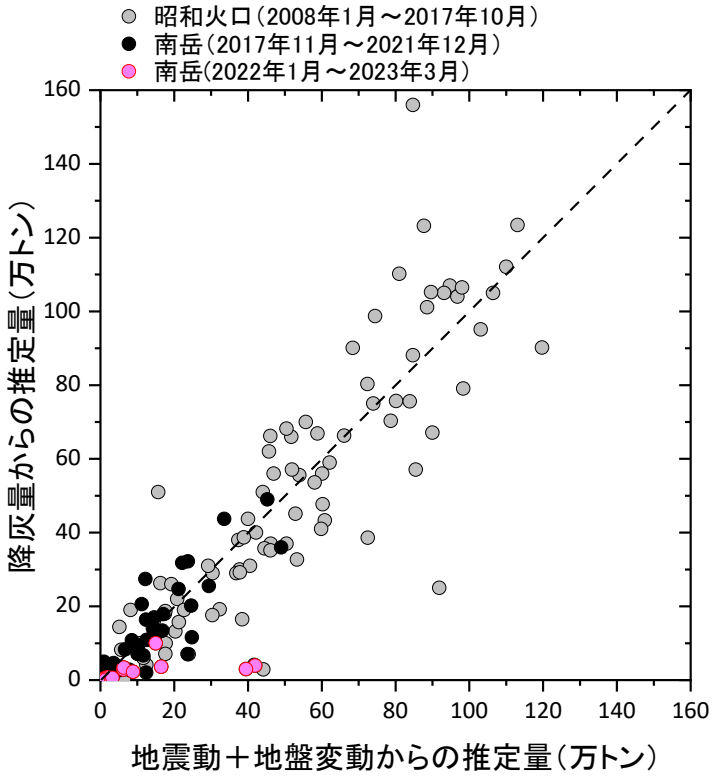


図 46　2009 年 1 月から 2023 年 3 月までの 14 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

2022 年以降の噴火のうち、2023 年 1 月と 2 月においては、推定式を用いた火山灰放出量は、降灰量の実測値から得られた降灰量の約 10 倍となり、過剰見積となった。これは、2023 年 1 月中旬ごろから顕著になった火山性微動の影響を受けたものである。図 47 に 2023 年 1 月～2 月の火山性震動のスペクトルの時間変化を示す。

1 月 20 日ごろから振幅が徐々に増大し、1 月 28 日から 2 月 2 日までが最も大きくなった。2 月 3 日から 6 日までは振幅が減少した。7 日 8 時ごろから再び振幅が増大し、8 日 9 時ごろに突然停止した。その後、11：10 に昭和火口において 5 年ぶりに噴火が発生し、同火口における噴火活動は翌日まで続いた。1 月 28 日から 2 月 8 日までに記録された噴火は 28 日 23:42 の爆発、2 月 3 日 19:51、7 日 9:09、16:08 の噴火であり、この期間に連続的に発生した火山性微動は桜島において「噴火」と定義される活動に関連しない。この火山性微動のスペクトルのピークは 1.6Hz 付近と 2.5Hz 付近に見られる。1.6Hz のピークは 20 日ごろから現れ、2.5Hz のピークは 28 日から顕著となった。

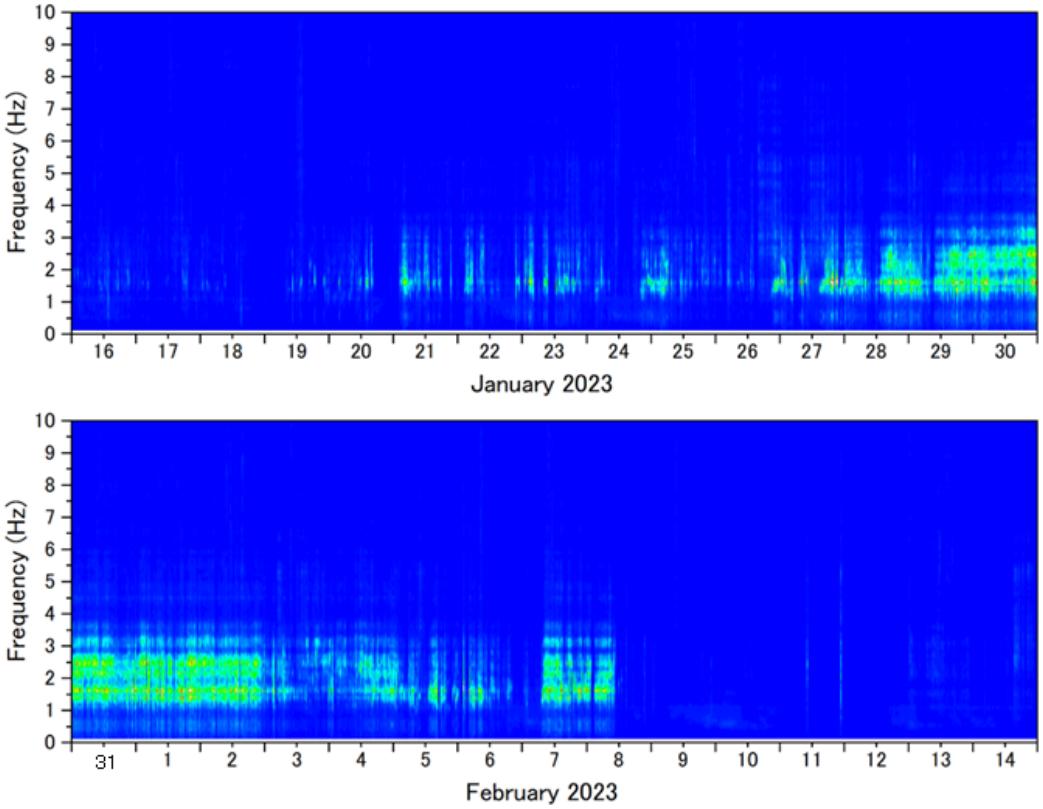


図 47　2023 年 1 月から 2 月までの火山性微動のスペクトルの時間変化。

1.6Hz を含む 1.5-1.7Hz 帯と 2.5Hz を含む 2.4-2.6Hz 帯の振幅および両者の比を図 48 に示す。1.5-1.7Hz 帯（青線）を背面に、2.4-2.6Hz 帯（緑線）を前面にプロットしたが、1 月 16 日から 2 月 8 日の期間においては、青線が見えていることから 1.6Hz のピークの振幅が大きい場合が多いことがわかる。2 月 9 日以降は、青線が見えている場合はほとんどなく、2.5Hz を含む 2.4-2.6Hz 帯の振幅が大きいことが分かる。1 月 16 日から 2 月 8 日の期間における 1.6Hz のピークが卓越していることは火山性微動のスペクトルの構造からみても特別な状況にあったと考えられる。この期間は、図 43 に示すように山体の膨張が観測され、昭和火口からの白色噴煙の放出が顕著であったので、マグマの貫入に伴う脱ガスの進行により火山ガスの放出量が増加し、それがスペクトルの構造に反映されたものと思われる。

一方、明らかに火山灰の噴出が顕著と思われる「噴火」では、図 47 とは異なるスペクトルの構造を示す。図 48 に代表的な火山灰放出に伴う火山性微動のスペクトルを示す。いずれの場合も、1.5－1.7Hz 帯と 2.4－2.6Hz 帯にピークが現れている。また、2012 年 3 月 4 日に昭和火口において発生した火山性微動の場合は、2.1Hz 付近にもピークがみられ、2022 年 9 月 23 日の場合は、16 時以降に 3.0Hz 付近にもピークが現れてよりブロードになっている。いずれの場合も、1.5－1.7Hz 帯のピークが 2.4－2.6Hz 帯のピークよりも大きくなることはない。このことから、1.5－1.7Hz 帯のピークが卓越する 2023 年 1 月 16 日から 2 月 8 日の状態はかなり特殊な事例と言える。

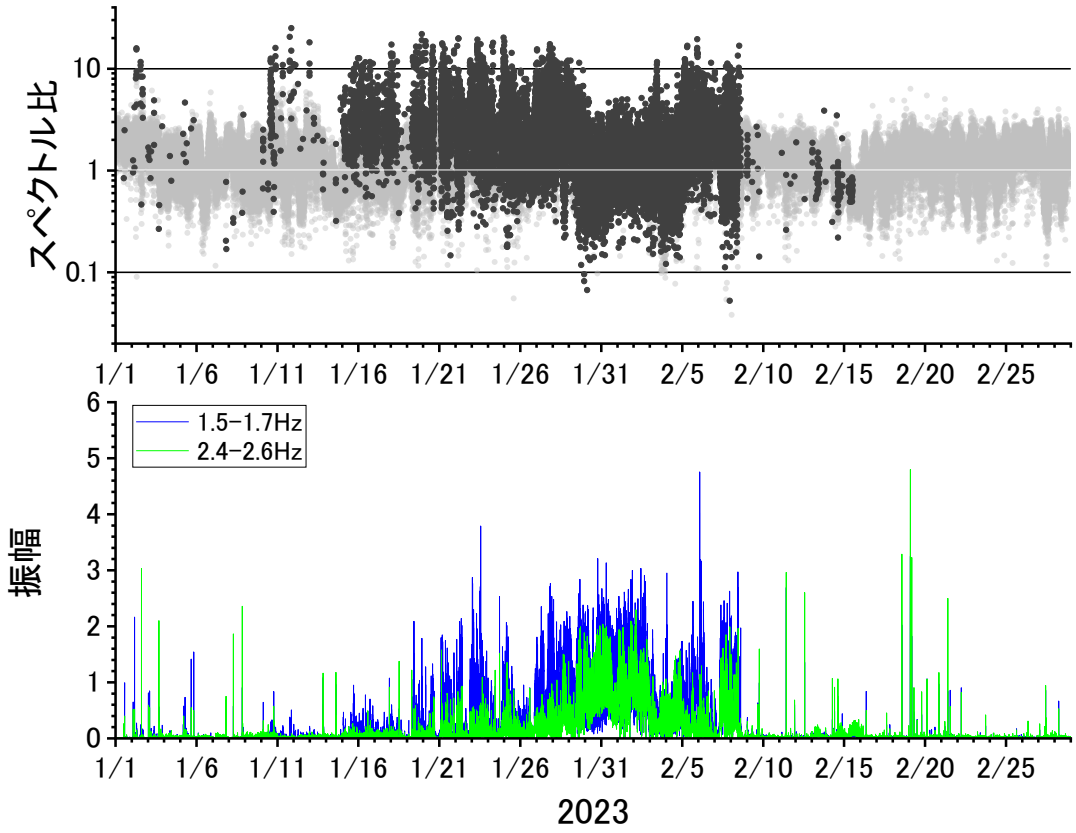


図 48　2023 年 1 月から 2 月までの火山性微動の 1.6Hz と 2.5Hz のピークの時間変化。上段：両者の比の時間変化。1.6Hz の振幅が 2×10^4 以上のものについて黒丸で示した。下段：1.6Hz（1.5－1.7Hz 帯）と 2.5Hz（2.4－2.6Hz 帯）の振幅の時間変化。

そこで、1.5－1.7Hz 帯のピークが卓越する火山性微動は火山ガスの放出に関連し、火山灰放出に寄与しないものと考え、火山灰放出量を見積もりなおしてみた。スペクトルのピークを考慮しない場合、2023 年 1 月と 2 月の火山灰放出量はそれぞれ、41.9 万トンと 39.5 万トンであったが、1.5－1.7Hz 帯のピークが卓越する火山性微動は火山灰放出に寄与しないものとすると、それぞれ 8.6 万トンおよび 8.1 万トンとなり、サンプリングによる降灰量から見積もられる火山灰放出量 4 万トンおよび 3 万トンの倍程度に収まった。したがって、1.5－1.7Hz 帯のピークが卓越する場合の火山性微動の振幅を（1）式から除去することにより、火山灰放出量推定式を高精度化できるといえる。

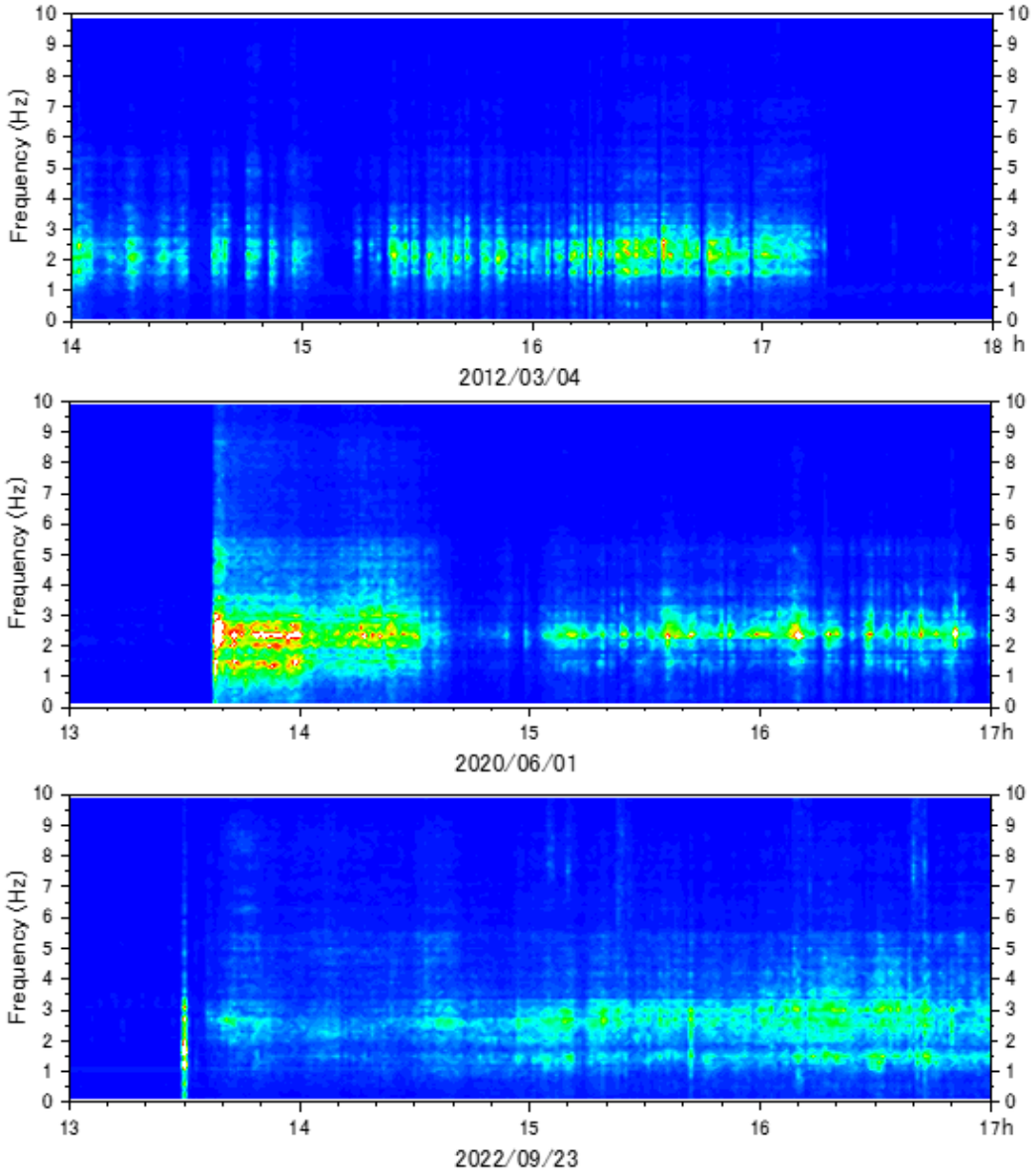


図 49　噴火に伴う火山性微動のスペクトル。上段：2012 年 3 月 4 日に昭和火口において発生した火山性微動。中段：2020 年 6 月 1 日 13:37 に始まった噴火に伴う火山性微動。下段:2022 年 9 月 23 日 13:30 ごろに始まった噴火に伴う火山性微動。

2）火山灰放出率と噴煙高度の関係の検討

式（1）から求められる火山灰放出率と噴煙高度の関係を検討する。

a）桜島における噴煙高度の推移

2009 年 2 月～2023 年 3 月に桜島の昭和火口または南岳火口において発生した噴火の噴煙高度の推移を図 50 に示す。ほとんどの噴煙高度は鹿児島地方気象台の遠望観測に基づくものであるが、雲入りの報告については、再検討したものもある。2012 年 7 月 24 日の爆発については、井口（2013）に基づき 8000m とした。また、

2020 年 6 月 4 日の爆発は X バンド MP レーダーの画像により火口縁上 4800m と決定した（令和 2 年度報告書)。

昭和火口噴火活動期には噴煙高度が徐々に高くなった。その後に発生した南岳噴火の噴煙高度は、昭和火口噴火より高い傾向がみられる。南岳噴火では Episode5（2019 年 9 月～2020 年 6 月）が最も噴煙高度が高いが、その後、低下している。2022 年の Episode8 においても噴煙高度の低下傾向が続いている。2022 年（主に Episode8）において、噴煙高度が 3000m を超えたのは、1 月 28 日、12 月 2 日、12 月 3 日の 3 回しかなく、高度は 3400m、3200m、3000m であった。

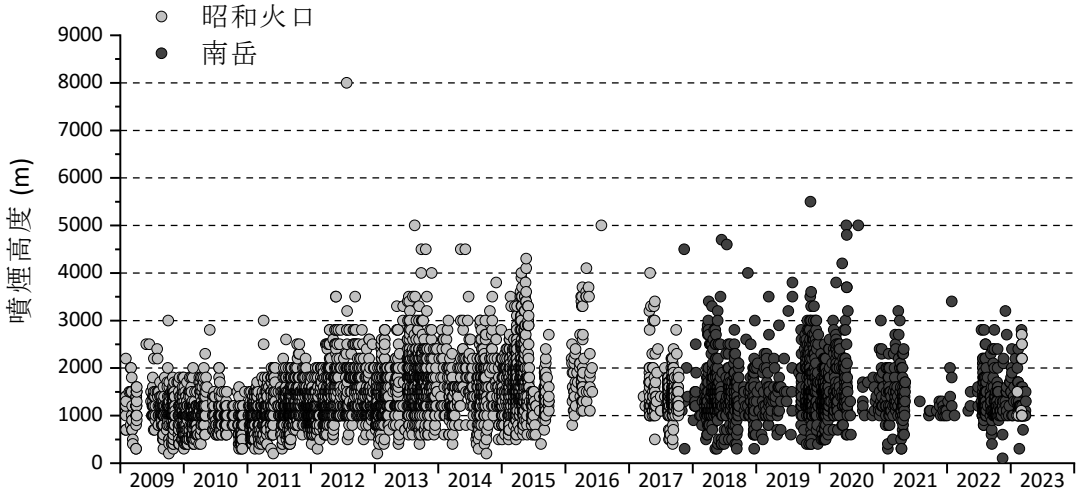


図 50　桜島の爆発に伴う噴煙高度の推移。鹿児島地方気象台の観測によるが、必要に応じて、噴煙高度データを補てん、修正した。黒丸は南岳、灰丸は昭和火口の噴火である。

b）火山灰重量放出率と噴煙高度の関係

図 50 に示した噴火のうち、有村観測坑道において 5 ナノストレイン以上のひずみ変化が検知され、かつひずみ変化の継続時間が 5 分以上続いた爆発は 4062 回発生している。式（1）から火山灰重量放出率を求め、ひずみ変化の継続時間で割ったものを平均噴出率とした。噴煙高度と平均噴出率の関係を図 51 に示す。

2009 年から 2022 年 3 月までの期間では、2012 年 7 月 24 日に南岳において発生した爆発の噴出率が最大であり、195,000kg/s に達している。この噴火について気象庁は噴煙高度を発表していないが、YouTube にアップロードされた桜島遠方からの画像により噴煙高度は 8000m とされている（井口、2013)。次いで、2017 年 11 月 13 日に南岳に発生した爆発の噴出率が大きく、93,100kg/s に達した。この爆発の噴煙高度は、レーダー観測から 4500m と推定されている。2020 年 6 月 4 日の爆発の噴煙高度は 4800m と推測されるが、噴出率は 37,600kg/s と見積もられる。このように噴煙高度が 4000m 以上に達した爆発では噴出率が大きく、噴出率と噴煙高度との間に相関が認められる。噴煙高度（H）には噴出率（W）に依存する上限が認められ、上限の直線は以下のように決定される。

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

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

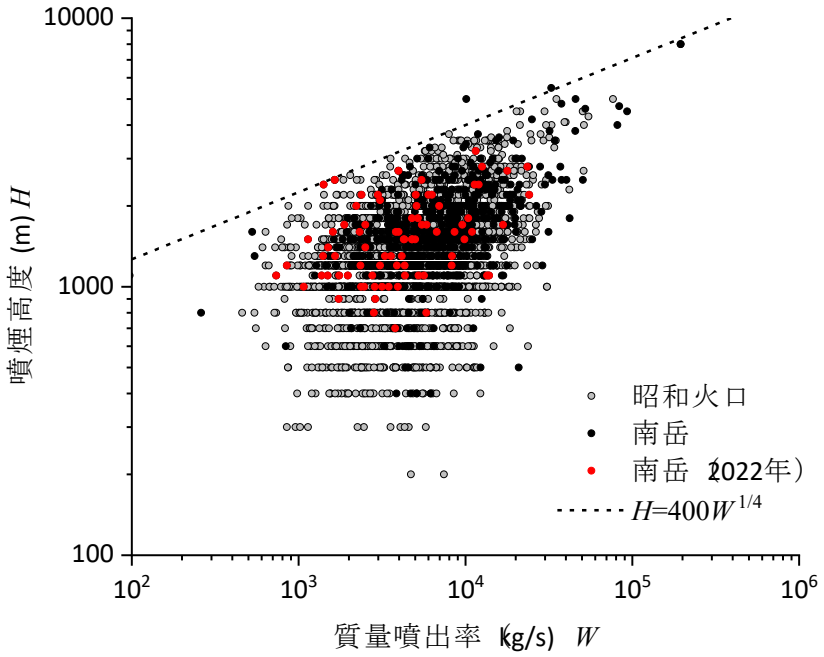


図 51　火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。最近の 2022 年 1 月から 2023 年 3 月までの噴火については赤丸で示した。

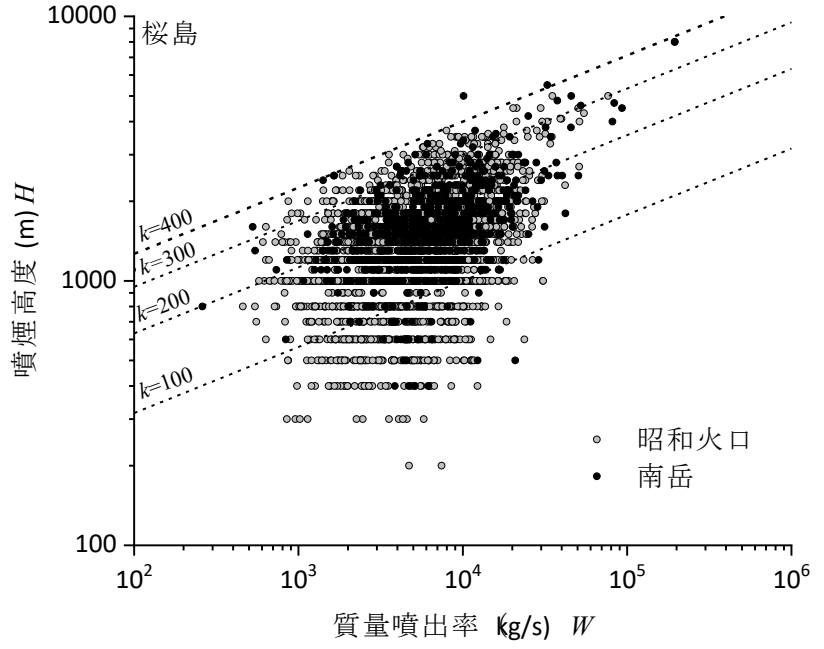


図 52　火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。係数k=100、200、300、400 とした。

次に、式（2）を以下のように一般化し、係数kを検討する。

$$H = kW^{1/4} \tag{3}$$

図 51 に係数k=100、200、300、400 としたものを書き加えて、図 52 に示す。ほとんどの爆発について係数kは 100～400 の範囲にあり、平均的にはk=200 と評価される。この結果は、2022 年の噴火を加えても同様であり、火山灰重量放出率と噴煙高度の関係を見る限り桜島の山頂部の南岳や昭和火口では、類似した噴火が繰り返されていると評価できる。

3）地震及び地盤変動観測の改修による噴出率の高精度化

平成 29 年度の古里観測井（桜島南部）、平成 30 年度の黒神観測井（桜島東部）、令和元年度の新島観測井（桜島北東部）、令和 2 年度の沖小島観測井（桜島南西部）、令和 3 年度のハルタ山観測井（桜島西部）の埋設型地震計（固有周期 1 秒）と傾斜計の改修を行ってきた。令和 4 年度は桜島南部の柴立観測室（図 53 の 1）において埋設機器の改修作業を行った。また、桜島北部の北岳観測室（図 53 の 2）においては、平成 28 年度に高免観測坑道敷地内（図 53 の 3）の深度 10m に設置していた浅層地殻活動観測装置を設置深度が深く、より高品位データが取得可能な北岳観測室のボアホールへ移設を行なった。

a）改修作業と得られた記録

改修作業は耐圧ケーブルの入手および加工に時間を要したため、令和 5 年 1 月 24 日に開始し、3 月 3 日に完了した。1 月 24～1 月 28 日にかけて北岳観測室および柴立観測室の旧機器の引き上げを行なった。その後、北岳観測室において、2 月 3 日～2 月 6 日にかけて孔内洗浄およびダミー通し試験を行い、ダミーの孔底部着底を確認した。2 月 15 日に高免観測坑道の浅層地殻活動観測装置を北岳観測室に移動し、2 月 15 日～2 月 18 日に挿入作業を行い（図 54(a)）、キー溝深度 138m にて着底を確認した。設置完了時に地震計･傾斜計機器の性能が正常であることを確認した。また、柴立観測室においては、2 月 20 日～2 月 26 日にかけて孔内洗浄およびダミー通し試験を行い、ダミーの孔底部着底を確認した。2 月 27 日～3 月 2 日にかけて改修機器の挿入作業を行い（図 54(b)）、キー溝 98m にて着底を確認した。改修機器の設置完了時に地震計・傾斜計機器の性能が正常であることを確認した。



図 53　改修および移設作業実施場所

a)北岳観測井　　b)柴立観測井



図 54　機器設置時写真。a)北岳観測室。b)柴立観測室。

改修および移設後の埋設型地震計の記録例を示す。図 55(a)は 2023 年 3 月 14 日 04 時 18 分に桜島南岳山頂火口で発生した爆発的噴火に伴う爆発地震の柴立観測室、北岳観測室の地震波形である。平成 29 年度改修の同程度のボアホール深度の古里観測井（桜島南部）の地震記録と合わせて示す。埋設型地震計の水平 2 成分は南岳山頂火口方向（図中 L 成分）とその直行方向（図中 T 成分）に方位を合わせて設置している。爆発的噴火としては小規模なため、地震記録の S/N はさほど良くない例ではあるが、いずれの観測井においても、爆発地震の初動から数秒間には火道最上部における膨張・収縮過程を反映する（Tameguri et al., 2002）低周波な地震動が記録されている。

図 55(b)に同地震の柴立観測室、北岳観測室および古里観測室の地震計記録上下動成分のスペクトルを示す。一般的に、爆発地震は 0.5～2 Hz の低周波成分に富むが、3 観測点とも 1.0 Hz 付近の低周波にピークを持ち、改修した埋設型地震計（固有周期 1 秒）が正常に動作していることが分かる。地震動記録の最大振幅は山頂火口に近い古里観測室と柴立観測室で約 4 秒後であるが、北岳観測室においては約 10 秒間に渡って振幅の大きい状態が続く。後述の A 型地震の記録でも同様の傾向が見られることから、site 特性もしくは伝播経路の影響を受けている可能性が考えられる。

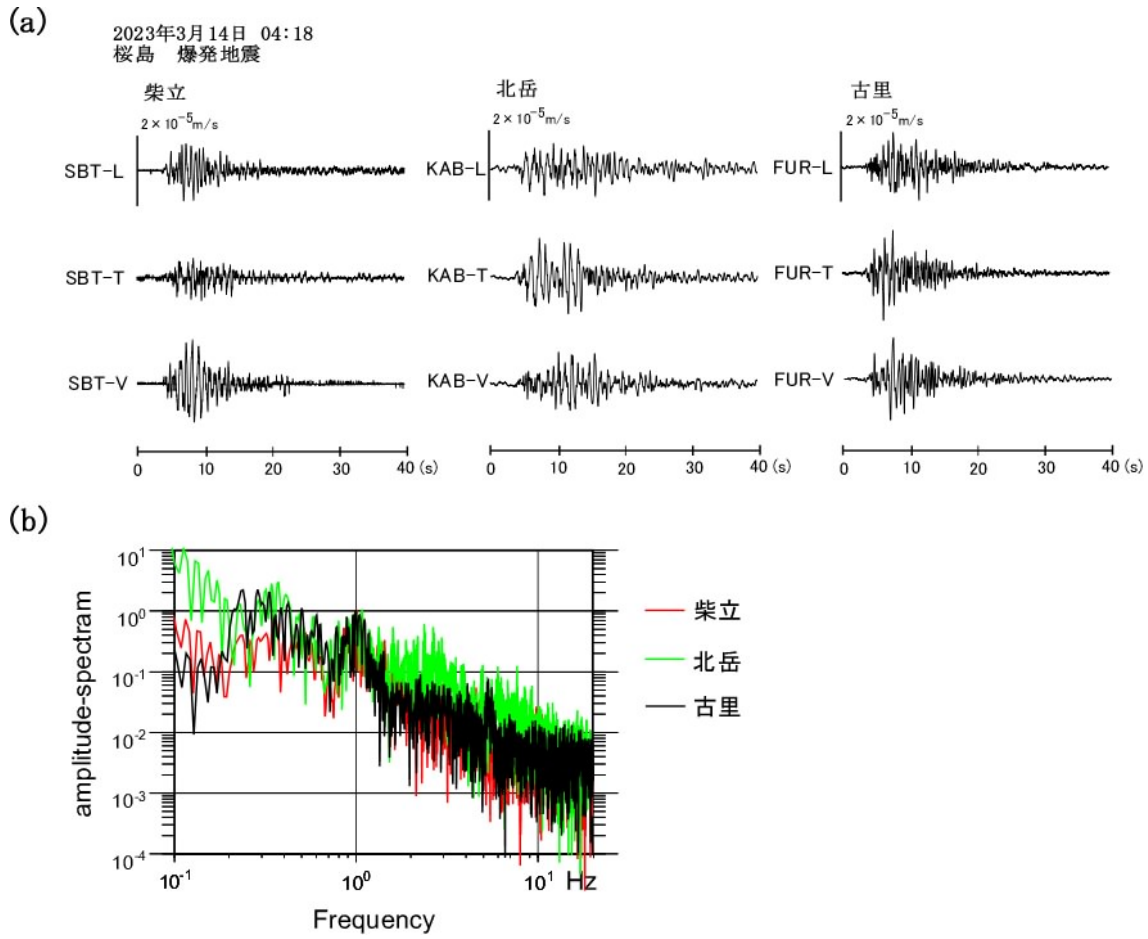


図 55　(a)2023 年 3 月 14 日に発生した桜島南岳山頂火口の爆発的噴火に伴う爆発地震の波形。左列が今回改修を行なった柴立観測室（SBT)、中列が高免観測坑道から機器を移設設置した北岳観測室（KAB)、右列が平成 29 年度に設置した古里観測室（FUR）の地震計記録である。上から順に、水平動火口方向成分（L 成分)、水平動直交方向成分（T 成分)、上下動成分（V 成分）である。(b)柴立観測室（SBT)、北岳観測室（KAB)、古里観測室（ARI）における爆発地震のスペクトル。

図 56 に 2023 年 3 月 6 日 14 時 5 分に南岳山頂火口直下 1.2km 付近で発生した火山構造性（A 型）地震の波形記録を示す。この地震のマグニチュードは 0.6 と微小地震であるが、柴立観測室、北岳観測室および古里観測室において P 波が明瞭に記録されており、非常によい S/N 比で記録されている。また、柴立観測室と古里観測室においては明瞭な S 波も見られる。低周波成分が卓越する爆発地震に加えて、高周波振動が卓越する火山構造性地震についても高精度な観測が可能であることが言える。北岳観測室で S 波が不明瞭な原因は震源放射特性の可能性もあるが、比較的コーダ波が低周波で振幅が大きい時間が継続することから、site 特性もしくは伝播経路の影響を受けている可能性が考えられる。

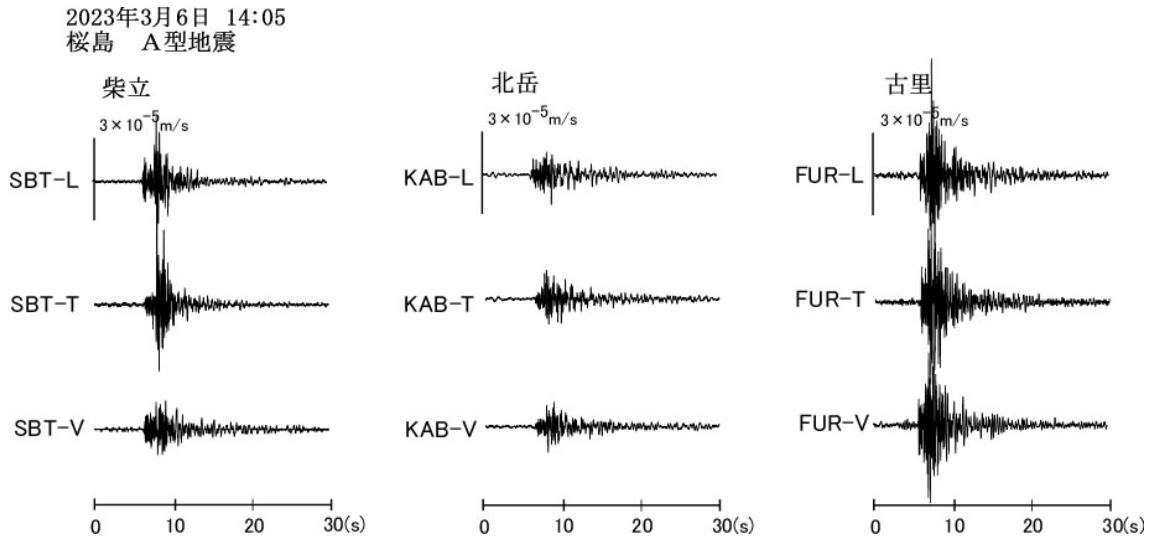


図 56　2023 年 3 月 6 日に南岳山頂火口直下の深さ 1.2km で発生した火山構造性地震の波形。各観測点および成分は図 55 と同様である。

b) 観測点の相違による振幅比の検討

桜島の噴火活動に伴い、火口側地盤の沈降傾斜及び収縮と爆発地震・火山性微動が観測される。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）に対して式(1)の関係がある（Iguchi, 2016）。

令和 2 年度の報告では、黒神観測井や新島観測井のように火山性微動の震源から遠い距離における地震動振幅から火山灰放出量を見積もることが可能か検証を行なった。その結果、振動源から 5km 程度までは火山灰放出量評価方法が十分実用である評価が得られた。順次行なっている機器改修の観測点において火山灰放出量評価についての確認を行う必要があるが、令和 4 年度に改修を行なった柴立観測室および機器移設を行なった北岳観測室においては設置後の日が浅く、顕著な火山性微動と地盤変動が検出されるような噴火が発生していないため、改修機器のデータを使用した火山灰放出重量計算についての評価はデータ蓄積を待つこととする。昨年度報告を行なったハルタ山観測室（火口から 2.8km）とほぼ震源距離が同じとなる古里観測室（火口から 2.6km）との 2-3Hz の周波数帯のスペクトル（A）の比較において、ハルタ山観測室と古里観測室のスペクトル振幅比（2-3 Hz）は 0.57 となっており古里観測室の方が大きい結果が得られていた。震源距離がほぼ同じ観測点であっても、振幅は site 特性の影響が大きく、正確な火山灰放出量計算の定数が求められない可能性があるため、平成 29 年度以降に機器改修作業を行なった点において site 特性の評価を行なった。site 特性評価には構造性の自然地震のスペクトル振幅を用いた。震央距離が 100 km 程度のイベントで各観測点において卓越周波数が 2～5 Hz となり、全ての観測点で振幅が読める 15 イベントを使用してサイト特性の補正値の計算を行なった。イベントは多方位および震源の深さが異なるものを選び、それぞれの観測点で平均化することで震源放射特性も平均化されると見なした。表 1 に

平成 29 年度以降に改修を行なった観測点について、ボアホール設置深度と得られた振幅比を示す。振幅比は古里観測点を基準にして計算している。ただし、今回設置した柴立観測室と北岳観測室の振幅比 (*) に関しては計算に使用したイベントが 1 例しかないため、現段階では参考値とする。その結果、新島観測室、沖小島観測室およびハルタ山観測室の 300m 級のボアホールでは古里観測室との振幅比が 1 以下で、特にハルタ山では約 2 倍の振幅比の違いがある。このことからボアホール深度が深い観測点では振幅が小さくなることが言える。また、深度 100m 前後に機器を設置している黒神観測室と、参考値であるが柴立観測室および北岳観測室においては最大で 1.23 であり、ほぼ同一の振幅であることが言える。

表 5　設置深度と古里観測室を基準とした 2-3 Hz 周波数帯域のスペクトル振幅比

観測点（改修年度）	設置深度 (m)	振幅比
古里　（平成 29 年度）	83	1
黒神　（平成 30 年度）	92	1.16
新島　（令和元年度）	340	0.77
沖小島　（令和 2 年度）	290	0.64
ハルタ山　（令和 3 年度）	290	0.48
柴立　（令和 4 年度）	98	1.23(*)
北岳　（令和 4 年度）	138	1.13(*)

ただし、柴立観測室と北岳観測室の振幅比（*）に関しては計算に使用したイベントが 1 例のため、現段階では参考値とする。

図 57 に昨年度報告を行なったハルタ山観測室と古里観測室のスペクトル振幅の比について、表 5 で得られた site 特性補正を考慮したものとの比較を示す。観測された 4 例の噴火微動について、1 分ごとの 2-3 Hz のスペクトル振幅をプロットしている。黒丸は site 特性補正前の観測値、赤丸は表 1 で得られた site 特性値からハルタ山観測室の振幅を 0.48 で割った補正後の値をプロットしている。両者のスペクトル振幅について相関はある程度良いが、補正前は両者の振幅比の平均が 0.57 となっており、古里観測井の方が振幅は大きい値となっている。site 特性補正後は両者の振幅比は 1.18 となり、site 特性の補正によって両者の振幅の違いが小さくなることが言える。今後は観測を継続してデータ収集を行ない、事例数を増やして柴立観測室および北岳観測室の site 特性補正値を定量化した上で、火山灰放出量計算の定数の検討を行う。

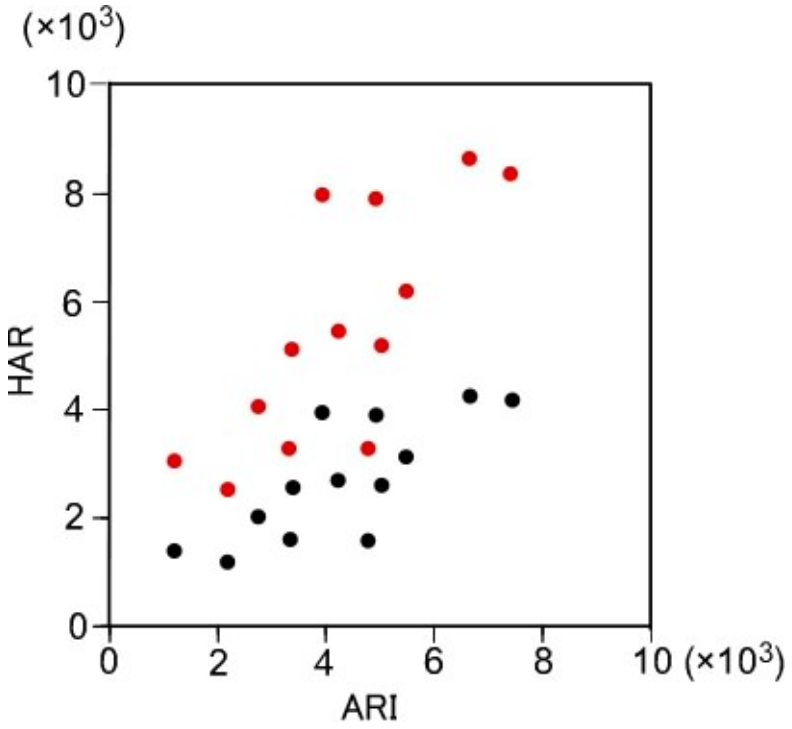


図 57　ハルタ山観測室（HAR）と古里観測室（ARI）の 2-3 Hz の周波数帯域の 1 分毎のスペクトルの相関。黒丸は site 特性補正前、赤丸は site 特性補正後。

4）火山灰放出量推定式の桜島以外の火山への適用

桜島火山の噴火を対象にした火山灰放出量の推定式は、長期の噴火活動期間について適用可能であることが確かめられた。これを他の火山に適用し、推定式適用の拡張を図る。令和 3 年度の報告書でも、噴火活動を続けている吐噶喇列島の諏訪之瀬島と、2013 年～2018 年にかけて噴火活動を繰り返したインドネシアのシナブン火山の噴火について火山灰放出量推定式の適用性を検討したが、今年度は長期間の火山灰放出量について検討した。

a）諏訪之瀬島火山

諏訪之瀬島は、九州の南方、吐噶喇列島のほぼ中央に位置する成層火山である。19 世紀の噴火活動は激しく、1813 年には御岳山頂付近の通称旧火口において大規模噴火が発生し、1883～1884 年には山頂から北東方向に開いた馬蹄形カルデラ内において溶岩を流出した。20 世紀以降は、馬蹄形カルデラ内に火砕丘を形成するブルカノ式噴火とストロンボリ式噴火を繰り返している。2000 年 12 月に火砕丘の北東側に新火口を形成して一時的に噴火活動は活発化したが、その後、噴火活動は低下傾向にあった。しかし、2020 年 12 月から爆発活動が再び激化し、活発な爆発活動を続けている。ここでは、2021 年 4 月～2023 年 3 月までの 2 年間の火山灰放出量を火山性微動の振幅から見積もり、その妥当性を検討する。

2021 年 1 月～2023 年 3 月までの噴火活動を図 58 に示す。同図には、日別の爆発回数、噴火回数、噴煙高度（いずれも福岡管区気象台が発表したもので、爆発は、気象庁榊戸原観測点において 10Pa 以上の空振を観測したもの、噴火は空振振幅が 10Pa 未満であるが、噴煙高度が火口縁上 1000m 以上に達したものである）をプロットした。なお、噴煙高度の時系列は 1000m 未満を含む。

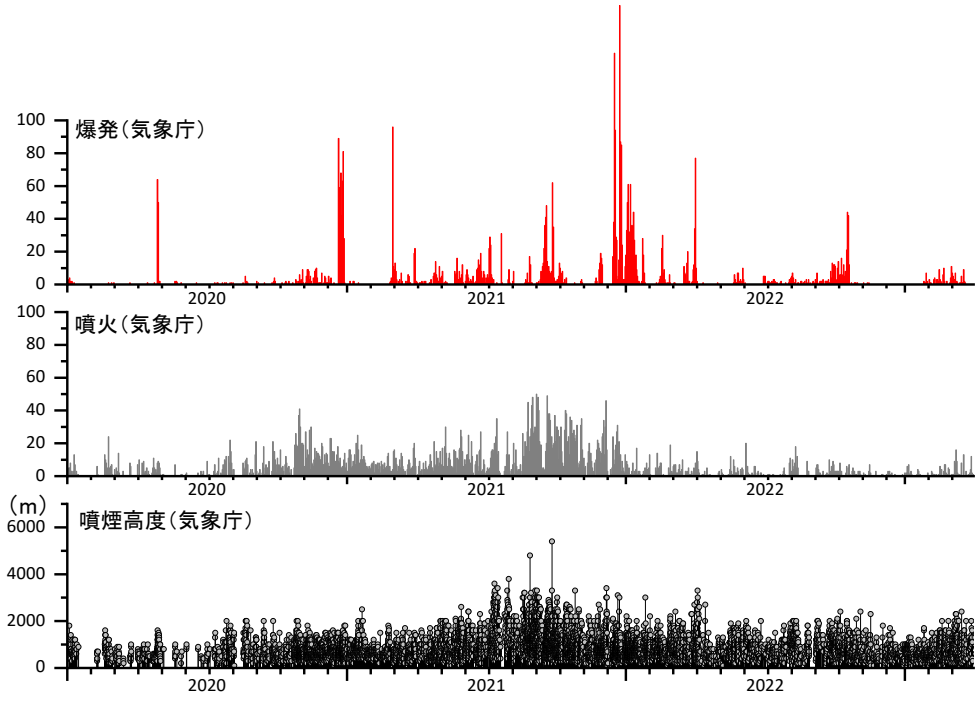


図 58　2021 年 1 月～2023 年 3 月までの日別の爆発回数、噴火回数、噴煙高度。

2020 年 12 月から爆発活動が激化しているので、2021 年も多数の爆発が発生した。爆発回数が多かったのは、2021 年 12 月である。2022 年も回数は減少したものの引き続き爆発は発生している。噴火回数は 2020 年 10 月ごろから増加した。噴火回数の多い状態は 2021 年 12 月まで続いた。火山灰放出量は爆発、噴火の発生頻度と関係はあると考えられるものの、気象庁の噴火は目視観測によって決められるので、視界不良により見えない時は噴火として認識できない。また、火山灰放出量はその継続時間にも強く依存するため、回数だけで火山灰放出量との関係を議論するのは適切ではない。噴火が継続している間は火山性微動が継続するので、火山性微動を用いて火山灰放出量を推定することを検討する。

桜島においては、火山灰放出量を地震動振幅と地盤変動から得られる圧力源の体積変化の線形結合である（1）式によって推定することが可能である。一方、桜島以外の火山においては、桜島の観測坑道における傾斜計とひずみ計による観測ほど地盤変動について高感度で信頼できるデータは得られていない。そこで（1）式を地震動振幅（A）のみによって表現する(1)’式を考え、その妥当性を検証する。

$$W_e = \alpha A + \gamma \qquad (1)'$$

2017 年から 2023 年までの桜島南岳火口の噴火活動について、地震動振幅の 2～3Hz 周波数帯域のスペクトルと火山灰放出量の関係を示すと図 59 のようになる。これを(1)’式により線形近似すると、$\alpha = 6.25\times10^{-5}$、$\gamma = -1.9\times10^{4}$ が得られる。

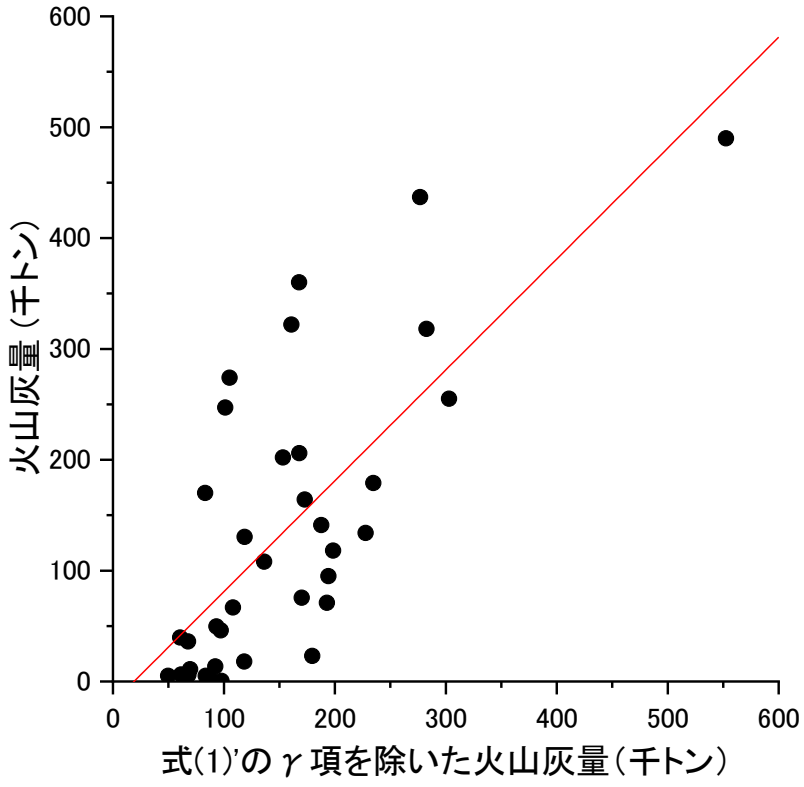


図 59　地震動振幅（2～3Hz 周波数帯域）のみを用いて推定した火山灰放出量とサンプリングにより推定された火山灰放出量の関係。2017 年から 2023 年までの桜島南岳火口の噴火活動について月毎の値により示す。

次に、この経験式を諏訪之瀬島にも適用できるものとして月毎の火山灰放出量を求めた。桜島では南岳火口から 2.4 kmの距離にある有村観測坑道の短周期地震計を用いたが、諏訪之瀬島でも火口からほぼ同じ距離（2.2 km）にあり、ボアホール（深さ 94m）に設置されている気象庁のナベダオ観測点の短周期地震計の記録を用いた。また、この地震計は地中に埋設されているため、諏訪之瀬島において頻繁に発生する爆発の空気振動の影響を受けにくいメリットがある。

諏訪之瀬島において発生する火山性微動のうち、噴火と確認されているもののスペクトルを図 60 に示す。スペクトルのピークは 1.6Hz と 2.7Hz にあることが分かる。2 つのピークは同じような推移を示した。ここでは、桜島と同様に 2－3Hz の周波数帯域を用いることにする。式(1)’のγ項は常時微動の補正項であるが、その定常性を検討するために、図 61 に 1Hz 未満の長周期帯と 2～3Hz の周波数帯域を比較して示した。常時微動を最もよく表す 1Hz 未満の長周期帯は冬季に振幅が大きく、夏季に小さくなる傾向がるもののその違いは 2 倍程度であり、2～3Hz の周波数帯域の振幅が常時微動の影響を受けていたとしても大きく変わらないのでγ項は定数として扱う。

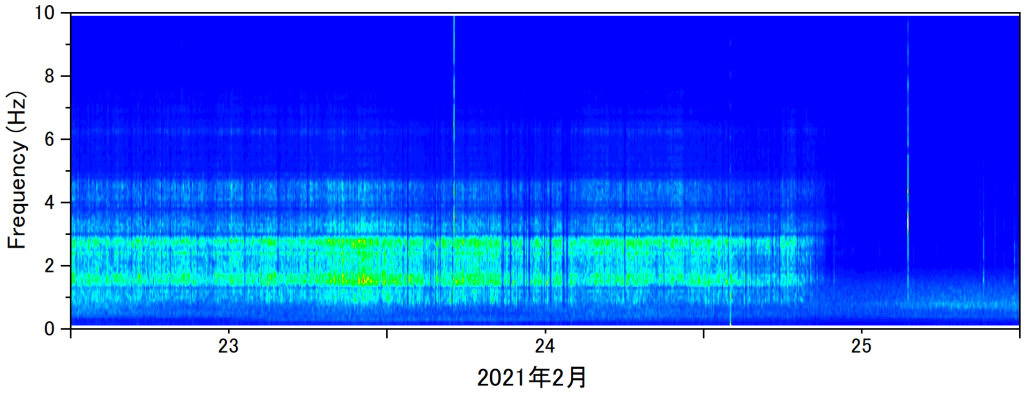


図 60　諏訪之瀬島の噴火微動に伴うスペクトル。2021 年 2 月 23 日～25 日。気象庁の遠望観測では 2021 年 02 月 23 日 21 時 55 分に噴火開始。噴煙高度 1200m。2021 年 02 月 24 日 19 時 20 分連続噴火停止。2021 年 02 月 24 日 22 時 18 分に噴火開始。噴煙高度 1400m。2021 年 02 月 25 日 02 時 46 分連続噴火停止。

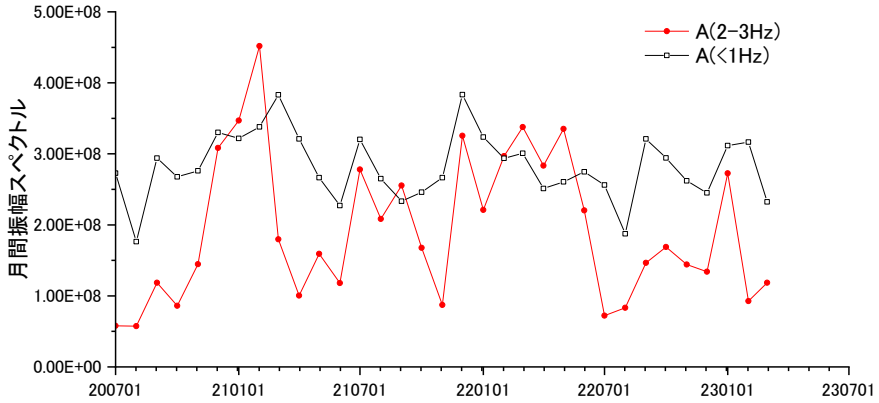


図 61　諏訪之瀬島の月間振幅スペクトルの推移。1Hz 未満の長周期帯と 2～3Hz の周波数帯域を比較した。

図 62 に式(1)’を用いて推定した月別の火山灰放出量を示す。2020 年 7 月から 2023 年 3 月について推定したところ月間火山灰放出量は 1 万トンから 25 万トンの値が得られた。諏訪之瀬島での降灰観測点は鹿児島県砂防課が南麓から集落周辺に設置したサンプリングポイントと自動降灰量計がある。降灰量は風向の影響を強く受けるので、直接的に比較するのは難しいが、2021 年 1 月から 2023 年 3 月までに約 3～4kg/m2 の降灰が観測された。式(1)’を用いて推定した 2021 年 1 月から 2023 年 3 月までの火山灰放出量は 270 万トンに達しているので、桜島における火山灰放出量と同等距離における降灰量の関係から見て式(1)’を用いて推定した火山灰放出量はオーダー的には一致しているといえる。図 55 に示した月別の火山灰放出量の多くは 10 万トンから 20 万トンの範囲にある。この量は、2020 年 7 月以降現在に至る桜島の噴火活動期よりも多いが、昭和火口の噴火活動期(2009 年から 2015 年)よりも少なく、1970 年代から 1980 年代の南岳噴火活動の最盛期に比べて 1 桁小さい。図 59 に示したように、(1)’の推定式は 2～3 倍の誤差を見込む個必要があるので、2021 年 1 月から 2023 年 3 月までの諏訪之瀬島の月間火山灰放出量は数十万トンと評価できる。

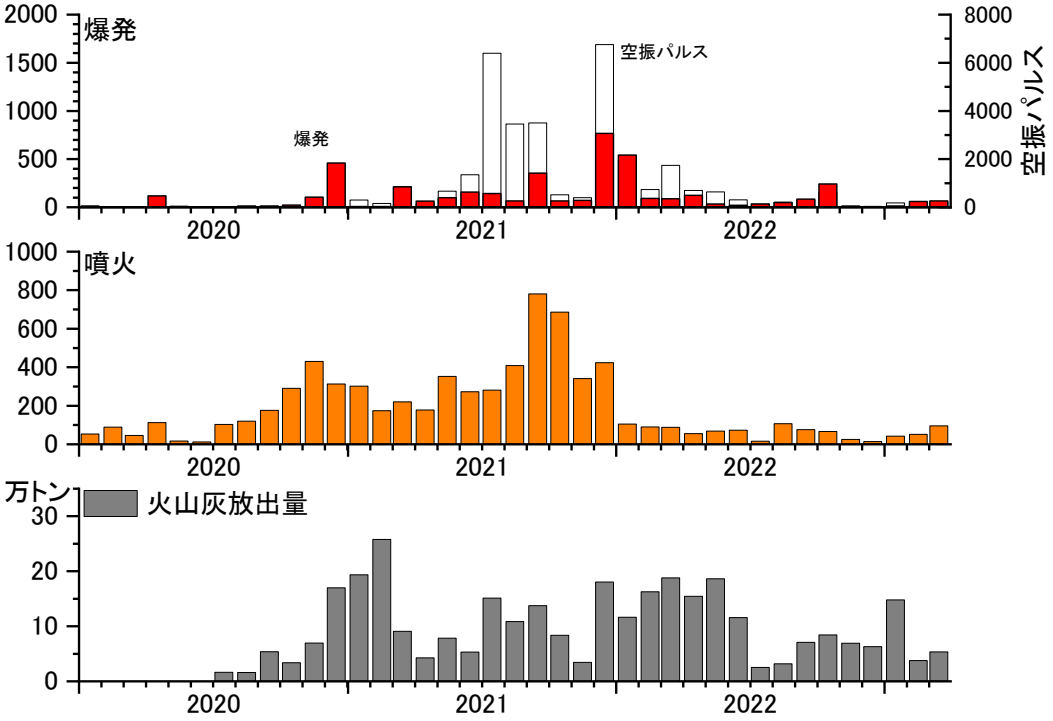


図 62　諏訪之瀬島の月別の噴火活動。上段：気象庁観測による爆発回数（赤棒）、御岳火口近傍観測点における 10Pa 以上の空振パルス数（白棒）。中段：気象庁観測による噴火回数。下段：(1)’式を用いて推定した火山灰放出量（2020 年 7 月～2023 年 3 月）。

