

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6年度
成果報告書

令和7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6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6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


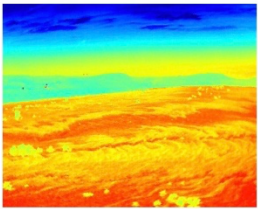
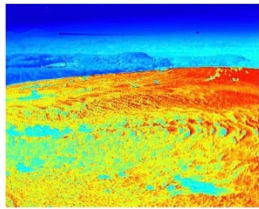

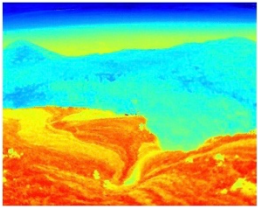
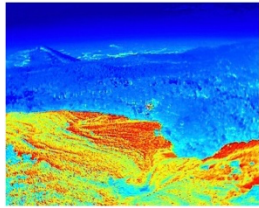
手動飛行		自動巡回
夜間（可視）	夜間（熱）	日中（熱）
		
		

図 1-1. 自動巡回による撮影結果（Mavic3T/可視・熱画像の例）

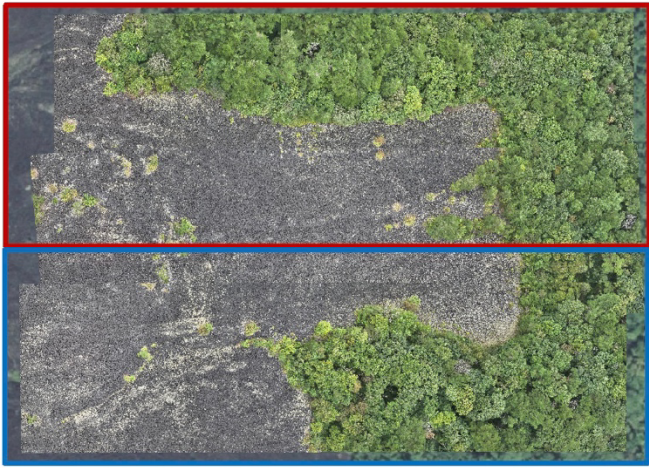
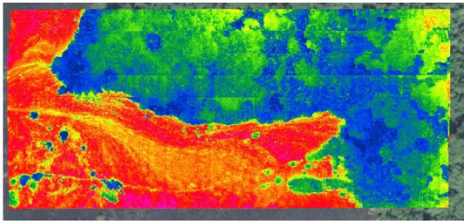
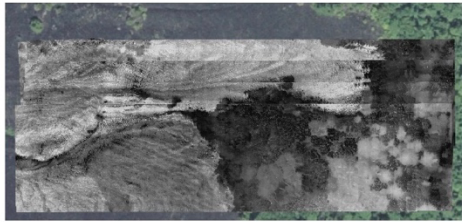
	
RGB 画像(赤枠:熱画像(RGB)部分、青枠:熱画像(白黒)部分)	
	
熱画像(RGB)	熱画像(白黒)

図 1-2. GIS 上に表示した垂直写真の連結画像

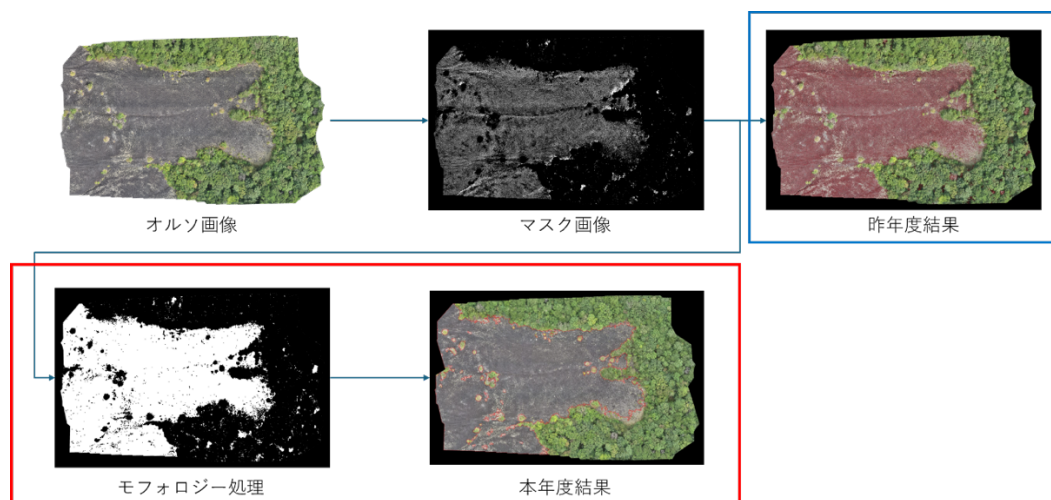


図 1-3. 溶岩流境界抽出処理の比較（赤枠が改良した部分）



図 1-4. 溶岩流の境界を自動抽出した例



図 1-5. ドローンで撮影した斜め写真を航空写真オルソ画像に重畳した結果

サブテーマ 2

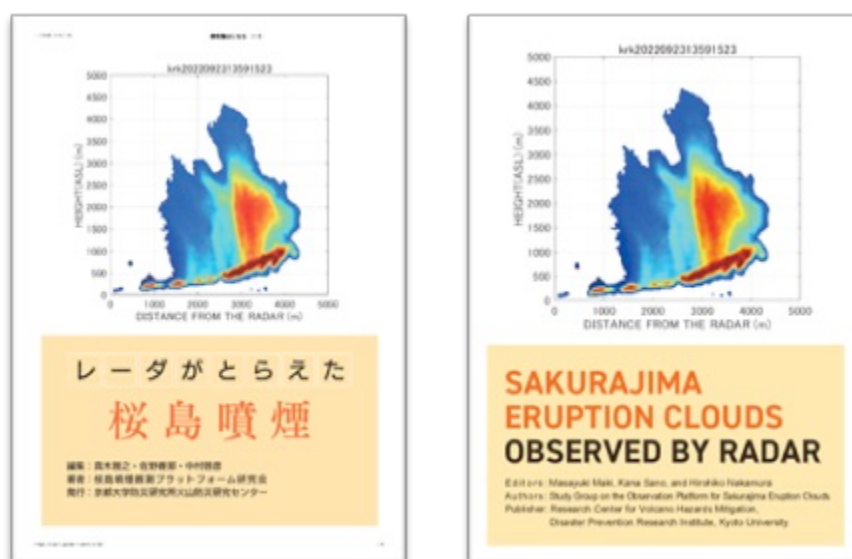


図 2-5. 電子ブックの表紙（左）和文、（右）英文。

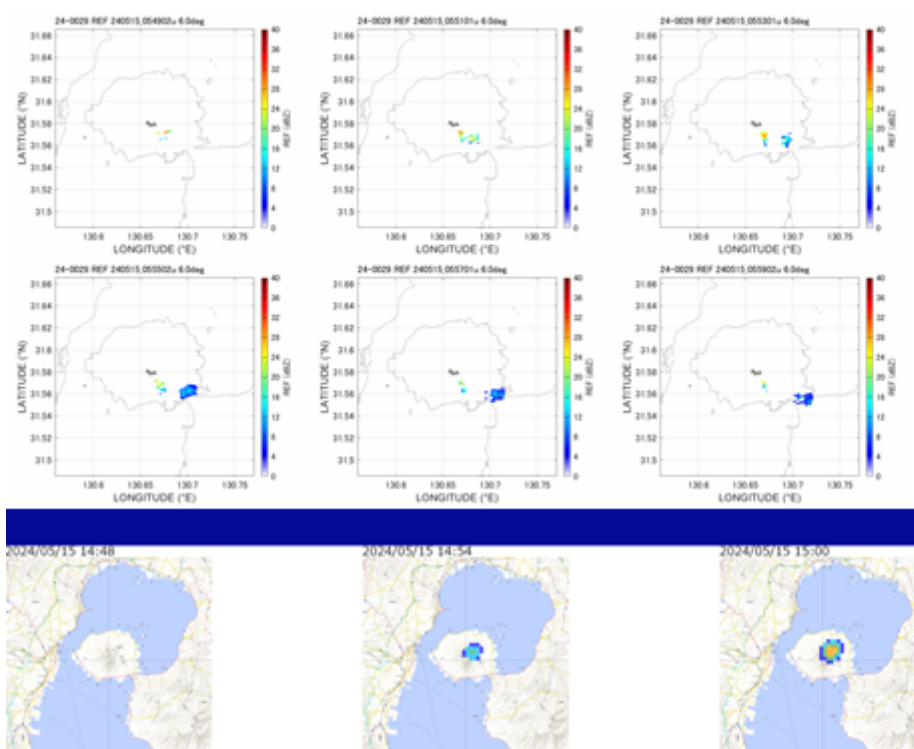


図 6-2. レーダ解析結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）比較

サブテーマ 3



図 1.3. 2025 年 1 月樽前山火山噴火総合防災訓練の様子（左：患者の搬送、右：合同本部運営図上訓練）

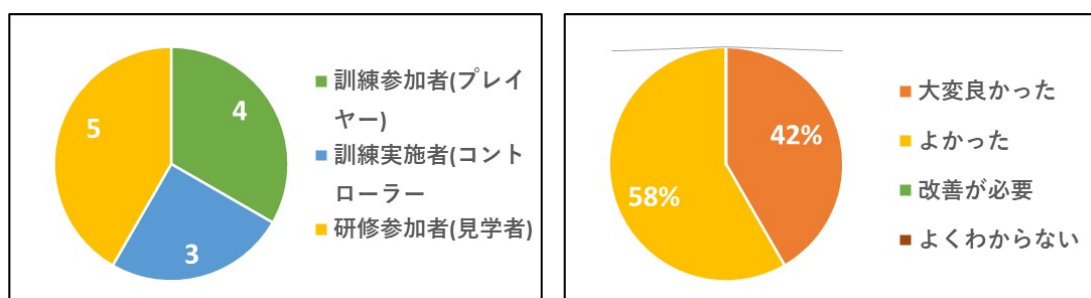


図 3-2. 上記訓練後のアンケート。左) 回答者の属性 (図中の数字は回答数)。右) 訓練全体の感想 (n=12)

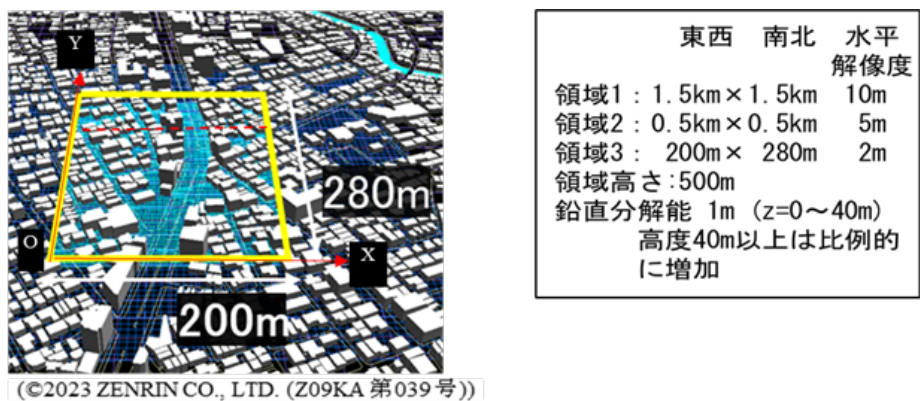


図 3-3. 降灰計算対象とした市街地、および、計算格子の概要

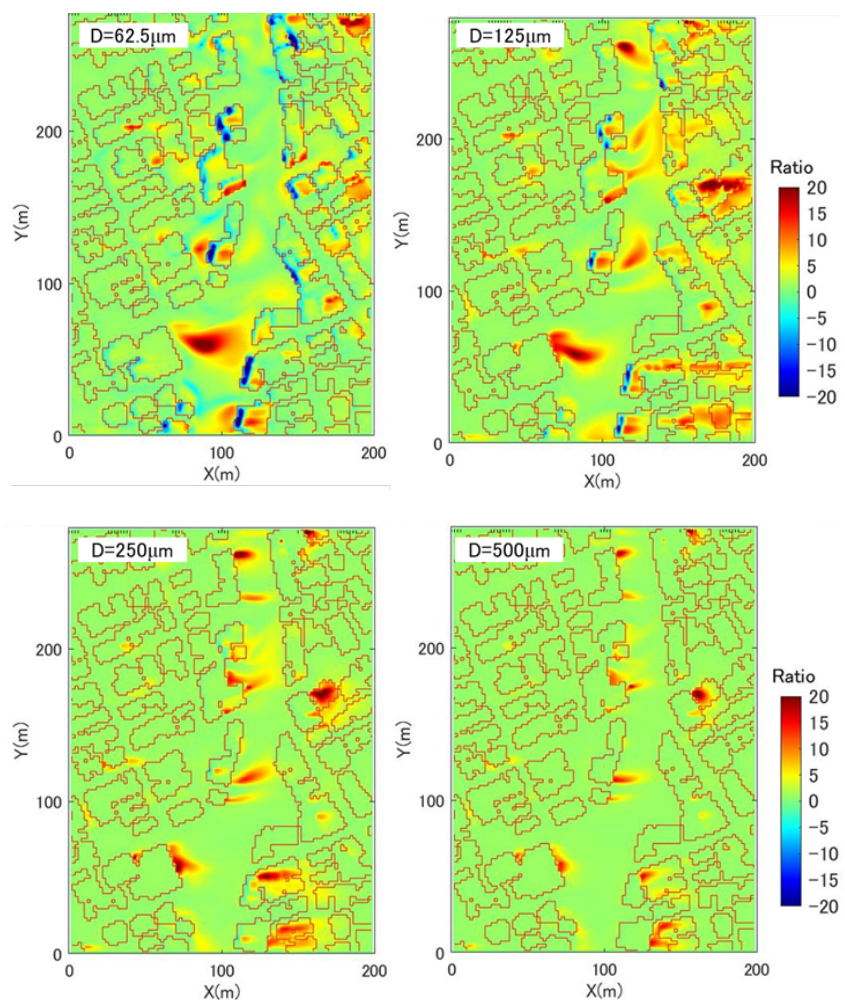


図 3-4. 再飛散ありと無しの場合の降灰強度の差（再飛散あり－無しの差分降灰強度、無次元比率として表現）参照風速 9 m/s の西風の場合（左から右に吹く）

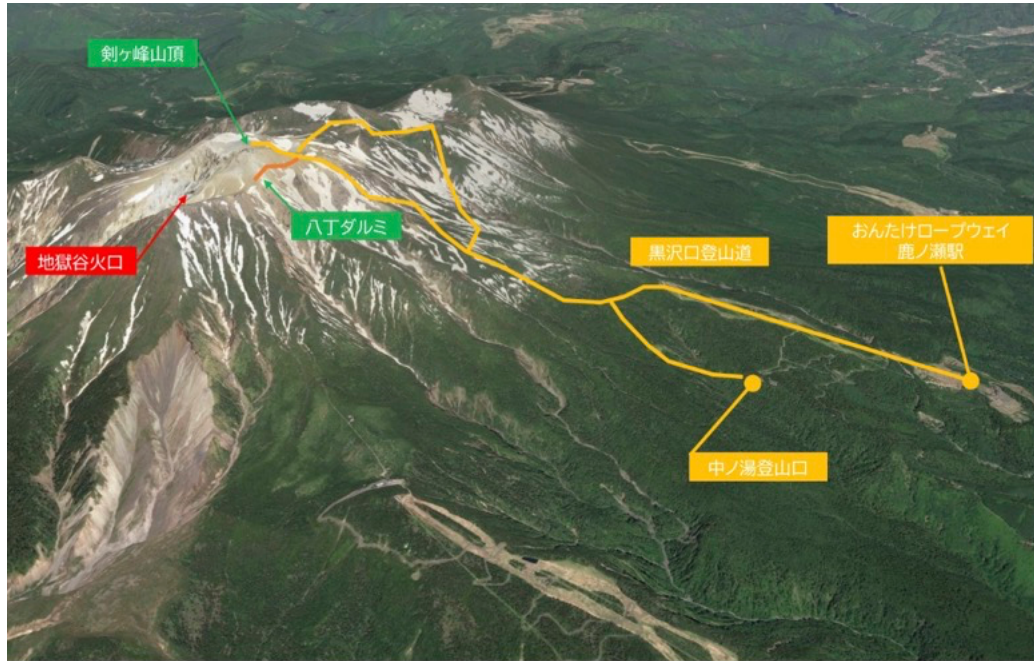


図 3-5. 令和 6 年度実施した御嶽山登山者動態データ取得実験の調査範囲（御嶽山黒沢口登山道）



図 3-6. 御嶽山登山者動態把握実験の様子。（左）黒沢十字路～剣ヶ峰間の登山道脇に身をかがめて待機する登山者、（右）剣ヶ峰下にあるシェルターに避難する登山者。

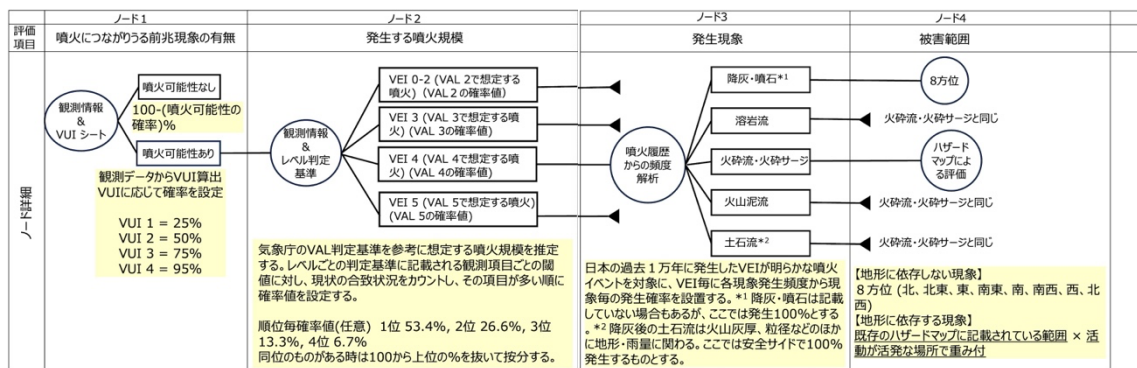


図 3-7. USGS 型噴火イベントツリーを改良して作成した、新燃岳噴火イベントツリーの構成概念図。

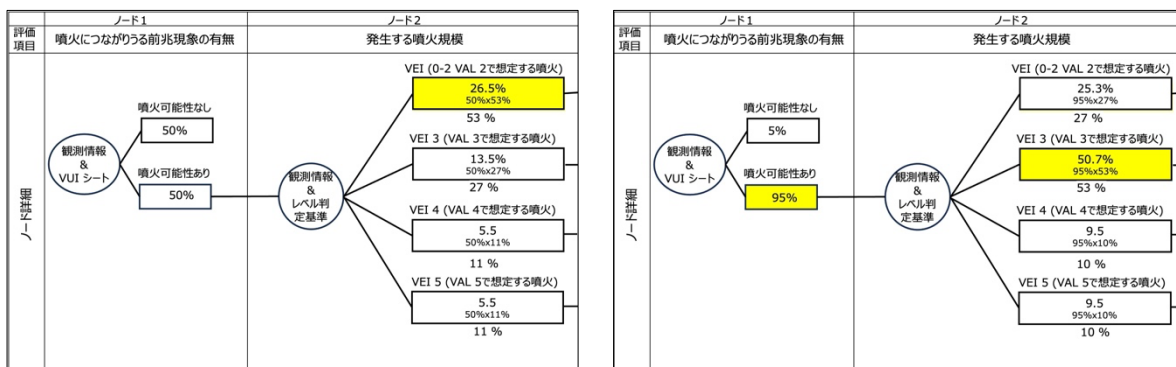


図 3-8. 上図の手順で作成された新燃岳の噴火イベントツリー。左) 2011 年 1 月 18 日時点の新燃岳の噴火イベントツリー。右) 2011 年 1 月 26 日午前時点の新燃岳の噴火イベントツリー。

はじめに

本課題Dでは、火山災害対策技術の開発として、無人機（ドローンなど）を使って噴火の状況をリアルタイムで把握し、観測データをすばやく収集・解析して、降灰の予測や被害の評価を行う手法を開発することを目的としている。また、気象庁が発表する噴火警戒レベルとあわせて、防災機関の職員や火山専門家が避難行動や事前の防災対策に活かせるような、わかりやすく役立つ火山災害情報の提供と、あわせて、その情報を正しく理解・活用するための基礎知識や訓練用の資料も提供することを目指している。

これらを実現するには、課題Bや課題Cで進められている火山の観測・予測に関する成果を活用し、火山の現在の状態や今後の活動の変化、起こり得る被害について、正確かつ分かりやすく伝える必要がある。その際には、課題Aで開発された「JVDN（日本火山災害情報ネットワーク）」を活用し、情報ツールを通じて発信することが重要である。これらは、課題Dのアウトプットであるだけでなく、本次世代火山研究推進事業全体のアウトプットでもある。

課題Dは以下の3サブテーマから構成される。

- サブテーマ1 (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。
- サブテーマ2 (D-2)：リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発。
- サブテーマ3 (D-3)：火山災害対策のための情報ツールの開発。

これらの期待されるアウトプットとしては、以下が含まれる。

- 噴火時にアクセス困難な場所の情報を取得し、火山防災・対策情報を提示。
- 現時点から24時間以内の、地点毎の降灰確率を提示。
- 自治体等が必要な行動をとるために必要な科学的根拠に基づく情報の提供。

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示す。

目 次

1. 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	1
(a) サブテーマ 1	1
(b) サブテーマ 2	2
(c) サブテーマ 3	4
(2) 研究実施日程	6
(a) サブテーマ 1	6
(b) サブテーマ 2	7
(c) サブテーマ 3	7
2. 研究成果の説明	9
2. 1 サブテーマ 1	9
(1) 業務の内容	9
(a) 業務題目	9
(b) 担当者	9
(c) 業務の目的	9
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	10
(e) 令和 6 年度における業務の方法	11
(2) 令和 6 年度の成果	13
(a) 業務の要約	13
(b) 業務の成果	13
(c) 引用文献	30
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	30
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	30
(3) 令和 7 度の業務計画案	31
2. 2 サブテーマ 2	32
(1) 業務の内容	32
(a) 業務題目	32
(b) 担当者	32
(c) 業務の目的	32
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	33
(e) 令和 6 年度における業務の方法	34
(2) 令和 6 年度の成果	36
(a) 業務の要約	36
(b) 業務の成果	37
(c) 結論	145
(d) 引用文献	145

(e) 成果の論文発表・口頭発表等	147
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	148
(3) 令和 7 年度の業務計画案	148
2. 3 サブテーマ 3	151
(1) 業務の内容	151
(a) 業務題目	151
(b) 担当者	151
(c) 業務の目的	151
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	152
(e) 令和 6 年度における業務の方法	155
(2) 令和 6 年度の成果	156
(a) 業務の要約	156
(b) 業務の成果	158
(c) 結論	224
(d) 引用文献	224
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	227
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	227
(3) 令和 7 年度の業務計画案	227
3. 会議録	229
4. むすび	230
 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

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」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。

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」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。

サブテーマ3「火山災害対策のための情報ツールの開発」では、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 国土保全技術部 国土保全技術部 国土保全技術部 国土保全技術部	千葉達朗 佐々木寿 野中秀樹 森 貴章 谷口宙河 小森惇也 江川 香 杉下 七海 若松 海 出口 美桜	【サブテーマ1】 サブテーマ1の研究課題の実施および総合推進を行った。 サブテーマ1の無人機を利用して火山災害をリアルタイムで把握する技術の高度化の研究を行い、補助アプリケーションの有効性を確認し、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、画像処理を活用し、事象抽出を試み、解	R6.4.1～ R7.3.31	5,975,651	1,378,996

		析処理の迅速化に 寄与する研究を進 めることができ た。			
--	--	---------------------------------------	--	--	--

(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	中道治 久	【サブテーマ 2】 サブテーマ 2 の研究テーマを総 合的に推進した。リモートセン シングによる火山灰放出量の即 時把握技術開発、火山灰拡散予 測の高速化技術開発、火山灰 拡散予測のためのオンラインシ ステム開発の研究を行い、火山 灰予測を高精度化させた。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	62, 534, 999	14, 431, 153
同・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・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・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・同・特定 助教	味喜大 介	降灰観測および降灰調査を行っ た。GNSS 観測を行った	同上	-	-
同・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・大学院理 学研究科・助 教	石井杏 佳	火山噴火に伴う地盤変動パラメ ータをデータベース化し、噴火 の発生時刻と規模を確率的に予 測する手法を開発した。	同上	-	-
同・防災研究 所・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・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・同・リサーチアシスタント	Vico Luthfi Ipman	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。	R6. 4. 1～ R6. 9. 30	－	－
同・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。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	－	－
同・名誉教授	井口正人	確率的火山灰拡散予測シミュレータ開発に従事した。	同上	－	－
同・名誉教授	丸山敬	桜島周辺地域での気流の数値シミュレーション手法を開発した。	同上	－	－
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。	同上	－	－
東北大学・理学研究科・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。	同上	－	－
同・部長	佐々木寛介	ドローンによる上空の風、火山灰、ガス観測のとりまとめ。	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	Alexandros 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	－	－

防災科学技術研究所・火山防災研究部門・契約研究員	瀧下恒星	ディスト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。	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・巨大地変災害研究領域・火山研究推進センター・参事	中田節也	【サブテーマ3】本研究テーマを総合的に推進した。情報ツール利活用方策の検討を担当し、噴火のデータベースを活用した噴火災害評価の仕方を研究した。	R6. 4. 1- R7. 3. 31	9,732,188	2,245,889
防災科学技術研究所・巨大地変災害研究領域・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と社会実装に向けた準備等を担当し、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。また、降灰被害予測コンテンツの研究成果の表示方法について研究した。	同上	同上	同上
防災科学技術研究所・巨大地変災害研究領域・副領域長	藤田英輔	情報ツール利活用方策の検討を担当した。	同上	同上	同上
防災科学技術研究所・巨大地変災害研究領域・火山研究推進センター・セン	清水 洋		同上	同上	同上

ター長					
防災科学技術研究所・巨大地変災害研究領域・調査役	棚田俊收		同上	同上	同上
防災科学技術研究所・巨大地変災害研究領域・火山研究推進センター・客員研究員	宮村正光		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の高度化と社会実装に向けた準備等を担当した。	同上	同上	同上
熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・教授	宮縁郁夫		同上	同上	同上
株式会社大林組 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	降灰被害予測コンテンツ高度化と社会実装準備等を担当した。都市街区降灰計算で火山灰再飛散を導入した。堆積深への変換を行った。広域の降灰情報と街区降灰計算を関連付ける方法を検討した。	R6. 4. 1- R7. 3. 31	5, 454, 464	1, 258, 722
株式会社大林組 技術本部技術研究所・構造技術研究部・副部長	諏訪 仁	降灰被害予測コンテンツ高度化と社会実装準備等を担当した。降灰荷重による建物屋根の変形等構造的影響に関する検討の拡充を行った。降灰と重要施設である病院の機能被害の関連付けをより明確にした。	同上	同上	同上
大林組・技	野畑有秀	屋根への降灰荷重の影響およ	同上	同上	同上

術本部技術 研究所		び病院の機能被害検討を行った。			
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"> ● 周知啓発教育用コンテンツの高度化と社会実装に向けた準備等 ● 避難・救助支援コンテンツの高度化と社会実装に向けた準備等 研究成果の概要： 社会実装に向けて、周知啓発教育用コンテンツの高度化と訓練コンテンツなどの追加を行った。避難・救助支援コンテンツについても、退避施設の耐衝撃対策に資するこれまでの実験結果の整理と実験装置の社会実装の準備等を行った。	R6. 4. 1- R7. 3. 31	9,364,351	2,161,004
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
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	周知啓発教育用コンテンツならびに情報ツール利活用方策の検討のために、利活用に資する要件の具体化のため、県や道路管理者等と意見交換を行った。	R6. 4. 1- R7. 3. 31	4,917,952	1,134,912
同・教授	関谷直也	周知啓発教育用コンテンツならびに情報ツール利活用方策の検討のために、利活用に資する要件の具体化を検討した。	同上	同上	同上

(2) 研究実施日程

(a) サブテーマ1

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
プロジェクトの総合推進	←											→
RTK-GNSS搭載UAVを用いた実証実験の実施		←				→						
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									←			→

(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社会実装	←											→
降灰被害予測コンテンツの社会実装	←											→
避難・救助支援コンテンツの社会実装	←											→
情報ツール利活用方策の検討	←											→

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

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

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
アジア航測株式会社	分担機関	先端技術研究所 室長	千葉達朗
		国土保全技術部 副部長	佐々木寿
		社会システムコンサルタント部 部長	野中秀樹
		社会システムコンサルタント部	森 貴章
		社会システムコンサルタント部	谷口宙河
		先端技術研究所	小森惇也
		国土保全技術部	江川 香
		国土保全技術部	杉下七海
		国土保全技術部	若松 海
		国土保全技術部	出口美桜

(c) 業務の目的

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

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

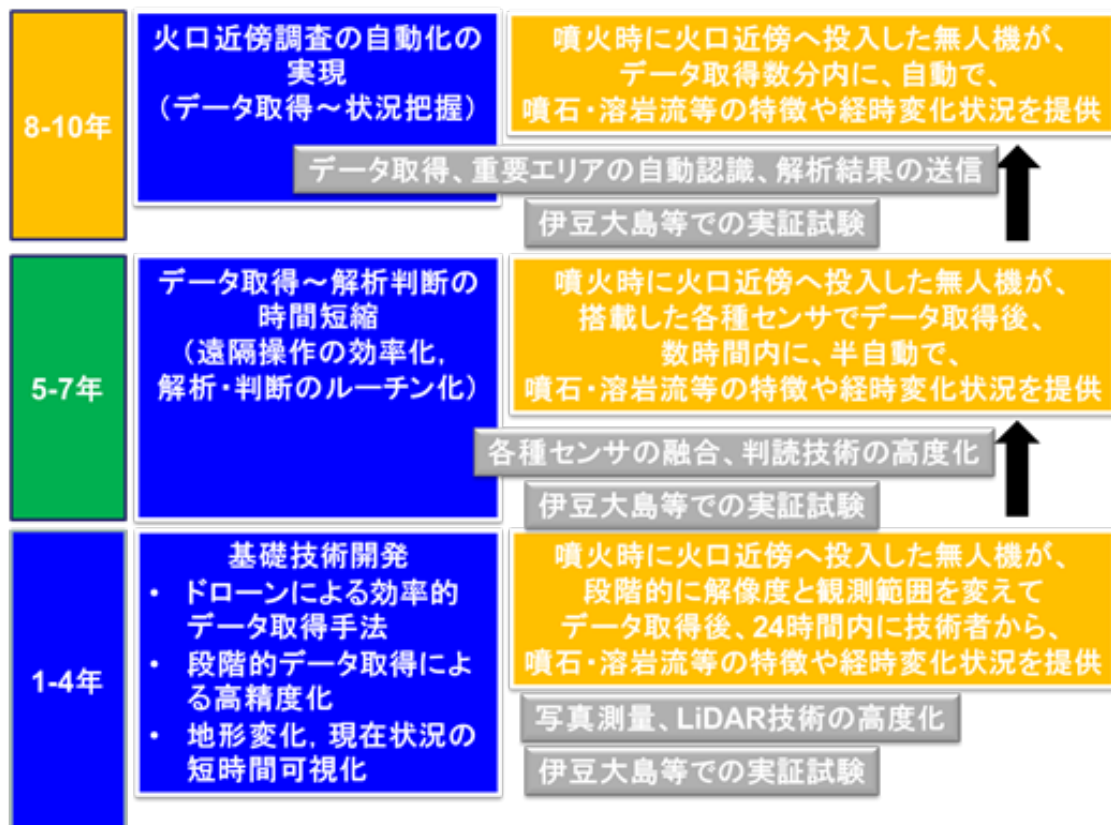


図 7 本業務の全体計画

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

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

3) 平成 30 年度：

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

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

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

5) 令和 2 年度 :

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

6) 令和 3 年度 :

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

7) 令和 4 年度 :

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

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・改良点等を取りまとめた。

9) 令和 6 年度 :

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処理方法やツールを実証実験で検証し、ツールの改良等を行った。

10) 令和 7 年度 :

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

(e) 令和 6 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。
- 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、同一課題内での連携を推進する。

2) 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。

3) 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、発生し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。

4) 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。

5) 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) 令和 6 年度の成果

(a) 業務の要約

- 岩手山を対象に実証実験を行った。3D 地形モデル作成の精度向上を目的として、自律飛行による垂直写真を取得した。熱赤外画像についても正確な画像のマッチングが可能となった。レーザ測距機能による溶岩流末端の座標値取得方法を検証した。防災対応や数値シミュレーションへの活用を想定した場合に十分な精度であることを確認した。現地から UAV の映像をリアルタイム配信し、研究者の指示に従う飛行を実施した。プロポ上に画面表示される計測結果はリアルタイムで配信されるため、遠隔地にいる研究者に数秒以内に座標値を計測・伝達することができた。
- 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改良した。高速に処理可能で中心投影画像を連結しても、一定の連結精度を発揮する手法を構築した。構築した手法で実際に画像の状態を短時間で把握可能であるか検証した。検証の結果、高精度に画像を連結することができ、処理時間の面でも撮影画像のデータ不足を瞬時に確認することが可能となった。
- 境界部抽出の精度向上を試み、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。オルソ画像のマスク処理後にモフォロジー処理を加えることで過剰抽出を抑え、溶岩流の境界を正確に抽出可能であることを確認した。
- 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した。また、噴火時に航空機やドローンをとばさなくとも、地上で撮影した画像から撮影範囲のオルソ画像を作成することで災害状況を把握することが可能であるか検証した。単写真測量の標定作業と地上から撮影した画像（以下、「地上写真」という）をオルソ画像化し GIS で確認することを可能にする方法として、国立研究開発法人国立環境研究所が 2023 年 9 月に発表した「山小屋カメラを鉱山植生モニタリングに活用 深層学習を用いた植生図の自動作成手法を開発」内で開発されたオルソ化手法を用いた。位置ずれが生じているものの、斜め写真をオルソ画像化できたことが確認できた。オルソ画像化した画像から溶岩流を確認できるため、火山噴火が発生した際に迅速に被害範囲を把握することができ、また、ドローンのフライトプランの作成に役立つことが期待できる。

(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改良し、データ取得作業の効率化（時間短縮）を図ることで、火山噴出物の層厚推定に用いる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

現地から UAV の映像をリアルタイム配信し、研究者の指示に従う飛行を実施した。火山学者の指示により、可視画像・熱赤外画像の撮影を行った。また、Matrice300 RTK に

搭載されたカメラ (H20T) のレーザ測距機能で、溶岩流の先端などの遠隔で指示された位置の計測を行った。プロポ上に画面表示される計測結果はリアルタイムで配信されるため、遠隔地にいる研究者に数秒以内に座標値を計測・伝達し、防災対策に資することができる。

c) JVDN システム、B4、C との連携

3D 地形モデルを作成せずに抽出できる情報として、単写真と画像処理を組み合わせることで溶岩流境界の抽出を試みる研究を行い、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。また、ドローンに搭載されたレーザ測距機能や画像処理により、溶岩流の先端の位置や分布範囲が計測できるようになったため、数値シミュレーションへの具体的な反映方法などの連携検討が重要となる。

d) 火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携

火山研究人材育成コンソーシアム構築事業との連携として、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。代わりとして、火山研究人材育成コンソーシアム構築事業の参加学生 3 名が 2024 年 7 月にアジア航測株式会社を訪問した際に、本サブテーマの概要について解説し、ドローンの紹介や解析手法の説明を行った (図 8)。



図 8 学生への説明の様子

2) RTK-GNSS 搭載 UAV を用いた実証実験の実施

a) 概要

2024 年度は、岩手山を対象として実証実験を行った。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した。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った。

実証実験は 2024 年 9 月 18 日～9 月 19 日に実施した。使用した機体は、Mavic 3T および Matrice300 RTK である（表 1、図 9）。Mavic 3T は重量 1kg 以下の比較的小型の機体であり、可視カメラとサーマルカメラが搭載されている。Matrice300 RTK は防水・防塵性能を伴う中型機であり、用途に合わせてカメラを選択することができる。本検証ではレーザー距離計を含む H20T を使用した。H20T レーザ測距機能では、1km 以内の対象物の位置情報（緯度・経度・標高）について取得することができる。

表 1 使用機体のスペック

名称	Mavic 3T	Matrice300 RTK
重量	920g	約 6.3kg
対角寸法	380.1mm	895mm
最大飛行速度	15m/s	17m/s
最大飛行時間	45 分	55 分
保護等級	－	IP45
カメラ	<ul style="list-style-type: none">・ 48MP 広角カメラ・ 12MP 望遠カメラ・ 640×512px サーマルカメラ ※カメラ交換は不可	<ul style="list-style-type: none">・ 20MP ズームカメラ・ 12MP 広角カメラ・ 1200m LRF（レーザー距離計）・ 640×512px 放射分析サーマルカメラ ※カメラは用途に合わせて選定可能（本検討では H20T を使用）



図 9 使用機体（左：Mavic3T、右：Matrice300RTK）

b) 自律飛行・自動撮影による撮影手法

2022 年度に実施した自律飛行・自動撮影について、日中・夜間に実施した。Mavic 3T および Matrice300 RTK の 2 機種を用いて、「ライブミッション機能」による定点の自動巡回・撮影を実施した。2 機種の違いとして、「AI スポット機能」の有無が挙げられる。「AI スポット機能」を持つ Matrice300 RTK はミッションごとの画角のずれが小さいが、撮影に時間がかかる。一方で、「AI スポット機能」の無い Mavic 3T は撮影にかかる時間が短いことが特長である。自動巡回による画像取得例を図 10 および図 11 に示す。取得した画像は、後述する自動抽出や解析作業効率化の検討等に活用した。

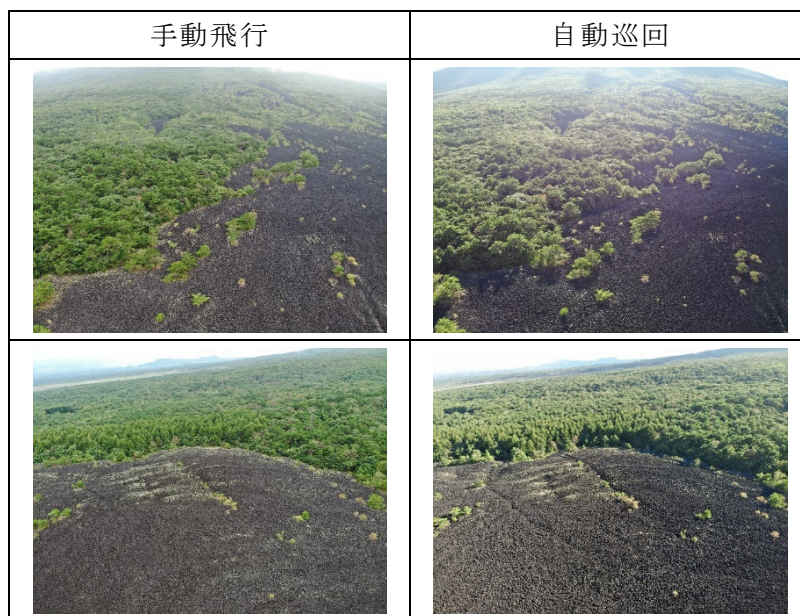


図 10 自動巡回による撮影結果 (Matrice300RTK/可視画像の例)

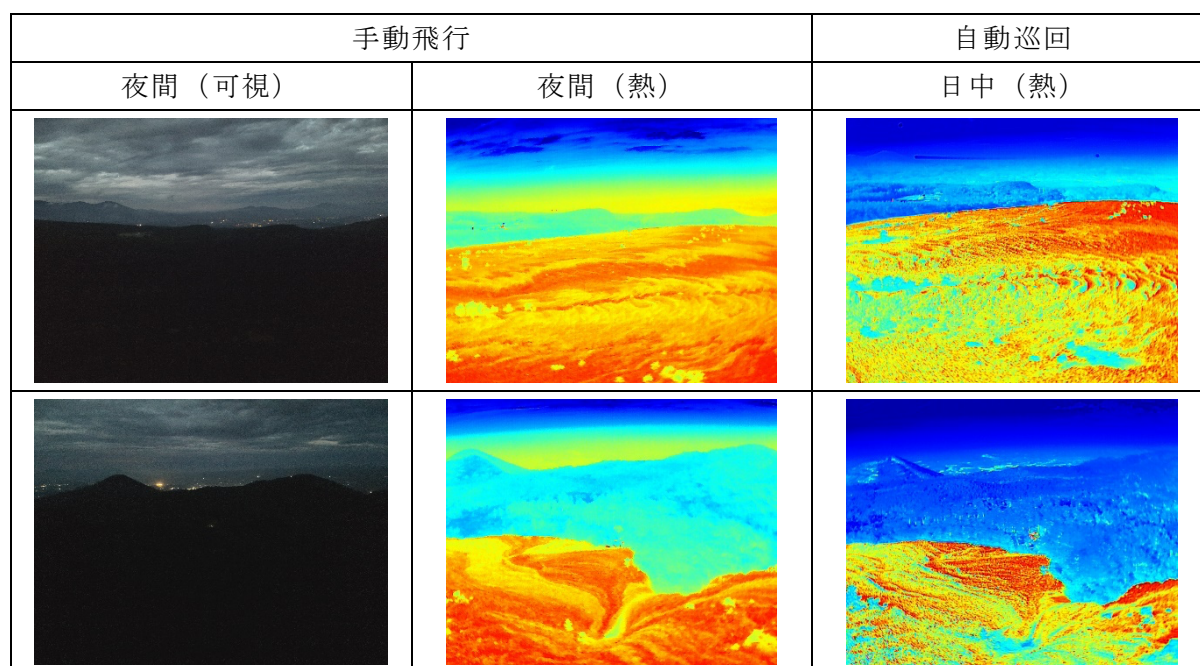


図 11 自動巡回による撮影結果 (Mavic3T/可視・熱画像の例)

c) 3D 地形モデル作成の精度向上を目的とした飛行方法

3D 地形モデル作成の精度向上を目的として、自律飛行による垂直写真を撮得した。撮影機体には Mavic 3T を用いた。可視画像と合わせて熱赤外画像（RGB）、熱赤外画像（白黒）を取得し、それぞれについて三次元地形モデルを作成した。

可視画像と熱赤外画像の取得のための飛行コースの例を図 12 に示す。可視画像についてはサイドラップ 60%、オーバーラップ 80%と設定したが、熱赤外画像については画像の特徴点が少ないことから、サイドラップ 90%、オーバーラップ 90%に設定した。これにより、熱赤外画像についても正確な画像のマッチングが可能となった。

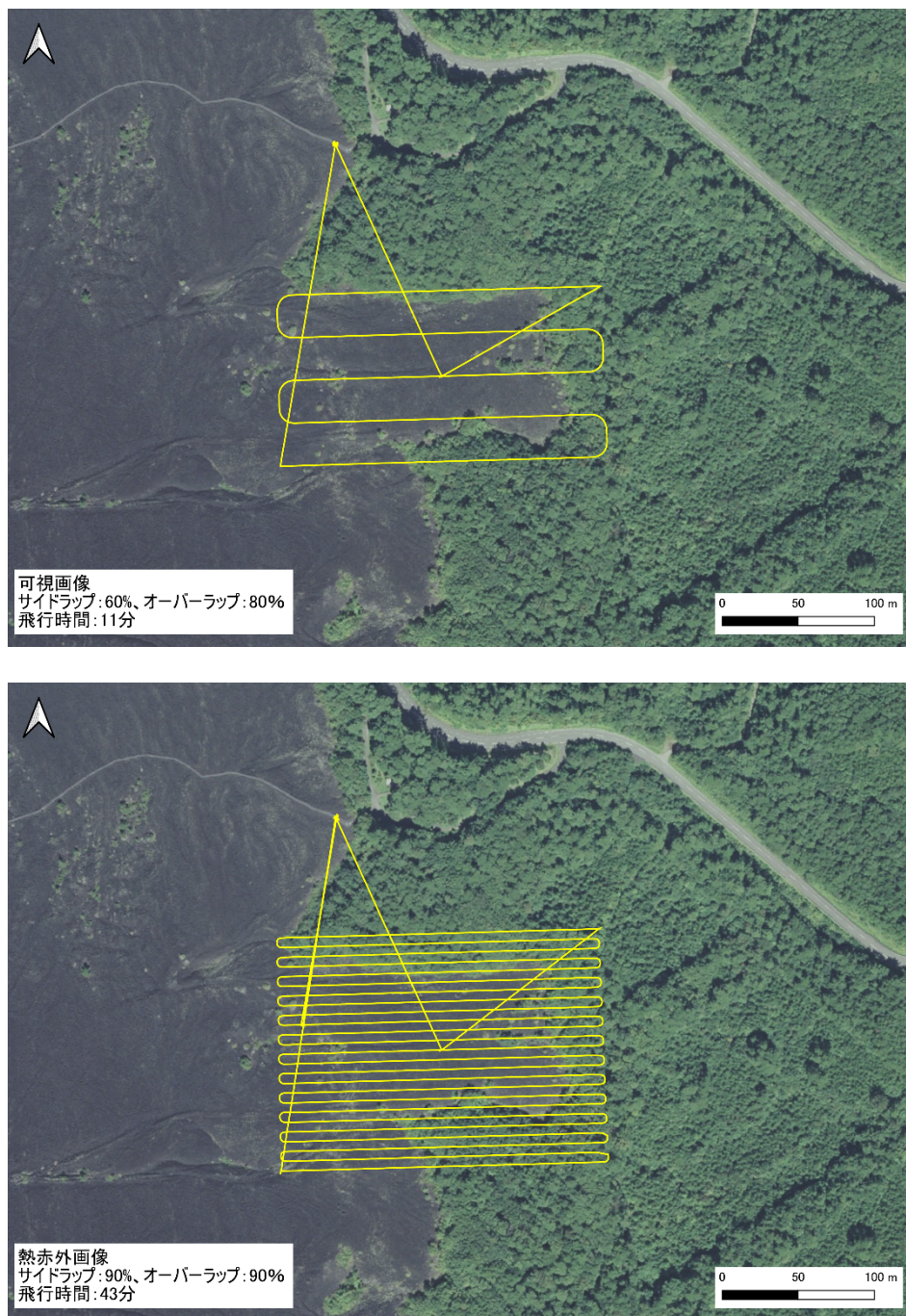


図 12 3D 地形モデル作成のための飛行コース例

d) レーザ測距機能による溶岩流位置情報の取得

Matrice300 RTK を使用し、レーザ測距機能による溶岩流末端の座標値取得方法を検証した。計測例を図 13 に示す。レーザ距離計で取得した座標を GIS 上に展開すると、実際の位置からはわずかにずれが生じている。これは上空からの斜め計測のため、溶岩流末端と判断した箇所が実際の位置より手前だったことが要因である。一方で、ずれの値は 10m 以内に収まっていることから、防災対応や数値シミュレーションへの活用を想定した場合、誤差による支障は小さいものと考えられる。

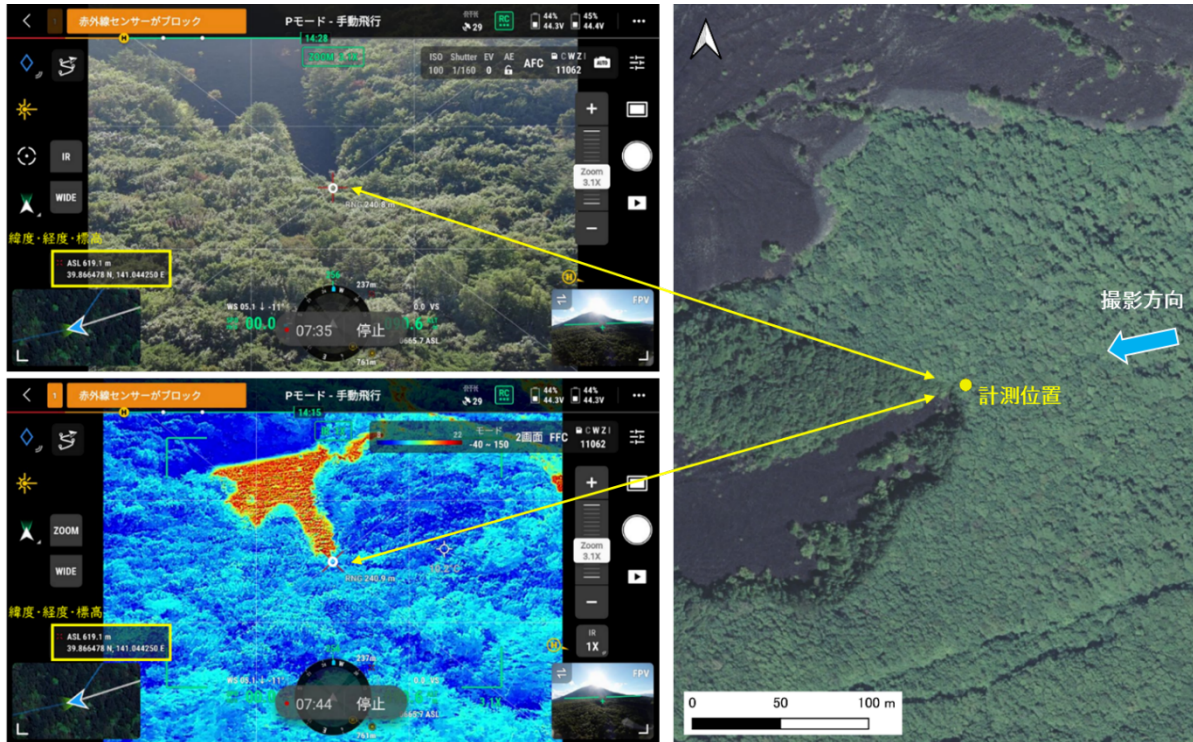


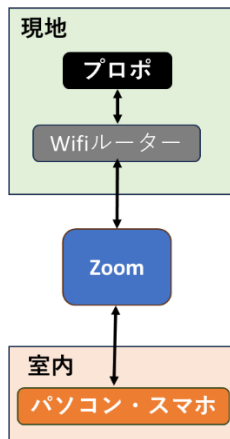
図 13 レーザ測距による位置情報の確認例
(左上：可視画像、左下：熱赤外画像、右：GIS 上に展開した座標値)

e) 取得データのリアルタイム配信手法の検討

現地から UAV の映像をリアルタイム配信し、研究者の指示に従う飛行を実施した。配信方法の概要について図 14 に示す。プロポに表示された UAV の映像をスマートフォンに外部出力し、Zoom を介して中継することで、遠隔地にリアルタイムで映像配信ができる。通信には携帯通信（Wi-Fi ルーター）を使用している。

本手法を用いて、火山学者の指示により、可視画像・熱赤外面像の撮影を行った。また、Matrice300 RTK のレーザ測距機能で溶岩流の先端などの遠隔で指示された位置の計測を行った。プロポ上に画面表示される計測結果はリアルタイムで配信されるため、遠隔地にいる研究者に数秒以内に座標値を計測・伝達することができる。本手法により、本業務の達成目標である「数分以内の状況把握」について達成された。

◆構成図



◆スマホの画面



◆現地状況



図 14 リアルタイム配信の実施状況

3) 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が原因で再計測が必要となる場面があった。3Dモデルの作成には時間がかかるため、作成前にデータの不備を確認できることが望ましい（図15）。2023年度には、3D地形モデル作成前に取得した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）に関する研究を行った。しかし、画像の連結手法が高負荷であり、かつ中心投影画像に適していなかったため、複数の課題があった。

そこで、2024年度は、高速に処理可能で中心投影画像を連結しても、一定の連結精度を発揮する手法を構築した。構築した手法で実際に画像の状態を短時間で把握可能であるか検証した。

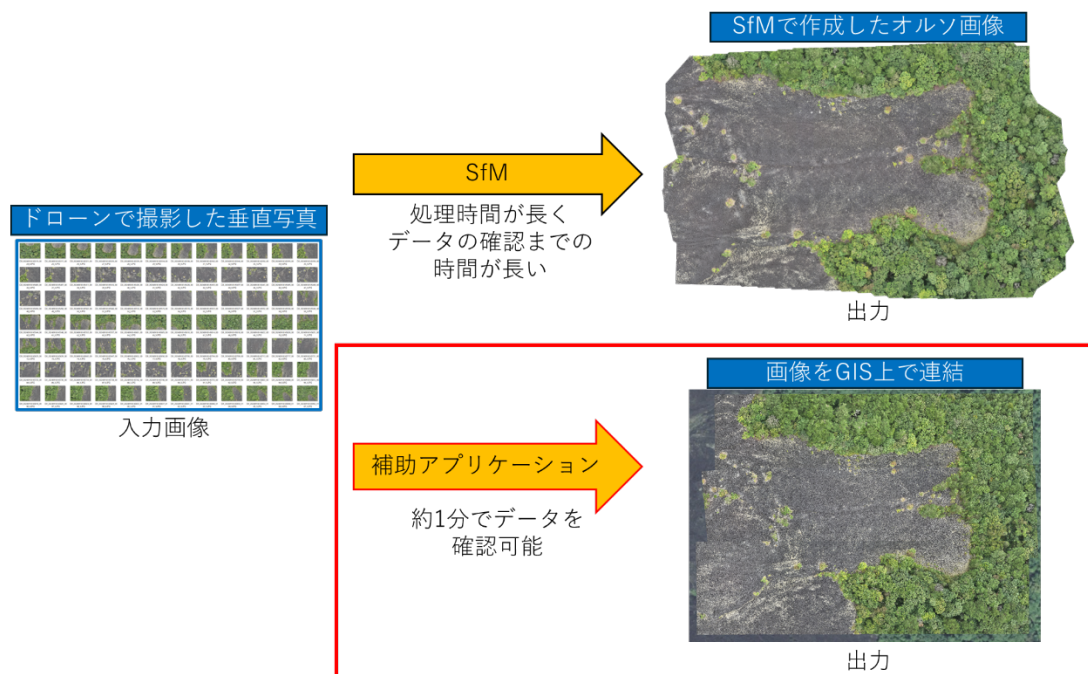


図 15 補助アプリケーションの目的

b) 昨年度手法との変更点

昨年度の手法では、画像処理ライブラリの OpenCV を用いて、画像同士の近傍点から画像の位置関係を算出し、その位置関係をワールドファイルに反映させることで、GIS 上でデータの状態を確認することを提案した。昨年度手法のイメージを図 16 に示す。この手法は、数枚程度の画像であれば高精度に画像を連結することが可能であるが、画像同士の近傍点を探索する特性上、被写体の撮影角度に大きく依存し、さらに計算コストが高く、大量かつ中心投影の画像を処理するため、現場での運用としては適していないことがわかった。

そこで、本年度の研究では、各画像の GNSS 情報から UAV の進行角度を算出し、位置情報と進行角度からワールドファイルを作成した。本年度手法のイメージを図 17 に示す。

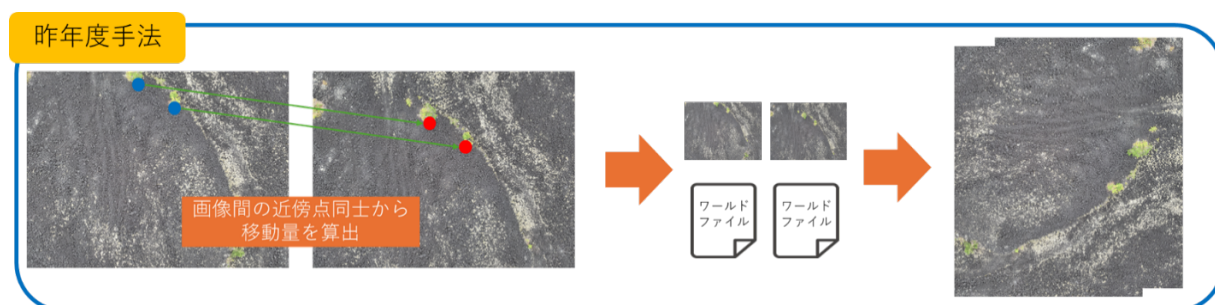


図 16 昨年度手法のイメージ

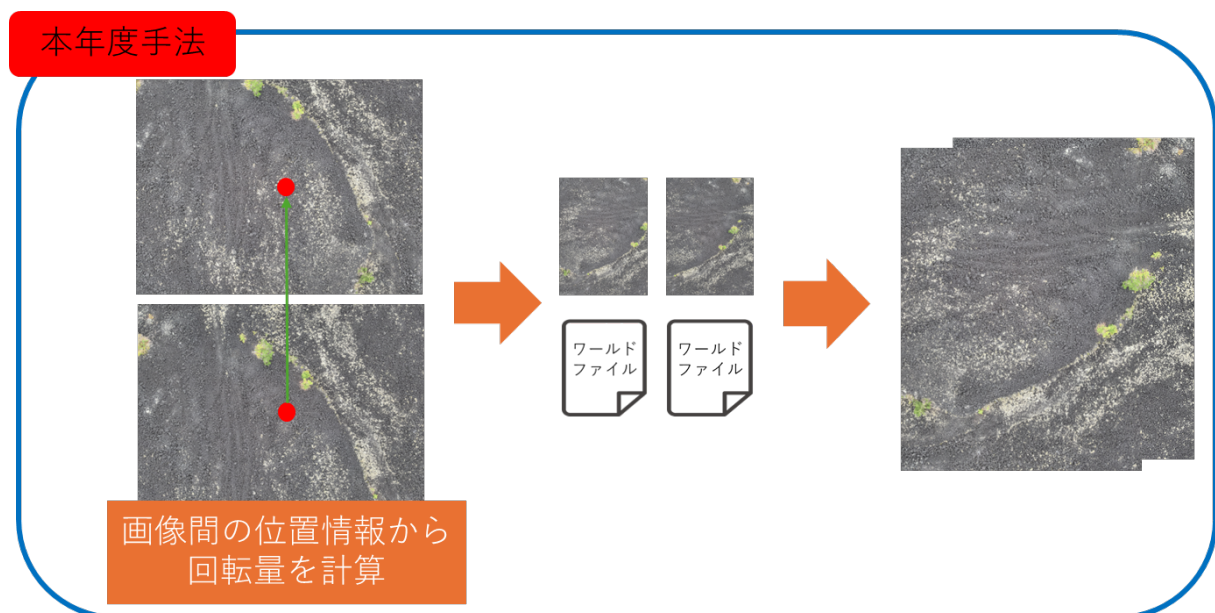


図 17 本年度手法のイメージ

c) 検証結果

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、画像の状態を目視で確認した。確認するデータは、RGB 画像、熱画像 (RGB)、熱画像 (白黒) を QGIS 上で確認した。連結画像を図 18 に示し、処理時間などの結果を表 2 に示す。検証の結果、高精度に画像を連結することができ、処理時間の面でも撮影画像のデータ不足を瞬時に確認することが可能であるといえる。

