

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5年度  
成果報告書

令和6年5月  
文部科学省研究開発局  
国立研究開発法人 防災科学技術研究所

本報告書は、文部科学省の令和5年度科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が実施した令和5年度「課題D：火山災害対策技術の開発」の成果を取りまとめたものです。

## グラビア

### サブテーマ 1



図 1 UAV 取得画像の確認用補助アプリケーションの処理結果

赤線は UAV の飛行コース。UAV で連続撮影した画像に抜けがないことが確認できる。

## サブテーマ 1

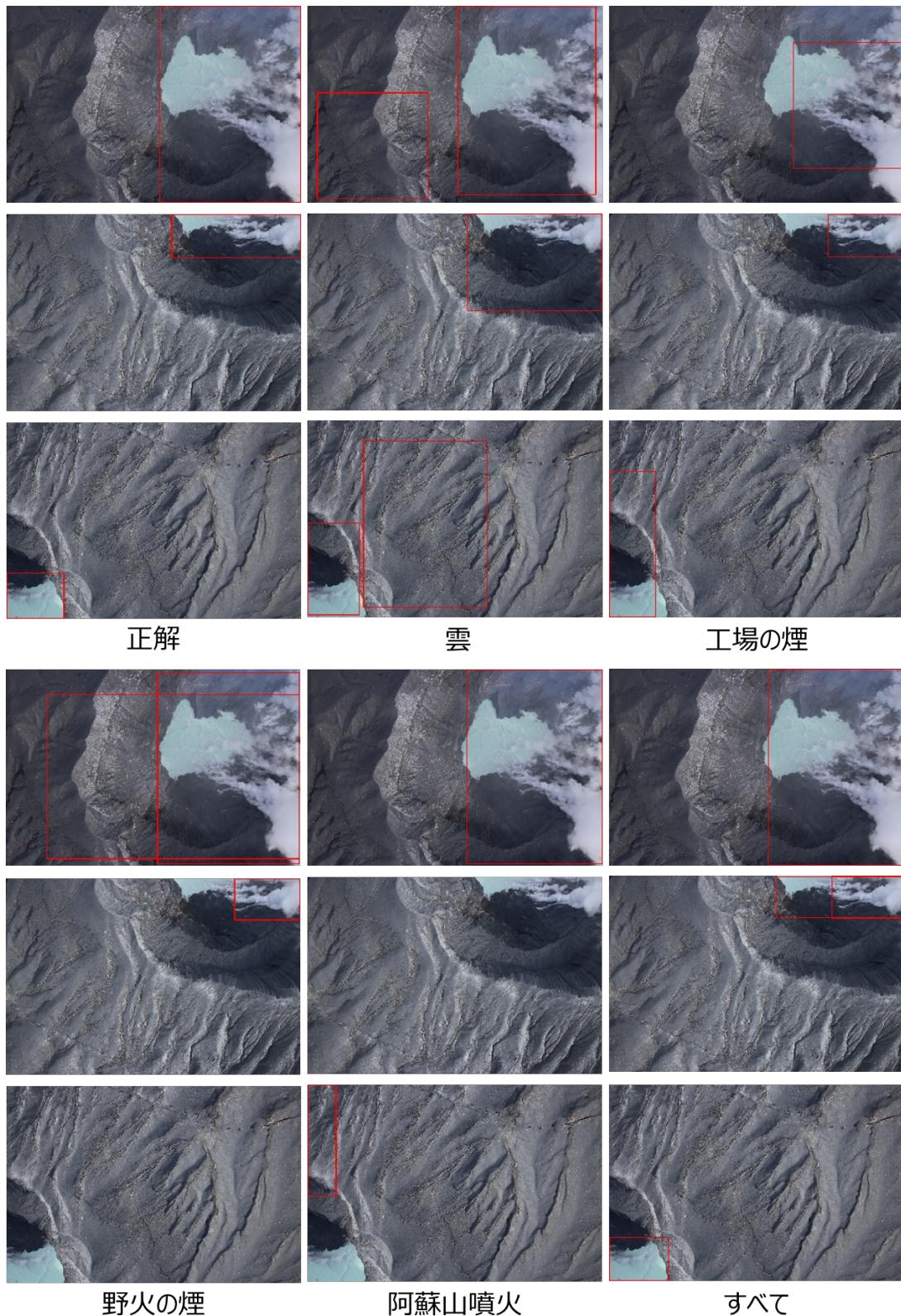


図 2 噴気の自動抽出結果（各 3 場面、学習方法の違いによる 5 モデル）  
赤枠は噴気があるエリア。雲、工場の煙、野火の煙、阿蘇山噴気の全てを学習データに使  
用した場合が最も再現率が高い。

## サブテーマ 1

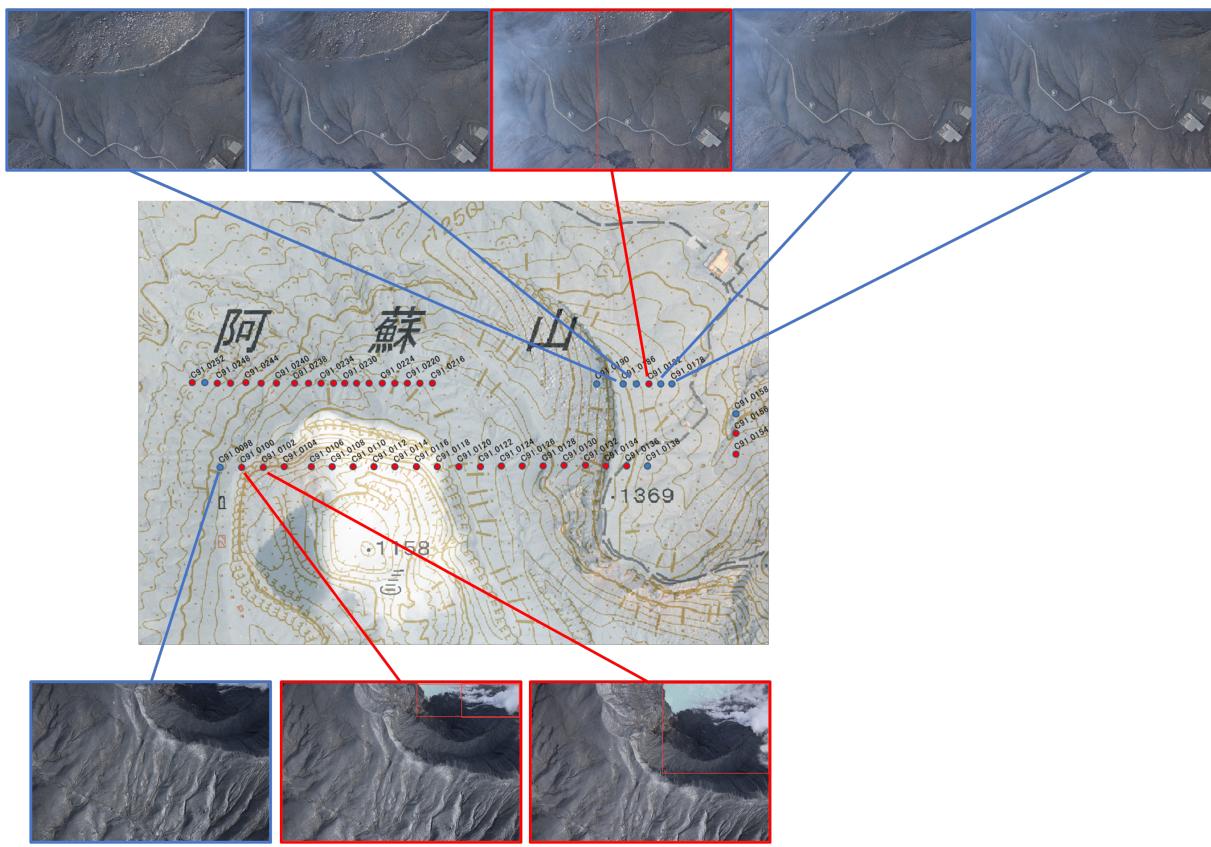


図 3 UAV 撮影地点毎の噴気写り込み判定結果の地図表示および対応する画像  
(赤：噴気写り込みありの地点、青：噴気写り込み無しの地点)

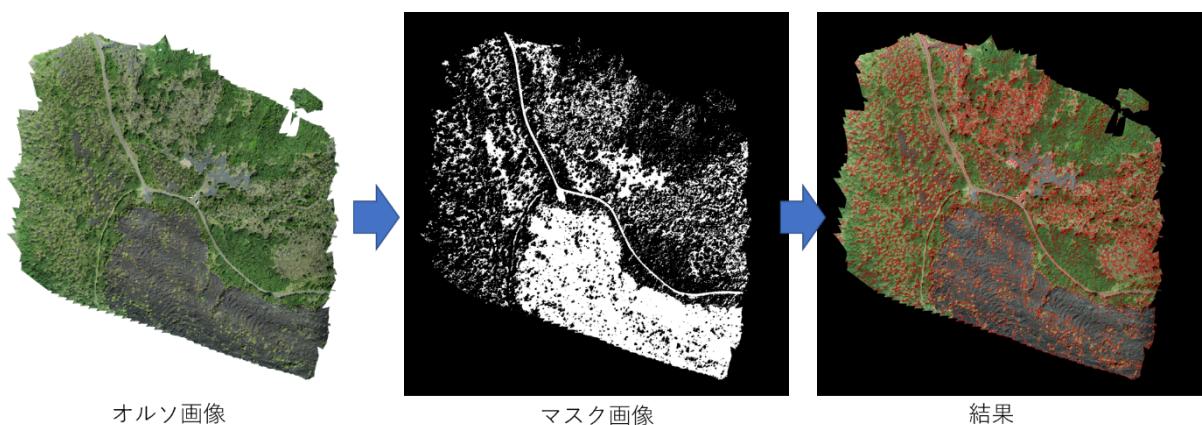


図 4 溶岩流の境界抽出

UAV で得られたオルソ画像からマスク処理を行い溶岩流の境界を抽出した。

## サブテーマ 2

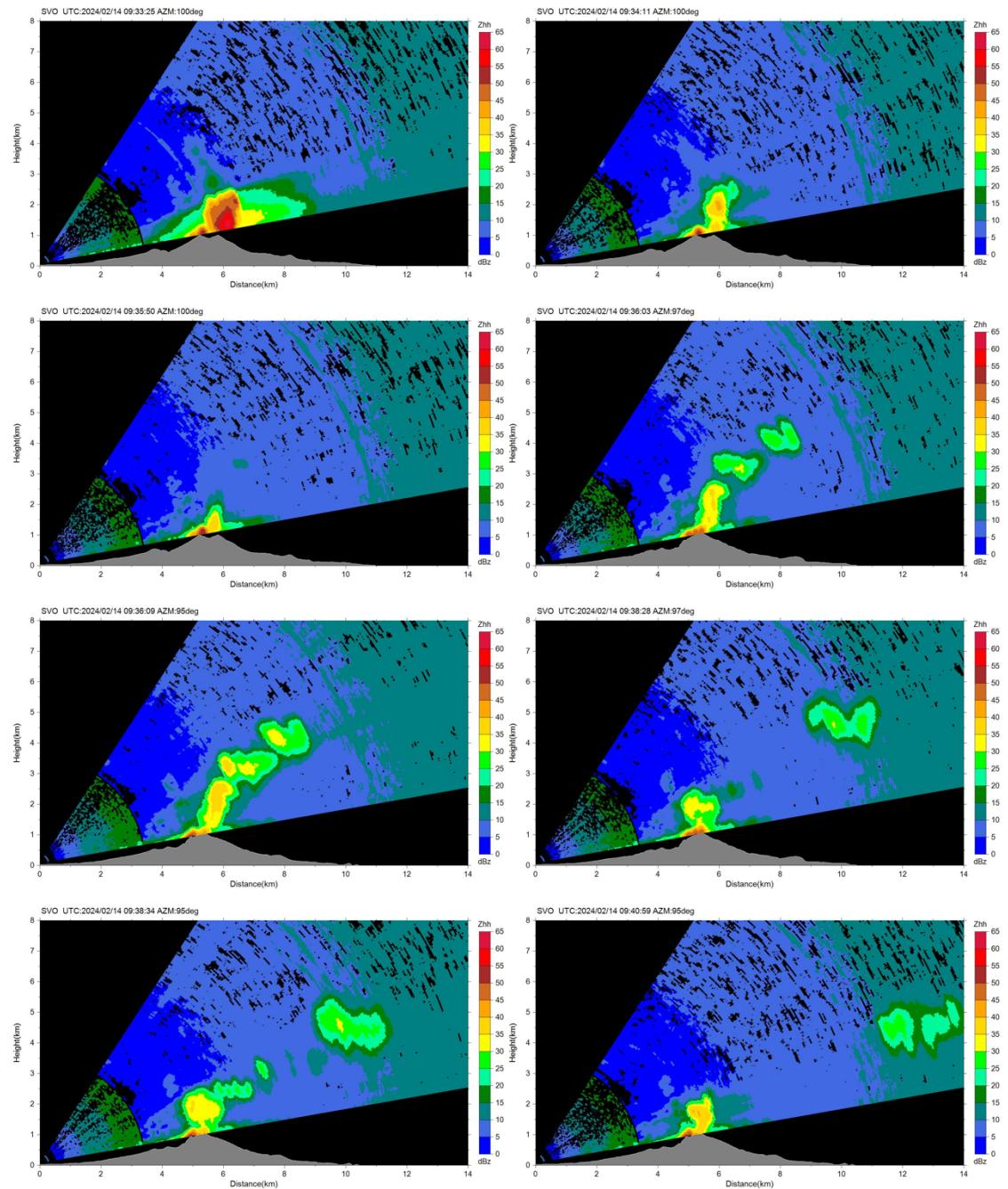


図 5 レーダによって観測された桜島爆発の噴煙の動き。桜島火山観測所から南岳方向の断面を RHI スキャンした 2024 年 2 月 14 日 18:33～18:41 のレーダ画像。図に記載した時刻は UTC。AZM は北から時計回り方位角を示す。

## サブテーマ 2

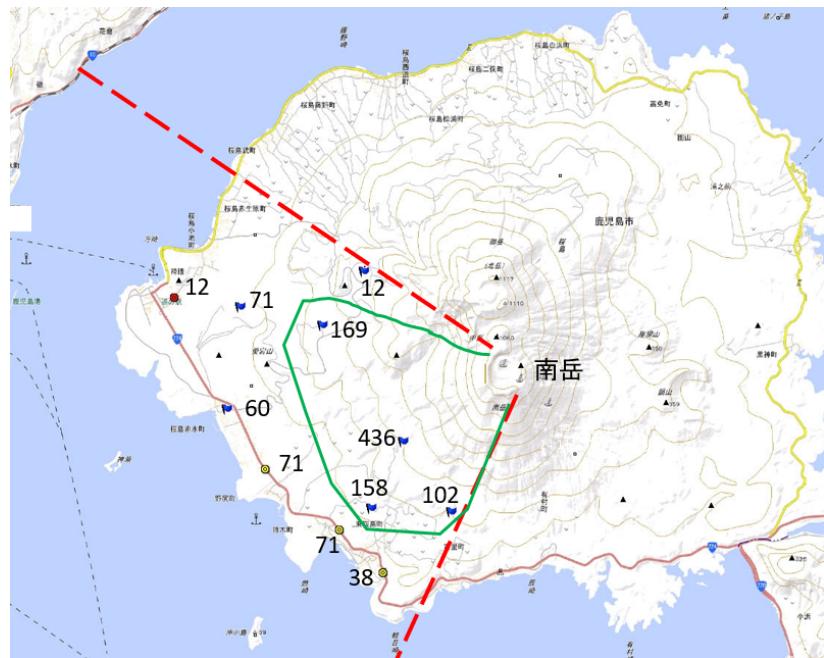


図 6 桜島における降灰量のキャンペーン観測。2023年10月11日7時52分に発生した噴火に伴う降灰量分布 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )。火山灰は南岳の南西山麓に降下した。

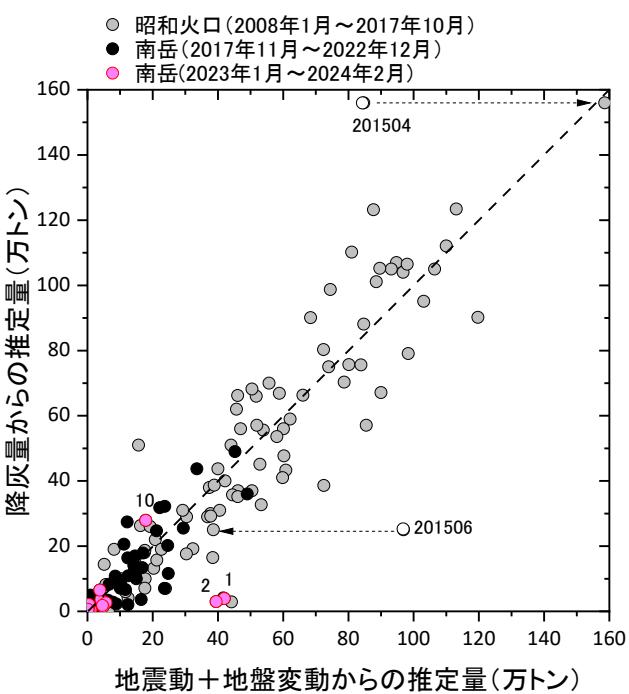


図 7 地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーから火山灰放出量を推定する経験式の高精度化。2009年1月から2024年2月までの15年間の月ごとのサンプリングから求めた火山灰放出量と経験式から火山灰放出量の関係。201504と201506で示される2015年4月と6月の値は、地震動と地盤変動を再検討することにより見積もり精度が改善された。

## サブテーマ 2

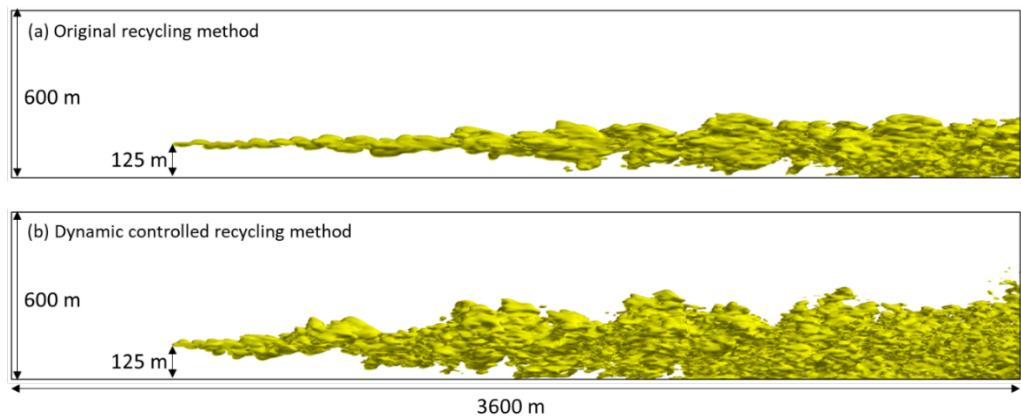


図 8 亂流を考慮した移流拡散シミュレーションの高度化。異なる乱流生成手法によりシミュレーションされた点源から放出された物質濃度の拡散場のスナップショット。(a) Nakayama et al. (2012) の手法による解析結果、および (b) Nakayama and Takemi (2024) により改良された手法による解析結果。



図 9 噴煙の大気中の上昇による気象場の検討のために、水槽を用いて火山模型周りの密度流れ場を可視化した。PIV (Particle Image Velocimetry) により、輝点の運動を追跡して流速分布を計測する。

## サブテーマ 2

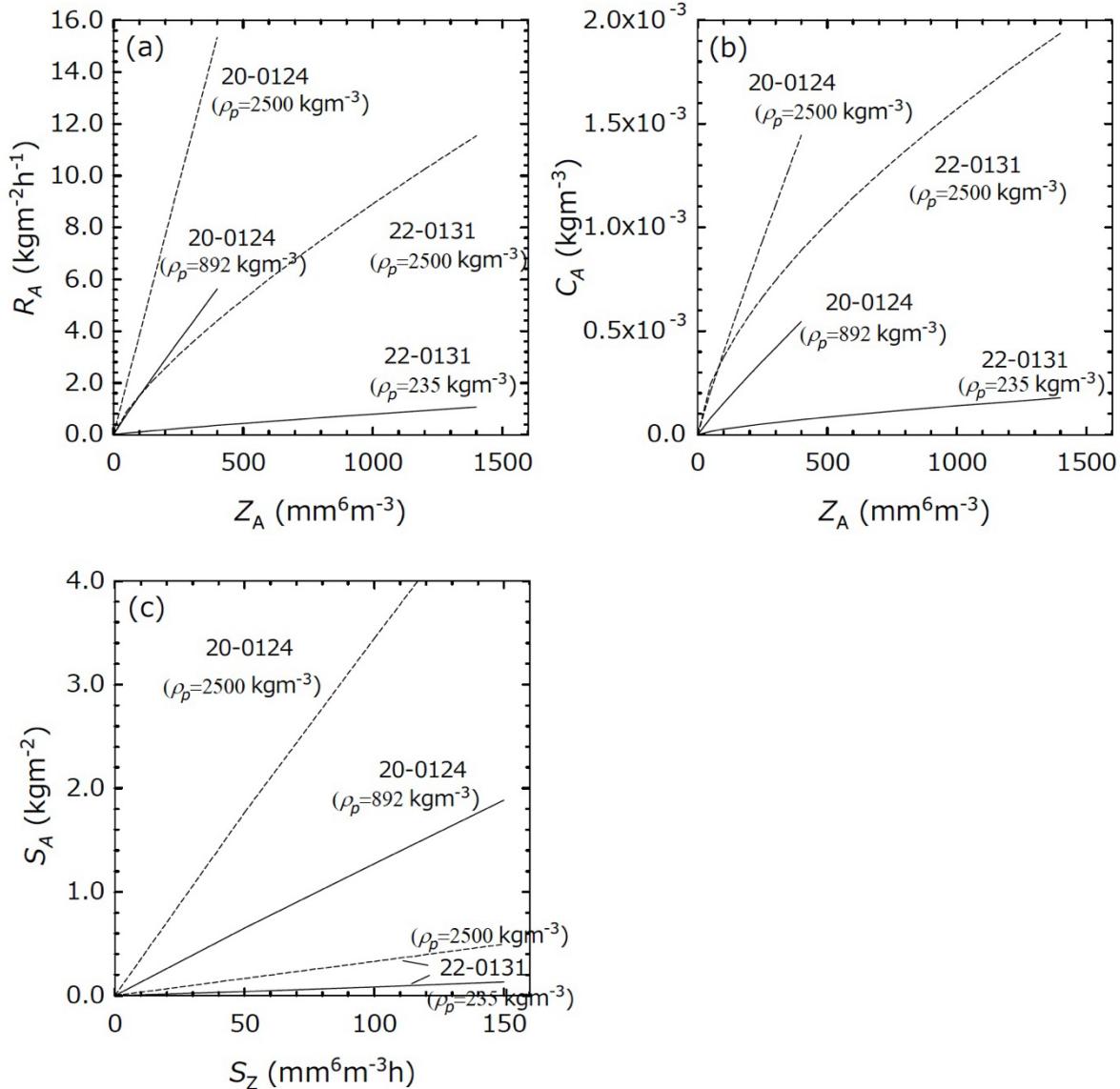


図 10 降灰量予測の高精度化のために火山灰粒子の凝集の効果を検討し、レーダの反射強度に基づく降灰量予測式を改善した。噴火事例 20-0124 と 22-0131 の降灰量推定式。破線は密度を  $2500 \text{ kgm}^{-3}$  とした場合の推定式。(a) レーダの反射強度 ( $Z_A$ ) と降灰強度 ( $R_A$ ) の関係。(b) レーダの反射強度 ( $Z_A$ ) と空間密度 ( $C_A$ ) の関係。(c) 積算量の関係。

## サブテーマ 2

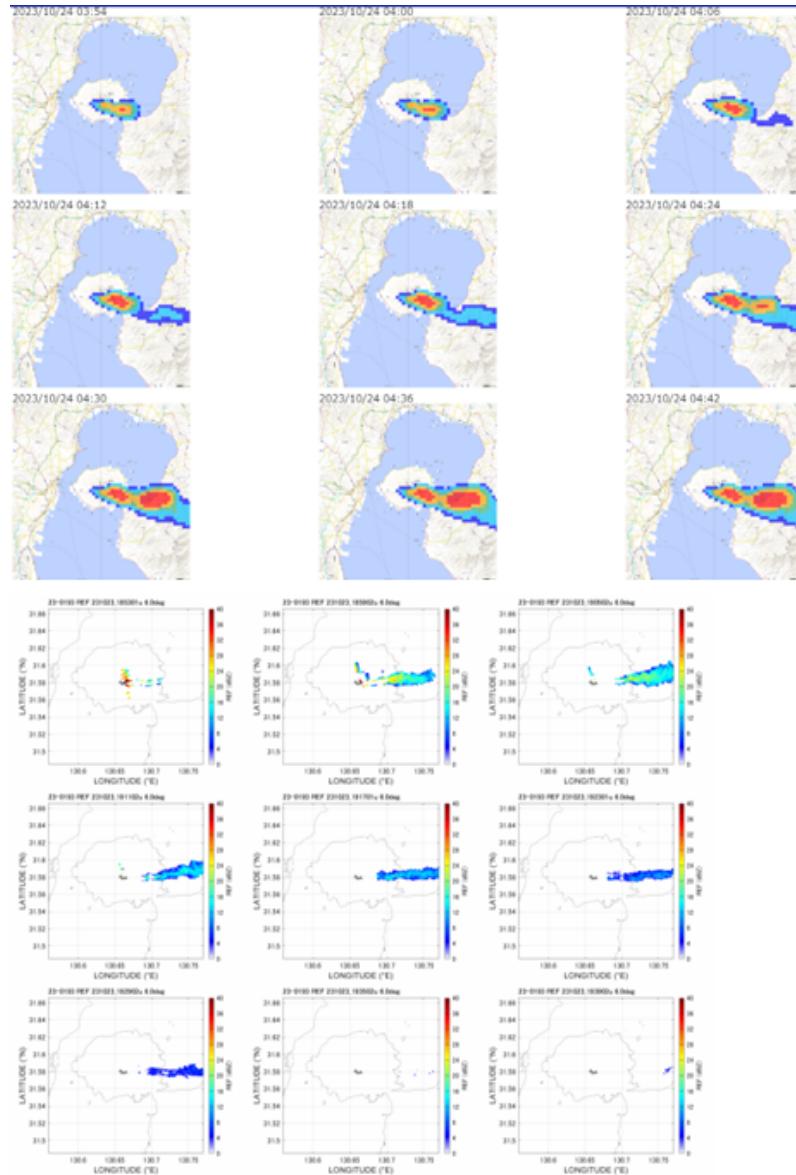


図 11 の連続的予測のために開発したオンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）。レーダー解析による降灰量分布の結果（下段）と比較した。2023 年 10 月 24 日 3 時 46 分の噴火。

## サブテーマ 2

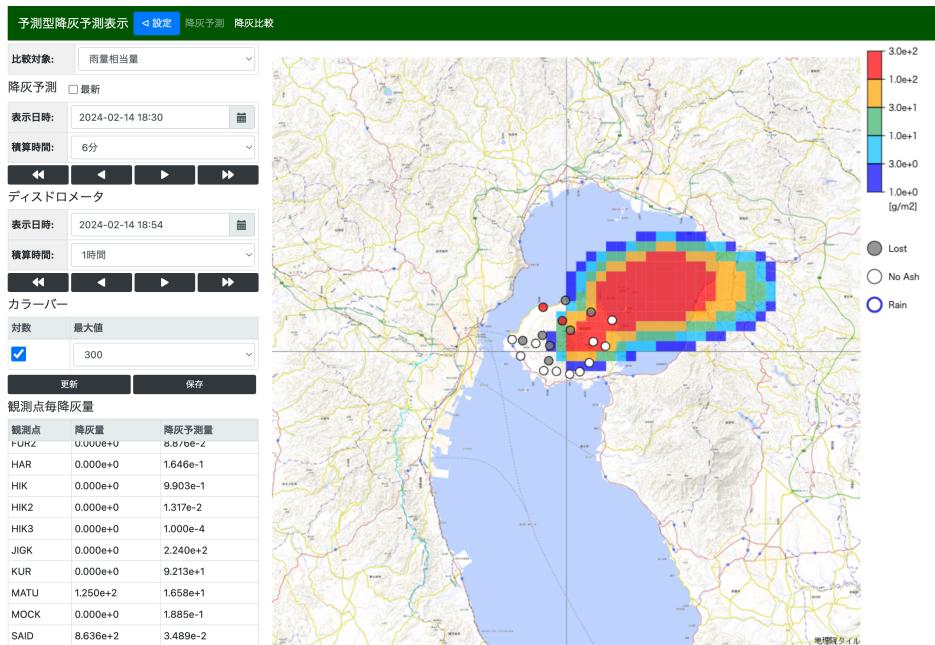


図 12 噴火発生前の確率的降灰予測シミュレータの Web ブラウザ上の出力結果（2024 年 2 月 14 日 18:30）。丸で示されるのはディスドロメータの観測点。

### サブテーマ 3



図 13 道庁が支援した雌阿寒岳火山噴火総合防災訓練

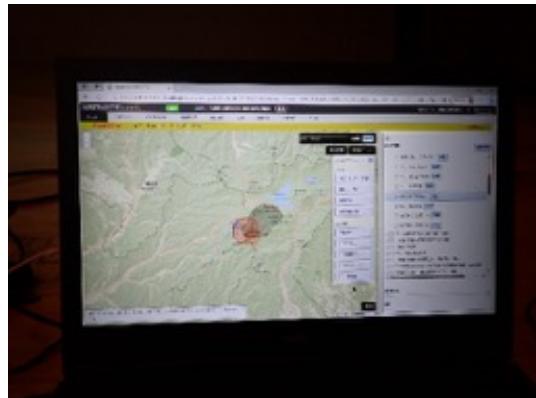


図 14 北海道庁の防災情報システムによる情報共有



図 15 十勝岳噴火を想定した美瑛消防署における図上訓練



図 16 美瑛町内での自衛隊の支援による避難訓練



図 17 2024 年 2 月に富士砂防が実施した火山礫の清掃実験（ロードスイーパー）



図 18 同じく火山礫除去の様子

### サブテーマ 3

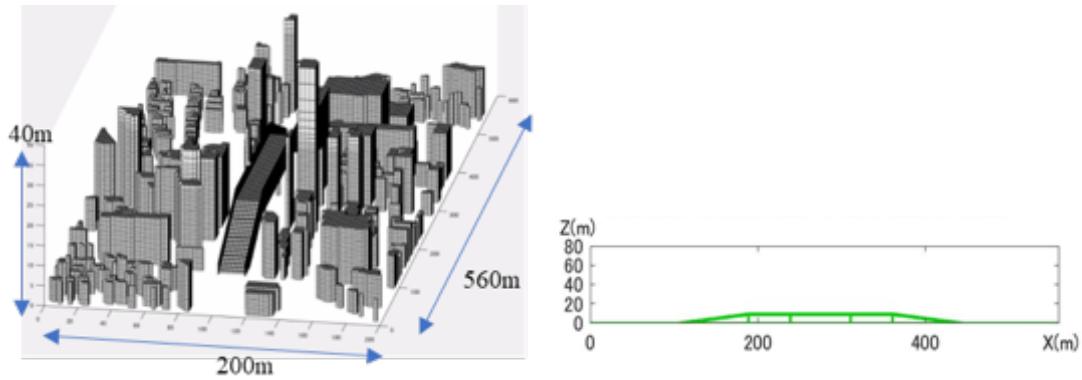


図 19 立体交差道路（領域 B）のモデル化（左：南東からの鳥瞰図、右：南北断面図）

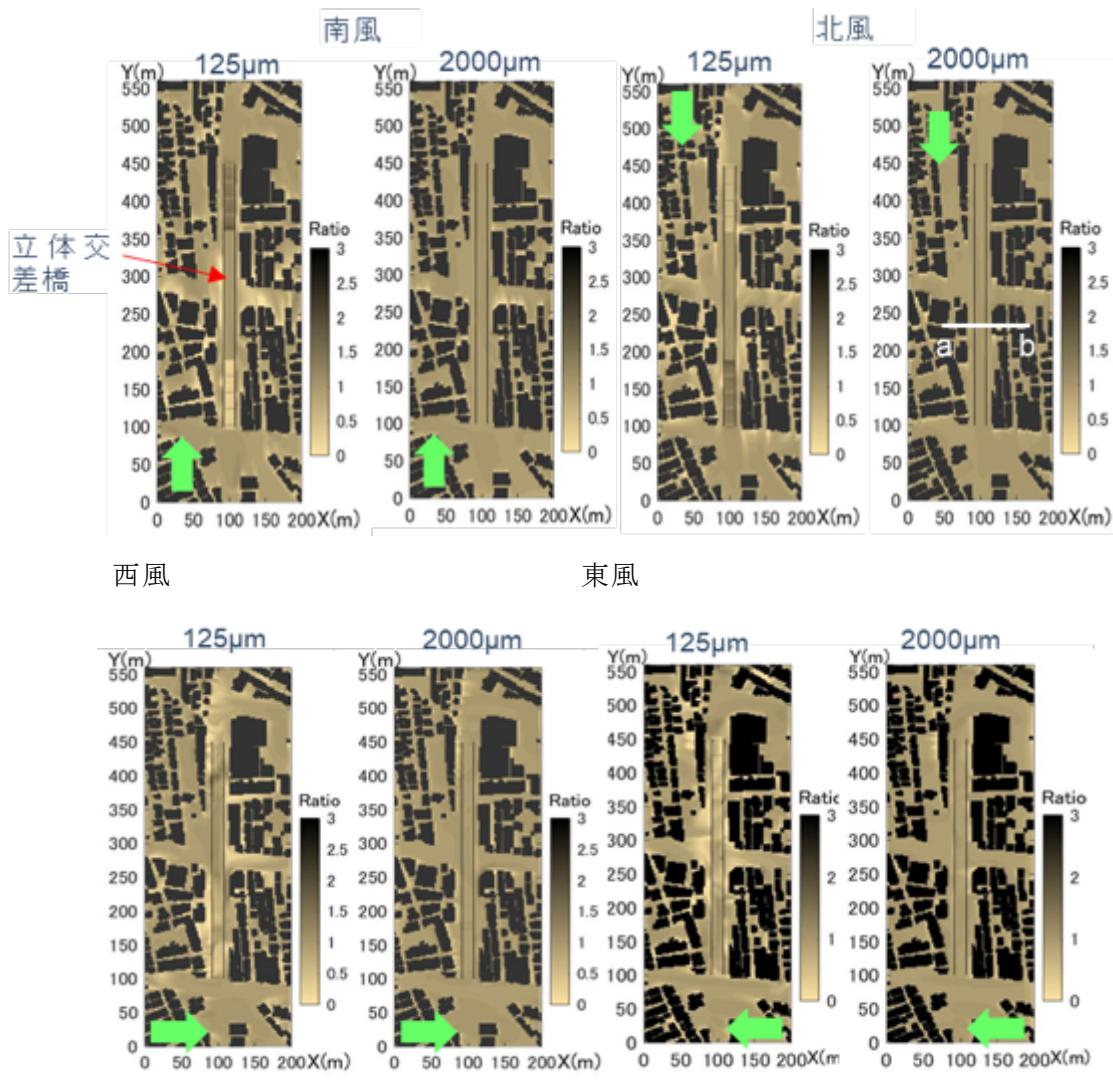


図 20 立体交差橋含む交差点周辺の無次元降灰強度。南北に走る道路にある 2 本の平行直線は高架橋の位置を示す（黒のハッチは建物等障害物、都市内道路の例として環状八号—甲州街道交差点付近を近似的に模擬）

### サブテーマ 3

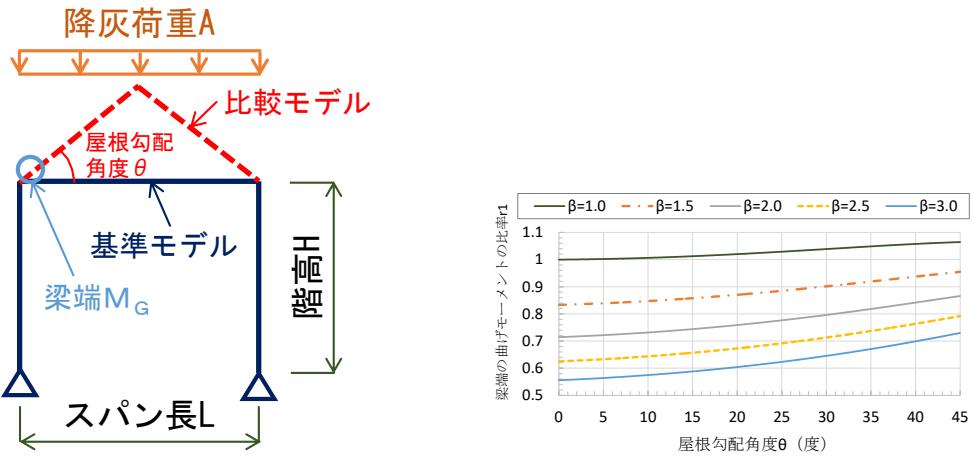


図 21 (左) 1層 1スパン山形ラーメン構造物の梁に作用する降灰荷重(屋根勾配  $\theta$  時)  
 (右) 梁端の曲げモーメントの比率

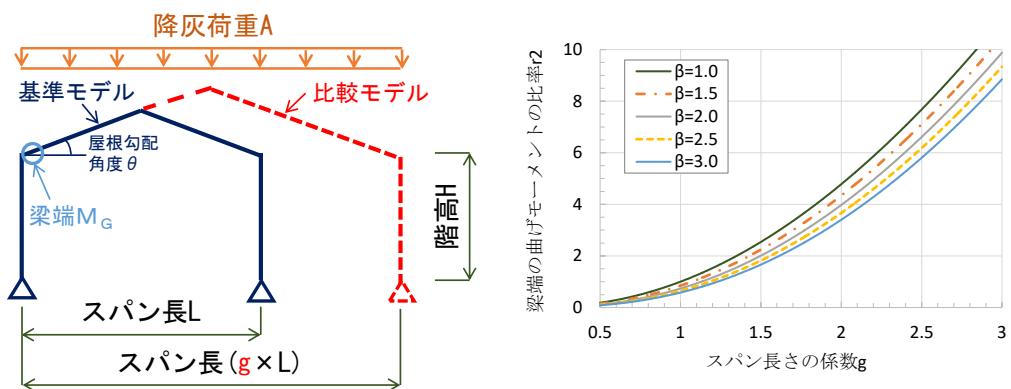


図 22 (左) 1層 1スパン山形ラーメン構造物の梁に作用する降灰荷重(スパン長変化時)  
 (右) スパン長  $L$  の係数  $g$  と梁端の曲げモーメントの比率  $\alpha$  の関係(屋根勾配角  
 $14^{\circ}$  時)

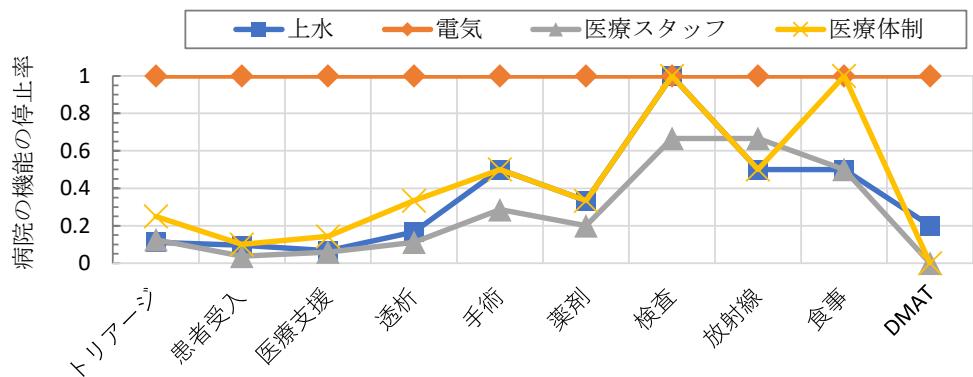


図 23 病院重要要素(図上段)の各被害時における病院機能(災害医療)停止率

### サブテーマ3

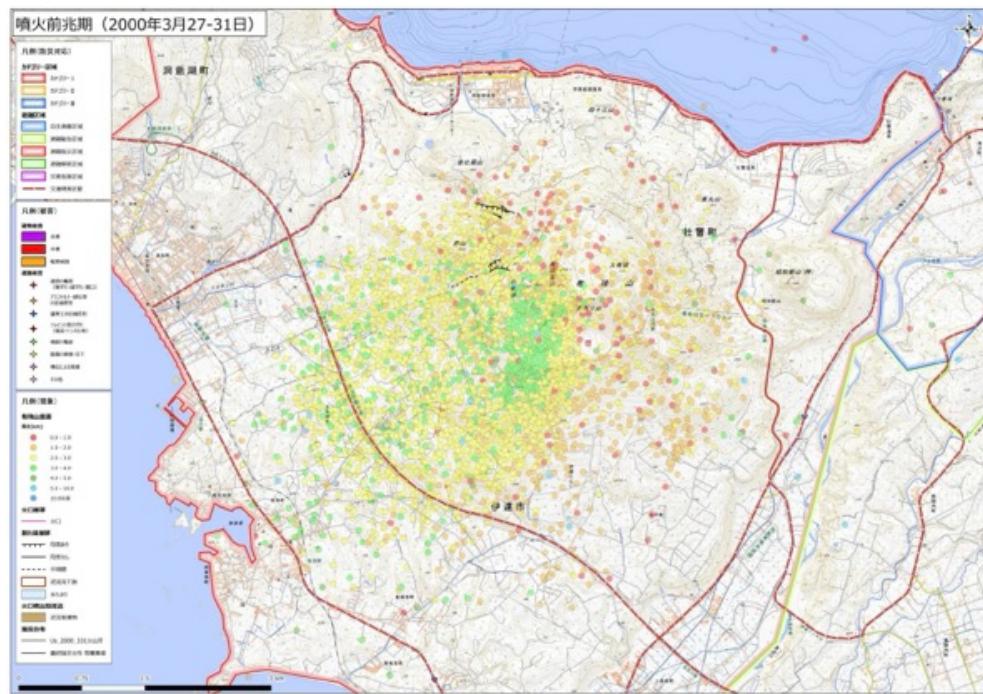


図 24a 有珠山 2000 年噴火時における災害に関する GIS 上で表示したステージ分類図（噴火前兆期）。地震震源、地殻変動、降灰状況、被害及び避難区域などの情報を表示。

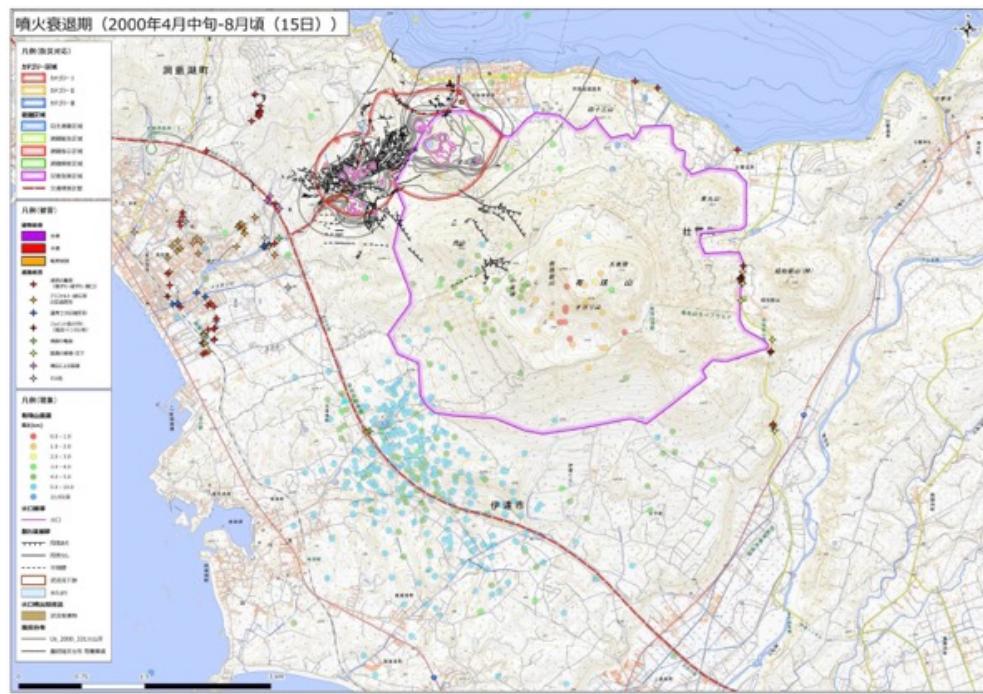


図 24b 有珠山 2000 年噴火時における災害に関する GIS 上で表示したステージ分類図  
(噴火衰退期)

### サブテーマ 3



図 25 御嶽山で実施した登山者動向把握実験で対象とした黒沢口登山道（緑線）と王滝口登山道（橙線）。2023 年の実験で設置したレシーバー（21か所）を青丸で示す。なお、2022 年に実施した同様の実験で設置したレシーバー（17か所）を赤四角で示す。ビーコン配布箇所（おんたけロープウェイ鹿ノ瀬駅、中の湯駐車場、田の原駐車場）を灰色円で示す。黒い円は 2014 年噴火の際の火口（黒三角）から 1km の範囲を示す。

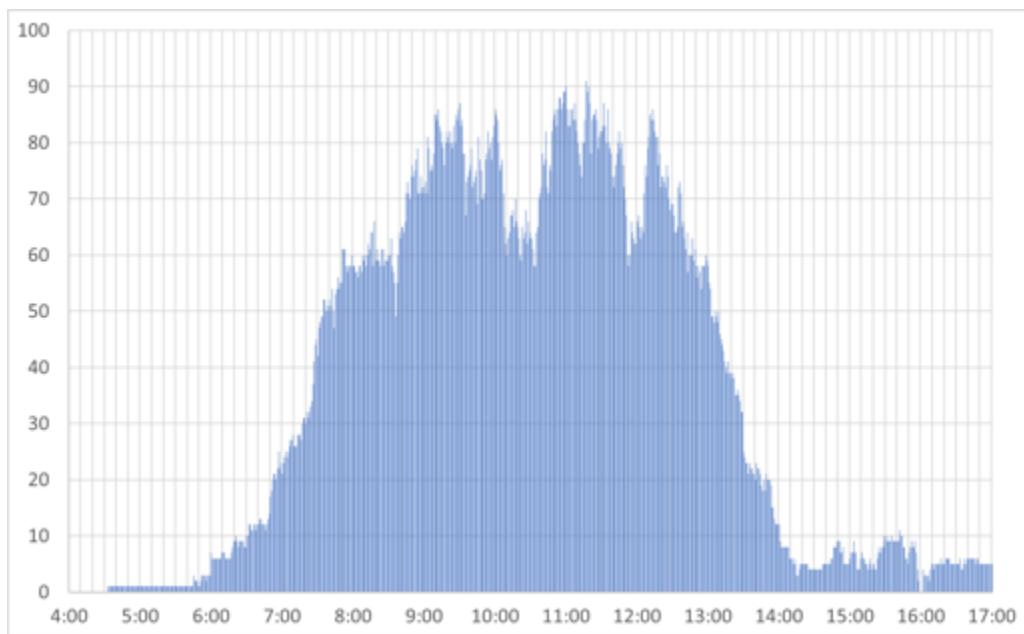


図 26 同上実験で火口から 1km の範囲（上図黒円）内にいる登山者数の時間変化（2023 年 8 月 25 日土曜日）

## 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。防災関係機関や火山防災協議会に所属する火山専門家が受け取ったそれらの情報（特に、降灰被害予測に関する情報）を、事前の防災対策や発災中の避難行動に（気象庁から発出される噴火警戒レベルに加味し）活かすことが可能になる。それには、課題Bや課題Cで実施されている噴火観測・予測の研究成果から、火山の状態がどのようにあり、今後どのように展開するのか、どのような被害がありうるのかも含めて正確で分かりやすい情報を、課題Aで開発したJVDNを活用しながら情報ツールを使用して発信することが重要である。それが課題Dの目的であると同時に、本次世代火山プロジェクト全体のアウトプットでもある。以下に、課題D各サブテーマの本年度の研究概要について以下に示す。

サブテーマ1では、現地でのデータ取得を適切にできなかった場合の課題に対応するために、R4年度の有珠山での実証実験で取得したデータをもとに、補助アプリケーションを試作した。また、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した。

サブテーマ2では、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、長時間継続する噴火活動に対処する手法を高度化した。そのため、リモートセンシング観測を継続し、新たなデータを取得した。また、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、その妥当性を検証するとともに課題について検討した。さらに、桜島における過去の地盤変動データを整理し、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から降灰分布を予測するシステムを開発した。

サブテーマ3では、次年度からの社会実装へ向けて情報コンテンツ試作版の高度化を進めた。昨年度に続き、地方自治体防災関係者やライフライン関係者へのインタビュー実施、防災訓練などに参加し、情報コンテンツや情報発信の在り方について検討した。また、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病院機能への被害影響分析を行った。日本の過去の噴火災害の噴火活動進行と災害及び対策に関する時系列に関する空間情報をGIS上で表示することを試みた。さらには、御嶽山で登山者動向把握実験を昨年度に引き続いて実施するとともに、登山者の移動の特徴を定量的に検討した。退避豪等の耐衝撃性を評価のための実験を継続した。

## 目次

<b>1. 研究概要の説明</b>	<b>19</b>
(1) 研究者別の概要	19
(a) サブテーマ 1	19
(b) サブテーマ 2	20
(c) サブテーマ 3	22
(2) 研究実施日程	24
(a) サブテーマ 1	25
(b) サブテーマ 2	25
(c) サブテーマ 3	26
<b>2. 研究成果の説明</b>	<b>27</b>
<b>2. 1 サブテーマ 1</b>	<b>27</b>
(1) 業務の内容	27
(a) 業務題目	27
(b) 担当者	27
(c) 業務の目的	27
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	28
(e) 令和 5 年度における業務の方法	29
(2) 令和 5 年度の成果	30
(a) 業務の要約	30
(b) 業務の成果	30
(c) 結論	48
(d) 引用文献	48
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	48
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	48
(3) 令和 6 年度の業務計画案	49
(a) プロジェクトの総合推進	49
(b) RTK-GNSS 搭載 UAV を用いた実証実験の実施	49
(c) データ取得作業効率化の検討	49
(d) 画像や 3D 地形モデルから状況認識する方法の検討	49
(e) 解析作業効率化の検討	49
<b>2. 2 サブテーマ 2</b>	<b>50</b>
(1) 業務の内容	50
(a) 業務題目	50
(b) 担当者	50
(c) 業務の目的	50
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	51

(e) 令和 5 年度における業務の方法 .....	52
(2) 令和 5 年度の成果.....	55
(a) 業務の要約 .....	55
(b) 業務の成果 .....	55
(c) 結論 .....	152
(d) 引用文献 .....	152
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 .....	155
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 .....	155
(3) 令和 6 年度の業務計画案.....	155
(a) 業務計画、実施方法 .....	156
(b) 目標とする成果 .....	158
<b>2. 3 サブテーマ 3 .....</b>	<b>159</b>
(1) 業務の内容.....	159
(a) 業務題目 .....	159
(b) 担当者 .....	159
(c) 業務の目的 .....	159
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） .....	161
(e) 令和 5 年度における業務の方法 .....	163
(2) 令和 5 年度の成果.....	165
(a) 業務の要約 .....	165
(b) 業務の成果 .....	165
(c) 結論 .....	233
(d) 引用文献 .....	234
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 .....	236
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 .....	236
(3) 令和 6 年度の業務計画案.....	237
(a) 周知啓発教育用コンテンツの社会実装 .....	237
(b) 降灰被害予測コンテンツの社会実装 .....	237
(c) 避難・救助支援コンテンツの社会実装 .....	237
(d) 情報ツール利活用方策の検討 .....	237
(e) 自発的な研究活動等.....	238
<b>3. 会議録.....</b>	<b>238</b>
(1) 課題D全体.....	238
(2) サブテーマ 1 .....	238
(3) サブテーマ 2 .....	239
(4) サブテーマ 3 .....	239
<b>4. むすび.....</b>	<b>239</b>

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 副部長 社会システムコンサルタント部 部長 社会システムコンサルタント部 社会システムコンサルタント部 先端技術研究所	千葉達朗 佐々木寿 野中秀樹 森 貴章 谷口宙河 小森惇也	<p>【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。</p> <p>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、補助アプリケーションを試作し、取得データの高精度化に寄与する研究を進めることができた。また、AIを活用し、事象抽出を試み、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。</p>	R5.4.1～R6.3.31	6,015,289	1,388,143

## (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。	R5.4.1～R6.3.31	62,534,99	14,431,153
同・准教授	中道 治久	レーダ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、建物に衝突した際の破壊性状を明らかにした。	同上		
同・特定教授	山路 昭彦	ドローンによる上空の風速ベクトルと火山灰・ガスの観測を行い、風速場の高精度化の観測データを取得した。	R5.4.1～R5.8.31		

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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31		
同・研究員	眞木 雅之	レーダの反射強度と降灰の粒径分布の関係を検討し、両者の間の理論式を導出した。	同上		
同・研究員	西 隆昭	船舶レーダによる噴煙柱モニタリング技術の実用化を図った。	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し噴出量を推定した。	同上		
同・技術補佐 員	佐野 香那	レーダデータをデータベース化した。	同上		
学振特別研究 員 DC2	瀧下 恒星	ディスク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った。	R5. 4. 1～ R5. 4. 30		
以下研究協力 機関  神戸大学・都 市安全研究セ ンター・教授	大石 哲	レーダの反射強度と降灰の粒径分布の関係を検討した。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31		
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・統括主幹	山路 昭彦	ドローンによる上空の風、火山灰、ガス観測のとりまとめ。	R5. 9. 1～ R6. 3. 31		
同・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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31		

同・技師長	井上 実	ドローンによる上空の風速ベクトルと火山灰・ガスの観測を行い、風速場の高精度化の観測データを取得した。	同上		
高知大学・自然科学系理工学部門・教授	佐々 浩二	船舶レーダによる噴煙柱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	船舶レーダによる噴煙柱モニタリング技術の実用化を図った。	同上		
ブレーメン大学・ポスドク研究員	Alexandr os P. Poulidis	メソ気象モデルに基づいて風速場の再現し、火山ガス濃度から妥当性を検証した。	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・参考事	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。降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化を担当し、過去の自然災害の空間情報の可視化を行った。	R5.4.1-R4.3.31	8,998,510 円	2,076,579 円
防災科学技術研究所・火山防災研究部門・主任研究員	宮城洋介	避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化を担当し、御嶽山における地元自治体と協力した登山者動向把握及び状況共有のための実証実験を実施した。	同上	同上	同上
防災科学技術研究所・火山防災研究部門・部門長	藤田英輔	避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化を担当した。	同上	同上	同上
防災科学技術研究所・火山研究推進センター・センター長	清水洋	周知啓発・教育コンテンツ試作版の高度化を担当した。	同上	同上	同上

防災科学技術研究所・火山研究推進センター・特別研究員	棚田俊收	周知啓発・教育コンテンツ試作版の高度化を担当	同上	同上	同上
防災科学技術研究所・火山研究推進センター・客員研究員	宮村正光	降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化を担当した。	同上	同上	同上
電力中央研究所・主任研究員	上澤真平	降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化を担当した。	同上	同上	同上
大林組・技術本部技術研究所・構造技術研究部・副部長	諏訪 仁	降灰荷重による建物屋根への検討を山型の屋根を対象に行い、降灰量に対する被害率の曲線を求めた。災害時の重要施設である病院の機能被害について検討を行った。	R5.4.1-R6.3.31	5,762,316 円	1,329,76 5 円
大林組・技術本部技術研究所・都市環境技術研究部・上級主席技師	大塚清敏	都市街区を対象とした降灰計算を行い、建物影響による降灰性状、粒径依存性を明らかにした。都市内道路への降灰にも着目した。火山灰空間濃度からの設備機器被害予測への関連付けを検討した。	同上	同上	同上
大林組・技術本部技術研究所	野畠有秀	屋根への降灰荷重の影響および病院の機能被害検討を行った。	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所・研究管理幹	吉本充宏	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化</li> <li>・ 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化</li> </ul> <p>研究成果の概要 :</p> <p>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った。</p> <p>避難・救助支援コンテンツについては、退避壕（シェルター）等の</p>	R5.4.1-R6.3.31	9, 584, 00 3円	2,211,69 3円

		耐衝撃性を評価するために、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壕等の対策に資する実験結果の整理や既存退避壕の情報整理等を行った。			
山梨県富士山科学研究所・研究管理幹	石峯康浩	・	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所・主任研究員	本多亮	・	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所・研究員	久保智弘	・	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所・研究員	西澤達治	・	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所・研究員	亀谷伸子	・	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所・研究員	山河和也	・	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所・研究員	佐藤明夫	・	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際して防災関係機関が影響評価や対策策定上に求められる情報について、通信機能を中心に関係機関との意見交換を実施した。	R5.4.1-R6.3.31	4,923,776円	1,136,256円
同・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	←											→
データ取得作業効率化の検討		←							→			
画像や3D地形モデルから状況認識する方法の検討				←					→			
解析作業効率化の検討		←					→					
データ取得から状況把握までの手順化・課題整理				←					→			

(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

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務題目

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

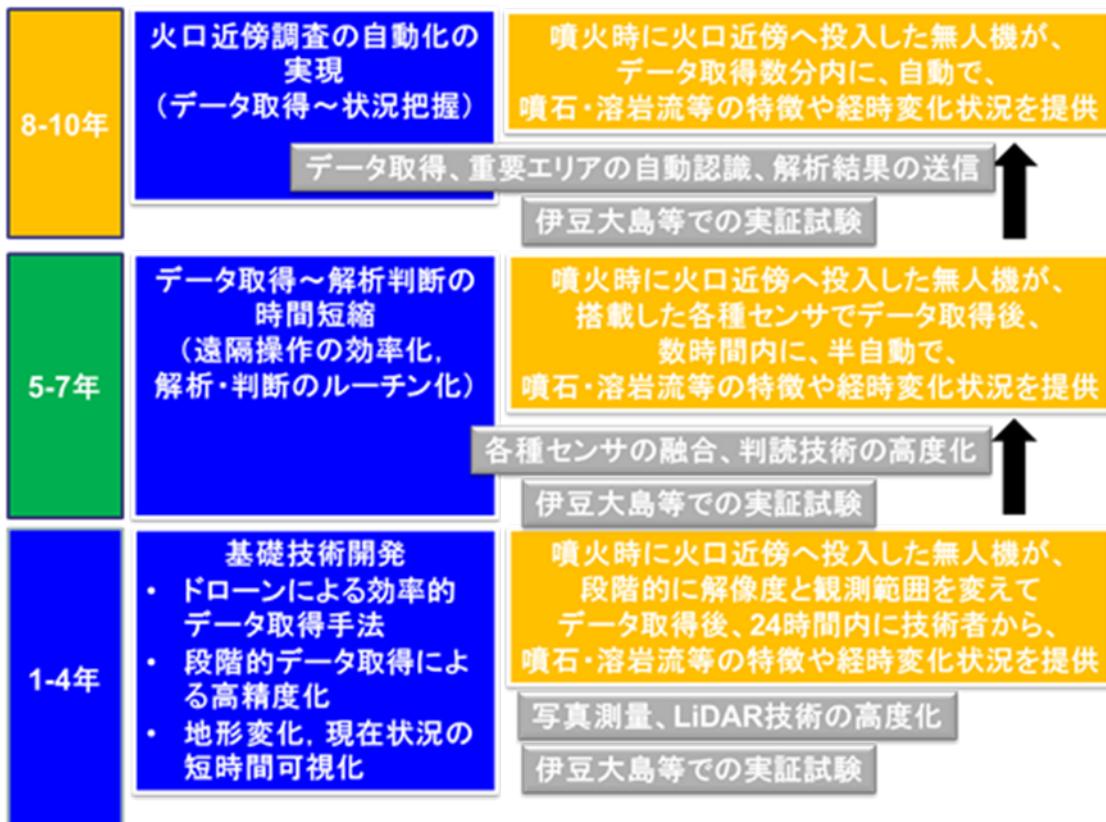
##### (b) 担当者

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

##### (c) 業務の目的

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

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



#### (d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

##### 1) 平成 28 年度：

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

##### 2) 平成 29 年度：

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

##### 3) 平成 30 年度：

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

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

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

5) 令和 2 年度：

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

6) 令和 3 年度：

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

7) 令和 4 年度：

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

8) 令和 5 年度：

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

9) 令和 6 年度：

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

10) 令和 7 年度：

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

(e) 令和 5 年度における業務の方法

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) データ取得作業効率化の検討

- 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。

## (2) 令和 5 年度の成果

### (a) 業務の要約

- 現地でのデータ取得を適切にできなかった場合の課題に対応するために、R4 年度の有珠山での実証実験で取得したデータをもとに、補助アプリケーションを試作した。
- 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した。

### (b) 業務の成果

#### 1) プロジェクトの総合推進

##### a) サブテーマ 2 との連携

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）を図ることで、数値地形モデルの迅速な作成に関する連携を実施した。

b) サブテーマ3との連携

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い、早期に提供できる情報の高度化を図ることで、地図と重ねられる「三次元表示（三次元座標）」の迅速な作成に関する連携を実施した。

c) テーマA、B4、Cとの連携

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した。その抽出結果を地図上に重ね合わせることが可能な形式で出力することで、同一課題内での連携を推進した。

d) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携として、火山調査関連技術や火山防災業務の紹介等への参加者募集を行う予定であったが、今年度は現地調査がなかったため、開催を見送った。

## 2) データ取得作業効率化の検討

### a) 概要

2022 年度までの研究では、3D モデル作成後にデータ不足により再計測が必要な場面があつた。3D モデル作成には、時間がかかるため、作成前に確認できることが望ましい。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）に関する研究を行つた。

補助アプリケーションは、画像処理ライブラリの OpenCV を用いて、画像のワールドファイルを作成し、QGIS などで画像の状態を確認した。本アプリケーションのイメージを図 1-5 に示す。

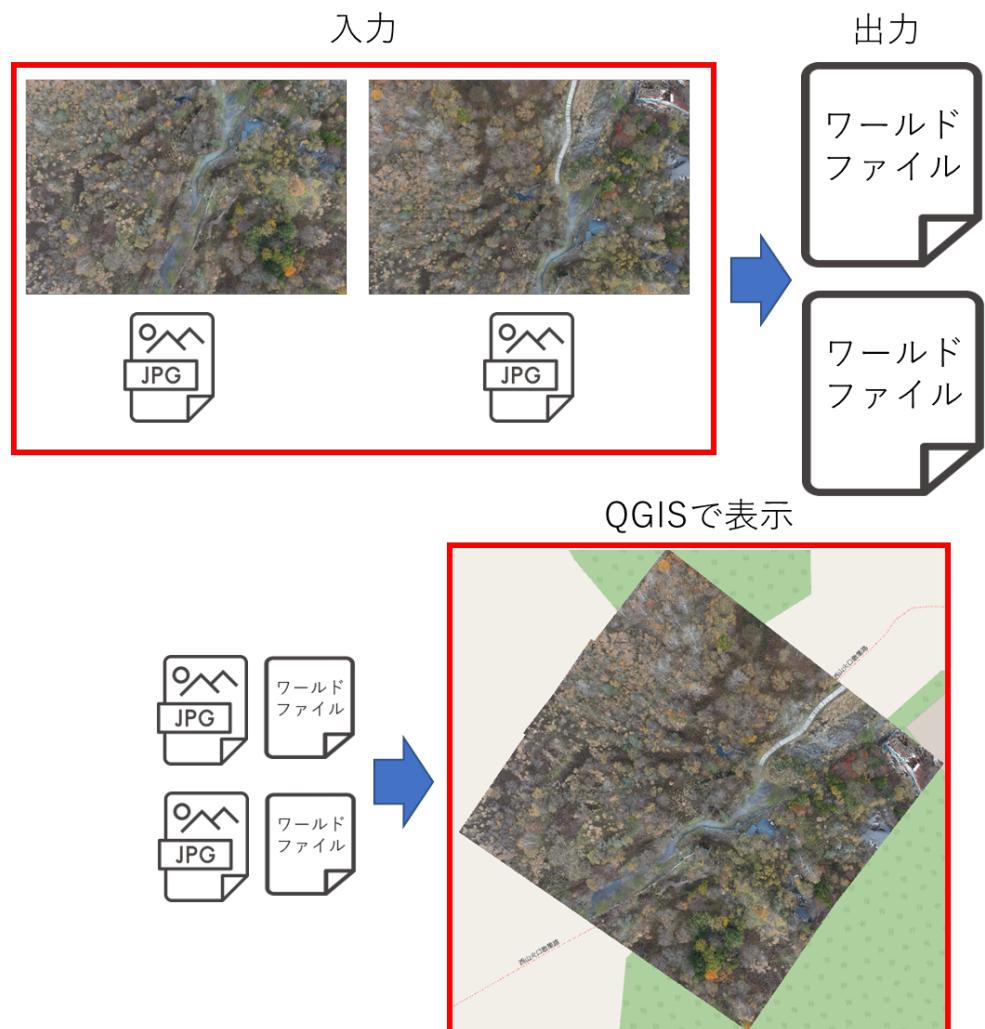


図 1-5 補助アプリケーションのイメージ

### b) ワールドファイルの作成

ワールドファイルの作成は、OpenCV 内にある特徴点検出器(AKAZE)と特徴点マッチングを用いて算出した画像間の座標や角度などの位置関係を取得することで作成した。

具体的には、特徴点検出器で各画像の特徴点を検出し、特徴点マッチングで画像間の最近傍特徴点を取得する。取得した特徴点同士を重ね合わせるための平行移動量と回転移動量を算出する。算出した移動量からワールドファイルのパラメータを算出するという流れである。処理のイメージを図 1-6 に示す。

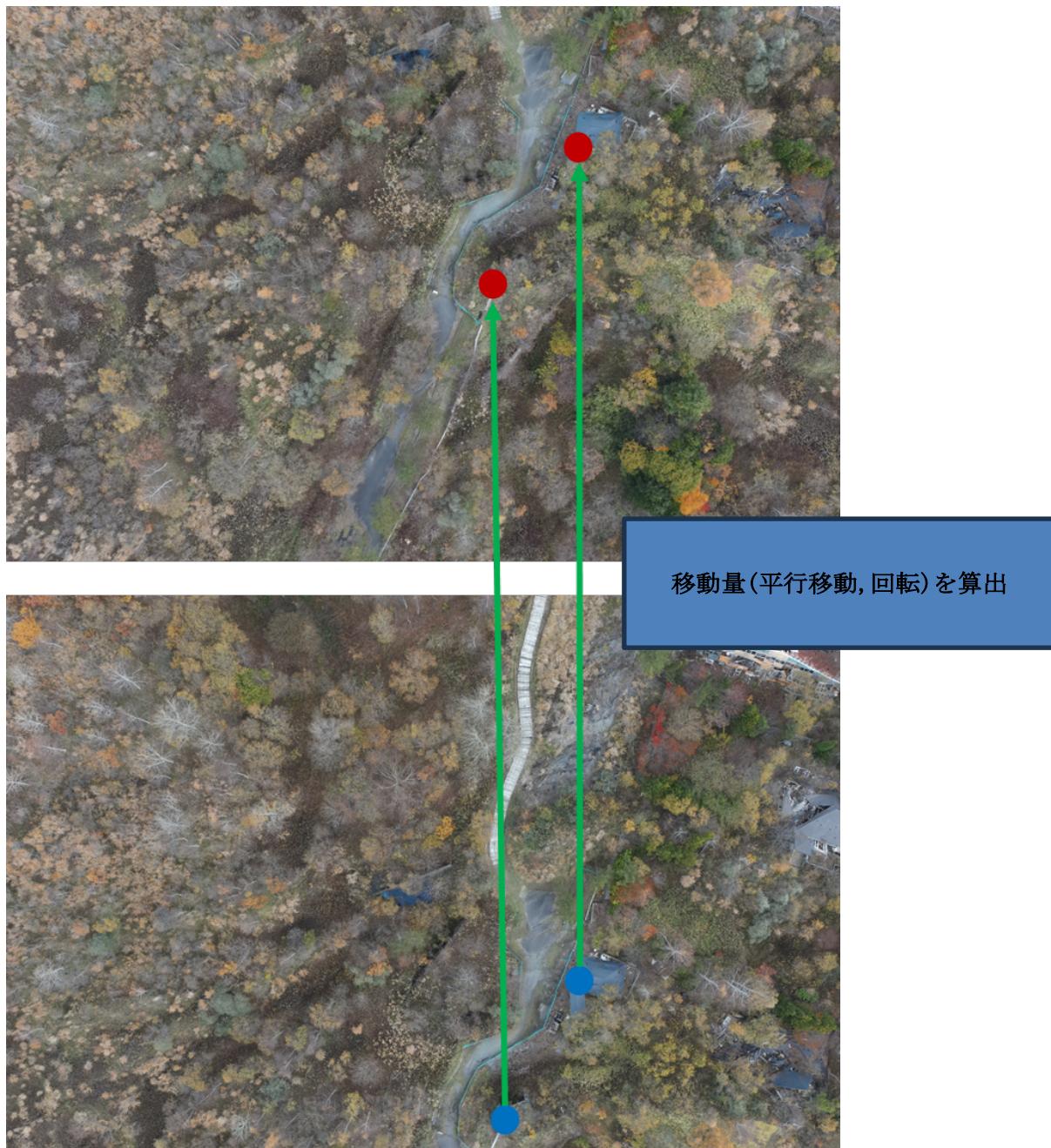


図 1-6 移動量算出処理のイメージ

### c) 処理結果

UAV で撮影した画像とその画像から作成したワールドファイルを GIS ソフト (QGIS) で読み込み、画像の状態を確認できるか目視で確認した。処理結果を図 1-7 に示す。結果として、背景地図と画像で大まかに位置が重なっていることを確認した。

以上から、本アプリケーションを用いて 3D モデル作成前の画像を確認し、撮影画像のデータ不足を確認することが可能であるといえる。



図 1-7 補助アプリケーションの処理結果

#### d) 課題

本アプリケーションにより、3Dモデル作成前の画像の状態を確認することが可能であることがわかった。しかし、UAVの向きが変わる箇所を境に位置合わせにずれが生じてしまう課題が明らかになった。課題のイメージを図1-8に示す。

この課題の原因は、撮影された画像が中心投影であるため、図1-9のように撮影角度が変わることで画像間での物体の写り方に差異が生じ、特徴点マッチングにずれが生じてしまうためであると考えられる。

UAVのコース間の位置合わせはずれてしまうことが確認できたが、コースごとの位置合わせはおおよそ位置合わせできていることからコースごとに画像を確認すれば問題はないと考えられる。



図 1-8 課題のイメージ



図 1-9 中心投影による画像間のズレ

### 3) 画像や 3D 地形モデルから状況認識する方法の検討

#### a) 概要

2019 年度に、火山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 を用いて噴石痕の自動抽出を試みた。2023 年度は、AI を用いた噴石痕抽出の精度向上や、噴気の抽出を試み、状況の自動認識を高度化することを検討した。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の検討を行った。

#### b) AI を用いた噴石痕抽出の精度向上

2019 年度の噴石痕抽出で使用した AI は物体検出手法の RefineDet である。物体検出手法とは、画像から検出対象を矩形で抽出する手法である。試行結果は 169 個ある噴石痕のうち 70 個を自動判読により検出することができ、誤って噴石痕を検出した数は 27 個であった。式(1)、式(2)に示す予測の正しさの指標である適合率と、全事象の取り漏れの少なさの指標である再現率で評価すると、適合率は 72.2%、再現率は 41.1% であった。

$$\text{適合率} = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{\text{正予測}}{\text{全予測検出枠}} \quad (1)$$

$$\text{再現率} = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{\text{正予測}}{\text{全正解枠}} \quad (2)$$

TP : 予測がポジティブで正解

FP : 予測がポジティブで不正解

FN : 予測がネガティブで正解

2019 年度の試行ではさらに、画像を反転・回転することにより疑似的に学習データを増やすことによる検証を行い、その結果、適合率 75.2%、再現率 46.7% に精度向上することを確認した。

2023 年度は RefineDet よりも新しい手法であり、より高い精度で自動検出が可能と見込まれる YOLOv8 を使用した。YOLOv8 の学習は、2019 年度の学習にも用いた 2016 年噴火後の阿蘇山のデータを使用し、2019 年度の試行で効果が確認された反転・回転を行い、疑似的に学習データを増やした状態で学習を行った。学習および評価に用いた画像枚数と人による噴石痕の判読数は表 1-1 の通りである。

表 1-1 噴石痕のデータ詳細

データ	画像枚数 (分割画像)	画像枚数 (噴石痕を含む)	噴石痕の判読数
学習用	152 枚	41 枚	175 個
検証用	95 枚	36 枚	169 個

試行の結果、表 1-2 に示す通りであった。適合率では RefineDet が 15%程度高く、予測結果がより正しい。再現率では YOLOv8 が 20%程度高く、事象の見逃しが少ないことが分かった。火山活動事象による被害を把握することが目的であるため、見逃しが少ない YOLOv8 の方が噴石痕の抽出に適しているといえる。

表 1-2 噴石痕抽出の試行結果

物体検出 AI	適合率 [%]	再現率 [%]
RefineDet	<b>75. 2</b>	46. 7
YOLOv8	60. 6	<b>66. 9</b>

YOLOv8 による噴石痕の抽出結果画像を図 1-10 に示す。上段は抽出正解が多い事例である。左 1 列目の例では色が濃く痕が明確な噴石痕を検出できていることが分かる。左 3, 4 列目の例では隣り合うような噴石痕も抽出できていることが確認できる。

中段は空振りが多い事例である。左 1 列目では駐車場や植木部分に対して誤検出している。左 2 列目の画像中心周辺の検出枠では、噴石痕ではなさそうな落差がある箇所を誤検出している。一方で、左 3, 4 列目では噴石痕らしき箇所を抽出している。この事例について噴火前後のオルソ画像を用いて噴石痕であるか改めて目視確認したところ、実際に噴石痕であることが分かった。人が認識漏れしていた噴石痕を自動抽出できたことが確認できた。

最後に、下段は見逃しが多い事例である。見逃しをした噴石痕は色の濃淡やサイズの大小が様々であり、見逃す場合の傾向を把握することが難しい。学習サンプル数が少ないことが原因で AI の学習が十分にできておらず、見逃しが発生したと考えられる。

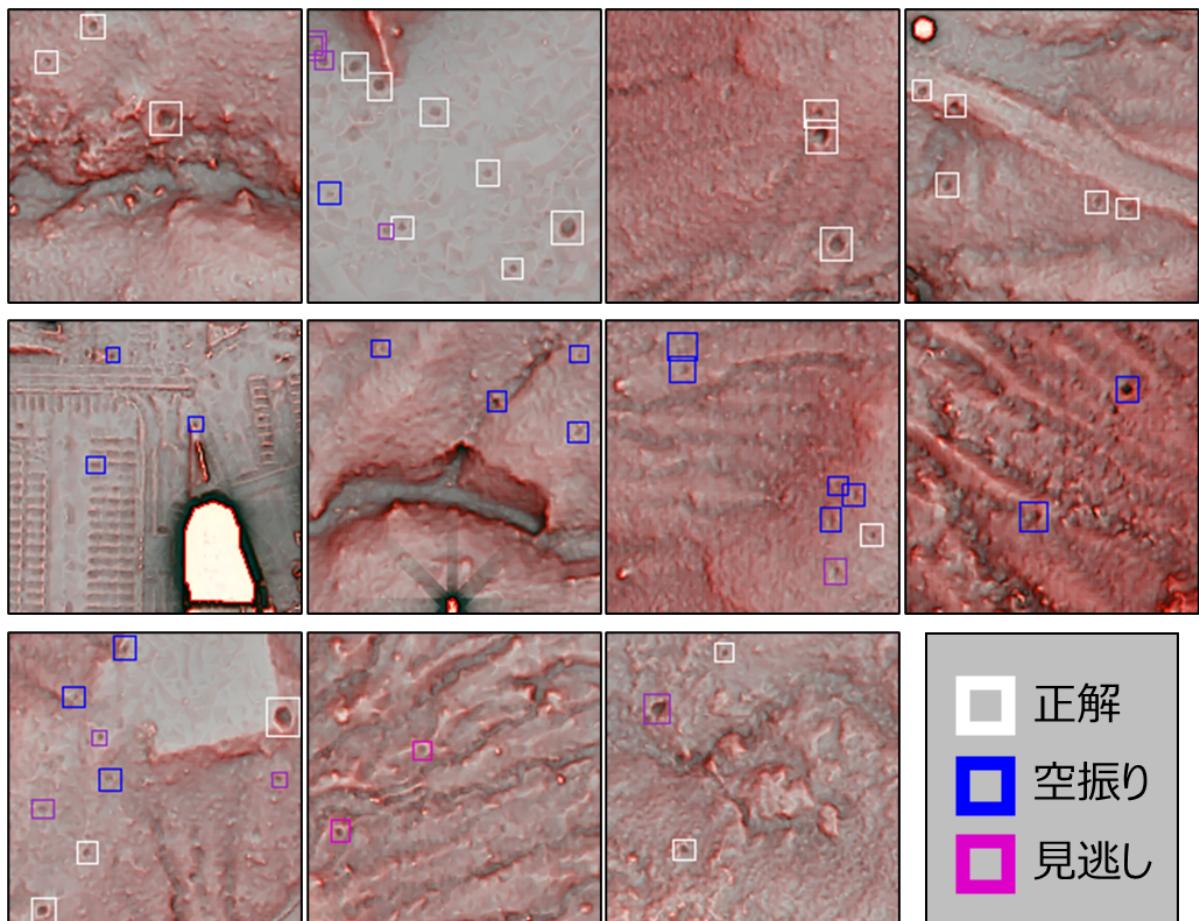


図 1-10 噴石痕の抽出結果

### c) AI を用いた噴気の抽出

噴火後の火山地形を把握するために、三次元地形モデルの作成が必要となる。UAV で撮影した画像から作成する際に噴気の写りこみがあると地形情報の生成を阻害するため、精度に関わる。三次元地形モデルを作成する前に噴気の写りこみを把握できれば画像の撮り直しの検討ができるため、撮影段階の画像から噴気を把握できることが望ましい。

本検討では、UAV 等の無人航空機による火山地形の撮影後に、三次元地形モデルに悪影響を及ぼす可能性がある噴気の写りこみ写真を、AI を用いて自動で抽出し、再撮影が必要な地点を把握することを目的に、噴気の自動抽出 AI を検討した。

噴気を自動抽出する AI は前項 b) で効果を確認した YOLOv8 とした。学習データに用いる噴気の画像は、阿蘇山噴火後の 2016 年 12 月に UAV を用いて取得した画像とした。また、噴気画像だけでは学習サンプルが少なく、学習が不十分になることも考えられたため、本検討では噴気に類似した見た目である工場の煙、野火の煙、雲の画像を学習サンプルとして用意した。これにより、噴気の類似した画像を学習データに取り入れた場合の効果を検証することが可能である。各画像の学習用枚数と検証用枚数は表 1-3 に示す通りである。

表 1-3 噴気の学習/検証画像枚数

画像場面	学習用	検証用
雲	250 枚	—
工場の煙	250 枚	—
野火の煙	252 枚	—
阿蘇山噴気	82 枚	49 枚

実験結果を表 1-4 に示す。雲、工場の煙、野火の煙、阿蘇山噴気をそれぞれ個別に学習した結果を見ると、適合率は阿蘇山噴気で学習したモデルが最も高く 83.9%である。再現率は、阿蘇山噴気で学習したモデルが 53.0%で、工場の煙や野火の煙のほうが 69.4%と高い数値であり、阿蘇山噴気のみで学習しただけでは事象の取りこぼしが多いことがわかる。

つぎに、雲、工場の煙、野火の煙、阿蘇山噴気の全てを学習データに使用した場合には、適合率が 82.7%と阿蘇山噴気のみで学習したものよりも低いが、再現率は 78.3%で最も高く、取りこぼしが最も少ないことが確認できた。

表 1-4 噴気抽出の試行結果

学習画像	適合率 [%]	再現率 [%]
雲	51.7	49.0
工場の煙	46.1	69.4
野火の煙	75.5	69.4
阿蘇山噴気	<b>83.9</b>	53.0
上記すべて	82.7	78.3

検出結果画像を図 1-11 に示す。上段は噴気が大きく写る画像の例である。全ての学習条件で噴気を検出できたが、雲のみ学習モデルでは誤検出があり、工場の煙のみ学習モデルでは検出枠が小さく噴気全体を捉えられていない。次に、中段は画像の端に小さく噴気が写る画像の例である。阿蘇山噴気のみ学習モデル以外で噴気が検出できていた。最後に、下段はさらに小さく噴気が写る画像の例である。野火の煙および阿蘇山噴気のみ学習モデル以外では噴気が検出できている。雲および阿蘇山噴気のみ学習モデルでは誤検出があり、工場の煙のみ学習モデルでは検出枠が広く噴気以外も含まれている。いずれの場面において、すべての画像で学習したモデルが最も優れる結果であった。

以上の結果から、噴気抽出では類似の異なる事象の画像で学習することで一定の検出効果が得られた。検出対象のみで学習するより、類似の異なる事象の画像を含み学習することが効果的であることが分かった。