次に、火山灰放出量の時間変化の妥当性について検討する。噴火活動は 2020 年 9 月頃から徐々に活発化したとされる。2020 年 7 月と 8 月の推定降灰量が 1 万トンと少ない。噴煙高度が 1000m 以上となる噴火・爆発は 7 月に 17 回、8 月に 42 回と

少ない。9 月、10 月、11 月の推定火山灰量は、5 万トン、3 万トン、7 万トンに増加した。噴煙高度が 1000m 以上となる噴火・爆発もそれぞれ 32 回、42 回、99 回に増加した。さらに、爆発が急増した 12 月には（85 回）17 万トンに達した。噴火活動の活発化が進行した時点では、爆発回数、噴火回数、推定火山灰放出量はよく対応している。

2021 年 1 月以降の爆発回数、噴火回数、推定火山灰放出量の対応関係はよくない。1 月、2 月には爆発・噴火回数は減少したが、推定火山灰放出量は増加し、2 月の推定火山灰量が最も多い（25 万トン）。爆発は 1 分程度で終了するが、噴火は長時間継続する場合がある。例えば、2 月には 1 日以上継続した事例もある（図 53）。また、図 63 に示す降灰観測では 2 月末に降灰量が急増した。一方、2021 年 3 月～12 月の爆発が多い時期の推定火山灰量はそれほど多くない。爆発は、噴石を飛散させるが、噴煙に含まれる火山灰量は多くない。これは、爆発発生時にレーダのエコーが観測されにくいこととも整合的である。爆発の発生は、火山灰放出への寄与が小さい。

2022 年 1 月以降は、爆発・噴火回数は急速に減少したが、推定火山灰量は 6 月頃まで 15 万トンから 18 万トン程度のレベルを保った。図 56 をみると、この期間に降灰量が増加しており、特に、2022 年 3 月には 1 週間で 1kg/m^2 以上の増加があった時期もあるので、火山灰放出量も高いレベルにあったと考えられる。7 月以降は火山灰放出量も減少したが、爆発・噴火回数ほど著しい低下をみせておらず、火山灰の放出は依然として継続している。

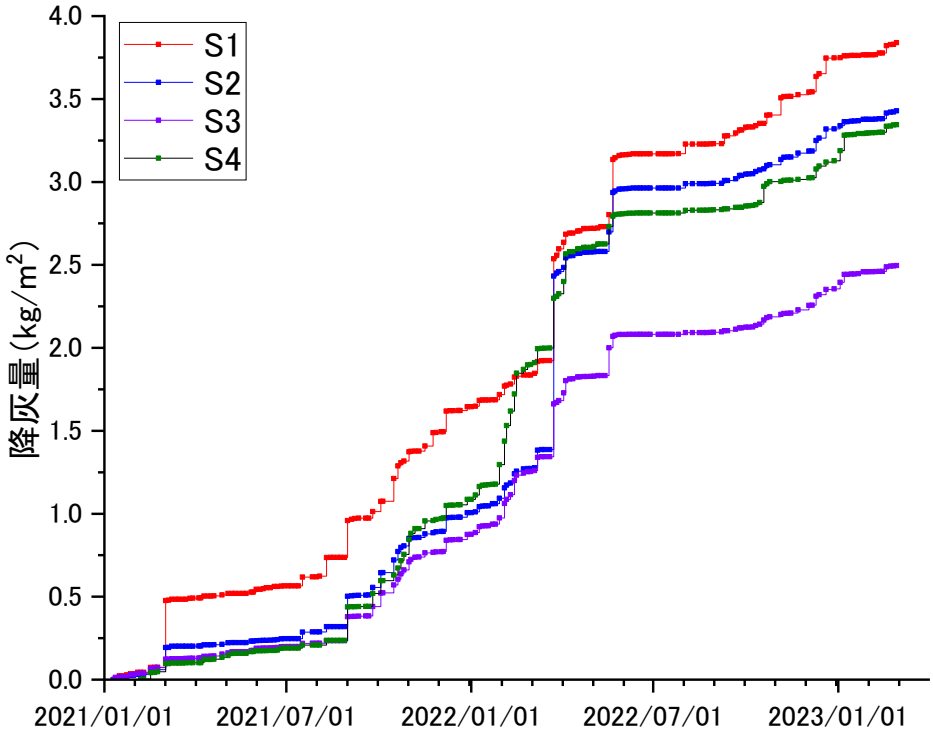


図 63　諏訪之瀬島南山麓における積算降灰量。鹿児島県砂防課によるデータ。S1 は気象庁ナベダオ観測点。

以上の検討から、火山性微動の 2－3Hz 帯域の振幅を用いた火山灰放出量の推定式(1)’は、地盤変動を含めた推定式(1)よりも精度は劣るが、2－3 倍の誤差を考慮すれば、火山灰放出量の推定には十分実用になるといえる。実際、サンプリング調査による降灰量の観測でも 2 倍程度の差は認められている。また、噴火活動については、揮発性成分の発散が卓越する爆発活動期から火山灰粒子の放出が卓越する時期への遷移が明瞭に認められた。例えば、2020 年 12 月の爆発活動期から 2021 年 1 月・2 月の火山灰放出期、2021 年 12 月・2022 年 1 月の爆発活動期から 2022 年 2 月～6 月の火山灰放出期への遷移である。

b) シナブン火山

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

火砕流は火山砕屑物が火山体の斜面を流れ下る現象であることから地震動を励起しやすく振幅の大きい火山性微動を伴う。一方、噴煙放出型の噴火では、火山性微動の振幅が 1/5 程度に小さいことから、火山性微動と火山灰放出の関係を検討するためには、火砕流と噴煙放出型の噴火では、異なる扱いをする必要がある。昨年度は噴煙高度が火口縁上 3000m 以上に達した噴煙放出型の噴火について、噴煙高度から推定される火山灰放出率と継続時間から火山灰放出量を推定したが、今年度は、噴煙放出型の噴火に伴う火山灰量の推移を検討することとした。

ここでは、山頂から 2.6 ㎞北にある Law Kawar 観測点の短周期地震計のデータの 2～3Hz の周波数帯域の地震動に(1)’式を適用することとした。噴煙放出型の噴火が発生し始めたのは、2015 年 10 月以降であり、2018 年 2 月までの噴煙放出型の噴火を解析することとした。

図 64 に噴煙放出型の噴火の噴煙高度と(1)’式を用いて推定した噴火ごとの火山灰放出量の時系列を示す。ここで、γ=0 とした。噴煙高度は 1000m～2000m のものが多く最大でも 5000m 程度なので、桜島南岳の噴火と同等規模と評価できる。一方、(1)’式を用いて推定した噴火ごとの火山灰放出量は、最大でも 200 トン程度であり、多くは 100 トン以下と計算された。この量は、桜島南岳の噴火で噴出する火山灰量である千トンオーダーから万トンオーダーに比べ 2 桁小さいことになる。火山灰放出量が過小評価となった理由の 1 つはシナブン火山のテレメータ観測システムはアナログであり、噴火の場合は、地震動が降り切れてしまうことにある。

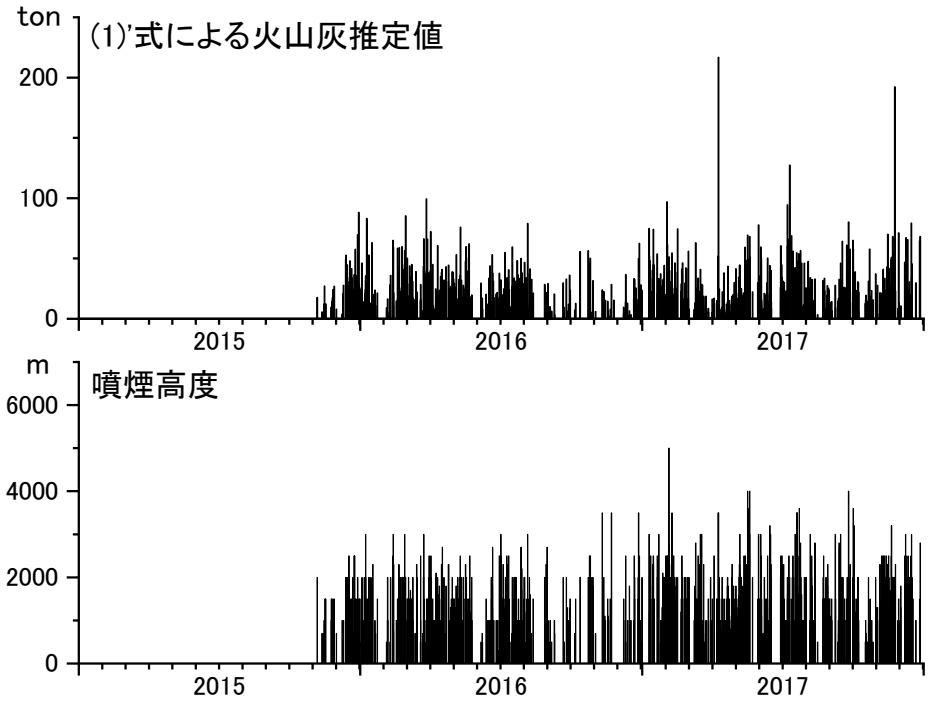


図 64　(1)’式を用いて推定した噴火ごとの火山灰放出量と噴煙高度の時系列。

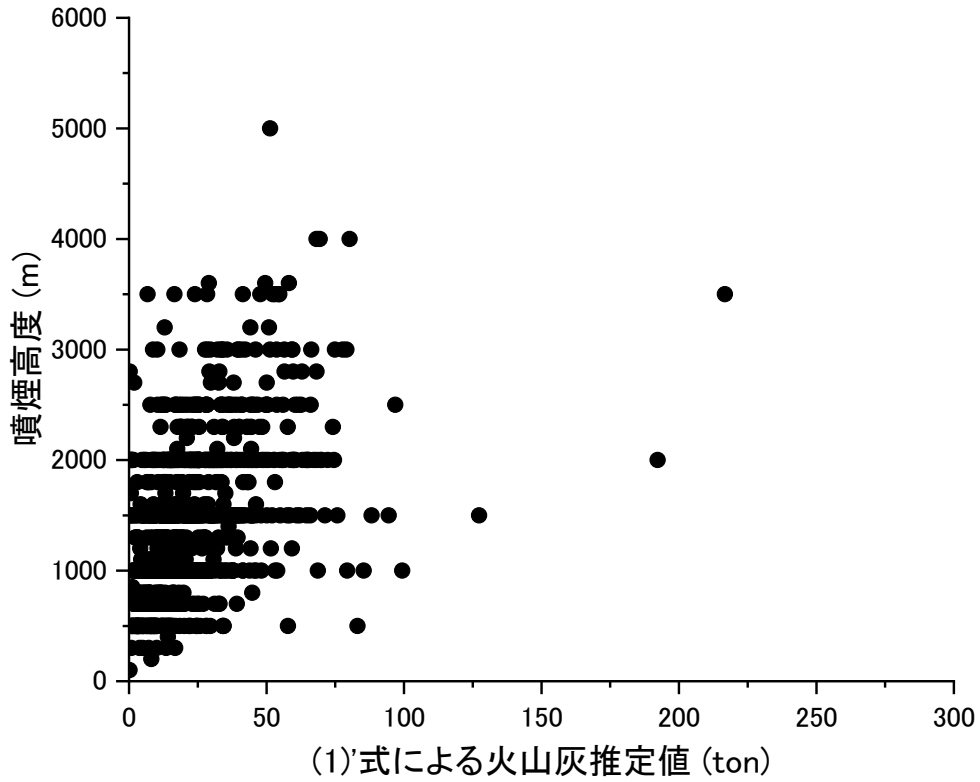


図 65　(1)’式を用いて推定した火山灰放出量と噴煙高度の関係。

もう 1 つの理由は、(1)’式は月毎の火山灰量に対して経験的に導出した換算式 (1) 式を地震動のみに対して低起用できるように改変したものであるので、月毎

の火山灰量に対しては有効であるが、個々の噴火に対しては有効でないのかもしれない。桜島の場合、個々の噴火に対しても(1)式は有効であることが確認されているが、(1)式は地盤変動の項を含むものである。桜島の個々の噴火についてみてみると、(1)式の地震動の項よりも地盤変動の項による火山灰放出量への寄与が圧倒的に大きく、地震動の項だけを見てみると 10 トン/分から 100 トン/分のオーダーであり、シナブン火山と同程度である。桜島の場合、個々の噴火についても適用可能なのは、100 トン/分のオーダー～1000 トン/分のオーダーの噴出率を算出できる地盤変動の項を考慮しているからであり、地盤変動の項を無視した経験式では、個々の噴火に伴う火山灰放出量を換算することができなかった。

一方、(1)’式から計算される火山灰放出量は、噴煙高度と相関があるので（図 65)、地震動エネルギーは火山灰放出量を反映する情報を含んでいると思われる。今後は、個々の噴火に対して地震動エネルギーが火山灰放出量推定できるようにさらなる検討を進めたい。

5) 噴煙シミュレーションによる噴煙高度の検討

爆発的噴火における火山灰輸送と堆積過程の理解と予測のため、課題 C3 と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行した。主に課題 C3 で開発・改良を進めている噴煙の３次元流体モデル SK-3D を用いた。このモデルは計算精度が高い一方、大規模並列計算機を用いても１回のブルカノ式噴火を再現するには数日間の計算時間を要する。そのため、実際の噴火時に堆積範囲を推測できるようあらかじめ多数の計算例を揃える。噴火規模を代表する噴出量、噴火強度を代表する噴出率、噴火継続時間、噴出速度、火口半径を変えたパラメータスタディを実施した。これにより、表 6 で示す計算条件についてブルカノ式噴火の噴火条件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。

表 6　ブルカノ式噴火の３次元シミュレーションの計算条件

ID	噴出量 (kg)	噴出率 (kg/s)	噴火継続時間 (s)	噴出速度 (m/s)	火口半径 (m)
195	1.0×10^{9}	2.0×10^{8}	5.0	141	295
196	1.0×10^{9}	5.0×10^{8}	2.0	141	466
197	1.0×10^{9}	1.0×10^{9}	1.0	141	659
198	1.0×10^{8}	1.0×10^{8}	1.0	141	208
199	1.0×10^{8}	5.0×10^{7}	2.0	141	147
200	1.0×10^{8}	2.0×10^{7}	5.0	141	93
203	1.0×10^{8}	1.0×10^{7}	10.0	141	66
204	1.0×10^{8}	1.0×10^{6}	100.0	141	21
214	1.0×10^{8}	2.0×10^{8}	0.5	141	295
216	1.0×10^{8}	1.0×10^{9}	0.1	141	659
217	1.0×10^{8}	5.0×10^{8}	0.2	141	466
218	1.0×10^{7}	1.0×10^{7}	1.0	170	60
219	1.0×10^{7}	5.0×10^{6}	2.0	85	60
220	1.0×10^{7}	2.5×10^{6}	4.0	43	60
222	1.0×10	5.0×10^{6}	2.0	170	42
223	1.0×10^{7}	2.5×10^{6}	4.0	170	30
254	1.0×10^{6}	1.0×10^{7}	0.1	80	87
255	1.0×10^{6}	2.5×10^{6}	0.4	80	43
256	1.0×10^{6}	1.0×10^{7}	0.1	141	21
257	1.0×10^{6}	1.0×10^{8}	0.01	141	208
258	1.0×10^{6}	5.0×10^{7}	0.02	141	47
259	1.0×10^{7}	1.25×10^{6}	8.0	18	65
260	1.0×10^{7}	2.0×10^{6}	5.0	28	66
261	1.0×10^{7}	5.0×10^{6}	2.0	281	33
262	8.3×10^{5}	4.6×10^{5}	1.8	281	10

263	1.0×10^{6}	5.0×10^{6}	0.2	33	96
266	1.0×10^{6}	1.0×10^{5}	10	141	6.6
268	1.0×10^{8}	5.0×10^{5}	200	141	15
269	1.0×10^{8}	1.25×10^{5}	800	141	7.4

観測データの定量化を目指し、数値シミュレーションとの比較研究に着手した。インドネシア・シナブン火山の 2018 年噴火を対象に、SK-3D を用いて噴火条件を変えたシミュレーションを複数実行した。X バンド MP レーダーによる反射強度データと SK-3D のシミュレーションで再現した火山灰のサイズ分布を比較した（図 66）。2018 年噴火では溶岩ドーム崩壊による火砕流とそれに伴う灰神楽が、火口からの噴煙放出に先行した。そのため、レーダー観測ではそれらと噴煙柱が混在した。一方、数値シミュレーションでは噴煙柱のみを再現した。これらによって、レーダー観測データから噴火条件を推定する準備が整った。

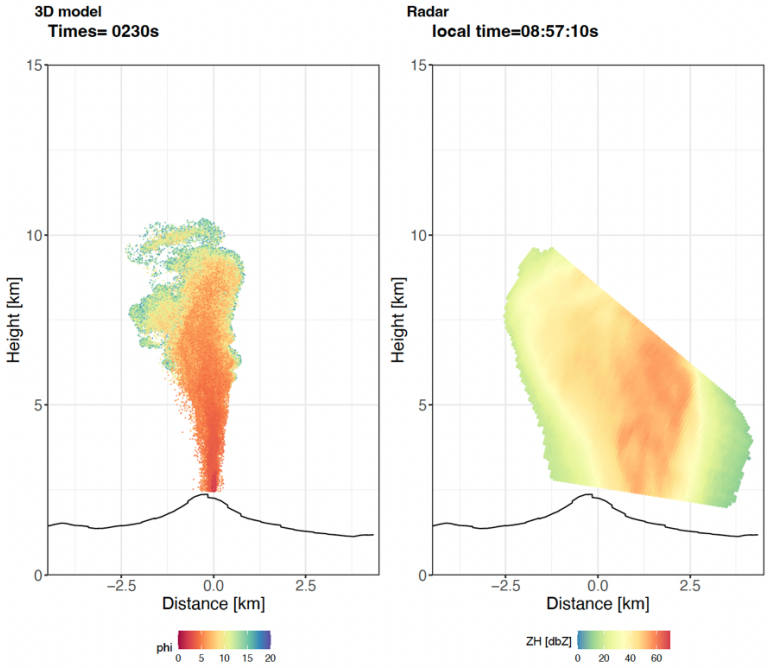


図 66　シナブン火山 2018 年噴火の 3 次元シミュレーションから得られた火山灰の粒径分布（左図）。X バンド MP レーダー観測で得られた反射強度分布（右図）。いずれも火口を含む断面での分布を表す。

6）火山灰輸送拡散 PUFF モデルを用いた予測精度の向上

a）PUFF モデルによる火山灰の輸送拡散予測改良の背景

火山灰粒子の運動をラグランジュ的に追跡する PUFF モデルは、航空安全を目的として 1990 年の Redoubt 火山噴火を契機に開発されたモデルであり、火口から数百キロの範囲への輸送拡散を予測するモデルである。開発初期には一般的な格子点モデルが検討されたが、発生源がポイントソースの場合、格子点の物理量の時間変化を計算するオイラーモデルよりも火山灰粒子の質量を追跡するラグランジュモデルが適していると判断され、開発がすすめられた。この種のモデルは移流拡散モデルと呼ばれることが多いが、オイラーモデルに現れる移流は格子点の局所変化を計算するのに対し、ラグランジュモデルでは移流の効果は輸送として計算されるので、輸送拡散モデルと呼ぶのが適当である。輸送と移流は物理的次元の異なる量なので、混同は避けなければならない。移流拡散モデルでは、ポイントソースから数値拡散により上流側に物理量が偽りの拡散をもたらすため、要注意となる。

PUFF モデルはインターネットで公開される天気予報モデルの GPV（Grid Point Value）データを利用して火山灰粒子の輸送を計算する。輸送の他に正規乱数を用いた Random Walk による拡散と Stokes Law を用いた重力落下を計算する簡単なモデルである。最初のモデルは噴煙高度を入力パラメータとして火口に円柱状の噴煙コラムを立て、それが上空の風によってどのように拡散するのかを数値予報モデルとして予測した。初期の円柱状の噴煙はその後、傘雲などに変形させるなどの改良が加えられた。噴煙高度の他に噴火の継続時間も重用なインプットとなる。Tanaka and Iguchi（2019）はこの PUFF モデルに桜島周辺の地震計や傾斜計からリアルタイムで算出される噴出率と噴煙高度を組み合わせることで、噴火開始時刻に噴出率と噴煙高度を自動入力する PUFF モデル予測システムを開発した。しかし、地震計等による噴煙高度の推定には大きな誤差が含まれる。気象庁から配信される風のデータもリアルタイムで自動化する際には解析値ではなく近未来の予報値が用いられるため大きな誤差を含むことになる。そこで、Tanaka et al.（2020）では MP レーダーデータによる噴煙の 3 次元的な分布の実測を PUFF モデルの数値予測に同化する試みがなされた。PUFF モデルの初期値が推定値でなく、現地での実測値に置き換えられたことは、予測精度の点で画期的な改善と言える。さらに、Tanaka et al.（2022）ではデータ同化の手法として近年注目される粒子フィルターのアルゴリズムをラグランジュ的に移動する火山灰粒子に適用することで、同化の精度が向上することを示した。粒子フィルターでは、Bayes の定理に基づいて MP レーダーのエコーの中心からの距離でモデル内の各火山灰粒子の尤度を求め、尤度の低い粒子は除去し、尤度の高い粒子を増殖するという手法が導入される。気象予測ではアンサンブルメンバーを粒子に見立てて粒子フィルターを導入するが、PUFF モデルでは火山灰粒子に粒子フィルターを導入するので、より直接的である。モデル予測が MP レーダー観測と合わない事例は火山灰予測には頻繁に見られるようである。MP レーダーは噴煙の下端が観測点からの仰角で削られるため、観測が完全に正しい分布を示すわけではない。その点はモデル予測が補完してくれるので、予測と観測の

両方の特徴を反映した粒子フィルターは有効な同化手法と言える。現時点では事例解析に留まるが、将来的には連続観測データを逐次モデルに同化するシステムへと発展させることが望まれる。

b) PUFF モデルのサーバー変更

PUFF モデルはアラスカ大学地球物理学研究所(GI/UAF)と地質調査所(USGS)の AVO (Alaska Volcano Observatory)との共同研究で開発され、1991 年からは開発者(PI)の異動により筑波大学地球科学系のサーバーに移植された。現時点では筑波大学計算科学研究センター(CCS)のサーバーで運用されてている。2005 年までは米国のリアルタイム気象予測データが用いられたが、気象庁の GPV データが 2005 年に教育研究目的で一般に公開されるようになってからは、CCS が GPV データのポータルサイトを担うようになると、その GPV データが PUFF モデルの風データとして用いられるようになった。以後、京大の井口教授の下で SATREPS インドネシア国際支援プロジェクトが開始されると、インドネシア気象局(BMKG)に PUFF モデルが移植され現業モデルとして利用されるようになった。さらに、次世代火山研究推進事業の下で、リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発に貢献してきた。開発から 30 年が経過し、PI の定年退職によりサーバーの変更が検討されたことから、桜島火山観測所のサーバーに PUFF モデルの移植が行われた。

図 67 は桜島火山観測所に移植後に Linux サーバーのモニターに映る PUFF モデルのトップページを中道准教授が確認しているところである。



図 67 桜島火山観測所の計算サーバーに移植された PUFF モデル。

本事業の下では、図 68 に示すように、桜島、新燃岳、口永良部島、三宅島、浅間山、富士山、アラスカの Augustine 火山を対象に毎日 1 回の仮想的噴火に対する火山灰輸送拡散シミュレーションを行い、Web 上で公開している。火山名が World となっているアイコンは、実際に世界のどこかで大規模な噴火が発生した際に、即座にマニュアルで火山灰輸送拡散モデル予測を実施し、公開するために設けられている。トップページの下端には、過去に発生した実際の大規模な噴火の際のシミュレーション結果が紹介されている。桜島と新燃岳に関しては、地震計等によるリアル

タイム噴出率と噴煙高度の推定が提供され、仮想的な噴火ではない実測推定値に基づく輸送拡散モデルの予測が Real-time Operation というアイコンで運用されている。

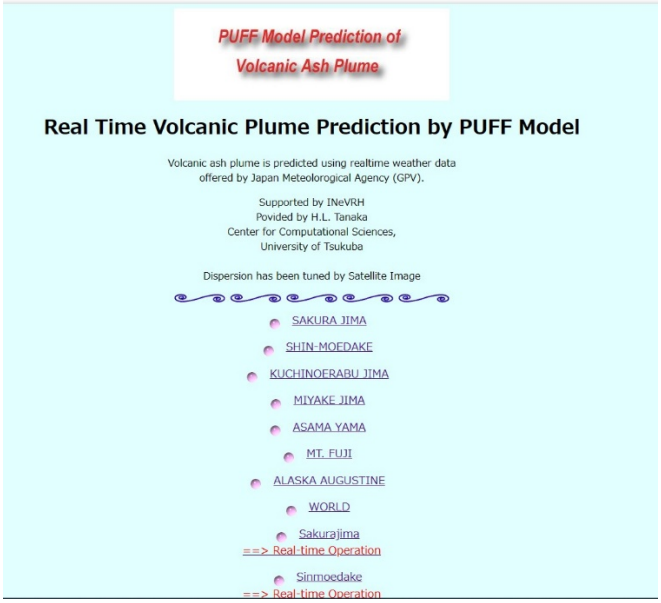


図 68　次世代火山研究推進事業の下で運用される PUFF モデルのサイト。

図 69 は筑波大学 CCS がポータルサイトとなって一般に公開している気象庁(JMA)の GPV データのホームページである。2005 年以降の全球大気大循環モデル (GSM)による解析値と予測値が保存されており、名前と所属を登録し、研究教育目的であることを同意することで、誰でも GPV/JMA データをダウンロードすることができる。このポータルサイトは筑波大学 CCS の地球環境研究部門とセンターの計算機科学部門の専門家で共同運営されており、国内外の地球惑星科学のさまざまな研究教育分野で利用されている。



図 69　筑波大学 CCS が一般に公開している気象庁(JMA)の GPV データサイト。

c) まとめ

アラスカの Redoubt 火山噴火を契機に 1990 年に開発され、30 年以上運用され続けた PUFF モデルであるが、開発者の定年退職によりひとつの節目を迎えている。今日では気象庁火山課が中心となり、充実した火山灰移流拡散モデルによる噴煙予測が行われ、ホームページで公開されるようになった。このモデルは格子点上の変数の時間変化を計算するオイラーモデルであるが、数値拡散の問題も抑えられ高精度の移流拡散の計算が行われている。風の入力データも格子間隔の粗い GSM ではなく、より細かい格子の風データが入力されている。ただし、解像度の高い格子点の風データが実際の風を精度よく再現しているわけでは無く、解像度が高ければ高いほど誤差の相対値は上がってしまうことに注意しなければならない。現実の上空の風を精度よく予測することは大変困難であり、避けられない予報誤差を常に伴うことに注意が必要である。また、風データの精度が十分に良かったとしても、噴出率と噴煙高度の入力は移流拡散モデルの初期値として大変重要であり、高精度のソースのリアルタイム推定が必要である。さらに、精度の良いモデルに精度の良い初期値を与えても、大気のカオス性によりモデル予測は時間と共にその誤差が拡大する。よって、MP レーダーなどのリアスタイムの観測とその観測を予測モデルに同化する 4 次元同化技術の開発が今後の火山灰気象学の課題である。火山灰追跡モデルに MP レーダーなどの実測データの同化が行われることで、火山防災に資する高精度な予測モデルが完成すると考えている。今後の研究開発に期待する。

(d) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

気象モデル WRF による高分解能シミュレーションおよび分解能を変えたシミュレーションから、火山の地形の影響を受けた拡散場の再現性の評価に基づき、火山灰拡散を精度良く予測するためのシミュレーション条件を評価した。予測精度の検証には、現地で実施される様々な実測データを活用した。ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度を計測し、鉛直プロファイルを把握した。取得したデータにより、地上観測機器や気象データとの比較、気象モデルの妥当性評価等を実施した。火山周辺の気流をさらに高精細化させるため、WRF から得られる気象場を境界条件とし、地形の凹凸、地表面の植生や構造物など気流を乱す粗度の影響を考慮して、非定常な乱流場の計算を行うことのできるキャノピーモデルを用いたラージエディシミュレーションを用いて、噴火時の火山周囲の気流性状を明らかにした。ディスドロメータは火山灰粒子の落下速度も計測できるので、観測された落下速度から見かけの粒子比重を求めることにより、火山灰粒子の凝集の程度をさらに多くのデータを用いて評価した。

1) 風速ベクトルのその場観測

a) 調査概要

桜島を対象にドローンによる上空の風ベクトルおよび火山灰・火山ガス調査を実施した。さらに並行してドップラーライダーを用いて風の連続観測を行い、風の乱流強度の鉛直プロファイルの計測も行った。調査は図 1 に示す、桜島島内の松浦地点（Site A）および有村地点（Site B）で実施した。今年度は松浦地点において火山灰・火山ガスの調査を、有村地点においてドローンによる上空の乱流計測の調査に取り組んだ。年間 2 回の観測キャンペーンを設定し、それぞれの調査期間は以下の通りである。各調査期間におけるフライト概要を表 1 および表 2 に示す。

・調査期間①　2022 年 6 月 28 日（火）～6 月 29 日（水）の 2 日間（松浦地点）
・調査期間②　2023 年 1 月 25 日（水）～1 月 26 日（木）の 2 日間（有村地点）

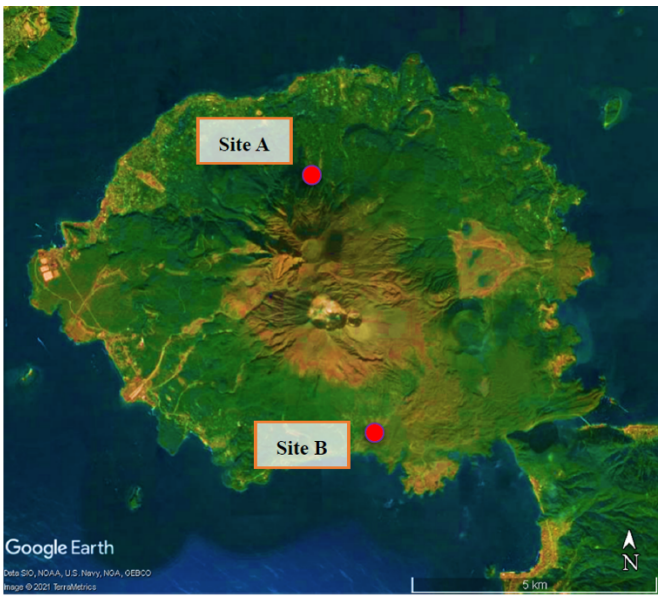


図 70　調査地点（Site A：松浦地点、Site B：有村地点）

表 7　ドローンのフライト概要（調査期間①）

Run	観測日	観測地点	離陸時刻	着陸時刻	フライト内容（高度、移動速度）
1	2022/06/28	松浦地点	11:29:55	11:42:05	0m➡500m（11:29:55-11:38:30）（1m/s） 500m➡0m（11:38:30-11:42:05）（3m/s）
2			12:19:40	12:34:00	0m➡585m（12:19:40-12:30:15）（1m/s） 585m➡0m（12:30:15-12:34:00）（3m/s）
3			12:38:25	12:53:45	0m➡500m（12:38:25-12:49:54）（1m/s） 500m➡0m（12:49:54-12:53:45）（3m/s）
4			13:05:50	13:24:20	0m➡800m（13:05:50-13:19:10）（1m/s） 800m➡0m（13:19:10-13:24:20）（3m/s）
5			13:30:35	13:51:00	0m➡900m（13:30:35-13:45:30）（1m/s） 900m➡0m（13:45:30-13:51:00）（3m/s）
6	2022/06/29	松浦地点	10:03:45	10:15:57	0m➡513m（10:03:45-10:12:55）（1m/s） 513m➡0m（10:12:55-10:15:57）（3m/s）
7			10:31:10	10:47:50	0m➡700m（10:31:10-10:43:22）（1m/s） 700m➡0m（10:43:42-10:47:50）（3m/s）
8			10:58:30	11:18:15	0m➡880m（10:58:30-11:13:50）（1m/s） 880m➡0m（11:13:52-11:18:15）（3m/s）
9			11:55:18	12:18:00	0m➡1000m（11:55:18-12:11:55）（1m/s） 1000m➡0m（12:12:10-12:18:00）（3m/s）
10			13:07:06	13:16:27	0m➡387m（13:07:06-13:13:50）（1m/s） 387m➡0m（13:13:50-13:16:27）（3m/s）
11			13:19:22	13:33:10	0m➡600m（13:19:22-13:29:23）（1m/s） 600m➡0m（13:29:23-13:33:10）（3m/s）

表 8　ドローンのフライト概要（調査期間②）

Run	観測日	観測地点	離陸時刻	着陸時刻	フライト内容（高度、移動速度）
12	2023/01/25	有村地点	14:16:00	14:33:30	0m➡500m（14:16:00-14:24:35）（1m/s） 500m➡0m（14:24:45-14:33:30）（1m/s）
13			14:38:50	14:58:03	0m➡700m（14:38:50-14:50:32）（1m/s） 700m➡0m（14:50:32-14:58:03）（3m/s）
14			15:09:30	15:23:25	0m➡600m（15:09:30-15:19:30）（1m/s） 600m➡0m（15:19:30-15:23:25）（3m/s）
15	2023/01/26	有村地点	10:34:40	10:44:40	0m➡900m（10:34:40-10:40:10）（4m/s） 900m➡0m（10:40:10-10:44:40）（3m/s）
16			10:52:30	11:04:23	0m➡400m（10:52:30-10:55:51）（2m/s） 400m➡20m（10:55:51-10:59:26）（2m/s） 20m➡400m（10:59:26-11:01:47）（3m/s） 400m➡0m（11:01:47-11:04:23）（3m/s）
17			11:07:45	11:24:40	0m➡500m（11:07:45-11:15:45）（1m/s） 500m➡0m（11:15:45-11:24:40）（1m/s）
18			11:33:25	11:55:55	0m➡700m（11:33:25-11:44:55）（1m/s） 700m➡0m（11:45:10-11:55:55）（1m/s）
19			12:56:40	13:12:20	0m➡400m（12:56:40-13:00:00）（2m/s） 400m➡20m（13:00:00-13:03:35）（2m/s） 20m➡400m（13:03:35-13:05:40）（3m/s） 400m➡20m（13:05:40-13:08:10）（3m/s） 20m➡400m（13:08:10-13:09:50）（4m/s） 400m➡0m（13:09:50-13:12:20）（3m/s）
20			13:16:55	13:36:33	0m➡400m（13:16:55-13:23:28）（1m/s） 400m➡20m（13:23:28-13:29:42）（1m/s） 20m➡400m（13:29:42-13:33:02）（2m/s） 400m➡0m（13:33:02-13:36:33）（2m/s）
21			13:40:10	13:55:30	0m➡400m（13:40:10-13:43:35）（2m/s） 400m➡20m（13:43:35-13:46:55）（2m/s） 20m➡400m（13:46:55-13:49:10）（3m/s） 400m➡20m（13:49:10-13:51:20）（3m/s） 20m➡400m（13:51:20-13:53:00）（4m/s） 400m➡0m（13:53:00-13:55:30）（3m/s）

b）調査方法

観測に使用したドローンは、6 枚のプロペラを有するマルチコプター（SPIDER CS-6；ルーチェサーチ）である。機体の中心上部に高さ 45 cm のアルミポールを設置し、その上端に超音波風向風速計（TriSonica Mini；Anemoment）を、直下に PM センサ（Pocket PM2.5 Sensor；ヤグチ電子工業）を搭載した。また、温湿度センサ（iMet-XQ2；InterMet Systems）、ガスセンサ（QRAE3；RAE Systems）、データロガー及びバッテリーをドローン上面に装着したアルミ製のデッキに収納した。ドローンの外観を図 71 に示す。

フライト方法には、観測地点の直上を指定速度で上昇または下降しながら計測する方法を採用した。フライト高度は最大で 1000 m まで、1 回のフライトは 15～25 分間である。計測要素は、気圧、気温、湿度、風向風速、ガス濃度（SO_2、H_2S）、$PM_{2.5}$、PM_{10} で、計測間隔は、風向風速が 0.1 秒、その他が 1 秒である。



図 71　調査で使用したドローンの外観（SPIDER CS-6）。

ドップラーライダーは、三菱電機製の DIABREZZA W シリーズ（LR-E1S5SB）を使用した。有村地点における調査期間②のみ、ドローン離着陸地点の近傍にドップラーライダーを設置して観測を行った。観測高度は、45 m～330 m を対象として鉛直方向に 15 m 間隔、計測時間は 2 秒間隔として連続観測を行った。ドップラーライダーの外観を図 3 に、主要性能を表 3 に示す。

表 9　調査に使用したドップラーライダーの主要性能

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

RH：Relative Humidity，RoHS：Restriction of Hazardous Substances

※）三菱電機技報 Vol.89 No.3 2015 より引用



※）三菱電機取扱説明書より引用

図 72　調査に使用したドップラーライダーの外観（三菱電機製 DIABREZZA W）。

c）火山ガス及び火山灰の観測結果

2022 年 6 月 28 日～29 日に火口の北側にあたる松浦地点（標高 318 m）においてドローンによる火山ガス及び火山灰の観測を実施した。この期間中の桜島では、**エラー！参照元が見つかりません。**に示した火山灰噴出率の時間変化からわかるように、顕著な噴火が 6 月 28 日の 1 時 19 分及び 6 月 29 日の 5 時 47 分の 2 回発生しており、地表面には火山灰が数センチ堆積していた。

2022 年 6 月 28 日 13 時(Run4)のフライトにおける風向風速、火山ガス濃度(SO_2、H_2S）及び火山灰濃度（$PM_{2.5}$、PM_{10}）の時間変化を図 74 に示す。このフライトでは標高 1100 m まで上昇しており、標高 700m 付近（13 時 13 分頃）で火山灰濃度が大きくなっており、SO_2 濃度は、地上が最も高く上空に向かうに従い減少していた。

次に、風向風速、SO_2 濃度及び火山灰濃度の鉛直プロファイルを図 75 に示す。図は上昇時のドローンの観測値を高度 40 m 毎にその上下 20 m の平均値を算出してプロットしたものである。風速は最大で 5 m/s 程度、風向は南～南東となっており、SO_2 濃度は期間初め上層まで 1 ppm でほぼ一定だった状況から 13 時頃まで地上側を中心に 3 ppm 程度まで増加しその後減少した。H_2S は全期間で検出限界の 0.1 ppm 以下であった。火山灰濃度（PM_{10}）は、標高 600～900 m で極大となっており、南風によって火口から噴煙が流入したものと考えられる。

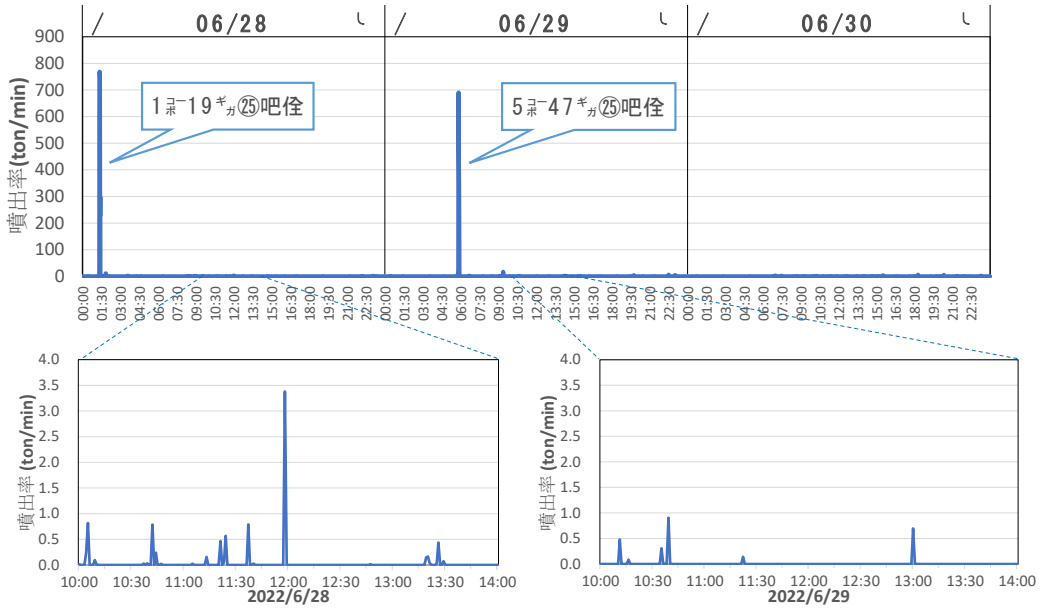


図 73　2022 年 6 月の観測時の噴火の状況（火山灰噴出率）。

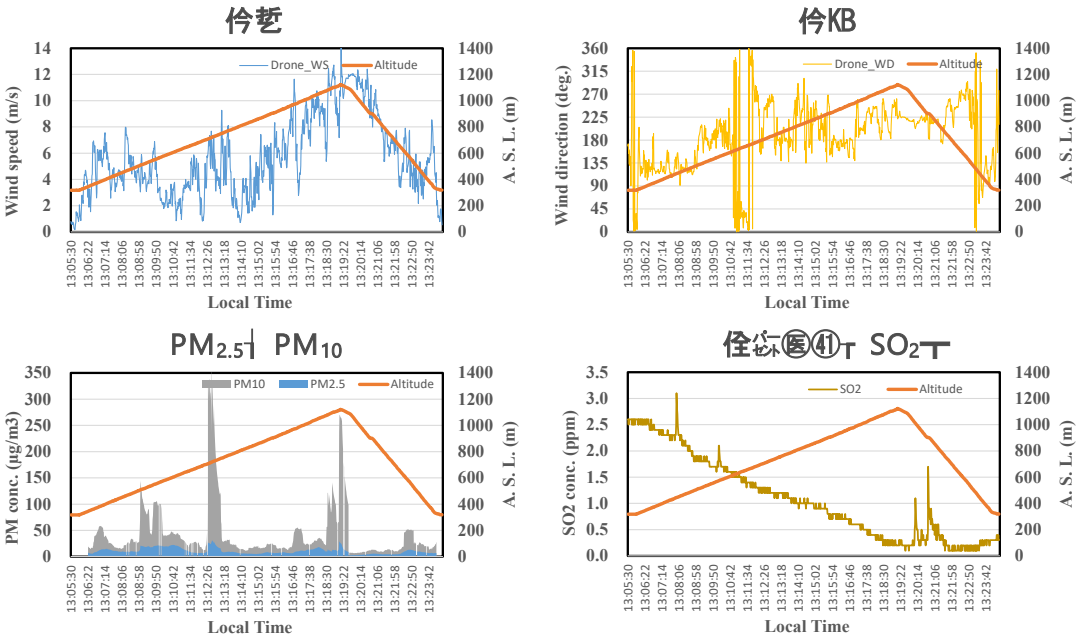


図 74　ドローンによる観測結果（Run4 松浦地点、 2022 年 6 月 28 日）

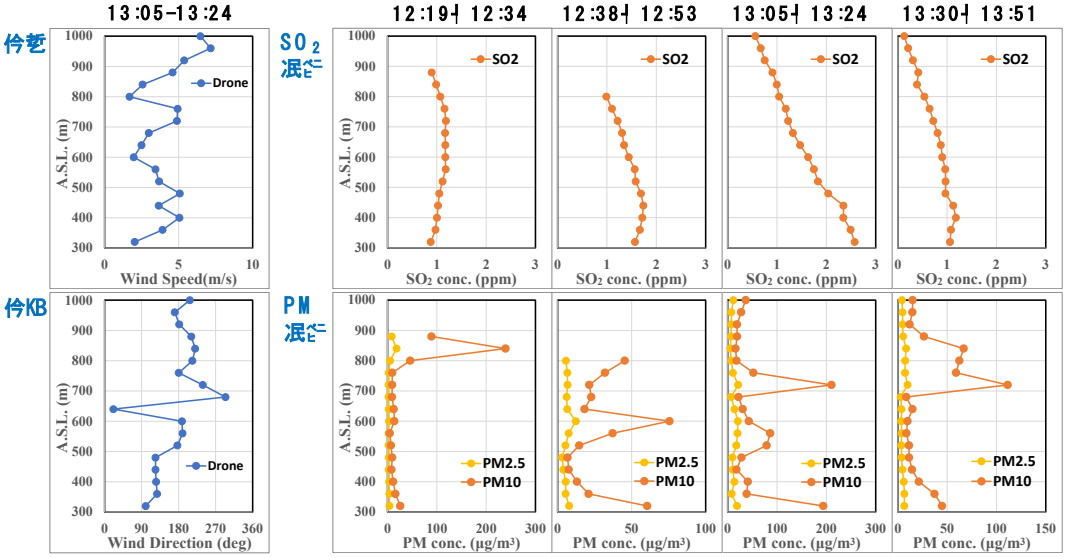


図 75　風向風速、火山ガス濃度及び火山灰濃度の鉛直プロファイル（2022 年 6 月 28 日）

d）平均風速及び乱流強度の観測結果

2023 年 1 月 25 日～26 日（調査期間②）に有村地点においてドップラーライダーを設置し、ドローンとの同時観測を実施した。両者の平均風速、平均風向及び乱流強度の観測結果の鉛直プロファイルを比較し、ドローンによる風速場の観測精度について検討した。

ドローンのフライトは、観測地点の直上を指定速度で上昇または下降しながら観測する方法を採用した。フライト内容の一覧は表に示したとおりで、フライト高度は地上から最大 900 m まで、1 回のフライトは 10～22 分間である。フライト数は合計 10 回で、そのうち 4 回は上空との間を複数回往復しているため全体で 16 回の往

復となっており、上昇時、下降時の観測数は 16 ケースである。上昇速度は 1、 2、3、 4 m/s の 4 種類を使用しており、それぞれの観測数は 6、 4、 3、 3 ケースであり、下降速度は 1、 2、 3 m/s の 3 種類、それぞれの観測数は 4、 4、 8 ケースとなっている。

ドップラーライダーは、上空 45 m～330 m を対象として鉛直方向に 15 m 間隔、計測時間は 2 秒間隔として連続観測を行った。1 月 25 日の観測結果を図 76 に示す。

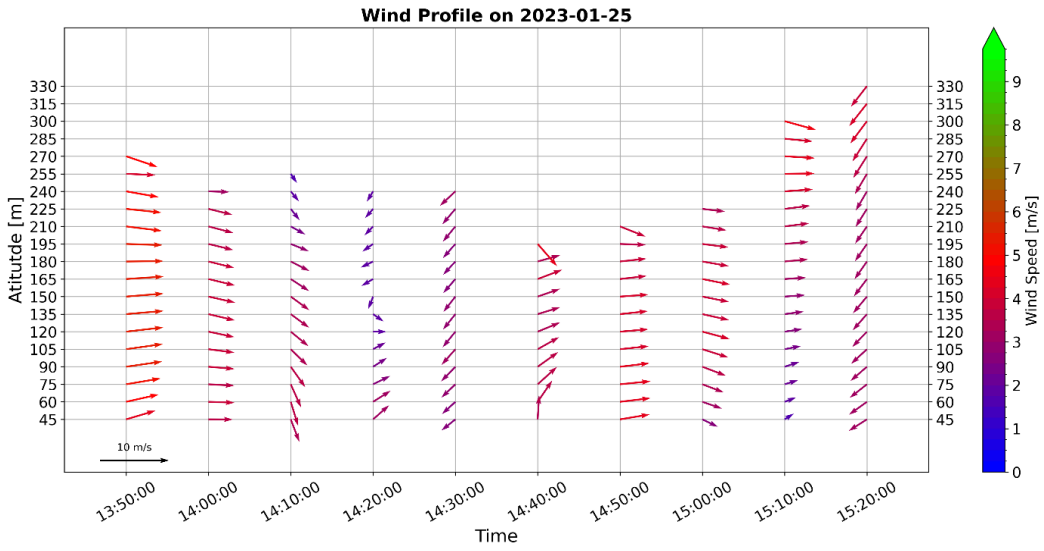


図 76　ドップラーライダーによる観測結果（有村地点、 2023 年 1 月 25 日）。

ドローン観測の鉛直プロファイルは、上昇時及び下降時について高度 30 m 毎にその上下 15 m の観測値を平均して算出した。対象とした要素は、平均風速、平均風向及び乱流強度である。乱流強度は風速の標準偏差を平均風速で除したものである。ドローンの風速値については旋回風のバイアス値を+0.5 m/s として補正を行った。ドップラーライダーについてはドローンが指定高度を通過した時刻を中心とした前後 30 秒間の平均風速、平均風向及び乱流強度を算出した。

ドローン上昇時における平均風速の鉛直プロファイルの比較結果を図 77 及び図 78 に示す。同様に乱流強度の比較結果を図 79 及び図 80 に示す。平均風速の場合、ドローンとドップラーライダーの変化傾向が概ね一致したが、Run64b のように大きく異なるケースもみられた。上昇速度別にみると 2m/s の一致度が最も良好であったが、上昇速度と一致度に一定の関連性はみられなかった。乱流強度の場合、両者の傾向が一致するケースは半数程度で、風速の弱い 1 月 26 日午後のケース（Run64 以降の 8 ケース）では傾向の違いが顕著であった。平均風向については、ドローンとドップラーライダーの傾向はよく一致していた。

次に、ドローン上昇時の平均風速及び乱流強度のドローン観測値とドップラーライダー観測値の散布図を図 81 に示す。比較のため 2021 年に実施したホバリング観測時の結果も加えた。同様にドローン下降時の散布図を図 82 に示す。平均風速については、下降時の方が上昇時に比べて一致度が高かったが、ホバリング時に比べる

と一致度は大きく劣っていた。乱流強度については、上昇時、下降時とも大きな違いはなく一致度はかなり低いものとなった。

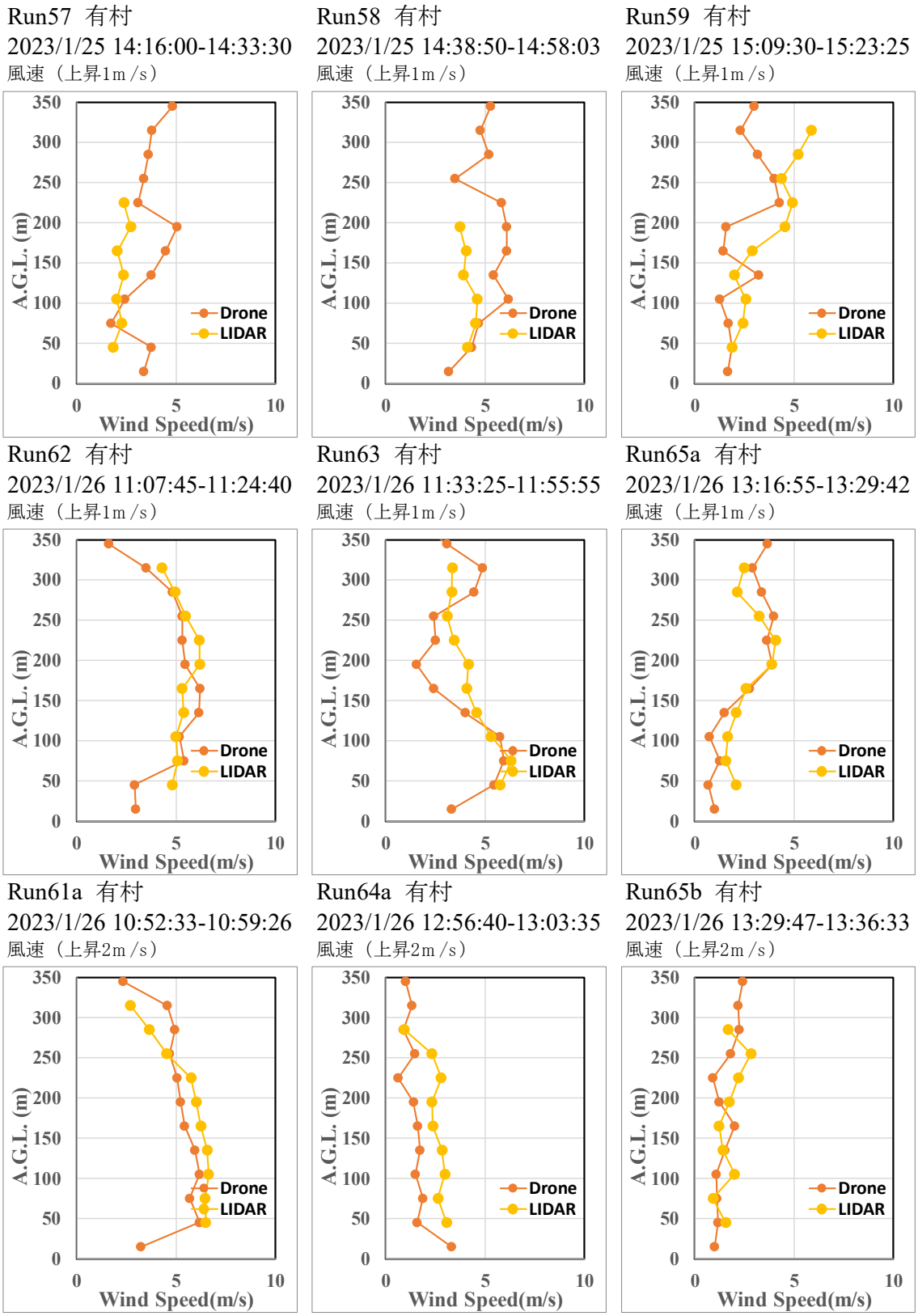
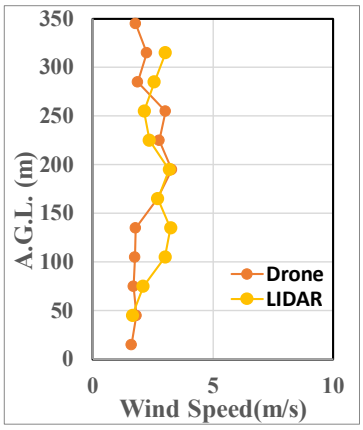
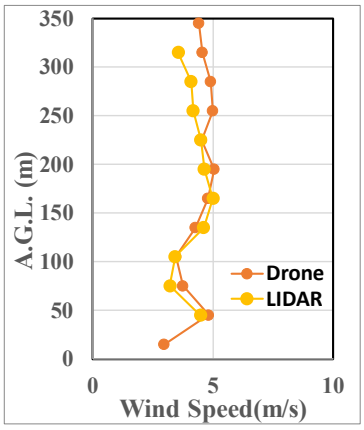


図 77　ドローンとドップラーライダーの平均風速の鉛直プロファイルの比較（上昇時）。上段～中段：上昇速度 1m/s、下段：上昇速度 2m/s。

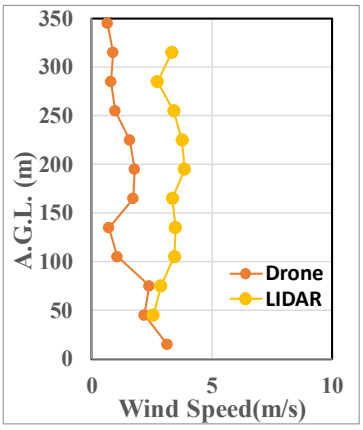
Run66a 有村
2023/1/26 13:40:10-13:46:55
風速（上昇2m/s）



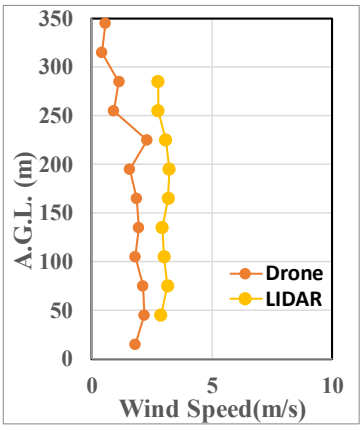
Run61b 有村
2023/1/26 10:59:31-11:04:23
風速（上昇3m/s）



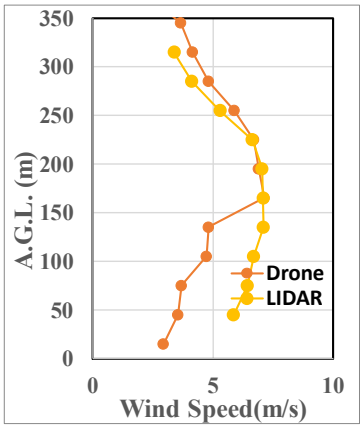
Run64b 有村
2023/1/26 13:03:20-13:38:10
風速（上昇3m/s）



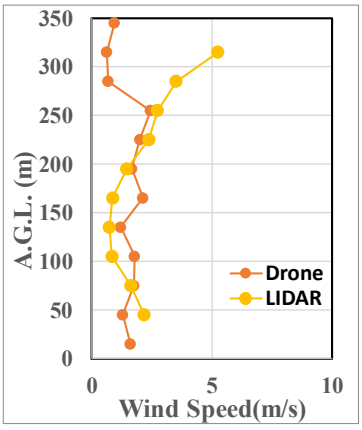
Run66b 有村
2023/1/26 13:46:47-13:51:20
風速（上昇3m/s）