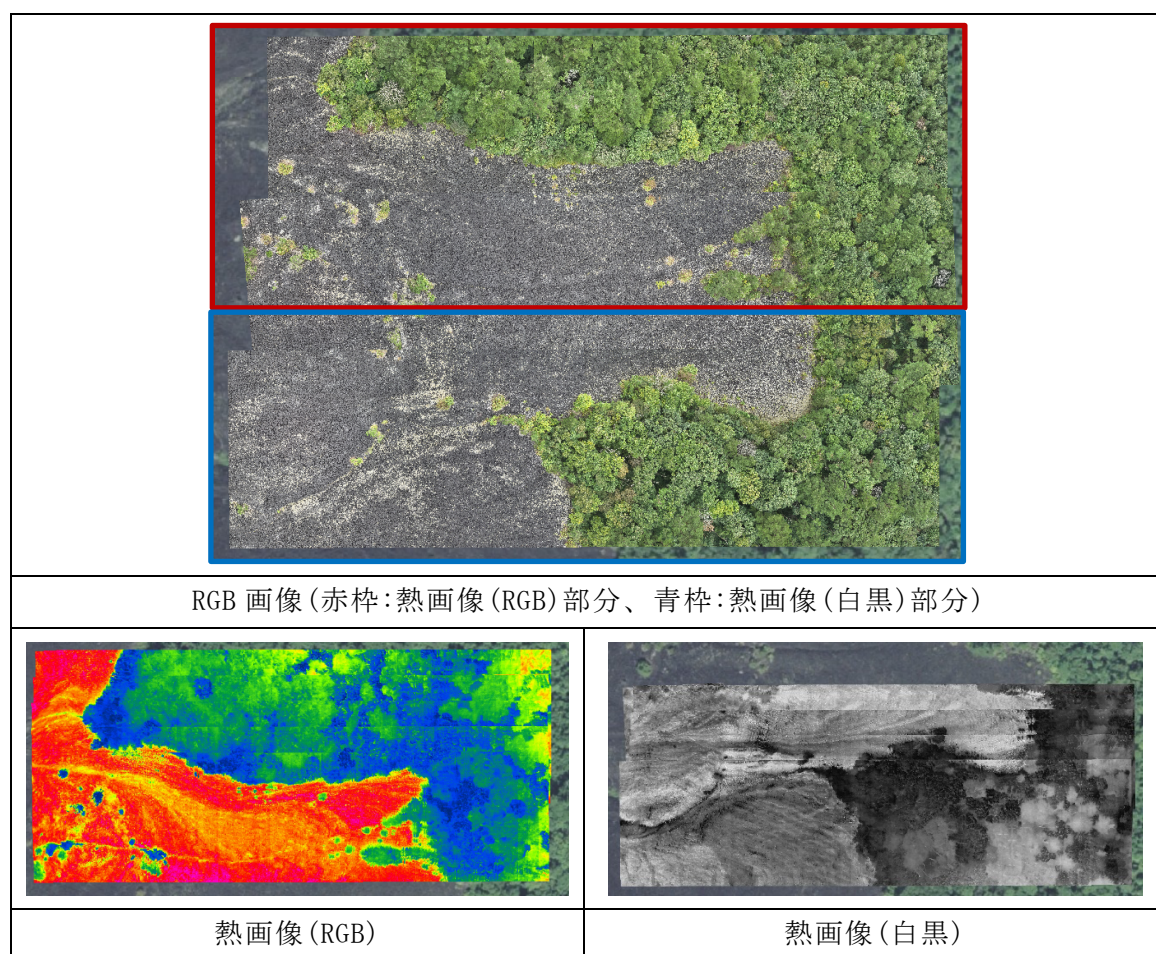


図 18 GIS 上に表示した垂直写真の連結画像

表 2 各連結画像の比較表

	画像数	解像度	処理時間
RGB 画像	109	4000*3000	2 分
熱画像 (RGB)	439	640*512	30 秒
熱画像 (白黒)	319	640*512	20 秒

4) 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

2023 年度に、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し、その抽出結果から境界部を算出した。2024 年度は、境界部抽出の精度向上を試み、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) 画像処理を用いた溶岩流境界抽出の精度向上

オルソ画像のマスク処理後にモフォロジー処理を加えることで過剰抽出を抑え、溶岩流の境界を正確に抽出可能であることを確認した（図 19）。2023 年度の処理のみでは青枠のようになり、過剰に境界を検出している。

また、抽出した溶岩流境界線は GIS 上で表示可能であり（図 20）、状況認識が容易になった。

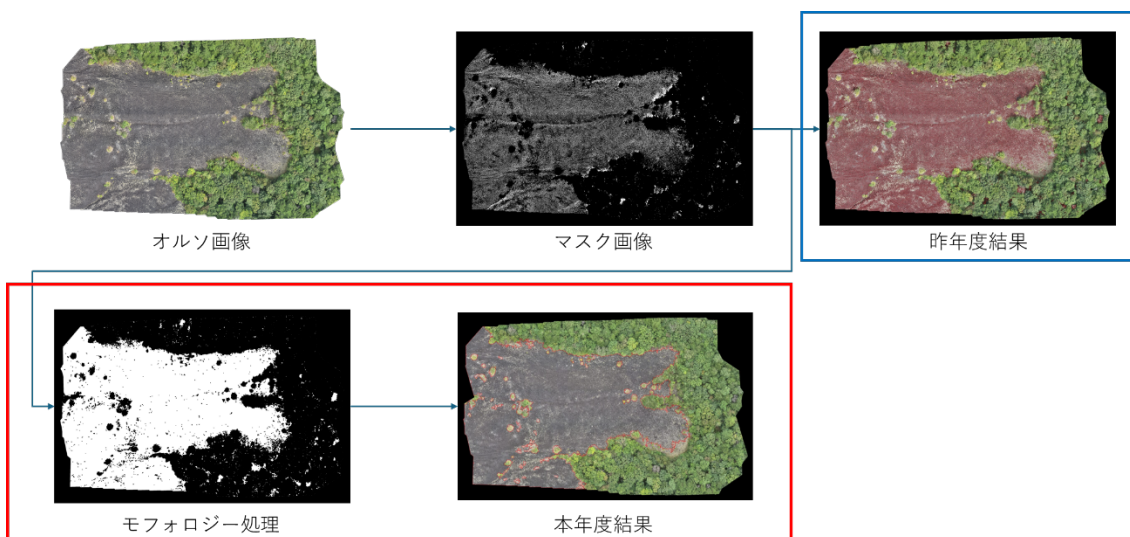


図 19 溶岩流境界抽出処理の比較（赤枠が改良した部分）



図 20 溶岩流の境界を自動抽出した例

5) 解析作業効率化の検討

a) 概要

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した。また、噴火時に航空機やドローンをとばさなくとも、地上で撮影した画像から撮影範囲のオルソ画像を作成することで災害状況を把握することが可能であるか検証した。

b) 調査結果

単写真測量の標定作業と地上から撮影した画像（以下、「地上写真」という）をオルソ画像化し GIS で確認することを可能にする方法として、国立研究開発法人国立環境研究所が 2023 年 9 月に発表した「山小屋カメラを鉱山植生モニタリングに活用 深層学習を用いた植生図の自動作成手法を開発」内で開発されたオルソ化手法を用いた。オルソ化手法の実行プログラムは GitHub にて公開されている。

処理に必要なデータは 3D モデルをシミュレーションするための航空写真(GeoTiff 形式)と DEM(GeoTiff 形式)、単写真測量とオルソ化の対象となる写真とその撮影時のカメラパラメータである。処理の流れは次の通りである。

- ① 航空写真オルソ画像と DSM を入力して、撮影対象の 3D モデルをシミュレート
- ② 地上写真のカメラパラメータを用いてカメラの位置・姿勢を設定し、シミュレーション結果を画像化
- ③ AKAZE 局所特微量と FLANN を使用して②シミュレーション画像と地上写真のマッチング点を取得（GCP 取得）
- ④ ③の GCP の地理座標を画像座標系に投影し、再投影誤差を最小化することによりカメラパラメータを最適化
- ⑤ ④最適化したカメラパラメータを用いて、地上の各画素に地理座標を埋め込むことによりオルソライクな画像を作成

c) 試行結果

上の b) で調査したオルソ化手法を用いて、単写真のオルソ化に取り組んだ。入力データは図 21 の通りである。なお、b) で入力データとしている地上写真の代わりにドローンを用いて撮影した岩手山の斜め写真を使用した。

航空写真オルソ画像：八幡平山系（秋田駒ヶ岳外）航空レーザ測量成果（借用：国土交通省 東北地方整備局 岩手河川国道事務所）
 DEM：八幡平山系（秋田駒ヶ岳外）航空レーザ測量成果（借用：国土交通省 東北地方整備局 岩手河川国道事務所）
 斜め写真：Mavic3E(広角カメラ)で撮影。背景の空は黒塗りに変更
 カメラパラメータ：斜め写真撮影時のパラメータ（座標含む）

	
航空写真オルソ画像	DEM 画像 (1m 解像度)
	<pre>{ "x":18432.8,"y":-14045.4,"z":757.1, "fov":54.629,"pan":-117.300,"tilt":10.500,"roll":0, "a1":1,"a2":1,"k1":0,"k2":0.0,"k3":0,"k4":0,"k5":0.0,"k6":0, "p1":0,"p2":0,"s1":0,"s2":0,"s3":0,"s4":0, "w":5280,"h":3956,"cx":5280/2,"cy":3956/2} </pre>
斜め写真 (Mavic3E で撮影)	カメラパラメータ

図 21 斜め写真のオルソ画像化 入力データ

なお、本検討の実施に当たりオルソ化手法のプログラムを一部変更した。1 つ目は、3D モデルをシミュレーションする際に入力する座標値を、デフォルトでは斜め写真の撮影位置であるのに対して、岩手山の火口付近に変更した。3D モデルをシミュレーションする

際に航空写真オルソ画像と DEM 画像を特定の座標から任意の距離で矩形に取得する処理が含まれており、デフォルトの斜め写真の撮影位置の座標を入力すると本検討で利用した航空写真オルソ画像と DEM 画像では画像の範囲外を参照することとなりエラーが発生すること、また、山体をシミュレーションできないことを避けるために行った変更である。2つ目に、AKAZE 局所特徴量の抽出時に入力とするシミュレーション画像と斜め写真の両方をグレイスケールに変更した。この変更は、AKAZE により取得した点同士をマッチングしやすくするための変更である。

処理に使用した PC のスペックは、CPU Core i7-14700, RAM 16GB, GPU Nvidia T1000, VRAM 8GB である。処理に要した時間は 5 分 41 秒であった。

処理結果を図 22、図 23 に示す。図 23 下部の重畳結果から位置ずれが生じているものの、斜め写真をオルソ画像化できたことが確認できる。オルソ画像化した画像から溶岩流を確認できるため、火山噴火が発生した際に迅速に到達範囲を把握することができ、また、ドローンのフライトプランの作成に役立つことが期待できる。

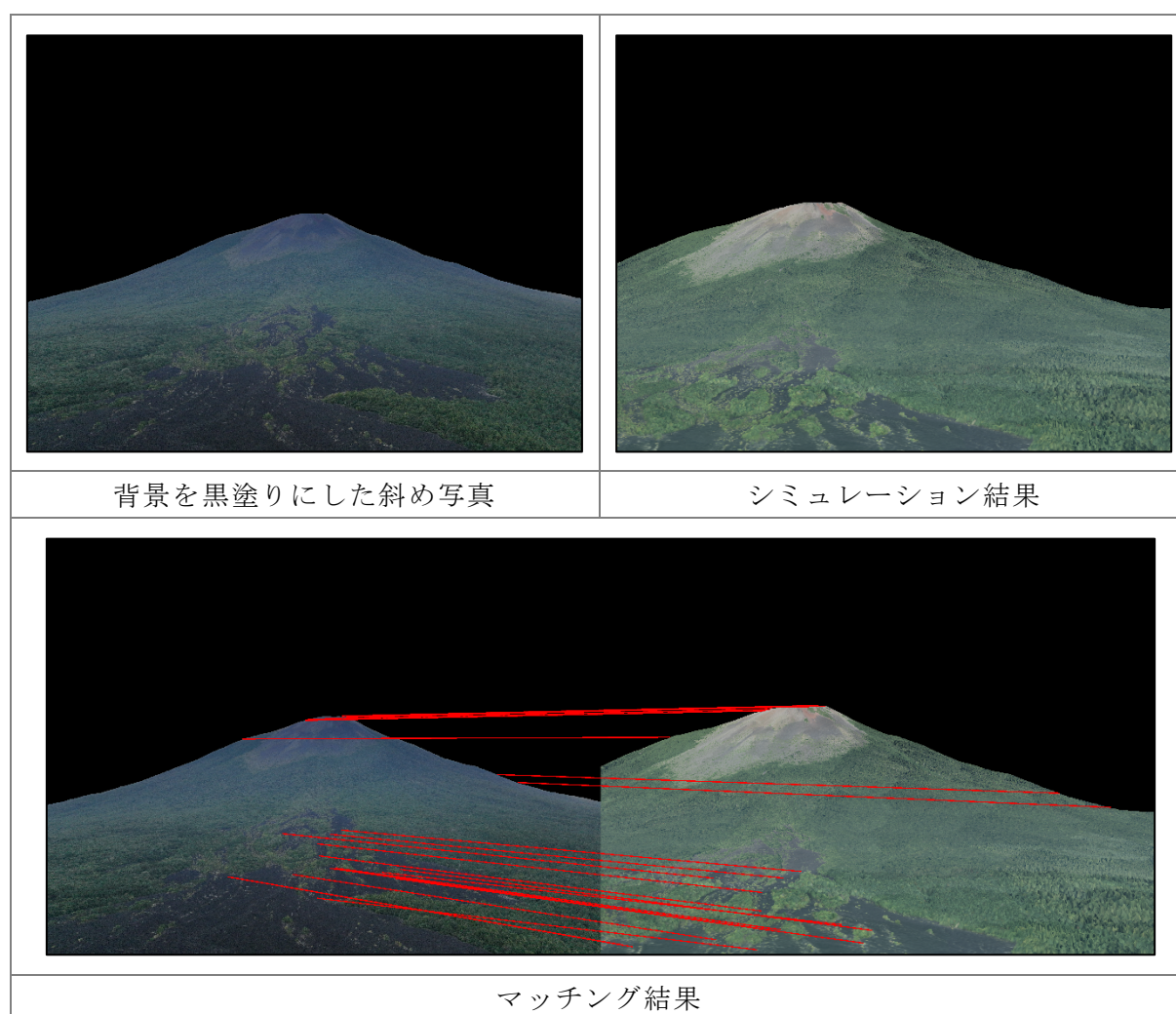
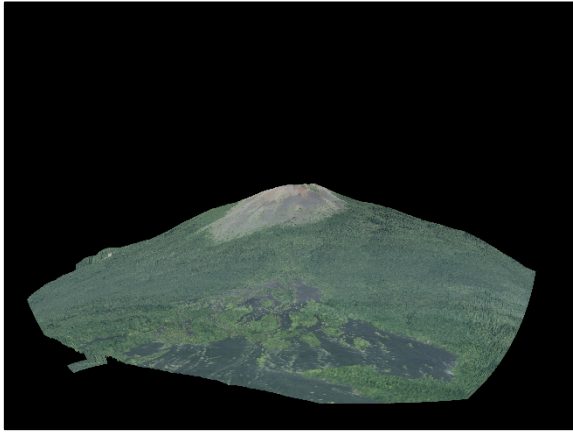
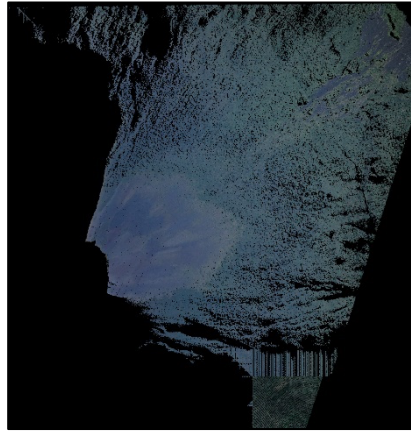


図 22 斜め写真のオルソ画像化 処理結果 1



カメラパラメータ最適化後
シミュレーション結果



地理座標を割り当てた斜め写真
(オルソ化画像)

u	v	x	y	z	B	G	R
2883	1748	14695.069	-16460.2	1829.374	101	75	58
2884	1748	14694.628	-16459	1829.281	99	73	56
2885	1748	14693.922	-16458	1829.2615	97	71	54
2886	1748	14693.290	-16456.9	1829.2224	101	75	58
2887	1748	14692.282	-16456.1	1829.2932	104	78	61

斜め写真の各ピクセルに割り当てた地理座標



斜め写真を航空写真オルソ画像に重畳した結果

図 23 斜め写真のオルソ画像化 処理結果 2

d) 位置ずれの改善案

上の c) の処理中には AKAZE による特徴点抽出と FLANN による特徴点マッチングを行った。マッチング結果は概ね正しかったが、オルソ画像化結果では航空写真オルソ画像と重畳した際に座標のズレが確認された。マッチングした GCP 点が少なく全体的にマッチングできていなかったのが原因である可能性がある。近年では、画像間のマッチングを深層学習で行う手法が発表されており、高精度なマッチングが可能となっている。

深層学習によるマッチングには DetectorBased と DetectorFree の 2 種類がある。DetectorBased は前述のマッチングと同様に、特徴点を抽出した後にマッチングを行う。代表的な深層学習手法には、特徴点抽出では SuperPoint, D2-Net, SFD2 があり、特徴点マッチングでは SuperGlue, LightGlue がある。DetectorFree は特徴点を抽出せずにマッチングを行うことが可能な手法であり、代表的な手法として LoFTR、MESA などがある。したがって、AKAZE と FLANN によるマッチングをこれらの深層学習手法に置き換えることで高精度なマッチングができ、位置精度のさらなる改善が期待できる。

(c) 引用文献

山小屋カメラを高山植生モニタリングに活用 深層学習を用いた植生図の自動作成手法
を開発 | 2023 年度 | 国立環境研究所

GitHub - Okam/alproj: Georectification toolset for Alpine Landscape
Photographs, written in Python.

(d) 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。

(e) 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 7 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の抽出を行い、予測降灰量との照合を目的とし、数値地形モデルの迅速な作成に向けて効率化等を図る。
- 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合わせ可能な「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等を図る。
- JVDN システム、B4、C との連携：ドローンで得られたデータ（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等を行う。
- アプリケーション開発および解析結果の提供を通して、同一課題内での連携等を推進する。

(b) ドローンドックを用いた実証実験

- 伊豆大島等においてドローンドックを用いた実証実験を行う。ドローンドックは、ドローンを格納・管理し、現地での離発着や機体の充電が可能で、自動飛行、遠隔操作、飛行画面の共有等ができる。今回は伊豆大島等の噴火を想定し、遠隔地からドローンを操作して自律飛行・自動撮影を日中・夜間で実施し、画像取得やライブ配信について社会実装の可能性の最終確認をするための実証実験等を行う。

(c) データ解析効率化の検討

- 実証実験で得られたデータに対して、これまで開発したアプリケーションや自動抽出などの手法を適用し、有効性や課題を整理し、社会実装の可能性の最終確認等を行う。

(d) 熱赤外画像を用いた建物被害の状況把握

- 有珠山 2000 年噴火で被害を受けた建物を対象に、ドローンを用いて熱赤外画像を撮影し、噴火時の建物被害状況の把握手法等を研究する。

(e) 火山災害のリアルタイム把握手法のとりまとめ

- 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に関するとりまとめを行う。火山噴火時にはドローンのみならず、航空機や人工衛星による状況把握も行われるため、それらとの違いや使い分けなども含めた社会実装の可能性等について、本サブテーマの研究成果をとりまとめる。

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	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	特定助教	味喜 大介
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	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	名誉教授	井口 正人
国立大学法人京都大学	共同実施機関	名誉教授	丸山 敬
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	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	主幹研究員	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
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	研究員	A. P. Poulidis
国立研究開発法人防災科学技術研究所	協力機関	契約研究員	瀧下 恒星

(c) 業務の目的

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

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

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

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

3) 平成 30 年度：

南九州 5 火山におけるレーダ観測を継続した。ディストロメータを火口から直線状に配置することにより、降灰量と粒径分布の距離依存性を明らかにした。X バンド MP レーダ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關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検討して風の場の再現の高精度化を図った。また、FALL3D による桜島近傍の火山灰拡散シミュレーションを行い、地上降灰量と比較して、精度検証・高精度化を図った。ホノルルで開催される国際会議(Asia Oceania Geosciences Society)において、研究成果を発表するとともに研究に関する情報収集を行った。さらに、風洞実験装置を利用してレキの空力特性を把握した上で、瓦や壁材を対象にレキへの耐衝撃性能試験を行い、サブテーマ D3 に引き渡す基礎データを作成した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

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

5) 令和 2 年度：

令和 2～4 年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発する。令和 2 年度はそのためのデータベースを整備した。これらのデータベースは、火山灰噴出率、レーダ噴煙高度、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：

引き続き、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た。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、高精度化を図った。

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 6 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」と連携して、研究集会を開催する。また、火山灰ハザード評価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するにあたって、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Xバンドレーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業（保守点検作業）も併せて行う。桜島一円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、噴火頻発時や規模の大きい噴火が発生したときに火山灰採集を行う。その上で、Xバンドレーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係について、多くの噴火事例と火山灰凝集効果を考慮することにより、降灰量推定精度の向上に取り組む。また、船舶レーダー網にて噴煙柱を観測し、Xバンドレーダーの観測データとの比較することにより、噴火ソースパラメータを推定する。Xバンドレーダーの観測データから求めた過去の顕著な噴火事例の降灰情報およびレーダー反射強度の動画化とデータベース化を進めて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。解析から得られるLC搬送波位相残差およびSN比の低下を噴火様式や噴煙含有水蒸気量と関連付けて検討する。

桜島の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）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。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

これまでに改修してきた地震傾斜観測点およびその他の観測点の地震動と傾斜変動を再検討し、火山ガスの放出を考慮することによって火山灰放出率推定式を高精度化した。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、火山灰放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行う。そして、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結果といった、これまでの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整理を進める。

気象モデルや流体計算モデルを利用して高分解能の火山灰拡散シミュレーションを行う。その際に、実測データの取り込みにより、火山灰拡散と降灰のシミュレーションによる予測精度向上を図る。

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の改良を進めた。また、住宅の代表的な外装材に対しレキの衝撃試験による、建物に衝突した際の破壊性状の実験データから、噴石の落下・衝突による被害リスクの評価を進める。

ディストロメータにて火山灰粒子の落下速度を計測し、落下速度から見かけの粒子比重を求め、火山灰粒子の凝集の程度を評価する。

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステム開発

整備済みの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った。Xバンドレーダー観測による噴煙高度やディスト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との照合を進める。

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った。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た。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続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化を図る。

(2) 令和6年度の成果

(a) 業務の要約

令和6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および解析によって培われた火山灰放出量の即時把握技術、予測の高速化及び高精度化技術をさらに発展させたうえで、噴出率の時間変化を取り扱うことにより、長時間継続する噴火活動に対処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5年度までの観測を継続して、火山灰に関連する新たなデータを取得することにより、これらの技術をさらに高度化させた。

また、火山灰拡散予測のための連続化シミュレータの運用を継続するとともに、同様の環境をそなえた新たなサーバーによる連続化シミュレータを用意して、シミュレーションの高速化を図った。さらに、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する作業を進めて、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た。

(b) 業務の成果

令和 6 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

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、研究集会を開催した。また、火山灰ハザード評価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するにあたって、自治体の防災担当者の意見を聴取した。

a) 研究集会の開催と参加

令和 6 年 12 月 3 日と同 4 日に開催された次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの合同研究集会において、火山灰移流拡散シミュレーションの連続化システムと噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発、JVDN を活用した火山灰観測研究について発表した。令和 6 年 12 月 16 日と同 17 日に、桜島などを対象とした大規模火山噴火に関する研究集会を開催し、ディストロメータ降灰観測による連続火山灰放出モニタリング、船舶レーダーによる大規模火山噴火観測ポテンシャル評価、火山噴火時の密度流れ場のモデリング、噴火前の降灰予測システムの開発、噴火発生時刻予測の高精度化に関する研究発表を行った。

b) 火山灰ハザード評価シミュレータの自治体防災担当者からの意見聴取

火山灰ハザード評価シミュレータにおいては火山灰移流拡散シミュレーションが行われている。シミュレータには火山灰拡散連続予測シミュレータと噴火発生予測型火山灰拡散連続予測シミュレータがあり、前者は噴火発生後の即時的リアルタイム降灰予測で、後者は噴火発生前の山体膨張を検知しての噴火の発生時刻と規模を確率的に予測して降灰予測を行う噴火発生前降灰予測をしている。

これらのシミュレータについて、鹿児島市役所危機管理局危機管理課にて防災担当者の意見を聴取した。桜島においては山体膨張が一定値を超えると鹿児島地方気象台から鹿児島市に対して、降灰量の多い噴火の発生の可能性を付した山体膨張の情報が提供される。また、内閣府による首都圏における広域降灰対策ガイドラインに降灰リスクを表す降灰量は厚さで示されている。シミュレータの表示部には現状では単位面積（1 m²）あたりの質量(g)で火山灰量が表示されているが、防災担当者に理解してもらうには、厚さ（例えば、mm 単位）で表示することが望ましいという意見があった。また、気象庁は噴火の際に噴煙高度の情報も一般に伝えていること、そしてシミュレータは内部で噴煙高度を計算していることから、シミュレータの表示部に噴煙高度の値を表示することで、シミュレータに対する理解が進むという意見があった。図 1 は鹿児島市役所において意見聴取の風景を示す。

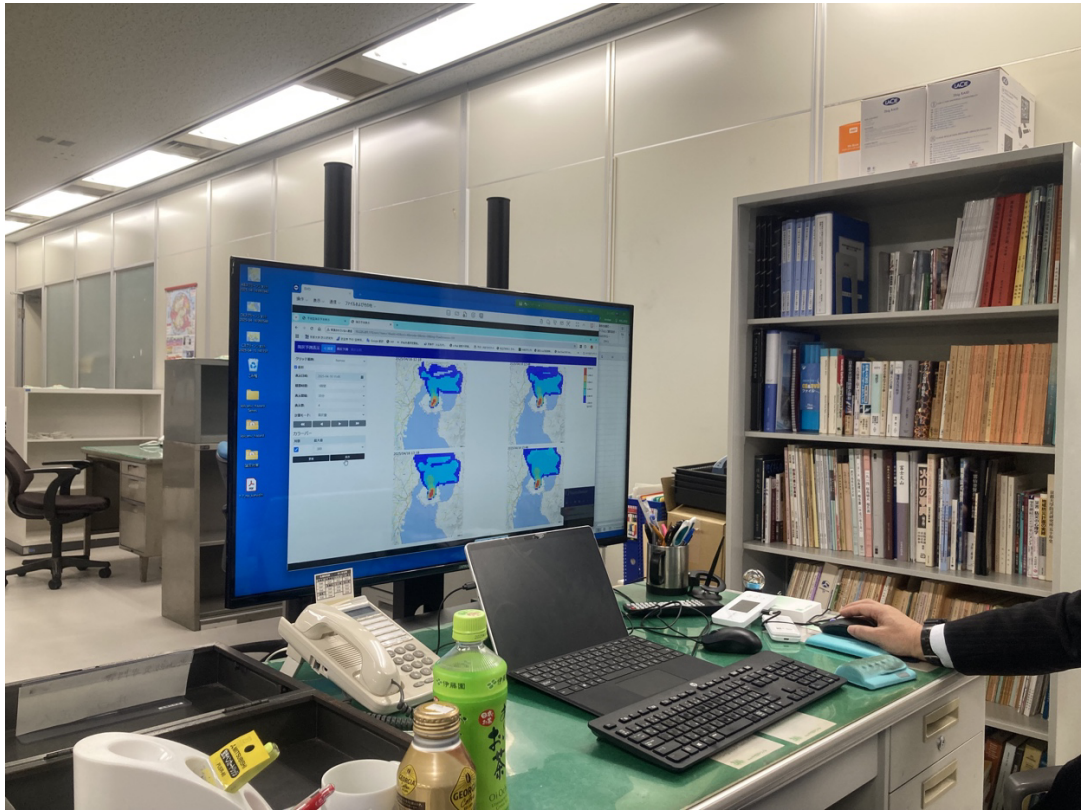


図1 自治体の防災担当者との意見聴取時の火山灰ハザード評価シミュレータ表示

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トロメータを用いた地上観測からなる火山灰観測を継続した。図2にマルチパラメータ観測の概要を示す。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。観測機器のメンテナンスを繰り返すことにより、概ね正常な観測が続けられている。

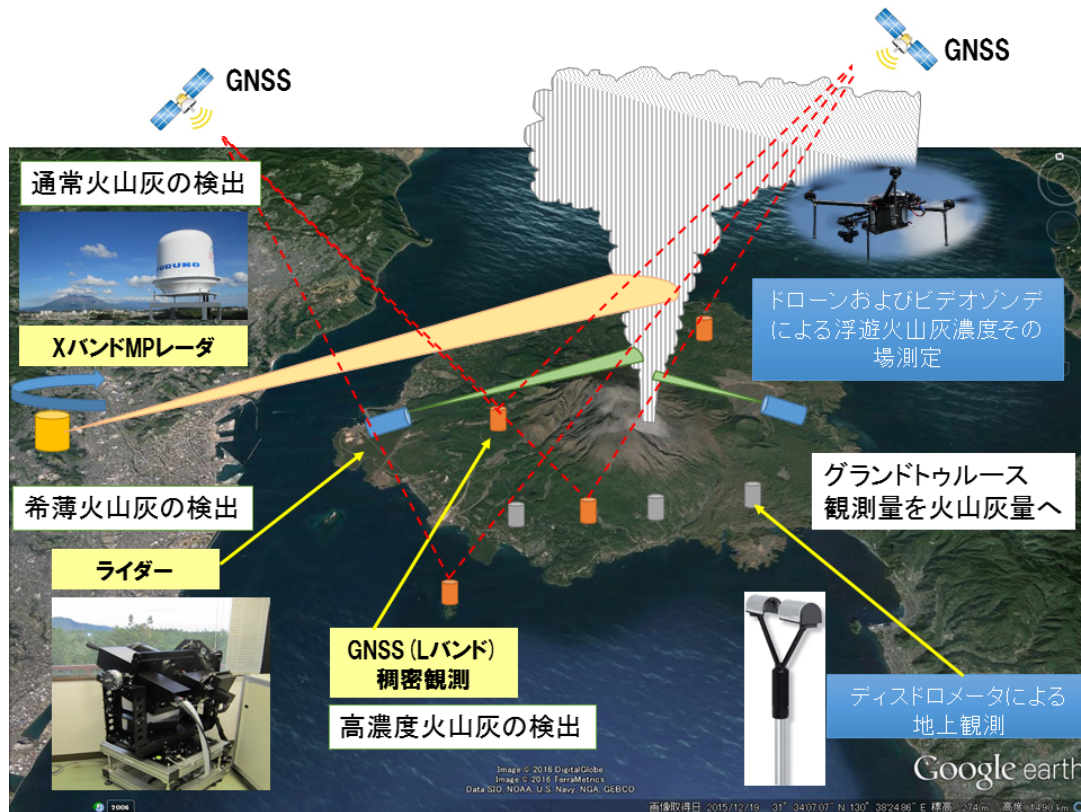


図2 火山灰のマルチパラメータ観測の概要

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。

i) 観測の概要

レーダ観測において安定的にデータを取得できている。レーダの設置場所および操作の仰角と方位角は、変更していないので、令和4年度報告書を参考にされた。レーダ観測では、6ヶ月から10ヶ月の間隔で現地に赴き、データが蓄積されているハードディスクを交換している。そのため、データ解析の対象期間な必ずしも年度に対応してはいない。

ii) 桜島噴火

桜島火山観測所に設置したレーダにおいて、ハードディスク交換にてデータを保存済みである直近の 2023 年 11 月 27 日から 2024 年 10 月 28 日の期間において、鹿児島地方気象台の観測により噴煙高度が 3,000 m 以上の噴火を解析の対象とした。

2024 年 2 月 14 日 18:33 (世界時刻 9:33) 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 5,000 m、噴煙の流向は北東である。図 3 に噴火開始直後から 3 分後までのレーダ反射強度分布を示す。以後、反射強度分布から 20 dBz の等反射強度の最高高度をその時間における噴煙高度とする。噴火直後は、高度 2,500 m から 3,000 m つまり、火口縁上に 1,400 m から 1,900 m に上昇したことが確認された。その後、噴火開始から 3 分後には、高度 5,000 m、つまり火口縁上 3,900 m に到達し、5 分後には高度 5,500 m、つまり火口縁上 4,400 m に到達したが、噴煙は柱状から風によって崩れている。鹿児島地方気象台による目視による最大噴煙高度には達していないことから、レーダのセクタ RHI スキャンの範囲から離れた時間以降に噴煙が上昇していたか、もしくはレーダによって検出出来ないような火山灰が希薄な噴煙が上昇していたと思われる。

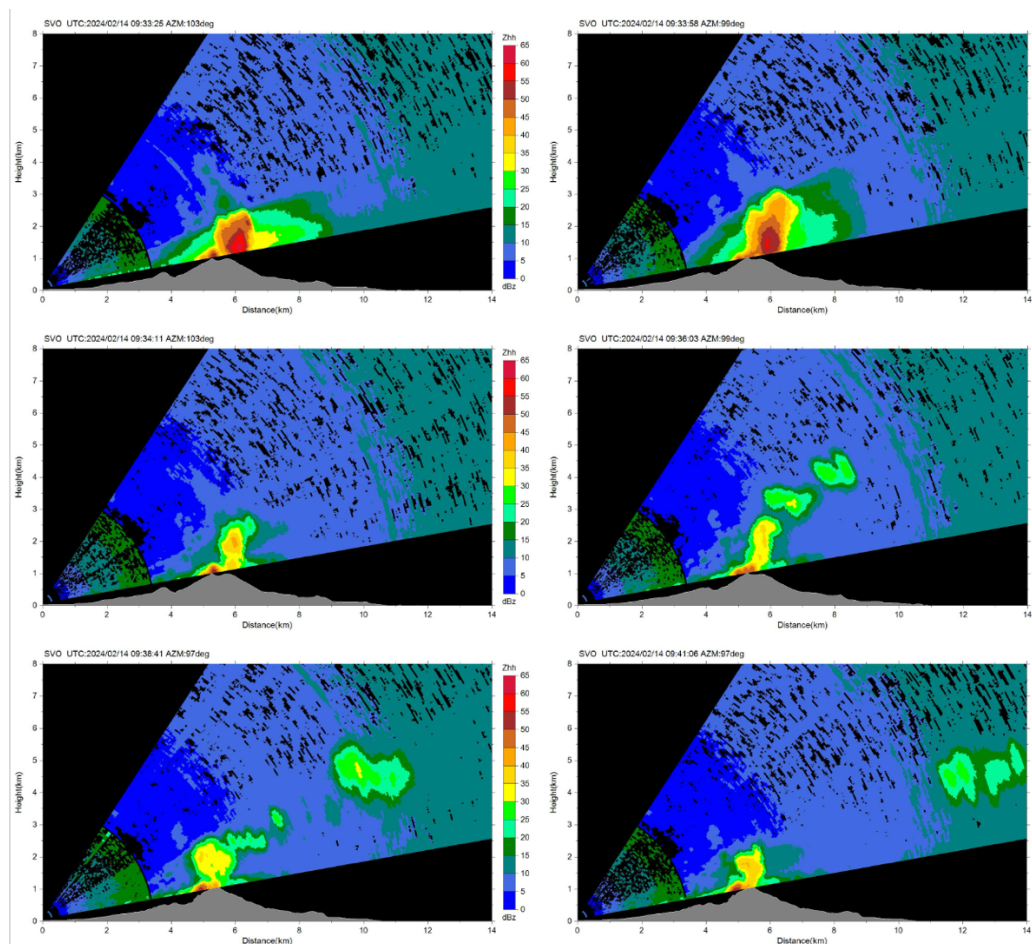


図 3 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 2 月 14 日 18:33~18:41 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

次に、2024 年 5 月 22 日 17:18（世界時刻 8:18）に開始した噴火について述べる。南岳 A 火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に 3,000 m、噴煙の流向は北西である。図 4 に噴火開始直後から 4 分後までのレーダー反射強度分布を示す。まず、スキャンしている領域全体にわたって反射強度が高いこと、そして、高度 5,000 m 付近に水平に反射強度が 30 dBz から 45 dBz とさらに高い領域が存在する。この水平の反射強度の高い層は融解層（ブライトバンド）と呼ばれるもので、この層にみぞれがあるため、雪や雨の粒よりも電波を良く反射するとされている。反射強度分布から 20 dBz の等反射強度の最高高度をその時間における噴煙高度とすると、このような層を含めてしまう。そこで、この場合のみ 30 dBz の等反射強度の最高高度をその時間における噴煙高度とする。基準を厳しくしたため、目視による噴煙高度よりも、低い噴煙高度として求められることに注意が必要である。噴火開始直後は火口縁から 300 m の高さまでに噴煙が認識される。その後、噴火開始から 2 分後では、高度 2,500 m、つまり火口縁上 1,400 m の高さまで噴煙の上昇が確認できた。噴火開始から 3 分後には噴煙が崩れ始めて、水平距離(Distance)が 0 km にある観測所に向けて流れている様子が見て取れる。噴煙開始から 4 分後には完全に噴煙は崩れて斜面にそって流下しているように見える。

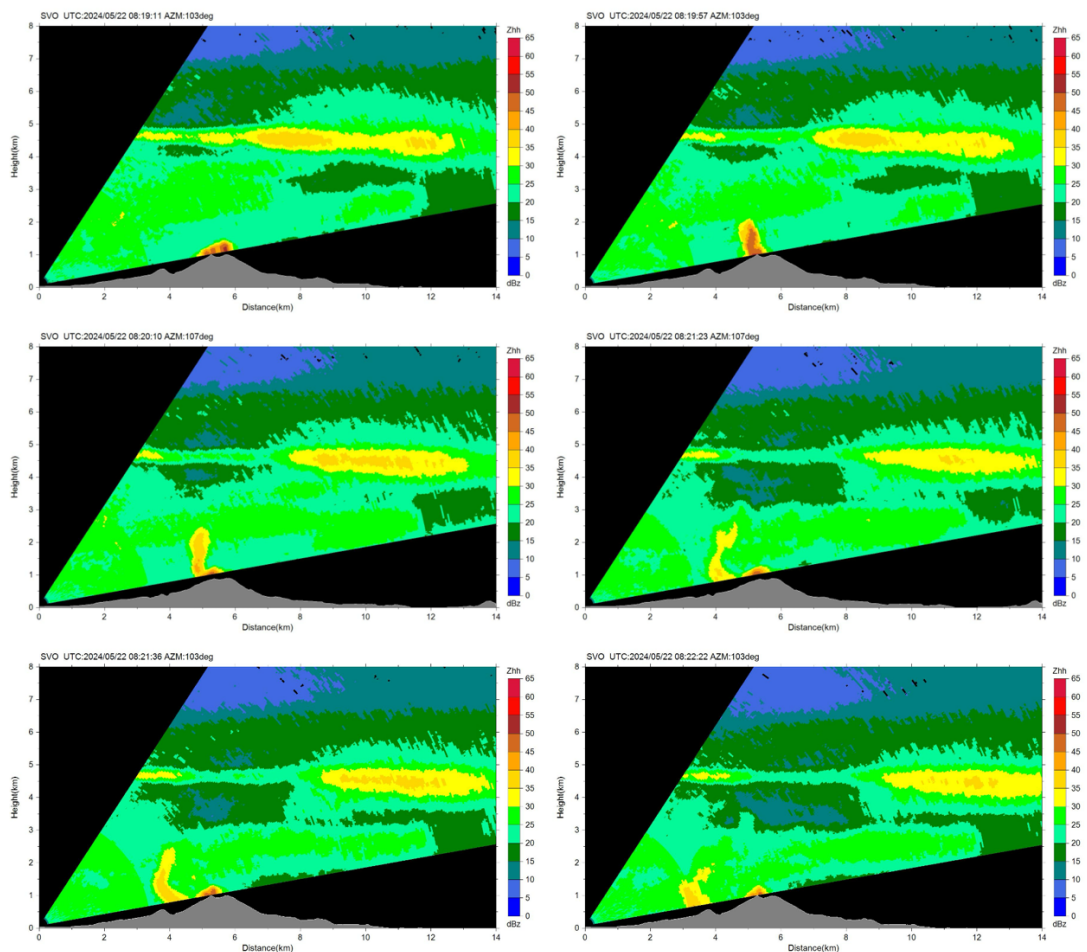


図 4 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 5 月 22 日 17:19～17:22 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

次に、2024 年 7 月 14 日 18:19（世界時刻 9:19）に開始した噴火について述べる。南岳 A 火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に 4,500 m、噴煙の流向は北東である。図 5 に噴火開始直後から 5 分後までのレーダ反射強度分布を示す。噴火直後は、高度 2,100 m、火口縁上に 1,000 m に上昇したことが確認された。その後、噴火開始から 4 分後には、高度 2,500 m、つまり火口縁上 1,400 m に到達したが、これ以上は上昇せず、噴火開始から 5 分後には、噴煙高度は 1,500 m つまり、火口縁上 400 m と低下している。鹿児島地方気象台による目視による最大噴煙高度には達していないことから、レーダのセクタ RHI スキャンの範囲から離れた時間以降に噴煙が上昇していたか、もしくはレーダによって検出出来ないような火山灰が希薄な噴煙が上昇していたと思われる。

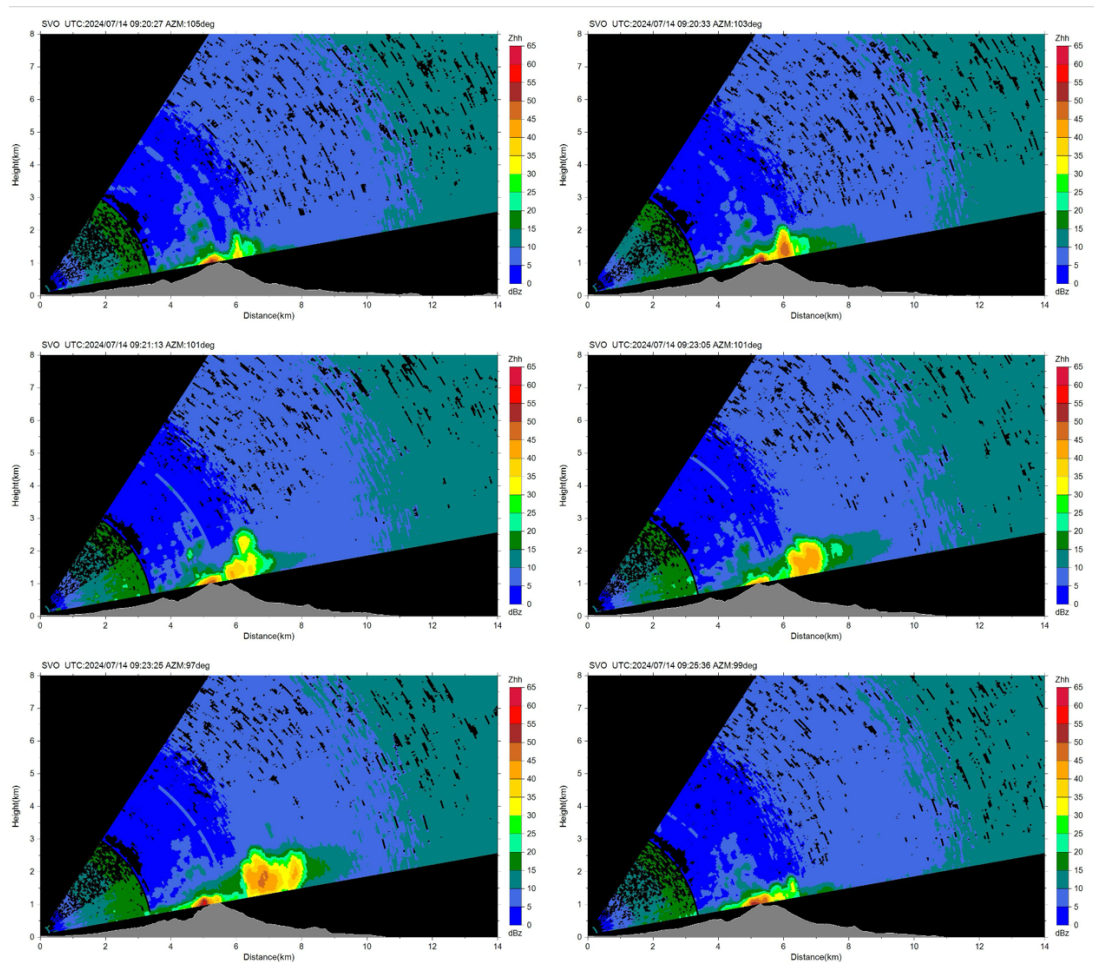


図 5 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 7 月 14 日 18:20～18:25 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

次に、2024 年 7 月 20 日 13:58（世界時刻 4:58）に開始した噴火について述べる。南岳 A 火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に 3,700 m、噴煙の流向は北東である。図 6 に噴火開始直後から 16 分後までのレーダ反射強度分布を示す。噴火

直後では噴煙の上昇は見えていない。噴火 1 分後に、高度 2,200 m、火口縁上に 1,100 m に上昇したことが確認された。その後、噴火開始から 4 分後には、高度 3,500 m、つまり火口縁上 2,400 m に到達したが、これ以上は上昇せず、噴火開始から 5 分後には、噴煙高度は 2,900 m つまり、火口縁上 1,800 m と低下している。そして、噴火から 10 分後から 15 分後には、噴煙高度は 2,000 m つまり、火口縁上 900 m に低下しつつも、噴火が継続していたことがわかる。鹿児島地方気象台による目視による最大噴煙高度には達していないことから、この噴火においても、レーダのセクタ RHI スキャンの範囲から離れた時間以降に噴煙が上昇していたか、もしくはレーダによって検出出来ないような火山灰が希薄な噴煙が上昇していたと思われる。

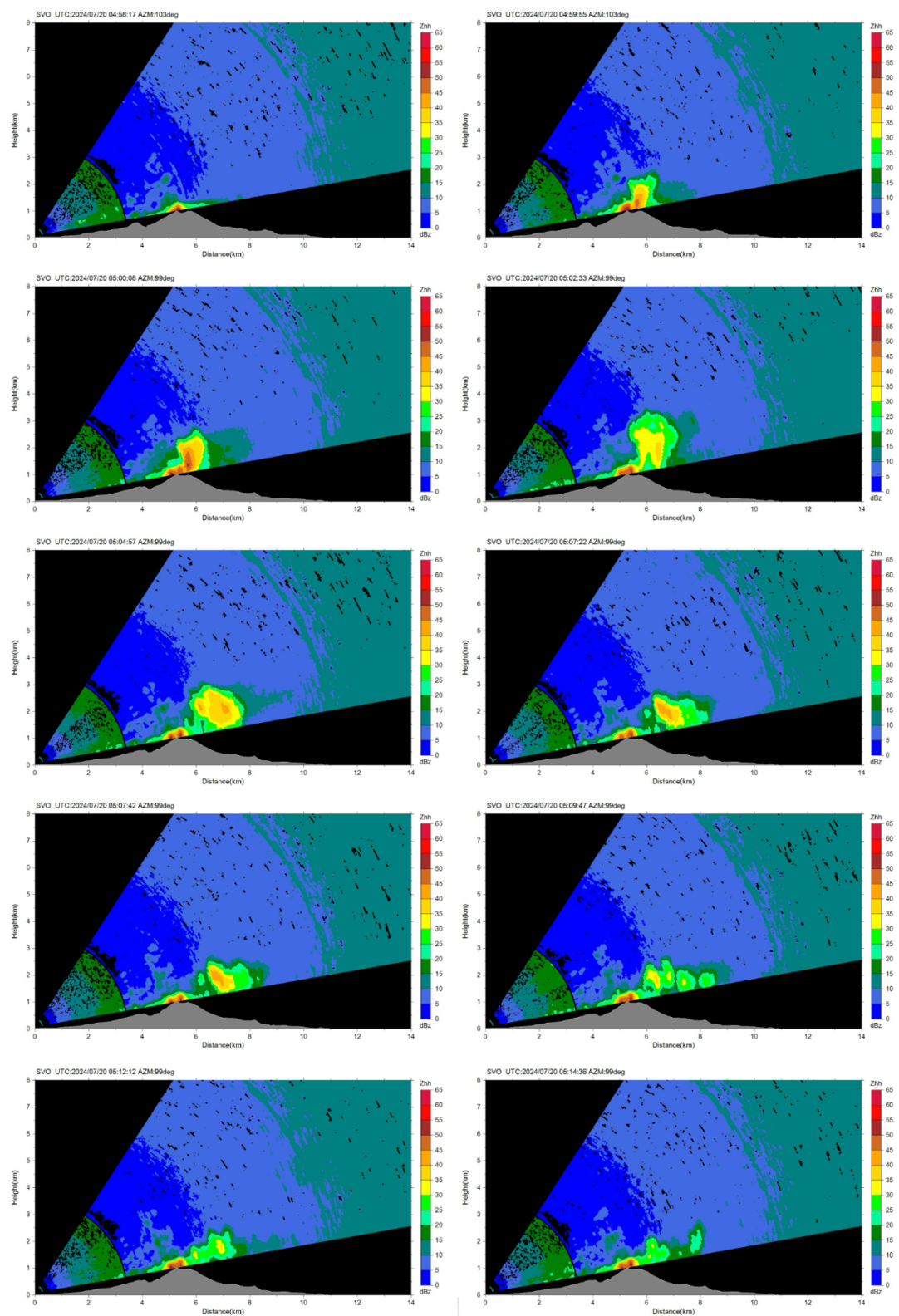


図6 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 7 月 20 日 13:58~14:14 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

次に、2024 年 7 月 29 日 16:46（世界時刻 7:46）に開始した噴火について述べる。南岳 A 火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に 4,400 m、噴煙の流向は南東である。図 7 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。噴火直後は、高度 1,800 m から 2,000 m つまり、火口縁上に 700 m から 900 m に上昇したことが確認された。その後、噴火開始から 2 分後には、高度 3,400 m、つまり火口縁上 2,300 m に到達し、3 分後には高度 3,800 m、つまり火口縁上 2,700 m に到達していることが確認された。噴火開始から 4 分・5 分後には、高度 4,000 m、つまり火口縁上 2,900 m に到達し、その後、噴煙高度が低下し、噴火開始から 8 分後には高度 2,000 m、つまり火口縁上 900 m にまで低下したことが確認された。この噴火において目視による最大噴煙高度よりもレーダによる噴煙高度は 1,000 m 程度低い。これは、レーダのセクタ RHI スキャンの範囲から離れた時間以降に噴煙が上昇していたか、もしくはレーダによって検出出来ないような火山灰が希薄な噴煙が上昇していかと考えられる。この噴火の場合は噴煙の流向は南東であるため、レーダのセクタ RHI スキャンの方向とほぼ一致していることから、後者の可能性を検討する必要がある。実際に、反射強度分布から 10 dBz の等反射強度の最高高度をその時間における噴煙高度とすれば、噴火開始から 5 分・6 分後に噴煙高度は高度 4,500 m、つまり火口縁上 3,400 m となるため、目視による高度と差が小さくなる。

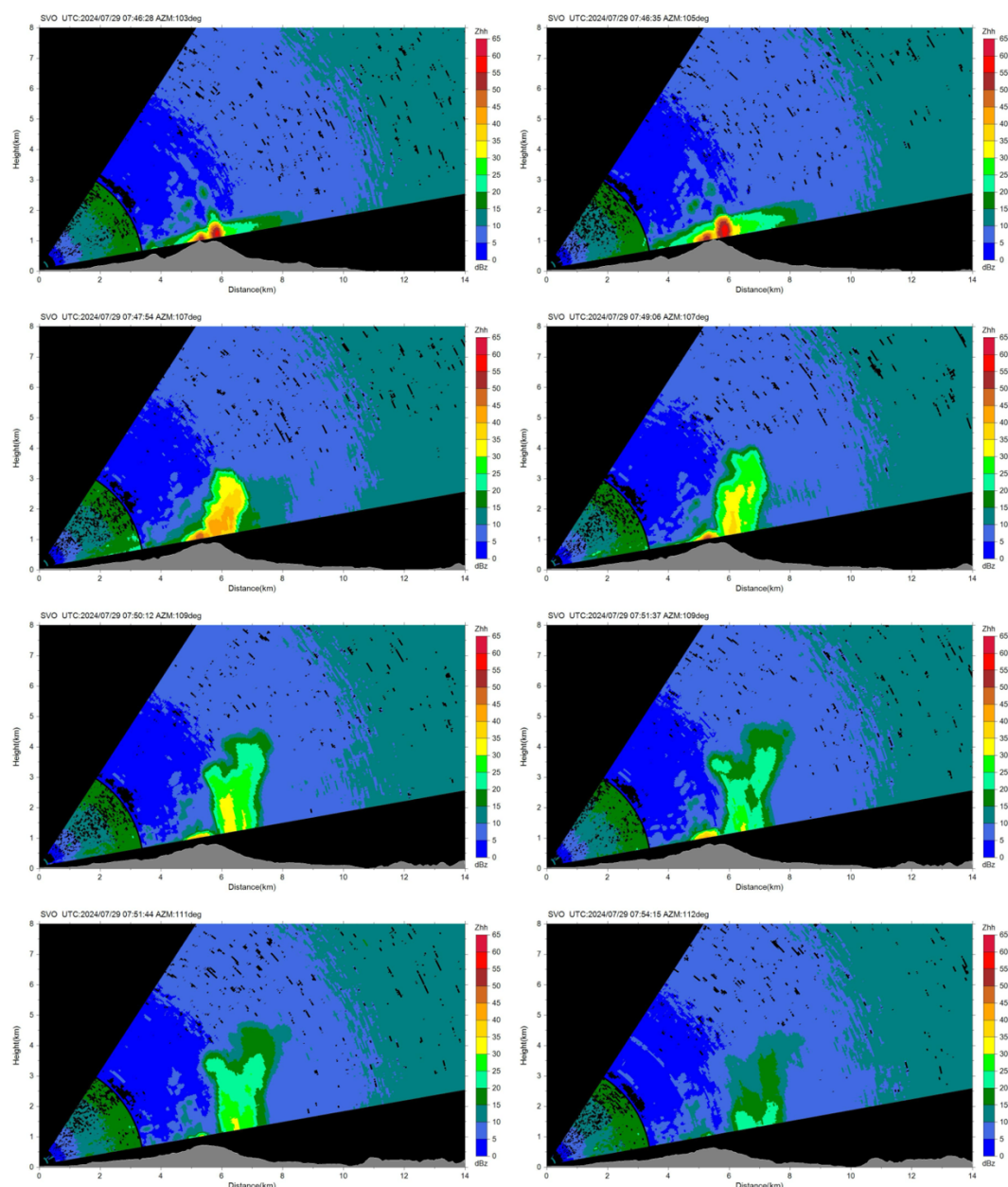


図 7 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 7 月 29 日 16:46～16:54 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

次に、2024 年 8 月 6 日 0:37（世界時刻 8 月 5 日 15:37）に開始した噴火について述べる。南岳 A 火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に 3,000 m、噴煙の流向は南西である。図 7 に噴火開始直後から 9 分後までのレーダー反射強度分布を示す。噴火直後に噴煙は、高度 2,000 m つまり、火口縁上 900 m に達し、噴火 4 分後に高度 3,600 m、つまり火口縁上に 2,500 m に上昇したことが確認された。その後、噴火開始から 7 分後までは、高度 3,600 m、火口縁上 2,500 m を維持し、これ以上は上昇していない。噴火開始から 9 分から 10 分後には、噴煙高度は 2,500 m つまり、火口縁上 1,400 m と低下したが、噴火が継続していたことがわかる。この噴火の場合はレーダによる最大噴煙高度 2,500 m と、気象台の目視による高度