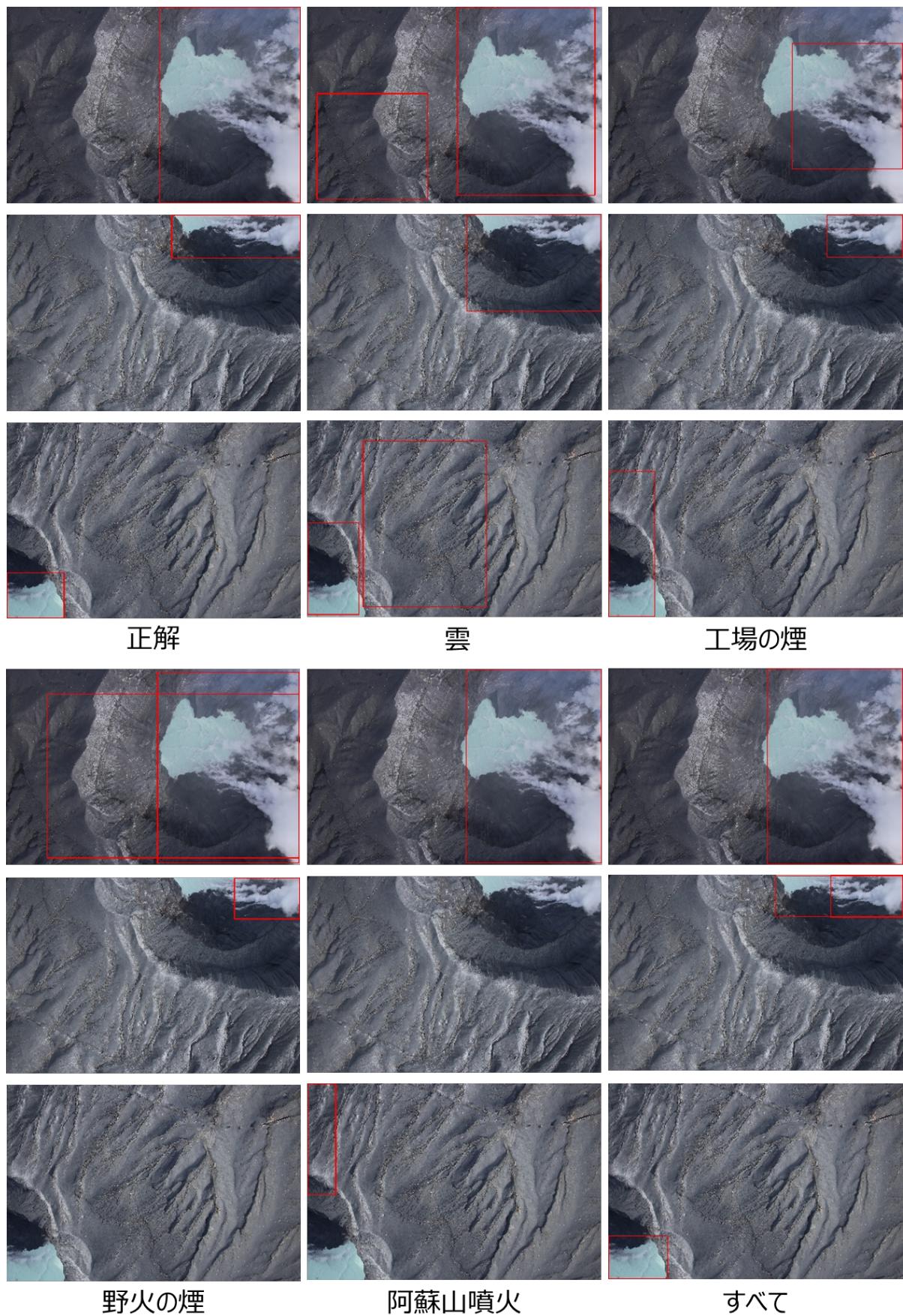


図 1-11 噴気の抽出結果（各 3 場面、学習方法の違いによる 5 モデル）

d) AI を用いた火山事象抽出結果の地図への重畠

前項 c) の噴気抽出結果から噴気が写り込んだ位置を地図へ描写可能な形式に出力する方法を検討した。

地図へ描写可能なファイル形式として、kml と shp の二つの形式を選定した。kml 形式は座標情報のみを格納することが可能なファイル形式であり、shp は座標情報の他に属性情報も格納可能な形式である。それぞれには利点があり、kml 形式であれば、過年度までの検証で使用した DJI 製の UAV 無人航空機のウェイポイント設定でインポート可能であるため、kml 形式で出力したファイルを直接して飛行経路を設計可能である。Shp 形式であれば、先の説明の通り属性情報を付与することが可能であるため、撮影地点それぞれに対して、撮影画像ファイル名、噴気が写り込んでいるか、などの情報を追加して、後の処理を行うときにファイルへのアクセス性を向上させることができる。

kml 形式または shp 形式への出力は、撮影画像の EXIF 情報に含まれる座標情報 (GPSLatitude および GPSLongitude) から緯度経度座標を取得し、平面直角座標系に変換したうえで各形式に書き込むことで可能である。

shp 形式で出力した結果例を図 1-12 に示す。表示には QGIS を使用し、QGIS に標準搭載されている写真と標準地図を読み込み、標準地図は 50%透過で表示した。各点は赤と青に塗り分けており、赤は噴気が写り込んだ写真の撮影地点、青は噴気が写り込でいない写真の撮影地点を示す。図 1-12 のとおり、どの地点を撮影しなおせば良いか把握することがこれまでよりも容易になった。

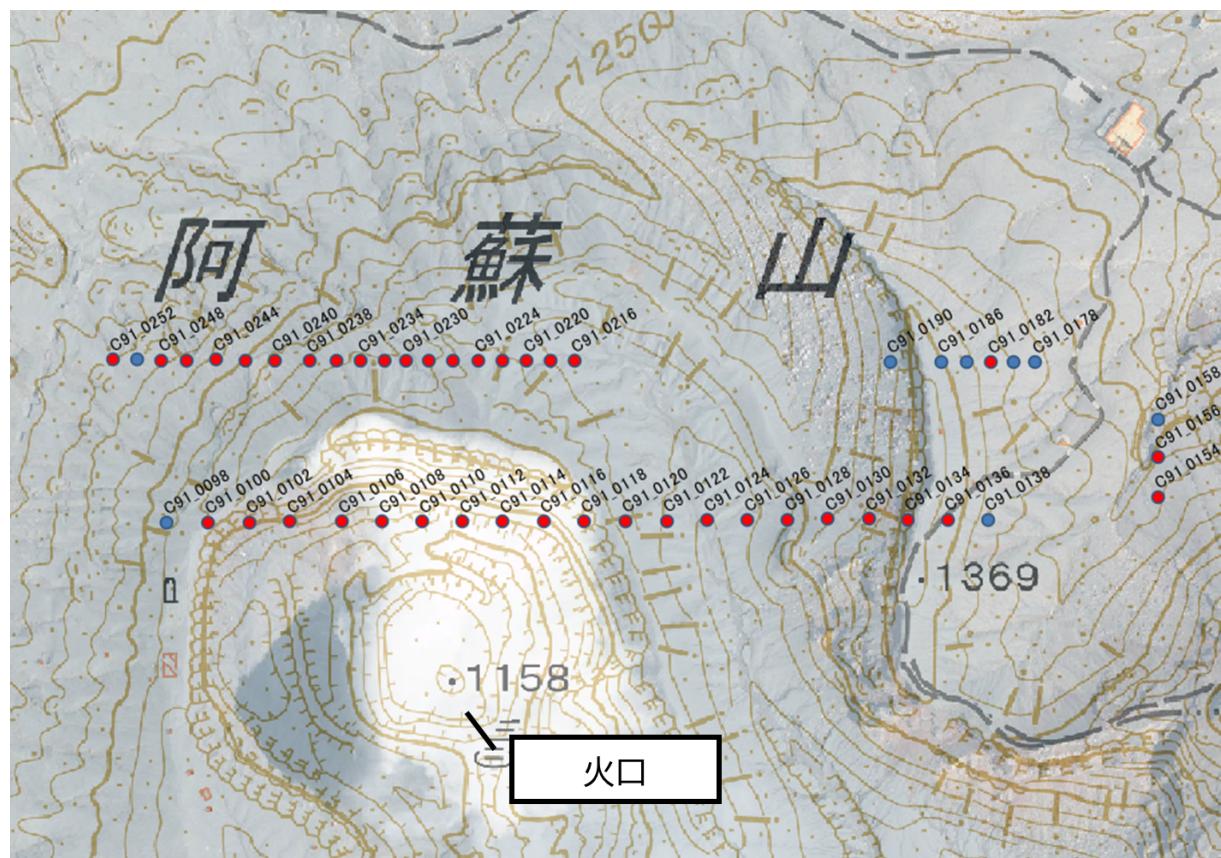


図 1-12 噴気写り込み地点の地図への表示（赤：噴気写り込み、青：噴気写り込み無し）

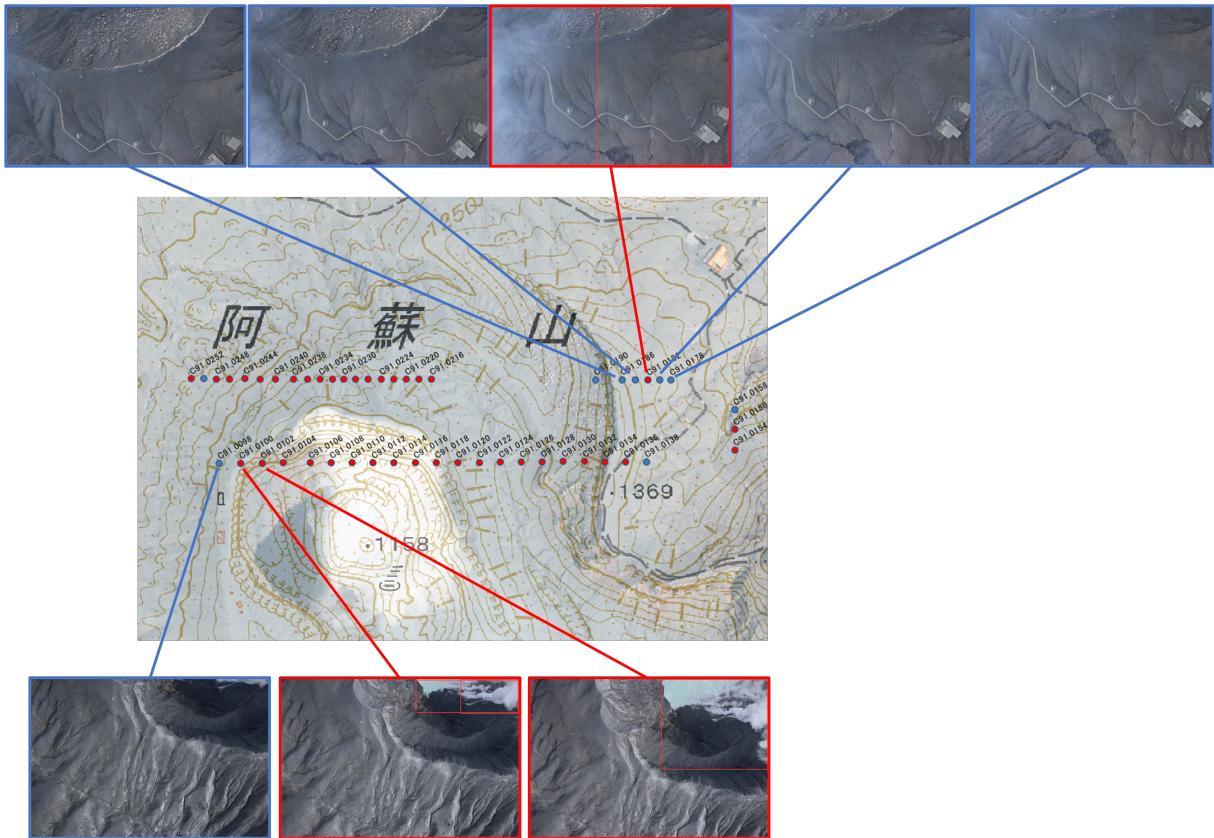


図 1-13 噴気写り込み地点の地図への表示と対応する画像  
(赤：噴気写り込み、青：噴気写り込み無し)

#### 4) 解析作業効率化の検討

##### a) 概要

2022 年度までの研究では、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ている。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った。これにより、早期に提供できる情報の高度化を図った。

##### b) 単写真測量と AI/画像処理を組み合わせた解析

単写真 (UAV の斜め画像) を斜め写真測量システム (アジア航測株式会社開発) に取り込むことで、三次元位置の算出が可能である。「画像や 3D 地形モデルから状況認識する方法の検討」で検討した AI による噴気の抽出結果画像をシステムに取り込むことで、単写真測量時の目標とすることができ、噴気位置把握 (三次元座標の取得) の迅速化を図ることができる。



図 1-14 噴気の自動抽出 (UAV の斜め画像)



図 1-15 システム取り込みイメージ

### c) 溶岩流の境界抽出

溶岩流の分布範囲の自動抽出を目的として、画像処理から溶岩流の境界抽出を試みた。オルソ画像をもとに、OpenCV を用いてマスク処理を行い、溶岩流の黒く写る部分を抽出する。抽出結果から境界部を算出する。

結果として、過剰な抽出もあるが、溶岩流の境界が抽出可能なことを確認した。今後は、単写真からの抽出も検討を進めていき、単写真からの抽出結果と単写真測量を組み合わせ、溶岩流境界の三次元位置の算出を試みることを予定している。

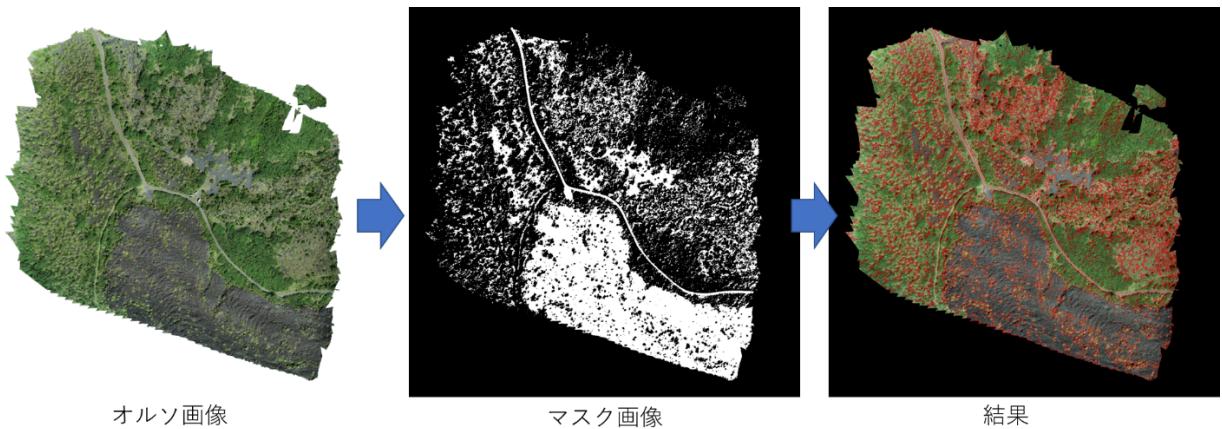


図 1-16 溶岩流の境界抽出

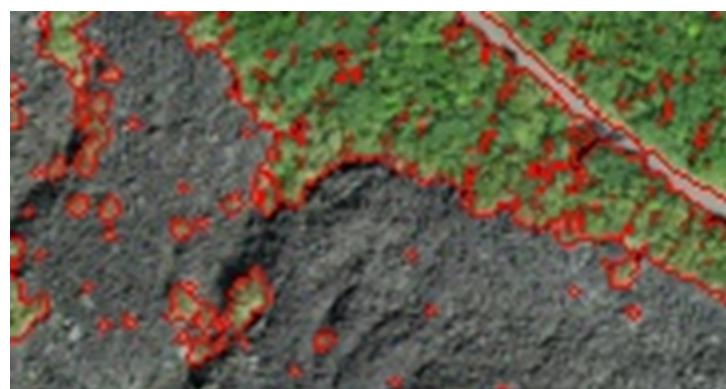


図 1-17 溶岩流境界の拡大

## 5) データ取得から状況把握までの手順化・課題整理

### a) 概要

2022年度までの研究では、伊豆大島・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った。

### b) データ取得から状況把握までの手順（案）の作成

データ取得（UAV飛行）から、状況把握（三次元モデル作成や自動抽出や斜め写真測量システムへの搭載）までの流れをフローとして整理した。

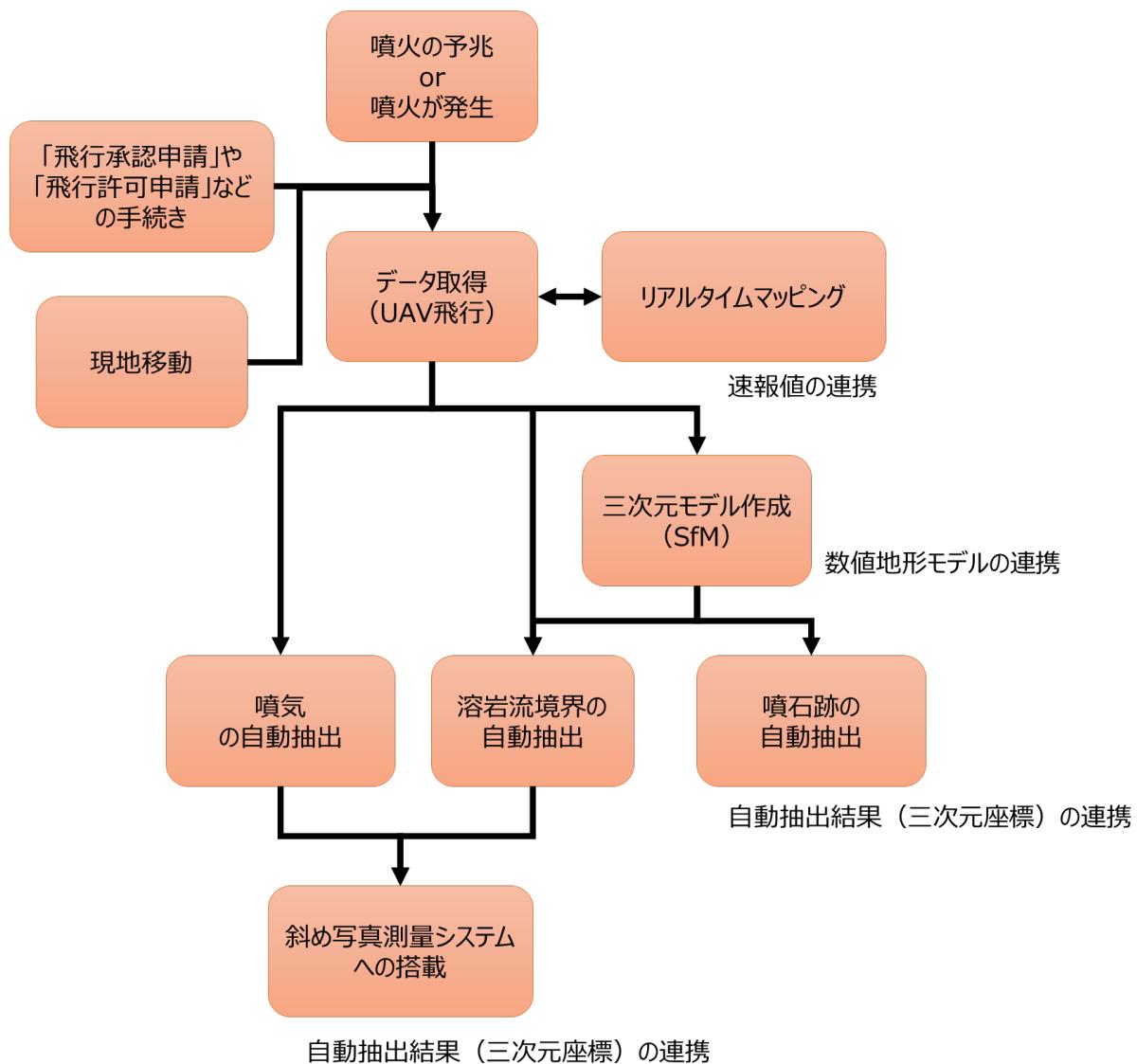
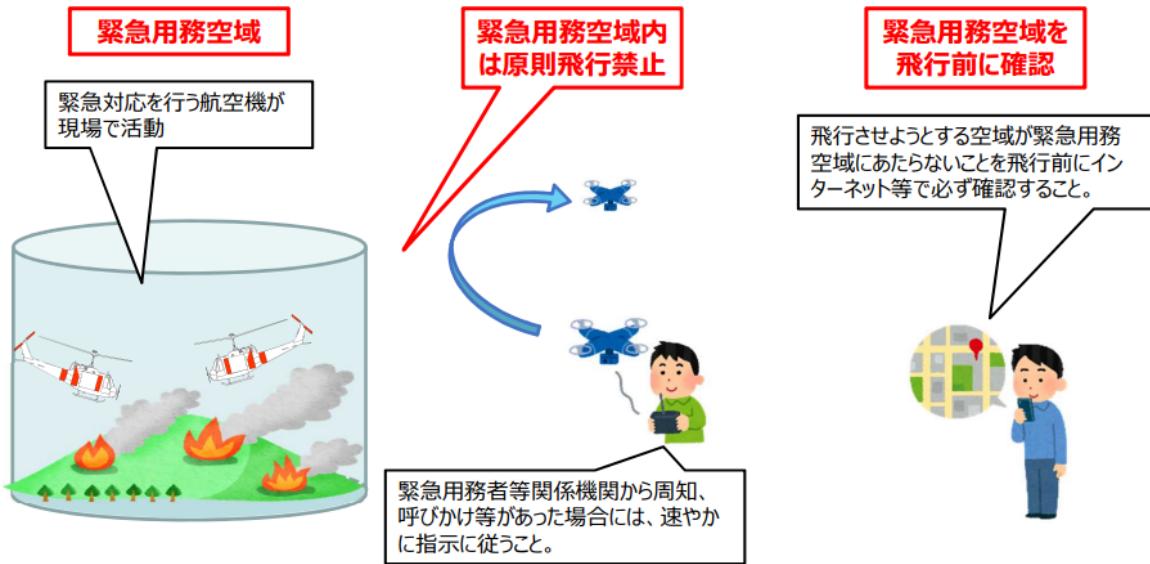


図 1-18 データ取得から状況把握までの手順（案）

### c) 噴火時の課題

災害時に無人航空機の飛行が原則禁止される「緊急用務空域」が設定されることがある。火山噴火時（噴火直後）に「緊急用務空域」が設定されると、UAVを飛行させることができないことが予想される。



※ 空港周辺、150m以上の空域、DID（人口集中地区）上空等の飛行許可（包括許可含む。）があっても、緊急用務空域を飛行させることはできません。

図 1-19 緊急用務空域（国土交通省）

[https://www.mlit.go.jp/report/press/content/pr20210510\\_cabksj\\_01.pdf](https://www.mlit.go.jp/report/press/content/pr20210510_cabksj_01.pdf)

また、UAVの飛行前には、「飛行承認申請」や「飛行許可申請」などの手続きが必要（複数の機関に申請・連絡）となる。火山噴火時（噴火直後）には、申請や許可に時間がかかる可能性が高いと思われる。

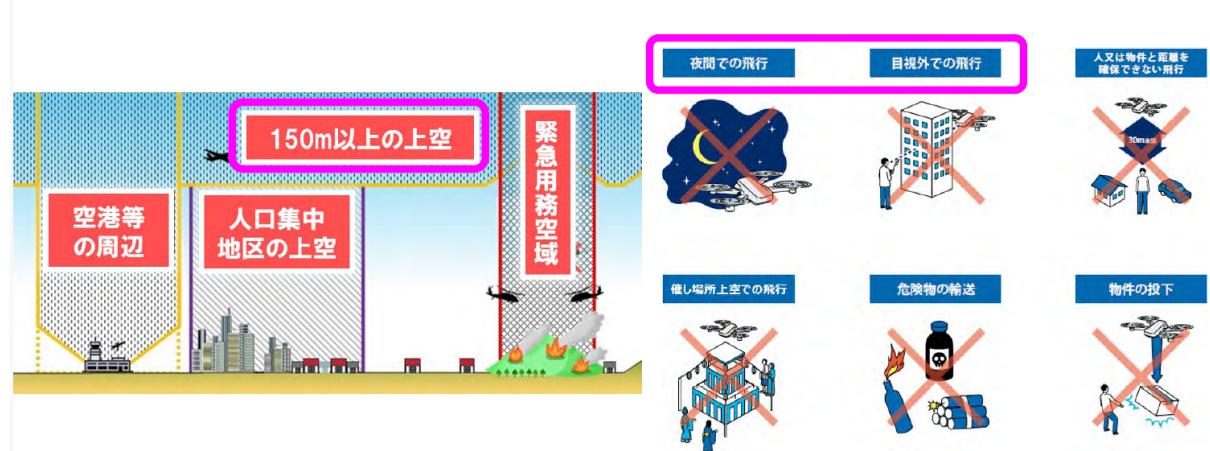


図 1-20 特定飛行に該当する飛行（国土交通省）

[https://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_fr10\\_000042.html](https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html)

噴火時には避難計画で設定された箇所で立入が規制されるため、UAV飛行に有利な場所まで到達できない可能性がある。海外では溶岩流のような穏やかな噴火の場合には溶岩流の近傍で短距離飛行可能なUAVで計測した事例もあるが、国内では立入規制のため遠方からUAVを飛行させる可能性がある。



図 1-21 伊豆大島の立入規制（気象庁）

[https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/level/PDF/level\\_317.pdf](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/level/PDF/level_317.pdf)

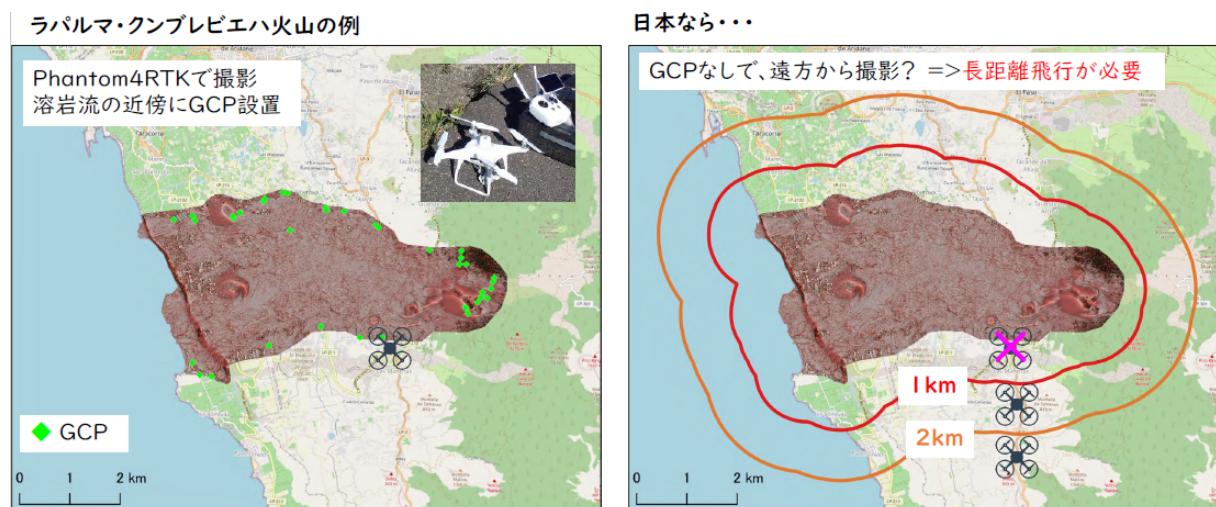


図 1-22 日本の場合の溶岩流時のUAV飛行 (Civico et al. (2022)のデータを加工)

(c) 結論

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た。GIS ソフト (QGIS) 上で撮影画像のデータ不足を確認できるようにした。UAV の向きが変わる箇所を境に位置合わせにずれが生じてしまう課題があったが、コース間での簡易な確認としては問題ない。2024 年度実証実験にて検証し、課題抽出・改良を行う予定である。

AI を用いた噴石痕抽出の精度向上や、噴気の抽出を試み、状況の自動認識を高度化することを検討した。新規 AI 手法により噴石痕の見逃しが減少した。新規 AI 手法による噴気の検出にて、類似事象の画像を混ぜて学習することが精度改善に繋がることが確認できた。

単写真測量と AI を組み合わせ変化状況の抽出を試みることで、早期に提供できる情報の高度化を図った。AI により抽出した噴気画像を用いることで単写真測量時の目標とすることができ、噴気位置（三次元位置）把握の迅速化が図れることになる。また、画像処理により溶岩流境界が抽出可能なことを確認した。2024 年実証実験にて、溶岩流境界の三次元位置の算出を試みる予定である。

データ取得 (UAV 飛行) から、状況把握（三次元モデル作成や自動抽出や斜め写真測量システムへの搭載）までの流れをフローとして整理した。UAV 飛行にあたっては、緊急用務空域・特定飛行・立入規制の課題が存在する。

(d) 引用文献

なし

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 令和 6 年度の業務計画案

#### (a) 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。
- JVDN システム、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、同一課題内の連携を推進する。

#### (b) RTK-GNSS 搭載 UAV を用いた実証実験の実施

- 2024 年度は、本州の 1 火山を対象として、実証実験を行う。2022 年度に実施した自律飛行・自動撮影を日中・夜間で実施し、自動抽出等に用いる画像を取得する。また、3D 地形モデル作成の精度向上を目的とした飛行方法および撮影方法についても実験を行う。

#### (c) データ取得作業効率化の検討

- 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）を検討した。
- 2024 年度は、現地実証にて、試作した補助アプリケーションを活用し有効性を確認するとともに、でてきた課題に対する改良を行うことで、データ取得作業の効率化に関する研究を行う。

#### (d) 画像や 3D 地形モデルから状況認識する方法の検討

- 2023 年度は、AI を用いて噴石跡抽出の精度向上や噴気の事象抽出を試み、状況の自動認識を高度化することを検討した。画像処理技術を用いて、溶岩流境界部の抽出も試みた。
- 2024 年度は、現地実証にて、3D 地形モデル及び単写真からの溶岩流境界部の抽出精度の向上を試みる。

#### (e) 解析作業効率化の検討

- 2023 年度は、3D 地形モデルを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、早期に提供できる情報の高度化を図った。
- 2024 年度は、事前に必要となる単写真測量の標定作業を AI または画像処理技術を用いて自動化できる箇所を検証する。

## 2. 2 サブテーマ2

### (1) 業務の内容

#### (a) 業務題目

火山災害対策技術の開発「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

#### (b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	井口 正人
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	中道 治久
国立大学法人京都大学	共同実施機関	准教授	為栗 健
国立大学法人京都大学	共同実施機関	助教	山本 圭吾
国立大学法人京都大学	共同実施機関	助教	山田 大志
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	竹見 哲也
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	丸山 敬
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定教授	山路 昭彦
国立大学法人京都大学	共同実施機関	特定助教	石井 杏佳
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	研究員	西 隆昭
国立大学法人京都大学	共同実施機関	RA	V. L. Ipmawan
国立大学法人京都大学	共同実施機関	技術補佐員	佐野 香那
国立大学法人京都大学	共同実施機関	学振特別研究員	瀧下 恒星
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	統括主幹	山路 昭彦
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
ブレーメン大学	協力機関	ポスドク研究員	A. P. Poulidis

#### (c) 業務の目的

火山灰に対して噴火前の予防的対策及び噴火後の迅速な防災対策のために、火山灰ハザードの予報的及び即時の評価を可能とする技術の実現を目指し、地上観測および大気中その場観測に裏付けされるリモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発、地震及び地盤変動観測

データとシミュレーションを統合した火山灰拡散予測の高速度化技術開発、空間分解能の高い風速場把握および落下粒子特性把握による火山灰拡散予測の高精度化技術開発、連続的な噴火を対象とした火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの技術開発、噴火発生前の確率的降灰予測の技術開発を実施し、「課題D サブテーマ3：火山災害対策のための情報ツールの開発」に解析結果を出力することを目的とする。

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成28年度：

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

2) 平成29年度：

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

3) 平成30年度：

南九州5火山におけるレーダ観測を継続した。ディスクロメータを火口から直線状に配置することにより、降灰量と粒径分布の距離依存性を明らかにした。XバンドMPレーダ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、研究成果を発表とともに研究に関する情報収集を行った。さらに、風洞実験装置を利用してレキの空力特性を把握した上で、瓦や壁材を対象にレキへの耐衝撃性能試験を行い、サブテーマD3に引き渡す基礎データを作成した。

4) 平成31年度（令和元年度）：

即時把握技術開発においては、XバンドMPレーダ、GNSS、ライダーによるリモートセンシング観測を継続することにより、このマルチパラメータ観測システムが噴煙高度や降灰量等の即時的把握と噴煙量の推定に有効であることが示された。予測の高速度化技術においては、傾斜計及び地震計を改修することにより、噴火の発生、地震動や地盤変動データからの噴出率と噴煙高度の評価パラメータを高度化が図られた。予測の高精度化においては、火山体周辺の風

速ベクトル分布を高分解能で把握することにより、降灰量の予測がさらに改善された。太陽光パネルの破壊実験のデータをサブテーマ D3 に引き渡した。

5) 令和 2 年度 :

令和 2~4 年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発する。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 レーダにより南九州の 4 火山において噴煙を検知する実績が積み上がり、実用段階となった。

6) 令和 3 年度 :

引き続き、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を進めた。データベースの構成要素である火山灰噴出率、レーダ噴煙高度、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。

7) 令和 4 年度 :

引き続き、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を進めた。データベースの構成要素である火山灰噴出率、レーダ噴煙高度、高解像度風速場、降下火山灰量の高精度化を図った。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、試験運用を開始した。噴火発生前の降灰確率の予測研究に着手した。

8) 令和 5 年度 :

引き続き、噴火発生前の降灰確率の予測研究を行った。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に基づき、降灰予測を行うシステムを開発した。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った。

9) 令和 6 年度 :

発生時刻と規模の確率的予測をオンラインシステムとして稼働させるため、膨張開始時刻の高精度決定手法を開発し、高精度化を図る。また、時間関数として噴出率を与えられるように理論的な噴出率モデルを構築する。火山地形を考慮した詳細な予測風速ベクトルおよび予測降灰量を観測量と照合することにより、噴火発生前の予測精度を検証する。

10) 令和 7 年度 :

前年度の予察的なシミュレーション結果と噴火発生後の観測量の照合に基づいて問題の所在を検討した上で、予測手法の改良を行い、高精度化を図る。

(e) 令和 5 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。長時間継続する噴火に対応する連続化火山灰拡散予測シミ

ュレータの高精度化を図る。さらに、噴火発生前の降灰確率の予測システムを開発し、試験運用を行う。

### 1) プロジェクトの総合推進

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

### 2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諫訪之瀬島においてレーダ観測を継続し、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クロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量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 レーダにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディスクロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例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による噴煙柱の観測を実施し、既設レーダ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。

### 3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

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

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

#### 4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

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

気象モデルや流体計算モデルを利用して、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。

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

#### 5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

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レーダ観測による噴煙高度やディスクロメータにより得られた降灰量とシミュレーション結果を照合する。

#### 6) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

桜島における過去の地盤変動データを整理し、火山噴火に前駆する地盤変動継続時間および圧力源の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。このデータベースとともに、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。

## (2) 令和 5 年度の成果

### (a) 業務の要約

令和 5 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高度化した。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 4 年度までの観測を継続して、火山灰に関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を継続し、その妥当性を検証するとともに課題について検討した。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、これをもとに求められた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から降灰分布を予測するシステムを開発した。

### (b) 業務の成果

令和 5 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。

#### 1) プロジェクトの総合推進

課題、サブテーマの内外とオンラインで打ち合わせを行った。また、研究集会を開催するとともに、合同研究集会において研究発表を行った。

全国の市町村を対象にオンラインで本サブテーマに関するセミナーを行った。

##### a) プロジェクト内の打ち合わせ等

「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。令和 5 年 12 月 6 日に次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトが主催する合同研究集会において本サブテーマのこれまでの研究成果について発表した。12 月 19 日と 20 日には鹿児島市において、桜島大規模噴火に関する研究集会を開催し、複数圧力源による地盤変動の解析、船舶レーダの運用、気象レーダによる噴煙モニタリング、噴火発生前の降灰予測について研究発表を行うとともに、大規模噴火時におけるレーダの活用について議論した。

##### b) オンラインセミナーの開催

令和 6 年 1 月 16 日に鹿児島市が事務局を務める火山防災強化市町村ネットワークの研修会において、「気象レーダを用いた噴煙観測による降灰把握と予測」、「降灰予測システムの開発」と題する講演をオンラインで行った。参加した市町村は、北海道 8 町、青森県 3 市町、岩手県 4 市町、秋田県 3 市町、山形県 1 市、宮城県 1 町、福島県 2 市村、栃木県 1 町、群馬

県 1 村、神奈川県 5 市町、新潟県 1 市、山梨県 6 市町村、長野県 2 市町、静岡県 6 市町、長崎県 1 市、熊本県 1 市、宮崎県 3 市町、鹿児島県 5 市町村であった。

[https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/kazan/kazanbousaikyoukasyouson\\_network.html](https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/kazan/kazanbousaikyoukasyouson_network.html)

## 2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

桜島においてレーダ、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシングおよびディスクロメータを用いた地上観測からなる火山灰観測を継続した。図 2-1 にマルチパラメータ観測の概要を示す。レーダは霧島山、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。レーダと 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。

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

### a) X バンド MP レーダ観測

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、レーダによる噴煙観測の成果について述べる。

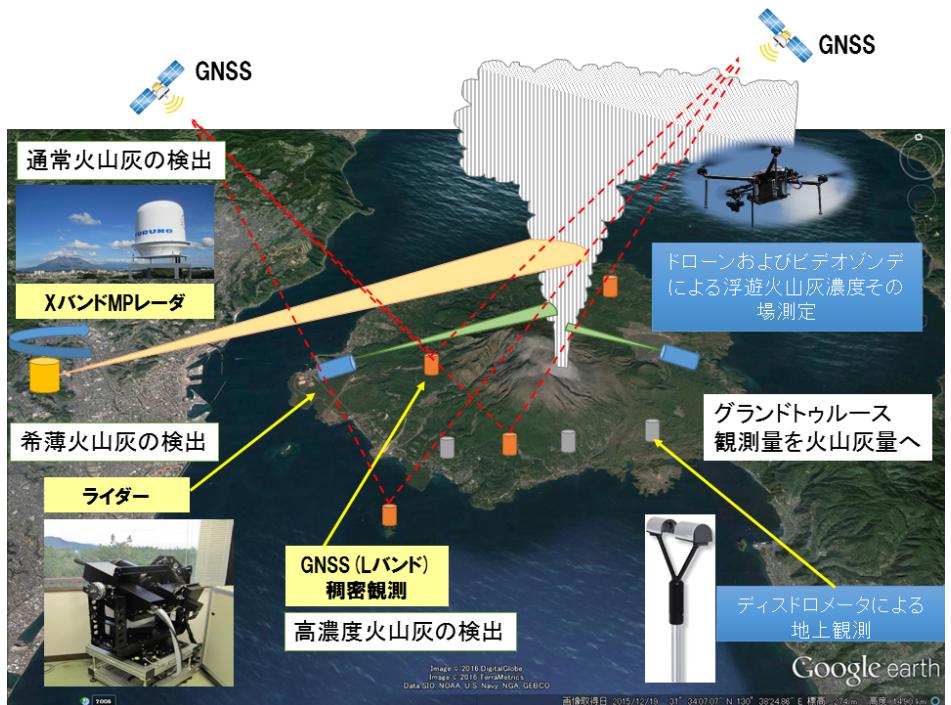


図 2-1 火山灰のマルチパラメータ観測の概要

### i) 観測の概要

レーダの設置場所は鹿児島県内 6 カ所で表 2-1 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 2-2 に示す。

表 2-1 レーダ基地局の場所

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 2-2 レーダの走査モード及びパラメータ（2024 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（°）
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。

レーダの設置状況を図 2-2～2-4 に示す。使用したレーダは古野電気（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。レーダの生データはデータ量が大きいので、6 ヶ月から 9 ヶ月に 1 回の頻度で定期的にハードディスク（容量 8TB）を交換している。



図 2-2 レーダの設置状況。鹿児島県立錦江湾高等学校に設置したもの



図 2-3 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 2-4 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。

## ii) 桜島噴火

2023年6月7日14時1分（世界時刻5時1分）に開始した噴火について述べる。南岳B火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に2500m、噴煙の流向は南東である。爆発から連続的な噴火に移行し、噴火は15時5分（世界時刻6時5分）に停止した。大隅河川国道事務所の有村観測坑道における伸縮計の火口直交方向の成分において噴火継続中に $0.1\mu$ ストレインの短縮が観測された。図2-5に噴火開始直後から60分後までのレーダ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4分後までに噴煙高度は3600m程度まで達したことが分かる。その後、噴火開始から5分後から10分後にかけて徐々に噴煙高度が低下して、火口縁上に2300m程度となった。噴火開始後20分後ではレーダ反射強度が20dBzに満たない噴煙が確認され、その高度は火口縁上1400m程度である。噴火開始後41分後と60分後ではレーダ反射強度分布からは噴煙は確認できない。

2023年10月19日16時48分（世界時刻7時48分）に開始した噴火について述べる。南岳B火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に3600m、噴煙の流向は東である。図2-6に噴火開始直後から9分後までのレーダ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4分後までに噴煙高度は火口縁上3000m程度まで達したことが分かる。その後は、噴火開始後7分後には噴煙高度は3000m程度であるが、火口から2km程度東へ噴煙が流れ、そして噴火から9分後には噴煙高度が2000m程度へ低下したことが分かる。

2023年10月24日3時46分（世界時刻10月23日18時46分）に開始した噴火について述べる。南岳B火口の噴火で、最大噴煙高度は火口縁上に3400m、噴煙の流向は東である。図2-7に噴火開始直後から24分後までのレーダ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、噴火直後に噴煙高度は火口縁上1000m程度に達し、その後は噴火開始後から7分後に1700m程度に達していることが分かる。噴火開始後から14分後において噴煙高度は1500m程度を維持していたことが分かる。そして、噴火開始後から17分後から噴煙高度は徐々に低下して、噴火開始後から24分後には噴煙高度は800m程度であったことが分かる。この噴火は、噴火継続時間は比較的長いが、噴煙高度はそれほど高くなかったことがレーダ反射強度から分かった。一方、気象庁の目視による噴煙高度である3400mとレーダ反射強度による噴煙高度である1700m程度とは大きな乖離がある。この理由として、レーダ反射強度には反映しないような細粒の火山灰が目視可能な噴煙を形成して上昇していた可能性がある。

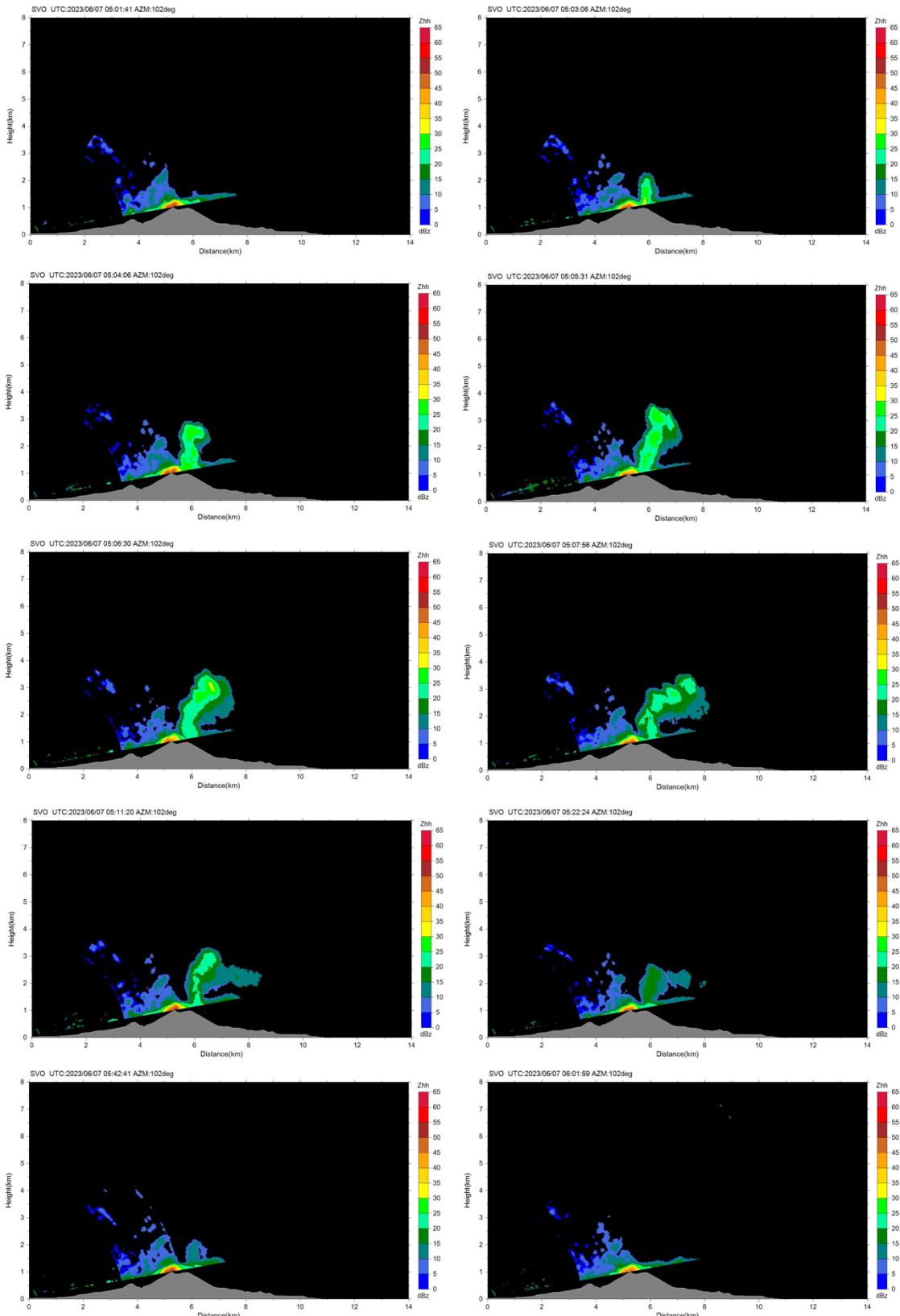


図 2-5 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2023 年 6 月 7 日 14:01~15:02 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

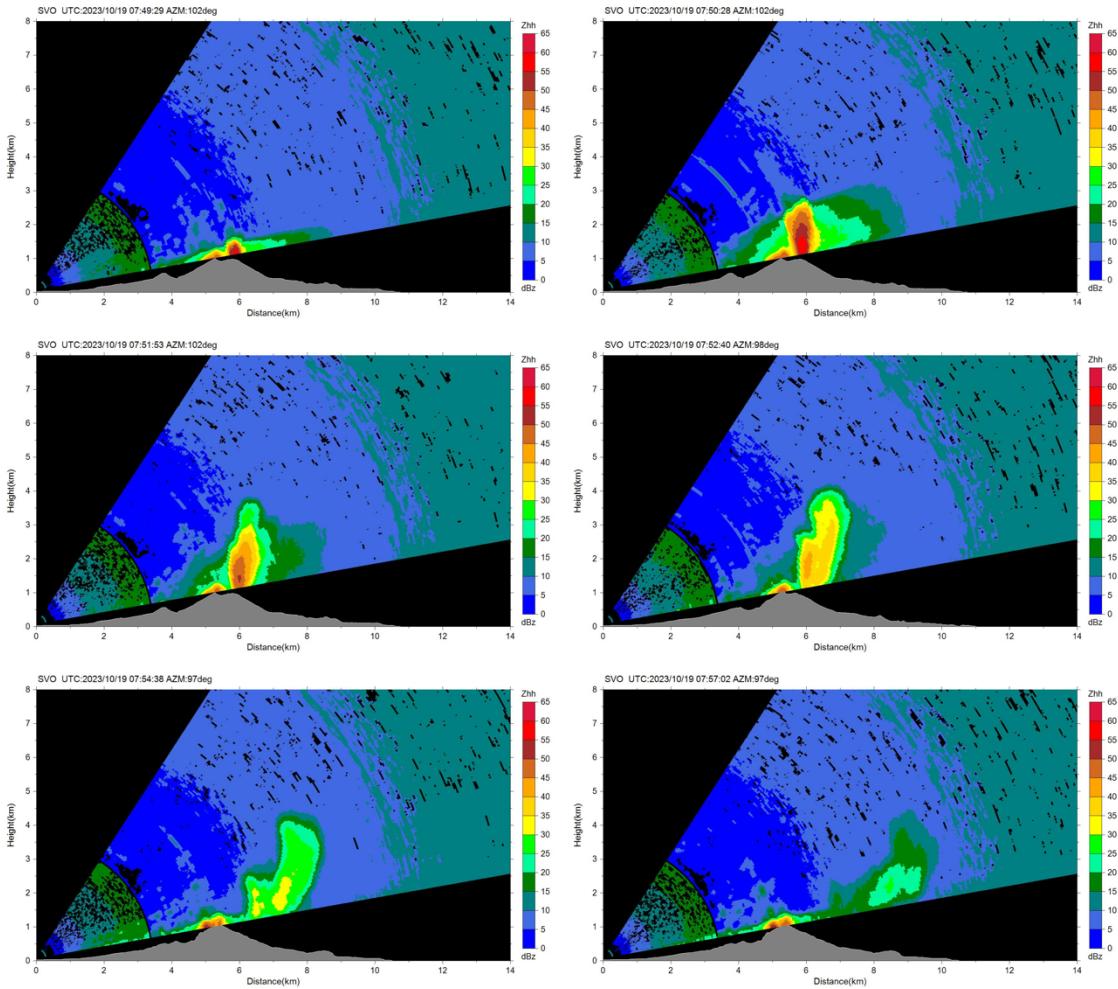


図 2-6 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2023 年 10 月 19 日 16:49～16:57 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2024 年 2 月 14 日 18 時 33 分（世界時刻 9 時 33 分）に開始した噴火について述べる。南岳 B 火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に 5000 m、噴煙の流向は北東である。桜島で 5000 m 以上の噴煙高度を観測したのは、2020 年 8 月 9 日 5 時 38 分の南岳 A 火口の爆発（最大噴煙高度 5000 m）以来である。図 2-8 に噴火開始直後から 8 分後までのレーダ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 1 分間では噴煙高度は最高で火口上 1700 m 程度であるが、3 分後に 3800 m 程度まで達したことが分かる。その後、噴火開始から 4 分後以降は風に流されながら、火口上 4500 m 程度まで上昇したことが分かった。よって、噴火規模が大きいために噴煙高度が高くなつたというよりも、風速場の影響で高くなつたと言える。

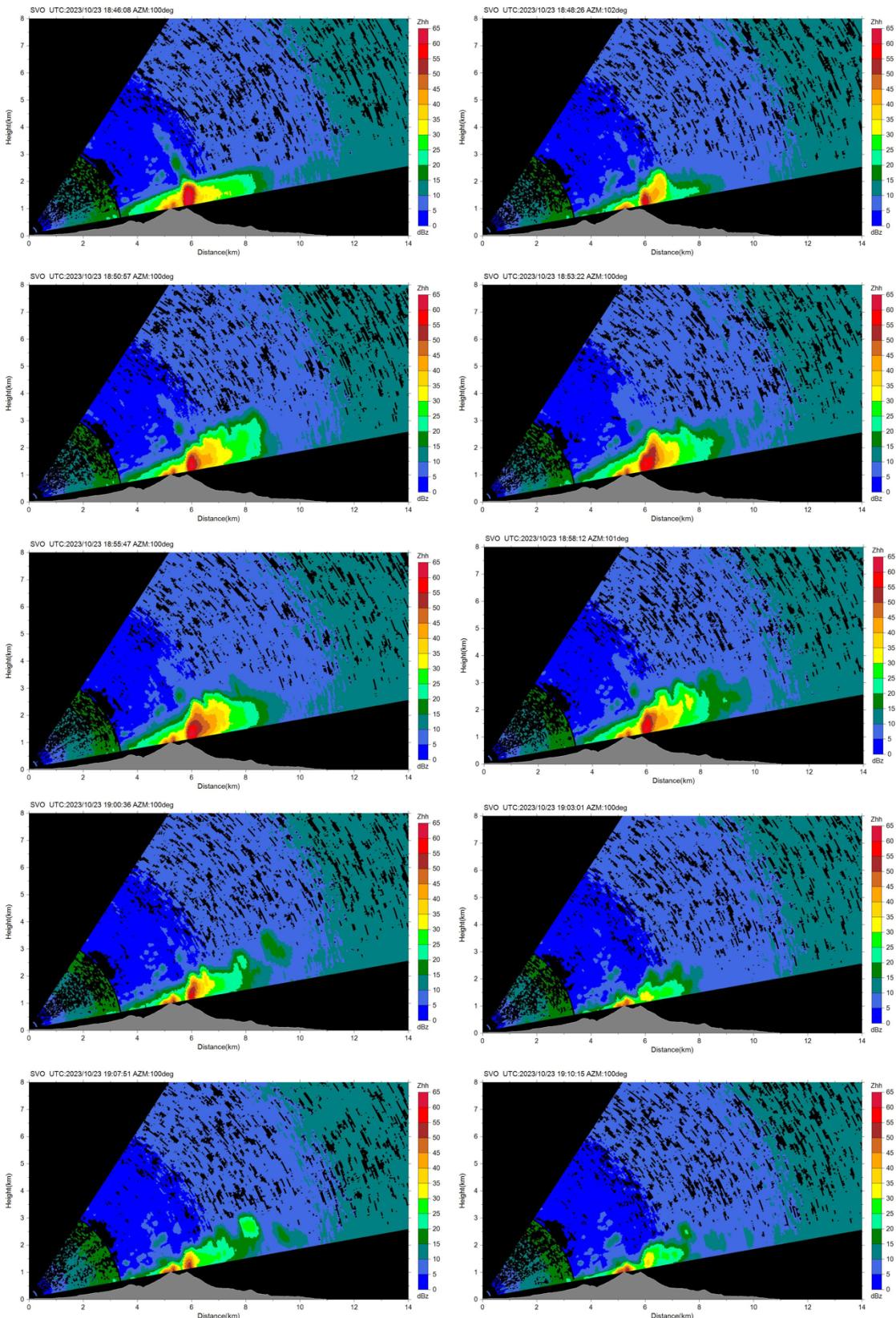


図 2-7 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2023 年 10 月 24 日 3:46~4:10 のレーダによる噴火映像。図に記載した時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

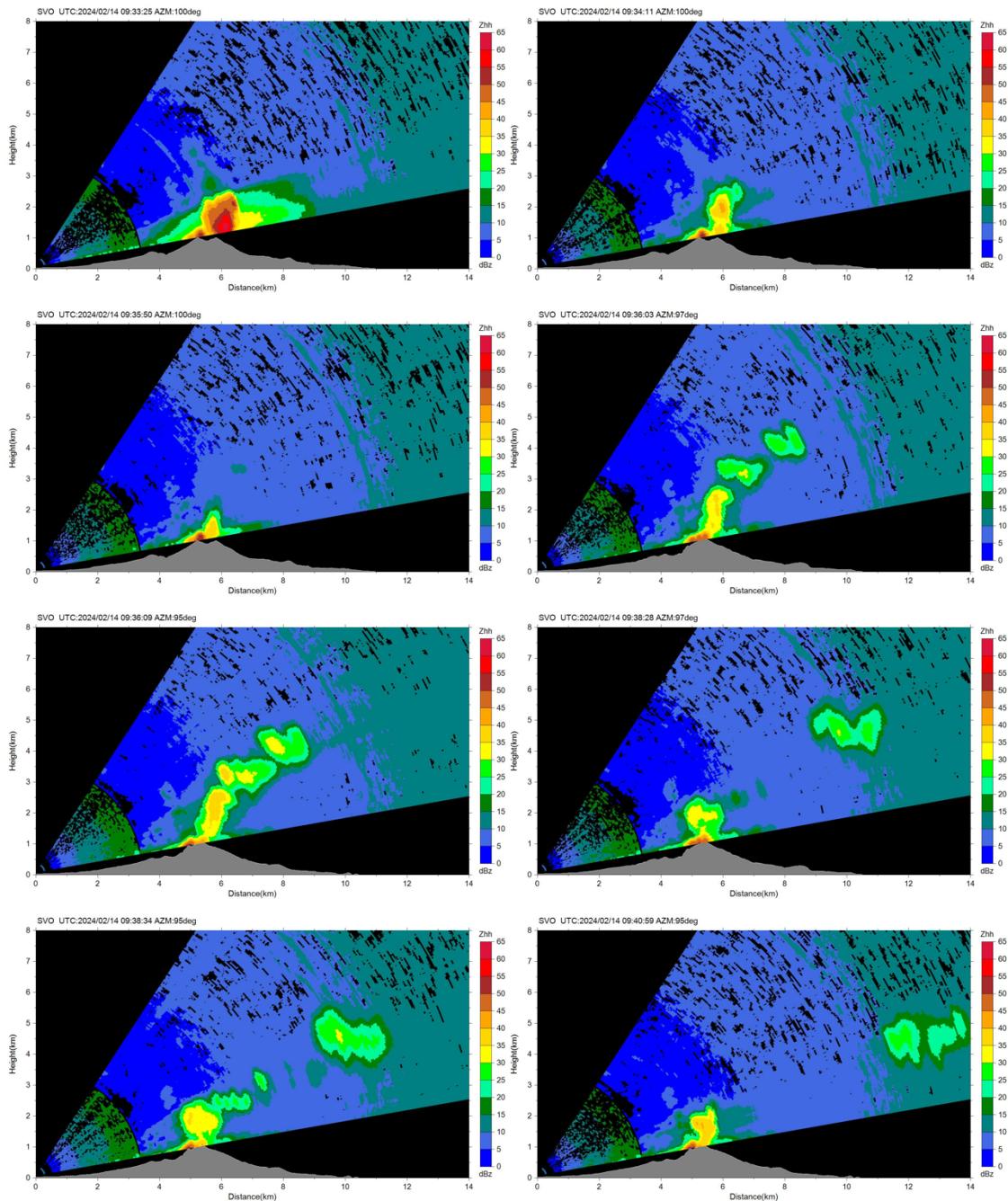


図 2-8 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 2 月 14 日 18:33～18:41 のレーダによる噴火映像。図に記載した時刻は UTC。AZM は北から時計回り方位角を示す。

## b) ライダー観測

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

### i) 令和 5 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かってレーザーを射出し、粒子からの後方散乱光を望遠鏡で集光して経路上の粒子分布を遠隔計測する。図 2-9 に、令和 5 年の日毎の観測時間を表示する。夏以降に両ライダーとも停止しており、これはメンテナンスで入れ替えたレーザー励起用フラッシュランプに問題があったためと考えられる。本館ライダーは年末までに復旧したが黒神ライダーは他のトラブルと併せて翌 R6 年まで再開が遅れた。鹿児島気象台による桜島火山活動報告では 10 月中旬に噴火が多く発生しておりこの期間に両地点でライダー観測結果が残っていないのは監視体制としては不十分な点として認識している。

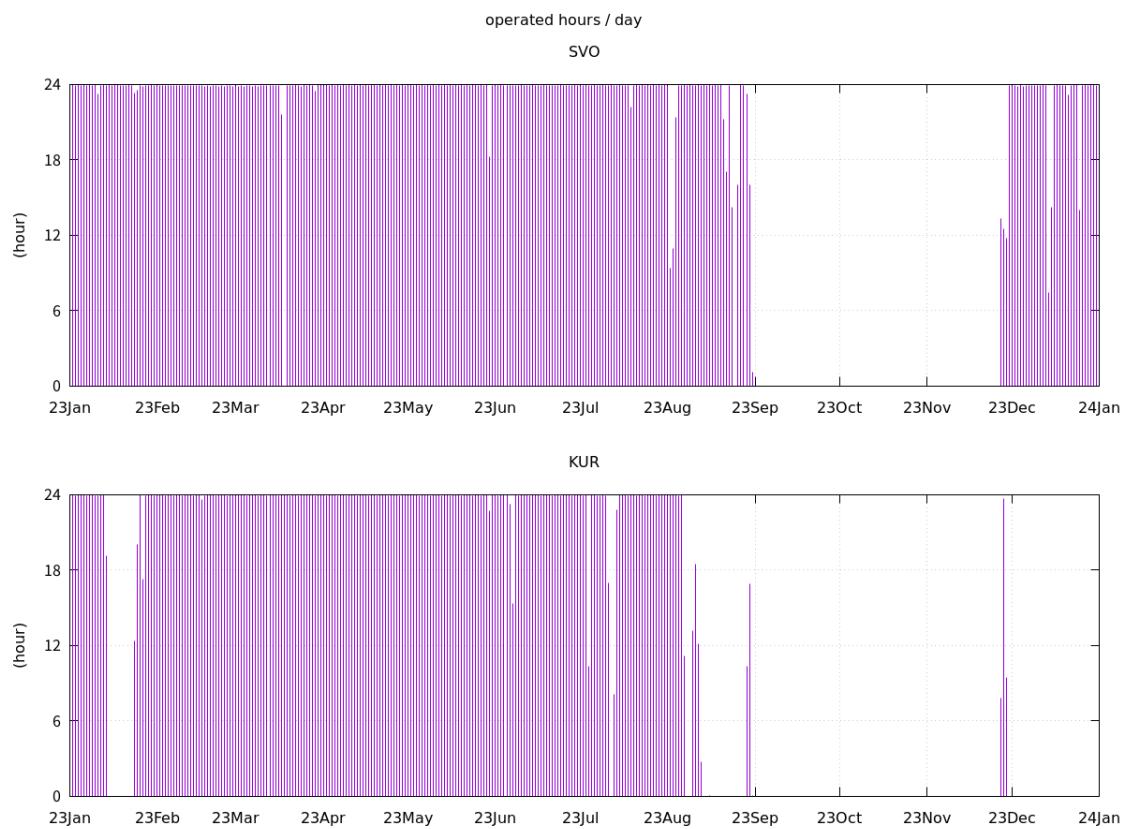


図 2-9 令和 5 年の観測所本館(上)および黒神観測室(下)における日毎のライダー観測時間。

### ii) エアロゾル消散係数の季節変化

本館での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(図2-10)。手法はShimizu et al. (2021)に準ずる。火口付近に相当するレンジ5.5km付近では年前半に消散係数が大きいが手前側(2~4km)では6月や8月に大きく、これは地上で暖候期に東風が出現するタイミング1)と合致している。黒神ライダーについては、1月や11月にレンジ3~4kmで消散係数が大きくなっていた(観測期間が短いので図を省略)。

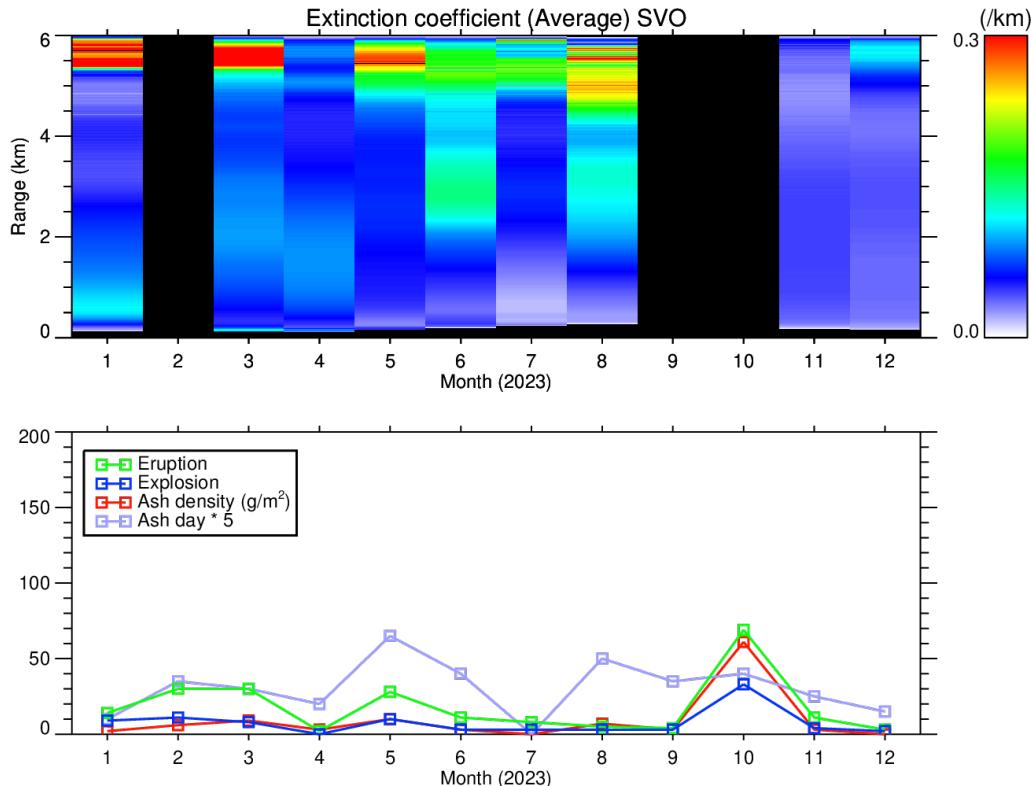


図2-10 (上)本館ライダーにより得られた月平均532nmエアロゾル消散係数のレンジ方向分布と(下)鹿児島気象台による月毎の噴火(緑)/爆発(青)回数、降灰量(赤)、降灰日数(紫)。

### iii) 小型粉塵計による火山灰計測

桜島周辺の火山灰広域分布を把握するために利用する測器の候補として簡易光学粒子計(OPC)による観測を本館において行った。図2-11は設置した2023年1月下旬から12月末までの粒径別粒子数の時系列である。粒径 $5\mu\text{m}$ 以上の粒子数は10月や11月に通常の10倍以上となるケースが見られ、火山活動が活発だった時期に一致している。この頃 $1\mu\text{m}$ 以下の粒子数には増加が見られず、大粒子側にピークを持つ火山灰を検出していることが確かめられる。この時期にはライダー観測が行われていないため、2月上旬の弱いピークにおいてライダー観測とOPC観測結果の比較を行った。図2-12に示すように、 $2.5\mu\text{m}$ (オレンジ)と比較して $5\mu\text{m}$ (黒)の個数はライダーによる火山灰の量と対応がよく、大粒子側に感度を持つOPCの有用性が示された。本測定装置は太陽電池と携帯通信網により移動可能・

電源不要で運用でき、災害時にも遠隔地サーバーを利用して継続的な火山灰モニタリングが行えるものと期待される。

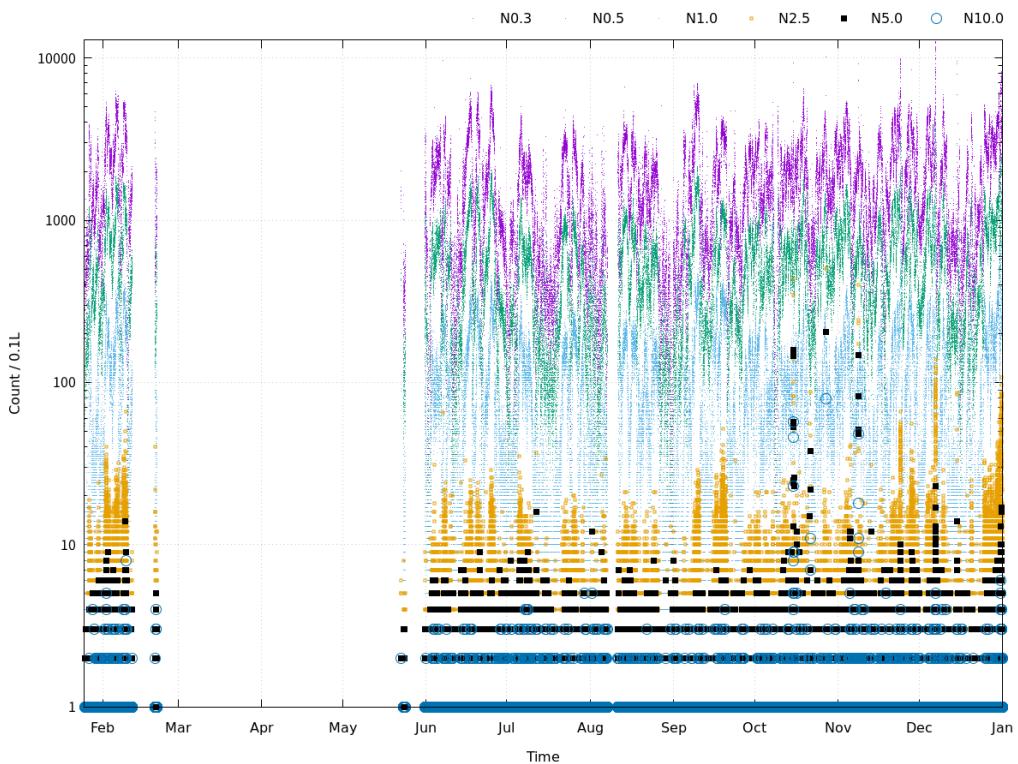


図 2-11 OPC による粒径別の粒子数時系列。カウントは 0.1Lあたりの粒子数。

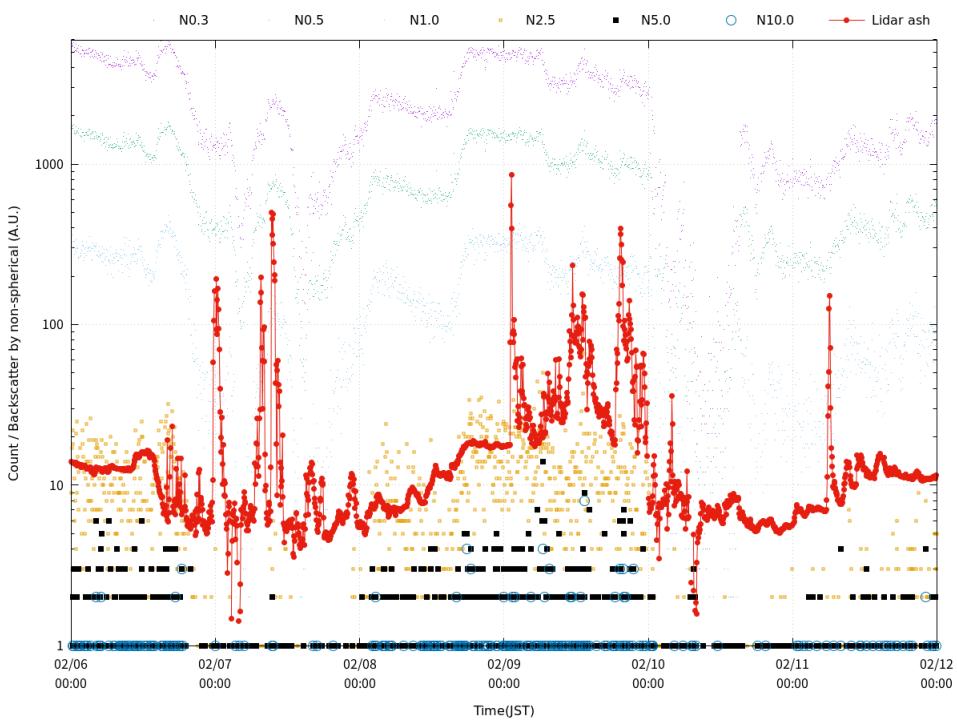


図 2-12 OPC による粒径別の粒子数時系列とライダーによる火山灰濃度(視線方向 600m 付近における後方散乱係数と体積偏光消度の積)。2023 年 2 月 6 日から 11 日まで。

c) GNSS 観測

GNSS による噴煙モニタリングの時間分解能を向上させることを目的として 2020 年 8 月 9 日のイベントでパルス状の波形が観測された 7 個のパスについて、サンプリング間隔を上げた観測データにもとづいて LC PPR の評価を実施した。図 2-13 に UTOG 観測点と SVN47 衛星間の 1Hz 毎の LC-PPR の時系列を示す。同図より、噴火発生からしばらくしてから 5 分程度の継続時間で LC-PPR が急速に増加するだけでなく、より高い時間分解能でその増減が捉えられていることが分かる。同傾向は図 2-14 に示した HARG 観測点と SVN45 衛星間における LC-PPR 時系列からも確認できる。同時系列では、LC-PPR は急速に立ち上がった後、一定の時間幅を持って減衰した後、急速に定常状態に戻る。これらの結果は、LC-PPR によってより微細な噴煙の動態を捉えられる可能性を示唆する。

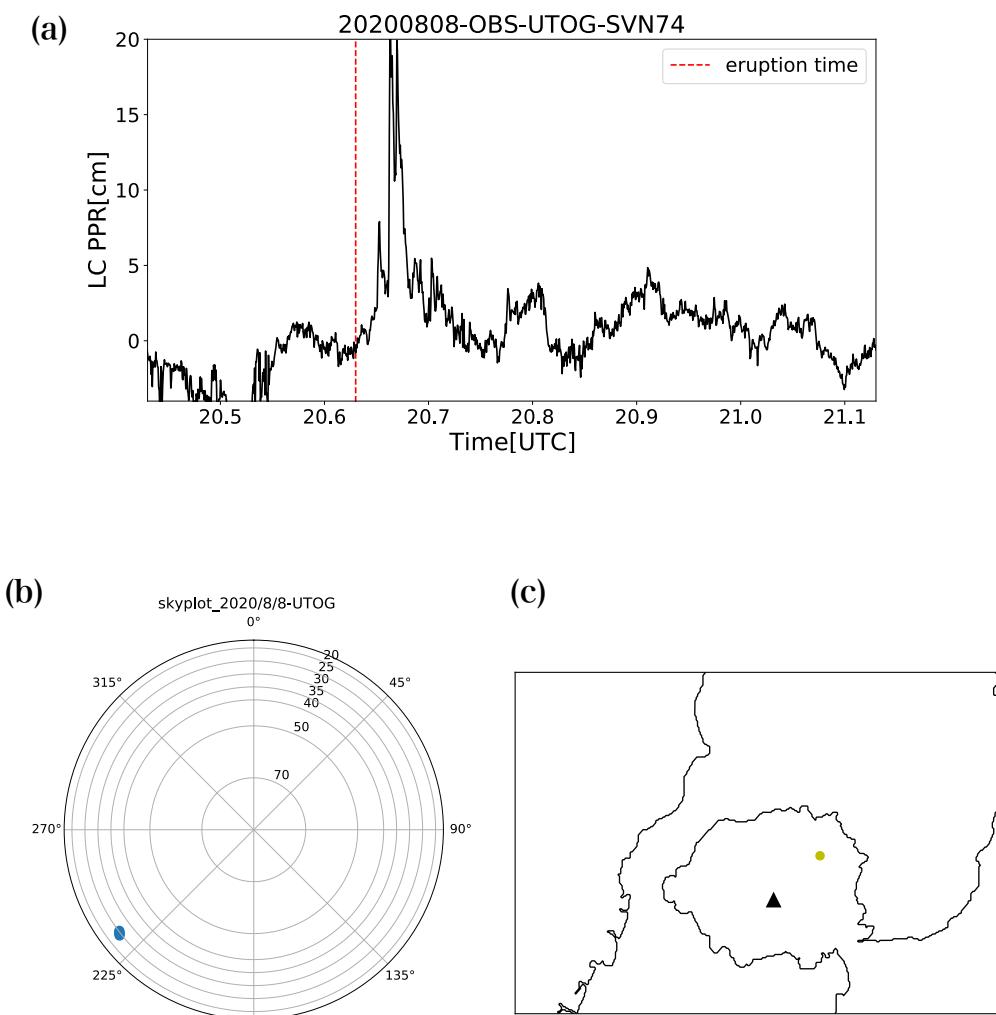


図 2-13 観測点 UTOG-SVN74 における 1Hz での解析結果。(a)LC PPR の時系列。横軸は時刻(UTC)、縦軸は LC PPR の値、赤点線は噴火発生時刻、赤実線は  $3\sigma$  の値を示す。(b)異常が見えている時刻における衛星の位置のスカイプロット。方位角は北を 0 とする 時計周り、仰角は水平を 0 として半径方向で表す。(c) 観測点の位置、▲は南岳。

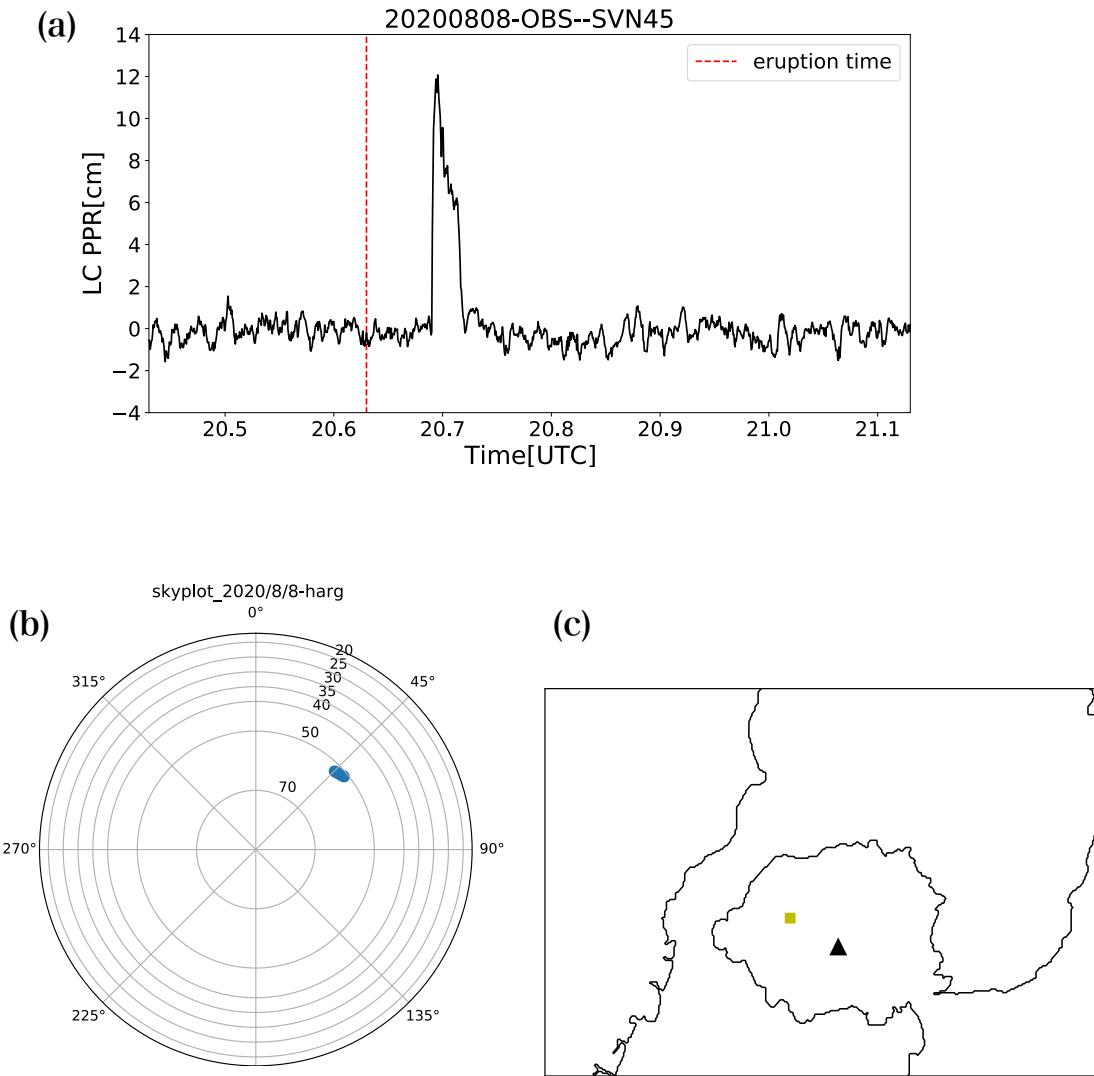


図 2-14 観測点 HARG-SVN45 における 1Hz での解析結果。(a)LC\_PPR の時系列。横軸は時刻(UTC)、縦軸は LC\_PPR の値、赤点線は噴火発生時刻、赤実線は  $3\sigma$  の値を示す。(b)異常が見えている時刻における衛星の位置のスカイプロット。方位角は北を 0 とする 時計周り、仰角は水平を 0 として半径方向で表す。(c) 観測点の位置、▲は南岳。

一方で、得られた LC-PPR 時系列は細かな擾乱を示す。これらは GNSS 解析における衛星時計補正情報の精度に起因すると考えられる。本研究における LC-PPR の解析には精密単独測位法(PPP)を採用している。同解析では衛星の時計補正情報をあらかじめ用意する必要があるが、今回の解析では一般的に用いられる 30 秒毎の時計補正情報を用いている。そのため、1Hz での解析では、それら 30 秒毎の時計補正情報を補間することで解析を実現している。その一方、衛星時計誤差はホワイトノイズ特性を示すことが知られ、単純な補間では真の時計補正值を得ることは難しい、そのため、1Hz LC-PPR 時系列に現れている細かい擾乱は衛星時計補正誤差に起因すると考えられる。一方、近年ではより高頻度の時計補正情報生成も実施されており、それらを使うことで、これら補間誤差は低減できる可能性があり、今後の課題である。

#### d) ディスドロメータによる地上観測

令和4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。2023年10月には噴火活動が活発化したので、キャンペーン観測を行い、降灰分布を把握した。

##### i) 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(PARSIVEL<sup>2</sup>、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2-15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。