Run60 有村
2023/1/26 10:34:40-10:44:40
風速（上昇4m/s）



Run64c 有村
2023/1/26 13:07:57-13:12:20
風速（上昇4m/s）



Run66c 有村
2023/1/26 13:51:11-13:55:30
風速（上昇4m/s）

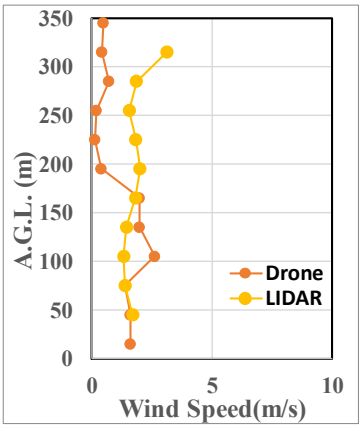
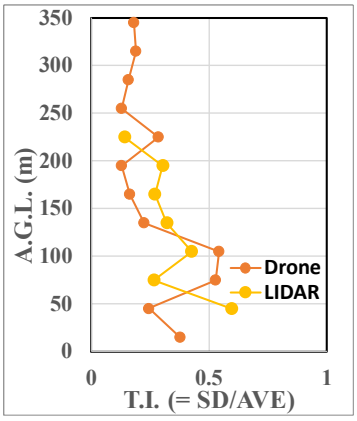
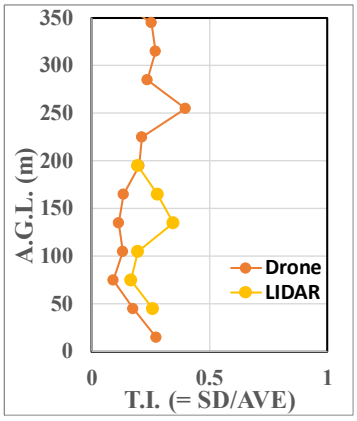


図 78　ドローンとドップラーライダーの平均風速の鉛直プロファイルの比較（上昇時）。上段：上昇速度 2m/s のケース、中段：上昇速度 3m/s、下段：上昇速度 4m/s。

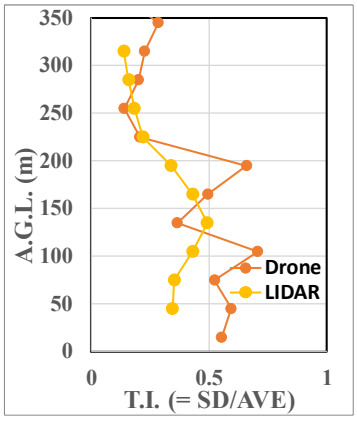
Run57 有村
2023/1/25 14:16:00-14:33:30
乱流強度（上昇1m/s）



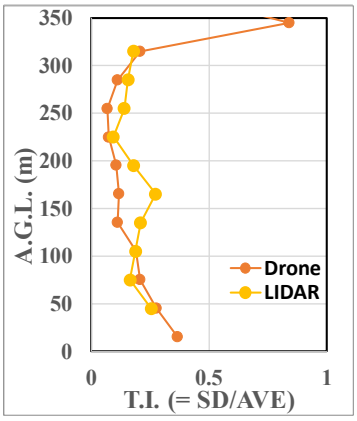
Run58 有村
2023/1/25 14:38:50-14:58:03
乱流強度（上昇1m/s）



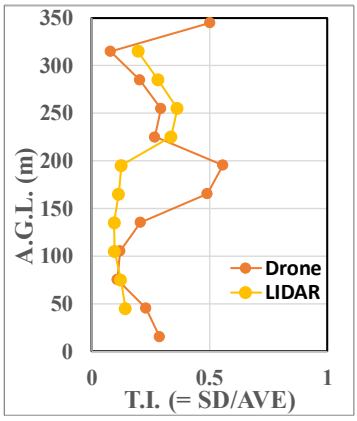
Run59 有村
2023/1/25 15:09:30-15:23:25
乱流強度（上昇1m/s）



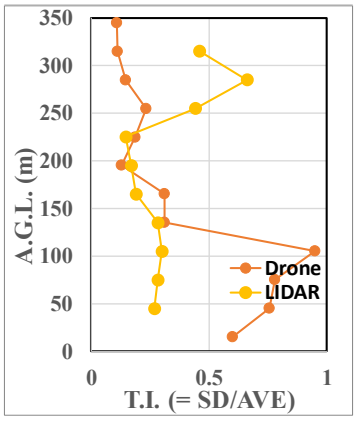
Run62 有村
2023/1/26 11:07:45-11:24:40
乱流強度（上昇1m/s）



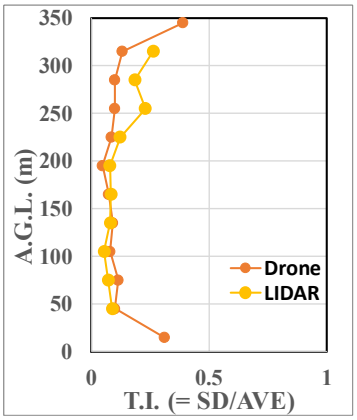
Run63 有村
2023/1/26 11:33:25-11:55:55
乱流強度（上昇1m/s）



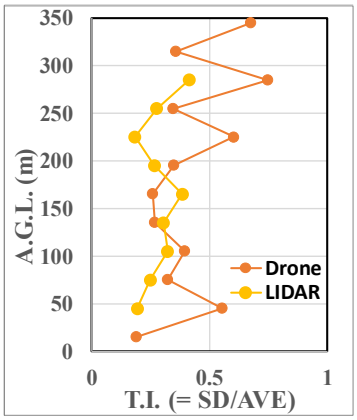
Run65a 有村
2023/1/26 13:16:55-13:29:42
乱流強度（上昇1m/s）



Run61a 有村
2023/1/26 10:52:33-10:59:26
乱流強度（上昇2m/s）



Run64a 有村
2023/1/26 12:56:40-13:03:35
乱流強度（上昇2m/s）



Run65b 有村
2023/1/26 13:29:47-13:36:33
乱流強度（上昇2m/s）

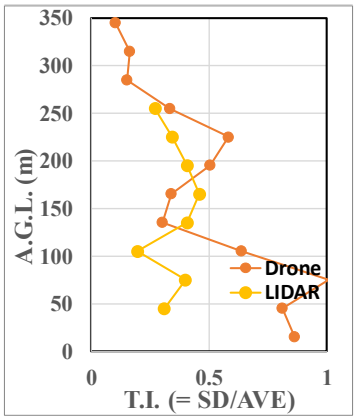
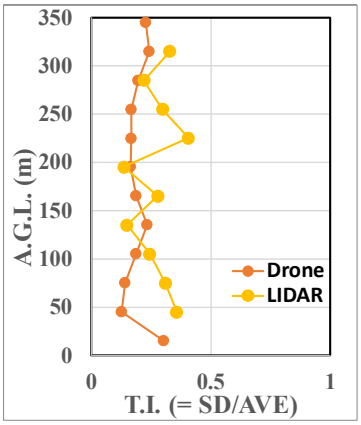
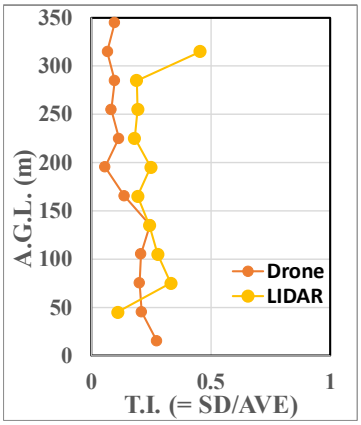


図 79　ドローンとドップラーライダーの乱流強度の鉛直プロファイルの比較（上昇時）。上段～中段：上昇速度 1m/s、下段：上昇速度 2m/s。

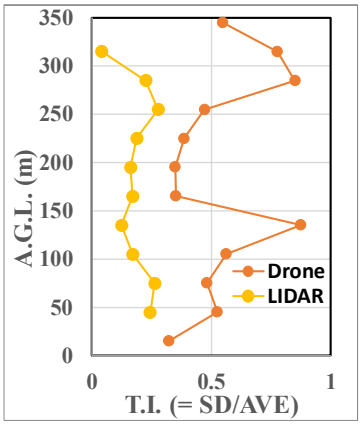
Run66a 有村
2023/1/26 13:40:10-13:46:55
乱流強度（上昇2m/s）



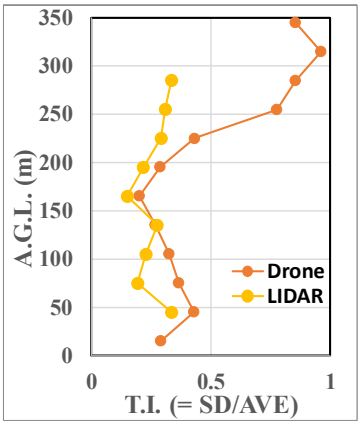
Run61b 有村
2023/1/26 10:59:31-11:04:23
乱流強度（上昇3m/s）



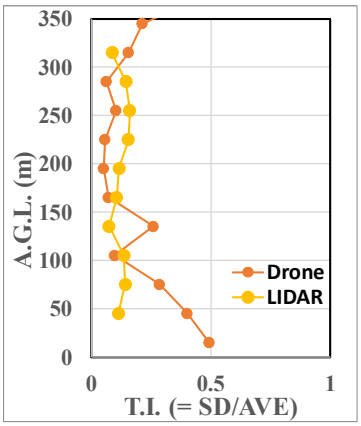
Run64b 有村
2023/1/26 13:03:20-13:38:10
乱流強度（上昇3m/s）



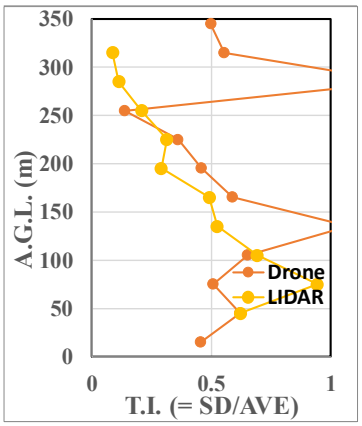
Run66b 有村
2023/1/26 13:46:47-13:51:20
乱流強度（上昇3m/s）



Run60 有村
2023/1/26 10:34:40-10:44:40
乱流強度（上昇4m/s）



Run64c 有村
2023/1/26 13:07:57-13:12:20
乱流強度（上昇4m/s）



Run66c 有村
2023/1/26 13:51:11-13:55:30
乱流強度（上昇4m/s）

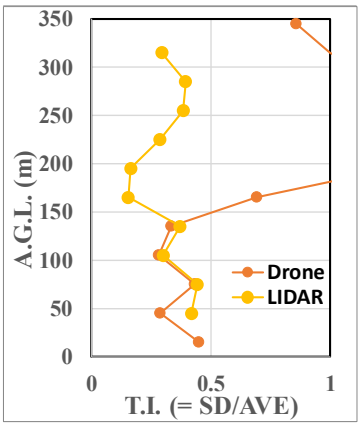


図 80　ドローンとドップラーライダーの乱流強度の鉛直プロファイルの比較（上昇時）。上段：上昇速度 2m/s のケース、中段：上昇速度 3m/s、下段：上昇速度 4m/s。

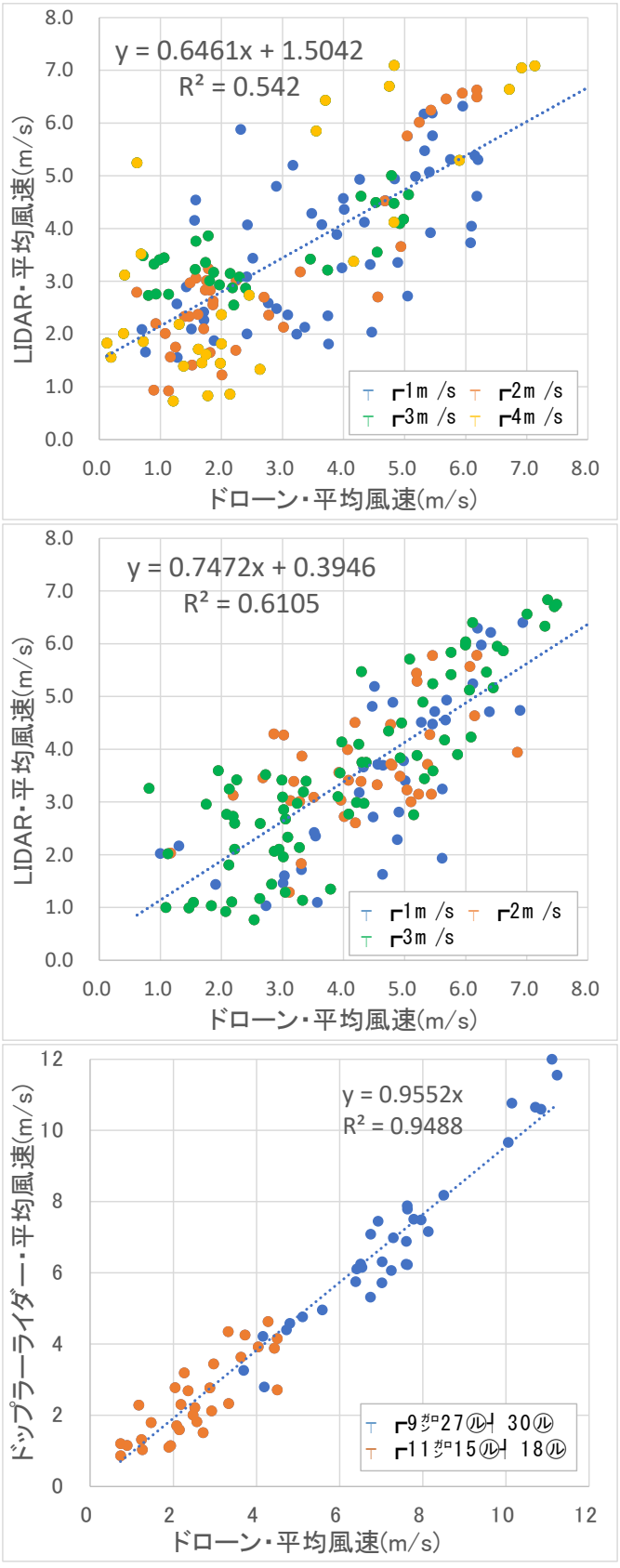


図81　ドローンとドップラーライダーの平均風速の比較。上段：上昇時の観測、中段：下降時の観測、下段：2021年のホバリング時の観測。

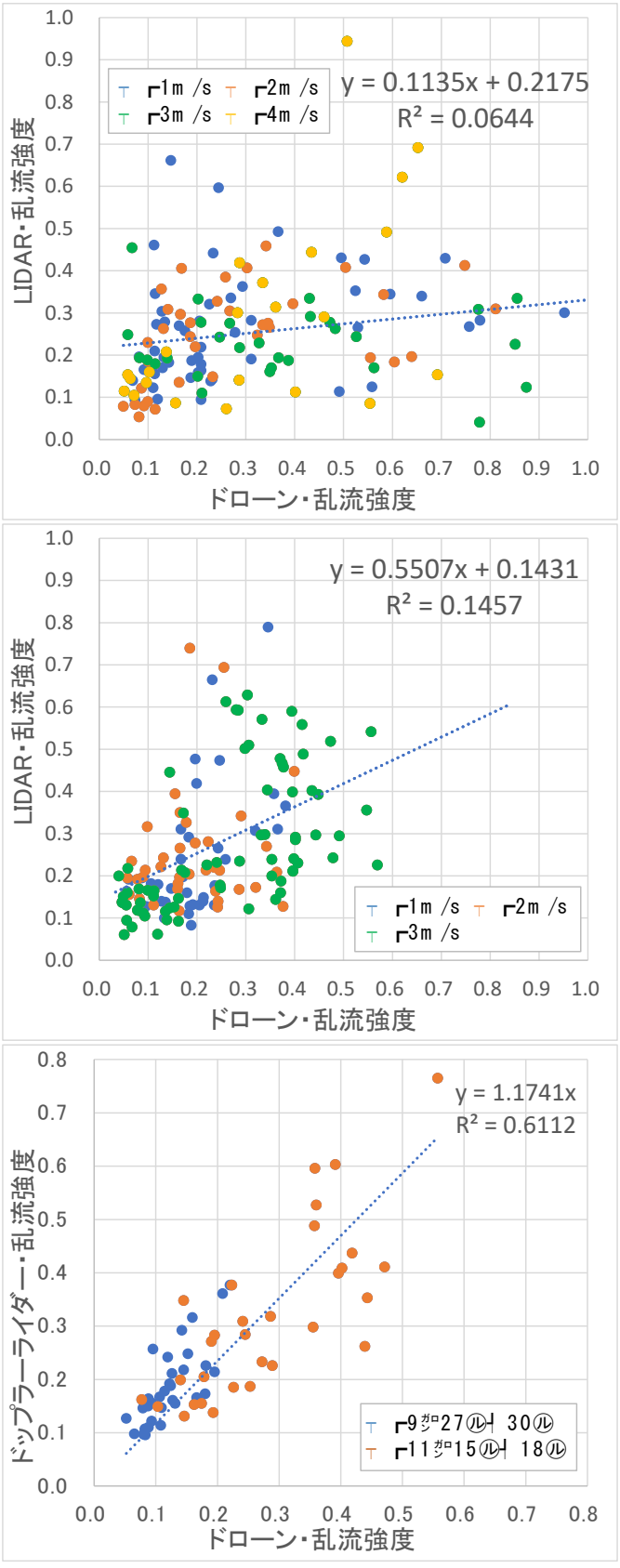


図 82　ドローンとドップラーライダーの乱流強度の比較。上段：上昇時の観測、中段：下降時の観測、下段：2021 年のホバリング時の観測。

e）まとめ

ドローン観測により火山ガス濃度、火山灰濃度の鉛直プロファイルの時間変化を捉えることができた。上昇時及び下降時のドローン観測では、平均風速、平均風向は概ねドップラーライダーと一致したが、乱流強度は両者の傾向が一致するケースは半数程度であった。今後は噴火時の火山ガス濃度、火山灰濃度の観測データの蓄積及び今回とは異なる気象条件での観測による乱流強度観測の精度評価を進める必要があると考えられる。

2) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーション

ここでは、メソスケール気象現象をターゲットとした数値気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF)モデルを用いて、桜島火山および周辺の地形を高解像度で精緻に表現することで、地形の微細構造に起因した火山近傍の詳細な風速場や気象場を数値シミュレーションにより明らかにすることを目的としている。さらに、鹿児島市など都市部での火山灰の拡散や降灰を定量的に評価するため、市街地の詳細な建物や構造物の分布を考慮して、都市における火山灰輸送の数値シミュレーションの試行を実施した。

a) 桜島の微地形ならびに市街地の地形

これまで、WRF モデルを使った高分解能シミュレーションにより、降灰の再現性について検討し、解像度依存性を明らかにしてきた。また、火山灰拡散および降灰の予測実験を行い、定量的な予測に要する解像度について調査した。さらに、高分解能シミュレーションにおいて、桜島および周辺地形の複雑さを精緻に再現した上（図 83）で、地形周りの風速場の再現性によって、異なる粒径の火山灰の降下パターンがどのように影響を受けるのかを調べた。図 83 を見ると、桜島および周辺地域の地形には、現業気象予報モデルの解像度（5 km ないし 2 km）では表現しきれないような微細な構造があることが分かる。

次に、WRF モデルによる高分解能シミュレーション結果から、鹿児島市の都市部など市街地スケールまでダウンスケールして、市街地内での気流や乱流、火山灰の拡散・降下を再現可能とする数値シミュレーション技術を開発する。市街地での気流・拡散の数値シミュレーションを実施するためには、実際の市街地の地形や建物の情報が必要となる。ここでは、国際航業による高解像度地理情報データ PAREA-LiDAR を利用することとした。このデータは、航空レーザー計測により都市における高密度・高精度の 3 次元空間情報を含む。今年度は、図 84 に示す鹿児島市内の地理情報データを整備した。

図 85 には、鹿児島市の市街地の中心地域における地表面高度および建物高度の分布を示す。ここで建物高度は、地表面高度と建物そのものの高さを足したものを示している。建物には人工構造物一般を含み、建物がない場所は地表面高度そのものを示す。

令和 4 年度のおいては、計算流体力学モデルに図 85 で示されるような実在都市の空間情報を取り込み、市街地での気流・拡散の数値シミュレーションの試行を進めた。市街地の建物分布といった幾何学的な構造を定量的に示すため、様々な幾何学パラメータを用いた。図 86 に、都市の幾何学パラメータに関する概念図を示す。これら幾何学パラメータにより、都市大気中での拡散場の特性を整理することを試みた。

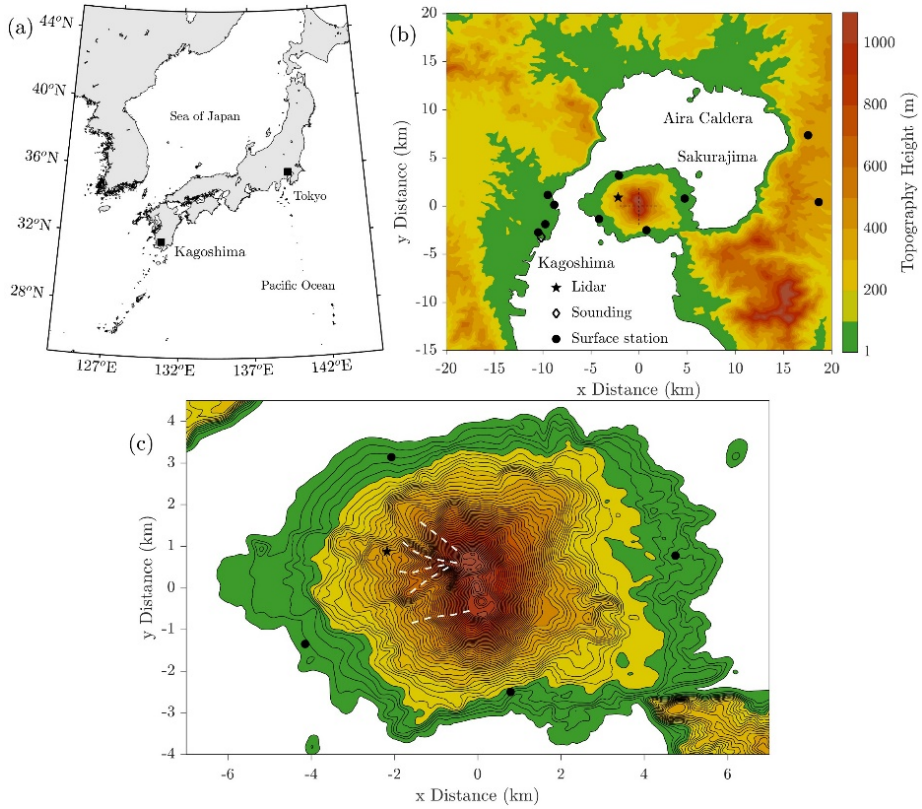


図 83　(a) 日本地図と鹿児島の位置、(b) 桜島および周辺地形、(c) 桜島の地形。

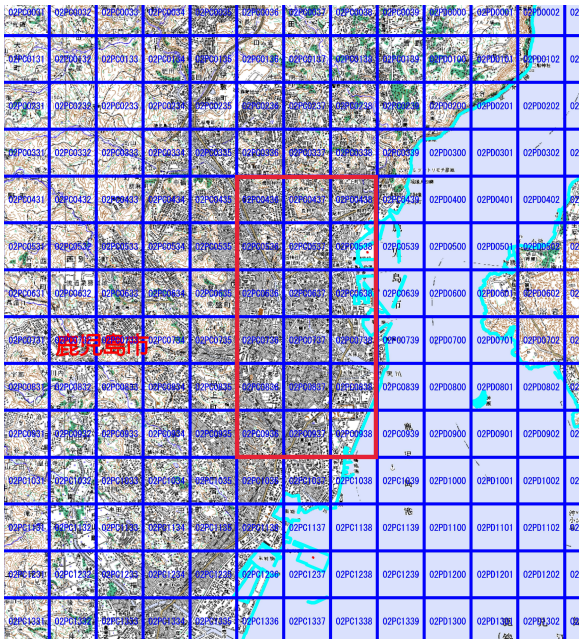


図 84　鹿児島市の地図および市街地 3 次元空間情報の取得範囲

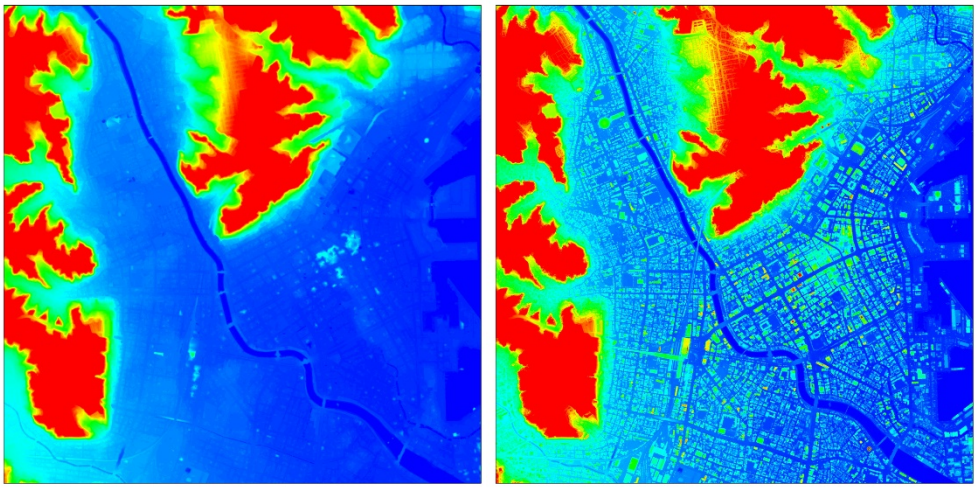


図 85　鹿児島市内における地表面高度（DEM）および地表面および建物高度（DSM）。

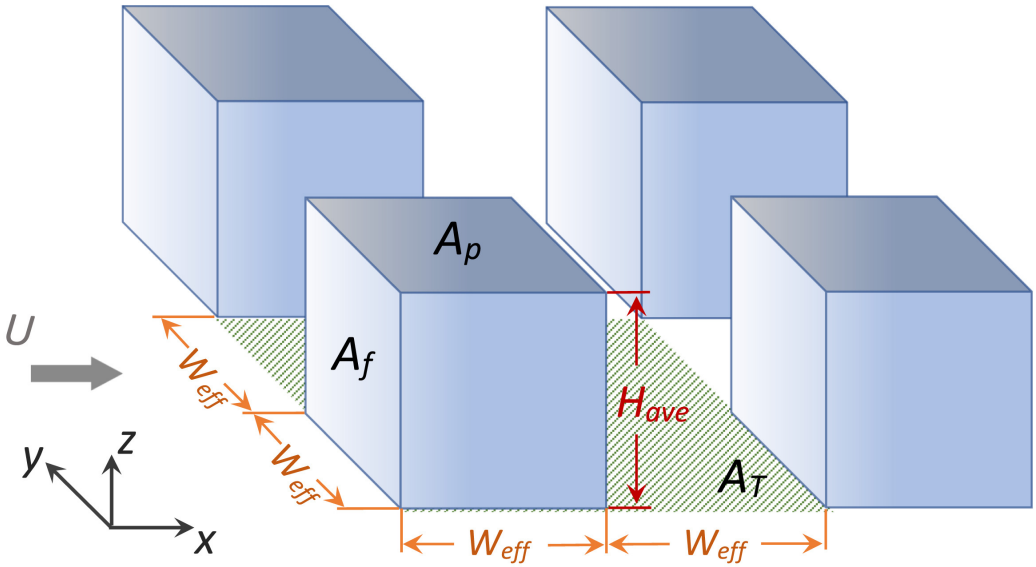


図 86　都市の幾何学パラメータを算出するための空間スケールの概念図。

b）解析結果

本研究では、数値流体力学モデル PALM（Maronga et al. 2020）を用いた。実在都市では、建物の立地パターンは立地密度、また建物の高さは、不規則に分布しており、それに応じた気流場や拡散場は複雑に決まる。特に拡散場は、気流の少しの変化に鋭敏に応答するため、再現精度を確保することが極めて難しい。また、実在都市での実大気での拡散場の野外実験も数は少ない。そこで、数値シミュレーションモデルによる拡散場の再現精度の評価には、風洞実験との比較が有効である。

図 87 は、Pavageau and Schatzmann (1999)による拡散の風洞実験結果を検証用データとして、PALM による再現シミュレーション結果を比較したものである。ここでは、二つの粗度ブロックの間のキャビティ流れによる拡散場を対象とした。流れは、図の左から右に向かっており、キャビティ内で循環が形成される。この循環に

伴い、粗度ブロック上に流入してきた濃度がキャビティ内に侵入している様子が分かる。数値モデルにより、こういった拡散場の特徴をよく表現できている。

このような風洞実験結果による数値モデルの検証に基づき、建物の立地密度や高さが異なるような市街地を想定した拡散場の数値シミュレーションを行った。ある単位面積に対する風上側に面した建物の側面の総面積の割合（λ_f、建物見付面積率）という幾何学パラメータにより、拡散場の違いを整理した。図 88 は、異なる建物見付面積率λ_fの場合において、解析対象領域で平均した濃度の時間推移を示している。λ_fが大きくなるほど、同じ時刻における濃度が高くなっており、また時間経過とともに濃度が減少する割合は小さくなっている。すなわち、建物が密集していたり、高い建物が多数立地していたりするような街区においては、高濃度の状態が長期間にわたって維持され、濃度が散逸しにくいことを示している。このように、市街地内での濃度の拡散は、当該街区の幾何学的特徴に強く依存していることが示唆される。

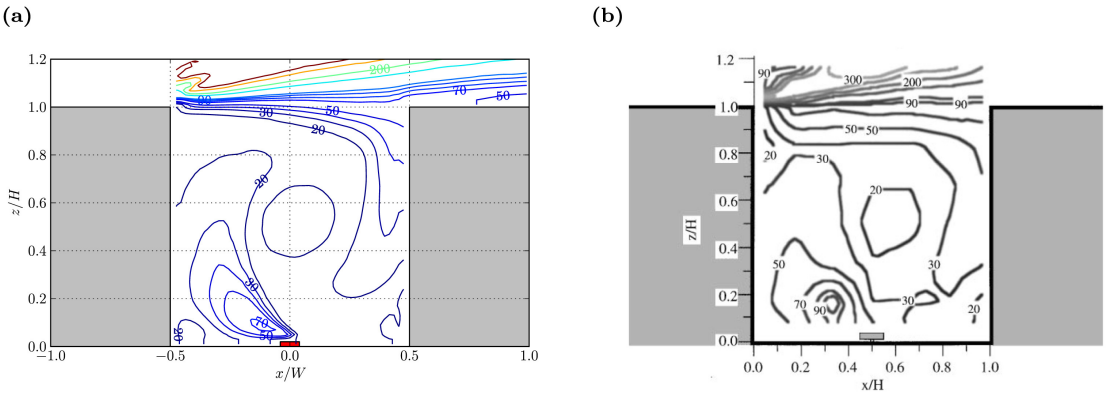


図 87　(a) PALM による拡散シミュレーション結果、および (b) Pavageau and Schatzmann (1999)による風洞実験装置による拡散実験結果。

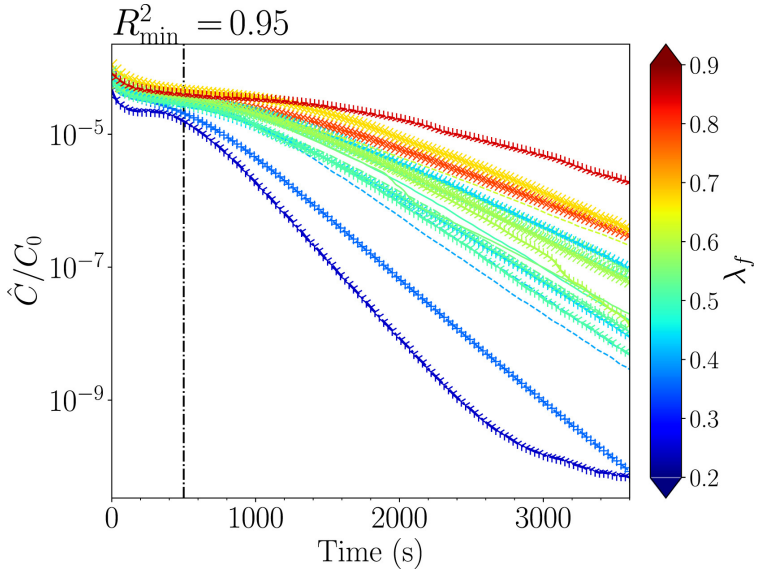


図 88　異なるλ_fに対する領域平均した濃度の時間変化。

c）まとめ

令和 4 年度においては、細密な 3 次元空間データを数値流体力学モデルに取り込み、実在都市を想定して拡散場の数値シミュレーションを実施した。市街地の拡散場は、都市の幾何学的性状に強く依存することを数値モデルにより量的に示すことができた。

今後は、高解像度での気象モデルによる数値シミュレーションの出力データを数値流体力学モデルの入力条件として与えることで、現実的な気象場の下での市街地における火山灰の拡散・降下を予測可能なモデル開発を進める。

3) ラージエディシミュレーションによる火山周囲の気流性状

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

a) 計算手法の開発

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

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

構築した計算手法の概要を表 10 にまとめる。

表10　開発した計算手法の概要

＊RIAM-COMPACT数値モデル 1）を改変
・数値計算手法：有限)差分法
・乱流モデル：Large-Eddy Simulation(LES)
・流れの支配方程式：フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式と，ブシネスク近似に基づいたナビエ・ストークス方程式、および、エネルギー方程式(温度方程式)
・計算アルゴリズム：部分段階法 2)に準じる
・時間進行法：オイラー陽解法
・圧力に関するポアッソン方程式：SOR法
・空間項の離散化：2次精度中心差分、ただし、対流項：補間法3)に基づいた3次精度風上差分。3次精度風上差分の数値拡散項の重みは河村-桑原スキームタイプ 4)の $\alpha=3.0$ に対して $\alpha=0.5$
・LESのSGSモデル：渦粘性近似モデル 5)

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

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

b）噴煙・噴石の移流拡散モデルの組み込み

令和 3 年度に開発した計算手法では、噴煙中の固体物である火山灰の飛散を、流速場と共に移流・拡散するとした計算が可能となっているが、気流とは異なる速度で移動する礫や、大きな噴石の運動は組み込まれていなかった。そこで、本年度は、気流や形状の影響を受けて変化する火山レキの空力特性を取り込み、火山噴火に噴出する噴石の飛散運動を、①気流によって運ばれ、気流と同じ速度で運動する火山灰などの非常に細かな粒子、②風に流されて飛散するが、気流とは異なる速度で運動するレキ、③弾道軌道で飛散運動を行う大きな噴石に至るまで、シームレスに移流・拡散運動ができるモデルを開発した。これにより、噴煙・噴石の移流・拡散・飛散により気流が受ける力を気流の運動方程式中に取り込むことができ、噴煙による気流の見かけ上の密度増加による沈降、レキや噴石による気流の連行などの再現計算が可能となる。さらに、噴煙の拡散を計算する際の拡散係数の予測を経験則に基づく方法で行っていたが、噴煙によって、気流に空間的な温度変化がある場合の適用に限界があったので、本年度は、サブグリッドスケールの乱流エネルギーも計算に取り込むことにより、計算された流れ場自身から自動的に拡散係数を算定する方法に切り替えた。現在、組み込まれたモデルの精度検証用のデータを取得すべく、室内実験の準備を進めている。

4) レキによる衝撃破壊実験

台風や竜巻などによる強風災害では、外装材の破壊や剥離などに伴って発生する大小様々な飛散物が他の建築物などに衝突し、連鎖的に被害を拡大させることが数多く報告されている。また、火山噴火時の噴石による被害のうち、風に飛ばされて遠方まで飛ぶような小さな噴石、すなわち、礫の落下衝突により発生する建物の被害も、屋根ふき材や壁、窓ガラスなどの外装材の被害が広範囲で発生する。特に桜島においては 1955 年以降の南岳火口における 173 回のブルカノ式噴火によるレキの落下が山麓において確認されている。火口から 20km 離れた地点において確認されたこともあり、噴煙高度の高い時や強風時にレキが遠方に到達する傾向がある。そのうち、被害報告があったのは 86 例であり、車両、建築物、航空機の被害が多い。建築物については瓦、スレート材などの屋根材が被災することが多く、屋根の上に設置された太陽熱温水器のガラス材が破損することもあった。

飛来物により外装材の被害を受けると雨や風が侵入し、内装や家財を損ねるだけでなく、柱などの構造材の腐りの原因になる場合もある。また、ガラスの嵌った開口部は飛散物に対して最も脆弱な部分であり、開口部が破られると、割れた窓ガラスの破片による人的被害も引き起こすことがある。さらに、室内圧の上昇により屋根や他の開口部が破壊するなど、建物全体の重大な被害の引き金となることもある。このように、外装材を飛散物から守ることは建築物の飛来物による災害の防止、低減にとって重要である。

飛来物による被害を防ぐには、外装材の耐衝撃防御性能を明らかにすることが基本である。飛来物に対する耐衝撃性能評価に関して、ハリケーンを対象とした飛来物の衝突による開口部の性能基準の代表的なものとしては、American Society of Civil Engineers の ASCE 7-05 が挙げられ、耐衝撃性能に関する性能標準試験方法と性能標準仕様については American Society for Testing and Materials の ASTM E1886-04 と ASTM E1996-04 により定められている。さらに、建物開口部におけるガラスの衝撃破壊性能評価方法を定めた ISO 16932 は上述の性能基準や試験・性能評価方法を基に策定されており、ほぼ同様な仕様となっている。また、日本の JIS R 3109:2018 が ISO 16932 をもとに、台風時の強風による飛来物に対するガラスの耐衝撃性能評価試験法を定めている。本報では、ISO 規格に準じた衝撃破壊試験を行うことができるように開発された試験装置(aircannon) （丸山・他、2009）を用いて、衝撃試験を行う。

強風時には礫以外にも種々の物体が飛来するが、外装材に被害を発生させるものとして礫が最も多いと考えられる。また、火山噴火時に噴出する種々のサイズの噴石のうち、礫は遠方まで飛散して外装材に被害を与えるので、ここでは加撃体として礫を用いることとした。

飛来物の衝突による被害を考えると、外装材の鉛直部分では、ガラスが嵌っている開口部が最も弱いので、多くの窓で用いられているフロートガラスを試験対象とした。屋根については日本で多く用いられている屋根ふき材を試験体として選んだ。以下では、衝撃試験により明らかになった破壊性状について述べるとともに、耐衝撃性能について考察する。

a）試験装置

実験は図 89 に示すように、射出装置の前に置かれた試験体取り付け治具に試験体を固定して加撃体を衝突させた。低速での射出は slingshot を用いた。高速で射出する場合は、図 90 に示すように発泡ウレタンのカプセルに加撃体を入れ、ISO 規格に準じた耐衝撃試験が行える aircannon を用いて射出した。加撃体は試験体に衝突する前にカプセルから飛び出し、加撃体だけが試験体に衝突する。衝突面を高速度カメラで撮影し、衝突・破壊状況と加撃体の衝突速度を明らかにした。装置の性能については丸山・他（2009）を参照されたい。

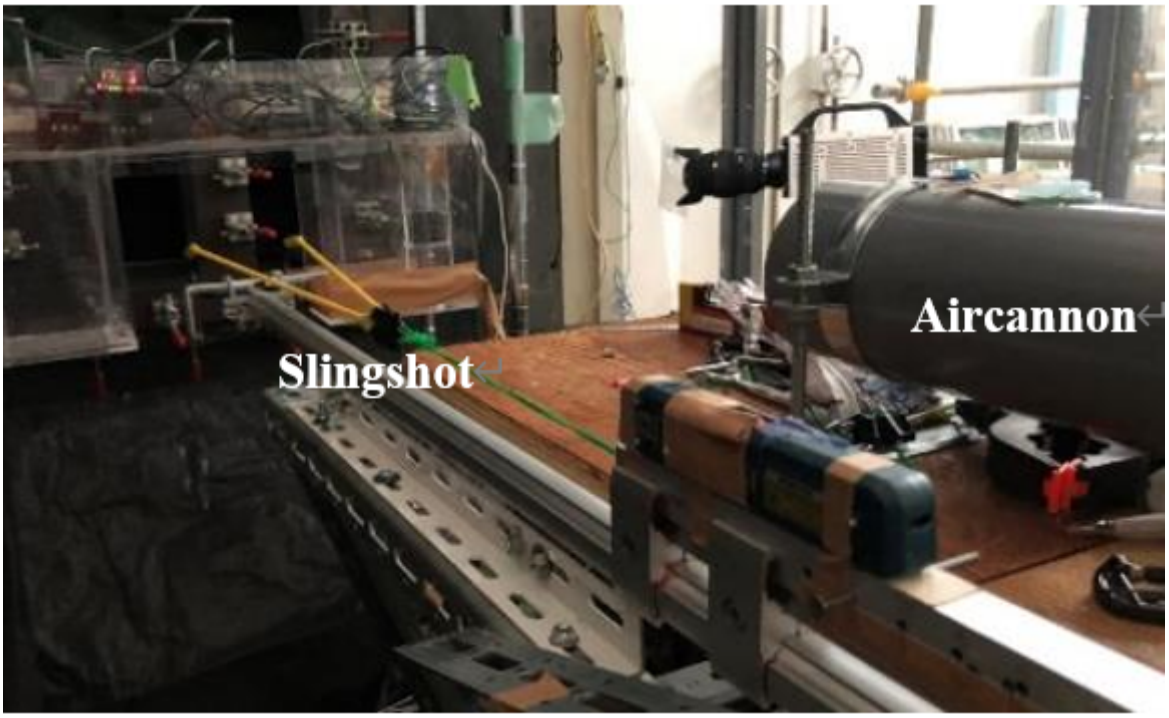


図 89　衝撃試験装置の外観。

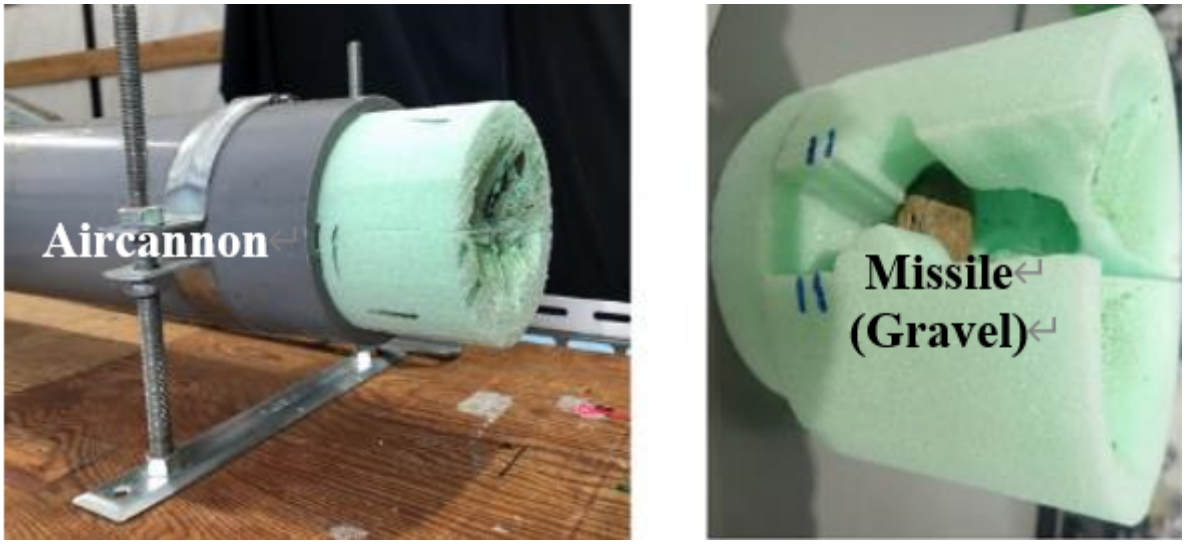


図 90　加撃体を入れたカプセル。

b) 加撃方法

質量と速度を変えて加撃体を試験体に衝突させて加撃を行った。加撃速度の増加に従って、試験体の損傷状態は、衝突位置に目視では変化が見られない状態、割れは生じていないが傷や凹みが生じた状態、割れや開口が生じた状態へと、損傷の程度が大きくなっていく。試験は低い速度から始め、速度を増しながら加撃を行い、割れや開口が生じた時点で終了することとした。ガラスおよび和瓦では加撃ごとにほぼ同じ位置に加撃したが、それら以外の試験体の加撃に関しては、衝突位置に目視では変化が見られない場合は同じ位置に、損傷が確認された場合は、それまでに行った加撃位置から 10 ㎝以上の間隔をあけて、次の加撃を行った。

c) 加撃体

加撃体に選ぶ礫には密度、硬度が異なるものが存在するが、衝突時の衝撃力が強く、破壊力が大きいものを選ぶことにする。火山噴火時の噴石では、軽石のように溶岩が空中で冷え固まったものや、火口付近に噴火前から存在した岩石の破片が飛ばされたものが飛来物となる。桜島で採集した噴石で行った事前の試験では、密度が小さく、脆い軽石は、衝突時に粉砕され、

試験体に傷をつけることはできても、割れや開口などを生じさせることはなかった。そこで、本実験では桜島で採集した安山岩の礫、平均比重 3.0、モース硬度 5.5～6.5、質量 100g 程度までの、JIS A 1204:2009 7)の分類では粗礫に相当する礫（図 91）を衝撃試験の加撃体として用いた。



図 91　加撃体として用いた礫の例。

d) 試験体

外装材を代表する試験体には、壁面の部材として耐衝撃性能が最も弱いと考えられ、開口部に多く使用されるフロートガラスを選んだ。屋根材としては和瓦、スレート瓦、カラー鋼板を選んだ。以下に各試験体の詳細を示す。

フロートガラス

フロートガラスの試験体は厚さ 5mm、面積 30×30cm^2、の″小試験体″と、大きさの影響を検証するために厚さ 5mm、面積 90×110cm^2 の″大試験体″について加撃試験を行った。小試験体は図 92a のように 24.5×24.5cm^2 の開口をもった鉄製の枠で両側からゴムを挟んで固定し、射出装置の前に垂直に設置した。小試験体の前には加

撃体が中央部に衝突するように、直径 15cm の穴をあけたアクリル板を穴の中心がガラスの中央にくるように前面に設置した。大試験体の設置（図 92b)、加撃方法は ISO 16932 に準じた。



図 92　フロートガラスの設置状況。a:小試験体、b:大試験体。

和瓦

和瓦には、図 93 のように実際の屋根に設置された状態を再現した 4 枚の瓦のうちの右上の瓦の中心に加撃体を衝突させた。ガラスの場合と同様に、瓦の中心部に加撃体が衝突するように、かわらの前方には直径 13cm の穴をあけたアクリル板を設置した。

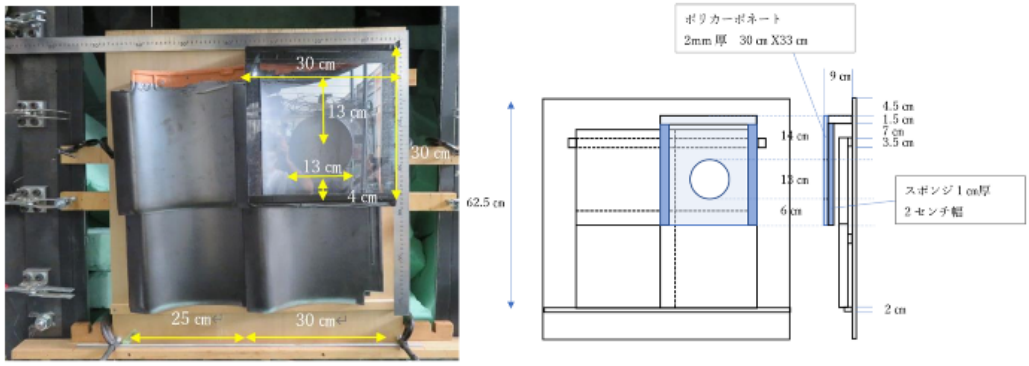


図 93　和瓦葺き設置状況。JIS　J 型 桟瓦（マルスギ和型防災 53 番、桟瓦銀黒)、下地：ラワン合板 12mm 厚。

スレート瓦

図 94 に示す通り、スレート瓦は 117×182cm^2 の範囲に実際の屋根に設置された状態を再現した。加撃位置は各瓦のほぼ中央になるように衝突させた。

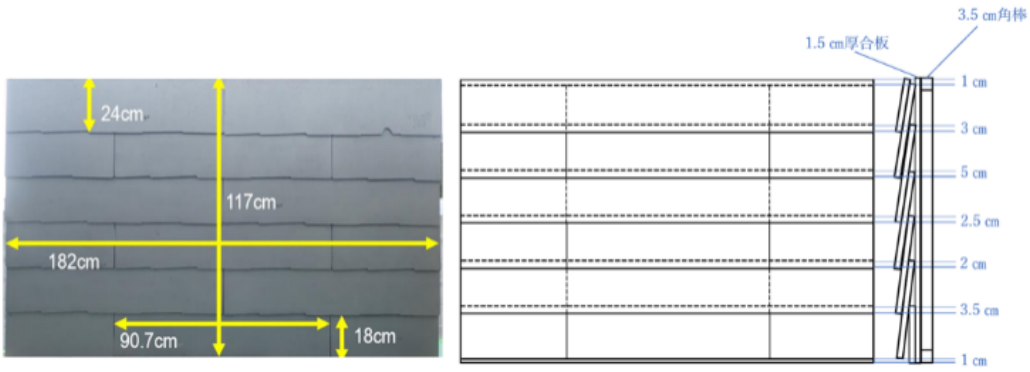


図 94　スレート瓦葺き設置状況。ケーミューコロニアル、下地：ラワン合板 12mm 厚。

薄板鋼板（瓦棒葺き）

図 95 に示す通り、カラー鋼板（瓦棒）葺きは 120×214cm^2 の範囲に実際の屋根に設置された状態を再現した。加撃は瓦棒と瓦棒の間の溝板の中心線上に衝突させた。

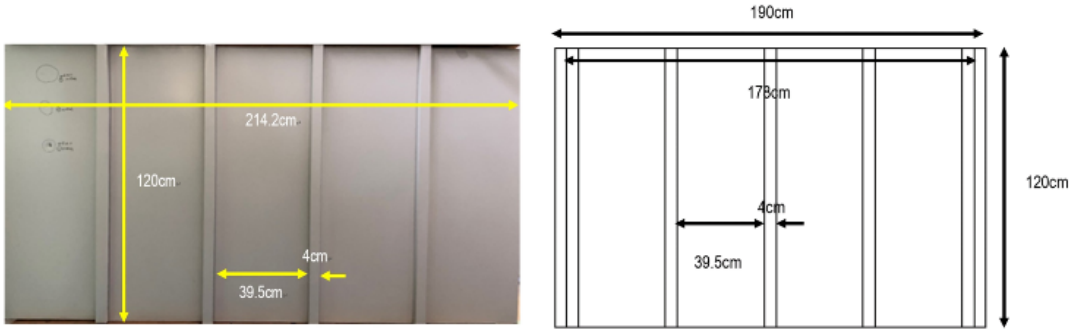


図 95　瓦棒葺き設置状況。カラー鋼板 0.4mm 厚（タテヒラ 333）、下地：ラワン合板 12mm 厚。

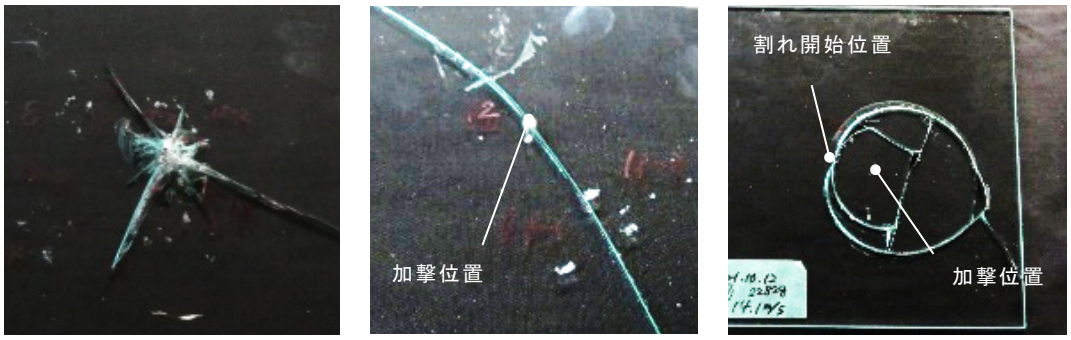
e）破壊性状

加撃体を試験体に加撃した場合、質量が小さく、また、衝突速度が低くて衝撃力が小さいうちは目視で判別できるような変化が衝突位置で見られない。しかし、衝突速度を徐々に上げ、衝撃力が大きくなるにしたがって、１．部材の裏面までは達していない傷や凹みが生じる。２．部材の裏面まで達するひび割れが生じる。３．開口ができる。４．貫通する。の順で破壊の程度が大きくなっていく。本試験では、２、３の試験体に割れや開口が生じはじめる速度を破壊速度V_cと呼ぶことにする。

試験体ごとの破壊性状の概略を以下に述べる。

フロートガラス

フロートガラスでは、図 96 に示すように衝突面の反対側に円錐状の欠損が生じるヘルツ破壊や、ひび割れが生じる曲げ破壊が見られた。ひび割れは衝突位置だけでなく、衝突位置以外の離れた位置から生じる場合もあった。その試験体において加撃が初めてでない場合、割れ始めの位置は事前の加撃位置であることがあり、その場合、前の加撃の際に付いた欠陥が亀裂の始めとなっていると考えられる。



ヘルツ破壊　　曲げ破壊　　加撃位置と異なる位置から割れる

図 96　フロートガラスの破損状況。

加撃体である礫の質量と加撃速度を変化させて試験を行ったときの破壊性状の変化を図 97 に示す。目に見える損傷が生じ始める衝突速度は、加撃体の質量の増加とともに減少する。試験体の大きさの影響に関しては、礫の質量が小さい場合は割れ以上の破壊が生じる破壊速度にガラスの面積による差はないが、質量が大きくなると、面積の大きい試験体の方が、破壊速度が若干速くなることがわかる。

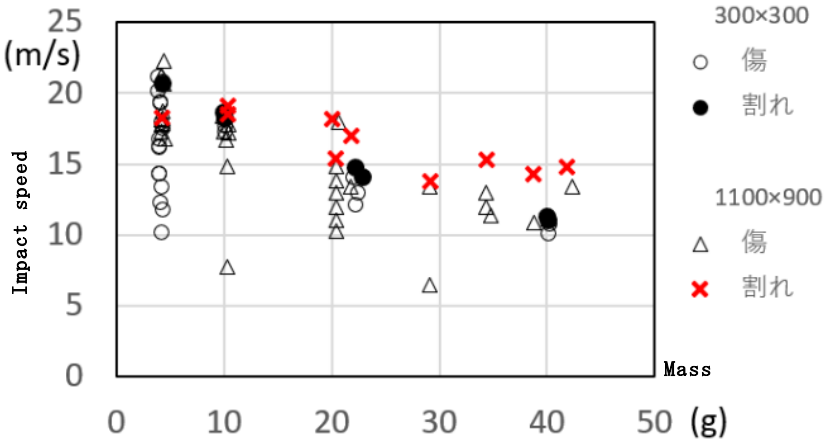
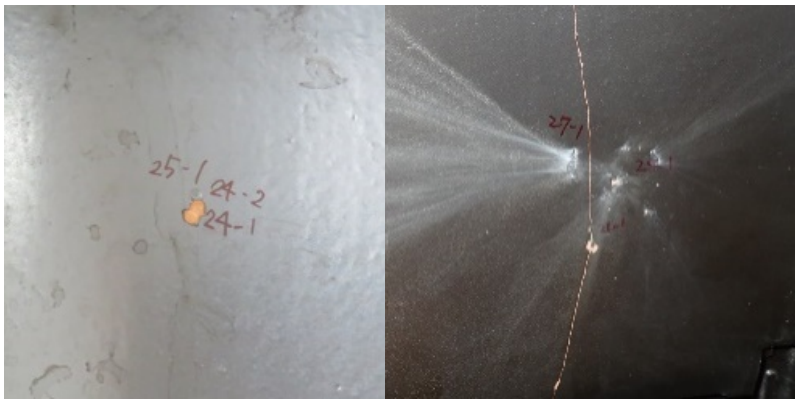