3,000 m の差はあるものの、先ほどまで示してきた噴火のレーダによる高度と目視との高度の差に比べて小さい。

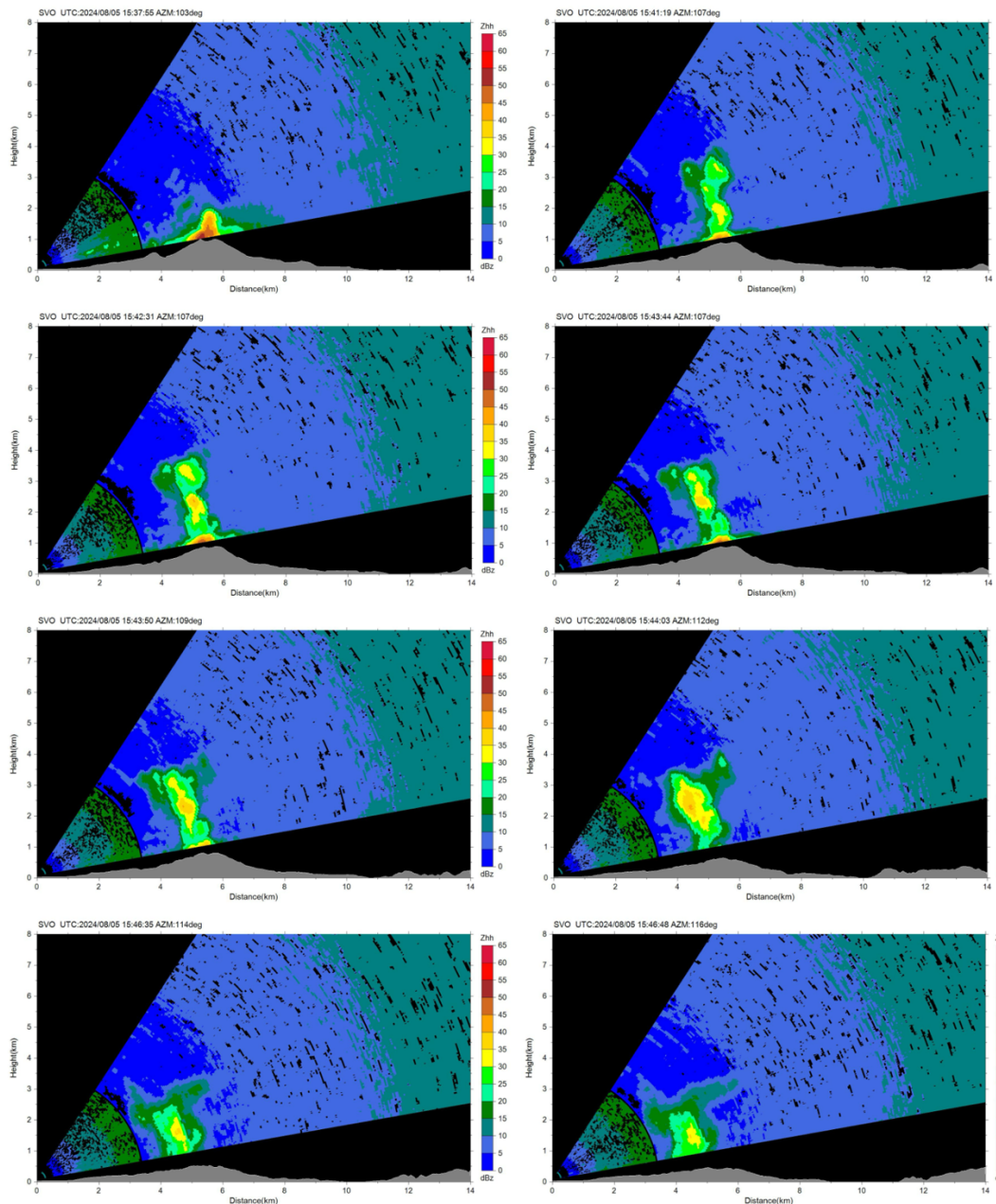


図7 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 8 月 6 日 0:37～8:46 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

最後に、2024 年 10 月 18 日 1:21（世界時刻 10 月 17 日 16:21）に開始した噴火について述べる。南岳 A 火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に 4,000 m、噴煙の流向は直上である。図 8 に噴火開始直後から 13 分後までのレーダー反射強度分布を示す。噴火直後に噴煙は、高度 1,600 m つまり、火口縁上 500 m に達し、噴火 3 分後に高度 3,400 m、つまり火口縁上に 2,300 m に上昇したことが確認された。その後、噴火開始から 8 分後には、高度 4,800 m、つまり火口縁上 3,700 m に達し

た。そして、噴火から 11 分後には、高度 4,300 m、つまり火口縁上 3,200 m と若干低下し、その後、スキヤンの範囲から出ているのが分かる。この噴火の場合もレーダによる最大噴煙高度 3,700 m と、気象台の目視による高度 4,000 m の差はあるものの、噴火のレーダによる高度と目視との高度の差は大きくない。

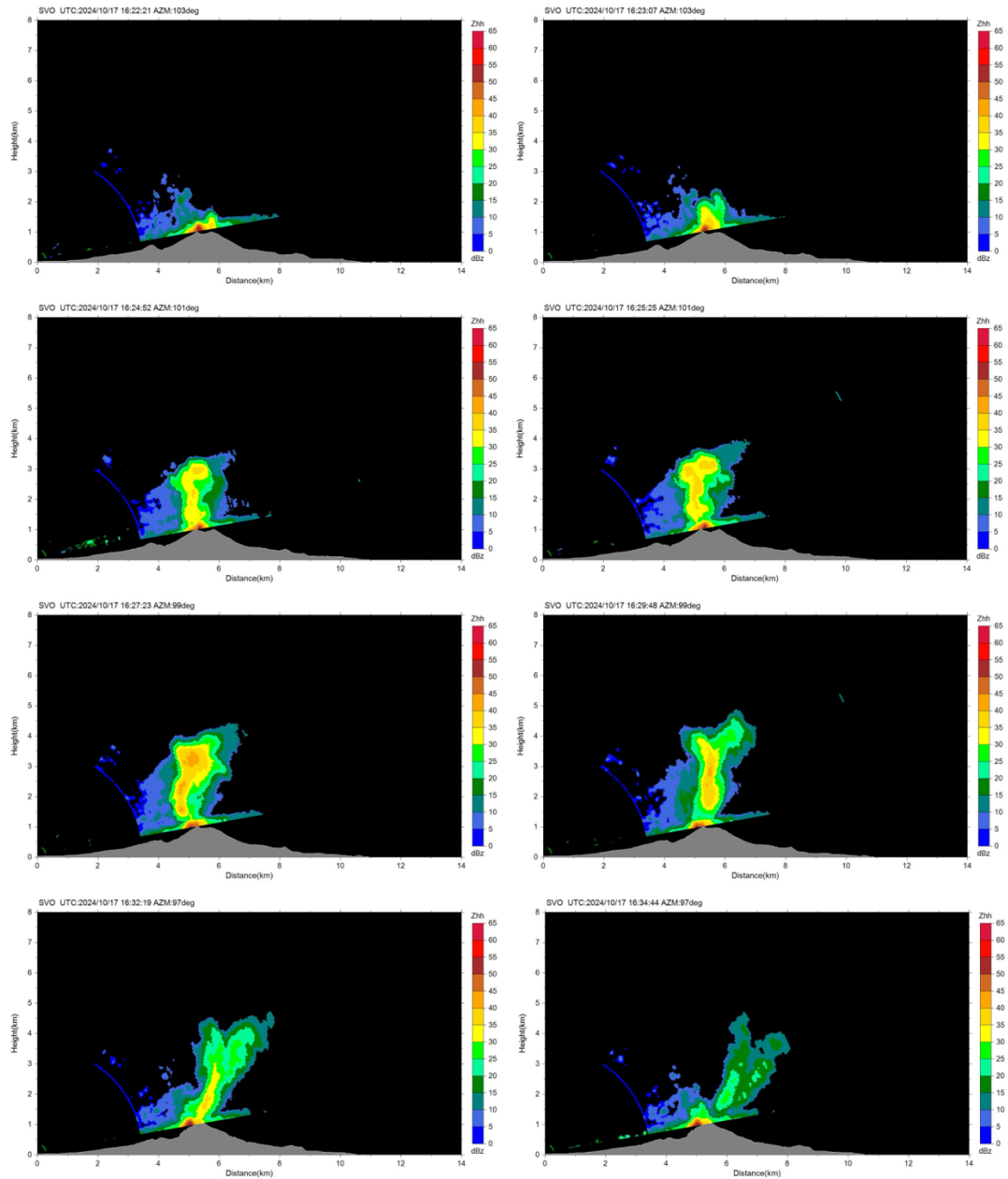


図 8 桜島火山観測所レーダによる RHI スキヤンによる反射強度分布。2024 年 10 月 18 日 1:22~1:34 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

iii) 諏訪之瀬島噴火

諏訪之瀬島キャンプ場に設置したレーダにおいて、ハードディスク交換にてデータを保存済みである直近の2024年4月23日から2024年10月8日の期間のうち、2024年10月4日の噴火を解析した。この日の噴火は、噴火が連続的に継続していたが、天候不良のため噴煙の状況が不明とされる時間帯があった。図9に2024年10月4日9:31（世界時刻0:31）から16:34（世界時刻7:34）までのレーダ反射強度分布を示す。この期間における噴煙高度は変化していたが、福岡管区気象台の目視によると火口縁上900 mから2,000 mであった。反射強度分布から10 dBz（晴天時）もしくは20 dBz（悪天候時）の等反射強度の最高高度をその時間における噴煙高度とすると、レーダから求めた噴煙高度は、高度1,500 mから2,200 m、つまり火口縁上700 mから1,400 mとなり、目視による噴煙高度より若干低い。桜島の噴火と同様に、レーダのセクタ RHI スキャンの範囲から離れた時間以降に噴煙が上昇していたか、もしくはレーダによって検出出来ないような火山灰が希薄な噴煙が上昇していたと思われる。

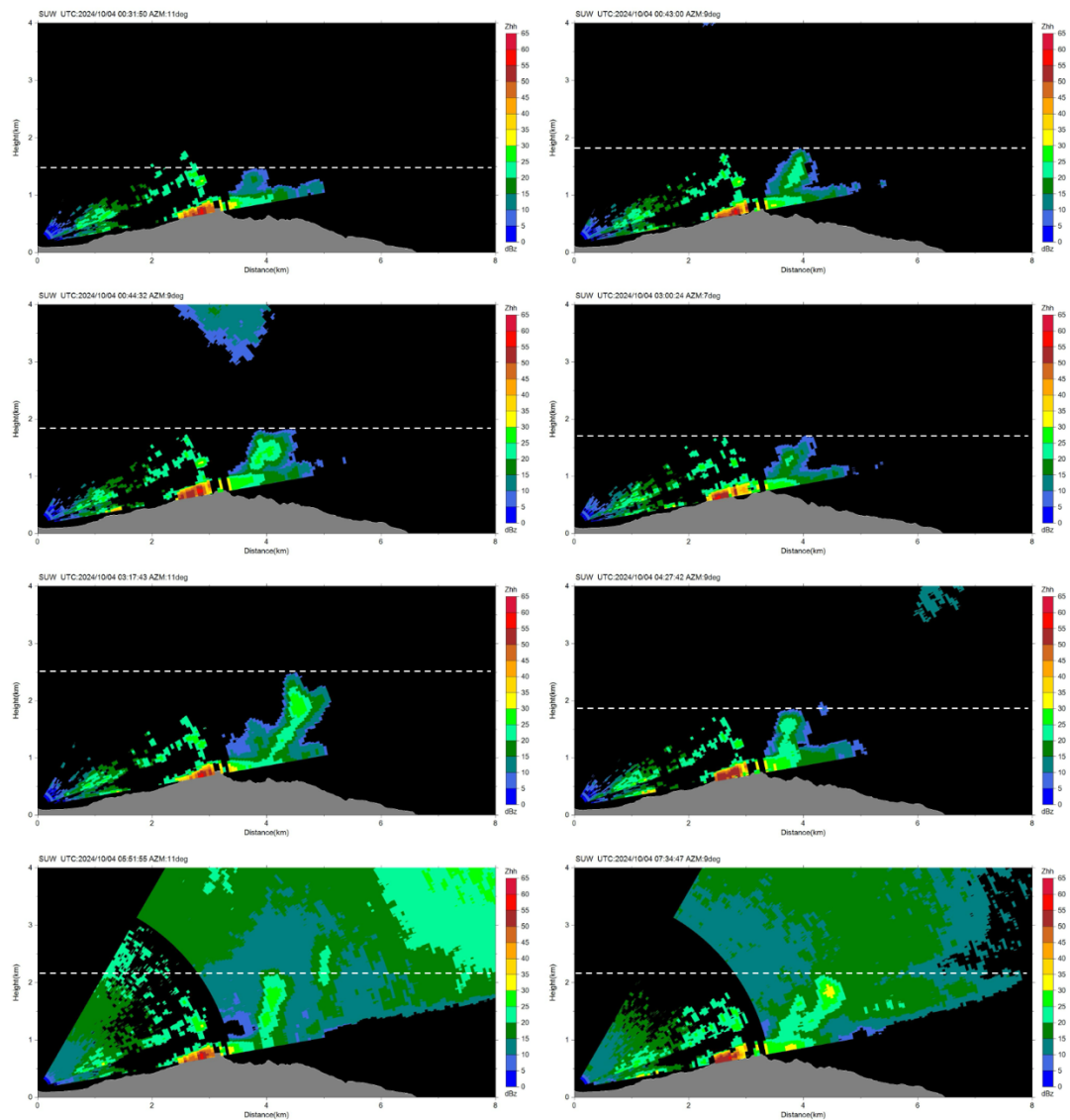


図 9 諏訪之瀬島レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 10 月 4 日 9:31~16:34 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。白破線は反射強度分布から推定した噴煙高度を示す。

b) ライダー観測

桜島に設置した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、消散係数と噴火活動の関係を検討した。さらに、小型粉じん計による火山灰計測を実施した。

i) 令和6年のライダー稼働状況

桜島火山観測所本館と黒神観測室に設置された2波長偏光ライダーは自動連続運転が可能な仕様となっている。それぞれの地点から南岳火口付近に向けレーザーを射出し、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10に、令和6年の日毎の観測時間を表示する。観測所本館では7月まで、黒神観測室では8月から観測を行っているが両地点で同時に観測を実施した期間はない。どちらも停止した原因はレーザーの不調で、繰り返し修理を行いながら運用しているが、観測を2014年11月から10年続けており、装置としての寿命が近づいていると考えられる。

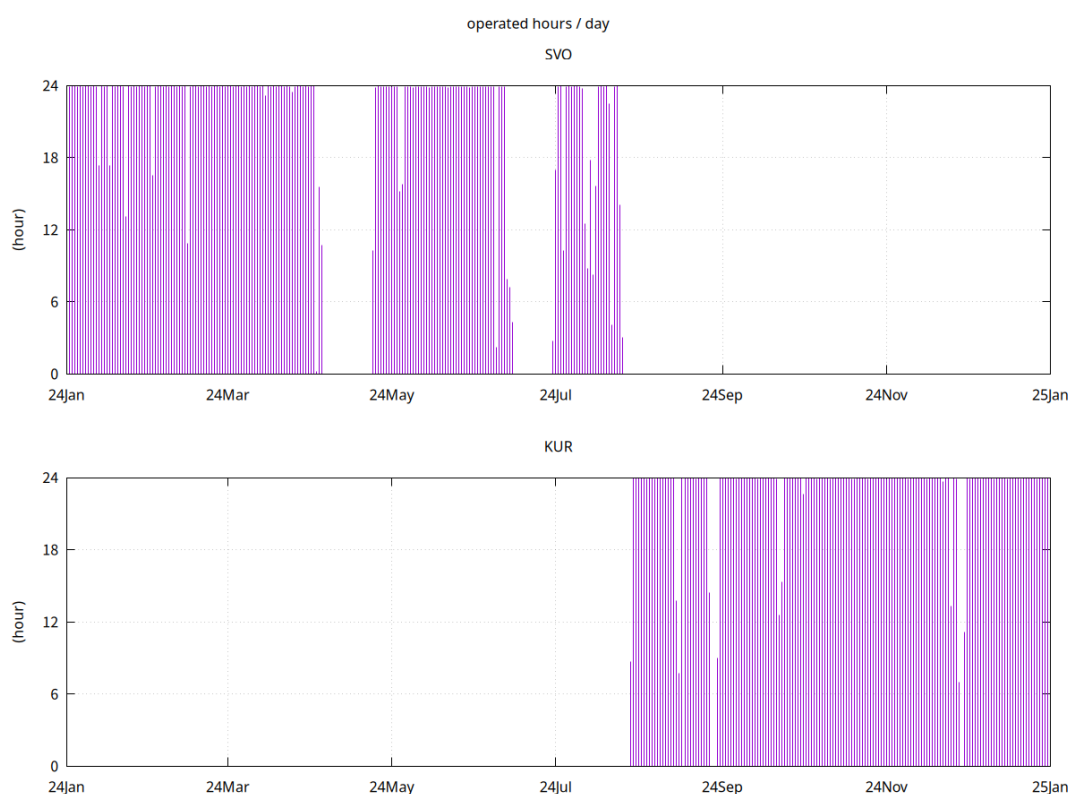


図10 令和6年の観測所本館（上）および黒神観測室（下）における日毎のライダー観測時間。

c) エアロゾル消散係数の季節変化

本館(7月まで)および黒神(8月以降)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(手法は Shimizu et al. (2021)¹⁾に準ずる)。図 11 ではレンジ 5.5km 付近が火口周辺にあたり、その手前(2km)では 5-6 月に消散係数が大きくなっていた。これは地表で東風が吹き火口付近から西側の本館方面への輸送が強い時期にあたる。

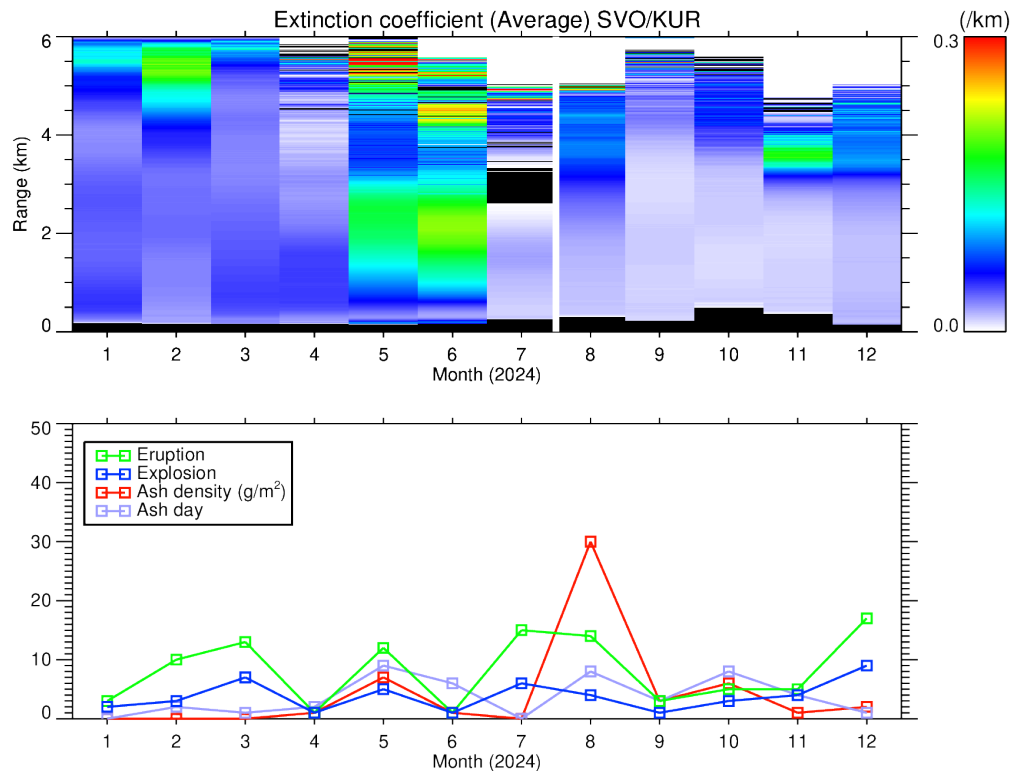


図 11 (上)本館ライダー(7月以前)および黒神ライダー(8月以降)により得られた月平均 532nm エアロゾル消散係数のレンジ方向分布と(下)鹿児島地方気象台による月毎の噴火(緑)/爆発(青)回数、降灰量(赤)、降灰日数(紫)。

i) 2016 年以降の長期変動

本館ライダーによる消散係数に関して 2016 年から 2024 年の長期変動について解析し、ライダーから火口付近までの 4 区間の特徴についてまとめた。平均的な消散係数はライダー寄りが高く、日最大値については火口寄りで高かった。これらから、水平輸送によるライダー視線方向への火山灰の流入が無視できず、また地表からの再飛散についても考慮が必要であることが示唆された。鹿児島地方気象台による月ごとの火山監視結果とライダー消散係数との相関は高くなく、気象台が発表する爆発・噴火のみならずより小規模な噴火によってもたらされる火山灰が大気環境にインパクトを与えていることが示唆された。

ii) 火山灰計測計の設置

2023 年度に簡易 PM 測定器(光学式粒子計=OPC の原理で体積質量密度を出力する)を数種類検討したが、PM10 や PM2.5 の差に不自然な点が見られるなどの問題があ

ったため、2024 年度は個々の粒子を検出するタイプの OPC を導入した。神栄テクノロジー(株)が販売している花粉センサ PS2 は、粒径 $15\mu\text{m}$ 以上の粒子を個別に検出する。同社では、偏光情報を用いて花粉とそれ以外の粒子を判別するとしているがその機序には不明な点もあるため、ここでは同社の処理プログラムを用いず光学センサー出力値を直接モニターして粒子数のカウントを行った。

2025 年 1 月に観測所本館、2 月に黒神観測室に火山灰計測計を設置し、連続観測を開始した。図 12 には、特徴的な変化が見られた 3 月上旬の粒子数時系列を、観測所付近でのライダー観測結果ならびに鹿児島地方気象台における気象観測結果と共に示す。これによれば、地上での粗大粒子濃度はいくつかのファクターに支配されていることが明らかになった。(1)地上風速が高い場合には、粒子数が増える(6 日の日中)。この時ライダーによる散乱強度は低いため、地上に堆積した火山灰が強風により巻き上げられたものが検出されたものと考えられる。(2)ライダーの散乱強度と火山灰検出計がともに高い値を示している場合(9 日～10 日付近)、火山噴火の直接の影響と考えられる。(3)降水の後、火山灰濃度の低下が見られる(4 日)。これらから、地上で観測される火山灰粒子濃度はライダーで見られる上空の濃度とも異なる挙動を示し、人体への影響等を考えるうえでも実際の生活空間内で計測を行うことの重要性が示された。

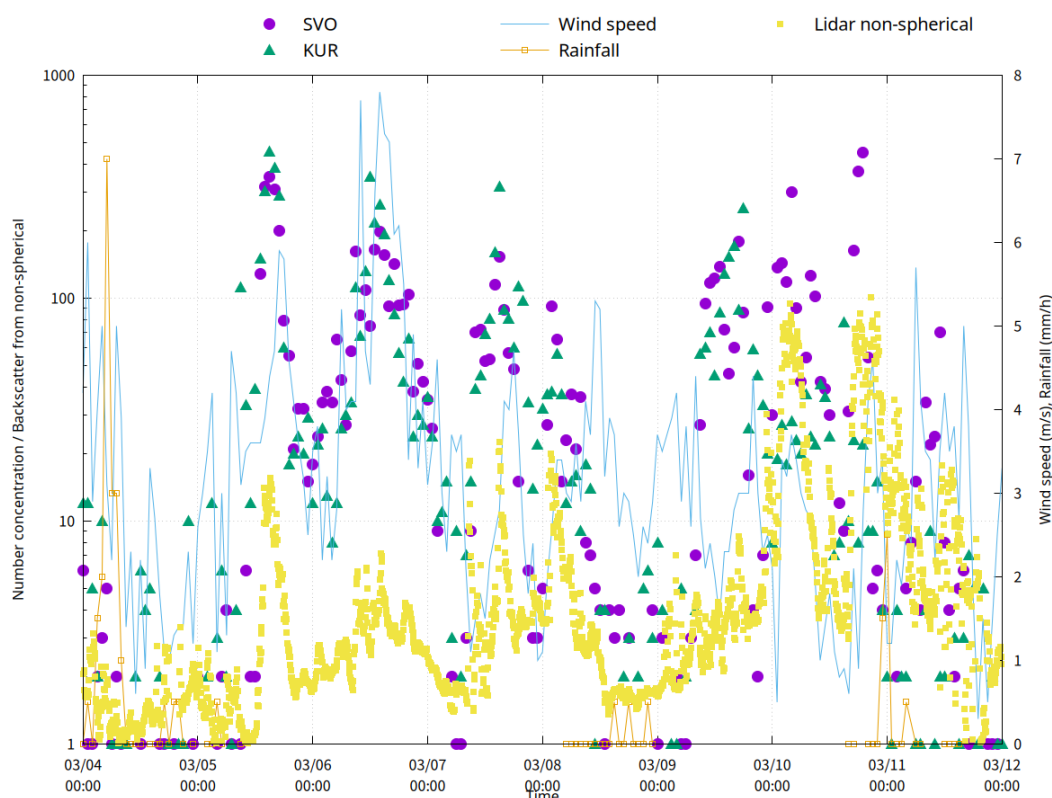


図 12 火山灰計測計による 2 地点での 1ft^3 あたり粒子数(紫●＝本館、緑▲＝黒神)、鹿児島地方気象台における風速(青)、同じく降水量(オレンジ)、ライダーによる非球形粒子散乱強度の時系列(視線方向 600m 付近、黄色)。2025 年 3 月 4 日から 11 日まで。粒子数と散乱強度のみ対数表示。

d) GNSS 観測

GNSS 観測による噴煙モニタリングを高精度化する上で、観測点周辺の障害物等に起因するマルチパスを適切に低減することの重要性は大きい。測位解析におけるマルチパスノイズの低減においては、衛星の再訪周期を利用した Sidereal Filter と呼ばれる方法が一般的に用いられるが、GNSS 搬送波位相の残差を用いた噴煙モニタリングでは、測位段階でマルチパスノイズが搬送波位相に混在するため、同手法を活用することができない。これら背景から、今年度はイベント発生時以前のデータを用いて、マルチパスノイズを抽出し、GNSS 搬送波位相自体を補正する手法を適用し、その測位解析への効果を評価した。

マルチパスノイズを補正する手法として Multipath Hemispherical Map (MHM 法) を用いた。MHM 法は通常の測位解析を行い、その時の位相残差を天球上にマップ (MHM) し、それらを時間方向にスタックすることで、マルチパス起因のノイズを抽出する手法である。本年度は、同手法を多数観測点が存在する火山近傍で活用することを念頭に拡張した手法の開発を実施した。具体的には MHM を複数の短基線で作成し、それらを用いることで、基準局に起因するマルチパスノイズを低減しつつ、目的とする観測点のマルチパスノイズを強調して抽出することを目指した。同手法をマルチ GNSS 環境で作成し、それらを用いて GNSS の生データである搬送波位相データを補正した上で、測位解析を実施し、その効果を評価した。この時、どの程度の基線数・日数が MHM を作成する上で必要かを評価するために、基線数を 1-5 基線、日数を 1-15 日で変化させ、時系列の低減効果を確認した。その結果、基線数を多くするかつ、日数を伸ばすほど時系列の低減効果が大きくなることが明らかになった(図 13)。特に日数については、衛星再訪周期 (Galileo=10 日、GLONASS=8 日) と一致する傾向を示し、適切な日数を確保することでマルチパスノイズを効果的に低減できることが明らかになった。同結果は、適切に噴煙による搬送波位相残差の抽出においてもその精度向上に寄与可能であることを示唆し、今後同手法の活用が期待される。

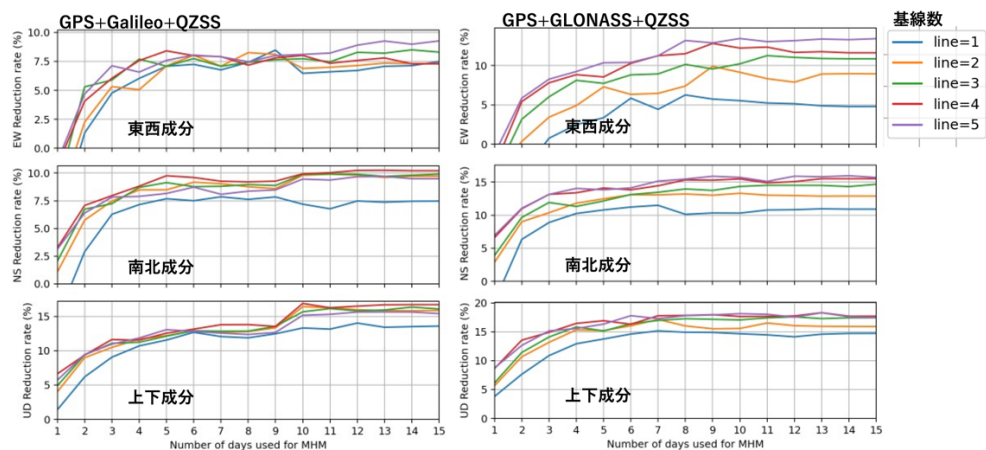


図 13 Multipath Hemispherical Map を作成するために使用した基線数および日数に対する測位時系列の改善率。左パネルが GPS+Galileo+QZSS を用いた場合、右パネルが GPS+GLONASS+QZSS を用いた場合。いずれの場合も 8-10 日以上かつ基線数が多いほど測位時系列の改善率が大きくなる

e) ディスドロメータによる地上観測

令和 5 年度に引き続き、ディストロメータによる地上降灰量観測を行った。2024 年は噴火が少なく 2024 年を通じた火山灰噴出量は約 20 万トン（鹿児島県²⁾の調査結果に基づく推定値）と降灰量も非常に少なかった。それでも、ディストロメータによって降灰が検出された噴火がいくつかあり、野外で降灰分布および降灰量を調査するキャンペーン観測を実施した。

i) ディストロメータによる地上観測の概要

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トロメータ（PARSIVEL²、ドイツ OTT Hydromet 社製）を用いた。本装置は落下粒子によってさえぎられる光を計測することによって、粒径ごとに粒子を観測するパーティクルカウンターであり、粒径および落下速度ごとの粒子数を記録する。粒径の測定範囲は 0.25 mm～26 mm、落下速度の測定範囲は 22.4 m/s 以下である。

ディストロメータの桜島における位置を図 14 に示す。各観測点では、時間雨量相当量、粒子数、センサの温度、電源電圧に加え、粒径毎の 30 クラスと落下速度毎の 32 クラス、合計 960 クラスに分けた粒子数が 1 分毎に記録される。いずれの観測点もオンラインによるデータ取得が可能である。他のプロジェクトにより設置したものを合わせて 21 台のディストロメータが桜島において稼働している。

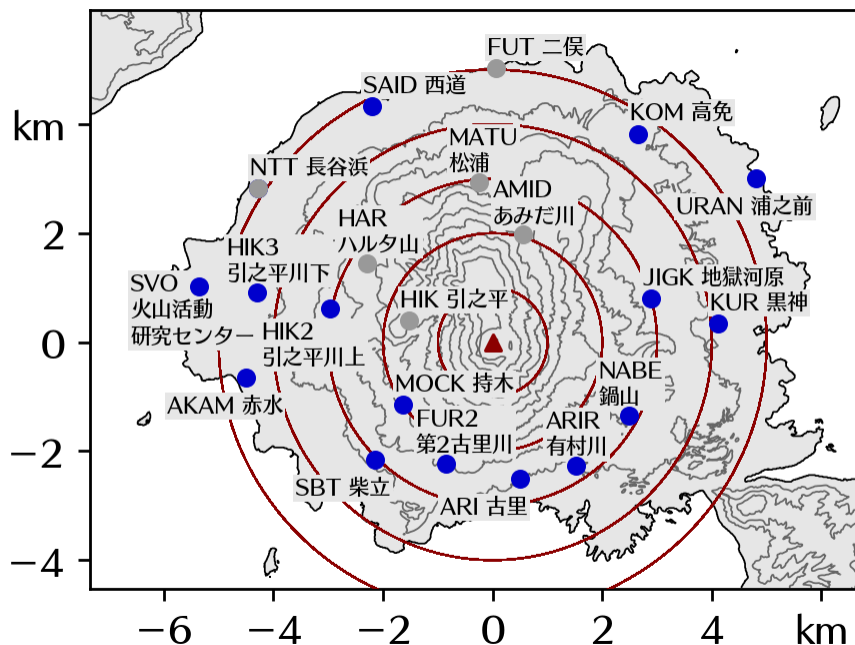


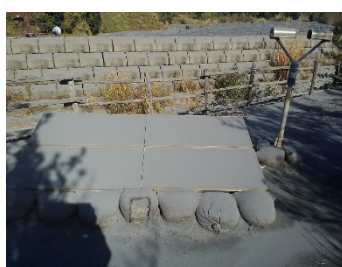
図 14 桜島におけるディストロメータの配置。青丸は本プロジェクトにおいて設置した観測点、灰丸は他のプロジェクトにおいて設置した観測点。赤三角は南岳 A 火口の位置を、赤円は南岳 A 火口から 1 km ごとの距離を示す。

ii) 降灰量のキャンペーン観測

先述のように、2024 年は噴火が少なく、降灰量のキャンペーン観測を行った事例も少ない。以下では、2024 年 12 月 23 日 7 時 10 分と 7 時 29 分に発生した爆発

的噴火、および 2024 年 9 月 26 日夜間に発生した噴火による降灰の分布範囲および降灰量を調査した例を示す。

2024 年 12 月 23 日 7 時 10 分の噴火では火口上約 1600m、7 時 29 分の噴火では火口上約 3400m まで噴煙が上昇した。この日は上空の風が強く、火山灰は南南東方向のごく狭い範囲に流された。図 15 に降灰範囲および採取試料地点の位置と降灰量、および降灰の状況を示す。降灰範囲が極端に狭かったため試料採取地点の数は少ないが、最も降灰量の多かった有村展望所では 433 g/m^3 の降灰があった。これらの調査結果を基に江頭・石原(1979)³⁾、Eto (1989、2001)^{4), 5)}と同様の方法で推定した火山灰放出量は約 3500 トンであった。



ARIR



有村展望所



海湯 BS

図 15 2024 年 12 月 23 日 7 時 10 分および 7 時 29 分に発生した噴火に伴う降灰量分布（上段）と降灰の状況（下段）

2024 年 9 月 26 日の噴火では火口上約 1,300 m まで噴煙が上昇し、火山灰は南南西方向の比較的狭い範囲に流された。図 16 に降灰範囲および採取試料地点の位置と降灰量を示す。最も降灰量の多かった FUR2 観測点では 624 g/m^3 の降灰があっ

た。これらの調査結果を基に先の例と同じ方法で推定した火山灰放出量は約 6,000 トンであった。



図 16 2024 年 9 月 26 日夜間に発生した噴火に伴う降灰量分布

iii) ディストロメータ観測による降灰量の時間変化

前節に示した 2024 年 12 月 23 日の爆発的噴火による降灰は ARIR のみで検出された。ARIR におけるディストロメータ観測の結果を図 17 に示す。図 17 上段は、ディストロメータで検出された時間雨量相当量の時間変化である。7 時 10 分に発生した爆発的噴火による降灰は 7 時 20 分に検出され始めた。7 時 29 分の爆発的噴火による火山灰が ARIR に到達した時刻は、先の噴火による降灰と同時に到達した可能性があるため明瞭ではないが、先の噴火による降灰が噴火の 10 分後に検出されはじめたことと噴煙の到達高度が先の噴火より高かったこともあわせると、時間雨量相当量が急増する 7 時 41 分から 7 時 42 分と考えるのが妥当かもしれない。ディストロメータで検出された累計の雨量相当量は 0.19 mm であった。

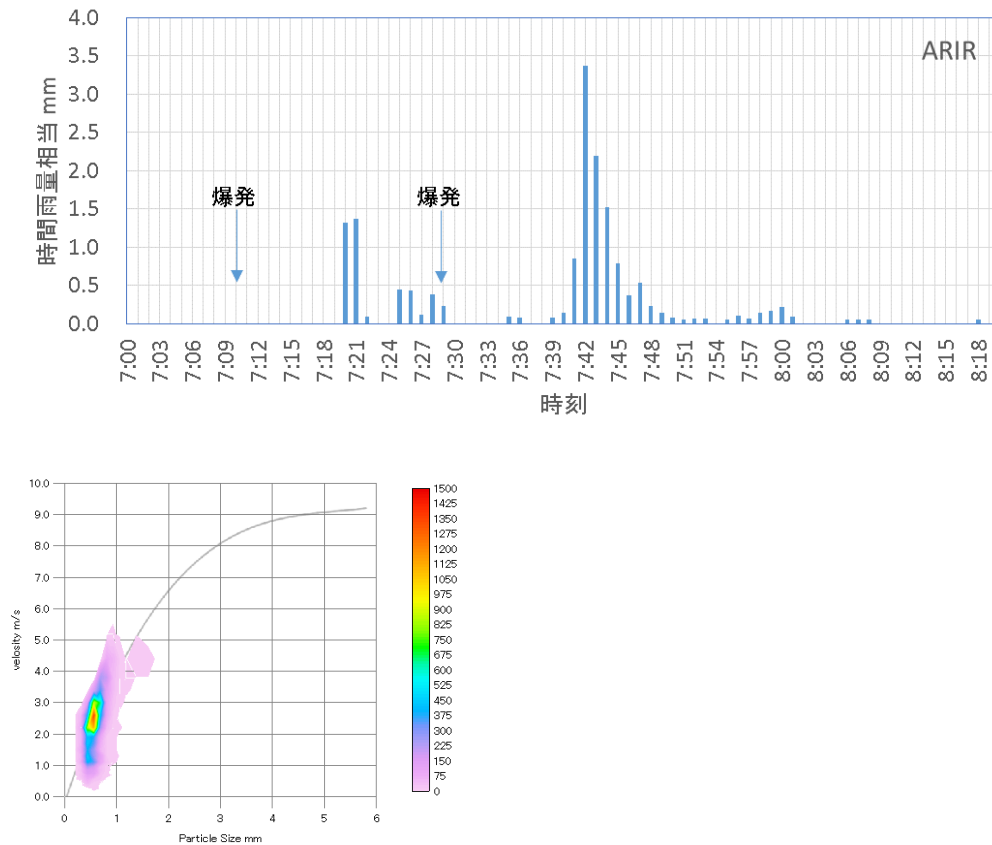


図 17 2024 年 12 月 23 日 7 時 0 分から 8 時 20 分までのディストロメータ観測による時間雨量相当量の推移（上段）と、ディストロメータ観測による検出粒子の粒径－速度分布（下段）。下段の図中の曲線は雨滴の粒径と落下速度の関係（Gunn and Kinzer、1946）⁶⁾。

2024 年 9 月 26 日の噴火による降灰は FUR2 および SBT で検出された。この 2 点におけるディストロメータ観測の結果を図 18 に示す。図 18 上段は、ディストロメータで検出された時間雨量相当量の時間変化である。当該の噴火は 20 時 1 分に発生したとされているが、わずか 2 分後の 20 時 3 分には FUR2 で降灰が検出されていることから、20 時 1 分より前にも火山灰の放出があったものと考えられる。他方、SBT では 20 時 25 分に降灰が検出され始めた。ディストロメータで検出された累計の雨量相当量は FUR2 が 1.07 mm、SBT が 0.06 mm であった。

図 18 下段はディストロメータで検出された降下粒子の粒径－速度分布である。FUR2 で検出された粒子には粒径 1 mm を超える粗い粒子が比較的多く含まれるのに対し、SBT では粗い粒子は相対的に少ない。また最も検出数の多い粒径速度領域の粒径は FUR2、SBT とともに 0.625-0.750 mm だが、落下速度は FUR2 が 2.0-2.4 m/s であるのに対し SBT が 1.2-1.4 m/s であった。SBT が降灰範囲の端部に位置しており、噴火発生から降灰検出までに要した時間も長いことを考慮すると、SBT では見かけの密度が小さいために降下速度の小さい凝集した火山灰が FUR2 より高い割合で含まれている可能性がある。

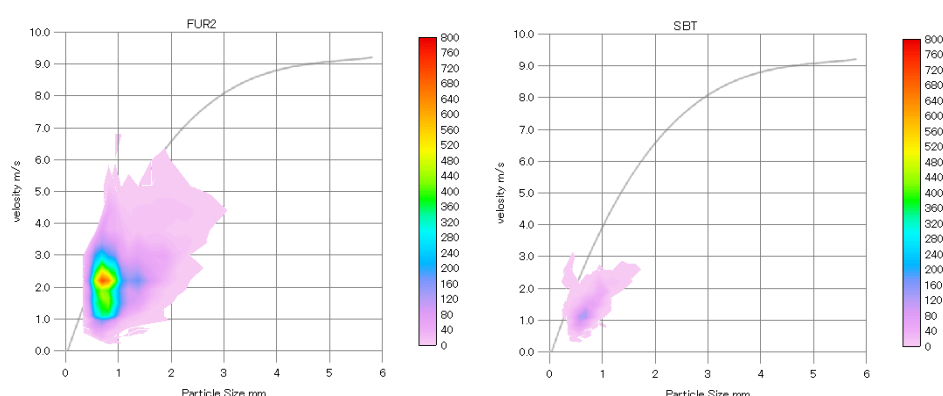
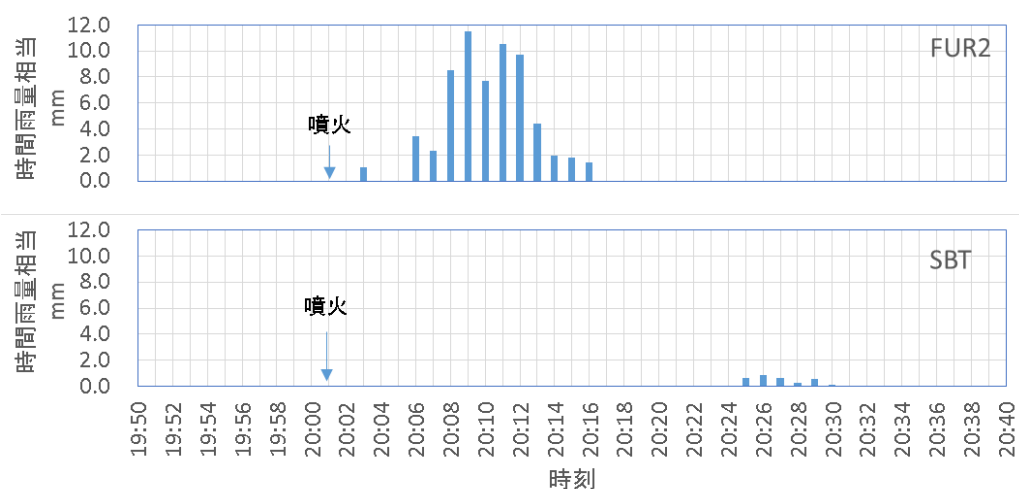


図 18 2024 年 9 月 26 日 19 時 50 分から 20 時 40 分までのディストロメータ観測による時間雨量相当量の推移（上段）と、ディストロメータ観測による検出粒子の粒径－速度分布（下段）。観測点 FUR2、SBT。下段の図中の曲線は雨滴の粒径と落下速度の関係（Gunn and Kinzer、1946）⁶⁾。

2024 年 10 月 13 日 12 時 42 分に発生した爆発的噴火では、噴煙は火口縁上 1,400m まで上昇し、火口の西方に降灰があった。この事例では噴火後の降雨により試料採取が困難であったため野外での降灰調査は行っていないが、複数のディストロメータで降灰が検出された。ディストロメータで検出された時間雨量相当量の時間変化を図 19（上段）に示す。12 時 42 分に発生した爆発的噴火による降灰は HIK2 では 12 時 56 分、HIK3 では 12 時 59 分、SV0 では 13 時 5 分に検出され始め、それぞれの観測点で 12 分前後にわたって降灰を検出した。火口から観測点までの距離が大きくなるにつれて検出の開始が遅く、また時間雨量相当量が小さくなる傾向がみられる。これは噴煙粒子の風による移送と拡散の過程を反映していると考えられる。ディストロメータで検出された累計の雨量相当量は HIK2 で 0.20 mm、HIK3 で 0.04 mm、SV0 で 0.01 mm であった。

図 19（下段）は検出された各観測点の粒径－速度分布である。検出された粒子数が最も多かったのはいずれの観測点も粒径 0.500-0.625 mm、落下速度 1.0-1.2 m/s の領域であったが、火口から観測点までの距離が大きくなるにつれて相対的に

粗い粒子の検出が減少していることが認められ、風による分級の効果を示唆している。

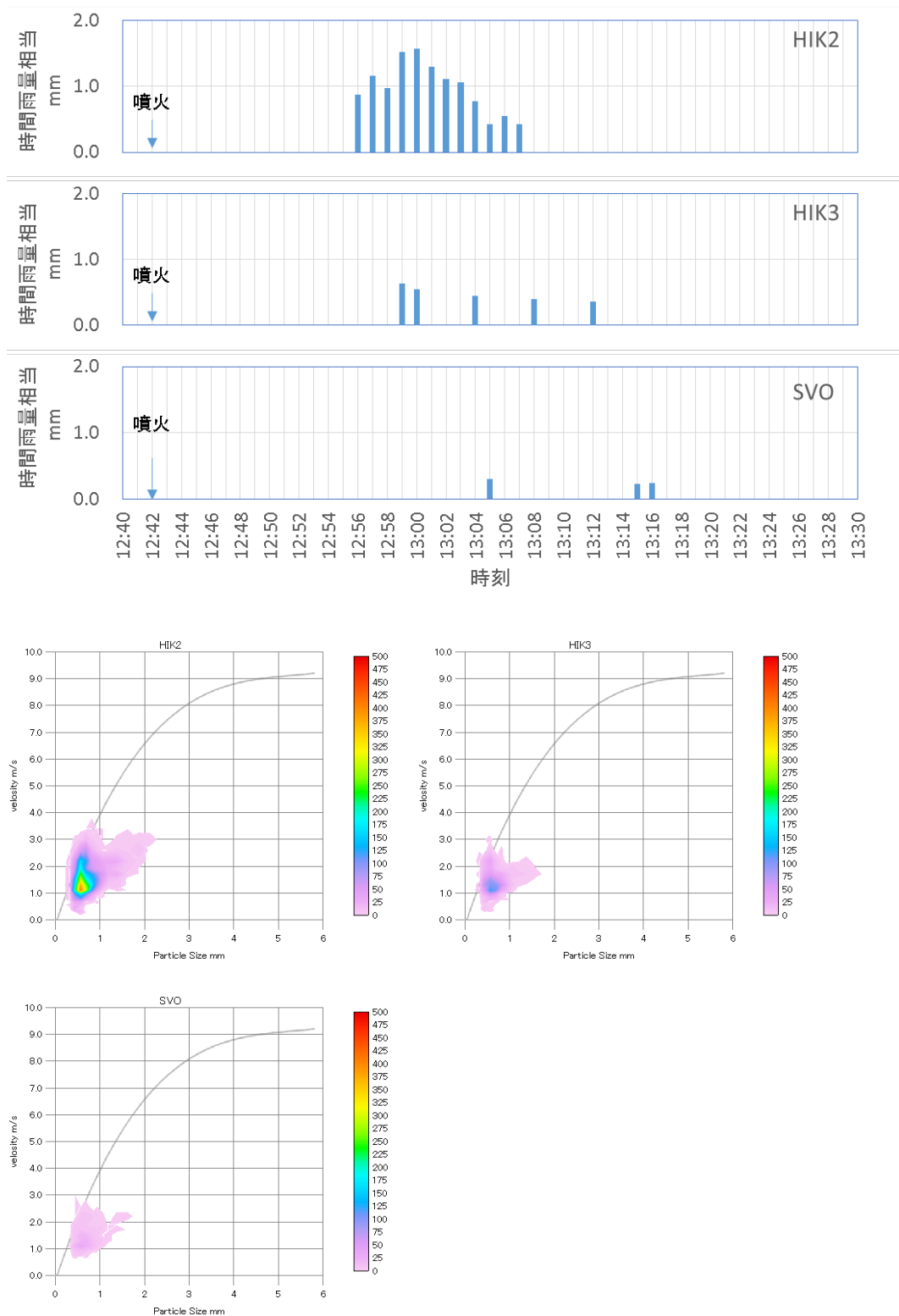


図 19 2024 年 10 月 13 日 12 時 40 分から 13 時 30 分までのディスドロメータ観測による時間雨量相当量の推移（上段）と、ディスドロメータ観測による検出粒子の

粒径－速度分布（下段）。観測点 HIK2、HIK3、SV0。下段の図中の曲線は雨滴の粒径と落下速度の関係（Gunn and Kinzer、1946）⁶⁾。

iv) ディスドロメータ観測による火山灰連続放出のモニタリング

観測と並行して、これまでに観測されたディスドロメータの降灰量データを用いて、桜島の火山灰連続放出のモニタリングができるか検討した。火山灰連続放出は、ブルカノ式噴火と並ぶ桜島の主要な噴火様式である。ブルカノ式噴火は爆発的で短時間に数千トンの火山灰を放出する一方、火山灰連続放出は、数十分から数時間の間、間欠的に少量の火山灰を放出させる現象で、継続時間が長くなるとブルカノ式噴火と同程度の火山灰量を放出することもある。そのため、火山灰連続放出の噴出量は桜島の火山活動を評価する上で重要である。ディスドロメータは降灰量を高時間分解能で計測することができるため、火山灰連続放出の継続時間と質量噴出率の時間変化の算出を検討した。

地盤変動と地震動振幅にもとづいて質量噴出率を算出する方法（Iguchi、2016⁷⁾；平成 29 年度報告書）を用いて、毎分の質量噴出率を推定し、ディスドロメータの降灰量と比較した。ここでは、毎分 100 トン以上の質量噴出率をブルカノ式噴火と判定し、判定時刻から 30 分以内にディスドロメータにて粒子降下が計測された場合はブルカノ式噴火によるものと判定した。一方、火口からの方位に依らず粒子が検知された時間帯を降雨とみなし、鹿児島地方気象台によって 3 時間以内に降雨が検知された時間帯とともに、解析対象から除外した。解析対象の時間帯の中で、直近 1 時間以内に 20 分間以上の降灰が検知された場合に、その降灰が火山灰連続放出によると判定した。図 14 に示す観測網において、2019 年 1 月から 2020 年 5 月に計測された降灰観測データから 98 回の火山灰連続放出イベントを検出した。粒子数のデータを Takishita et al. (2022)⁸⁾により提案された換算式を用いて重量に変換し降灰量を求め、噴出量の時間変化と比較した（図 20）。

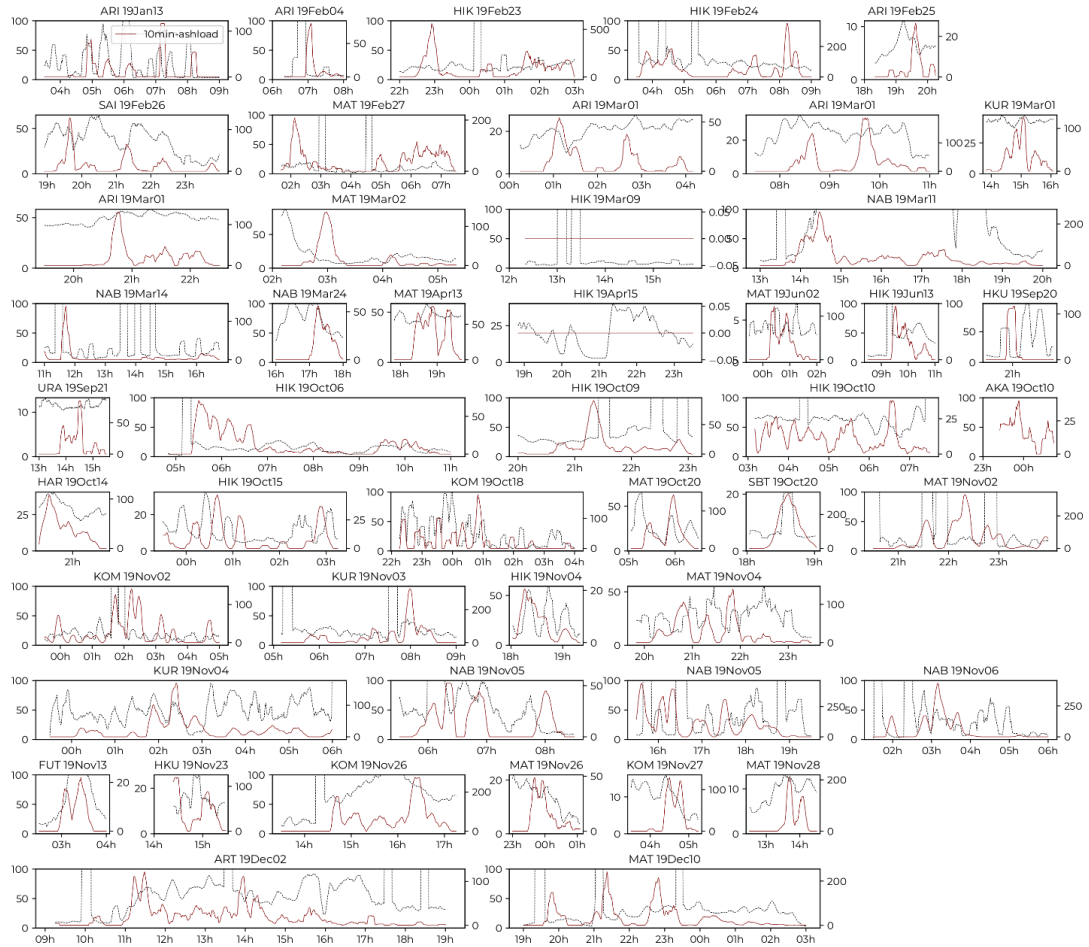


図 20 2019 年 1 月から 2020 年 5 月において検知された、火山灰連続放出により噴出した火山灰の降灰検知事例。タイトルは計測地点と横軸の左端時点の年月日を表し、横軸は 1 時間毎の時刻を表す。黒い破線は質量噴出率(t/min)、赤い実線は降灰量(g/m²/min)。次に続く。

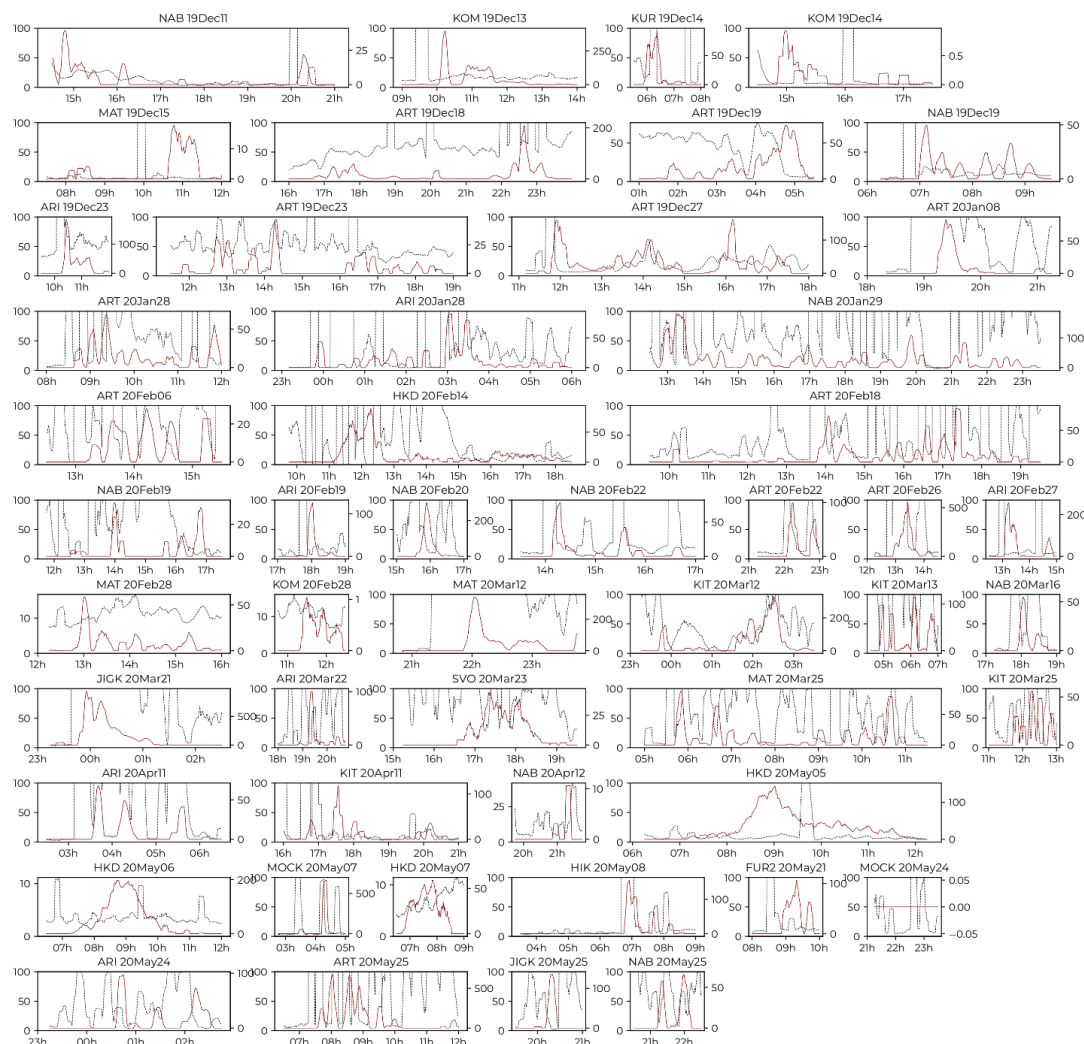


図 20 の続き

図 20 に示した事例の多くでは、間欠的な噴出のパルスに数分遅れて降灰のパルスが見られた。個々の噴出パルスと降灰パルスの時間差や継続時間に基づいて噴出と降灰を対応付けて、パルス毎の噴出量と降灰量の相関を調べた。1つ以下の外れ値を除外し、4つ以上のパルスを対応付けた 68 事例(図 21)のうち、31 事例で相関が高い($R \geq 0.75$)。火山灰が火口から噴出して地表に堆積するまでの輸送過程(風速場、噴煙高度、粒径分布)が火山灰連続放出の継続中に定常的であれば、噴出量の増減と降灰量の増減が連動するため、質量噴出率の増減を大まかにディストロメータで把握することができることが示された。これまで噴火による噴出量の推定には、可視画像、赤外画像、衛星画像や地盤変動、地震動が使われてきたが、ディストロメータはこれらの観測方法を補完する役割を担う可能性が出てきたと言える。ただし、相関が高かった事例での噴出量と降灰量との関係式のべき指数は 1 を超える事例がほとんどで、その法則性は見出されていない。よって、ディストロメータを用いた定量的な噴出量推定には課題が残されている。