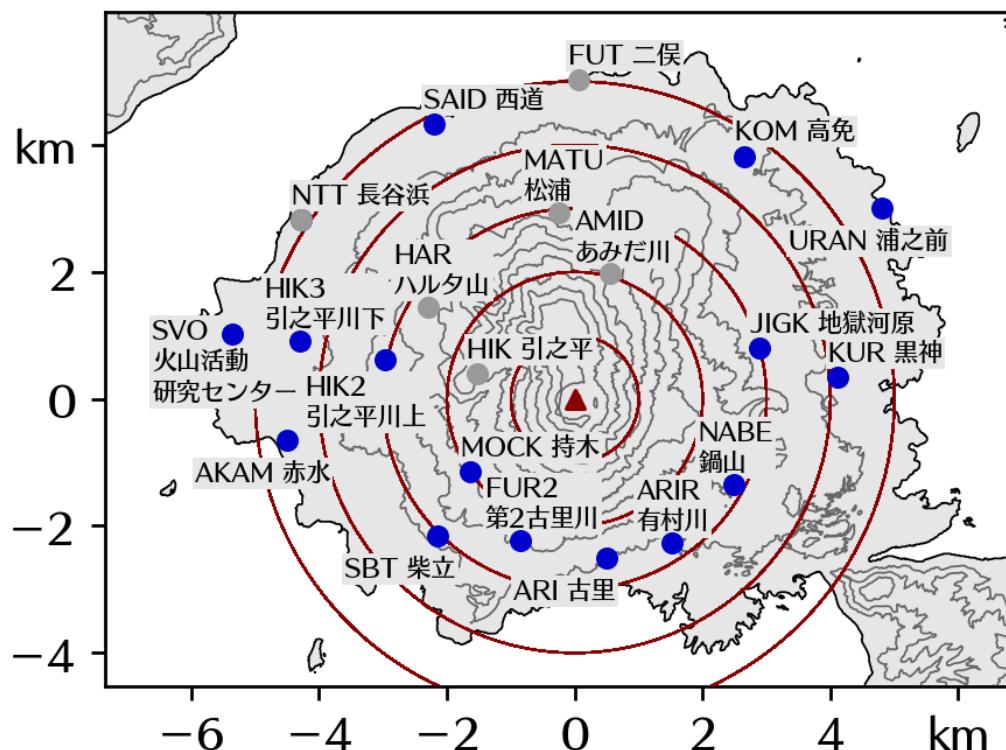


図2-15 桜島におけるディスドロメータの配置。青丸は本プロジェクトにおいて設置した観測点、灰丸は他のプロジェクトにおいて設置した観測点。赤三角は南岳A火口の位置を、赤円は南岳A火口から1kmごとの距離を示す。

### ii) 降灰量のキャンペーン観測

2023年1月以降は降灰量が少なく、降灰量のキャンペーン観測ができた噴火が少なかった。その期間では2023年10月には39回の爆発が発生したので、1例として10月11日7時52分に発生した噴火に伴う降灰量を図2-16に示す。桜島の南西山麓の11点において採取した。火山灰の採取状況を図2-17に示した。南岳に最も近い場所で436g/m<sup>2</sup>の降灰があった。風が弱かったため、火山灰は南西山麓に広く降下した。

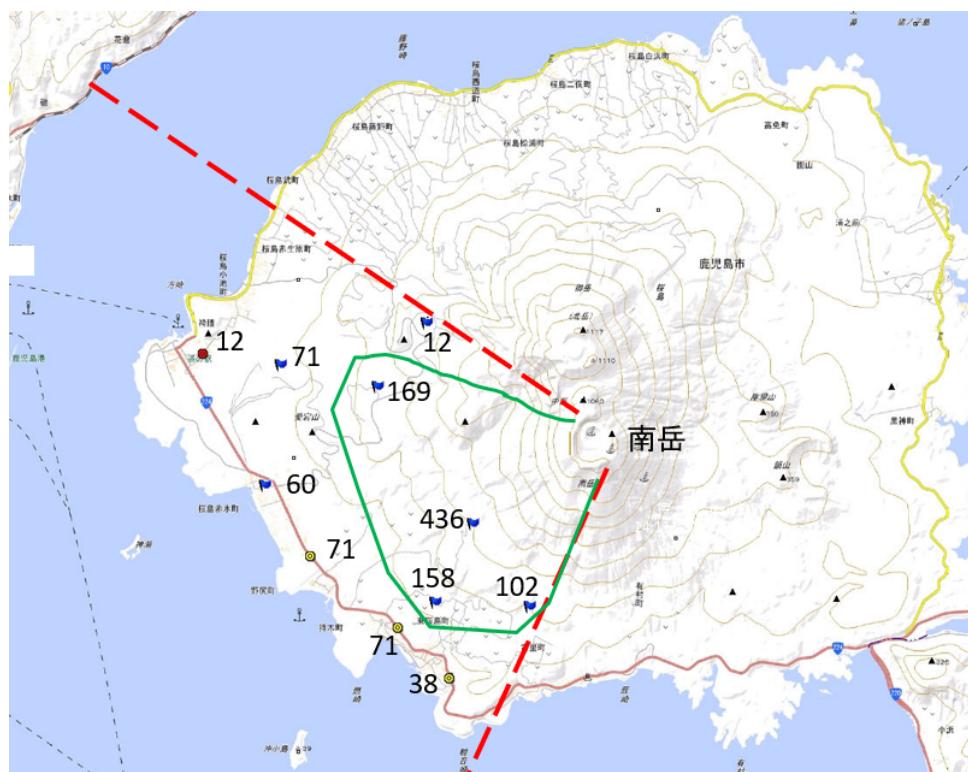


図2-16 2023年10月11日7時52分に発生した噴火に伴う降灰量分布



図2-17 火山灰の採取状況

### iii) ディスドロメータ観測による降灰量の時間変化

図 2-16 に示した噴火によるディスドロメータ観測の結果を図 2-18 に示す。噴火は 7 時 52 分に発生したとされているが、5 時ごろから火山灰が噴出し始め、6 時代に火山灰を 40ton/分程度の割合で 1 時間以上にわたり噴出したと思われる。SBT 観測点では火山灰粒子が 8 時 13 分から検知され始め、34 分まで検知され続けた。火山灰粒子が検知された時刻から考えて、この観測点に到達した火山灰粒子は 7 時 52 分に発生した噴火（噴煙高度 1400m）によるものと考えられる。この噴火に前駆して 5 時 40 分ごろから火山性微動の振幅が増加し、振幅の大きい状態が 1 時間程度続いた。この火山性微動は火山ガスの放出によるものと考えられる。

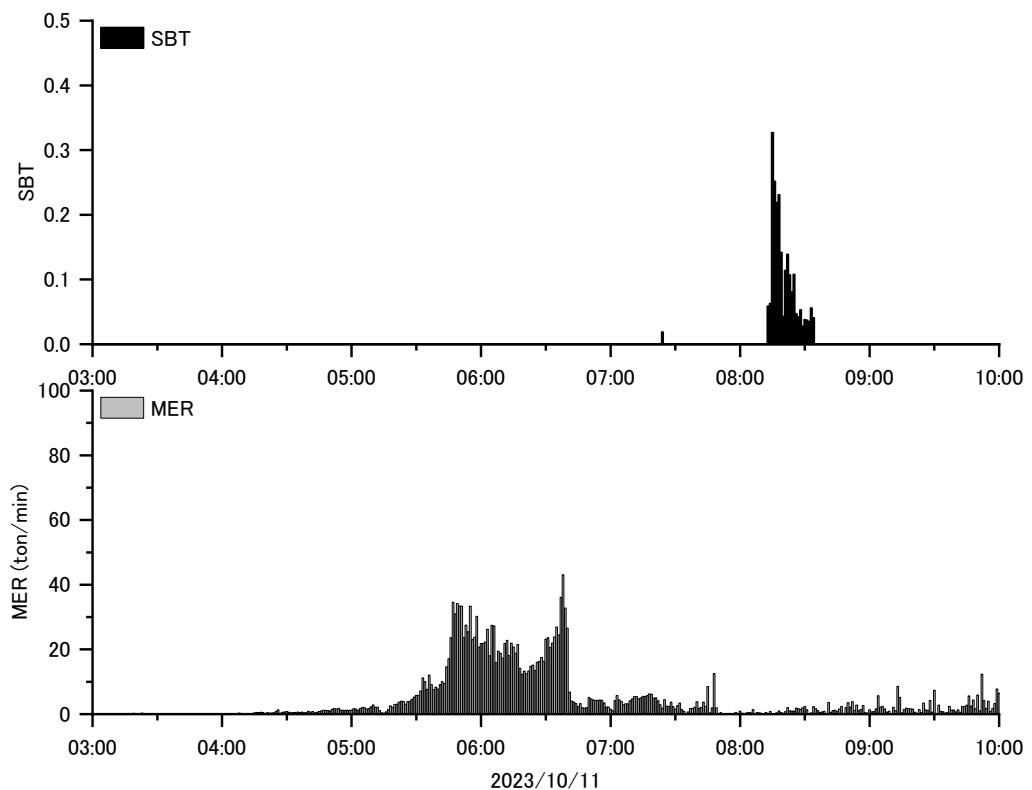


図 2-18 2023 年 10 月 11 日 3 時から 10 時までのディスドロメータ観測による時間雨量相当の推移。観測点 SBT (上段)、火山灰の推定噴出率 (下段)。

2024 年 2 月 14 日 18 時 33 分に発生した爆発では、噴煙高度は 5000m に達したとされており、2020 年 8 月 9 日以降では最も高い。噴出率も 4000 トン/分に達している。この爆発に伴う降灰のディスドロメータ観測の結果を図 2-19 に示す。火山灰は南岳から北へ移流し、桜島北麓の MATU、SAID、FUT において火山灰粒子が検知された。観測点 MATU が南岳火口に最も近いので、最初に火山灰粒子が検知された。降灰量は、さらに北北西側にある SAID が最も多い。

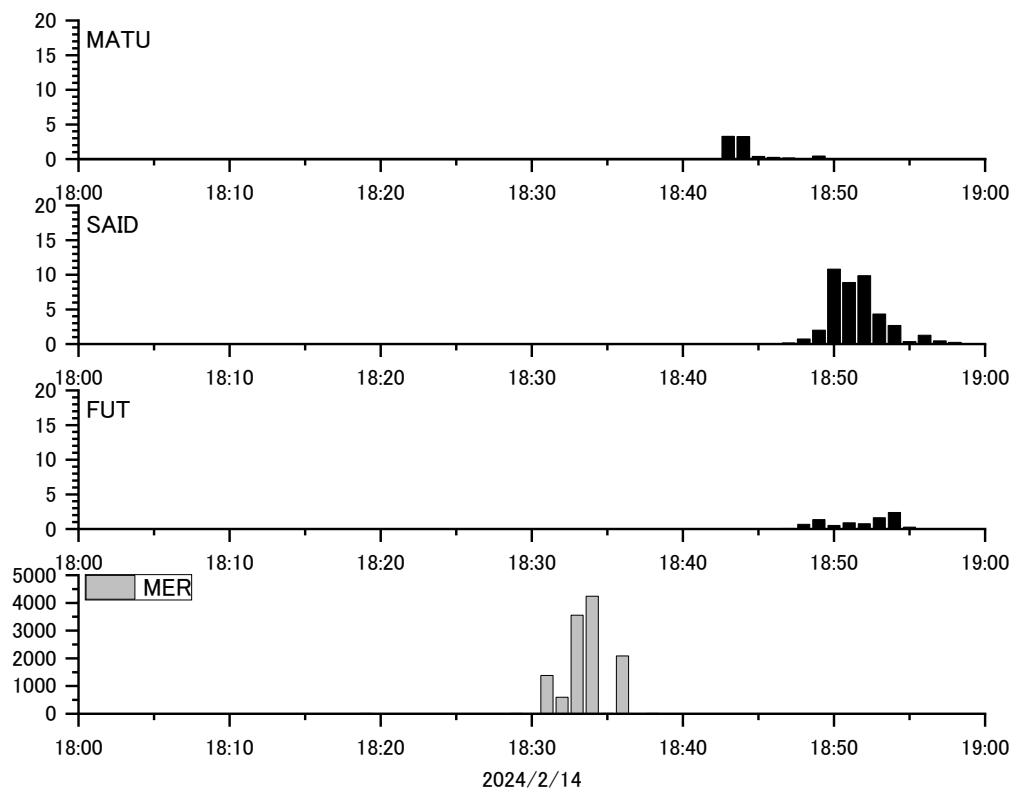


図 2-19 2024 年 2 月 14 日 18 時から 19 時までのディスドロメタ観測による時間雨量相当の推移。観測点 MATU、SAID、FUT（上段から 3 段目）、火山灰の推定噴出率（4 段目）。

e) レーダ観測による噴火事例のデータベース化

ディスクロメータや国土交通省の垂水 X バンド偏波レーダ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（降灰量と降灰時間の分布、総降灰量、降灰面積、粒径分布と降灰強度の時系列など）をデータベース化して web 公開する。

噴火事例のデータベース化に関しては、国土交通省の X バンド偏波レーダの観測データを処理して、過去 10 年間の降灰情報のデータベース化をおこなった。データベースの一部を防災科研の JVDN（火山観測データ一元化共有システム）へ提供した。

<https://jvdn.bosai.go.jp/portal/>

i) 降灰情報のデータベース化

昨年度に引き続き国交省垂水 X-MP レーダと京大防災研 SV0 の X-MP レーダデータを収集して噴火時の降灰量分布と噴煙柱の鉛直断面エコーをデータベース化し外部クラウド（google ドライブ）と web サイト「桜島降灰情報：VASH」へ登録した（表 2-3 参照）。但し、降灰量推定式は粒子の密度が  $2500 \text{kgm}^{-3}$  としているために推定された降灰量は過大評価されている。修正が必要である。

表 2-3 レーダ降灰情報の登録状況（2024 年 4 月現在）

年 情報	総事例数	Photo	TRM-XMP (Google ドライブ)	Ku-RAD	SV0-XMP (Google ドライブ)	Marine Radar	Disdrometer
2012年	3	6	12 ( 1095 )	0	0 ( )	0	0
2013年	4	6	12 ( 1007 )	0	0 ( )	0	0
2014年	0	0	0 ( 654 )	0	0 ( )	0	0
2015年	0	0	0 ( 1250 )	0	0 ( )	0	0
2016年	0	0	0 ( 153 )	0	0 ( )	0	0
2017年	0	0	0 ( 406 )	0	0 ( )	0	0
2018年	137	15	716 ( 479 )	0	270 ( 89 )	38	316
2019年	226	16	646 ( 400 )	0	450 ( 12 )	108	183
2020年	103	6	202 ( 421 )	0	204 ( 112 )	0	29
2021年	0	0	0 ( 132 )	0	0 ( 131 )	0	0
2022年	10	0	24 ( 232 )	2	20 ( 205 )	2	0
2023年	27	0	0 ( 183 )	0	54 ( 68 )	0	0
合計	510	12	1612 ( 6412 )	2	998 ( 617 )	148	528
登録予定数	5902		※噴火事例以外の各項目は画像等の総数です。				

f) 船舶レーダによる噴煙柱のモニタリング

昨年度に引き続き、SV0 および黒神観測室に設置した固体化船舶レーダによる噴煙の観測を実施する。今年度は、観測データから噴火のソースパラメータ（噴煙高度、噴火継続時間、噴出率）を準リアルタイムで推定し公開するシステムを構築する。推定されたパラメータの検証は、SV0 の X バンド偏波レーダの観測データを用いておこなう。過去の顕著な噴火事例について、作成した噴煙柱の動画をデータベース化して web 公開する。

固体素子船舶レーダから得られるドップラー速度分布の品質について調査した結果、噴火直後の噴煙柱内の速度分布はノイズが多く、ノイズ除去のための平均化処理が必要であることが確認された。SV0 の X バンド偏波レーダから得られるドップラー速度から噴煙柱内の鉛直速度を求めるアルゴリズムを作成した。これにより噴出率の推定が可能になった。SV0 のレーダ観測から得られた噴煙柱の動画についてはデータベース化し一部を web (VASH : Database of Sakurajima Volcanic ASH-fall Distributions) で公開した。

i) 船舶レーダによる噴煙柱の観測状況

- ・桜島の観測場所

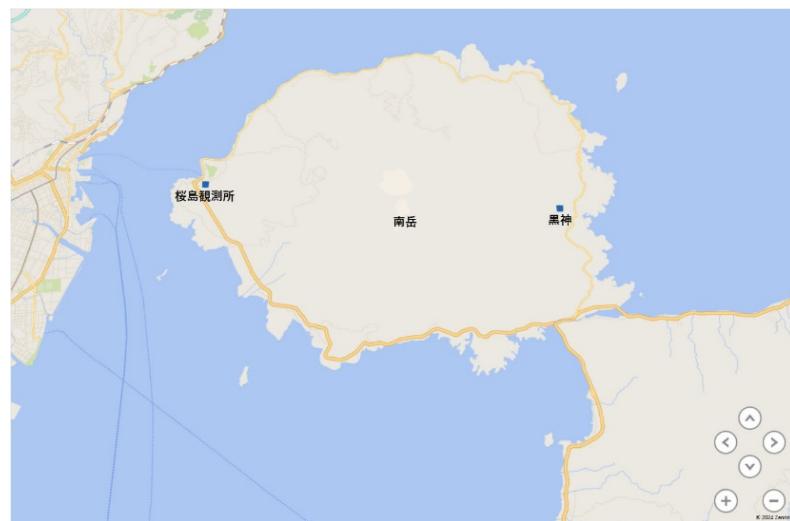


図 2-20 2023 年度船舶用レーダ配置 (桜島観測所と黒神観測室)

令和 5 年度は桜島の南岳を京都大学桜島観測所と黒神観測室に固体化船舶レーダ(SSR)を置いて南岳の東西から噴煙を観測した(図 2-20)。桜島観測所は屋上に空中線部(400W)を設置して制御監視用のコンピュータ(PC)は室内設置である。噴煙の高度をとらえるために観測は RHI (Range Height Indicator) とし、アンテナを高さ方向に回転させた。回転の速さは 2.5 秒/1 回転である。

桜島観測所の船舶用レーダは年間を通じて固体化した SSR であった。一方、黒神観測室は 2022 年末までマグネットロンレーダであったが、回転ギアの消耗で故障したために SSR に替えて観測を継続した(図 2-21)。SSR は 2023 年 10 月初旬まで稼働したが、故障したので、マグネットロンレーダを修理することにした。SSR は試作機のためメーカーに故障原因の調査を依頼したところ、空中線部電源の故障であった。



図 2-21 桜島観測所（左）と黒神観測室（右）の船舶用レーダの空中線部

#### ・桜島の噴火状況

鹿児島地方気象台観測の2023年桜島の噴煙高度毎の噴火度数は図2-22のとおりである。高度のわからない噴火も含めて回数は215回となっているが、最も頻度が高いのは高度1100m-1200mの9回で、2400mから3600mで3回であった。

これらの噴火の中で桜島観測所と黒神観測室の両方で観測できた結果を抽出したのが次の表2-4と図2-23である。同時観測できた期間は7月から10月で6件であった。

2点の観測だけであるがRHI観測であるので噴煙の移動、噴煙の高さが認識できる。一方で、噴煙の信号強度の変化はさらに詳細な分析が必要であり、今後の課題である。

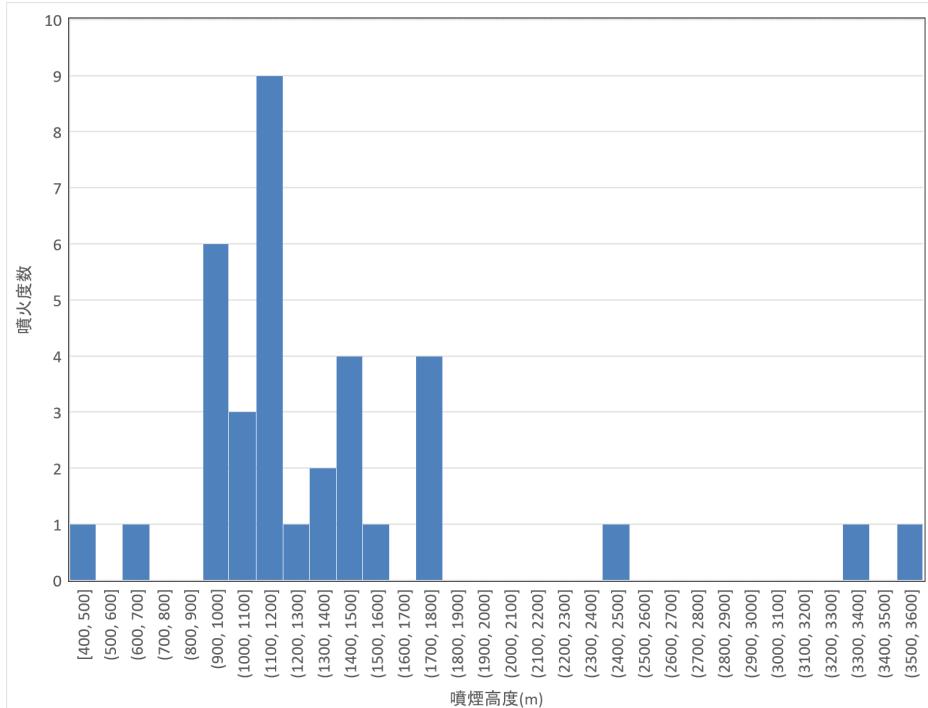


図 2-22 噴煙高度毎の噴火度数（2023年）、鹿児島地方気象台

表 2-4 桜島観測所と黒神観測室の同時観測結果一覧 (○ : 有)

日時	桜島観測所	黒神観測室
2023/7/17 12:35	○	○
2023/8/4 21:51		○
2023/8/4 21:52	○	
2023/8/4 21:53	○	
2023/8/4 22:07	○	○
2023/10/11 20:17	○	
2023/10/11 20:18		○
2023/10/12 1:16		○
2023/10/12 1:17	○	
2023/10/12 7:28	○	
2023/10/12 7:29		○
2023/10/12 7:30	○	

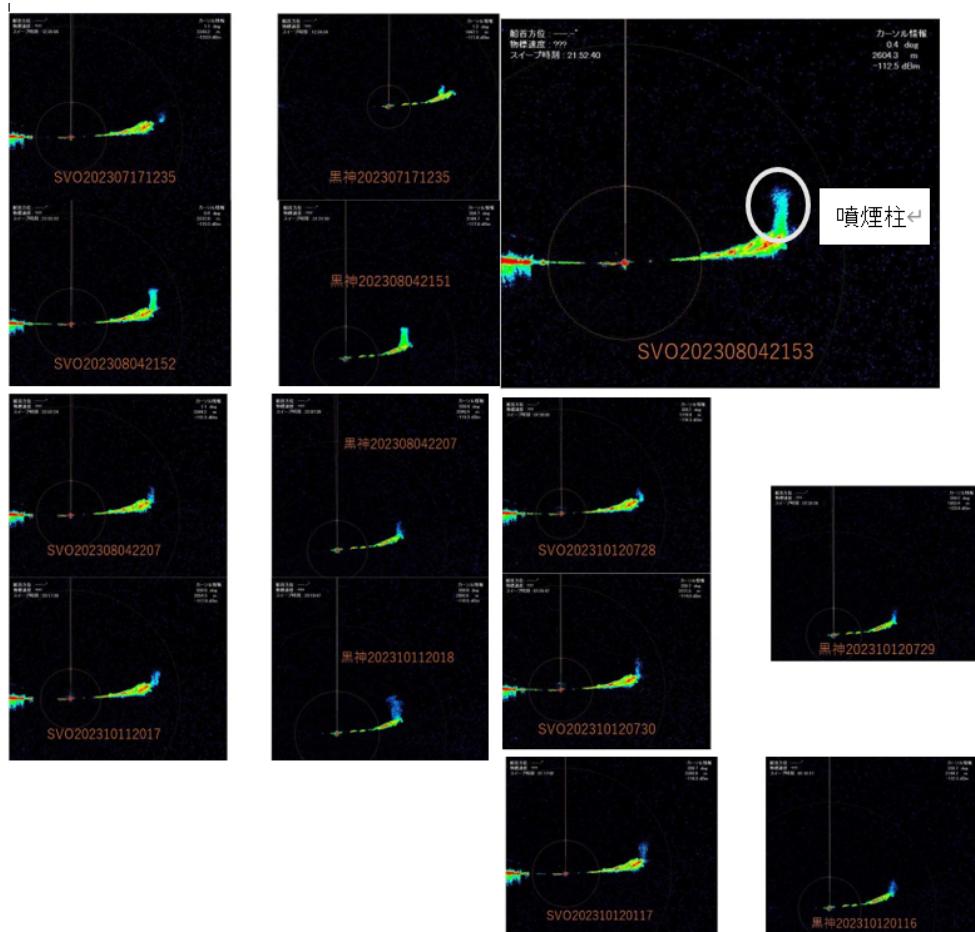


図 2-23 桜島観測所と黒神観測室の同時観測結果映像

### ii) 船舶レーダデータの準リアルタイム処理

火山の噴火予測は地震波、電気比抵抗や電磁探査などで地下構造の変化をとらえることで行われている。船舶用レーダは1回転に2.5秒という高速で噴煙を観測することで、噴煙の発生を検知し動態を予測することを目標にしている。桜島の噴煙観測は送信を真空管の一種であるマグネットロンを使う従来型船舶用レーダと送信を固体化素子で行う固体化船舶用レーダ(SSR)の両方で実施している。先ず船舶用レーダで噴煙を自動で検知することを検討した。

- マグネットロンを使う従来型船舶用レーダで噴煙の出現を検知する方法

マグネットロンレーダは空中線部から映像の①ビデオ、②トリガ、③1回転毎のヘディング、④回転の角度の4信号を取り出し、コンピュータ(PC)で受け取り映像を作成して画像ファイルとして保存するようになっている。保存された像を読み取り噴煙を検出することになる。データ保存用PCはA/D変換器を増設したPCで取り込む方式であるが、OSがWin7で開発環境を整えるのが難しい。

- 固体化船舶用レーダ(SSR)で噴煙の出現を検知する方法

SSRは空中線部がデータをLANでブロードキャストしPC側で受信してデータの表示・保存する。SSRのデータはヘッダとデータ部分で構成されており、信号強度とドップラー値がある。保存は数値であるので読み出し前回の記録と今回の記録と比較して噴煙を検出できる。保存したデータを読み取って判断するので、1分強の時間差ができるので、“準リアルタイム”と呼ぶことにする。準リアルタイムでの噴煙検出フローチャートを図2-24に示す。

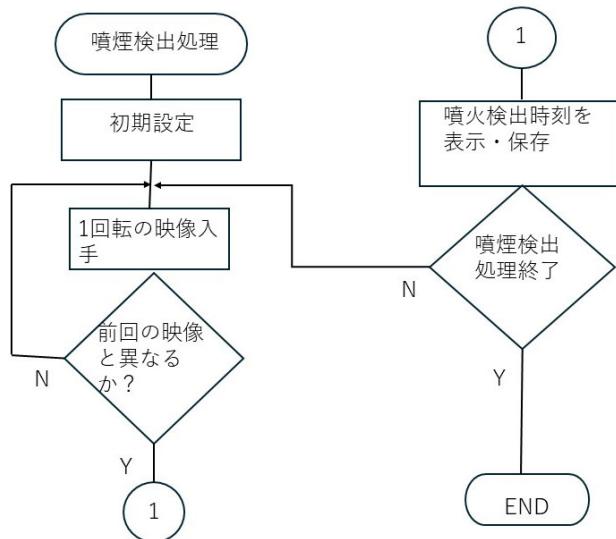


図2-24 噴煙検出フローチャート

SSRの保存プログラムはWin10で動作する。準リアルタイムで噴煙検出するためには保存しながら噴煙検出する必要があるので、保存プログラムより早い時間で動作する必要がある。Win10でプログラム開発するためには開発に親和性の高いMicrosoft Visual C++を

使用する必要がある。時間制限のないプログラム開発では、任意にライブラリの揃った便利な言語を選択できるが、機器依存性の高い準リアルタイムの開発では致し方が無い。

<pre> 1回目のレーダデータ headlghl_3 58 0 0 0 imgdtlghl_3 0 8 0 0 ver1_3 0 dataclass 0 datastruct 0 sta1_3 23 sampt1_3 e6 df 3d 64 1681776614 643ddfe6 samph1_3 ea 2b 2 0 lat1_3 0 0 0 0 long1_3 0 0 0 0 sealealt1_3 0 0 0 0 relaazi1_3 fffffff96 19 0 0 6550 1996 trueazi1_3 0 0 0 0 aziwid1_3 19 0 0 0 releleva1_3 0 0 0 0 trueleva1_3 0 0 0 0 elevawid1_3 0 0 0 0 horbewid1_3 0 0 0 0 verbewid1_3 0 </pre>	<pre> 0 magf1_3 0 0 accu1_3 0 0 0 0 0 0 0 sweap1_4 56 d6 d6 d0 c5 ac a3 92 8a 85 7f 6a 66 5f 5f 5c 5d 5e 5e 55 5f 62 59 4f 5a 60 5e 58 5b 5b 61 5d 57 5c 54 5f 58 5a 5d 61 63 64 63 5e 5c 61 5f 59 5e 5c 52 5b 53 57 59 5a 5d 5f 59 5b 5d 57 56 5b 5c 5a 5e 60 5f 58 58 52 56 5a 59 58 53 5d 60 5e 60 5b 53 5d 5e 60 5a 61 52 53 62 62 5e 5e 5c 5c 61 5f 5d 59 5e 60 61 63 62 5e 5c 5a 5b 58 5d 5d 5a 5c 63 61 5e 58 5e 60 5a 5a 5d 5b 5f 62 64 62 58 54 5e 5e 5c 57 57 5b 5c 5f 5c 57 56 60 5d 57 4f 59 5e 5e 60 5b 62 60 5c 53 5b 60 5d 5e 56 52 5a 5b 5d 5c 59 53 5e 62 61 5e 57 54 57 54 4d 5b 60 57 62 5b 5b 59 64 5c 5f 5c 60 63 5f 5f 61 64 61 60 5d 5b 5a 5f 59 60 62 5e 5e 5f 4d 5b 57 50 5f 5d 5f 59 61 61 5a 5e 5c 5f 5e 5d 5d 5b 61 62 63 5f 5e 5f 5d 5f 54 5b 57 5c 52 60 58 5b 5e 55 51 5b 58 55 5b 54 5c 59 5f 5e 62 5e 5f 57 58 57 60 62 60 5b 59 58 61 57 5d 60 61 57 61 5a 5d 58 5c 60 5d 57 5b 60 62 60 61 62 58 4f 58 5c 5e 5d 5d 56 56 5c 5a 5c 5e 4d 57 5e 5e 61 52 5b 57 56 62 5e 5b 5a 58 5d 61 5b 55 59 54 59 57 52 64 60 59 5d 51 5d 58 58 57 62 57 51 4f 5b 63 57 55 5f 63 60 5e 51 55 5b 5d 64 59 63 65 60 5a 5b 58 5a 5d 5f 5e 53 57 52 60 65 65 63 5c 5f 5d 57 5a 5c 63 60 54 64 61 5a 5a 60 5c 5e 58 60 61 60 60 61 5d 59 60 58 58 50 50 59 5f 5e 5d 5c 57 58 58 58 5b 5e 5d 4f 59 63 61 5c 60 60 61 60 5c 59 56 5e 5b 5c 5b 5d 62 64 63 4e 5b 5e 63 5c 54 60 62 60 5a 5d 5f 5d 5c 5b 5d 52 5d 5e 57 5b 5c 5a 5f 5f 5a 58 56 4d 56 5c 59 4f 4d 5b 60 62 63 60 56 59 50 59 5c 5c 5e 5d 56 57 61 5a 5e 5e 59 59 5d 50 5f 53 58 5b 5c 5c 5f 61 60 58 60 64 61 5f 61 65 67 66 5a 5e 5f 64 5e 54 57 5d 56 5d 5a 61 </pre>
--	---

図 2-25 SSR 保存データのヘッダ（左）とスイープデータ（右）

#### ・保存データの構成

SSR データを Microsoft Visual C++で作成したプログラムで読み取ったところ、構成はヘッダ 88 バイト、データ 2048 バイトの構成で観測中に保存される。ヘッダにはイメージデータ長 2048 であるので、1 回ごとに 8 ビット電界強度と 8 ビットドップラが入れ替わっている。ヘッダにサンプリング時刻や 0.01° までの相対方位があるので識別が可能である（図 2-25）。

今後 RHI の角度情報や時刻情報を引数にしてスイープ情報などから最適なアルゴリズムを検討していく。

### iii) 噴出率の推定アルゴリズム

VO-XMP のドップラー速度 RHI 観測データから噴出率を推定するアルゴリズムを作成した。噴火により火口から天頂角 $\phi$ 方向に速度  $V$  で放出された火碎物をアンテナ仰角 $\theta$ に固定したレーダで観測したときに観測されるドップラー速度  $V_D$  は

$$V_D = V \sin (\theta + \phi) = V \sin \phi \cos \theta + V \cos \phi \sin \theta \quad (1)$$

で表される（図 2-26 参照）。 $V$  の水平方向と鉛直方向の成分をそれぞれ、 $u$ 、 $w$  とすると

$$u = V \sin \phi \quad (2)$$

$$w = V \cos \phi \quad (3)$$

である。従って、

$$V_D = u \cos \theta + w \sin \theta \quad (4)$$

$$w = (V_D - u \cos \theta) / \sin \theta \quad (5)$$

である。 $w$  は火碎物の噴出速度に対応する。火口から噴出される単位面積、単位時間あたりの火碎物の噴出量を質量噴出フラックス  $RE$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) と定義する。レーダサンプリング内の火碎物の空間密度を  $C_A$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) とすると  $RE$  の水平、垂直成分はそれぞれ次式から計算される。

$$RE_H = C_A \times u \quad (6a)$$

$$RE_V = C_A \times w \quad (6b)$$

火碎物の放出角度  $\phi$  がゼロの場合、

$$w = V_D / \sin \theta \quad (7)$$

なので  $RE$  は簡略化され次式で表される。

$$RE_V = C_A \times V_D / \sin \theta \quad (8)$$

$C_A$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) はレーダ観測から得られる反射因子  $Z_A$  ( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ) を用いて次式から計算できる（真木・井口、2022）。

$$C_A = 1.81 \times 10^{-5} Z_A^{0.673} \quad (9)$$

噴出率は一般に単位時間に火口から噴出する火碎物の量と定義されるので、噴出率は噴煙柱の水平断面内の  $C_A$  の面積積分で求められる。なお、実際の噴出率の計算にあたっては、水平断面をどの高度に設定するか、火碎物の密度の値、噴煙柱内を下降する火碎物の扱い、レーリー散乱の過程が成り立つかどうかなどの問題がある。これらの点は次年度の課題である。

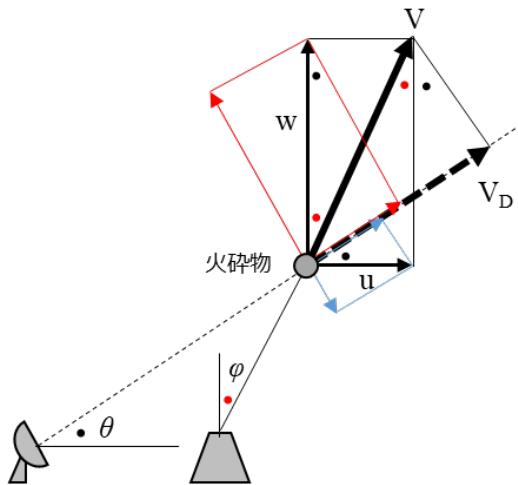


図 2-26 ドップラー速度から火碎物の鉛直速度を求める模式図。粒子の速度ベクトル  $v = (u, w)$  の  $u$  と  $w$  のそれぞれのビーム方向の成分の和がドップラー速度  $V_D$  として観測される。

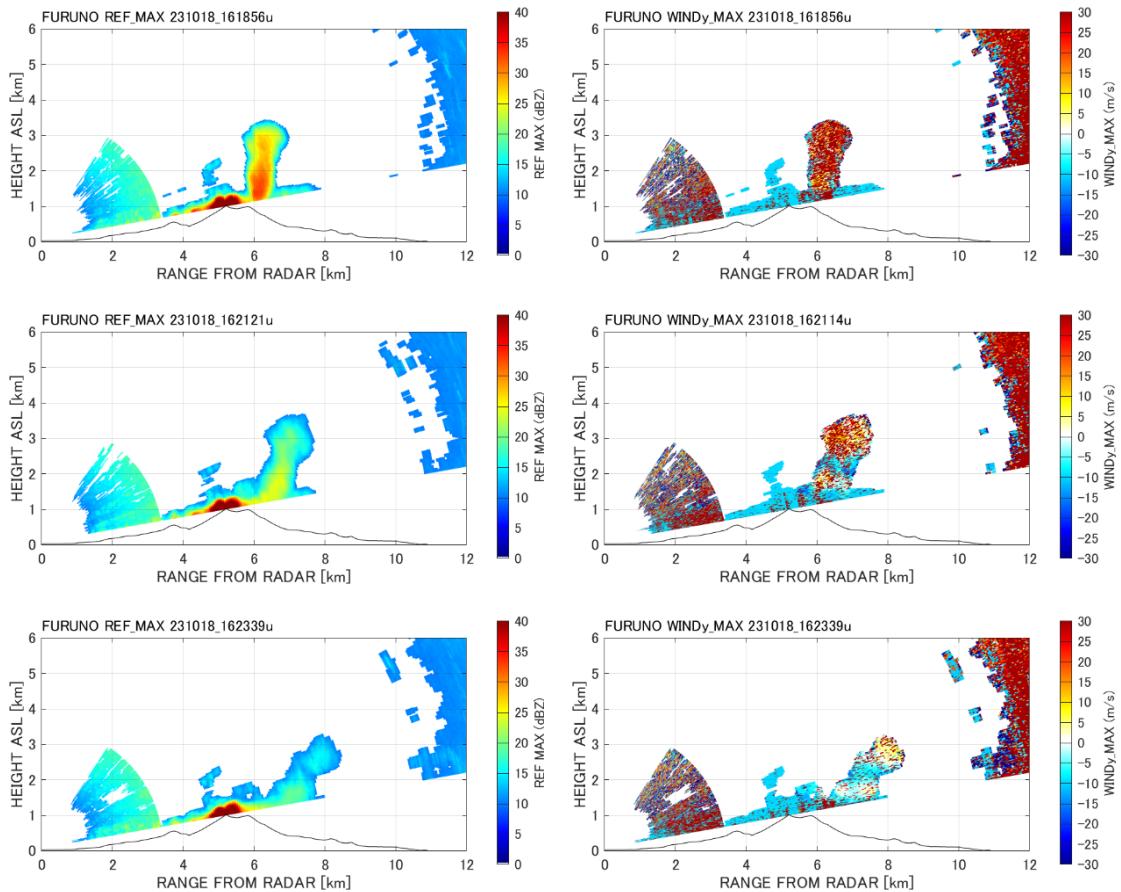


図 2-27 svo-xmp レーダの RHI 観測から得られた反射因子の最大値（左）と鉛直流の最大値（右）の分布。鉛直流の暖色系は上昇流。寒色系は下降流。噴火事例 23-0281（2023 年 10 月 19 日 01 時 16 分噴火、噴煙高度 2500m）。

推定した鉛直流分布の例を図 2-27 に示す。参考の為に反射因子の鉛直断面も示す。噴火の約 3 分後（左上図）には噴煙柱の上端は火口から 2500m の高度に達している。この時の鉛直流の最大値は噴煙柱全層+となっている。その後約 2 分後には噴煙柱の中層以下で下降流が支配的になっている（右中図）。但し、火口直上でわずかではあるが鉛直流も認められ新たな小噴火が発生していると考えられる。その後 2 分後には噴煙柱は風で流され風下に傾いている（下図）。この時、噴煙柱の上端部の鉛直流は弱くなつた。本報告では示さないが、反射因子と上昇流の鉛直分布から火山灰の上向きおよび下向きの輸送量を推定することができる。

#### iv) SVO レーダ RHI 観測画像の web 公開

SVO レーダによる噴煙柱の観測結果を web 公開するために、2022 年度の観測データと解析結果をデータベース化した。解析にあたって、収録データから噴火時のデータを抽出し保存する MATLAB ベースのプログラムを作成した。レーダデータの解析は昨年度機能追加した ANT3D（三次元レーダデータ解析ツール）を用いた。SVO レーダの観測データは桜島火口を含む方位角  $95^\circ \sim 115^\circ$  の範囲を仰角  $10^\circ \sim 57^\circ$  で計 11 の RHI スキャンから得られる。11 スキャンに要する時間は約 1 分で、計 6 種類のレーダパラメータ（反射因子、ドップラー速度、スペクトル幅、反射因子差、比偏波間位相差、相関係数）が収録されている。噴煙量に關係する反射因子と鉛直速度に關係するドップラー速度の結果をデータベース化した。噴煙粒子の形状や大きさの推定に利用される反射因子差、比偏波間位相差、相関係数などのいわゆる偏波レーダパラメータは品質管理を行った後にデータベース化する予定である。データベース化された反射因子とドップラー速度の RHI 画像（動画）は本プロジェクトで整備した桜島降灰情報データベース（VASH : [Database of Sakurajima Volcanic ASH-fall Distributions](#)）へ登録した。図 2-28 に VASH で公開している SVO-XMP の画像例を示す。

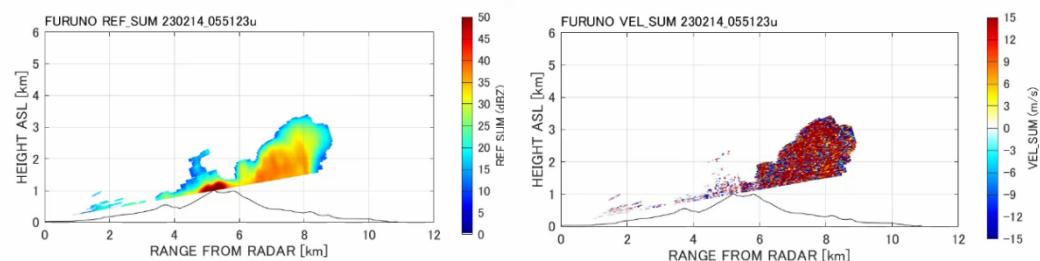


図 2-28 VASH で公開されている噴煙柱の SVO-XMP の観測画像の例。左：反射因子、右：ドップラー速度。いずれも 11 方位角の RHI データの合成図。2023 年 2 月 14 日の桜島噴火。

### 3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島において令和5年度に観測されたデータの解析と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震動を解析し、推定式の拡張性について検討した。また、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させた。

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

桜島火山における2023年以降の降灰量と地震動・地盤変動のデータを加えて、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。

##### i) 2024年3月までの桜島南岳第3活動期の噴火活動

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月にはマグマ性噴火に移行した。2009年からは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日からは南岳において噴火が頻発するようになった。これ以降の期間を南岳第3活動期と呼ぶ。

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2-29に示す。2024年3月までの噴火活動は、9つのEpisodeに分けられる。最も活動的であったのは、2019年9月に始まり、2020年6月まで続いたEpisode5である。その後、2020年後半から2021年5月までのEpisode6、2021年第4四半期から2022年2月までのEpisode7が現れているが、Episode5に比べて噴火発生頻度も少なく、爆発強度も小さい。

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162回、噴火は201回発生しており、回数としては多いが、噴煙高度は最高でも3200mと過去の活動に比べて低く、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。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月から8月まで昭和火口においても噴火が41回発生した。昭和火口の噴火活動は、2018年以降5年ぶりである。噴火の様式はほとんど「噴火」であり、「爆発」は3回しか発生しなかった。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といえる。噴煙高度の最大値は2700m(2023年3月6日)であった。

地盤変動に注目してみると2023年1月ごろから膨張速度が速くなっており、膨張過程の加速後に昭和火口の噴火活動が発生したといえる。膨張がその後も継続し、8月頃には再度加速した。2023年10月には「爆発」の発生が39回と急増し、空振振幅の増加もみられるので、これ以降をEpisode9とした。このEpisodeでは、10月には活発化がみられたが、11月以降爆発回数が減少した。噴火活動の低下とともに、地盤の膨張も停止した。なお、2024

年2月14日の爆発では噴煙が5000mの高度に達しており、噴煙高度が5000mを超えたのはEpisode6の2020年8月9日の爆発以来であった。

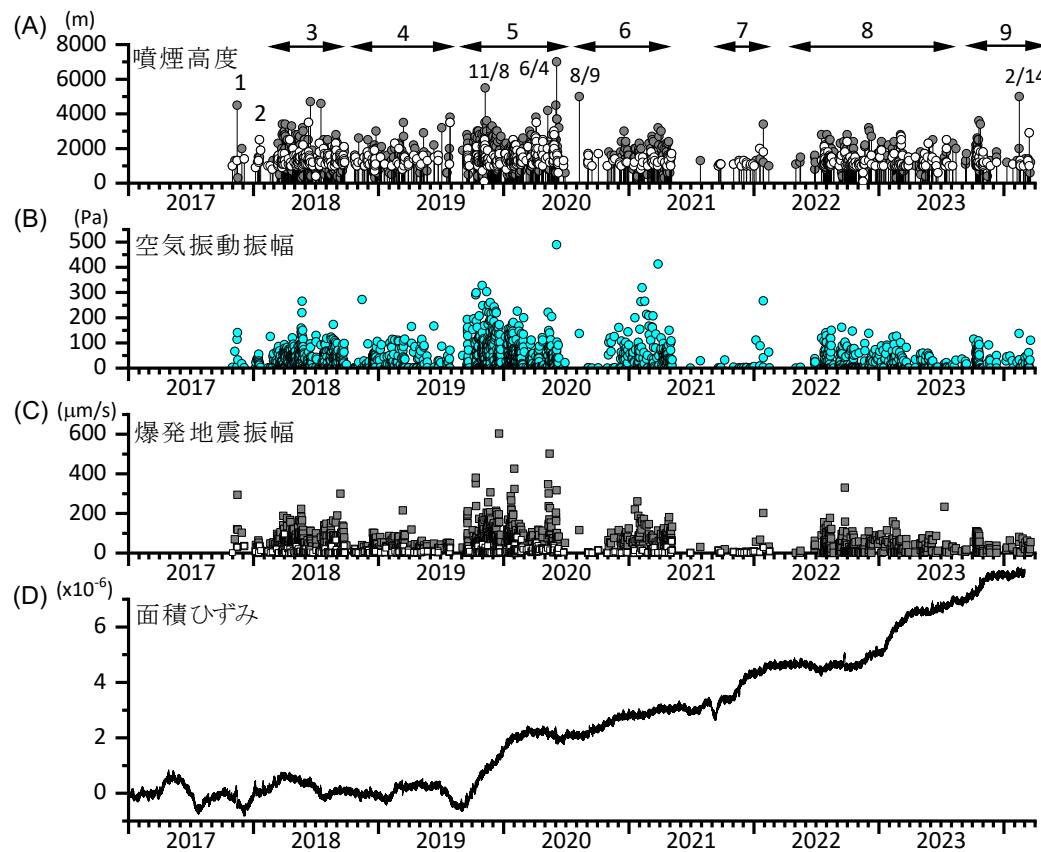


図2-29 2017年11月以降の南岳の噴火活動の推移。数字はEpisodeの番号を示す。(A)火口縁上噴煙高度(鹿児島地方気象台発表)。灰丸は爆発、白丸は噴火を示す。(B)有村観測坑道における空気振動振幅。(C)有村観測坑道における爆発地震の最大振幅。灰色の□は爆発、白□は噴火を示す。(D)ハルタ山観測坑道における面積ひずみ(火口方向ひずみ+直交方向ひずみ)の変化。

### ii) 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( $\Delta V$ )に対して以下の線形関係がある(Iguchi, 2016)。

$$W_e = \alpha A + \beta \Delta V + \gamma \quad (10)$$

2009年から2013年までの昭和火口の噴火活動では、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -1.03 \times 10^5$ と近似されている(Iguchi, 2016)。ここで、 $\gamma$ 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、2024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2-30に2009年1月から2024年2月までの15年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量—火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係を示す。月ごとの

火山灰放出量は、鹿児島県内 62 点における降灰量の実測値から推定されたものである (Iguchi, 2016)。係数については、昭和火口噴火活動期については  $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -0.5 \times 10^5$  とした。南岳噴火活動期については、 $\beta = 2.2$  とした方が火山灰放出量をうまく説明できる。噴火活動期によって、係数を変える必要が指摘できる。2023 年 1 月から 2024 年 2 月までの噴火のうち、2023 年 1 月と 2 月については火山性微動の振幅は大きかったので、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が過大となっている。このことについては令和 4 年度の報告書に述べた。降灰量が増加した 2023 年 10 月についてはこれまで通り推定式を適用することが可能である。

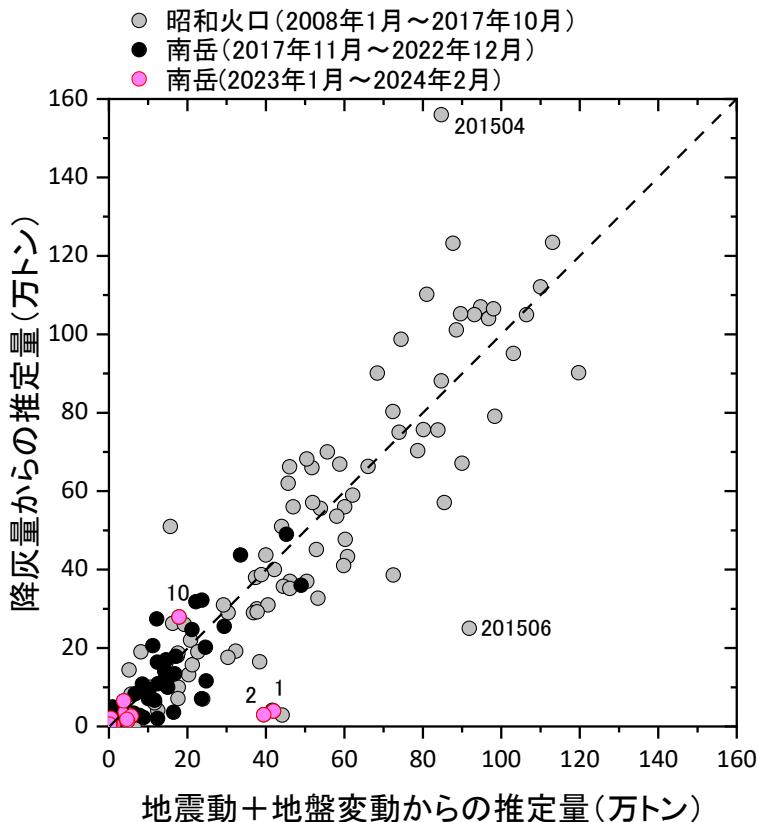


図 2-30 2009 年 1 月から 2024 年 2 月までの 15 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量—火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。数字の 1、2、10 は 2023 年 1 月、2 月、10 月のデータを示す。201504 と 201506 は 2015 年 4 月と 6 月の値を示す。

図 2-30 は、月ごとのサンプリングによる火山灰放出量と地盤変動量—火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量がよく一致していることを示すが、2015 年 4 月と 6 月の値は近似式 (10) からのずれが大きい。4 月は火山灰放出量に対して地盤変動量—火山性地震・微動のエネルギーから推定する火山灰放出量が 1/2 程度過小であるが、6 月は 4 倍程度過大となっている。この 2 つの月について再検討を行う。

2015 年 4 月の噴火活動は活発で、爆発は 106 回発生しており、火山灰放出量は 156 万トンに達した。火山灰放出量は 1993 年以降で最も多い。翌 5 月には、爆発回数は 169 回に増加したが、火山灰放出量は 123 万トンに減少した。このことは、5 月における火山灰放出の

主要な噴火様式は爆発であったが、4月は非爆発的な噴火によって火山灰が放出されたことを示す。非爆発的な噴火でも噴煙が目視でき、その高度が1000m以上に達すれば、「噴火」として鹿児島地方気象台の遠望監視記録に記載される。そこで、この「噴火」記録に基づいて地盤変動を再度抽出した。その結果、75個の地盤変動イベントを追加することができ、火山灰放出量は159万トンに修正され、サンプリングによる火山灰放出量に一致した。追加した地盤変動イベントは、最大でも30ナノストレインのひずみ変化で、多くは1~2ナノストレインの極微小なものであったが、追加したイベントの数が多かったので、火山灰放出量の推定値を大きく改善できた。

2015年6月の爆発回数は102回で4月と同程度であるが、火山灰放出量が25万トンと4月の1/6になった。一方で、地盤変動量—火山性地震・微動のエネルギーから推定する火山灰放出量は97万トンに達しており、食い違いが大きい。まず、鹿児島地方気象台の「噴火」記録に基づいて地盤変動を再度抽出したところ、34イベントを追加でき、火山灰放出量はさらに増加した。桜島においては、非噴火地盤変動(Non-Eruptive Deformation, NED)と呼ばれる火山ガスの放出に伴う地盤変動イベントが頻発することがある(Iguchi et al., 2022)。6月はNED頻発期であるので、精査して火山灰放出を伴わないNEDを除去した。その結果、96万トンと見積もられ、依然として課題である。

推定式(1)は地震動と地盤変動の線形結合であるので、次に地震動について検討した。図2-31に1分ごとの地震動振幅の最大値を示す。6月18日までは、振幅の大きい振動の多くは、爆発または噴火であるが、それ以降は、爆発・噴火以外の火山性震動が多数を占め、振動エネルギーが増加していることが分かる。18日以降の非爆発・噴火の増加が火山灰放出量の課題見積になっていると考えられる。この振動は、図2-32に示すようにモノクロマティックな振動であり、初動付近では1.6Hzにピークがあるが、徐々に高周波にシフトしていく、後半部分では3.2~3.3Hz付近の周波数が卓越する。爆発地震や噴火微動とは異なる波形を示す。また、多くは1Pa未満で、10Pa未満の弱い空気振動を伴う。振動の継続時間は1~2分と短いが頻発するので、総地震エネルギーとして大きくなる。2024年1月から2月上旬までにも同様の周波数帯域をもつモノクロマティックな火山性微動が連続的に発生し、火山灰放出量の見積もりが過大となった(令和4年度報告書、および本報告書図2-33)。このような振動は火山ガスの噴出に伴う振動と考えられ、火山灰放出を伴わない。

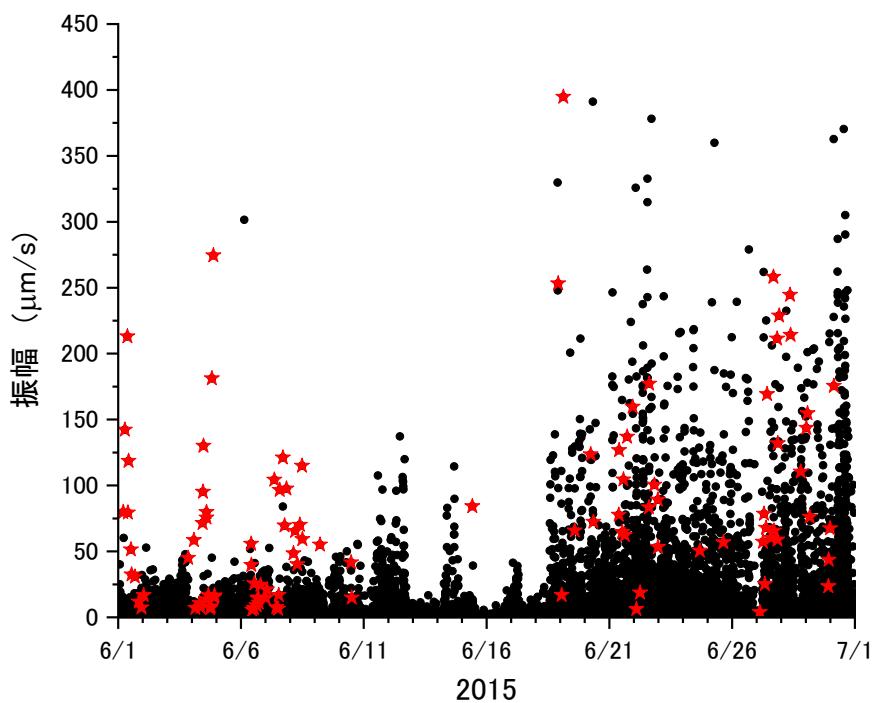


図 2-31 2015 年 6 月における 1 分ごとの地震動振幅の最大値（有村観測坑道）。赤星印は爆発と噴火を示す。

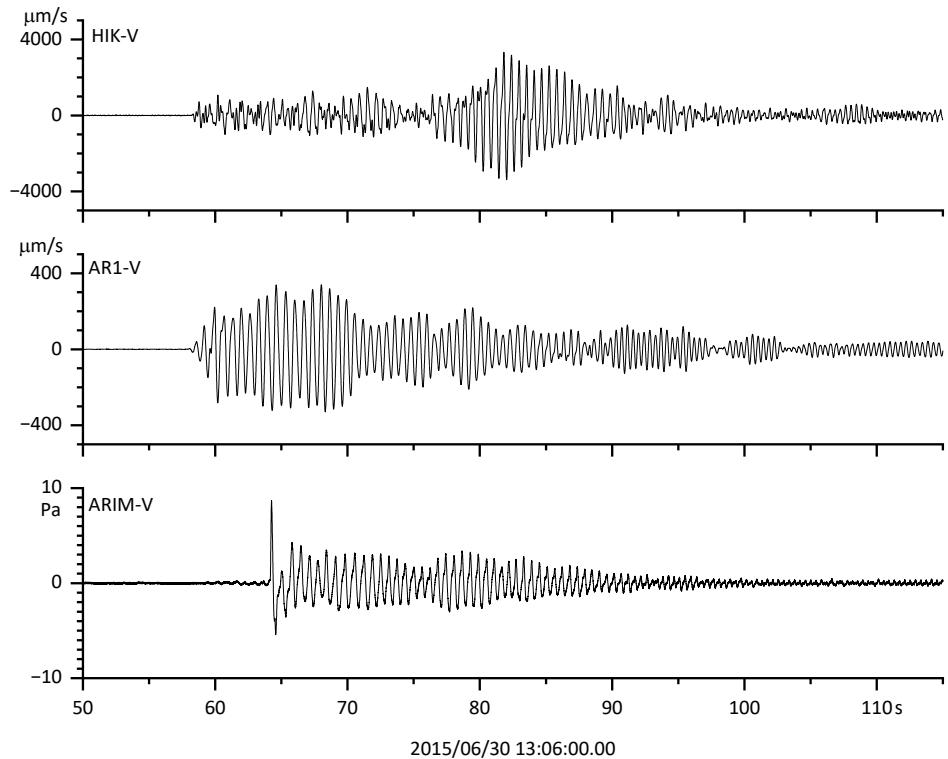


図 2-32 2015 年 6 月 18 日以降に多数発生したモノクロマティック微動。引之平の地震動（上段）、有村観測坑道の地震動（中段）、有村観測坑道における空気振動（下段）

そこで、式(1)第1項において、モノクロマティック微動を除去して火山灰放出量を見積もったところ39万トンと見積もられ、サンプリングによる火山灰放出量25万トンに対して56%増しに抑えられた。

再検討してられた2015年4月と6月の値を図2-33に示すが、大幅に改善されたことが分かる。全体としてみれば、±20万トン程度の誤差で火山灰放出量を評価することが可能であり、火山性震動の特性を評価することにより高精度化が図られたといえる。

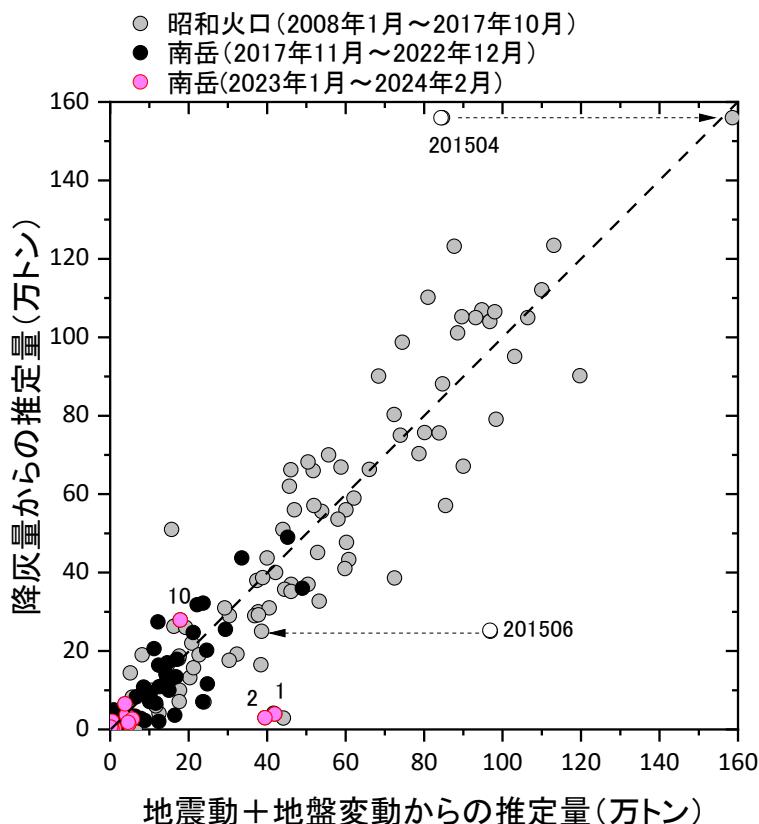


図2-33 2009年1月から2024年2月までの15年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量—火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。数字の1、2、10は2023年1月、2月、10月のデータを示す。201504と201506は2015年4月と6月の値を示す。○はこれまでの見積もり、矢印により再評価された値を示す。

## b) 火山灰放出率と噴煙高度の関係の検討

式 (10) 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。

### i) 桜島火山噴火に伴う噴煙高度の推移

2009 年 2 月～2024 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 2-34 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つた。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。2023 年 10 月以降の Episode9 では、噴煙高度が 3000m を超える噴火が 3 回発生している。10 月 19 日と 24 日の噴火では、噴煙高度がそれぞれ 3600m と 3400m に達した。2024 年 2 月 14 日の噴火では噴煙高度が 5000m に達した。それ以外は 2000m 未満の噴火が 87% を占める。

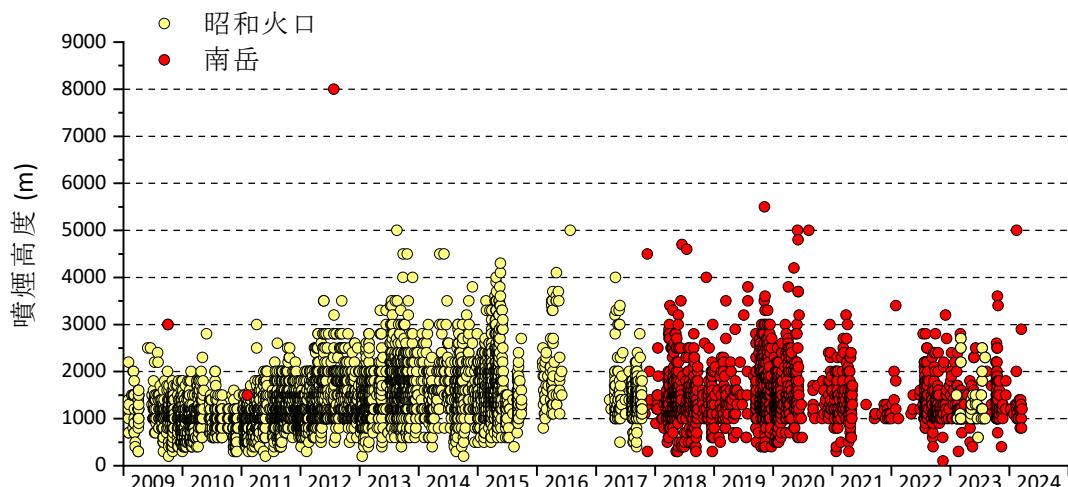


図 2-34 桜島の爆発に伴う噴煙高度の推移。鹿児島地方気象台の観測によるが、必要に応じて、噴煙高度データを補てん、修正した。赤丸は南岳、黄丸は昭和火口の噴火である。

### ii) 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係

噴煙高度が決定できた噴火 (図 2-34) 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 (直交成分) 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 4155 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 2-35 に示す。

2009 年から 2024 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、レーダ観測から4500mと推定されている。2020年6月4日の爆発の噴煙高度は4800mと推測されるが、噴出率は37,600kg/sと見積もられる。このように噴煙高度が4000m以上に達した爆発では噴出率が大きく、噴出率と噴煙高度との間に相関が認められる。噴煙高度( $H$ )には噴出率( $W$ )に依存する上限が認められ、上限の直線は以下のように決定される。

$$H = 400W^{1/4} \quad (11)$$

2023年1月から2024年3月までに発生した噴火のうちでは2024年2月14日に発生し、噴煙高度が5000mに達した爆発はこの上限式上にプロットされる。また、2023年10月19日に発生した爆発も上限式に近い。10月24日の爆発はこの期間では最も質量噴出率が大きいが、高度1000m～3000mの風速は、10月19日が1～6m/sであるのに対し、11～18m/sと強く風によって噴煙の上昇が抑えられた可能性がある。

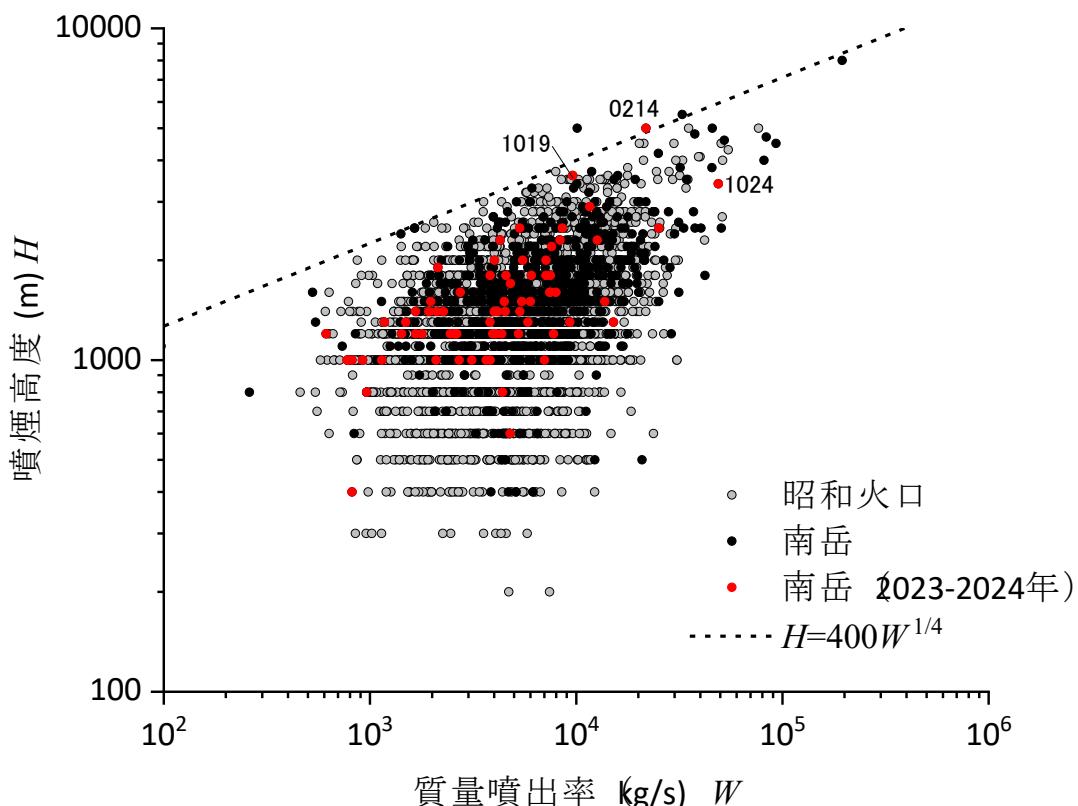


図2-35 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。最近の2023年1月から2024年3月までの噴火については赤丸で示した。1019、1024、0214は2023年10月19日、10月24日、2024年2月14日に発生した爆発の質量噴出率と噴煙高度を示す。

なお、唯一(2)式の上限式を超えている噴火は2020年8月9日に発生した爆発である(噴出率10,100kg/s、噴煙高度)。この爆発による噴煙上昇には、大気中の水蒸気や火口内の天水が関与している可能性がある(令和4年度報告書)。

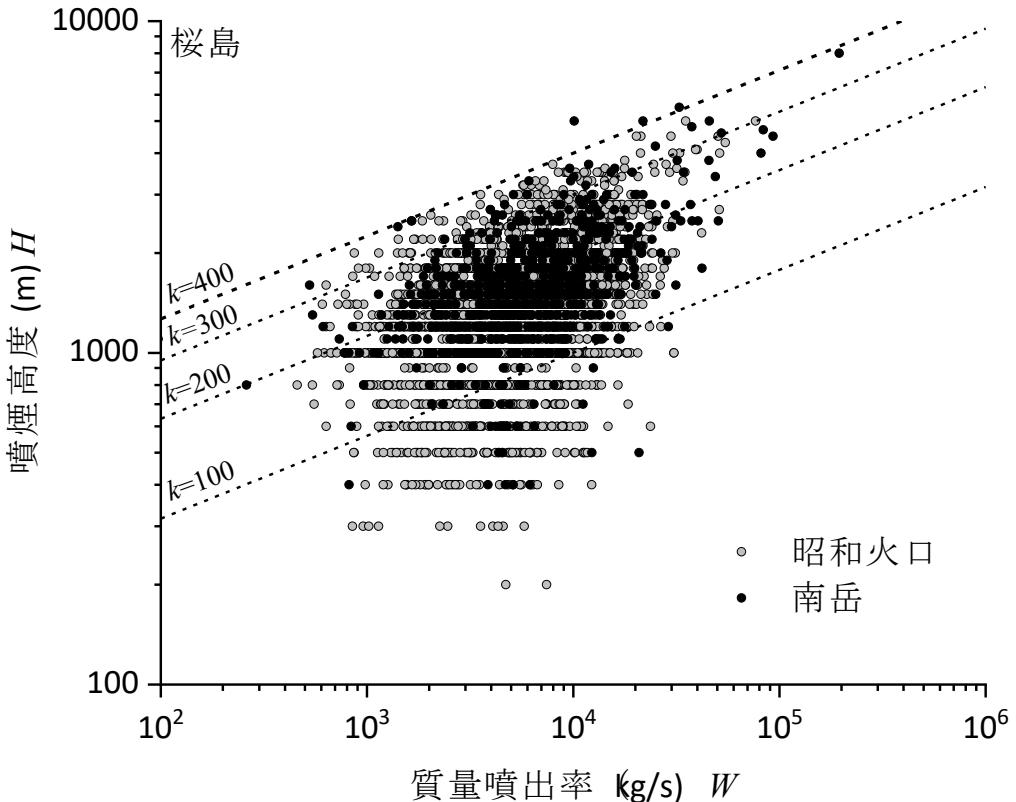


図 2-36 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。係数  $k=100, 200, 300, 400$  とした。

次に、式(2)を式(3)のように一般化し、係数  $k$ を検討したところ、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  $k=200$  と評価された（令和 4 年度報告書）。

$$H = kW^{1/4} \quad (12)$$

この結果は、図 2-36 に示すように 2023 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、類似した噴火が長期間繰り返されていると評価できる。

### c) 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 年度および 4 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地震動に基づく火山灰放出量推定式の適用性を検討したが、諏訪之瀬島については 2023 年のデータを追加して、また、シナブン火山については、火山灰放出噴火の前の溶岩流や火碎流の噴出率との整合性に基づいて、火山灰放出量の妥当性について検討した。

#### i) 諏訪之瀬島火山

諏訪之瀬島は、九州の南方、吐噶喇列島のほぼ中央に位置する成層火山である。19 世紀の噴火活動は激しく、1813 年には御岳山頂南西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碎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月に火碎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、現在も活発な爆発活動を続けている。令和4年度の報告書では2021年4月～2023年3月までの2年間の火山性微動の振幅データを用いて見積もられる火山放出量が妥当であることを示したが、ここでは、さらに2023年4月から2024年3月までのデータを追加して、さらに検証を進める。

2021年1月～2024年3月までの噴火活動を図2-37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、気象庁神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。

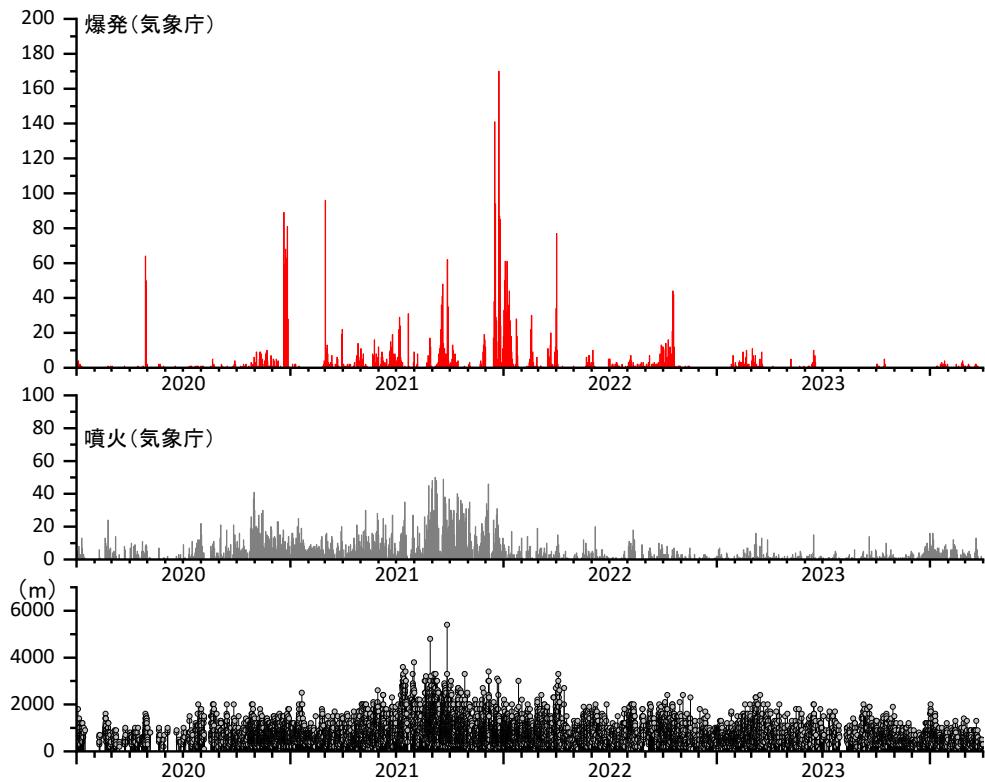


図2-37 2021年1月～2024年3月までの日別の爆発回数、噴火回数、噴煙高度。

諏訪之瀬島では2020年12月から爆発活動が激化し、最も活動的であったのは2021年である。爆発回数が最も多い月は2021年12月である。2022年の回数は減少したものの引き続き爆発は発生している。2023年はさらに爆発回数は減少した。一方、爆発的でない噴火は依然として継続しており、2000m未満の低高度の噴煙放出が繰り返されている。

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(10)式によって推定することが可能であるが、諏訪之瀬島においては、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の高感度で、個々の噴火に対応

する地盤変動について信頼できるデータは得られていない。そこで (10) 式を地震動振幅 ( $A$ ) のみによって表現する (10)' 式を考えて火山灰放出量を求めた。

$$W_e = \alpha A + \gamma \quad (10)'$$

桜島南岳火口の噴火活動では  $\alpha = 6.25 \times 10^{-5}$ 、 $\gamma = -1.9 \times 10^4$  の値が得られているので、令和 4 年度の報告書では、この値を用いて 2023 年 3 月までの火山灰放出量を求めた。諏訪之瀬島では噴火活動は爆発地震と火山性微動を伴う。このうち爆発地震については、振幅は大きいが継続時間が短いために、積算量にあまり寄与しない。また、図 2-37 に示すように爆発の発生回数は著しく少なくなっており、2023 年以降の火山灰放出は連続的で火山性微動を伴うものである。したがって、火山性微動をもとに火山灰放出量を求めても大きな誤差は生じないと考えた。

図 2-38 に式(10)' 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 2024 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。年間の火山灰放出量は、2021 年、2022 年、2023 年がそれぞれ、141 万トン、127 万トン、110 万トンであり、火山灰放出量は減少傾向にあるものの大きな違いはない。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 衍小さい。図 2-30 に示したように、(10)' 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十万トンのオーダーと評価できる。

一方、爆発回数は 2021 年が最も多く 2012 回、2022 年には 1312 回で、2023 年には 190 回まで減少した。2021 年以降の年間火山灰放出量は 110 万トンから 140 万トンであり、急激な変化はない。令和 3 年度の報告書に記載したように、爆発では、レーダによってエコーが捉えられないことが多く、火山灰放出量が少ない。一方、噴火の方がレーダによってエコーが観測されており、火山灰量が多い。噴火回数も減少しているので、火山灰放出の様式は、噴煙高度の低い連続放出に変化していることが分かる。

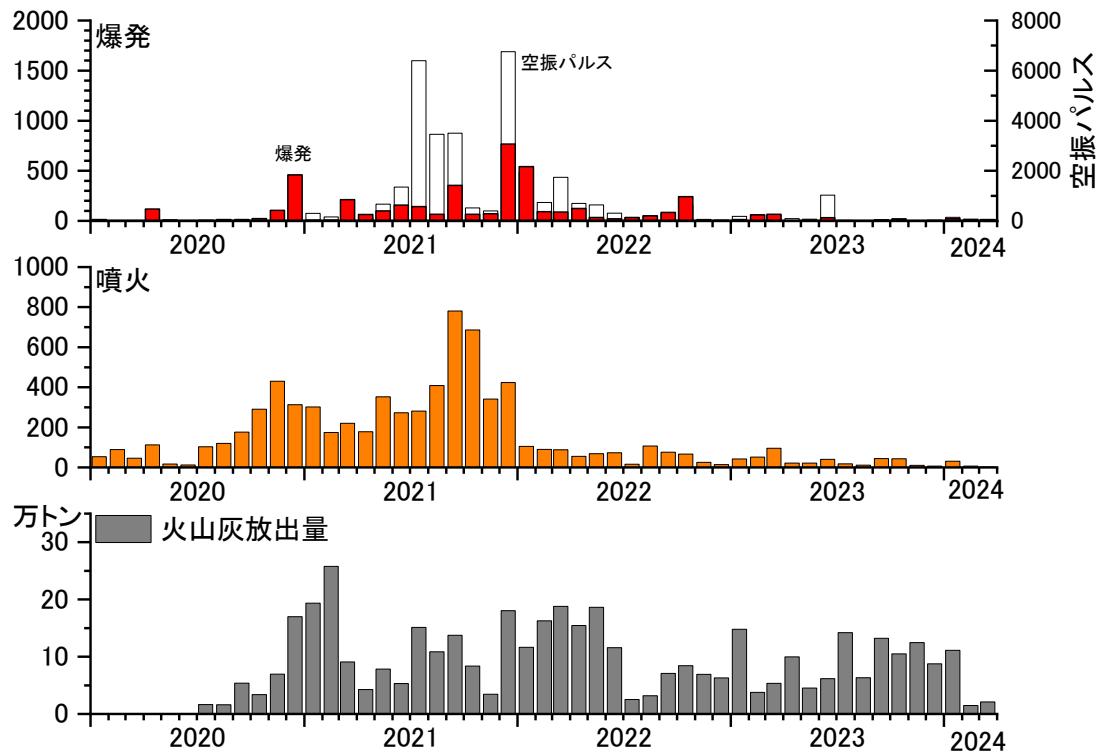


図 2-38 諏訪之瀬島の月別の噴火活動。上段：気象庁観測による爆発回数（赤棒）、御岳火口近傍観測点における 10Pa 以上の空振パルス数（白棒）。中段：気象庁観測による噴火回数。下段：(10)' 式を用いて推定した火山灰放出量（2020 年 7 月～2024 年 3 月）。

### ii) シナブン火山

シナブン火山はインドネシア・スマトラ島北部、トバ湖の北にある成層火山である。火山体は溶岩流と火碎流堆積物からなる。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碎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碎流であった。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、火碎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。

令和3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、観測された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、令和4年度は、噴煙放出型の噴火に伴う火山灰量の推移を検討した。山頂から 2.6 km 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(10)' 式を適用し噴火ごとの火山灰放出量を求めた。

本年度は、爆発地震の最大振幅から「気象条件を除いた噴煙高度」を推定し、この噴煙高度から (12) 式を用いて火山灰噴出率を求めた。目視観測された噴煙高度データを用いず、爆発地震の最大振幅から推定する気象条件を除いた噴煙高度を用いる理由は、山頂に

雲がかかっている時は噴煙高度が分からぬこと、噴煙上昇時には大気を噴煙に取り込むエントレインメント効果が噴煙の上昇に寄与すること (Degruyter and Bonadonna, 2012)、風によって噴煙高度が低下すること (Degruyter and Bonadonna, 2012) である。そこで、気象条件に依存しない爆発地震の最大振幅を用いて、気象条件を除いた噴煙高度を推定する手法を開発した。図 2-39 に爆発地震の最大振幅 (KBY 観測点) と目視観測された噴煙高度の関係を示す。