図 97　加撃体の質量と衝突速度による破壊性状の変化。（フロートガラス・厚さ 5 mm）

和瓦

和瓦の場合、衝突速度が低い場合は図 98 a のように、表面の釉薬が剥がれたり、凹みが生じた。衝突速度が速くなると、図 98 b のように割れが生じるようになる。破壊性状に関しては、図 99 に示すように質量が 10g 程度の加撃体を衝突させた場合、速度 35m/s 程度までは傷はつくが、割れを生じることはなかった。それ以上の質量においては、加撃体の質量の増加とともに破壊速度は減少した。



a．傷、凹み　　b．傷、割れ

図 98　和瓦の破損状況。

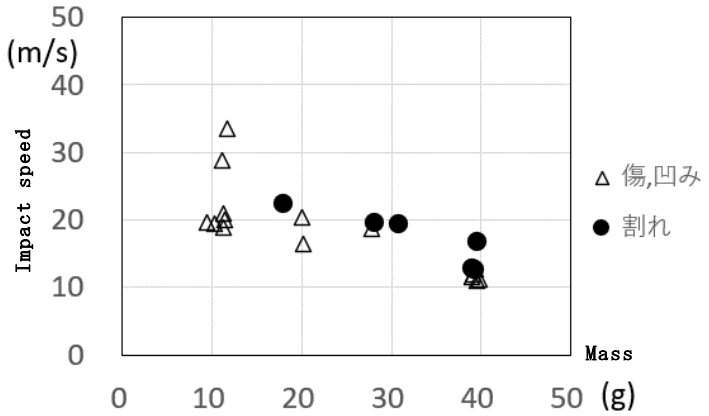


図 99　加撃体の質量と衝突速度による破壊性状の変化（和瓦）

スレート瓦

スレート瓦の場合、衝突速度が低い場合は図 100 a のうに、傷や凹みが生じ、衝突速度が速くなると、図 100 b のように割れが生じるようになる。破壊性状に関しては、図 101 に示すように質量の増加とともに破壊速度も減少した。



a．傷、凹み　　b．凹み、割れ

図 100　スレート瓦の破損状況。

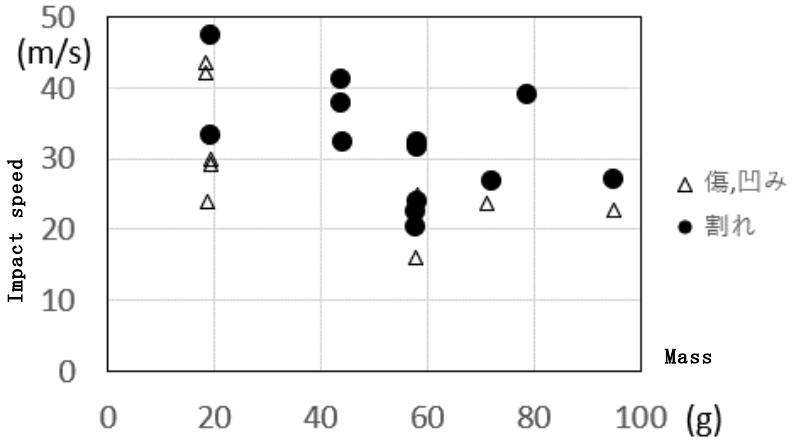


図 101　加撃体の質量と衝突速度による破壊性状の変化（スレート瓦）。

薄板鋼板（瓦棒葺き）

薄板鋼板（瓦棒）葺きの場合、衝突速度が低い場合は図 102 a のうに、傷や凹みが生じ、衝突速度が速くなると、図 102 b のように割れが生じるようになる。破壊性状に関しては、図 103 に示すように質量の増加とともに破壊速度も減少した。



a . 傷、凹み　　b . 凹み、割れ

図 102　和瓦の破損状況。

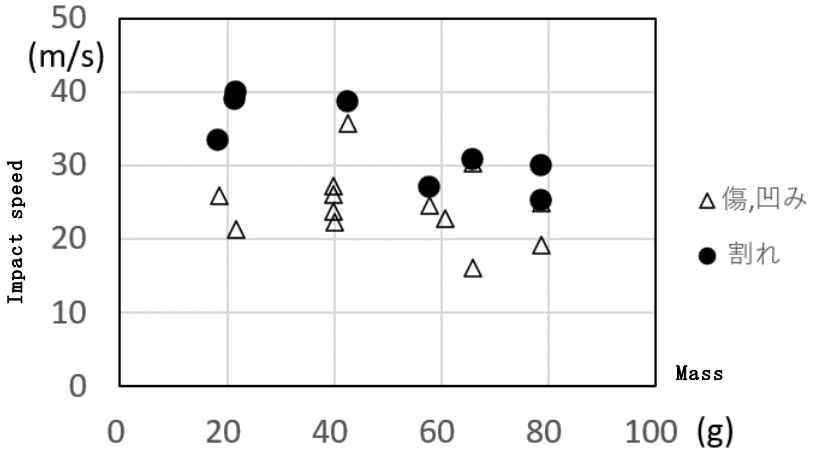


図 103　加撃体の質量と衝突速度による破壊性状の変化。薄板鋼板（瓦棒葺き）。

f）耐衝撃性能

以下では、衝撃試験により明らかになった破壊性状について述べるとともに、耐衝撃性能について考察する。

試験体を外装材としてみた場合、部材の裏面までは達していない傷や凹みが生じた状態では建物内部への被害が浸透しないと考えられる。ここでは、建物内部に達する被害リスクの判定に用いることを考え、部材の裏面まで達するひび割れ以上の損傷が生じる衝突速度の最低値を破壊速度V_Cとして評価した。各部材に対する破壊速度V_C[m/s] と礫の質量M[g] の関係を求めると図 104 のようになり、V_CとMの関係を近似する曲線を次式(4)の形で求めると表 11 の関係が得られた。

$$V_C = CM^{\alpha} \qquad (4)$$

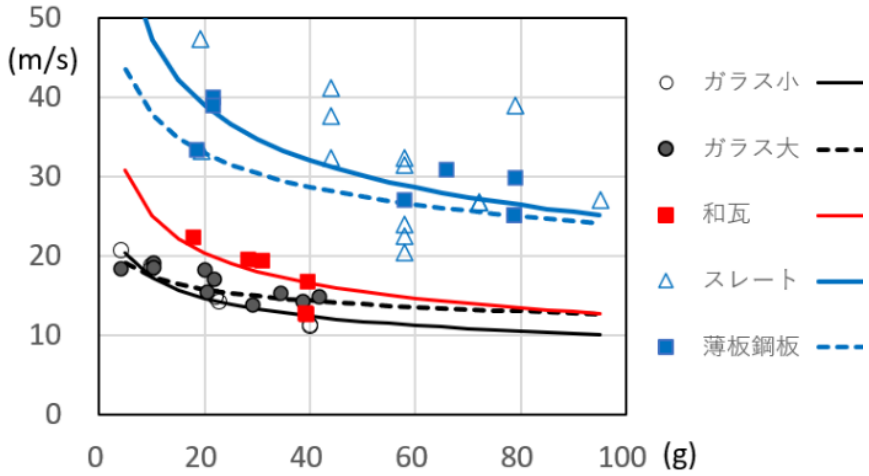


図 104　礫の質量M（g）と破壊速度V_C（m/s）の関係。

表 11　試験体のV_CとMの関係を近似する曲線の係数

Specimen	C (g)	α
Float glass (small)	30	-0.24
Float glass (large)	24	-0.14
Japanese roof tile	50	-0.30
Slate tile	90	-0.28
Thin steel plate	60	-0.20

g）まとめ

衝撃実験により、強風時や火山噴火時に飛来する礫による建物外装材の耐衝撃性能を検討した。桜島で採集された安山岩の礫を、フロートガラス、および、和瓦、スレート瓦、薄板鋼板を葺いた屋根模型に速度と質量を変化させて衝突させ、損傷・破壊性状を明らかにした。建物内部に達する被害リスクの判定に用いることを考え、各外装材の裏面まで達するひび割れ以上の損傷が生じる衝突速度の最低値を破壊速度として評価し、各部材に対する破壊速度と礫の質量の関係を求めた。

(e) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

令和 3 年度は地震及び地盤変動データから計算される噴出率、レーダー観測により得られる火口直上の反射強度、地上風速データ、ディスドロメータ観測による火山灰の粒径・落下速度毎の粒子数などを集約するオンラインシステムを開発するとともに、気象モデルの気象場を WRF により高分解能化した気象場データは随時、データベースに追加した。

令和 4 年度は、火山灰の移流拡散モデルを、オンラインシステムに蓄積される噴出率の連続データに対応できるように改良してワークステーションに実装し、試験運用を開始した。これにより、人手を介することなく火山灰拡散予測を自動的に行うことができるようになった。

1) 火山灰移流・拡散のための連続化シミュレータ

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

a) 連続化シミュレータの概要

火山灰の移流拡散の連続化シミュレーションシステムの概要を図 105 に示す。このシステムでは、移流拡散シミュレーションを一定間隔で繰り返す。そのために、噴出率の時間関数をシミュレーションの繰り返し時間間隔で離散化した値を噴出率として扱い、継続時間はシミュレーションの繰り返し時間間隔とする。個々のシミュレーションから算出される降灰量を位置毎に加算して、降灰量積算値の空間分布を求める。

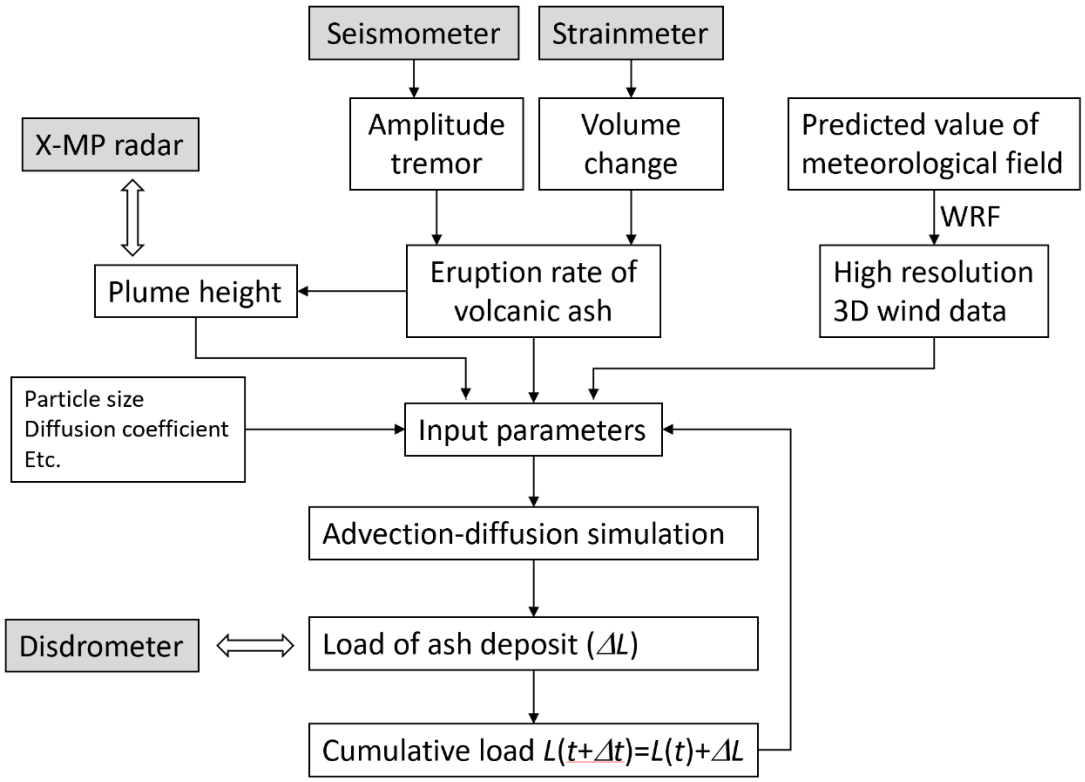


図 105　火山灰移流・拡散シミュレータの連続化のためのプロセスとデータのフロー。

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

このシミュレーションを繰り返す。シミュレーションごとに降灰量の時系列を得ることができるので、時刻ごとに対応する降灰量を足し合わせることにより、時間降灰量を求めることができる。

b) 火山灰噴出率

Iguchi(2016)は、火山性微動振幅、地盤変動から見積もられる圧力源の体積変化量および補正項の線形結合により､火山灰噴出量を経験的に見積もることを提案し、桜島の南岳火口から 50 ㎞以内の 62 観測点における降灰量から見積もられる月別火山灰放出量に適用し、(1) 式の経験式を得た。火山性微動振幅に係る計数は、有村観測坑道に設置した短周期（1Hz）地震計の信号、圧力源の体積変化量に係る計数は同坑道に設置した伸縮計の火口方向および直交方向の成分から求めた。この経験式を適用して得られた月毎の火山灰放出量を 2009 年から 2023 年 3 月までの月毎の火山灰放出量と比較したものを図 45 に示した。この比較結果は概ね、2 倍から 1/2 倍の精度で火山灰放出量を見積もることが可能であることを意味する。(1) 式は月ご

との降下火山灰量から算出した火山灰放出量と 1 か月のスペクトルおよび圧力源の体積変化量に適用されたものであるが、個々の爆発についても適用可能なことが示されている（Iguchi, 2016)。連続化シミュレータでは、(1) 式を 1 分毎の 2～3Hz 帯域のスペクトルと圧力源の体積変化量に適用し、1 分毎の火山灰放出量として、連続的に算出した。地震動については、桜島島外において発生する構造性地震や火山構造性地震は火山灰放出に寄与しないので、これらの地震を検知した場合は、(1) 式においてα=0 とした。また、圧力源の体積変化（V）が火山灰放出に関与を表すβVの項については、V を火口方向のひずみと直交方向のひずみの比から求めているため、噴火発生時刻を起点として、両者の比が-2～0 の間に入る時間帯のみについて算出している。

c) 噴煙高度

噴煙頂は雲によって見えないことも多く、また、噴煙頂高度の自動把握には多くの問題があるため、噴煙高度を火山灰噴出率から推定した。2009 年 2 月～2023 年 3 月に発生した噴火について、鹿児島地方気象台の遠望観測に基づいた噴煙高度と重量噴出率の関係を図 52 に示したが、重量噴出率からみて噴煙高度には上限があることが分かった。上限式は以下の様に記述できる。

$$H = 400W^{1/4} \qquad (3)'$$

(3)’式は重量噴出率から推定される噴煙高度の最大値を与えるものであり、連続化シミュレータが降灰ハザード予測システムとして機能するためには、(3)’式は妥当であると考えた。

d) 風速場

連続シミュレータで使用することのできる風速場データは気象庁の提供する 5km メッシュの MSM データ（予測値）である。しかし、火山近傍の風速場は、地形の影響を強く受けることが知られているので、5 km メッシュのデータでは不十分である。そこで、領域気象モデル WRF Version 4 (Skamarock et al., 2019)を用いて気象モデルから得られる風速場を高精細化する必要がある。高精細化された風速場では風下側において下降流が卓越し、風速が 50%増加することを示されている（Poulidis et al., 2017)。そこで、火山灰移流拡散の連続シミュレーションにおいても WRF により高精細化された気象場を用いる。

WRF モデルの計算領域を図 106 のように設定した。一番外側の領域を Domain 1 とし、内側に Domain 2 をネストさせて領域設定した。Domain 1 と 2 の水平格子幅は、それぞれ 2500 m および 500 m とし、これらの計算領域での乱流混合のパラメタリゼーションには境界層スキームを用いた。また、鉛直方向には、格子間隔を下層ほど細かくし、上層ほど粗くするような伸縮型の鉛直レベルを設定した。WRF による領域シミュレーションで必要とされる気象場の初期条件・境界条件は、ヨーロッパ中期気象予報センター（ECMWF）の解析値 ERA5 を用いた。

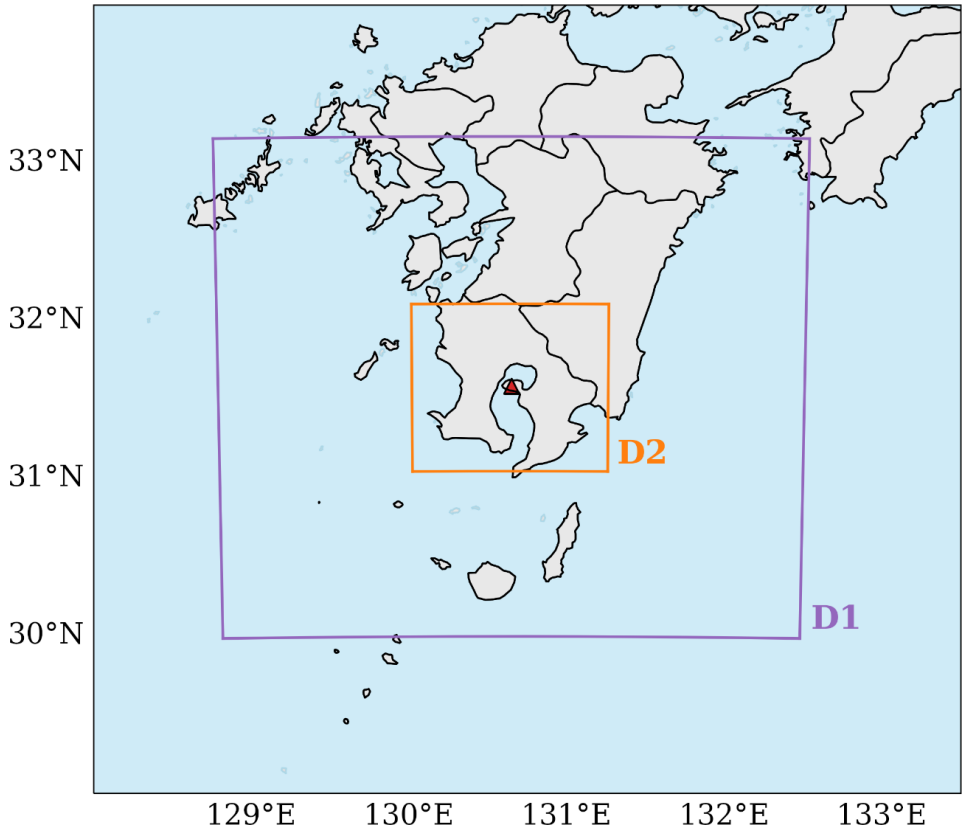


図 106　WRF モデルの計算領域。

一方、WRF を用いた高分解能の風速場の計算には時間を要するため、WRF を用いた風速場の高精細化を噴出率や噴煙高度の推定のようにリアルタイムで行うことができない。そこで、過去の気象モデルに遡って WRF による高精細化を行い、リアルタイムで提供される 5 kmメッシュの風速場と類似した過去の風速場とそれに対応する高精細化風速場を抽出し、連続化シミュレーションを行った。現状の風速場に類似した過去の風速場の抽出方法は令和 3 年度の報告書に記述した。2018 年と 2019 年の風速場について WRF による高精細化を行った。風速場の分解能は 100m である。

e) シミュレーション設定

シミュレーションエンジンには FALL3D 8.1.1 (Folch et al., 2020) を用いた。使用したワークステーションの仕様を表 13 に示す。

表 13　ワークステーションの仕様

CPU	Intel Xeon E-2378 CPU 2.6GHz (16Core)
メモリ	64GB
ストレージ	SATA 1.9TB x 8 Raid6構成(7+1hotspare)
ネットワーク	内蔵ギガビット　NICx2 PCIe拡張ギガピット NICx4 OS
OS	AlmaLinux 8.6

シミュレーションの繰り返し間隔は 6 分とし、個々のシミュレーションは 6 時間後まで計算を行うこととした。

計算領域は広域と狭域の 2 種類を同時に計算するものとした（表 14)。計算領域とグリッド間隔はパラメータにより設定できる。広域の計算領域は、南岳火口を中心とする東西および南北方向に 36 km×36km の正方形、狭域の計算領域は 18 km×18km の正方形とした。グリッド間隔は 0.6 km とした。また、鉛直方向については広域の場合、10 km まで計算することとし、狭域は 5 km である。鉛直方向グリッド間間隔は、広域 0.2 km、狭域 0.1 km とした。

表 14　計算領域とグリッド間隔

	広域	狭域
南北方向計算領域サイズ	36 km	18 km
東西方向計算領域サイズ	36 km	18 km
鉛直方向計算領域サイズ	10 km	5 km
南北方向グリッド間隔	0.6 km	0.3 km
東西方向グリッド間隔	0.6 km	0.3 km
鉛直方向グリッド間隔	0.2 km	0.1 km

f）連続化シミュレータの表示

連続化シミュレータの設定画面を図 107 に示す。計算領域は広域と狭域の 2 種類内から選択できる。また、降灰量を計算するための積算時間（最大 30 日)、表示間隔（最大 2 時間)、表示パネル数（最大 9）を選択できる。



図 107　連続化シミュレータの表示画面。

画面上には「降灰予測」と「降灰比較」の 2 つのメニューがある。降灰予測は設定画面で選択した間隔ごとの降灰量を示すものである。画面の例を図 108 に示す。また、ディスドロメータによって観測される粒径、落下速度毎の粒子数から降灰量を求めることができるので（Takishita et al., 2022)、連続化シミュレータによる予測降灰量とディスドロメータ観測から見積もられる降灰量の比較することもできる。表示の例を図 109 に示す。

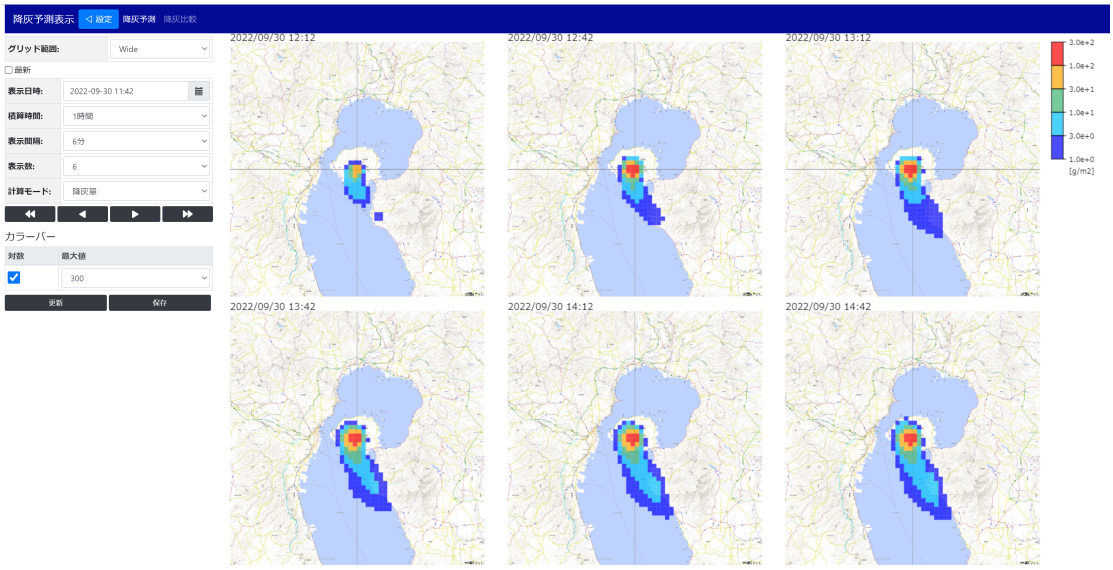


図 108　連続化シミュレータの表示画面。

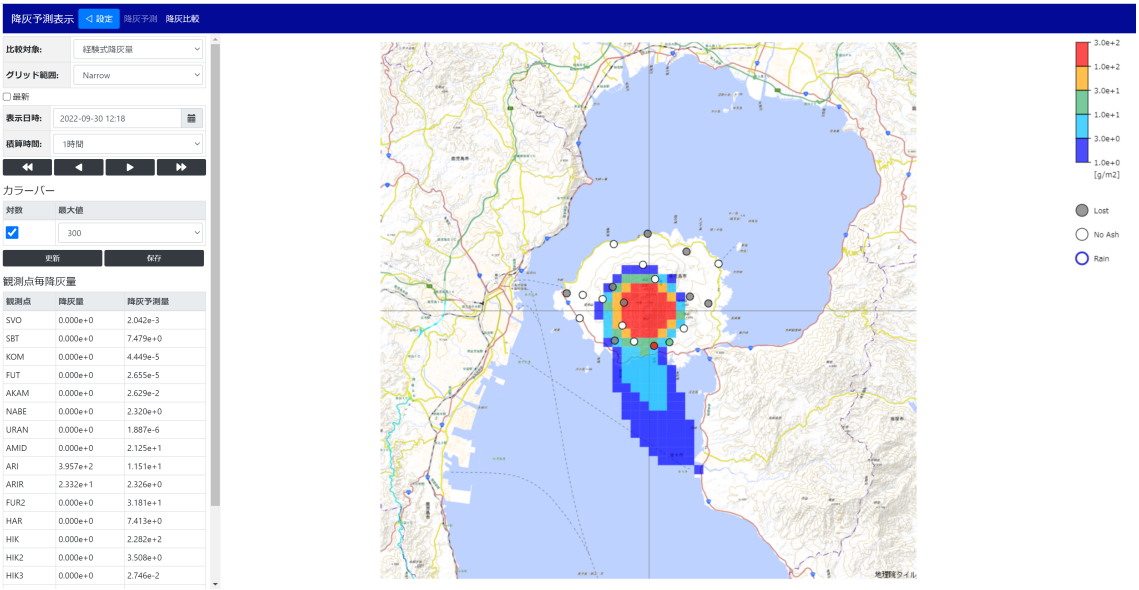


図 109　連続化シミュレータによる予測降灰量とディスドロメータ観測から見積もられる降灰量の比較。比較は指定時間の 1 時間後には可能となる。

2) 噴出率の時系列

(1) 式を用いて求めた 1 分毎の火山灰噴出率を図 110 に示した。対象とした期間は噴火活動が南岳に回帰した 2017 年 11 月以降、2023 年 3 月までである。最も、噴出率が大きかったのは、2017 年 11 月 13 日 22:07 に開始した爆発で、22:08 に 18 千トン/分に達した。2018 年 6 月 16 日 7:19 の爆発では噴出率が 16 千トン/分、7:20 でも 14 千トン/分を維持した。2018 年 11 月 14 日 0:42 の爆発でも噴出率が 14 千トン/分であった。2019 年では 9 月以降、2020 年 6 月まで噴出率が高い状態が続いた。これは、噴火活動が活発であったことを反映している。特に、2019 年 11 月上旬は噴出率が高く、噴出率が 16 千トン/分に達した 11 月 6 日 23:01 の爆発を含め、4 回、噴出率が 10 千トン/分を超えた。これらの爆発では、噴煙高度が 4000m 以上に達しており（鹿児島地方気象台の観測では 2017 年 11 月 13 日 22:07 の爆発は雲入りとなっているが、レーダ観測から 4200m 程度と判定できる)、噴出率と噴煙高度は密接な関係があることがわかる。噴煙高度が 5500m に達した 11 月 8 日 17:24 の爆発でも噴出率は 6 千トン/分と多い。

噴火活動が活発な状態は、2020 年 6 月まで続いたが、それ以降、噴出率は小さく、概ね 5 千トン/分未満である。特に、2020 年 6 月中旬から同年 11 月、2021 年 5 月中旬から 2022 年 6 月中旬までは、ごくわずからイベントを除いて噴出率が 0 に近く、桜島としては、極めて噴火活動が静穏な状態であった。2022 年 6 月下旬から噴出率が 5 千トン/分に達するイベントが時々現れるようになってきたが、2020 年 6 月以前と比較すると噴出率は小さい。

図 110 を対数表示したのが、図 111 であり、爆発的なやや規模の大きい噴火に比べて噴出率が低いものの、連続的もしくは頻繁に噴出イベントがあったことがわかる。噴出率千トン/分程度のイベントが頻繁に発生したのが 2018 年 3 月～9 月、2019 年 9 月～2020 年 6 月であり、Episode3 および 5 に対応する。2022 年 6 月以降の Episode8 においては、2023 年 1 月～2 月の連続微動に対応して噴出率が 0.1 千トン/分程度の状態を保ったのが特徴的である。噴出率は大きくはないが、噴出量は噴出率の積分となるので、噴出量の増加が見込まれた。ただし、3) a)ii)に既述したようにこの火山性微動は火山ガス放出量の増加を反映したものであり、降灰量の増加を反映したものにならなかった。

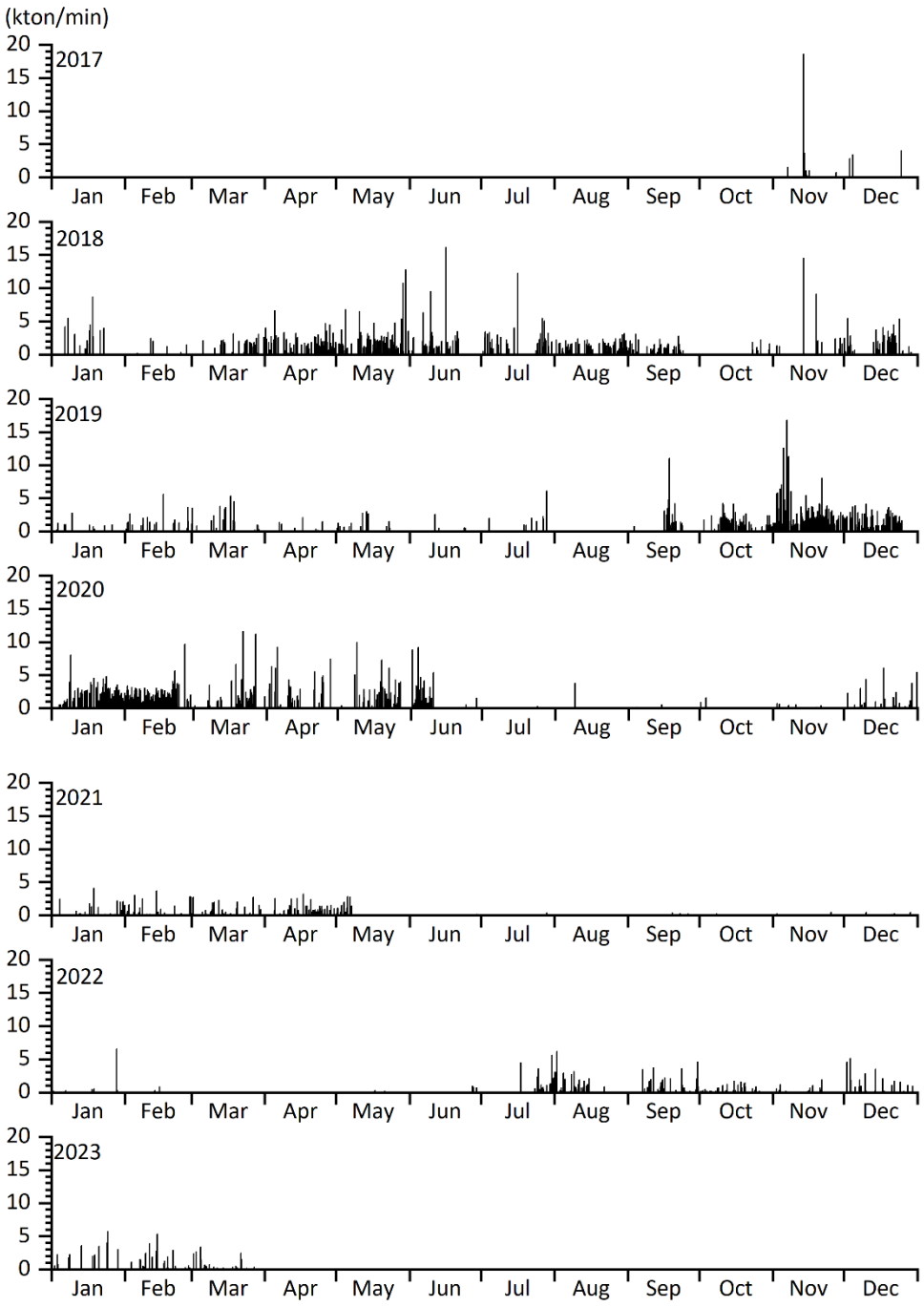


図 110　2017 年 11 月から 2023 年 3 月までの火山灰の質量噴出率の時系列。1 分毎にプロットした。

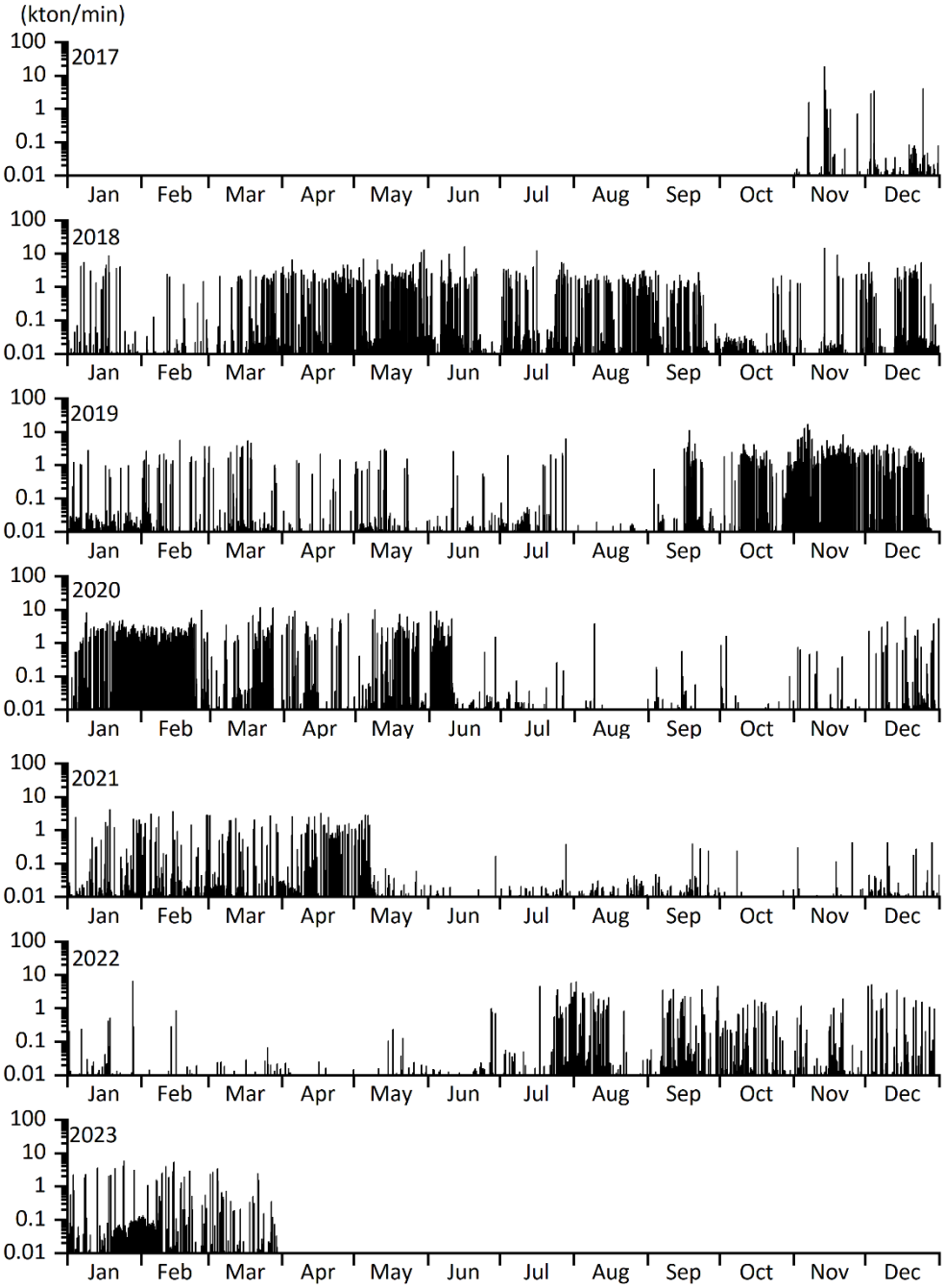


図 111　2017 年 11 月から 2023 年 3 月までの火山灰の質量噴出率の時系列。1 分毎にプロットした。対数スケールで示した。

3）連続化シミュレータの試験運用結果

連続化シミュレータを 2022 年 10 月から稼働させ、試験運用を開始した。このシミュレータは過去のデータに遡って再解析する機能もあるので、9 月以前の噴火についてもシミュレーション結果を観測降灰量と比較検討した。

a）シミュレーションとディスドロメータ観測による降灰量の比較

火山灰の移流・拡散シミュレータを連続化し、降灰シミュレーションを行った。2022 年度に発生した噴煙高度 2500m 以上の噴火（表 4）におけるシミュレーション結果を観測結果と比較して図 112 と図 113 に示す。11 回の噴火で噴火開始時刻から 1 時間の間に 10g/m^2 以上の降灰が検知されたのは 10 噴火ののべ 19 地点であったが、このうち 11 地点は降灰が予測された領域内に収まり、4 地点は降灰が予測された領域と隣接し、4 地点は離れていた。領域内の地点と隣接する領域に位置する地点を合わせた 79%の地点は、降灰の検知を見逃さずに予測することができた。一方で、降灰が予測された領域内に位置する観測点のべ 62 地点のうち、降灰を検知しなかったのは 51 地点で、降灰が予測された地点のうち 82%の地点で実際に降灰がもたらされなかった。火山灰が流れる流向はおおよそ正確だったものの、その領域は実際よりも広く予測されたことが示された。さらに、観測網の配置された島内において計算された降灰量の最大値は、いずれの噴火でも 3 倍から 30 倍程度過大評価になった。このような過大評価の原因は、3)a)で述べたように、火山性微動の振幅から換算した火山灰放出量が過大に見積もられたためだと考えられる。図 46 に示した、降灰量分布から見積もられた月間放出量に対する、地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーから見積もられた月間放出量の倍率は、図 112 に示した降灰量の計算値の観測値に対する倍率とおおよそ整合的であった。図 112 に見られた過大評価は、火山灰放出量の推定を高精度化することにより改善されると期待される。

b) 風速場の検討

噴火 i では例外的に、降灰が検知された領域と予測された領域の火口からの方角が異なった。これは風速場の予測手法に原因があると考えられる。現在は計算対象時刻の 6 から 9 時間前の風速場データに基づいて、風速場データの初期値から 6、9、 12 時間後（噴火開始時刻から－3～0、 0～3、 3～6 時間後）に予測された低解像度の風速場との残差が最も小さい時刻における高解像度の風速場を、2018 年から 19 年の 2 年間のデータベースから採用する方法を取っている。風が弱かったり風向が大きく変わったりした事例では、初期値からの予測が困難なことがある。噴火 i では火口から東北東から東南東の間で火山灰が最も多く降下し、10g/m^2 以上の降灰は北東から南南東の間にもたらされると予測された一方、実際に検知された地点は火口から南西から西に位置する地点だった。気象庁の鹿児島地方気象台で計測された風向は、噴火開始時刻の 6 時間前である 12 月 9 日 18 時から 1 時間毎に、西南西、西北西、南西、北東、北、北東、北北東と変化した。このように、噴火開始 6 時間前から開始時刻までに風向が大きく変化する場合には、与える風速場の精度が下がると考えられ、改善の余地がある。

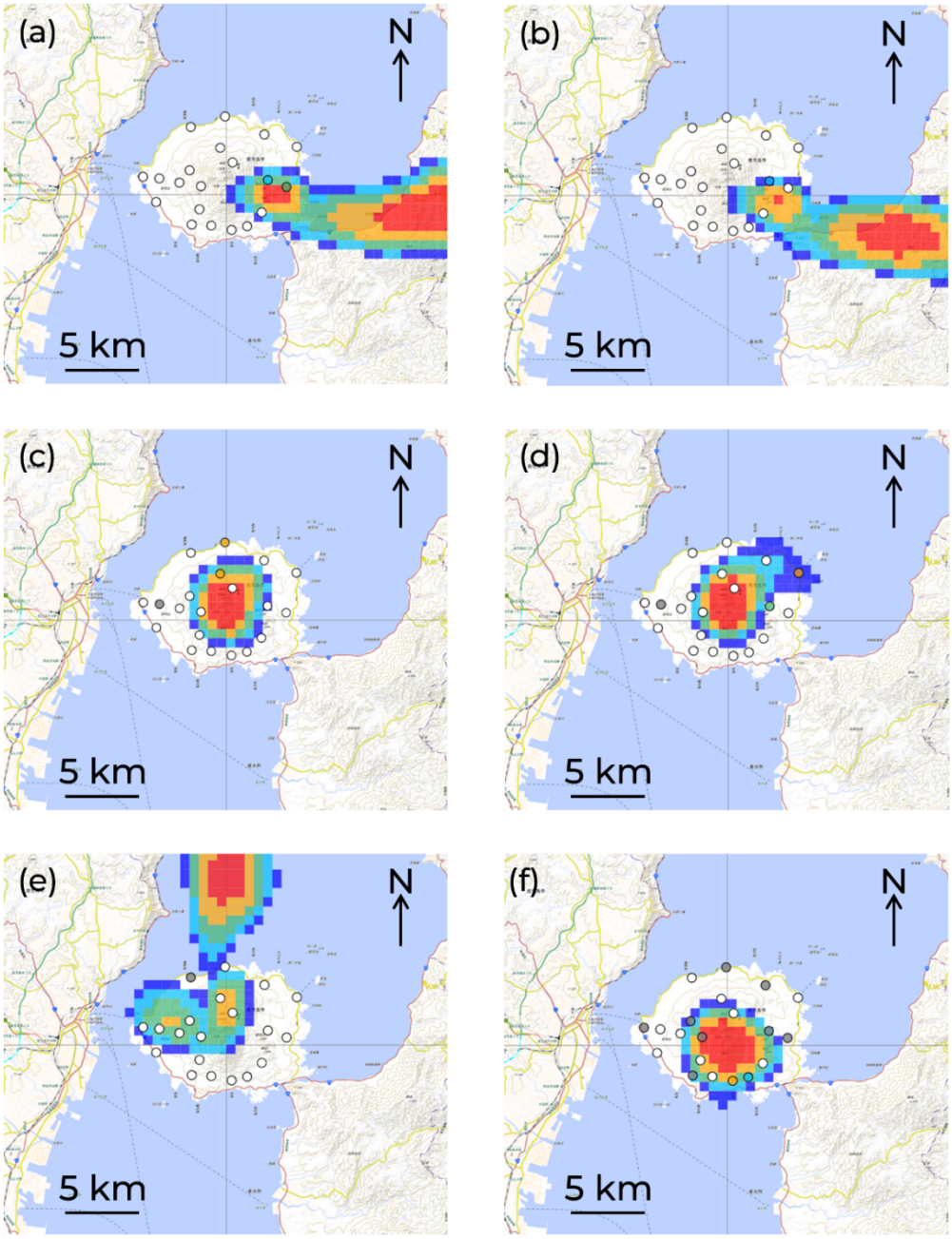


図 112 シミュレーションとディスドロメータ観測による降灰量空間分布の比較。噴火 a-f について示した。丸印の中に塗りつぶした色がディスドロメータの各観測点における観測結果を、地図上に塗りつぶされた領域がシミュレータの各グリッドにおける計算結果を表す。灰色で塗りつぶされた地点は欠測。いずれも噴火開始時刻から 1 時間の積算の結果を表す。

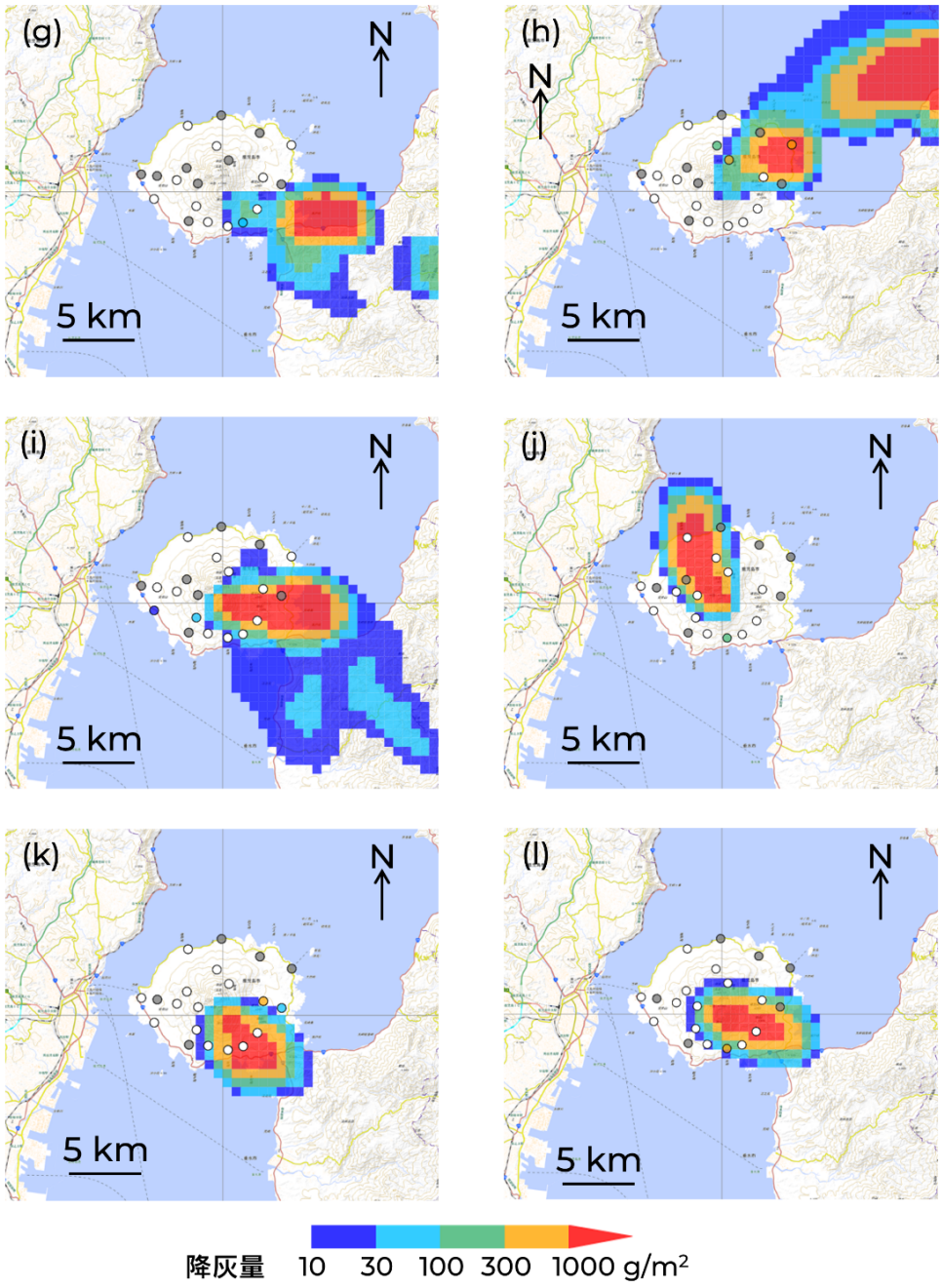


図 113　シミュレーションとディスドロメータ観測による降灰量空間分布の比較。噴火 g-1 について示した。丸印の中に塗りつぶした色がディスドロメータの各観測点における観測結果を、地図上に塗りつぶされた領域がシミュレータの各グリッドにおける計算結果を表す。灰色で塗りつぶされた地点は欠測。いずれも噴火開始時刻から 1 時間の積算の結果を表す。

(f) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

桜島で過去に発生したブルカノ式噴火にともなう地盤変動のデータベース化をおこなった。噴火に前駆する膨張の継続時間・膨張量、噴火発生時の収縮量に着目し、昭和火口、南岳火口のそれぞれについて各項目の頻度分布を明らかにした。さらに、頻度分布を最もよく近似するモデル関数を推定した。また、このデータベースにもとづいて、噴火の時刻と規模を確率的に予測する手法について検討した。

1) データベースの作成と統計的性質

a) 使用データ

対象とした噴火イベントは、2009 年 2 月～2015 年 9 月に昭和火口で発生した噴火と 2017 年 11 月~2020 年 12 月に南岳火口で発生した噴火である。このうち、気象庁及び桜島火山観測所で検知され、特定の観測点で空振が 10 Pa を超えたものを扱った。用いたデータは、有村観測坑道で記録された伸縮計 2 成分（火口方向・直交方向）である。有村観測坑道では、噴火に前駆して火口方向成分が収縮し、直交方向成分が伸張することが多い。また、噴火後にはこれが反転し、火口方向成分が伸張、直交方向成分が収縮する。これらの変動は、それぞれ浅い圧力源の膨張と収縮として解釈される（Iguchi et al., 2013)。したがって、圧力源の膨張期間（火口方向成分：収縮、直行方向成分：伸張）と収縮期間（火口方向成分：伸張、直交方向成分：伸張）を読み取った。各成分の変動量は、Iguchi et al. (2013)にならって、火口方向・直交方向の変動量比を用いて、圧力源での体積変化量に変換した。ここまでの結果を踏まえて、(1)膨張継続時間、(2)膨張体積、(3)収縮体積、(4)収縮率（=収縮体積/膨張体積）のデータセットを作成した。

b) 頻度分布とそのモデル関数

図 114 に昭和火口、図 115 に南岳火口で発生したイベントの上記４項目の頻度分布を示す。縦軸はいずれも確率密度関数に変換している。4 項目ともピークを持つ分布を示した。

各項目の分布の性質を明らかにするため、頻度分布をよく説明するモデル関数の推定をおこなった。ここでは、Log-logistic 分布、Weibull 分布、指数分布の 3 つのモデルを候補とした。これらはいずれも、繰り返し噴火の噴火間隔をモデル化する際によく用いられるものである。前者２つはブルカノ式噴火の噴火間隔のモデルとして先行研究で用いられており、特に Log-logistic 分布は桜島のブルカノ式噴火の噴火頻度や噴火間隔のモデルとして採用されている(Watt et al., 2007; Jenkins et al., 2019)。前者２つは 2 変数（μ、k）によって、後者は 1 変数（μ）によって分布の形状が決まる。したがって、各モデルについて、最尤推定でこれらのモデルパラメータを推定したのちに、AIC を用いて 3 つのうちで最適なモデルを決定した。

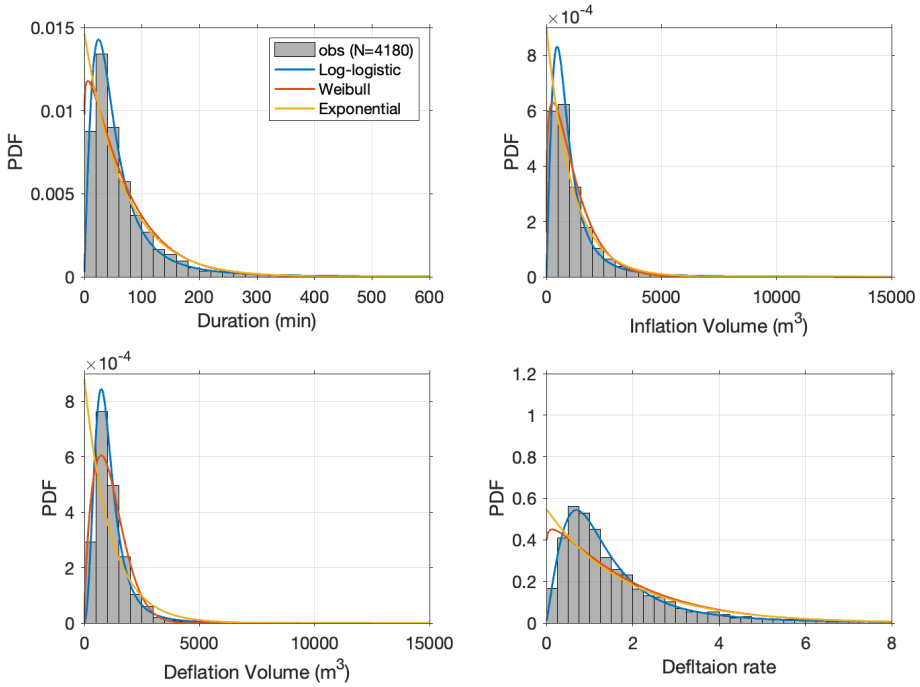


図 114　昭和火口噴火イベント（2009 年 2 月～2015 年 9 月）の頻度分布。グレーのヒストグラムが観測データ、3 色の実線で 3 つのモデル分布を示す。

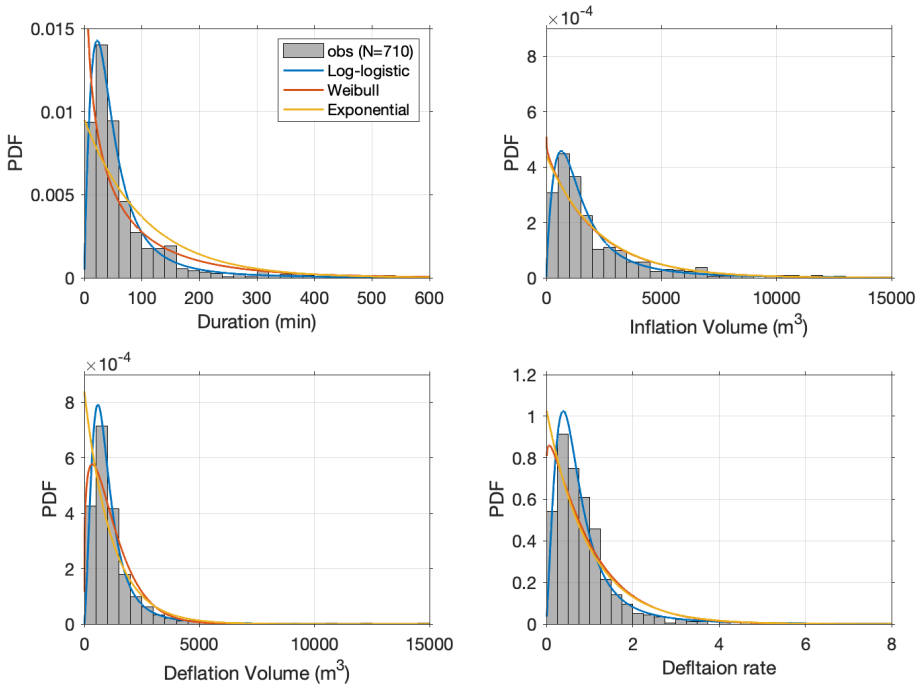


図 115　南岳噴火イベント（2017 年 11 月～2020 年 12 月）の頻度分布。凡例は図 114 に同じ。

表 15 に 3 つのモデルの最適モデルパラメータと AIC を示す。いずれの項目も Log-logistic 分布が AIC 最小となり、最適モデルとなった。各モデルの推定結果

は図 114、図 115 の頻度分布に重ねて示しているが、いずれも Log-logistic 分布がデータをよく近似していることが見てとれる。一方で、指数分布ではデータを説明できないことから、噴火にともなう膨張・収縮のサイズや時間スケールはランダムではなく、何らかの規則性を持っていることが示唆される。

c）最適モデルの時間変化

解析対象期間中の最適モデルの時間変化を調べるために、前から 100 イベントずつを用いて、1 イベントずつずらしながら最適モデルを推定した。図 116 に各時間窓の最適モデルを示す。4 項目のいずれも、ほとんどの時間窓で最適モデルが Log-logistic 分布と推定された。一部、Weibull 分布が最適モデルになる時期も存在するが、AIC の値自体は Log-logistic 分布との間に大きな差があるわけではない。つまり、この時期に噴火を駆動するメカニズム等が変化したことを意味しているとは考えづらい。したがって、基本的に全ての時期において、Log-logistic 分布が最適モデルであると見なしてよいと考えられる。

図 117 には、Log-logistic 分布のモデルパラメータ k の時間変化を示す。k は現象の規則性を示す指標であり、k が大きくなるほど分布のピークが明瞭になることを意味する。k の値は時間変化しており、噴火現象の規則性が時期によって変化していたことが示唆される。特に、k が大きくなる時期は長期的な地盤変動から示唆されるマグマ貫入期（井口・ほか, 2019; Iguchi et al., 2022）との対応がみられた。これは、深部からのマグマ供給の増加が、より規則的な繰り返し噴火を引き起こしている可能性を示している。したがって、将来的に噴火予測を実施する際には、長期的な活動推移をふまえて、使用する確率密度関数を調整することで、より現実に即した噴火予測が可能になると考えられる。

表 15　最適モデルパラメータと AIC

		Log-logistic 分布		Weibull 分布		指数分布	
		パラメータ	AIC	パラメータ	AIC	パラメータ	AIC
昭和火口	膨張時間	μ=44.8	42892	μ=70.4	43607	μ=68.1	43650
		k=1.93		k=1.08			
	膨張体積	μ=788	66323	μ=1192	66722	μ=1110	66985
		k=2.04		k=1.21			
	収縮体積	μ=955	65179	μ=1277	65613	μ=1135	67167
		k=2.85		k=1.66			
	収縮率	μ=1.20	12375	μ=1.87	13343	μ=1.82	13376
		k=2.01		k=1.07			
南岳火口	膨張時間	μ=43.9	7441.0	μ=79.3	7839.9	μ=105	8031.0
		k=1.83		k=0.76			
	膨張体積	μ=1355	12278	μ=2253	12398	μ=2272	12396
		k=1.76		k=0.98			
	収縮体積	μ=883	11279	μ=1289	11421	μ=1191	11479
		k=2.3		k=1.24			
	収縮率	μ=0.6	1170.4	μ=0.99	1372.4	μ=0.97	1375.2
		k=2.08		k=1.06			

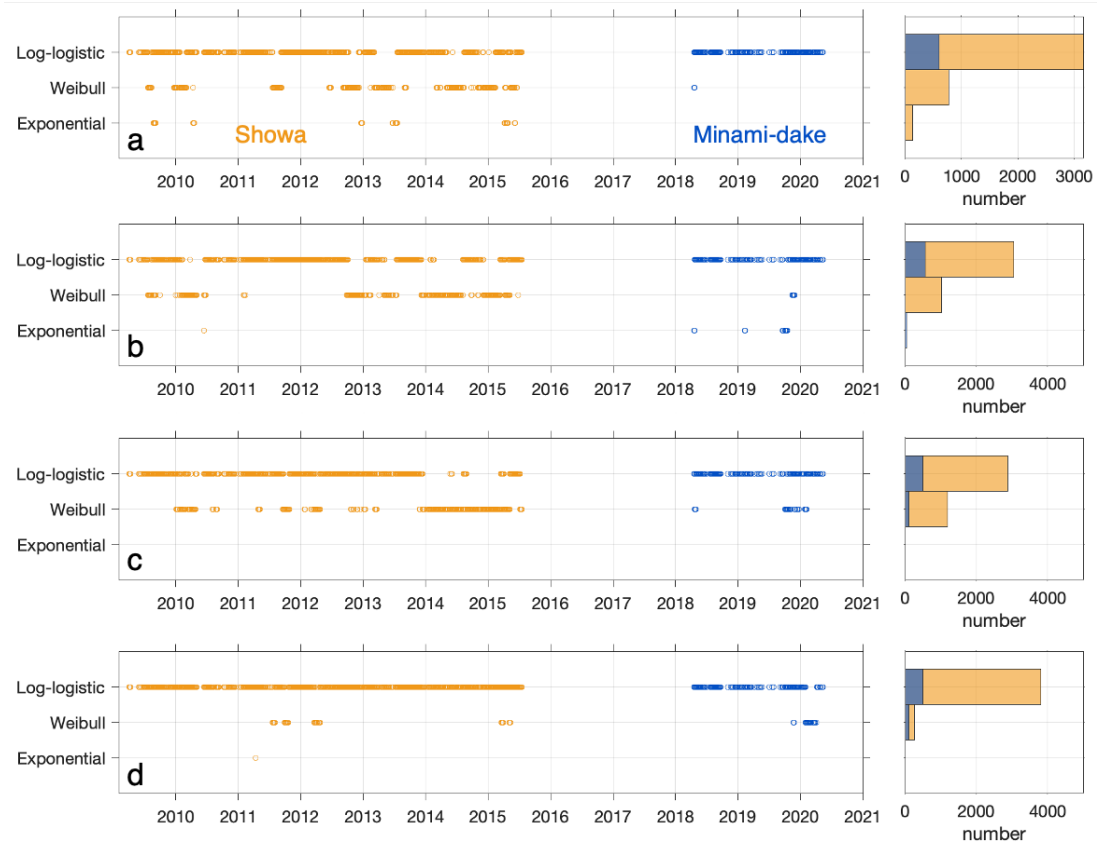


図 116　最適モデル（AIC 最小モデル）の時間変化。a: 膨張継続時間、b: 膨張体積、c: 収縮体積、d: 収縮率。オレンジ、青はそれぞれ昭和火口、南岳火口の噴火イベントを示す。