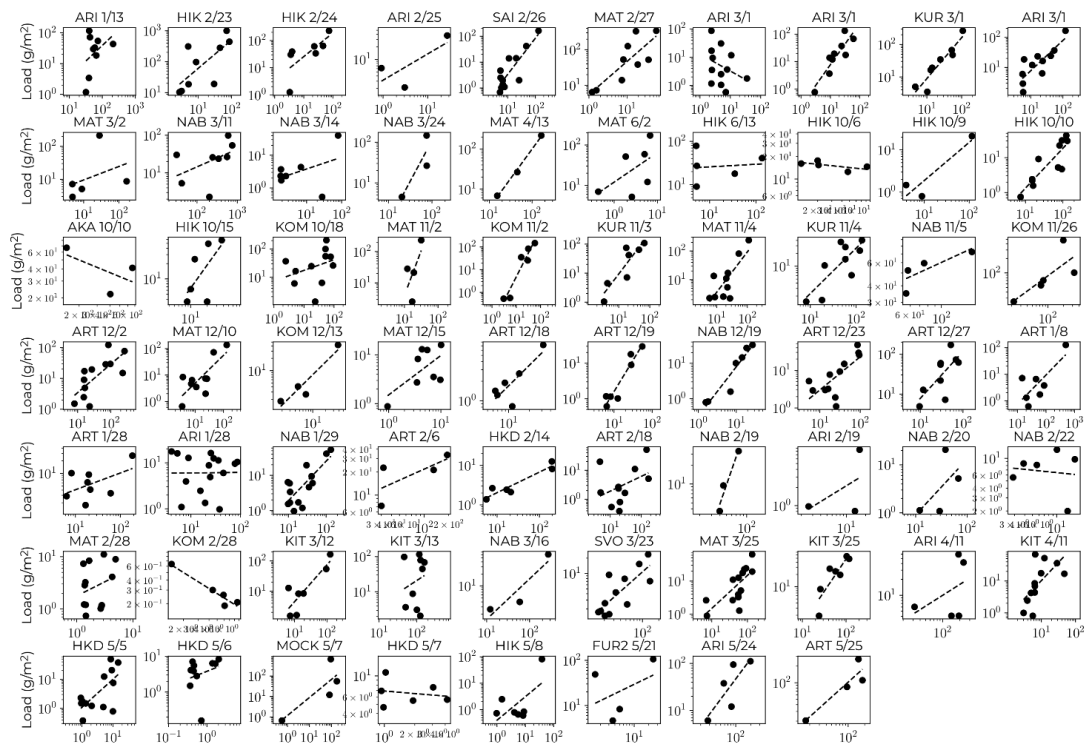


図 21 4 つ以上のパルスが対応付けられた 68 事例における、各パルスの噴出量 (t) と降灰量 (g/m²) の関係。両軸は対数軸で、傾きが 1 であれば降灰量と噴出量の近似式のべき指数が 1 である。

f) レーダ観測による噴火事例のデータベース化

ディスト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 公開した。

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://jvndn.bosai.go.jp/portal/>

i) 降灰情報のデータベース化

前年度に引き続き、様々なレーダ情報およびディストロメータ情報を web サイト VASH (<https://vash.jp/>) に登録した。2025 年 1 月 30 日時点での登録数を表 1 に示す。2024 年の噴火事例の登録数はゼロとなっている。これは、2012 年からのレーダデータの収集、画像作成、登録の作業をマニュアルでおこなっているためである。2024 年度に関しては画像作成まではおこなっているが、登録作業ができていない。また、本年度は後述する電子ブックの作成に時間がかかったためである。一部のレーダ画像は google ドライブでダウンロード出来るようになっている。来年度は、データベース化までの一連の作業を自動化するプログラムを作成して効率を上げる必要がある。

表 1 データベース（VASH）への降灰情報の登録数（2025 年 1 月 30 日現在）

年	噴火事例	Photo	垂水 XMP	KuRAD	SVO-XMP	船舶レー ダ	ディスドロ	MSM
2012 年	24	6	96	0	0	0	0	24
2013 年	63	10	212	0	0	0	0	63
2014 年	34	1	136	0	0	0	0	34
2015 年	65	31	260	0	0	0	0	65
2016 年	0	0	0	0	0	0	0	0
2017 年	0	0	0	0	0	0	0	0
2018 年	137	15	544	0	332	22	314	18
2019 年	228	16	896	0	474	125	397	35
2020 年	259	6	1004	0	540	0	570	0
2021 年	139	0	528	0	278	0	0	0
2022 年	236	0	924	2	450	3	0	0
2023 年	133	2	404	0	262	0	0	0
2024 年	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	1318	87	5004	2	2336	150	1281	239

ii) 電子ブック「レーダがとらえた桜島噴煙」の発行

VASH の中から特に顕著な噴火事例を抽出して電子ブックを作成した。図 22 は日本語版と英語版の電子ブックの表紙である。この電子ブックは、レーダに関しては初心者の方の火山専攻の学部・大学院学生や火山専門家、地方自治体の防災担当者を対象に作成した書籍である。噴火直後の噴煙柱の発達の様子や降雨中の噴火事例などを動画で閲覧できるようになっている。Copyright の確認後に web 上で一般に公開する予定である。公開準備中の電子ブックはパスワード付きで閲覧できる。

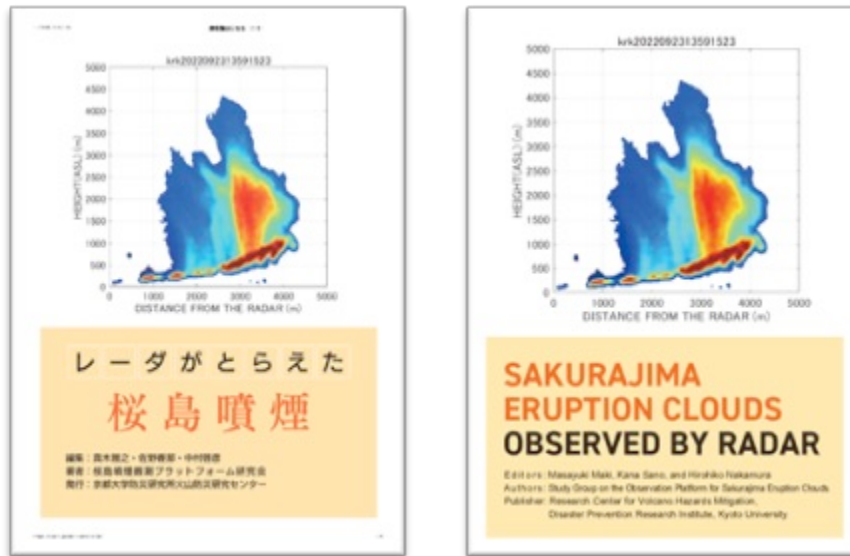


図 22 電子ブックの表紙。(左) 和文、(右) 英文。

iii) SV0 レーダ RHI 観測画像の web 公開

昨年に引き続き、SV0 の X バンド MP レーダの RHI 画像を作成した。画像はレーダ反射因子とドップラー速度の鉛直断面の動画である。桜島南岳火口を中心に 11 方位角の RHI スキャンデータを合成して作成した。VASH への登録はまだできていないが、2018 年から 2024 年の噴火事例について下記のアドレスから閲覧・ダウンロードできる。

g) <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1-CqhF9cegGHIh0NQ7qUFVmGAu0XNU7SK>

i) 噴火ソースパラメータ

噴火ソースパラメータとは噴火時刻、噴火継続時間、噴出率、噴煙高度などの噴火の規模や形態を特徴付けるパラメータである。原理的には、SV0—XMP レーダ観測からは約 1 分毎の噴火パラメータを、船舶レーダからは約 2 秒間隔で噴火ソースパラメータを推定できる可能性がある。本研究では、SV0—XMP の観測データと船舶レーダの観測データを比較することで、船舶レーダ観測から定量的な噴火ソースパラメータの推定が可能かどうかを調べた。結論として、現時点では、噴出率に関しては船舶レーダによる指定は困難である。その理由は、船舶レーダから求められるデータのキャリブレーションが十分な精度できていないためと考えられる。特にマグネトロンタイプの船舶レーダの場合、出力データは 0 から 255 の輝度値であり、電力値 dBm へ換算する必要がある。固体化船舶レーダの場合、出力値は dBm で噴出量の推定は可能である。しかしながら、噴出物の速度を推定するためのドップラー速度の測定値が SV0—XMP とかなり異なっており、噴出率の計算までは至っていない。今後、標準反射体を使った船舶レーダのキャリブレーションが必要であろう。一方、噴煙高度は Kobori et al. (2022)⁹⁾ が示したように、船舶レーダによる推定が可能である。また、噴火時刻や噴火継続時間は火口直上の噴煙エコーをモニ

ターすることで可能であることは確かめられており、降雨中でも大きな噴火であれば検出が可能である点である。このような船舶レーダの噴煙観測の能力に関しては論文として学術誌へ投稿予定である。

h) 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。

i) 船舶レーダによる噴煙柱の観測状況

2024 年度は桜島の南岳を京都大学ハルタ山観測室と黒神観測室に固体化船舶レーダ(SSR)を置いて南岳の北西と東から噴煙を観測した（図 23）。

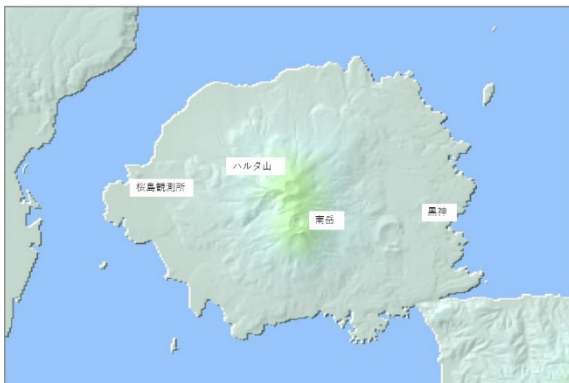


図 23 2024 年度船舶用レーダ配置（桜島火山観測所とハルタ山/黒神観測室）

桜島火山観測所は建物の保守工事のために屋上が使用できなかったために SSR400W はハルタ山観測室に移設し、南岳西側からの噴煙観測を続けた。ハルタ山は南岳まで 2.9 km と桜島火山観測所と南岳 5.7 km より 2.8 km 噴火口に近くなった。また高度が 318m 高くなった（図 24）。



図 24 ハルタ山に設置した固体化船舶レーダ

2024 年度の観測は桜島火山観測所が 4 月から 7 月の 4 か月間で SSR_RHI（鉛直観測）である。ハルタ山観測室は 8 月から 2025 年 3 月までの 8 か月間である。そして、黒神観測室は、マグネトロンレーダにて 2024 年 4 月から 2025 年 3 月までの通年観測を RHI で実施し、SSR の PPI（水平）観測を 2024 年 5 月半ばから 8 月初めの 2 か月半実施した。

2024 年 4 月から 2025 年 3 月の桜島噴煙頻度を高度によるヒストグラムにしたのが図 3 である。1300m より低い噴煙が大半であったが、1550m より高い噴火もある。

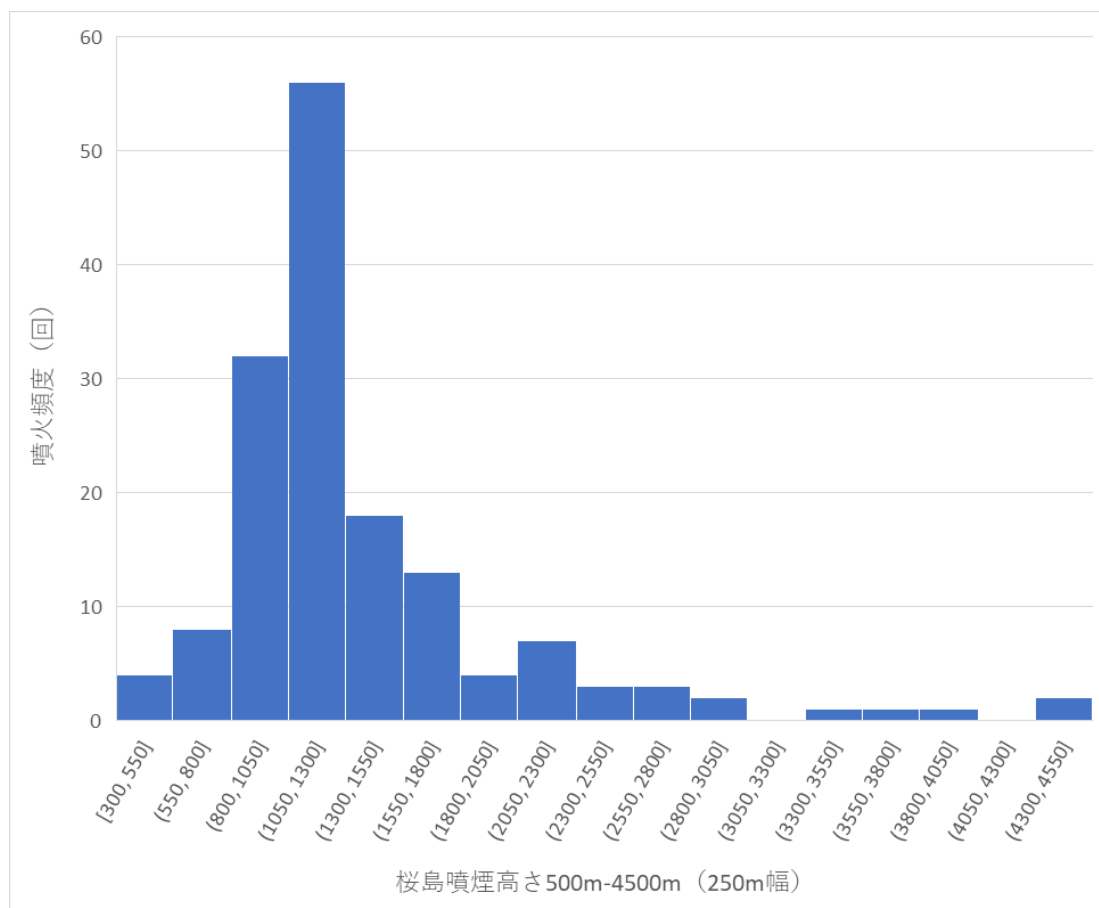


図 25 2024 年 4 月から 2025 年 3 月の桜島の噴煙高度頻度分布（鹿児島地方気象台）

ハルタ山観測室に設置した固体化船舶レーダによって噴煙の上昇が高い時間分解能で得られている。図 26 に 2024 年 10 月 18 日の 1 時 21 分の噴火によるレーダ反射強度を示す。1 時 21 分 45 秒に噴火直後の噴煙が捉えられ、1 時 29 分 47 秒に最大の噴煙高度に達しており、3,100 m を超えていることが分かった。また、噴煙は火口から北に移動していたことがレーダによって確認された。図 26

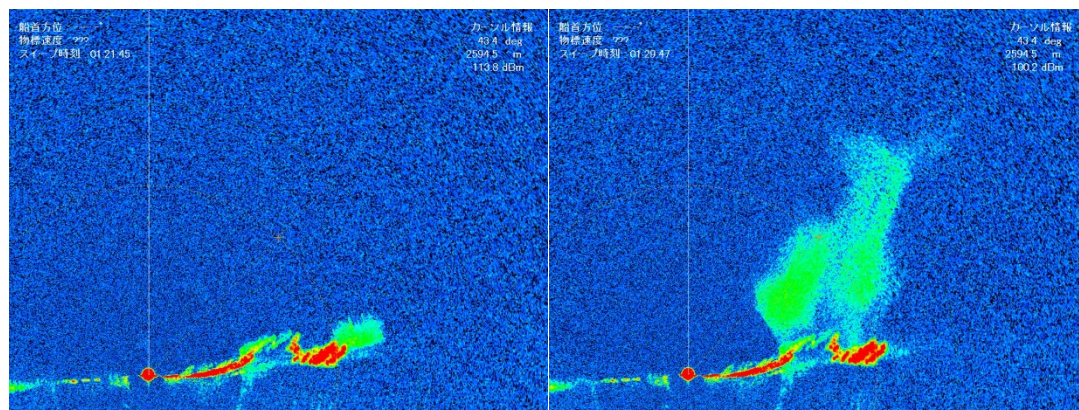


図 26 2024 年 10 月 18 日 1 時 21 分の桜島噴火の固体化船舶レーダによる反射強度分布。(左) 1 時 21 分 45 秒、(右) 1 時 29 分 47 秒。赤丸がレーダ設置場所を示す。

ハルタ山観測室と同時刻帯において黒神観測室においてマグネトロン船舶レーダによる RHI 観測がおこなわれており、観測結果を図 27 に示す。噴火直後(図 27 左)では噴煙が見えないが、噴火から 6 分後(図 27 右)に最高高度に到達した。黒神観測室は南岳山頂火口から東にあり、山腹による反射が明瞭に認識できるため、レーダ画像から噴煙の認識が容易である。なお、黒神から南岳山頂火口までの水平距離は 4.2 km である。

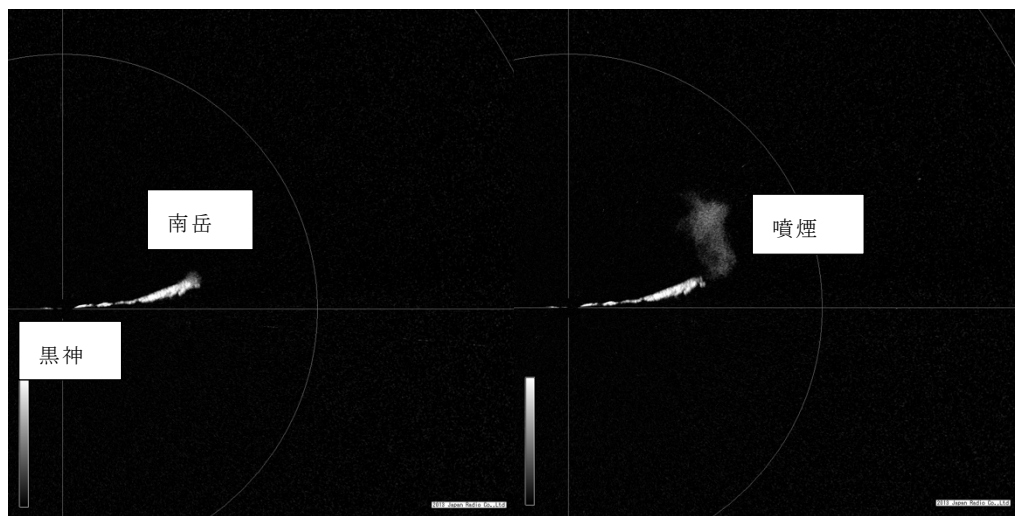


図 27 2024 年 10 月 18 日 1 時 22 分の桜島噴火時のマグネトロンレーダ画像。(左) 1 時 22 分 13 秒、(右) 1 時 28 分 2 秒。

桜島の噴煙を機動的に観測するために、船舶レーダのアンテナを鉛直に回転させる RHI 観測を 2018 年から行っている。RHI の鉛直方向は 1.2° のビーム幅であるので細かく観測できる。水平方向のビーム幅は 22° であるので、黒神から放射した信号は南岳山頂火口では 1,570 m の幅となるため広範囲を 1 度のスキャンで観測できる利点があるが、水平方向の分解能が粗いため噴煙の流向がわかりづらい欠点がある。そこで、船舶レーダの本来の使い方である水平回転による PPI 観測を行った。

黒神観測室に固体化船舶レーダを設置した(図 28)。固体化船舶レーダ(SSR)の仕様は表 2 の通りである。アンテナのビーム幅は水平 1.2° 、垂直 22° のファンビームで、送信方式は P0N(単パルス)と Q0N(パルス圧縮)を併用している。PPI で噴煙の観測をする場合、レーダの信号を捉えるところを覆域とする必要があるので、信号の上下角を検討した(図 29)。黒神から南岳山頂火口への仰角は 13° であるため、アンテナを 25° 上向きにすることで、垂直ビームの上の仰角が 36° 、下の仰角が 14° となるので、仰角 25° にて観測を行った。観測期間は 2024 年 5 月 14 日から 7 月 23 日で、この期間に噴煙の水平移動の把握を 3 回行った。



図 28 黒神観測室における固体化船舶レーダ（SSR100W）の設置風景（2024 年 5 月 14 日）。

表 2 固体化船舶レーダ（SSR100W）の主な仕様

Item	Specification	Remarks
Antenna		195cm(6ft)
Horizontal beam width	1.2°	-3dB
Vertical beam width	22°	
Rotation number	24rpm	2.5s/Rotation
Solid State Radar (SSR)	100W±50%	
Transmission output (Peak-to-peak value)		
Transmit frequencies	9380～9420MHz	P0N:9390±10MHz Q0N:9410±10MHz
Transmission pulse width	P0N:0.08～1.2 μ s Q0N:5～18 μ s	
Sweep frequency	Q0N:5, 10, 15MHz	

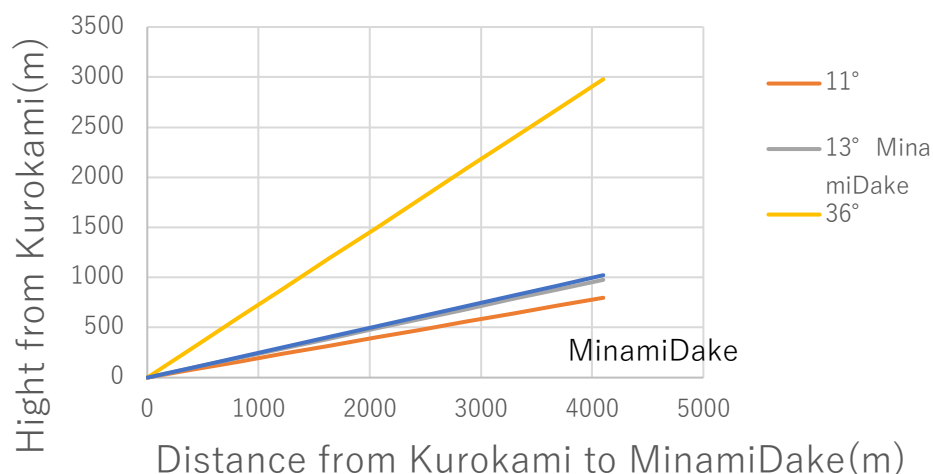


図 29 黒神観測室から南岳山頂火口への PPI アンテナ縦ビーム範囲 (-3dB)

そして、仰角を 0° から 25° に変化させながら PPI 観測を行い、映像の変化を検討することで、噴煙の水平分布の把握方法を検討した。観測した噴煙の PPI 映像で噴煙の移動が顕著に表れていたのは 2024 年 7 月 14 日 18 時 19 分の噴火であった。鹿児島地方気象台によると、この噴火は噴煙高度が火口縁上 4,500 m で、流向は北東方向であった、気象レーダによる観測結果は図 5 に示した通りである。図 30 に RHI と PPI の同時観測で把握した、この噴火の噴煙の移動を示す。

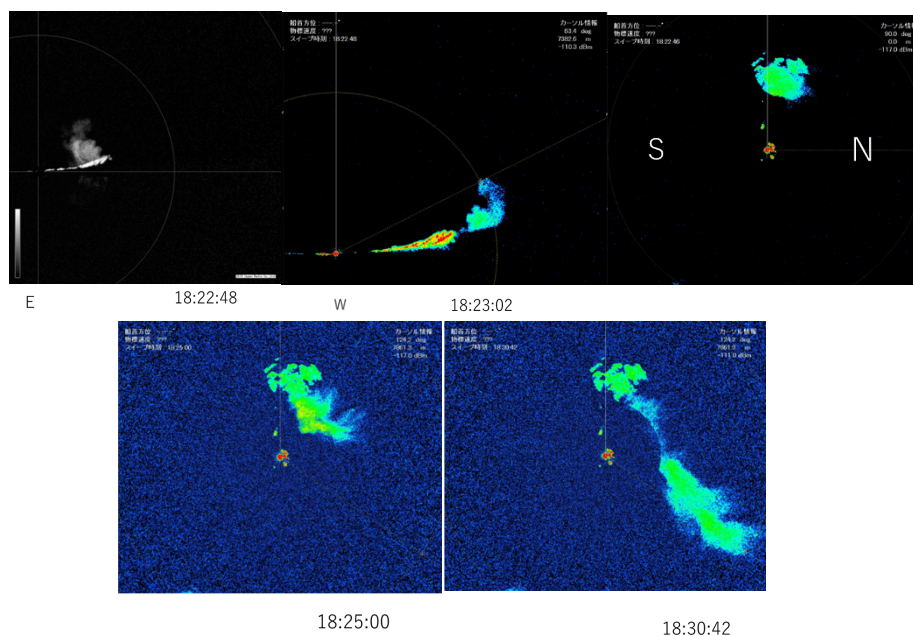


図 30 2024 年 7 月 14 日 18 時 19 分の噴火によるレーダ画像。(上) RHI 観測、(下) 高度 4,000 m に対応する PPI 観測画像。

RHI 観測に PPI 観測を加えることにより噴煙が流れる方向を把握することができ、図 30 に示す通り噴煙が水平方向で火口から 8 km 遠方に流れたことがわかった。ただし、桜島の山腹において電波が反射することによっておこるグランドクラッタと噴煙が重なることがあり、噴煙とグランドクラッタの分離が難しい点が今後の課題である。

ii) 船舶レーダデータの準リアルタイム処理

2.5 秒で 1 回転する船舶レーダでの特徴を生かして噴火検知を目指す方法を PC で実現するためのアルゴリズムの検討をし、レーダデータの読み込み、そして固体化船舶レーダに Linux 系マイクロコンピュータに接続し機能を組み込んだ。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島において令和 6 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 2024 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) 2025 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 31 に示す。2024 年 3 月までの噴火活動は、11 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、2022 年 8 月からの Episode8 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。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。11 月以降爆発回数が減少し、地盤の膨張も停止した。2024 年 2 月 14 日の爆発では噴煙が 5,000 m の高度に達したが、Episode9 の活動は 3 月で終わった。3 月以降は地盤の収縮が見える。

2024 年 5 月から噴火が再び発生するようになり、7 月には 9 回の爆発が発生した。7 月 14 日の爆発では 4,500m、7 月 29 日の爆発では 4,400m の高度まで噴煙が達した。この時期の噴煙高度は高い。ここでは 5 月以降を Episode10 とした。その後、1 か月に数回の頻度で噴火は繰り返されたが、11 月 24 日以降、噴火がみられなくなった。

噴火活動は低下したが、10 月ごろからひずみ計により地盤の膨張が捉えられており、12 月 20 日には 5 回の噴火が発生し、それ以降、爆発が頻発するようになった。これ以降の期間を Episode11 とする。12 月 20 日から 2025 年 3 月 31 日までに 56 回の爆発が発生した。回数としては多いが、噴煙高度は最高でも 2,700 m 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。

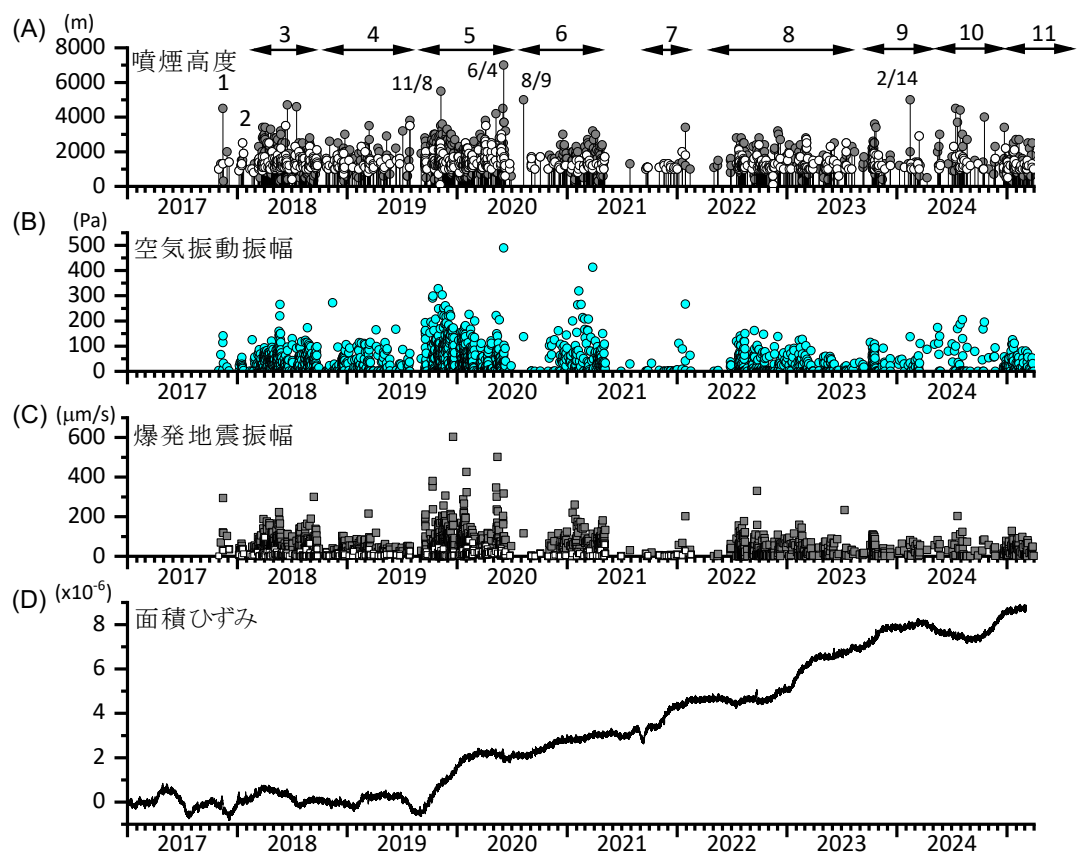


図 31 2017 年 11 月以降の南岳の噴火活動の推移。数字は Episode の番号を示す。(A) 火口縁上噴煙高度(鹿児島地方気象台発表)。灰丸は爆発、白丸は噴火を示す。(B) 有村観測坑道における空気振動振幅。(C) 有村観測坑道における爆発地震の最大振幅。灰色の□は爆発、白□は噴火を示す。(D) ハルタ山観測坑道における面積ひずみ(火口方向ひずみ+直交方向ひずみ)の変化。

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、2～3 Hz の周波数帯のスペクトル (A) と地盤変動を励起する圧力源の体積変化 (ΔV) に対して以下の線形関係がある (Iguchi, 2016)⁷⁾。

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

2009 年から 2013 年までの昭和火口の噴火活動では、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -1.03 \times 10^5$ と近似されている (Iguchi, 2016)⁷⁾。ここで、 γ は常時微動を考慮した補正項である。

2009 年以降の昭和火口噴火と 2017 年以降の南岳噴火のデータに、2024 年 4 月から 2025 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。

2009 年 1 月から 2025 年 2 月までの 16 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図 32 に示す。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)⁷⁾。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、南岳噴火活動期については、 $\beta = 2.2$ とした。2024 年は降灰量が少ないため (図 27 の桃色の丸)、降灰観測による火山灰放出量、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とも原点付近に集中した分布となっている。

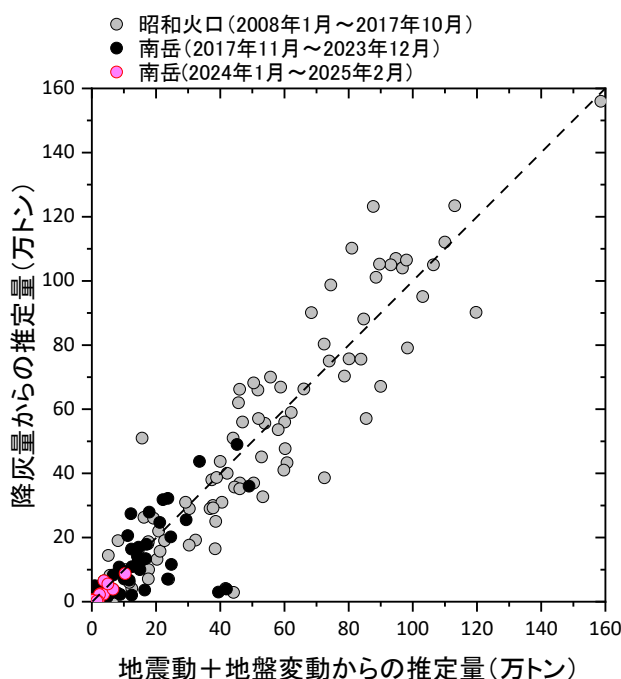


図 32 2009 年 1 月から 2025 年 2 月までの 16 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

降灰量が少ないので、拡大して図 33 に示した。2024 年 4 月以降については、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小となっており、負の値をとるものも多い。(1) 式において常時微動を考慮した補正項 γ が課題となっていることが考えられる。噴火活動が活発な時期には地震動の項 αA と地盤変動の項 βV が γ に比べて十分大きいので γ は火山灰放出量の見積りに大きな影響を与えないが、噴火活動が低下すると γ が相対的に大きくなるので見積りに大きな影響を与える。特に、2024 年 4 月は 1 回の爆発しか発生しなかったため火山灰放出量は -2.7 万トンとなった。

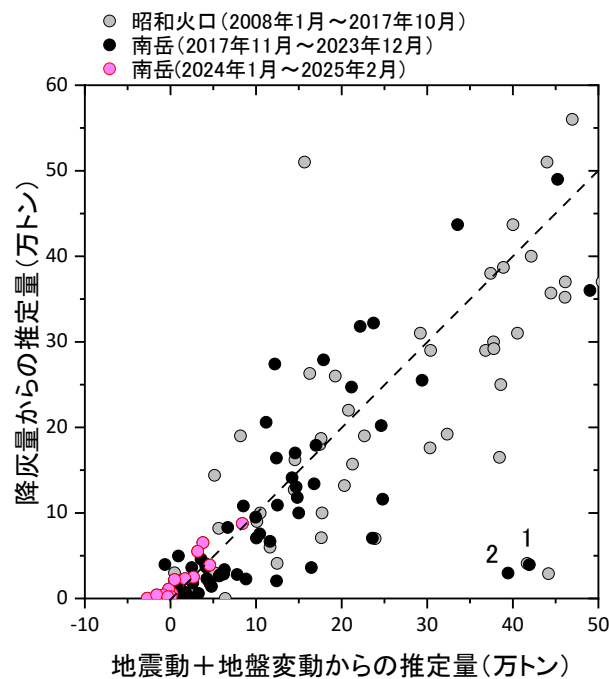


図 33 2009 年 1 月から 2025 年 2 月までの 16 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。 $\gamma = -0.5 \times 10^5$ とした。図 28 の拡大。数字の 1 と 2 は 2023 年 1 月と 2 月のデータを示す。火山性微動の振幅が大きかったため、地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量が過大となっている。

そこで、 $\gamma = -0.3 \times 10^5$ として見積もりなおした結果を図 29 に示す。この場合、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は降灰観測から推定される火山灰放出量に、より整合的となった。

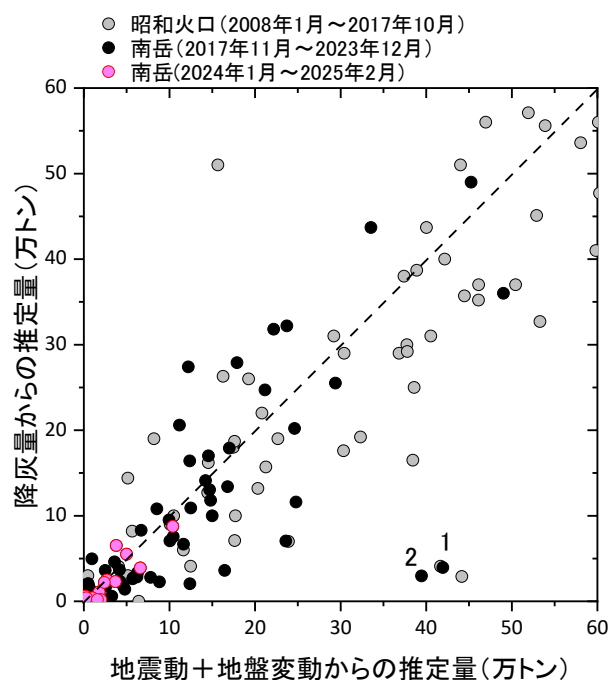


図 34 2009 年 1 月から 2025 年 2 月までの 16 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。 $\gamma = -0.3 \times 10^5$ とした。

b) 火山灰放出率と噴煙高度の関係の検討

式 (1) から求められる火山灰放出率と噴煙高度の関係を検討する。

i) 桜島火山噴火に伴う噴煙高度の推移

2009 年 2 月～2025 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 35 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)¹⁰⁾に基づき 8,000 m 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 4,800 m と決定した (令和 2 年度報告書)。

昭和火口噴火活動期には噴煙高度が徐々に高くなった。その後に発生した南岳噴火の噴煙高度は、昭和火口噴火より高い傾向がみられる。南岳噴火では Episode5 (2019 年 9 月～2020 年 6 月) が最も噴煙高度が高いが、その後、低下した。2024 年以降は再び噴煙高度が高くなっている。2024 年 1 月以降では、噴煙高度が 3,000 m を超える噴火が 8 回発生している。2 月 14 日の噴火では噴煙高度が 5,000 m に達した。7 月 14 日には 4,500 m、7 月 29 日は 4,400 m、10 月 18 日には 4,000 m まで噴煙が上昇した。7 月 20 日、12 月 23 日の噴火では、噴煙高度がそれぞれ 3,700 m と 3,400 m に達した。

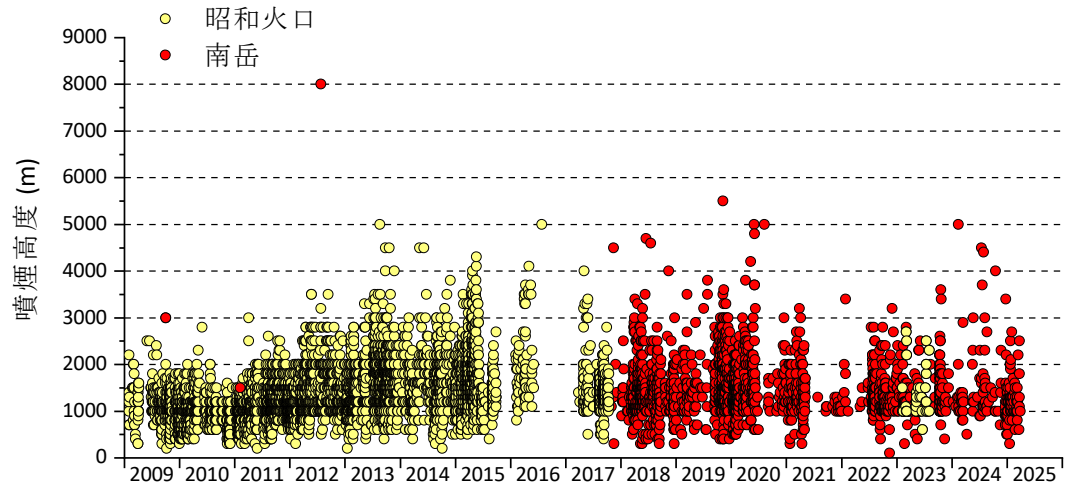


図 35 桜島の爆発に伴う火口縁上噴煙高度の推移。噴煙高度は鹿児島地方気象台の観測によるが、必要に応じてデータを補てん、修正した。赤丸は南岳、黄丸は昭和火口の噴火である。

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 35）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 5,184 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 36 に示す。

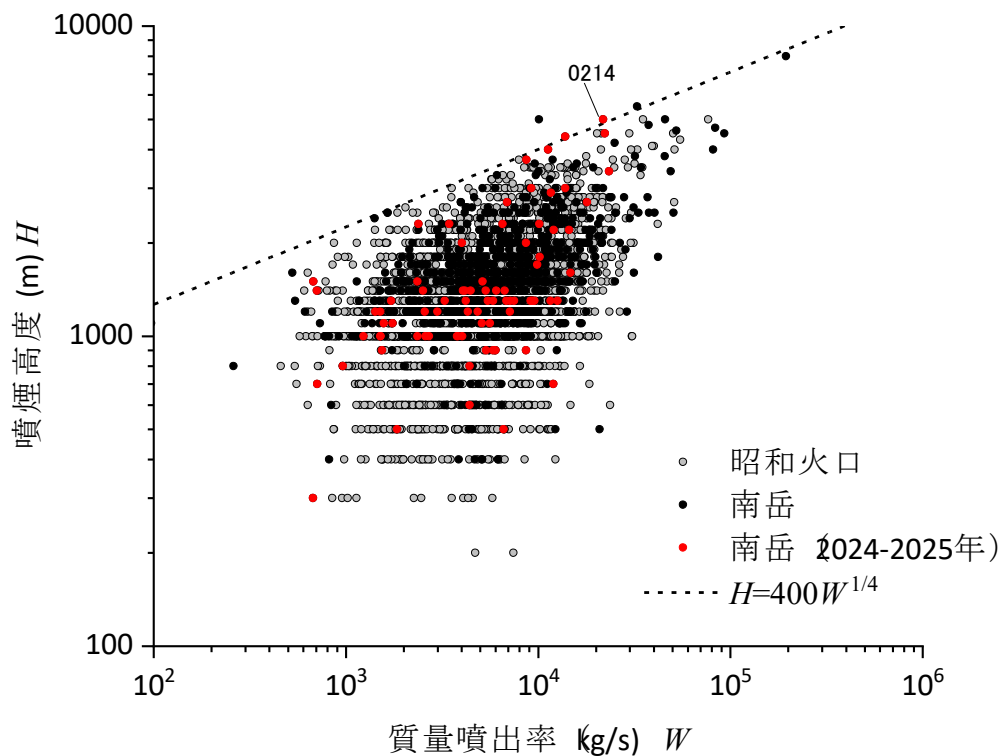


図 36 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。最近の 2024 年 1 月から 2025 年 3 月までの噴火については赤丸で示した。0214 は 2024 年 2 月 14 日に発生した爆発の質量噴出率と噴煙高度を示す。

2009 年から 2025 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、195,000 kg/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 8,000 m とされている（井口，2013）¹⁰⁾。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、93,100 kg/s に達した。この爆発の噴煙高度は、レーダ観測から 4,500 m と推定されている。2020 年 6 月 4 日の爆発の噴煙高度は 4,800 m と推測されるが、噴出率は 37,600 kg/s と見積もられる。このように噴煙高度が 4,000 m 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、Morton et al. (1956)¹¹⁾を参考に、上限の直線は以下のように決定されている。

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

2024 年 1 月から 2025 年 3 月までに発生した噴火の噴煙高度と質量噴出率の関係は上記の上限式を満たすものである。このうち噴煙高度が 3,700 m 以上に達した 2024 年 2 月 14 日、7 月 14 日、20 日、29 日、10 月 18 日の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。12 月 23 日の爆発はこの期間では最も質量噴出率が大きく（23,300 kg/s）、(2) 式から噴煙高度は最大 5000m 程度が想定されるが、観測された噴煙高度は 3,400 m であった。高度 1,000 m～3,000 m の風速は、10 m/s に達しており、風によって噴煙の上昇が抑えられた可能性がある。

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 $k = 200$ と評価されている（令和 4 年度報告書）。

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

図 37 に示すように 2024 年 1 月～2025 年 3 月の噴火も同様の傾向を示す。先に述べたように、噴煙高度が 3,700 m 以上に達した 2024 年 2 月 14 日、7 月 14 日、20 日、29 日、10 月 18 日の爆発は $k=400$ であるが、 $k=100\sim200$ となるものが最も多い。本プロジェクトは火山灰ハザードを評価するのが目的であるので、上限を考慮した $k=400$ が妥当であることが確認できた。

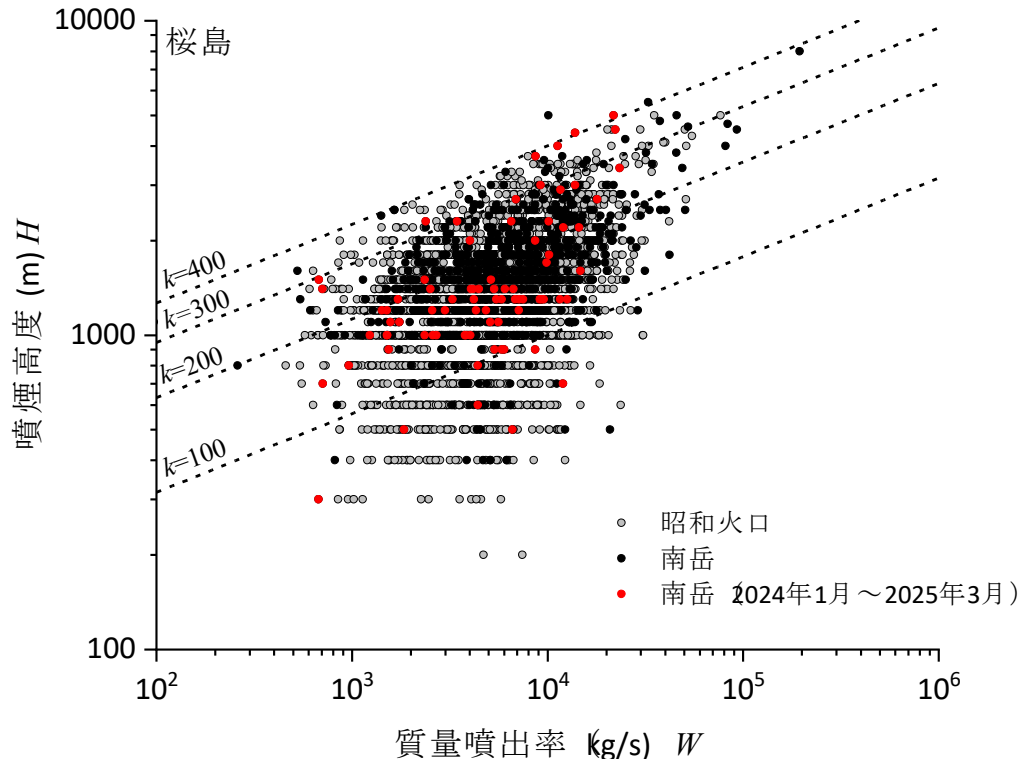


図 37 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。係数 $k = 100$ 、 200 、 300 、 400 とした。

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～令和5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。本年度は、諏訪之瀬島については2024年のデータを追加して、また、シナブン火山については、爆発地震の振幅と噴煙高度の関係を再検討することにより、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

諏訪之瀬島では、2020年12月から爆発活動が激化し、爆発回数が多い時期は2022年の10月まで続いた。その後も、散発的に爆発を含む噴火活動が続いている。令和5年度の報告書では2023年4月～2024年3月まで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2024年4月から2025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38に示す。同図には、日別の爆発回数、噴火回数、噴煙高度（いずれも福岡管区気象台が発表したもので、爆発は、気象庁榊戸原観測点において10 Pa以上の空振を観測したもの、噴火は空振振幅が

10 Pa 未満であるが、噴煙高度が火口縁上 1,000 m 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 1,000 m 未満を含む。

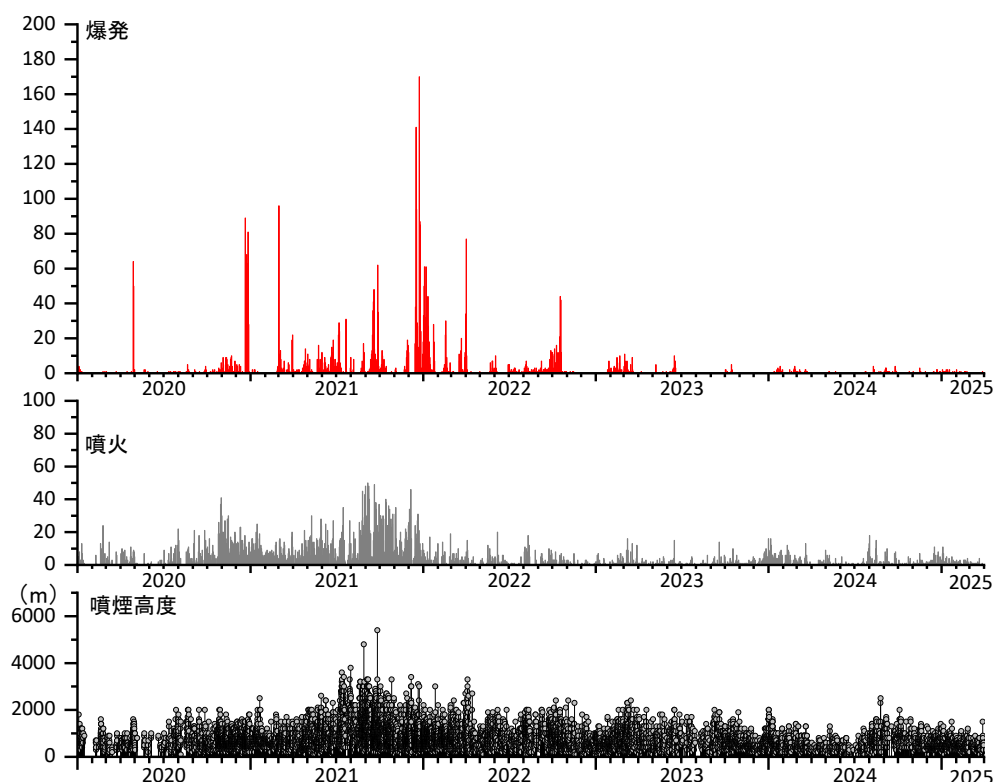


図 38 2021 年 1 月～2025 年 3 月までの日別の爆発回数、噴火回数、噴煙高度。

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 11 月以降、爆発回数は著しく減少している。一方、爆発的でない噴火は依然として継続しており、2,000 m 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経験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 (1) 式を地震動振幅 (A) のみによって表現する (1)' 式を考えて火山灰放出量を求めた。

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

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、この値を用いて 2025 年 3 月までの火山灰放出量を求めた。使用した観測点は御岳火口から 2.5km 離れた気象庁のナベダオ観測点 (ボアホール) である。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 38 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、2022 年 11 月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 39 に式(1)’を用いて推定した月別の火山灰放出量を示す。2024 年 1 月以降についてみると、2024 年 1 月は 11 万トンであったが、2 月には 1 万トンと約 1/10 になった。1 万トン程度の火山灰放出量は 6 月まで続いた。7 月以降は増加傾向を示し、10 月には 17 万トンまで急増した。これは、10 月ごろの爆発と噴火回数の増加と整合的である。

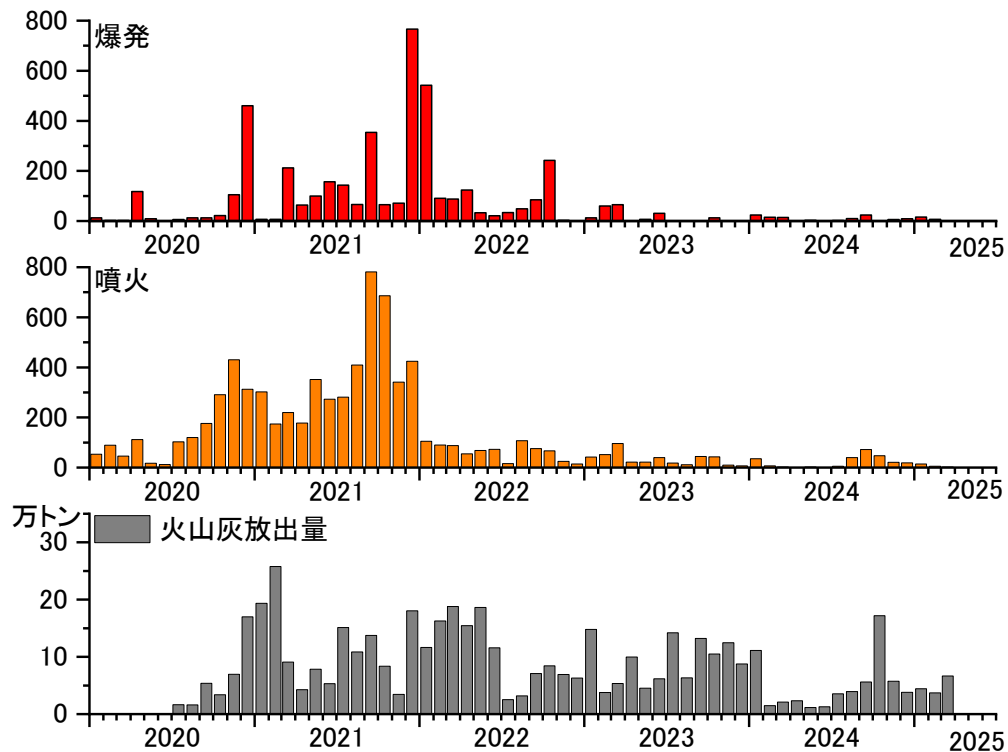


図 39 諏訪之瀬島の月別の噴火活動。上段：気象庁観測による爆発回数（赤棒）。中段：気象庁観測による噴火回数。下段：(10)’式を用いて推定した火山灰放出量（2020 年 7 月～2025 年 3 月）。

2020 年 7 月から 2025 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、2024 年がそれぞれ、141 万トン、127 万トン、110 万トン、59 万トンとなった。火山灰放出量は長期的には減少傾向にあるといえる。この量は、2020 年 7 月以降現在に至る桜島の噴火活動期よりも多いが、昭和火口の噴火活動期（2009 年から 2015 年）よりも少なく、1970 年代から 1980 年代の南岳噴火活動の最盛期に比べて 1 桁小さい。図 32 に示したように、(1)’の推定式は 2～3 倍の誤差を見込む個必要があるので、2021 年 1 月から 2025 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。

爆発回数は 2021 年が最も多く 2012 回に達した。2022 年は 1,312 回であったが、2023 年は 190 回、2024 年は 107 回と約 1/10 まで減少した。一方、2021 年か

ら 2024 年の年間火山灰放出量は 141 万トンから 59 万トンへの低下であり、約 1/3 の減少にとどまっている。令和 3 年度の報告書に記載したように、爆発に伴う噴煙は、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。したがって、爆発回数の減少は著しい火山灰放出量の減少とならない。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、火山灰放出の様式が、噴煙高度の低い火山灰連続放出に変化していることが分かる。

ii) シナブン火山

シナブン火山はインドネシア・スマトラ島北部、トバ湖の北にある成層火山である。火山体は溶岩流と火砕流堆積物からなる。17 世紀以降、噴火は発生していなかったが、2010 年 8 月下旬に新たな噴火活動が始まった。2010 年 8 月と 9 月の噴火はすべて、水蒸気爆発であった。その後、しばらく静穏であったが、2013 年 9 月に 2 回目の水蒸気爆発の活動が再開し、噴出する火山灰に新鮮なマグマ物質が含まれるようになったのち、12 月には山頂に溶岩ドームが出現した。2014 年に入ると溶岩ドームは流下を始め、溶岩流を形成するとともに、溶岩ドームの崩落は火砕流を頻繁に発生させた。2014 年と 2015 年の噴火のほとんどは、溶岩ドームの崩落による火砕流であった。ところが、2015 年 11 月ごろから、桜島や諏訪之瀬島の噴火と同様に、噴煙柱のみを形成し、火砕流を伴わない噴火（以下、ブルカノ式噴火とする）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 5 年度は、ブルカノ式噴火に伴う爆発地震の最大振幅（ A ）と噴煙高度（ H ）の関係式を経験的に求めた。

$$\text{Log}_{10} H = 0.25 \text{Log}_{10} A + 4.33 \quad (3)$$

その上で、すべての噴火について得られる爆発地震の最大振幅から噴煙高度を推定し、噴煙高度は噴出率の 1/4 乗式に比例する関係式（Morton et al., 1956）¹¹⁾ に基づいて火山灰噴出率を求めた。今年度は、爆発地震の最大振幅と噴煙高度の間の経験式は誤差が大きいのので、再検討を行った。

まず、KBY 観測点（山頂から 6.8 km 北東）において観測された爆発地震の 1-2 Hz、2-3 Hz、3-4 Hz、4-5 Hz、5-20 Hz の 5 つの周波数帯域について振幅と噴煙高度の相関を検討した。周波数帯域ごとの相関係数を表 3 に示す。

表 3 周波数帯域毎の振幅と噴煙高度の相関係数

周波数帯域	相関係数
1-2 Hz	-0.02
2-3 Hz	0.10
3-4 Hz	0.30

4-5 Hz	0.20
5-20 Hz	0.06

相関はいずれもよくないが、3-4 Hz の周波数帯域について最も高い相関が得られた。そこで、この周波数帯域を用いることとする。この場合、(3) 式は、以下のよう置き換えられる。

$$\text{Log}_{10} H = 0.23 \text{Log}_{10} A_s + 4.51 \quad (4)$$

対数振幅と対数噴煙高度の間の線形一次近似式の傾き 0.23 は、式 (2) に等価な 0.25 (3 式) に近い。(3) 式では両者の線形一次近似式の切片を 4.33 としたが、図 40a に示すように、対数噴煙高度のばらつきが大きいので、切片を w によりパラメータ化し、

$$\text{Log}_{10} H = 0.23 \text{Log}_{10} A_s + w \quad (4)'$$

対数噴煙高度のばらつきの原因は、噴煙上昇時における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)¹²⁾ と、風によって噴煙高度が低下すること (Degruyter and Bonadonna, 2012)¹²⁾ が考えられる。