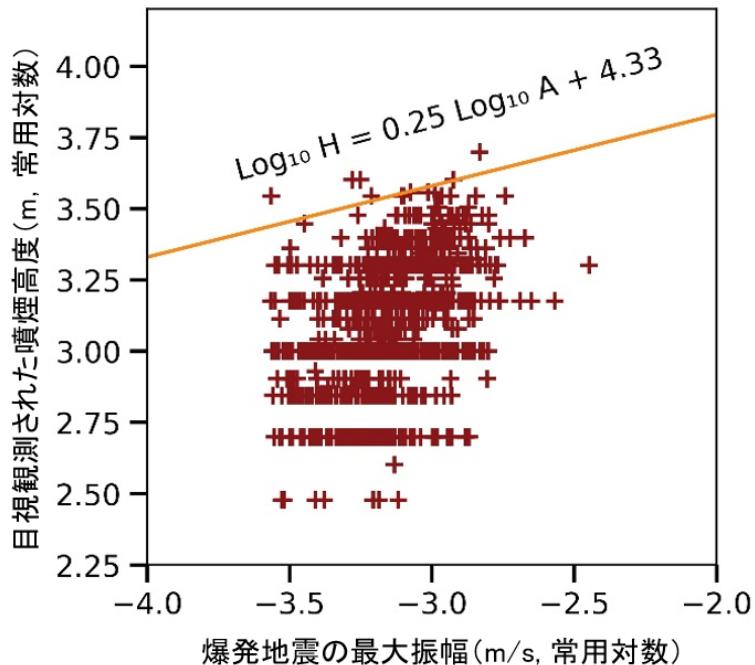


図 2-39 爆発地震の最大振幅 (KBY 観測点) と目視観測された噴煙高度の関係。ここで、 $H$  は噴煙高度、 $A$  は爆発地震の最大振幅を表す。

シナブン火山のブルカノ式噴火は小規模であるため、エントレインメント効果は小さいと考え、風によって噴煙高度が低下する効果だけを考えることにする。図 2-39 では、対数噴煙高度は 2.5 から 3.5 の間にあるが、上限にプロットされるデータの大気環境は無風状態にあり、噴煙高度が上限よりも低い場合は、風によって噴煙高度が低下したものとみなすことができる。上限式は以下の様に与えることができる。

$$\log_{10} H = 0.25 \log_{10} A + 4.33 \quad (13)$$

上限式の噴煙高度は無風状態における火山灰噴出率を反映しているものと考えられるので、火口から噴出した時点での噴出率とみなす。(12) 式に (13) 式を代入すると以下のように火山灰噴出率を求めることができる。

$$W = \left( \frac{10^{4.33}}{k} \right)^4 A \quad (14)$$

このようにして得られた火山灰噴出率は概ね  $10^4 \text{ kg/s}$  のオーダーにあり、最近の桜島の爆発と比べるとやや大きい部類にある。

図 2-40 にブルカノ式噴火に伴う爆発地震の波形例を示す。ここでは、振り切れていない KBY 観測点の波形記録を用いる。爆発地震の初動から 15 秒に振幅が最大に達し、その後振幅は緩やかに減衰する。振動は約 3 分程度続く。他の爆発地震の記録もこれと同様である。空気振動の記録は火口から 8.7 km 離れた観測所で観測されたものである。音速を考慮すると 60 秒付近で空気振動は発生したと推定される。53 秒から 60 秒までは初期微動が発生し、60 秒に破裂が起り、地震動振幅が急に大きくなっている。したがって、68 秒付近に現れる最大振幅は噴煙の形成に関与していると考えられる。

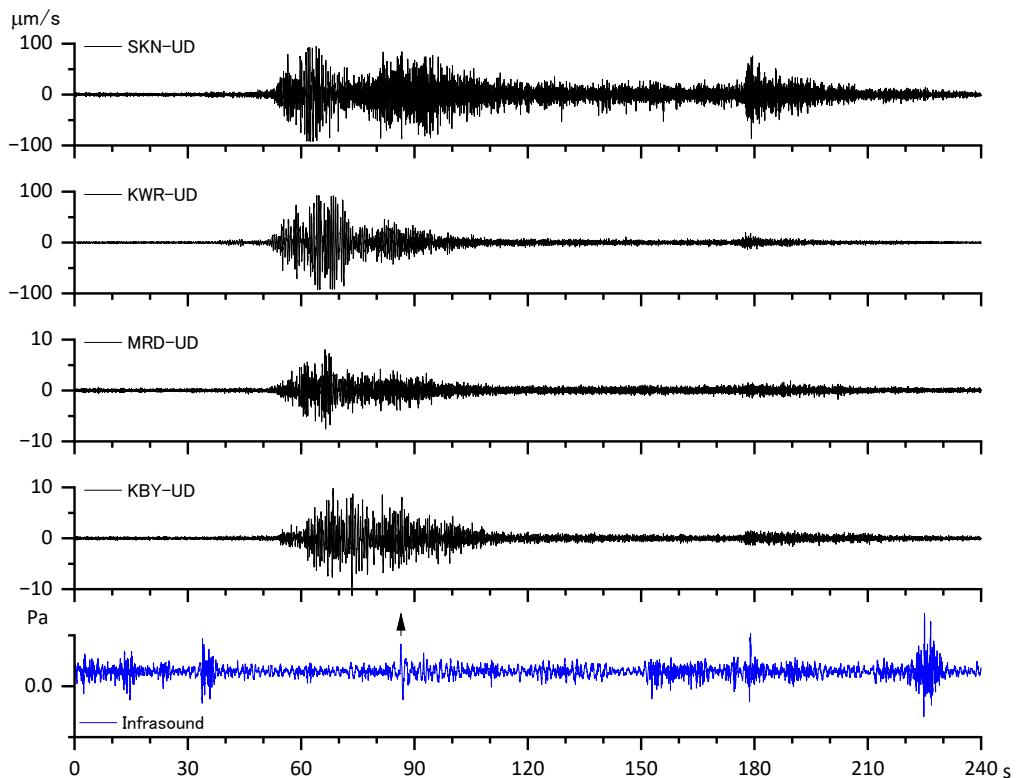


図 2-40 2015 年 12 月 20 日 21 時 37 分に発生した爆発地震の波形。4 段目までが爆発地震。5 段目は低周波マイクロホンの記録で、矢印が爆発に伴うシグナルを示す。

式 (14) に示すように火山灰噴出率と爆発地震の振幅には比例関係がある。振幅の絶対値を積分すれば、1 回のブルカノ式噴火に伴う総噴出量を求めることができる。図 2-41 に (13) 式に基づいて推定した無風状態における推定噴煙高度と (14) 式に基づいて計算した火山灰噴出率とその積算値を示す。図 2-40 に示した 2015 年 12 月 20 日 21 時 37 分に発生した爆発地震の波形例では、振幅が小さいので、総噴出量は 19 トンにしかならなかった。

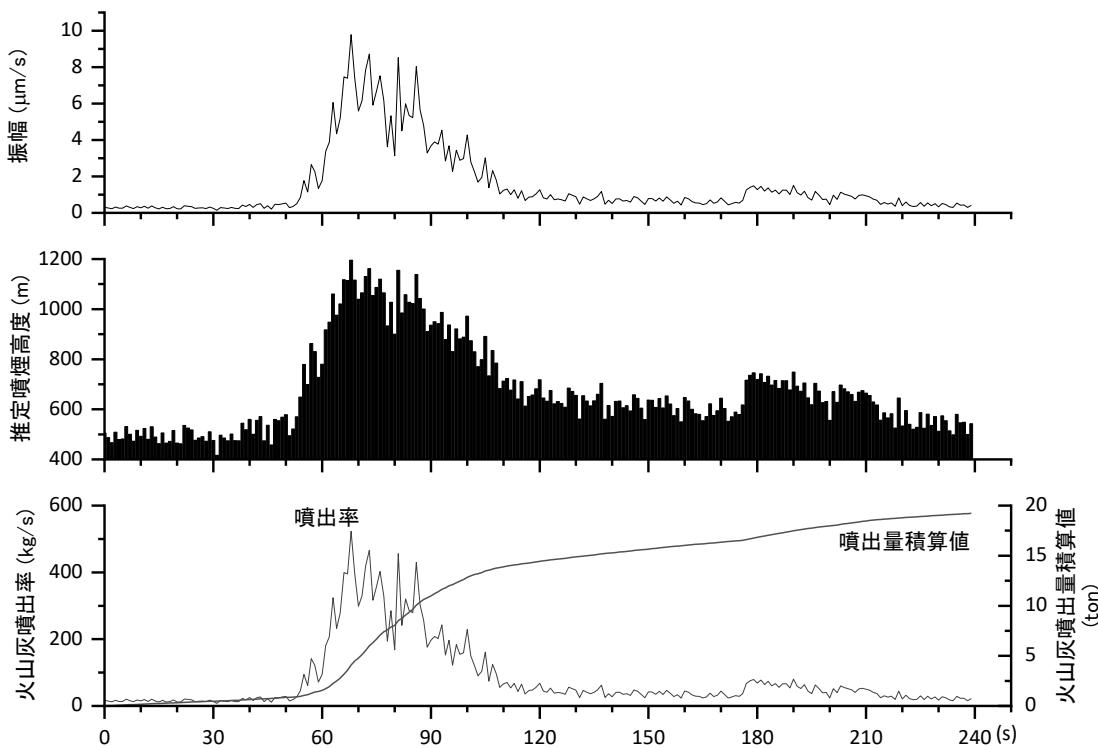


図 2-41 爆発地震の振幅の絶対値の推移（上段）。(4)式に基づいて推定した無風状態における火山灰噴出率（中段）、(5)式に基づいて計算した火山灰噴出率とその積算値（下段）。

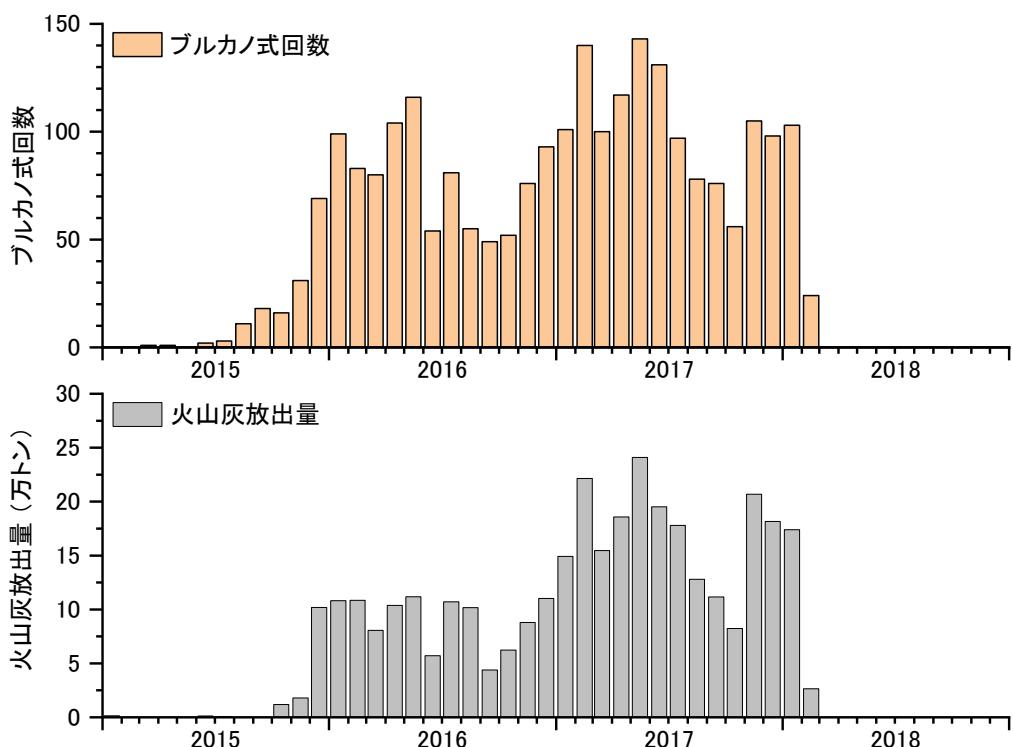


図 2-42 月別のブルカノ式噴火発生回数（上段）と火山灰放出量（下段）。2018年2月まで。

このようにして爆発地震の振幅から求めた火山灰放出量を月毎にまとめて、図 2-42 に示した。回数の推移と火山灰放出量の推移はよく一致しており、ブルカノ式噴火の規模は 2015 年から 2018 年までに大きな変化はないことを意味する。シナブン火山では、時々規模の大きい噴火が発生するが、その時は噴煙上昇とともに火碎流も発生する。火碎流を伴う場合は、地震動振幅が大きくなるので、ブルカノ式噴火のリストからは除外している。最大規模の噴火は 2018 年 2 月 19 日に発生した。噴煙高度は 4900m に達し、火碎流も 5000m 流下した。この噴火に先行してブルカノ式噴火の発生回数と火山灰放出量が著しく減少したことは注目に値する。

#### d) 噴煙シミュレーションによる噴煙高度の検討

課題 C 3 と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行した。これにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させた。課題 C3 では、圧縮性流体力学スキームで計算される速度場にトレーサー粒子を乗せることで火山灰が大気中に運ばれ、噴煙から離脱すると終端速度で降下する様子を再現できる 3 次元モデル SK-3D を開発・改良している。

様々な噴火条件や大気条件を与え、火山灰が大気中を移動する様子や地表への堆積分布を計算した。噴出時間 2 秒のブルカノ式噴火では、噴煙は高度 6km 程度まで達した。この場合、粒子サイズによって火山灰の大気中での輸送が大きく異なることを確認できた（図 2-43）。 $-4\phi$  (16 mm) などの比較的大きな粒子は噴煙柱下部から落下するため、噴火から 400 秒の時点ですでに多くの粒子は落下フェーズに入っていた。600 秒後には全ての粒子が地表に堆積していた。 $-3\phi$  (8 mm) の粒子は 400 秒、600 秒で落下する様子が確認できるが、800 秒後には堆積を終了していた。 $0\phi$  (1 mm) 程度の粒子では 400 秒で噴煙最上部に達し、そこからゆっくりと落下している様子が捉えられた。 $2\phi$  (0.25 mm) は噴煙上部に長時間滞留し、さらに細かな粒子は計算時間の 1000 秒後まで落下することはなかった。

数値シミュレーションによってこのようなブルカノ式噴火での火山灰の時空間分布データを取得し、データベースを充実させた。

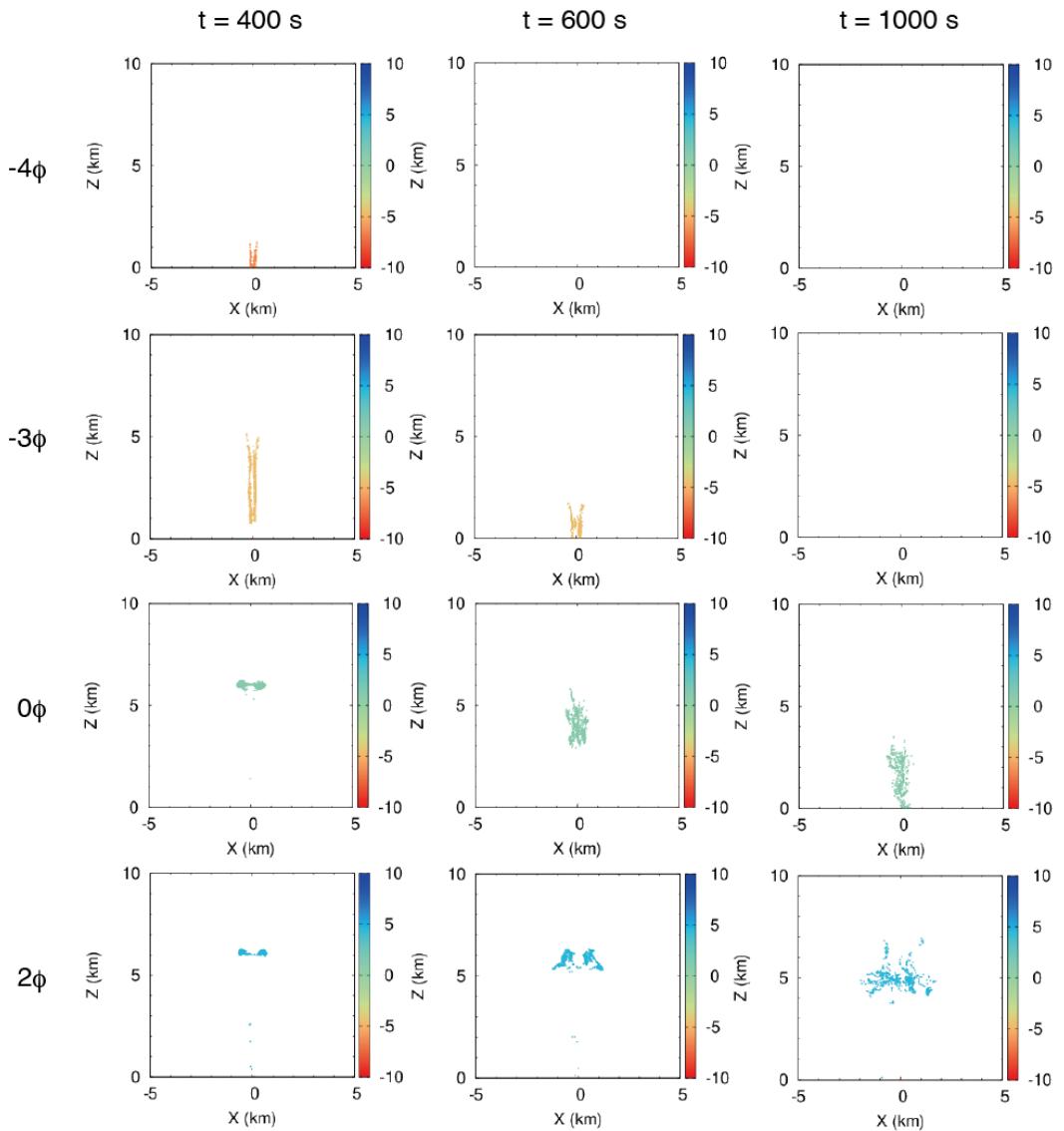


図 2-43 ブルカノ式火山噴煙の3次元数値シミュレーション結果。粒径毎の大気中における火山灰粒子分布の時間発展を示す。上から $-4\phi$  (16mm),  $-3\phi$  (8mm),  $0\phi$  (1mm),  $2\phi$  (0.25mm)。

#### 4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

気象モデル WRF による高分解能シミュレーションおよび分解能を変えたシミュレーションから、火山の地形の影響を受けた拡散場の再現性の評価に基づき、火山灰拡散を精度良く予測するためのシミュレーション条件を評価した。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。ラージエディシミュレーションを用いて火山噴出物の移流・拡散解析を行う際にサブグリッドスケールの乱れのエネルギーの予測が重要となることから、火山レキや火山灰などの固体粒子を含む混層流流れ場におけるサブグリッドスケールの乱れのエネルギーの予測式の定式化を行った。また、開発した火山周辺の気流計算手法の精度検証用のデータを得るために、火山模型周りの密度流れ場の実験を行うことができる水槽を開発・作成した。さらに、令和 4 年度に引き続き衝撃実験を実施した。

##### a) 風速ベクトルのその場観測

###### i) 調査概要

桜島において、気象センサを搭載したドローンにより地上から上空までの気象場の鉛直プロファイルを観測した。また、気象と併せて、上空の火山灰のモニタリング調査を実施した。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を行った。なお 2 種類の風速計センサを用いて観測を行い、両者の観測精度の違いについてもドップラーライダー観測データとの比較により検証した。

調査地点は図 2-44 に示す有村地点 (Site A) である。調査期間は 2023 年 5 月 17 日の 11 時～15 時で、フライトの概要を表 2-5 に示す。風速計センサについては、期間前半の Run67 ～Run69 では TriSonica Mini を、後半の Run70～Run73 では FT205 を使用した。



図 2-44 調査地点 (Site A : 有村地点)

表 2-5 ドローンのフライト概要

Run	観測日 観測地点	風速計	離陸時刻	着陸時刻	フライト内容（高度、移動速度）
67	2023/05/17 有村	TriSonica Mini	11:35:10	11:52:13	0m→400m (11:35:10-11:38:42) (2m/s) 400m→15m (11:38:43-11:42:10) (2m/s) 15m→400m (11:42:11-11:44:39) (3m/s) 400m→10m (11:44:40-11:47:03) (3m/s) 10m→400m (11:47:04-11:49:40) (3m/s) 400m→0m (11:49:41-11:52:13) (3m/s)
68					0m→400m (11:55:44-12:02:08) (1m/s) 400m→15m (12:02:09-12:09:04) (1m/s) 15m→400m (12:09:05-12:11:23) (3m/s) 400m→0m (12:11:24-12:13:55) (3m/s)
69			12:18:28	12:37:45	0m→400m (12:18:28-12:26:03) (1m/s) 400m→20m (12:26:04-12:32:38) (1m/s) 20m→400m (12:32:39-12:35:06) (3m/s) 400m→0m (12:35:07-12:37:45) (3m/s)
70					0m→400m (13:35:00-13:38:22) (2m/s) 400m→13m (13:38:23-13:41:52) (2m/s) 13m→400m (13:41:53-13:44:14) (3m/s) 400m→14m (13:44:15-13:46:40) (3m/s) 14m→400m (13:46:41-13:49:00) (3m/s) 400m→0m (13:49:01-13:51:32) (3m/s)
71		FT205	13:35:00	13:51:32	0m→400m (13:54:06-13:56:26) (3m/s) 400m→18m (13:56:27-13:58:46) (3m/s) 18m→400m (13:58:47-14:00:58) (3m/s) 400m→20m (14:00:59-14:03:22) (3m/s) 20m→400m (14:03:23-14:05:35) (3m/s) 400m→0m (14:05:36-14:08:12) (3m/s)
72					0m→400m (14:10:41-14:14:02) (2m/s) 400m→20m (14:14:03-14:17:26) (2m/s) 20m→400m (14:17:27-14:20:53) (2m/s) 400m→20m (14:20:54-14:24:20) (2m/s) 20m→330m (14:24:21-14:26:17) (3m/s) 330m→0m (14:26:18-14:28:22) (3m/s)
73			14:32:07	14:46:46	0m→400m (14:32:07-14:39:22) (1m/s) 400m→0m (14:39:23-14:46:46) (1m/s)

### ii) 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；ルーチェサーチ社）である（図2-45）。機体の中心上部に高さ45cmのアルミポールを設置し、その上端に超音波風速計（FT205；FT Technology社またはTriSonica Mini；Anemoment社）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社）、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。超音波風速計の概要を図2-46に示す。

フライトには、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400mまで、1回のフライトは15～20分間である。計測要素は、気圧、気温、湿度、風向風速、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>で、計測間隔は、風向風速が0.1秒、その他が1秒である。



図2-45 調査で使用したドローンの外観（SPIDER CS-6）



FT205 (FT Technology社製)  
風速、風向を最大10Hzで測定。内蔵電子  
コンパスで方位を自動補正



TriSonica Mini (Anemoment社製)  
風速、風向、気圧、加速度、方位、露点、  
空気密度を最大10Hzで測定

図2-46 調査で使用した2種類の超音波風速センサー

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。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 2-47 に、主要性能を表 2-6 に示す。

表 2-6 調査に使用したドップラーライダーの主要性能

項目	性能
観測距離	40～250m(実際の観測距離はエアロゾル濃度等によって変化する。)
高度分解能	20m, 25m, 30m(最小 4 mごと)
走査パターン	スイッチ切替え方式
ビーム走査方向	0°(北)／90°／180°／270°／鉛直
レンジ数	20／40レンジ切替え
出力／表示データ	・水平風向風速の各レンジごとの分布 ・鉛直風の各レンジごとの分布 ・10分間平均風向風速データ
風速観測範囲	0～60m/s
風向風速更新周期	最速 2 s以内
レーザ波長	1.55μm 帯の単一波長 (JIS C 6802 クラス1Mに相当)
外部温度・湿度範囲	-20～+40°C, 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



図 2-47 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、三菱電機取扱説明書より引用）

### iii) 調査結果

#### (1) 風速場及び火山灰の観測結果

2023年5月17日に火口の南側にあたる有村地点（標高80m）においてドローンによる気象場及び火山灰の観測を実施した。合わせてドップラーライダーを設置し、ドローンによる風速場の観測結果との比較を行い、2種類の風速計センサの観測精度について検証した。

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2-5に示したとおりで、フライト高度は地上から最大400mまで、1回のフライトは15~20分間である。フライト数は合計7回で、そのうち6回は上空との間を複数回往復しているため全体で17回の往復となっている。ドローンの上昇速度は1, 2, 3m/sの3種類を使用しており、それぞれの観測数は2, 4, 11ケースである。下降速度も1, 2, 3m/sの3種類を使用し、それぞれの観測数は2, 4, 11ケースである。風速計センサとして、前半のRun67~69にはFT205を、後半のRun70~73にはTriSonica Miniを使用した。ドップラーライダーは、上空45m~330mを対象として鉛直方向に15m間隔、計測時間は2秒間隔として連続観測を行った。

各フライトにおける風速データの時間変化を図2-48に示す。図中のブルーの折れ線は風速値を、オレンジの折れ線はドローンの飛行高度である。上空の風速は4~6m/s程度であり比較的風の弱い状況であった。ドローンの下降時には上昇時に比べ風速が大きめの値をとり、変動も大きくなっていた。Run70以降のTriSonica Miniによる観測では、上昇時も含め変動がFT205に比べ大きくなっていた。

風向データについて時間変化を図2-49に示す。図中の黄色の折れ線が風向を表している。観測期間を通じて概ね南西の風が地上から上空まで吹いていたことがわかる。

火山灰濃度（PM2.5、PM10）について時間変化を図2-50に示す。図中のブルーの棒グラフがPM2.5を、グレーの棒グラフがPM10を表している。観測当日の桜島では、14時30分頃に小規模な噴煙が発生したものの火山灰の大きな噴出はなかったため、いずれの観測値も $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満であり、火山灰は検知されなかった。

#### (2) 平均風速、風向及び乱流強度の鉛直プロファイル

ドローン観測による平均風速、風向及び乱流強度の鉛直プロファイルを上昇時及び下降時について高度30m毎にその上下15mの観測値を平均して算出した。ドローンの風速値については旋回風のバイアス値を+0.5m/sとして補正した。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。ま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秒間の風速、風向及び乱流強度を平均して算出した。

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2-51に、下降時の結果を図2-52に示す。上昇時の平均風速は、前半のFT205による結果はライダーとよく一致し、後半のTriSonica Miniでは変動が大きくライダーとの対応はよくなかった。一方、下降時は、FT205、TriSonica Miniともにライダーに対してドローンの方が過大傾向を示し、対応はよくなかった。なお、上昇時、下降時ともに、ライダーとの対応の良否に対してドローンの上昇・下降速度による影響はほとんどみられなかった。

次に、上昇時及び下降時の風向の鉛直プロファイルを図 2-53 及び図 2-54 に示す。平均風速と同様に FT205 の方が TriSonica Mini に比べて良好な結果となっており、またドローンの上昇・下降速度との関連性もみられなかった。

最後に、乱流強度の比較結果を図 2-55 及び図 2-56 に示す。乱流強度の場合、ドローンとライダーの傾向が一致するケースは半数程度で全般に対応はわるく、また FT205 と TriSonica Mini との間に明確な違いはみられなかった。

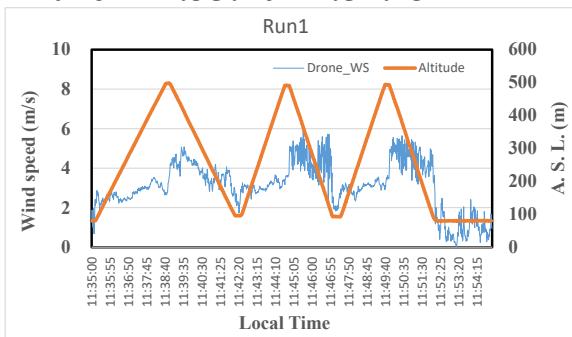
### (3) 3 年間の平均風速の比較

FT205 と TriSonica Mini による平均風速の観測結果について 2021 年～2023 年の 3 年間の 42 ケースを対象として比較した。その結果は図 2-57 の散布図に示すとおりで、FT205 はばらつきが小さく、TriSonica Mini に比べて良好に観測できることがわかる。なお、今回はドローンの上昇・下降中の観測であり、ホバリング中の観測では、FT205、TriSonica Mini とともに良好に観測できることは既に確認している。

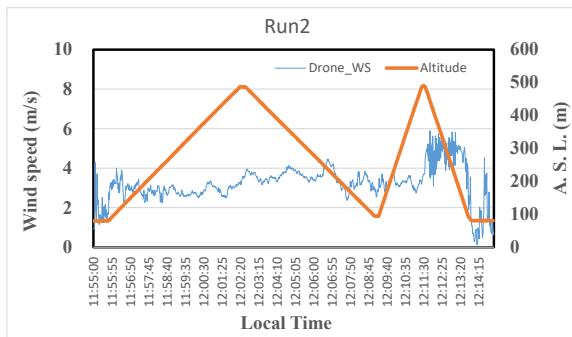
#### iv) まとめ

上昇・下降中のドローン観測では、FT205 の方が TriSonica Mini よりも良好な結果が得られることが確かめられた。ただし、乱流強度はばらつきが大きくいずれの風速計でも良好な結果を得ることができなかつた。

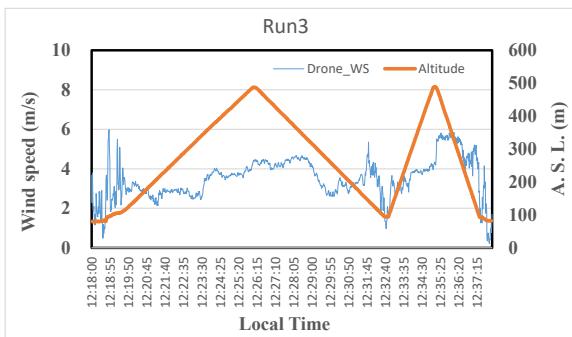
**Run67 11:35:10-11:52:13**



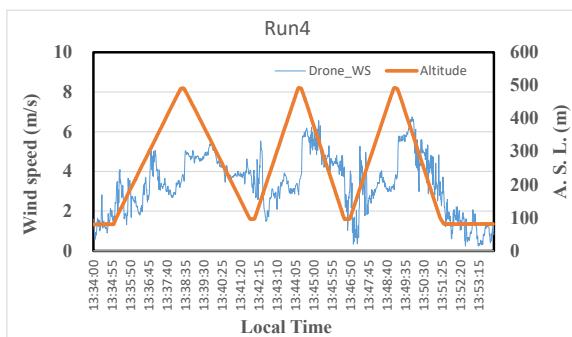
**Run68 11:55:44-12:13:55**



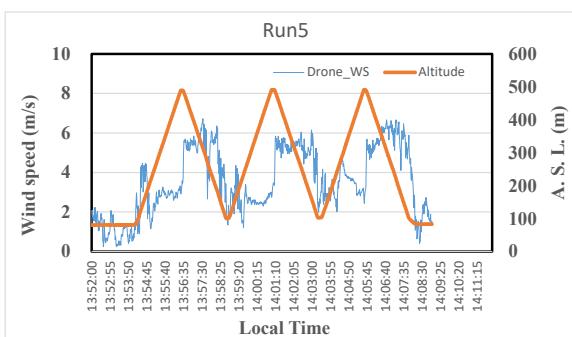
**Run69 12:18:28-12:37:45**



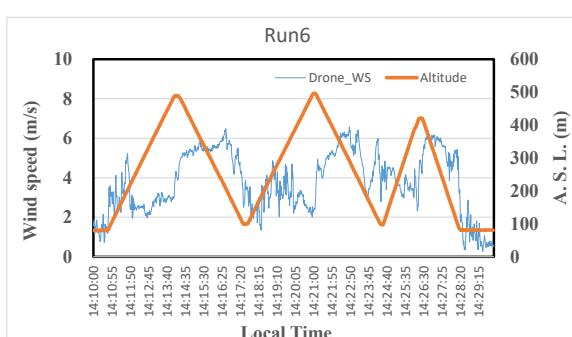
**Run70 13:35:00-13:51:32**



**Run71 13:54:06-14:08:12**



**Run72 14:10:41-14:28:22**



**Run73 14:32:07-14:46:46**

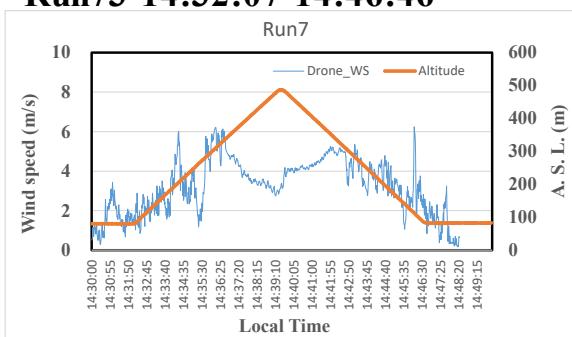
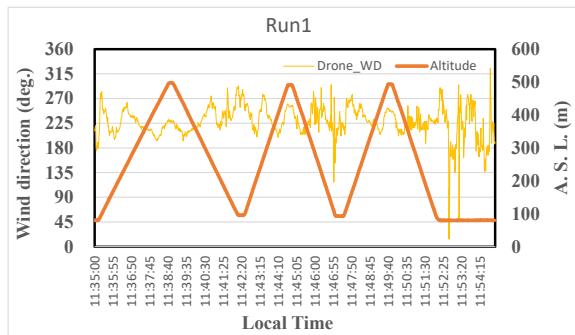
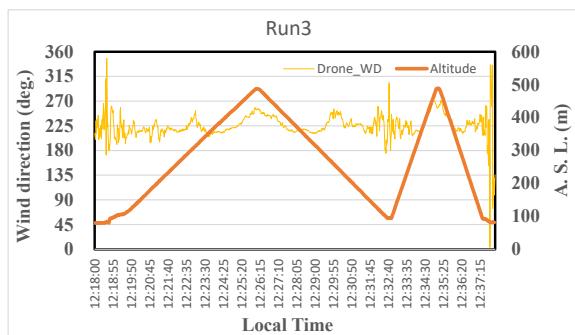


図 2-48 ドローンによる風速の観測結果（有村地点、2023年5月17日）

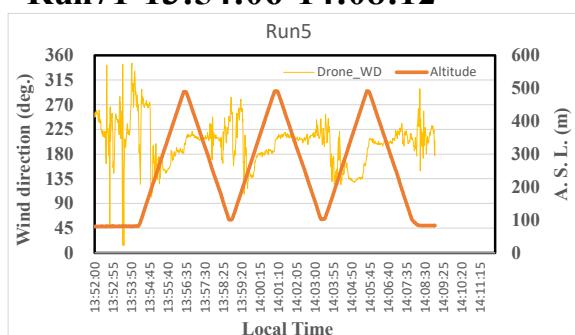
### Run67 11:35:10-11:52:13



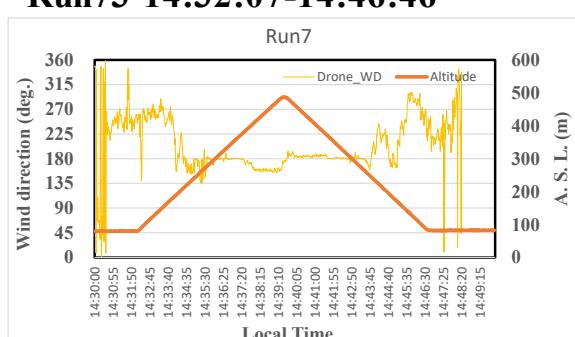
### Run69 12:18:28-12:37:45



### Run71 13:54:06-14:08:12



### Run73 14:32:07-14:46:46



### Run68 11:55:44-12:13:55



### Run70 13:35:00-13:51:32



### Run72 14:10:41-14:28:22

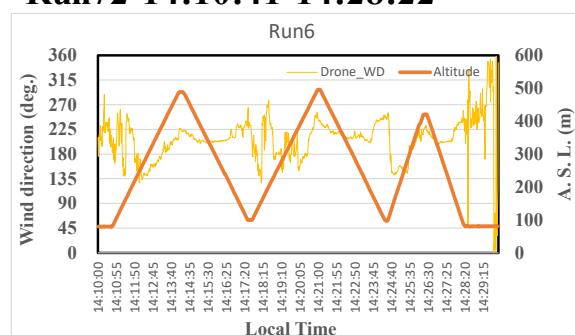
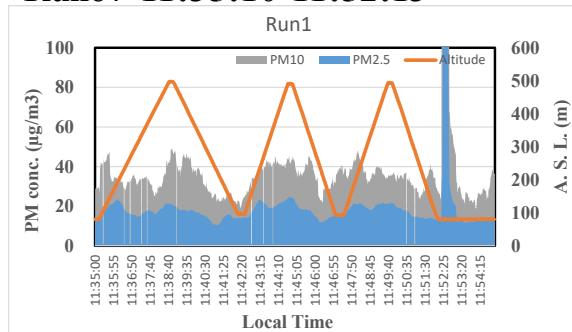
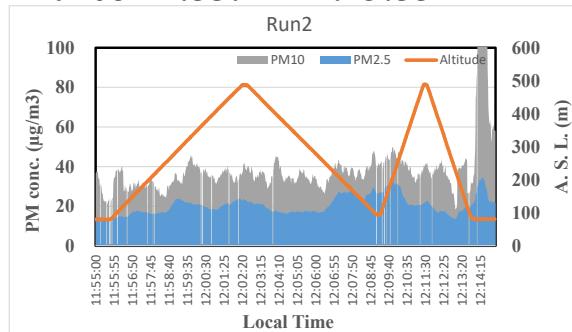


図 2-49 ドローンによる風向の観測結果（有村地点、2023年5月17日）

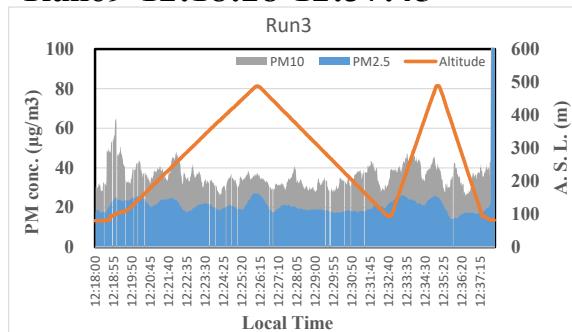
**Run67 11:35:10-11:52:13**



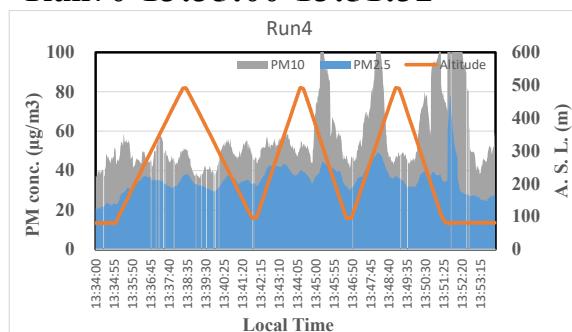
**Run68 11:55:44-12:13:55**



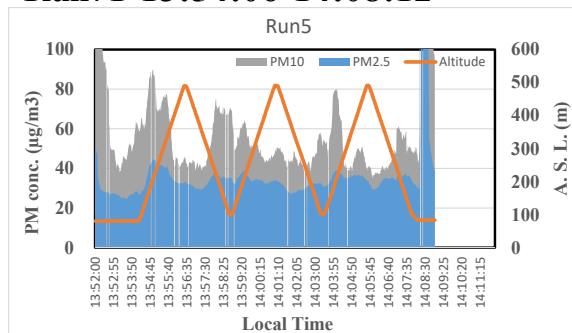
**Run69 12:18:28-12:37:45**



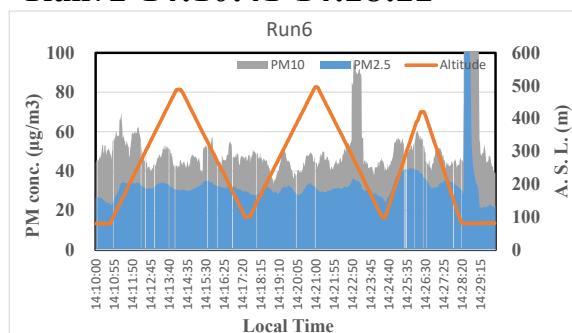
**Run70 13:35:00-13:51:32**



**Run71 13:54:06-14:08:12**



**Run72 14:10:41-14:28:22**



**Run73 14:32:07-14:46:46**

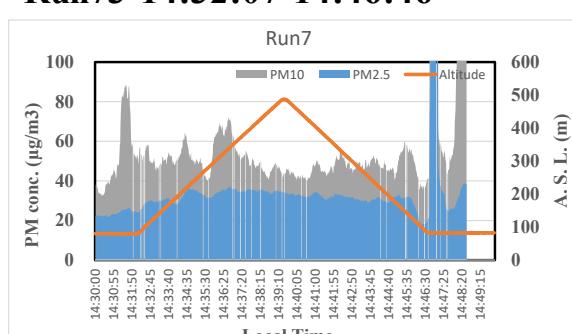


図 2-50 ドローンによる火山灰濃度の観測結果（有村地点、2023年5月17日）

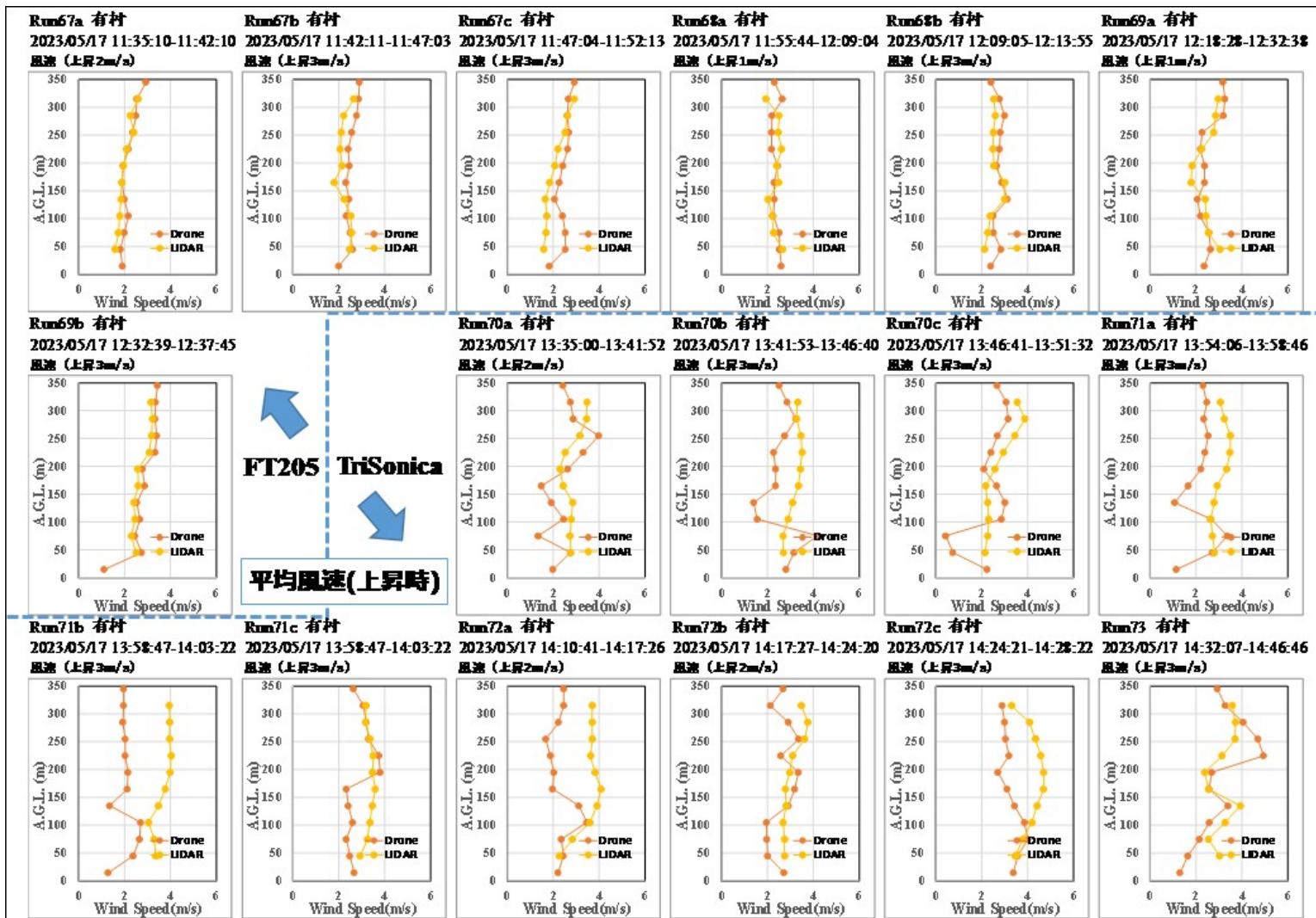


図 2-51 ドローンとドップラーライダーの平均風速の鉛直プロファイルの比較（ドローン上昇時）

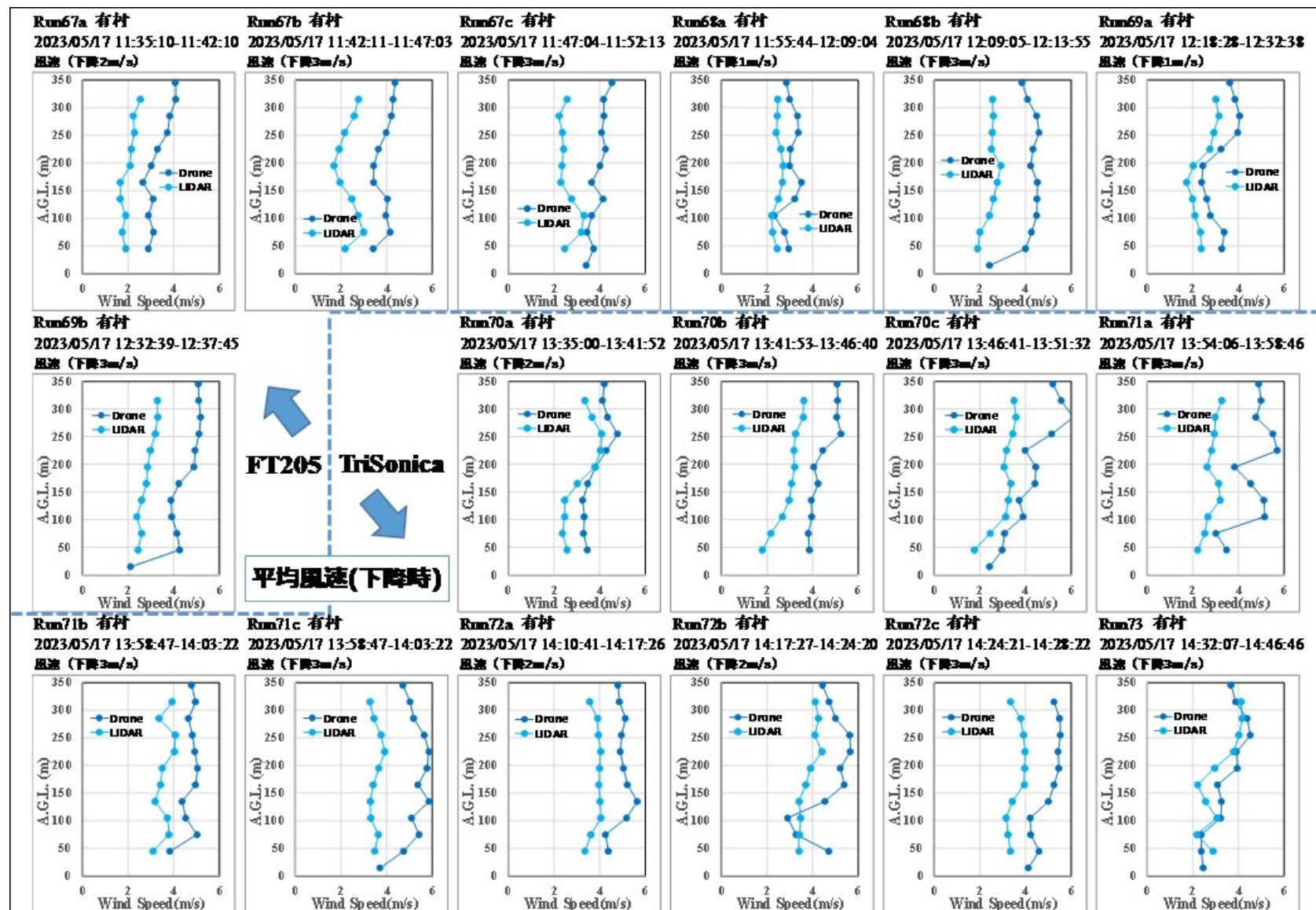


図 2-52 ドローンとドップラーライダーの平均風速の鉛直プロファイルの比較（ドローン下降時）

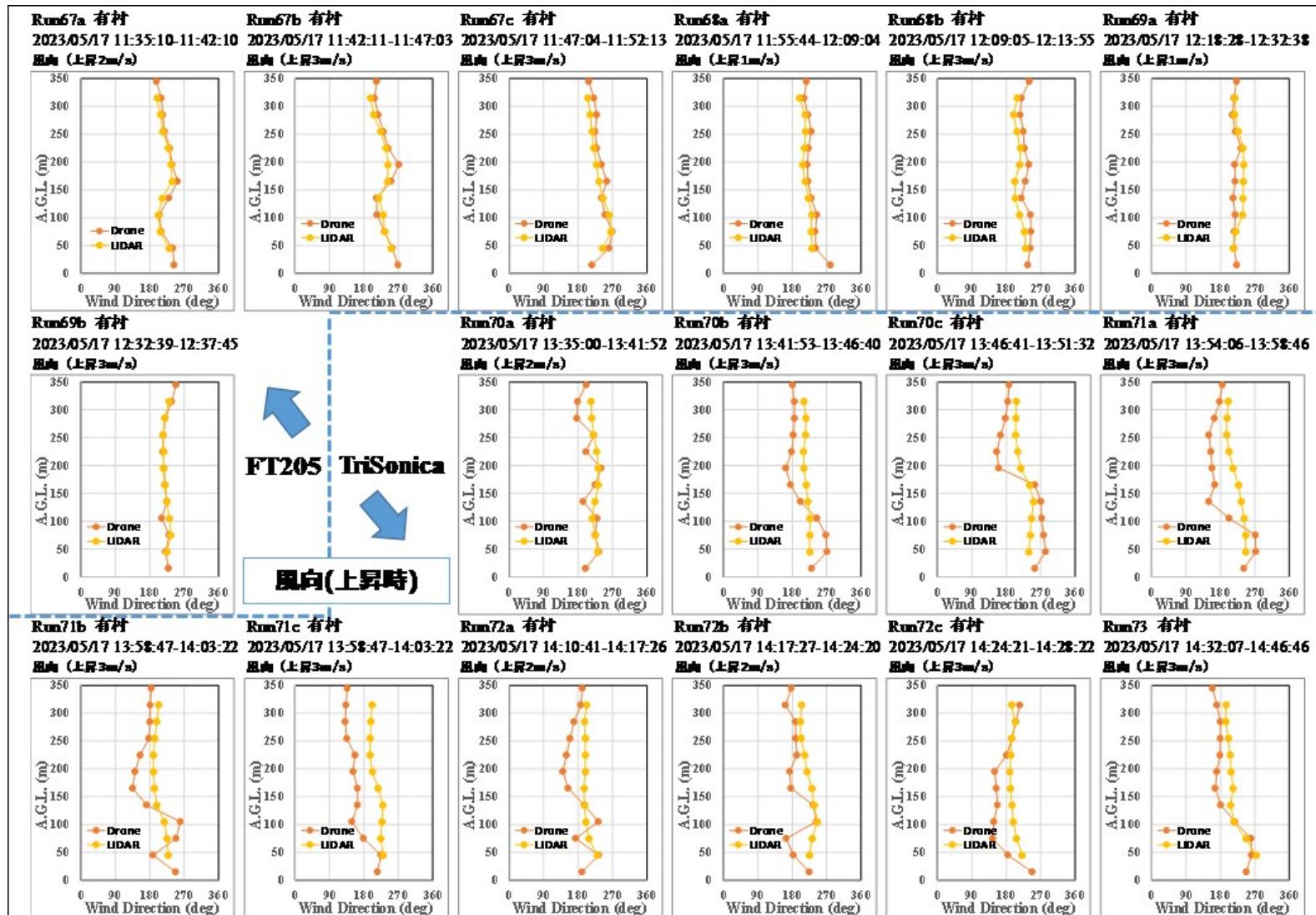


図 2-53 ドローンとドップラーライダーの風向の鉛直プロファイルの比較（ドローン上昇時）

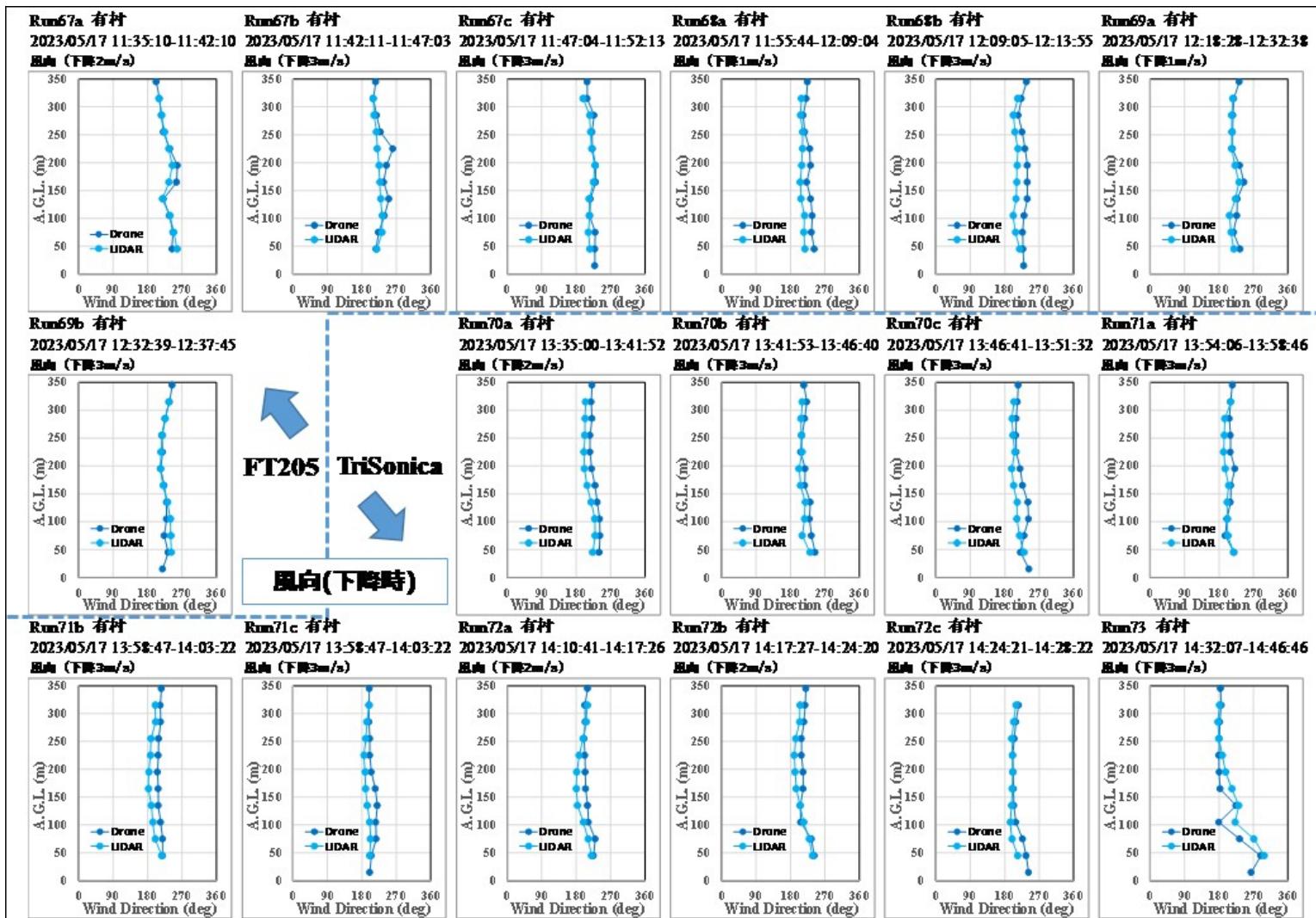


図 2-54 ドローンとドップラーライダーの風向の鉛直プロファイルの比較（ドローン下降時）

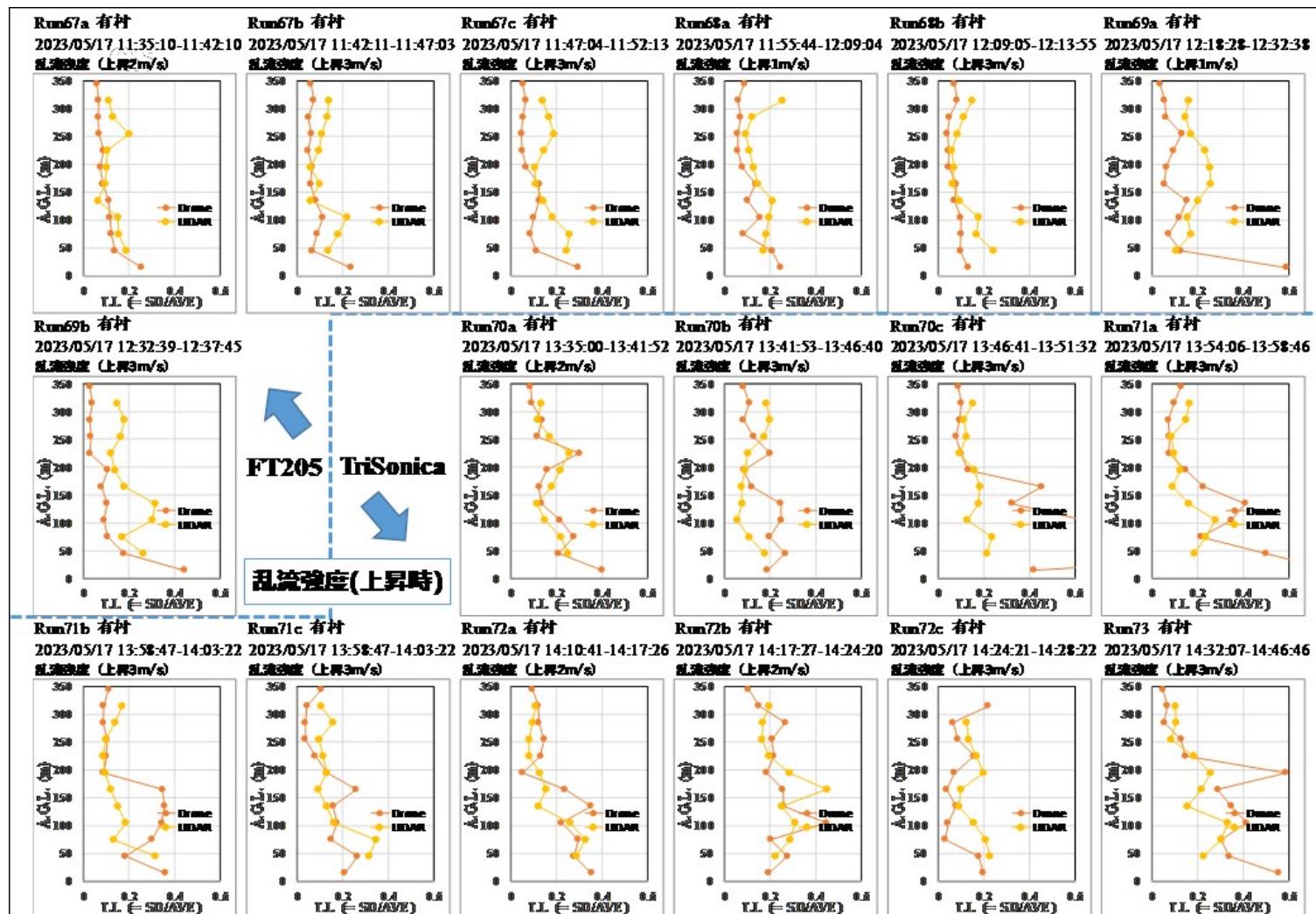


図 2-55 ドローンとドップラーライダーの乱流強度の鉛直プロファイルの比較（ドローン上昇時）

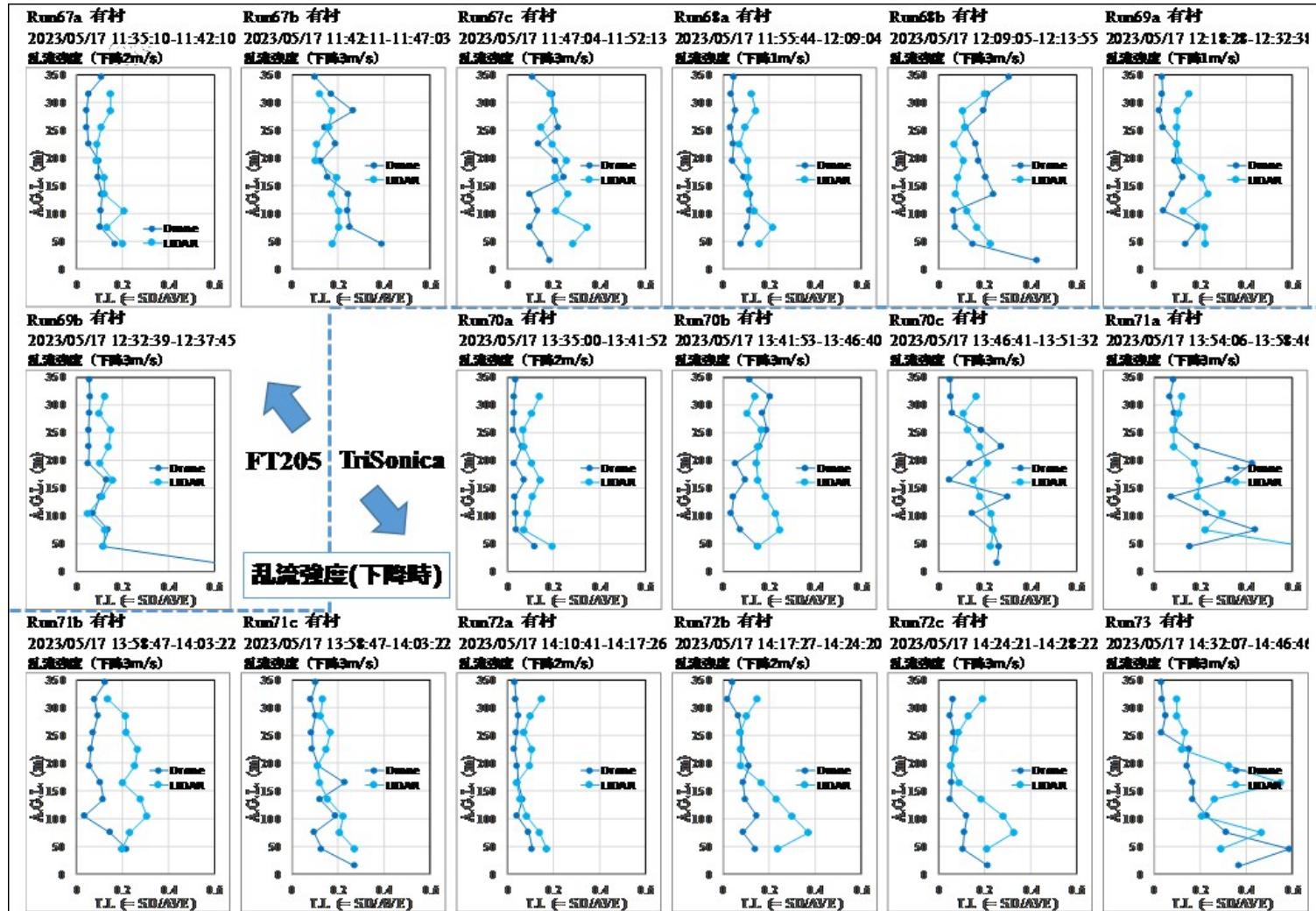


図 2-56 ドローンとドップラーライダーの乱流強度の鉛直プロファイルの比較（ドローン下降時）

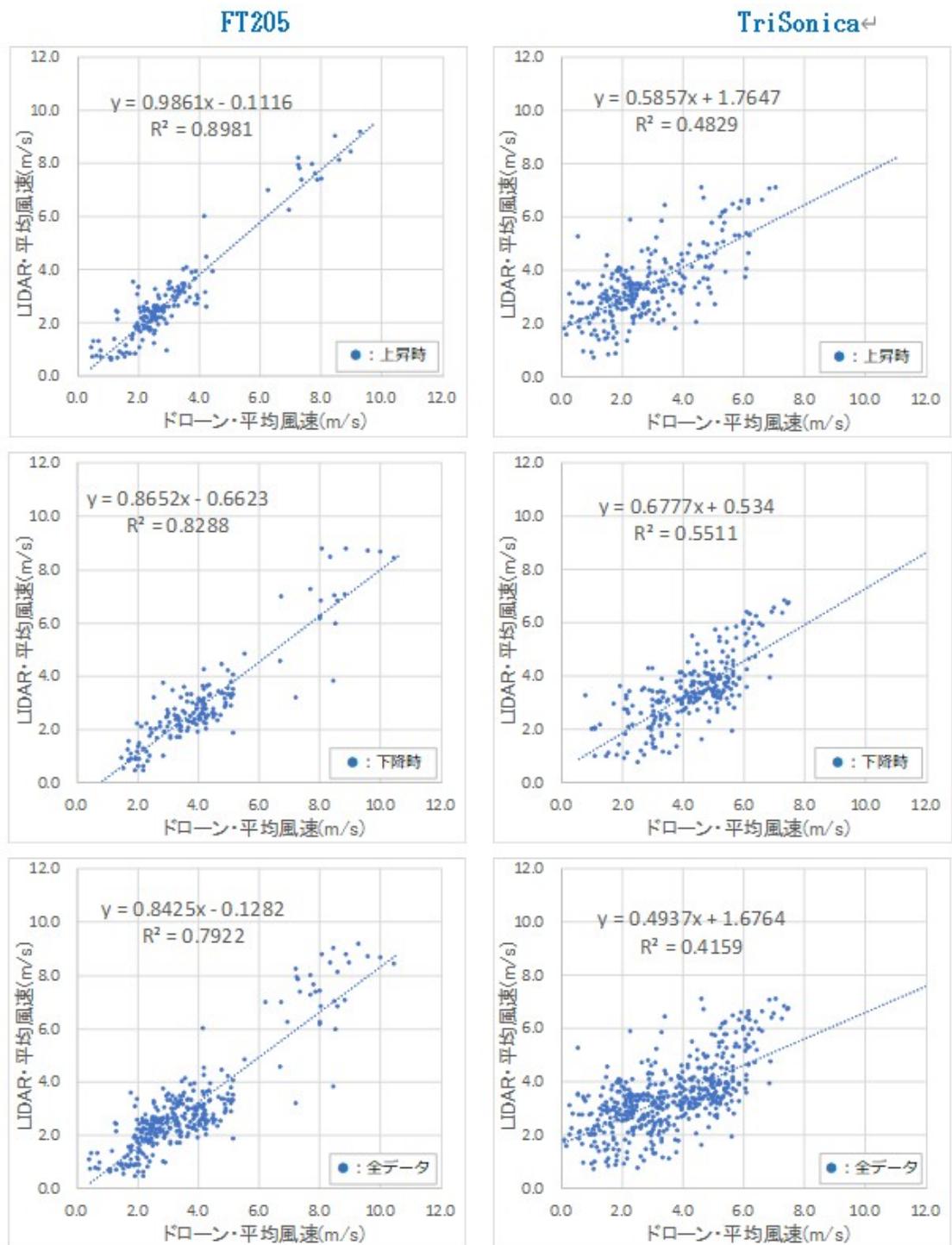


図 2-57 ドローンとドップラーライダーの平均風速の比較（対象期間：2021～2023年）。左列：FT205、右列：TriSonica Mini。上段：上昇時の観測、中段：下降時の観測、下段：全データ。

## b) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーション

ここでは、メソスケール気象現象をターゲットとした数値気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF) モデルを用いて、桜島火山および周辺の地形を高解像度で精緻に表現することで、地形の微細構造に起因した火山近傍の詳細な風速場や気象場を数値シミュレーションにより明らかにすることを目的としている。さらに、高分解能気象シミュレーション結果を入力条件として、市街地の詳細な建物や構造物を表現した流体計算モデルを用いた数値シミュレーションを実施し、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ことを目標としている。

### i) 気象モデルを入力とした建物解像流体計算モデルの構築

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、地形周りの風速場を詳細に表現することによって、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。こういった詳細な気象シミュレーション結果を利用し、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の開発を進めている。

昨年度において、国際航業による高解像度地理情報データ PAREA-LiDAR を利用し、図 2-58 に示す通り、鹿児島市内の地理情報データを整備した。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見ている。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。

このような実在都市の建物データを流体計算モデルの計算領域の下端境界条件として取り込み、市街地での気流・拡散の数値シミュレーションを進めた。特に、気象モデルから流体計算モデルに入力することで、実際の気象場における市街地での拡散場を再現するための技術開発を進めた。

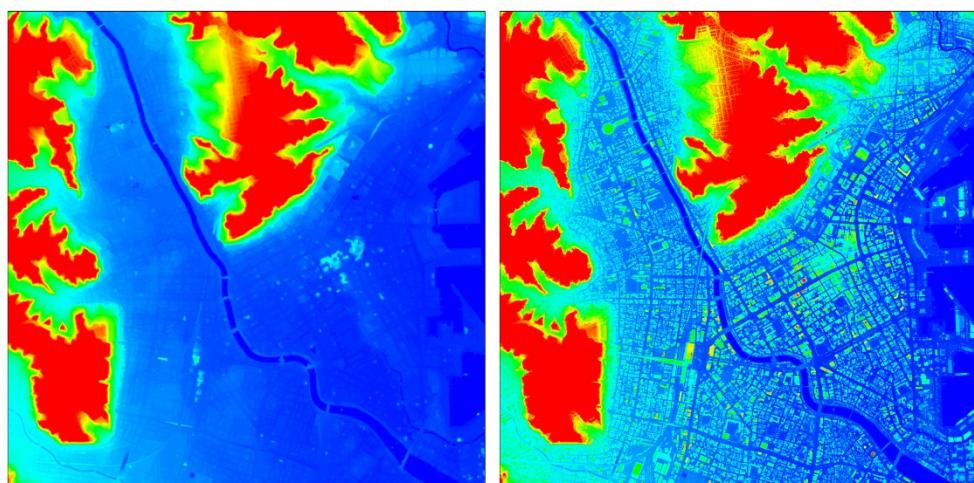


図 2-58 鹿児島市内における地表面高度 (DEM) および地表面および建物高度 (DSM)

### ii) 気象モデルから流体計算モデルへの接続技術の開発

これまでの研究で、建物周りの詳細な乱流変動を数値解析する技術が発達し、都市の建物群を想定した気流のモデリングも発達してきた。一方で、現実的な気象状況での都市の風の変動性状を理解することも大事であることから、気象モデルと都市モデルを組み合わせた解析手法も提案されてきている。我々の研究グループでは、都市の気流変動を解析するモデルとして、建物解像LESモデルを開発し

(Nakayama et al. 2011)、気象モデルによる気象解析結果をLESモデルの平均場として取り入れた乱流生成手法を開発し(Nakayama et al. 2012)、台風通過時の東京都心での突風を定量的に評価したり(Nakayama et al. 2012; Takemi et al. 2019; Takemi et al. 2020)、オクラホマシティーでの都市での拡散実験によるトレーサー濃度の再現精度を評価したり(Nakayama et al. 2016)、またモデルの検証のため宇治川オープンラボラトリーでの気象観測鉄塔での乱流計測値と比較したりした(Yoshida et al. 2018)。さらに、最近では、乱流観測データをLESモデルに同化させる手法の開発(Nakayama and Takemi 2020)もしている。

本研究では、Nakayama et al. (2012)の手法に基づき、流れ場に応じてダイナミックに流入変動風を効果的に生成する手法を開発した(Nakayama and Takemi 2024)。図2-59に、点源から放出された物質濃度が変動する風により風下方向に拡散する様子をシミュレートした結果を示している。図中に示した濃度場は、ある瞬間でのスナップショットである。Nakayama et al. (2012)で開発された乱流生成手法によりシミュレートされた濃度場と、Nakayama et al. (2012)を改良したNakayama and Takemi (2024)の手法により得られた濃度場を比べると、明らかに濃度分布が違うことが分かる。元の手法よりも今回開発した新手法の方が、より活発に物質濃度が拡散している様子が分かる。Nakayama et al. (2012)の元の手法では、計算領域を吹走するにつれ乱流が徐々に減衰してしまうという課題が残されており、今回開発した手法は、乱流の減衰を抑制し、ターゲットとする乱流状態を維持するように作用する。このような点から、図示したような濃度場の違いとなって表れたのである。このように、乱流を減衰させずに維持するような今回の手法の方が、現実的な気象場での大気乱流の影響を的確に考慮できると言える。

### iii) まとめ

実際の気象場における実在都市での火山灰の拡散・降下を数値シミュレーションにより再現するため、気象モデルと流体計算モデルを接続するための技術を開発した。流体計算モデルとして構造物による乱流生成を的確に表現することを可能とする建物解像LESモデルを用いて、気象モデルの出力データを利用して都市域での乱流による拡散場を精緻にシミュレーションすることを可能とするものである。

今後は、特定の降灰事例を対象として、現実的な気象場の下での市街地における火山灰の拡散・降下の数値シミュレーションを進める。

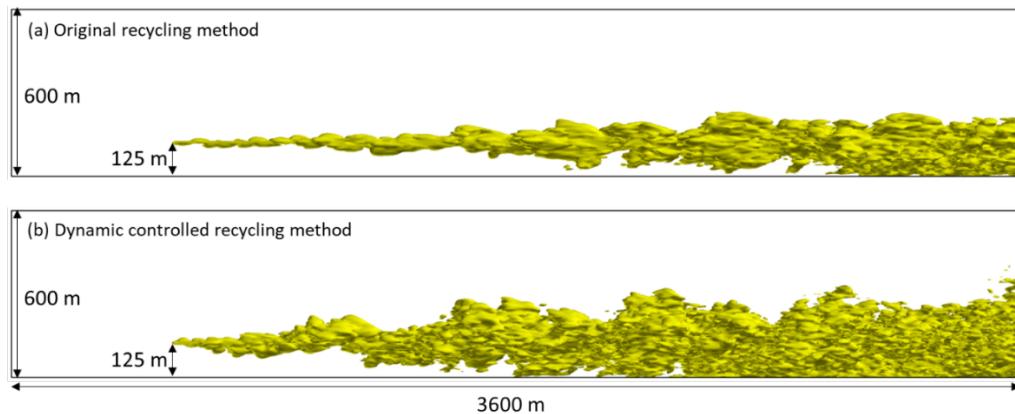


図 2-59 異なる乱流生成手法によりシミュレーションされた点源から放出された物質濃度の拡散場のスナップショット。(a) Nakayama et al. (2012) の手法による解析結果、および (b) Nakayama and Takemi (2024) により改良された手法による解析結果。

c) ラージエディシミュレーションによる火山周囲の気流性状

火山噴出物の移流・拡散解析を高精度で行うために、ラージエディシミュレーションではサブグリッドスケールの乱れのエネルギーの精度良い予測が重要となる。これまでには、速度勾配に拡散率が比例するというシンプルなモデルを用いていた。しかし、火山レキや火山灰などの固体粒子を含む流れ場においては、物体と流れ場の間の運動量や熱エネルギーの交換量を精度よく予測できるモデルを用いることが精度向上には不可欠となる。そこで、火山レキや火山灰などの固体粒子を含む混層流流れ場におけるサブグリッドスケールの乱れのエネルギーの予測式の定式化を行った。また、定式化において現れるモデル係数等を同定するために、火山レキと気流場の間の熱エネルギーの交換性状を明らかにする必要が生じたので、風洞実験を行って、火山レキが気流中に置かれた際の熱伝達率を明らかにする実験方法を開発した。さらに、開発した計算手法の妥当性と精度検証を行うために、火山噴火時の高温熱流場を模擬できる実験装置を開発、作成して、所定の測定ができるることを確認した。

i) 計算手法の改良

火山周辺の気流について、ラージエディシミュレーションを用いた解析のさらなる高精度化を目指し、火山レキや火山灰などの固体粒子の影響を取り込むための定式化を以下の通り行った。

- ・高温熱流場の移流・拡散を支配する拡散係数を求めるために、サブグリッドスケールの乱れのエネルギーを用いる一方程式系の乱流モデルを採用することとし、火山レキや火山灰などの固体粒子を含む場合の定式化を行った。
- ・高温の火山噴出物と流れ場との間の運動量や熱エネルギーのやり取りを、キャノピーモデル (Hiraoka, 2009) に倣って定式化した。

ii) 検証用データ獲得のための実験装置の開発・作成

新たに開発したモデルや計算手法の適用性、および、精度検証を行うためのデータ取得のための実験装置の開発・作成を以下の通り行った。

・高温の火山レキが気流中を飛散する際の熱伝達率を明らかにするために、炉で加熱されたレキを風洞内の気流中に晒し、サーモグラフにより、表面温度の変化を測定した後、保温水槽を用いて残留熱量を測定する方法（図 2-60）を考案し、レキと気流場の熱伝達率を明らかにする実験方法を開発した。

・火山噴火時の高温の熱気流解析のように、密度変化の大きな流れ場の再現実験を、火山模型を用いて行うための、水槽を用いた実験装置（図 2-61）を開発・作成した。塩水やアルコールなど、水と密度の異なる液体を用いることによって、火山模型周りに噴火時に相当する密度流場を再現し、微細なプラスチック粉末をトレーサーとしてレーザー光で流れ場を可視化し、PIV システムにより流速を測定できるようにした。そして、所定の条件下で流速が測定できることを確認した。

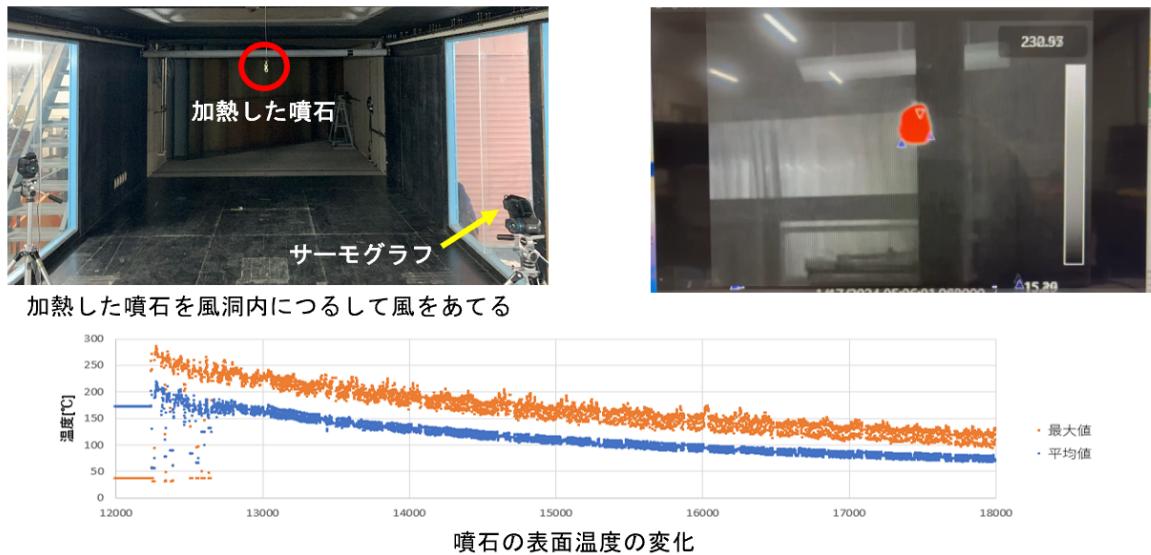


図 2-60 火山レキの大気中の熱伝達率の測定手法の開発。風洞内に加熱した噴石をつるし、風を吹かせて表面温度の変化をサーモグラフで明らかにする。



図 2-61 水槽を用いた火山模型周りの密度流れ場の可視化。水槽を用いた密度流れ場の可視化実験を行い、PIV (Particle Image Velocimetry) により、輝点の運動を追跡して流速分布を計測する。

#### d) レキによる衝撃破壊実験

令和 4 年度に引き続き衝撃実験を実施し、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に関するデータを蓄積した。新たに得られた知見としては、窓用のフロートガラスに直角以外の角度をもって衝突した際の損傷・破壊性状を明らか

にした。また、令和 4 年度の成果を学術雑誌に発表した (Maruyama and Iguchi, 2023)。

#### e) 火山灰粒子の凝集効果の検討

火山灰粒子の凝集過程に関する過去の文献調査をおこない、ディスクロメータで観測された降灰粒子の落下速度から凝集の有無と凝集粒子の密度を推定するアルゴリズムを開発した。その結果を用いてレーダ降灰量推定式（いわゆる ZA-RA 関係）の高度化を図った。

##### i) 火山灰粒子の凝集過程

火山灰粒子の移流拡散のモデル化にはソース項とシンク項を組み込む必要がある (Durant and Brown, 2016)。ソース項の例としては、噴煙柱の形状、高さ、質量噴出率、火山灰の鉛直方向の分離過程などがあげられる。ソース項に関しては Morton et al. (1956) のホットプリュームの理論を基に、1970 年代後半から 1980 年代に数多くの研究がなされた。そして、噴煙柱はガストラスト領域、浮力領域、傘領域の三つの領域からなること (Wilson, 1976; Sparks, 1986; Woods, 1988) や噴煙柱の形成過程 (Suzuki, 1983)、そして、噴出量と噴煙柱の高さとの関係 (Wilson et al., 1978; Carey and Sparks, 1986) 等が明らかにされた。これらは Sparks et al. (1997) の書籍にまとめられている。