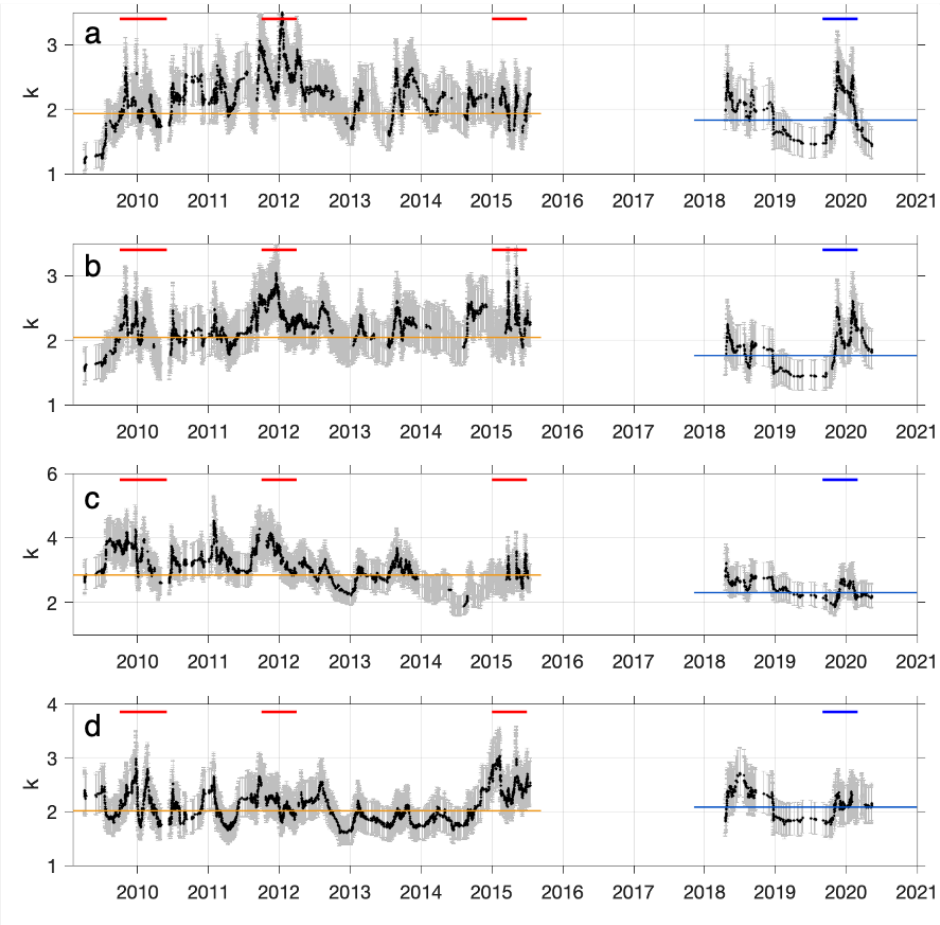


図 117　Log-logistic 分布のモデルパラメータ k の時間変化。a: 膨張継続時間、b: 膨張体積、c: 収縮体積、d: 収縮率。灰色のエラーバーは 95%信頼区間を示す。オレンジ、青の横線はそれぞれ昭和火口、南岳火口の全イベントから推定される k の値である。図上部の太線が長期的な地盤変動にもとづくマグマ貫入期を示す（赤: 井口・ほか, 2019、青: Iguchi et al., 2022)。

2）時刻と規模の確率的予測

上記で作成したデータベースおよびモデル分布関数を用いることで、噴火確率の算出が可能となる。以下では、現在の活動の主体である南岳火口での噴火イベントを予測することを想定した噴火確率の算出例と今後の課題を示す。

a）時刻の予測（古典的手法）

噴火間隔の分布関数を用いた噴火時期の予測は古くから行われている。同じアイデアを本データセットから得られた膨張継続時間の分布に適用することで、膨張開始後の噴火確率を評価できる。膨張開始から t 分経過したときに、まだ噴火が発生しておらず今すぐ噴火する確率は、ハザード関数 h(t) =PDF/S(t)で表される（図 118c)。ここで、PDF は膨張継続時間の確率密度関数（図 118a)、S(t)は生存関数（膨張開始から t 分経過したときにまだ噴火が発生していない確率; 図 118b）である。図 118c からは、膨張開始から 40 分経過した時に今すぐ噴火する確率が最も高いこ

とがわかる。この考え方を応用することで、今から数十分後に噴火する確率なども算出できる。

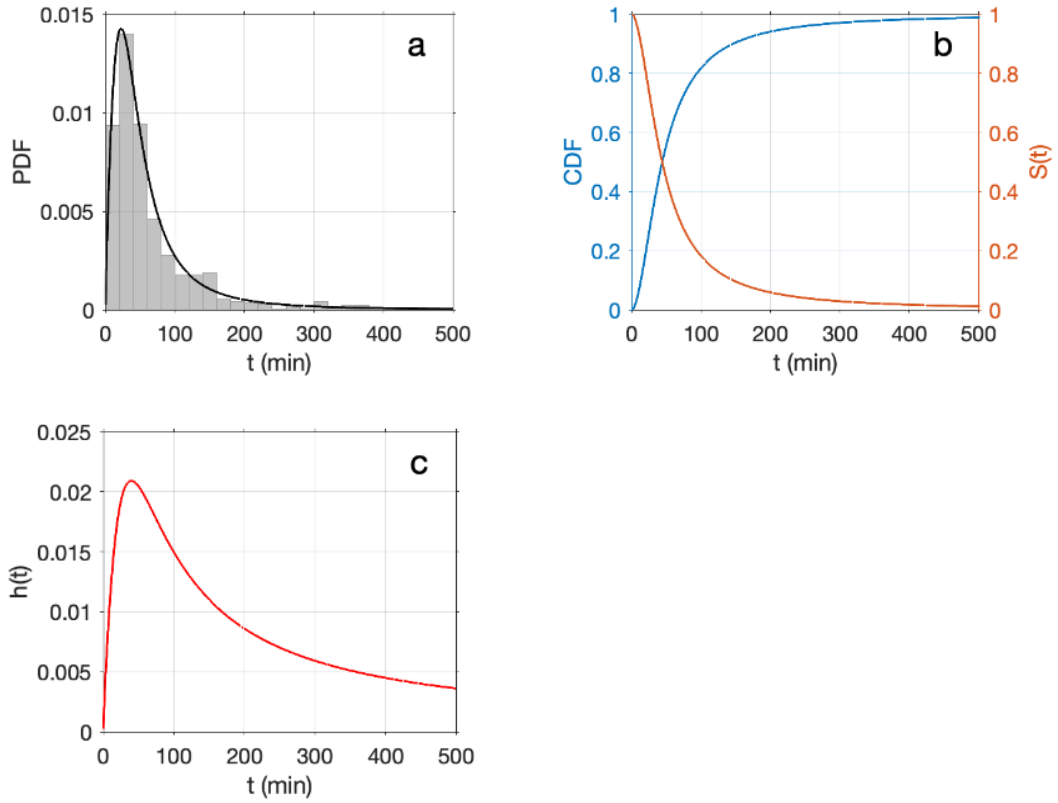


図 118　噴火時刻の確率的予測。a：膨張継続時間の確率密度関数。実データ（南岳）とモデル分布（Log-logistic 分布）。b：a から算出した累積分布関数（青）と生存関数（赤）。c：a と b から算出したハザード関数。

b）時刻と規模の予測

上記のように 1 指標（上の場合、噴火時刻）に着目した噴火確率の算出は、非常に単純な方法で算出が可能であるが、本プロジェクトで目指すのは、噴火時刻と噴出量の同時予測である。これらの確率を算出するには、膨張継続時間、膨張体積、収縮率の分布を考慮すべきである。これらの 2 次元空間分布を図 119 に示す。膨張継続時間が短いときには膨張量も比較的小さい傾向にある（図 119a）。膨張継続時間が短いときの収縮率の分布は、膨張継続時間が長い時に比べて幅広く分布しており、収縮率が 1 より大きい領域にまで広がっている（図 119b）。収縮率が 1 を超える場合とは、連続して噴火が発生する際に、前の噴火で解消できなかった膨張量も合わせて収縮している場合が多い。図 119 の分布はこのようなイベントの存在も考慮された分布になっていることがわかる。

今後、この分布を噴火予測システムに組み込み、実際にどのように確率の算出を運用していくのかが課題である。特に、平均的な噴火よりも大きな噴火を扱う際には注意が必要である。図 119 のようなデータそのままの分布では、規模の大きな噴火のサンプル数が少なく不連続な分布になってしまっているので、平滑化の必要性

がある。また、リアルタイムで得られる膨張量や膨張速度をどのように確率の算出に反映するのかについても検討が必要である。

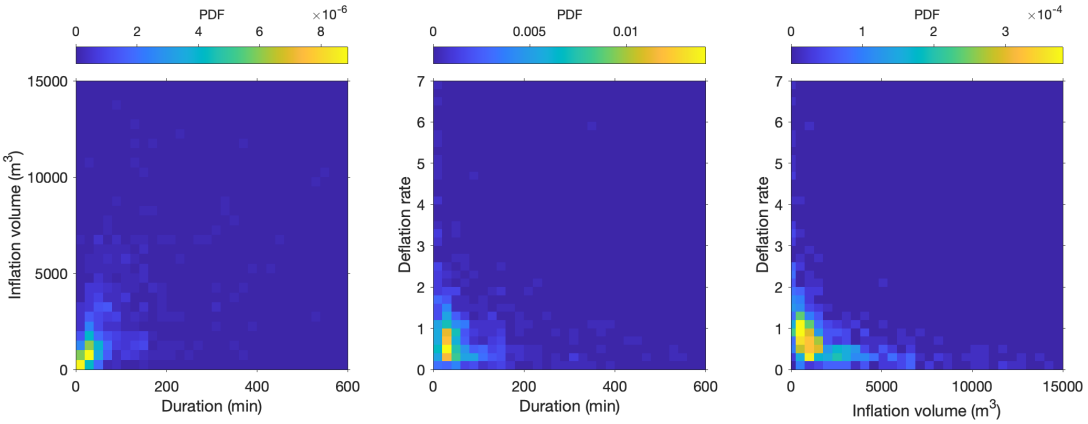


図 119　膨張継続時間、膨張体積、収縮率の 2 次元分布（南岳）。a: 膨張継続時間と膨張体積。b: 膨張継続時間と収縮率。c: 膨張体積と収縮率。

(3) 結論

ワークステーション上で火山灰拡散シミュレーションを連続的に稼働させ、試験運用を開始した。このことにより、人手を介することなく、常時、火山灰ハザードを評価できるようになった。ハザード評価の精度を向上させるために、今後もリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、火山灰拡散予測の高速化技術開発、火山灰拡散予測の高精度化技術開発を継続していく必要がある。また、噴火発生前の地盤変動の統計的性質が明らかになり、令和 5 年度以降、噴火発生前の火山灰ハザード評価に向けて目途が立った。

(4) 引用文献

(a) Shimizu A., Iguchi M., Nakamichi H. (2021) Seasonal Variations of Volcanic Ash and Aerosol Emissions around Sakurajima Detected by Two Lidars. Atmosphere, 12 (3), 326.

(b) Shimizu A., Sugimoto N., Matsui I., Mori I., Nishikawa M., Kido M. (2011) Relationship between Lidar-derived Dust Extinction Coefficients and Mass Concentrations in Japan. SOLA, 7A, 1-4.

(c) Bertiger, W., Yoaz Bar-Sever, Angie Dorsey, Bruce Haines, Nate Harvey, Dan Hemberger, Michael Heflin, Wenwen Lu, Mark Miller, Angelyn W.Moore, Dave Murphy, Paul Ries, Larry Romans, Aurore Sibois, Ant Sibthorpe, Bela Szilagyi, Michele Vallisneri, Pascal Willis: GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research, Advances in Space Research, Volume 66, Issue 3, pp.469-489, 2020.

(d) Ohta, Y., Iguchi, M., Advective diffusion of volcanic plume captured by dense GNSS network around Sakurajima volcano: a case study of the vulcanian

eruption on July 24, 2012, Journal: Earth, Planets and Space, Volume 67:157, DOI: 10.1186/s40623-015-0324-x, 2015.
(e) Thayer, G. D., An improved equation for the radio refractive index of air, Radio Sci., 9(10),803?807, doi:10.1029/RS009i010p00803, 1974.
(f) Bilich, A., Mader, G. L., National Geodetic Survey, GNSS absolute antenna calibration at the National Geodetic Survey, 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR, September 21-24, 2010.
(g) 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.
(h) Maki, M., R. Takaoka, M. Iguchi 2021: Characteristics of particle size distributions of falling volcanic ash measured by optical disdrometers at the Sakurajima volcano, Japan. Atmosphere 2021, 12(5), 601; https://doi.org/10.3390/atmos12050601.
(i) 真木雅之・小堀壮彦・西　隆昭・藤吉康志・徳島秀彦・佐藤英一・井口正人・爲栗　健: 船舶レーダによる桜島火山の噴煙柱モニタリング、－2018 年の観測結果－、京都大学防災研究所年報、63B、136-148、2020.
(j) 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.
(k) Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K.: Mechanism of explosive eruptions from source mechanism analyses of explosion earthquakes at Sakurajima Volcano, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 47, pp.197-215, 2002.
(l) 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.
(m) Chouet, B., Dawson, P. and Arciniega-Ceballos, A., Source mechanisms of Vulcanian degassing at Popocatepetl Volcano, Mexico, determined from waveform inversions of very long period signals, J. Geophys. Res., 110, B07301, doi:10.1029/2004JB003524, 2005.
(n) Tanaka, H.L. and M. Iguchi: Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal for Sakura-jima using real-time emission rate estimation, Journal of Disaster Research, Volume 14, No.1, pp. 160-172, 2019.
(o) Tanaka, H.L., Nakamichi, H., and Iguchi, M.: 2020: PUFF model prediction of volcanic ash plume dispersal for Sakurajima using MP radar observation, Atmosphere, Volume 11, No. 11, 1240, 2020.
(p) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Power, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., Huang, X. Y., A model description of the advanced research WRF model version 4 (No. 980 NCAR/TN-

556+STR). Technical Report. National Center for Atmospheric Research. Boulder, 2019. doi:10.5065/1dfh-6p97.
(q) Maronga, B., et al., Overview of the PALM model system 6.0, Geosci. Model Dev., Volume 13 (3), pp.1335-1372, http://dx.doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020, 2020.
(r) Pavageau, M., Schatzmann, M., Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon, Atmos. Environ., Volume 33, pp.3961-3971, http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00138-7, 1999.
(s) Folch, A., Costa, A., Macedonio, G., Fall3d: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. Comput. Geosci., Volume 35, pp.1334-1342. doi:10.1016/j.cageo.2008.08.008, 2009.
(t) Poulidis, A. P., Takemi, T., Iguchi, M., Renfrew, I. A., Orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash: A case study of Mt. Sakurajima, Japan, Journal: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Volume 122, pp.9332-9350, 2017.
(u) Maki, M., Iguchi, M., Maesaka, T., Miwa, T., Tanada, T., Kozono, T., Momotani, T., Yamaji, A., Kakimoto, I., Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke, Jour. Disast. Res, Volume 11, pp.15-30, 2016.
(v) Takishita, K., Poulidis, A-P., Iguchi, M., In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107442, 2021.
(w) Tanaka, H.L., Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt Volcano, Alaska. Proc. First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, U.S. Geological Survey, Bulletin 2047, pp.283-291, 1994.
(x) Folch, A., Mingari, L., Gutierrez, N., Hanzich, M., Macedonio, G., Costa, A., FALL3D-8.0: a computational model for atmospheric transport and deposition of particles, aerosols and radionuclides - Part 1: Model physics and numerics, Geosci. Model Dev., Volume 13, pp.1431-1458, 2020.
(y) 井口正人・山田大志, 1955 年以降の桜島南岳活動期の火山災害, 京都大学防災研究所年報, No. 74, pp.57-72, 2021.
(z) ASCE 7-05: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE (American Society of Civil Engineers) Standard. 2005.
(aa) ASTM E1886-04: Standard Test Method for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Missiles(s) and Exposed to Cyclic Pressure Differentials, ASTM (American Society for Testing and Materials) Standard. 2004.

(bb) ASTM E1996-04: Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective System Impacted by Windborne Debris in Hurricanes, ASTM (American Society for Testing and Materials) Standard. 2004.
(cc) ISO 16932: Glass in Building — Destructive-windstorm-resistant security glazing — Test and classification, ISO (International Organization for Standardization)
(dd) JIS R 3109:2018: Glass in building-Destructive-windstorm-resistant security glazing-Test method.
(ee) 丸山 敬・河井宏允・西村宏昭・加茂正人, 外装材耐衝撃性能試験用エアーキャノン, 日本風工学会論文集, Vol.34, No.2 (No.119), pp. 31-38, 2009.
(ff) JIS A 1204:2009: Test method for particle size distribution of soils.

(5) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(6) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

(a) 特許出願

なし

(b) ソフトウエア開発

名称	機能
ANT3D	レーダデータ多機能解析表示ソフト
火山灰拡散連続予測シミュレータ AshFall	降灰量の予測を連続的に自動で行うソフトウェア

(c) 仕様・標準等の策定

なし

２．２．３　令和５年度の業務計画案

令和５年度は、噴火発生前の確率的降灰予測を目指す第３期（令和 5～7 年度）の初年度に当たる。令和５年度は、これまで進めてきた「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速度化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」を引き続き継続して火山灰拡散予測の高速度化および高精度化を進めることにより、令和４年度に導入した連続化火山灰拡散予測シミュレータを稼働するオンラインシステムの高精度化を図る。また、噴火発生前の噴火確率分布をオンラインシステムに試験的に導入して噴火発生前の確率的降灰分布予測に着手する。さらに、プロジェクト研究の将来的な社会実装を目指した自治体の防災担当者向けのセミナーを実施するなど、成果の普及に努力する。

(1) 業務計画、実施方法

業務は、以下の 6 項目について実施する。

(a) プロジェクトの総合推進

当該プロジェクトと関連する「課題 C　サブテーマ 3」および「課題 D　サブテーマ 3」と連携を図りつつ、研究集会を開催する。また、火山灰ハザード評価用シミュレータの利活用を促進するための自治体等の防災担当者向けセミナーを鹿児島市において開催する。

(b) 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（保守点検作業、薩摩硫黄島レーダーの修理）も併せて行う。これまでに桜島を取り巻くように設置したディスドロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量の時間変化を把握する。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したときには火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、X バンド MP レーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディスドロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例と火山灰の凝集効果を考慮することにより、降灰量見積精度を上げる。また、複数台の船舶レーダーによる噴煙柱の観測を実施し、既設レーダーの観測データと比較することにより、噴火ソースパラメータを推定する。レーダーの観測データから求めた過去の顕著な噴火事例の降灰情報およびレーダー動画をデータベース化して web 公開する。

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

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

を引き続き作成するとともに、消散係数と火山灰噴出量の関係を検討する。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。

(c) 火山灰拡散予測の高速度化技術開発

これまで改修してきた地震計と傾斜計および既存の観測点の地震動、地盤変動を再検討し、火山ガスの放出を考慮することにより、火山灰噴出率推定式を高精度化す

る。また、諏訪之瀬島やインドネシアのシナブン火山について、火山灰噴出率推定式を桜島以外の火山に拡張するための検討を継続する。

課題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。

(d) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

桜島を対象にドローンを用いて上空の風速ベクトルおよび火山灰・火山ガスの計測調査を年間 2 回程度実施する。主にドローンによる上空の乱流計測の可能性調査および桜島上空の火山灰・火山ガス濃度分布の実測データの蓄積に取り組む。

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

火山周囲の気流や形状の影響を受けて変化する火山レキの空力特性を取り込んだ火山周辺の気流予測の計算手法を改良する。また、住宅の代表的な外装材に対してレキの衝撃試験を引き続き行い、建物に衝突した際の破壊性状の実験データを積み重ねる。これにより、噴石の落下・衝突による被害リスクを評価する。

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

(e) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

令和 4 年度に構築した連続化シミュレータを運用し、シミュレータの問題点の抽出とパラメータの調整を行う。ブレーメン大学の研究者を招聘し、火山体周辺の風速場の高解像度化とデータベース構築作業効率化について検討する。小型 X バンド MP レーダー観測による噴煙高度やディスドロメータにより得られた降灰量とシミュレーション結果を照合する。

(f) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

桜島における過去の地盤変動データを整理し、火山噴火に前駆する地盤変動継続時間および圧力源の体積増加量と噴火に伴う体積減少量の関係をデータベース化する作業を継続する。特に、圧力源を検討しなおすことにより体積変化量見積の高精度化を図る。このデータベースをもとに、噴火の発生時刻と規模の確率分布式を求めたうえで、噴火発生前の確率的火山灰拡散予測シミュレータを開発する。研究成果をシンガポールで開催される AOGS 国際会議で発表する。

(g) 自発的な研究活動

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

(2) 目標とする成果

地震・地盤変動の観測データから得られる火山灰噴出率と高解像度風速場データを参照する火山灰拡散予測シミュレータが安定的に精度の良い降灰予測を出力するようにするとともに、噴火発生前の地盤変動に基づく予測型シミュレータが、降灰分布の出力が可能となることを目指す

２．３　サブテーマ３

２．３．１　業務の内容

(1) 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」

(2) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人 防災科学技術研究所 火山研究推進センター	担当機関	センター長 副センター長 研究統括 研究員 客員研究員 客員研究員	中田節也 藤田英輔 宮城洋介 棚田俊收 宮村正光 中村洋一
株式会社大林組 技術本部 技術研究所	参加機関	上席研究員 上級主席技師 上級主席技師	諏訪　仁 大塚清敏 野畑有秀
山梨県富士山科学研究所 富士山火山防災研究センター	参加機関	主幹研究員 主幹研究員 主任研究員 研究員 研究員 研究員	吉本充宏 石峯康浩 本多　亮 久保智弘 西澤達治 亀谷伸子
東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター	参加機関	特任教授 准教授	田中　淳 関谷直也
電力中央研究所	協力機関	主任研究員	上澤真平

(3) 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各種コンテンツから成り、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（次世代火山研究推進事業）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観測データや課題 B（先端的な火山観測技術の開発）及び課題 C（火山噴火の予測技術の開発）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み、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」の成果等も積極的に活用する。また、気象庁が発表する各種火山情報や地域防災計画等も考慮し、既に各自治体が取り組んでいる対策等を踏まえて内容を検討する。具体的には以下により本業務に取り組む。

本業務では課題 A と密接に連携し、研究成果などの情報を自治体の防災担当者に適切に伝達するために必要となる情報ツールを開発する。なお課題 A では、情報ツール開発のために必要な機能を実装する。そのために、まず過去の国内外における火山災害・降下火山灰による影響評価について文献調査・事例研究を行う。次に、平時及び災害発生時に自治体が必要とする情報について防災担当者を対象としたヒアリング調査等を通して把握し、自治体による適切な情報発信と、防災担当者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ための情報ツールの開発を行う。

また、火山災害の中で最も広範囲に影響を及ぼす降灰が都市部に与える被害を予測するコンテンツについては、情報ツール開発の基礎データとして定量的なリスク評価を行う。降灰の被害地域として都市部を想定した場合、リスク評価を行う対象は、病院や官庁といった災害発生時に機能継続が求められる重要施設及び施設の機能継続に係る建築設備や電気・ガス等のライフライン、また鉄道や道路などの交通インフラなど多岐にわたる。これらの中から対象を絞って降灰実験を行い､影響度を定量的に評価する｡この評価の際には、日本建築学会の特別委員会と情報共有・情報交換を行い、連携を図る。さらに、過去の降灰による被害に関する文献調査・事例研究の結果を踏まえ、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）及び課題 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）から得られる降灰予測を考慮し降灰によるリスクの定量的な評価を行う。

課題 D（火山災害対策技術の開発）内の連携としては、サブテーマ 1「無人機による火山災害のリアルタイム把握手法の開発（以下、課題 D-1)」とサブテーマ 2「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発（以下、課題 D-2)」と密接に連携して情報ツールの開発を行う。課題 D-1、D-2 では、それぞれ災害発生時にリアルタイムで火山災害を把握する手法とリアルタイムで火山灰ハザードを評価する手法の開発が行われる。これら課題 D-1、D-2 で得られるリアルタイム災害情報は，火山専門家が情報ツールを使って自治体防災担当者に伝えることを想定しており、現在活発に噴火活動を続けている桜島を対象として鹿児島県をフィールドとし､降灰被害予測コンテンツを含む情報ツールを使った実証実験を行う。なおこの実証実験を行うに当たり、鹿児島県及び鹿児島市に協力機関として参加してもらう。

開発した情報ツールについては、現場でユーザーにどのように利用されどのような成果に繋がったかを調査し、また、他の自治体を対象としたアウトリーチ活動も実施し、得られたフィードバックを基に情報ツールの高度化を行う。その際、本事業のリスク・コミュ

ニケーション担当プロジェクト・アドバイザーの指導を仰ぎつつ社会防災分野の研究者と連携する。

(4) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

(a) 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。

(b) 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。

(c) 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。

(d) 平成 31 年度（令和元年度）:

- 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。
- 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実験結果の妥当性を検証し、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。
- 避難・救助支援コンテンツの試作版を開発した。
- 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、本試作版の活用について検討した。

(e) 令和 2 年度：

- 周知啓発教育用コンテンツの試作版について、前年度開発した試作版について自治体防災担当者にヒアリングやアンケート調査を行い、課題を把握するとともに、新たなニーズを把握し、その結果を基に高度化を実施した。
- 降灰被害予測コンテンツの試作版の高度化を実施した
- 降灰被害予測コンテンツの試作版について、防災担当者を対象とした火山灰対策の勉強会を行い、降灰対策に必要な情報の把握と降灰被害予測コンテンツへのニーズを把握した。
- 避難・救助支援コンテンツの試作版の高度化を実施した。
- 避難・救助支援において重要となる避難施設の耐衝撃性について、既存の建物への耐衝撃性を向上せるための実験を行い、補強方法の提案に資する結果を得た。

(f) 令和 3 年度：

- 周知啓発教育用コンテンツを利用したアウトリーチ活動等を踏まえ、動画学習コンテンツを充実させるなどコンテンツの高度化を図り、防災担当者が避難確保計画策定に活用できるように整備した。
- ３コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、インフラ関係者を集めた研究会等を実施した。
- 降灰被害予測コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、コンテンツの高度化を図る。これまで実験結果をまとめ、建物機能被害の損傷曲線の提案し、都市部への降灰被害予測コンテンツを改善した。
- 離散型降灰データから等層厚線図を自動的に描く作業を行い、伊豆大島火山の降灰災害カーブを作成した。
- 避難・救助支援コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、コンテンツの高度化を図る。これまでに開発した可視化ツールの改修を行った。
- 退避壕等の耐衝撃実験を実施し、建物の耐衝撃性能の補強方法について検討を行った。

(g) 令和 4 年度：

- 周知啓発教育用コンテンツを利用したアウトリーチ活動やアンケート調査を踏まえ、コンテンツの高度化を図った。
- インフラ関係各社の防災担当者と大規模降灰の対策について意見交換した。
- 降灰被害予測コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、降灰の建物への影響について実験結果とシミュレーションから評価し、コンテンツの高度化を図った。
- 降灰ハザードの評価の面から、降灰データからの降灰量見積もり及び降灰被害カーブについて検討した。
- 避難・救助支援コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、コンテンツの高度化を図った。その際、過去に実施した登山者の動態データを可視化するフールを開発するとともに、地元自治体の避難対策などに活用した。

(h) 令和 5 年度：

- 周知啓発教育用コンテンツの活用方法の検討を行う。
- 近年発生した海外での火山災害についてコンテンツの充実のための情報収集を行う。
- 防災関係機関へのヒアリング等を実施し情報発信の在り方を検討する。
- 降灰被害予測コンテンツの改善のために、都市部の建物が降灰に及ぼす影響や病院などの機能被害をもたらす損傷曲線等の検討を行う。
- 過去の日本の主要噴火災害の時間経過を空間地理情報としてまとめる。
- 昨年に引き続き御嶽山の登山者動向把握実験を行い防災訓練に活用する。
- 待避濠などの耐衝撃性を確認する実験を継続し、これまでの実験結果を整理する。
- 海外の噴火の火山災害対応タイムラインを参考にし、火山ハザードシミュレーションと連携し火山防災対策手法の検討を行う。

(i) 令和 6 年度：

- 各種コンテンツの汎用化を進める。

(j) 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。

(5) 令和 4 年度における業務の方法

(a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

本年度は中間報告年度であることを鑑み、これまでに開発してきた周知啓発教育用コンテンツ試作版を高度化する。昨年度行ったヒアリング調査やアンケート調査から得られたニーズや課題に対応し、本コンテンツの高度化を図るとともに、本コンテンツを使ったアウトリーチ活動に向けた準備を行う。具体的には、動画や写真などのデジタルコンテンツと災害対応の記録等をコンテンツとして掲載する。また、引き続き火山ごとに情報を整理するとともに対象火山の情報や避難確保計画に関する情報を容易に調べることができるようにするとともに、火山灰対策に関する情報を整理してコンテンツに加える。いくつかの火山防災協議会における検討資料も公開可能なものを掲載する。さらに、引き続き、本コンテンツを広く日本国内の防災担当者に周知するためのアウトリーチ活動を行い、さらなる高度化のために、引き続きニーズや課題をアンケート調査などから把握する。

本コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、火山防災に関して防災関係機関へのヒアリング、ディスカッション等を実施する。

(b) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

本年度は中間報告年度であることを鑑み、これまでに開発してきた降灰被害予測コンテンツ試作版を高度化する。昨年度までに実施してきた降灰による建築物の損傷・被害に関する降灰深の閾値評価や建物空調設備およびフィルター被害の結果を含めて建物機能被害評価法を再検討し、都市部への降灰被害予測コンテンツの改善を実施する。今年度は降灰による屋根への影響評価事例を増やすことで、要因となるパラメータを整理する。また都市部における積灰空間分布を確認するため、数値シミュレーションにより建物が積灰分布にどのような影響を及ぼすか街区での積灰空間分布の検討を行う。さらに、これまで実験による建物空調設備およびフィルター被害の結果をまとめ、建物機能被害の損傷曲線を提案するとともに、過去の被害事例に基づく都市機能被害の損傷曲線と組み合わせることで、機能被害を明示し都市部への降灰被害予測コンテンツを改善する

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

(c) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

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

さらに、前年度に引き続き、避難計画の作成や避難・救助活動において重要な施設である退避壕（シェルター）等の耐衝撃性を評価するために、今年度は鉄筋コンクリート造構造物等を想定した模擬火山岩塊を使用した衝突実験を実施する。

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

(d) 自発的な研究活動等

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

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。

２．３．２　令和４年度の成果

(1) 業務の要約

本年度は中間報告年度であることを鑑み、これまでに開発してきた周知啓発教育用コンテンツ試作版、降灰被害予測コンテンツ試作版、および、避難・救助支援コンテンツ試作版を高度化した。

(1)周知啓発教育用コンテンツでは、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を基に周知啓発教育用コンテンツ試作版を改善するとともにニーズに応じてコンテンツの充実を行った。また、周知啓発教育用コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、防災関係機関へのヒアリング、ディスカッション、文献研究等を実施した。

(2)降灰被害予測コンテンツでは、降灰の都市機能への影響を調べるため都内街区を対象に降灰の数値計算を実施するとともに、降灰荷重による建物の特性を検討した。さらに、都市機能への影響評価するため東北地方太平洋沖地震における病院機能の被害分析を行った。さらに、降灰データからハザードを面的評価する例として阿蘇山の過去 3 万年間の降灰被害カーブを検討した。

(3)避難・救助支援コンテンツ試作版では、御嶽山で登山者動向把握実験を実施した。また、自治体防災担当者が火口近傍の避難対策を行うで必要になる避難誘導の検討に必要となる移動速度について検討を行った。さらに、避難施設対策として必要となる退避豪等の耐衝撃性を評価するために鉄筋コンクリート造を対象に模擬火山岩塊を使用した衝突実験を行った。また、これらの情報コンテンツを我が国で活用するための基礎的データとして、近年外国で起きた大噴火の際の火山災害対応タイムラインを調査した。

(2) 業務の成果

(a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版

1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

本年度は中間報告年度であることを鑑み、これまでに開発してきた周知啓発教育用コンテンツ試作版を高度化した。初めに前年度行ったアンケート結果から、火山防災担当業務が4年目以上の方を分析した結果、実務で使用する場面を想定して活用できるサイトにする必要があることが分かった。

そこで、防災担当者には火山防災として避難確保計画の検討や防災訓練などの業務があることから、それら計画や訓練などの情報を収集し、「計画策定支援」のページに情報を掲載した。計画策定支援として各火山防災協議会などですでに作成されている避難確保計画や火山に関する地域防災計画、火山噴火緊急減災対策砂防計画、火山防災計画・火山避難計画について、常時観測火山を中心にウェブサイトを検索し、参考となる資料のリンクの追加を行った。また、各火山防災協議会で協議会での資料を掲載している協議会もあることから、他の火山防災協議会でどのような検討がなされているか把握することができるように公開されている資料のページのリンクを「計画策定支援」のページに掲載した（図1-1)。



図 1-1：火山防災協議会の資料へのリンク

次に訓練を行う際や対応計画を検討する際に参考となる情報として、「素材集」のページにクロノロ資料として2016年に本課題D3「火山災害対策のための情報ツールの開発」で行った過去の火山災害対応に関する調査での資料を掲載した（図1-2)。2016年の調査では、伊豆大島1986年噴火から2015年箱根山でのごく小規模の噴火までの10の災害対応を整理し、クロノロ資料を作成した。

これまでのアンケート調査やヒアリング調査で担当する火山の情報を収集する際に山ごとに整理された情報が必要であるというニーズを把握しており、山ごとに情報を検索でき

るようにサイトを構築してきた。今年度はさらに前述の対策や各火山防災協議会などの情報が集まってきたことを受けて、山ごとのページついて見直しを行い、気象庁が持つ情報に加えて、火山防災協議会を組織している市町村の地域防災計画やハザードマップ、火山防災協議会、噴火シナリオ、避難計画、防災計画、火山噴火緊急減災対策砂防計画などの情報を掲載した。



図 1-2：過去の火山災害に関する資料

最後に、周知啓発教育用コンテンツ試作版は開発当初から 7 年経過したこともあり、開発当初に掲載した情報のリンク切れ等について、利用者から指摘をいただく機会も出てきた。そのため、2023 年 1 月時点で掲載されている情報のリンク切れの確認やページ間リンクなどの確認を行った。その結果、いくつかリンク切れやページ間のリンクミスなどがあったことから、それらの修正を行った。今回のように次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトが実施中であれば、定期的に確認作業は行えるが、プロジェクト終了後の継続的なサイトの運用方法などについて、今後検討していく必要があることが分かった。

2) ヒアリング調査

引き続き周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化を行うため、2022 年 10 月に北海道駒ケ岳周辺の自治体(森町、鹿部町、七飯町)、及び有珠山周辺の自治体(壮瞥町、伊達市)の防災担当者に加えて、今年度は樽前山周辺自治体(苫小牧市)、倶多楽周辺自治体(登別市)にヒアリング調査を行い(写真 1-1)、2023 年 3 月に十勝岳周辺自治体(上富良野町、美瑛町)にヒアリング調査を行った(写真 1-2)。また、本州ではあまりヒアリングを行っていなかったため、今年度は自治体・関係組織として、浅間山について佐久地域振興局と安達太良山周辺自治体（二本松市)、新潟焼山周辺自治体（糸魚川市）の担当者にもヒアリングを行った。

一方、これまで自治体を中心にヒアリングを行ってきたが、今年度は、火山専門家が感じている火山防災の課題なども今後のサイト改善には必要と考え、北海道の火山専門家にもヒアリングを行った。さらに、2022 年 7 月に鹿児島県桜島で噴火警戒レベルが 5 に引

き上げられたため、その際の対応や課題などを把握するために 8 月に鹿児島市と桜島の火山専門家にヒアリングを行った。



写真 1-1　登別市でのヒアリング調査



写真 1-2 上富良野町と美瑛町へのヒアリング調査

はじめに 2022 年 10 月に実施した北海道の火山に関するヒアリングについて、各火山防災協議会を構成する市町村に訓練の実施状況や訓練で必要な資料、観光者・登山者対策、噴火警戒レベルがあった時の対応など、火山防災業務で扱っている具体的な内容を基にヒアリング調査を行った。その結果を以下の通りである。

- 訓練・対策に関すること
  - 他自治体の訓練に関する資料や情報が欲しい
  - 火山災害に関する訓練は市町村として行っているが、協議会としては行えていないところもある。
  - 対策や訓練を行う際、風評被害にも気を付ける必要がある。
  - 機能移転訓練を実施予定。
- 観光者・登山者対策、警戒レベルが上がった時の対応や課題
  - 災害時の情報伝達について
  - 避難確保計画策定の進め方
- その他コンテンツや課題について
  - 有珠山 77 年噴火の写真や映像があるとよい。
  - 噴火を学ぶ上で音も効果的であることから、空振の音声データがあるとよい。
  - ガイドラインや法整備に関する情報があるとよい。
  - 担当者が 2 年くらいで交代してしまうため､研修会の実施や資料があるとよい。

次に 2023 年 3 月に実施した十勝岳周辺自治体へのヒアリング調査結果は、以下の通りである。

- 訓練・対策に関すること
  - 非積雪期と積雪期で訓練を実施している。
  - 実動訓練により課題抽出を行ったので、課題の対策などを検討する予定。
- 観光者・登山者対策、警戒レベルが上がった時の対応

- シェルターの整備、恒常的な情報発信。
- 警戒レベルが上がった時に住民説明会などを実施

- その他コンテンツや課題について
  - Google で検索したが、サイトが出てこなかった。
  - JVDN や次世代火山研究プロジェクトのサイトからのリンクがあるとよい。
  - 火山防災マップについて、各町のものが掲載されているとよい。
  - 過去の災害伝承として、郷土資料館での情報発信や郷土史で特集号の企画、小学校と連携して砂防施設の見学会などの実施。
  - 積雪期における降灰による被害について知りたい。
  - 降灰によるインフラ被害について知りたい

本州の火山を持つ自治体・関係機関へのヒアリング調査結果は以下のとおりである。

- 訓練・対策に関すること
  - 火山防災協議会の構成組織に関する情報が欲しい
  - 業務仕様書や担当業者がわかるサイトになっていると嬉しい。
- その他コンテンツや課題について
  - 専門用語集のような資料があるとよい
  - 研修などで利用できるウェブコンテンツがあるとよい。
  - 火山防災を学ぶための研修があるとよい
  - 必要とする情報にたどり着けないことがある。
  - 火山防災マップを作成するにあたり、フリーな素材があるとよい。

以上のように今年度はこれまでヒアリング調査を行ってきた自治体に加えて、北海道を中心にヒアリング対象を増やし、さらに過去に実災害を経験した自治体にもヒアリング調査を行った。その結果、十勝岳や有珠山のように近年噴火災害を経験した自治体では、実践的な訓練や継続的な課題の検証などが行われており、さらに火山災害経験の伝承についても継続的に行っていることが分かった。一方、これまで経験したことのない火山については、協議会を構成する組織規模や人口の多い市町村では、実践的な訓練が行えているが、それ以外については、訓練を実施するためのシナリオ作りや訓練実施までのプロセスで課題があることが分かった。またこれは初年度から継続的に挙がっている課題であるが、火山防災担当者が数年で異動してしまうため、研修や資料の引継ぎが十分でないといった課題が引き続き確認できた。最近、内閣府（防災担当）では、年度初めにオンラインでの火山防災担当者に講習会を行っているが、その情報が入手できていないことや業務のため受講できていないことも確認できた。そのため、講習会の動画などをコンテンツとし、オンデマンドで受講できる環境をする必要がある。さらに、周知啓発教育用コンテンツの利便性を高めるために必要な情報に容易にたどり着けるようにサイトの情報構成の再検討の必要性、サイト内検索の在り方やキーワードの埋め込み方について検討する必要があることが分かった。加えて、火山防災対策を行う上で、積雪期における降灰被害や降灰によるインフラ被害に関して火山防災担当者から高いニーズがあることが分かった。

一方、火山専門家へのヒアリング調査から、火山専門家からも担当者の異動が課題として挙げられ、防災担当者が学ぶための仕組みと継続的な研修の仕組みを構築する必要性が高いことが分かった。また、COVID-19 により、オンライン会議が多く行われるように

なり、また場合によっては書面会議のみの場合などが多くなり、顔を合わせての会議や検討の機会が減ってしまったため、火山防災担当者と火山専門家との顔のつながりが少しずつ薄れていることが分かった。このため、オンライン会議の良さと実際に会って行う良さのそれぞれのメリットを活かして、火山防災協議会を運営していく必要がある。

最後に 2022 年 7 月に桜島で噴火警戒レベルが 5 に引き上げられた際の対応についてまとめる。2022 年 7 月の噴火では、夜間に気象台がカメラで噴石が 2.5 ㎞以上飛んだと判断し、それに伴い、噴火警戒レベルが 5 に引き上げられた。これにより、鹿児島市では桜島島内の有村や古里に避難指示を出した。この際、気象庁による噴火速報のエリアメールで文面が不十分であったため、桜島島外の住民へも情報が伝達され、情報が錯綜してしまった。そのため、鹿児島市では市内全域に防災行政無線等で正確な情報提供を行った。一方、道路規制などについては、計画通り実施することができた。また、桜島の火山専門家にもヒアリング調査を行い、情報共有や連絡網の共有、火山に関する知識の継承（数年で異動してしまうこと）の課題などが挙げられた。

3）動画コンテンツの充実

動画コンテンツの充実として、これまで自治体の防災担当者に行ってきたヒアリング調査から火山灰対策や火山灰被害による情報のニーズが高かった。そのため、今年度も引き続き動画コンテンツの作成を行った。今年度も Volfilm に掲載されている火山ガスや土石流・泥流などの火山現象に関する英語版の動画を基に日本の火山防災担当者が理解できるよう日本語化を行い、本ポータルサイトに掲載できるよう準備を行った（図 1-3）。

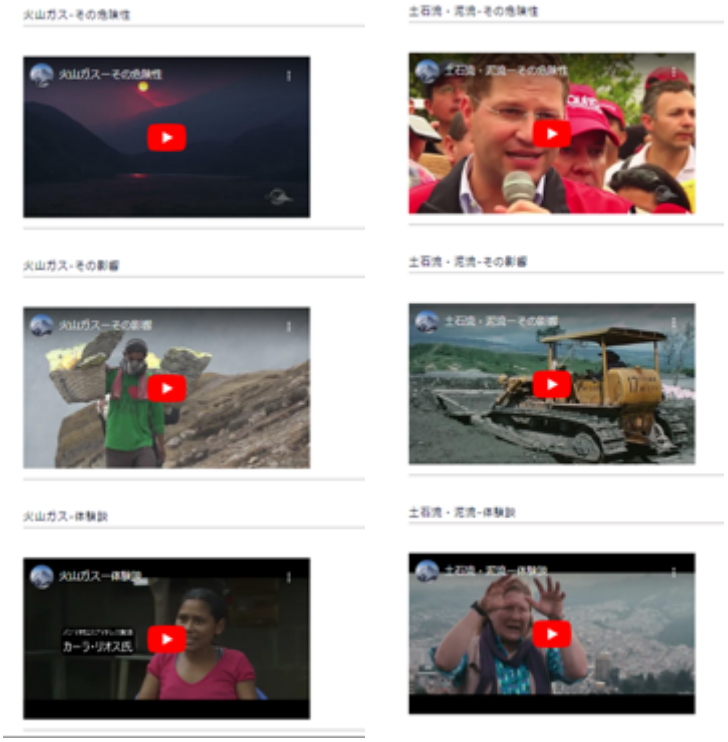


図 1-3：火山現象の動画コンテンツ

4）社会防災分野との連携

周知啓発教育用コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、防災関係機関へのヒアリング、ディスカッション、文献研究等を実施した。

i）防災機関との意見交換

情報発信のあり方を検討するために、富士山科学研究所のメンバーとともに市町村の防災担当者やライフライン機関の防災担当者と火山噴火計画策定上の課題や求められる情報などについて意見交換を行った。市町村との意見交換では、防災対策のうち、津波や水害の大規模被害想定が発表されたこともあり、噴火対策以外のこれらの災害対策も進める必要がでてきている。その中で、噴火対応計画の策定に当たっているが、意見交換をした北海道内の市町村には、これまで日本の火山防災を先導してきた地域が多く、また実際の噴火対応経験者が残っていることが強みとなっていた。実際に、前任者から引き継がれている資料もある。また、周辺市町村の危機管理担当に自衛隊出身者が多いことから、防災対策に関しては相互に密なコミュニケーションがとられていた。しかし、防災担当者は、第一世代を継ぐ第二世代、第三世代となってきており、対象とする個々の火山に関する専門家による講演等に対する評価は高かった。このことから、火山現象に関する基礎的知識とともに、対策検討対象となる火山について個別的、具体的かつ科学的な情報の入手の必要性が示唆される。本プロジェクトでのポータルサイト等を通じた情報発信についての在り方の一つを示すといえよう。

首都圏の私鉄との意見交換では、事業者として電子機器への影響を懸念していた。これまでもライフライン機関の防災担当は、火山噴火に伴う通信障害に関心を持っていたことも合わせると、降灰による道路交通への支障とともに通信障害の可能性の評価への社会的要望は高い。また、同じ鉄道事業者の被災経験と対策の参考は桜島噴火事例となることから、灰の質や降灰量の多寡など桜島と他の火山との異同について議論された。鉄道事業者としては、桜島での経験に依存しているが、その知見を応どの程度応用可能かが、関心事の一つとなっていることを反映している。このほか、地下区間との近接個所等傾斜が強い区間における降灰の影響や踏切障害物検知装置に対する降灰の影響など首都圏ならではの課題についても意見交換を行った。首都圏の私鉄事業者は降灰への関心が高いが、前述した北海道の市町村の防災担当者では、噴火現象のうち火砕サージ等の直接的に住民の生命にかかわる現象への関心が高かった。同じ市町村の防災担当者でも火山から離れている場合には降灰への関心が高くなるものと予想される。このことを踏まえると、市町村の防災担当者やライフラインの防災担当者でも、置かれた地理的環境や業務の多様性を反映し、その関心は多様である。

情報発信の在り方を考える上では、それぞれの業務を具体的に把握しておく必要があるものと考えられる。

これらの意見交換ならびにその分析に加えて、本プロジェクトのポータルサイト「火山情報ポータルサイト」の改善に向けて、ポータルサイトの論点を整理するために先行研究のレビューを実施した。これらの結果を踏まえて、本プロジェクトが提供している「火山

情報ポータルサイト」現行版について質的研究を試行的に実施し、その改善方向に関する提案に関する意見交換を D3 内で行った。

ii) ポータルサイトの開発・運営ならびに利用に関する論点整理

ポータルサイトを通じた情報発信の在り方を検討するために、ポータルサイトに関連する先行研究を広く収集し、その開発・運営や利用に関する論点と改善の工夫、留意点などを整理した。

収集した論文の内容は、a)ポータルサイトの技術的特徴や構築目的、b)想定される利用者ニーズの把握、c)ポータルサイトのログ履歴等を用いた利用動向やマーケット構造の分析など多様な内容にわたっている。また開発・運営主体も、民間企業から公的機関や研究教育機関まで広く、目的も商業目的から情報サービスや学術組織のアウトリーチ活動まで広がっている。また、コロナ禍の大学教育では全教員・全学生がオンライン教育に関わらざるを得なくなったことから、ポータルサイトを通じて活用事例や作成手順など多くの工夫が紹介されていた。

その中で、研究機関や公的機関のポータルサイトも多く紹介されており、参考となる知見少なくなかった。以下、本プロジェクトで提供を開始している「火山情報ポータルサイト」の分かりやすさ、ユーザビリティ、使いやすさなどの参考となる点を中心にまとめる。

分かりやすさ

分かりやすさの明示的な定義や尺度等は見いだされなかった。その中で、本嶋・他(2016)[1-1)]は、アンケート調査、モニター観察調査などの幅広い調査に基づき、ハザードマップについて「入手した情報を正しく解釈するのが難しい」こととともに「災害時にとるべき行動と結びつけられない」という課題を指摘している。これらの課題指摘は分かりやすさのひとつの捉え方だろう。当然、提供者と利用者とで持っている知識には違いがあり、情報の解釈や理解はその違いに依存することも多い。この開発者と利用者との知識量の差に加え、知識を活かす行動目的や関心が異なるため、「災害時に とるべき行動と結びつけられない」。情報の有効性は利用者の行動と結びつけられるかどうかがひとつの観点となる。笠田(2015)[1-2)]は、アウトリーチについて「受信者たる社会が必要としている情報を，発信者たる研究者サイドが常に意識し，提供できるような仕組みを構築する」べきという指摘している。この指摘は学術機関が構築する核融合のポータルサイトを巡ってであるが、災害情報に関して一般に指摘されており、本プロジェクトとも通じる側面を持つだろう。さらに安保 (2021)[1-3)]は「移転先の文化・文脈に合わせて知的な情報を取捨選択して介入に仕立て直す」、具体的には「表現や見出しの設定に利用者側の慣れた表現や見出しの設定をするべきという提言をしている。火山噴火災害においても、研究と防災とで異なるカテゴリーを用いているなど、発信者である火山研究サイドと防災機関の担当者との関心の違いや求められる知識の違いに十分な配慮が求められる。

その利用者の行動目的やニーズの把握と理解を目指した研究として、ログ履歴からサイト内閲覧行動解析をしたり[1-4)]、web サイトユーザに対するアンケート調査から満足度を分析するなどの研究群[1-5),1-6)]がある。ただし、同じ市町村の防災担当者であっても、防災業務の範囲を見れば、前述した防災担当者との意見交換からも伺えるように、その利用

目的は多様性を持つ。たとえば、住民等への噴火災害に関する知識啓発を目的としている担当者の場合には、噴火現象の理解が重要となる。他方、計画作成担当者であれば、地域防災計画や避難計画を立てる際に役立つかどうかにかかる。その場合には、噴火現象の理解は、計画の有効性を高めるための背景的な知識となる。防災担当業務の目的は一様ではなく、また防災担当業務の経験にも差がある。このため、異なる利用目的や利用方法の比率を把握することに強いアンケート等量的調査だけではなく、利用目的や利用方法のパターンを理解する詳細な質的調査も必要と考えられる。

検索方法

分かりやすさのひとつとして、階層が深すぎると必要な情報がどこにあるのかが分かりにくいという情報検索の経路の複雑さがあげられている。たとえば、横山(2021)[1-7]は、「トップページからマニュアル閲覧までは7回の操作が必要であり、情報があっても階層が深過ぎると認知されにくくなり，結果利用されない状態になっている」という、ポータルサイトの課題を例示している。

階層問題は、種類（カテゴリー）による検索に付随する弱点であるが、この点を補完するために、キーワード検索も並行して提供されている事例が多い。たとえば、井戸・他(2020)[1-8]は、「キーワード」がタグ付けされていると、ユーザは必要な情報を素早く検索できると主張している。その一方で、非専門家では概念や用語を厳密に覚えていないこともありうるし、理学と防災とで表現や区分が異なるなどの課題がある。その改善として、佐々木・他（2021)[1-9]は、1)地域から探す、2)キーワードから探す、3)分野から探す、4)他の国から探すという4つの方法を提供している。その上で、適切なキーワードを選択することに慣れていない学習者向けに。参考となるようにキーワードランキングや関連候補が表示されるようにしているという。防災担当者向けである本ポータルサイトにはキーワードランキングが向くかには疑問も残るが、曖昧な記憶でもキーワードを再認できる機能は参考になる。前述した安保（2021)[1-3]の「表現や見出しの設定に利用者側の慣れた表現や見出しの設定をする」ことを意識するとともに、索引や一覧表などの活用が考えられる。

動画の分かりやすさ

昨年度までのヒアリングでも動画への要望が多かったが、動画の分かりやすさや使いやすさについては、短いクリップを推奨するものが見られた[1-10)，1-11)など]。このうち、米満・他（2021)[1-11)]は授業の動画は「90分連続で録画することはせず、10分程度の短い動画を複数録画し組み合わせること」を推奨しており、その理由として開発者側としては動画の修正が行いやすいこと、他方、視聴者側としては必要な個所ないしは理解できない個所を選択視聴しやすいことをあげている。市町村担当者との意見交換からも、多くの業務をこなしている中で、長い動画を視聴する時間の確保が難しいといった声も聞かれた。

表現や内容の統一性

藤井・他(2018)[1-12)]は、気象災害に関するハザードマップについて，機関ごとにまた災害種別ごとにバラバラに作成され，凡例やカテゴリーが非統一で表現が異なる問題をあげ、その改善をポータルサイトのひとつの目的にあげている。「火山情報ポータルサイト」においても同様の意義やメリットは意義のひとつとして期待される。

ただし、その際に、火山噴火災害ではすべての火山のすべての現象について、その情報を統一的に整えられるわけではない。中村・橘(2015)[1-13]は植物の侵略性の評価について、「情報があり評価可能」、「情報あるが評価基準について基準を満たさない」、「該当する情報なし」といった評価をポータルサイトに掲載している。情報を見出せなかった時に、そもそも情報があるのか無いのかは、ポータルサイトの使いやすさや評価につながり、また情報が科学的な知見かどうかの評価は、ポータルサイトの信頼につながる。このことから、「評価不能」や「評価基準について基準を満たさない」といった評価も重要との指摘は本ポータルでも大いに参考となるだろう。

同様に、笠田（2015）[1-2]は、ポータルサイトは「非専門家の検索者にとっては質の高い（かつ理解しやすい）情報にアクセスしやすい状況」とすることも重要と指摘している。この質の高さの補償をすることも「火山情報ポータルサイト」の大きな役割であろう。

維持運営について

研究機関や個人の研究者が主となって構築したポータルサイトでは、維持・運営の継続性を指摘する論文は少なくない。たとえば、笠田(2015)[1-2]は、「特定の研究者らの個人的なボランタリー精神に頼るようなコンテンツの更新システムには限界」があり、公的な取り組みを期待しているし、山口(2021)[1-10]は、2021 年 3 月時点で国立国会図書館東日本大震災アーカイブである「ひなぎく」に連携するアーカイブは 53 に増えている一方で、すでに 4 つのアーカイブが閉鎖している厳しい実態を紹介している。

事業期間が限られている場合には、その運営継続に向けた体制整備が求められる。そのひとつの観点として、著作権について福林・他(2020)[1-14]が言及している点は本プロジェクトでも注目に値する。国立国会図書館が韓国国立中央図書館とともに進めている事業では、元資料とともに「解説には個別に著作権がある」ため許諾申請等の手続きが必要となりうるとしている。木村(2022)[1-15]も、二次利用のための著作権についての表記を明示するようにしたとする。本事業で追加したコンテンツが、個人に属するのか、組織に属するのか、変更はどこまで許容されるのかなど著作権については検討が必要である。

菊池・他(2014)[1-16]は、災害の発生を考慮して、システムは障害や急激な負荷変動を考慮すべきで、クラウドが有利としている。大規模噴火時には降灰による通信障害の危険性も残されているが、火山噴火時の使用をも想定している以上は、通信障害や急激な負荷変動に対して検討が必要となる。

更新方法について

ポータルサイトの意義を活かすうえでも、リンク先の修正を確実に実施することが求められる。藤井・他(2018)[1-12]は、国と言う立場から各市町村からの報告に基づき随時そのリンク先の更新を行っているが、それでも適切なホームページにリンクしていないサイトが散見されたという。このことを踏まえ，全ての市町村のホームページについてリンク先が適正かどうかを確認するツールを作成し，誤りがあるサイトのリンク先について修正を行っているという。同時に、更新前の情報をどこまで残すかについても、検討が必要であろう。

iii) 周知啓発用コンテンツの検討

検討方法

周知啓発用コンテンツに対して、昨年度の市町村の防災担当者を対象とした調査では全体的には前向きの回答であったが、在任 4 年目以上の経験者では不十分とする比率が相対的に高かった。火山噴火災害に関する知識や災害対策に関する知識・経験が増えたことから、情報の過不足が分かるようになっている、あるいはその経験から課題を指摘しやすくなっているなど理由が考えられる。少なくとも新任者では「在り方」の評価自体が難しい可能性もある。このため、アンケート調査やヒアリング以外の検討方法も必要となる。また、前項で予想したように防災担当業務の違いによる利用目的の差も想定される。