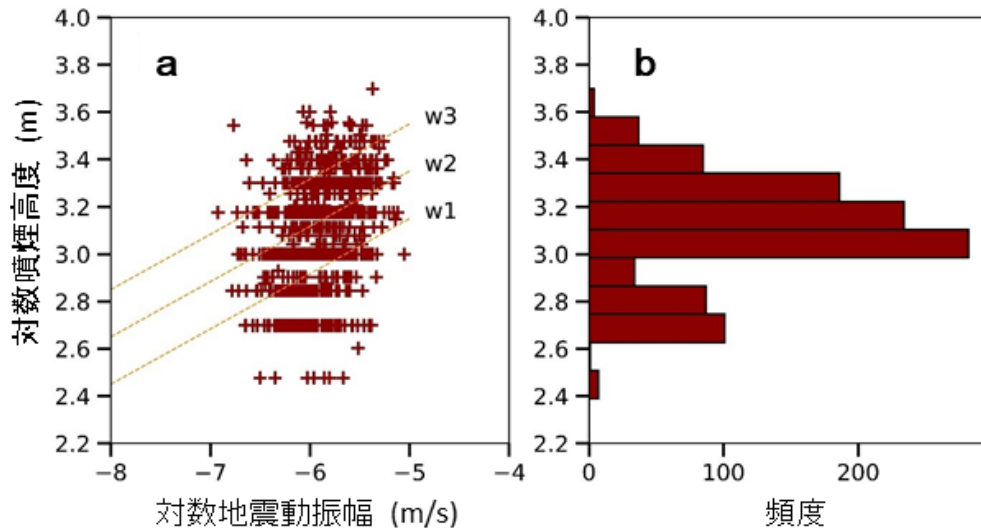


図 40 (a) 爆発地震の対数スペクトル振幅 (3-4 Hz、KBY 観測点) と目視観測された対数噴煙高度の関係。(b) 対数噴煙高度の頻度分布。

(2) 式と (4)' 式を考慮すると噴出率 (\dot{M}) は以下のように記述することができる。

$$\dot{M} = \left(\frac{A_s^{0.23} \times 10^w}{k} \right)^4 \quad (5)$$

ブルカノ式噴火の継続時間を t_d とすれば、1 回のブルカノ式噴火により噴出する火山灰重量 M は以下のように表すことができる。

$$M = \dot{M} t_d. \quad (6)$$

ここで問題となるのが、パラメータ k であるが、シナブン火山の場合は噴出率に関する情報がほとんどない。わずかにある情報は、2018年2月19日に発生した最大規模の爆発的噴火に関するものだけである。この噴火ではレーダ観測によって噴出量 0.8×10^9 kg と噴煙高度 7.4 km が得られている (Syarifuddin et al., 2020)¹³⁾。この場合、 $k=183$ となる。しかしながら、この噴火は噴煙柱崩壊型の火砕流を伴っており、シナブン火山においてよく発生するブルカノ式噴火とは異なる様式をもつ。シナブン火山のブルカノ式噴火は桜島のブルカノ式噴火と類似しているので、図 37 を参考にすることができる。桜島では k の値は 400 を上限とし、その多くは 100 までの範囲にあるので平均的な値として $k=250$ も候補になりうる。

まず、図 40 の切片 w について 3 種類の切片 $w1=4.31$ 、 $w2=4.51$ 、 $w3=4.71$ を検討した。図 41 に、3 種類の切片について個々のブルカノ式噴火によって噴出する火山灰重量を示す。噴出質量の最大値で比較すると $w1$ 、 $w2$ 、 $w3$ それぞれについて、 8.1×10^5 kg (810 トン)、 5.1×10^6 kg (5,100 トン)、 3.24×10^7 kg (32,400 トン) となり、2 桁近い差がある。同等の噴煙高度に達する桜島のブルカノ式噴火では、規模の大きいものは数万トンの火山灰を噴出するので、 $w3$ が最も妥当と考えられる。

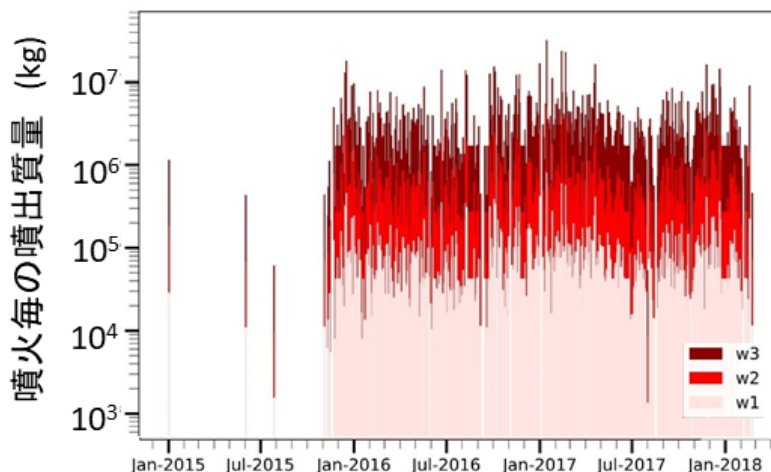


図 40 個々のブルカノ式噴火によって噴出する火山灰重量

次にパラメータ k について検討する。 $k=183$ 、250、400 を候補とする。図 41 にブルカノ式噴火の活動期全体に渡る積算噴出質量を示す。 $k=400$ とした場合、2 年超に渡る火山灰の積算噴出質量は 8×10^7 kg (8 万トン) にしかない。この値は桜島の 1 か月の火山灰放出量であり、少なすぎる。 $k=183$ とした場合、積算噴出質量は 2×10^9 kg (200 万トン)、 $k=250$ とした場合、積算噴出質量は 5×10^8 kg (50 万トン) に達する。最近の桜島のブルカノ式噴火と比較するとこれらの値が妥当かもしれない。

$k=250$ 、 $w=4.71$ として、ブルカノ式噴火の活動期全体に渡る積算噴出質量を見積もった。結果を図 42 に示す。積算噴出質量は 3×10^9 kg (300 万トン) となった。

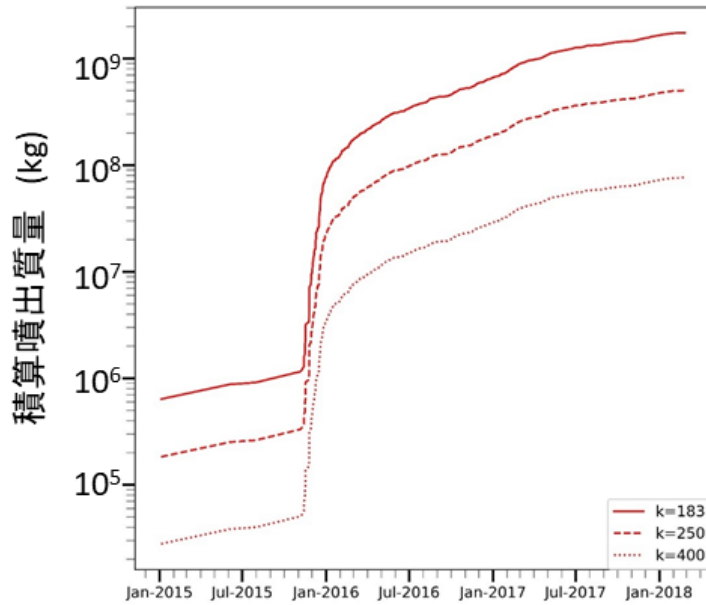


図 41 ブルカノ式噴火の活動期全体にわたる積算噴出質量

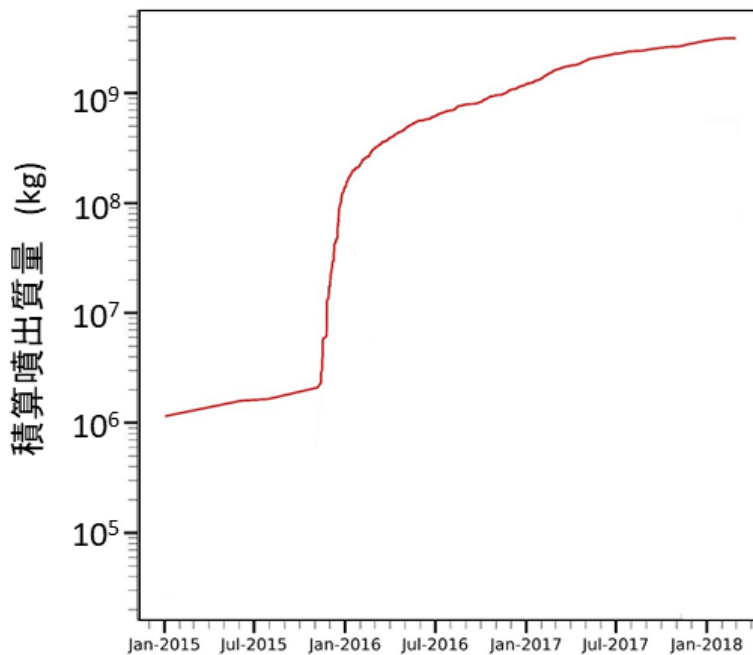


図 42 ブルカノ式噴火の活動期全体にわたる積算噴出質量。 $k=250$ 、 $w=4.71$ とした。

d) 噴煙シミュレーションによる噴煙高度の検討

課題 C3 と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを行った。そして、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載せることで火山灰が大気中に運ばれ、噴煙が

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 の高度化を目指している。

ブルカノ式噴火における噴出率の時間変化が噴煙挙動に与える影響を調べるため、流入条件に時間関数を入れたシミュレーションを実行した（図 43）。昨年度までの計算と同様に噴出率を一定とした場合に加え、噴出率が噴火開始から増加してピーク値を超えてから徐々に低下する場合を想定した。噴出密度や火口半径は一定とし、噴出速度を変化させることで噴出率変化を表現した。いずれも噴出率の最大値は 10^5 kg/s とブルカノ式噴火に標準的な値を用いた。また、桜島の 2013 年 8 月 18 日噴火規模を想定したシミュレーションの結果、噴出率の時間変化が噴煙高度や噴煙挙動に影響を与えることが観察された（図 44）。

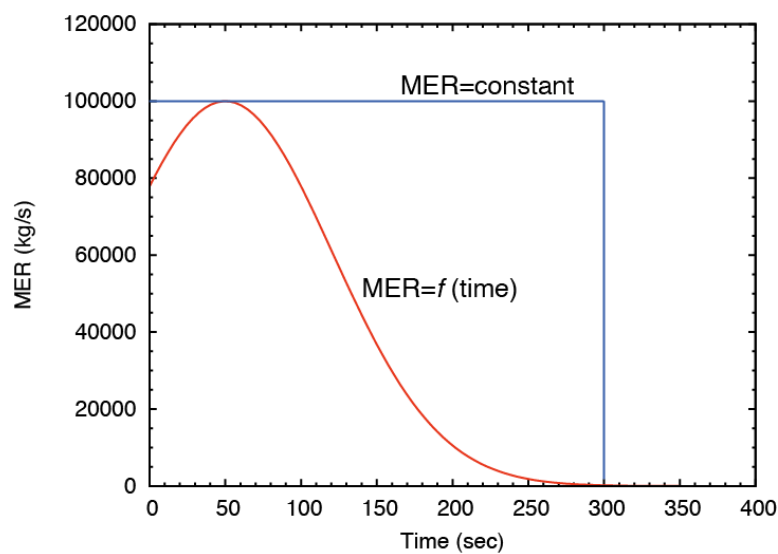


図 43 ブルカノ式噴火を想定した 3 次元数値シミュレーションの噴出条件。噴出率が一定の場合（青線）と時間変化する場合（赤線）。いずれも最大値は 10^5 kg/s。

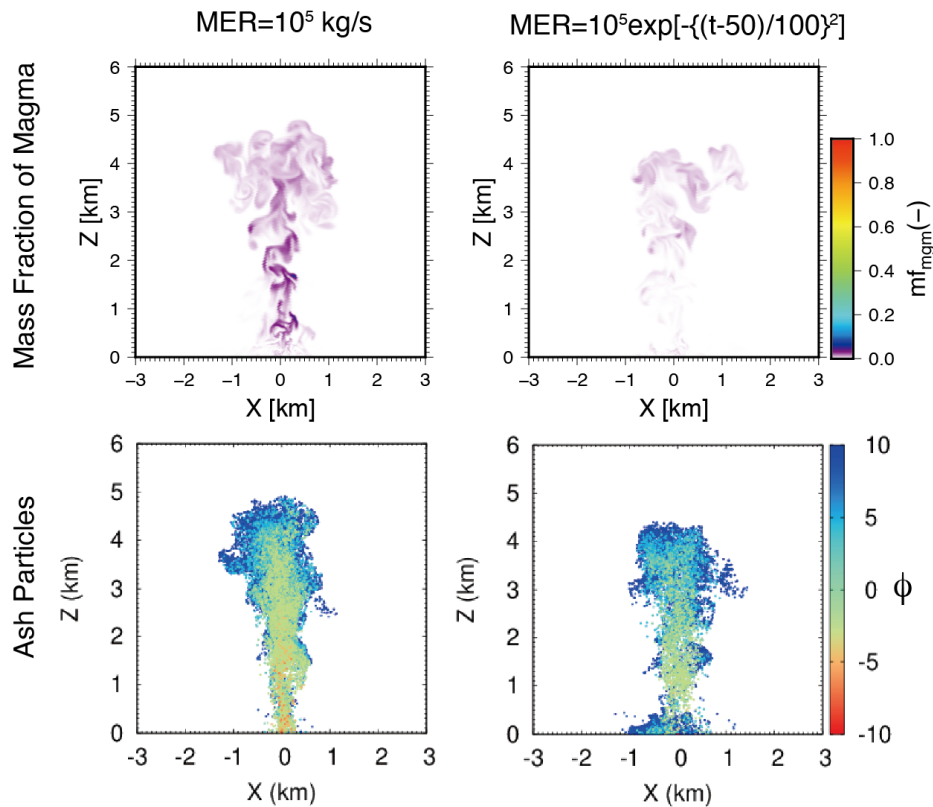


図 44 ブルカノ式火山噴煙の 3 次元数値シミュレーション結果。噴出率を図 43 の青線の条件とした場合（左列）と赤線の条件とした場合（右列）。火口を含む鉛直断面における噴出物の質量分率分布（上段）と火山灰粒子分布（下段）を示す。下段における粒子の色は ϕ スケールでの粒子サイズを表す。

噴出率一定の場合に比べ噴出率が変化する場合は、噴煙高度は数 100m 低下した。高度の違いの絶対量は小さいが、噴煙高度全体からすると 10% 以上に相当する。噴煙高度は噴出率に依存するとしたこれまでの解析解や経験則からのズレがあることを示す。また、時間依存性のある噴出率の場合、噴火後半の噴出速度が低下したときに小規模な火砕流が発生する様子が確認できた。これは桜島 2013 年噴火で観察された火砕流に類似する可能性がある。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

令和 5 年度に実施した、ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度の鉛直プロフィール観測結果をうけて、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。令和 5 年度は火山噴火時の気流予測のため大気流れの計算手法の開発を行った。令和 6 年度は、噴煙の移流・拡散の予測精度向上を目指して、大気流れによって移流・拡散する火山噴出物のモデル化を行い、計算手法の改良を行った。

a) 風速ベクトルとその場観測

i) 調査概要

これまで、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の観測を実施してきた。また、気象と併せて上空の火山灰のモニタリング調査も実施した。さらに並行してドップラーライダーを用いて上空の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てきた。今回は、2021 年～2023 年の 3 年間に実施した 73 ケースの観測事例の中から、ドローンの風速計センサに FT205 を使用しており、かつドップラーライダー観測も実施している 29 ケースの観測事例を抽出し、ドローンの上昇・下降中の観測データの風向、風速及び風の乱流強度に関して解析を行った。

対象とする観測地点は図 45 に示す有村地点（Site A）及び黒神地点（Site B）である。解析対象とした観測事例のドローンのフライト概要を表 4 に示す。



図 45 観測対象地点（Site A：有村地点、Site B：黒神地点）

表 4 解析対象とした観測事例のドローンのフライト概要

Run	観測日 観測地点	離陸時刻 (時:分: 秒)	着陸時刻 (時:分: 秒)	飛行時間 (分: 秒)	フライト内容 (到達高度, 上昇速度, 下降速度)
5	2021/09/28	14:48:30	15:01:58	13:28	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s

8	黒神	15:43:48	15:57:01	13:13	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
12	2021/09/29	11:34:55	11:46:30	11:35	1000 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
13	黒神	11:52:36	12:02:20	9:44	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
14	2021/09/30	10:20:17	10:33:44	13:27	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
17	有村	11:27:20	11:40:17	12:57	1000 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
18		11:46:58	12:01:06	14:08	1000 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
19		13:12:00	13:22:30	10:30	400 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
20		13:27:40	13:39:50	12:10	500 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
21		13:48:40	13:59:25	10:45	600 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
27	2021/11/16	11:32:00	11:49:12	17:12	500 m まで, 上昇 1m/s, 下降 1m/s
28	黒神	12:45:05	12:57:53	12:48	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
29		13:38:40	13:48:55	10:15	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
31		15:01:30	15:11:05	9:35	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
34	2021/11/17	11:08:00	11:17:50	9:50	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
37	有村	13:06:20	13:19:20	13:00	1000 m まで, 上昇 4m/s, 下降 2m/s
38		13:26:30	13:35:30	9:00	500 m まで, 上昇 2m/s, 下降 2m/s
39		13:38:50	13:47:50	9:00	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s
40	2021/11/18	10:54:18	11:08:15	13:57	800 m まで, 上昇 2m/s, 下降 2m/s
43	有村	11:40:00	11:51:45	11:45	300 m まで, 上昇 4m/s, 下降 3m/s

44		12:17:30	12:32:05	14:35	1000 m まで、上昇 4m/s、下降 2m/s
45		12:44:02	12:54:47	10:45	300 m まで、上昇 1m/s、下降 1m/s
67a	2023/05/17 有村	11:35:10	11:42:10	7:00	400 m まで、上昇 2m/s、下降 2m/s
67b		11:42:11	11:47:03	4:52	400 m まで、上昇 3m/s、下降 3m/s
67c		11:47:04	11:52:13	5:06	400 m まで、上昇 3m/s、下降 3m/s
68a		11:55:44	12:09:04	13:20	400 m まで、上昇 1m/s、下降 1m/s
68b		12:09:05	12:13:55	4:50	400 m まで、上昇 3m/s、下降 3m/s
69a		12:18:28	12:32:38	14:10	400 m まで、上昇 1m/s、下降 1m/s
69b		12:32:39	12:37:45	5:06	400 m まで、上昇 3m/s、下降 3m/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 46）。機体の中心上部に高さ 45 cm のアルミポールを設置し、その上端に超音波風速計を取り付けた。乱流計測のため、高時間分解能で計測が可能なタイプの風速計（FT205；FT Technology 社または TriSonica Mini；Anemoment 社）を搭載した。風向風速データは 10Hz でデータロガーに収録し、フライト終了後にデータを回収した。また、桜島上空での火山灰及び火山ガス濃度の分布計測では、PM センサ（Pocket PM2.5 Sensor；ヤグチ電子工業）及び火山ガスセンサ（QRAE3；RAE Systems）を搭載した。さらに、温湿度センサ（iMet-XQ2；InterMet Systems 社）を搭載し、気温、湿度、気圧の計測を行った。

フライトは、観測地点の直上を一定高度でホバリングしながら計測する方法と指定速度まで上昇または下降しながら計測する方法の 2 種類を実施した。フライト高度は最大で 1,000 m 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_{2.5}、PM₁₀、火山ガスで、計測間隔は、風向風速が 0.1 秒、その他が 1 秒である。

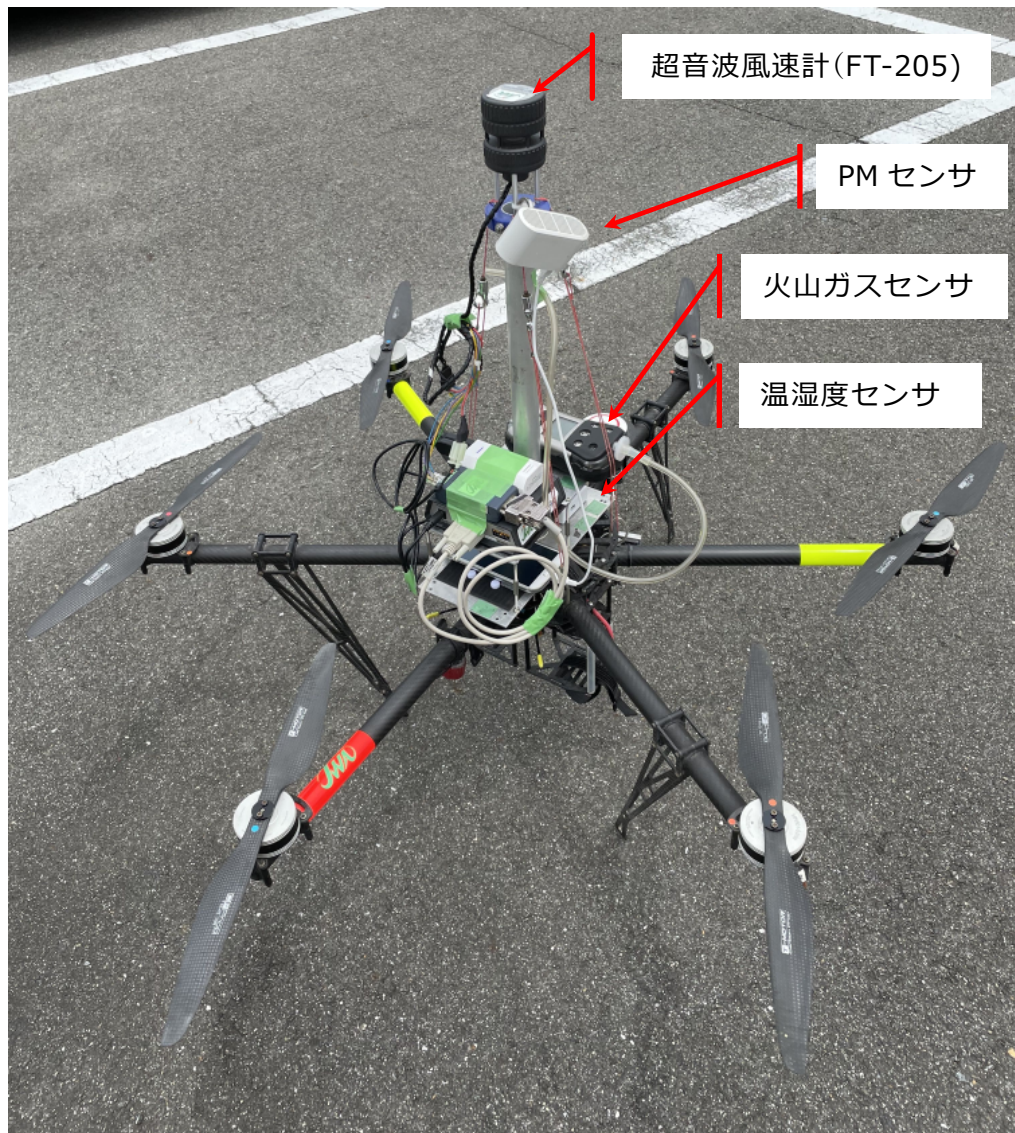


図 46 調査で使用したドローンの外観（SPIDER CS-6）

ドップラーライダーは、三菱電機製の DIABREZZA W シリーズ（LR-E1S5SB）を使用した。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 47 に、主要性能を表 5 に示す。



図 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）

表 5 調査に使用したドップラーライダーの主要性能

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

RH : Relative Humidity, RoHS : Restriction of Hazardous Substances

※) 三菱電機技報 Vol.89 No.3 2015 より引用

iii) 調査結果

①平均風速、風向およ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 30 m 毎にその上下 15 m 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+0.5 m/s として補正を行った。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 48～図 53 に、下降時の結果を図 53～図 57 に示す。平均風速は、上昇時、下降時ともにドローンとドップラーライダーの結果がよく一致していたが、下降時にはドップラーライダーに対してドローンの方がやや過大傾向であった。乱流強度はドローンとドップラーライダーの高度に対する変化傾向は概ね一致したが、いくつかの事例の特定高度でその差が大きく異なるケースもみられた。平均風向は、上昇時、下降時とも概ねドローンとドップラーライダーの結果が一致したが、風速の弱いケース

(Run44、Run45 など) で高度に対する風向の変動が大きく、ドローンとドップラーライダーとの差が大きくなる場合がみられた。

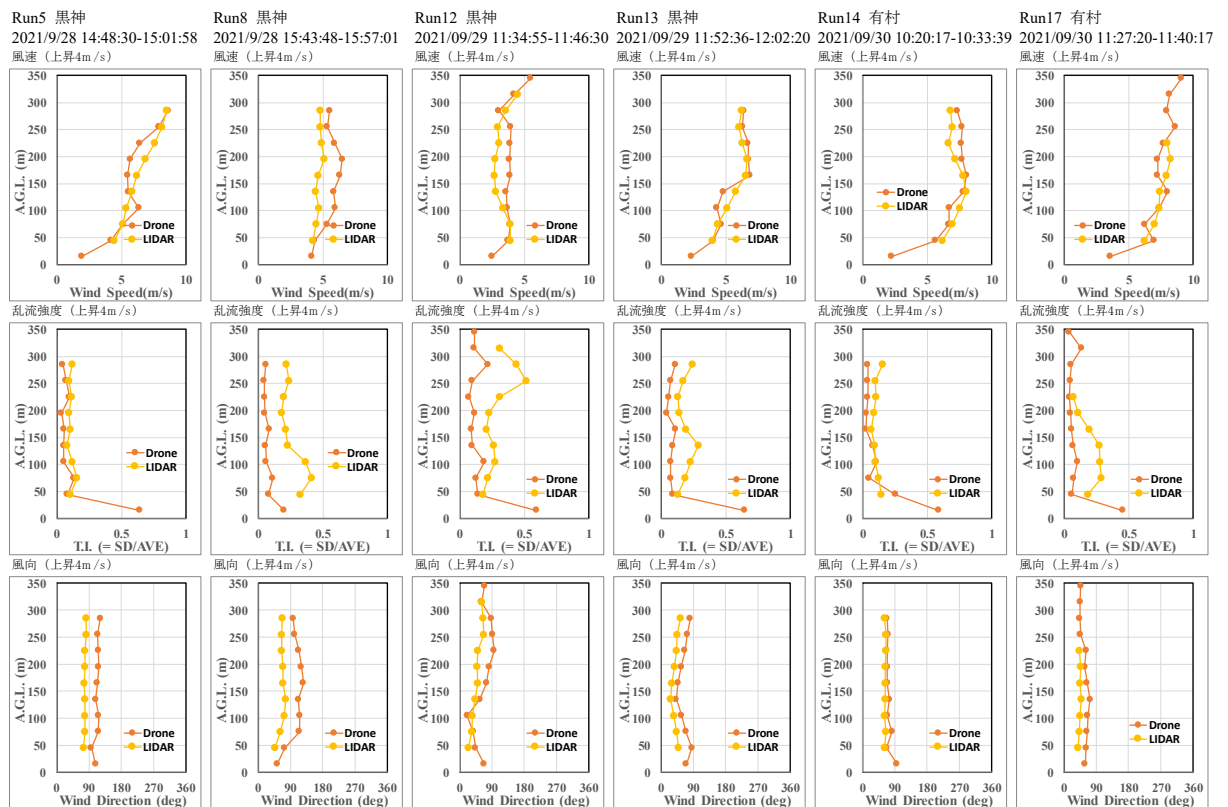


図 48 ドローン上昇時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル（上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向）

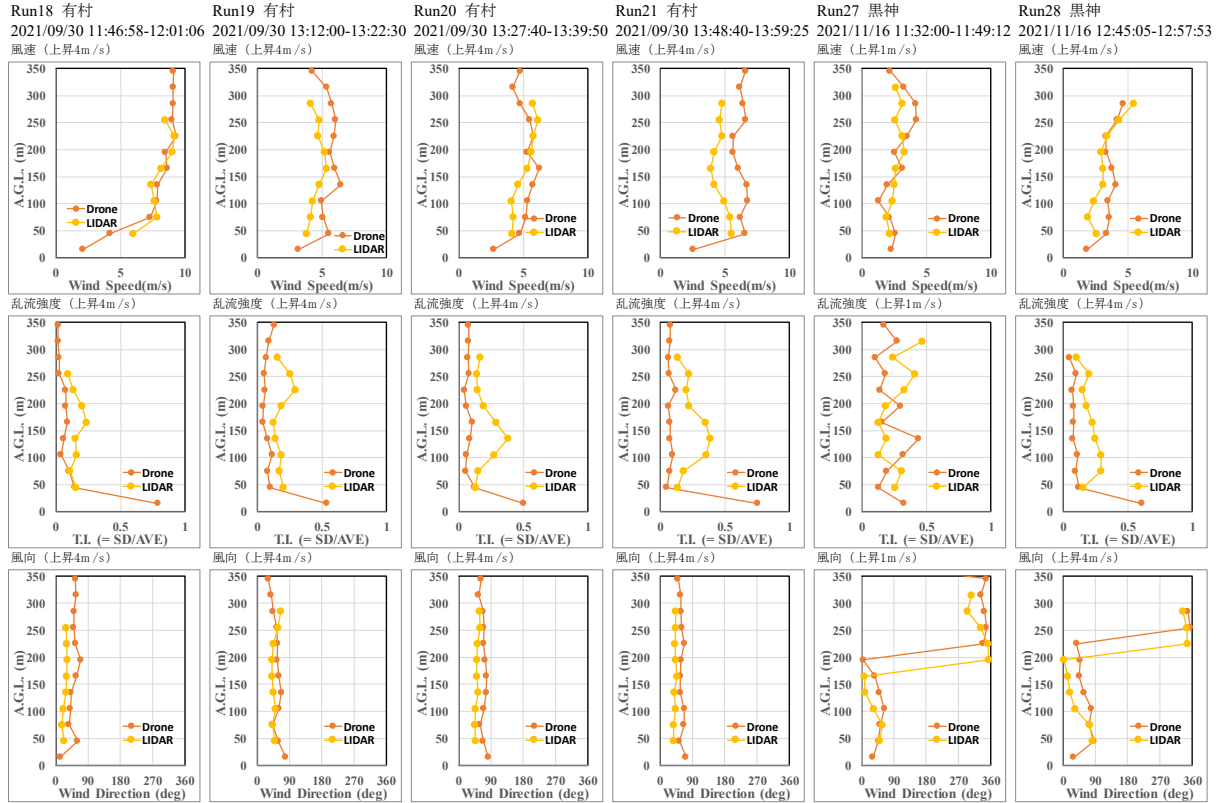


図 49 ドローン上昇時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル (上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向)

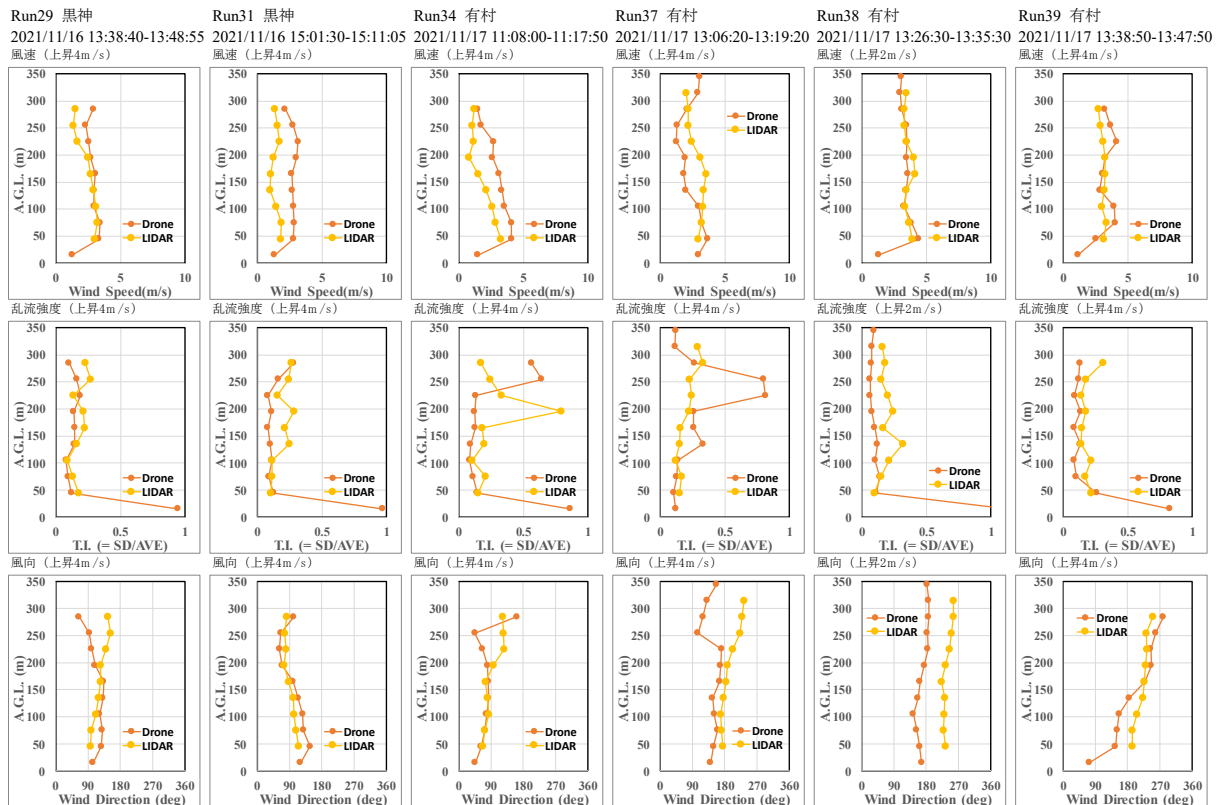


図 50 ドローン上昇時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル（上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向）

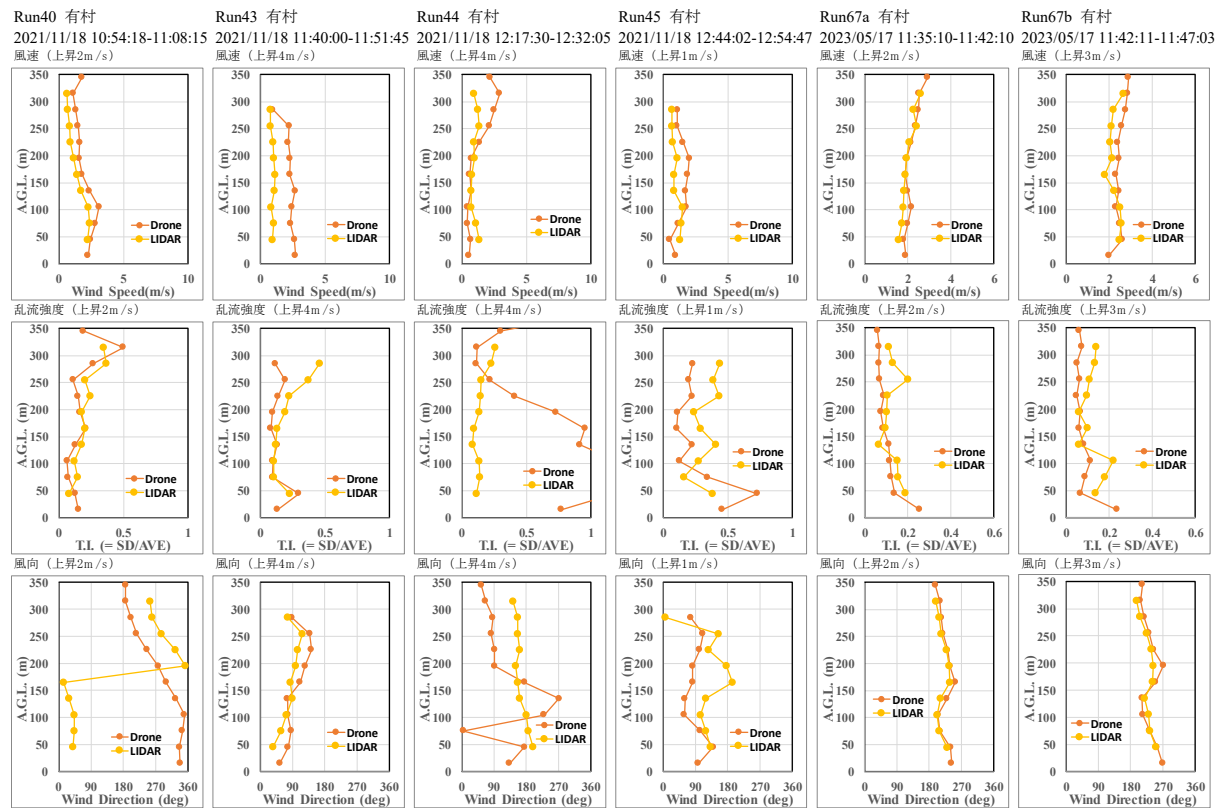


図 51 ドローン上昇時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル（上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向）

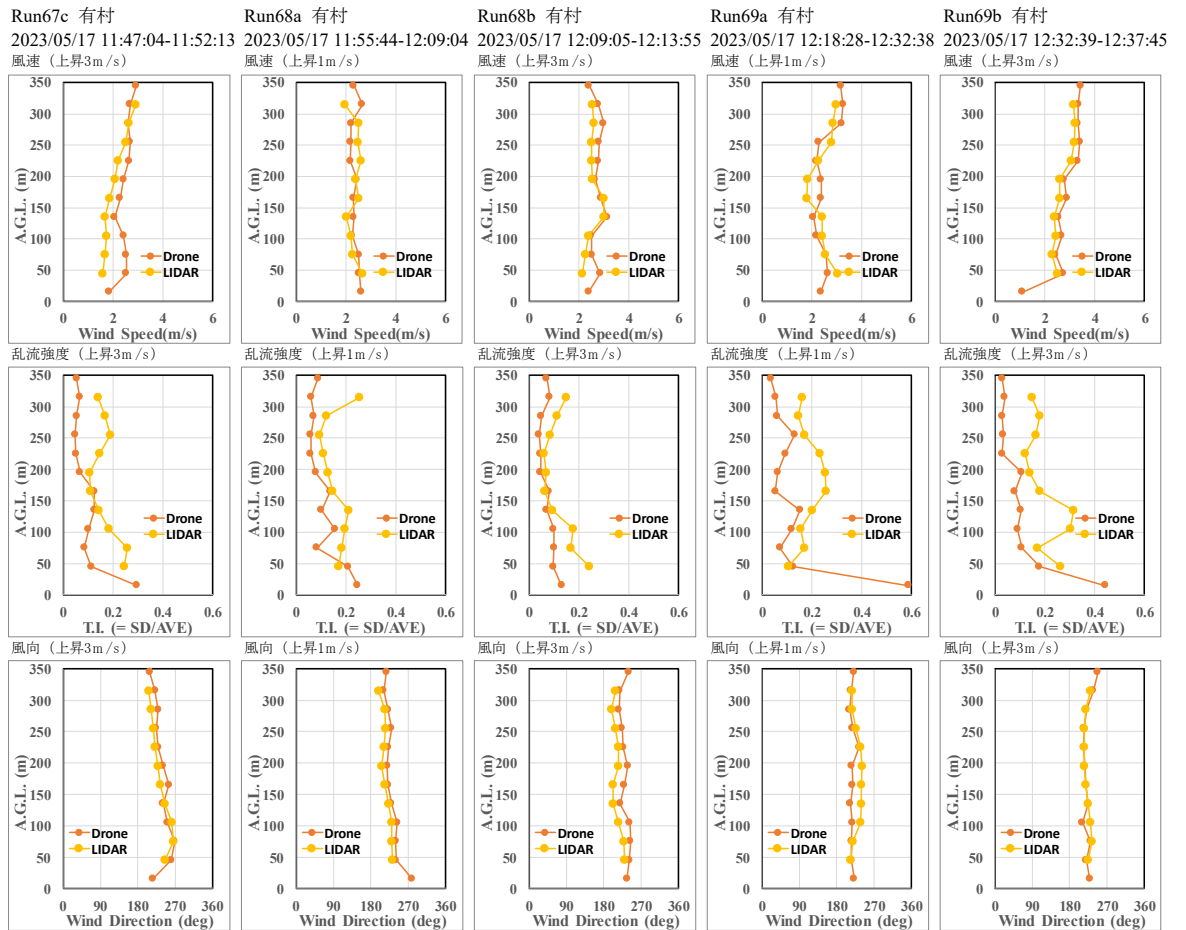


図 52 ドローン上昇時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル (上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向)

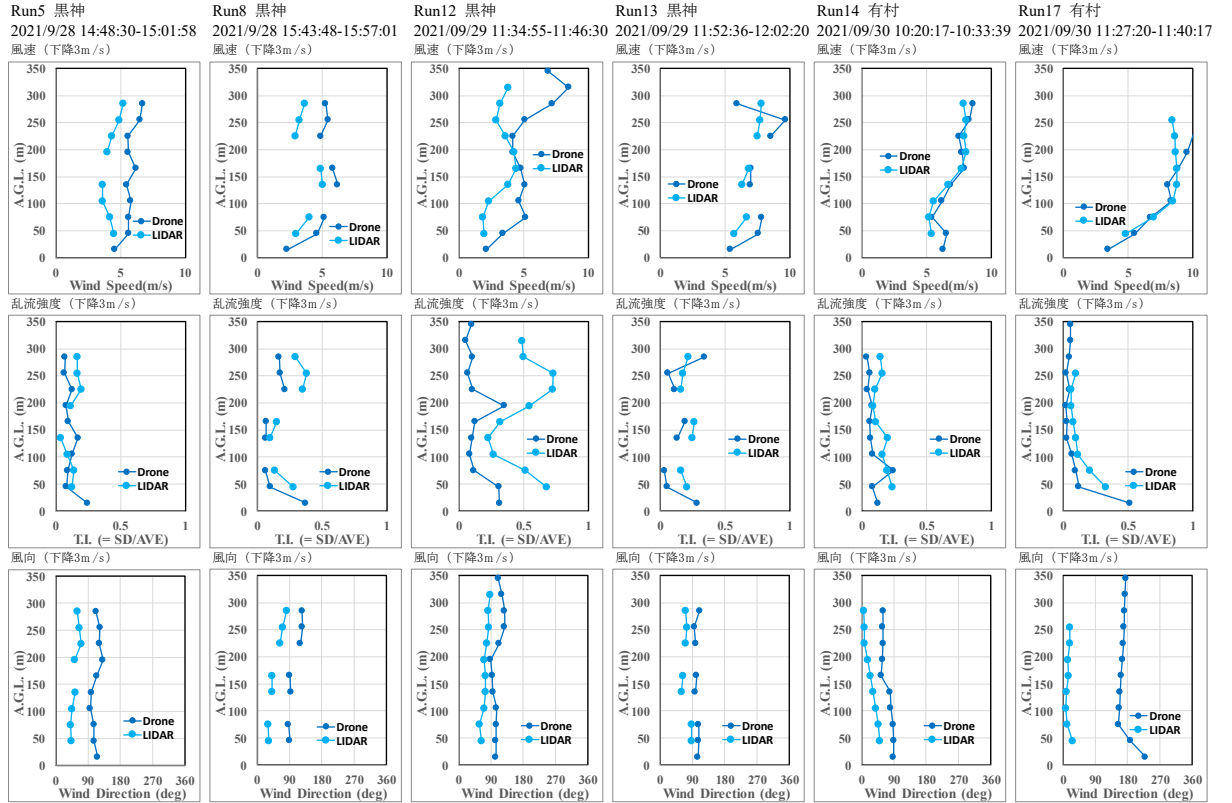


図 53 ローン下降時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル
 ル（上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向）

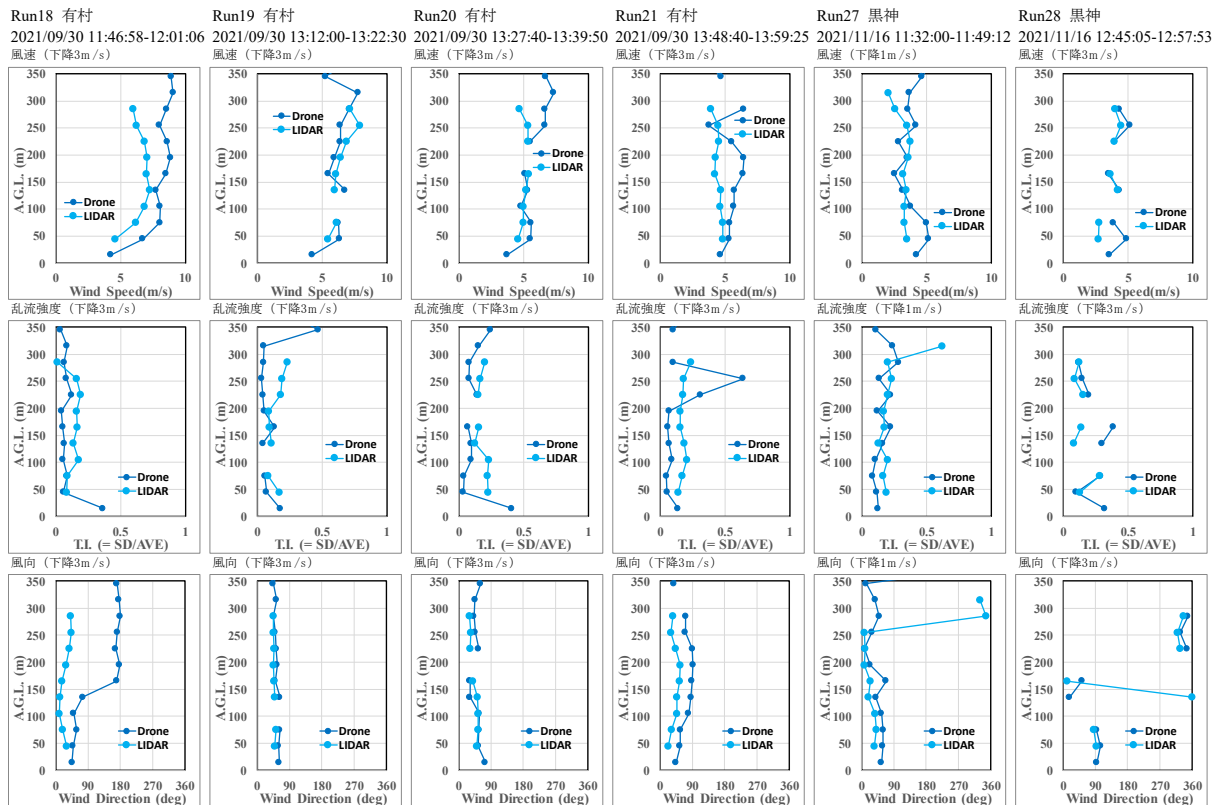


図 54 ドローン下降時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル（上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向）

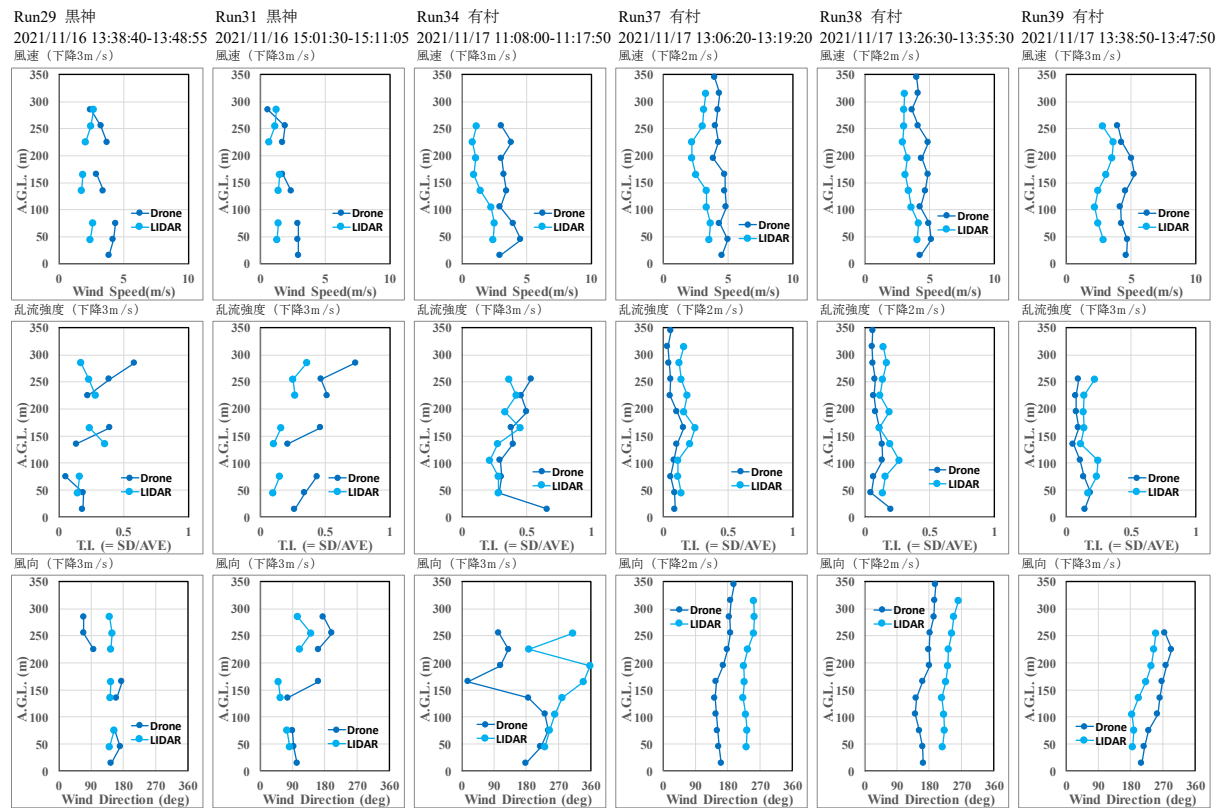


図 55 ドローン下降時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル（上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向）

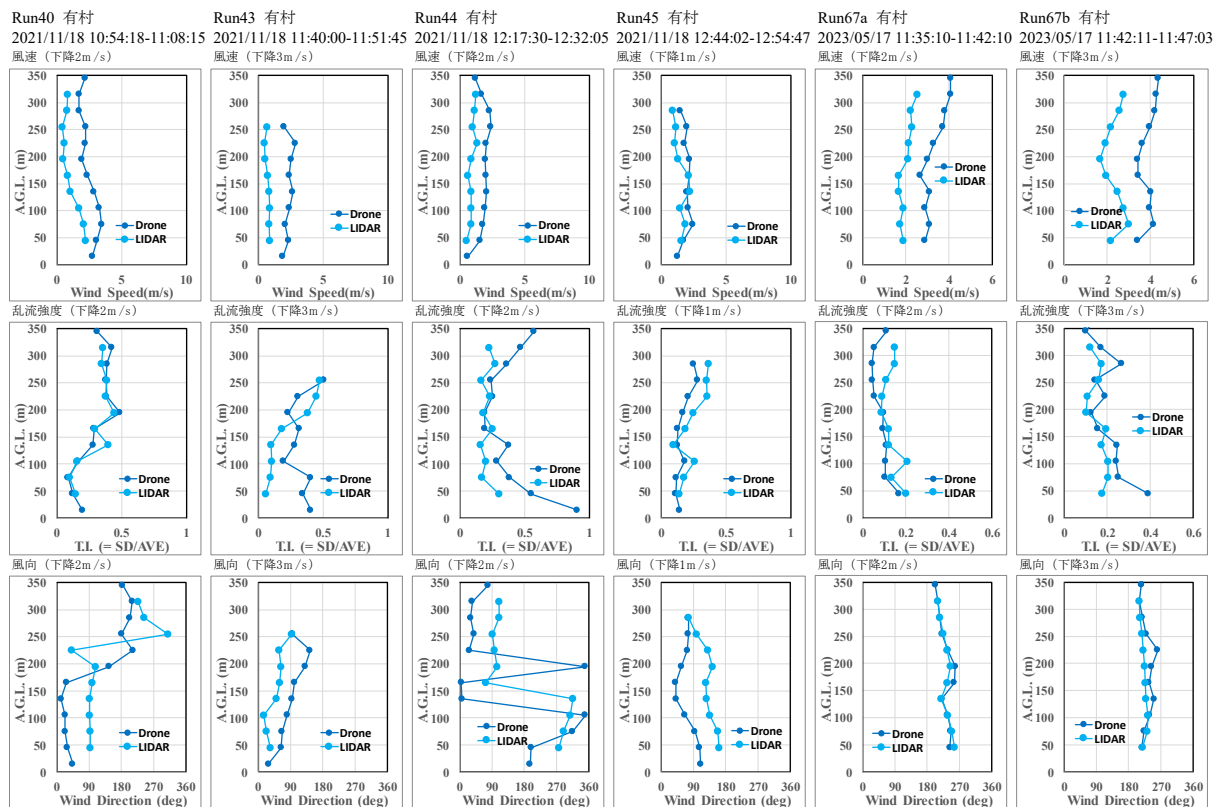


図 56 ドローン下降時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル（上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向）

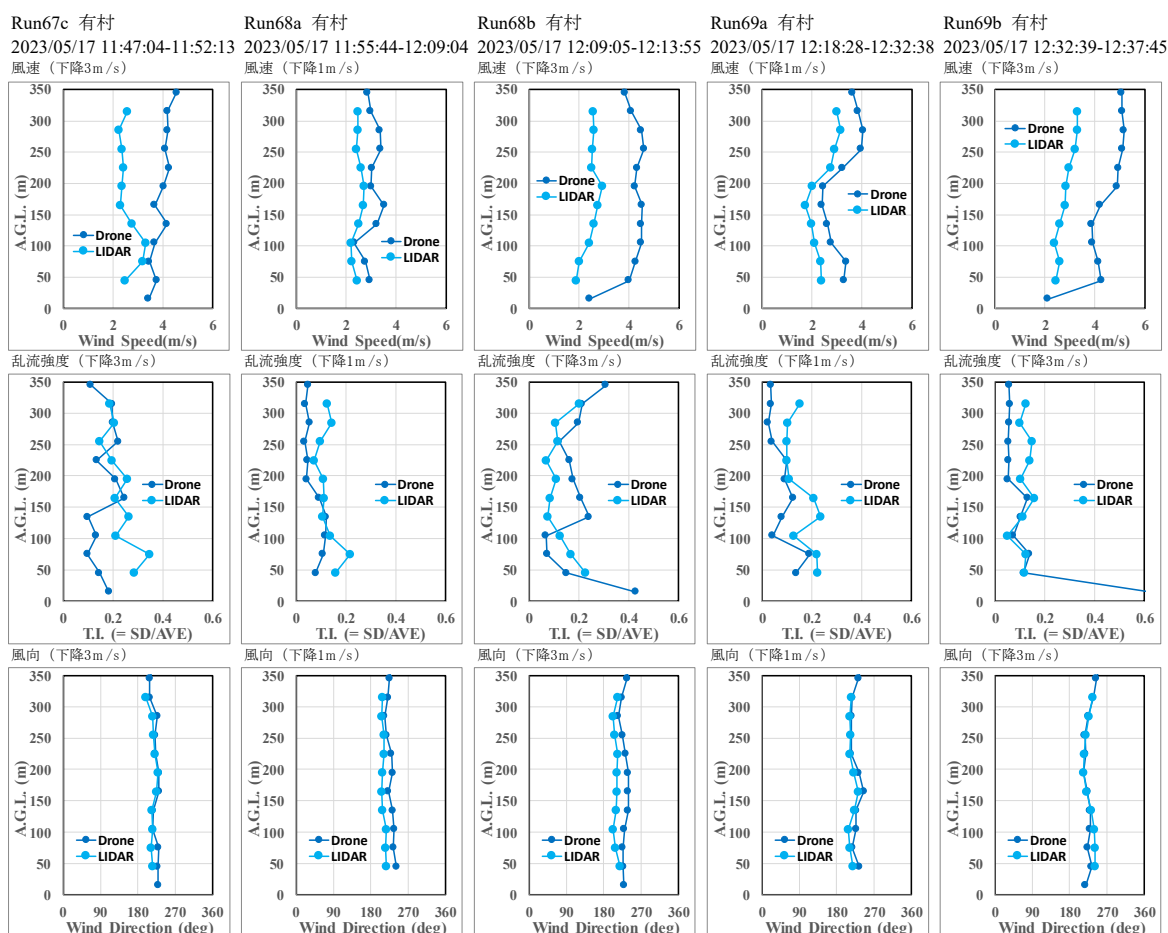


図 57 ドローン下降時のドローン及びドップラーライダーの観測の鉛直プロファイル（上段：平均風速、中段：乱流強度、下段：平均風向）

②3 年間の平均風速、乱流強度の比較

2021 年～2023 年の 3 年間の 29 ケースを対象として平均風速及び乱流強度を比較した。図 58 に示すように、平均風速はドローンとドップラーライダーとの間にややバラつきがあるものの明瞭な関係がみられた。一方、乱流強度についてみるとバラつきが大きく、ドローンを上昇・下降させながらの乱流強度の観測は難しいことがわかった。