##### ii) 凝集粒子の密度、落下速度、形状

大気中を落下する粒子の終端速度は粒子に働く重力、空気抵抗力  $R$ 、浮力  $R_b$  から決定される。粒子の運動方程式は

$$m(dw/dt) = mg - R - R_b \quad (15)$$

で表される。ここで、 $w$  は落下速度、 $m$  は雨滴の質量、 $g$  は重力加速度 ( $\text{ms}^{-2}$ ) である。終端速度は上式の右辺が 0 の場合である。空気抵抗力  $F$  は落下速度とレイノルズ数  $R_e$  に依存するため、運動方程式から終端速度の解析解を求めるることは一般的に不可能であり数値的に解く必要がある。

Dellino et al. (2005) は 142 個の軽石の形状解析から

$$w = \frac{1.2065\eta(D^3 g(\rho_p - \rho_a)\rho_a F^{1.6} / \eta^2)^{0.5206}}{D\rho_a} \quad (16)$$

を導き出した。 $(16)$  の右辺を展開して

$$w = 1.2065 \times g^{0.5206} \eta^{-0.0412} \rho_a^{-0.4794} \rho_p^{0.5206} F^{0.83296} D^{0.5618} \quad (17)$$

となる。 $(16)$  および $(17)$  式中の変数および定数は次の通りである。

$w$  : 終端速度  $\text{ms}^{-1}$

$\eta$  : 粘性係数  $(1.723 \times 10^{-5} \text{ Pa s}, 0^\circ\text{C})$

$D$  : 球相当直径  $\text{m}$

$g$ : 重力加速度 ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ )

$\rho_p$ : テフラの密度 ( $500 \text{ kg m}^{-3}$  —  $2500 \text{ kg m}^{-3}$ )

$\rho_a$ : 空気の密度 ( $1.293 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $0^\circ\text{C}$ )

$F$ : 形状ファクター  $= (b+c)/2a$  ( $0.2$  —  $1.0$ )

$a$ : 軽石の最長長さ

$b$ : 中間長さ

$c$ : 最短長さ

Bonadona et al. (1998) はテフラを球形としさらに密度を一定として次の終端速度を導き出した。

$$w = \sqrt{\frac{3.1gD\rho_p}{\rho_a}} \quad (18)$$

$Re > 500$  の時、(4)式による終端速度の平均誤差は 65%に達するのに対して(17)式は 12%程度である。

(17)式からテフラ粒子の終端速度が密度や形状ファクターによってどのように変化するかを知ることができる。図 2-62 に  $F$  が 1 (球形) と 0.2 (扁平) の時に  $w - D$  関係が  $\rho_p$  によってどのように変化するかを示す。 $w - D$  関係の  $\rho_p$  による変動の大きさは粒子の形状が球の場合の方が扁平な場合に比べて大きい。例えば、 $D$  が 1mm の粒子の場合、 $F = 1$  の粒子の終端速度は  $\rho_p$  が  $500 \sim 2500 \text{ kg m}^{-3}$  で  $2.9$  から  $6.8 \text{ ms}^{-1}$  と変化するのに対して  $F=0.2$  の粒子では  $0.8$  から  $1.8 \text{ ms}^{-1}$  である。図 2-63 は  $\rho_p$  が  $500$  と  $2500 \text{ kg m}^{-3}$  の場合、 $w - D$  関係が  $F$  によってどのように変化するかを示す。 $w - D$  関係の  $F$  による変動は粒子の密度が大きい程大きい。例えば、 $D$  が 1mm の粒子の場合、 $\rho_p = 500 \text{ kg m}^{-3}$  では、粒子の終端速度は  $F$  が  $0.2 \sim 1$  で  $0.8 \text{ ms}^{-1} \sim 2.9 \text{ ms}^{-1}$  の変化であるが  $\rho_p = 2500 \text{ kg m}^{-3}$  では  $1.8 \sim 6.8 \text{ ms}^{-1}$  の変化である。

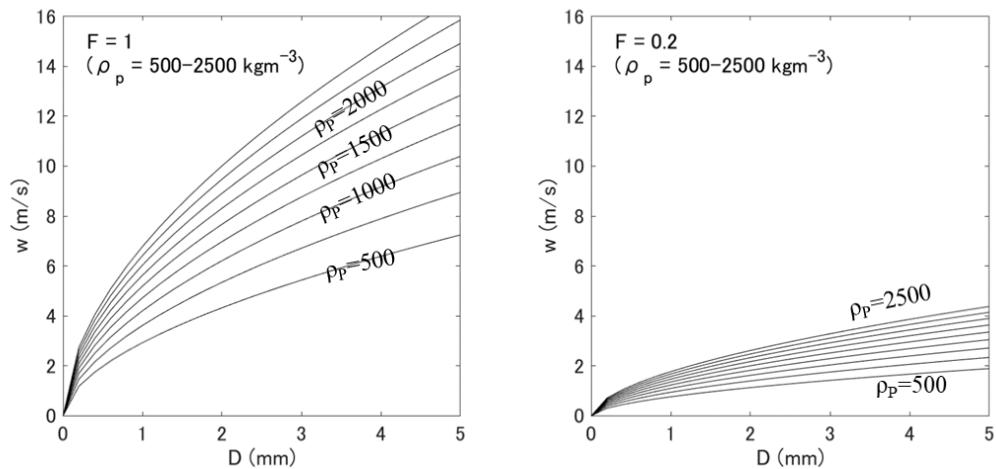


図 2-62 形状ファクター  $F$  が 1 (左) と 0.2 (右) の時の  $w - D$  関係。

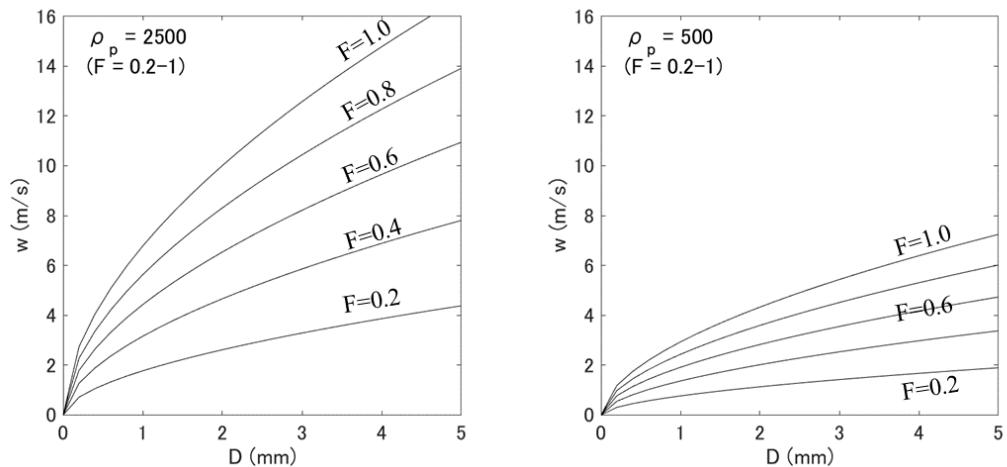


図 2-63 密度が  $2500 \text{kgm}^{-3}$  (左) と  $500 \text{kgm}^{-3}$  (右) の時の  $w$ - $D$  関係。

更に(3)式を簡略化する。近年、2DVD を用いた降灰粒子の  $F$  の調査がおこなわれた (Suh, 2019; Suh et al., 2019; 坂井ほか, 2019)。それらの結果を図 2-64 にまとめた。坂井ほか (2020) 以外の結果は粒子が小さくなると  $F$  が小さくなる。各調査結果の平均を求める

$$F = 1.04 - 1.2 \exp(-4.02D) \quad (19)$$

である。(3), (5) より

$$w = 1.2065 \times g^{0.5206} \eta^{-0.0412} \rho_a^{-0.4794} \rho_p^{0.5206} (1.04 - 1.2 \exp(-4.02D))^{0.83296} D^{0.5618} \quad (20)$$

となり,  $w$  の説明変数は  $D$  と  $\rho_p$  のみとなる。

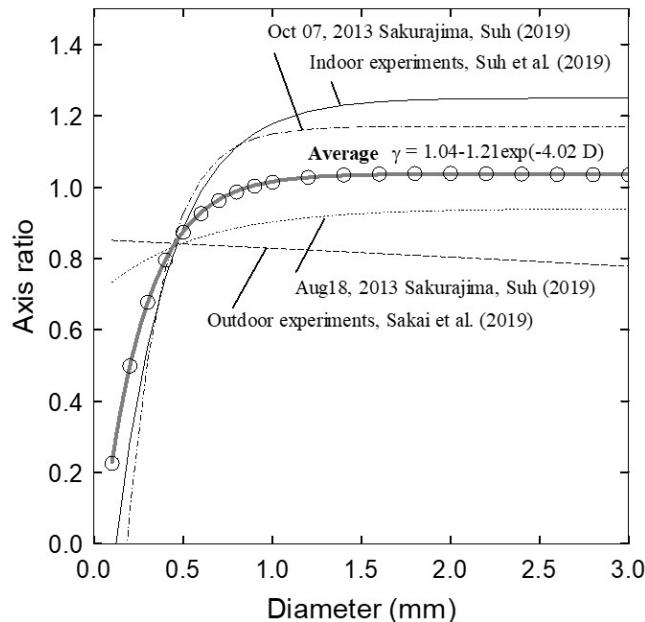


図 2-64 降灰隆子の形状  $F$  (軸比) と直径の関係

(20)式は

$$\rho_p = 0.6973 \times g^{-1} \eta^{0.07914} \rho_a^{0.9209} (1.04 - 1.2 \exp(-4.02D))^{-1.6} D^{-1.0792} w^{1.9209} \quad (21)$$

と変形できる。Parsivel の観測から得られた ( $w$ ,  $D$ ) データを(7)式に代入すれば  $\rho_p$  を推定することができる。Parsivel の個々の粒子の  $\rho_p$  を求めことは粒子の個数が膨大なために現実的ではないので  $w-D$  散布図の代表点の  $\rho_p$  を求めた。代表点としては最大頻度点や面積重心点などが考えられるが、Ishizaka et al (2016) が雪粒子の  $w-D$  散布データに使用した質量フラックス中心 (center of mass flux: CMS) を利用した。なお、質量フラックスは  $C_{ij} \cdot D_i^3$  とする。ここで、 $C_{ij}$  は Parsivel データの  $w_i - D_i$  行列の要素、 $D_i$  は  $i$  番目のチャンネルの粒径である。 $D_i^3$  は粒子の質量に相等し数は少ない大きな粒子の影響を考慮するためである。

図 2-65 に大きな落下速度が観測された噴火事例 (ケース A)、すなわち凝集の影響が小さいと考えられるケースと落下速度が小さかった噴火事例 (ケース B) の  $w-D$  散布図の例を示す。各図には推定された CMF 点が塗りつぶした白丸で示されている。(7)式から計算した CMF 点での密度はケース A が  $892 \text{ kgm}^{-3}$  でケース B が  $235 \text{ kgm}^{-3}$  である。これらの値はいずれも固体粒子の密度 ( $2,500 \text{ kgm}^{-3}$ ) に比べて小さい。CMF 点を通る  $w-D$  曲線 (点線) は(6)式から求めたものである。空の白丸は各直径の平均落下速度で太い実線は最小 2 乗法から求めた回帰曲線である。回帰曲線と CMF を通る  $w-D$  曲線は良くあっている。参考に、 $\rho_p = 2,500 \text{ kgm}^{-3}$  と  $200 \text{ kgm}^{-3}$  の  $w-D$  曲線 (点線) をそれぞれ  $w-D$  散布図の上限と下限に示す。なお、破線は雨滴の  $w-D$  曲線である。

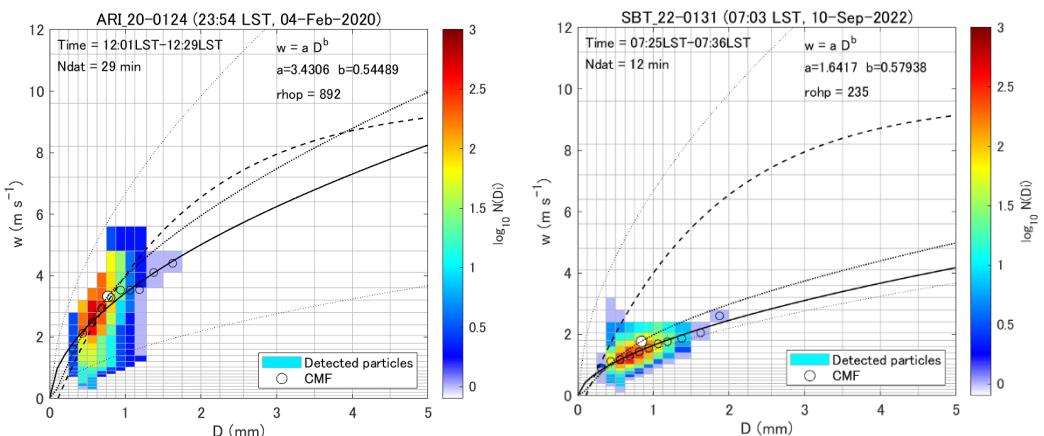


図 2-65 左：凝集の影響が少ないと考えられる噴火事例 20-0124 (ケース A、有村観測点)。右：凝集の影響が大きい噴火事例 22-0131 (ケース B、柴立観測点)。

### iii) 凝集を考慮したレーダ降灰量推定式

- ・積分パラメータ

降灰粒子の総個数、空間密度、降灰強度、反射因子は粒径分布 (PSD) の積分パラメータと呼ばれる。積分パラメータは PSD のモーメントで表される。ディスドロメータなどで PSD のデータが得られる場合、PSD の積分パラメータは以下の式から求められる。

$$\text{空間密度} : C_A = \frac{\rho_p \pi}{6} \int_0^{D_{\max}} D^3 N(D) dD \quad (22)$$

$$\text{降灰強度} : R_A = \frac{\rho_p \pi}{6} \int_0^{D_{\max}} D^3 w(D) N(D) dD \quad (23)$$

$$\text{反射因子} : Z_A = \int_0^{D_{\max}} D^6 N(D) dD \quad (24)$$

上式からわかるように各種の積分パラメータは粒径分布  $N(D)$ 、粒子の密度  $\rho_p$ 、落下速度  $w$  から計算される。以下では図 2-65 に示した二つの噴火事例の降灰量推定式について述べる。観測点は有村（ケース A）と柴立（ケース B）である。

#### ・凝集を考慮しない降灰量推定式

これまで導出した降灰量推定式は火山灰の粒子密度=2500kgm<sup>-3</sup>（すなわち、粒子は固体の石の粒子）として導出した推定式であった。表 2-7 に噴火事例 20-0124（ケース A）と噴火事例 22-0131（ケース B）の降灰量推定式を示す。

表 2-7 粒子密度を 2500kgm<sup>-3</sup>とした場合の降灰量推定式

関係式	噴火事例 20-0124（ケース A）	噴火事例 22-0131（ケース B）
$R_A-Z_A$	$R_A=3.95 \times 10^{-2} Z_A^{0.995}$	$R_A=0.0433 Z_A^{0.771}$
$C_A-Z_A$	$C_A=5.53 \times 10^{-6} Z_A^{0.929}$	$C_A=2.14 \times 10^{-5} Z_A^{0.622}$
$S_A-S_Z$	$S_A=4.05 \times 10^{-2} S_Z^{0.965}$	$S_A=0.336 \times 10^{-2} S_Z^{0.997}$

#### ・凝集を考慮した降灰量推定式

(ii) で説明したように落下速度から CMF 点を求めその点での密度を噴火事例の降灰粒子の密度として降灰量の推定式を求めた。その結果を表 2-8 と図 2-66 に示す。典型的な落下速度の違いが観測された 2020 年の有村観測点と 2022 年の柴立観測点の例を紹介する。

表 2-8 凝集の効果（粒子密度の変化）を考慮した降灰量推定式

関係式	噴火事例 20-0124（ケース A）	噴火事例 22-0131（ケース B）
$R_A-Z_A$	$R_A=1.85 \times 10^{-2} Z_A^{0.954}$	$R_A=1.93 \times 10^{-3} Z_A^{0.871}$
$C_A-Z_A$	$C_A=2.23 \times 10^{-6} Z_A^{0.918}$	$C_A=9.27 \times 10^{-7} Z_A^{0.725}$
$S_A-S_Z$	$S_A=1.49 \times 10^{-2} S_Z^{0.966}$	$S_A=5.58 \times 10^{-4} S_Z^{1.09}$

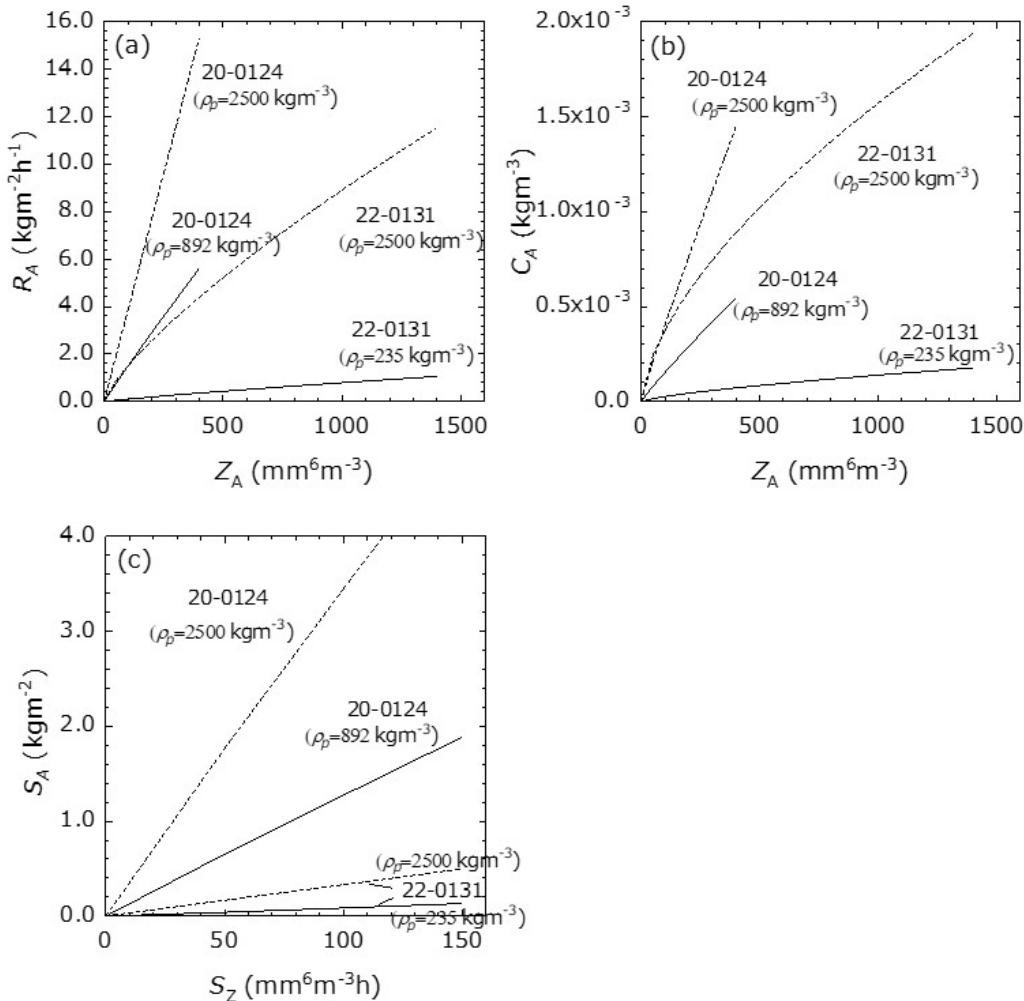


図 2-66 凝集の効果（粒子密度の変化）を考慮した噴火事例 20-0124 と 22-0131 の降灰量推定式。破線は密度を  $2500 \text{ kg m}^{-3}$  とした場合の推定式。

表 2-7 の推定式は粒子密度を  $2500 \text{ kg m}^{-3}$  として求めた式である（真木・井口、2022）。従って凝集効果により小さくなった粒子密度  $\rho_p$  を考慮した推定式に対して  $2500/\rho_p$  倍だけ降灰量を過大評価することになる。例えば、噴火事例 20-0124（ケース A）では約 2.8 倍だけ過大評価する。噴火事例 22-0131（ケース B）では約 10 倍だけ降灰量を過大評価することになる。図 2-66 からわかるように、粒子の密度の違いは降灰量推定精度に大きく影響する。注意すべき点として、密度が同じでも降灰量推定式はケース A とケース B で異なっていることがある。これは粒径分布の違いによるものである。従って降灰量推定式の変動を議論する場合、粒子密度の違いだけではなく粒径分布の違いも考慮する必要がある。

今年度は凝集によると考えられる粒子密度の変化を w-D 分布図から推定するアルゴリズムを開発した。推定した CMF 点は w-D 分布図を代表していることが確かめられている。今後は開発した手法を Parsivel による観測が開始された 2017 年からのデータに適用して降灰粒子の密度の変動（凝集の効果）について大気の環境場や噴火の規模との関係を調査する予定である。さらに、粒子密度の変動と偏波パラメー

タ（反射因子、反射因子差、比偏波間位相差）との関係を調べ X バンド MP レーダによる凝集の定量的な評価を試みたい。

## 5) 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WRFにより高分解能化した気象場を気象場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。

令和5年度は、試験運用を続けて小型XバンドMPレーダ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ことにより、オンラインシステムの妥当性を検証するとともに、課題を抽出した。また、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した。

### a) 風速場の高解像度化とデータベース構築作業

これまでに2018年と2019年の気象データについて気象モデルWRFにより高解像度化を図った。高解像度データの一部が欠落していることが分かったので、追加計算を行い補填した。WRFによる計算は時間を要するために、計算の手順と必要な解像度について検討し、これまでの解像度で十分であることを確認した。さらに、高解像度気象場の妥当性を検討するために、風により移流拡散する二酸化硫黄ガスの空間分布を把握する観測を実施した。

### b) オンラインシステムの実験結果

オンラインシステムの妥当性を検証するために、降灰予測の結果とXバンドMPレーダのエコーの分布から得られた降灰量予測を比較した。ディスドロメータの降灰量との比較はオンラインシステム上で可能となっている。

#### i) 噴煙高度2000m以上の爆発

2023年には108回の爆発が南岳または昭和火口において発生したが、ここではそのうち、噴煙高度が2000m以上に達した27回の爆発について比較する。このうち、レーダにエコーが記録されたものは14回であった。オンラインシステムの出力結果をレーダ画像と比較して図2-67～図2-80に示す。上段がオンラインシステムにより出力された予測時刻から1時間の降灰量を6分毎に示した。下段がレーダの反射強度から推定された降灰量で、おおむねオンラインシステムの時刻に合わせてあるが、時刻は世界時間で記述されているので、オンラインシステムの時刻よりも9時間遅い。

2023年1月8日に発生した6時42分の爆発（図2-67）と19時55分の爆発（図2-68）の場合は、レーダ観測による噴煙の移流は南東方向であり、オンラインシステムも南東方向の移流を予測した。オンラインシステムの出力結果の方が噴煙の広がりが広いのは、レーダに捉えられる反射強度は火山灰粒子の濃度によるためである。

2023年1月28日22時00分の爆発（図2-69）の場合、レーダによる火山灰の移流方向は南東であり、オンラインシステムは火口から噴出した直後は南東方向に移流し、その後東に曲がることを予測した。オンラインシステムの方が複雑な風速場を用いて移流拡散計算をしたことになる。

2023年3月4日21時57分の爆発（図2-70）では、レーダ画像は南東方向へ移流したこと示すが、オンラインシステムは噴煙が北へゆっくりと流れしていく予測をした。

2023年5月25日13時27分の噴火（図2-71）では、北へ噴煙が移流したことレーダ画像は示す。オンラインシステムも噴煙が北へゆっくりと流れていく予測をしている。気象庁はこの噴火の噴煙の流向を「直上」としているように、風が弱かったが、オンラインシステムはうまく予測したといえる。

2023年5月28日15時20分の爆発（図2-72）の噴煙は火口近くでは北東に向かい、その後、東方向へ向きを変えたことが、レーダ画像からわかる。オンラインシステムも噴煙が北東へ移流することを予測している。

2023年8月4日21時50分の噴火（図2-73）では、噴煙は北西方向へ移流している。オンラインシステムは噴煙が西北西へ移流することを予測した。風向の予測の若干のずれはあるものの、概ね一致している。

2023年8月13日22時05分の爆発（図2-74）では、噴煙は西へ移流していることはレーダ画像からわかるが、オンラインシステムは噴出率を0と評価した。噴出率のうち、地震動の項は負と評価されて噴出率は小さい。もとのデータに当たると803トンの火山灰が噴出したと計算されるので、自動処理の過程にバグがあるものと推測される。

2023年10月には爆発が頻発した。2023年10月14日17時36分の爆発（図2-75）では噴煙が南東に移流したことがレーダ画像からわかり、オンラインシステムも同様の予測をした。2023年10月16日8時52分の爆発（図2-76）と同日10時59分の爆発（図2-77）の噴煙も南東に移流したが、オンラインシステムは東北東への移流を予測した。風速ベクトルの予測に食い違いがみられる。

2023年10月19日1時16分の爆発（図2-78）および同日16時48分の爆発（図2-79）の噴煙はどちらも東に流れたことがレーダ画像からわかるが、オンラインシステムは1時16分の爆発については北への移流を、16時48分の爆発については東南東への移流を予測した。

2023年10月24日3時46分の噴火（図2-80）は火山灰量において2023年の最大規模の噴火である。レーダは40分以上にわたって噴煙の東方向への移流を観測した。オンラインシステム15度程度のずれはあるものの東方向への移流を予測している。

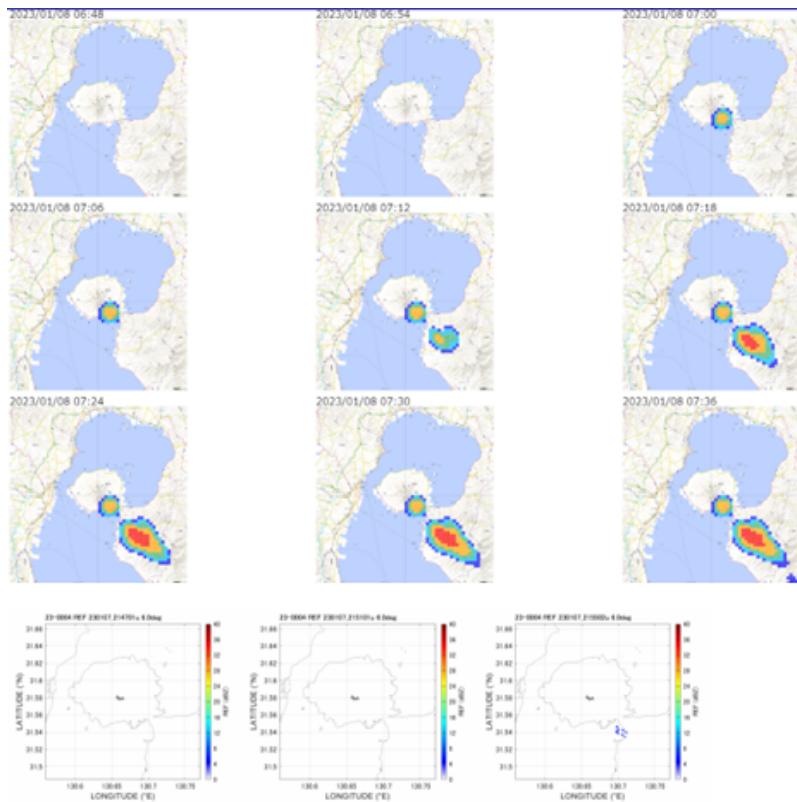


図 2-67 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 1 月 8 日 6 時 42 分の爆発。

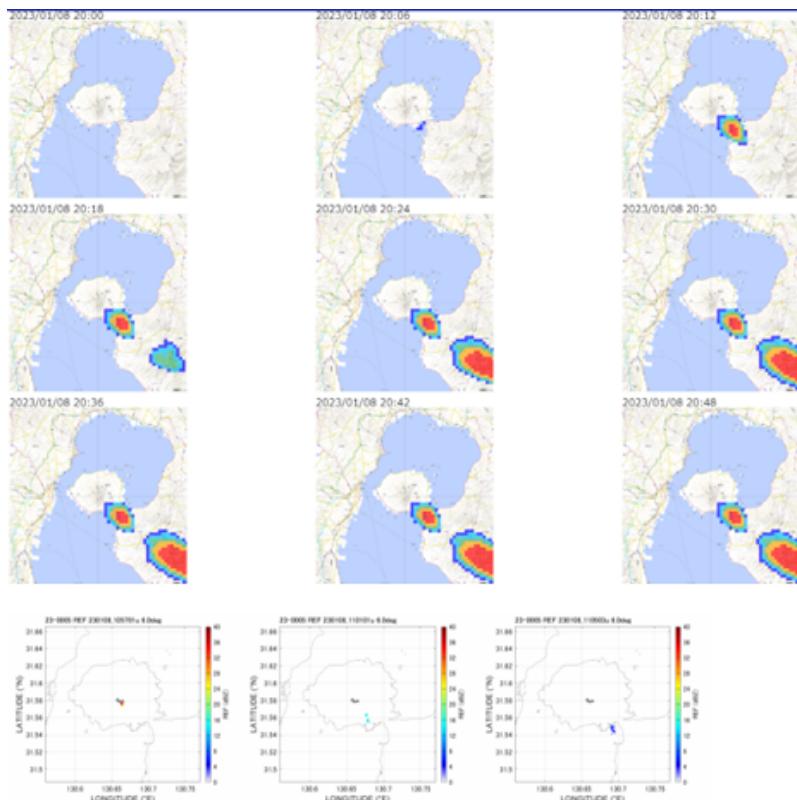


図 2-68 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 1 月 8 日 19 時 55 分の爆発。

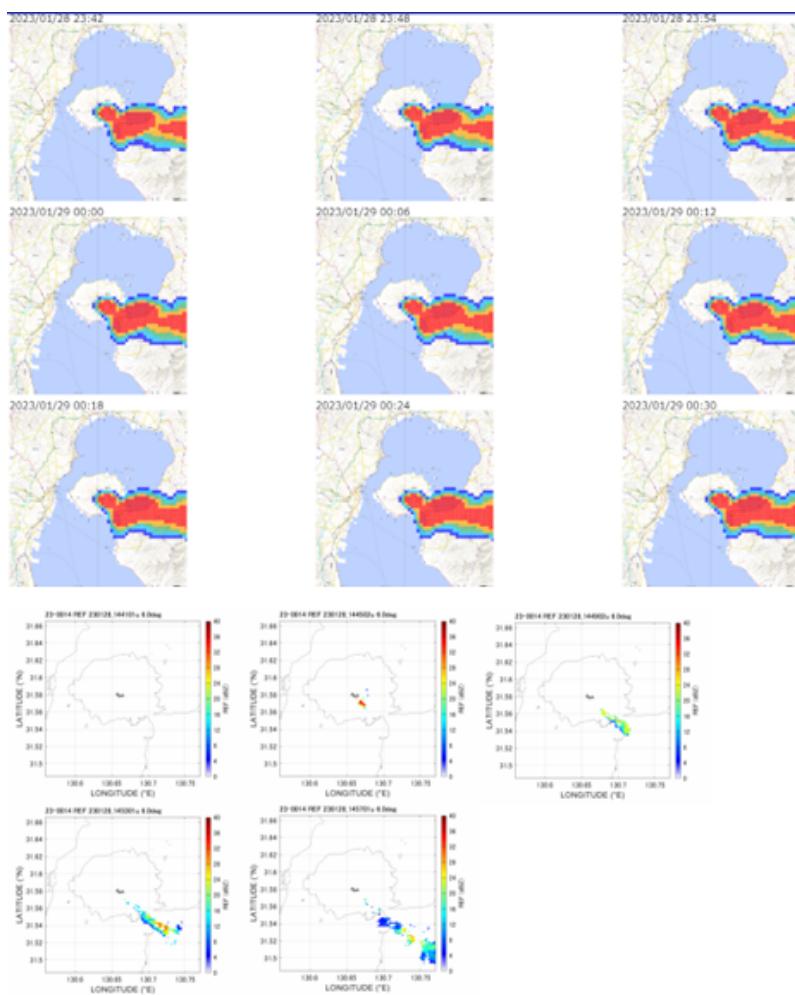


図 2-69 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 1 月 28 日 22 時 00 分の爆発。

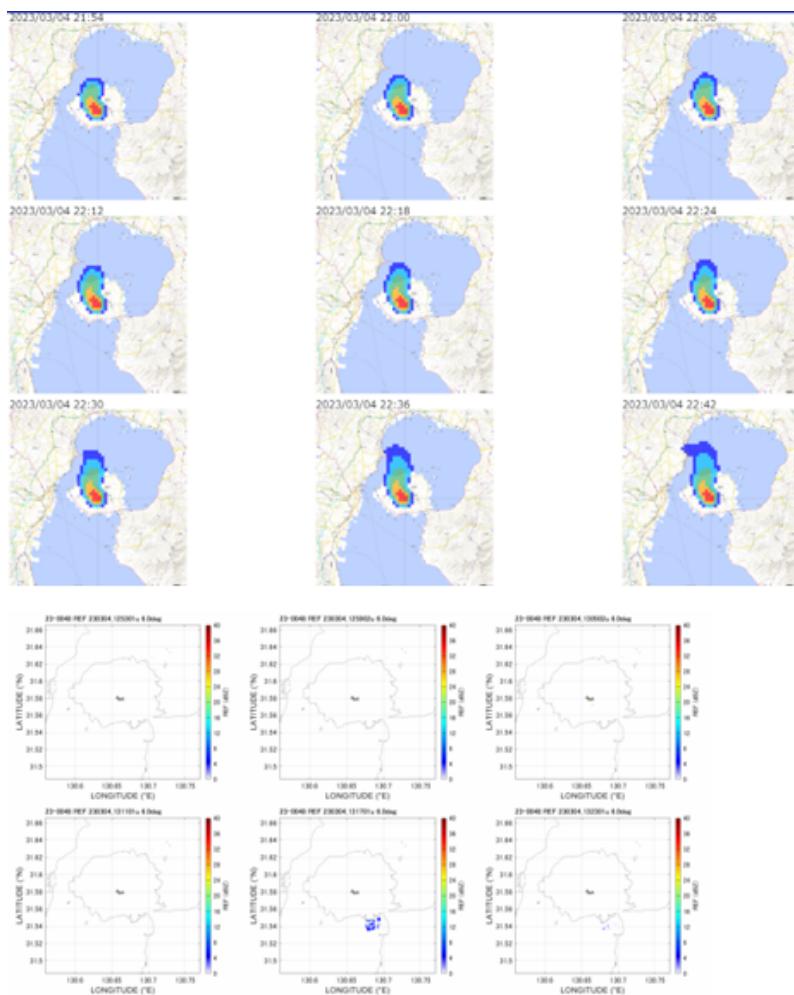


図 2-70 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 3 月 4 日 21 時 57 分の爆発。

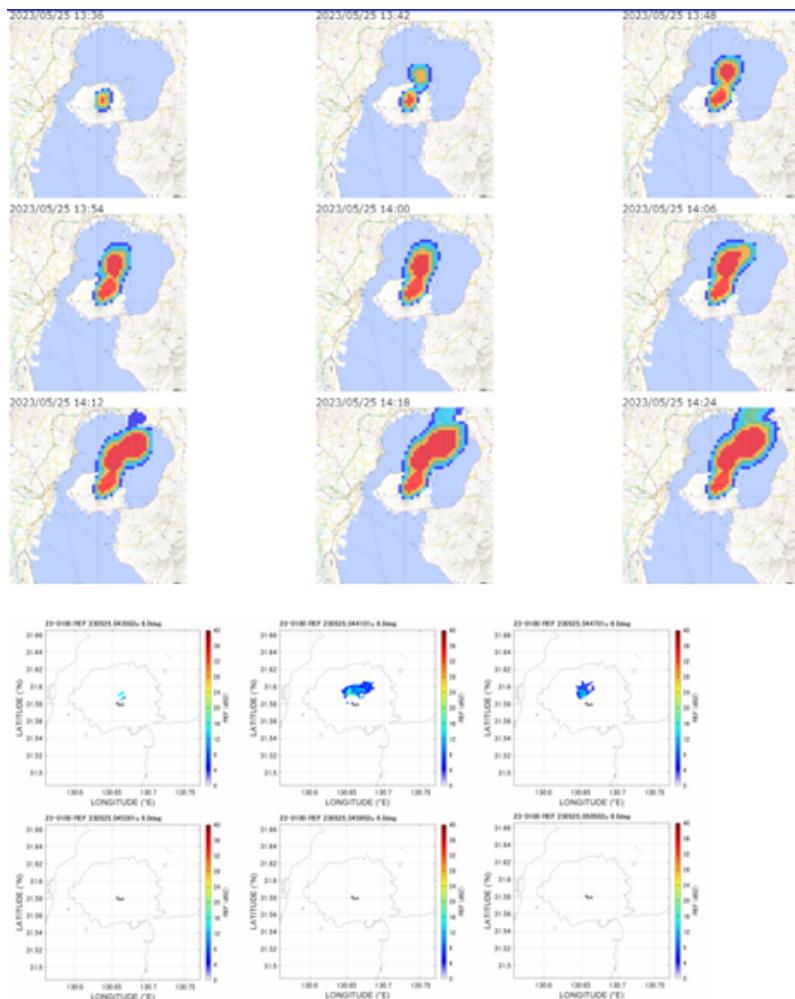


図 2-71 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 5 月 25 日 13 時 27 分の噴火。

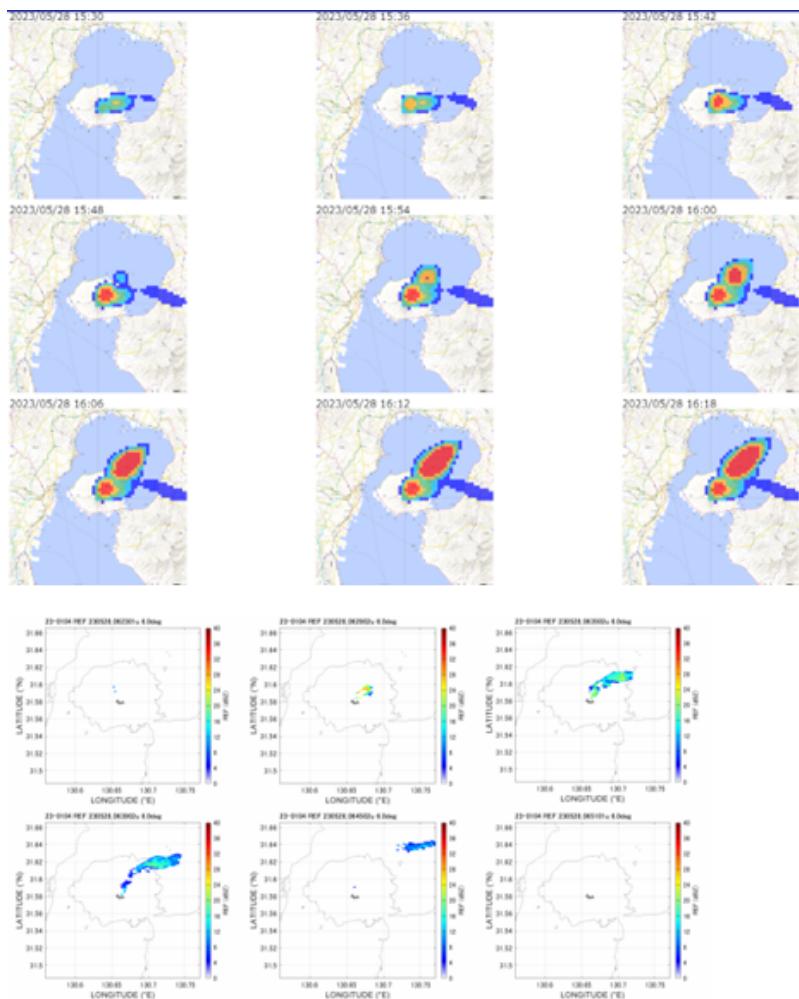


図 2-72 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 5 月 28 日 15 時 20 分の爆発。

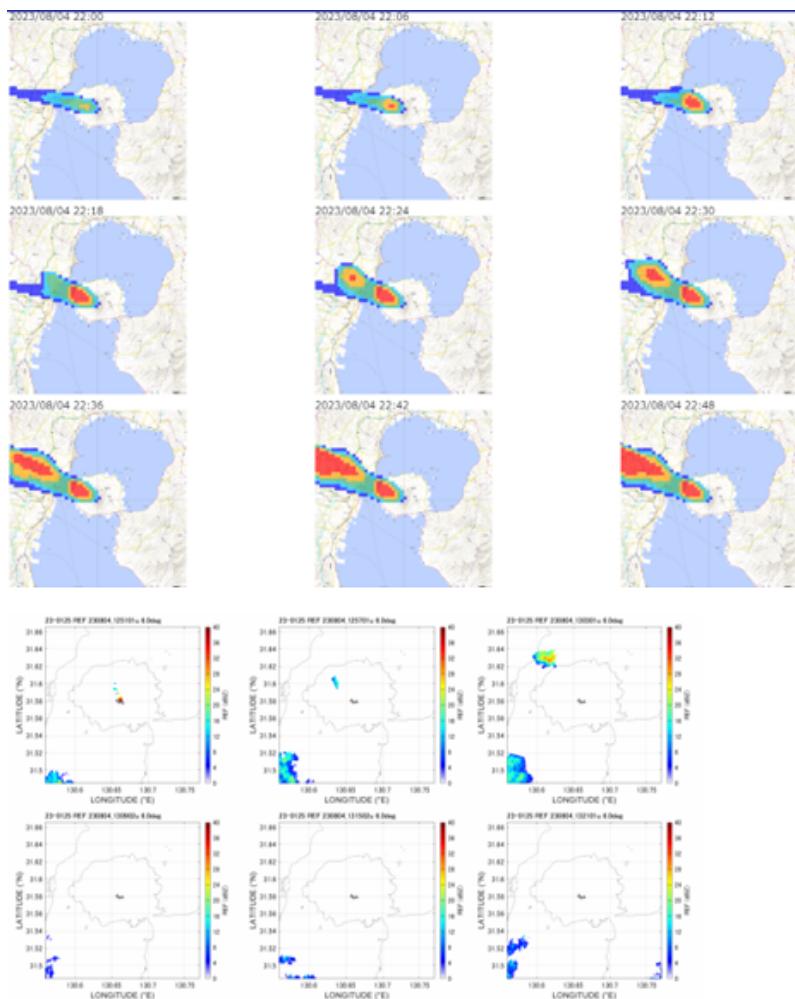


図 2-73 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 8 月 4 日 21 時 50 分の噴火。

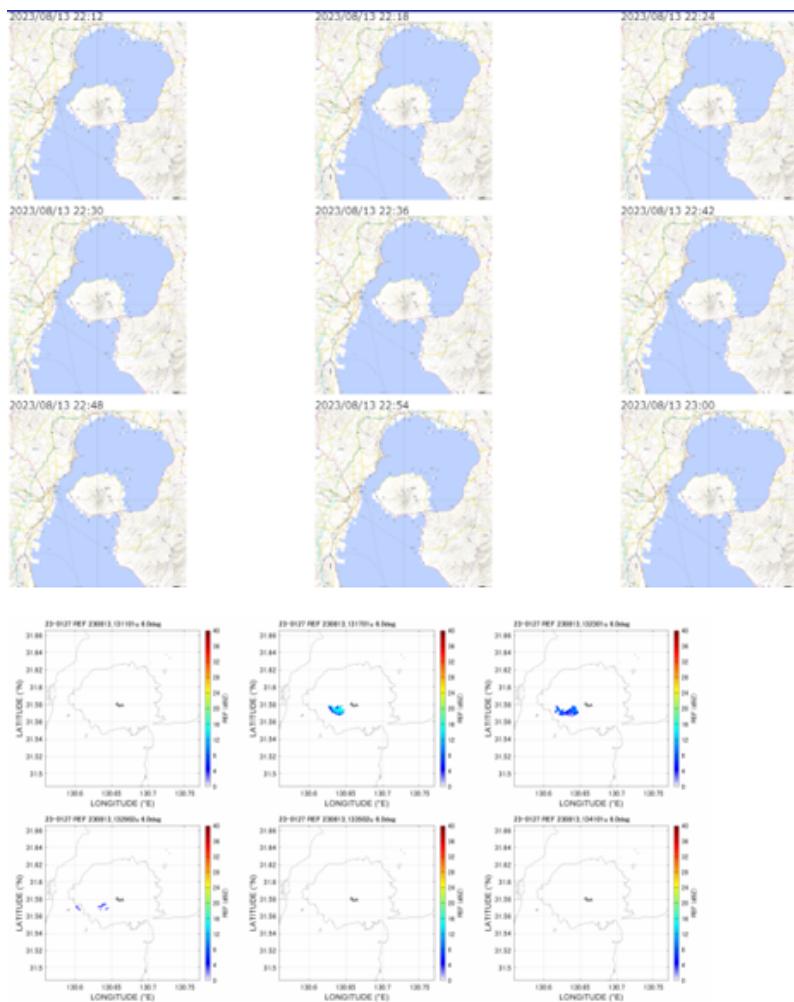


図 2-74 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 8 月 13 日 22 時 05 分の爆発。

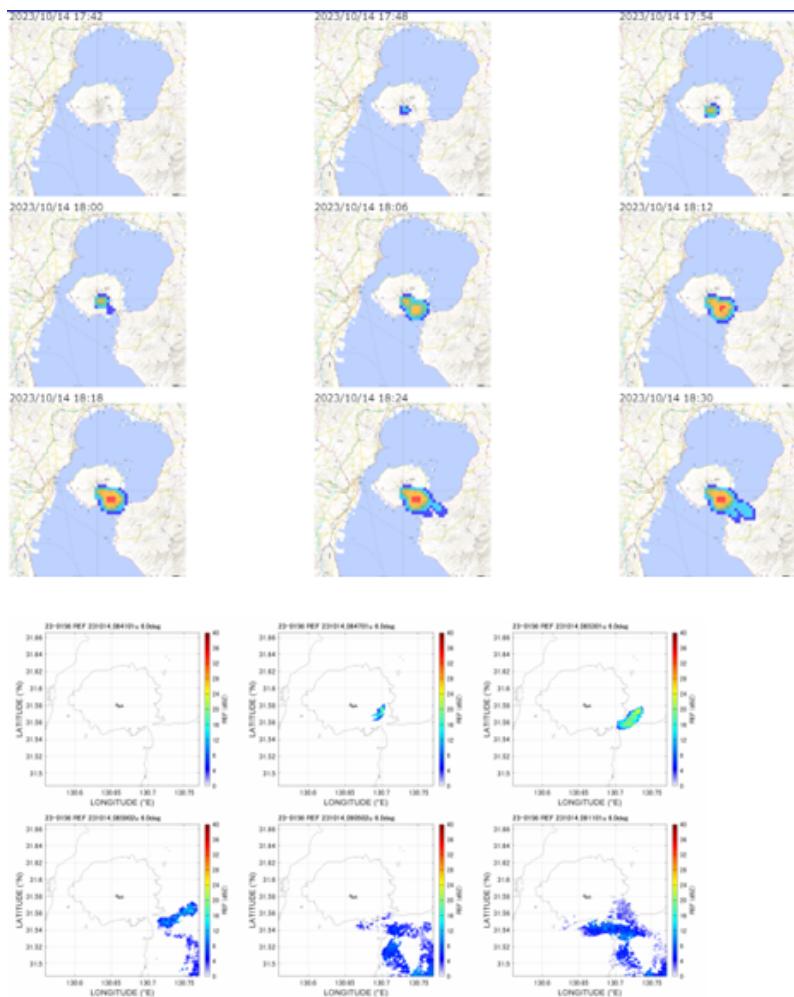


図 2-75 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 10 月 14 日 17 時 36 分の爆発。

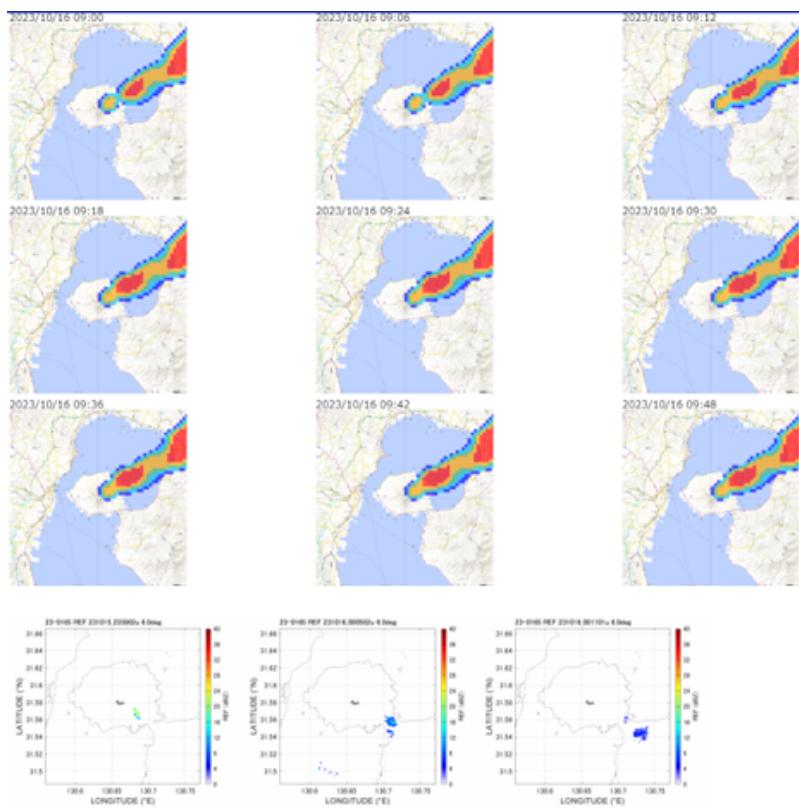


図 2-76 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 10 月 16 日 8 時 52 分の爆発。

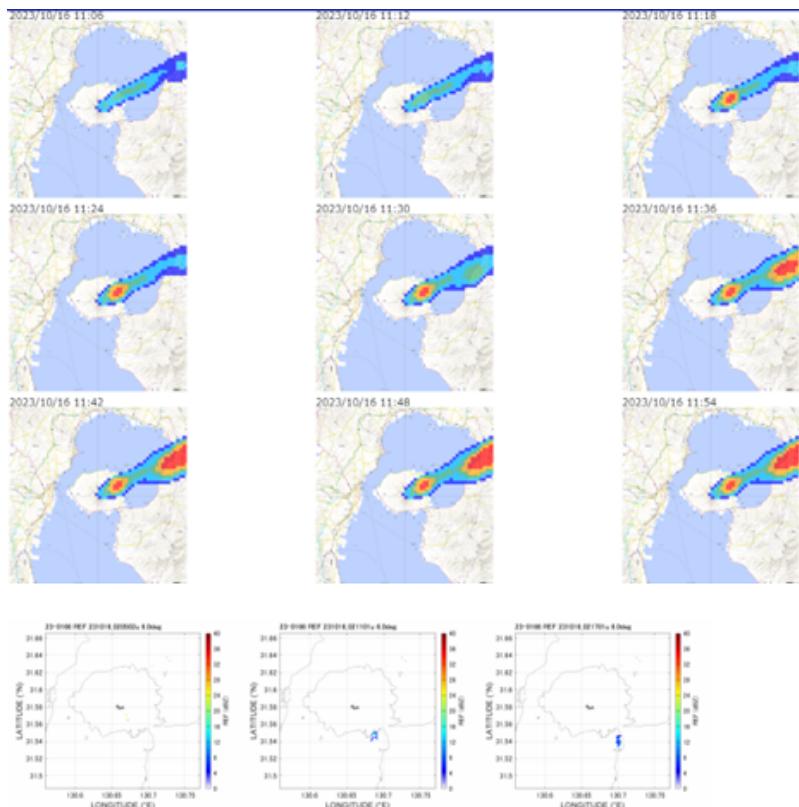


図 2-77 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 10 月 16 日 10 時 59 分の爆発。

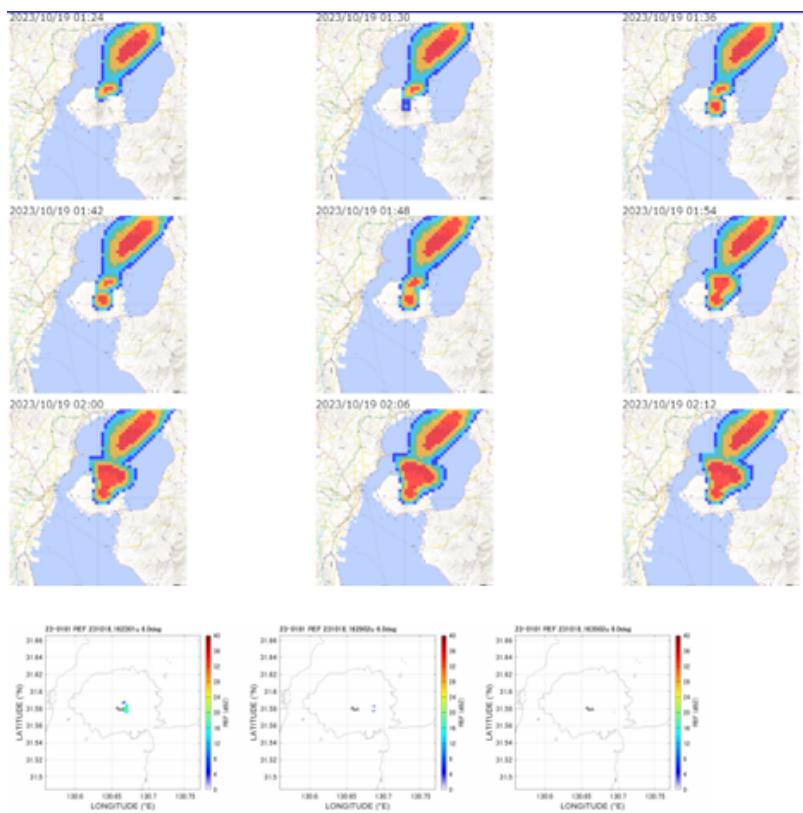


図 2-78 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 10 月 19 日 1 時 16 分の爆発。

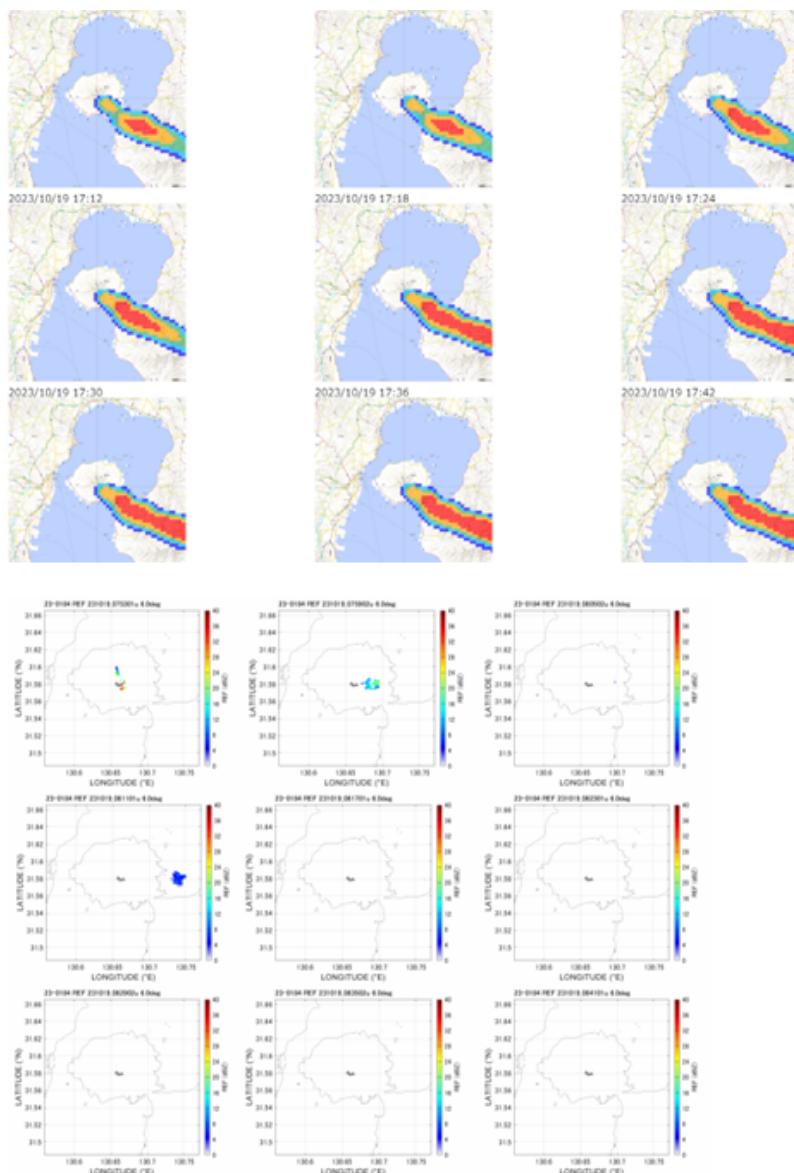


図 2-79 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 10 月 19 日 16 時 48 分の爆発。

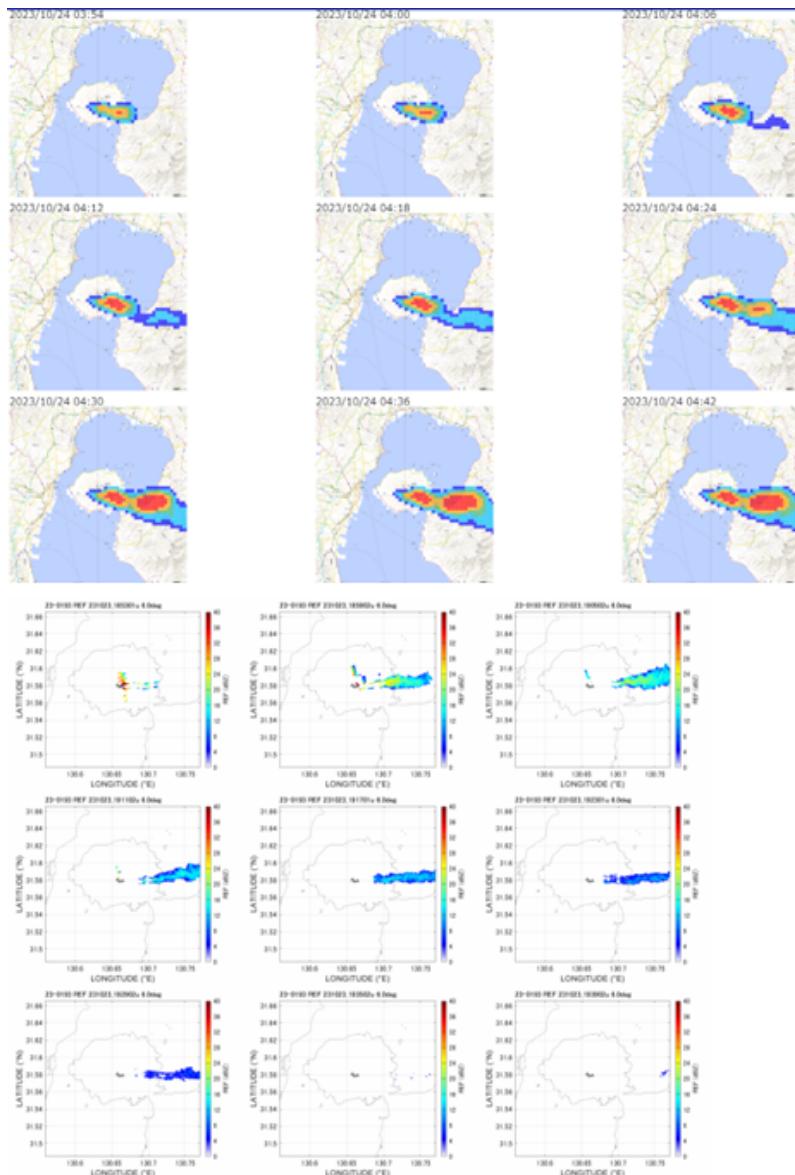


図 2-80 オンラインシステムによる降下火山灰予測（上段）のレーダー解析による結果（下段）の比較。2023 年 10 月 24 日 3 時 46 分の噴火。

### ii) 静穏時における誤った降灰予測

気象庁が定義する「爆発」、「噴火」ではないが、降下火山灰があると予測する場合がある。火山灰噴出率は(10)式に示すように地震動、地盤変動、地震動の補正項の線形結合によって表現される。「爆発」の判定には空気振動を使うので比較的容易であるが、「噴火」は空気振動が小さい、あるいはノイズレベル以下となるので、空気振動を使うことができず、スペクトルと振幅のみを使って判定する。そのため、近地地震を噴火と判定することがある。2-3Hz の周波数帯域にエネルギーを持つ火山性震動も同様に誤判定の原因となる。

地盤変動の場合は、火山灰放出を伴わない膨張-収縮(NED, Iguchi et al., 2022)が発生するときは、火山灰噴出が起きたもとして取り扱われる。

地震動は常に常時微動として存在するので補正項 $\gamma$ を設けているが、天候が悪いために常時微動の振幅が大きくなる時は補正しきれないので、火山灰噴出として取り扱われる。台風や冬季に季節風が強いときがこれに相当する。

### c) オンラインシステムの課題

火山灰拡散予測のためのオンラインシステムは移流拡散予測のための自動化システムであるので、自動化のためにいくつかの問題がある。システムを稼働させることにより課題を抽出した。移流拡散モデルは多くのパラメータの設定を必要とするが、降下火山灰の堆積分布に最も影響を与える要素は風速場と火山灰噴出量である。風速場は、火山灰粒子の移流方向と到達距離を決める。また、噴出量率とその時間関数は、噴煙高度と降下火山灰堆積量に直接的に関係する。ここでは、風速場と噴出率について検討する。

#### ii) 風速場の予測に関する課題

システムでは、気象庁が発表する 5 km メッシュの MSM データをリアルタイムに取得し、最も類似した過去の MSM データに対応する高解像度風速場を用いている。したがって、風速場の現状評価と予測において気象庁データに強く依存する。気象庁の予測のすれば、そのまま本システムのシミュレーション結果の誤差となる。

また、6 時間ごとに気象庁が公表する予測風速場を用いて、時間内挿した風速場を本システムは用いるが、風向が急変する場合は、適切な風速場を用いることができない。

風が弱く噴煙がほぼ直上に上昇する場合は、火山灰粒子が遠方まで到達しにくい状況にあるが、風向が定まらないため、風向の予測が不安定で広い範囲に広がりやすい。

#### iii) 火山灰噴出率の評価に関する課題

火山灰噴出率は爆発地震や火山性微動からなる地震動と地盤変動の線形結合から計算している。地震動については、火山灰放出を伴わない火山性地震や火山性地震の振動を除去するのが課題となる。令和 4 年度の報告書で指摘した 2023 年 1 月から 2 月まで継続したハーモニック微動は火山ガスを放出するが火山灰が含まれなので、火山灰噴出量の評価としては課題となる。また、本報告書で指摘した 2015 年 6 月下旬に頻発したモノクロマティック地震も火山灰噴出量の過大評価となった。火山性震動の特性を考慮して噴出率を決める必要がある。現在のシステムでは A 型地震、BH 型地震と構造性地震の発生の場合についてのみ、火山灰噴出率を 0 としているが、ハーモニック微動もしくはモノクロマティック地震のように特定の周波数帯域にピークを持つ場合も火山灰噴出率を 0 とする必要がある。A 型地震、BH 型地震、構造性地震をうまく判定できない場合もあり、火山灰放出を伴う噴火性火山性地震を正確に抽出するための改善が必要である。

地盤変動についても火山灰放出を伴わない膨張一収縮 (NED、Iguchi et al., 2022) も地盤変動イベント全体の半数を占めるので、注意が必要である。NED に伴うひずみ変化量は日常的に発生する爆発や噴火に伴うひずみ変化量と大差はないが、NED 発生に伴う地震動と空気振動は爆発や噴火と比べ小さいので、NED を自動判定できる可能性がある。また、NED の発生は火山活動状態に依存する。数か月継続する一

連の噴火活動期の初期においては揮発性成分が卓越するので、NED が多く、火山灰放出が卓越する活動期の後半には NED が減少する。

2009 年以降の昭和火口や南岳の噴火活動期には発生していないが、南岳の噴火活動の最盛期には BL 型地震を伴うストロンボリ式噴火と多量の火山灰を連続的に放出する噴火活動が頻繁に発生した。どちら顕著な火山性地震と微動を伴うが、火山灰量の推定式（1）におけるパラメータ $\alpha$ の値はストロンボリ式噴火と多量の火山灰を連続的に放出する噴火活動で変える必要があり、多量の火山灰を連続的に放出する噴火活動における $\alpha$ の値はストロンボリ式噴火に比べて数倍大きい（井口・他、2019）。火山灰噴出率の評価には噴火様式を考慮しなければならないことも今後の課題である。

## 6) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

令和 5 年度は、過去噴火の地盤変動データから得られた膨張継続時間・収縮率の確率分布をもとに次の噴火の発生時刻と規模を確率的に予測し、予測したシナリオを火山灰移流拡散連続化シミュレータの入力に用いるように改良し、噴火発生前の火山灰移流拡散シミュレータを新たに立ち上げた。これによって、噴火発生前に降灰空間分布を確率的に提示することが可能になった。以下では、システムの概要を示した後、噴火シナリオの予測手順とその発生確率の算出方法について述べる。最後に実例を示し、今後の課題をまとめるとする。

### a) システムの概要

本システムでは、一定間隔で火山灰の移流拡散シミュレーションを繰り返し、降灰空間分布を出力する。リアルタイムで観測される伸縮計記録を用いて、噴火時刻と規模についての複数のシナリオを予測する。それぞれのシナリオについて、予測された噴出率と予測時刻の気象場を反映したシミュレーションを実施し、最後に各シナリオの発生確率で加重平均をとった降灰分布を出力する。各シナリオにおいて噴出率と気象場から降灰分布を算出する過程は、令和 4 年度で実装された連続化シミュレータと基本的に同じである。その前段階にあたる複数のシナリオの予測と発生確率の算出が本年度の主な改良点であるため、以下でその詳細を説明する。

### b) 噴火シナリオの作成とその確率

システムでは、桜島有村観測坑道でのひずみ変化（直交方向成分）が  $13 \mu\text{ strain}$  を上回った場合に膨張イベントと判定され、降灰予測を開始する。噴火発生時刻 4 ケース、噴火規模 5 ケースを掛け合わせた計 20 ケースについて降灰シミュレーションを行う。各ケースの発生確率は、2017～2020 年に南岳で発生した爆発の地盤変動データから得られた膨張継続時間・収縮率の確率分布から算出した。令和 4 年度の検証の結果、観測された確率分布は Log-logistic 分布でよく近似できることが判明したため、これを用いた。Log-logistic 分布は確率密度関数 (PDF) や累積分布関数 (CDF) を簡単な解析式で表記できるため、他の分布関数に比べて計算コストが下がるという運用上の利点も持つ。確率分布の推定には、噴火前のひずみ変化が  $>13 \mu\text{ strain}$  を満たす事例のみを用いた（図 2-81）。このとき、噴火確率が最も高くなる膨張継続時間  $t_{max}$  は 43 分であった。

#### i) 噴火発生時刻

噴火発生時刻は、膨張が検知され始めてから現在までの経過時間  $t_{cur}$  に応じて、4 つのケースを設定した。膨張開始からの経過時刻が  $t_{max}$  に達していない場合 ( $t_{max} > t_{cur}$ )、シミュレーション間隔  $d = t_{max} - t_{cur}$  を用いて、 $t_{max}$  前後の 4 ケース ( $t_{max}-d, t_{max}, t_{max}+d, t_{max}+2d$ ) を設定した。一方、膨張開始からの経過時刻が  $t_{max}$  を超えた場合 ( $t_{max} \leq t_{cur}$ ) には、シミュレーション間隔  $d = t_{cur}/2$  を用いて、現時刻以降の 4 ケース ( $t_{cur}, t_{cur}+d, t_{cur}+2d, t_{cur}+3d$ ) を設定した。各時刻  $t$  での噴火発生確率  $p$  は以下の式で算出し、4 ケースの確率の総和が 1 になるように正規化した。

$$p(t) = (\text{CDF}(t+6) - \text{CDF}(t)) / (1 - \text{CDF}(t_{\text{cur}})) \quad (25)$$

$$\text{CDF}(t) = \frac{1}{1+(t/\mu)^{-k}} \quad (26)$$

ここで、 $\mu = 76.6799$ 、 $k = 1.9403$ （図 2-81 左）とした。

### ii) 噴火規模

噴火規模は有村観測坑道の伸縮計記録から推定する。火口方向・直交方向 2 成分の記録を変動率が変わらないとして、上記で想定した噴火発生時刻まで外挿して膨張体積を求める。この膨張体積に対して収縮体積は 1/5 倍、1/2 倍、1 倍、2 倍、5 倍の 5 ケースを想定した。それぞれの発生確率は図 2-81 右に示した確率分布を元に算出し、5 ケースの確率の総和が 1 になるように正規化した。上記で算出した噴火発生時刻 4 ケースの確率と掛け合わせることで、20 ケースの確率マトリックスを作成した。

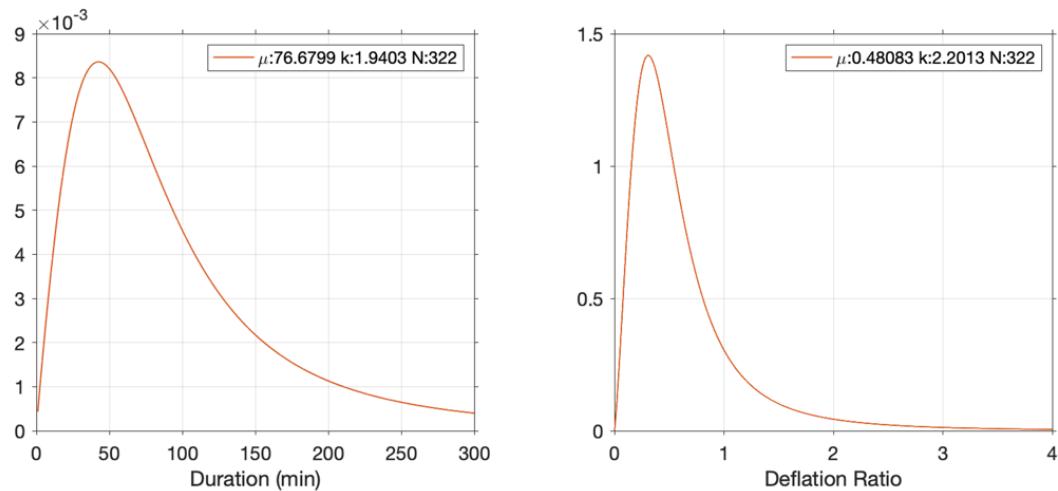


図 2-81 ひずみ記録から得られた確率分布 (Log-logistic 分布)。左：膨張継続時間、右：収縮率。

### iii) 火山灰噴出率の噴煙高度への変換

降灰シミュレーションに入力する噴煙高度は、上記で想定した収縮体積から計算する。収縮源は指數関数的に収縮すると仮定し、噴火開始後の時刻  $t$  での収縮体積を

$$V(t) = V_d(e^{-0.85t} - 1) \quad (27)$$

とした。ここで  $V_d$  は総収縮体積である。この関係式から得られた時間あたりの収縮体積を Iguchi (2016) の経験式（本報告書 (10) 式）にもとづいて質量噴出率に変換する。質量噴出率は Iguchi et al. (2022) の経験式（本報告書 (13) 式）に基づいて噴煙高度に変換する。代表ケースの噴煙高度に応じて計算領域を広域と狭域のいずれかに固定する。なお、質量噴出率が 1000 kg/s を下回った場合、噴出停止とみなすことにする。

### c) シミュレータの出力結果

#### i) Web ブラウザ上の表示

図 2-82 にシミュレータの出力例を示す。2024 年 2 月 14 日 18:30 に発生した爆発（噴煙高度 5000 m）の直前 18:30 時点での降灰予測結果である。この事例では前日の 17:15 から膨張判定が出ており、降灰予測分布が一定間隔で出力される状態にあった。図に示されるカラーマップは単位面積あたりの地表降灰量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) を示す。この分布は 20 ケースの結果をそれぞれのケースの確率で加重平均したものである。Web ブラウザ上では、令和 4 年度より実装されている連続化シミュレータと同様に、ディスクロメータで観測された降灰量との比較も可能である。

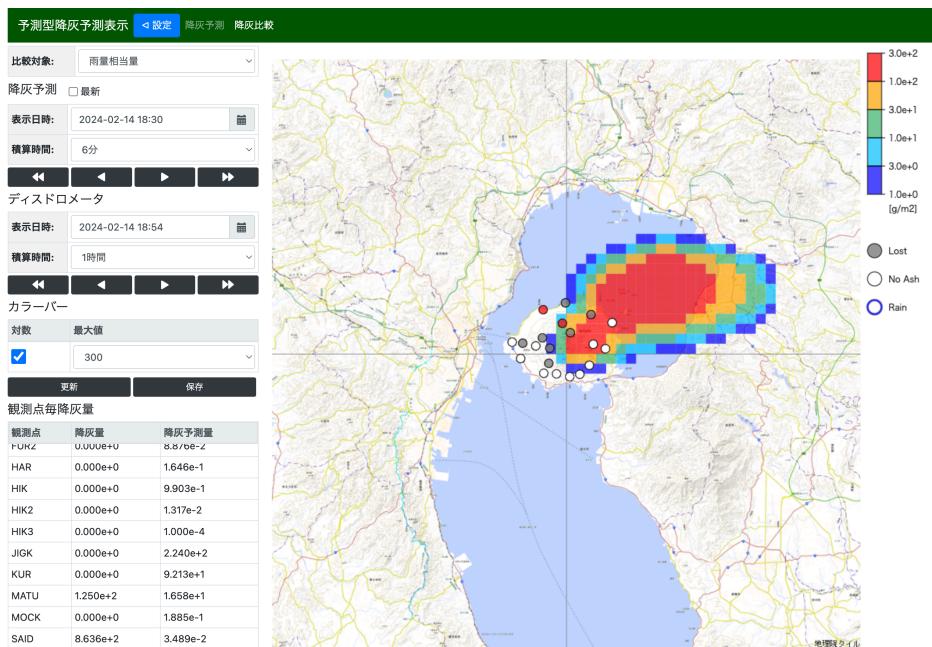


図 2-82 Web ブラウザ上の出力結果（2024 年 2 月 14 日 18:30）。丸で示されるのはディスクロメータの観測点。

#### ii) 降灰予測に関する検討

上記 Web 上には加重平均をとった降灰分布のみが表示されるが、システム上にはシミュレーションを行った 20 ケース全ての出力結果が保持される。図 2-83 左側に図 2-82 の分布の元となった 20 ケースのシミュレーション結果を示す。行が 4 通りの噴火予測時間、列が 5 通りの噴火規模に対応する。各ケースの発生確率は右上のカラーマップ（青）に示す。

現行システムでは 6 分ごとに 20 ケースのシミュレーション結果が出力されている。図 2-84 には膨張判定が確定してから各時刻で予測された噴火規模の時間推移を示す。この事例の場合、膨張開始からほとんど全ての時間において想定されたシナリオの中に実際の噴火規模が含まれていることがわかる。噴火直前には、全シナリオの加重平均や最大確率をとるシナリオの予測体積が実際の収縮体積の 2 分の 1

程度になっており、やや過小評価であるものの、おむね妥当な範囲で予測できていると考えられる。

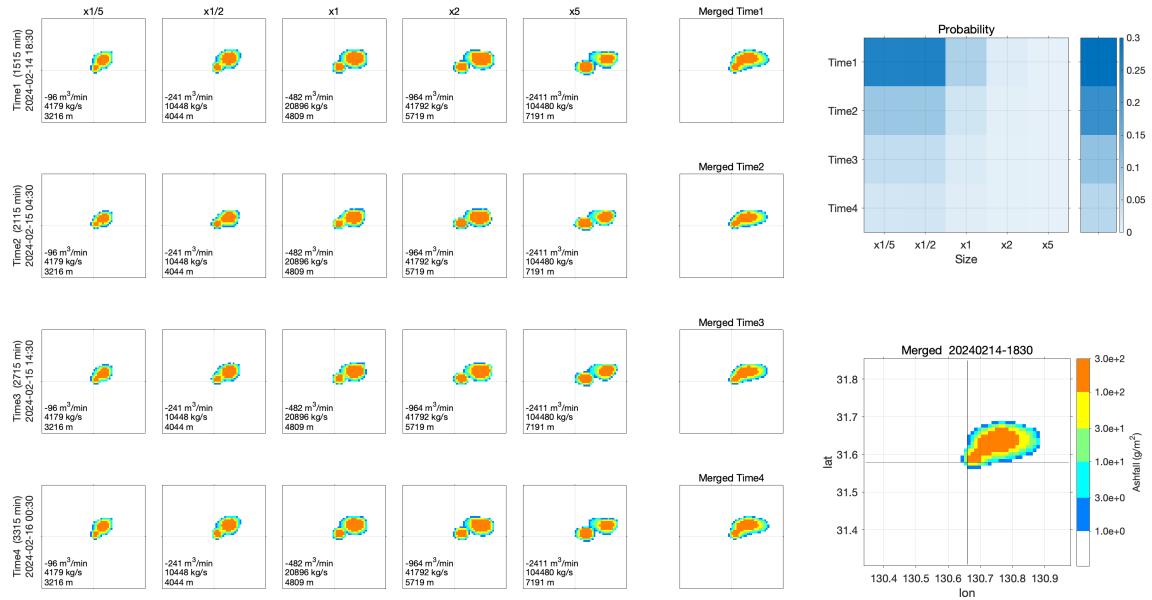


図 2-83 降灰予測分布（図 82）の内訳。右下は図 82 で示したもののは再掲。

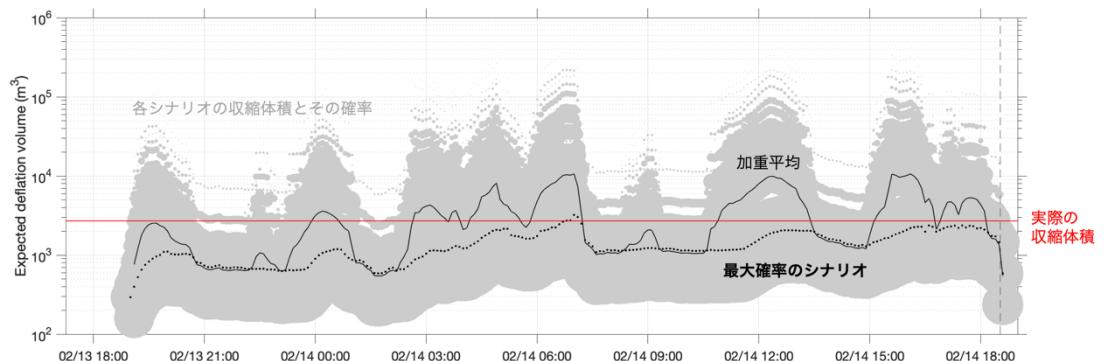


図 2-84 各時刻で計算されるシナリオの予測収縮体積の時間変化。灰色バブルは各時刻の 20 ケースの予測収縮体積（縦軸）とその確率（バブルの大きさに対応）を示す。黒実線は 20 ケースの加重平均、黒点線は 20 ケースのうち最も確率の高いシナリオを示す。赤線が実際の収縮体積である。

#### d) 確率関数の関数に関する課題

システムの大枠が完成し定常的に予測結果を出力できるようになったが、より現実的な予測を行うには今後細かいパラメータの調整やいくつかの改良が必要である。現在、確率算出に用いている確率関数は噴火の条件によらず一律のものを使用しているが、時期やイベントの特徴によって適宜確率関数を変更することを検討する必要があるだろう。特に、比較的短い膨張継続時間（1 時間未満）を有する噴火イベントを多

数繰り返すような時期と、数時間～1日程度膨張が継続する噴火イベントが発生する時期とでは、確率関数は異なっているはずである。

また、より予測精度を上げるために、膨張率の時間変化にも着目したい。特に桜島では噴火発生の直前に地盤変動のトレンドが膨張から停滞・収縮に変化する。このトレンドの変化を検出して予測過程に組み込むことで、噴火予測時刻の制約精度を上げることができると考えられる。

#### e) 火山灰噴出ソースに関する検討

令和5年度は噴火時の火山灰噴出率の予測に向けていくつかの検討を行った。噴出率は前項目で報告した降灰予測システムの入力変数となるため、噴出率の予測精度がシミュレーションの精度に影響する。したがって、噴出率の予測手法を確立・検証する必要がある。本年度は、まず過去噴火の地盤変動データを用いて、噴出率の経験式の構築を試みた。また、噴出率推定をより高精度化するために、地盤変動の圧力源モデルを検討した。

##### i) 噴出率時間関数

噴出率時間関数の構築にあたって、過去に桜島南岳で発生した噴火時の地盤収縮過程を簡単な関数で近似し、その平均的な特徴を捉えるという方針をとった。火口直下に球状圧力源を仮定し（深さは時間変化しないとする）、伸縮計記録を用いて収縮体積の時間変化を推定した。その後、収縮体積の時間変化を指數関数で近似した。このとき、収縮体積 $V$ を時間 $t$ （分単位）の関数として

$$V(t) = A(e^{-Bt} - 1) \quad (27)$$

とした。 $A$ は一回の噴火の総収縮体積に対応する。 $B$ は収縮の時定数を支配するパラメータ（単位： $/\text{min}$ ）である。南岳で2017～2020年に発生した爆発のうち、明瞭な地盤収縮が読み取れた792事例について、パラメータ $B$ の取りうる値を調査した。推定された $B$ の値の頻度分布を図2-85に示す。 $B$ の値は幅広く分布しているが、0.6～1付近にピークをもつ分布となった。全イベントの残差総和が最も小さくなるのは $B=0.85$ の場合であったため（図中横線）、この値を暫定的に経験式に採用した。これによって、総収縮体積 $A$ さえ予測できれば、収縮変動の時間変化を計算することができるようになった。前項目に記載の降灰予測シミュレーションでは、伸縮計のリアルタイム観測と過去データから得られた確率分布から収縮体積を予測している。この予測収縮体積を $A$ として、収縮の時間関数 $V(t)$ を算出し、質量噴出率に変換している。

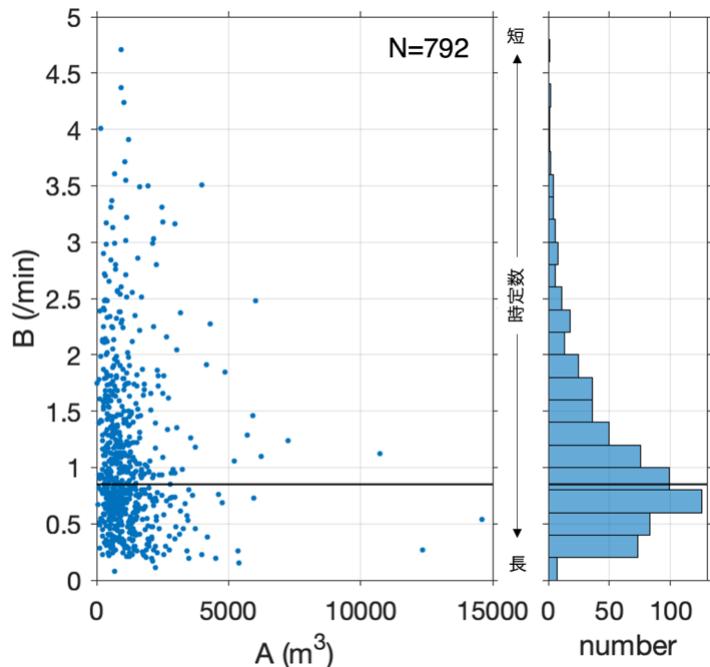


図 2-85 収縮変動の時定数 $B$ の頻度分布。横線は $B=0.85$ を表す。

### ii) 圧力源モデルの検討

桜島のブルカノ式噴火にともなう地盤変動は、多くの場合火口直下の球状圧力源の収縮として解釈される。しかし、一部の噴火では浅部と深部の複数の圧力源が異なる時定数で収縮していることを示唆するひずみ記録が得られている（たとえば Hotta and Iguchi, 2021）。地盤変動記録から収縮体積を見積もって噴火規模を評価する場合、適切な圧力源モデルを用いていないと噴火規模を過小評価してしまう恐れがある。したがって、深さの異なる 2 つの球状圧力源を仮定した簡単なモデルを用いて、観測記録を再現できるのか検討を行った。

2 つの圧力源がそれぞれ指數関数的に収縮すると仮定して、圧力源の深さ、変動量および変動の時定数の 3 パラメータ（2 ソース合わせて 6 パラメータ）を推定した。用いたデータは、有村観測坑道のひずみ記録 2 成分（火口方向・直交方向）である。

図 2-86 に 2020 年 6 月 4 日の爆発時の伸縮計記録と推定した最適解を示す。最適解は、変動のトレンドをある程度再現しているものの、特に火口方向ひずみの変動幅を完全には再現できていないことがわかる。先行研究 (Hotta and Iguchi, 2021) では、噴火後の深部ソースの収縮時に火口直下浅部で膨張変動があったことが指摘されていることを踏まえて、指數関数的に膨張する 3 つ目のソースを追加すると、観測データをよく再現できることがわかった（図 2-87）。

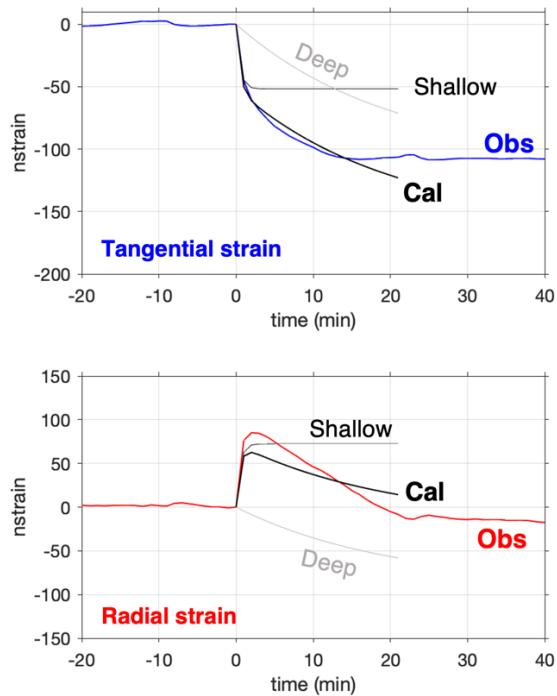


図 2-86 2020 年 6 月 4 日 2:59 の爆発に伴うひずみ記録 (Obs) と深さの異なる 2 つの収縮源による理論変動値 (Cal)。Deep, Shallow はそれぞれのソース単体による変動を示す。上が直交方向成分、下が火口方向成分。

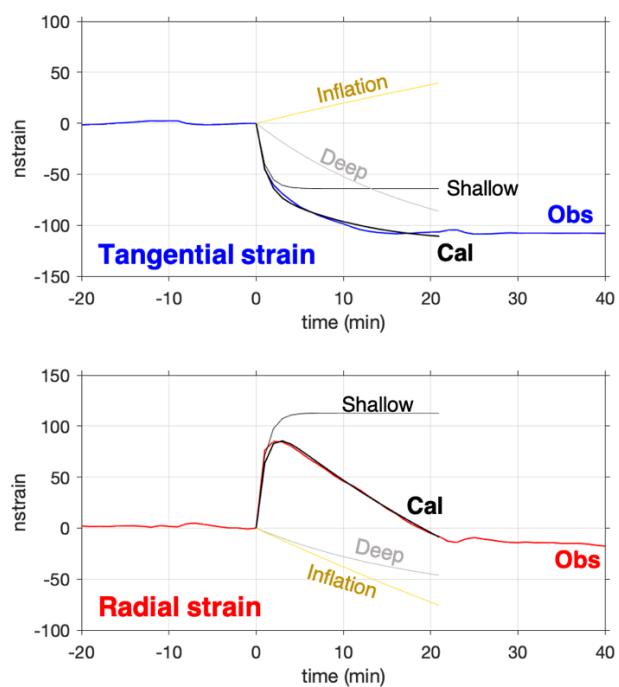


図 2-87 2020 年 6 月 4 日 2:59 の爆発に伴うひずみ記録 (Obs) と 3 つの圧力源 (2 収縮源 + 1 膨張源) による理論変動値。図 2-86 に比べて、観測記録をよく再現できている。

この膨張圧力源の解釈はまだ議論の余地が残るもの、一つの可能性として地盤の粘弾性効果により、見かけ上膨張ソースが見えていると解釈できるかもしれない。噴火発生直後、急激な圧力解放によって浅部でステップ的な収縮が起こるが、その後地盤の粘弾性緩和によってゆっくりと膨張性の変動が生じると考える。思考実験として、球状圧力源の周囲に粘弾性シェルを仮定したモデル (Segall, 2016) を用いて、観測データが再現される条件を検討した。その結果、マグマだまり内のマグマの圧縮性が低く、シェル部分の粘性が  $10^{12} \sim 10^{13}$  Pa・s 程度であれば、膨張性の変動が生じ、変動の時定数を再現できる可能性があることがわかった。

### iii) 今後の課題と展望

噴出率の経験式については、現在非常に単純な仮定のもとに構築されている。そのため、噴火の規模によらず収縮の時定数のパラメータ  $B$  は一意の値をとることになっているが、これについては今後検討が必要である。実際、 $B$  の値は噴火イベントによってばらつきがあるため（図 2-85）、このばらつきを予測誤差に反映させるようにして噴火の規模に応じて  $B$  の値を変える等の工夫を加えるべきだろう。

圧力源モデルについては、粘弾性シェルのモデルを用いて観測波形を再現できるように今後より厳密なパラメータスタディを行う必要がある。また、複数圧力源の関与する噴火イベントについての統計的な調査を実施し、噴火時の各ソースの寄与の統計的な傾向を明らかにすることも望まれる。

## (c) 結論

桜島噴火に伴う噴煙の観測及び解析によって、火山灰放出量の即時把握技術の開発のうち、レーダ観測とディスドロメータによる降灰量観測は火山監視のための主要観測として実装段階にあるといえる。また、地震動と地盤変動を用いた火山灰噴出率即時推定の経験式は連続化シミュレータを稼働させるオンラインシステムに有効に活用できるとともに、同様の灰噴火を繰り返す火山においても有効であることが確かめられた。火山灰の凝集を考慮する経験式が発案され、降下火山灰の予測の高精度化が図られた。

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、これをもとに求められた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から降灰分布を予測するシステムを開発し、試験運用を開始した。

これらのシステムにおける課題も抽出できたので、令和 6 年度以降、改善を図っていくとともに、降灰予測を防災に活用するためのセミナーを今後も継続して浸透を図る必要がある。

## (d) 引用文献

- 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.