そこで、消費者の購買行動を分析する質的方法のひとつとして用いられるプロトコル法の採用を検討した。プロトコル法とは、購買時に消費者が自らの行っている行動や判断、考えたことなどを言語化し、その内容から消費者の意思決定過程の特徴を把握しようとする質的研究法のひとつである[1-17)]。具体的な研究の手続きとしては、研究参加者に、店内で購買時に頭に浮かんだこと、見ているもの、考えていることなど全てをテープレコーダーに録音するなどして記録し、後から研究者が内容を分析することが多い。

予備的検討

実際のポータルサイトの分析に、プロトコル法を適用可能かどうか評価するために、予備的にメンバーの中の一人が予備的に実施した。専門は社会心理学で、火山研究の専門家ではない。本ポータルサイトの利用方法のひとつとして想定される避難計画ならびに防災周知啓発を目的と置き、実際の自らの情報探索過程を言語化した。

その結果、後からでは想起しにくい事項が含まれており、ポータルサイトの設計・改良に有効であることが確認された。その一方で、作業には時間と労力を相当程度必要とすることも判明した。したがって、実際の防災担当者に協力を求めるには作業負担を軽減化する必要がある。以下に、「ii)ポータルサイトの開発・運営ならびに利用に関する論点整理」で前述した論点に沿って実際の言語報告例とともに結果を紹介する。

分かりやすさ

先行研究でも指摘されているが、利用者の行動に沿っている情報であると使いやすいと感じるし、興味もわく。文例 1-1 に記録された発現の中で関連する部分を切り出したが、予想したコンテンツが発見できた場合には、好意的に評価している。文例 1-2 も、トップページに「計画策定支援」というカテゴリーがあり、行動目標と合致していることから肯定的な評価となっている。利用者の行動プランに沿っていることはわかりやすさの評価の 1 要素になりうる。

【文例 1-1】: 「まず[防災講演のための情報]に行ってみよう。定義やデータ等基本的な資料があるかも。最初の方に「火山防災教育プログラムの実践」や「火山防災教育プログラムの単元構成」がある、防災授業の完成資料の例か。「雲仙火山とわたしたち(PDF 資料)」そうだね。こういうガイドが最初にあるといいね」

【文例 1-2】: 「 [計画策定支援はこちら]もいいね。[避難確保計画作成の解説資料]や[防災科研の地域防災計画(火山防災関連)一覧]か。こういうのは全体が見えて有難い」

また、前述したように、分かりやすさの要素として、利用者側の慣れた表現や見出しを用いることが推奨されていたが、本ポータルサイトでは、防災行政の用語を用いていることも多く、この点は配慮されていた。たとえば、文例 1-3 に例示した噴石の大きさに関して、火山岩塊や火山礫といった火山学の専門用語ではなく、気象庁が噴火警報等で用いている「大きな噴石」や「小さな噴石」を用いている。ただ、サイト内の資料によって、50cm や 10cm 未満、こぶし大など多様な大きさが紹介されている。元の資料の表現の揺らぎを基礎知識で解説しておくと利用者の安心感は高まるだろう。

【文例 1-3】:　「では、災害を引き起こす要因毎に見てみよう。まず[大きな噴石]を見てみよう」「2 枚目に「直径約 50cm 以上の大きな噴石」とあるが、1 枚目には、大きな噴石は 20～30cm 以上のようだ。正確に記述すると「大きな噴石のうち直径約 50 ㎝以上では」になるのかな？火山岩塊は 64 ㎜以上だし」
「4 頁目に大きな噴石による被害が出ていた。全部が大きな噴石なのか。あれっ、こぶし大は風に流されるとある。大きな噴石ではないよね。小さな噴石でよいの？」
「こぶし大などどれくらい飛ぶのか？人が怪我する噴石はどれくらい飛ぶ？」
「エット、富士山のハザードマップではどうなっているんだろう？」
「噴石は青か。しかし、大きさが分からない。『この範囲外に、まれに 10cm 未満が』とある。こぶし大は、10cm とどういう関係？」

利用者側の慣れという面では、並び順もその一つであろう。たとえば、行政情報では都道府県には慣習的な並び順がある。文例 1-4 のように火山が北から順に並んでいる、あるいは元となる火山データベースの共通の番号順になっていると予測を付けて探しやすい。他方、一定の順に並んでいないと検索中にストレスを感じやすかった。

【文例 1-4】:「火山ごとか。御岳から始まり、北からみたいだ。あれっ 8 頁目に富士山、浅間山、有珠山まである。順番は北からではなく、ばらばらに見える」

多くの情報が掲載されていると、利用者からの信頼感は高まる。その一方で、情報量が多すぎると、非専門家ではどれを選べば良いかわからない。全体像や使い方のガイドがある方が使いやすい。例えば、文例 1-5 のように、富士山のハザードマップは 45 件紹介されている。資料としては貴重だが、防災担当者にはその全部に目を通す余裕があるとは思われない。富士山噴火災害の全体像を知る、あるいは特定の噴火現象についてみるには、あるいは特定の市町村についてみるには、といったガイドやお勧めがあると使いやすさは向上するものと予測される。

【文例 1-5】:「富士山のハザードマップは、No.194 の『富士山火山防災マップ　試作版』から No.238 の「御殿場市の火山防災マップ　試作版」まで、45 種類もあるのか！」

「とりあえず、最初のが「富士山火山防災マップ　試作版」。これでいいか？　でも 2004 年だ。古いぞ。でも、2011 年の方が新しいけど、市町村毎だな。まず、山全体や県単位のまとめがからみたい。お勧めや全体像があると助かる。」

検索方法

階層が深すぎると必要な情報がどこにあるのかが分かりにくい。文例 2-1 に示したように、求める情報にたどり着くまで時間を要していることが、検索のしやすさの評価を下げている。

また、カテゴリー検索とキーワード検索とで結果が変わる事例もあった。たとえば、文例 2-2 に示したように、[火山名から探す]というメニュー・カテゴリーからは富士山のハザードマップを探すことができたが、ハザードマップというキーワード検索では失敗した。カテゴリーから検索していく場合でも、文例 2-3 に示したように、内閣府の災害教訓の継承に関する専門調査会報告書に関して、経路によって検索可能なコンテンツ数に差が出た。文例 2-4 もキーワード検索からは失敗し、かつ利用者からみて最も関係がありそうな関連法令というカテゴリー検索でもたどり着けなかったものが、[業務から探す]の下位カテゴリー[計画策定支援はこちら]から検索できた例である。文例 2-5 に示したように、カテゴリーを細かく設定してしまうと、カテゴリー間の重複が増えたり、割り当て時や逆に検索時に迷う可能性が高まる。

【文例 2-1】:「[箱根]で検索すると出てきた。[火山災害]の 6 頁だ。検索はできるが、[火山災害]から入るとたどり着くまでに時間がかかる。」
【文例 2-2】:「[ハザードマップ]で検索。8 件あった！　北海道駒、浅間、雲仙っと。富士山、富士山ない！」「ハザードマップで検索すると富士山はないな。では[火山名から探す]で探してみるか？」「中部地方の火山、富士山、[ハザードマップ]あった！」
【文例 2-3】:「[火山災害]に行ってみよう。豊富な情報がある。災害教訓の継承に関する専　門調査会報告書も、こちらには全部出ている。つまり、[体験談]からでは 3 火山分にしかたどり着けなかった。どのメニューから入るかで結果は変わってしまうことにある」
【文例 2-4】:「[緊急減災]は必要なのでは？記憶があいまいだから正式法律名は分からない。関連法案を見てみよう。ない。ではキーワード検索してみよう。緊急減災では該当しない。緊急減災計画では。だめか。」
「ホームページの下にある[業務から探す]の中の[計画策定支援はこちら]からはいるとあった！そうか、キーワード付けは重要だが、網羅的に付けるのは大変そうだ。」
【文例 2-5】:「[火山現象]の方にも[火山災害]が入ってくる。ある現象の発生と被害とは結びついている以上は、火山現象と火山災害とは分けることは難しい。」

動画の分かりやすさ

短いクリップを推奨するものが見られた。この面では、本プロジェクトで提供している VolFilm は比較的短い構成となっており、この要件に適合していると言えよう。長尺の防災講演会もあるが、著作権の問題もありクリップに再編集することは難しい可能性もある。この長尺の講演は、内容的に入り口としてのガイドとしては利用可能であろう。

表現や内容の統一性

統一的に構成されていると検索し易く、使いやすい。文例 3-1 のように、火山を通じて同じ構造でコンテンツが配置されていることで、検索しやすく感じた。火山ごとに機械的に貼り付けてしまった方が信頼性は増すことになろう。文例 3-2 のように、地図の活用も使いやすいと考えられる。

【文例 3-1】:「他の火山もチェック。同じ情報構造で分かりやすい」

【文例 3-2】:「磐梯山を引いて、[一覧に戻る]を押すと地図上に火山がある。地方ごとの一覧から検索するよりいいかも。あれ、押すと、一覧に戻って押し直し。とりあえず画面のトップに火山名があるからいいか。」

更新方法ついて

更新に追随するには、文例 4-1 のように、リンク形式の方がメンテは容易ではあるが、それでもすでにリンクが切れてしまっている例も見られた。先行研究の中でも大きな問題とされていた。火山防災協議会ないしは参加市町村数は限られているので、現実的には、定期的に確認せざるをえない。

【文例 4-1】: [○○町地域防災計画]が 2005 年改定は古いな。見てみるとリンクになっていて平成 26 年(2014 年)改訂版を見ることができる。更新が必要な形式よりも、リンクの方が良いかもしれない。」

iv) まとめ

防災機関のヒアリングからみると、関連する火山に関して詳細かつ具体的な情報が求められる。この多様な関心に対応する検索方法としては、カテゴリー検索とキーワード検索とを用いているポータルサイトが多い。ただ、キーワード検索はコンテンツすべてにキーワードを貼り付けるという負担が大きい。また火山学の専門家ではない防災担当者の利用が想定されている本「火山情報ポータルサイト」では、利用者全員が用語を正確に記憶しているわけではない。

このため、カテゴリー検索も用意されている。本ポータルサイトでは利用目的と合致したカテゴリーが用意されており、使いやすい。ただし、経路によって検索の手間や可否に差があることが確認された。カテゴリーはあまり細分化せずに、関連しそうなコンテンツを一覧できる構成は利用者の検索性を高めることにつながると考えられる。その際、網羅性を高めると新任の防災担当者には情報が過多となり可能性もあり、推奨コンテンツや基礎知識解説コンテンツがあると使いやすさは向上するものと予想される。

(b) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

1) 降灰への建物影響に関する数値計算による検討

降灰による被害は、一般には降灰の量の増加に伴ってその程度が大きくなる。ある期間内の降灰の量は、その期間内に降った火山灰の（単位面積当たりの）質量であるが、火山灰の堆積密度を与えることで、降灰量を堆積厚さに変換することができる。降灰被害の想定の多くでは、そうして得られた降灰の堆積厚さが降灰量を表す基本的な尺度として用いられ、インフラや建物をはじめとする各分野の被害と関連付けられている[2-1)]。

富士山や浅間山などは大都市圏に近い火山として、それらの噴火による降灰が大都市に与える影響が懸念されている。被害想定では降灰の堆積深の面的な分布が与えられているが、それらは、例えば降灰予測プログラム Tephra2[2-2)]のような、噴煙柱を発生源とする大気中での火山灰の移流―拡散―重力沈降モデルによって、数 km 程度の水平分解能で格子分割された範囲の降灰量分布が計算される。そこでは、1 辺が数 km 程度ある個々の計算格子の中では降灰は一様であると仮定されている。そのような空間分解能は、気象学におけるいわゆるメソスケール（数百 km 程度の範囲、関東平野全体程度の面的な広がり）の範囲内での、火山からの距離や主風向に対する降灰の分布状況を把握するには十分である。しかしながら、都市域では密集する建物等によって地表面は凹凸に富み、その影響で気流の乱れが大きく、広域の降灰予測の格子よりも小さい空間スケール、すなわち街区などの狭い範囲内での降灰の不均一性（変動）が顕著になると予想される。(図 2-1)

降灰の空間的な不均一性は、地面や屋根への火山灰堆積深さや降下中の火山灰の空間濃度の不均一性となって現れる。本課題において、過年度に屋外設置の空調機器やエアフィルタに対する降灰実験を行ったが[2-3)、2-4)]、こうした空調機器への影響は吸気口からの火山灰の吸引量に依存するので、上空からの降灰が一様であっても機器の設置場所によって、動作に支障の出るタイミングの違いなど、影響の出方に違いが生じる可能性がある。道路への堆積では、通行への支障の大きい箇所、小さい箇所の出現や、屋根への火山灰の堆積では荷重の偏在などの影響が出る。

降灰予想は、被害想定のように、仮定された噴火推移シナリオに対するもの、噴火が進行する途上で逐次的に見通しとして出されるもの、さらにはいくつかの地点での観測・観察などの実績を反映したもの、などがあると考えられる。いずれの場合においても、建物など市街地特有の地面条件による降灰影響の変動幅の目安を得ることは、被害の軽減や、防災担当者の意思決定などに対し有効に働くと思われる。本課題での降灰計算は、そうした立場で行っている。

令和 3 年度は単純な形状をした単体の建物に対し、降灰分布に対する建物影響を数値計算によって調べた。火山灰粒子の慣性力を考慮した降灰計算を行い、粒径や風の条件による建物周りの降灰分布の違いを調べた。本年度（令和 4 年度）は、多数の建物が含まれる場合に拡張し、ひとつの街区を対象に、火山灰粒子の大きさや風の条件の違いを考慮して、市街地における降灰の特徴的な点についての検討を行った。その結果を報告する。

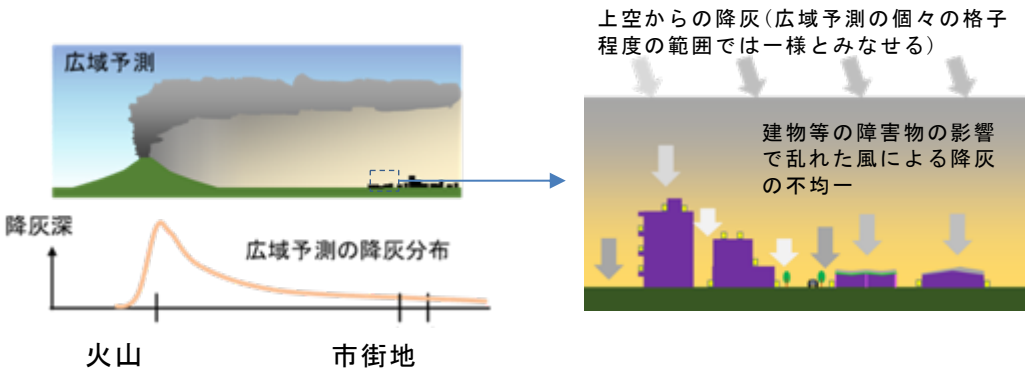
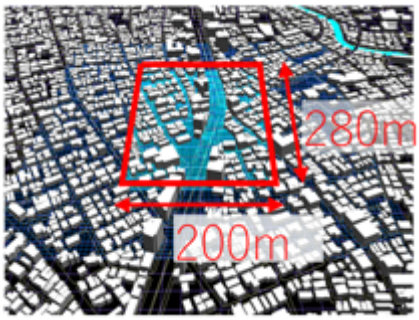


図 2-25 広域の降灰(左)と建物近くの狭い範囲の降灰（右）

a）降灰計算の方法

降灰計算の対象とした街区の概要と計算領域構成を図 2-2 に示す。対象とする街区は、2 階建て住宅程度の低層建物が密集し、その中に高さ 20～30m の中層建物が散在する東西 200m×南北 280m の範囲の実在の市街地を、東西―南北方向ともに水平分解能 2m でモデル化したもので（図 2-2 の赤枠の中)、中央付近を南北方向に幅の広い道路が通っている。赤枠の範囲の外側には、この領域に流入する風を計算するための領域が 2 段階設けられている。これらの計算領域は外から内側に向かって、第１、第２および第３領域と称しており、それらの領域の広さ、高さ、格子分割の分解能は図 2-2 の領域構成に示してある。降灰計算に用いる風の場には、工学分野で多用される、非圧縮のレイノルズ平均流方程式系に標準 k-ε 乱流クロージャモデルで与えられる渦粘性係数を組み合わせた流体計算で得られたものを用いた(後述する式(2)の U_{air})[2-5]。風は、最も外側の領域 1 の側面境界から流入するが、高度方向の風速分布は地上高度 10m で風速 5m/s で、指数 0.2 の高度に関する指数関数に従う分布を与えた（日本建築学会地表面粗度区分 III の気流[2-6]）。風向は 16 風向を考慮した。火山灰は、計算領域上端と風上側面から一様に流入させ、重力落下と気流の影響による降灰分布を計算する。風向は、例えば東京など具体的な地点毎に高頻度（卓越風向)、低頻度の風向があるが、どの風向も発生する可能性はあるため 16 風向全てを対象とすることにした。ちなみに、日本が位置するような中緯度地方では高度数 km 以上になると西寄りの風が卓越するが、低い高度では気圧配置によりどのような風向も出現し得る。上空で西寄りの風で移流してきた火山灰が重力沈降で低い高度に降りてくると、低い高度での風に流されるようになる。そのため、全ての風向を考慮する必要がある。



計算領域構成

	東西	南北	水平解像度
領域1：	1.2km	×1.2km	24m
領域2：	480m	×480m	6m
領域3：	200m	×280m	2m

領域高さ:500m
鉛直分解能 1m（z=0～40m）
高度40m以上は比例的に増加

図 2-26 街区のモデル化（左）および計算領域構成（右）

降灰計算の基礎式は、表 2-1 に示すように火山灰の粒径別の空間濃度の移流拡散式と運動方程式とからなる。気流との間の空気抵抗の抗力係数には、Reynolds 数に依存する近似式[2-7]を用いた。粒子は球形と仮定されているが、抗力係数には扁平の度合いによる補正も含まれる。火山灰粒子の運動方程式を導入したのは、気流と粒子との間の重力落下以外の流れ場のずれを考慮するためである[2-8]。建物近傍では気流の空間的変化が大きく、慣性力の影響で粒子の流れは気流の変化に必ずしも追随せず、その程度は慣性力や空気抵抗を特徴づける粒子の大きさや質量の違いによって異なるからである。これらは、空間濃度や降灰分布の粒径依存性につながる。対象とする火山灰粒子の粒径は 62.5、125、250、500、1000、2000μm とした（ファイスケールで、-1～+4）。式(2)の左辺および気圧勾配をゼロとすると、粒子の速度の鉛直成分は終端落下速度に等しくなる。

以下に示す結果では、地表への降灰強度(下向き火山灰質量流束密度 $F_{ash}=C_D w_D$ (kg/m^2/s)、 w_Dは粒径 D の火山灰粒子速度の鉛直成分)や空間濃度(kg/m^3)は、全て計算領域上端でのそれらに対する比率(無次元量)として与える。すなわち、建物の無い平坦平面上の降灰に対する比率であるといえる。広域の降灰予測の各格子セル内を一様とみたときに、その中のさらに小規模な変動を見ていることになる。

表 2-1 降灰計算の基礎式と記号

（空間濃度の保存式）
$$\partial_t C_D + \nabla \cdot C_D \boldsymbol{U}_D = \boldsymbol{D}_{iff}(C_D) \quad (1)$$

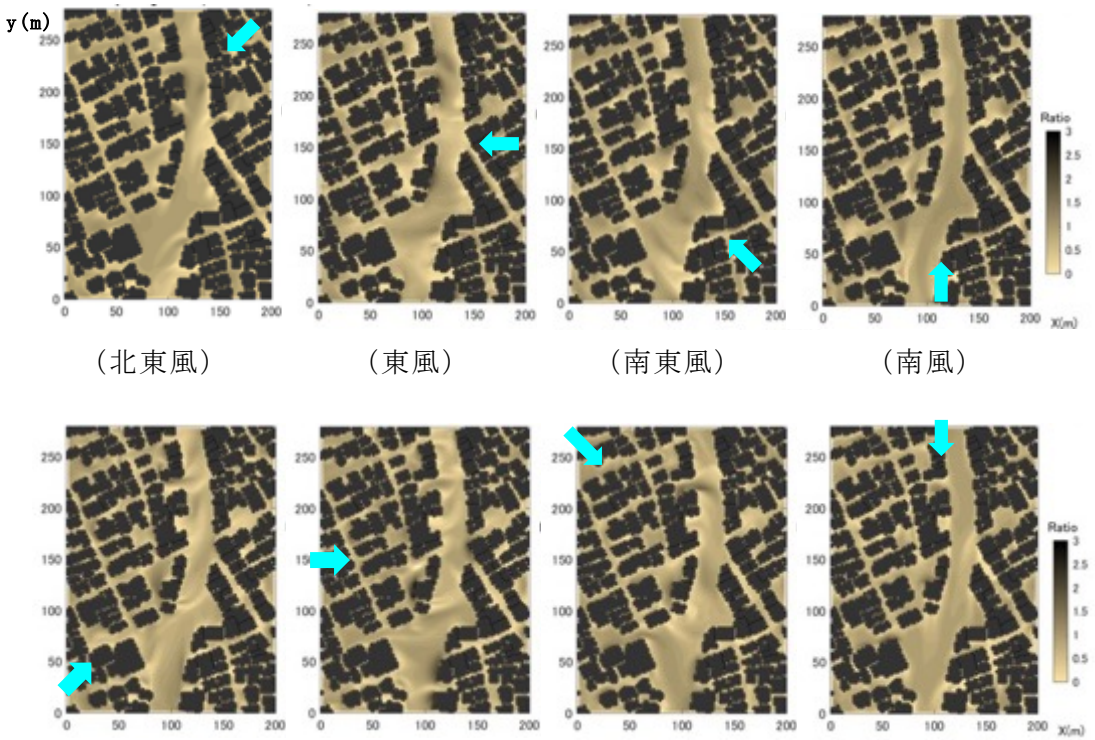
（火山灰の運動方程式）
$$m_D(\partial_t \boldsymbol{U}_D + \boldsymbol{U}_D \nabla \boldsymbol{U}_D) = -\nabla p_{air} - (m_D - m_{air})\boldsymbol{g} \quad (2)$$
$$-0.5\rho_{air} C_{drag}(Re) A |\boldsymbol{U}_D - \boldsymbol{U}_{air}|(\boldsymbol{U}_D - \boldsymbol{U}_{air})$$

（記号の意味）

∂_t:局所時間微分、 ∇:勾配演算子、$\nabla\cdot$:発散演算子、 D: 粒径、 C_D :粒径 D の粒子の空間濃度(kg/m^{-3})、 $\boldsymbol{g}$: 重力加速度、 $\boldsymbol{U}_D$:粒径 D の粒子の速度(重力落下含む)、 m_D :粒径 D の粒子の質量、 m_{air}:粒径 D の粒子と同体積の空気の質量、 A:粒子投影面積、 $\boldsymbol{U}_{air}$:気流速度、 ρ_{air}:空気密度、 C_{drag}抗力係数、 Re:粒径と粒子-気流相対速度による Reynolds 数、火山灰粒子密度:2600kgm^{-3}

b）街区に対する降灰の特徴

火山から遠隔にある地域で、多くあり得る程度の火山灰粒子の大きさである粒径 125μm の粒子について、8 つの風向(北東、東、南東、南、南西、西、北西、北)に対する地面降灰強度分布（無次元量）を図 2-3 に示す。水色の矢印は風向を表している。図中の黒いハッチは建物である。建物と建物との間は道路あるいは駐車場などの広場である。図のほぼ中央を南北（上が北）に走る建物のない部分は幅の広い幹線道路である。ここでの計算では、地面や屋根にいったん堆積した火山灰の風による再飛散はまだ含まれておらず、次の段階での検討課題である。図 3 では、建物による降灰強度のむらが明瞭に認められる。いすれの風向でもだいたいにおいて、降灰は建物の風上側で相対的に強く、風下側で弱い傾向が見られる。これらの傾向は、幅の広い道路や広場に接する建物の周りでよりはっきりと認められる。幅の広い道路では場所や風向により降灰が不均一になるのがわかる。



（北東風）　（東風）　（南東風）　（南風）

（南西風）　（西風）　（北西風）　（北風）

図 2-3 粒径 125μm についての 8 つの風向に対する地表面における無次元降灰強度（図の横軸と縦軸の数字は距離(m)、カラースケールの ratio は無次元の比率を表す）

西風の場合の地面における無次元降灰強度を粒径 62.5、250、500、1000、2000μm について図 2-4 に示す。粒径 125μm は、図 2-2 の西風の図と同じであるため、図 2-4 では割愛してある。

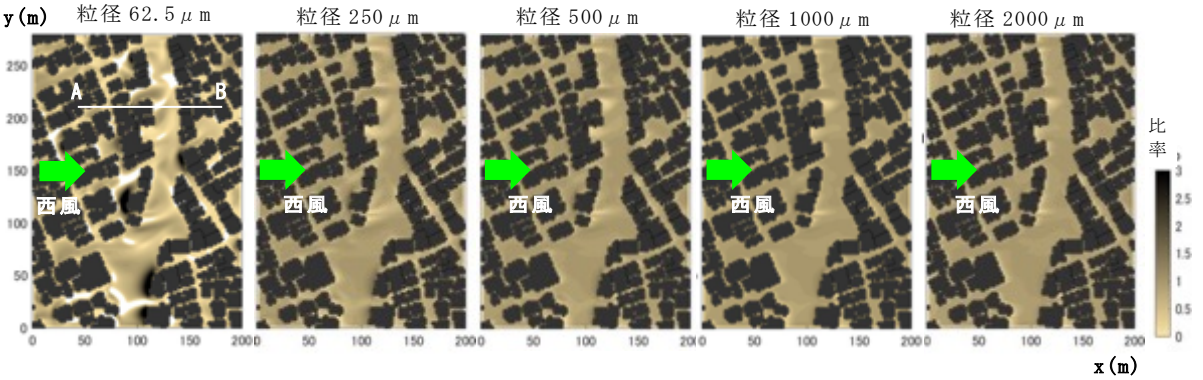


図 2-4 西風の場合の粒径 62.5、250、500、1000、2000μm に対する無次元降灰強度
（125μm は、図 2-2（西風）参照）

降灰強度の不均一性は粒径 62.5μm が最も顕著であり、粒径が大きくなるにつれて一様性が増している。62.5、125（図 2-3 西風）、250μm では降灰強度の正負の変動が建物の風上、風下に広く広がっているが、500～2000μm では、図では判別しづらいが、それらは建物に近接した部分に次第に集中するようになる。こうした傾向は、粒径による落下速度の違いや粒子の慣性力の影響によるものであるが、同じ密度の粒子では粒径が大きいほど気流の変化に対して応答しづらくなるため、ここで対象とした粒子で最も大きい 2000μm が地表への降灰強度分布は最も一様性が高くなっている。

粒子の大きさの違いによる降灰強度や空間濃度の違いをみるため、図 2-4(62.5μm)の直線 A-B に沿った東西-鉛直断面内の火山灰の空間濃度（無次元空間濃度）、および気流と火山灰粒子の速度ベクトルを粒径 125μm、2000μm について図 2-5 に示す。ベクトルは気流が赤色、火山灰粒子が水色である。風は東風である。粒径 125μm では空間濃度の低い範囲が建物風下側に大きく広がっている。中央の大きな建物の東側(風上)では、建物に衝突して生じる下向きの気流に乗るように火山灰も下向きに流れ、さらに、地面付近で気流の向きが建物から離れる向きに変化しても、火山灰はその変化に追随している。濃度分布は火山灰のそうした流れを反映したものとなっている。一方、粒径 2000μm では、中央の建物東側の気流の変化にあまり乗ることなく、上空から東風に乗りながら降下してきたまま建物に衝突する向きに流れている。こうした大きな粒子の気流の影響を受けにくい運動を反映し、空間濃度は東側外壁に沿って高濃度であり、風下側（西側）の低濃度の部分も 125μm のものより狭い。建物の東側は道路であるが、粒径の違いによる道路上への降灰強度の違いが図から推察される。建物周りのこうした傾向は、令和 3 年度に実施した単体建物の周りの降灰分布に見られた特徴と調和的である。

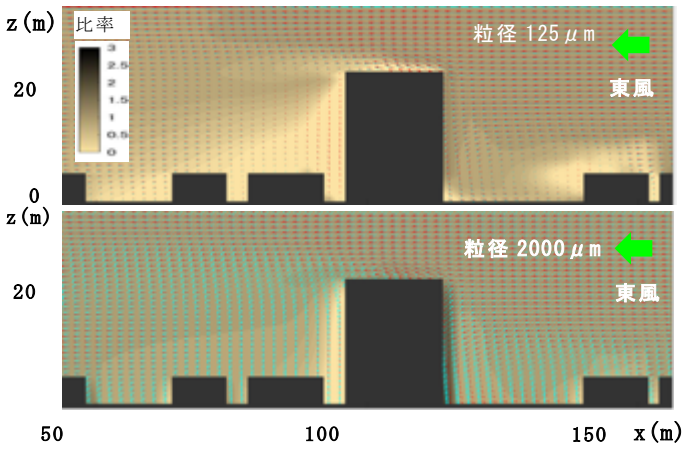
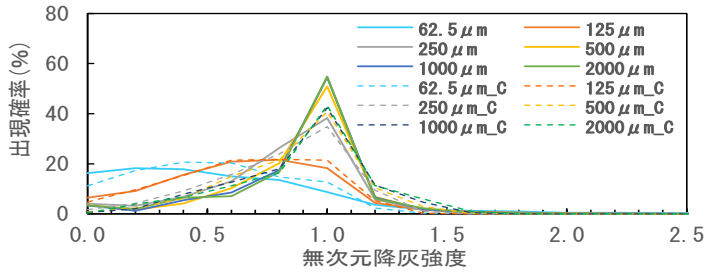


図 2-5 東西-鉛直断面内(図 2-4 の直線 A-B 上)の火山灰の無次元空間濃度、気流(赤)および粒子(水色)の速度ベクトルの分布

iii) 降灰強度および空間濃度の出現頻度（不均一性の度合い）

街区における降灰の不均一性の程度を見るために、地面(建物がない部分)での無次元降灰強度、地面および建物側面・屋上に接する計算格子セル内の空間濃度の出現確率を調べた。地面降灰強度では、建物の無い部分における地面上１番目の格子セルの降灰強度の出現確率（%)、空間濃度については建物の無い部分の地面直上の格子セルに加え、建物外壁に接する格子セルにおける空間濃度の出現確率（%）である。空間濃度は空調設備への降灰影響に対する重要な量であるため[2-3)]、 濃度出現率は機器が設置されることの多い外壁や屋上に接する格子セルも対象に含めた。西風の場合について、今回考慮した６つの粒径に対する結果を図 2-6 に示す。実線は地面での降灰強度、破線は地面および建物外壁における空間濃度、それぞれの出現確率である。出現確率は、横軸の値 0.0～0.1、0.1～0.3、0.3～0.5、・・・、0.9～1.1、1.1～1.3、1.3～1.5、・・・のように、0.2 の刻み幅毎に頻度が求められている。降灰強度、空間濃度のいずれも粒径が小さい方ほど確率分布が裾広がりになっており、不均一の度合いが大きくなることを示している。一方、粒径 250μm 以上では、比率が 1.0（0.9～1.1 の区間）でピークを持ち、さらに 500μm 以上の粒径ではそのピークがより尖っている。無次元降灰強度、空間濃度ともに 1.4（1.3～1.5 の階級）を超える値まで数～10%程度の出現頻度がある。



無次元降灰強度(実線)および空間濃度（破線）（出現率は 0.2 刻みで計算）

図 2-6 降灰強度および濃度の出現確率の粒径による違い(西風の場合)

出現頻度に対する風向の影響を見るために、16 風向に対する地面降灰強度と地面および建物近傍の空間濃度の出現確率を、粒径 125μm、2000μm について図 7 に示す。図には、16 風向それぞれの頻度分布が重ねて描いてある。図の横軸である無次元量の範囲(0.0～2.5)で、降灰強度、空間濃度ともに 16 本の折れ線の最大、最小の差は最大で 10%程度に収まっている。これから、風向による出現確率の差はあまり大きくないといえる。ただし、この結果は単純には一般化できないと考えられる。今回対象とした街区は、建物の大きさや高さが比較的揃っており（2 階建て住宅などの低層建物の密集地に最高で 20～30m の中層建物が散在)、超高層建物など、建物単体で周囲に与える影響が風向によって大きく変化するような建物が含まれていないのが、要因のひとつと考えられる。降灰強度、空間濃度いずれも 1.5 を超える部分があり、広域予測に対して少なくともこの程度までは、降灰に関係する量の幅を見る必要があることを示している。

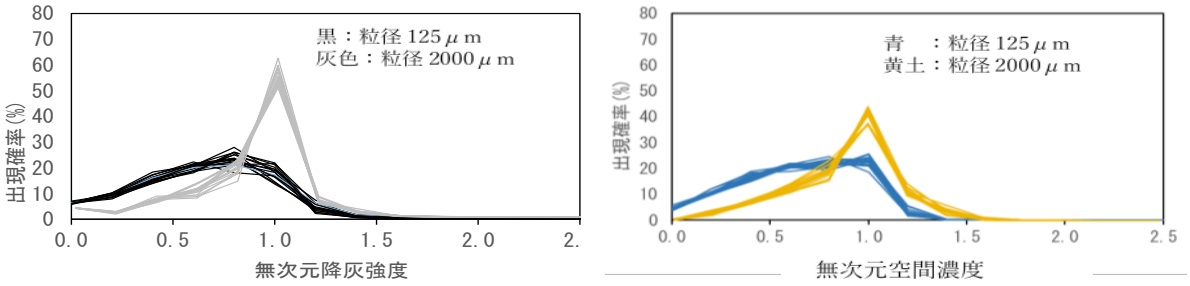


図 2-7 降灰強度・空間濃度の風向別の出現確率（16 風向分の重ね書き）

iv)まとめ

令和 4 年度は、降灰の都市機能への影響の観点から、複数の建物が存在する街区を対象に、建物による降灰強度、火山灰空間濃度の不均一性の度合いについて、数値計算によって調べた。都市域では建物などの障害物による風（気流）の乱れにより、地面への降灰強度や空間濃度などの降灰分布の不均一性が大きくなる可能性がある。例えば東京などでは、年間で風のない静穏の割合は極めて低く、常に何らかの風が吹いている。過年度に行った降灰実験では、機器の動作への影響と降灰量との関係が調べられたが、そこでは機器は平坦面に置かれ、上空から垂直に一様な降灰があるという状況（無風時の降灰）が仮定されていた。しかし、上空の降灰が一様であっても地面近くでの降灰の不均一性により、機器の動作に支障が出るタイミングや影響の度合いが、その設置場所によって異なったものになる可能性がある。

今年度の降灰計算は、低層建物が密集し、その中に中層建物が散在する街区を対象に行われ、地表面への降灰強度や火山灰空間濃度の分布が調べられた。これらは、建物のない一様な降灰に対する比率として無次元化し、無次元降灰強度、無次元空間濃度として表した。結果は次のように要約される。

・建物は市街地での降灰強度や空間濃度などの降灰分布に大きく影響する。その程度は粒径によって異なっている。(図 2-3、図 2-4)

・降灰強度や空間濃度の大きさの空間的な出現頻度（出現確率）を求めた結果、粒径が小さいほど確率分布の裾が広く、分布の不均一性が大きくなることがわかった。一方、粒径が大きくなるほど、出現確率分布は 1.0 にピークを持つ、より尖った形になる傾向があった（図 2-6)。頻度分布から、建物無しの状態に対し、1.5 倍程度の降灰となる箇所が現れる可能性が示唆された。
・出現確率分布に対する風向の影響を見るため、気流 16 風向について頻度分布を調べた。その結果、風向への依存性はあまり大きくはなかった（図 2-7)。今回対象とした街区が比較的揃った大きさの建物からなり、超高層建物のような大きな建物が含まれないことが、風向への依存性が大きくないことの要因のひとつと考えられる。
・計算対象街区の中央には幅の広い道路が南北に走っているが、道路への降灰強度は風向により、道路上で降灰の多い側、少ない側が異なって現れることがわかった（図 2-4)
・降灰強度や空間濃度は、建物風上側で大きく、風下側で小さくなる傾向が明瞭にみられた（図 2-5)。その程度は粒子の大きさに強く依存しており、粒子の慣性力が関係しているためと考えられる。そのため、例えば過年度に扱った空調機器への影響では、影響の程度が降灰時の風向に少なからず依存する可能性が示された。
・今回の計算では含まれていない建物屋根への降灰、降灰強度と降灰深さとの関連付け、風による火山灰の再飛散の影響の考慮、高層建物を含むなど複数の街区パターンを対象とすること、などが次の段階の課題である。

2）降灰荷重による建物屋根への検討

富士山の宝永噴火を想定した降灰シミュレーション[2-9)]によると、首都圏においても火山灰の最終堆積厚が約 10cm を超過しており、木造建物などの屋根を対象に部材が短期許容応力度に達した時点の積灰深などが検討されている[2-10)～2-13)]。

今年度は、2021 年度に実施した鉄骨造地上 1 階倉庫の屋根の検討結果を参考に、1 層 1 スパンの柱梁ラーメン構造物を対象に、降灰荷重を含んだ鉛直荷重が梁に作用したときに梁端に生じる曲げモーメントを定式化する。つぎに、梁に生じる曲げ応力度と梁の短期許容曲げ応力度を比較して限界降灰深の定式化を行う。

a）鉛直荷重により柱梁ラーメン構造物に生じる応力

降灰荷重を含んだ鉛直荷重Wが柱梁ラーメン構造物の梁に等分布に作用するとき、図 2-8 となる。このとき、梁端に生じる曲げモーメント M_G を定式化すると(1)式となる。

$$M_G = \frac{1}{4} W L^3 \times \frac{1}{2SH + 3L} \tag{1}$$

$$W = G + P + A \tag{2}$$

ここに、Ｌ：スパン長さ、Ｈ：階高

Ｓ：柱に対する梁の断面 2 次モーメント比

Ｇ：固定荷重、Ｐ：積載荷重、Ａ：降灰荷重

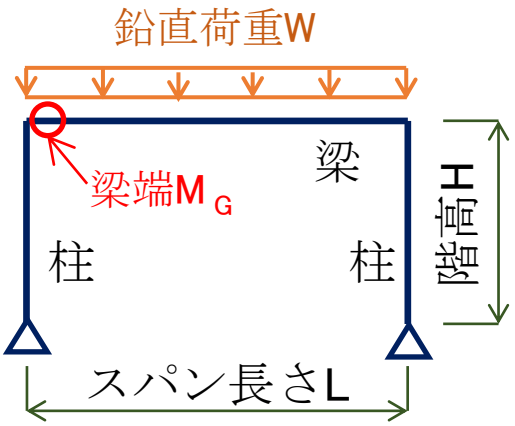


図 2-8　柱梁ラーメン構造物に作用する鉛直荷重（基準モデル）

柱梁ラーメン構造物のスパン長さが図 2-9 に示すように変化したとき、梁端に生じる曲げモーメント M_{G2} を定式化すると(3)式となる。

$$M_{G2} = \frac{1}{4} W(g \times L)^3 \times \frac{1}{2(\beta \times S)H + 3(g \times L)} \tag{3}$$

ここに、g：スパン長さの係数

β ：柱に対する梁の断面 2 次モーメント比の係数

このとき、基準モデルの曲げモーメント M_G に対する M_{G2} の比率 r を計算すると図 2-10 となる。

$$r = \frac{M_{G2}}{M_G} \tag{4}$$

梁端に生じる曲げモーメントは、スパン長さが長くなるに従い大きくなる。また、スパン長さが同一のとき、柱に対する梁の断面 2 次モーメント比が大きいほど梁端の曲げモーメントは小さくなることがわかる。

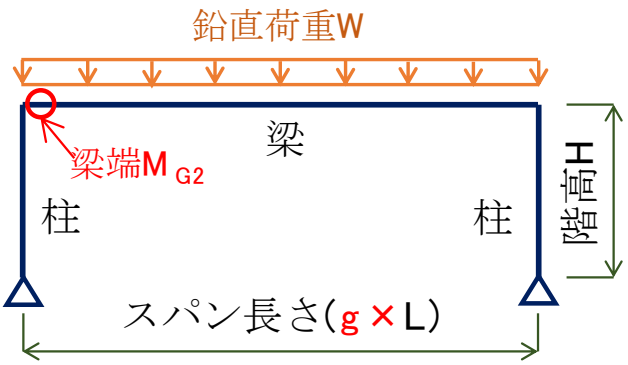


図 2-9　柱梁ラーメン構造物に作用する鉛直荷重（スパン長さが変化したとき）

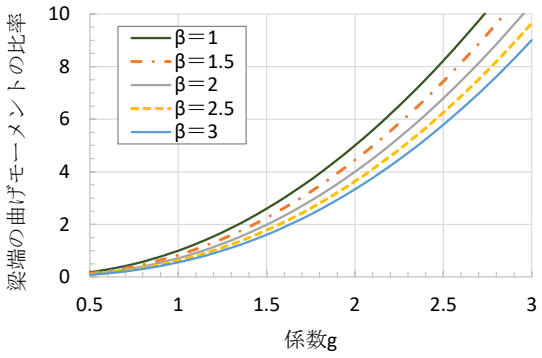


図 2-10　係数 g と梁端の曲げモーメントの比率の関係

つぎに、柱梁ラーメン構造物の階高が図 2-11 に示すように変化したとき、梁端に生じる曲げモーメント M_{G3} を定式化すると(5)式となる。

$$M_{G3} = \frac{1}{4} W L^3 \times \frac{1}{2(\beta \times S)(c \times H) + 3L} \tag{5}$$

ここに、c：階高の係数

同様に、基準モデルの曲げモーメント M_G に対する M_{G3} の比率 r を計算すると図 2-12 となる。梁端に生じる曲げモーメントは、階高が高くなるに従い小さくなる。また、スパン長さが同一のとき、柱に対する梁の断面 2 次モーメント比が大きいほど梁端の曲げモーメントは小さくなることがわかる。

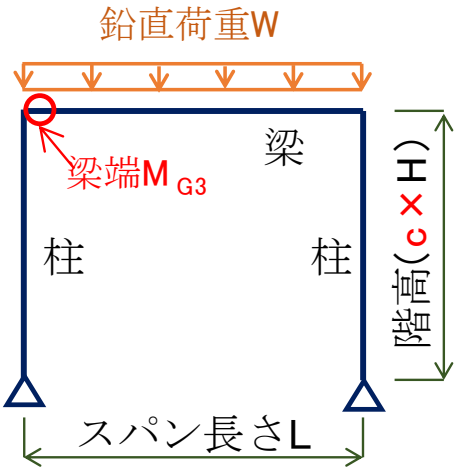


図 2-11　柱梁ラーメン構造物に作用する鉛直荷重（階高が変化した時）

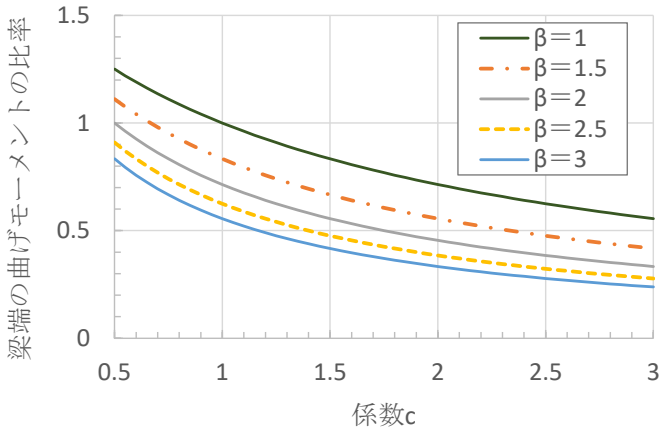


図 2-12　係数 c と梁端の曲げモーメントの比率の関係

b）柱梁ラーメン構造物の限界降灰深の評価法

降灰荷重を含んだ鉛直荷重Wが柱梁ラーメン構造物の梁に等分布に作用するとき、梁に生じる曲げ応力度 σ_G は次式より計算される。

$$\sigma_G = \frac{M_G}{Z} \tag{6}$$

ここに、Z：断面係数

一方、梁の短期許容曲げ応力度を f_b、余裕率を a とすると、

$$a \times f_b \geq \sigma_G$$

のとき、梁に生じる曲げ応力度は余裕率を考慮した短期許容曲げ応力度以下となり安全となる。このため、

$$a \times f_b = \sigma_G \tag{7}$$

として限界降灰深の定式化を行うと(8)式となる。柱と梁の断面特性と基準強度などが決定されると、限界降灰深が(8)式より求められる。

$$d_a = \frac{\left\{4 \times (a \times f_b) \times Z \times \left(\frac{2SH + 3L}{L^3}\right) - N\right\}}{\rho_a} \tag{8}$$

$$N = G + P \tag{9}$$

ここに、a：余裕率

f_b：梁の短期許容曲げ応力度

Z：梁の断面係数

ρa：火山灰の単位重量

なお、梁の短期許容曲げ応力度 f_b は、鉄骨造では鋼材の種類などに応じて横座屈の影響を考慮して定められる[2-14)]。横座屈とは、梁の強軸に曲げモーメントを受ける部材が軸対象から逸脱したねじりを伴った変形を弱軸に生じる座屈現象をいう。

c）まとめ

1 層 1 スパンの柱梁ラーメン構造物を対象に、降灰荷重を含んだ鉛直荷重が梁に作用したときに梁端に生じる曲げモーメントを定式化した。そして、柱梁ラーメン構造物のスパン長さ、階高ならびに柱に対する梁の断面 2 次モーメント比をパラメータとして、梁端に生じる曲げモーメントの特性について検討した。つぎに、スパン長さ、階高ならびに柱に対する梁の断面 2 次モーメント比などを用いて梁に生じる曲げ応力度を計算し、梁の短期許容曲げ応力度と比較することにより柱梁ラーメン構造物の限界降灰深を定式化した。

3）病院の機能被害

富士山の大規模噴火では、東京都心部でも 10cm 程度の降灰が想定されており、降灰による都市機能への影響[2-15)]が懸念されている。このため、災害時に重要な役割を担う病院を対象に、大規模噴火時における病院の機能被害について検討することにした。しかし、これまでの降灰による被害事例を調査しても、病院への機能被害は殆ど見られない。火山噴火が頻繁に発生している鹿児島市でもヒアリング調査を行ったが、最近は降灰量も比較的少なく、病院の機能被害が発生したとの報告は殆ど無い。このような背景を踏まえ、東北地方太平洋沖地震における医療施設被害データ[2-16)]に着目し、災害時における病院の機能被害について検討する。

a）東北地方太平洋沖地震における医療施設被害

医療施設被害の調査文献は、病院の被害対策を推進するための基礎資料を得ることを目的として、平成 23 年度厚生労働科学研究「大規模災害に対応した保健・医療・福祉サービスの構造、設備、管理運営体制等に関する研究（研究代表者・筧淳夫・工学院大学)」の分担研究として、研究分担者・山下哲郎・工学院大学が実施したものである[2-16)]。

調査対象は、48 病院・施設である。対象地域は、福島県、茨城県、宮城県、岩手県、青森県であり、施設の被災状況等、震災による影響をヒアリングにより調査したものである。調査方法は、建築・設備のハード的な側面と、運営やマニュアルに関するソフト的な側面の両方で実施されている。調査項目は、表 2-2 となる。

表 2-2　調査項目

Ⅰ	病院概要
Ⅱ	被災の一般状況
Ⅲ	建築・構造の状況
Ⅳ	設備の被害と復旧状況－建築設備・医療設備
Ⅴ	医療機器の被害と復旧状況
Ⅵ	サービスの展開
Ⅶ	サービス－給食、選択、家族への対応
Ⅷ	物資の補給・廃棄
Ⅸ	防災対策
Ⅹ	被災に際して病院として何が問題になったか

文献の調査項目に基づき病院の被害原因を表 2-3 に示すように分類し、調査報告文をもとに被害の程度を、「被害無し」、「一部被害有り」、「被害有り」に区分した。

表 2-3　病院の被害原因と被害の程度

		要素	被害の程度
躯体	躯体	ひび割れ、剥離など	被害無し、一部被害有り、被害有り
		地盤沈下	被害無し、一部被害有り、被害有り
仕上げ	ガラス、照明器具	天井など	被害無し、一部被害有り、被害有り
	その他取付け器具	スプリンクラー、モニタなど	被害無し、一部被害有り、被害有り
	家具、棚		被害無し、一部被害有り、被害有り
	ベット、ワゴン		被害無し、一部被害有り、被害有り
建築設備	電力設備、非常電源	受変電設備	被害無し、一部被害有り、被害有り
		非常用発電機	被害無し、一部被害有り、被害有り
	給水、排水設備	受水槽、高架水槽	被害無し、一部被害有り、被害有り
		給水設備（配管、井水）	被害無し、一部被害有り、被害有り
		排水設備	被害無し、一部被害有り、被害有り
	熱源設備	ボイラ	被害無し、一部被害有り、被害有り
		熱電機器	被害無し、一部被害有り、被害有り
	空調設備		被害無し、一部被害有り、被害有り
	電話、通信設備	固定電話	被害無し、被害有り
			復旧日
		携帯電話	被害無し、一部被害有り、被害有り
			復旧日
		インターネット	被害無し、一部被害有り、被害有り
			復旧日
		衛星電話など	被害無し、一部被害有り、被害有り
			復旧日
	EV		被害無し、一部被害有り、被害有り
			復旧日
消火設備	消火設備	スプリンクラーなど	被害無し、一部被害有り、被害有り
ライフライン	水	上水	被害無し、一部被害有り、被害有り
			復旧日
		下水	被害無し、一部被害有り、被害有り
			復旧日
		高架水槽、受水槽、井水	被害無し、一部被害有り、被害有り
	電気	商用電気	被害無し、一部被害有り、被害有り
			復旧日
		非常用発電機	被害無し、一部被害有り、被害有り
	ガス	都市ガス	被害無し、一部被害有り、被害有り
			復旧日
		その他（プロパンガスなど）	被害無し、一部被害有り、被害有り
	重油、灯油	非常用発電機などに使用	被害無し、一部被害有り、被害有り
	その他	道路、鉄道、通信など	被害無し、一部被害有り、被害有り

つぎに、文献の調査項目に基づき病院の機能被害を表 2-4 に示すように分類し、調査報告文をもとに機能被害の程度を、「可能」、「一部可能」、「不可」等に区分した。

表 2-4　病院の機能被害と機能被害の程度

		要素	機能被害の程度
病院の機能	医療ガス	液酸（CE）タンクなど	稼働、一部稼働、停止
			復旧日
	病棟、ICU	病棟	稼働、一部稼働、停止
		ICU、透析	稼働、一部稼働、停止
	放射線関係	レントゲン、CT、MRI	稼働、一部稼働、停止
	手術部門		稼働、一部稼働、停止、設置無し
	検査関係	検査機器（内視鏡など）	稼働、一部稼働、停止
	その他	透析など	稼働、一部稼働、停止
		情報システム（電子カルテなど）	稼働、一部稼働、停止、設置無し
	医療スタッフ	通勤	可能、一部可能、不可
		医療体制	可能、一部可能、不可
	災害医療	トリアージ（外来）	可能、一部可能、不可
		患者受入（搬送、他病院からの受入など）	可能、一部可能、不可、対応無し
		医療支援（避難所、保健所、他病院など）	可能、一部可能、不可、対応無し
		透析	可能、一部可能、不可、対応無し
		手術	可能、一部可能、不可、対応無し
		薬剤	可能、一部可能、不可、対応無し
		検査	可能、一部可能、不可、対応無し
		放射線	可能、一部可能、不可、対応無し
		食事	可能、一部可能、不可、対応無し
		DMATからの支援受入	可能、一部可能、不可、対応無し
	入院患者	患者の避難（外部など）、院内移動	可能、一部可能、不可、対応無し
		患者の他病院への転院	可能、一部可能、不可、対応無し
	外来患者	受入（透析など）	可能、一部可能、不可、対応無し
		トリアージ	可能、一部可能、不可、対応無し
	薬剤	投薬	可能、一部可能、不可、対応無し
	診療材料	医療材料（手術、透析など）	充足、一部充足、不足
		衛生材料（リネンなど）	充足、一部充足、不足
	食材	給食、非常食など	充足、一部充足、不足

b）病院の被害と病院の機能被害の対応関係

災害時における病院機能として、災害医療に着目する。災害医療の項目は、トリアージ（外来)、患者受入（搬送、他病院からの受入など)、医療支援（避難所、保健所、他病院など)、透析、手術、薬剤、検査、放射線、食事、DMAT からの支援受入とする。このとき、ライフラインの被害状況（上水、電気）ならびに医療スタッフの対応状況（医療スタッフの通勤、医療体制）と、災害医療の対応関係について検討する。

一例として、上水の被害有りと災害医療の対応関係は図 2-13 となる。ここで、上水の被害有りは、表 2-3 の被害の程度において「一部被害有り」と「被害有り」を対象とする。手術を見ると、一部可能と不可の病院を合計すると約 50%となり、上水の被害による影響を大きく受けている。また、食事も約 50%の病院で不可となり影響を受けている。ただし、災害時においては非常食による対応等により、食事が全く提供されなかったわけではない。つぎに、透析では、上水の被害有りの場合でも約 80%の病院で可能になっている。これは、ヒアリング調査が透析の可否を直接的に質問していないため、問題無し等の回答は可能と判定したことが考えられる。また、透析の可否が不明の病院も多数有り、不明の判定法は今後の課題となる。ヒアリング結果を見ると、上水が停止したため、透析が不可になったあるいは控えた等の回答が有った。また、水の補給を受けて透析を継続した回答も有った。従って、透析において上水の供給は必要不可欠と考えるべきである。

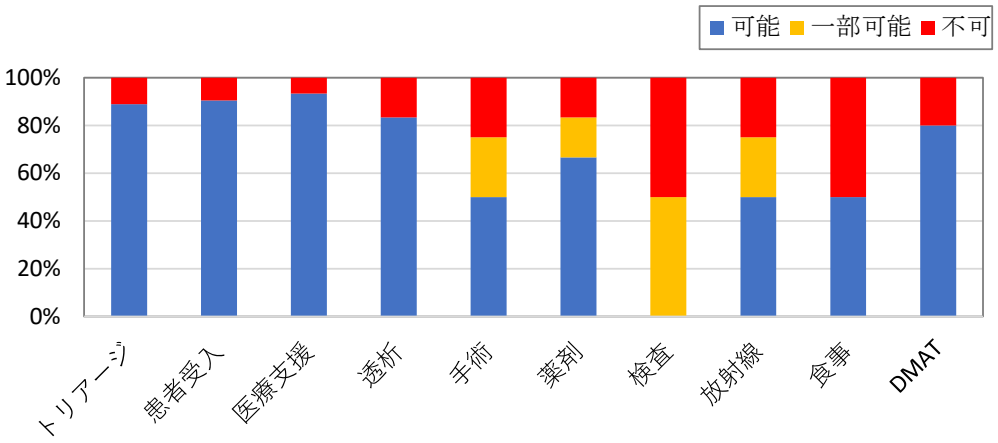


図 2-13　上水の被害有りと災害医療の対応関係

c)　まとめ

東北地方太平洋沖地震における病院機能の被害分析を行った結果、以下の知見が得られた。

・上水の供給は透析などで必要不可欠となり、病院の機能維持において上水の供給が重要となる。

・電気の被害は、手術や検査などほぼ全ての災害医療に影響を及ぼすことがわかった。ただし、非常用発電機を設置している病院が多く、商用電気が停止した後の災害医療の継続に大きく貢献したことがわかった。

・医療体制は、医療スタッフの通勤の可否により影響を受ける。ただ、各病院では日頃より災害時の体制に備えており、今回の地震災害では病院間の協力、DMAT、自治体、消防、自衛隊等の援助により医療体制を維持し、災害医療を可能な限り継続したと考えられる。

今回の被害分析は地震災害によるものであり、地震の大きな揺れによる建物被害や機器の破損等が病院の機能に影響を与えた。一方、火山災害では降灰が広範囲に及ぶことで、上下水や電気などのライフラインや交通等への影響が懸念される。また、浄水施設への降灰による水質の悪化や、送電システムにおいては広範囲に漏電が発生することで復旧には時間がかかることが予想される。このように、病院の被害発生は地震と火山で異なる部分があるものの、病院の被害と病院の機能被害の関係は災害の種類に依らず共通した部分が多いと考えられる。今後、病院の被害と病院の機能被害の関係を統計的に分析し、降灰による病院の被害が与えられた条件のもとで病院機能の被害確率関数の作成に向けて検討する必要がある。

4）阿蘇カルデラ内における降灰被害評価

平成３年度は伊豆大島の最近 1500 年間に起きた約 26 噴火の公表されている降灰データを用いて、噴火ごとに自動で層厚コンタを作成し、島内任意の地点（特に島内の主要設備拠点）について、26 噴火の層厚を計算し、被害カーブ（層厚と年超過確率）を作成した。本年度は、同様に多くの噴火の降灰データがある阿蘇山について同様の検討を実施した。特に、本年度は離散型降灰データから自動コンタを描くマニュアルを作成することを目的とした。

今年度は熊本大学宮縁育夫氏がこれまでに公表している阿蘇火山過去３万年前から 2019 年までの 53 噴火の降灰分布図地点データ[2-17～19]などを対象にした（表 2-5)。まず、文献の原図を GIS 化し、降灰量調査地点と層厚コンターの GIS 化を行った。火口位置についてはプログラムで降灰データから推定できるが、明らかな場合には、誤差を少なくするため既知の値を与えた。