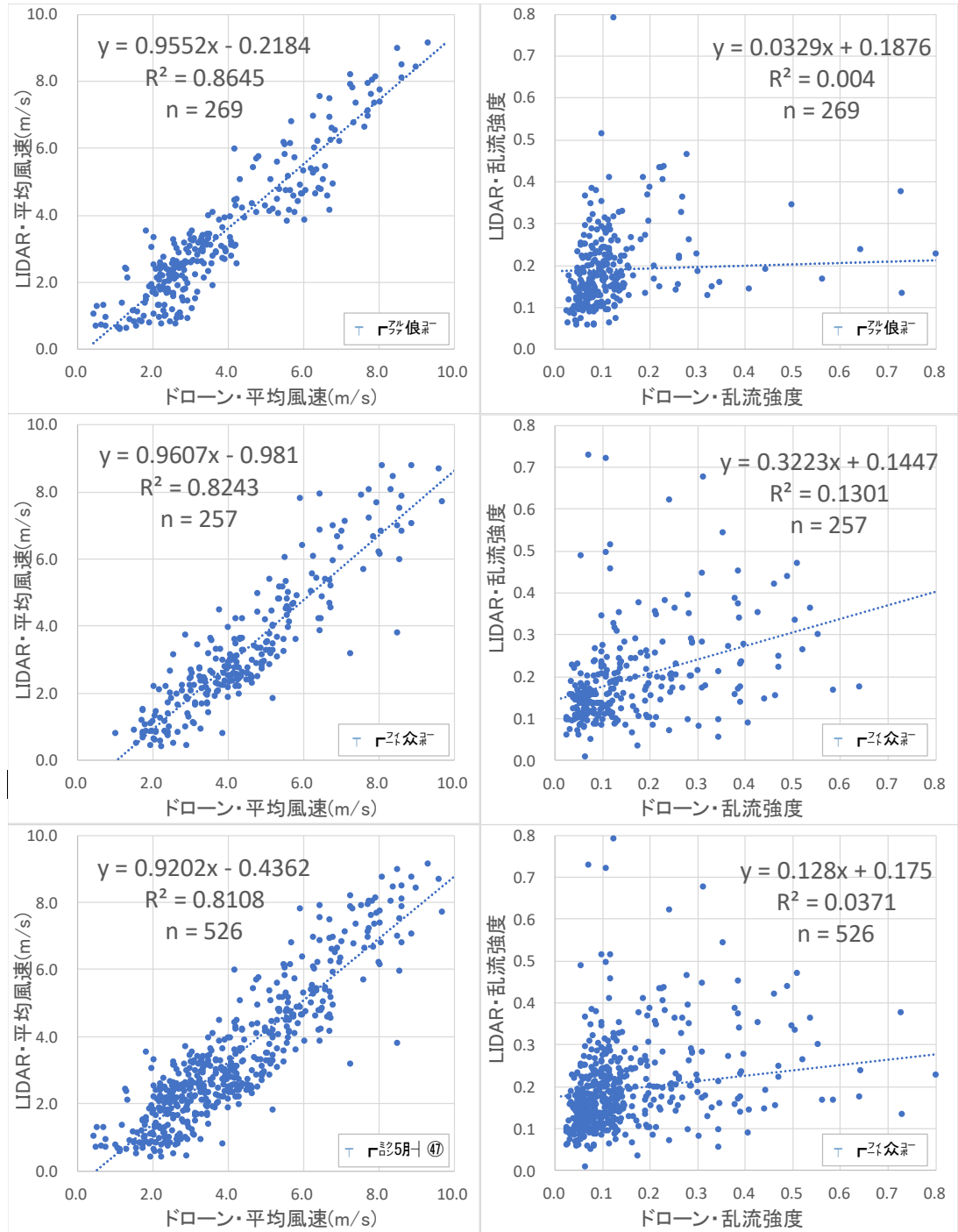


図 58 ローンとドップラーライダーの平均風速及び乱流強度の比較（対象期間：2021～2023 年）。左列：平均風速、右列：乱流強度。上段：上昇時の観測、中段：下降時の観測、下段：全データ。

次に、平均風速と乱流強度の関係について比較した結果を図 59 に示す。図の横軸は平均風速、縦軸は乱流強度であり、左側の図がドローン観測、右側の図がドップラーライダー観測の結果である。ドローン観測では、平均風速の増大に伴い乱流強度が低下するという特徴が捉えられており、定性的には妥当と言える結果が得られた。ドップラーライダー観測では、ドローン観測よりもバラつきが大きいもの

の、両者の変化傾向はよく類似しており、乱流強度はドローン観測の方が系統的にやや小さい値となった。

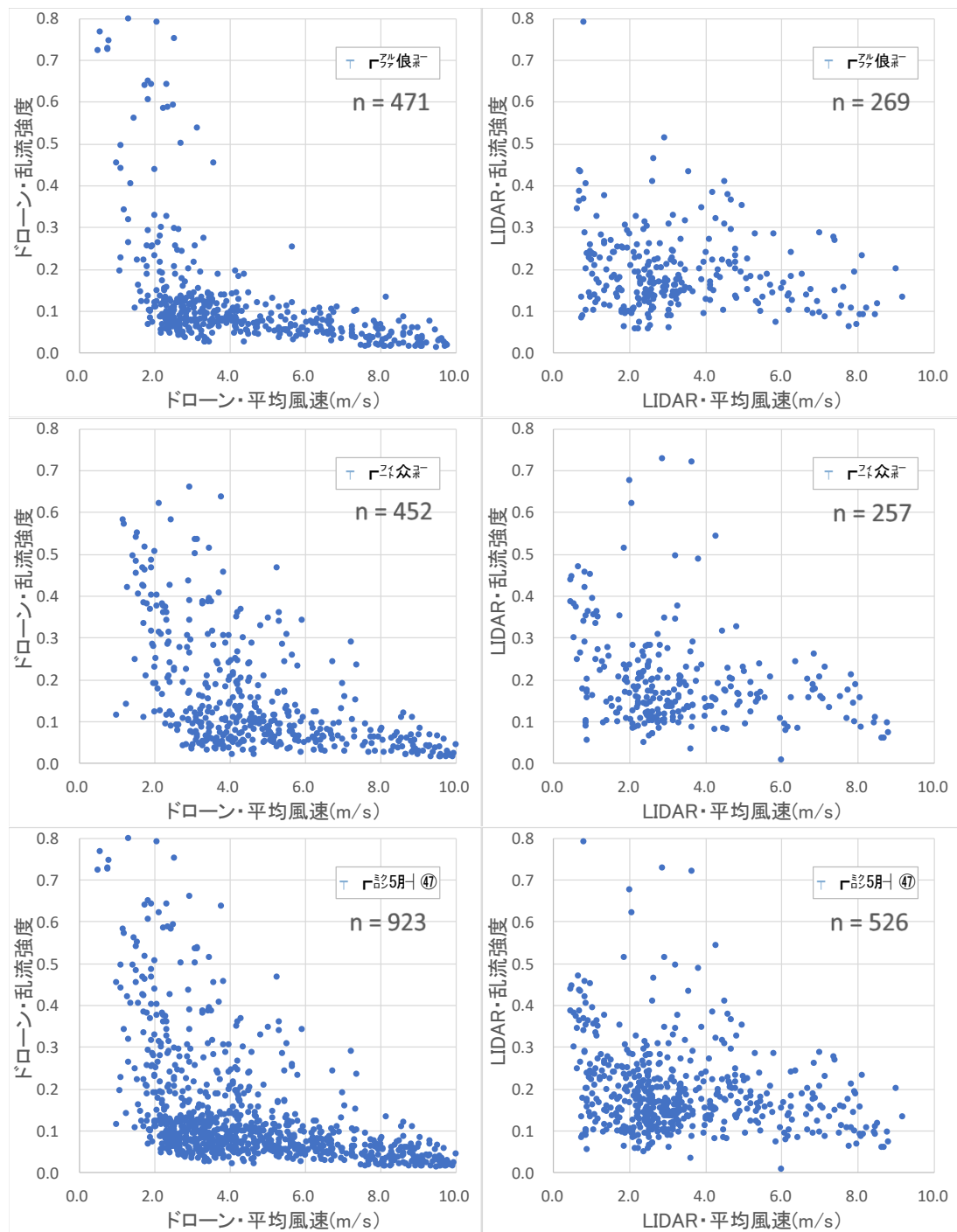


図 59 平均風速と乱流強度の関係（対象期間：2021～2023 年）。左列：ドローン観測、右列：LIDAR 観測。上段：上昇時の観測、中段：下降時の観測、下段：全データ。

③ まとめ

移動しながらのドローンによる風向、風速の観測値が概ねドップラーライダーの観測値と一致していることが確かめられた。ただし、乱流強度についてはバラつきが大きく観測は難しいことが明らかとなった。

b) 火山周辺の気流予測計算手法の改良

火山噴火時の噴出物を含む大気の解析を行う場合、大気の主成分である乾燥空気に混ざって、火山ガスだけでなく噴石、礫、火山灰、エアロゾルなど種々の大きさをもつ固体粒子、さらには、雲、雨滴、氷粒などが移流・拡散する混相密度流れを扱うことになる。令和5年度は、火山噴出物を含む大気流れを解析する際に、乱流モデルとしてLES (Large Eddy Simulation) を適用するために混相密度流の支配方程式系を作成した。令和6年度は、支配方程式系に火山噴出物のうち固体粒子の移流・拡散を組み込むため、運動特性を粒子の大きさに応じて分類し、モデル化を進めた。その際、大気密度流れ場は乾燥空気を含めて固体相と流体相に分類し、固体相において粒子の運動は運動方程式を用いてラグランジュ的に追跡し、流体相は評価空間内の単位体積当たりの保存式を用いてオイラー的に解くためのモデル化を行った。

i) 火山噴出物の分類

乾燥空気に混ざって火山噴出物が移流・拡散する場合、それらは乾燥空気によって輸送されるスカラー量として扱うことができる。その際、火山噴出物内の各成分の移流・拡散特性は異なるので、その特性に応じたモデル化が必要になる。乾燥空気やガスは圧力や温度に応じた体積変化を伴うが、固体粒子・液体粒子は気体に比べて体積変化は小さい。大きな固体粒子は1つ1つの粒子の運動をラグランジュ的に追跡することができるが、十分小さくて数が多くなると群としての運動を扱うことになる。その際、評価体積に対して十分小さな固体粒子は、評価体積内において群としての質量は変化することができるので、粒子単位質量当たりの体積も変化するとみなせる。さらに、評価体積で空間平均された粒子群としての運動は流体として扱うことができ、オイラー的に保存式を用いて解くことができる。そこで、火山噴出物を構成する固体粒子の運動、移流・拡散特性を、ラグランジュ的に運動を追跡することができる固体相と、評価体積で空間平均された粒子群としての運動を流体としてオイラー的に追跡できる流体相に分けて扱うこととした。表6に示すように流体相には乾燥空気や火山ガスだけでなく、評価体積に対して個々の粒子の体積が十分小さく粒子群としての運動を流体として扱うことができる固体、液体の粒子を含める。さらに、乾燥空気に混ざって、同じ平均速度で移流・拡散するガス、微粒子は乾燥空気と合わせて大気相として扱うこととした。以上のように火山噴出物を含む大気の構成成分を、粒子の大きさにより図60のように大きい方から大粒子、中粒子、細粒子、微粒子、さらにガスも極小の粒子として分類し、それらの運動、移流・拡散特性を以下のように対応させた。

表6 火山噴出物を含む大気の構成成分の分類と扱い

大粒子 [R]	岩塊 Rock mass	火山噴出物	固体相 [S] ラグランジュ的解析
中粒子 [L]	礫 Lapilli		
細粒子 [P]	火山灰 fine Particl		大気相 [A] 平均速度 が同じ
微粒子 [Z]	エアロゾル aerosol		
ガス [G]	H ₂ O、CO ₂ 、SO ₂ など		
乾燥空気 [D]	O ₂ +N ₂ Dry air		

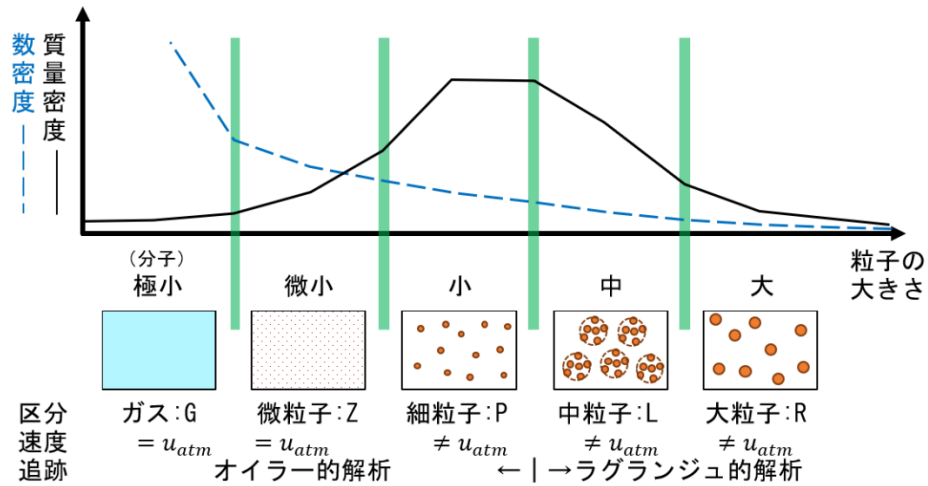


図 60 火山噴出物の粒形（粒子の大きさ）による分類

ii) モデル化された方程式系

固体相に対しては粒子の運動方程式を求め、流体相に対しては、ラージエディシミュレーションによる乱流場の解析に対応させるため、粒子を含む評価体積内の変数を空間平均操作によって粗視化することにより求める。以下にモデル化した方程式系を示す。式中の変数の表記は、粒子の質量、圧力、体積、密度、代表面積、代表長さ、摩擦係数、風圧係数、拡散係数、速度をそれぞれ、 m_* , P_* , V_* , $\hat{\rho}_* = m_*/V_*$, a_* , l_* , c_{f*} , c_{d*} , κ_* , $\mathbf{v}_* = \mathbf{v}_{*i} = (v_{*1}, v_{*2}, v_{*3})$ とする。下付き添え字の i ($i = 1, 2, 3$) は x_i 軸方向成分を、 n は粒子および粒子群の番号、下付き添え字内の $R, L, P, Z, G, D, S, F, A$ は、それぞれ大粒子、中粒子、細粒子、微粒子、ガス、乾燥空気、固体相、流体相、大気相を表す。また、重力加速度を $g = -9.8 \text{ m/s}^2$ 、コリオリパラメータを f_{C*} とする。

n 番目の大粒子 [R]・中粒子群 [L] の運動方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_{*n} v_{*ni}) = -a_{*n} l_{*ni} \frac{\partial \bar{P}_A}{\partial x_i} + \delta_{i3} V_{*n} (\hat{\rho}_{*n} - \bar{\rho}_A) g + V_{*n} \hat{\rho}_{*n} f_{Ci} + F D_{*ni} + C_{*ni} \quad (7)$$

ここで、

$$F D_{*ni} = \bar{\rho}_A a_{*n} (\tilde{u}_{Ai} - v_{*ni}) \left(c_{f*ni} + \frac{1}{2} c_{d*ni} |\tilde{\mathbf{u}}_A - \mathbf{v}_{*n}| \right)$$

C_{*ni} は粒子間の衝突による運動量の交換。下付き添え字内の*は大粒子でRを、中粒子群でLをとる。

流体相に関しては、体積を $V_F = V_D + V_G + V_Z + V_P$ として、評価体積 $V_0 = V_R + V_L + V_F$ に対する流体相の体積率を $G_F = V_F/V_0$ 、流体相における質量密度を $\bar{\rho}_* = m_*/V_F$ 、速度を $\mathbf{u}_* = \mathbf{u}_{*i} = (u_{*1}, u_{*2}, u_{*3})$ 、ファブル平均速度を $\tilde{\mathbf{u}}_* = \overline{\rho_* \mathbf{u}_*} / \bar{\rho}_*$ とする。ここで、下付き添え字内の*は細粒子でPを、大気相でAをとり、大気相の質量密度は $\bar{\rho}_A = \bar{\rho}_D + \bar{\rho}_G + \bar{\rho}_Z = (m_D + m_G + m_Z)/V_F$ となる。また、上付きのバー $\overline{}$ は流体相内の空間平均値を表す。流体相におけるモデル化された方程式系を以下に示す。

質量保存式：

$$\text{細粒子} : \frac{\partial \bar{\rho}_P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}_P \tilde{u}_{Pi}) = \frac{1}{G_F} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(G_F \bar{\kappa}_P \frac{\partial \bar{\rho}_P}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

$$\text{乾燥空気、ガス、微粒子} : \frac{\partial \bar{\rho}_*}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}_* \tilde{u}_{Ai}) = \frac{1}{G_F} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(G_F \bar{\kappa}_* \frac{\partial \bar{\rho}_*}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

$$\text{大気相} : \frac{\partial \bar{\rho}_A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}_A \tilde{u}_{Ai}) = \frac{1}{G_F} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(G_F \bar{\kappa}_G \frac{\partial \bar{\rho}_G}{\partial x_j} + G_F \bar{\kappa}_Z \frac{\partial \bar{\rho}_Z}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

ここで、下付き添え字内の*は乾燥空気でDを、ガスでGを、微粒子でZをとり、乾燥空気の拡散係数 $\bar{\kappa}_D$ は0とする。

細粒子の運動量保存式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}_P \tilde{u}_{Pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}_P \tilde{u}_{Pi} \tilde{u}_{Pj}) &= -\frac{\bar{\rho}_P}{\bar{\rho}_F} \frac{\partial \bar{F}_A}{\partial x_i} + \bar{\rho}_P (\delta_{i3} g + f_{Ci}) \\ &\quad + \frac{1}{G_F} \frac{\partial}{\partial x_j} \{ G_F (\overline{F_{Pij}} - \overline{T_{Pij}}) \} + \overline{FD_{Pi}} - \frac{\bar{\rho}_P}{\bar{\rho}_F} \overline{FD_{RLi}} \end{aligned} \quad (11)$$

大気相の運動量保存式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}_A \tilde{u}_{Ai}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}_A \tilde{u}_{Ai} \tilde{u}_{Aj}) &= -\frac{\bar{\rho}_A}{\bar{\rho}_F} \frac{\partial \bar{F}_A}{\partial x_i} + \bar{\rho}_A (\delta_{i3} g + f_{Ci}) \\ &\quad + \frac{1}{G_F} \frac{\partial}{\partial x_j} \{ G_F (\overline{F_{Aij}} - \overline{T_{Aij}}) \} - \overline{FD_{Pi}} - \frac{\bar{\rho}_A}{\bar{\rho}_F} \overline{FD_{RLi}} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、

$$\overline{F_{Pij}} = 2\bar{v}_P \left(\overline{D_{Pij}} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{\rho}_P \tilde{u}_{Pi}}{\partial x_k} \right), \quad \overline{T_{Pij}} = -2 \left(\bar{v}_{SP} \overline{D_{Pij}} - \frac{1}{3} \overline{E_{SP}} \right)$$

$$\overline{F_{Aij}} = 2 \left(\bar{v}_D \frac{\bar{\rho}_D}{\bar{\rho}_A} + \bar{v}_G \frac{\bar{\rho}_G}{\bar{\rho}_A} + \bar{v}_Z \frac{\bar{\rho}_Z}{\bar{\rho}_A} \right) \left(\overline{D_{Aij}} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{\rho}_A \tilde{u}_{Ai}}{\partial x_k} \right)$$

$$\overline{T_{Aij}} = -2 \left\{ \left(\bar{v}_{SD} \frac{\bar{\rho}_D}{\bar{\rho}_A} + \bar{v}_{SG} \frac{\bar{\rho}_G}{\bar{\rho}_A} + \bar{v}_{SZ} \frac{\bar{\rho}_Z}{\bar{\rho}_A} \right) \overline{D_{Aij}} - \frac{1}{3} \overline{E_{SA}} \right\}$$

$$\overline{D_{Pij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{\rho}_P \tilde{u}_{Pi}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\rho}_P \tilde{u}_{Pj}}{\partial x_i} \right), \quad \overline{D_{Aij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{\rho}_A \tilde{u}_{Ai}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\rho}_A \tilde{u}_{Aj}}{\partial x_i} \right)$$

$$\overline{FD_{Pi}} = \bar{\rho}_A \sum_{n=1}^{PN} \left\{ \bar{A}_{Pn} (\tilde{u}_{Ai} - \tilde{u}_{Pi}) \left(c_{fPni} + \frac{1}{2} c_{dPni} |\tilde{\mathbf{u}}_A - \tilde{\mathbf{u}}_P| \right) \right\}$$

$$\overline{FD_{RLi}} = \frac{1}{V_F} (\sum_{n=1}^{RN} \overline{FD_{Rni}} + \sum_{n=1}^{LN} \overline{FD_{Lni}})$$

\bar{A}_{pn} は細粒子の表面積密度 $=a_{pn}/V_F$ 、 \bar{E}_{s*} はサブグリッドスケールの運動エネルギーとする。渦動粘性係数 $\bar{\nu}_{s*}$ は、Smagorinsky モデルに準じて平均化の空間スケール ΔL および \bar{D}_{*ij} を用いて $\nu_s = (C_s \Delta L)^2 (2\bar{D}_{*ij} \bar{D}_{*ij})^{1/2} / \bar{\rho}_*$ とするか、 \bar{E}_{s*} の式を別途解く場合は $\bar{\nu}_s = C_v \Delta L (\bar{E}_{s*} / \bar{\rho}_*)^{1/2}$ などとする。

以上、様々な大きさの固体粒子とガスからなる火山噴出物を含む密度流れの数値計算を行うために、ラージエディシミュレーションによる乱流場の解析に対応した粒子の運動方程式と、混相密度流れ場の保存式をモデル化した。

c) 降灰粒子の凝集効果

降灰粒子の凝集は密度や落下速度に影響を与える。このため、降灰粒子の凝集効果を定量的に評価することは、レーダによる定量的降灰量推定式の導出や火山灰拡散予測モデルのシンク項の精度向上にとって極めて重要である。令和5年度に引き続き、文献調査、ディストロメータにより得られた降灰粒子の落下速度のデータを解析して凝集の効果を定量的に評価した。

i) 火山灰粒子の凝集過程

Van Eaton et al. (2012)¹⁴⁾によれば、大気中の水が関与した火山灰粒子の凝集過程は次の四つの過程に分類できる（図 61 を参照）。(i) 湿潤化と核化：雨滴や雲粒子による火山灰粒子の補足あるいは水で覆われた降灰粒子が結合する、(ii) 層状化：大きなクラスター粒子が小さな火山灰粒子を補足してクラスター粒子の表面に水幕が形成される、(iii) 併合：ほぼ同じ大きさの粒子が衝突して併合される、(iv) 泥状化：高い含水率のために変動の大きな泥状の粒子が形成される。

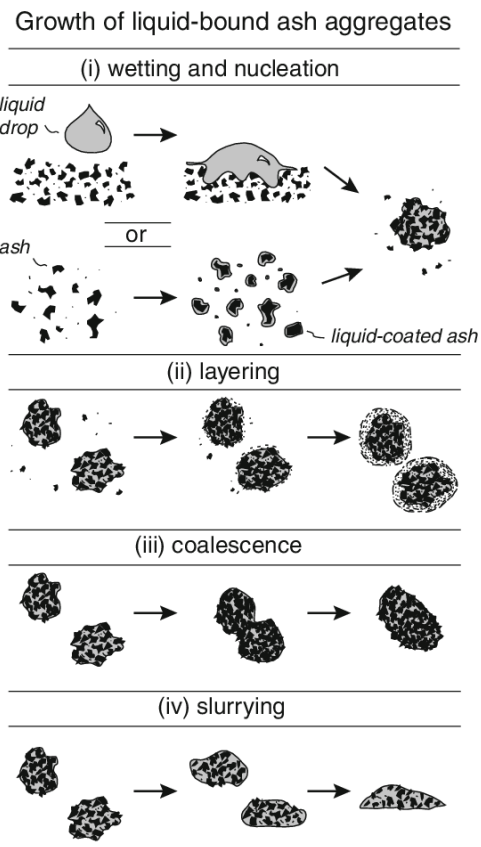


図 61 水が関与した火山灰粒子の凝集過程 (Van Eaton et al., 2012)¹⁴⁾。

火山灰粒子の凝集は水以外に静電気が「接着剤」として関与する場合もある (James et al., 2003)¹⁵⁾。静電気により凝集された粒子は空隙が大きく崩れ易い構造となっている (図 62)。このため、同じ大きさの水による凝集粒子に比べて落下速度は小さく、密度は 200 kg/m^3 程度と固体粒子の $1/10$ 程度である。

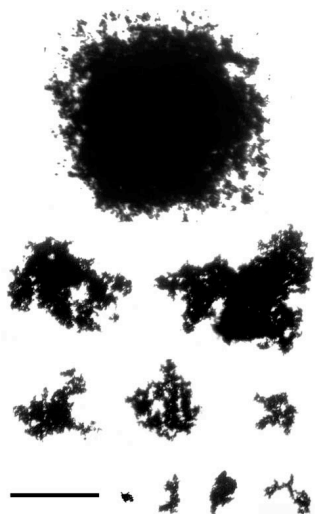


図 62 典型的な静電気による凝集火山灰粒子。スケールは $500 \mu\text{m}$ 。James et al. (2003)¹⁵⁾ より。

ii) 凝集粒子の空気力学的パラメータ

空気中を落下する凝集粒子の終端速度は粒子に働く重力と抵抗力が釣り合う時の速度である（例えば、Pfeiffer et al., 2005¹⁶⁾）。すなわち、

$$V_p \rho_p g = 1/2 \rho_a C_d A_p w^2 \quad (13)$$

ここで、式(13)の左辺は粒子に働く重力で V_p 、 ρ_p 、 g はそれぞれ粒子の体積、密度、重力加速度である。式(13)の右辺は粒子に働く抵抗力で、 ρ_a 、 C_d 、 A_p 、 w はそれぞれ粒子の体積、密度、有効断面積、終端速度である。なお式(13)で、空気中を落下する粒子に働く浮力は他の項に対してきわめて小さいので無視している。

落下する粒子を扁球回転楕円体と仮定し、短軸が鉛直方向に向いて落下すると仮定すると

$$V_p = 4/3 \pi abc \quad (14)$$

$$A_p = \pi ab \quad (15)$$

である。ここで、 a 、 b 、 c はそれぞれ回転楕円体の長径、中径、短径である。粒子を同じ体積の球としその直径を d_e とすると V_p 、 A_p はそれぞれ次式で表される。

$$V_p = 1/6 \pi d_e^3 \quad (16)$$

$$A_p = 1/4 \pi d_e^2 \quad (17)$$

(16) と (17) を (13) へ代入して整理すると、

$$\rho_p g = \frac{3}{4} \rho_a C_d d_e^{-1} w^2 \quad (18)$$

となる。(18)は終端速度で落下する単位体積の回転楕円体粒子に働く力の関係式である。(18)の抵抗係数 C_d はレイノルズ数 R_e の関数で表される。 R_e は d_e と w に依存する。このため、(18)から w を求める場合、 w は繰り返し法により求める必要がある。

単純化のため、凝集粒子の抵抗係数を形状と大きさで表す研究がなされている。ここでは、大気中で観測される Re の範囲で精度良く求められた二つの実験式を採用する。Dioguardi et al. (2018)¹⁷⁾ が紹介している Wilson and Huang (1979)¹⁸⁾ と Dellino et al. (2005)¹⁹⁾ の実験式である。Wilson and Huang (1979) は 3 つのテフラ層（二つは赤道太平洋の深海で採取されたコアで他の一つは Azores の San Miguel の陸上の凝灰岩層）からサンプルされた火山灰粒子の形状や終端速度の解析から、抵抗係数は次式で表されることを見出した。

$$C_d = \frac{24}{R_e} F^{-0.828} + 2\sqrt{1.07 - F} \quad (19)$$

ここで、 R_e 、 F はそれぞれレイノルズ数、形状ファクターである。(19)の右辺の $24F/R_e$ は球に対する抵抗係数 $24/R_e$ に形状効果を考慮した項である。第 2 項は R_e が大きな値の場合の形状効果を補正する項である。上式は $0.1 < R_e < 100$ の範囲で実験したサンプル粒子の 80% について 20% 以内の誤差で抵抗係数を推定できる。Suzuki (1983)²⁰⁾ は Wilson and Huang (1979)¹⁸⁾ の実験データによりよく合う式として (19) の変形式を提案してい

る。

$$C_d = \frac{24}{R_e} F^{-0.32} + 2\sqrt{1.07 - F} \quad (20)$$

(19)の R_e は空気の粘性力係数 η と粒子の球相当直径 d_e を用いて次式で定義される。

$$R_e = d_e \rho_a w / \eta \quad (21)$$

(21)を(19)に代入して、

$$C_d = \frac{24\eta}{d_e \rho_a w} F^{-0.828} + 2\sqrt{1.07 - F} \quad (22)$$

d) が得られる。(22)で η や ρ_a は一定と見なせるので、ある直径 d_e の C_d は w 、 F で決定できることを示している。(22)を(18)に代入して整理すると Wilson and Huang (1979)¹⁸⁾ の C_d を仮定した力の釣り合いの式が得られる。

$$e) \quad \rho_p g = \frac{3}{4} \rho_a \left(\frac{24\eta}{d_e \rho_a w} F^{-0.828} + 2\sqrt{1.07 - F} \right) d_e^{-1} w^2 \quad (23)$$

Dellino et al (2005)¹⁹⁾ は 142 個の軽石の形状解析から(22)よりも扱いやすく若干ではあるが精度が向上した次の実験式を提案した。

$$R_e = 1.0387 (C_d R_e^2 F^{1.6})^{0.5206} \quad (24)$$

但し(24)の実験式の適用範囲は $50 < R_e < 10,000$ である。(21)を(24)へ代入して整理すると

$$C_d = 0.92967 \times \left(\frac{\eta}{d_e \rho_a w} \right)^{0.07914} F^{-1.6} \quad (25)$$

と表される。Dellino et al. (2005)¹⁹⁾ は(22)の誤差は 28%であるのに対して(25)から計算される C_d の誤差は 22%であると述べている。(25)を(18)へ代入すれば凝集粒子に働く力の釣り合いの式は次式で表される。

$$\rho_p g = 0.6973 \rho_a^{0.9209} \times \eta^{0.07914} F^{-1.6} d_e^{-1.0791} w^{1.9209} \quad (26)$$

(23)や(26)は力の釣り合いの式でもあるが後述するように凝集粒子の密度や落下速度を求める際にも利用される。

(22)や(25)は C_d と F 、 d_e 、 w 、 η との関係を比較的単純な関数形で表現しているが各関係式が適用できる R_e の範囲が制限されている。Dioguardi et al. (2018)¹⁷⁾ はこの点を改善して想定される R_e の全範囲に利用できる次の関数形を提案している。

$$C_d = \frac{24}{R_e} \left(\frac{1 - F}{R_e} + 1 \right)^{0.25} + \frac{24}{R_e} (0.1806 R_e^{0.6459}) F^{-(R_e^{0.08})} + \frac{0.4251}{1 + \frac{6880.95}{R_e} F^{5.05}} \quad (27)$$

(19)、(20)、(24)、(27)で表される C_d - R_e 曲線を図 63 に示す。図 63 には Dioguardi et al. (2018)¹⁷⁾ の観測値も示した。 C_d - R_e 関係式は F に依存するので図には $F=1.0$ (球形)、0.8、0.6、0.4 の曲線が示されている。

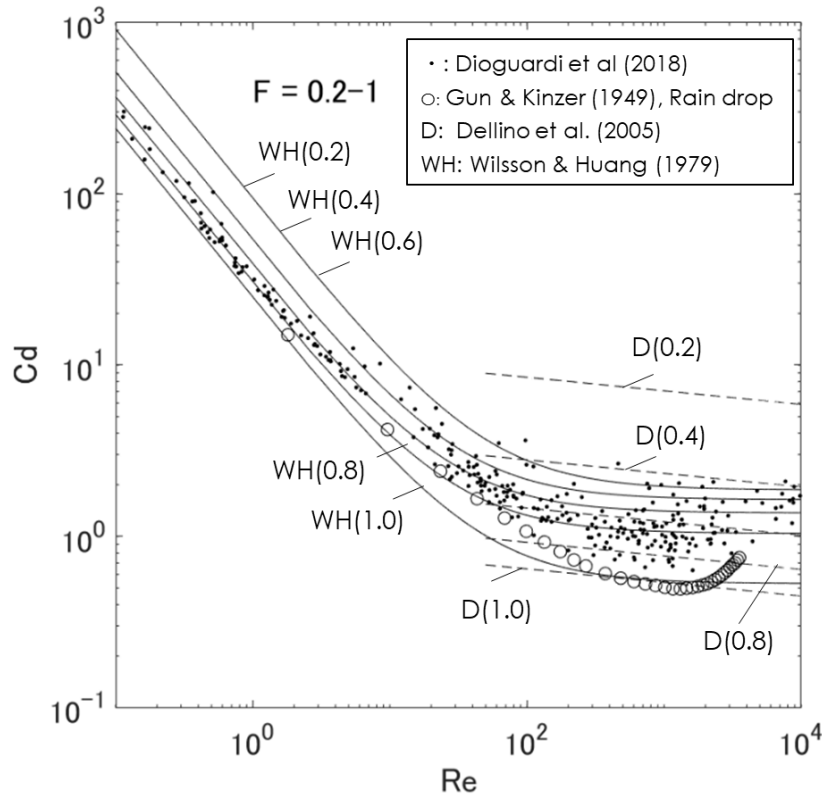


図 63 簡略化された Cd-Re 関係。

i) 質量フラックスセンター (CMF)

気象レーダはビーム幅とレンジ幅で決まるサンプリングボリューム内に分布する凝集粒子の平均値を測定する。個々の凝集粒子の物理量を計測するわけではない。したがって、レーダ計測の観点からは前節で述べた個々の凝集粒子の落下速度や密度は重要ではなく、サンプリング空間内の凝集粒子の集団としての落下速度や密度を知ることが重要である。一般にある物理量の分布の特徴を表す指標として最頻値、重心がある。落下する粒子群の代表点として、本研究では Ishizaka et al. (2016)²¹⁾ が雪片や霰などの氷粒子の研究に提案した質量フラックス中心 (CMF) を求めた。

図 64 に CMF の計算原理の模式図を示す。今回使用したディストロメータは粒径と速度を測定するチャンネルがそれぞれ 32 であるが、簡略化して 10 チャンネルとしている。図 64(a) の各チャンネルナイン値は 1 分間に観測された粒子の個数である。図 64 左図は d 、 w をそれぞれ x 軸 y 軸とし座標 (x, y) で観測された個数 $n(x, y)$ である。この時の最大頻度点、重心、MFC の座標をそれぞれ $P(x_p, y_p)$ 、 $G(x_g, y_g)$ 、 $F(x_f, y_f)$ とすると各点の座標は次式で表される。

最頻度点 P :

$$n(x_p, y_p) = \text{mode}(n(x, y)) \quad (4-e-16) \quad (28)$$

重心 G :

$$x_g = \frac{1}{M} \iint_S x \cdot \rho_p n(x, y) dx dy \quad (4-e-17a) \quad (29a)$$

$$y_g = \frac{1}{M} \iint_S y \cdot \rho_p n(x, y) dx dy \quad (4-e-17b) \quad (29b)$$

$$M = \iint_S \rho_p n(x, y) dx dy \quad (4-e-17c) \quad (29c)$$

MFC 点 F:

$$x_f = \frac{1}{M_f} \iint_S x \cdot \rho_p w(x, y) n(x, y) dx dy \quad (4-e-18a) \quad (30a)$$

$$y_f = \frac{1}{M_f} \iint_S y \cdot \rho_p w(x, y) n(x, y) dx dy \quad (4-e-18b) \quad (30b)$$

$$M_f = \iint_S \rho_p w(x, y) n(x, y) dx dy \quad (4-e-18c) \quad (30c)$$

図 64 に示したように最頻点、重心、CMF の位置は異なる。最頻点と重心の位置はより近くなるが、CMF は落下速度が重み付けされるので、最頻点や重心よりも粒径の大きな方向かつ落下速度の大きな方向に位置する。

Histogram												Chj W J		dW J		Centroid												Chj W J		dW J		CMF																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Y	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図 64 CMF を説明する模式図。左図：各チャンネルで観測された粒子の個数分布と最頻値の位置、中央図：規格化された質量分布と重心の位置、右図：規格化された質量フラックス分布と CMF の位置。

図 65 に 2018 年 6 月 16 日 07:19 の噴火（噴煙高度 4700m）の噴火時に観測された噴煙エコーの時間積算分布を示す。噴煙は火口から南西方向に流れ柴立（SBT）上空を通過している。図 66 は SBT で観測された $w-d_e$ 分布図（観測時間は 7:35 から 8:34 の計 61 分間）である。CMF は直径が約 1.2 mm、落下速度が約 4.2 ms^{-1} にある。(26) から CMF の密度は 841 kgm^{-2} と推定された。参考のために、図には凝集粒子がとり得ると考えられる最大と最小の密度として、それぞれ 2500 kgm^{-2} と 500 kgm^{-2} の曲線を示す。また、CMF の他に最頻値点および面積重心も示した。

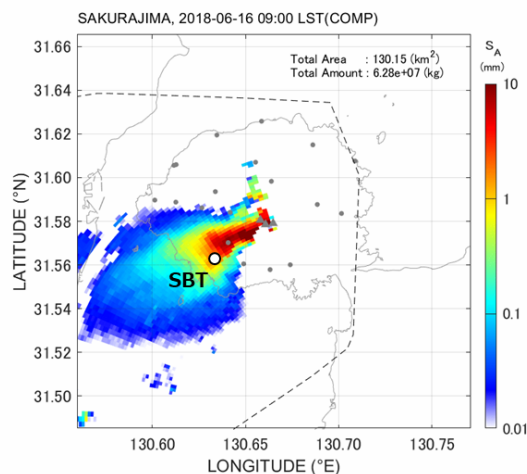


図 65 垂水に設置された XMP レーダ
による降灰エコー時間積算分布。
2018 年 6 月 16 日 07:19 の噴火。

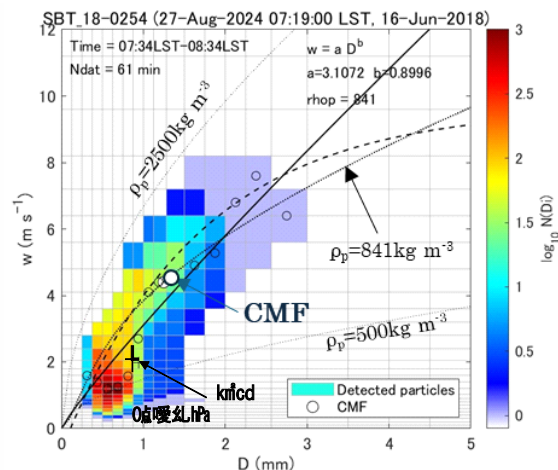


図 66 柴立地点 (SBT) に設置されたデ
イスドロメータで観測された $w-d_e$ 分
布図と CMF (○印)。破線は雨滴の終端
速度。

表 6 に 5 つ噴火事例の解析結果を示す。また、推定した密度を用いた R_A-Z 関係式も示す。テフラ粒子の密度は 600~1100 kg m^{-3} である

表 6 推定された降灰粒子の密度と R_A-Z 関係式

噴火日時	地点	ND	密度	R_A-Z 関係式
08:08, May 15, 2018	NAB	26	658	$R_A = 0.0227 Z^{0.809}$
19:48, May 22, 2018	HIK	21	1078	$R_A = 0.0131 Z^{0.826}$
	HAR	13	645	$R_A = 0.0140 Z^{0.595}$
08:01, May 30, 2018	KUR	15	949	$R_A = 0.0554 Z^{0.522}$
11:35, Jun. 30, 2018	HAR	22	935	$R_A = 0.0945 Z^{0.568}$
07:19, Jun. 16, 2018	SBT	61	841	$R_A = 0.0119 Z^{0.778}$
15:38, Jul. 16, 2018	AKA	23	841	$R_A = 0.0336 Z^{0.653}$

ii) 誘電ファクター

火山灰中の岩石成分の誘電率は、噴煙からのレーダ電波の散乱強度を計算するための基本的なパラメータの一つである。4 GHz から 19 GHz の周波数に関してガテ

マラヤやアラスカの計 5 つの火山の火山灰の誘電率の測定結果によれば、火山灰の複素誘電率は $\varepsilon = (6 \pm 0.5) - (0.08 \sim 0.27)i$ 、誘電ファクターは $|K_a|^2 = 0.39 \pm 0.2$ であった (Adams et al., 1996²²⁾)。Oguchi et al. (2009)²³⁾ は桜島や浅間山など計 5 つの国内の火山で採取された火山灰の複素誘電率がネットワーク・アナライザを用いて調べた。その実験結果によれば、1 GHz から 13 GHz の周波数範囲で桜島の火山灰の誘電率は $\varepsilon = 5.27 - 0.131i$ 、誘電ファクターは $|K_a|^2 = 0.345$ であった。ちなみに雨滴の誘電ファクターは、3GHz から 9 GHz の範囲で、温度が 0℃ から 20℃ の範囲で $|K_w|^2 = 0.93$ である (例えば、Sauvageot, 1992²⁴⁾)。また、密度が 1 gcm^{-3} の純粋な氷の場合、温度および波長に関係なく $|K_i|^2 = 0.197$ である。従って、火山灰の誘電率は雨滴の誘電率の約 1/3 であり、氷粒に比べて約 2 倍の大きさである。ここで注意しないといけないのは、上述した火山灰の誘電ファクターの値は火山灰を固体粒子として求めていることである。実際の降灰粒子は凝集の効果により個々の固体粒子が集合したものである。最も単純な場合として、火山灰粒子を固体粒子と空気の凝集粒子と考えると、その誘電ファクター K_m は、Debye の理論 (Debye, 1992²⁵⁾) から

$$|K_m|^2 = (\rho_m)^2 (|K_a|/\rho_a)^2 = 0.221(\rho_m)^2$$

である。ここで、 ρ_m は凝集粒子の密度である。凝集粒子を固体粒子と水の混合粒子とすると

$$|K_m|^2 = (0.2366 + 0.7277x)^2 (\rho_m)^2$$

と表される。ここで、 x は含水率である。

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステム開発

令和 6 年度は、整備済みの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った。X バンドレーダ観測による噴煙高度やディスト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との照合を進めた。

a) 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。ディスト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 2,000 m 以上の爆発

2024 年には 46 回の爆発と 53 回の噴火が南岳において発生したが、ここではそのうち、噴煙高度が 2,000 m 以上に達した 17 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 9 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 67～図 75 に示す。上段がオンラインシステムにより出力された時刻から 6 分間の降灰量を 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。

2024 年 3 月 15 日 4 時 50 分の噴火（図 67）と 2024 年 5 月 15 日 14 時 42 分の爆発（図 68）に伴う火山灰の移流方向は、レーダ観測によると南東方向もしくは東南東方向である。オンラインシステムは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広いののは、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。

2024 年 5 月 20 日 1 時 21 分（図 69）の場合、レーダ観測ではエコーを捉えることができなかった。鹿児島地方気象台の観測では火山灰の移流方向は西とされているが、上空の風は 5m/s（海拔 2000m）と弱くほぼ直上に上昇したものと考えられる。オンラインシステムはほぼ直上に上昇し、あまり移流しない噴煙を予測した。

2024 年 5 月 22 日 17 時 18 分の爆発（図 70）時には、弱い降雨があり、雨雲からのエコーが画像全体を覆っているが、北西方向へ移流する噴煙を識別できる。オンラインシステムは噴煙が北へゆっくりと流れていく予測をした。

2024 年 7 月 29 日 16 時 46 分の爆発（図 71）では、レーダは南南東方向へ移流する噴煙を捕捉した。オンラインシステムは噴煙が南もしくは南南東へゆっくりと流れていく予測をしている。

2024 年 8 月 6 日 0 時 37 分の爆発（図 72）の噴煙は西南西へ移流したことが、レーダ画像からわかる。オンラインシステムは噴煙が西もしくは西北西へ移流することを予測した。

2024 年 8 月 7 日 14 時 14 分の爆発（図 73）では、桜島周辺に雷雲が発生しており、レーダ画像から噴煙の移流方向はよくわからない。鹿児島地方気象台の観測では火山灰の移流方向は南とされている。オンラインシステムは噴煙が北へ移流することを予測した。海拔 2000m の風は南東の風 2m/s と弱い。風速場の予測が見ず香椎事例といえる。

2024 年 8 月 21 日 14 時 57 分の爆発（図 74）では、噴煙は北西もしくは北へ移流していることはレーダ画像からわかる。オンラインシステムは噴煙がほぼ直上に上昇し、あまり移流しないことを予測した。

2024 年 10 月 18 日 1 時 21 分の爆発（図 75）では噴煙が北西に移流したことがレーダ画像からわかる。10 月 18 日 1 時 21 分の爆発ではオンラインシステムは火山灰噴出率を最大でも 30 トン/分と評価したので、降灰量は山頂付近でも 10g/m² 未満であり、図 75 の分布図には反映されていない。2024 年には 104 回の「爆発」と「噴火」が発生したが、このうち 7 回についてオンラインシステムは降灰量を 0 と評価している。このうち 6 回は「噴火」である。「噴火」に伴う地震動と地盤変動は「爆発」に比べて小さいので、降灰量が 0 と評価される場合もある。この爆発については、噴煙高度の割には地盤変動が小さい（圧力源の体積変化で -500m³）のですが、火山灰噴出率が小さく評価された。

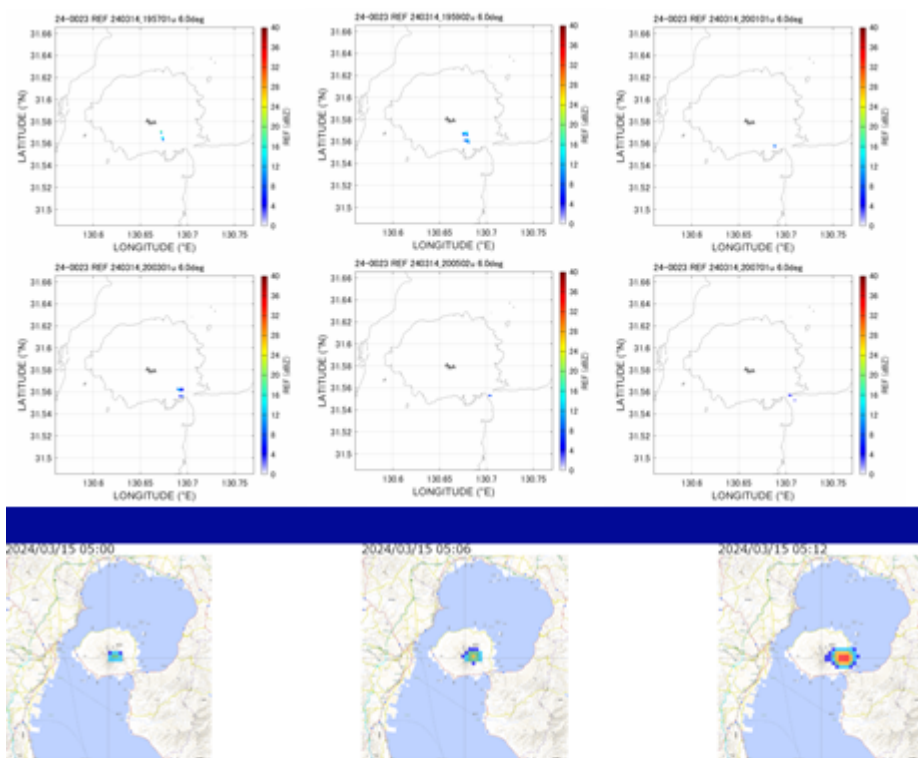


図 67 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 3 月 15 日 4 時 50 分の噴火。

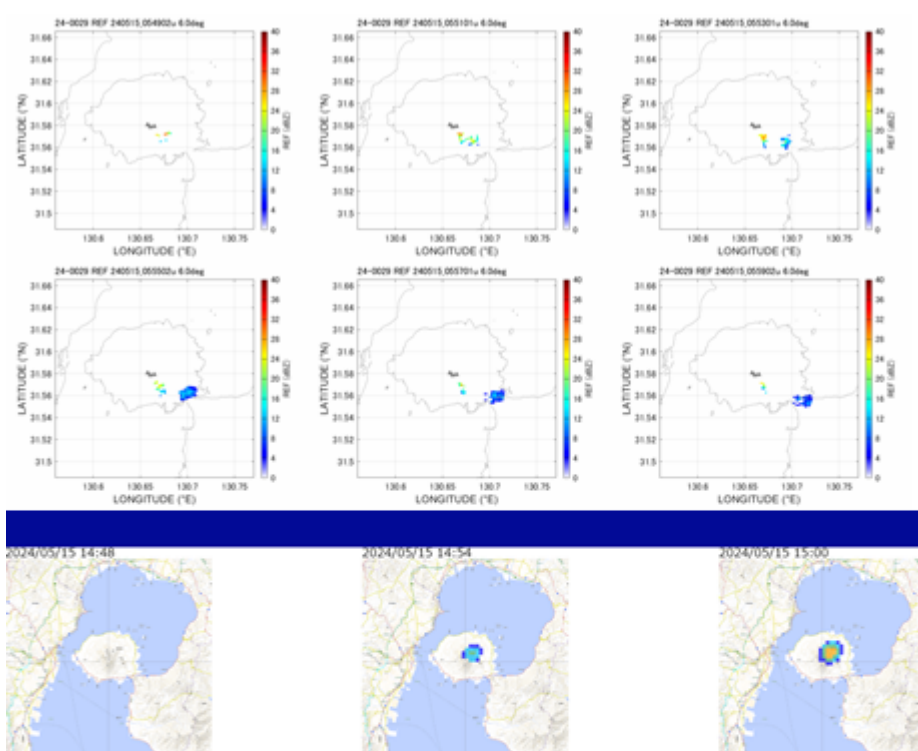


図 68 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 5 月 15 日 14 時 42 分の爆発。

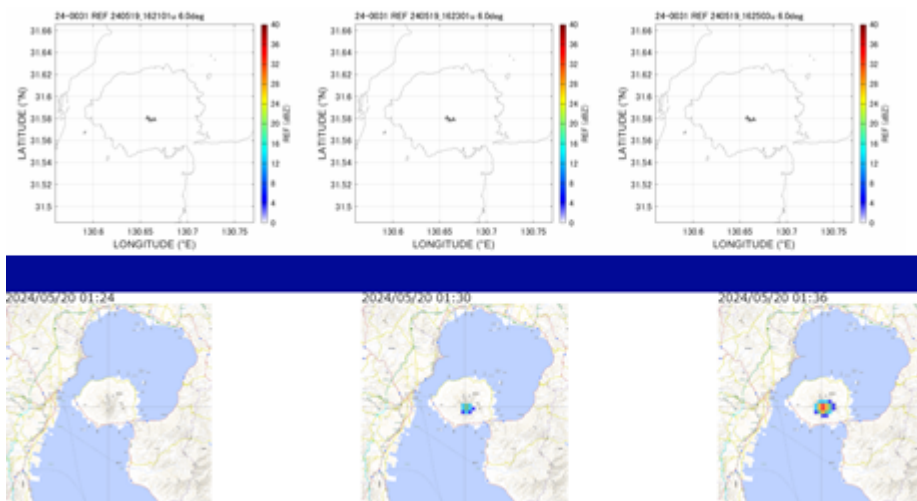


図 69 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 5 月 20 日 1 時 21 分の爆発。

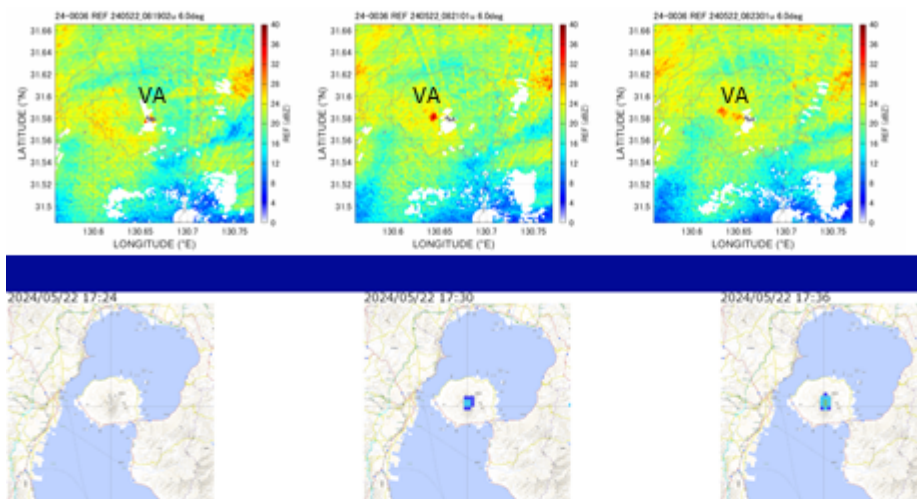


図 70 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 5 月 22 日 17 時 18 分の爆発。弱い降雨があり、雨雲からのエコーが全体を覆っている。反射強度の高い VA は火山灰雲を示す。

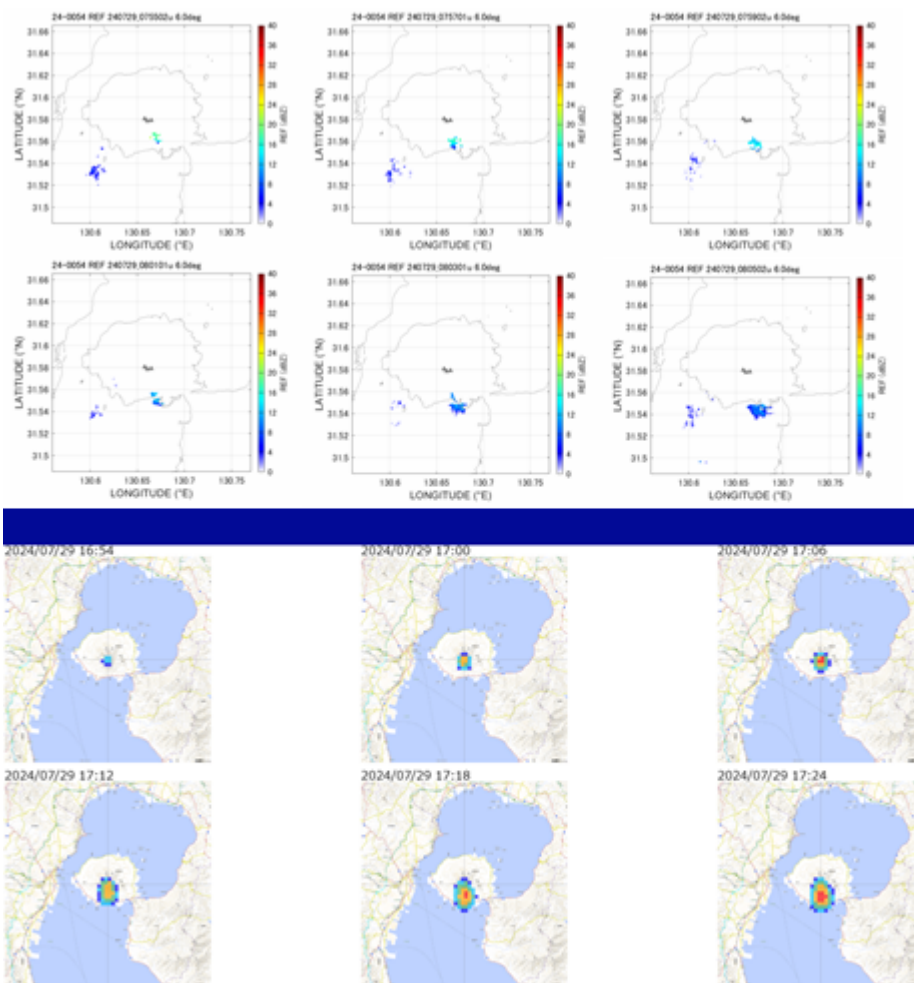


図 71 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 7 月 29 日 16 時 46 分の爆発。

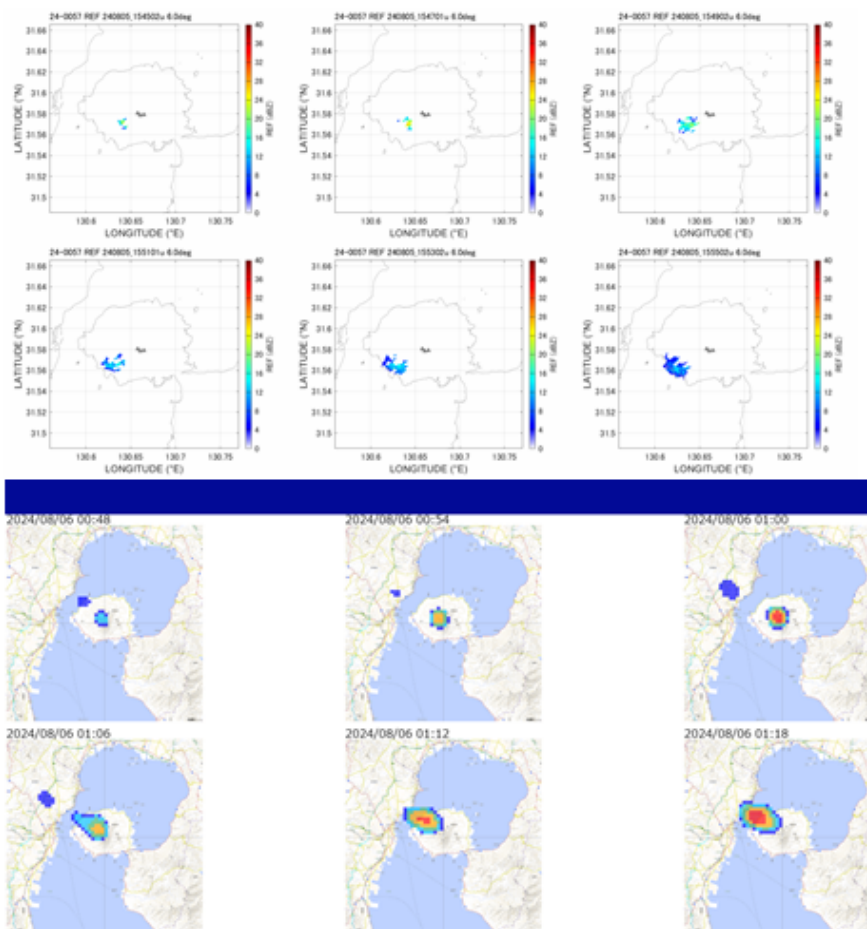


図 72 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 8 月 6 日 0 時 37 分の爆発。

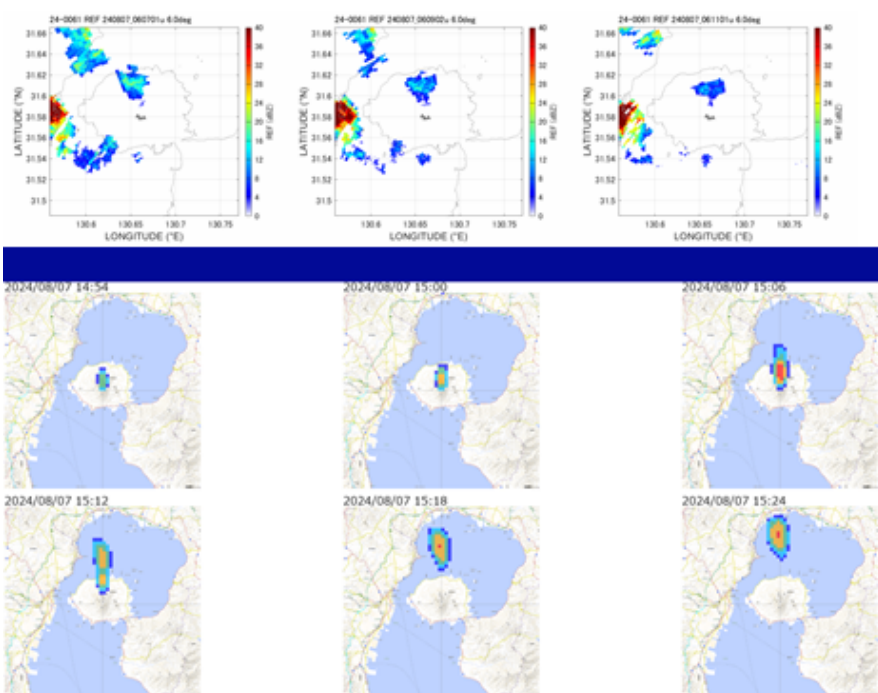


図 73 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 8 月 7 日 14 時 14 分の爆発。雷雲が発生している。