- ・ 真木雅之・井口正人 (2022) 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, 京都大学防災研究所年報, 65, 77–96.
- ・ Iguchi, M. (2016) Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash - case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan -, Jour. Disast. Res, 11, 4–14.
- ・ Iguchi, M., Yamada, T., Tameguri, T. (2022) Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by non-eruptive deflation, Frontiers in Earth Science, 10, 727909.
- ・ 井口正人 (2013) 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, 1–8.
- ・ Degruyter, W., Bonadonna, C. (2012) Improving on mass flow rate estimates of volcanic eruptions, Geophys. Res. Lett., 9, L16308.
- ・ Nakayama, H., and T. Takemi (2020) Development of a data assimilation method using vibration equation for large-eddy simulations of turbulent boundary layer flows. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, Vol. 12, e2019MS001872, doi:10.1029/2019MS001872.
- ・ Nakayama, H., and T. Takemi (2024) Large-eddy simulation of plume dispersion in a turbulent boundary layer flow generated by a dynamically controlled recycling method. Atmospheric Science Letters, e1204, doi:10.1002/asl.1204.
- ・ Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai (2011) LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries. Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 50, pp. 1692–1712, doi: 10.1175/2011JAMC2567.1.
- ・ Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai (2012) Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations. Atmospheric Science Letters, Vol. 13, pp. 180–186, doi: 10.1002/asl.377.
- ・ Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai (2016) Development of local-scale high-resolution atmospheric dispersion model using large-eddy simulation. Part 5: Detailed simulation of turbulent flows and plume dispersion in an actual urban area under real meteorological conditions. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 53, pp. 887–908, doi: 10.1080/00223131.2015.1078262.
- ・ Takemi, T., T. Yoshida, S. Yamasaki, and K. Hase (2019) Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. SOLA, Vol. 15, pp. 22–27, doi:10.2151/sola.2019-005.

- Takemi, T., T. Yoshida, M. Horiguchi, and W. Vanderbauwhede (2020) Large-eddy-simulation analysis of airflows and strong wind hazards in urban areas. *Urban Climate*, Vol. 32, 100625, doi:10.1016/j.uclim.2020.100625.
- Yoshida, T., T. Takemi, and M. Horiguchi (2018) Large-eddy-simulation study of the effects of building height variability on turbulent flows over an actual urban area. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 168, pp. 127–153, doi: 10.1007/s10546-018-0344-8.
- Hiraoka, H. (2009) Modeling of a one-equation for plant canopy flows, *Journal of Environmental Engineering*, 74, 603–612.
- Maruyama, T., Iguchi, M. (2023) Impact resistance test of cladding by using gravel, *Jour. Disast. Res.*, 18, 918–923.
- Durant, A. J., Brown, R. J. (2016) Chapter 3 – Ash Aggregation in Volcanic Clouds, In *Volcanic ash*, 53–65.
- Morton, B. R., G. Taylor, J.S. Turner (1956) Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, *Proc. Roy. Soc. Ser. A.*, 234, 1–23.
- Wilson, L. (1976) Explosive Volcanic Eruptions – III. Plinian eruption columns. *Geophys J R Astr Soc*, 45, 543–556.
- Sparks, R. S. J. (1986) The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bull Volcanol*, 48, 3–15.
- Woods, A. W. (1988) The fluid dynamics and thermodynamics of eruption columns. *Bull Volcanol* 50, 169–193.
- Suzuki, T. (1983) A theoretical model for dispersion of tephra, D. Shimozuru, I. Yokoyama (Eds.), *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, TERRAPUB, 95–113.
- Wilson, L., R. S. J. Sparks, T.C. Huang, N.D. Watkins (1978) The control of volcanic column heights by eruption energetics and dynamics, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 83 (B4), 1829–1836.
- Carey, S., RSJ Sparks (1986) Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns, *Bulletin of volcanology* 48, 109–125.
- Sparks, R. S. J., M. I. Bursik, S. N. Carey, J. S. Gilbert, L. S. Glaze, H. Sigurdsson, A. W. Woods (1997) *Volcanic Plumes*, Chichester, Wiley and Sons, United Kingdom, p. 574.
- Dellino et al. (2005) The analysis of the influence of pumice shape on its terminal velocity, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L21306.
- Bonadonna, C., GGJ Ernstd, RSJ Sparks (1998) Thickness variations and volume estimates of tephra fall deposits: the importance of particle Reynolds number, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81 (3–4), 173–187.

- Suh, Sung-Ho, Masayuki M., Iguchi, M., Dong-In Lee, Yamaji, A., Momotani, T. (2019) Laboratory analysis of volcanic ash particles using a 2D video disdrometer, Atmospheric Measurement Techniques, 12, 5363–5379.
- 坂井紀之・寺谷拓治・内田良始・吉村知祐・田中剛 (2020) 降灰量推定精度向上のためのドローンを用いた火山灰落下実験, 砂防学会誌, 72, 35-41.
- 井口正人・為栗健・平林順一・中道治久 (2019) マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山, 64, 33-51.
- Iguchi, M., Nakamichi, H., Takishita, K., Poulidis, A. P. (2022) Continuously operable simulator and forecasting the deposition of volcanic ash from prolonged eruptions at Sakurajima Volcano, Japan, Jour. Disast. Res., 17, 805-817.
- Hotta, K., Iguchi, M. (2021) Tilt and strain change during the explosion at Minami-dake, Sakurajima, on November 13, 2017, Earth, Planets and Space, 73:30
- Segall, P. (2016) Repressurization following eruption from a magma chamber with a viscoelastic aureole, Journal of Geophysical Research: Solid Earth 121(12), 8501-8522.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
噴火発生予測型火山灰拡散連続予測シミュレータ AshFallEst	地盤変動データを用いて、火山噴火発生前に降灰量の予測を自動で行うソフトウェア

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和 6 年度の業務計画案

令和 6 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 2 年目に当たる。令和 6 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、令和 5 年度に高精度化した連続化火山灰拡散予測シミュレ

ータが稼働しているオンラインシステムに加えて、令和6年度に新たにサーバーを調達して連続化シミュレータと同環境を構築して、並列計算化により予測シミュレーションの高速度化をはかる。令和5年度に試験導入した噴火発生前の噴火確率分布を組み込んだ噴火発生前の確率的降灰分布予測オンラインシステムの運用をする。さらに、オンラインシステムの結果を自治体において閲覧可能にして、自治体の防災担当者の意見聴取することで、成果の普及に務める。

#### (a) 業務計画、実施方法

業務は、以下の6項目について実施する。

##### 1) プロジェクトの総合推進

当該プロジェクトと関連する「課題C サブテーマ3」および「課題D サブテーマ3」と連携して、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による結果を自治体において常時閲覧可能にして、自治体の防災担当者の意見を聴取する。

##### 2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてレーダ観測を継続し、必要なメンテナンス作業（保守点検作業）も併せて行う。これまでに桜島を取り巻くように設置したディストロメータによる降灰観測を継続することにより、降灰量の時間変化を把握する。また、噴火頻発期や規模の大きい噴火が発生したときには火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、XバンドMPレーダにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係について、さらに多くの噴火事例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による噴煙柱の観測を実施し、既設レーダ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し、必要なメンテナンス作業（レーザー修理等）も併せて行う。ライダーで観測可能な火山灰消散係数の上限を決定した上で火山灰消散係数について気候学的解析を行い、大気環境常時監視局データとの照合を行う。火山灰の輸送拡散数値モデルを検証するためのデータセットを引き続き作成するとともに、消散係数と火山灰噴出量の関係を検討する。

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

### 3) 火山灰拡散予測の高速度化技術開発

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。

### 4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

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

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

火山周囲の気流や形状の影響を受けて変化する火山レキの空力特性を取り込んだ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。

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

### 5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発

整備済みの連續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。Xバンドレーダー観測による噴煙高度やディスクロメータにより得られた地上降灰量とシミュレーション結果を照合する。

### 6) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

桜島における過去の地盤変動データを整理し、火山噴火に前駆する地盤変動継続時間および圧力源の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。圧力源の再検討を継続することで体積変化量推定の高精度化を図る。このデータベースをもとに、前年度までに構築した噴火の発生時刻と規模の推定のための確率分布式の高精度化を進めることで、導入済みの噴火発生前の確率的火山灰拡散予測シミュレータの高度化を進める。なお、これらの項目の実施は運用中の確率的火山灰拡散予測シミュレータを運用しているサーバーに加えて、新たにサーバーを調達して連續化シミュレータと同じ環境を構築することで並列計算化により予測シミュレーションの高速度化をはかる。

## 7) 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。

### (b) 目標とする成果

地震・地盤変動の観測データから得られる火山灰噴出率と高解像度風速場データを参考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なるとともに、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

### (1) 業務の内容

#### (a) 業務題目

火山災害対策技術の開発 「火山災害対策のための情報ツールの開発」

#### (b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人 防災科学技術研究所 火山研究推進センター	担当機関	参事 研究統括 副センター長 センター長 研究員 客員研究員	中田節也 宮城洋介 藤田英輔 清水 洋 棚田俊收 宮村正光
株式会社大林組 技術本部 技術研究所	参加機関	副部長 上級主席技師	諏訪 仁 大塚清敏 野畠有秀
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	研究管理幹 研究管理幹 主任研究員 研究員 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 山河和也 佐藤明夫
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 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

#### (c) 業務の目的

本業務では、火山災害に関わる自治体の防災担当者らが、災害発生時に適切な初動対応及び防災活動を行うことを支援するための「火山災害対策のための情報ツール（以下、「情報ツール」という。）」を開発することを目的とする。情報ツールとは火山災害対策のために必要となる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。

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

- a) 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。
- b) 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。
- c) 自治体を対象とした火山対策の現状を調査した。
- d) 都市部の施設に対する降灰影響評価実験の実験計画を作成した。

2) 平成 29 年度：

- a) 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。
- b) 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。
- c) 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。
- d) 都市部の施設に対する降灰影響評価実験を行った。
- e) 登山者動向把握実験へ参加した。

3) 平成 30 年度：

- a) 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。
- b) 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。
- c) 自治体を対象とした火山対策の比較・分析を行った。
- d) 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。
- e) 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。
- f) 登山者動向把握実験へ参加し、得られた登山者動態データの火山防災対策への利用に関して検討した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

- a) 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。
- b) 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。
- c) 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。
- d) 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。
- e) 避難・救助支援コンテンツの試作版を開発した。
- f) 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。

5) 令和 2 年度：

- a) 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。
- b) 降灰被害予測コンテンツの試作版の高度化を実施した

c) 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。

d) 避難・救助支援コンテンツの試作版の高度化を実施した。

e) 避難・救助支援において重要な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。

6) 令和3年度：

a) 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。

b) 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。

c) 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。

d) 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。

e) 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。

f) 退避壕等の耐衝撃実験を実施し、建物の耐衝撃性能の補強方法について検討を行った。

7) 令和4年度：

a) 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。

b) 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。

c) 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。

d) 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。

e) 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。

8) 令和5年度：

a) 周知啓発教育用コンテンツの活用方法の検討を行った。

b) 近年発生した海外での火山災害について災害の進行に関するタイムラインなどを含めた情報の収集を行った。

c) 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した。

d) 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った。

- e) 過去の日本の主要噴火災害のうち、有珠火山の2000年噴火の時間経過を空間地理情報としてまとめた。
  - f) 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した。
  - g) 待避壕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した。
- 9) 令和6年度：
- a) 防災担当者などにヒヤリング調査を実施するとともに、自治体の図上訓練や実働訓練に参加し、周知啓発教育用コンテンツに対するニーズ把握を行うことにより、コンテンツの整理と充実を行う。
  - b) 前年度までに実施された降灰影響評価実験や降灰計算の結果等をGIS上で表示方法の検討と同時に、降灰被害の補充計算を実施し、GIS上で閲覧可能なコンテンツの開発および拡充・改善を行う。
  - c) 前年度までに実施した登山者動向把握実験及び状況共有の結果をもとに、避難支援コンテンツの開発をさらに進める。また、避難壕などの実験をさらに実施し、これまでの実験結果をもとに耐衝撃対策に資する情報を整理する。
  - d) 前年度までに得られた情報コンテンツに関する研究成果を、JVDNを介して防災関係者にわかりやすく伝えるための方策を検討する。また、過去の噴火災害のデータベース化を続け、噴火災害評価への活用法を検討する。
- 10) 令和7年度：
- a) 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。
  - b) 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。
  - c) 避難・救助支援コンテンツの社会実装として、自治体の避難計画への反映を行う。

(e) 令和5年度における業務の方法

令和5年度の業務計画に従って以下の業務を遂行した。

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った。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った。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った。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った。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った。

本コンテンツによる情報発信の在り方を検討するために、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した。

## 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した。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した。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った。さらに、これまでの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した。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した。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した。

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、昨年度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した。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った。

## 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った。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した。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した。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した。

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壕等の対策に資する実験結果の整理や既存退避壕の情報整理等を行った。

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した。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った。

## 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こととしていた。令和5年度においては、該当事例はなかった。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、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していた。令和5年度においては、該当事例はなかった。

## (2) 令和5年度の成果

### (a) 業務の要約

本年度は本プロジェクトの7年目に当たり、本課題としてはこれまで続けてきた情報ツールの3コンテンツ（周知啓発教育用コンテンツ、降灰被害予測コンテンツ、および、避難・救助支援コンテンツ）試作版の高度化の終了時期に当たる。以下に3つのコンテンツ試作版の高度化を通して得られた成果について示す。

### (b) 業務の成果

#### 1) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

##### a) 周知啓発教育用コンテンツ試作版の高度化

今年度は、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った。初めにページのレイアウト・構成について修正を加えるとともに、防災担当者が必要な情報を検索しやすいようにQ&A形式の「よくある質問」ページを作成した（図3-1）。この「よくある質問」ページは、これまで防災担当者へのヒアリング調査や直接いただいた質問などを「訓練」や「火山灰対策」などの項目に分け、回答や参考となる資料のリンクや情報を掲載した。これにより防災担当者が火山防災業務などで疑問に感じたことを容易に検索することができる。今後は、さらなるヒアリング調査などで得られた質問や防災担当者が疑問と感じていることを整理し、このページを更新していく予定である。

訓練

Q. 訓練シナリオ作成で、どのように作成してよいかわからない。

A. 気象台などに相談すると警戒レベルに関するシナリオなどを提供いただけます。また、過去の災害事例や火山専門家に相談してみるのもよいでしょう。

▶ クロノロのページ

火山灰対策

Q. 火山灰が降ると車の通行に影響はありますか？

A. 2016年に国土交通省九州地方整備局によって行われた実験や山梨県で行った実験では通行に支障があることが確認できました。過去には火山灰を対象に鹿児島市で実験も行われています。

▶ 火山灰堆積地での現地調査における自動車走行上の留意点

▶ 大量軽石火山灰を想定した車両走行・道路舗装作業検証実験

▶ 火山灰走行実験について

Q. 火山灰の除灰に関する資料はありますか？

Q. 火山灰はパソコンなどに影響を及ぼしますか？

図 3-1 「よくある質問」のページ

今後の利用状況を把握するためにサイトへのアクセスを記録できるよう図 3-2 に示すような画面が初めてサイトにアクセスした際に表示できるようにした。また、この機能は強制になるとサイトへのアクセスをあきらめるユーザーが出ることを考慮し、「アンケート」という表現にするとともに、任意に入力できるものとした。



図 3-2 アクセス状況の把握機能

ページの情報更新状況や利用者に推奨するコンテンツをアピールできるように推奨コンテンツに「PICK UP」を付与し、ほかの情報よりも優先度をつけて表示ができる機能を追加した(図 3-3)。この機能によって、利用者に最新の情報や伝えたい情報をわかりやすくすることができた。



図 3-3 情報の優先度付与機能

防災行政機関へのヒアリング調査などから、前述の「よくある質問」ページと関連して、これまでの研究成果に関連するニーズが高いことが分かった。そこで、コンテンツの充実化として、「火山防災対策を進めるうえで役立つ資料集」のページを構築した(図 3-4)。このページでは主に防災科学技術研究所と富士山科学研究所が実施してきた国際ワークショップや国際シンポジウムの報告書、工学系学会などによる火山防災に関連する報告書、次世代火山研究プロジェクトで実施した火山防災に関する実験などの研究成果を閲覧できるページとした。

研究題目	出典
国際シンポジウム2010「火山と植物」報告書	出典: 山梨県富士山科学研究所
国際シンポジウム2014報告書「安全で快速な富士登山に求められること」	出典: 山梨県富士山科学研究所
国際シンポジウム2015「火山地域の観光と防災」報告書	出典: 山梨県富士山科学研究所
火山災害軽減の方策に関する国際ワークショップ2015 報告書「火山地域の観光と防災」	出典: 山梨県富士山科学研究所
国際シンポジウム2016「堆積物から噴火の歴史を読み取る」報告書	出典: 山梨県富士山科学研究所
火山災害軽減の方策に関する国際ワークショップ2017 報告書「火山監視と防災」	出典: 山梨県富士山科学研究所
国際シンポジウム2017「火山噴火と防災対応」報告書	出典: 山梨県富士山科学研究所
国際シンポジウム2018「火山モニタリング観測と火山活動予測」報告書	出典: 山梨県富士山科学研究所
火山災害軽減の方策に関する国際ワークショップ2019報告書「火山噴火の危機管理-国内外の事例から-」	出典: 山梨県富士山科学研究所
国際シンポジウム2019「火山噴火とリスクコミュニケーション」報告書	出典: 山梨県富士山科学研究所
火山災害軽減の方策に関する国際ワークショップ2021「火山における登山者の安全確保」	出典: 山梨県富士山科学研究所
国際シンポジウム2021 富士山登山における噴火時の安全確保	出典: 山梨県富士山科学研究所
国際シンポジウム2022 富士山地域DX～山岳観光と次世代通信～	出典: 山梨県富士山科学研究所

#### 研究成果について

- 土木学会地盤工学委員会火山工学研究小委員会(2012)実発的な火山噴火に対する降灰や土石流が社会資本に与える影響と対策に関する調査研究 活動報告書, 土木学会: [報告書](#)
- 日本建築学会火山災害対策特別調査委員会(2018)「火山災害対策特別調査委員会」活動報告書, 日本建築学会: [報告書](#)

図 3-4 「火山防災対策を進めるうえで役立つ資料集」のページ

最後に、前年度から継続して実施しているリンク情報の検証を行った。その結果、今年度も行政のページや防災科学技術研究所が提供する火山防災情報に関するページへのリンクなどが切れていることを確認し、該当するページを検索してリンクの修正を行った。防災担当者が安心して利用できるサイトにするためには、リンク状況の調査は、定期的に行う必要があり、今後も継続していく必要がある。

#### b) 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、今年度は図上演習や防災訓練の機会で利用する上で必要な情報を収集した。初めに2023年10月に有珠山周辺の自治体(伊達市、壮瞥町、洞爺湖町)に訓練シナリオ作成や訓練実施での課題について、ヒアリング調査を行った(図3-5)。その結果、有珠山周辺では、自衛隊OBの方が再雇用として市町の防災担当者として赴任しており、災害対応の専門家が訓練シナリオを作成している。訓練実施については、図上訓練と実動訓練を分けて実施していることや実動訓練実施に際して、高校と連携して実施する取り組みを行っていることが分かった。しかし、ブラインド型ではない訓練方法に課題を感じていることやCOVID-19中は対面での訓練が実施できなかつたため、災害対応における情報伝達や災害対策本部設営の手順の確認を中心とした訓練となっていることが分かった。

北海道駒ヶ岳を有する森町では、10月5日に情報伝達を中心とした実動訓練を実施した(図3-6)。そこで、訓練の様子と訓練担当者にヒアリング調査を実施した。訓練では、COVID-19明け後の訓練ということもあり、手順を確認する目的として実施しており、手順を確認することができた。しかし、事前に用意された台本があるため、台本通りの進行となり、また用意した地図などが活用されていないなど、災害対応の課題を把握することが難しい訓練となつた。これは、久保他(2020)<sup>1)</sup>で指摘されている通り、事前の台本に基づいた訓練では課題把握することが難しいため、訓練実施に際して、訓練参加者に失敗をして課題を把握することが訓練の目的であることを共有し、それが災害の状況を想定しながら、訓練に参加するような取り組みが必要である。防災訓練のコントローラーにヒアリング調査を行つたところ、今回の訓練を通じて、訓練シナリオに漏れがあったことを確認しており、町単位で訓練を行う際に、担当職員が限られているため、いちから付与情報などを作つて訓練を実施することは難しいことが分かった。



図 3-5 有珠山周辺自治体へのヒアリング調査



図 3-6 森町での防災訓練の様子

次に 10 月 24 日に北海道庁が支援する図上訓練を見学して、訓練実施の課題や訓練で必要となる情報などの把握を行った(図 3-7)。この訓練は、北海道庁が毎年道内の常時観測火山を中心に協議会単位での図上訓練を支援している取り組みで、令和 5 年度は雌阿寒岳火山防災協議会を対象に実施した。この訓練では北海道庁の防災担当者がコントローラーとなり、市町村の防災担当者や関係機関がプレイヤーとなって対応するものである。この訓練では、降灰範囲や道路状況などを紙地図と北海道庁の防災情報システム(図 3-8)を使って状況把握が行われていた。また気象庁札幌管区気象台の参加者が噴火に関する情報を適宜付与し、その付与情報に基づき関係期間や市町の対応を行っていた。このように実践に近い形で訓練を行うことで、訓練の目的である火山災害対応の課題把握と関係機関との連携方法、情報共有方法などの確認ができた。また、防災担当者の少ない町や村に対しては、北海道庁職員が支援して訓練が行われており、実災害においても同様の支援が必要となることなどが確認できていた。この訓練では離れた拠点との情報共有として WEB 会議のアプリケーションが利用されており、COVID-19 を受けて、WEB 会議アプリの利用が容易になったため、拠点間の情報共有などもスムーズに実施していた。



図 3-7 雌阿寒岳火山噴火総合防災訓練の様子

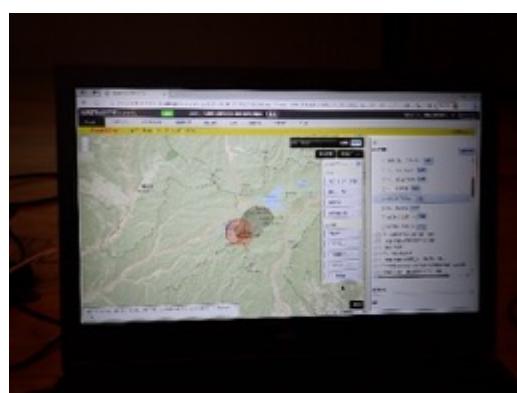


図 3-8 北海道庁の防災情報システムによる情報共有

訓練実施後に北海道庁危機対策課の方に雌阿寒岳火山噴火総合防災訓練での課題などについて、2024年1月29日にヒアリング調査を行った。ヒアリング調査から、COVID-19以降ということもあり、以前までの課題などに基づいた訓練実施することができなかつたことなどが挙げられた。そのため、令和6年度の訓練に向けて準備を進めていることを伺った。また今回のヒアリング調査では、北海道は以前から火山専門家と自治体とが連携した会議や訓練、防災対策を行っており、ほかの地域と比べて十分な支援体制が整っていることを確認した。

2024年2月14, 15日に北海道十勝岳火山防災協議会で行われた防災訓練の見学を行った。この訓練では、毎年十勝岳周辺自治体や関係機関が現地対策本部となる大雪消防組合美瑛消防署で図上訓練の実施と市町村でそれぞれの防災訓練を実施しており、前年度のヒアリング調査を基に見学を行った。十勝岳噴火を想定した訓練では主に火口周辺の観光施設の対応と融雪型火山泥流への対応を中心に行われていた。2月14日は美瑛町大雪消防組合美瑛消防署で関係機関による図上訓練の様子を見学し(図3-9)、十勝岳の状況把握体制や噴火警戒レベルに基づいた防災体制を確認した。15日は美瑛町内の小学校での自衛隊の支援による避難訓練の様子を見学し(図3-10)、上富良野町では融雪型火山泥流によって被害を受けた状況を想定した救助訓練(図3-11)と上富良野町役場の災害対応訓練(図3-12)を見学した。特に上富良野町での災害対応訓練では町単位で状況付与を行っており、訓練シナリオも全体区の訓練と連携したシナリオを独自に作成して行っており、市町村単位の訓練の中でレベルの高い訓練が実施されていることを確認した。訓練後ヒアリングした結果、上富良野町では自衛隊の駐屯地があるため、日ごろから自衛隊と連携して危機管理に関する議論などを行っているため、災害対応への意識が高いことを確認した。



図3-9 大雪消防組合美瑛消防署



図3-10 自衛隊支援による避難訓練



図 3-11 融雪型泥流を想定した救助訓練

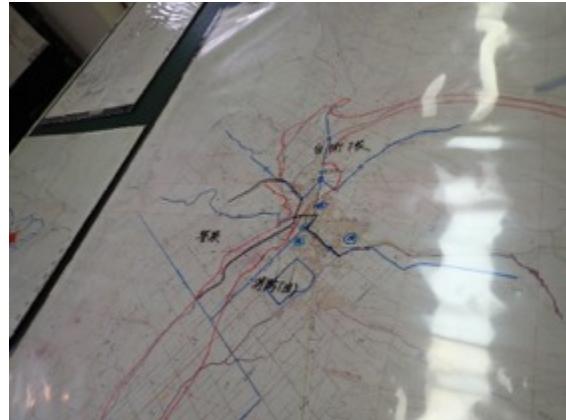


図 3-12 上富良野町での状況集約状況

山梨県による火山防災訓練についても訓練の見学と山梨県防災危機管理課の訓練担当者に訓練実施に関する課題等をヒアリング調査した。富士山では、12月10日に富士山の噴火警戒レベルが上がったことを想定して、山梨県と富士北麓地域の市町村とで情報共有訓練が行われ、忍野村では観光客を想定した避難誘導訓練、住民を対象に火山灰の上を歩いてみたり触ったりする体験イベントなどが行われた(図3-13)。情報共有訓練では主に防災担当者間で伝達手段と内容、各市町村では噴火警戒レベルに紐づいた対応を確認した。一方、忍野村では、富士山噴火警戒レベルが4に引き上げられた状況と降灰が発生したことを想定して、観光客役の役場職員に降灰対策用に傘を配布して、所定の避難場所への誘導を行う訓練を行い(図3-14)、手順を確認した。

訓練実施後、山梨県防災危機管理課の訓練担当者にヒアリング調査を行い、訓練の課題等を確認した。その結果、今回の訓練で忍野村の協力を得て、住民などを対象にした訓練を実施したが、夏や秋に実施される地震災害などを想定した防災訓練で住民や自主防災組織、消防団の協力を得て実施しており、さらに冬にも住民参加の訓練を実施するには協力を得るのが難しいという課題があることを確認した。また、防災担当者を対象とした図上訓練については、訓練シナリオを作成することの難しさを課題と感じていることが分かった。これは令和4年に山梨県庁で内閣府(防災担当)の支援を受けて、噴火を想定した図上訓練が行われた(図3-15, 3-16)。この時山梨県の防災担当者はプレイヤーとして対応し、コントローラーは内閣府(防災担当)から依頼を受けた業者が担当した。こういった訓練により噴火対応の課題や現地本部との連絡体制などの課題については把握することができた。このため、この時作成された訓練シナリオをベースに令和5年度の情報伝達訓練で災害対応の確認などが行われているが、市町村を対象にした訓練シナリオにはなっていないため、市町村用の訓練シナリオの必要性を感じていた。また内閣府(防災担当)の支援した訓練では、関係機関などの付与情報はあったが、市町村からの付与情報はそれほどなかったため、実際の対応ではそういう情報が増えて対応が必要になることから、この時の訓練シナリオの改善をしたいという要望があった。



図 3-13 火山灰体験イベント



図 3-14 傘を使った降灰時避難の様子



図 3-15 令和 4 年 10 月 山梨県庁での図上訓練(プレイヤー)



図 3-16 令和 4 年 10 月 山梨県庁での図上訓練(コントローラー)

上記以外の那須岳や富士山、桜島周辺の市町の防災担当者にも火山災害を想定した訓練実施の際の課題について、ヒアリング調査を実施した。これまでの訓練を見学して把握した課題と同様に火山災害では広域避難のケースもあるため、市町村単体ではなくてはならないため、ステークホルダーの調整が難しい点などが挙げられた。また訓練を実施するためのノウハウや訓練シナリオの作成方法が分からぬなどの課題が挙げられた。

以上のように今年度は主に防災訓練を実施するうえでのニーズについてヒアリング調査を行った。その結果、以下のニーズがあることがわかった。

- ・ 市町村を対象とした訓練シナリオ(付与情報など)が必要
- ・ 市町村で図上訓練を行う際に、マンパワーが十分でないため、都道府県などの支援があるとよい。
- ・ 火山以外の自然災害の訓練も考慮した調整

今後防災訓練を実施する際に周知啓発教育用コンテンツを利活用してもらうためにこれらのニーズに対応したコンテンツを整備し、掲載していく必要があることを確認した。

### c) コンテンツの充実化

今年度は、前年度のヒアリング調査などから火山灰に関するコンテンツの要望が高いことが分かった。そこで、今年度は火山灰に関するコンテンツを中心に収集を行った。

2023年10月に桜島で噴火が見られたことから、噴火の動画や降灰の状況に関するデジタルコンテンツを収集した(図3-17, 3-18)。



図3-17 2024年10月の桜島噴火の様子



図3-18 衣類に付着した火山灰

2024年2月に国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所が火山灰車両走行体験演習を実施し、その際、火山礫の清掃実験を行った。これは、道路上に積もった火山礫をロードスイーパーでどの程度除去できるかを把握することを目的に実施した(図3-19, 3-20)。貴重な機会で都道府県などが火山灰対応として、ロードースイーパーを使って検証を行っており、行政機関における火山灰対策の貴重な情報となる。そこで、富士砂防事務所の許可をいただき、デジタルコンテンツの収集を行った。厚さが約5cm程度になると一度での除去は難しく(図3-21)、約3cm程度ではある程度除去できることを確認した(図3-22)。しかし、火山礫は火山灰や通常の道路清掃での除去物よりも重いため、ロードスイーパーのみでは効率的ではないことから、ホイールローダーなどと組合せた除灰対応が必要であることが分かった。



図 3-19 ロードスイーパー



図 3-20 火山礫除去の様子



図 3-21 火山礫厚さ約 5cm の除去状況



図 3-22 火山礫厚さ約 3cm の除去状況

2024 年 3 月に垂水市に火山灰対策に関するヒアリング調査を行うとともに降灰対策の状況や過去の噴火災害の碑を見学した(図 3-23～3-26)。垂水市では桜島の降灰の影響を強く受けることから、降灰除去事業により様々な火山灰除去対応を実施しており、また、農作物対策として防災営農対策事業を実施しており、事業内容と火山灰対策がなされたビニールハウスを見学した。さらに、令和 5 年度に垂水市桜島火山爆発総合防災訓練を実施し、その訓練で、垂水市牛根地区で図上訓練を行い、地区防災計画及び個別避難計画の検証を実施していた。このように垂水市でも火山灰対策や大規模噴火に備えた対策を実施していることが分かった。



図 3-23 垂水市役所屋上での降灰観測



図 3-24 防災営農対策事業によるビニールハウス



図 3-25 垂水市牛根麓の埋没鳥居



図 3-26 安永噴火を伝える櫻嶋焼亡塔

近年発生した海外での火山災害の研究成果や災害対応などの情報を収集するためにグアテマラのアンティグア市で開催された Cities on volcano 12 に参加し、火山灰による被害や火山災害時の情報把握に関する手法などについてヒアリング調査等を行った。ヒアリング調査では、国家防災調整庁 CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres) と日本の気象庁に当たる INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala) の職員から、グアテマラにおける火山防災対策と予報業務等について情報を収集した(図 3-27～3-29)。グアテマラでは、INSIVUMEH からの情報に基づき CONRED から避難等の情報が発出され、避難指示や災害対応が行われ、現地での応急対応や救出活動、避難者への物資供給が一元的に行われていた。また、CONRED の本部は空港に直結しており、被災地のニーズに合わせて物資供給が迅速に行われる工夫がなされていた。図 3-30 は、CONRED の物資保管庫の様子で、物資は食品、生活用品などパッケージ化されており、奥のドアから直接空港の滑走路に移動することができ、航空機やヘリに迅速に積み込む工夫がなされている。

また、グアテマラ南部に位置するフェゴ火山の2018年6月発生した火碎流によって被災した集落(図3-31, 3-32)および同じく南部に位置するパカヤ火山の2010年噴火溶岩流で被災した集落を訪問し(図3-33)、火碎流及び溶岩流災害の情報収集を行った。



図3-27 CONREDのオペレーティングルーム

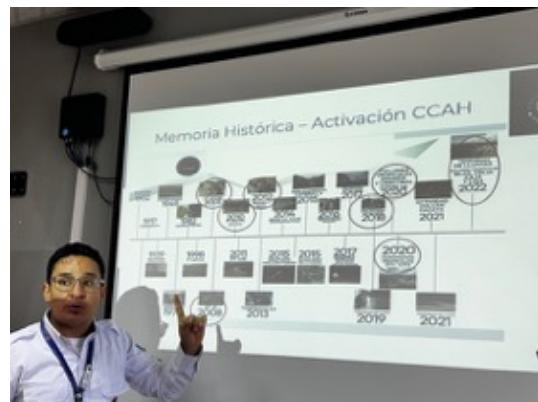


図3-28 CONREDでの災害対応事例の紹介

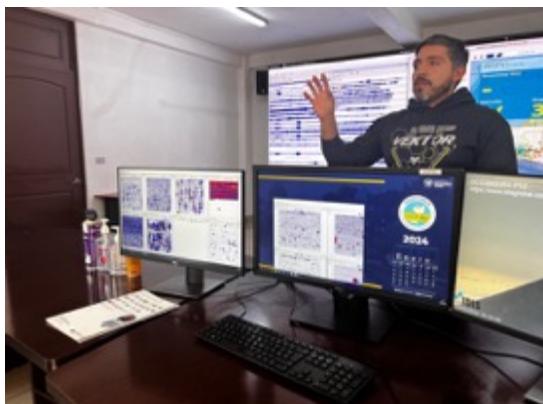


図3-29 INSIVUMEHのオペレーティングルーム

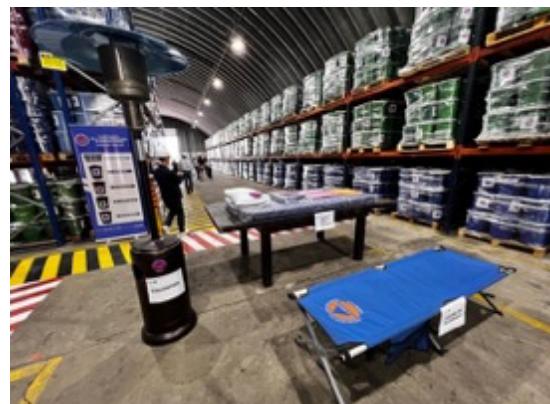


図3-30 CONREDの物資保管庫



図3-31 2018年噴火の火碎流で被災したゴルフ場のクラブハウス。



図3-32 2018年噴火の火碎流で被災した民家。



図 3-33 パカヤ火山 2010 年噴火の溶岩流

### 火山灰の特徴

ヒアリング調査などから、工学的な火山灰対策を行う際に、火山灰の見かけ密度や特徴について情報が十分でないことが分かった。そこで本研究では、これまでに現地調査やヒアリング調査の際に採取した火山灰と市町村からの提供いただいた火山灰を使い、火山灰の特徴について計測を行った。

今回対象とした火山灰・スコリアは、桜島、阿蘇山、富士山(宮川)の 3 つである。桜島は 2023 年 6 月 7 日の噴火直後に鹿児島市の防災担当者によって桜島古里公園で採取した火山灰(図 3-34)と 2023 年 10 月 18 日に桜島国際火山砂防センターで採取したもの(図 3-35)、2024 年 3 月 21 日に垂水市市役所で採取した火山灰(図 3-36)、2024 年 3 月 22 日に桜島黒神で採取した火山灰(図 3-37)で、それぞれの月に噴火した火山灰と考えられる。阿蘇山は 2021 年 11 月 21 日に阿蘇山上ターミナルで採取したもの(図 3-38)で同年 10 月 20 日の噴火による火山灰と考えられる。玄武岩質の火山灰は近年噴火していないことから、火山灰が火碎物であることを参考に富士山噴火に由来するものとして富士吉田市上吉田字剣丸尾付近の宮川で 2022 年 9 月に採取したスコリア(以下、富士山(宮川)とする)を使用した(図 3-39)。火山灰・スコリアはそれぞれ採取した状態(A11)と 1mm 以上, 500  $\mu\text{m}$ ~1mm, 250  $\mu\text{m}$ ~500  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$  以下にふるい、粒径ごとにみかけ密度や流動性などを計測した。しかし、篩をかけた際に必要量に達しなかった場合は、計測を実施できなかった(各表中 N)。



図 3-34 2023 年 6 月 9 日 桜島古里公園



図 3-35 2023 年 10 月 18 日桜島国際  
火山砂防センター



図 3-36 2024 年 3 月 21 日垂水市役所



図 3-37 2024 年 3 月 22 日桜島黒神



図 3-38 2021 年 11 月 21 日阿蘇山上ターミナル



図 3-39 富士吉田市宮川

### i) みかけ密度

みかけ密度の計測は、本来 JIS 規格等に基づき計測する必要があるが、本研究では現地調査などの際に採取した試料が限られた量であることから、次の手順で計測を行った。

- ① 10 cc のスチロール容器 A 型を使用し、採取した試料を 4 回計測し平均値を求める。
- ② 水を用いて計測したスチロール容器の体積求める。
- ③ ①と②から密度を計測する。

乾燥状態にするため、電気オーブンで 60°C、24 時間、火山灰・スコリアを入れて乾燥させた。ここで JIS 規格よりも温度が低く、時間が短いのは、阿蘇山や桜島の火山灰に付着した化学成分が乾燥によって揮発し、電気炉を痛める可能性があることから、このような条件とした。計測したみかけ密度を表 3-1 に示す。

表 3-1 から、桜島の火山灰は既往の研究結果<sup>2)</sup>とおおむね近い値となった。また、粒径が細かくなるにつれて、みかけ密度が大きくなることを確認した。次に阿蘇山は粒径ごとで若干の違いがみられ、富士山(宮川)は粒径が小さくなると大きくなる傾向が見られた。

このようにみかけ密度は粒径によっても変化することを確認した。また、250 μm 以下については、阿蘇山のもの以外はおおむね 1.4g/cm<sup>3</sup> 程度であることがわかった。

表 3-1 火山灰のみかけ密度

粒径 / 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	桜島2023 古里公園	桜島2023砂 防センター	垂水市役所 2024	黒神2024	阿蘇山 2021	富士山(宮 川)2022
All	1.52	1.53	1.54	1.61	1.05	1.31
1mm <	N	N	1.03	1.33	N	1.14
500 μm - 1mm	1.26	N	N	1.34	0.89	1.29
250 μm - 500 μm	1.35	N	1.38	1.41	0.97	1.35
<250 μm	1.42	1.43	1.52	1.48	0.91	1.43

### ii) 流動性の計測

流動性の計測方法は、コンクリート試験で用いられる方法を参考に次に示す簡易な方法で計測を行った。

- ① 試料 15g をラミネートシートの上に置いた加工したスチロール容器(25 cc)に火山灰を入れる。
- ② 容器内での高さを計測する(図 3-40)。
- ③ 容器を外した際に広がった面積を橢円形で近似して計算する(拡大率)(図 3-41)。
- ④ 下がった高さ(高さ減少率)を計測する。
- ⑤ ①から④を同一試料で 4 回実施し、平均値を求める。

このように計測した結果を表 3-2 に示す。



図 3-40 スチール容器内の様子

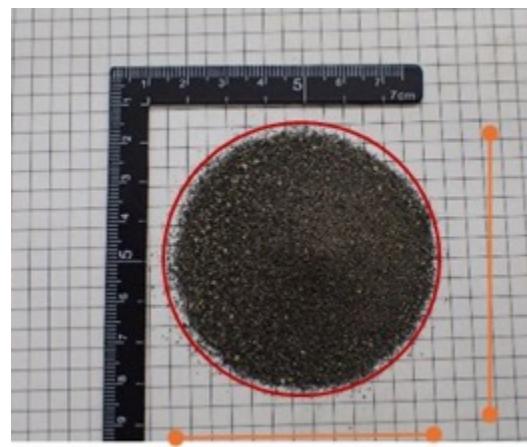


図 3-41 流動性の計測の様子

表 3-2 火山灰の流動性

	桜島2023 古里公園		桜島2023 砂防センター		垂水市役所2024		黒神2024		阿蘇山2021		富士山(宮川)2022	
	高さ減少率	拡大率	高さ減少率	拡大率	高さ減少率	拡大率	高さ減少率	拡大率	高さ減少率	拡大率	高さ減少率	拡大率
All	0.85	5.93	0.61	5.40	0.82	6.51	0.92	5.08	0.57	6.34	0.58	6.30
1mm <	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	0.56	5.02
500 μm ~ 1mm	0.63	6.03	N	N	N	N	0.65	6.92	0.52	5.85	0.44	6.27
250 μm ~ 500 μm	0.60	6.59	N	N	0.63	6.89	0.75	6.94	0.34	8.02	0.46	6.64
< 250 μm	0.92	5.85	0.55	7.09	0.80	6.88	0.70	6.71	0.53	8.18	0.55	7.30

表 3-2 から、桜島 2023 年砂防センターや阿蘇山 2021、富士山(宮川)2022 において、粒径が細かくなるに従い、拡大率や高さ減少率が大きくなることから、火山灰が広がりやすいことが分かる。一方、2023 古里公園と垂水市役所 2024、黒神 2024 で採取した桜島の火山灰は “500 μm ~ 1mm” から “250 μm ~ 500 μm” になると広がりやすくなっているが、さらに細かい “250 μm” 以下 “になるとあまり広がらないことが分かる。特に桜島 2023 古里公園は” 250 μm 以下 “であまり広がらなくなっており(図 3-42~3-45)、これはフレッシュな火山灰であったことから、火山灰の化学成分による影響で広がりにくくなった可能性がある。

このため、細かい火山灰については、火山灰の化学成分が流動性に影響を与える可能性があると考えられるが、事例が 1 ケースのため、今後フレッシュな火山灰を収取し、同様の傾向について検証していく必要がある。

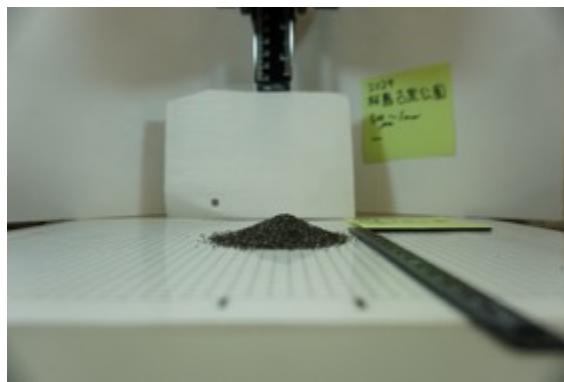


図 3-42 桜島 2023 古里公園  $500 \mu\text{m}$ ～ $1\text{mm}$  での高さ変化

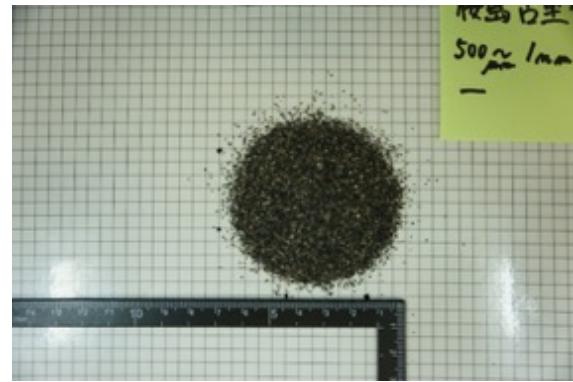


図 3-43 桜島 2023 古里公園  $500 \mu\text{m}$ ～ $1\text{mm}$  での広がりの変化

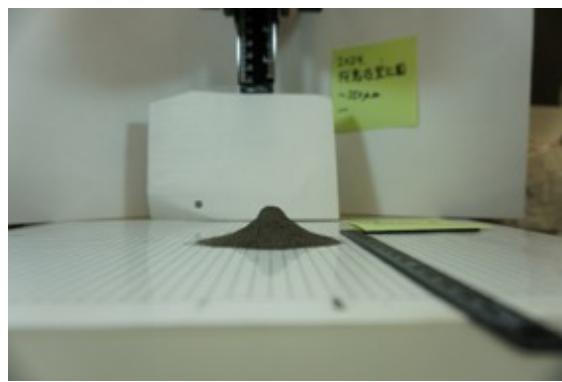


図 3-44 桜島 2023 古里公園  $250 \mu\text{m}$ 以下 での高さ変化図。

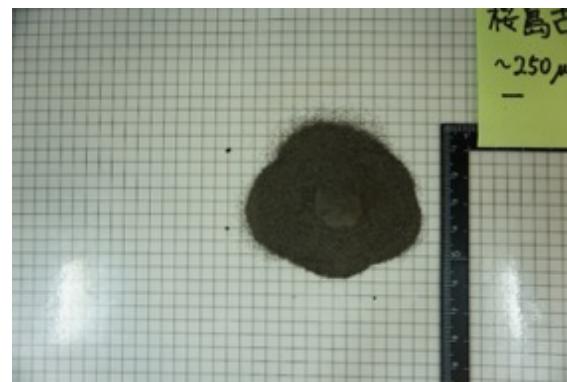


図 45 3-桜島 2023 古里公園  $250 \mu\text{m}$ 以下 での広がりの変化。

### iii) 飽和状態の計測

飽和状態の計測は、試料 15g に 1ml ずつ加水し、目視で飽和状態を判断し、重量含水率を計算した(図 3-46、3-47)。ここでは、すべての試料で計測することができず、桜島 2023 桜島火山国際砂防センターと、阿蘇山 2021、富士山(宮川)2023 の 3 つの試料について実施した。さらに、加水による粘性の変化の検討として、桜島 2023 桜島火山国際砂防センターと阿蘇山の  $250 \mu\text{m}$  以下を用いて、15g の試料に 2ml ずつ加水し、流動性の計測で実施した①～⑤の方法で観察した。それぞれの結果を表 3-3、表 3-4 に示す。

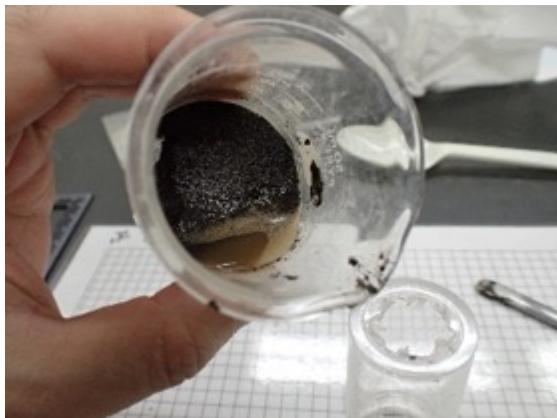


図 3-46 飽和状態の計測

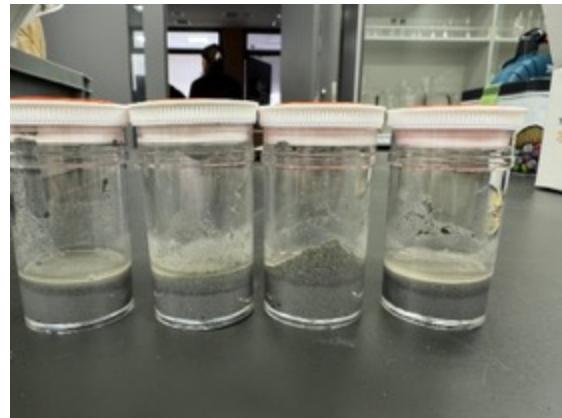


図 3-47 阿蘇山 2021 試料の飽和状態

表 3-3 飽和状態の重量含水率

重量含水率	桜島2023砂防センター	阿蘇山2021	富士山(宮川)2022
All	29%	38%	29%
1mm <	N	N	35%
500 μm - 1mm	N	40%	32%
250 μm - 500 μm	M	40%	32%
< 250 μm	29%	38%	32%

表 3-4 含水率の違いによる流動性の変化

250 μm以下 15gに対して	桜島2023砂防センター		阿蘇山2021		
	加水(ml)	高さ減少率	拡大率	高さ減少率	拡大率
2	1.00	1.00	0.65	5.34	
4	1.00	1.00	1.00	1.01	
6	1.00	1.00	1.00	1.00	
7	0.98	1.16	1.00	1.00	

表 3-3 から、重量含水率は採取した火山灰によっても異なることを確認し、飽和状態の含水率は、桜島と富士山では約 30% 程度で飽和するのに対して、阿蘇山では 40% となった。含水率による流動性の変化については、表 3-4 と図 3-48, 3-49 から、桜島では 2ml(10% 程度)、阿蘇山では 4ml(20% 程度) の含水率で、高さ減少率と拡大率が 1 となっており、容器内の形状をとどめている状態を示している。これは、水によって火山灰が凝結して流動性が下がったと考えられる。この状態は、飽和状態まで同様の傾向が見られたことから、火山灰に水が含まれると固くなり形状を崩しにくくなることがわかった。

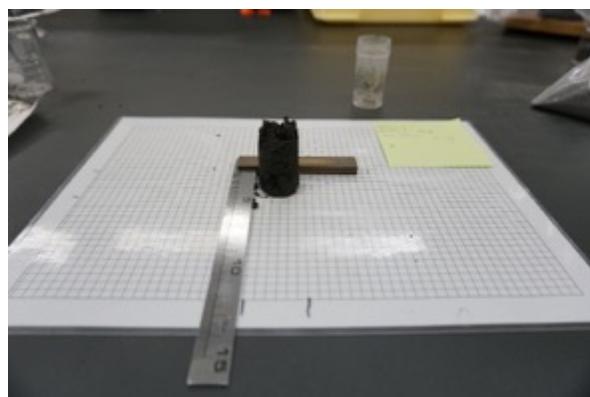


図 3-48 桜島 2023 砂防センター 250  $\mu\text{m}$  以下  
水 4ml 水 4ml を加えたときの状態

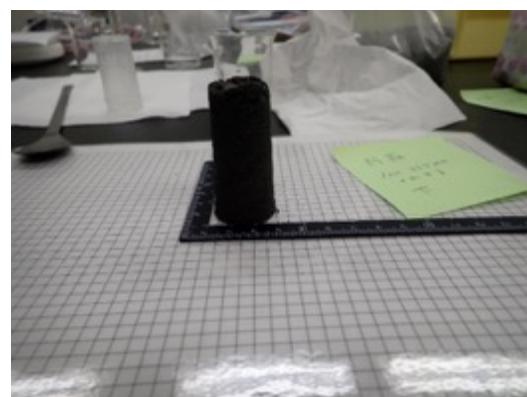


図 3-49 阿蘇山 2021 250  $\mu\text{m}$  以下で  
を加えたときの状態

#### d) 社会防災分野との連携

情報発信の在り方を検討するために、今年度は、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。具体的には、防災行政機関や公共機関の噴火対応に大きな影響を与えると指摘されている、通信機能ならびに道路機能を主に、防災機関が対策を計画・実施していく上で、火山研究の成果に求められている要件について検討した。

##### i) 情報発信の在り方に関する通信機能の維持からみた要件

###### 予備的意見交換

電気通信事業者からの降灰対策の課題と火山研究への要望を把握し、意見交換会の論点を整理するための予備的意見交換を行った。5月30日に実施し、NTT東災害対策室室長以下3名の参加を得て、対策の現状と課題、火山研究への要望について意見交換を行った。NTTグループでは、富士山噴火時の通信への影響については、国の大規模な被害想定に基づいて、自社の施設被害を評価している。その評価結果としては、溶岩流等に起因するケーブル被害が生じ、孤立する通信局が生じる可能性はあると捉えている。携帯基地局についても、同様に局引き込みまでのケーブルに被害を受けると機能停止する可能性はある。また商用電源の停電に備えて自家発電装置やバッテリーを配備しているが、停電機関が長期になると燃料不足やバッテリーの消耗などによって通信局や携帯基地局の機能は停止する。しかし、全体でみると、電気通信網は長年にわたって、多ルート化を進めてきた。したがって、ひとつの経路が被災しても代替路に切り替えることでカバーできるとみている。

降灰による施設被害については、電気通信研究所で評価しているという。その結果としては、長距離の伝送路については、無線のウェイトは小さく、また前述のように多ルート化されているので影響は少ないと評価している。また、災害対策用の可搬機器は見通し区間程度のごく短距離であり、影響は小さいと見ている。ただし、需要家サイドの屋内引き込み線等は断面が球形であり、降灰と降雪とが重なるなど条件が厳しいと被害は発生しうる。

他方、衛星通信は携帯通信等に比べて電波が微弱であり、影響を受ける可能性があると考えている。ただし、衛星通信への影響については評価できていない部分もある。この未評価の部分については、専門家の協力がないと難しい。

今後の進め方については、専門家との連携が必要であり、他のライフライン事業者を交えた検討の場とともに、通信機能に特化した意見交換への要望も寄せられた。

###### 関連研究の分析

以上得られた論点をより明確とし、情報発信すべき知見や提示方法等を明らかにするために、幅広く関連する先行研究を収集し分析した。

降灰がライフラインに与える影響に関して幅広く論文を集めるために、降灰に関する検索語として「降灰」、「火山灰」、「噴火」、「火山」、またライフラインに関する検索語として「ライフライン」、「通信」、「衛星通信」、「電力」、「電気」、「ガス」、

「都市ガス」、「水道」、「上水道」ならびに「道路」を指定し、両方の検索語の「and 検索」によって抽出された論文を対象とした。ここではライフラインのうち、通信を中心に得られた結果を概観する。

ライフゲインに関する検索語としては「通信」、また降灰に関する検索語としては「噴火」の両検索語で and 検索した結果が、もっとも多かった。しかし、その多くは、観測システムの構成要素として衛星通信等の通信機能が含まれていることによるものだった。たとえば、西の島での火山活動に際して再設置した地震計と空振計のデータを衛星や携帯電話経由で転送する観測システムの構築（大湊・渡辺、2020）<sup>3)</sup> や、地震・噴火時にリアルタイム GPS データ解析に必要なデータの取得を衛星通信で行う方式の検討（山本ら、2013）<sup>4)</sup>、携帯電話回線を用いた画像、観測データ、位置情報等の送信とそれに基づく遠隔運用（黒田ら、2012）<sup>5)</sup> などである。観測分野の研究としては防災により近い研究として、火山性地震を自動分類し、その結果を携帯電話や E-mail で関係者に通報するシステムの開発（石原ら 2004）<sup>6)</sup> もみられた。

応急時の搜索・救出の支援システムに関する論文もいくつか見られた。遠隔操作型の不整地移動探査ロボットの自己位置推定と走行試験（永谷ら、2012）<sup>7)</sup>、通信の幅轍を最小限にしつつ安全な救援活動を行うための手法として、被災者の持つスマートフォンから Drone を中継して最小限の被災状況を送信する Protocol の提案（前山ら、2017）<sup>8)</sup>、あるいは噴火時の火山において遭難者の探索ができる探索システムの開発（川上、2018）<sup>9)</sup>などの研究もなされている。

その中で、火山活動中の通信への影響を見る上で、参考となる記述もいくつか見られる。たとえば、大湊・渡辺（2020）<sup>3)</sup>によると、原因是特定されていないが、西之島の火山活動の東京への衛星通信はやや不安定で、9 月の設置以降の実績では通信の成功率は 6 割程度とされている。岡本ら（1991）<sup>10)</sup>は、雲仙普賢岳噴火活動に際して、梅雨期には雲に覆われることが多く、静止気象衛星「ひまわり 4 号」（GMS-4 号）や極軌道気象観測衛星「ノア」などによる情報は得られず、赤外画像によっても「今後も、噴煙を伴う大規模な噴火以外では識別が困難」と評価している。

また、松下（2015）<sup>11)</sup>は無線、なかでも警察無線への影響に关心を寄せているが、ヒアリングや文献研究から降灰による無線への影響を概観し、またそれらの影響を評価する実験計画の立案をしているものの、実際に実験を実施し、評価するまでには至っていない。

さらに、石塚ら（2013）<sup>12)</sup>は、噴火活動が活発な桜島において、自動降灰・降雨量計で得られたデータを技術試験衛星 VIII 型回線経由で降灰下に配信可能であるかどうかの実証を試みている。ただ残念ながら、降灰が多い状況下でのデータ伝送実験は実施できなかった。降灰が衛星通信へ与える影響を直接評価できる研究計画となっていたが、噴火イベントの発生頻度自体が低い火山活動ゆえの結果と言えよう。

これらの研究から、降雨時・噴火時に安定した通信を確保し観測を継続することは、基礎研究を支える面からも重要であるとともに、防災に一步踏み出すうえで、災害時に確実に観測を継続し、情報を共有することは重要な課題となる。その前提として、通信障害の発生とその原因とを特定し対策を進めていくことが必要であり、

そのためには組織的な試みが求められるだろう。また、火山研究側から、災害時にどのような観測がなされうるか、またそのためにどのような通信確保が求められるかを電気通信事業者と協議しておくことも必要となろう。

これらの研究に対して、既往災害時における電気通信事業への影響を直接扱った事例研究がある。高橋・藤井(1996)<sup>13)</sup>は、雲仙普賢岳噴火時のライフライン全般について、その被害と対応を詳細に調べ上げている。以下、この論文で参考となる点を、詳しく紹介していくことにしたい。

まず、電気通信設備被害に関しては、通信回線の切断に対しては、可搬形無線機や衛星車載局に切り替えて、通信回線の確保を図った。降灰の影響としては、無線通信を利用しているために、島原半島南部地域の一部の電話がかかりにくいケースや、雨雲によって電波が届かないため通信の信頼性が低下するケースが生じたという。なかでも、平成3年7月下旬の大雨の時に、雨雲によって電波が届かなかったために、アメダスの記録が届かないケースも生じたとある。なお、このとき、NTTは他ルートに切り替えて対応した。なお、電力においても同様に、水無川を横断する送電線、配電線および通信回線の切断対策(代替手段の導入、送電系統の変更など)、システムのブロック化もしくはネットワーク化などを図る緊急対策が実施されている。

他方、代替ルートがない市内ケーブルでは、焼失等の被害を受け、電話が使えない地域が発生したという。ただし、これらの地域では住民が避難している地域も含まれるが、居住者が残る地域も含まれており、NTTでは居住している住民向けに、無線公衆電話を設置して対応している。このことから、ケーブルが直接に被害を受けた地域より広いエリアで通信支障が発生したものと推察される。

降灰の影響のうち特殊な事例として、公衆電話機のテレフォンカードの読み装置から微細な火山灰が侵入し、電話機の故障が頻発したという。このため、NTTは、ファン付きの公衆電話機を設置して対応した。これは桜島の火山灰対策として鹿児島市で使用されている電話機を、今回の被災エリアに試験的に導入したものである。ファンの設置は火山灰の侵入防止に効果があり、故障の頻度は小さくなるようである。災害時に発生した支障については、予見しにくい現象もあり得る。その一方で、災害規模が大きくなると、極めて低頻度であっても被害の影響は極めて大きい現象も発生てくる。既往災事例は低頻度の現象も含めて、ライフライン事業者間で広く共有していく必要がある。

物理的被害ではないが、災害時には呼が集中することで輻輳が発生する。雲仙普賢岳噴火災害時にも、「平成3年5月15日に土石流が発生した際は、テレビの映像で土石流のリアルな様子が写し出されたため、市外からの見舞や安否などの通話が通常の20~30倍に達した」(高橋・藤井、1996)<sup>13)</sup>という。災害のたびに発生する通信障害のひとつである。

個々の住民への応急対策としては、平成3年6月3日以降、避難勧告、警戒区域が拡大するにつれて要請が増えた電話の移設を行った。仮設住宅への電話の設置については、市町村と緊密な連絡をとり、入居と同時に使用できるようにしたという。特設公衆電話からの発信は無料のままとしたが、着信については有料とした。なお、

電気通信事業が民営化されて以降、複数の電気通信事業者が電気通信サービスを提供する競争環境下となっている。国として、これら電気通信事業者のサービスや料金について調整が必要な場面も予想される。

火山研究に関連しては、火山観測に必要な計測機器や監視カメラの専用回線の需要に積極的に対応した。防災対応についても「全国から報道関係者が応援に駆けつけて、その報道体制を支える専用回線、FAX、無線回線の申し込みが急増した。工事は即日、あるいは翌日の希望が多く、NTTではこうした要請にも迅速に対応した」とある（高橋・藤井、1996）<sup>13)</sup>。しかし、災害規模が大きくなるにつれ個別の対応は難しくなる。前述したが、想定される観測に不可欠な電気通信機能を火山研究側から明示し、電気通信事業者と予め協議をしておく必要があろう。

さらに雲仙普賢岳噴火時には警戒区域が設定されたが、設定直後の数か月間は、都市ガス、水道、電力、電気通信などのライフライン担当者は自分の施設を守るために警戒区域に立入りをすることはしなかった。その一方で、居住者が生活を続ける地域では、生活を継続するためにライフラインは不可欠である。しかし、供給エリアの構成は必ずしも一致していないので、被害によってはライフラインによって供給が停止したり、継続したりと混在する可能性がある。また、ライフライン機能は相互に関連を持つ。このため、生活を守るためには、ライフライン事業者間で、応急措置や応急復旧の調整が求められる。

### 意見交換

5月に実施した予備的意見交換と関連研究の分析を踏まえ、11月8日にNTTグループと火山研究者との意見交換を行った。出席者は、NTTグループから4名、次世代プロジェクトから中田、藤田ならびに田中の3名であった。

当日は、まず火山研究者から富士山噴火の履歴と想定の概要を報告した。次いで、論点にそってNTTグループより、降灰による通信被害の影響評価の現状と課題について報告があり、その後自由な意見交換を行った。

その概要は以下の通りである。

富士山噴火は、重大なリスクと認識し、NTTグループ全体として、影響評価を行っている。しかし、被災経験が少なく、特に対応の評価等については既往災害からの蓄積がなく、専門家と連携をはかりつつ実施している。

個々の通信局や携帯基地局については、溶岩流および火碎流による施設被害を評価し、応急対応を検討している。応急対策のひとつに無線の利用があり、火山灰による減衰について、桜島火山灰サンプル用いた分析など進めているとのことだった。

中継系については無線のウェイトは小さくなってしまっており、降灰の影響は受けにくくなっています。しかも経路はループ化されていることから降灰による影響は小さいものと見込んでいる。その結果、通信機能全体としては、停電の影響が大きく、燃料補給のオペレーションが重要となる。この観点からは、補給経路としてどの道路が使えるかが重要な判断材料となり、降灰等による道路機能の状況が必要となる。

なお、音声通信については、需要急増による輻輳が大きい。重要通信の確保のために発信規制をかけることが考えられる。

その上で、意見交換を行った。主な内容は以下の通り。

第1に、応急対策用無線設備の配備場所を評価するうえで、降灰による減衰の見積もりが重要となる。この無線の減衰率は、火山灰の粒径と密度とに依存することがわかっている。減衰率は粒径の3乗に比例する。また、粒径が1mmを下回ると影響は小さくなってくると想定している。同様に、降灰が衛星通信に与える影響についても、上空の火山灰の密度と粒径とに依存する。

したがって、地上に積もった降灰深だけではなく、上空を移流拡散する火山灰の粒径別の密度に関する時系列的な情報への要望が出された。しかし、火山灰の粒径や密度分布は膨大な計算量である。このため、すべての風向きや風速等での計算結果ではなく、影響が大きな1ケースだけでも情報提供されると良いと考えられる。

第2に、施設被害想定の次のステップとして応急対応計画を策定することが目的となる。う回路や無線での救済など応急対応を考える上では、同時に被災する施設の想定と救済策とが前提となる。すべてのケースで最大となる溶岩流や火碎流、最大降灰深を示した「可能性マップ」では、示された全範囲が同時被災するわけではないので、対策の検討に向かない。その前提となっている個々のシミュレーション結果が大事となる。したがって、可能性マップだけではなく、噴火パターンごとに溶岩流や火碎流、降灰の到達範囲を知り知りたいとの要望があった。

この場合、シミュレーションの解像度は必ずしもそれほど細かい必要はない。ネットワーク構成の変更を検討する基礎単位は、県に複数ある上位局レベルとなるので、そのオーダーの解像度であれば最低限の検討はできることになる。

このほか、以下の個別の項目についても意見交換がなされた。現在、桜島の火山灰を試料に施設被害を検討しているが、その結果を他の火山にも適用可能か質問があった。これに対して、火山によって放出される火山灰の特性には差がある。たとえば、阿蘇山噴火で放出される火山灰は特殊である。なお、富士山では桜島の火山灰の特性により近い。また、鮮度によっても含有される成分等に違いが出てくることが指摘された。

応急対策要員の安全対策のために、マスクに求められる機能に関しても質問があった。後述する東京都の「大規模噴火降灰対応指針」（令和5年12月公表）等で求められている措置である。これに対して、火口近傍の窪地等特殊な領域以外では通常のマスクで有効と考えられる旨説明があった。また、本プロジェクトでは扱っていない火山灰の密度が非常に高い地域で空調施設が使えなくなるまでの余裕時間についても質問があった。交換機施設における空調設備のバックアップ構造化などが、東京都の「大規模噴火降灰対応指針」（令和5年12月公表）等で求められている項目である。本プロジェクトの実験では機能停止し始める閾値を求めており、それ以上の密度についてはわからないものの、対策として、吸排気口のカバーの有効性が紹介された。

このように、ライフライン等の指定公共機関のひとつである電気通信事業者との意見交換を通じて幾つか参考となる点が得られた。第1に、可能性マップ、すなわち条件を変えて行われた降灰シミュレーションで得られた地表面での降灰深のうち最大値を示したハザードマップよりも、影響評価と対策を考えるために、その元

となっている個別ケースでの計算結果を提供していく必要がある。第2に、地表面での降灰深だけではなく、大気中を移流拡散途中である降灰の粒径や密度を提供する方法について検討が求められる。このほか、降灰対策については先例が乏しいことから、火山専門家の協力が求められていることが確認された。

#### ii) 情報発信の在り方に関する道路管理者との予備的意見交換

降灰時に道路啓開の全体調整と実行を担うことが予想される関東地方整備局と論点整理のための予備的意見交換を行った。

#### 関連施策や関連研究の収集

まず予備的意見交換の前に、降灰時の道路機能の維持に関して関連研究を収集した。このうち、道路管理者の計画としては、東京都が令和5年12月に「大規模噴火降灰対応指針」を発表している。これは、都が設置した「富士山噴火降灰対策検討会」において、大規模噴火時の降灰から都市活動を維持し、都民の生活を守るために取組について検討した結果をとりまとめたものである。その中で、都は、火山灰処理に関する国や他道府県等との広域連携を通じた処分先の確保や大規模降灰時の火山灰除去・処分指針の提示、降灰が家電など家庭にある設備等へ及ぼす影響に係る調査研究及び周知情報発信などを国に求めていた。

交通インフラについては、短期的な取り組み、長期的な取り組みならびに国への要望を示している。都の短期的な取り組みとして、優先除灰道路の選定等、都管理道路を中心とした道路啓開体制の構築と道路管理者・鉄道事業者等が行うべき予防・応急復旧策の明確化を行うこととしている。このうち優先除灰道路の選定については、重要拠点を結ぶ路線を選定する方向性を示している。また道路除灰手順については、この優先除灰道路の上下各1車線を啓開することを基本として、各道路管理者が計画を立てるものとしている。ついで長期的な取り組みとして国や高速道路事業者等も含めた官民が連携した除灰の24時間体制の構築を、さらには国に対して首都圏全体の交通ネットワークの維持に係る基本計画の提示を求めていた。

これらの取り組みのうち、首都圏全体の交通ネットワークの維持に関連する計画としては、「八方向作戦」が公表されている。この計画は、国や東京都、首都高速道路などが首都直下地震ならびに大雪を想定した道路啓開計画である。この八方向作戦では、各道路管理者が連携・協力のもと、八方位毎に高速道路、国道、都道のうち被害が少ない区間を交互に利用することにより、少なくとも都心へ向かう1車線及び都心から郊外へ向かう1車線（合計2車線）を啓開して行くものとされている（首都直下地震道路啓開計画検討協議会、2023)<sup>14)</sup>。なお、その背景としては、東日本大震災で展開された「くしの歯」作戦が復旧に大きく貢献したこと、さらに平成26年11月に災害対策基本法の一部を改正する法律が施行され、道路管理者が放置車両・立ち往生車両の移動・撤去を行うことが可能となったことが上げられている（首都直下地震道路啓開計画検討協議会、2023)<sup>14)</sup>。

この災害対策基本法に基づく道路管理者による放置車両等の移動は、首都直下地震や大雪が想定されているが、この法改正は、東日本大震災時の首都圏での交通渋滞や

平成 26 年 2 月に発生した関東甲信地方での記録的大雪に際して道路交通が大きく乱れたことを教訓として検討されたものである。したがって、火山噴火時に適用されるかは明示されていない。しかし、指定のための要件として「放置車両や立ち往生車両によって、緊急通行車両が通行する最低限の空間、例えば一車線すら確保されておらず、被災現場までの通行ルートを確保する必要がある場合」(国土交通省道路部、2014)<sup>15)</sup>とあり、大規模噴火時においても発動される可能性は十分にあるだろう。なお、対象とする区間の指定は地方整備局長に委任されている。

このほか、富士山噴火によって道路交通に対して生じかねない影響を具体的に検討している研究が幾つかある。後藤・柴山 (2023)<sup>16)</sup>は、予測された降灰に対して、降灰厚 0.1cm 以上 の場合は、0.1cm まで除去し、その後、ロードスイパーで残りを除去することと仮定した場合、一般道では 1 カ月以上かかる結果を得ている。また高速道路についても、冬に典型的な風向・風速では東名高速道路、秋の場合には中央自動車道が使用できなくなる可能性があるという結果を示している。なお、後藤・柴山 (2023)<sup>16)</sup>は前提となる降灰深予測について季節ごとに予測しており、その結果によれば春および冬では、東に向かって降灰軸が伸びており、宝永噴火と同様の傾向となっている。具体的には、堆積が集中する地域は静岡県駿東郡・神奈川県西部となり、都心は最大 10cm と予測されている。他方、夏には降灰軸が日によって変化し、全方位に降灰する。堆積が集中する地域は、静岡県東郡・山梨県東部・神奈川県西部であり、都心部での降灰は少量に留まった。秋には、降灰軸が北東に向けて広がっており、堆積が集中する地域としては、神奈川県・山梨県境と東京都であり、都心は最大 30cm の降灰深となると予測している。

より間接的な影響評価として、石倉ら (2018)<sup>17)</sup>は、輸送コストへの影響を試算している。富士山の噴火による降灰が大規模となると、道路途絶や交通容量の低下が発生したり、代替経路となった路線では渋滞が発生したりすることで輸送コストが変化する。その結果、ある産地と消費地との間の輸送コストも変わるため、よりコストの低い産地に切り替わる可能性があることが指摘されている (石倉ら、2018)<sup>17)</sup>。実際に、高橋・藤井 (1997)<sup>18)</sup>は、雲仙普賢岳噴火に際して、アンケート調査に基づき、約 97 億円の交通費用の増加があったものと推定している。

### 道路管理者との予備的意見交換

道路管理者と火山研究者との意見交換の場の設定可能性ならびにその場での論点の整理をするために、関東地方整備局の幹部と協議した。その結果、大規模噴火への対応は重要であることから、情報交換を図ることで合意された。そのうえで、火山研究やその成果の情報発信に関して、以下のような指摘や要望があった。

第 1 に、溶岩流や火碎流、大きな噴石等の予測が、計画策定時においても、実際の応急対策実行時において最も必要とされる。どのような道路啓開等応急対策をとるかは、全体の俯瞰的被災状況によるためである。たとえば、首都直下地震の場合に想定されている八方向作戦については、周辺部から都心まで道路啓開が最優先される状況において採用されることになる。他方、富士山の大規模噴火時には、国の初動として、溶岩流や火碎流、大きな噴石から住民の身を守る対策が最優先されることになる。

したがって、関東地方整備局としても、それらの対策実施に必要な道路啓開戦略が求められる。判断は、どの時点でどのような噴火現象への対応を優先するかであり、その検討の資料として、種々の現象の情報が必要となる。具体的には、降灰予測だけではなく、溶岩流や火碎流、噴石、火山ガスなど、幅広い噴火現象を包括でき、かつ火口から周辺まで広い範囲について、タイムラインがわかる情報が必要となる。