表 2-5　離散型降灰データを使用した阿蘇火山 53 噴火の文献と年代、噴出量等一覧

	論文	テフラ	単位	Age (Ka)	mass (10^4 ton)	volume (km3)
1	宮縁ほか（2000）	Ikph1	thickness	4.5		0.00013
		Ikph2	thickness	10		0.00019
3	宮縁ほか（2004）	YmS18	thickness	22–21		0.38
		YmS10	thickness	18–16		0.02
		NbP1	thickness	18–16		–
		YmS7	thickness	18–16		0.02
		YmS5	thickness	18–16		0.03
		YmS4	thickness	18–16		0.03
		YmS3	thickness	18–16		0.1
		YmS1	thickness	18–16		0.68
4	宮縁ほか（2005）	July 10,2003	mass/ares	–0.00352	0.0041	
		January 14,2004	mass/ares	–0.00404	0.0032	
5	宮縁ほか（2007）	July 25,2005	mass/ares	–0.00547	0.00012	
		June 21,2005	mass/ares	–0.00557	0.00042	
6	Miyabuchi et al.(2008)	April 14,2005	mass/ares	–0.00529	–	
7	宮縁ほか（2008）	Mid-February,2008	mass/ares	–0.00809	0.0002	
8	Miyabuchi(2009)	ACP1	thickness	4.1		–
		YmS20	thickness	22–21		0.21
		YmS15	thickness	22–21		0.9
		KsS	thickness	4		0.06
		OjS	thickness	3.6		0.06
		N2S	thickness	1.5		0.03
9	Miyabuchi(2011)	Kpfa	thickness	30		2.39
10	Miyabuchi et al.(2018)	September 14, 2015	mass/ares	–0.01571	2.7	
11	Miyabuchi et al.(2019)	Nov 25–29, 2014	mass/ares	–0.01492	14.9	
		Nov 29–Dec 2, 2014	mass/ares	–0.01493	6.6	
		Dec 2–8, 2014	mass/ares	–0.01495	1.9	
		Dec 8–9, 2014	mass/ares	–0.01495	2.9	
		Dec 9–11, 2014	mass/ares	–0.01495	7.0	
		Dec 11–15, 2014	mass/ares	–0.01496	8.4	
		Dec 15–17, 2014	mass/ares	–0.01497	4.4	
		Dec 17–23, 2014	mass/ares	–0.01499	6.0	
		Dec 23, 2014–Jan 7, 2015	mass/ares	–0.01503	38.9	
		Jan 7–13, 2015	mass/ares	–0.01504	14.3	
		Jan 13–20, 2015	mass/ares	–0.01506	18.4	
		Jan 20–29, 2015	mass/ares	–0.01509	19.1	
		Jan 29–Feb 2, 2015	mass/ares	–0.0151	8.1	
		Feb 2–9, 2015	mass/ares	–0.01512	6.9	
		Feb 9–16, 2015	mass/ares	–0.01514	3.3	
		Feb 16–25, 2015	mass/ares	–0.01516	2.7	
		Feb 25–Mar 2, 2015	mass/ares	–0.01518	3.6	
		Mar 2–9, 2015	mass/ares	–0.01519	7.1	
		Mar 9–17, 2015	mass/ares	–0.01522	5.6	
		Mar 17–23, 2015	mass/ares	–0.01523	6.6	
		Mar 23–31, 2015	mass/ares	–0.01525	1.8	
		Mar 31–Apr 15, 2015	mass/ares	–0.0153	2.5	
		Apr 15–21, 2015	mass/ares	–0.01531	1.2	
		Apr 21–27, 2015	mass/ares	–0.01531	8.9	
		Apr 27–May 4, 2015	mass/ares	–0.01535	10.1	
		May 4–11, 2015	mass/ares	–0.01537	0.6	
		May 11–19, 2015	mass/ares	–0.01539	1.4	
		May 19–25, 2015	mass/ares	–0.01541	0.3	
12	宮縁ほか（2021）	May 3–5,2019	mass/ares	–0.01935	0.07	
合　計（Kpfa以降）		53				

火口位置および主軸角度の推定

火口位置と風向を特定するプログラムは、Yang et al.（2018）[2-20]によるRプログラム（SVL_2.0.R、以降SVL）によって半経験的モデル（指数）とべき乗則モデルを用いて特定できる。このプログラムへの入力は、層厚ファイル、概略の火口位置座標（X、Y）のみである。火口位置の座標は、UTM座標で与え、層厚ファイルはCSV形式で、X、Y座標(x, y)、層厚(zr)の順に記載する。

計算結果は、べき乗則モデルか半経験的モデルで計算した火口座標、風下風向に加え、最終検索半径（h）や決定係数などであり、h（初期値1000m）が<1mなどと十分に小さければ収束していることになる（図2-14参照）。ただし、今回は火口位置が既知であるため、風下風向の結果のみを採用した。

等層厚線図作成プログラムの概要

等層厚線図作成のためのプログラムは、Yang and Bursik（2016)によるRプログラム（optimizedTTDv1、以降TTD)を使用する。TTDの設定パラメータは、主にkrigingに関するもののうちセミバリオグラムモデルを決定する変数「var.model」が必要である（表2-6）。

表2-6　プログラムTTDに必要な認定パラメータ(詳細はマニュアルに記述)

基本的な入力データ		
td	テフラ厚さの実測値（CSV形式ファイル）	基本的に調整の必要なし
sv	火口位置座標；既知 or SVLの結果（CSV形式ファイル）	結果によっては観測データや風下風向の
ang	SVLで推定した風下風向の値	調整・吟味が必要な場合あり
作成ラスターの範囲設定のためのパラメータ		
Displacement.coaf	原点位置を左下にシフトする係数	事前に調整、設定
Expanding.coef	初期設定範囲の拡張係数	
sellsize	グリッドセルサイズ	
ecode	空間参照系（EPSGコード）の設定	
トレンドモデル作成に関するパラメータ		
segdist	距離に対する層厚のブレークポイント距離	事前に調整、設定
segdd	風下距離に対する層厚のブレークポイント距離	
Kriging関連パラメータ		
width.val & cutoff.val	バリオグラム計算のためのパラメータ	適合性を確認しながら調整 主に、セミバリオグラムモデルの調整
var.model	セミバリオグラムモデル	
max	最大サンプル数	
min	最小サンプル数	
maxdist	検索範囲	

等重量線図（コンタ）作成

降灰量調査のデータ（CSV形式）と、Yang et al.（2018)[2-20]によるSVLを用いて推定した主軸角度を用い、Yang and Bursik（2016)[2-21]によるTTDを用いて53噴火の等層厚線図の作成を行った。各種パラメータを火山学的判断も加えながら試行的に調整して行った。

調整は、以下の流れに従って等層厚線図が作成できたと判断できるまで順に調整を実施した。すべての調整において、セミバリオグラムモデルの比較（ここではexponentialとcircle）について誤差の少ない方をその調整段階の結果とした。まず、調整0としてRプログラムSVLで推定した風下風向を使って等層厚線図の推定を行う。次に、SVLで得られた風

下風向がうまく推定できなかったケースに対して、既往文献の降灰コンタから推定した風下風向を手動で付与して推定する（調整１）。調整１で推定に問題があるケースについては、既往文献の降灰コンター上にポイントを付与して推定を行った（調整２）。表2-7に示すように、実施に調整３まで必要になったのは53噴火のうち2例のみであった。代表的な2噴火について、求められた自動降灰コンタ図をパラメータについて示す（図2-14）。

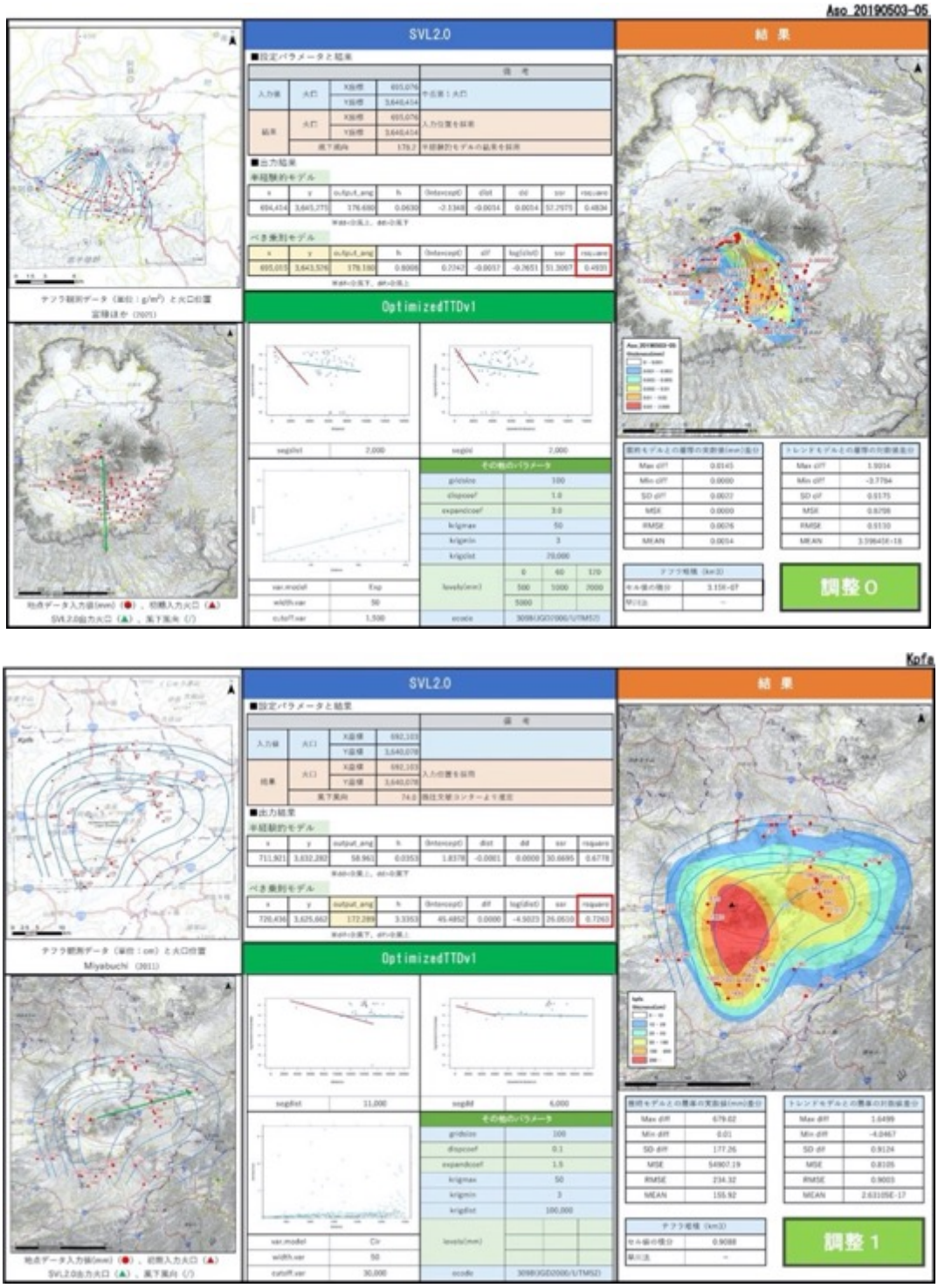


図2-14　代表的な２噴火の計算例。2019年5月3-5日噴火（上）およびKpfa噴火（下）

図2-15には、阿蘇火山の2021年10月21日噴火の同一の降灰データから求めた自動コンタ

と宮縁氏によって手動で描かれたコンタの比較を示した。このデータは降灰チームによってJVDN上に集約されたもので、これに宮縁氏がその後観測した火口付近のデータを加えたものを使用した。図2-15に示すように、風上側の火口付近を除いて、ほぼ両者の結果はよく似ている。噴出量の計算方法は次項に示すが、この噴火の噴出量は、宮縁（2022私信）では3.5tであり今回の自動コンタでは5.9tとなる。この違いは風上側の火口近傍の描き方の違いに由来していると考えられる。

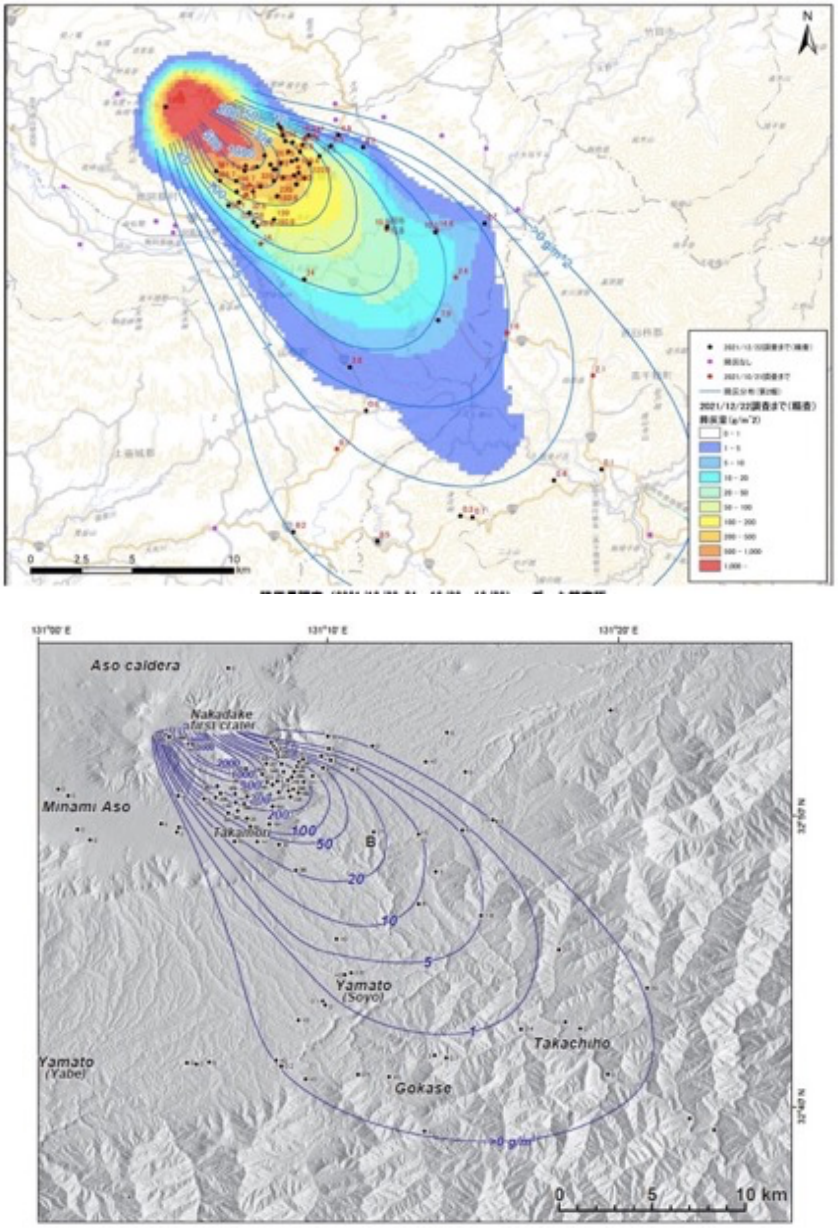
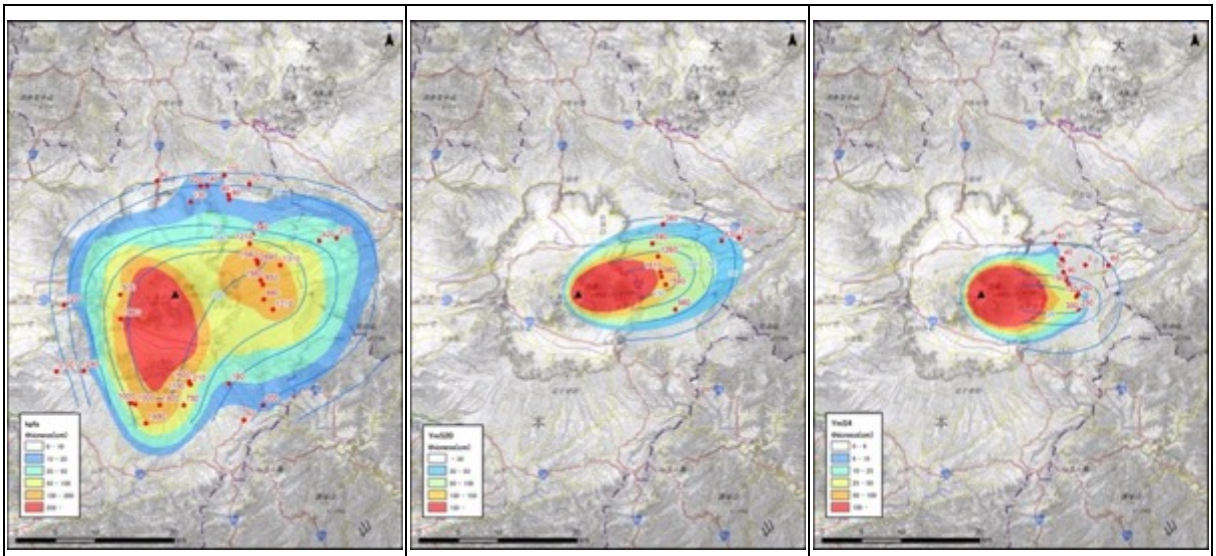


図2-15　阿蘇火山2021年10月20日噴火の降灰データから今回求めた自動コンタ。薄青線は宮縁（2022私信）によるコンタ（下図）。単位はg/m^2。自動コンタでは1g/m^{2}以上を着色して示した。

噴出量の見積もり

作成されたラスターデータを用いて降灰の体積を算出した。算出方法は、ラスターデータのセルサイズと降灰厚のセル値の積によって求める方法で行った。なお、使用した文献値[2-17～19)]などとの比較をするため火山灰密度は 1200kg/m^3 を用いた。今回求められた噴火ごとの火山灰噴出量を表 2-7 で既往文献値と比較した。既往文献の噴出量と比較して、Kpfa は約 1/3、YmS20 は約 7 倍、YmS4 は約 36 倍の噴出量と見積もられた。火口近傍や遠方（YmS20 や YmS4）のデータが不足しているため、大きく異なる値が見積もられたものと考えられる。図 2-16 に文献値と違いが大きい３つの噴火火山灰について、降灰データ、文献コンタと自動コンタとを重ねて示した。



Kpfa　　YmS20　　YmS4

図 2-16　文献値との違いが大きい３つの噴火火山灰

表 2-7　噴出量の計算値と文献値との違い

論文	テフラ	Age (Ka)	mass (10^4 ton)	volume (km3)	今回 (km3)
宮縁ほか（2021）	May 3-5,2019	-0.019353	0.07	5.8E-07	3.2E-07
Miyabuchi et al.(2018)	September 14, 2015	-0.015712	2.7	2.3E-05	1.7E-05
Miyabuchi et al.(2019)	May 19-25, 2015	-0.015405	0.3	2.4E-06	5.8E-07
Miyabuchi et al.(2019)	May 11-19, 2015	-0.015389	1.4	1.1E-05	1.6E-05
Miyabuchi et al.(2019)	May 4-11, 2015	-0.015367	0.6	5.4E-06	3.3E-06
Miyabuchi et al.(2019)	Apr 27-May 4, 2015	-0.015348	10.1	8.4E-05	6.9E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Apr 21-27, 2015	-0.015312	8.9	7.4E-05	4.0E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Apr 15-21, 2015	-0.015312	1.2	1.0E-05	5.0E-06
Miyabuchi et al.(2019)	Mar 31-Apr 15, 2015	-0.015296	2.5	2.1E-05	1.6E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Mar 23-31, 2015	-0.015255	1.8	1.5E-05	6.4E-06
Miyabuchi et al.(2019)	Mar 17-23, 2015	-0.015233	6.6	5.5E-05	4.2E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Mar 9-17, 2015	-0.015216	5.6	4.7E-05	4.8E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Mar 2-9, 2015	-0.015195	7.1	5.9E-05	5.0E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Feb 25-Mar 2, 2015	-0.015175	3.6	3.0E-05	1.7E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Feb 16-25, 2015	-0.015162	2.7	2.3E-05	1.2E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Feb 9-16, 2015	-0.015137	3.3	2.7E-05	1.9E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Feb 2-9, 2015	-0.015118	6.9	5.7E-05	1.7E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Jan 29-Feb 2, 2015	-0.015099	8.1	6.8E-05	4.0E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Jan 20-29, 2015	-0.015088	19.1	1.6E-04	9.5E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Jan 13-20, 2015	-0.015063	18.4	1.5E-04	8.8E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Jan 7-13, 2015	-0.015044	14.3	1.2E-04	6.9E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Dec 23, 2014-Jan 7, 2015	-0.015027	38.9	3.2E-04	3.8E-04
Miyabuchi et al.(2019)	Dec 17-23, 2014	-0.014986	6.0	5.0E-05	1.7E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Dec 15-17, 2014	-0.014970	4.4	3.7E-05	2.0E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Dec 11-15, 2014	-0.014964	8.4	7.0E-05	3.6E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Dec 9-11, 2014	-0.014953	7.0	5.8E-05	3.5E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Dec 8-9, 2014	-0.014948	2.9	2.4E-05	1.2E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Dec 2-8, 2014	-0.014945	1.9	1.6E-05	2.6E-06
Miyabuchi et al.(2019)	Nov 29-Dec 2, 2014	-0.014929	6.6	5.5E-05	3.4E-05
Miyabuchi et al.(2019)	Nov 25-29, 2014	-0.014921	14.9	1.2E-04	7.3E-05
宮縁ほか（2008）	Mid-February,2008	-0.008090	0.0002	1.7E-09	4.0E-09
宮縁ほか（2007）	July 25,2005	-0.005567	0.00012	1.0E-09	6.3E-10
宮縁ほか（2007）	June 21,2005	-0.005474	0.00042	3.5E-09	1.7E-09
Miyabuchi et al.(2008)	April 14,2005	-0.005288	-	-	4.2E-09
宮縁ほか（2005）	January 14,2004	-0.004038	0.0032	2.7E-08	1.5E-08
宮縁ほか（2005）	July 10,2003	-0.003523	0.0041	3.4E-08	1.7E-09
Miyabuchi(2009)	N2S	1.5		0.03	0.05
Miyabuchi(2009)	OjS	3.6		0.06	0.08
Miyabuchi(2009)	KsS	4		0.06	0.09
Miyabuchi(2009)	ACP1	4.1		-	0.001
宮縁ほか（2000）	Ikph1	4.5		1.3E-04	7.8E-05
宮縁ほか（2000）	Ikph2	10		1.9E-04	7.5E-05
宮縁ほか（2004）	YmS1	16.1		0.68	0.44
宮縁ほか（2004）	YmS3	16.4		0.1	0.11
宮縁ほか（2004）	YmS4	16.7		0.03	1.07
宮縁ほか（2004）	YmS5	17		0.03	0.02
宮縁ほか（2004）	YmS7	17.3		0.02	0.03
宮縁ほか（2004）	NbP1	17.6		-	0.05
宮縁ほか（2004）	YmS10	17.9		0.02	0.04
Miyabuchi(2009)	YmS15	21.1		0.9	0.57
宮縁ほか（2004）	YmS18	21.6		0.38	0.31
Miyabuchi(2009)	YmS20	21.9		0.21	1.47
Miyabuchi(2011)	Kpfa	30		2.39	0.91

主要地点における被害カーブ

主要な地点（図 2-17；阿蘇市役所、高森町役場、山上広場、草千里、南阿蘇役場、九州電力一宮変電所、同高森変電所、新阿蘇大橋）における被害カーブ（厚さと頻度）を求めた。なお、被害カーブ作成の際には、Uesawa（2019）[2-22]と Uesawa et al.（2020）[2-23]のツールを用い、年超過確率（頻度）を算出するように修正して用いた。取り扱う範囲は３万年間で 2000 年区切りの年超過確率（頻度）と超過降灰回数を算出した。算出した年超過確率（頻度）を図 2-18 に示す。傾向として、西側、南北は頻度が低く、東側や山の近くで頻度が高いという特徴が出ている。

ここで注意しなければならないのは、昨年度の 1500 年間の全噴火を扱った伊豆大島の被害カーブと違って、３万年間の全噴火を取り扱っているわけではない。そのため、頻度が実際よりも小さく算出され、超過確率も実際より小さくなっている。今後、噴火規模の小さい噴火については、比較的データが揃っている近年の噴火で頻度を求め、規模の大きい噴火については、古く残っている噴火を用いるなどして、規格化した噴火頻度に対応する層厚頻度を計算した上で、実際に近い被害カーブを作成する必要がある。



図 2-17　被害カーブを計算した主要な拠点位置図

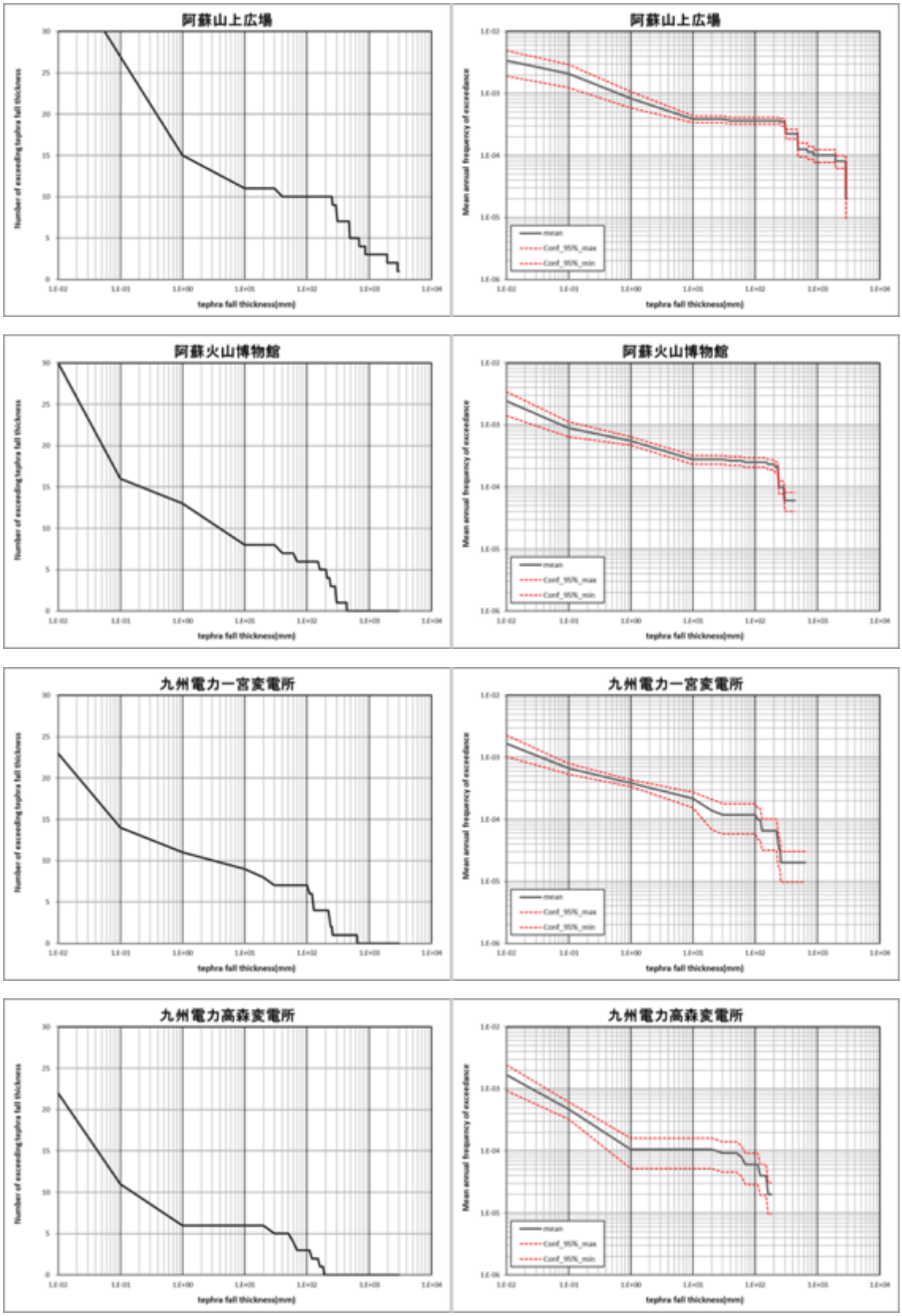


図 2-18　山上広場、阿蘇火山博物館、九州電力一宮変電所、同高森変電所における層厚頻度図(左)と被害カーブ（右）

マニュアル作成

離散型降灰データから今回使用したSVL、TTDのRプログラムを用いて、自動コンタを描き、それぞれの噴出量を算出するための、プログラムやその手順や留意点を整理した「Rによる等層厚線図作成マニュアル」を作成した。次表に示すような目次からなる。詳細については本報告では省略するが、今後、本Rプログラムを JVDN に搭載して、このマニュアルに沿って集約された降灰データから自動コンタを描き、点情報から面情報として提供できることを目指す。

表 2-8　「Rによる等層厚線図作成マニュアル」の目次

目　次

1. はじめに 1
1.1 目的 1
1.2 作業手順 1
2. 火口位置、降灰量調査地点のGISデータ化 2
3. Rによる火口位置および主軸角度の推定 3
4. Rによる等層厚線図作成 6
4.1 入力データ（火口位置、降灰量） 7
4.2 EPSGコード(ECODE)の設定 8
4.3 変数DISPLACEMENT.COAFとEXPANDING.COEFの設定 9
4.4 変数CELLSIZEの設定 11
4.5 変数SEGDIST & SEGDDの設定 12
4.6 変数WIDTH.VAL & CUTOFF.VALの設定 13
4.7 変数VAR.MODELの設定 14
4.8 変数MAXDISTとMAX・MINの設定 16
4.9 観測データの調整 17
4.10 等層厚線図作成結果 19
4.11 降灰体積算出 20

【巻末資料】

・解説書 ((pub_svl_2.0)

・解説書 (optimizedTTDv1)

（c）避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

1）御嶽山における登山者動向把握実験

今年度は、本コンテンツ開発の基礎データ収集のため、2022 年 9 月 17 日（土）に御嶽山において登山者動向把握実験（御嶽山チャレンジ 2022）を実施し（図 3-1）、御嶽山黒沢口登山道（御岳ロープウェイ飯森高原駅/中ノ湯駐車場～剣ヶ峰山頂～ニノ池～三ノ池）を対象として（図 3-2）、登山者の動態データを取得した。



図 3-1　御嶽山チャレンジ 2022 の告知用ポスター（©FCP2022）



図 3-2　実験対象区間である御嶽山黒沢口登山道とレシーバーの設置位置（①～⑰）



写真 3-1　登山者に配布したビーコン



写真 3-2　御岳ロープウェイ山麓駅におけるビーコン配布作業の様子

本実験の手法は、登山者に小型のビーコン（写真 3-1）を配布し（写真 3-2）、あらかじめ登山道にある道標（写真 3-3）や山小屋（写真 3-4）等に設置した 17 台のレシーバー（小型の GPS トラッカーを使用）（写真 3-5）でビーコンを持った登山者を検知し、各レ

シーバーにおける各ビーコンの検知履歴から登山者の動向を把握する。レシーバーで検知されたビーコン情報は 4G 及び LTE の通信を使ってインターネット上のクラウドサーバーに送信され、ほぼリアルタイムで、インターネット上で閲覧可能なビューワーを使って表示した（図 3-3)。



写真 3-3　登山道の道標に設置したレシーバー



写真 3-4　山小屋（石室山荘）に設置したレシーバー



写真 3-5　設置したレシーバーセット（左からバッテリー、GPS トラッカー、ケース）



図 3-3　Web-GIS を活用したインターネット上で閲覧可能なビューワー

実験当日は 620 名の登山者にビーコンを配布し、取得された登山者動態データから、登山者の空間分布の時間変化、登山者の選択した登山ルートや山頂での滞在時間、登山開始から下山に要した時間などが得られ、登山者の行動パターンの一部を把握することができた（図 3-4、図 3-5）。

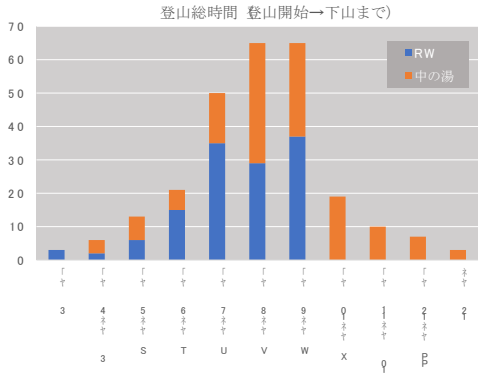


図 3-4　登山者が登山開始から下山までに要した時間

登山ルート(順路)	人数
中の湯→剣ヶ峰→二ノ池→三ノ池→トラバース→8合目→中の湯	48
中の湯→剣ヶ峰→中の湯	35
RW→剣ヶ峰→RW	20
RW→剣ヶ峰→二ノ池→三ノ池→トラバース→8合目→RW	10
RW→剣ヶ峰→二ノ池→RW	10
RW→8合目→トラバース→三ノ池→二ノ池→三ノ池→トラバース→8合目→RW	8
中の湯→剣ヶ峰→二ノ池→中の湯	8
中の湯→8合目→トラバース→三ノ池→二ノ池→三ノ池→トラバース→8合目→中の湯	4
不明または判定不能	199

図 3-5　登山者により選択された登山ルート

今回の実験では、木曽町が同日に実施した登山者参加型避難訓練（写真 3-6）と連携し、避難訓練に参加する登山者にビーコンを配布し、登山者の避難行動モニタリングを試みた（写真 3-7）。その結果、噴火発生を模したサイレンが鳴った後に山小屋へ移動するなどの避難行動が見られた一方、サイレンが鳴ったにも拘わらず避難行動をとらずに移動を開始した登山者も見られた。後者については、サイレンが聞こえず適切な避難行動がとられなかった可能性を示しており、木曽町の防災行政無線にトラブルがあった（聞こえなかった）可能性がある。

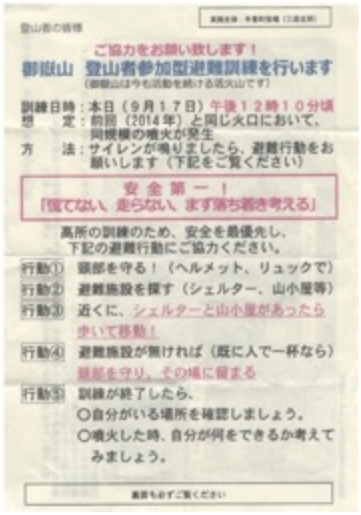

ご協力をお願い致します！
御嶽山 登山者参加型避難訓練を行います
訓練日時：本日（９月１７日）午後１２時１０分頃
想　　定：前回（2014 年）と同じ火口において、同規模の噴火が発生
方　　法：サイレンが鳴りましたら、避難行動をお願いします（下記をご覧ください）
安 全 第 一 ！
「慌てない 走らない まず落ち着き考える」
高所の訓練のため、安全を最優先し、下記の避難行動にご協力ください。
行動① 頭部を守る！（ヘルメット、リュックで）
行動② 避難施設を探す（シェルター、山小屋等）
行動③ 近くに、シェルターと山小屋があったら歩いて移動！
行動④ 避難施設が無ければ（既に人で一杯なら）頭部を守り、その場に留まる
行動⑤ 訓練が終了したら、
○自分がいる場所を確認しましょう。
○噴火した時、自分が何をできるか考えてみましょう。

写真 3-6　木曽町が実施した訓練のチラシ



写真 3-7　木曽町が実施した訓練の様子

取得された登山者データをリアルタイムでオンライン地図上に表示するビューワーを使い、現地でデモンストレーションを行った（写真 3-8)。ここでは、実験に参加した木曽町役場職員、長野県木曽地域振興局職員、マスコミ関係者らと、噴火災害発生時に共有すべき情報について、また状況を共有する方法について意見交換を行った。後日には、木曽町役場総務課職員を対象として本実験で得られた結果を踏まえてインタビュー調査を実施し、同様の意見交換を行った（写真 3-9)。これら意見交換では以下のようなコメントがあった。

- 2014 年御嶽山噴火災害の際には登山者の動向を把握するためには、山小屋やロープウェイからの情報を集めることや駐車場に停まっている車の台数を数えるくらいしか手段がなかったことから、登山者動態データ及びそれらをリアルタイムで共有できるシステムは非常に有用である。
- 登山者だけでなく、災害対応者にもビーコンを配布して、その情報を共有できるとよい。
- 登山道や山小屋だけでなく、避難所や災害対策本部にもレシーバーを設置して、その情報を共有できると良い。
- 噴火時だけではなく平時でもフェーズフリーで利用できると良い。例えば、遭難者救助や急病者対応、規制区域内への侵入者把握に役立つ。
- システムの実装にかかる費用は誰が負担するのか。
- 山小屋の協力を仰ぐと良いのでは。
- ビューワーで気象情報が重ねて表示できると、降灰後の泥流対策に使えるかもしれない。
- ビーコン情報と登山届を紐づけられると良いのでは。



写真 3-8　実験当日現地で行ったビューワーを使ったデモンストレーションと意見交換



写真 3-9　木曽町職員を対象としたインタビュー調査

今回の実験を通じて、ソフト、ハード両面で課題が浮き彫りになった。最も大きな課題は、山岳地域における IoT システム導入の難しさである。実験で用いたシステムにおけるレシーバーとクラウドサーバー間の通信には携帯電話の回線を使用しているため、山間部に存在する携帯電話の電波が届かない場所ではリアルタイムでの登山者データは取得で

きない。携帯基地局を新たに設けるのはコストがかかり過ぎて現実的ではなく、屋外で使用可能な無線 LAN によるローカルエリアネットワークを構築するといった対応が必要になるが、これも同様にコストがかかる。それから、今回の実験ではビーコンの検知率（※最低 1 回以上どこかのレシーバーに検知されたビーコン数の割合）が 55%（342 名分）に留まった。これは、天候の急変等の理由でレシーバーから基地局までのモバイル無線区間における電波環境が悪化し、通信不能及びパケット品質の劣化に至ったことが原因であると考えられ、通信状況によってデータが大きく欠損する場合があることが分かった。システムや通信の、大気状態に対する脆弱性や噴火発生時の主に火山砕屑物に対する脆弱性について明らかになっていない点が大きな課題である。これらの課題については、影響評価実験を行うなどして定量的に評価する必要がある。また、意見交換会でのコメントにもあるように、本システムを実装するには設置や管理のための経費が必要であり，そのための予算をどこが負担するのかを決めることは現時点では難しく、実装の実現性が低いという課題が残った。

実験結果の分析及び活用の提案

今年度、御嶽山で取得された登山者動態データを分析することで、地元自治体と連携して行った登山者参加型避難訓練のブラッシュアップのための提案をすることができた。また、2020 年度に那須岳で得られた登山者動態データを分析し、訓練シナリオに反映させることでより実践的な防災訓練を実施することができた。

結論ならびに今後の課題

今年度は、御嶽山において登山者動向把握実験を実施した。実験で得られた登山者動態データから、登山者の空間分布の時間変化と登山者の行動パターンが明らかになった。また、地元自治体が実施した登山者参加型避難訓練と連携し、登山者の避難行動モニタリングを行った。その結果を地元自治体と共有し、今後実施する訓練のブラッシュアップのための提案を行った。同時に、得られた登山者動態データを可視化しリアルタイムで地元の自治体他と共有する実験も行い、噴火発生時に共有すべき情報、状況を共有するための方法について意見交換を行った。ただし、IoT システムの山岳地域への導入に当たり困難が生じることが分かり、課題が残った。

次年度は、今年度と同様に御嶽山において登山者動向把握実験及び状況共有実験を実施する。実験の実施に当たっては、システムを改良するなど今年度課題として残ったハード面の課題解決を目指し、データ欠損を減らしより多くの登山者の行動モニタリングを行う。また、協力する防災関係機関の数を増やし、機関を横断した対応を想定した状況共有実験を行う。

2）富士山チャレンジのデータを活用した登山時における移動速度の検討

避難計画などを策定する際、避難者の誘導や避難完了にかかる時間などを把握するために登山者の歩行速度が必要となることがある。そこで、2015 年から富士山で行われている登山者の動態データを収集するプロジェクト(富士山チャレンジ)で得られたデータを活

用して、登山と下山の歩行速度と勾配の関係について整理を行った。今回使用した富士山チャレンジ(以下、FCP)[3-1] は、次世代火山研究推進事業 2017 年度課題 D 成果報告書 [3-2] に記載されているように、山小屋や登山道の途中にレシーバーを設置し、登山者に配布したビーコンがレシーバーに近づくことで、登山者の位置情報が把握できる仕組みである。本研究では FCP により取得した 2017 年と 2018 年のレシーバー間の移動にかかった時間を使用して、移動速度の分析を行った。

登山道の勾配については、動態データの移動に近い形で分析するために迷路検索を基にした簡易な動態シミュレーションプログラムを作成し、登山道の標高値を分析用にデータ化した。登山道の標高値は今後の他火山への適用を考慮し、国土地理院の 10m メッシュの DEM データを使用した（図 3-6)。図 3-7 に示すように取得した標高と移動距離から勾配を求め、レシーバー間の 1 メッシュ移動ごとの勾配を求めた。その結果を図 M7 に示し、この図から勾配分布が正規分布とならないことから、レシーバー間の勾配に中央値を使用した.

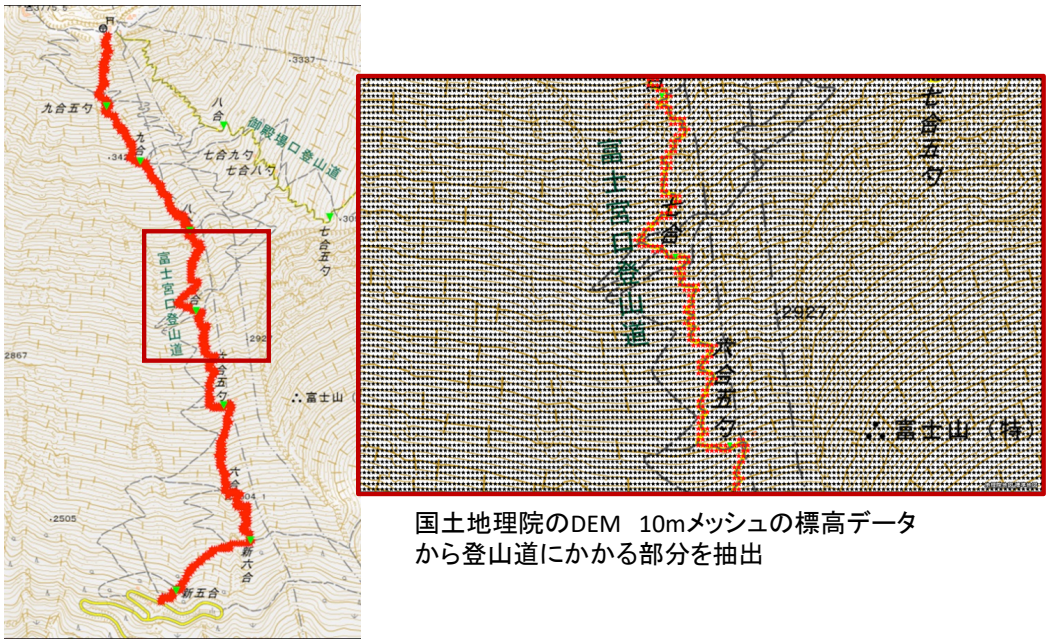
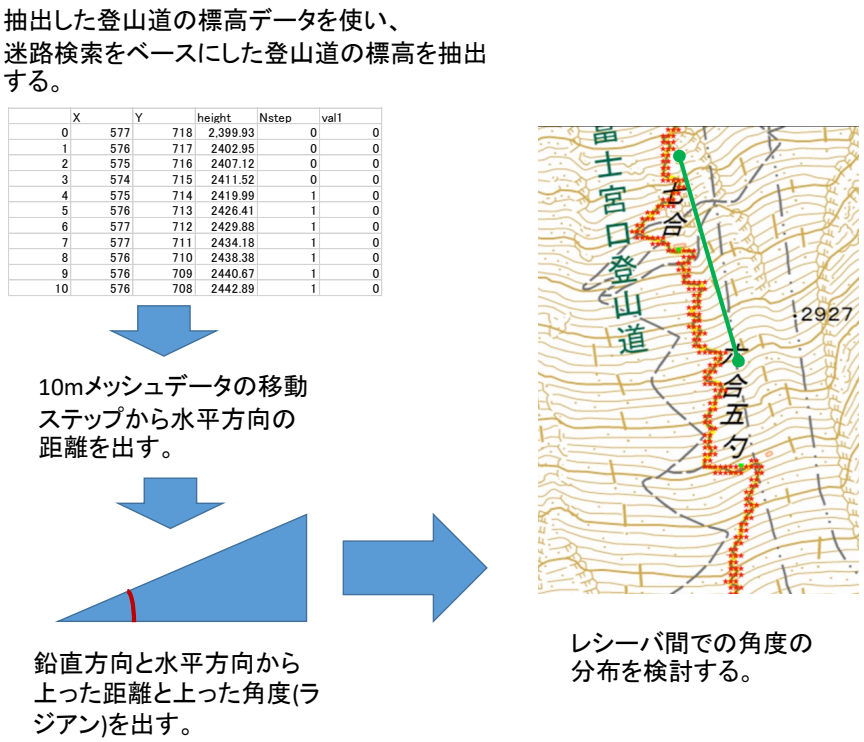


図 3-6　DEM データからの登山道の抽出方法



	X	Y	height	Nstep	val1
0	577	718	2,399.93	0	0
1	576	717	2402.95	0	0
2	575	716	2407.12	0	0
3	574	715	2411.52	0	0
4	575	714	2419.99	1	0
5	576	713	2426.41	1	0
6	577	712	2429.88	1	0
7	577	711	2434.18	1	0
8	576	710	2438.38	1	0
9	576	709	2440.67	1	0
10	576	708	2442.89	1	0

図 3-7　勾配データの算出方法

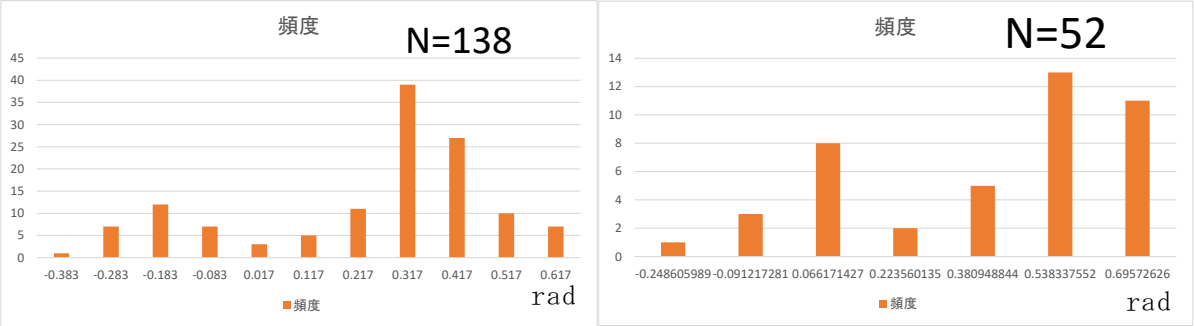


図 3-8　勾配の分布図（左：6 合目から 7 合目まで、右：須走 8.5 合目から頂上まで）

FCP のデータを使用する際、2017 年と 2018 年でレシーバーの位置が異なる。図 3-9 は 2017 年のレシーバーの位置を示し、図 3-10 は 2018 年のレシーバーの位置を示す。この 2 つの図から、2018 年は 2017 年と比べてレシーバー配置が密となっていることがわかる。

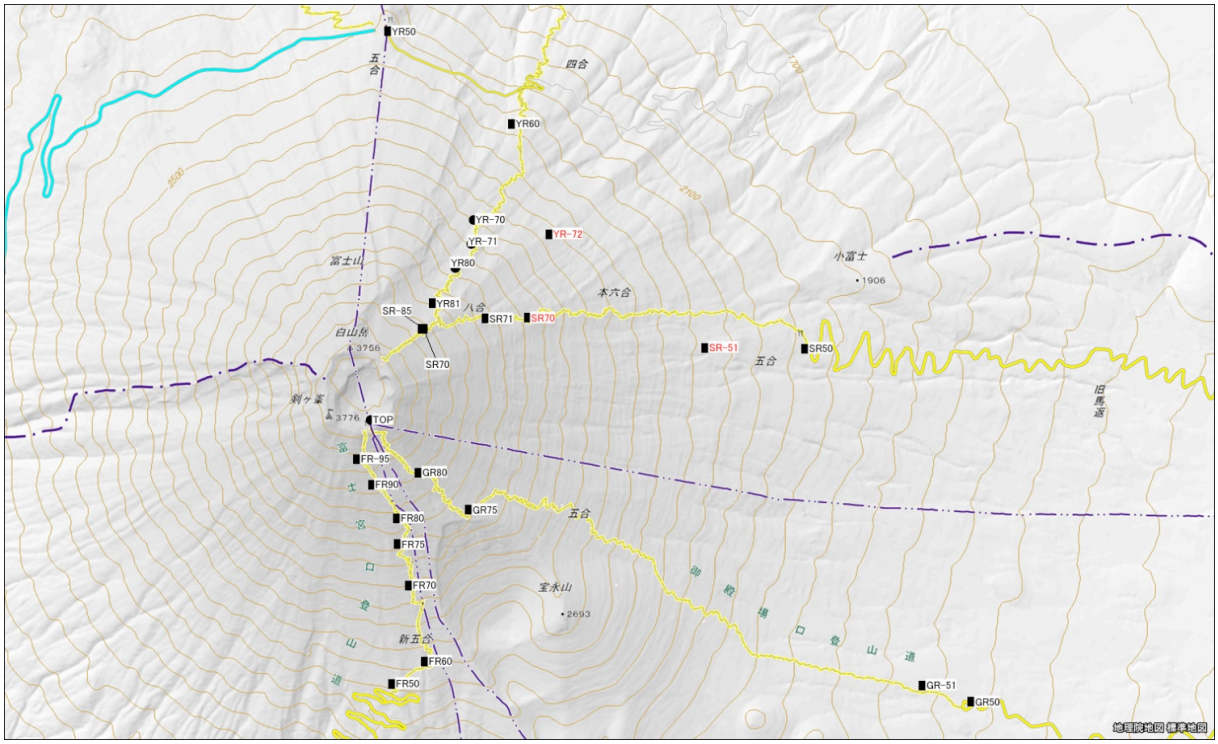


図 3-9　2017 年富士山チャレンジのレシーバー位置

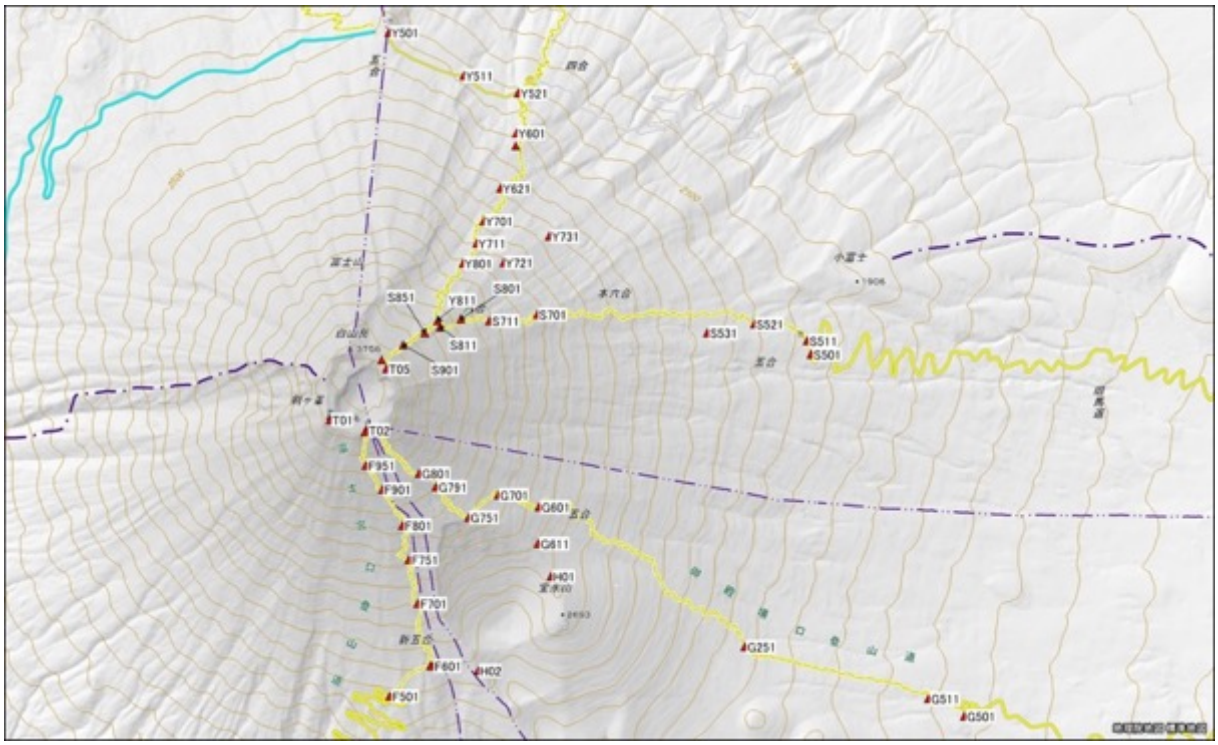


図 3-10　2018 年富士山チャレンジのレシーバー位置

次に動態データの整理について説明する。富士登山では山小屋に宿泊する登山者が多いことから、レシーバー間の移動が 5 時間以上かかったものはデータから外し、また富士登山ではご来光渋滞が発生することからその時間帯を調べて除外することとした。初めに登山者の移動時間の分布について整理した。図 3-11 に吉田口登山道のレシーバー間の移

動時間の頻度分布を示す。図 3-11 から、頻度分布がロングテールとなることから、レシーバー間の移動速度は中央値を採用した。

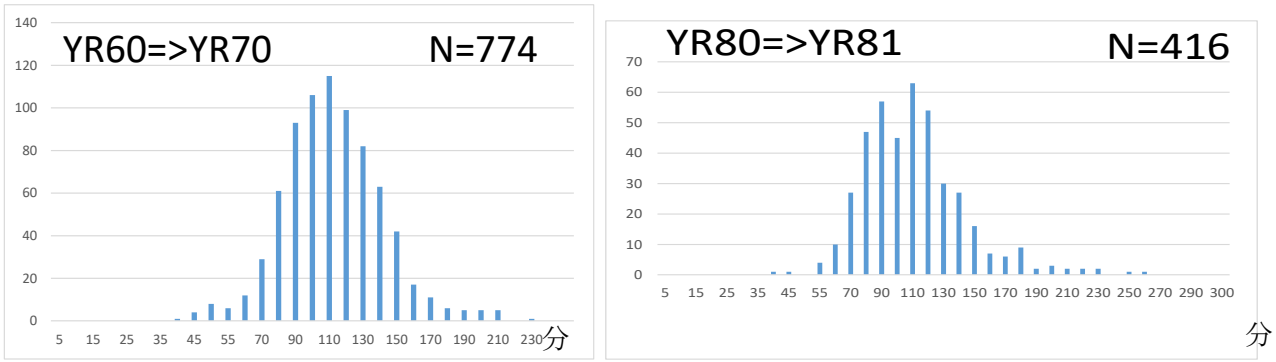


図 3-11　移動速度の分布。（左：2018 年上り YR60 から YR70 間、右：2018 年上り YR80 から YR81 間）

次にご来光渋滞の検討について説明する。図 3-12 は 2018 年の吉田口登山道の移動データを縦軸にレシーバー間の移動にかかった時間をとり、横軸に 0 時から 24 時までの時間ごとに整理した図を示す。図中の赤枠は日の出の時間帯を示す。この図の右上から、吉田口では、9 合目から山頂まででは、0 時から 10 時くらいまで移動にかかった時間のばらつきが大きいことがわかる。図 3-12 の左上では、8.5 合目から 9 合目までの移動は 0 時から 4 時までで移動にかかる時間のばらつきが大きくなっており、それ以降では、ばらつきは少しずつ小さくなる傾向が見られた。図 3-12 の左下は 8 合目から 8.5 合目までの移動時間の分布を示すが、8 合目から 8.5 合目までの移動時間のばらつきは時間によらず一定であることが分かる。このため、ご来光渋滞の影響は吉田口では 8.5 合目以上から発生しており、時間も頂上付近では 10 時ごろまで発生していることがわかる。同様に富士宮口や須走口、御殿場口のデータを整理し、富士宮は 9 合目以上、富士吉田口、須走口は 8.5 合目以上、御殿場口は 8 合目以上の 1 時から 10 時までのデータをご来光渋滞の影響が出ていると仮定して、それ以外のデータを用いて、移動速度と勾配の関係を整理した。