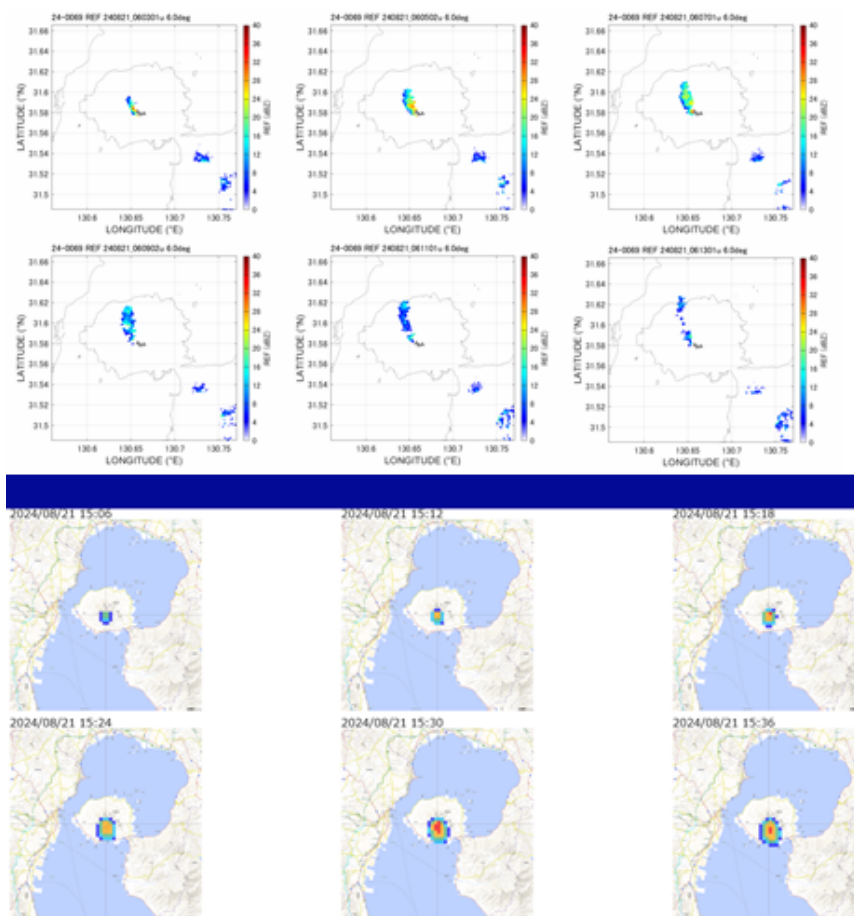


図 74 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 8 月 21 日 14 時 57 分の爆発。

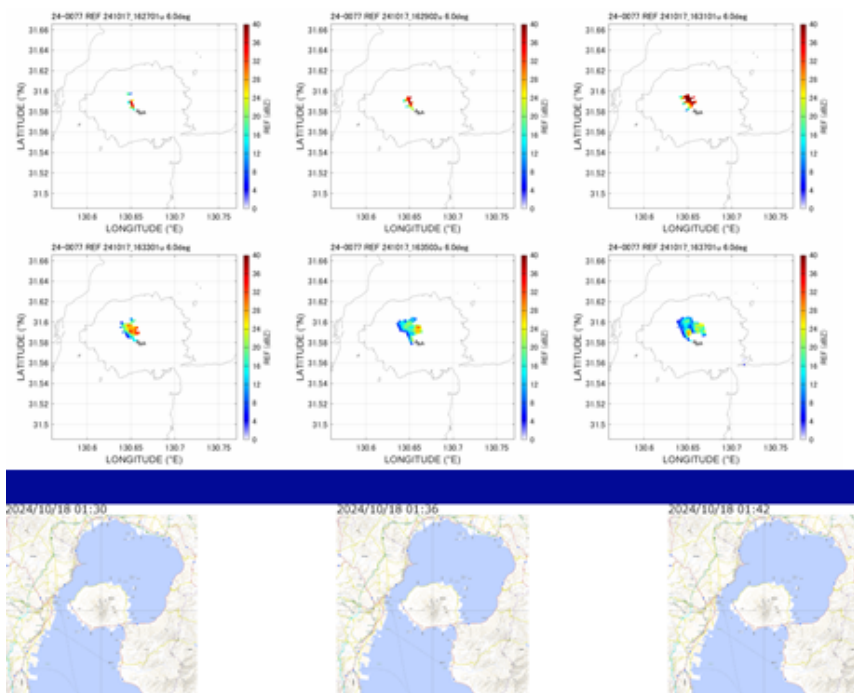


図 75 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2024 年 10 月 18 日 1 時 21 分の爆発。

次に、オンラインシステムによる降下火山灰予測をディストロメータによって観測された火山灰粒子の降下速度と粒径によって分けたクラスごとの粒子数から推定した降灰量と比較した。ディストロメータを用いた降灰量推定方法は、Takishita et al. (2022)⁸⁾に従った。

噴煙高度が 2,000m 以上に達した爆発と噴火について、オンラインシステムによる予測降灰重量をディストロメータ観測と比較して、図 76～78 に示す。タイルの分布が予測降灰重量、○がディストロメータ観測点を示す。カラーによって降灰量を表している。白丸は降灰を検知していないことを示す。赤い領域あるいは赤丸は $100\text{g}/\text{m}^2$ 以上の降灰を予測あるいは観測されたことを示す。

2 月、3 月、5 月の例を図 76 に示した。これらの例では、オンラインシステムは北～北東～東に火山灰が移流することを予測した。2024 年 2 月 14 日 18 時 33 分の爆発（図 76a）、同日 18 時 33 分の爆発（図 76b）、5 月 15 日 14 時 42 分の爆発（図 76d）では、火山灰の移流方向とディストロメータの位置がおおむね一致している。3 月 15 日 4 時 50 分の噴火ではオンラインシステムは東に火山灰が移流することを予測したが、火山灰がディストロメータで検知されたのは南麓の ARIR 観測点であった（図 76c）。5 月 20 日 1 時 21 分の爆発ではディストロメータにより火山灰が検知されなかった（図 76e）。5 月 22 日 17 時 18 分の爆発では多くの観測点でディストロメータは落下粒子を検知しているが（図 76f）、雨滴である。

7 月と 8 月の例（図 77）では、様々な方向に火山灰粒子が移流することをオンラインシステムは予測した。そのうち、火山灰の移流方向とディストロメータの位置がおおむね一致しているのは、2024 年 7 月 8 日 5 時 13 分の噴火（図 77g）、7 月 20 日 13 時 58 分の爆発（図 77i）、8 月 6 日 0 時 37 分の爆発（図 77k）である。7 月 29 日 16 時 46 分の爆発（図 77j）では、火山灰がディストロメータで検知された観測点はないが、事後解析によって ARIR 観測点では火山灰粒子が検知され、降灰量は $122\text{g}/\text{m}^2$ と評価された。7 月 14 日 18 時 19 分の爆発（図 77h）では、火山灰の予測移流方向と火山灰がディストロメータで検知された観測点が異なる。火山灰が検知された観測点は SVOG など西麓の観測点であるが、これは雨滴を検知したものであり、火山灰粒子は桜島島内において検知されていない。8 月 7 日 14 時 44 分の爆発（図 77l）は、火山灰の予測移流方向と火山灰が検知された観測点が異なる例である。

8 月 21 日と 10 月、12 月の例を図 78 に示す。12 月 23 日 7 時 29 分の爆発（図 78p）、12 月 27 日 16 時 41 分の噴火（図 78q）は、火山灰の移流方向とディストロメータの位置がおおむね一致している例である。11 月 23 日 0 時 52 分の爆発（図 78o）では、火山灰がディストロメータで検知された観測点はないが、鹿児島気象台の観測では噴煙は南方向に流れているので、オンラインシステムによる予測は概ね観測に一致している。2024 年 8 月 21 日 14 時 57 分の爆発（図 78m）は、火山灰の南への移流方向予測と火山灰が検知された観測点（SAID）が異なる例である。10

月 18 日 1 時 21 分の爆発ではオンラインシステムは火山灰噴出率を最大でも 30 トン/分と評価したので、降灰量は山頂付近でも $10\text{g}/\text{m}^2$ 未満であり、図 78m の分布図には反映されていない。

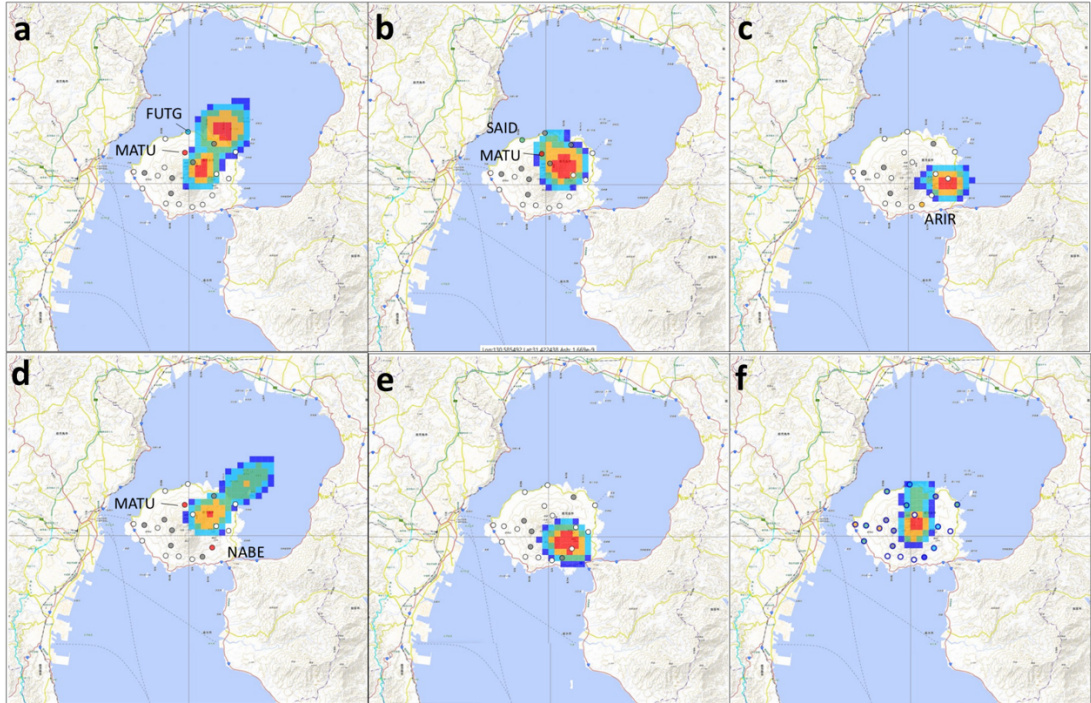


図 76 オンラインシステムによる予測降灰重量のディストロメータ観測との比較。a:2024 年 2 月 14 日 18 時 33 分の爆発、b:同日 18 時 33 分の爆発、c:3 月 15 日 4 時 50 分の噴火、d:5 月 15 日 14 時 42 分の爆発、e: 5 月 20 日 1 時 21 分の爆発、f: 5 月 22 日 17 時 18 分の爆発。

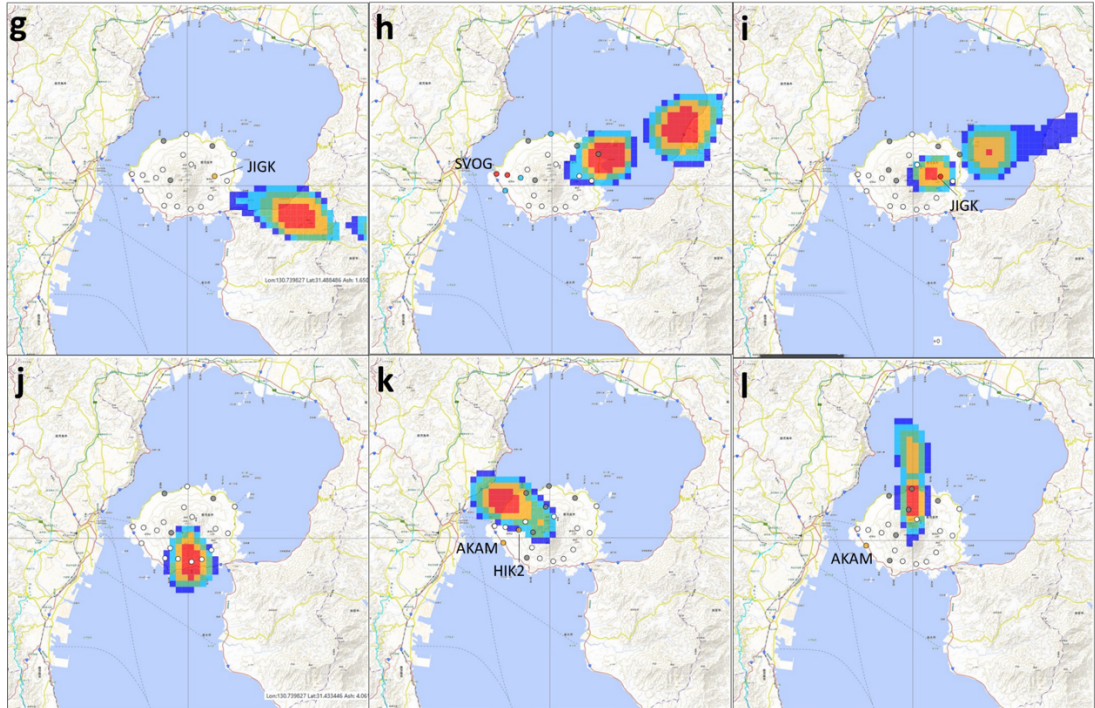


図 77 オンラインシステムによる予測降灰重量のディストロメータ観測との比較。g:2024 年 7 月 8 日 5 時 13 分の噴火、h:7 月 14 日 18 時 19 分の爆発、i:7 月 20 日 13 時 58 分の爆発、j:7 月 29 日 16 時 46 分の爆発、k: 8 月 6 日 0 時 37 分の爆発、l: 8 月 7 日 14 時 44 分の爆発。

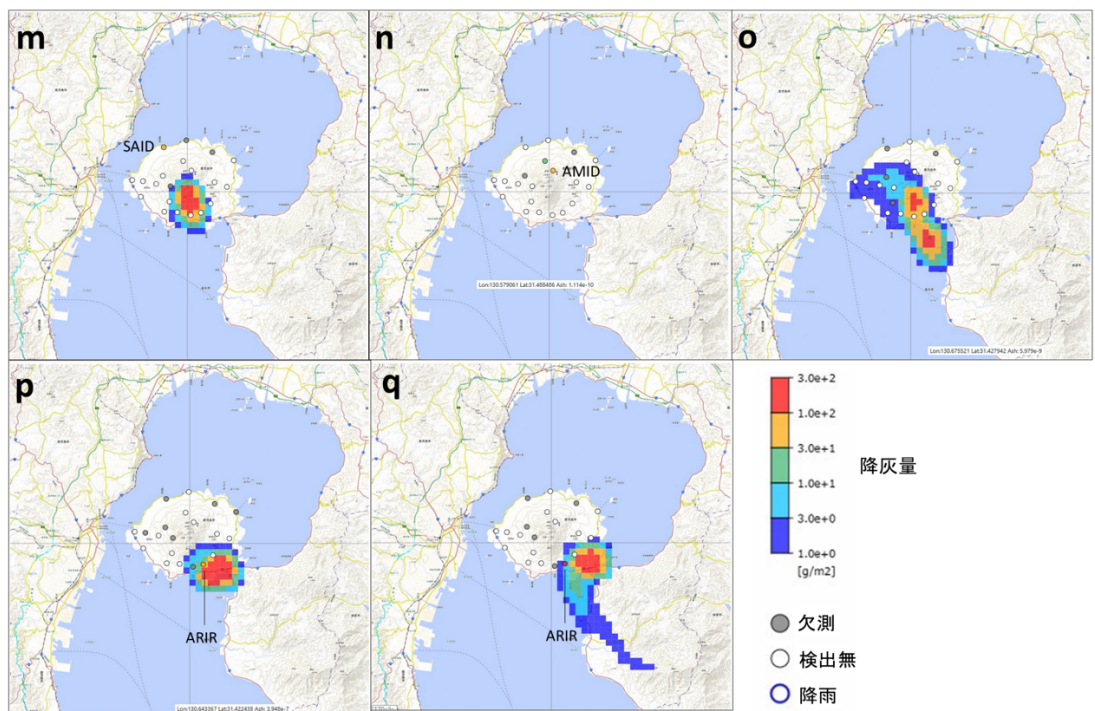


図 78 オンラインシステムによる予測降灰重量のディストロメータ観測との比較。m:2024 年 8 月 21 日 14 時 57 分の爆発、n:10 月 18 日 1 時 21 分の爆発、o:11

月 23 日 0 時 52 分の爆発、p:12 月 23 日 7 時 29 分の爆発、q: 12 月 27 日 16 時 41 分の噴火。

ii) 噴火活動の静穏時における誤った降灰予測

オンラインシステムは、気象庁が定義する「爆発」、「噴火」ではないときに火山灰放出があると判定する場合がある。1 つは火山性地震と構造性地震の判定である。オンラインシステムでは 2-3Hz の周波数帯域を用いるが、日向灘を含む南九州地域において発生する構造性地震（近地地震）は、噴火に伴う火山性地震と同様に 2-3Hz の周波数帯域が卓越する場合が多い。これまでのシステムでは桜島島内の観測点と桜島島外の観測点における地震波の着震時により、桜島島内の観測点の着震時が早ければ火山性地震、島外の観測点が早ければ構造性地震として判定していた。オンラインシステムは 1 分毎の時間ウィンドウごとにデータ処理するので、地震波到達の時間ウィンドウでは概ね正確に判定できるが、次の時間ウィンドウでは震動がすでに始まっているので誤判定が多かった。

そこで、振幅を用いて判定するように改良した。具体的には桜島島内の基準観測点における 1 分時間ウィンドウの振幅最大値に対する島外観測点（5 点まで設定可能）の振幅最大値の比が閾値を超えた場合、構造性地震として火山灰予測から除外する。これにより、判定精度は大幅に改善された。

火山灰放出を伴わない収縮地盤変動（NED、Iguchi et al., 2022²⁶⁾）が発生する時も、火山灰噴出が起きたものとして取り扱われる。NED が多数発生したのは 2019 年 9 月から 2020 年 6 月までの Episode5 である。Episode5 よりも頻度は低いですが、2024 年には 171 回の NED が発生した。最大規模の NED は 2024 年 2 月 21 日 4:09 に発生したもので、火山灰予測の結果は図 79 に示すとおりである。

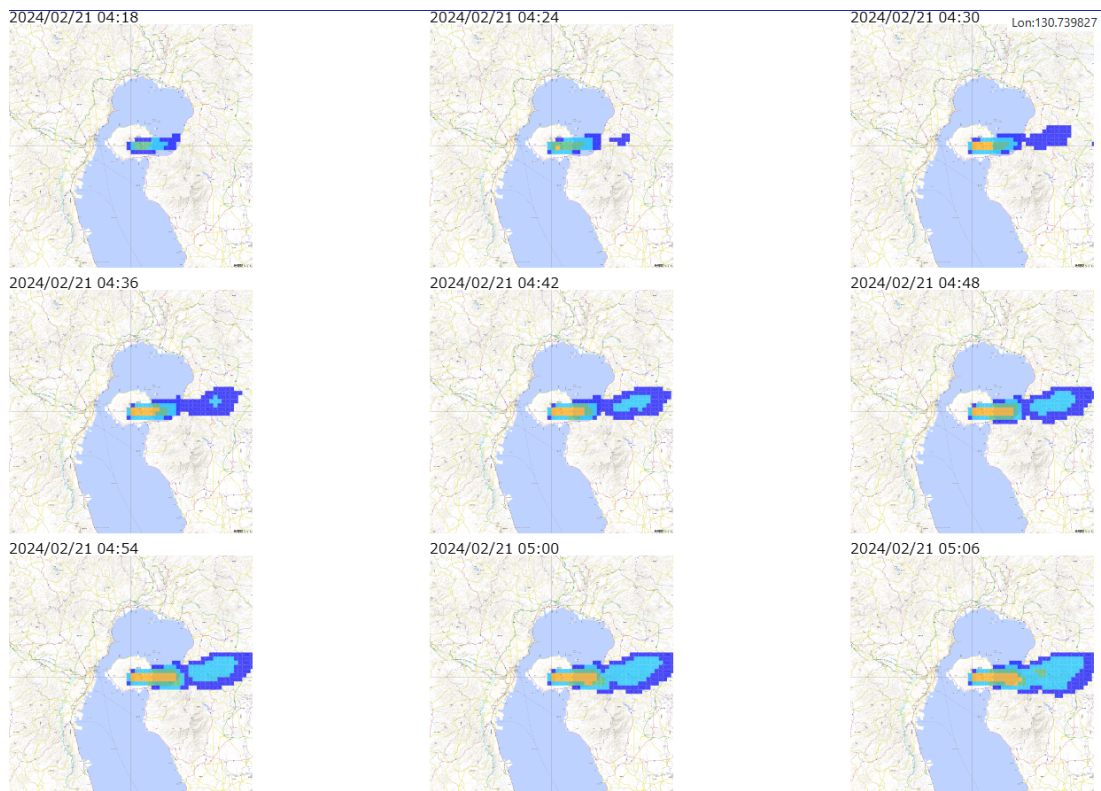


図 79 NED を火山灰放出としてオンラインシステムが予測した結果。

地震動は常に常時微動として存在するので補正項 γ 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。台風の接近時や冬季に季節風が強いときがこれに相当する（図 80）。

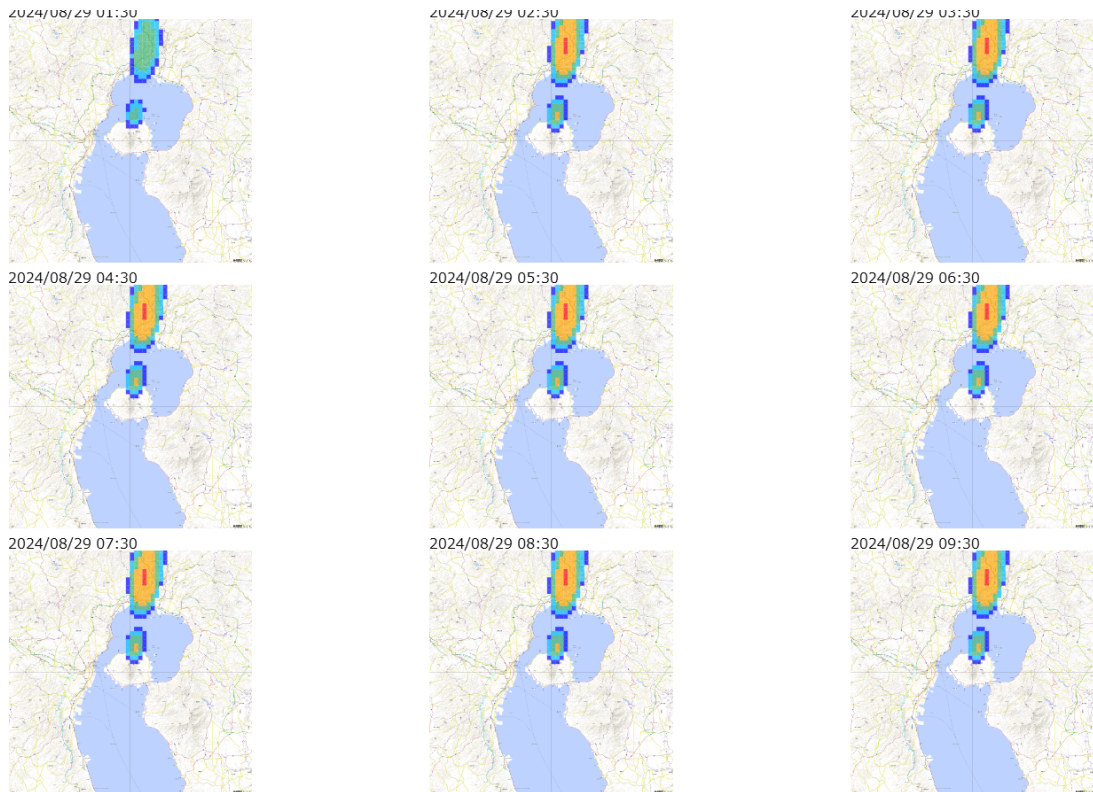


図 80 台風 10 号が鹿児島島に接近したときにオンラインシステムが予測した結果。2024 年 8 月 29 日 1:30～9:30 の時間帯について 1 時間おきに示した。

b) 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。風速場の予測に関する課題と火山灰噴出率の評価に関する課題は令和 5 年度報告書において指摘したとおりである。風速場については 7 月、8 月の風の弱い時に予測値と観測の間の乖離が大きい。

2024 年には気象庁の定義する噴煙階級 5 以上（概ね噴煙高度 3,500m 以上）の噴火は 5 回発生している。このうち、10 月 18 日 1 時 21 分の爆発のみがオンラインシステムにより降灰予測は $10\text{g}/\text{m}^2$ 未満であり、著しく小さい。この理由について考察する。

オンラインシステムが評価した噴出量の積算値を図 81 に示す。2024 年 2 月 14 日と 7 月 14 日の爆発では、積算値が 7,000 トンおよび 9,000 千トンまで増加したが、噴煙高度もそれぞれ 5,000m および 4,500m に達しており高度が高い（2024 年では第 1 位、第 2 位）。一方、2024 年 10 月 18 日の爆発の噴煙高度は 4,000m に達

したが、オンラインシステムによる噴出量の積算値はわずか 120 トンであり、他の噴火に比べて非常に小さい。

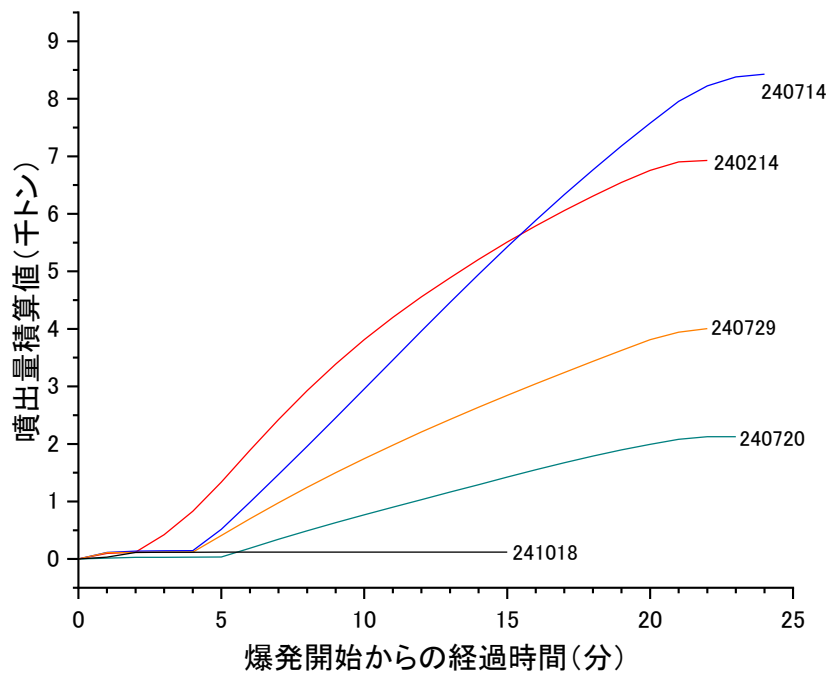


図 81 オンラインシステムが評価した噴出量の積算値の推移。オンラインシステムが噴出率 0 以下と評価するまでを示す。

オンラインシステムによる噴出量の妥当性を検討する。図 82 に有村観測坑道における噴火に伴うひずみ変化を示す。10 月 18 日 1 時 21 分の爆発に伴うひずみ変化は 6 ナノストレイン、その継続時間も 5 分程度であった。他の 4 例と比べてひずみ変化が小さく、その継続時間も短いのがその理由であり、システムとしては正常に稼働したといえる。

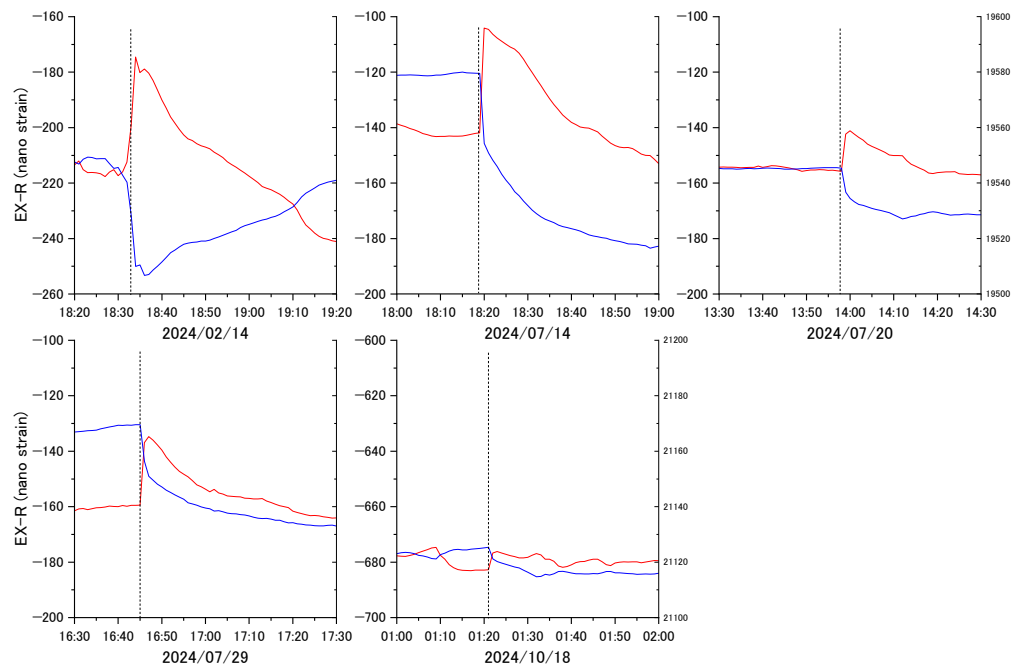


図 82 噴煙階級 5 の爆発に伴う有村観測坑道におけるひずみ変化。赤：火口方向、青：直交方向。破線は爆発の発生時刻を示す。

ハルタ山観測坑道についてみると（図 83）、10 月 18 日 1 時 21 分の爆発に伴うひずみ変化は他の 4 例と比べて小さいが、5 ナノストレイン程度のひずみ変化が明瞭に捉えられており、その継続時間も長い。このことは、噴出量の積算値はわずか 120 トン程度ではなく、もっと多いことを示唆する。有村観測坑道は南岳火口に最も近いので浅い圧力源に起因するひずみの検出感度は高いが、近いために、圧力源の深さを過小に見積もる傾向がある。噴火に伴うひずみ変化の極性が火口方向と直交方向で異なることは浅いことを示す（Iguchi et al., 2013²⁷⁾）。一方、ハルタ山観測坑道における噴火に伴うひずみ変化の極性は火口方向、直交方向とも収縮を示しているので、深い圧力源に対して十分な感度を持っていると考えられる。南岳や昭和火口において発生する爆発は小規模なので、ハルタ山観測坑道における変動検出率は低下するが、ハルタ山観測坑道で地盤変動が検知された場合は、このデータを用いて圧力源解析を行った方がよい。

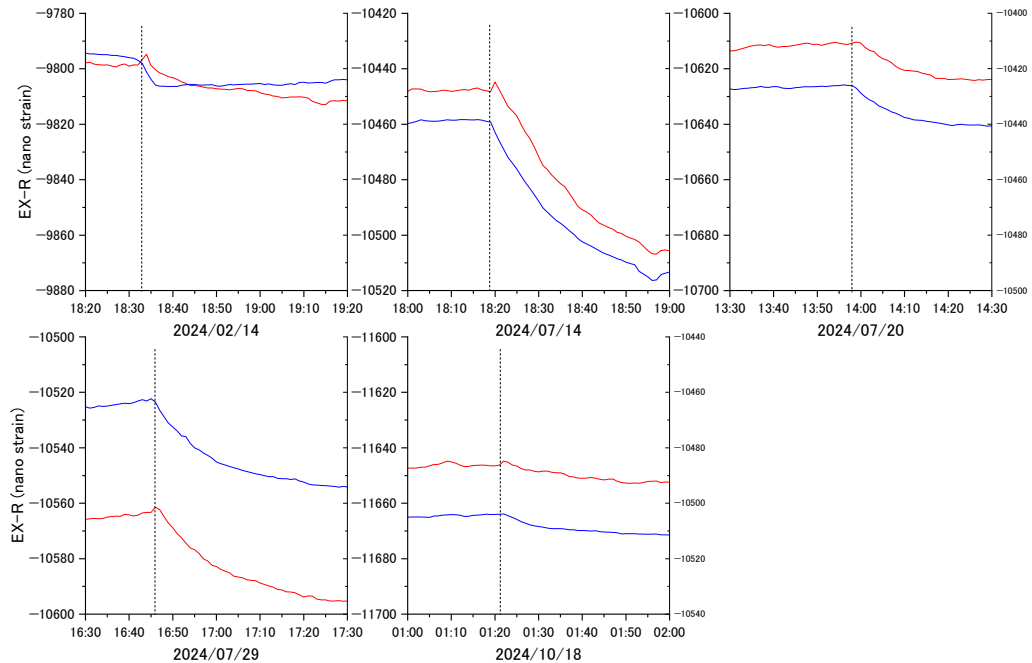


図 83 噴煙階級 5 の爆発に伴うハルタ山観測坑道におけるひずみ変化。赤：火口方向、青：直交方向。破線は爆発の発生時刻を示す。

6) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

令和 6 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。

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。

b) 噴火時刻予測の高精度化に向けた検討

昨年度より稼働している降灰予測シミュレータでは、噴火に前駆する地盤膨張の継続時間を用いて、次の噴火の時刻を予測する（詳細は昨年度報告書、および Ishii & Iguchi, 2024²⁸⁾ を参照）。この手法では、膨張継続時間が典型的な長さである場合には比較的うまく噴火時刻の予測ができるが、長期間膨張が継続する場合の切迫性の評価に課題があった。具体的には、膨張継続時間が最大噴火確率をとる時間（現行システムでは 43 分）を過ぎると、常にいますぐ噴火する確率が最大となってしまう

う。特に現行システムでは、膨張継続時間の長い噴火の検知に特化したアルゴリズムを採用しているため、検知した事例のほとんどが1時間以上の継続時間を有する。したがって、予測計算が行われる大部分の時間において、いまずぐに噴火するという予測が示されることになり、噴火の切迫性評価としては不十分であった。この課題の解決のために、噴火前のひずみの変化率を切迫性評価の指標として用いることを検討した。桜島では、噴火発生の直前に山体の膨張が停滞し、場合によっては収縮に転じてから噴火することが報告されている(Iguchi et al., 2013²⁷⁾; Tameguri & Iguchi, 2019²⁹⁾)。この停滞・収縮を検知できれば、長期的な膨張が継続している場合でも噴火の発生時刻をある程度予測できることが期待される。

調査対象としたのは、有村観測坑道の伸縮計記録(直交方向成分)である。南岳火口で2017~2020年に発生した爆発のうち、膨張継続時間が1時間を超えた事例を用いた。そのうち、膨張検知システムでの検知基準を踏まえて、噴火までの総変動量が13 nstrainを超えるもののみを抽出した結果、全193事例となった。これらの事例に対して、まずひずみ記録の関数形状を評価した。評価には、指標として面積比ARを導入した。これは、膨張開始からのひずみ記録の時間積分値と、[膨張継続時間×ひずみの総変動量/2]の比、である(図84)。ARが1に等しい場合、ひずみは単調増加することを意味し、 <1 の場合は下に凸の関数(噴火に向かって加速的にひずみが増加)、 >1 の場合は上に凸の関数(噴火に向かって徐々にひずみの変化率が低下)であることを意味する。この指標を用いて、簡易的に関数形状の評価を行ったところ、用いたイベントの75%で $AR>1$ となった(図84)。これは、過半数の事例で噴火に向かってひずみの変化率が低下することを意味しており、変化率をトレースすることで噴火の切迫性を評価できる可能性が示唆された。

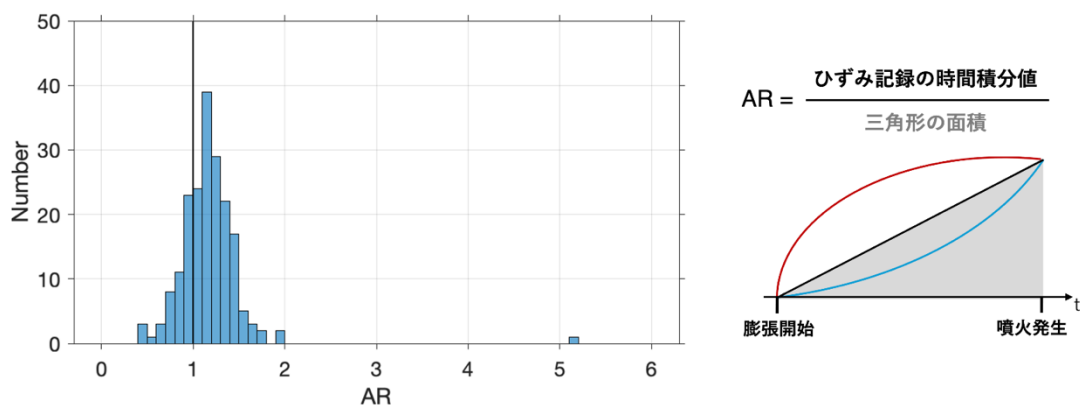


図 84 面積比 AR の分布

そこで、上記で扱った噴火事例について、膨張開始から噴火発生までのひずみの変化率を追跡した。指定した時間窓内のデータを1次関数でフィッティングし、その傾きをひずみの変化率と定義した。時間窓の長さは、10分、30分、60分の3種類を用いた。図86に例として2018年5月30日のひずみ記録とその変化率の時間変化を示す。ひずみの変化率が噴火に向かって徐々に低下する様子がみられる。ま

た、3 種類の時間窓のうち、10 分窓を使用した場合にはばらつきが大きく、60 分窓で評価するのが適切であることがわかる。仮に変化率が 0.1 nstrain/min 以下の場合を、ひずみ変化の停滞と定義すると、噴火の 40 分ほど前に停滞状態になる。図 87 には、全事例についての膨張開始から噴火までの最大変化率と噴火直前の変化率の比較を示す。いずれの時間窓においても、 0.1 nstrain/min 程度の変化率で噴火する事例が多いことがわかる。

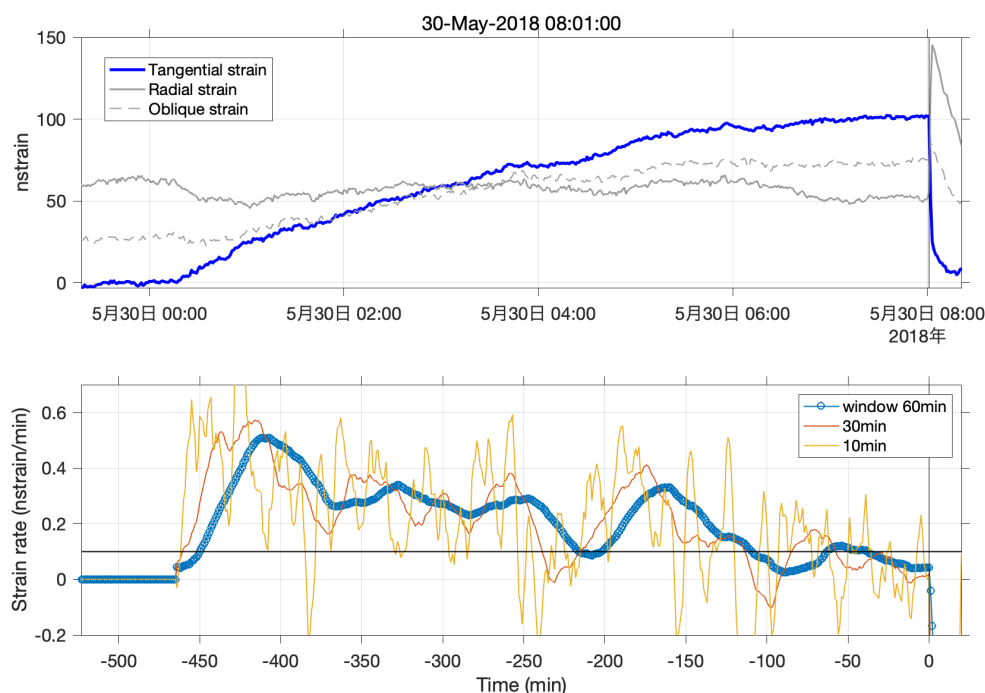


図 86 2018 年 5 月 30 日の噴火に前駆するひずみ記録（上）とひずみ変化率（下）。下図、水平方向の黒線は、ひずみ変化率 0.1 nstrain/min を示す。

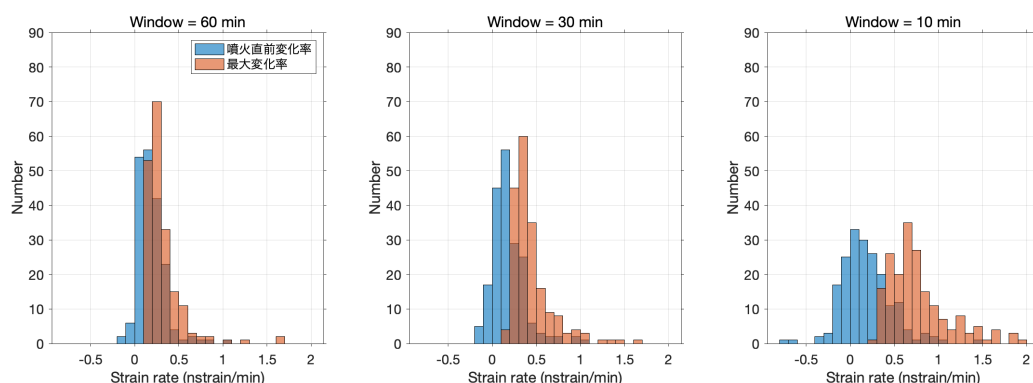


図 87 噴火直前のひずみ変化率（青）と噴火までの最大変化率（赤）の比較。変化率を算出する時間窓長さが、左より 60 分、30 分、10 分。

この結果を踏まえて、ここまでの統計解析に使用していない 2024 年の噴火事例でも同様の基準が適用できるか調査した。用いた事例は、2024 年 2 月 14 日 18:33

に南岳 B 火口で発生した噴火である。この噴火は、2021～2024 年で最大となる 5000 m の噴煙高度を記録している。現行の降灰予測シミュレータでは、2 月 13 日の 17:15 に膨張開始と判定され、同日の 19:00 以降、降灰分布予測が表示されていた。翌 14 日の 6:59 に南岳 A 火口で爆発が発生するものの、膨張は解消されずに 18:33 に噴火が発生した。この事例のひずみ記録とその変化率を図 88 に示す。噴火発生の直前以外にも変化率が低下する時間はあるものの、上で解析した事例と同様に、噴火直前に変化率の低下がみられた。ただこの事例では、膨張開始直後に大きく膨張したあと、比較的緩やかな変化が続くため、停滞状態の判定基準を <0.1 nstrain/min にすると、噴火までのほとんどの時間で停滞判定になってしまう。一方、基準を <0 nstrain/min にした場合、噴火の 62 分前から停滞判定となり、この事例においてはこちらの基準の方が適切である。このように、停滞判定の基準値の汎用性についてはまだ検討の余地が残っているため、今後、解析事例数を増やして適切な基準値を決定する必要がある。

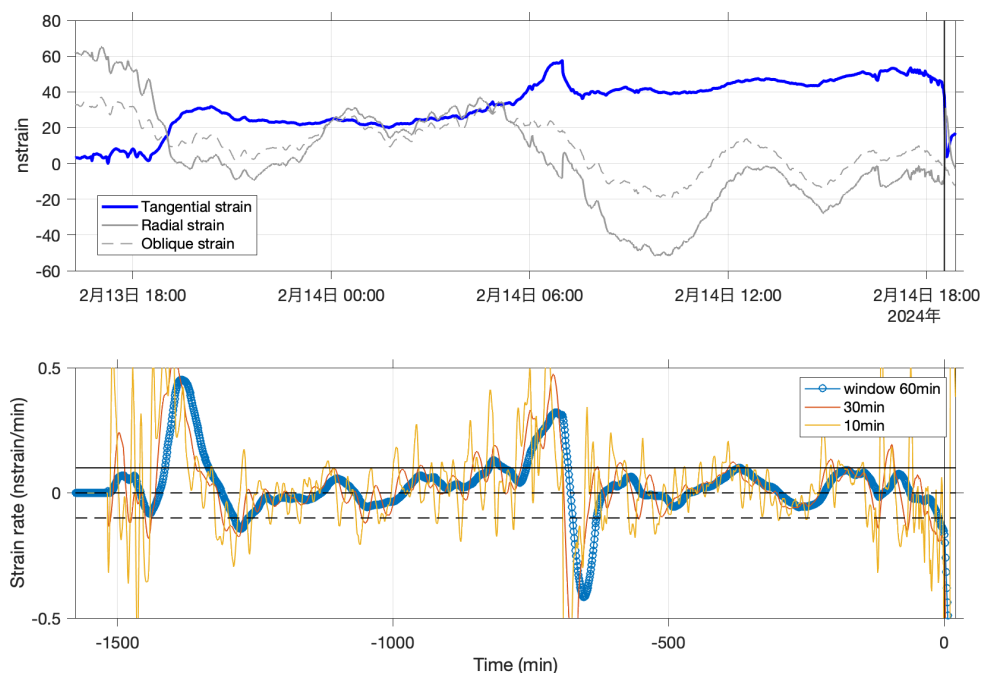


図 88 2024 年 2 月 14 日の噴火に前駆するひずみ記録（上）とその変化率（下）。
下図、水平方向の黒実線はひずみ変化率 0.1 nstrain/min を示し、黒点線は 0 nstrain/min、 -0.1 nstrain/min を示す。

c) 噴火発生前の降灰予測シミュレータの運用結果

i) 膨張の検知と噴火発生前の降灰予測出力結果

本システムは膨張ひずみが検知されたときのみ確率的に噴火発生時刻と火山灰放出率を予測して移流拡散シミュレーションを行う。膨張ひずみが検出されると移流拡散シミュレーションを行うので、噴火発生前の降灰予測が可能となる。2024 年に

は噴煙高度が 2,000m 以上に達した爆発と噴火は 17 回発生した。これらの爆発と噴火に前後するひずみ変化と降灰予測が出力された期間を図 89、90、91 に示す。

17 回の爆発と噴火のうち、13 回について噴火発生前に降灰予測ができた。2024 年 2 月 14 日 08 時 59 分の爆発と 18 時 33 分の爆発では、地盤膨張が急速に進展した 13 日 19 時から降灰予測を開始した（図 89a、b）。08 時 59 分に爆発が発生したが、膨張量に対して、噴火に伴う収縮量が 50%に達しなかったため、システムは引き続き噴火が発生すると判定し降灰予測を継続した。18 時 33 分の爆発は規模が大きかった（噴煙高度 5,000m）ため、13 日 19 時からの膨張量に相当する収縮が発生した。システムは 18 時 33 分まで降灰予測を行い、その後、降灰予測なしと判定した。3 月 15 日 4 時 50 分の噴火（図 89c）では、4 時 6 分に降灰予測を開始し、噴火発生 4 分後の 4 時 54 分まで降灰を予測した。この噴火の場合、パラメータの調整によって 4 時 6 分以前から降灰予測を行うことが可能と思われる。5 月 15 日 14 時 42 分の爆発（図 89d）では、13 時 6 分に降灰予測を開始し、噴火発生約 6 時間後の 20 時 36 分まで降灰を予測した。噴火直後に降灰予測を停止しなかったのは収縮量が膨張量の 50%に満たなかったためであり、その後再び膨張を続けた。5 月 22 日 17 時 18 分の爆発では、14 時 12 分から降灰予測を開始した。なお、当日は観測坑道の定期点検が実施されたことから計器は不安定であり、膨張量は過大となっているかもしれない。

2024 年 7 月 8 日 5 時 13 分の噴火（図 90a）、7 月 14 日 18 時 19 分の爆発（図 90b）、7 月 20 日 13 時 58 分の爆発（図 90c）、7 月 29 日 16 時 46 分の爆発（図 90d）、8 月 6 日 0 時 37 分の爆発（図 90e）、8 月 7 日 14 時 44 分の爆発（図 90f）についてはいずれも噴火発生前に降灰予測を開始している。このうち、噴煙高度 4,500m に達した 7 月 14 日 18 時 19 分の爆発（図 90b）と 4,400m に達した 7 月 29 日 16 時 46 分の爆発（図 90d）では、膨張継続時間が長く、膨張量も大きいので、爆発発生の 21 時間前及び 15 時間前に降灰予測を開始している。8 月 6 日 0 時 37 分の爆発（図 90e）、8 月 7 日 14 時 44 分の爆発（図 90f）では、膨張継続時間が 1–2 時間程度と短い、爆発発生前には降灰予測を開始している。8 月 6 日 21 時 37 分の爆発（図 90e）でも降灰予測を爆発発生前に開始した。この爆発の噴煙は高度 800m で雲入りとされているが、膨張量からみて 3,000m 級であった可能性を指摘できる。実際に、レーダ観測によって、この噴火は高度 4,000 m、つまり火口縁上 2,900 m の噴煙高度であったことが確認できた（図 92）。

11 月 23 日 0 時 52 分の爆発（図 91c）と 12 月 23 日 7 時 29 分の爆発（図 91d）でも、爆発発生前に降灰予測を開始できている。11 月 23 日 0 時 52 分の爆発（図 91c）に先行する膨張は小さかったため、予測を開始したのはわずか 4 分前であった。12 月 23 日 7 時 29 分の爆発（図 91d）では膨張継続時間が長かったため、19 時間前から降灰予測を開始した。

一方、膨張量が小さい場合は、降灰予測が行われなかった。これらは、e: 5 月 20 日 1 時 21 分の爆発（図 89e）、2024 年 8 月 21 日 14 時 57 分の爆発（図 91a）、10 月 18 日 1 時 21 分の爆発（図 91b）、12 月 27 日 16 時 41 分の噴火（図 91e）である。

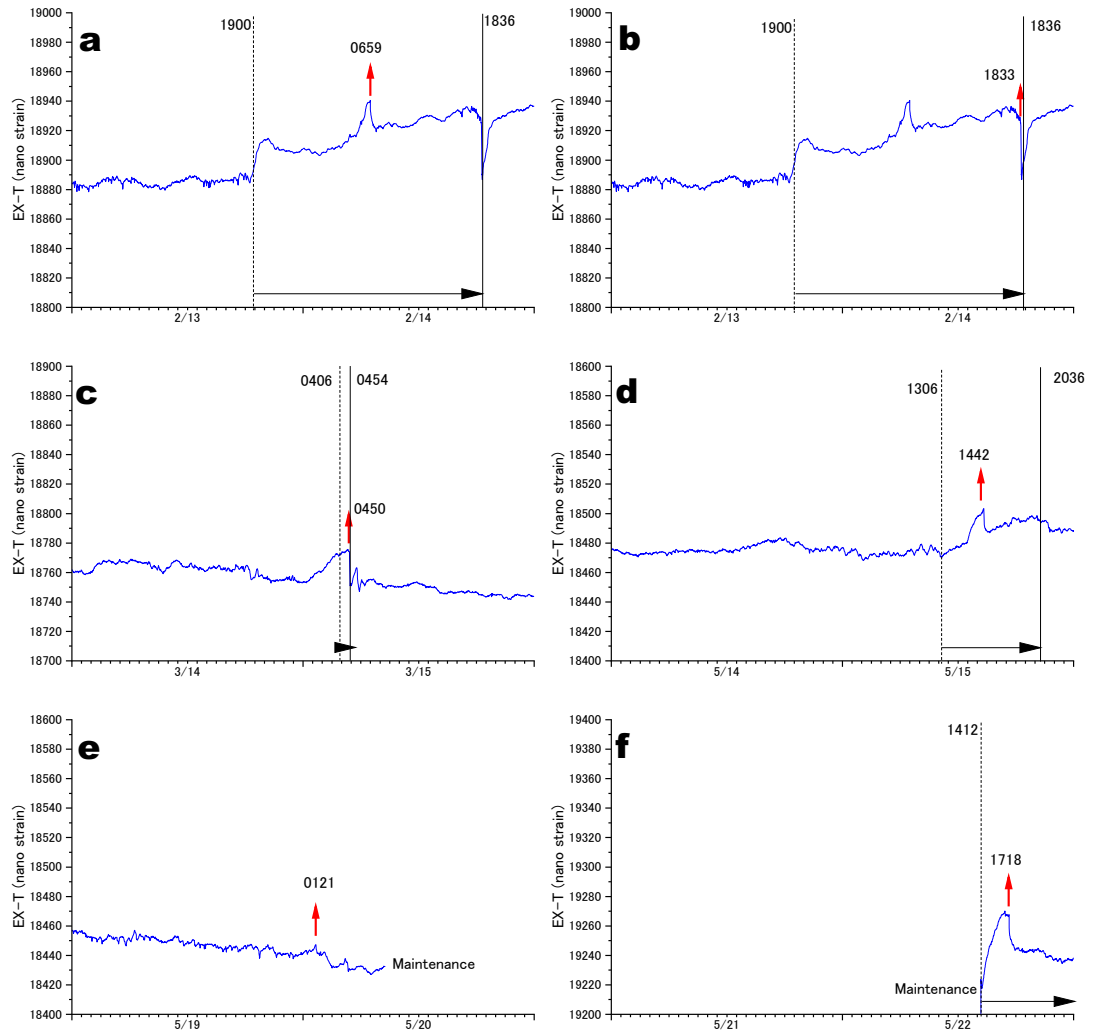


図 89 噴煙高度が 2000m 以上に達した爆発と噴火に前後するひずみ変化と降灰予測が出力された期間。a:2024 年 2 月 14 日 08 時 59 分の爆発、b:同日 18 時 33 分の爆発、c:3 月 15 日 4 時 50 分の噴火、d:5 月 15 日 14 時 42 分の爆発、e: 5 月 20 日 1 時 21 分の爆発、f: 5 月 22 日 17 時 18 分の爆発。赤矢印は爆発または噴火の発生時刻を示す。破線は噴火発生前の降灰予測シミュレータの降灰予測結果の出力開始、実線は出力終了を表し、横矢印が降灰予測結果の出力継続中を意味する。数字は時刻を示す。

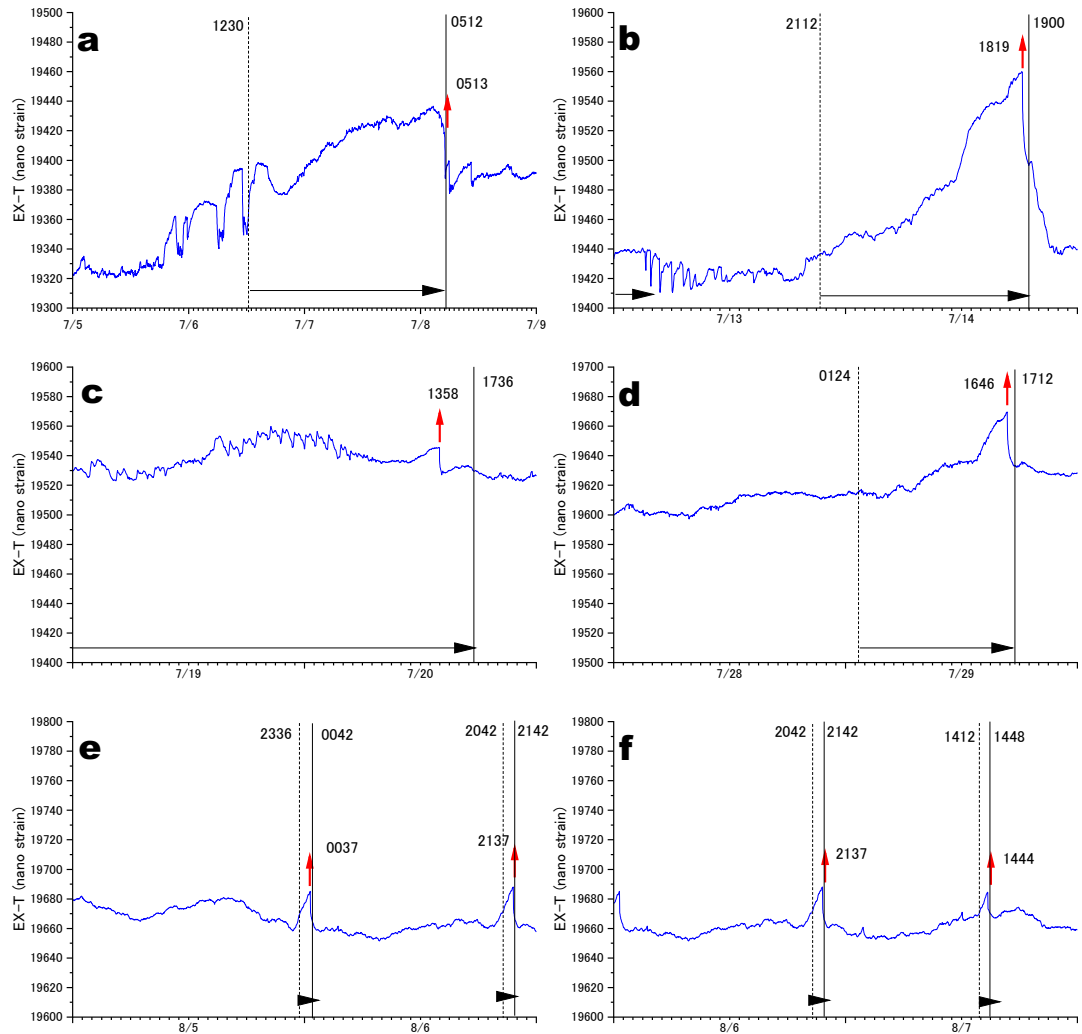


図 90 噴煙高度が 2000m 以上に達した爆発と噴火に前後するひずみ変化と降灰予測が出力された期間。a: 2024 年 7 月 8 日 5 時 13 分の噴火、b: 7 月 14 日 18 時 19 分の爆発、c: 7 月 20 日 13 時 58 分の爆発、d: 7 月 29 日 16 時 46 分の爆発、e: 8 月 6 日 0 時 37 分の爆発、f: 8 月 7 日 14 時 44 分の爆発。赤矢印は爆発または噴火の発生時刻を示す。破線は噴火発生前の降灰予測シミュレータの降灰予測結果の出力開始、実線は出力終了を表し、横矢印が降灰予測結果の出力継続中を意味する。数字は時刻を示す。