応急対策時には、住民の命と共に、対策実施要員の安全確保が求められる。このためにも、火碎流や溶岩流、大きな噴石等、今後予想される推移あるいは活動可能領域の情報は不可欠となる。

第2に、噴火シミュレーションに関しては、複数のパターンの提供が必要となる。噴火現象は多様であり、かつ規模にも大きな幅がある。ある特定の噴火イベントに対して、具体的な対策と優先順位を準備しても、予想外の事態に追い込まれる可能性がある。したがって、事前の検討に際しては、一つのシナリオや複数のケースの最大値を示す可能性ハザードマップでは、事前の予備的検討や実際の対応計画の参考とはならない。その元になっている個々のシミュレーションが必要である。予想される南海トラフ沿い地震については、複数の震源による津波のシミュレーションが示されているが、火山噴火災害においても同様にいくつかのパターンで予測が示されることが望ましい。その際、6時間後、12時間後、24時間後といったタイムラインで、規模に関しても最大規模や頻度が高い中小規模などが望まれる。宝永噴火想定以外にも、異なる規模や噴火現象の推移などに、いくつかの典型的なシミュレーションが提供されると計画はより実効的かつ柔軟なものとなる。

第3に、火山噴火災害は発生頻度が低く、噴火現象も多様である。このため、たとえば降灰除去が新燃岳と同様にできるかなど対策の実行性については不明な部分も残されている。

このように、道路管理者との予備的意見交換でも、幾つかの条件の異なるシミュレーション結果の提示が求められた。前述した電気通信事業者と同様の要望である。その際、道路交通における広域降灰対策は、複数の道路管理者の連携が求められている。各機関が検討をするためには、共通の資料として使用できる標準的な資料が必要となる。したがって、異なる噴火パターンや規模、季節や気象条件など複数の、かつ科学的に妥当性を持つ標準的な噴火のシナリオ提示が今後求められよう。

### iii) 情報発信の在り方に関する災害医療との意見交換

D3の研究の一環として降灰による病院機能への影響評価を行ってきてている。具体的には、東日本大震災時の病院機能維持の先行研究から、病院機能の維持に求められる機能とそれらの機能に影響する要因とを抽出してきている。その結果の妥当性を確認するため、災害時医療に詳しい帝京大学付属病院救急部森村教授に聞きとり調査を行った。

森村教授は、厚生労働科研等で災害時の病院に関する需要と供給の分析を行っている。なお、本プロジェクトでは、このうち医療の供給能力について評価していることになる。災害時医療は、施設や設備が被害を受けたり、停電等で機能できないといった環境制約の中で、最善の医療継続を行うことになる。他方、災害により人的被害が

発生するなど需要は増加しやすい。その中で、災害時に中核となる災害拠点病院等で最も大きな判断は、外来医療、入院患者ならびに救急医療のそれぞれをどこまでを行うかにあると指摘する。医療需要が大きくなると、外来医療から中止し、救急受入れを優先する。設備制約や救急需要が大幅に高まると入院患者の転院をせざるをえない。したがって、あまり細かい設備条件よりも、森村教授らのこれまでの研究では、災害拠点病院の医療供給力を、病院側の要因として医師数、看護師数といった人的リソースおよび総病床数で代表させている。さらに、職員参集や医療資機材や医薬品、自家発電装置の燃料等の補給の影響が大きいため、人的応援や消耗品の補給を規定する道路閉塞状況に依存するとみている。

ここで停電を明示的に扱っていないのは、対象とした災害拠点病院は一般的に耐震性能をあげているとともに、自家発電装置を備えていることが多いためである。この災害拠点病院指定要件に「通常時の6割程度の発電容量のある自家発電機等を保有し、3日分程度の備蓄燃料を確保しておくこと」とされているためである。

ちなみに災害拠点病院は、全国で基幹災害拠点病院64病院、地域災害拠点病院706病院が指定されている(厚生労働省資料、「災害拠点病院一覧(令和5年4月1日現在)」)。富士山大規模噴火関連で見れば、静岡県では基幹1病院、地域22病院が、山梨県では基幹1、地域9病院が、神奈川県では基幹の指定はなく、地域35病院、東京都では基幹2、地域81病院が指定されている。なお、厚生労働省の令和4年医療施設(動態)調査調査によると、病院数は8,156施設であり、一般診療所は105,182施設となっている。ここに病院は患者20人以上の入院施設を有するものを指す。災害拠点病院は病院全体の1割弱にあたることになり、まさに拠点病院となる。ただし、地域医療が低下すると災害拠点病院の負担が高まる。このため、医療機能全体としては一般診療所も含めて停電の影響は生じうるし、その結果として本来はそこで吸収可能だった需要が、災害拠点病院の需要増となってくる。

また、これらの災害拠点病院でも、商用電源の長期停電は自家発電装置の燃料補給ができないかぎり自家発電能力を失い、医療継続は難しくなる。実際、令和元年台風15号の強風による長期停電では、2病院209名の病院避難を実施している。ちなみに、日本病院会調査(2022)<sup>19)</sup>では72時間以上の継続時間を持つのは回答した病院の43%だったが、なかには150時間を超える機関もみられる。発電容量300KVA未満が36%をしめている。

このため、電力の面でも災害拠点病院では燃料補給が重要であり、森村教授らのグループでは、前述した供給力を規定する要因として、地震時では倒壊家屋による細街路の閉塞や水害時の道路浸水や土砂災害による道路閉塞といった通行支障に着目していることになる。

このほか、森村教授によると、火山噴火災害による災害時医療を扱った研究は少ないが、医療需要としては呼吸器系と眼科系が増加するという報告はある。

また、災害時医療を検討するために、電力と道路交通への降灰の影響が必要となる。加えて、災害時医療ではトリアージを含め屋外に応急仮設テント等仮設構造物を設置する可能性がある。このため、降灰下の機能評価として、降灰荷重による仮設構造物への影響を知りたいとの要望があった。

#### iv) 情報発信の在り方に関するまとめ

電気通信事業者や道路管理者、災害医療専門家に対する意見交換から、a)事前段階では、幾つかの標準的な噴火パターン毎に、すべての火山現象に関する時間的推移を示すシミュレーションを用意することが求められていること、b)解像度としては、それぞれのネットワーク構成や対策に応じて、それほど細かくしなくとも有効な場合があること、c)噴火対策の経験が蓄積されておらず、対策の有効性についての専門的な評価への要望があること、d)電気通信事業者からは1例でも良いので、移流拡散中の粒径毎の密度分布が求められていること、e)災害医療の立場から応急仮設テント等仮設構造物の降灰荷重に対する耐力を知りたいとの要望があったこと、などが明らかとなつた。

本プロジェクトの残された期間で、すべてに対応することは難しいと思われるが、情報発信を進める上で、これらの具体的な要望はひとつの方向性を示すものと考えられる。

## 2) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

### a) 概要

降灰被害予測への適用を目的に、昨年度に引き続き、降灰シミュレーションによる都市街区への降灰性状の把握、屋根への積灰荷重による建物の構造安全性・使用性の検討、災害時重要施設のひとつである病院の機能被害に関する検討を行った。降灰シミュレーションでは、今年度は、新たに2つのタイプの街区を対象とした。さらに、過年度実施の空調設備への降灰実験結果と降灰シミュレーションの結果とを、被害予測の観点からどのように結びつけて考えるのがいいか、について単体建物を対象に検討した。また、建物機能被害については、過年度は平面屋根を対象にしたが、今年度は山形屋根を持つ建物の積灰に対する荷重状態、建物種類別の荷重一被害曲線を検討した。さらに、災害時重要施設である病院に関し、災害時の病院の状況について、比較的多くの病院に対する調査報告のある東日本大震災における状況を参考し、降灰に対して考慮すべき病院関係の要素について整理した。以下 b)～e)にこれらについて具体的に示す。

また、日本の過去の火山噴火の例として、有珠山2000年噴火の活動の進行に伴う降灰を含む被害分布、避難範囲などの時間変化を空間地理情報として、降灰被害予測コンテンツの一部として整備した。以下 f)にその結果を示す。

### b) 都市の降灰シミュレーション

火山から遠隔にある都市では、火山噴火による直接的な被害は降灰によるものが主である。遠隔地では、降灰そのものは破壊的な現象ではないが、都市に幅広い機能的な被害を及ぼす<sup>20)</sup>。過年度では、都市の構成要素である建物について、建物の主要機能のひとつである空調換気設備への降灰影響に関し、実験による検討を行ってきた<sup>21)</sup>。併せて、降灰の数値シミュレーションによって、都市街区における建物の影響による降灰の不均一性について検討した。都市街区には多くの建物があるため、それらの存在によって気流が乱れ、広域の降灰予測の水平分解能よりも小さい空間スケールの降灰の不均一が生じる。そのため、ひとつの都市街区（底～中層建物が密集する街区）を対象に降灰数値シミュレーションを行い、数多くの建物の存在による降灰の不均一の程度（降灰強度、火山灰空間濃度の空間的な不均一性の程度）を調べてきた。それによれば、都市街区の中では、降灰の不均一によって、大きいところでは広域の降灰関連量の1.5倍以上になる可能性が示された。こうした不均一性は、図3-50の概念図にあるA、B、C点のように、互いに近い場所の間での降灰被害の出方に繋がる。

また、都市では、建物間の間隙には多くの道路が走っており、降灰の不均一は道路への降灰状況にも直接影響する。特に幹線道路は、災害対応や復旧時の関係車両の通行にとって重要な施設である。そのため、今年度は、道路への降灰性状も検討対象とすることにし、幹線道路を含む2つのタイプの街区について降灰シミュレーションを行うことにした。さらに、降灰の不均一性と被害の出方との関係に関する検討として、建築設備の被害を考える上で、降灰シミュレーションから得られる火山灰空間濃度を、設備被害予測にどのように活用すべきかについて、過年度実施の単体建物周りの降灰計算を対象に検討を行った。

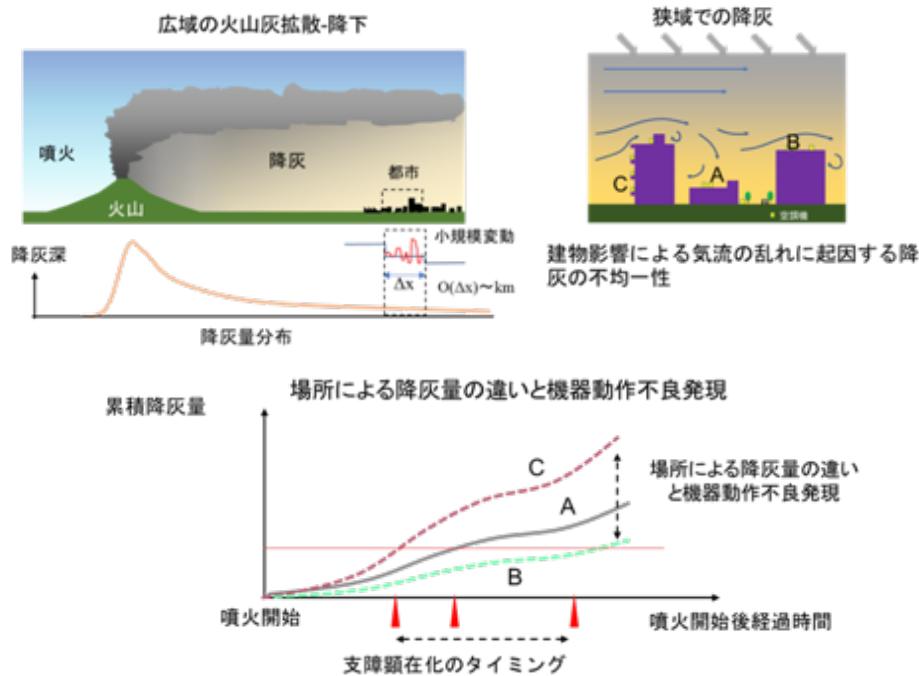


図 3-50 火山から遠隔にある都市への降灰と、都市内の場所（図の A、B、C）による被害発生のタイミングの違いの概念図

### i) 計算対象領域の設定および計算方法に関する記述

降灰計算とした 2 つの都市街区を図 3-51 に示す。それらを領域 A、領域 B と称す。領域 A は、東西 400m × 南北 400m 四方の領域で、低～中層建物が密集し、途中で方向が大きく変わる幅の広い道路が通っている。もうひとつは、立体交差道路橋を有する互いにほぼ直交する幹線道路どうしの交差点のある、東西 200m × 南北 560m の領域である。いずれも大都市の都心からやや離れた場所によく見られるタイプの街区である。図 3-51 の領域 A の赤い太い破線が途中で方向の変わる幹線道路、領域 B の 2 本の平行な破線の直線が立体交差橋の範囲を表している。

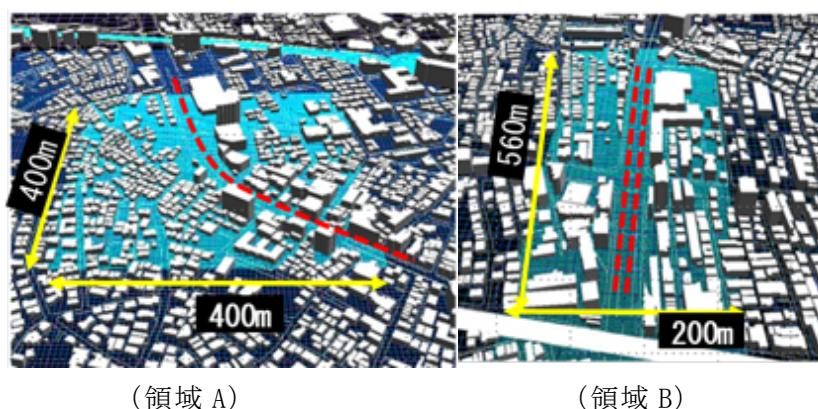


図 3-51 降灰計算対象とした 2 つの都市街区のモデル化

(©2023 ZENRIN CO.、 LTD. (Z09KA 第 039 号))

降灰計算の基本方程式は、先行研究<sup>21)</sup>と同様に火山灰粒子の粒径毎に Euler 形式で書かれた粒子の運動方程式、および重力沈降を含む移流拡散方程式からなり、気流には 3 次元の中立非圧縮流体計算で得られたものを用いた。これらの式は、いずれもレイノルズ平均された式であり、定常状態まで時間積分が行われる。数値計算は、基本方程式系を格子分割された直交直線座標上で離散化して行った。領域 A、B の水平解像度はいずれも 2m であり、いずれの領域も、さらに外側に 2 重の計算格子を持つ 3 段階のネスティング格子としている（外から内側に向かって格子 1、2、3）。計算領域の仕様を表 3-5 に示す。

表 3-5 計算格子の構成

	領域A	領域B		
	広さ (東西 × 南北)	水平 分解能	広さ (東西 × 南北)	水平 分解能
格子1	1440m × 1440m	24m	1440m × 1440m	24m
格子2	480m × 480m	6m	480m × 720m	6m
格子3	400m × 400m	2m	200m × 560m	2m
領域高さ	500m		500m	
鉛直 分解能	1m (z=0~40m) z=40m以上漸増		0.5m (z=0~20m) z=20m以上漸増	

考慮した火山灰粒子の粒径は  $62.5 \mu\text{m}$ 、 $125 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ 、 $500 \mu\text{m}$ 、 $1000 \mu\text{m}$ 、および  $2000 \mu\text{m}$  である。降灰計算は粒径毎に独立に行い、異なる粒径の粒子間の衝突・併合など粒径の変化につながる相互作用は簡単のため考慮しないとした。降って来る火山灰粒子の大きさは、一般には火山から遠くなるにつれ小さくなる。これは、噴煙が上空の気流で風下に流される間に大きくて重い粒子から先に地面に達するからである。ただし、これらはあくまで相対的なことであり、噴煙の上昇高度や上空の風の違いなどによって火山灰の風下への移流拡散状況が異なるため、火山からの距離によって火山灰粒子の大きさが一意に決まるわけではない。富士山宝永噴火(1707 年)では東に約 100km 離れた江戸でも、1mm 以下の小さな粒子だけでなく粟粒大(2mm 程度)の粒子が降っており<sup>23)</sup>、こうした粒径範囲を扱った。

### ii) 計算結果：領域 A（途中で大きく方向の変わる幹線道路を含む街区）

火山灰の粒径  $125$ 、 $250$ 、 $2000 \mu\text{m}$  に対する、地面への無次元降灰強度を南、北北西、東北東、および南西の風の場合について図 3-52 に示す。風向は道路の向きに対して直交に近い方位からの風（南西、東北東）、曲線部の接線に平行に近い方位からの風（北北西）、幹線道路に対し全体的に斜めに入り込む方位からの風（南）とした。計算領域への流入風は、高度 30m で風速  $5\text{m/s}$  になるような、高度に関する指數 0.15 の指數関数に従う風速分布（建築学会地表面粗度区分Ⅲに相当）をもつとした。ここで、無次元化降灰強度は、上空からの一様な降灰強度（下向きの火山灰質量流束密度( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ )）に対する地面降灰強度の比率（図中の凡例では Ratio と表記）のこととを意味している。上空からの一様な降灰は、広域予報による降灰と見なすことができる。降灰の広域予測は 1～数 km 程度の水平分解能で行われることが多いが、本

研究における街区の降灰計算の領域は、広域の降灰予測に用いられる個々の計算格子に含まれる程度の広さであり、ここでの計算は、広域予測で与えられる降灰の、より小さい水平スケールでの変動を見るものである。したがって、無次元化降灰強度や無次元化火山灰空間濃度は、広域予測に対する相対値を表している。

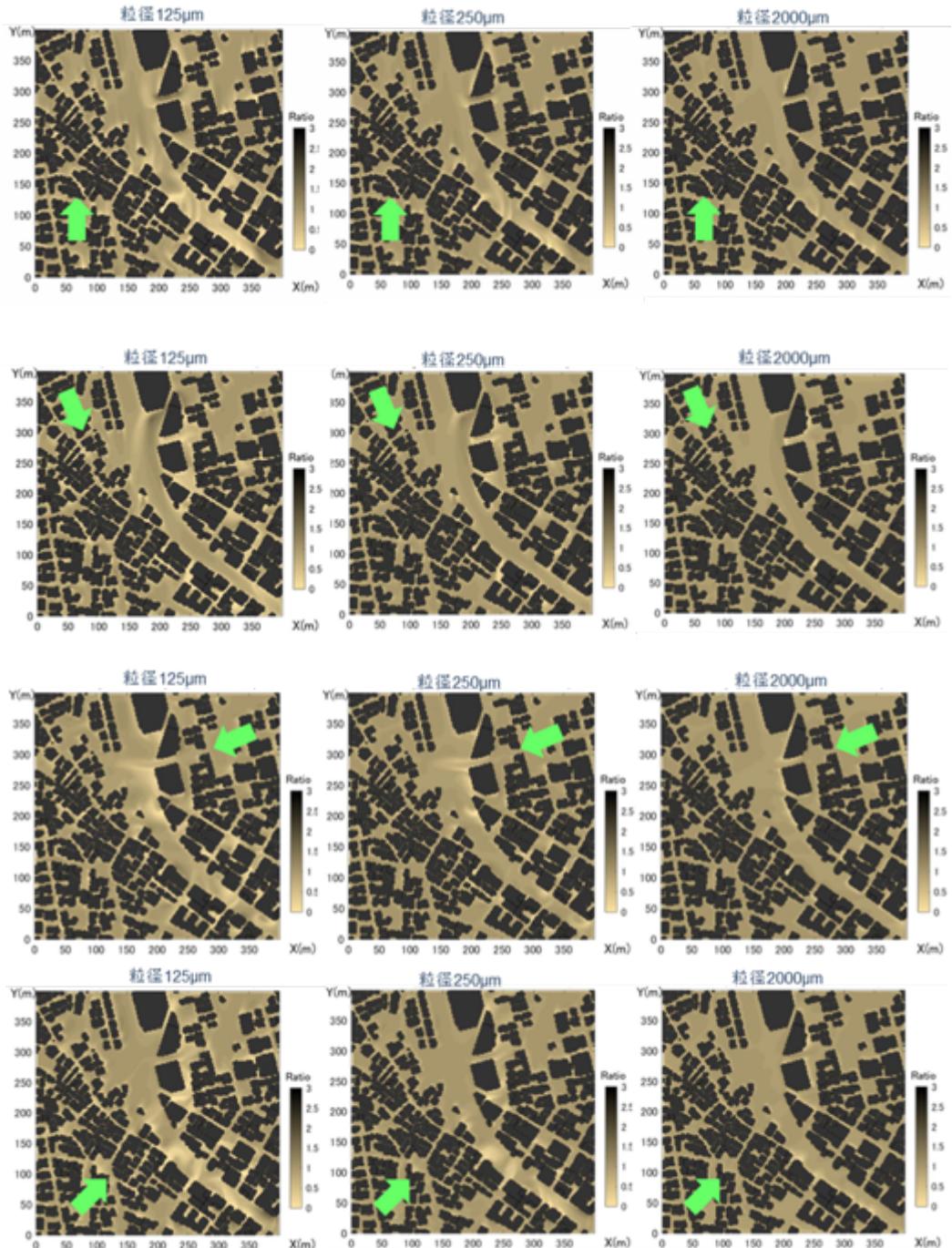


図 3-52 地面での無次元降灰強度（上段から、南風、北北西風、東北東風、南西風、緑の矢印は風向、黒いハッシュは建物）

降灰強度は粒径が小さいほど不均一性が大きくなっている。これは昨年度の検討で見られた傾向と同じである。幅の広い道路は領域中央付近で方向が 30 度以上曲がっているが、特に小さい粒子で曲線部を挟んだ前後で降灰強度の変化が大きい。

街区での降灰の不均一性の程度を量的に見るために、無次元地面降灰強度、無次元空間濃度の出現頻度(%)を調べた。粒径  $62.5\mu\text{m}$ 、 $125\mu\text{m}$ 、 $250\mu\text{m}$ 、 $2000\mu\text{m}$  の粒子について、各粒径に対し 16 風向のグラフを重ねて書いたものを図 3-53 に示す。図中に  $\mu\text{m}$  の単位とともに凡例として書かれている数字は粒径である。地面降灰強度の出現頻度は、計算領域の第 3 格子内（図 3-51、表 3-5 の領域 A）で、建物の無い部分での地面上 1 番目の格子セルの総数に対し、地面における無次元降灰強度がある値をとる格子セル数の割合を百分率(%)で表したものである。無次元空間濃度については、建物の無い部分の地面上 1 番目の格子セルに加え、建物外壁に接する格子セルも対象とし、その全数に対する、無次元空間濃度がある値をとる格子セル数の割合(%)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 22)，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空間濃度の出現頻度の算出対象に含めた。

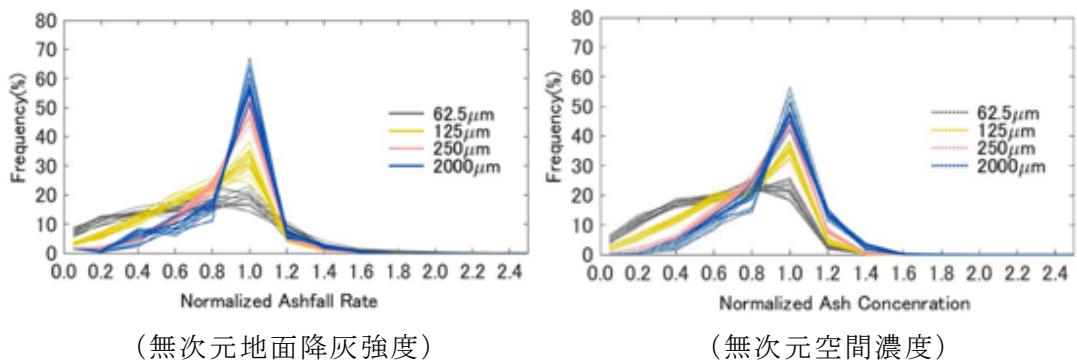


図 3-53 無次元地面降灰強度（左）および無次元空間濃度（右）の出現頻度分布

粒径  $2000\mu\text{m}$  では、1.0 でのピークが大きく  $125\mu\text{m}$  では分布の幅が広い。いずれも 1.5 を超える範囲まで頻度が現れている。風向による頻度分布の形状が大きくは変わらないことと合わせ、昨年度対象とした街区と似た分布となっている。但し、全体的に頻度分布の形状の風向による差異（それぞれの粒径に対する 16 本のグラフの線の束の幅）はやや大きく、特に、粒径  $2000\mu\text{m}$  では無次元降灰強度 1.0 以下の範囲で目立っている。昨年度対象とした街区も、その中央を南北に走る幹線道路を含んでいたが、幹線道路の走る方向の変化が領域 A と比べ小さく、そうした違いも頻度分布の風向依存性の差の一因と考えられる。

### iii) 計算結果：領域 B（立体交差橋のある幹線道路交差点を含む街区）

領域 B について、立体交差道路を直交直線座標系の格子分割でモデル化したもの図 3-54 に示す。図には、南南東からの鳥瞰（高さ方向は強調してある）、高架橋の南北断面図を示す。鳥瞰図の方の中央付近にはモデル化された立体交差道路がある。立体交差道路橋は、ほぼ南北方向に走り全長 350m で、中央部の 170m の区間が道路面の地上高さが 10m の橋梁になっており、その南北にそれぞれ長さ 100m、傾斜が 1/9 の斜路を持っている。立体交差橋の全長にわたり、道路の両側には高さ 3.5m の防音壁を

設けた。火山灰は水分を含むと滑り易くなり、災害時の道路交通の支障となるため、傾斜をもつ道路施設もここでの対象にすることにした。

図 3-55 に地面や道路面への粒径  $125, 2000\mu\text{m}$  の無次元降灰強度分布を示す。立体交差橋のある交差点で交わる南北、および東西に走る道路に沿った北風、南風、西風、東風の場合が示してある。

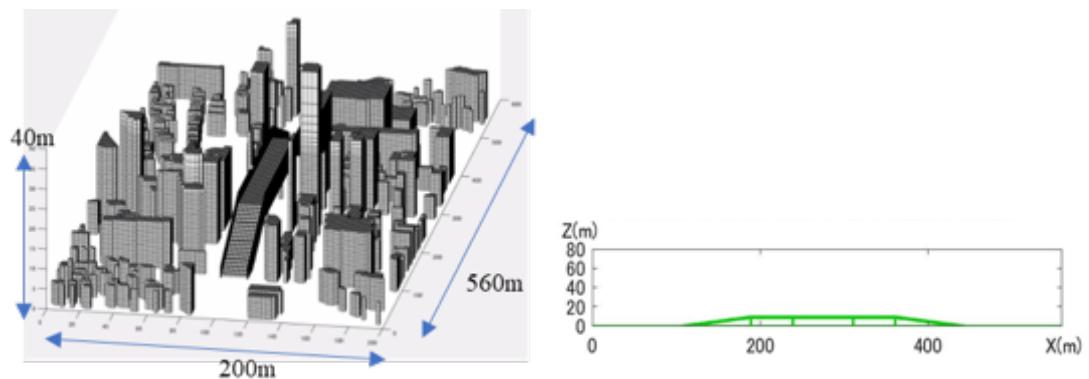


図 3-54 領域 B の立体交差道路のモデル化（左：鳥瞰図、右：断面図）

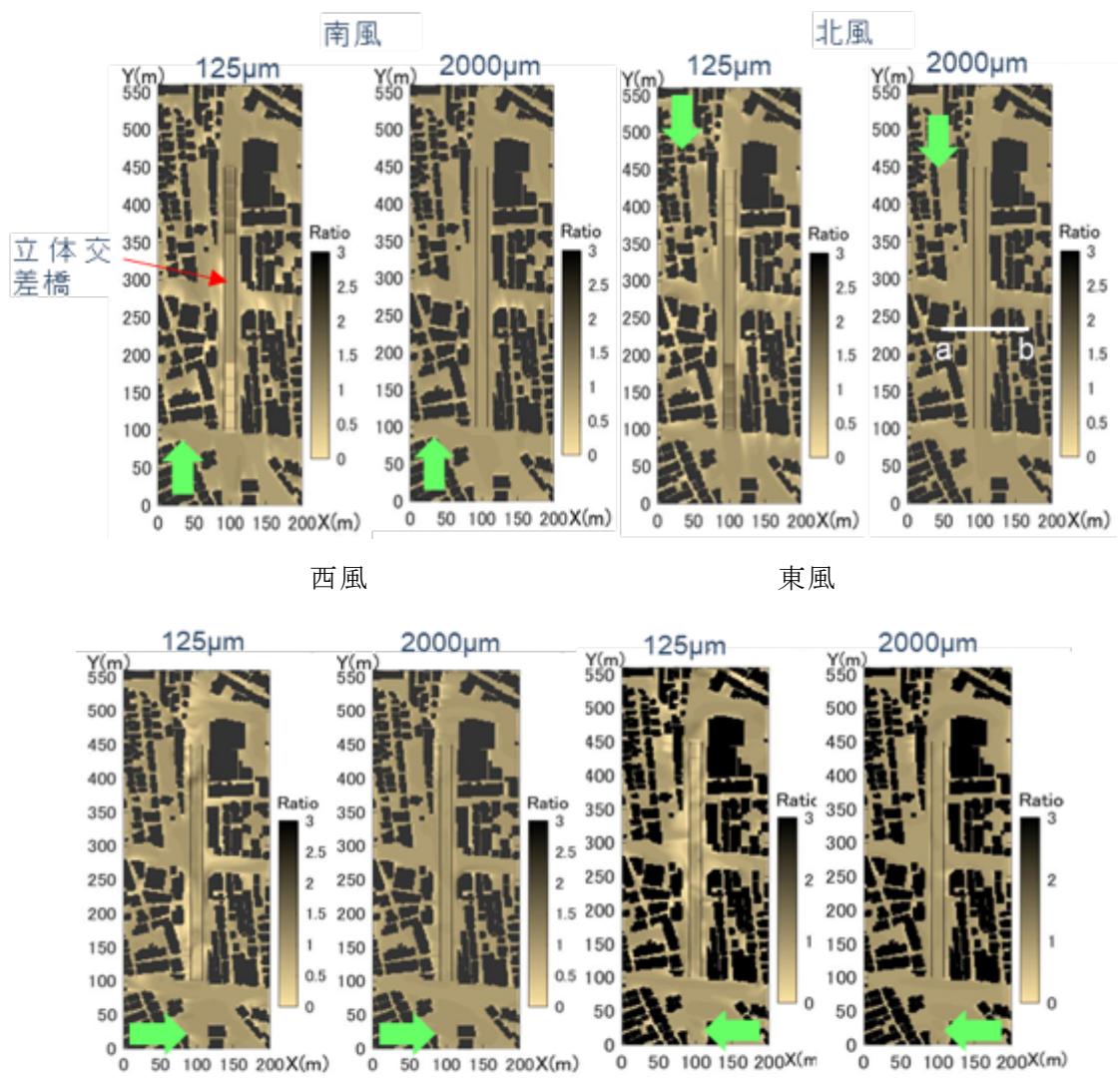


図 3-55 立体交差道路周辺の無次元降灰強度。南北に走る道路にある 2 本の平行直線は高架橋の位置を示す（黒のハッチは建物等障害物）

地面の降灰強度分布の粒径による違いが図 3-52 と同様に出ている。風向の関係では、南北に走る道路より東西に走る道路の方が、道路面での降灰のむらが大きい。南北に走る立体交差道路部分(両側の黒い直線は防音壁)について見ると、粒径  $125\mu\text{m}$  で北風、南風ともに風上に向いた斜路で降灰が少なく風下向き斜路で多いという非対称性が明瞭に出ている。一方、粒径  $2000\mu\text{m}$  ではそうした傾向は不明瞭であり、一様性がやや大きい。これは、粒子の大きさによる風への応答の違いの影響が現れたものと考えられる。立体交差道路を横切る東西断面(図 3-55 北風  $2000\mu\text{m}$  のパネルの直線 a-b 上)内の無次元降灰濃度分布(上空の空間濃度に対する比率(Ratio))を 4 つの粒径について図 3-56 に示す。風は西風である。気流と火山灰粒子の速度ベクトルも併記してある。

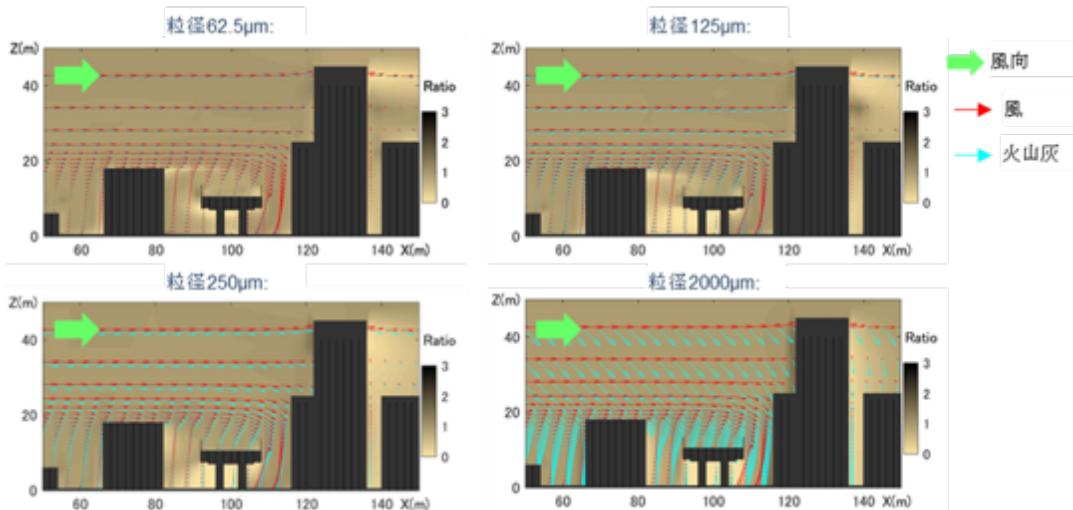


図 3-56 立体交差道路を含む断面内の無次元化空間濃度、気流、粒子速度ベクトル

道路東側にある建物に当たった気流は、高架橋の下に東から（図の右から）回り込んでいるが、粒径  $62.5 \mu\text{m}$  の粒子は、その気流に乗って高架下への回り込みが明瞭である。粒径  $125\mu\text{m}$  では、こうした高架下への回り込みははっきりと見られるものの、その程度は  $62.5\mu\text{m}$  よりやや弱い。一方、粒径  $2000\mu\text{m}$  では高架下への回り込みはあまり起こっておらず、高架橋の下が降灰に対し蔭のようになっている。粒径による降灰分布状況の違いが明瞭に出ている。

#### iv) 計算から得られる火山灰空間濃度の設備被害出現予測への関連付けの検討

上述の降灰シミュレーションでは、都市内での小スケールの降灰の不均一が取り扱われたが、降灰量の大小は都市における被害の軽重や影響出現タイミングの違い等の局所的な分布の現れに直接関係してくる。被害の顕在化の時間・空間的な差異を把握することは、事前あるいは降灰中の対策の優先箇所、あるいは、逆に比較的猶予のある個所など対策の順位付け等に繋がり、対策行動の効率化に有用であると考えられる。

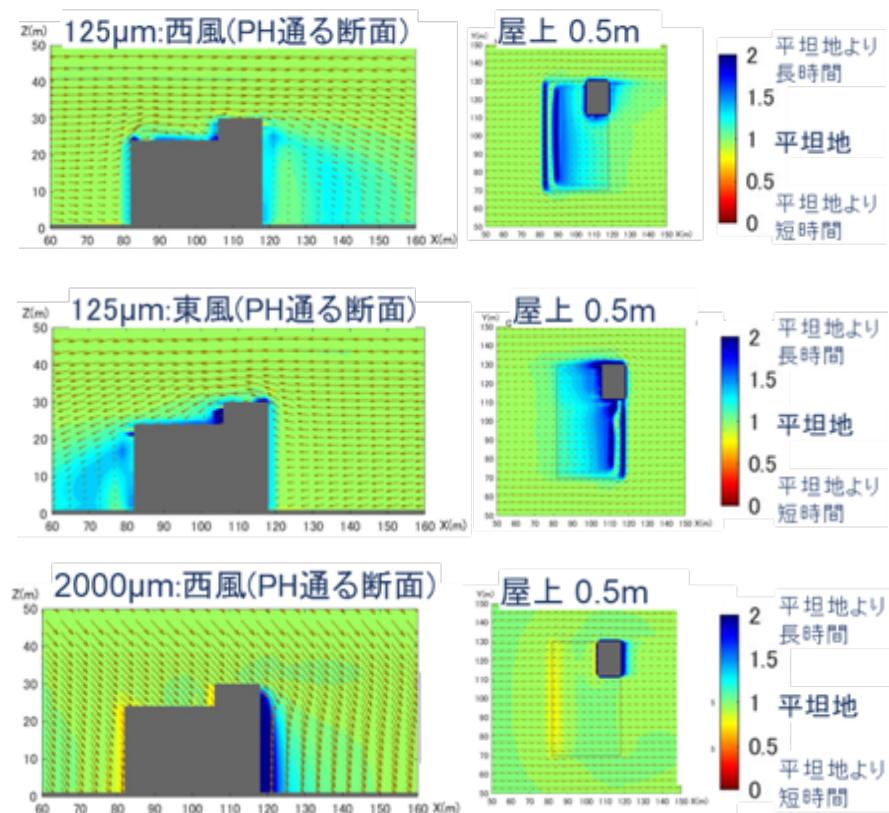
過年度に行った建物空調設備に関する降灰実験では、降灰量と機器動作あるいはフィルタ目詰まりの概略的な関係を得たが、一方で、降灰の数値シミュレーションによって、建物周りや都市街区における降灰強度や空間濃度などの降灰関連量の不均一に関する粗い知見が得られている。したがって、これらを結びつければ、建物配置や風などの与条件に対し、降灰の影響の出やすい箇所、猶予のある個所の出現の仕方の理解に繋がる可能性がある。

今年度は、それに対する予備的な検討として、降灰シミュレーションから直接的に得られることについて行った検討結果の一例を示す。屋外に設置される空調室外機、冷却塔は一般に機器側面に外気取入れ（吸気口）があり、空気を水平方向に吸引する。そのため、降灰下では火山灰が吸気の気流に乗る形で機器に侵入し、侵入量が多くなると機器の動作に影響を与えることになる。火山灰の機器への侵入量は、第 1 義的には火山灰の空間濃度、吸気の流速、吸気口の面積の積で表され、火山灰空間濃度に比例することになる。そのため、火山灰空間濃度が大きければ顕在化するまでの時間が短く、濃度が低ければその時間が長くなる。ここでは、令和 3 年度に行った北東端に

塔屋（ペントハウス、PH）のある、高さ 24m の矩形の単体建物の周りの有風時の火山灰空間濃度の分布を、こうした視点で見直してみた。図 3-57 に、風に乗りやすい粒径  $125 \mu\text{m}$ 、風に乗りにくい粒径  $2000 \mu\text{m}$  の粒子について、東風、西風の場合の、空間濃度から見た機器に影響が出る時間の相対的な分布を示す。平坦地に機器が置かれた状況を 1 とする場合の相対的な大小が示してある。空調機器は実際には建物屋上や側壁に接して置かれるが、センター図は計算の便宜上空中についても描いてある。各図には塔屋（PH）を通る断面図、および屋上  $0.5\text{m}$  の位置での平面図が示してある（塔屋で遮られる部分には、平面分布は書かれていらない）。

粒径  $125\mu\text{m}$  では、西風、東風のいずれに対しても、建物外壁や屋上では青系統の色になっており、機器が建物のない平地に置かれた場合よりも降灰による影響が顕在化する時間がより長くかかることを示している。小さい粒子は、建物を避けるように流れる気流に乗り易いため、やや建物を避ける傾向が出てくるためと思われる。一方、粒径  $2000\mu\text{m}$  では建物や塔屋の風上向きの面で黄～赤系統、同じく風下側で青系統の色になっており、非対称性がはっきりしている。粒径によるこうした違いは、粒子の慣性力による建物周りの気流の変化への応答、および落下速度の違いに起因していると見られる。

降灰被害の予測では、予報から提供される変数を被害と結びつける必要がある。そうした視点で、ここで示した考え方のさらなる向上を 2024 年度に行う予定である。



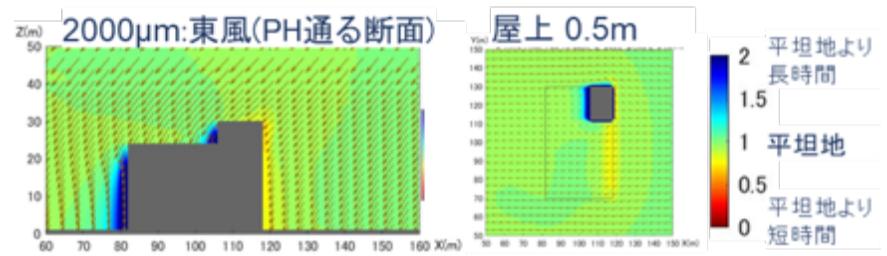


図 3-57 空調機の降灰影響出現までの時間の平坦地に対する相対時間

c) 降灰荷重による建物屋根への検討

i) はじめに

富士山の宝永噴火を想定した降灰シミュレーション<sup>24)</sup>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降灰深などが検討されている<sup>25-29)</sup>。

2022 年度は、1 層 1 スパン門形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。鉛直荷重による梁の損傷を評価するとき、梁端に生じる曲げ応力度が短期許容曲げ応力度に達した時点を損傷発生に設定すると、梁の限界降灰深を安全側に評価し過ぎると考えられる。2014 年の大雪による「建築物の雪害対策についての報告書」<sup>30)</sup>を参照し、短期許容曲げ応力度に対して損傷発生までの余裕率  $a$  ( $a > 1$ ) を考慮した。このとき、梁端に生じる曲げ応力度と短期許容曲げ応力度に余裕率  $a$  を考慮した値を等値することにより、梁の限界降灰深の定式化を行った。

今年度は、体育館などの避難施設で適用されている 1 层 1 スパン山形ラーメン構造物を対象に、梁端に生じる曲げモーメントならびに梁の限界降灰深の定式化を行う。

ii) 降灰荷重により 1 層 1 スパン山形ラーメン構造物に生じる応力

建築基準法施行令において降灰荷重の規定は無いが、建物屋根に作用する荷重の観点からすると、建築基準法施行令における積雪荷重の規定が有る。建築基準法施行令では一般の場合（多雪区域でない場合）において、積雪時の組み合わせ荷重  $V_s$  (N/m<sup>2</sup>) は短期に生ずる力として次式により規定される<sup>28)</sup>。

$$V_s = G + P + S \quad (1)$$

ここに、G：固定荷重(N/m<sup>2</sup>)、P：積載荷重(N/m<sup>2</sup>)、S：積雪荷重(N/m<sup>2</sup>)

このため、積雪荷重と降灰荷重は同時に作用しない設定条件のもとで、降灰荷重による建物屋根の安全性を建築基準法施行令における積雪荷重の規定に基づき検討する。このとき、(1)式において積雪荷重  $S$  を降灰荷重  $A$  に置換すると、降灰時の組み合わせ荷重  $V_A$  (N/m<sup>2</sup>) は次式となる。

$$V_A = G + P + A \quad (2)$$

ここで、梁が負担する組み合わせ荷重  $V$  (N/m<sup>2</sup>) の負担幅を  $B$  (m) とすると、単位長さ当たりの鉛直荷重  $W$  (N/m) は  $V_A$  を用いて次式となる。

$$W = B \times V_A = B \times (G + P + A) \quad (3)$$

降灰荷重  $A$  が 1 層 1 スパン山形ラーメン構造物の梁に等分布に作用するときは、図 3-58 となる。ここで、柱脚はピン支持とする。このとき、梁端に生じる曲げモーメント  $M_G$  (N·m) を定式化する。

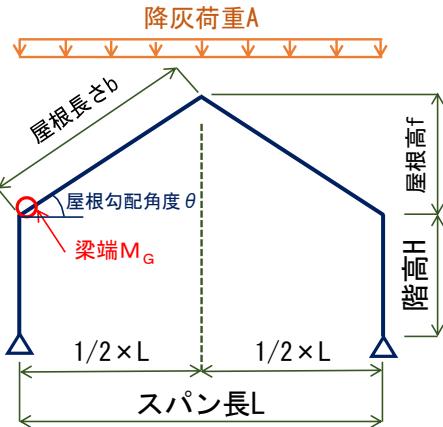


図 3-58 1 層 1 スパン山形ラーメン構造物の梁に作用する降灰荷重

柱の剛度を  $K_C$  ( $\text{cm}^4/\text{m}$ )、梁の剛度を  $K_G$  ( $\text{cm}^4/\text{m}$ ) とすると、 $K_C$  と  $K_G$  はそれぞれ次式となる。

$$K_C = \frac{I_C}{H} \quad K_G = \frac{I_G}{b} \quad (4)$$

ここに、  
 $I_C$  : 柱の断面 2 次モーメント ( $\text{cm}^4$ )  
 $I_G$  : 梁の断面 2 次モーメント ( $\text{cm}^4$ )  
 $b$  : 屋根長さ (m)  
 $H$  : 階高 (m)

柱に対する梁の剛比  $k$  は、

$$k = \frac{K_G}{K_C} \quad (5)$$

となり、(4)式を(5)式に代入すると柱に対する梁の剛比  $k$  は次式となる。

$$k = \left(\frac{I_G}{b}\right) \times \left(\frac{H}{I_C}\right) = \left(\frac{I_G}{I_C}\right) \times \left(\frac{H}{b}\right) \quad (6)$$

柱に対する梁の断面 2 次モーメント比を  $S$  とすると、

$$S = \frac{I_G}{I_C} \quad (7)$$

となり、柱に対する梁の剛比  $k$  は次式となる。

$$k = S \times \left(\frac{H}{b}\right) \quad (8)$$

降灰荷重  $A$  が梁に等分布に作用するとき、梁端に生じる曲げモーメント  $M_G$  ( $\text{N}\cdot\text{m}$ ) は(9)式となる。

$$M_G = \frac{1}{32} \times W \times L^2 \times \frac{H \times (8H + 5f)}{H^2 \times \left\{S \times \left(\frac{H}{b}\right) + 3\right\} + f \times (3H + f)} \quad (9)$$

屋根勾配  $U$  を、

$$U = \frac{f}{\left(\frac{1}{2}L\right)} \quad (10)$$

とすると、屋根高  $f$  (m) は、

$$f = \frac{1}{2} \times U \times L \quad (11)$$

となり、屋根長さ  $b(m)$  は(12)式となる。

$$b = \sqrt{\left(\frac{1}{2}L\right)^2 + f^2} \quad (12)$$

(11)式の屋根高  $f(m)$  を(12)式に代入すると、屋根長さ  $b(m)$  は(13)式となる。

$$b = \frac{1}{2}L \times \sqrt{1 + U^2} \quad (13)$$

ここで、屋根勾配  $U$  と屋根勾配角度  $\theta$  (度) の関係は(14)式となる。

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{1+U^2}}\right) \times \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (14)$$

(11)式の屋根高  $f(m)$  と(13)式の屋根長さ  $b(m)$  を(9)式に代入すると、梁端に生じる曲げモーメント  $M_G(N \cdot m)$  は(15)式となる。

$$M_G = \frac{1}{32} \times W \times L^2 \times \frac{H \times \left\{8H + \left(\frac{5}{2} \times U \times L\right)\right\}}{H^2 \left\{S \times \left(\frac{2H}{L \times \sqrt{1+U^2}}\right) + 3\right\} + \left(\frac{1}{2} \times U \times L\right) \times \left\{3H + \left(\frac{1}{2}UL\right)\right\}} \quad (15)$$

このとき、屋根高、スパン長ならびに階高が変化したとき、梁端に生じる曲げモーメント  $M_G$  の特性について検討する。

### 1) 屋根勾配角度が変化した場合

基準モデルは陸屋根として、(15)式の屋根勾配  $U$  を 0 に設定する。このとき、基準モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G0}$  は(16)式となる。

$$M_{G0} = \frac{1}{4} \times W \times L^2 \times \frac{1}{\left\{S \times \left(\frac{2H}{L}\right) + 3\right\}} \quad (16)$$

比較モデルの屋根勾配角度  $\theta$  が図 3-59 のように変化したとき、比較モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G1}(N \cdot m)$  は(17)式となる。ここで、屋根勾配  $U$  と屋根勾配角度  $\theta$  (度) の関係は(14)式より図 3-60 となる。

$$M_{G1} = \frac{1}{32} \times W \times L^2 \times \frac{H \times \left\{8H + \left(\frac{5}{2}UL\right)\right\}}{H^2 \times \left\{\beta \times S \times \left(\frac{2H}{L\sqrt{1+U^2}}\right) + 3\right\} + \left(\frac{1}{2}UL\right) \times \left\{3H + \left(\frac{1}{2}UL\right)\right\}} \quad (17)$$

ここに、 $\beta$  : 柱に対する梁の断面 2 次モーメント比の係数

基準モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G0}$  に対する比較モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G1}$  の比率  $r_1$  は、(16)式と(17)式を用いて求められる。

$$r_1 = \frac{M_{G1}}{M_{G0}} \quad (18)$$

基準モデルおよび比較モデルのスパン長  $L$  と階高  $H$  は同値 ( $L=H$ ) とし、比較モデルの柱に対する梁の断面 2 次モーメント比の係数  $\beta$  は 1.0~3.0 に設定する。

屋根勾配角度 (度) と梁端の曲げモーメントの比率  $r_1$  の関係は図 3-61 となる。梁端の曲げモーメントの比率は屋根勾配角度が大きくなるに従い大きくなる。また、屋

根勾配角度が同値のとき、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の比率は小さくなる。

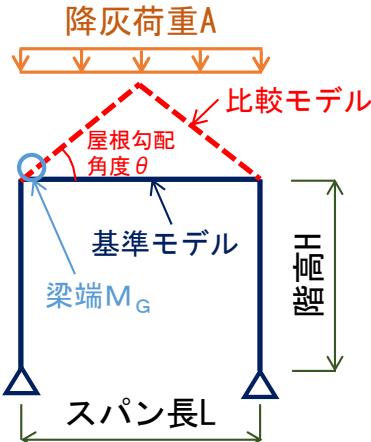


図 3-59 1 層 1 スパン山形ラーメン構造物の梁に作用する降灰荷重  
(屋根高が変化したとき)

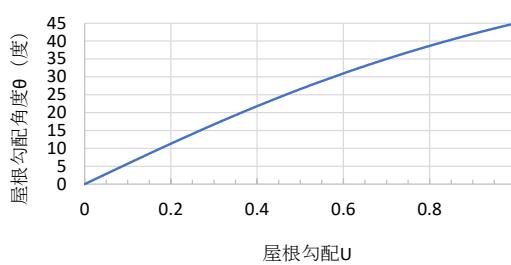


図 3-60 屋根勾配と屋根勾配角度(度)の関係

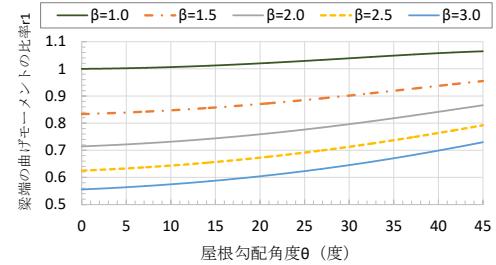


図 3-61 梁端の曲げモーメントの比率

基準モデルが図 3-62 のとき、比較モデルのスパン長が図 3-62 に示すように基準モデルに対して変化したとする。基準モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G1}$ (N・m)は(17)式により求められる。一方、比較モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G2}$ (N・m)は(19)式となる。

$$M_{G2} = \frac{1}{32} W(g \times L)^2 \times \frac{H \times \left\{ 8H + \left( \frac{5}{2} \times U \times (g \times L) \right) \right\}}{H^2 \left\{ (\beta \times S) \times \left( \frac{2H}{(g \times L)\sqrt{1+U^2}} \right) + 3 \right\} + \left( \frac{1}{2} U (g \times L) \right) \times \left\{ 3H + \left( \frac{1}{2} U \times (g \times L) \right) \right\}} \quad (19)$$

ここに、 $g$  : スパン長の係数

基準モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G1}$  に対する比較モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G2}$  の比率  $r_2$  は、(17)式と(19)式を用いて求められる。

$$r_2 = \frac{M_{G2}}{M_{G1}} \quad (20)$$

基準モデルのスパン長  $L$  と階高  $H$  は同値( $L=H$ )とし、柱に対する梁の断面2次モーメント比の係数  $\beta$  は 1.0 とする。基準モデルおよび比較モデルの屋根勾配  $U$  と屋根勾配角度  $\theta$  (度) は表 3-6 の 2 種類とし、比較モデルの柱に対する梁の断面2次モーメント比の係数  $\beta$  は 1.0~3.0 に設定する。

スパン長の係数  $g$  と梁端の曲げモーメントの比率  $r_2$  の関係は図 3-63 となる。梁端の曲げモーメントの比率はスパン長が長くなるに従い大きくなる。スパン長が同値のとき、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の比率は小さくなる。また、屋根勾配角度が大きくなるほど梁端の曲げモーメントの比率は小さくなる。

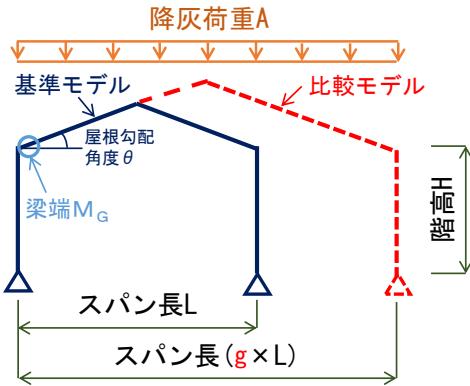


図 3-62 1 層 1 スパン山形ラーメン構造物の梁に作用する降灰荷重  
(スパン長が変化したとき)

表 3-6 屋根勾配と屋根勾配角度（度）の設定

屋根勾配 U	屋根勾配角度（度）
0.25	14.0
0.5	26.6

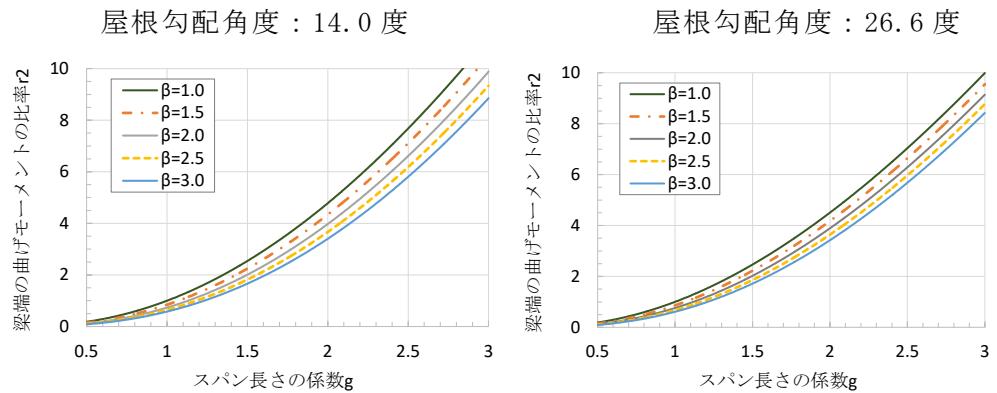


図 3-63 スパン長の係数と梁端の曲げモーメントの比率の関係

基準モデルが図 3-64 のとき、比較モデルの階高が図 3-64 に示すように基準モデルに対して変化したとする。基準モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G1}$  ( $N \cdot m$ ) は、(17) 式により求められる。一方、比較モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G3}$  ( $N \cdot m$ ) は (21) 式となる

$$M_{G3} = \frac{1}{32} WL^2 \times \frac{(c \times H) \times \left\{ 8(c \times H) + \left( \frac{5}{2} \times U \times L \right) \right\}}{(c \times H)^2 \left\{ (\beta \times S) \left( \frac{2(c \times H)}{L\sqrt{1+U^2}} \right) + 3 \right\} + \left( \frac{1}{2} UL \right) \times \left\{ 3(c \times H) + \left( \frac{1}{2} \times U \times L \right) \right\}} \quad (21)$$

ここに、c : 階高の係数

基準モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G1}$  に対する比較モデルの梁端に生じる曲げモーメント  $M_{G3}$  の比率  $r_3$  は、(17)式と(21)式を用いて求められる。

$$r_3 = \frac{M_{G3}}{M_{G1}} \quad (22)$$

基準モデルのスパン長  $L$  と階高  $H$  は同値 ( $L=H$ ) とし、柱に対する梁の断面 2 次モーメント比の係数  $\beta$  は 1.0 とする。基準モデルおよび比較モデルの屋根勾配  $U$  と屋根勾配角度  $\theta$  (度) は表 3-4 の 2 種類とし、比較モデルの柱に対する梁の断面 2 次モーメント比の係数  $\beta$  は 1.0~3.0 に設定する。

階高の係数  $c$  と梁端の曲げモーメントの比率  $r_3$  の関係は図 3-65 となる。梁端の曲げモーメントの比率は階高が高くなるに従い小さくなる。階高が同値のとき、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の比率は小さくなる。また、屋根勾配角度が大きくなる従い梁端の曲げモーメントの比率は概ね大きくなる傾向にある。

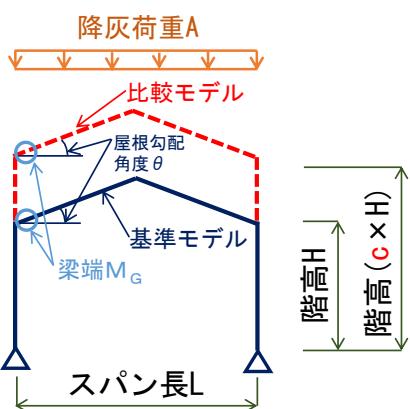
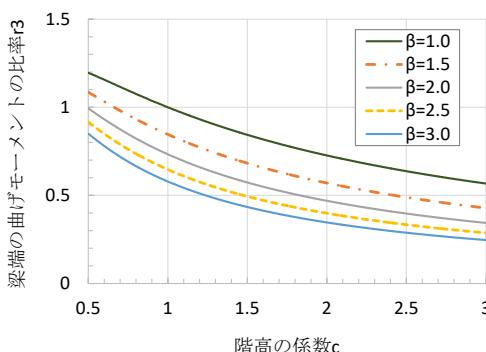


図 3-64 1 層 1 スパン山形ラーメン構造物に作用する降灰荷重  
(階高が変化したとき)

屋根勾配角度 : 14.0 度



屋根勾配角度 : 26.6 度

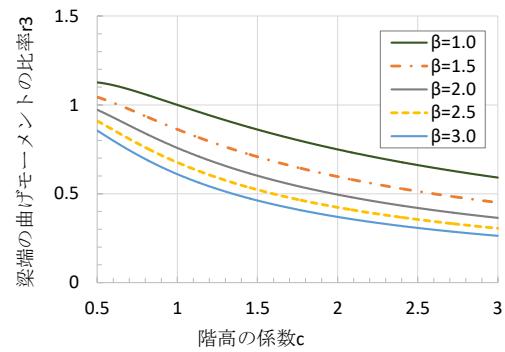


図 3-65 階高の係数と梁端の曲げモーメントの比率の関係

d) 病院の機能被害

i) はじめに

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を検討する必要がある。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ほとんど記録として残されていない。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ほとんど無い。このような背景を踏まえ、2022 年度は、東北地方太平洋沖地震における医療施設被害データ<sup>31)</sup>を用いて、病院の要素と要素の被害程度の関係、病院の機能と機能の被害程度の関係を作成した。

今年度は、病院の重要要素と病院の機能の被害関係を作成し、病院の重要要素の被害を用いた病院の機能の分類について検討する。

ii) 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・観淳夫・工学院大学）」<sup>31)</sup>の分担研究として、分担研究者・山下哲郎・工学院大学が実施したものである。

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た。

iii) 病院の重要要素と病院の機能の関係

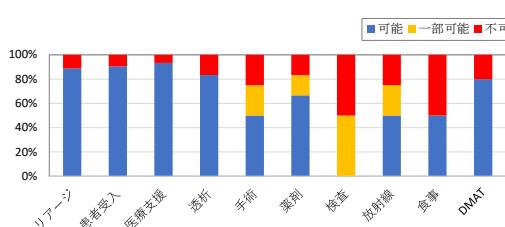
文献の調査項目に基づき病院の重要要素を表 3-7 に示すように設定し、調査報告文をもとに重要要素の被害程度を、「被害無し」、「一部被害有り」、「被害有り」に区分した。つぎに、病院の機能を災害医療に限定すると表 3-7 となり、調査報告文をもとに機能の被害程度を、「可能」、「一部可能」、「不可」に区分した。

表 3-7 病院の重要要素と病院の機能（災害医療）

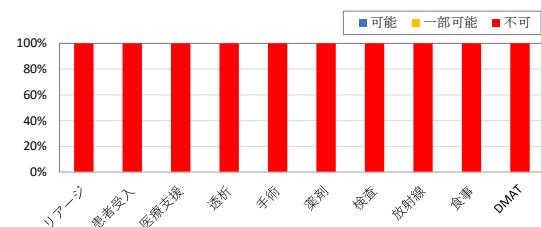
項目		被害程度
病院の 重要要素	上水	<ul style="list-style-type: none"> <li>・被害無し</li> <li>・一部被害有り</li> <li>・被害有り</li> </ul>
	電気	
	医療スタッフ（通勤）	
	医療体制	
病院の 機能 (災害医療)	トリアージ（外来）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・可能</li> <li>・一部可能</li> <li>・不可</li> </ul>
	患者受入（搬送、他病院からの受入など）	
	医療支援（避難所、保健所、他病院など）	
	透析	
	手術	
	薬剤	
	検査	
	放射線	
	食事	
	DMATからの支援受入	

病院の重要要素に被害有りのとき、病院の重要要素と病院の機能（災害医療）の被害関係は図 3-66 となる。ここで、重要要素に被害有りは、表 3-7において「一部被害有り」と「被害有り」の合計とする。上水の被害有りを見ると、手術については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が大きい。電気の被害有りを見ると、病院の機能（災害医療）は全ての項目において不可となる。医療スタッフの通勤不可を見ると、DMAT からの支援受入を除いた災害医療が一部可能または不可となる。医療体制の不可を見ると、検査と食事を除いた災害医療は可能である病院が多く、限られた病院の要素を活用して災害医療を可能な限り継続した病院が多かったと考えられる。

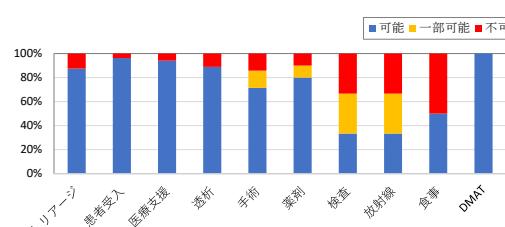
上水の被害有り



電気の被害有り



医療スタッフの通勤不可



医療体制の不可

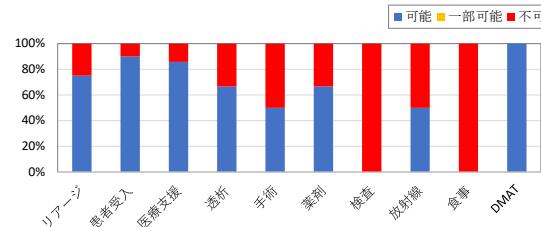


図 3-66 病院の重要要素と病院の機能（災害医療）の被害関係

病院の重要要素に被害有りのとき、病院の重要要素と病院の機能（災害医療）の停止率の関係は図 3-67 となる。ここで、病院の機能（災害医療）の停止は、図 3-66において「一部被可能」と「不可」の合計とする。電気の被害有りでは、全ての病院の機能の停止率が 1 となる。一方、電気を除いた病院の重要要素が被害有りでも、停止率の低い病院の機能が見られる。

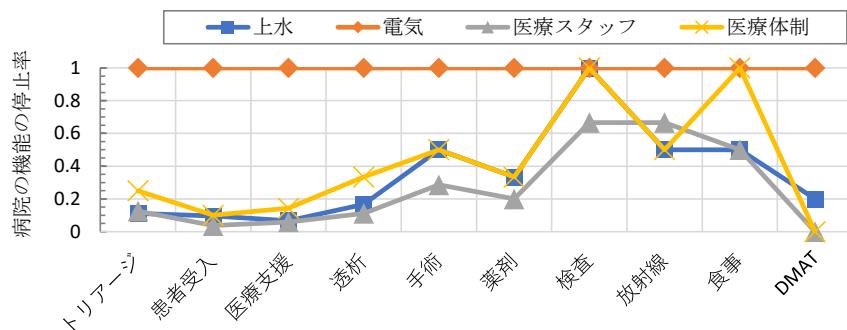


図 3-67 病院の重要要素と病院の機能（災害医療）の停止率の関係

病院の重要要素に被害有りのとき、病院の重要要素と病院の機能の停止率の関係が類似となるように、病院の機能（災害医療）を分類すると図 3-68 となる。なお、分類 1～分類 3 は表 3-8 となる。分類 1 は病院の重要要素として電気が支配的となる病院の機能であり、分類 2 は電気に加えて表 3-7 の重要要素が必要となる病院の機能となる。分類 3 は病院の機能の停止率を説明するには、表 3-7 の重要要素を含めてさらに病院の要素を検討する必要があるものとなる。

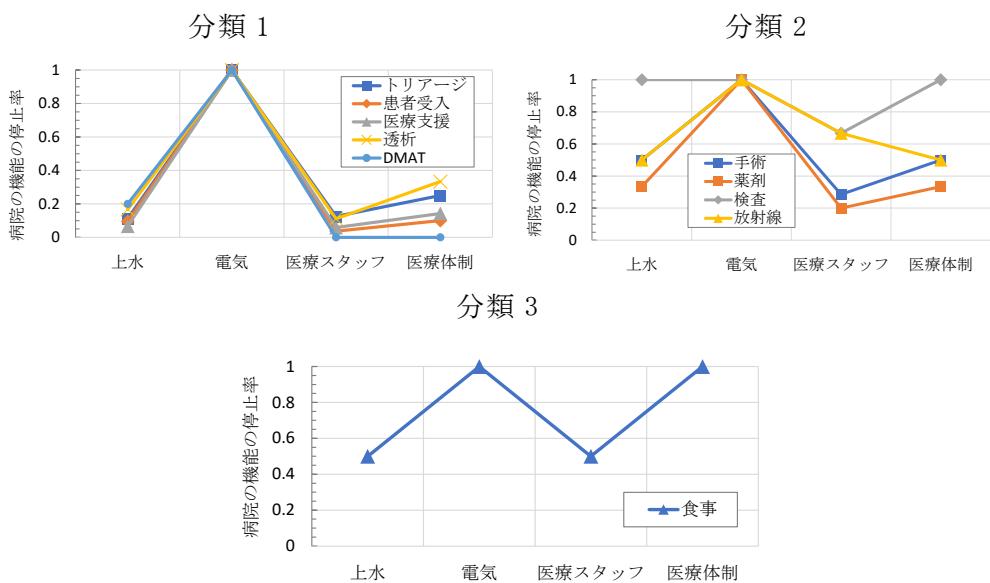


図 3-68 病院の重要要素の被害を用いた病院の機能（災害医療）の分類

表 3-8 病院の機能（災害医療）の分類

	病院の重要要素	病院の機能
機能分類 1	電気	トリアージ、患者受入、医療支援、透析、DMAT
機能分類 2	上水、電気、医療スタッフ、医療体制	手術、薬剤、検査、放射線
機能分類 3	上水、電気、医療スタッフ、医療体制に加えて他の要素も必要	食事

病院の機能被害は地震と火山で異なる部分があるものの、病院の重要要素の被害を用いた病院の機能（災害医療）の分類は災害の種類に依らず適用できる部分が多いと考えられる。従って、降灰による病院の重要要素の被害が求められると、表 3-7 の分類を用いて病院の機能被害が評価される。

#### e) 降灰被害予測コンテンツ試作版に関するまとめ

降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化に関し、令和 5 年度の計画案は達成できた。実施内容は以下のようにまとめられる。

本プロジェクトでは、火山被害の情報ツールの作成を目指して降灰被害予測のコンテンツ開発を行っている。本業務では、そのコンテンツの一つとして、都市機能を支える要素の一つである建築機能被害に着目し、屋外に設置される空調機室外機、冷却塔やエアフィルタへの影響を評価するための実験を過年度までに行ってきている。また建物屋根の積灰による影響評価を実施し損傷曲線の提案を行ってきている。さらに数値シミュレーションにより建物が都市街区の降灰や積灰分布にどのような影響を及ぼすかの基礎的な検討を行ってきている。それらの結果を踏まえ、本年度は、降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化として、下記の項目に対しての検討を行った。

建物群を有する都市部では、降灰空間分布は建物の影響により、広域の予測では表現されない小さい空間スケールの不均一が生じ、それらは風向や火山灰粒子の粒径に依存することが過年度の降灰数値シミュレーションから示唆されていた。これらは都市における建物機能被害の出現や、災害時の都市内道路の通行に影響するため、その性状を明らかにすることは重要である。今年度は、途中で方向が大きく変わる幅広い道路を含む街区、および立体交差橋のある交差点を含む街区を、新たに都市への降灰の検討対象の街区として加え、数値シミュレーションにより降灰状況の検討を行った。その結果、方向が大きく変化する都市内道路では、曲線部の前後で降灰状況が大きく変わること、また、立体交差橋では、斜路の向きと風向きとの関係により上り斜路と下り斜路との間で降灰状況に差異が出ること、これらの傾向は粒径の小さい火山灰でより顕著になること、などが示された。また、過年度実施の空調設備への降灰実験結果と、建物周りの降灰数値シミュレーションによる火山灰空間濃度分布とを関連付けることも試み、上空からの降灰が一様であっても、建物風上側、風下側といった建物

に対する位置により、影響が顕著になるタイミングなどに差異が生じる可能性があることが示唆された。

過年度までの研究で、屋根の強度に基づき積灰状態の安全性の検討を行ってきたが、降灰深が同一でも、建物条件（屋根形状、スパン長、高さ、柱と梁の部材寸法など）や荷重条件（降灰の偏荷重など）により構造物の安全評価は異なることが示唆された。今年度は、屋根形状への影響として、山形の屋根をもつ建物を対象に、構造部材の耐力の余裕率のばらつき（変動）を考慮し、変形に対する限界降灰深の定式化を行った。あわせて、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、折板屋根をもつ鉄骨造、木造などの、代表的な建物構造について、屋根の積灰量に対する被害確率関数（損傷曲線）の作成を行った。

過年度において、病院等の災害時重要施設における機能被害について整理を行う目的で、東日本大震災での病院（48病院）の被害事例に基づいて、病院の被害要因と機能被害のデータベースを作成した。これは、建物被害やインフラ被害と病院の機能被害との相関関係を見るためのものであったが、今年度は、災害時の医療の専門家のヒアリング調査を実施し、災害時の病院の機能維持を考える上で重要な要素について医療専門家の立場からの意見を収集した。これらは、次年度に実施する降灰の量と機能被害との関係性の統計的な検討の素材となる。

#### f) 過去の火山災害に関する地理情報の可視化

火山災害の進行に伴う、観測情報、地形変化、被害範囲、避難範囲などの時間的変化を地理情報として可視化することは、対象火山の地方自治体の防災担当者や火山専門家が、噴火災害の進行状況を把握することができ、避難行動についての検討をリアルタイムに役立てることができる。本プロジェクト中では住民避難が伴う比較的大きな噴火事例がなかった。そのため、過去の噴火事例を対象に、噴火の進行とともに見られた災害影響と避難範囲の変化などの地理情報の可視化を行なった。

まず、可視化作業に先立ち、近年の国内における噴火履歴から可視化に適した噴火を抽出した。Webに掲載されている資料（日本活火山総覧第4版と内閣府の「わが国の主な火山災害」<sup>32)</sup>を参考にした。そのうち詳、細な可視化に必要な詳細な資料が残っている過去30年程度の火山災害を伴う噴火イベントを抽出した（表3-9）。有珠山2000年噴火、新燃岳2011年噴火、御嶽山2018年噴火などがあるが、面的広がる火山現象で地殻変動、火山製泥流の発生など種類の多い噴火現象があり、居住区などへの被害が見られた2000年噴火を対象とした。有珠山2000年噴火について、時間分解能を向上させるように、噴火発生前から噴火の終了まで推移した噴火観測・調査記録や防災対応記録など可能な限り収集した（表3-10）。震源分布データについては、北海道大学の青山裕教授より提供していただいた。

有珠山噴火に関して、時空間的推移を整理し時系列に沿って整理し、各種情報について、GISシステム上で表示編集できるデータ形式に変換した。ここで各種情報は・火山活動（震源分布、地殻変動、火口の開口、火山灰の分布範囲等）、被害状況（家屋、

道路等)、立入規制範囲および避難居住区、避難施設の開設時期と位置、その他、今後他火山で防災対応を行う上で参考となる情報を含む。

表 3-9 最近 100 年間の火山災害のうち、地理情報が読み取り可能な事例として検討した最近 30 年間の噴火事例

年	火山	要因	詳細
1995 (平成7)	焼岳	水蒸気爆発	中ノ湯工事現場で水蒸気爆発、作業員4名死亡。
2000 (平成12)	有珠山	噴石・地殻変動・火口噴出型泥流	地殻変動や火口噴出型泥流などにより、家屋全壊261世帯、半壊343世帯ほか多数の家屋被害、土木被害64件、上下水被害44件など大きな被害。人的被害なし。
2000 (平成12)	三宅島	噴石・火碎流・二次泥流	全島避難。
2004 (平成16)	浅間山	空振・降灰	農作物、ガラス等に被害。
2011 (平成23)	新燃岳	噴火	空振、噴石により軽傷者1名、住宅や自動車のガラス太陽光パネル等損傷945件。
2014 (平成26)	御嶽山	噴石	死者58名、行方不明者5名。
2015 (平成27)	口永良部島	噴火	全島避難。
2018 (平成30)	草津白根山	噴石	死者1名、負傷者11名。

※日本活火山総覧（第4版）および内閣府HPに加筆・修正

表 3-10 有珠山 2000 年噴火の地理情報を取得するために活用した資料

収集資料	発行	発行年等	掲載内容
総合観測班地質グループ資料	総合観測班地質グループ	平成12年	火口推移、割れ目推移
火山噴火予知連絡会・有珠山部会資料	火山噴火予知連絡会	平成12年	火口分布、割れ目分布、震源分布
平成12年（2000年）有珠山噴火災害報告	北海道開発局室蘭開発建設部	平成12年12月	道路通行規制、避難区域
平成12年度有珠山現況把握基礎調査	国際航業株式会社	平成13年3月	家屋被害、火口噴出型泥流、避難区域
平成12年（2000年）有珠山噴火の記録	国際航業株式会社	平成13年3月	道路被害（総合観測班地質グループ資料）
平成12年（2000年）有珠山噴火 一年の軌跡	北海道建設部	平成13年7月	道路通行規制、降灰厚分布、避難区域
2005年秋季大会現地検討会『有珠山』資料集	日本火山学会	平成17年10月	降灰分布、震源分布（参考）
Onizawa et al. (2007)	JVGR,160 (2007) 175-194	平成19年	震源分布（北海道大学よりデータ受領）
北海道大学震源リスト（有珠山）	北海道大学		震源分布（2000年4月3日以降）

GIS 化には ArcGIS (Esri 社) を用い、収集した原図に記載される情報に対し GIS ソフト上でトレース作業を行うことで GIS データ化した。データ形式は汎用的な Shape File 形式（以下、shp と略記）とした。shp ファイルは、特定の建物等を点で示す「ポイント」、河川や道路など線で示す「ライン」、湖沼や森林など面で示す「ポリゴン」など 3 種類の図形形状で空間要素を示すものであり、属性情報も付加することができる。ここでは適切な図形形状の GIS 化を行った。時系列に沿ったデータが存在するものについては、時系列ごとに GIS データ化した（図 3-69）。震源分布情報は 2000 年 3 月 27 日から 4 月 1 日までの Onizawa et al. , (2005)<sup>33)</sup> と 4 月 3 日以降（北海道大学震源資料）がある。この内、前者については、避難区域設定タイミングを参照に 2000 年 3 月 27 日～3 月 29 日 11:59 と、3 月 29 日 12:00～4 月 1 日までの 2 つに GIS 図で示した。なお、震源の生データは JVDN の震源分布データとして掲載を依頼している。

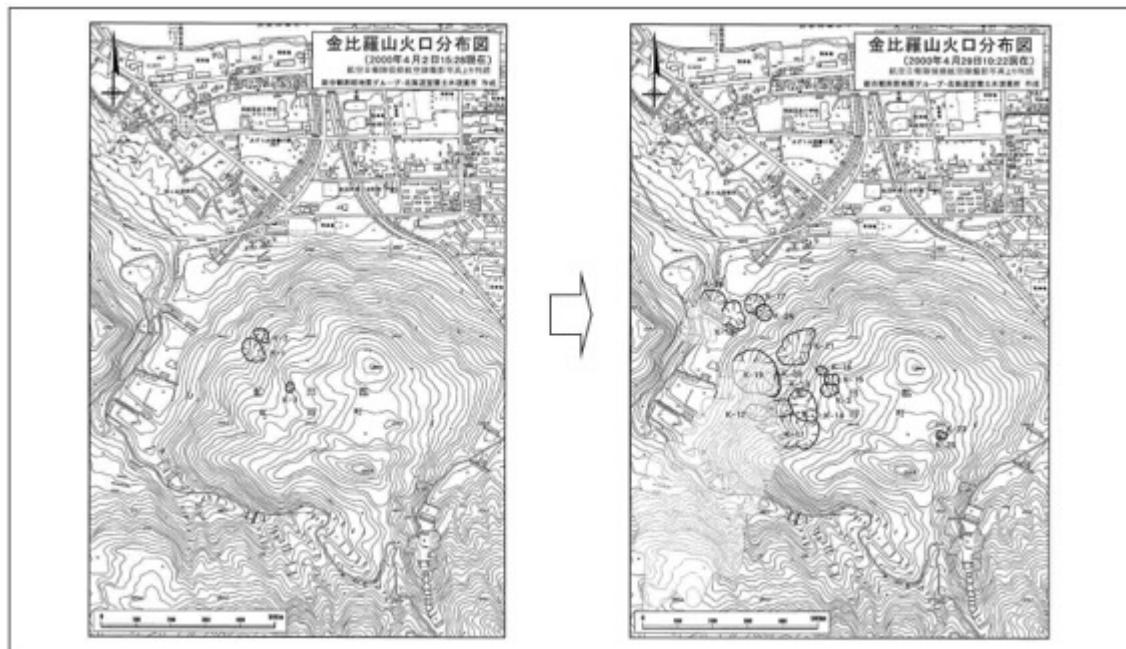


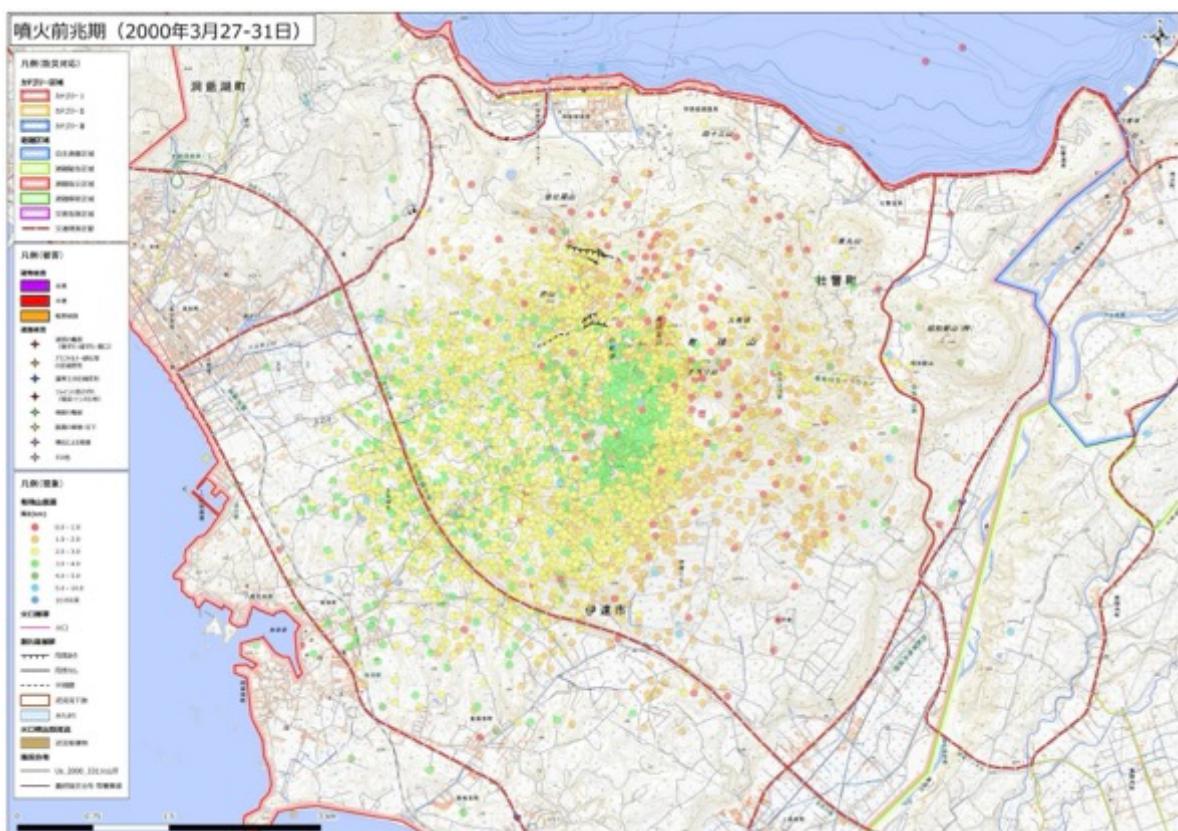
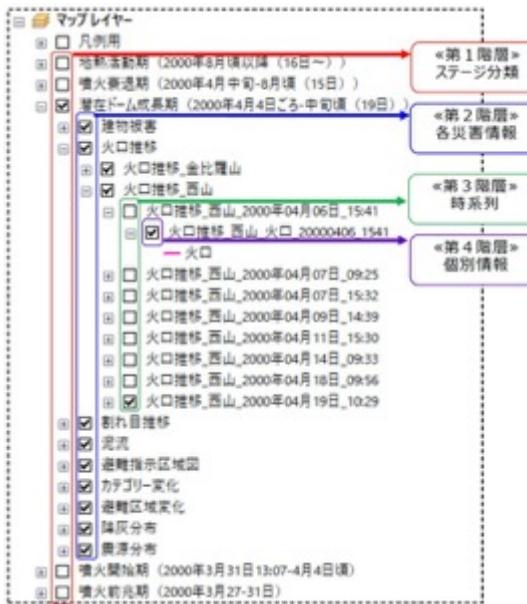
図 3-69 時系列化した GIS 画像例。火口の推移（左が 4 月 2 日、右が 4 月 29 日）