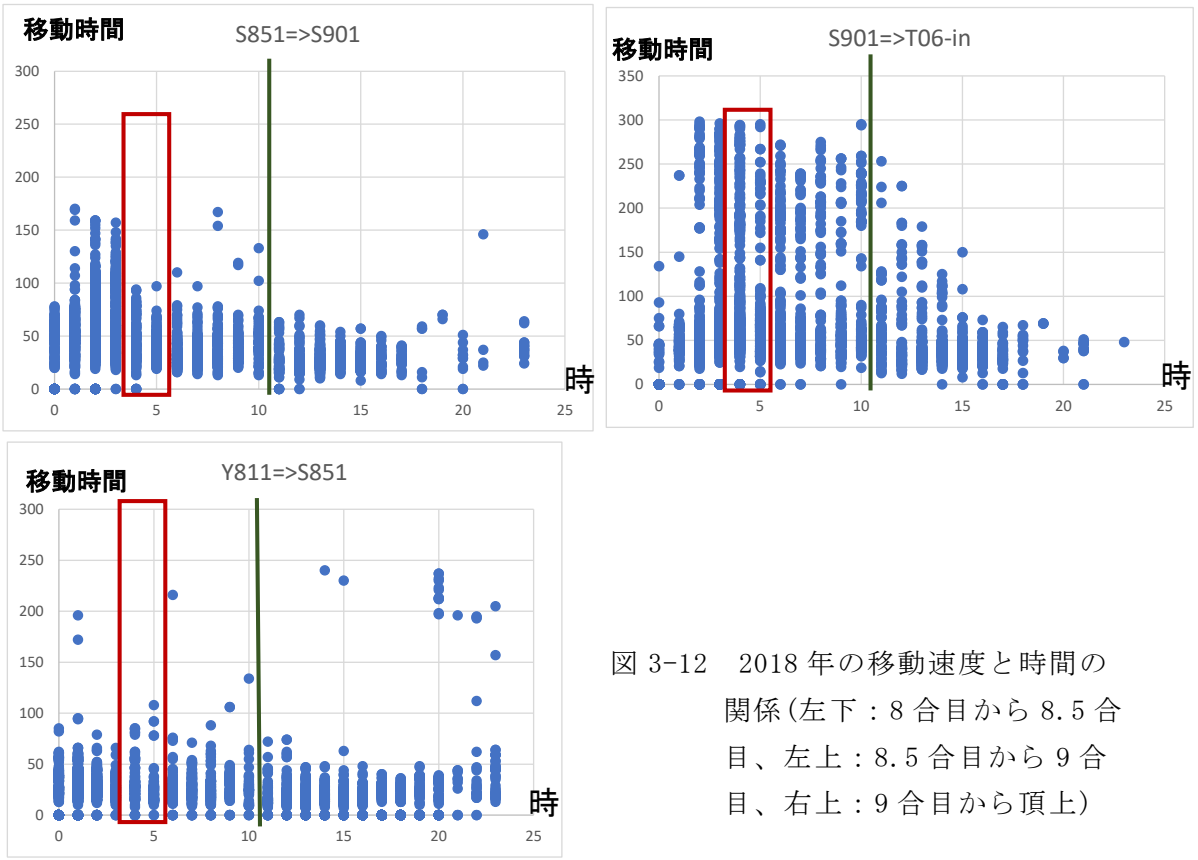


図 3-12　2018 年の移動速度と時間の関係（左下：8 合目から 8.5 合目、左上：8.5 合目から 9 合目、右上：9 合目から頂上）

このように宿泊の時間とご来光渋滞の影響などを除いたデータからレシーバー間の登山と下山にかかった時間と勾配の関係を図 3-13 に示す．図 3-13 から登山時下山時と勾配がきつくなるほど歩行速度が下がる傾向が確認できた。また、登山と下山の速度を比較すると下山時が早くなっていることから一般的な登山地図で用いられている時間と同様の傾向が得られた。回帰直線については R2 が 0.4～0.5 程度のため概ね図中の式によって関係を示すことができるが、登りでは勾配が 0.5rad あたりから横に変化していることから、回帰式についてはもう少し整理する必要がある。

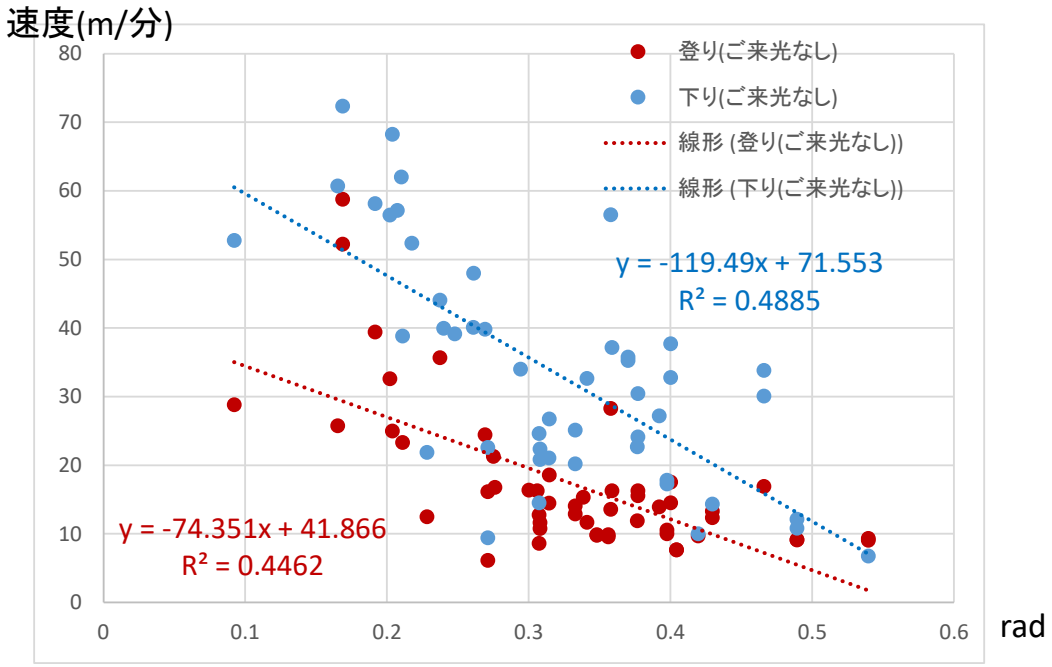


図 3-13　移動速度と勾配の関係（赤：上り、青：下り）

3）退避豪施設の耐衝撃性能の検討

前年度に引き続き、避難計画の作成や避難・救助活動において重要な施設である退避壕（シェルター）等の耐衝撃性を評価するために、今年度は鉄筋コンクリート造)構造物等を想定した模擬火山岩塊を使用した衝突実験を実施した。

実験方法はこれまでと同様に山田・他(2019)[3-3)] を基に図 3-14 に示す衝突実験装置を使用して、火山岩塊と同程度の強度を持つ砥石から作成した飛翔体を射出し、試験体に衝突させて実験を行った．衝突エネルギーは、飛翔体を操作することは難しいため、射出速度を変化させて衝突エネルギーを変化させた。

今年度は鉄筋コンクリート造(以下、RC 造)を対象に実験を行い、試験体準備等の関係から 2 回の実験を行い、1 回目は 2022 年 3 月 23 日～25 日、2 回目は 2022 年 11 月 23 日から 24 日に防衛大学校で実施した。

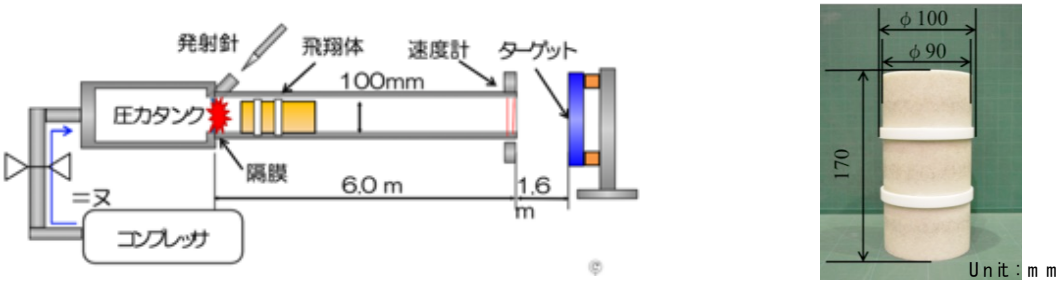


図 3-14　実験装置概要と飛翔体

今年度用いた RC 造の試験体は、厚さ 150 ㎜と 220 ㎜の 2 種類で、コンクリートの平均圧縮強度(Fc)は 30.1Mpa のものを使用した。鉄筋はボックスカルバート構造物などで使用されている D13 を使用した。試験体の図面を図 3-15 に示す。今年度は厚さを 2 種類用意したが、高さと幅、および使用した鉄筋は同じである。また、衝突による破壊現象について検討するため、鉄筋がない試験体も用意した。この試験体は取り扱いのために設置されたフックは試験体上部に埋め込まれているが、実験に影響のない程度の深さとなっている。

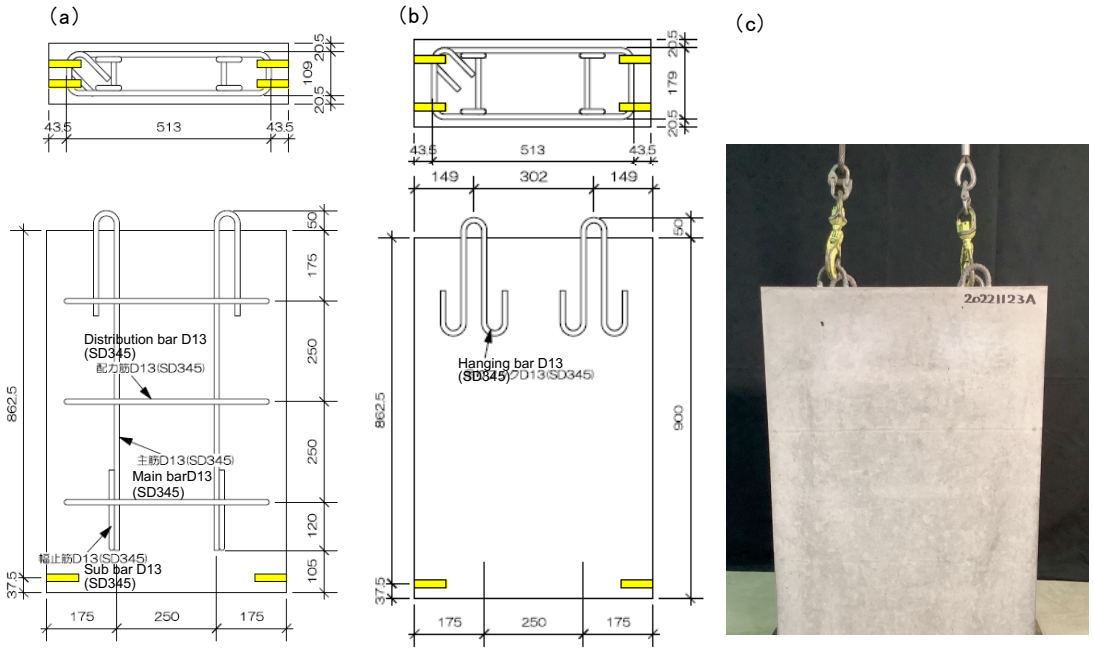


図 3-15　RC 造の試験体((a):鉄筋入り、(b)無筋、(c)試験体の写真)

今年度も前年度から引き続き、人工軽石による衝撃緩衝効果についても検討を行った。使用した人工軽石は廃ガラスを原料とした無機系多孔質軽量発泡資材のスーパーソル L1(ガラス発泡資材事業協同組合(1998)[3-4]，大粒(粒径：約 40 ㎜)絶乾比重：0.25～0.5、主成分：SiO2，　CaO、Na2O)を用いた(写真 3-10)。

人工軽石の設置方法は、高速投射型衝突破壊実験装置が水平に射出する装置であるため、簡易的に土嚢袋に人工軽石を入れて試験体に取り付けることで敷設した。飛翔体が衝突する場所の厚さを調整しながら土嚢袋に人工軽石を詰めて吊るすようにして設置した（写真 3-11)。

今年度の実験では、RC 造は、佐々木・他（2019）[3-5]で貫通しないことを確認していることから飛翔体のエネルギー量と裏面の破損状況に着目して実験を行った。



写真 3-10　使用した人工軽石



写真 3-11　人工軽石の設置

今年度の実験結果を表 3-1 に示し、そのうち代表的なケースの裏面を写真 3-11 に示す。なお、表 M1 の軽石厚さ 0 ㎜(No.1) については、固定状況が適切にできなかったため、飛翔体を衝突させたときに試験体が動いてしまい適切に試験が行えなかったことから、今回の検討には使用しない。また、写真 3-12 のひび割れは写真に写るよう目視でひび割れを黒マジックでなぞり強調している。表 3-1 の裏面のひび割れ程度については、定性的になるが、裏面を観察して、ひび割れが少なくひび割れ幅も狭いもの(0.3mm 以下)を”less crack”、 ひび割れがやや少なくひび割れ幅が狭いものを”minor crack”、ひび割れが多くひび割れ幅が中程度のものを”moderately”, ひび割れ幅が大きい(50mm 程度)ものを “middle crack” ひび割れ幅がとても大きい(50mm 以上)を”large crack”とした。

はじめにスラブ厚さ 150 ㎜において、軽石 0 ㎜(No.2)と軽石 310 ㎜(No.4)を比較すると写真 3-12 から人工軽石があることによって裏面のひび割れの程度が抑えられており、ひび割れの深さと幅も軽微であった。一方、人工軽石の敷設する厚さについては、軽石 190 ㎜(No.5) と軽石 110 ㎜(No.6) を比較すると人工軽石の厚さが増すことによって衝撃緩衝効果が向上することが確認できた。

次にスラブ厚さについては軽石 110 ㎜の場合で、スラブ厚さ 150 ㎜(No.8) とスラブ厚さ 220 ㎜(No.12) を比較するとスラブ厚さ 150 ㎜(No.8)よりもスラブ厚さ 220 ㎜(No.12)のほうが明らかに裏面のひび割れが少なくなっており、またひび割れ深さも浅くなったことから、十分なスラブ厚さが必要なことを確認した。

さらに鉄筋の有無については、軽石 295 ㎜(No.11) と軽石 305 ㎜(No.15) を比較すると軽石 295 ㎜(No.11)は鉄筋が入っていることによって裏面の引張力を鉄筋が負担することでコンクリートのひび割れを抑えているが、軽石 305 ㎜(No.15)は鉄筋がなく、コンクリートは引張力に弱いことから、裏面が曲げによる引張力により大きなひび割れが生じてしまっている。さらに、速度を低下させても同様のひび割れが見え、鉄筋の重要性を改めて確認することができた。

表 3-1　実験結果

No	Thickness of slab (mm)	Steel bar	Thickness of artifical pumice (mm)	Velocity (m/s)	Impact Energy (J)	Back surface
1	150	in	0	110	16,100	moderately
2			0	102	13,800	moderately
3			0	118	18,500	moderately
4			310	96	12,300	less crack
5			190	108	15,500	less crack
6			110	110	16,100	minor crack
7			190	116	17,900	minor crack
8			110	116	17,900	moderately
9	220		0	109	15,802	minor crack
10			0	123	20,122	moderately
11			295	120	19,152	less crack
12			110	120	19,152	minor crack
13		no	0	123	20,122	large crack
14			0	106	14,944	middle crack
15			305	123	20,122	middle crack
16			300	105	14,663	middle crack

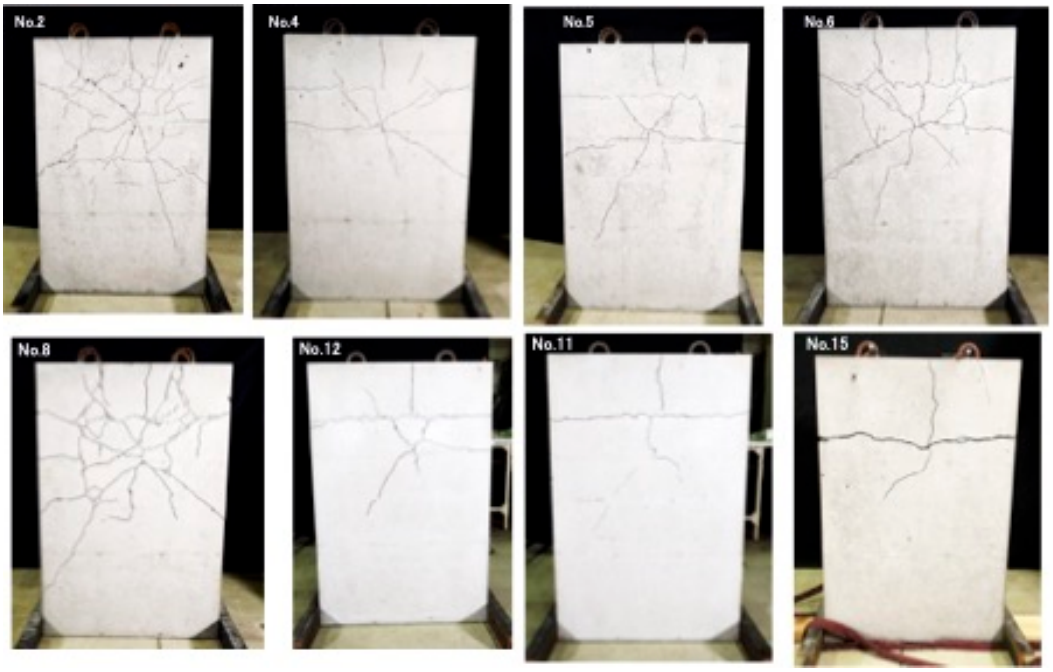


写真 3-12　実験後の試験体の裏面状況

4）海外における火山災害対応タイムライン調査

近年、海外で発生した火山噴火における国や自治体等ステークホルダーの対応について代表的な５つの事例の調査を実施した。それぞれについて噴火活動状況、被害状況、監視観測体制、防災危機管理体制、警報や情報提供の仕組みを系統的に把握し、タイムライン実績について概略を示す。

i）2020 年　La Soufriere 火山噴火（セント・ビンセント島）

La Soufriere 火山の監視と観測は主に Kingston にある農業省の La Soufriere 監視ユニットの協力のもと、the University of the West Indies (UWI)の Seismic Research Center (SRC)が実施している。地震、火山、そして津波の監視観測及び研究を通して、英語を母国語とする東カリブ諸島の住民の生命と生活を守るためのアドバイスと情報を提供。また、同住民のための地震及び火山に係る公式な情報源としての役割を担っている。2020 年の活動については 2020 年 12 月 27 日 登山者が偶然、La Soufriere にできた新しい溶岩ドームを撮影し、12 月 29 日には衛星により hot spot が確認され、UWI-SRC が確認、12 月 30 日に National Emergency Management Organization (NEMO)が最初の速報を発出するといった迅速な対応がなされた。その後の活動について継続的な情報発信が首相、NEMO、研究者からなされるとともに、避難解除の見込みについても事前に提供されるなど、成功例と考えられる。

表 3-2　2020 年 La Soufriere 火山噴火対応タイムライン（抜粋）

日付	現地時間	火山活動	主な被害	監視観測機関等	防災対応機関
12 月 27 日		登山者が撮影			
12 月 29 日				衛星写真で熱源、新しい溶岩ドームを目視	記者会見で、閣僚による説明の後、UWI-SRC が市民に説明。
12 月 30 日					NEMO 火山警戒レベルをオレンジに上げる
1 月 26 日					ジョージタウン（火口の南東側）で住民説明会。

4 月 8 日		火山性地震、山頂付近で蒸気も検知。			NEMO が火山警戒レベルをオレンジからレッドに上げ大統領による避難命令発令。
4 月 9 日	AM8:41	AM8:41　1 回目の爆発的な噴火。	火山灰、島の南端アイガール空港まで到達。		セントビンセント・グレナディーン赤十字の責任者、ドラ・ジェームズ氏によると、今のところ負傷者や建物損壊といった被害の報告なし。
4 月 15 日		爆発的な噴火の継続。火砕流は西方山腹に流下。ラハール流下を確認。		12 日から爆発的噴火の噴煙柱崩壊によって多方向に火砕流が発生。	国連のドゥジャリク事務総長報道官は１５日、避難民を支援するため国連の緊急対応基金から 100 万ドル（約 1 億 800 万円）を支出すると発表。一時、州民ら計約 2 万人が避難。約 4500 人がなおも避難所で生活。
5 月 6 日					火山警戒レベルがオレンジに下げる。
9 月 17 日		火山活動は４月の噴火前よりも活動的な			政府は、火山警戒レベルをオレンジから

		状態が続いている。			イエローに。残る避難所の住民全ての帰宅が許可。NEMO は火山活動がまだ継続していることを周知

ii）2018 年 Fuego 火山噴火（グアテマラ）

被害のあった６月３日の噴火では、早朝から夜まで警報を７回も出しているなか、これまでの噴火と比べて「異常」と感じたＡM11:30、そして実際に火山の活動が活発化して、PM13:40 には特別速報を発表して、この噴火が近年で最大の噴火であること、避難地域の発表を実施している。その後も継続的に情報を展開している。住民の声の中にはこれまでの噴火に慣れすぎて、これだけの規模になることを予想していなかったということもあり、被害が大規模になった原因の一つになっていると思われる。一部住民は自主避難をしているところもあり、例えばゴルフクラブでは何度も自主避難を実施している。フエゴ火山から 40 ㎞強にあるグアテマラシティと国際空港への降灰、国際空港は噴火のあった３日に閉鎖したが、翌４日の朝９：３０には除灰して閉鎖解除となる迅速な対応がなされた。また、フエゴ火山の東側を走る国道の閉鎖、ラハールに関する継続的な情報提供等の情報が得られた。

表 3-3　Fuego 火山 2018 年６月噴火対応時系列対応表（抜粋）

日付	現地時間	火山活動	主な被害	監視観測機関等	防災対応機関
6 月 3 日	AM５時前～PM4:30	近年で最も激しい噴火		INSIVUMEH は７つの特別速報を掲載	
	AM5:00	最初の火砕流発生			
	AM6:00	第１回特別速報		火山灰は西南西方向最大 40km 移動し、サクレデクリスト村とサンペドロイェポカパ村に影響を与えること言及	

	AM10:00	第２回特別速報。		噴火の勢いが増加し、爆発音や家屋への衝撃波の発生を確認。火砕流の流下方向は北西、北、北東に変化。	
	AM11:30			噴火と同様という評価から、「異常」と判断	ゴルフクラブ La Reunión 管理者が自主避難を決断し避難開始。この場所は過去に少なくとも７回避難
	PM12:55	火砕流断続的に発生		Web カメラの信号途絶	
	PM13:40	第３回の特別速報。 火砕流に伴う降灰は風下 40km 以上に分散、グァテマラシティでも 1mm 粒子の火山灰の降下		INSIVUMEH アラートステータスを上げる。近年で最大の噴火と説明。Sangre de Cristo コミュニティの避難を推奨し、La Aurora 国際空港の閉鎖を踏まえ、航空管制当局に降灰を警告。	
	PM13:55	第４回の特別速報。		火砕流の発生状況や、噴煙柱高度等の報告。 南側の監視を推奨。	
	PM14:00 ～14:30	Las Lajas 峡谷へ火砕流発生。	RN-14 高速道路の橋を破壊し、道路にいた数人が死亡		
	PM15:00 ～16:00	火砕流が San Miguel Los Lotes を 10m の厚さで被覆	住民のほとんどが死亡。		

	PM16:50	第５回の特別速報。		最初のラハールを Mineral 川で観測	CONRED は、Sangre de Cristo, Finca Palo Verde, Panimaché 等のコミュニティを避難。
	PM19:15	第６回の特別速報)。2-2.5 km噴煙柱継続。ラハール発生。		峡谷のほとんどが火砕流で埋められ、それらの土砂移動への注意を周知。ラハール発生周知。	
	PM22:00	第７回特別速報（最終)。クレーター内で大量の脱ガスと白熱が発生し、噴煙柱は火口から約 700m の高さを維持。 降灰は約 250 km離れた地域も影響		今後数時間から数日の間で噴火活動の再活発化と、大規模な泥流の発生があることを警告。	
6 月 4 日			死者数 62 人、負傷者数百人確認。 グアテマラ政府から、噴火による被災者は約 170 万人と発表。溶岩が近隣の町エル・ロデオに流れ込み、住宅を破壊。		警察や国際赤十字、消防隊員、軍など数百人が救助活動のため派遣、避難支援や臨時避難所の設置を実施。軍兵士らはラ・アウロラ国際空港の滑走路から灰の除去。 6/3 から閉鎖されたラ・アウロラ国際空港は 6/4 の 9:30 から再開。 当局は市民に対し、火山灰から身を守るためマスクの着用を呼びかけ。

					グアテマラ国家警察による空撮写真あり。 重度の熱傷を負った子ども等のアメリカの病院への搬送開始。 被災した町アロテナンゴへの救援物資提供。
6月5日	PM2:10	火砕流発生)。 最大6㎞噴煙柱や降灰を観測。	少なくとも72名の死者。 噴火により救助隊員が煙の中を避難する事態。 数千人が避難		火山活動により救助活動を中断。政府は付近の6集落に新たに避難指示を発令し、道路を封鎖。
6月6日		雨季になり最初の降雨。	少なくとも99名の死者。		グアテマラ国家警察による行方不明者の捜索の継続。
6月8日		火砕流・ラハール発生	一時、エスクィントラ市内まで火砕流が押し寄せるとの誤報が、SNS等であたかもアンティグア市内が大被害に遭っているといった誤った情報が流布。		エスクィントラ県，チマルテナンゴ県およびサカテペケス県の火山警戒レベルを最も高い「赤」に引き上げ。
6月9日		ラハール発生。 ※以降、1ヶ月通じて発生			

7 月 3 日			死亡 113 人。行方不明 197 人。 避難者 12,823 人		
8 月 16 日			一時閉鎖されていた国道 14 号線通行再開		

iii）2021 年 Merapi 火山（インドネシア）

火砕流に発生に対し、Merapi 火山を管轄する地元当局による、観測にもとづいて情報発信と住民への避難誘導が実施されたケース。噴火警戒のレベルも据え置きとなった状況下での対応の状況を把握した。

iv）2018 年 Anak Krakatau 火山（インドネシア）

噴火による山体崩壊と津波発生が発生したが、当初、噴火の影響による津波と捉えられず、避難に関する情報発表が遅れたことが指摘されている。津波を管轄する部門、火山を管轄する部門との連絡調整や災害規模の把握が当初困難となった事例であった。

v）2022 年 フンガトンガ　フンガハアパイ火山（トンガ）

大規模な噴火によって、津波が発生したこと。インターネットの不通等により、国外との連絡、および国内の離島地域への連絡が非常に困難なった対応のケースとして把握。

(3) 結論

1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化については、昨年度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を基に改善するとともに、引き続きヒアリング調査などを行い、サイトの利便性の確認を行った。また、ニーズに基づき、コンテンツの充実を行った。その結果、他機関や次世代火山研究のホームページなどからのリンクや火山防災担当者の異動に伴う知識や経験の共有についての課題を確認できた。そのため、新任担当者が火山防災を学ぶための情報コンテンツの充実を図る必要性やテキストや訓練資料の充実を行う必要があることが分かった。加えて、コンテンツのリンク等を見直し、リンク切れの対応や情報の更新なども行ったが、今後継続的にコンテンツの維持管理の仕組みについても検討する必要があることが分かった。防災担当者用の「ポータルサイト」では、カテゴリーはあまり細分化せずに、関連しそうなコンテンツを一覧できる構成は利用者の検索性を高め、推奨コンテンツや基礎知識解説コンテンツがあると使いやすさは向上すると考えられる。

2) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化に関しては、低層建物が密集し中層建物が散在する街区を対象に行なった降灰計算結果からは、建物は市街地での降灰強度や空間濃度などの降灰分布に大きく影響する（建物がないときの 1.5 倍程度）ことが分かった。比較的揃った大きさの建物からなる街区では風向への依存性はあまり大きくないものの、道路への降灰強度は風向により異なる。降灰強度や空間濃度は、建物風上側で大きく、風下側で小さくなる傾向が明瞭にみられ、その程度は粒子の大きさに強く依存することが分かった。降灰荷重については、1 層 1 スパンの柱梁ラーメン構造物の梁端に生じる曲げモーメントを定式化できた。また、広範囲の降灰で、上下水や電気などのライフラインや交通等への影響が懸念され、地震による病院の機能被害を共通した部分が多い。今後、降灰による病院機能の被害確率を検討する必要がある。

離散型降灰データから降灰量の自動コンタを作成するマニュアルを作成した。これを用いて、阿蘇火山の過去 53 噴火の降灰データを用いて、阿蘇カルデラ内の主要拠点での降灰被害カーブを作成した。噴火規模の規格化という課題はあるものの、ここ 3 万年間のカルデラ内の降灰被害の強弱について面的な広がりが確認できた。

3) 避難・救助支援コンテンツ試作版については、御嶽山において登山者動向把握実験と避難訓練を連携して実施した。データは可視化しリアルタイムで地元の自治体他と共有し、噴火発生時に共有すべき情報、状況を共有するための方法について意見交換を行った。また過去の登山者の動態でデータから、勾配がきつくなるほど歩行速度が下がる傾向が確認できた。退避豪の耐衝撃性については、人工軽石を利用することで、鉄筋コンクリート造においても衝撃力を緩衝する効果が確認できた。近年外国で発生した大噴火のタイムラインからは、スフリエール火山の大噴火では、登山者、研究機関、国が密接に連携して迅速な対応がなされ被害を最小限に抑えたこと、フエゴ火山での大噴火では、噴火慣れしている住民への周知に難があり大きな被害に繋がった。クラカタウやトンガの噴火では付随津波を捉える情報伝達の困難さや津波によるインフラ破壊などの課題が示された。

(4) 引用文献

1-1) 本嶋裕介，山本洋一，小島脩平，武藤雅知，2016，国土交通省ハザードマップポータルサイトの高度化，国土地理院時報(128) 105-112.

1-2) 笠田竜太，2015，インターネットアウトリーチと核融合ポータル，プラズマ・核融合学会誌，91 (2)，111-114，2015-02.

1-3) 安保寛明，2021，ポータルサイト作成のプロセスと多職種協働について学んだこと，日本精神保健看護学会誌 Vol. 30，No. 2，pp. 90～95.

1-4) 中里見祐介，生田目崇，大竹恒平，2020，ロイヤルティプログラムが与える消費者行動への影響の分析，情報処理学会第 82 回全国大会講演論文集 2020 (1)，615-616.

1-5) 上芝卓也，藤井夢佳，吉松直貴，髙桑紀之，山崎　航，諏訪部　順，2019，ハザードマップポータルサイトにおける多様な災害リスク情報の提供について，日本地理学会発表要旨集 2019s (0)，84-，2019.

1-6) 中西　豪，安田大樹，長野晋平，田原正之，近藤愛子，長野　章，2018，漁村情報発信ポータルサイト構築のための都市住民が期待する漁村情報について，日本水産工学会学術講演会学術講演論文集 2018 (0)，17-20.

1-7) 横山　誠，2021，武蔵野大学ポータルサイト「MUSCAT」の現状調査、Musashino University Smart Intelligence Center 紀要 Vol.2 (2021.3).

1-8) 井戸康太，加藤岳生，三澤貴宏，藤堂眞治，2020，ソフトウェア紹介「物質科学シミュレーションのポータルサイト MateriApps－分子動力学シミュレーションのはじめの一歩」，アンサンブル 22 (1)，74-80，2020-01-31.

1-9) 佐々木雄司，萩倉　丈，福井昌則，2021，小・中学生向け統計学習のためのポータルサイト「キッズすったと」， コンピュータ＆エデュケーション 51 (0)，101-102，2021-12-01.

1-10) 山口　勝，2021，【NHK 文研フォーラム 2021】シンポジウム 東日本大震災から 10 年 震災アーカイブから災害アーカイブへ，放送研究と調査 71 (8)，64-83.

1-11) 米満　潔，古賀崇朗，永溪晃二，町田正直，髙﨑光浩，堀良彰，山内一祥，和久屋　寛，2021，COVID‐19 対策として授業のオンライン化推進を目的とした FD 活動の実践と評価，佐賀大学全学教育機構紀要第 9 号，pp65-81.

1-12) 藤井夢佳，上芝卓也，吉松直貴，大角光司，2018，さらに使いやすい「国土交通省ハザードマップポータルサイト」を目指して，国土地理院時報，国土交通省国土地理院 編 (130) 119-122.

1-13) 中村華子，橘　隆一，2015、緑化植物に関するポータルサイトの立ち上げとコラム「緑化植物ど・こ・ま・で・き・わ・め・る」について，日緑工誌、40(4)，pp.564-571.

1-14) 福林靖博，奥田倫子，中川紗央里，2020，[63] EAST ASIA DIGITAL LIBRARY：東アジアにおける国際共同プロジェクトの一事例，デジタルアーカイブ学会誌 4 (s1)，s80-s83.

1-15) 木村　文，2022，デジタルアーカイブのポータルサイトのリニューアルについての考察，デジタルアーカイブ学会誌 6（s3），s218-s221.
1-16) 菊池瑶介，橋本浩二，柴田義孝，2014，DTN をベースとしたモバイルクラウド型災害情報共有システム，情報処理学会第 76 回全国大会講演論文集 2014（1），511-512，2014-03-11.
1-17) 田島義博，青木幸弘 編著，1989，『店頭研究と消費者行動分析－店舗内購買行動分析とその周辺―』，誠文堂新光社，1989.
2-1) 中央防災会議防災対策実行会議大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ，2020，大規模噴火時の広域降灰対策について-首都圏における降灰の影響と対策～富士山噴火をモデルケースに～（報告），降灰シミュレーションのパラメータと計算結果，令和 2 年 4 月.
2-2) Connor，L. and C. Connor，2011，“Tephra2 User’s Manual,” https://vhub.org/resources/756/download/Tephra2 Users_Manual.pdf（2021. 12. 28　閲覧）
2-3) 大塚清敏，野畑有秀，諏訪　仁，久保智弘，宮城洋介，宮村正光，2021，空調室外機および冷却塔の降灰実験，日本建築学会技術報告集，65 巻，pp.580-585.
2-4) 大塚清敏，野畑有秀，諏訪　仁，久保智弘，宮城洋介，宮村正光，2021，エアフィルタに関する降灰実験，2021 年度日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集，構造 I，29-30.
2-5) 片岡浩人，木梨智子，川口彰久，2002，風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発，大林組技術研究所報，No.64，49-54.
2-6) 建築物荷重指針・同解説，2015，日本建築学会，p.323-326.
2-7) Dare，R.A.，2015，Sedimentation of volcanic ash in the HYSPLIT dispersion model，CAWCR Technical Report No. 079，p.3.
2-8) Otsuka，K.，A. Nobata，H. Suwa，T. Kubo，Y. Miyagi and M. Miyamura，2022，A consideration on volcanic ash ingress into the horizontal air intake of air conditioning，J. Disaster Research，Vol. 17，No.5，pp.818-826.
2-9) 中央防災会議 防災対策実行会議，2020，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-首都圏における降灰の影響と対策-、～富士山噴火をモデルケースに～（報告）、降灰シミュレーションのパラメータと計算結果、令和 2 年 4 月.
2-10) 荻野和臣，曽根孝行，山本雅史，2015，富士山噴火による降灰が荷重として建築物に与える影響，日本建築学会大会(関東) 学術講演梗概集，B-1，113-114.
2-11) 荻野和臣，曽根孝行，山本雅史，2016，富士山噴火に伴う降灰荷重の影響度指標を用いた構造安全性の検討、日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集，B-1，73-74.
2-12) 曽根孝行，2018，積灰荷重に対する建物の構造安全性の検討，2018 年度日本建築学会大会（東北）特別調査部門パネルデイスカッション資料，2018.9.
2-13) 諏訪　仁，野畑有秀，大塚清敏，久保智弘，宮村正光，宮城洋介，2020，降灰荷重による建物屋根の被害確率関数、日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集.

2-14) 建築行政情報センター（日本建築防災協会），2015，2015 年版建築物の構造関連技術基準解説書，全国官報販売協同組合.
2-15) 中央防災会議防災対策実行会議大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ，2020，大規模噴火時の広域降灰対策について-首都圏における降灰の影響と対策-～富士山噴火をモデルケースに～（報告），降灰シミュレーションのパラメータと計算結果，令和 2 年 4 月.
2-16) 山下哲郎，2012，ライフライン・建築・設備の被災状況及び診療活動の状況 分担研究報告書，平成 23 年度厚生労働科学研究補助金「大規模災害に対応した保健・医療・福祉サービスの構造、設備、管理運営体制等に関する研究（研究代表者・筧　淳夫・工学院大学)」，平成 24 年 3 月.
2-17) Miyabuchi, Y., 2009, A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan, Sedimentary Geology, 220(3-4), 169-189.
2-18) Miyabuchi, Y. and Hara, C., 2019, Temporal variations in discharge rate and component characteristics of tephra-fall deposits during the 2014-2015 eruption of Nakadake first crater, Aso Volcano, Japan, Earth, Planets and Space, 71, 44.
2-19) 宮縁育夫・星住英夫・高田英樹・渡辺一徳・徐　勝，2003，阿蘇火山における過去約 9 万年間の降下軽石堆積物，火山，48(2)，195-214.
2-20) Yang, Q. and Bursik, M.I., 2016, A new interpolation method to model thickness, isopachs, extent, and volume of tephra fall deposits, Bulletin of Volcanology, 78(10): 68.
2-21) Yang, Q., Bursik, M.I. and Pitman, E.B., 2018, A new method to identify the vent location of tephra fall deposits based on thickness or maximum clast size measurements (SVL), https://vhub.org/resources/4377
2-22) Uesawa S., 2020, TephraDB_Prototype_ver1.1, https://doi.org/10.5281/zenodo.5109160
2-23) Uesawa, S., Toshida, K., Takeuchi, S. and Miura, D., 2022, Creating a digital database of tephra fallout distribution and frequency in Japan, Journal of Applied Volcanology, 11,14.
3-1) 田中義朗，2019、IoT を活用した富士山での安全登山対策の取組紹介，IPEJ Journal，2019，No.12.
3-2) 文部科学省，2018，次世代火山研究推進事業　2017 年度課題 D　成果報告書，https://www.kazan-pj.jp/reporting/research2017/d
3-3) 山田浩之，立山耕平，本多亮，吉本充宏，藤井敏嗣，2019，噴石衝突に対する木造建築物屋根の簡易構造補強，火山，64，p.243-251.
3-4) ガラス発泡資材事業協同組合，1998，https://www.supersol.jp/supersol#feature （2023 年 2 月 25 日確認).
3-5) 佐々木寿，成毛志乃，立山耕平，山田浩之，2019，鉄筋コンクリートの噴石衝突安全に関する評価手法の検討，日本火山学会秋季大会,B3-10.

(5) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(6) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

(a) 特許出願

なし

(b) ソフトウエア開発

名称	機能
なし	

(c) 仕様・標準等の策定

なし

２．３．３　令和５年度の業務計画案

本業務では課題 A と密接に連携し、研究成果などの情報を自治体の防災担当者に適切に伝達するために必要となる情報ツールを開発する。

(1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

社会実装を目指し、昨年度までに高度化してきた周知啓発教育用コンテンツ試作版の改良を行う。引き続き昨年度行ったヒアリング調査などで得られたニーズや課題に対応し、本コンテンツの改良を図るとともに、図上訓練や研修などの場において本コンテンツの活用方法の検討を行う。具体的には、防災担当者などにヒアリング調査やアンケート調査を行い、火山防災の平時業務や図上訓練、研修等でのニーズを把握し、必要に応じてデジタルコンテンツの構築を行う。また、本コンテンツに掲載された情報の検索方法について、キーワードの付与や整理を行うとともに利用者が必要とする情報に容易にアクセスできるようなページ構成について検討を行う。また、前年度のヒアリング調査から得られた要望に対応するため、引き続き動画や写真などのデジタルコンテンツの収集を行うとともに、近年発生した海外での火山災害について、研究成果や災害対応などに関して、国際学会に参加するなどして情報収集を行い、コンテンツの充実を行う。

本コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、火山防災に関して防災関係機関へのヒアリング、ディスカッション等を実施する。

(2) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

社会実装を目指し、これまでに実施してきた降灰による建築物の損傷・被害に関する降灰深の閾値評価や建物空調設備およびフィルター被害の結果を含めて建物機能被害評価法を再検討し、都市部への降灰被害予測コンテンツの改善を実施する。今年度は降灰による屋根形状への影響などの評価事例を増やすことで、要因となるパラメータを整理する。また、都市部

における降灰や積灰の性状を把握するため、街区を対象とした数値シミュレーションにより、建物が地面への積灰や空間濃度分布に及ぼす影響について検討を行う。さらに、これまで実験による建物空調設備およびフィルター被害の結果をまとめ、建物機能被害の損傷曲線を提案する。また、病院を対象とした過去の被害事例を用いて、機能被害に影響を与える被害原因を抽出する。つぎに、都市機能被害の損傷曲線と組み合わせることで、機能被害を明示し都市部への降灰被害予測コンテンツを改善する。

日本の過去の主要な火山噴火に関して、降灰を含む火山災害履歴について整理し、昨年までの降灰ハザード評価結果とともに、時間変化を含む空間地理情報として降灰被害予測コンテンツとして整備する。さらに、降灰対策や降灰情報の活用方法などについて、研究者と防災担当者を交えたワークショップを実施し、降灰対策などに関する研究ニーズや災害対応のニーズについて把握を行う。

(3) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

昨年度に引き続き御嶽山を対象とした登山者動向把握実験及び取得データを用いた防災関係機関間の状況共有実験を行う。実験の実施に当たっては、実験の対象範囲を黒沢口登山道に加えて王滝口登山道も含めた範囲に拡大して実施する。また、昨年度連携した木曽町に加えて長野県危機管理防災課、御嶽山火山防災協議会とも連携し、避難・救助支援コンテンツ試作版を通して実験結果を防災訓練に活用することで、御嶽山における火山防災上のニーズや課題を明らかにする。さらに、本コンテンツの標準化を目指し、他火山周辺の自治体を対象としたヒアリング調査を実施する。

避難計画の作成や避難・救助活動において重要な施設である退避壕（シェルター）等の耐衝撃性を評価するために、今年度も鉄筋コンクリート造構造物等を想定した模擬火山岩塊を使用した衝突実験を実施し、これまでの実験結果等を基に退避豪等の対策に資する実験結果の整理や既存退避豪の情報整理等を行う。

海外における最近の火山災害対応タイムラインを参考に、基本的なタイムラインの方向性を検討する。また、火山ハザードシミュレーションと避難シミュレーションの連携に基づく火山防災対策手法の検討を行う。

(4) 自発的な研究活動等

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

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。

３．会議録

【課題Ｄ全体】

日　時：2022 年 11 月 7 日、8 日
場　所：有珠山周辺の D1 ドローン実験実施場所
内　容：サブテーマ１で実施している有珠山のドローンを使用した実証実験に参加し、サブテーマ１の進捗状況を確認するとともに意見交換した。
参加者：サブテーマ１担当者、課題代表者

日　時：2022 年 12 月 1 日（オンライン）
内　容：総合協議会において、課題 D の取りまとめ報告を行う上で、サブテーマそれぞれの進捗状況をパワーポイントで準備し、発表・意見交換をした。その際に出た意見を反映し、修正したパワーポイントを 12 月 3 日までに課題代表者に集約し、総合協議会への提出資料とした。
参加者：各サブテーマ担当者、課題代表者

日　時：2022 年 12 月 26 日～27 日
場　所：TKP ガーデンシティ鹿児島中央２階　霧島プレミアム（鹿児島市）
内　容：2022 年度桜島大規模火山噴火総合研究グループ研究集会において、各研究課題の成果を発表し、意見交換した。
参加者：サブテーマ２担当者、サブテーマ３担当者、課題代表者

４．むすび

本研究課題では、火山災害に対応するため、リアルタイムで噴火の状況を把握するとともに、そのデータを迅速に解析し、推移予測とハザード・被害評価、さらには対策に資する情報の提供までを一連で行う研究技術の開発を実施している。本年度は、７年目評価の時期にあたり、課題Ｄのそれぞれのサブテーマが着地点を意識した研究を実施した。各サブテーマが自ら立てた研究計画に沿って順調に進んでいると考えられる。

サブテーマ１では、有珠山において地上基準点（GCP）を設置せずに三次元モデルを作成する方法を開発し、精度よく三次元地形モデルが作成できていることを確認した。また、自動航行撮影によって定点から夜間でも画像取得できることを確認した。2D 高速マッピング用ソフトの利用によってオルソ画像のみが迅速取得可能である。飛行中のリアルタイムマッピングで三次元モデルを作成することができた。

サブテーマ２では、ワークステーション上で火山灰拡散シミュレーションを連続的に稼働させ、試験運用を開始した。このことにより、人手を介することなく、常時、火山灰ハザードを評価できるようになった。ハザード評価の精度を向上させるために、今後もリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、火山灰拡散予測の高速化技術開発、火山灰拡散予測の高精度化技術開発を継続していく必要がある。また、噴火発生前の地盤変動の統計的性質が明らかになり、令和５年度以降、噴火発生前の火山灰ハザード評価に向けて目途が立った。

サブテーマ３では、周知啓発教育用ポータルサイトが改善され利便性確認ができた。カテゴリーの非細分化、検索性を高めるコンテンツ一覧提示、推奨コンテンツなどの導入が好ましい。また、建物の密集が降灰分布に大きく影響すること、阿蘇カルデラ内では降灰被害リスクに面的な偏りがあることが明らかになった。さらに、御嶽山の登山者動向把握実験の結果を地元の自治体などと共有できた。また、登山者の退避豪に人工軽石を敷くことで、弾道を描く火山岩塊の衝撃力を緩衝する効果がさらに確認できた。外国の大噴火では、登山者、研究機関、国の密接な連携により被害を最小限に抑えられた例がある一方、噴火慣れしている住民への情報周知の難しさや、付随現象に関する情報伝達の困難さインフラ破壊被害などによる課題が提示された。

このほか、本課題内における連携や他課題および人材育成コンソーシアムとの連携についても配慮した研究が進められた。

様式第２１

学　会　等　発　表　実　績

委託業務題目「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」

機関名　アジア航測株式会社

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
UAVを用いた地形モデルの精度向上と高速化について-伊豆大島1986年噴火の溶岩流を対象に-（ポスター発表）	森 貴章、小森 惇也、江川 香、杉下 七海、田中 利昌、佐々木 寿、野中 秀樹、千葉 達朗	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年５月	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
なし				

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

様式第２１

学　会　等　発　表　実　績

委託業務題目「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」
機関名京都大学　防災研究所
１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 （学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Numerical simulations of the 15 January 2022 eruptiveplume ofHunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano（口頭）	Suzuki, Y. J. and Costa, A.	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年1月	国外
Probabilistic model for ground deformation data of Vulcanian explosions at Sakurajima volcano（ポスター）	Kyoka Ishii, Masato Iguchi	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年2月	国外
Erupted tephra mass estimate by infrasound observations and link to the maximum eruption cloud height（口頭）	Taishi Yamada, Masato Iguchi, Takeshi TamegurTameguri	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年2月	国外
Aerodynamic characteristics and genesis of aggregates at Sakurajima Volcano, Japan（口頭）	Maria Carolina Diaz Vecino, Eduardo Rossi, Valentin Freret-Lorgeril, Allan Fries, Pietro Gabellini, Jonathan Lemus, Stefano Pollastri, Alexandros Poulidis, Masato Iguchi, Costanza Bonadonna	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年2月	国外
Continuously operable simulator and forecasting the deposition of volcanic ash at Sakurajima volcano, Japan（ポスター）	Masato Iguchi, Haruhisa Nakamichi, Kosei Takishita, Alexandros Poulidis	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年2月	国外

In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan	Kosei Takishita, Alexandros P. Poulidis, Masato Iguchi	Physics of Volcanoes 9	2023年3月	国外
Tephra segregation profiles from Vulcanian eruptions on Sakurajima volcano, Japan,based on the diameter and settling velocity observations of falling tephra	Kosei Takishita, Alexandros P. Poulidis, Masato Iguchi	第83回ドイツ地球物理学会	2023年3月	国外
桜島ブルカノ式噴火の噴煙からのテフラ粒子の時空間分離特性（口頭）	瀧下恒星・井口正人	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
諏訪之瀬島2021年噴火活動におけるレーダー反射強度と空振パルス振幅の関係（口頭）	中道治久・井口正人・山田大志	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
トンガ2022年火山噴火の噴煙３次元シミュレーション（口頭）	鈴木雄治郎	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
桜島噴煙モニタリングプラットフォームの構築に向けた連携（口頭）	真木雅之・中道治久・井口正人	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
火山灰降下予測の連続化（口頭）	井口正人・中道治久・瀧下恒星・Alexandros-Panagiotis Poulidis	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
桜島火山降灰量分布データベース（VASH）の構築（口頭）	真木雅之・西隆昭・小堀壮彦・佐野香那	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
ブルカノ式噴火における噴火微動と火山灰放出量の関係：霧島山新燃岳と桜島の比較（口頭）	及川純・井口正人・田島靖久	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
地盤変動データベースを用いた桜島ブルカノ式噴火の確立的噴火予測（口頭）	石井杏佳・井口正人	令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2023年2月	国内
最近の諏訪之瀬島の噴火活動におけるレーダー反射強度と空振パルス振幅の関係（口頭）	中道治久・井口正人・山田大志	令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2023年2月	国内

気象レーダとディスドロメータ観測から得られた桜島降灰情報（口頭）	真木雅之・井口正人・中道治久・西隆昭・小堀壮彦	令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2023年2月	国内
桜島における連続化降灰予測シミュレータの運用	井口正人・瀧下恒星	令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2023年2月	国内
ドローンを用いた上空の火山灰および気象場の観測（口頭）	山路昭彦・呉映昕・井上実・佐々木寛介	令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2023年2月	国内
都市にひそむ風災害リスクと都市環境変動の影響	竹見哲也	日本建築学会環境工学委員会空気環境運営委員会・第31回空気シンポジウム	2022年9月	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
A physics-based source model for real-time tephra-dispersal forecasting for weak eruption plumes	Ishii, K., Nishijo, A., Koyaguchi, T., Suzuki, Y. J.	Journal of Applied Volcanology	2022年7月	国外
Special Issue on Future Volcano Research in Japan: Integrated Program for Next-Generation Volcano Research	Eisuke Fujita, Masato Iguchi, Yuichi Morita, Setsuya Nakada, Mitsuhiro Nakagawa, Yuki Suzuki	Journal of Disaster Research	2022年8月	国内
Applying the Particle Filter to the Volcanic Ash Tracking PUFF Model for Assimilating Multi-Parameter Radar Observation	Hiroshi L. Tanaka, Haruhisa Nakamichi, Keiichi Kondo, Shoichi Akami, Masato Iguchi	Journal of Disaster Research	2022年8月	国内
Continuously Operable Simulator and Forecasting the Deposition of Volcanic Ash from Prolonged Eruptions at Sakurajima Volcano, Japan	Masato Iguchi, Haruhisa Nakamichi, Kosei Takishita, Alexandros P. Poulidis	Journal of Disaster Research	2022年8月	国内
In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan	Kosei Takishita, Alexandros P. Poulidis, Masato Iguchi	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2022年1月	国外

Long-term ash dispersal dataset of the Sakurajima Taisho eruption for ashfall disaster countermeasure	Haris Rahadianto, Hirokazu Tatano, Masato Iguchi, Hiroshi L. Tanaka, Tetsuya Takemi, Sudip Roy	Earth System Science Data	2022年12月	国外
Estimating the velocity of pyroclastic density currents using an operational dual-PRF radar	Magfira Syarifuddin, Susanna F. Jenkins, Benoit Taisne, Satoru Oishi, Ahmad Basuki, Masato Iguchi	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2022年4月	国外
Estimating Volcanic Eruption Column Height and Growth Rate Using X-Band Marine Radar at the Sakurajima Volcano	Takehiko Kobori, Masayuki Maki, Yasushi Fujiyoshi, Masato Iguchi, Seiji Fukushima	SOLA	2022年10月	国内
Aerodynamic characteristics and genesis of aggregates at Sakurajima Volcano, Japan	Maria Carolina Diaz Vecino, Eduardo Rossi, Valentin Freret-Lorgeril, Allan Fries, Pietro Gabellini, Jonathan Lemus, Stefano Pollastri, Alexandros P. Poulidis, Masato Iguchi, Costanza Bonadonna	Scientific Reports	2022年2月	国外
New insights into real-time detection of tephra grainsize, settling velocity and sedimentation rate	Valentin Freret-Lorgeril, Costanza Bonadonna, Eduardo Rossi, Alexandros P. Poulidis, Masato Iguchi	Scientific Reports	2022年3月	国外
Impacts of urban morphometric indices on ventilation	Duan, G., Nakamae, K., Takemi, T.	Building and Environment	2023年2月	国外
光学式ディスドロメータにより測定された桜島降灰粒子の解析	真木雅之・井口正人	京都大学防災研究所年報	2022年10月	国内
空気振動観測による放出火山灰量推定と噴煙到達高度の検討	山田大志・井口正人・為栗健	月刊地球	2022年7月	国内

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

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「 火山災害対策技術の開発　サブテーマ3：火山災害対策のための情報ツール開発」

機関名　防災科学技術研究所

1．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会名等）	発表した時期	国内・外の別
Assessment of hazards following the July 2022 magma eruption at Io-to (Iwo-To) Island (Ogasawara)（口頭）	Setsuya Nakada, Masashi Nagai, and Eisuke Fujita	IAVCEI 2023, Rotorua	2023年2月	国外
フンガトンガーフンガハーパイ2022年1月噴火の火山学的タイムライン（口頭）	中田 節也、市原 美恵、前野 深、大湊 隆雄、Kula Taaniela、Brenna Marco、Cronin Shane	JpGU2022	2022年5月	国内
小笠原硫黄島における2022年7月マグマ噴火後のハザード評価 (ポスター)	中田節也、長井雅史、藤田英輔	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月	国内
登山者動態データの防災利用（ポスター）	宮城洋介、田中義朗	JpGU2022	2022年6月	国内
登山者参加型避難訓練：ビーコンを使用した登山者動態の把握（口頭）	宮城洋介、吉森和城、金田成元、臼田裕一郎	御嶽山シンポジウム	2022年12月	国内
狭域の降灰分布に対する建物影響について（口頭）	大塚清敏, 野畑有秀, 諏訪仁, 久保智弘,宮城洋介	JpGU2022	2022年5月	国内
降灰への建物影響についての数値計算による予備的検討（口頭）	大塚清敏, 野畑有秀, 諏訪仁, 久保智弘, 宮城洋介	日本建築学会大会2022（北海道）	2022年9月	国内
「富士山での降灰堆積路面における車両走行実験の概要」（口頭）	吉本充宏、西澤達治、久保智弘、本多亮、亀谷伸子、石峯康浩、山本真也、中田節也、山川淳也、藤井敏嗣、山梨県防災局防災危機管理火山防災対策室	日本地球惑星科学連合2022年年次大会	2022年5月	国内

「降灰した道路における車両の走破性能評価（口頭）」	西澤達治、吉本充宏、久保智弘、本多亮、中田節也、亀谷伸子、石峯康浩、山本真也	JpGU2022	2022年5月	国内
「狭域の降灰分布に対する建物影響について」（口頭）	大塚 清敏、野畑 有秀、諏訪 仁、久保 智弘、宮城 洋介	JpGU2022	2022年5月	国内
「避難確保計画策定支援のための活火山周辺の都市構造に関する簡易分析」（口頭）	久保智弘、吉本充宏	2022年度日本建築学会大会	2022年9月	国内
「降灰への建物影響についての数値計算による予備的検討」（口頭）	大塚 清敏、野畑 有秀、諏訪 仁、久保 智弘、宮城 洋介	2022年度日本建築学会大会	2022年9月	国内
Research on Vehicle Running Performance on Paved Roads Covered with Falling Volcanic Ash	Junya Yamakawa, Ryosuke Eto, Yasuhiro Ichikado Mitsuhiro Yoshimoto, Tatsuji Nishizawa, Tomohiro Kubo and Hiroyuki Yamada	11th Asia-Pacific Regional Conference of the ISTVS	2022年9月	国外
「鉄筋コンクリート造を対象とした被覆人工軽石の衝撃吸収効果の検討」（口頭）	久保智弘、吉本充宏、本多亮、西澤達治、立山耕平、木村陸、山田浩之	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月	国内
「赤外線サーモグラフィ試験を用いた鉄筋コンクリート造耐噴石シェルターの健全性評価」（口頭）	木村陸、斉藤順哉、山田浩之、小笠原永久、立山耕平、吉本充宏、本多亮、久保智弘、西澤達治、佐々木寿	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Construction and Provision of Digital Photographic Archives by Using the Japan Volcanological Data Network System: Application to the 1990–1995 Mount Unzen Eruption Disaster	Yuhki Kohno, Hideki Ueda, and Setsuya Nakada	J. Disaster Research	2022年8月	国内
Impact on the Electric Infrastructure Due to Volcanic Ash from a Hydrovolcanic Eruption of Aso Volcano in 2016	Masashi Nagai and Setsuya Nakada	J. Disaster Research	2022年8月	国内
A Consideration on Volcanic Ash Ingress into the Horizontal Air Intake of Air Conditioning	Kiyotoshi Otsuka, Arihide Nobata, Hitoshi Suwa, Tomohiro Kubo, Yousuke Miyagi and Masamitsu Miyamura	J. Disaster Research	2022年8月	国内
火山噴火の降灰による建物への影響と被害評価法	諏訪仁、大塚清敏、野畑有秀、久保智弘、宮村正光、宮城洋介	雑誌「建築設備と配管工事」	2022年7月	国内
富士山における登山者の火山噴火に関する認識	丸山 洸・三ツ井 聡美・吉本 充宏・石峯 康浩・本多 亮・秦 康範	自然災害科学	2022年	国内
富士山周辺市町村住民を対象とした事前アンケート調査に基づく火山防災講習会の試行	佐藤 史弥・吉本 充宏・本多 亮・秦 康範	自然災害科学	2022年	国内
Development of Prototype Volcano Information Portal Website (VIP) for the Municipalities' Disaster Response	Tomohiro Kubo, Yousuke Miyagi, Mitsuhiro Yoshimoto, Ryo Honda, and Yasuhiro Ishimine	Journal of Disaster Research	2023年3月	国内
富士山大規模噴火と都民の意識－2022年東京都民調査から－	関谷直也・安本真也・富澤周・葛西優香・内田充紀	東京大学大学院情報学環紀要 情報学研究・調査研究編，No.39，pp.107-146.	2023年2月	国内