火山学的な現象推移と防災対応変化との関連性を視覚的にわかり易く把握することを目的に、有珠山 2000 年噴火の推移のステージ分類を行った。宇井ほか（2002）<sup>34)</sup>に基づき、火山活動の特徴により「噴火前兆期」、「噴火開始期」、「潜在ドーム成長期」、「噴火衰退期」、「地熱活動期」の 5 ステージに分類を行った。

ステージ分類：ここで、前兆期は3月17日から31日まで。噴火開始期は3月31日13時から4月4日に。潜在ドーム成長期は、4月5日から、火口形成の推移を基に、西山・金毘羅山の両火口において新たな火口が形成された最後の日付である4月19日までを「潜在ドーム成長期」と設定した。噴火衰退期は、4月20日に始まり、宇井ほか（2002）34の「隆起は鈍化し、最後に停止する時期」であり、大島ほか（2005）<sup>35</sup>の新山の比高変化を基に、新山の隆起が停止し、沈降に転じるタイミングから、8月15日までを「火口衰退期」と設定した。地熱活動期：8月16日以降とした。

GIS 化したデータを、ArcMap (ver10.8.2) に読み込ませることで災害情報の可視化を行った。これらの読み込まれたデータは、GIS ソフトの基本的な機能で、表示／非表示が可能である。さらに、複数データのグループ化機能により、大量のデータを同時に表示／非表示することができる。これらの機能を活用し、時空間的な広がりを持つ多様な災害情報の可視化を行った。

その際のグループ分けは、「ステージ分類」と「災害情報」からなる。「ステージ分類」は、火山活動に応じた防災対応の時系列変化を把握することを目的とし、5ステージのグループ群からなる。そこでは、ステージ分類、各災害情報、時系列、個別情報の4階層からなる（図3-70）。「災害情報」は、火山現象及び防災対応など、個々の災害情報の時系列変化の把握を目的としたグループ分けである。ここでは、各火山現象、防災対応など、個々の災害情報の時系列変化の把握のため、火山活動、被害状況、防災対応に関するすべての情報を掲載した（図3-71）。



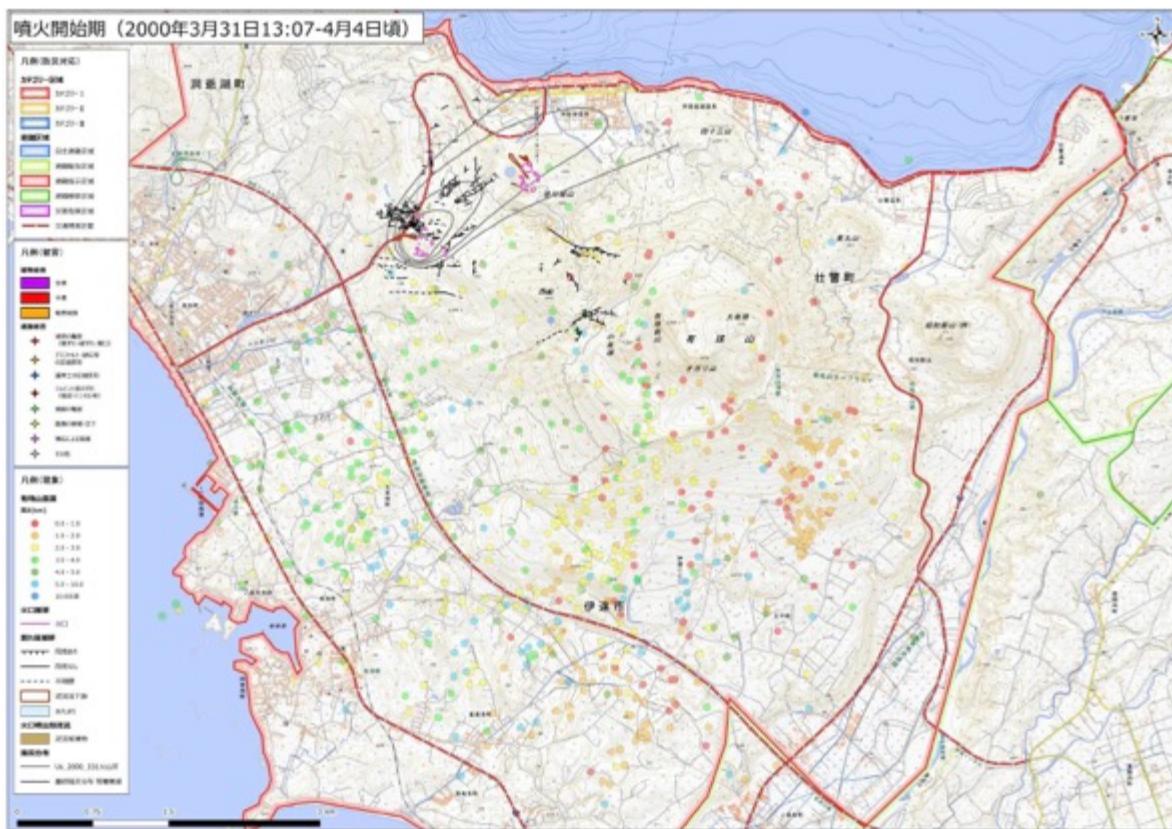


図 3-72b ステージ分類図（噴火開始期）

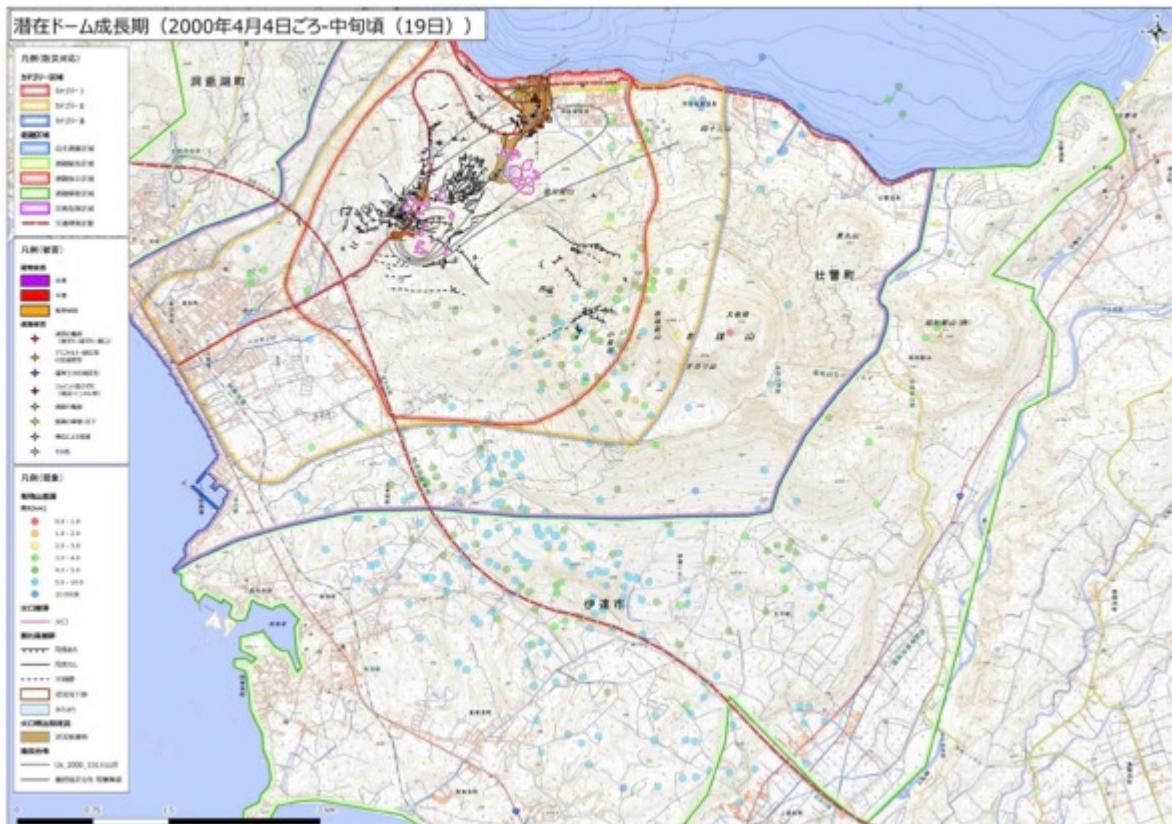


図 3-72c ステージ分類図（潜在ドーム成長期）

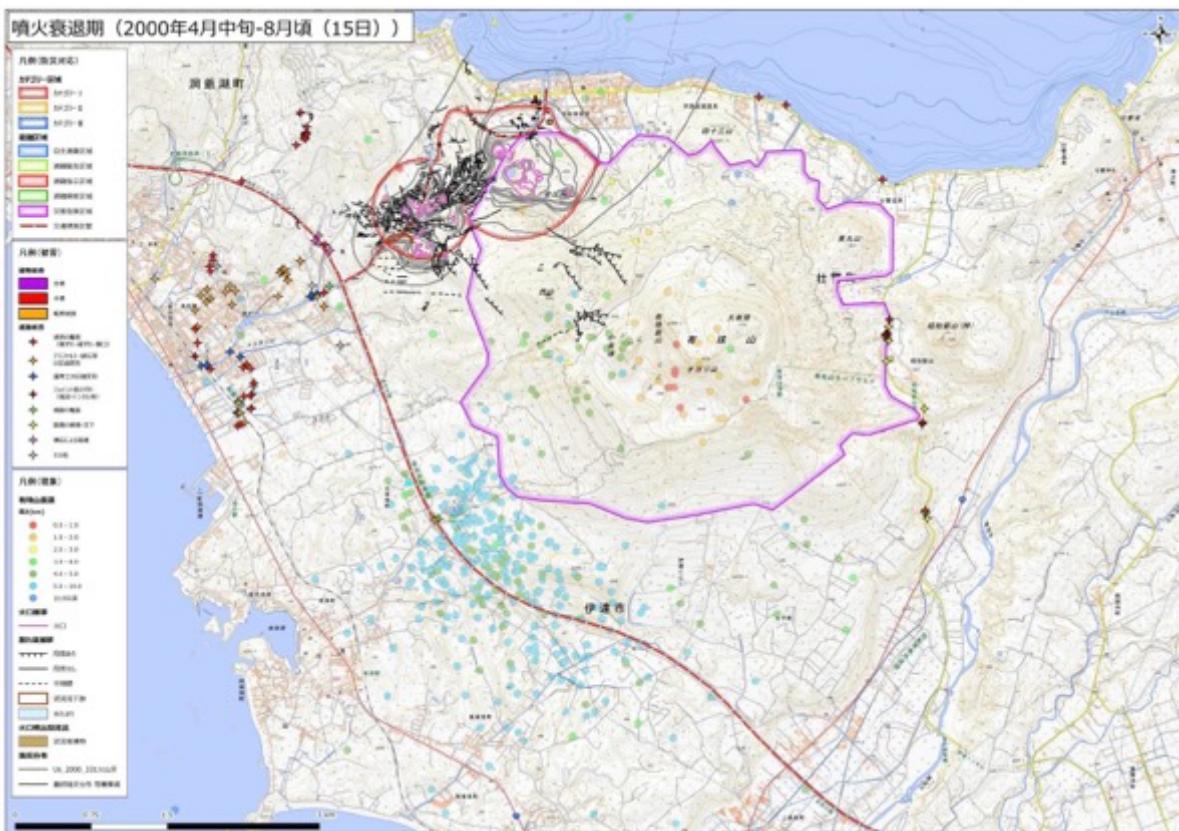


図 3-72d ステージ分類図（噴火衰退期）

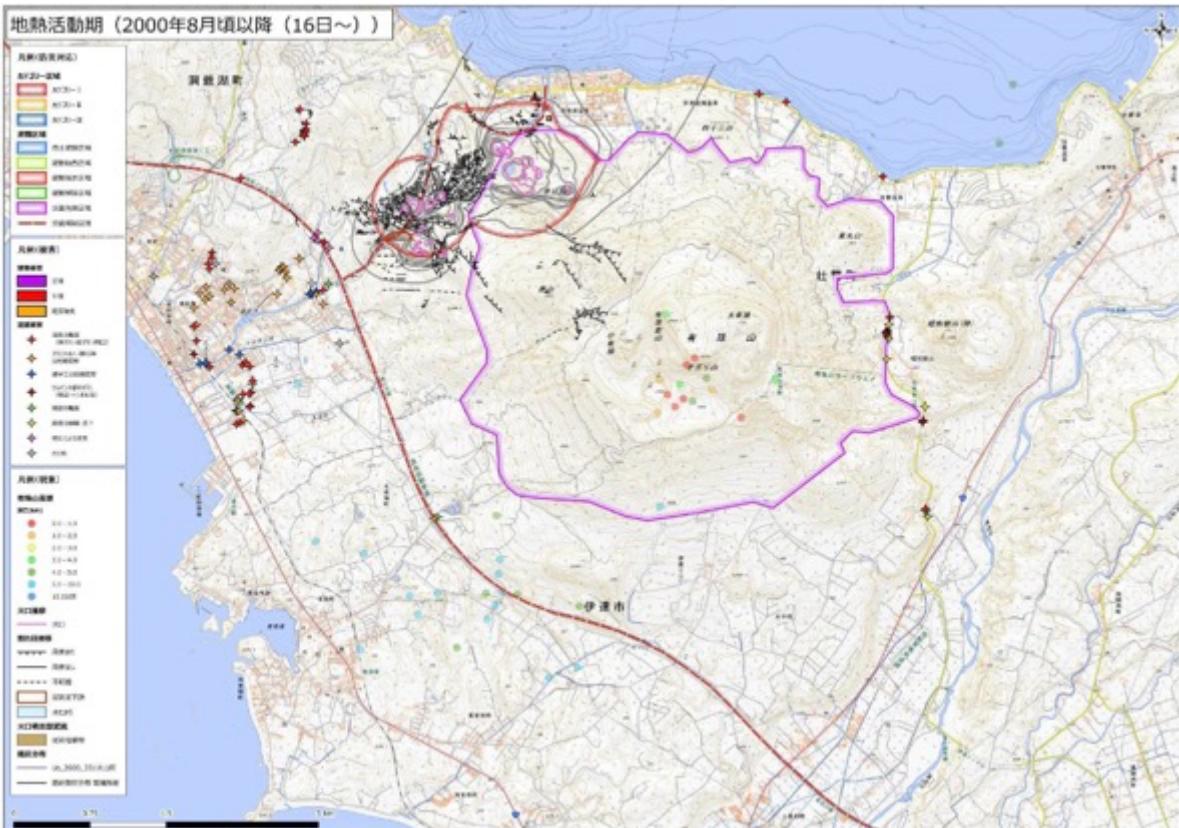


図 3-72e ステージ分類図（地熱活動期）

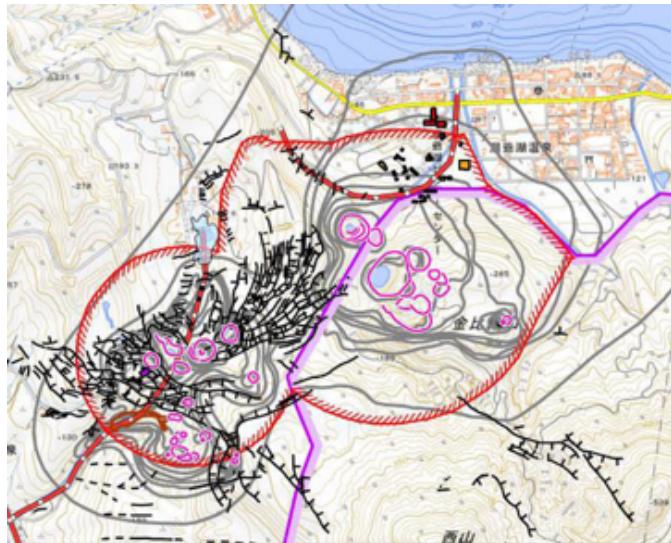


図 3-72f ステージ分類図（地熱活動期）の火口付近拡大図

図 3-72 には、各ステージ期間の最終日における時系列情報を表示させた状態の表示結果を示した。震源分布の GIS データは 2000 年 3 月 27 日～4 月 1 日と、4 月 3 日以降のデータの 2 期間で分けられているため、各ステージ時期に該当する観測データ全体を表示した。

#### 災害の空間情報のまとめ

今年度の業務では、日本の過去の噴火イベントのうち、火山噴火活動やそれに伴った災害、及び、対策に関する地理情報が充実している有珠山の 2000 年噴火を対象にした。時系列に沿った火山活動の推移、火山災害の拡大とそれに対応した警戒範囲などの対策に関するデータを集め、GIS 上で表示することができた。また、推移をわかりやすく理解するためのアニメーションも作成した。

今後、今回作成した地理空間情報データを JVDN 上で展開することによって、防災協議会に属する火山専門家がアクセスでき、火山災害の広がりと対応に関する具体的経緯を学ぶことが可能となり、将来、担当火山で遭遇する可能性のある火山災害の対策や対応に役立てることができるだろう。来年度以降は、これらに加えて、降灰被害予測コンテンツとして実施した降灰被害実験や降灰シミュレーションの結果を、リアルタイムの降灰情報や降灰シミュレーションと合わせて JVDN 上で提供できるよう検討することが必要である。

### 3) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

#### a) 登山者動向把握実験

##### i) 概要

2023年8月26日（土）、27日（日）の二日間、長野県と岐阜県の県境に位置する御嶽山において登山者動態データ取得実験および状況共有実験（通称、御嶽山チャレンジ2023）を実施した（図3-73）<sup>36,37)</sup>。これらの実験は、2014年御嶽山噴火発生時に浮き彫りになった「登山者の動向把握に時間がかかる」、「関係機関間の情報・状況の共有が不十分である」という火山防災上の課題の解決を目的とし、御嶽山における登山者の動態データを取得し登山者の動向（おおよその数、大まかな位置、行動パターン等）を把握すること、取得した登山者データを含む各種情報をリアルタイムで共有することを通して、実験結果を御嶽山の火山防災に役立てることを目指すものである。



図3-73 御嶽山チャレンジ2023の告知用ポスター

##### ii) 実験手法

登山者動態データ取得実験では、小型（5cm四方程度）のビーコン（図3-74）を登山者に配布しそれを持って登山をしてもらい、あらかじめ登山道他（図3-76）に設置したレシーバー（図3-75）でビーコンを持った登山者の動きを検知した。



図 3-74 登山者に配布するビーコン



図 3-75 登山道他に設置するレシーバー  
(ケース、バッテリー、スマートフォン)



図 3-76 実験対象とした黒沢口登山道（緑線）と王滝口登山道（オレンジ線）。2023年の実験で設置したレシーバー（21か所）を青丸で示す。なお、2022年に実施した同様の実験で設置したレシーバー（17か所）を赤四角で示す。ビーコン配布箇所（おんたけロープウェイ鹿ノ瀬駅、中の湯駐車場、田の原駐車場）を灰色円で示す。黒い円は2014年噴火の際の火口（黒三角）から1kmの範囲を示す。



図 3-77 登山道沿いの道標に設置



図 3-78 登山道に打った鉄の杭に設置



図 3-79 山小屋内の柱に設置



図 3-80 シェルター横の鉄の杭に設置

レシーバーは事前に登山道沿いの道標や山小屋内、シェルター近くの鉄の杭等に設置した他、王滝ルートに関しては王滝村役場に設置していただいた鉄の杭に設置した（図 3-79～3-80）。

状況共有実験では、取得した登山者データの他、登山道、山小屋、避難所、宿泊施設、気象情報等の各種情報をオンライン上（Web 地図上）でリアルタイムに可視化し関係者間で状況共有するためのビューアーを提供した（図 3-81）。

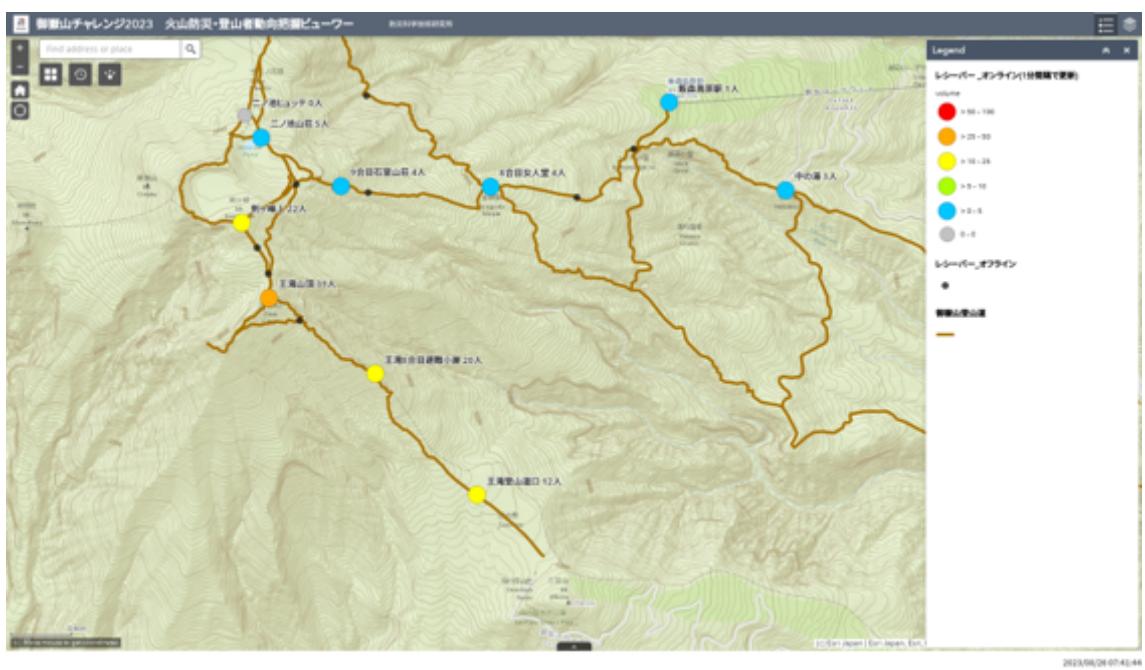


図 3-81 状況共有のためのビューワー（オンラインの Web 地図を利用）

### iii) 実験結果

実験当日（2023/8/26、27）は3か所のビーコン配布回収場所で、基本的には朝4時～16時の間ビーコン配布・回収作業を実施した（図3-82、3-83）。ビーコンの配布数は、初日（8/26）が439個（鹿ノ瀬駅155個、中の湯駐車場43個、田の原駐車場241個）、二日目（8/27）が405個（鹿ノ瀬駅で168個、中の湯駐車場48個、田の原駐車場189個）、2日間合計で844個だった（表3-11）。



図 3-82 鹿ノ瀬駅におけるビーコン配布



図 3-83 中の湯駐車場におけるビーコン配布

表 3-11 配布したビーコン数

	鹿ノ瀬駅	中の湯	田の原	合計
8月 26日(土)	155 個	43 個	241 個	439 個
8月 27日(日)	168 個	48 個	189 個	405 個
合計	323 個	91 個	430 個	844 個

状況共有実験の一環として、開発したビューワーのデモを現地で実施し、現地に参加した地元自治体の防災担当者と「噴火発生時に共有すべきデータや情報」、「共有方法」、「活用方法」等について意見交換を行った（図 3-84）。



図 3-84 現地におけるビューワーを使った意見交換

実験で取得された登山者動態データから、主に以下のことが分かる。

- ①（ビーコンを持った）登山者の各レシーバーに対する到着時刻、滞在時間、出発時刻。
- ②各登山者の登頂時刻、登山に要した時間、移動速度。
- ③登山道別登山者数、登山者分布と推移、登山パターン。

#### ア) 登山者数の時間推移

各レシーバー周辺（約 15m 以内）に滞在している登山者数の時間推移について、以下で例として女人堂、王滝頂上、剣ヶ峰で得られた結果（図 3-85～3-87）を示す。

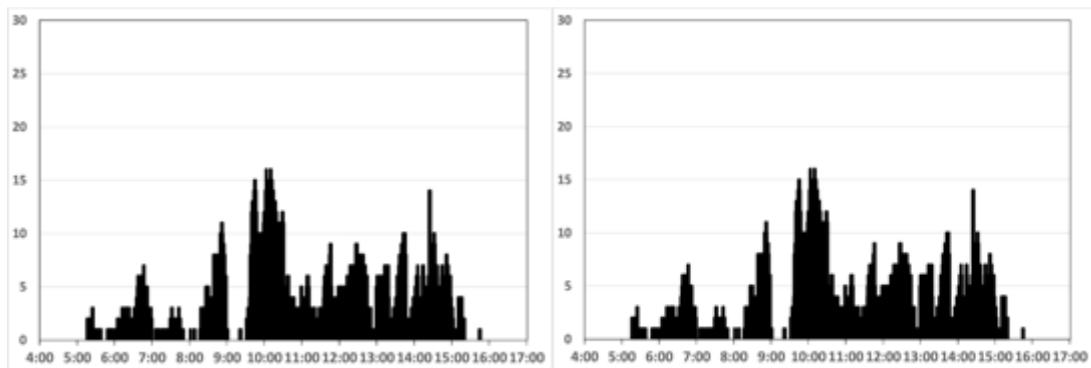


図 3-85 2023 年 8 月 26 日（左図）と 27 日（右図）に女人堂で検知された登山者数の推移（縦軸は人数、横軸は時間、以下同じ）

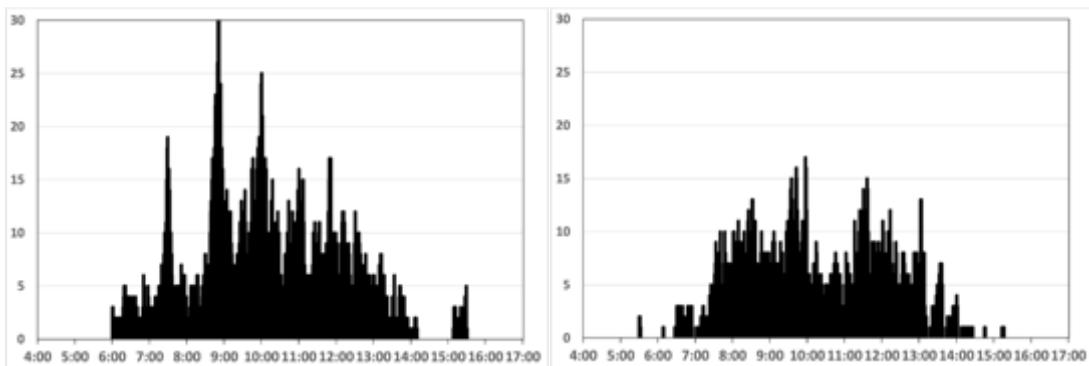


図 3-86 2023 年 8 月 26 日（左図）と 27 日（右図）に王滝頂上で検知された登山者の推移

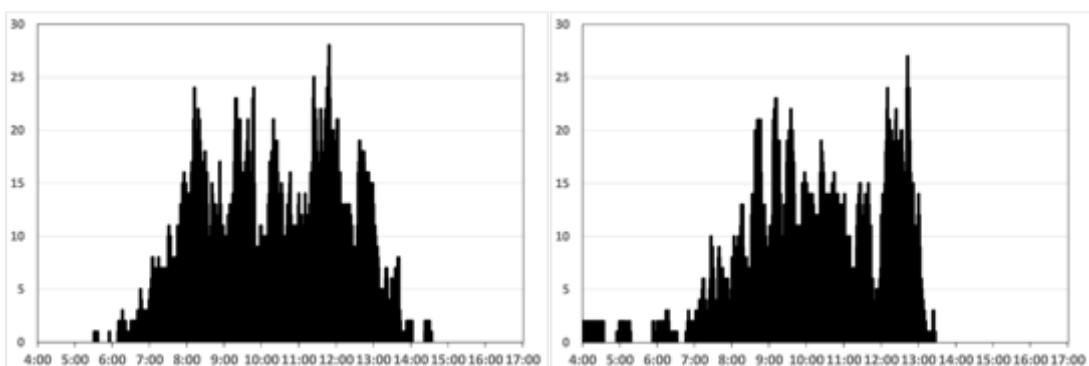


図 3-87 2023 年 8 月 26 日（左図）と 27 日（右図）に剣ヶ峰で検知された登山者数の推移

#### イ) 登山者の曝露評価

得られた登山者データから、簡易的な登山者の曝露評価を行った。ここでは例として、2014 年噴火の際の火口から 1km の範囲内（図 3-83 の黒円内）にいる登山者数の推移を図 3-88 に示す。

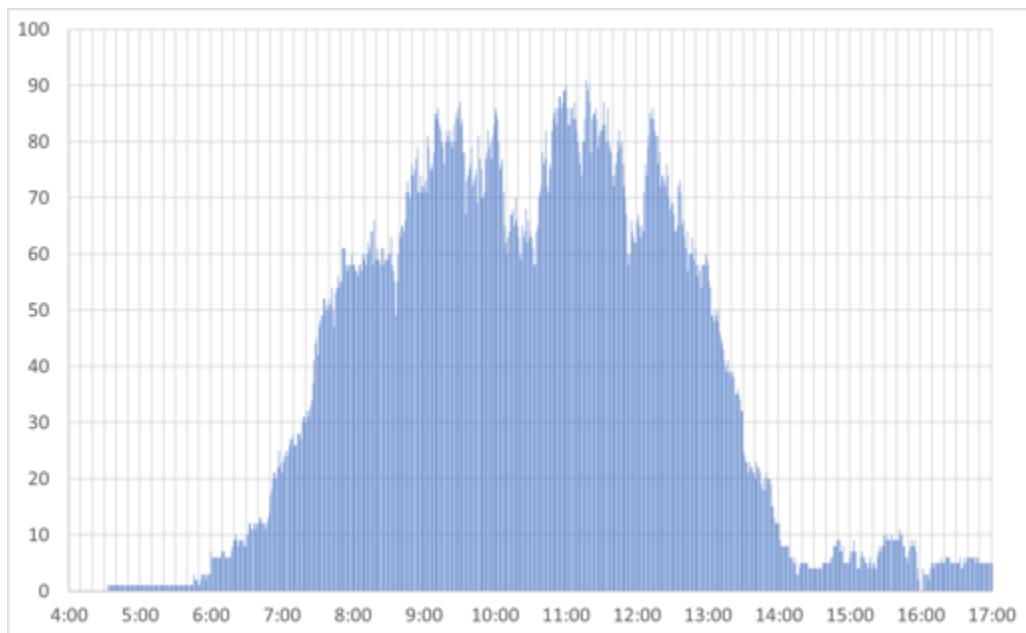


図 3-88 火口から 1km の範囲内にいる登山者数の時間推移

#### ウ) 登山者の登山パターン

登山者による登山パターンについて、ここでは例として 2023 年に規制緩和された八丁ダルミを経由する登山道を通る登山パターン（ルートと人数）を図 3-89 に示す。

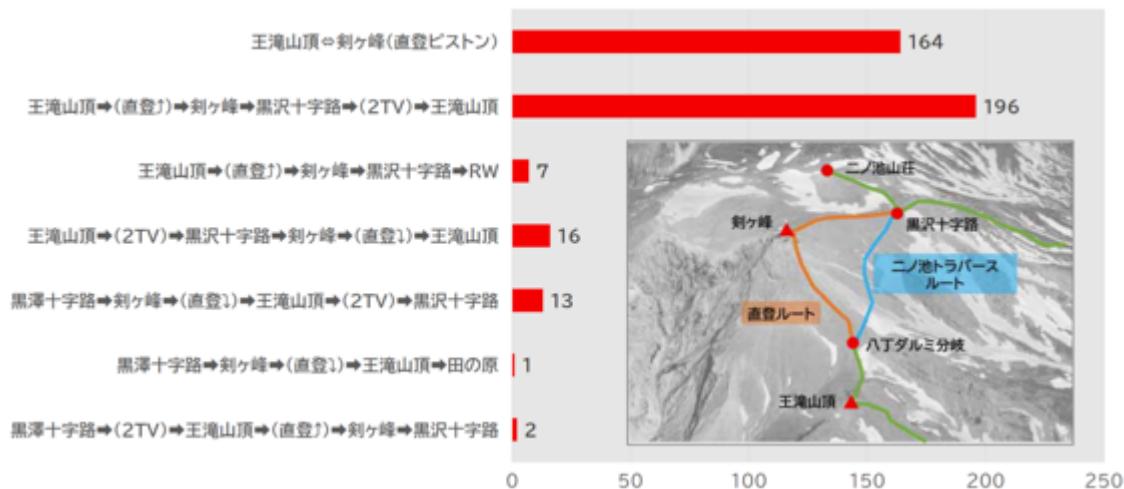


図 3-89 王滝頂上から八丁ダルミを通る登山道における登山パターン

#### エ) 登山者参加型避難訓練に参加した登山者の避難行動モニタリング

8/26 (土) 昼頃に、木曽町が中心となり登山者参加型の避難訓練が実施された。この訓練に参加する登山者にも同様にビーコンを配布し、訓練時の登山者の避難行動モニタリングを試みた。その結果の一部として、避難訓練実施時間帯 (8/26 の 12

時 20 分～40 分) 前後における黒沢口登山道の八合目よりも高いエリアでの登山者数の推移を図 3-90 に示す。

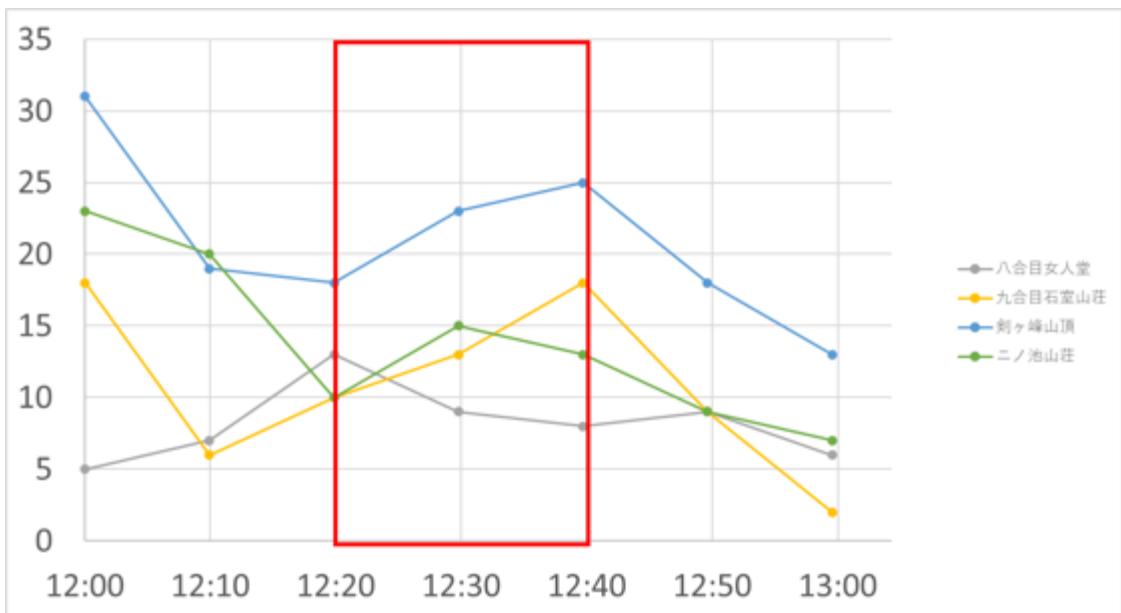


図 3-90 赤枠 (12 時 20 分～12 時 40 分) がおよそその訓練時間帯。黒沢口登山道の八合目よりも標高の高いエリアに設置したレシーバー (八合目女人堂、九合目石室山荘、剣ヶ峰山頂、ニノ池山荘) が検出した登山者数の推移。

#### b) 登山者動向把握実験結果のまとめ

御嶽山で実施された実証実験の結果から、防災関係機関が登山者の動向を把握し共有するためにかかる時間が大幅に短縮されることが見込まれ、これまで課題とされてきた災害時の登山者動向把握と状況共有に対する有効な解決になり得ることが示された。さらに、実験結果は災害時のみならず事前防災への活用も見込まれる。例えば、整備が十分ではない登山道の利用者が多いうことや火口から近いエリアでの登山者の滞在時間の長さなどが明らかになったことから、登山道整備の優先順位を考える際や周知用看板やシェルター等の設置箇所検討に際し参考になると思われる。登山者参加型避難訓練に参加した登山者の避難行動モニタリングの結果から、サイレンを聞いた登山者的一部が有効な避難行動をとったことが明らかになり、山頂付近における防災行政無線の有効性やシェルターの高い認知度が示された。また、これら結果を訓練シナリオや状況付与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可能になると思われる。

c) 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

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実験を実施した。今年度は試験体の幅による影響を把握するため、試験体サイズをこれまでの  $900 \times 600 \times 150$  から、 $900 \times 900 \times 150$  の試験体を用意して実験を行った。

実験方法はこれまでと同様に山田他 (2019)<sup>38)</sup> を基に図 3-91 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。今年度も鉄筋コンクリート造(以下、RC 造)を対象に 2024 年 1 月 23 日に防衛大学校で実施した。

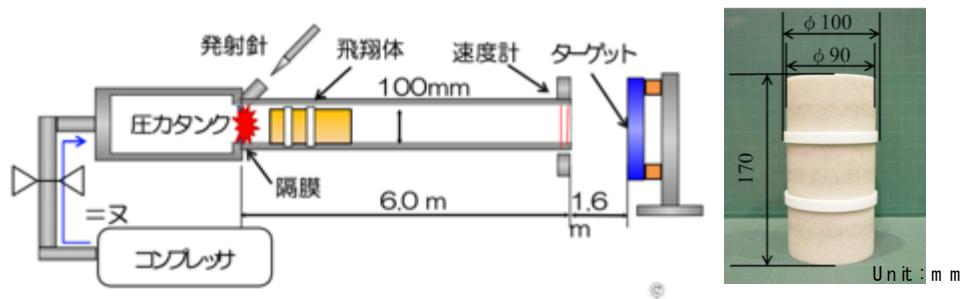


図 3-91 実験装置概要と飛翔体

今年度用いた RC 造の試験体は、前述の通り幅を 600mm から 900mm に変更して実施した。コンクリートの平均圧縮強度( $F_c$ )は 29.7MPa 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 3-91 に示す。

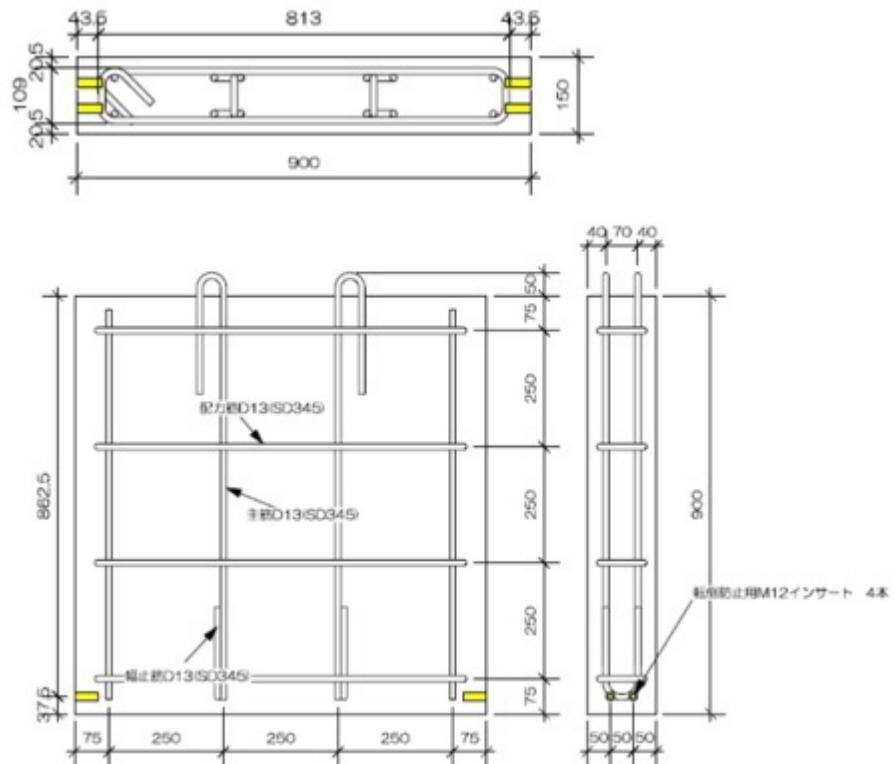


図 3-92 RC 造の試験体図面

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これまでと同様に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)<sup>39)</sup>、大粒(粒径 : 約 40 mm)絶乾比重 : 0.25~0.5、主成分 : SiO<sub>2</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O)を用いた。

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(図 3-93)。敷設完了後に飛翔体を射出し、実験を行った(図 3-94)。



図 3-93 人工軽石敷設後の計測

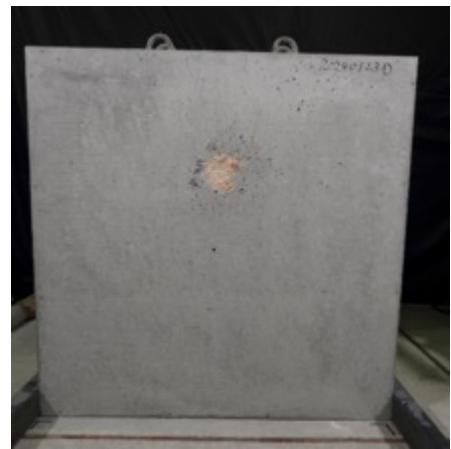


図 3-94 実験後の試験体(正面)

RC 造では、佐々木他（2019）<sup>40)</sup>により今回実験で使用した飛翔体サイズ(128mm相当)では貫通しないが裏面剥離が起こることを確認している。しかし、安全面から裏面剥離によってコンクリートが剥落し、人命に影響が及ぼすことを避ける必要がある。そのため、実験結果の評価は、これまでと同様に裏面のひび割れ程度を定性的に評価して行った。裏面の評価基準は、ひび割れ幅(w)やその範囲の広さに着目して、定性的にひび割れが少なくひび割れ幅も狭いもの ( $w \leq 0.3$  mm) を“less crack”、ひび割れがやや少なくひび割れ幅が狭いもの ( $w \leq 0.3$  mm) を“minor crack”、ひび割れが多くひび割れ幅が中程度 ( $0.3 \text{ mm} < w < 4\text{mm}$ ) のものを“intermediate”、ひび割れ幅が大きい ( $4\text{mm} \leq w \leq 6\text{ mm}$ ) ものを“middle crack” ひび割れ幅がとても大きい ( $w > 6\text{ mm}$ ) を“large crack”と分類した。前年度まで行った実験結果(No. 1～11)と今回の実験結果(No. 12～17)を合わせた結果を表 3-12 に示し、代表的な裏面の様子を図 3-95 に示す。

表 3-12 から、軽石敷設厚さが厚くなることで裏面のひび割れ程度が軽減していることがわかる。次に試験体の幅の影響については、裏面のひび割れの評価はあまり変わらないが、図 3-95 から全体的に試験体の幅が少なくなることで少し軽減しているように見えるが、その影響はあまり大きくない。

表 3-12 実験結果(前年度の結果も含む)

No	スラブ厚さ (mm)	スラブ幅 (mm)	軽石敷設 厚さ (mm)	速度 (m/s)	衝突エネ ルギー (kJ)	裏面の様子
1	150	600	0	102	13.8	intermediate
2			0	118	18.5	intermediate
3			310	96	12.3	less crack
4			190	108	15.5	less crack
5			110	110	16.1	minor crack
6			190	116	17.9	minor crack
7			110	116	17.9	intermediate
8	220	900	0	109	15.8	minor crack
9			0	123	20.1	intermediate
10			295	120	19.2	less crack
11			110	120	19.2	minor crack
12			0	115	17.6	minor crack
13	150	900	0	125	20.8	intermediate
14			100	116	17.9	minor crack
15			100	127	21.5	intermediate
16			190	115	17.6	minor crack
17			200	125	20.8	minor crack

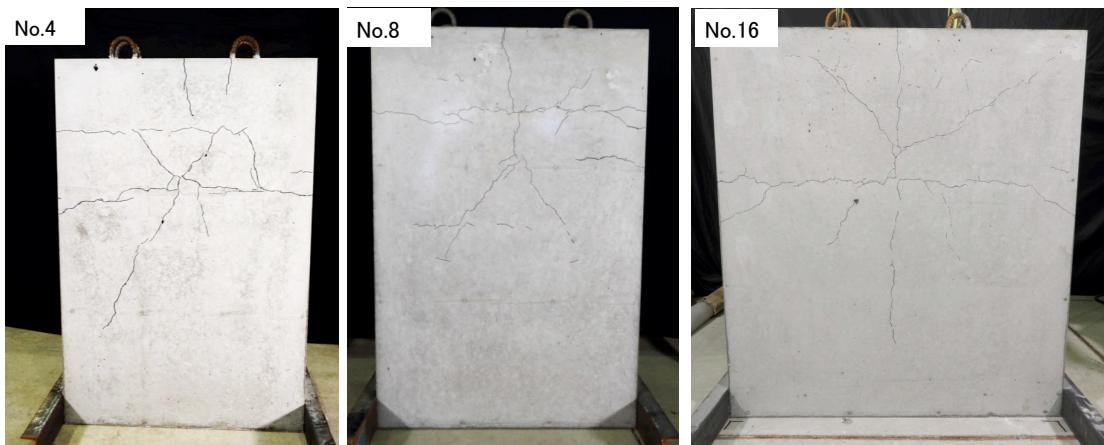


図 3-95 実験後の試験体裏面の様子

これまでの実験結果から、人工軽石を敷設することで裏面のひび割れが軽減し、厚さが増すことでさらにその効果が高くなることがわかった。また、スラブ厚さについても厚くなることで効果が高くなることがわかった。

そのため、火山岩塊による耐衝撃対策として人工軽石を敷設することで衝撃緩衝効果を期待することができる。特に RC 造は、積載荷重に余裕があることから、できるだけ軽石を屋根などに敷設し補強することは火山岩塊の衝撃に対して有効であると考えられる。

一方、衝撃緩衝材として軽石以外にも砂なども効果的であり、土木構造物の落石対策などで使用されている。そこで、砂による衝撃緩衝効果についても検証を行う必要がある。しかし、砂を用いた実験では、これまでの横型に射出する実験装置では難しいため、縦型で射出する実験装置を使った実験が必要になる。そこで、今年度は縦型装置の仮組を行い、検証を行った。仮組の様子を図 96, 97 に示す。来年度は縦型実験装置の整備を行い、来年度以降に砂を用いた衝撃緩衝効果について検証を行えるよう準備を進める。



図 3-96 縦型実験装置の射出機構

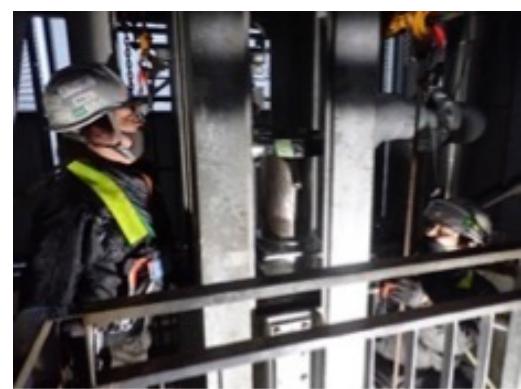


図 3-97 縦型実験装置の射出機構の仮組

## (c) 結論

### 1) 周知啓発教育用コンテンツの試作版の高度化

ヒアリング調査の結果を反映し、サイトの入り口で防災担当者が必要情報を検索、取得しやすい工夫を施し、火山災害に関係したシンポジウム報告書類の閲覧できるようにした。また、火山灰対策のために火山灰特性をコンテンツに加えるための基礎実験を実施した。北海道、山梨県などの自治体の防災訓練に参加し、情報共有を行うと同時に課題の把握を行なった。海外の火山災害の対応などの情報収集をグアテマラで実施した。さらに、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・文献調査等を実施し、防災機関が対策上最重要課題としている通信・道路機能に関して、研究者側に具体的に要望されている情報について検討した。

### 2) 降灰被害予測コンテンツ試作版の高度化

カーブする幅広道路や立体交差を含む街区の降灰数値シミュレーションを実施し、道路曲線部前後で降灰状況が大きく変わること、立体交差橋では風向きにより降灰状況に差異が出ることや、小粒径火山灰でそれらがより顕著になることなどが示された。また、同一降灰深でも、建物・荷重条件により構造物の安全評価は異なるが、今年度は、山形屋根の建物の変形に対する限界降灰深の定式化を行った。あわせて、主たる建造分類である鉄筋コンクリート造、鉄骨造、折板屋根をもつ鉄骨造（大スパン建物）、木造などについて、屋根の積灰量に対する損傷曲線を作成した。さらに、災害時の医療の専門家のヒアリング調査を実施し、災害時の病院の機能維持を考える上で重要な要素について医療専門家の立場からの意見を収集した。降灰被害予測コンテンツの表示方法に関して、有珠山2000年噴火の活動推移と災害対策の時系列空間情報をGIS上で表示できた。

### 3) 避難・救助支援コンテンツ試作版の高度化

御嶽山で実施した実証実験から、防災関係機関が登山者の動向を把握に要する時間が大幅に短縮されることが見込まれた。また、実験結果は災害時のみならず事前防災への活用も見込まれる。同時に実施した避難訓練に参加者した行動モニタリングから、山頂付近における防災行政無線の有効性やシェルターの高い認知度が示された。避難壕の耐衝撃対策の検討として、人工軽石を用いたコンクリート構造物への衝撃実験を昨年度に引き継いで実施し、火山岩塊による耐衝撃対策として人工軽石を敷設することで衝撃緩衝効果を確認できた。

(d) 引用文献

- 1) 久保智弘・鈴木亘・大井昌弘・高橋成実・浅尾一巳、吉岡薰（2020）津波災害を対象とした市町村における図上訓練の実施方法に関する研究。日本地震工学会、20卷7号、158-176
- 2) 春山元寿・下川悦郎・井上利昭（1977）桜島火山灰砂の物理的諸性質。鹿児島大学農学部演習林報告、5号、65-92
- 3) 大湊隆雄・渡邊篤志（2020）2019年西之島における地震・空振観測。小笠原研究、46号、53-68
- 4) 山本淳平・長田幸仁・太田雄策・平原聰・出町知嗣・中山貴史・立花憲司・佐藤俊也・木戸元之・藤本博己・日野亮太・三浦哲・内田雅之（2013）衛星通信を活用したリアルタイムGPS解析。測地学会誌、59卷4号、133-145
- 5) 黒田洋司・迎田賢太郎・西川佑樹・永田祐也・高橋佑弥・谷口雅彦・井上直人（2012）長期連続観測が可能な火山観測ローバの開発とフィールド試験。特集「無人観測ロボット その2」、日本惑星科学会誌遊星人 21(3)、206-214
- 6) 石原和弘・井口正人・味喜大介・山本圭吾・神田径・為栗健・福島大輔・森健彦・大島弘光・平林順一・野上健治・須藤靖明（2004）火山活動の評価手法の開発と火山防災情報に関する研究(序報)。京都大学防災研究所年報、C 47(C), 77-82
- 7) 永谷圭司・大木健・Britton Britton・佐藤毅一・野寄敬博・高橋悠輔・山内元貴・秋山健・吉田和哉（2012）伊豆大島における不整地移動ロボットの走行試験および自己位置推定試験。日本惑星科学会誌遊星人 21卷2号、121-129
- 8) 前山貴哉・高丸尚教・横山雄太郎（2017）Drone中継を考慮した災害時通信Protocol。第79回全国大会講演論文集 2017(1)、427-428
- 9) 川上由紀（2018）火山噴火を想定した新たなRFID探索システムの最適設計および評価、2018-04-01～2022-03-31（科研費）
- 10) 岡本謙一・田中總太郎・中山裕則・宮崎芳徳・植原茂次（1991）雲仙岳噴火に係わるリモートセンシングデータの取得状況（1990年11月～1991年7月末）。日本リモートセンシング学会誌、11卷3号、539-563,
- 11) 松下哲也（2015）火山噴火が警察無線に与える影響について。Police info-communications technical review (113)、24-31
- 12) 石塚忠範・森田耕司・清水武志・山越隆雄・中尾正博・橋本剛正（2013）技術試験衛星VIII型「きく8号」を用いた災害対応センサデータ伝送実験。月刊誌 土木技術資料 55(12)、42-45
- 13) 高橋和雄・藤井真（1996）長期化・大規模化した雲仙普賢岳の火山災害におけるライフルインの被害と復旧に関する調査。土木学会論文集 1996(549)、261-276
- 14) 首都直下地震道路啓開計画検討協議会（2023）首都直下地震道路啓開計画（第4版）
- 15) 国土交通省道路局（2014）災害対策基本法に基づく車両移動に関する運用の手引き
- 16) 後藤大青・柴山知也（2023）WRF-FALL3D連携モデルを用いた富士山噴火の降灰分布予測計算と高速道路網への影響評価。自然災害科学、42卷2号、159-169

- 17) 石倉智樹・尾山 梓 (2018) 火山噴火降灰による交易および物流への広域的な影響評価に関する基礎的研究。土木学会論文集 D3 (土木計画学)、74巻5号 (土木計画学研究・論文集第35巻)、I-109-115
- 18) 高橋和雄・藤井 真 (1997) 雲仙普賢岳の火山災害における交通の途絶が地域に及ぼした影響調査。土木学会論文集 No. 576/IV-37、111-121
- 19) 日本病院会・救急・災害医療対策委員会 (2022) 病院等における風水害 BCP ガイドライン。一般社団法人日本病院会
- 20) Wilson T., Stewart C., Sword-Daniels, V. et.al. (2021) Volcanic ash impacts on critical infrastructure. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, vol. 45-46, 5-23
- 21) 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、580-585
- 22) Otsuka, K., Nobata, A. Suwa, H. et al. (2022) A Consideration on Volcanic Ash Ingress into the Horizontal Air Intake of Air Conditioning, Journal of Disaster Research, vol.17, 818-828
- 23) 宮地直道・小山真人 (2007) 富士火山 1707 年噴火 (宝永噴火) についての最近の研究成果。荒牧重雄、藤井敏嗣、中田節也、宮地直道編「富士火山」、山梨県富士山科学研究所、339-348
- 24) 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 (1990) 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
- 25) 萩野和臣・曾根孝行・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
- 26) 萩野和臣・曾根孝行・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
- 27) 曾根孝行 (2018) 積灰荷重に対する建物の構造安全性の検討 (2018) 2018 年度日本建築学会大会 (東北)、特別調査部門、パネルディスカッション資料、2018.9
- 28) 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
- 29) 諏訪 仁・野畑有秀・大塚清敏 (2020) 火山噴火の降灰による建物被害評価法。大林組技術研究所報、No. 84
- 30) 社会資本整備審議会 建築分科会 建築物等事故・災害対策部会 (2014) 建築物の雪害対策について報告書。2014 年 10 月
- 31) 山下哲郎 (研究分担者・工学院大学建築学部建築学科) (2014) ライフラン・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・箕淳夫・工学院大学)」、平成 24 年 3 月
- 32) 気象庁 web ページ資料「日本活火山総覧 (第 4 版) 及び補記」  
[https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/souran/menu\\_jma\\_hp.html](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/souran/menu_jma_hp.html)、及

- び、内閣府 web ページ資料「わが国の主な火山災害」  
<https://www.bousai.go.jp/kazan/taisaku/k3.html> (2024 年 4 月確認)
- 33) Onizawa, S., Oshima, H., Aoyama, H. et al. (2007) P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 160, 175-194
- 34) 宇井忠英・中川光弘・稻葉千秋、他 11 名 (2002) 有珠山 2000 年噴火の推移(特集：2000 年有珠山噴火)。火山、47 卷, 105-117  
[https://doi.org/10.18940/kazan.47.3\\_105](https://doi.org/10.18940/kazan.47.3_105)
- 35) 大島弘光・青山 裕・鬼澤真也 (2005) 2000 年噴火－何が起ったか－。日本火山学会 2005 年秋季大会現地検討会「有珠山」資料集、北海道大学有珠火山観測所
- 36) Miyagi, Y., Yoshimori, K., Kaneta, S., & Usuda, Y. (2023). Consideration for Solving Problems Related to Volcanic Disaster Prevention by Real-Time Grasping of Climber Movement. *Journal of Disaster Research*, vol. 18, 754-762
- 37) 宮城洋介・吉森和城・上田啓瑚・工藤隼人・金田成元・臼田裕一郎 (2023) 御嶽山における地元自治体と連携した火山防災上の課題解決に向けた取組み。月刊地球、533 号、46(3)、162-170
- 38) 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 卷, 243-251
- 39) ガラス発泡資材事業協同組合 (1998) <https://www.supersol.jp/supersol#feature> (2024 年 4 月 20 日確認)
- 40) 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。2019 年日本火山学会秋季大会予稿集、94

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 令和6年度の業務計画案

#### (a) 周知啓発教育用コンテンツの社会実装

最終年度に向けて、周知啓発教育用コンテンツの社会実装に向けた準備を行う。令和5度までに引き続きヒアリング調査などで得られたニーズや課題に対応するとともに、訓練での活用を促進するためのコンテンツの整理と検討を行う。具体的には、防災担当者などにヒアリング調査等を行い、火山災害の図上訓練や実働訓練でニーズ把握し、訓練実施の支援のためのコンテンツの充実化を行う。また、本コンテンツに掲載された情報へのアクセス性について、キーワードの付与や整理を行い、さら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に、引き続きヒアリング調査などを通して本コンテンツの利便性を把握し、ページ構成や情報整理を行う。また、令和5度までに得られた防災担当者などの要望に対応するため、火山灰対策に関する情報を中心に研究成果や資料の掲載とデジタルコンテンツの収集を行う。

#### (b) 降灰被害予測コンテンツの社会実装

最終年度の社会実装のために、これまでに実施してきた降灰による建築物の損傷・被害に関する降灰の評価、建物空調設備やフィルター被害の実験結果、ならびに都市街区における建物周りの火山灰空間濃度分布や地面・道路への降灰分布特性把握のための狭域降灰シミュレーション結果などを考慮し、降灰量と建物等の機能被害との関係性を情報ツールへ提供するための表示方法を検討する。あわせて、降灰被害予測コンテンツの拡充・改善を行う。具体的には、建物に関する降灰被害閾値の拡充、災害時重要施設（病院を例にする）の被害要因と機能被害との関係把握の明確化、積灰に伴う建物変形による使用性評価事例の増加、および、狭域降灰シミュレーションにおける再飛散過程の考慮、降灰強度から堆積深への変換などを行う。情報ツールへのコンテンツの提供においては、他課題や公的機関から出力される広域の降灰情報から、局所的な建物等の機能被害への対応付けが必要となるため、これまで実施された降灰影響評価実験や降灰計算の結果等をGIS上で閲覧可能にするコンテンツの開発を行う。

#### (c) 避難・救助支援コンテンツの社会実装

令和5度実施した御嶽山を対象とした登山者動向把握実験及び状況共有実験の結果を基に避難・救助支援コンテンツの開発をさらに進め、本コンテンツの社会実装として、御嶽山火山防災協議会が実施する訓練に本コンテンツを活用する。

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、緩衝材による衝撃緩衝効果に関する衝突実験を実施し、これまでの実験結果等を基に退避壕等の耐衝撃対策に資する情報整理を行う。

#### (d) 情報ツール利活用方策の検討

令和5度までに高度化した上記のコンテンツ試作版の社会実装に際し、これまで得られた成果と他課題で得られている研究成果をあわせて、JVDNを介して防災関係者に分かりやすい形で提示するための方策を検討する。その際、利活用に資する要件の具体化の

ため、防災関係機関等と意見交換を行う。また、令和5年に引き続いて噴火災害履歴のデータベース化を続け、差し迫った噴火災害を評価するための活用について研究する。

(e) 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

#### (1) 課題D全体

日時：2023年8月16日（水曜日）

開催形態：オンライン

内容：12月研究集会の全体構成や課題間連携に関する意見交換

参加者：課題代表者、サブテーマ担当者

日時：2023年11月10日（金）

開催形態：オンライン

内容：進捗状況確認と12月研究集会に向けたサブテーマの発表内容に関する意見交換

参加者：課題代表者、サブテーマ担当者

日時：2022年12月26日（火）～27日（水）

開催形態：対面・オンライン

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：桜島大規模噴火に関する研究集会において、複数圧力源による地盤変動の解析、船舶レーダの運用、気象レーダによる噴煙モニタリング、噴火発生前の降灰予測について研究発表を行うとともに、大規模噴火時におけるレーダの活用について議論した。また、各研究成果を発表し意見交換した。

参加者：課題代表者、サブテーマ2担当者、サブテーマ1担当者（オンライン参加）など

#### (2) サブテーマ1

日時：2023年6月21日（水）

開催形態：対面・オンライン

場所：アジア航測株式会社 会議室

内容：令和5年度および最終年度に向けて実施する技術開発の方針確認

参加者：課題代表者、サブテーマ1担当者及び研究者

日時：2023年8月23日（水）

開催形態：対面・オンライン

場所：アジア航測株式会社 会議室

内容：火山事象のAI抽出（噴石+噴気）の技術開発について

参加者：サブテーマ1担当者及び研究者

### (3) サブテーマ2

日時：2024年6月16日（火）

主催：鹿児島市が事務局を務める火山防災強化市町村ネットワークの研修会

開催形態：オンライン

内容：「気象レーダを用いた噴煙観測による降灰把握と予測」、「降灰予測システムの開発」に関する講演と質疑応答

参加者：サブテーマ担当者および研究者、北海道8町、青森県3市町、岩手県4市町、秋田県3市町、山形県1市、宮城県1町、福島県2市村、栃木県1町、群馬県1村、神奈川県5市町、新潟県1市、山梨県6市町村、長野県2市町、静岡県6市町、長崎県1市、熊本県1市、宮崎県3市町、鹿児島県5市町村

参考：

<https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/kazan/kazanbousaikyoukasityousonetwork.html>

### (4) サブテーマ3

日時：2023年8月22日（火）

開催形態：オンライン

内容：これまでの進捗状況と今後の方針、および12月研究集会に関する意見交換

参加者：サブテーマ担当者、分担機関担当者など

日時：2023年11月22日（水）

開催形態：オンライン

内容：これまでの進捗状況と12月研究集会に関するサブテーマの発表内容の担当者と確認

参加者：サブテーマ担当者、分担機関担当者など

日時：2024年1月25日（木）

開催形態：オンライン

内容：令和5年度の成果報告と次年度の業務内容及び予算に関する議論

参加者：サブテーマ担当者、分担機関担当者など

## 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年目評価を経て、課題 D のそれぞれのサブテーマが 10 年目の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。それぞれの成果は以下のようにまとめられる。

サブテーマ 1 では、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、GIS ソフト（QGIS）上で撮影画像のデータ不足を確認できるようにした。UAV の向きが変わる箇所を境に位置合わせにずれが生じてしまう課題があったが、コース間での簡易な確認としては問題ない。また、AI を用いた噴石痕抽出の精度向上や、噴気の抽出を試み、状況の自動認識を高度化することを検討し、類似事象の画像を混ぜて学習することによって精度改善に繋がることが確認できた。AI により抽出した噴気画像を用いることで、噴気位置（三次元位置）把握の迅速化も図れた。また、画像処理により溶岩流境界が抽出可能などを確認した。さらに、データ取得（UAV 飛行）から、状況把握（三次元モデル作成や自動抽出や斜め写真測量システムへの搭載）までの流れをフローとして整理した。UAV 飛行にあたっては、緊急用務空域・特定飛行・立入規制の課題が存在する。

サブテーマ 2 では、桜島噴火に伴う噴煙の観測及び解析によって、火山灰放出量の即時把握技術の開発のうち、レーダ観測とディスドロメータによる降灰量観測は火山監視のための主要観測として実装段階にあるといえる。また、地震動と地盤変動を用いた火山灰噴出率即時推定の経験式は連続化シミュレータを稼働させるオンラインシステムに有効に活用できるとともに、同様の灰噴火を繰り返す火山においても有効であることが確かめられた。火山灰の凝集を考慮する経験式が発案され、降下火山灰の予測の高精度化が図られた。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、これをもとに求められた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から降灰分布を予測するシステムを開発し、試験運用を開始した。これらのシステムにおける課題も抽出できたので、令和 6 年度以降、改善を図っていくとともに、降灰予測を防災に活用するためのセミナーを今後も継続して浸透を図る必要がある。

サブテーマ 3 では、「周知啓発教育用コンテンツの試作版の高度化」として、ヒアリング調査を反映し、サイト入り口で防災担当者が必要情報を得やすくした。火山災害に関するシンポジウム報告書も閲覧可能。自治体の防災訓練への参加や海外の情報収集も行われ、防災関連機関へのヒアリングや文献調査も実施された。「降灰被害予測コンテンツの試作版の高度化」では、幅広道路や立体交差の降灰数値シミュレーションを行い、建物の構造や荷重条件による安全評価の違いを明らかにした。さらに医療の専門家による調査で、災害時の病院機能の維持に必要な要素を把握。有珠山 2000 年噴火の噴火災害情報を GIS 上で表示する方法も検討された。「避難・救助支援コンテンツの試作版の高度化」では、御嶽山での実証実験から、登山者の動向把握にかかる時間が短縮される見込みがあることが示された。避難訓練での行動モニタリングや衝撃実験により、防災行政無線の有効性や人工軽石による退避壕の耐衝撃対策を確認した。

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
火山噴火時におけるUAVによる自動巡回・画像取得手法の検討（口頭発表）	佐々木 寿、江川香、杉下 七海、森貴章、小森 悅也、加藤(成毛) 志乃、野中秀樹、千葉 達朗	日本火山学会 2023年秋季大会	2023年10月	国内
火山活動事象（噴石着弾痕・噴気）の自動抽出の検討（口頭発表）	森 貴章、小森 悅也、谷口 宙河、森居 恒平、佐々木 寿、野中 秀樹、千葉 達朗	日本写真測量学会 令和5年度秋季学術講演会	2023年11月	国内
D-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（口頭発表）	佐々木 寿	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 令和5年度 合同研究集会	2023年12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
火山噴火時を想定したUAVによる自動巡回および画像取得手法の検討	佐々木寿・江川香・杉下七海・森貴章・小森惇也	アジア航測技術報2024	2023年12月	国内

（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
Reconstructing the 19 February 2018 Sinabung eruption column by a 3D numerical model (口頭)	Syarifuddin, M., Suzuki, Y. J., Oishi, S., Basuki, A., and Iguchi, M.	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
桜島火山におけるライダーを用いた細粒火山灰の観測（ポスター）	中道治久	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
気象レーダ観測から得られた桜島降灰分布のデータベース（口頭）	真木雅之・佐野香那・中道治久・井口正人・西隆昭・中村啓彦・小堀壮彦・海賀克彦	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
気象レーダによる降水時の桜島火山噴火の検出（口頭）	真木雅之・中道治久・井口正人・西隆昭・藤吉康志・佐藤英一・小堀壮彦・海賀和彦・徳島秀彦	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
降下テフラ重量観測から得られた桜島ブルカノ式噴火のテフラ分離プロファイル（口頭）	瀧下恒星・井口 正人・Poulidis Alexandros P.	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
モニタリングとシミュレーションによる火山灰ハザードの予測（口頭）	井口正人・中道治久・為栗 健・瀧下恒星・Poulidis Alexandros・竹見哲也・山路昭彦・丸山 敬・真木雅之・石井杏佳・田中博・太田雄策・清水厚	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内

桜島ブルカノ式噴火に伴う地盤変動の統計的性質を用いた確率的噴火予測（口頭）	石井杏佳・井口正人	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
Lidar Observations of Eruptive Products of Sakurajima Volcano, Japan(ポスター)	Haruhisa Nakamichi	AOGS annual meeting 2023	2023年8月	国外
Dynamics of 2010–2018 Sinabung Eruption in Indonesia: Insight from Evolution of Seismic Multi-parameters	Vico Luthfi Ipmawan, Masato Iguchi, Takahiro Ohkura, Takeshi Tameguri	AOGS annual meeting 2023	2023年8月	国外
Statistical features of the ground deformation database for Vulcanian explosions at Sakurajima volcano (口頭)	Kyoka Ishii, Masato Iguchi	AOGS annual meeting 2023	2023年8月	国外
ドローンを用いた上空の気象場および火山噴煙の観測（ポスター）	山路昭彦・吳映昕・井上実・佐々木寛介	水文水資源学会 2023年度研究発表会	2023年9月	国内
桜島ブルカノ式噴火にともなう地盤収縮時間関数の推定（ポスター）	石井杏佳・井口正人	日本火山学会2023年秋季大会	2023年10月	国内
桜島火山噴煙のレーダマルチセンシング（口頭）	真木雅之・西隆昭・中道治久・井口正人・中村啓彦・佐藤英一・小堀壮彦・桜島噴煙モニタリングプラットフォーム研究会メンバー	日本火山学会2023年秋季大会	2023年10月	国内
ディスクロメータ観測に基づく火山灰噴出量推定（口頭）	瀧下恒星・小園誠史・三輪学央・井口正人	日本火山学会2023年秋季大会	2023年10月	国内

Numerical study of pyroclastic material transport in explosive volcanic eruptions (ボヌター)	鈴木雄治郎	American Geophysical Union 2023 Fall Meeting	2023年12月	国外
Dynamical downscaling from meteorological scales to urban scales for quantitative assessment of extreme wind hazards at local scales (口頭)	Tetsuya Takemi	The 4th International Conference on Meteorology and Climate Science 2023 (ICMCS 2023). Department of Meteorology, University of Dhaka, (Online)	2023年12月	国外
粒子の凝集を考慮した定量的降灰量推定(口頭)	眞木雅之・井口正人	令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2024年2月	国内
船舶用レーダ X-band と S-band による海上の雨雲観測(口頭)	西 隆昭・眞木雅之・中村啓彦・仁科文子・須本祐史・井口正人	令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2024年2月	国内
Changes in Mass Eruption Rate during 2014–2018 Sinabung's Eruptive Period Estimated Using Seismic Energy (口頭)	Vico L. Ipmawan, Masato Iguchi, Taishi Yamada・Takeshi Tameguri	令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2024年2月	国内
桜島ブルカノ式噴火にともなう地盤収縮時間関数の検討(口頭)	石井杏佳・井口正人	令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2024年2月	国内
桜島における火山噴火発生前の降灰予測(口頭)	井口正人・石井杏佳	令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2024年2月	国内
桜島火山におけるディスクロメータ観測網の配置と降灰検知確率の関係(口頭)	瀧下恒星・小園誠史・三輪学央・井口正人	令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2024年2月	国内

Hybrid modeling of mesoscale and large-eddy simulations to assess the impacts of extreme weather at urban scales (口頭)	Tetsuya Takemi	The First KU-NCU Joint Workshop on Mesoscale Modeling and Predictability, National Central University, Taoyuan, Taiwan	2024年3月	国外

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
桜島火山に設置されたライダーによる火山噴出物の観測	中道治久	レーザセンシング学会誌	2023年4月	国内
桜島降灰分布データベース (VASH)	真木雅之・佐野香那・中道治久・井口正人・西隆昭・中村啓彦・小堀壯彦	京都大学防災研究所年報	2023年8月	国内
Redox state of magma recorded in volcanic glass from an ash-forming eruption at Bromo volcano, Indonesia: Insights into the degassing process	Takahiro Miwa, Hidemi Ishibashi, Ryunosuke Kazahaya, Satoshi Okumura, Masato Iguchi, Genji Saito, Atsushi Yasuda, Nobuo Geshi, Hiroyuki Kagi	Bulletin of Volcanology	2023年8月	国外
Large-eddy simulation of plume dispersion in a turbulent boundary layer flow generated by a dynamically controlled recycling method	Tetsuya Takemi, Hiromasa Nakayama	Atmospheric Science Letters	2023年12月	国外
Impact Resistance Test of Cladding by Using Gravel	Maruyama Takashi. and Iguchi Masato	Journal of Disaster Research	2023年12月	国外

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

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

## 様式第21

## 学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「火山災害対策のための情報ツールの開発」

防災科学技術研究所

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（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Volcanic hazard information for disaster management decision makers in Japan (ポスター)	Nakada, S., Fujita, E., Miyagi, Y., Yoshimoto, M., Kubo, T., Nobata, A., Suwa, H., Otsuka, K. and Tanaka, A.	20th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Berlin (Germany)	2023年7月18日	国外
Ashfall hazard curves in areas surrounding Izu-Oshima and Aso Volcanoes, Japan (口頭)	Nakada, S., Nagata, N., Uesawa, S. and Miyabuchi, Y.	Annual meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Singapore	2023年8月4日	国外
History, present status and future of volcano monitoring/observation and disaster response in Japan (口頭)	Nakada, S. and Fujita, E.	Volcano Observatory Best Practice (VOBP) 5th workshop, Pucón, Chile	2023年11月	国外
Shape parameter measurements of tephra samples from grayscale images of individual particles using Dynamic Image Analysis (口頭)	Takishita, T., Miwa, T., Nagai, M., Nakada, S. and Suzuki, T.	Cities on Volcanoes 12, Antigua (Guatemala)	2024年2月	国外
Magma plumbing system of Ioto volcano, Ogasawara, Japan: A petrological constraint (ポスター)	Miwa, T., Nagai, M., Ueda, H., Kozono, T., Nakada, S. and Yasuda, A.	Cities on Volcanoes 12, Antigua (Guatemala)	2024年2月	国外
次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト最終成果に向けて（口頭）	藤田 英輔、小園 誠史、上田 英樹、中田 節也	地球惑星科学連合大会(JPGU) 2023	2023年5月23日	国内
小笠原硫黄島火山2012~2022年の噴火活動（口頭）	長井雅史、三輪学央、上田英樹、中田節也、小林哲夫、小澤 拓、棚田俊收、廣瀬 郁、小園誠史	地球惑星科学連合大会(JPGU) 2023	2023年5月24日	国内
JVDNシステムを活用した阿蘇火山中岳2021年10月20日噴火後の降灰調査（口頭）	宮嶽育夫・長井雅史・中田節也・小澤 拓・古川竜太・石塚 治・南 裕介・Chris Conway・伊藤順一	2023年度日本火山学会秋季大会(鹿児島市)	2023年10月18日	国内
小笠原硫黄島2022年噴火におけるマグマの温度圧力条件（ポスター）	三輪学央・長井雅史・上田英樹・小園誠史・中田節也・安田 敦	2023年度日本火山学会秋季大会(鹿児島市)	2023年10月19日	国内
粒子毎の動的画像解析によるテフラ標準試料の形状の計測（ポスター）	瀧下恒星・三輪学央・長井雅史・中田節也・鈴木 駿彦	2023年度日本火山学会秋季大会(鹿児島市)	2023年10月20日	国内
御嶽山における登山者動向把握実験と登山者データリアルタイム共有実験（口頭）	宮城洋介、吉森和城、臼田裕一郎、金田成元、田中義朗、福崎昭伸、吉永隆一	地球惑星科学連合大会(JPGU) 2023	2023年5月	国内
御嶽山における登山者動態データ取得実験および状況共有実験（口頭）	宮城洋介、吉森和城、上田啓瑚、工藤隼人、臼田裕一郎、金田成元	日本火山学会2023年秋季大会(京都)	2023年10月	国内
市街地における建物影響による降灰分布の不均一性について（ポスター）	大塚清敏、諫訪仁、野畑有秀、久保智弘、宮城洋介	地球惑星科学連合大会(JPGU) 2023	2023年5月23日	国内
市街地への降灰に対する建物の影響について（口頭）	大塚清敏、諫訪仁、久保智弘、宮城洋介	日本建築学会大会2023年大会(京都)	2023年9月14日	国内
都市への降灰と建物機能への影響について（口頭）	大塚清敏、諫訪仁、野畑有秀、久保智弘、宮城洋介	火山災害軽減のための方策に関する国際ワークショップ(大手町)	2023年11月2日	国内
降灰による建物の機能被害（口頭）	大塚清敏、諫訪仁、久保智弘、宮城洋介	次世代火山研究・人材育成 合同研究集会(東大)	2023年12月5日	国内
厚さを変化させた筋鉄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（ポスター）	久保智弘、吉本充宏、本多亮、西澤達治、立山耕平、山田浩之	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
市街地における建物影響による降灰分布の不均一性について（ポスター）	大塚清敏、野畑有秀、諫訪仁、久保智弘、宮城洋介	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
市街地への降灰に対する建物の影響について（口頭）	大塚清敏、野畑有秀、諫訪仁、久保智弘、宮城洋介	日本建築学会大会	2023年9月	国内
桜島火山2022年7月噴火に関する気象庁の画像解析の検証（口頭）	石峯康浩、久保智弘、山田大志、井口正人	日本火山学会秋季大会	2023年10月	国内
試作版周知啓発用コンテンツの改良と利活用について（ポスター）	久保智弘、吉本 充宏、本多 亮、石峯 康浩、宮城 洋介	日本火山学会秋季大会	2023年10月	国内
Experimental Study of Impact Absorption Effect of Overlying Artificial Pumice Layer for Dealing with Ballistic Rock Impact	Yoshimoto, M., Kubo, T., Honda, R., Nishizawa, T., Tateyama, K., and Yamada, H.	Cities on Volcanoes 12, Antigua (Guatemala)	2024年2月	国外
NHK BSプレミアム 新日本風土記「富士五湖」	吉本 充宏	NHKBS	2023年6月	国内
YBSワイドニュース 「火山防災の視点から富士山麓の街中にある溶岩について」	吉本 充宏	YBSテレビ	2023年6月	国内
「謎解き！伝説のミステリー」「地震の歴史」を特集。南海トラフ地震と富士山噴火が起きた際の被害想定、災害への備え等について、視聴者へ情報を発信し、専門家への取材を実施。	吉本 充宏	テレビ朝日	2023年7月	国内
身近な火山知り、備えて 「60秒で学べるNews」富士山について	吉本 充宏	毎日新聞（甲信版）	2023年7月	国内
タモリステーション「富士山噴火、どうなる？どう備える？」	吉本 充宏	テレビ東京	2023年8月	国内
ネットワーク1・17「富士山噴火に備える」	吉本 充宏	テレビ朝日	2023年11月	国内
		MBSラジオ	2023年12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)	巻号・ページ数	発表した時期	国内・外の別
Evaluation of vehicle running performance on ash-covered roads	Nishizawa, T., Yoshimoto, M., Kubo, T., Honda, R., Nakada, S., Kametani N., Ishimine, Y., and Yamamoto, S.	Scientific Reports	vol. 13, 21498 doi: 10.1038/s41598-023-47122-8	2023年12月	国外
The sequence of the 2017-2018 eruptions and seismo-acoustic activity at Kirishima volcano group	Ichihara, M., Kobayashi, T., Maeno, F., Ohminato, T., Watanabe, A., Nakada, S., and Kaneko, T.	Earth, Planets and Space	vol. 75, no. 1 doi: 10.1186/s40623-023-01883-8	2023年9月	国外
Eruption style transition during the 2017-2018 eruptive activity at the Shinmoedake volcano, Kirishima, Japan: surface phenomena and eruptive products	Maeno, F., Shohata, S., Suzuki, Y., Hokanishi, N., Yasuda, A., Ikenaga, Y., Kaneko, T. and Nakada, S.	Earth, Planets and Space	vol. 75, no. 1 doi: 10.1186/s40623-023-01834-3	2023年5月	国外
Consideration for Solving Problems Related to Volcanic Disaster Prevention by Real-Time Grasping of Climber Movement	Miyagi, Y., Yoshimori, K., Kaneta, S., & Usuda, Y.	Journal of Disaster Research	Vol. 18 No. 7 pp754-762 doi: 10.20965/jdr.2023.p0754	2023年9月	国外
御嶽山における地元自治体と連携した火山防災上の課題解決に向けた取組み	宮城洋介、吉森和城、上田啓瑚、工藤隼人、金田成元、臼田裕一郎	月刊地球	533号、Vol. 46, No. 3, 162-170	2024年3月	国内
火山噴火の降灰による建物被害評価法—富士山の宝永噴火による評価例—	諫訪 仁、大塚清敏、野畠有秀、久保智弘、宮村正光、宮城洋介	空気調和衛生工学	98巻、3号, 47-52	2024年3月	国内
富士山チャレンジデータを活用した登山者動態データ分析－勾配と登山及び下山にかかる時間の検討－	久保智弘、吉本充宏、本多亮、宮城洋介、田中義郎	月刊地球	533号, 171-178	2024年3月	国内