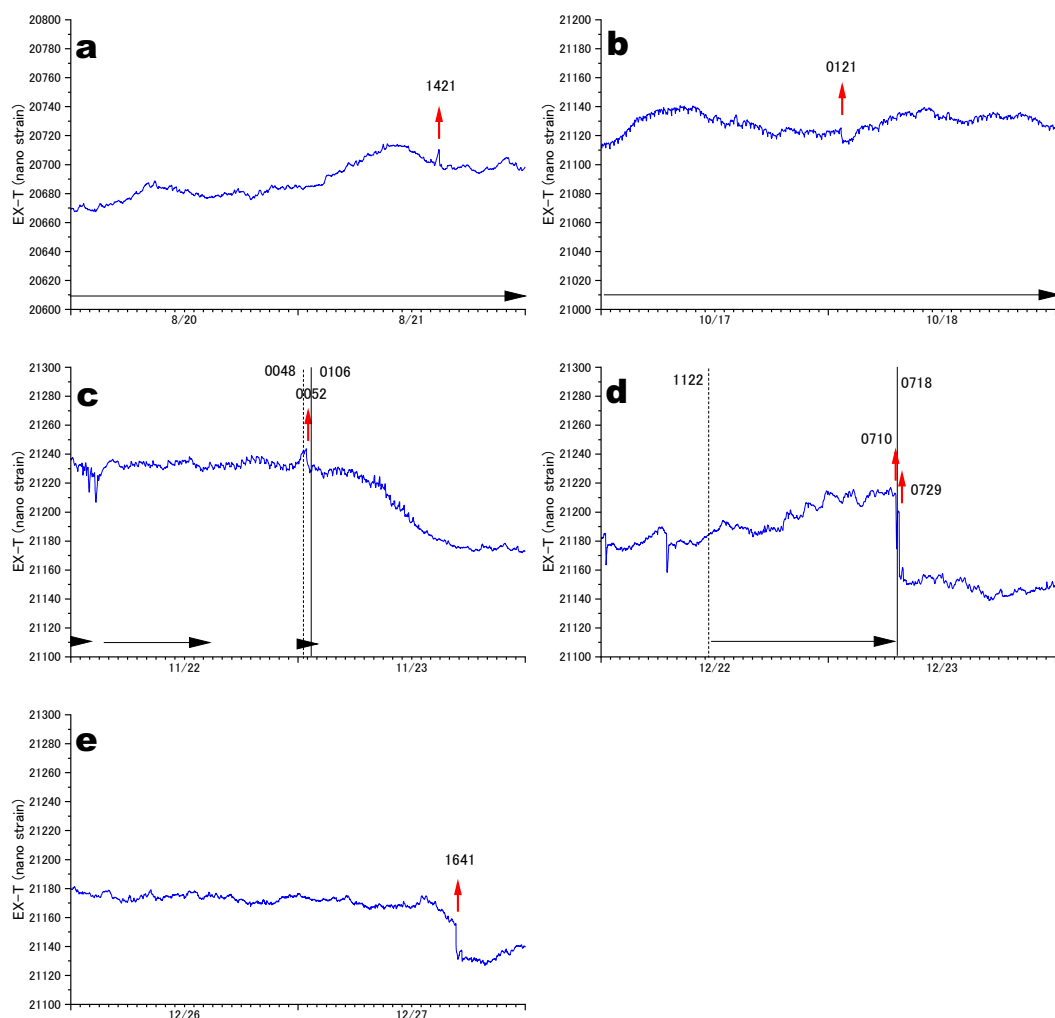


図 91 噴煙高度が 2000m 以上に達した爆発と噴火に前後するひずみ変化と降灰予測が出力された期間。a:2024 年 8 月 21 日 14 時 57 分の爆発、b:10 月 18 日 1 時 21 分の爆発、c:11 月 23 日 0 時 52 分の爆発、d:12 月 23 日 7 時 29 分の爆発、e: 12 月 27 日 16 時 41 分の噴火。赤矢印は爆発または噴火の発生時刻を示す。破線は噴火発生前の降灰予測シミュレータの降灰予測結果の出力開始、実線は出力終了を表し、横矢印が降灰予測結果の出力継続中を意味する。数字は時刻を示す。

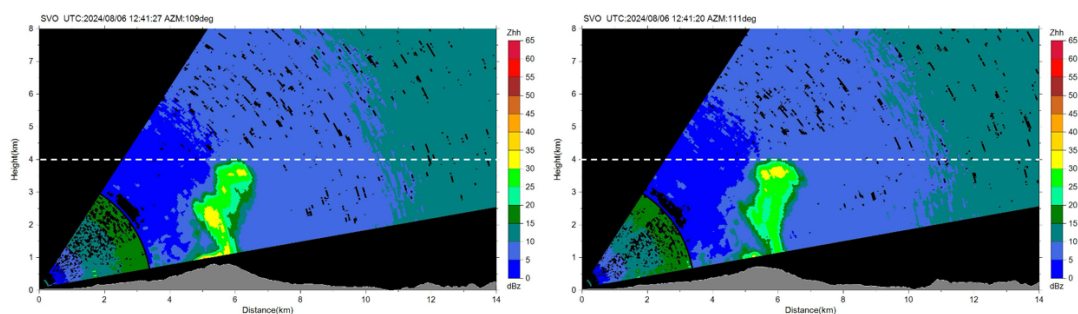


図 92 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2024 年 8 月 6 日 21:41 のレーダによる噴火映像。図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。白破線は反射強度分布から推定した噴煙高度を示す。

ii) 降灰予測の推移

予測される降灰量は、現在時刻における地盤変動量とそれを未来に外挿した確率的な噴火規模予測および確率的な噴火発生予測時刻における風速場に大きく依存する。したがって、時間の経過とともに予測される降灰範囲とその量は変化する。そこで、実際に運用した降灰予測の変化を図 93 に示す。本図は 7 月 29 日 16 時 46 分の爆発に先行する予測の変化を 1 時間ごとに示したものである。2024 年 7 月 29 日 1 時には降灰は予測されていないが、2 時には降灰が表示されている（計算は 6 分ごとに行われるため、最初の降灰は 1 時 24 分に予測される）。最初の予測は、その時点でのわずかな歪み増加に対応している。その後、歪み変化の増加に対応して、降灰予測領域が拡大し、降灰量の予測荷重が増加した。8 時までの降灰予測領域は桜島に限定されているが、これは風が弱かった（鹿児島気象台における高層気象観測の 0-4,400m では風速は 0-5m/s）。その後、予測降灰領域は海岸線を越えて南西方向に広がっており、12 時から輸送方向が西方向に変わった。15 時以降は、南方向または南東方向への移流が支配的となる。ブルカノ式噴火は 16 時 46 分に発生し、火山灰は南東方向に移流した。15 時以降の予測移流方向は、実際の移流方向とほぼ一致している。シミュレータは 17 時 6 分まで降灰を予測していたが、17 時 12 分以降は降灰を予測していない。降灰予測の終了は、ひずみの急激な収縮（最大膨張ひずみ変化の 50%超）と一致する（図 90d）。

iii) ディストロメータ観測による降灰量との比較

噴火発生前に予測された降灰量とディストロメータ観測による降灰量を比較して図 94 と 95 に示す。降灰荷重予測を観測点の降灰荷重と比較する。7 月 29 日 16 時 46 分の爆発では火山灰粒子は ARIR 観測点のみで検出された（図 95 a）。ディストロメータにより観測される火山灰粒子の粒径と落下速度を用いた降灰荷重推定法（Takishita et al., 2024³⁰⁾）によれば、ARIR での荷重は 122g/m^2 と推定される。シミュレーションシステムによる予測荷重は 16:00 で 551 g/m^2 、17:00 で 730 g/m^2 であり、これらの値は観測値より数倍大きい。ARIR 以外の観測点では降灰は観測されなかった。この場合、降灰は実際の降灰よりも広範囲に予測されていることになる。数倍程度の誤差を許容すれば、多くの事例で噴火発生前の予測は実際の降灰におおむね一致しているといえる。最も大きな誤差が発生したのは、8 月 7 日 14 時 44 分の爆発であり、火山灰の移流は北方向に予測されたが、実際の火山灰は南に降下した。



図 93 7 月 29 日 16 時 46 分の爆発発生前の降灰予測の変化。

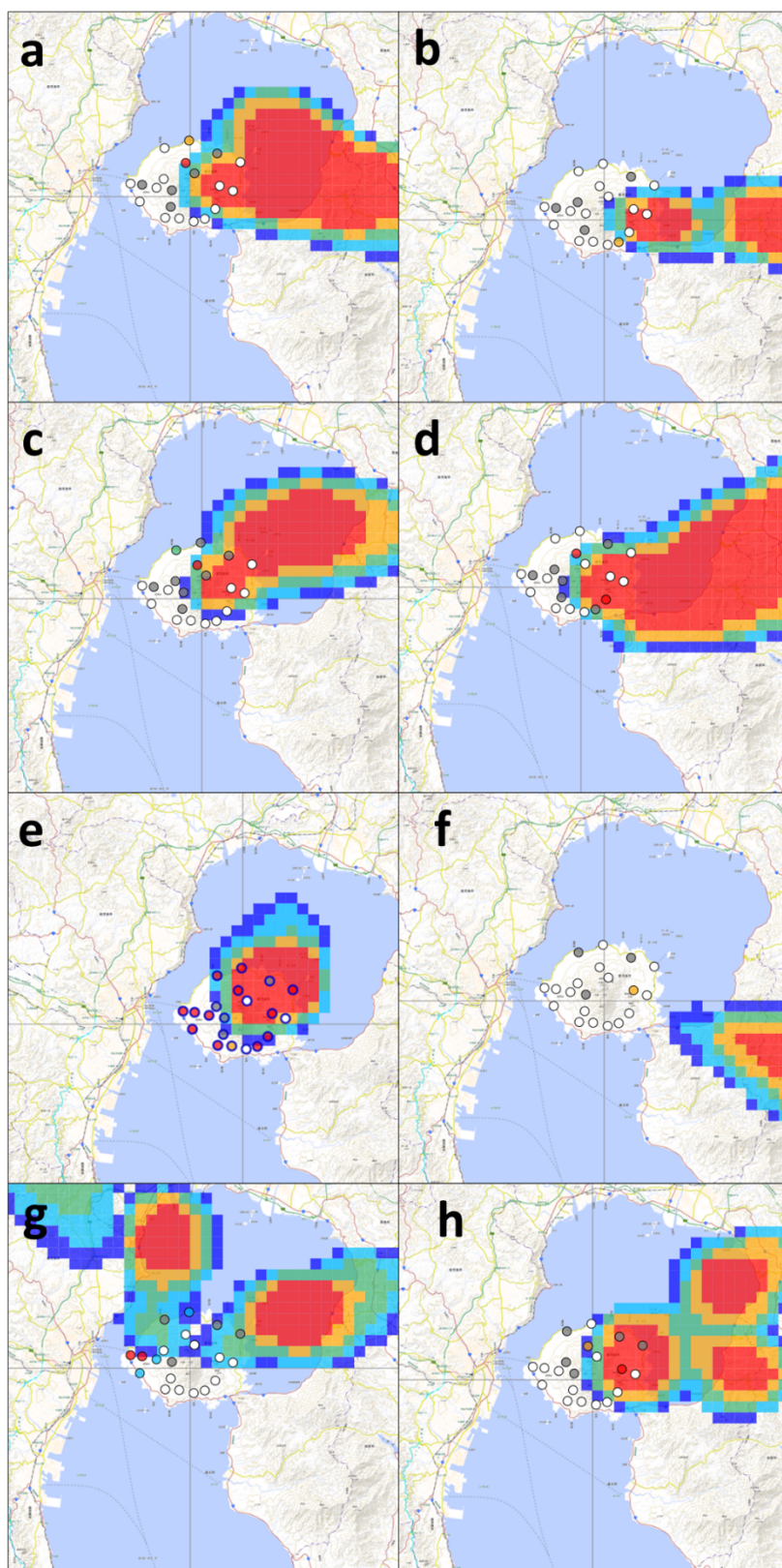


図 94 噴火発生前に予測された降灰量とディストロメータ観測による降灰量の比較。a:2024 年 2 月 14 日 08 時 59 分の爆発、b:同日 18 時 33 分の爆発、c:3 月 15 日 4 時 50 分の噴火、d:5 月 15 日 14 時 42 分の爆発、e:5 月 22 日 17 時 18 分の爆発。f:7 月 8 日 5 時 13 分の噴火、g:7 月 14 日 18 時 19 分の爆発、h:7 月 20 日 13 時 58 分の爆発。

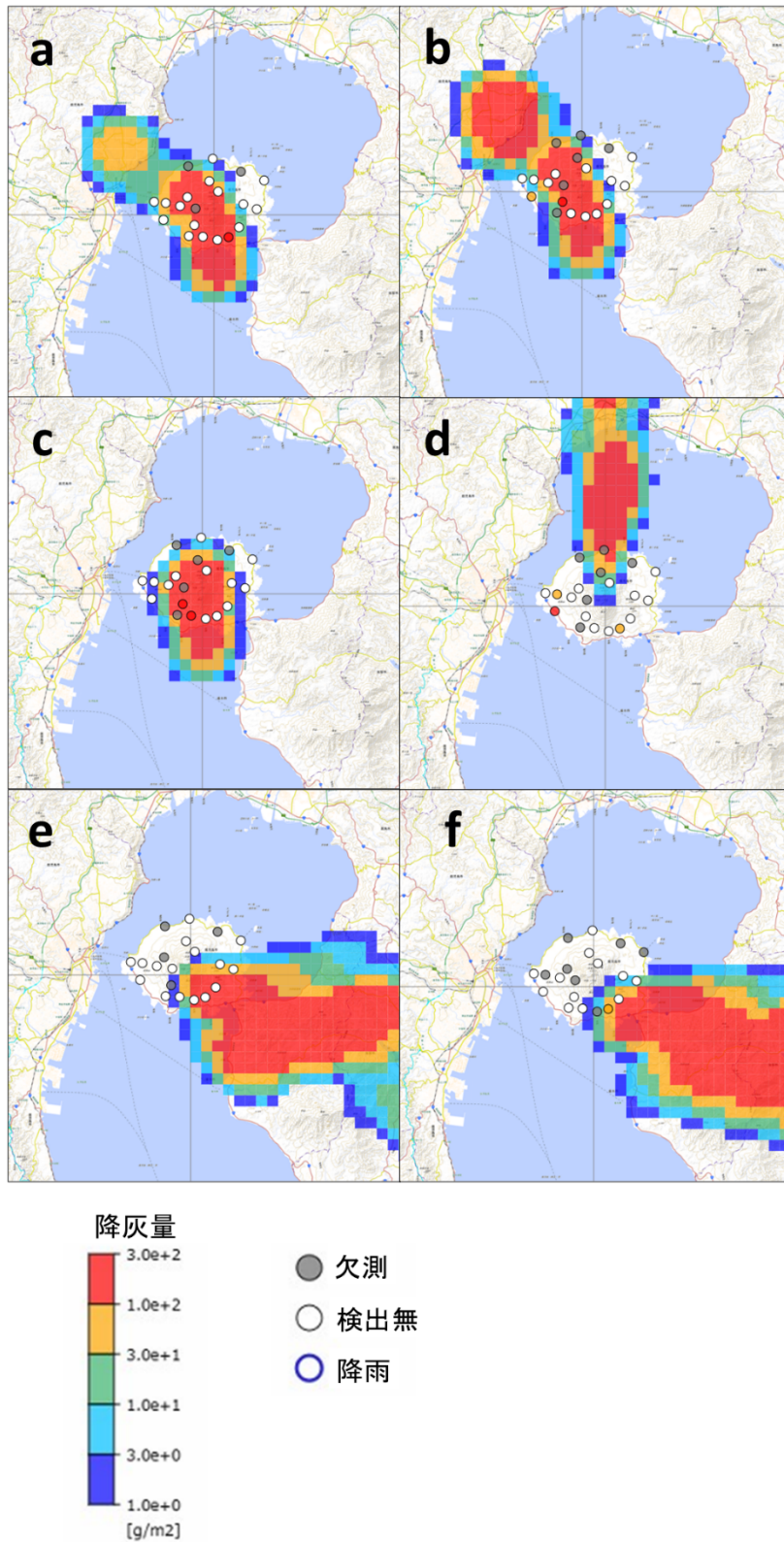


図 95 噴火発生前に予測された降灰量とディストロメータ観測による降灰量の比較。a:2024年7月29日16時46分の爆発、b: 8月6日0時37分の爆発、c:同日21時37分、d: 8月7日14時44分の爆発。e:11月23日0時52分の爆発、f:12月23日7時29分の爆発。

d) 降灰予測検証シミュレータの導入

本年度は昨年度から連続稼働しているリアルタイム予測シミュレータに加えて、降灰予測計算を検証するための新たなシミュレータを導入した。このシミュレータは、過去の指定した期間について降灰予測計算を実施するもので、計算に使用する確率関数や、地盤変動量から噴煙高度への変換に使用する各種係数を手動で変更できる。また、現行の予測シミュレータとの最大の違いは、前項目で報告したように、ひずみ変化率に応じて、ステータス（膨張・停滞・収縮）を判定し、各ステータスで確率関数を変えられる点である。以下では、この検証シミュレータの概要を報告した後、検証事例を紹介し、今後検討すべき課題について述べる。

検証シミュレータの構成は、基本的にリアルタイム予測シミュレータと同じである。伸縮計記録を用いて、噴火時刻 4 通りと噴火規模 5 通りについての 20 通り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。シナリオの発生確率は log-logistic 分布で表される確率関数を用いて計算する。ここで新たに導入されたのが、直交方向ひずみの変化率に応じたステータス判定である。デフォルトでは、60 分の時間窓で変化率を算出し、変化率が >0.1 nstrain/min で膨張、 $-0.1 \sim 0.1$ nstrain/min で停滞、 <-0.1 nstrain/min で収縮の判定をするが、変化率の算出時間窓長さおよび各ステータスの基準値は手動で変更可能である。ステータスによって噴火時刻の確率計算に用いる関数を変更し、log-logistic 分布の形状パラメータ μ と k をそれぞれ入力することで指定する。また、前項目での検討から示唆されるように、変化率が低下するにつれて噴火の切迫性が高くなることから、降灰分布を計算する 4 通りの時刻もステータスによって変更する。以下に、具体的な時刻の決め方を示す。

噴火確率が最も高くなる膨張継続時間を t_{\max} とした場合、

- ・膨張開始からの経過時刻 t_{cur} が t_{\max} に達していない場合 ($t_{\max} > t_{\text{cur}}$)

シミュレーション間隔： $d = t_{\max} - t_{\text{cur}}$

噴火予測時刻 4 ケース： $t_{\max} - d$, t_{\max} , $t_{\max} + d$, $t_{\max} + 2d$

- ・膨張開始からの経過時刻 t_{cur} が t_{\max} を超えた場合 ($t_{\max} \leq t_{\text{cur}}$)

シミュレーション間隔：膨張判定 $d = t_{\text{cur}}/2$

停滞判定 $d = t_{\text{cur}}/4$

収縮判定 $d = t_{\text{cur}}/6$

噴火予測時刻 4 ケース： t_{cur} , $t_{\text{cur}} + d$, $t_{\text{cur}} + 2d$, $t_{\text{cur}} + 3d$

上記の赤字部分が前シミュレータ（リアルタイム予測シミュレータ）からの変更点である。これによって、ひずみ変化率が低下するにつれ（すなわち噴火が近づくにつれ）、シミュレーション間隔が短くなり、より現時刻に近いシナリオを複数計算するような設計になっている。その他にも、図 96 に示すような変数を手動で変更することが可能であり、各種変数の影響の検証が可能である。

予測型噴灰予測検証 検証一覧

戻る

検証設定修正 番号: 4

設定名:

20240214 18:33 検証1

作成者:

石井

内容:

停滞 [0.1~-0.1] 収縮 [-0.1]

開始日時:

2024-02-13 16:00

解析時間(h):

27

状態:

解析済

更新日時:

2025-04-09 01:44:03.061734

検証用計算パラメータ

噴火流入確率時間(min):

43

膨張時噴火確率係数(μ):

76.6799

膨張時噴火確率係数(k):

1.9403

停滞時噴火確率係数(μ):

444.0213

停滞時噴火確率係数(k):

2.2733

収縮時噴火確率係数(μ):

3912.1024

収縮時噴火確率係数(k):

1.779

変動レート評価時間間隔長(min):

60

変動レート評価しきい値(+):

0.1

変動レート評価しきい値(-):

-0.1

グリッド範囲:

Wide

収縮率ケース係数1:

0.2

収縮率ケース係数2:

0.5

収縮率ケース係数3:

1.0

収縮率ケース係数4:

2.0

収縮率ケース係数5:

5.0

収縮率変み付き確率1:

0.4271

収縮率変み付き確率2:

0.4309

収縮率変み付き確率3:

0.1235

収縮率変み付き確率4:

0.0175

収縮率変み付き確率5:

0.001

噴出率減衰係数:

0.85

噴出高度変数係数:

2.6

噴出高度計算係数:

400.0

予測時刻膨張係数1:

0.0

予測時刻膨張係数2:

0.0

予測時刻膨張係数3:

0.0

予測時刻膨張係数4:

0.0

保存

キャンセル

図 96 予測検証システムの各種パラメータ入力画面

次に、本シミュレータでの検証結果を紹介する。例として、上記でも取り上げた2024年2月14日18:33に南岳B火口で発生した噴火を扱う。この事例では前項目での検討より、ひずみ変化率の停滞の基準を0 nstrain/minとするのが適切であった。したがって、 >0 nstrain/min で膨張、 $-0.1 \sim 0$ nstrain/min で停滞、 <-0.1 nstrain/min で収縮と設定した。各ステータスでの確率関数は、表1に示す値をlog-logistic分布の形状パラメータに使用した。このうち、膨張時の値は2017~2020年の全噴火事例（ひずみ変動量が13 nstrainを超えるもののみ）の膨張継続時間の分布を使用して推定した値で、リアルタイム予測シミュレータと同じ値である。一方、停滞時・収縮時の値は、2017~2020年の膨張継続時間が1時間を超える噴火事例のうち、噴火前に <0 nstrain/minあるいは <-0.1 nstrain/minになる事例の膨張継続時間の分布を使用して推定した値である（図97）。しかし、いずれも該当する事例が非常に少ないため、計算上、形状パラメータは決まっているものの、妥当性には議論の余地が残る。今回は試計算という位置付けで、この値を用いて計算した。図98に各ステータスでの確率関数の比較を示す。

表 1 各ステータスでの確率分布の形状パラメータ

	膨張（前シミュレータと同じ）	停滞	収縮
μ (min)	76.6799	659.0636	3912.1024
k	1.9403	1.042	1.779

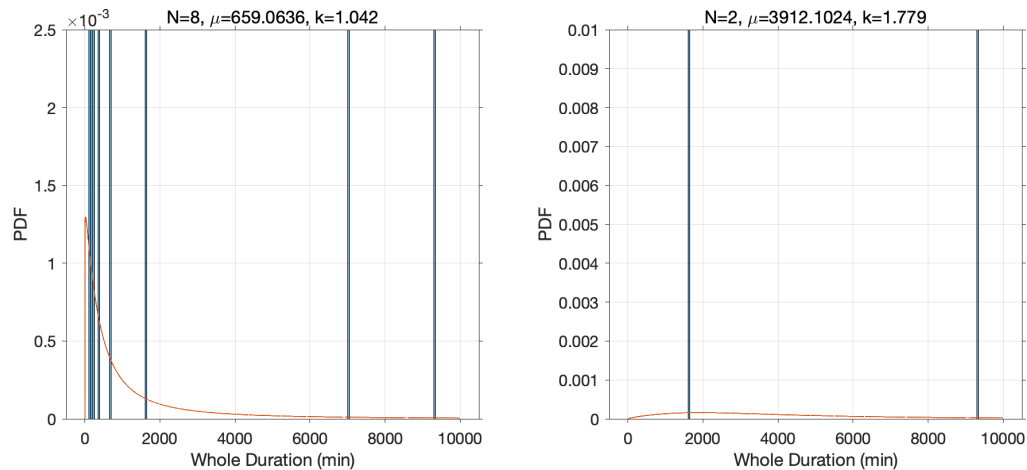


図 97 噴火前に(左) <0 nstrain/min および (右) <-0.1 nstrain/min になる事例の膨張継続時間の分布と推定された確率関数。

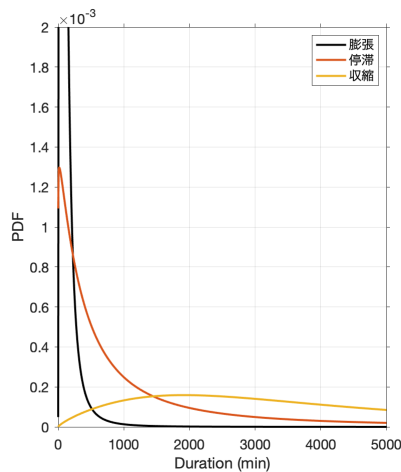


図 98 各ステータスでの膨張継続時間の確率関数。黒：膨張、赤：停滞、黄：収縮。

この設定で計算された降灰分布予測結果を図 99 に示す。噴火 1 時間半前、1 時間前、30 分前、直前（ここでは 3 分前）の予測結果である。比較のため、同噴火について、ステータス判定を採用していない前シミュレータ（リアルタイム予測シミュレータ）での降灰分布予測結果を図 100 に示す。図 99 と図 100 で分布が異なるのは、ステータスが噴火前に膨張から停滞、収縮に変化したことによって、(1) シミュレーション時間間隔が変わり参照する気象場も変わったこと、(2) 確率分布が変わったこと、の 2 点が主要な要因と考えられる。図 101 に膨張開始から噴火までのステータスおよび予測噴火規模・噴火時刻を示す。約 1 日にわたる変動期間中にステータスが変化しており、特に噴火前に停滞→収縮の変化がみられている。しかし、収縮判定になった場合に、噴火の切迫性が上がっているにもかかわらず、噴火確率の最も高い時刻がそれまでの予測よりも遅くなる結果となってしまった(図 101 中段)。

これは、収縮判定時の確率関数が適切でなかったためと考えられ、今後の検討課題である。

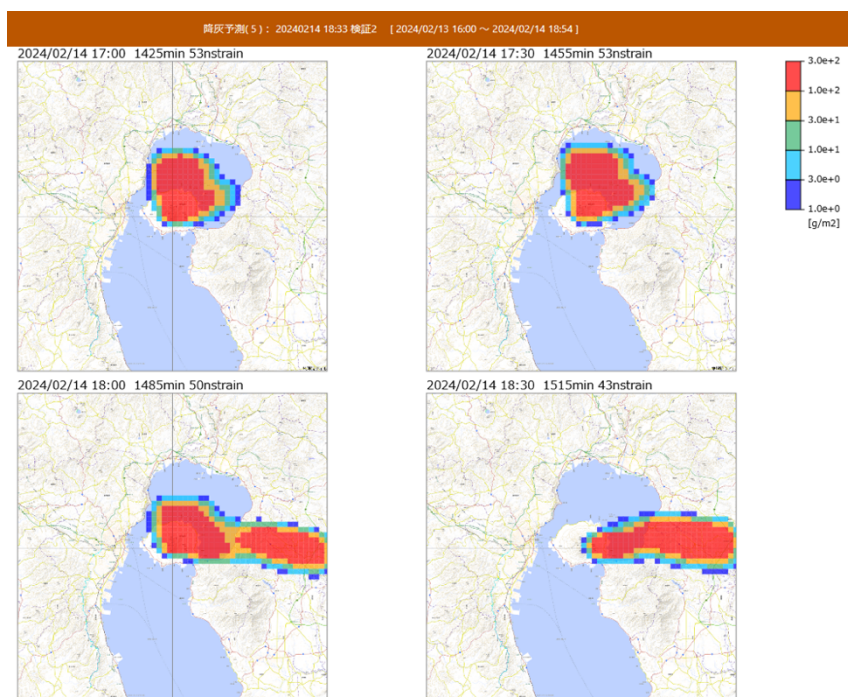


図 99 図 8 2024 年 2 月 14 日噴火の降灰分布予測結果。(左上) 噴火 1 時間半前 (右上) 噴火 1 時間前 (左下) 噴火 30 分前 (右下) 噴火直前。

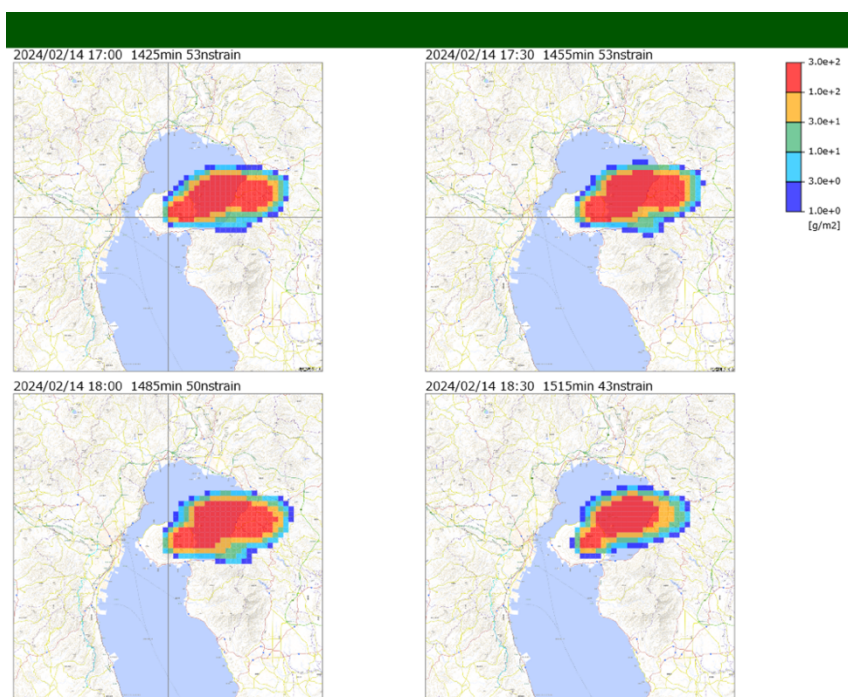


図 100 図 9 参考：ステータス判定を採用しない場合の 2024 年 2 月 14 日噴火の降灰分布予測結果。(左上) 噴火 1 時間半前 (右上) 噴火 1 時間前 (左下) 噴火 30 分前 (右下) 噴火直前。

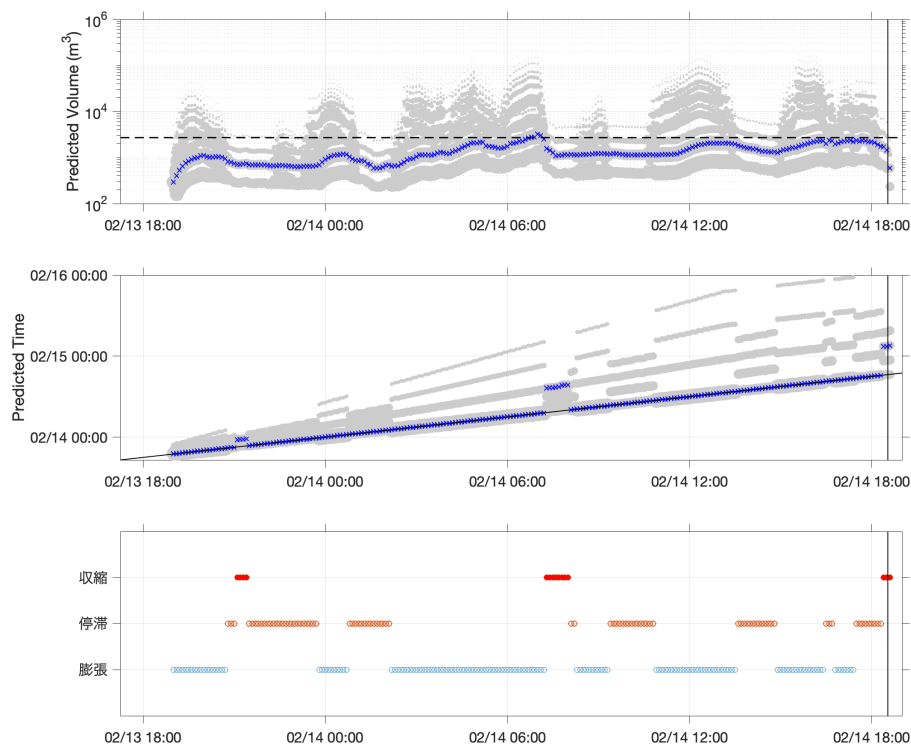


図 101 図 10 2024 年 2 月 14 日噴火における予測シナリオの時間変化。上から予測収縮体積（規模）、予測噴火時刻、ひずみのステータスを示す。上 2 段は、バブルサイズが各シナリオでの確率の大きさを意味し、青クロスが最大確率をもつシナリオである。上段黒点線は実際の収縮体積、黒縦線は噴火時刻。

このようにステータス判定を導入することで、以前のシステムよりも切迫性の評価が改善されたと考えられるが、今後詳細な検証に取り組む予定である。現時点で認識している主要な課題を以下に挙げる。

i) 各ステータスの基準値の決定

前述の通り、ひずみ変化率が 0.1 nstrain/min 付近で噴火する事例が多いことがわかっているが、より多くの事例解析を実施して汎用性の高い基準値を決定する必要がある。

ii) 各ステータスでの確率関数の与え方

現在は暫定的に、噴火前に停滞あるいは収縮判定になる事例の膨張継続時間から推定した確率分布を用いている（図 97）。ただ、特に収縮判定時において、噴火時刻が遅く予測されてしまう問題が生じている。この問題は、確率関数の変数に膨張開始からの時間ではなく、ステータスが変ってから時間（すなわち停滞継続時間・収縮継続時間）を用いることで解決すると考えている。

e) 噴火切迫度の表示方法

噴火前にステータスの変化が捉えられるようになったが、現システムでは加重平均した降灰分布のみが表示されるために、見た目では切迫性を認知できない。計算結果の表示方法の再検討が必要である。

(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トロメータによる降灰量観測の結果の集約が進んだ。さらに、噴火事例数が増えて充実し、データベースを元に電子ブックを作成し、公開に向けての準備を行った。また、船舶レーダにより高時間分解能での噴煙把握の技術開発が進んだ。

連続化シミュレータにおいて根幹となる地震動と地盤変動を用いた経験式による火山灰噴出率即時推定の高精度化を、最近の桜島の噴火活動と、諏訪之瀬島とシナブン火山のデータを元に進められた。また、火山灰粒子の凝集過程の検討によりディストロメータ観測による火山灰把握の高精度化、そして、火山灰の誘電ファクターの検討によりレーダ観測による火山灰量把握の高精度化を進めた。

連続化シミュレータの問題点の抽出とパラメータの調整とともに、レーダ観測による噴煙高度やディスト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との照合を進めた。また、噴火時刻予測の高精度化に向けた検討を進めた。

連続化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するにあたって、自治体の防災担当者の意見を聴取によって、シミュレータ表示部において噴煙高度と地図において火山灰の厚さを表示することによって、理解が深まるという貴重な意見を頂いたので、令和7年度に実装する予定としている。

(d) 引用文献

- 1) Shimizu A., Iguchi M., Nakamichi H. (2021) Seasonal Variations of Volcanic Ash and Aerosol Emissions around Sakurajima Detected by Two Lidars. *Atmosphere*, 12 (3), 326.
- 2) 鹿児島県 (2024) 鹿児島県ホームページ, URL:
<http://www.pref.kagoshima.jp/bosai/sonae/sakurajima/index.html>
- 3) 江頭庸夫・石原和弘 (1979) 桜島火山周辺における火山灰の降下堆積状態, 火山, 24, 88
- 4) Eto, T. (1989) An estimation of the amount and the dispersal of volcanic ash-falls ejected by summit eruptions at Sakurajima Volcano, *Proceedings, Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988*, 448-451.
- 5) Eto, T. (2001) Estimation of the amount and dispersal of volcanic ash-fall deposits ejected by vulcanian type eruption, *Rep. Fac. Sci. Kagoshima Univ.*, 34, 35-46.
- 6) Gunn, R., Kinzer, G. D. (1949) The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air, *J. Meteorol.*, 6, 243-248.

- 7) Iguchi, M. (2016) Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash - Case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan, *J. Disaster Res.*, 11, 1, 4-14.
- 8) Takishita, K., Poulidis, A.P., Iguchi, M. (2022) In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 421, 107442.
- 9) Kobori, T., Maki, M., Fujiyoshi, Y., Iguchi, M., Fukushima, S. (2022) Estimating volcano eruption column height and growth rate using X-band marine radar at the Sakurajima volcano, *SOLA*, 18, 231-235, doi:10.2151/sola.2022-037.
- 10) 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.
- 11) Morton, B.R., Taylor, G., Turner, J.S. (1956) Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, *Proc. Roy. Soc. Ser. A.*, 234, 1-23.
- 12) Degruyter, W., Bonadonna, C. (2012) Improving on mass flow rate estimates of volcanic eruptions, *Geophys. Res. Lett.*, 9, L16308.
- 13) Syarifuddin, M., Oishi, S., Nakamichi, H., Maki, M., Hapsari, R.I., Mawandha, H.G., Aisyah, N., Basuki, A., Loeqman, A., Shimomura, M., Iguchi, M. (2020) A real-time tephra fallout rate model by a small-compact X-band Multi-parameter radar, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 405, 107040.
- 14) Van Eaton, A.R., Muirhead, J.D., Wilson, C.J.N., Cimarelli, C. (2012) Growth of volcanic ash aggregates in the presence of liquid water and ice: an experimental approach, *Bull. Volcanol.*, 74, 1963-1984, doi:10.1007/s00445-012-0634-9.
- 15) James, M.R., Lane, S.J., Gilbert, J.S. (2003) Density, construction, and drag coefficient of electrostatic volcanic ash aggregates, *J. Geophys. Res.*, 108, B9, 2435, doi:10.1029/2002JB002011.
- 16) Pfeiffer, T., Costa, A., Macedonio, G. (2005) A model for the numerical simulation of tephra fall deposits, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 140, 273-294, doi:10.1016/j.jvolgeores.2004.09.001.
- 17) Dioguardi, F., Mele, D., Dellino, P. (2018) A new one-equation model of fluid drag for irregularly shaped particles valid over a wide range of Reynolds number, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 144-156, doi:10.1029/2017JB014926.
- 18) Wilson, L., Huang, T.C. (1979) The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 44, 2, 311-324.

- 19) Dellino, P., Mele, D., Bonasia, R., Braia, G., La Volpe, L., Sulpizio, R. (2005) The analysis of the influence of pumice shape on its terminal velocity, *Geophys. Res. Lett.*, 32, 21306, doi:10.1029/2005GL023954.
- 20) Suzuki (1983)
- 21) Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Yamaguchi, S., Nakai, S., Shiina, T., and Muramoto, K.-I. (2016) Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for snowpack modeling applications, *The Cryosphere*, 10, 2831-2845, doi:10.5194/tc-10-2831-2016.
- 22) Adams, R.J., Perger, W.F., Rose, W.I., Kostinski, A. (1996) Measurements of the complex dielectric constant of volcanic ash from 4 to 19 GHz, *J. Geophys. Res.*, 101, B4, 8175-8185, doi:10.1029/96JB00193.
- 23) Oguchi, T., Udagawa, M., Nanba, N., Maki, M., and Ishimine, Y. (2009) Measurements of dielectric constant of volcanic ash erupted from five volcanoes in Japan. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 47(4), 1089-1096.
- 24) Sauvageot, H. (1992): *Radar Meteorology*. Artech House, ISBN 0-89006-318-4, 366.
- 25) Debye, P. (1992) *Polar Molecules*. Chemical Catalogue Co. New York.
- 26) Iguchi, M., Yamada, T., Tameguri, T. (2022) Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, as revealed by non-eruptive deflation, *Front. Earth Sci.*, doi:10.3389/feart.2022.727909.
- 27) Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S., Nakao, S. (2013) Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 1, 115-135.
- 28) Ishii K., Iguchi, M. (2024) Statistical analysis of the ground deformation of Vulcania explosions at Sakurajima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 455, 108185, doi:10.1016/j.jvolgeores.2024.108185.
- 29) Tameguri, T., Iguchi, M. (2019) Characteristics of micro-earthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 372, 23-33, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.01.016.
- 30) Takishita, K., Poulidis, A.P., Iguchi, M. (2024) Tephra segregation profiles based on disdrometer observations and tephra dispersal modeling: Vulcanian eruptions of Sakurajima volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 76, 29, doi:10.1186/s40623-023-01952-y.

(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 予測検証用シミュレータ AshFallEstV	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で、設定により時 刻やパラメータを変更してシミュレーションを行う ことで、予測検証をおこなう。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和 7 年度の業務計画案

令和 7 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）の最終年度である。令和 7 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、火山灰拡散予測の高速度化および高精度化を進めるとともに、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してもらい、自治体の防災担当者の意見を参考に、シミュレータインターフェースを改良する。

(a) 業務計画、実施方法

業務は以下の 6 項目について実施する。

1) プロジェクトの総合推進

当該プロジェクトと関係するプロジェクトと連携して、プロジェクト最終年度としての取りまとめの研究集会を開催する。また、火山灰ハザード評価シミュレータによる結果を自治体担当者に閲覧してもらい、自治体の防災担当者の意見を参考に、シミュレータインターフェースの改良をする。

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 X バンドレーダー観測を継続し、必要なメンテナンス作業（保守点検作業）も併せておこなう。桜島一円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ために、故障したディストロメータの取り替えを行う。その上で、降灰量の時間変化を把握する。また、噴火頻発時や規模の大きい噴火が発生したときに火山灰採集を行う。X バンドレーダーにより観測される噴煙の反射強度からの降灰量推定精度を向上させる。また、時間分解能が高い船舶レーダーと空

間把握範囲の広い X バンドレーダーを組み合わせ、噴煙拡散の時空間変化把握の高精度化を進める。X バンドレーダーの観測データから求めた過去の顕著な噴火事例の降灰情報およびレーダー反射強度の動画化と web データベース化を進める。

これまでに設置した GNSS による噴煙観測を継続する。解析から得られる LC 搬送波位相残差および SN 比の低下を噴煙様式や噴煙含有水蒸気量と関連付けて検討する。

桜島のライダーによる火山灰観測を継続し、火山灰の消散係数の上限を決定し、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との関係を検討する。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

地震動、傾斜変動、空気振動を再検討し、火山ガスの放出を考慮することによって火山灰噴出率推定式の高精度化を進める。

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行う。そして、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速化技術開発

気象モデルや流体計算モデルを利用して高分解能の火山灰拡散シミュレーションを行う。その際に、実測データの取り込みにより、火山灰拡散と降灰のシミュレーションによる予測精度向上を図る。

ディストロメータにて火山灰粒子の落下速度を計測し、落下速度から見かけの粒子比重を求め、火山灰粒子の凝集の程度を評価する。

5) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステム開発

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。X バンドレーダー観測による噴煙高度やディスト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

桜島の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のデータベースをつかって、噴出量推定に直接反映される体積変化量推定の高精度化を進める。そのために、これまでに整備してきた、2 種類の確率的火山灰拡散予測シミュレータである、自動連続運用シミュレータとシミュレータ精度検証用のシミュレータのプログラムおよびインターフェースの改良を行い、性能および効率化の向上を図る。

7) 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、研究期間中の国内の火山で、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、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。

(b) 目標とする成果

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

2. 3 サブテーマ 3

(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 研究所巨大地変災害研究領域火山 研究推進センター	担当機関	参事 主任研究員 副領域長 センター長 調査役 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	上級主席技師 副部長	大塚清敏 諏訪 仁 野畑有秀
山梨県富士山科学研究所 富士山火山防災研究センター	参加機関	研究管理幹 研究管理幹 主任研究員 主任研究員 研究員 研究員	吉本充宏 石峯康浩 本多 亮 久保智弘 西澤達治 亀谷伸子
東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター	参加機関	特任教授 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
熊本大学 くまもと水循環・減災研究教育セ ンター	協力機関	教授	宮縁郁夫

(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）で開発された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、既に各自治体が行って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、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。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が続い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。

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。

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となる避難施設の耐衝撃性について、既存の建物への耐衝撃性を向上させるための実験を行い、補強方法の提案に資する結果を得た。

6) 令和3年度：

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で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ツールを開発するとともに、地元自治体の避難対策などに活用した。

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った。
- 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・改善を行った。
- 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た。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した。
- 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、防災関係者にわかりやすく伝えるための方策を検討した。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した。

10) 令和 7 年度：

- i) 周知啓発教育用コンテンツの整理と充実化等を行い、社会実装のあり方と今後の課題について取りまとめる。
- ii) 降灰被害予測コンテンツの研究成果の提供様式を検討し、社会実装のあり方と今後の課題について取りまとめる。
- iii) 避難・救助支援コンテンツに関するこれまでの研究結果の整理し事前防災に役立てる。退避壕（シェルター）等の耐衝撃性を評価する研究成果の社会実装のあり方と今後の課題について取りまとめる。
- iv) 上記 3 コンテンツを含む情報ツールの社会実装に際し、これまで得られた成果や噴火災害評価を防災関係者に分かりやすく提示する方策など情報ツールの利活用に関する課題について取りまとめる。

(e) 令和 6 年度における業務の方法

令和 6 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の高度化と社会実装に向けた準備等

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。昨年度までに引き続きヒヤ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ヤ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、引き続きヒヤ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、前年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。

②降灰被害予測コンテンツの高度化と社会実装に向けた準備等

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。

③避難・救助支援コンテンツの高度化と社会実装に向けた準備等

昨年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。

④情報ツール利活用方策の検討

昨年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、昨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。

(2) 令和 6 年度の成果

(a) 業務の要約

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った。昨年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った。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った。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った。また、前年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った。

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した。あわせて、降灰被害予測コンテンツの拡充・改善を行った。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、狭域降灰シミュレーションにおける再飛散過程の考慮、および、降灰強度から堆積深への変換などを行った。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った。「降灰被害予測コンテンツ試作版」の高度化を目的とし、これまで実施してきた降灰影響評価実験や降灰計算の結果等を踏まえ、降灰量と建物等の機能被害との関係をGIS上で閲覧可能にするツールの開発を行った。

避難・救助支援コンテンツの高度化と社会実装に向けた準備等を目的とし、御嶽山における地元自治体や火山防災協議会と連携した登山者参加型避難訓練や情報伝達訓練を実施した。また、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、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った。

昨年度までに高度化した上記のコンテンツの社会実装に向けた準備等に際し、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した。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った。さらに、データベースを活用した噴火災害評価手法を検討し、新燃岳を対象としてUSGS型の噴火イベントツリーを試作した。

(b) 業務の成果

1) 周知啓発教育用コンテンツの高度化と社会実装に向けた準備等

a) コンテンツ高度化の概要

今年度は、これまでのヒアリング調査などを基にアクセス性を向上させるためにページのレイアウト・構成について修正を行った。ページレイアウトについては図1に示すように箇条書きと説明文の間隔、見出しを付けるなど今後社会実装した際に利用者が容易に情報を検索しやすいように修正を行った。



図1. ページレイアウト・構成の更新（左：更新前 右：更新後）

また、これまで海外の火山に関するデジタルコンテンツなども収集してきたが、国内の情報と国外の情報が分かりやすいように新たに海外の火山のページを設けて（図2）、ページ構成を更新し、コンテンツを再掲載した。近年国内では、あまり火山災害が発生していないが、海外ではアイスランドやインドネシアなどで火山災害が発生しており、海外の火山のページを設けることで、海外の火山災害に関する情報を容易に確認することができるようになった。



図 2. 海外の火山のページ



図 3. 海外の火山のページ

海外の火山についても図 3 に示すように日本の火山と同様に火山ごとに研究機関や観測情報、ハザード情報などが掲載できるようにし、また各火山特有のデジタルコンテンツも掲載できるように改修を行った。今後、海外の火山についてもコンテンツを収集し、情報を充実させる予定である。また、今年度はこれまでのヒアリング調査からニーズの高かった市町村での火山噴火を想定した図上訓練に関するコンテンツを掲載した(図 4 の赤枠)。図上訓練に関する詳しい内容は b) で述べる。



図 4. 火山噴火を想定した図上訓練のコンテンツ

次にコンテンツの社会実装に向けて、防災担当者による防災講演会などでの周知啓発教育用コンテンツの利用について、ヒアリング調査や現地調査を行い、図 5 のように地元の学校などで防災講演に活用していただいた。今後のニーズについては、ヒアリング調査から火砕流などや溶岩流などのシミュレーション動画の要望も高いことから、次世代火山研究プロジェクトの他課題の研究成果などとも連携してコンテンツ情報を充実させる予定である。



図 5. 防災担当者による火山防災に関する講演会の様（北海道七飯町）

b) 防災訓練支援コンテンツ

昨年度と今年度に自治体の防災訓練を中心に現地調査やヒアリング調査を実施した。今年度は 2024 年 11 月に北海道森町の北海道駒ヶ岳周辺住民を対象にした避難訓練と 2025 年 1 月に北海道苫小牧市で行われた北海道庁と苫小牧市による樽前山火山噴火総合防災訓練について、現地調査を行った。北海道森町の避難訓練では、図 6 に示すように町の防災担当者が訓練実施者となり、要支援者の避難や避難所での活動などについて住民の訓練参加の支援を行っていた。次に樽前山火山噴火総合防災訓練では、図 7 に示すように苫小牧市内の医療施設で入院患者の避難訓練や苫小牧市庁舎で関係機関による合同本部運営図上

訓練などが実施されており、火山噴火時の情報共有と関係機関の対応の確認などを行っていた。



図 6. 2024 年 11 月森町での避難訓練の様子（左：要支援者避難、右：避難所対応）



図 7. 2025 年 1 月樽前山火山噴火総合防災訓練の様子（左：患者の搬送、右：合同本部運営図上訓練）

このように昨年度と今年度で自治体による防災訓練の実施方法や内容について調査を行った。その結果、訓練の実施体制と災害対応について表 1 の通りに整理した。表 1 から、実災害時における対応の最前線は市町村であるが、自身の組織内を対象とした実践的な訓練が実施できていないことがわかった。また直接市町村の防災担当者にヒアリング調査を行うと火山灰に関する情報と訓練実施のための資料などのニーズが高かった。

表 1. 訓練の実施体制と災害対応

	訓練(実情)	災害時対応
国・行政機関	総合防災訓練(9月)や機関ごとで実施	全体調整、プッシュ型支援、予算対応など
都道府県	住民向けや職員を対象にした訓練を実施	国と市町村の調整、市町村支援、予算対応など
市町村	都道府県の調整・対応、住民向けの訓練準備	住民対応、都道府県・関係機関対応など
住民	避難訓練、防災講演会	避難

しかし、市町村内の組織を対象に図上訓練を実施するためにはコントローラーやファシリテーターが必要だが、コントローラーなどになるためには対象市町村の地域防災計画の全体や実災害時の情報の流れや各組織の対応などを把握する必要があり、また防災担当者自身がプレイヤーになるため、地域の防災を理解している第3者の支援がないと実施が難しい。そこで、本研究では、久保他（2020）¹⁾を参考に火山防災協議会の枠組みを使い、訓練対象となる市町村と同一火山防災対策協議会内の他市町村の防災担当者の協力を得る形での実施方法を検討した。

今年度は、北海道七飯町を対象に構築した訓練シナリオを使い、実施方法などの検証を行った。訓練シナリオは2024年5月に北海道渡島総合振興局が北海道駒ケ岳を対象として実施した訓練シナリオを参考に、噴火警戒レベル2に上げる前に発表される「火山の状況に関する解説情報（臨時）」から噴火警戒レベル5（北海道駒ケ岳避難基本計画²⁾内のレベル5-1まで）を想定して行った。想定時間と噴火警戒レベル、対応目標を表2に示す。七飯町の防災担当者は噴火警戒レベルの変化に合わせて町の防災体制や避難指示等の対応を行うとともに、住民や観光施設、観光客等から付与情報に対応していく。想定時期は事前調査などから、七飯町の特徴を考慮して観光客の多い10月とした。

表2. 噴火警戒レベルと対応目標

	想定時間(実時間)	噴火警戒レベル	対応目標
10/4	8:30(13:00)	解説情報(臨時)	住民・観光客への周知内容の確認
	8:45(13:15)	Lv2	今後の推移に応じた準備態勢
	9:50(14:20)	Lv3	住民・別荘地対応 観光客対応
	10:20(14:50)	Lv4(小噴火)	高齢者等避難 要支援者対応 学校、福祉施設などの対応
	11:00(15:30)	Lv5(中噴火)	避難指示(第1次避難区域)
	11:30(16:00)	終了	

付与情報の作成については、地域防災計画や避難基本計画などの各種資料を基に災害対応組織や情報の流れ、現状、訓練で洗い出すべき課題などを基に構築した。防災関係機関や自治体において、災害対応のトリガーは気象庁による注意報や警報であるため、噴火シナリオや噴火警戒レベルの判定基準等を参考に想定される状況を付与情報として作成した。また、影響が出る閾値や被害は、これまでの周知啓発教育用コンテンツに掲載している研究成果を活用した。このようなポイントに基づき、訓練時間を3時間として付与情報を83作成した(表3)。

表3. 付与情報の抜粋

経過時間	役名	参加者	役割	状況	内容	発言・結果
8:40:00 J-1	振替情報(座席)	西野啓司氏(気象)	すべてに		北海道消防で火山性地震が観測された。この後、18時15分にL2によろする予定。	
8:45:00 R-0	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		大岩に伝えているが、今日は山梨県に緊急警報が来ているが、地震中に地震を観測した、不安に思っているが、地震にどうなっているか聞いてほしい。	
8:45:00 J-2	L2	西野啓司氏(気象)	すべてに		北海道消防の火山性地震レベルを2に引き上げます。	
8:46:00 M-1	マスコミ	M子(テレビ)	情報伝達		電話取材をさせていただきます。	
8:50:00 D-1	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		先ほど電話したものの、緊急警報は発生する方？	
8:52:00 D-2	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		発生、緊急警報に発生しましたが、緊急警報は発生する方？避難した方がいい方？	
8:55:00 R-1	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		火山性地震レベルが2に引き上げられ、火山性地震レベルが2に引き上げられたので、座席の火山性地震レベルを2に引き上げたい。9:00から25mmの地震を観測したい。	
8:55:00 F-1	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		緊急レベルが上がったが、緊急警報は発生する方？避難した方がいい方？	
9:00:00 R-2	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		今急務で東京にいるが、状況はどうなっている？	
9:00:00 R-3	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		緊急レベルが上がったが、私たちが緊急警報に発生する方？今すぐ避難する方？	
9:12:00 S-1	連絡	大岩M氏(気象)	情報伝達		火山性地震レベルが上がったようだが、こちらでは発生した方がよい方。	
9:15:00 S-2	連絡	大岩M氏(気象)	情報伝達		ちょうど地震が火山性地震に発生しており、このままでは発生する方？避難した方がいい方？	
9:15:00 R-4	連絡	大岩M氏(気象)	情報伝達		緊急レベルが上がったが、発生する方？避難した方がいい方？	
9:20:00 M-2	マスコミ	M子(テレビ)	情報伝達		電話取材をさせていただきます。	
9:22:00 M-1	連絡	大岩M氏(気象)	情報伝達		大岩M氏の件ですが、M氏の最新の最新情報で発生した地震は発生した。	
9:25:00 R-5	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		火山性地震レベルが上がったようだが、状況は発生してほしい。	
9:30:00	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		発生による地震発生は発生する方？	
9:30:00	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		発生による地震発生は発生する方？	
9:35:00 R-7	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		発生による地震発生は発生する方？	
9:40:00 J-6	振替情報(座席)	西野啓司氏(気象)	すべてに		北海道消防で火山性地震が観測された。この後、18時15分にL2によろする予定。	
9:40:00 S-3	連絡	ホテルM氏(気象)	情報伝達		発生による地震発生は発生する方？	下山しており、その状況でホテル大岩に避難
9:45:00 S-4	連絡	ホテルM氏(気象)	情報伝達		発生による地震発生は発生する方？	
9:45:00 R-8	連絡	佐藤M氏(気象)	情報伝達		発生による地震発生は発生する方？	発生による地震発生は発生する方？

このように作成した訓練シナリオを使い、協力機関によるコントローラーによって状況を付与する図上訓練を行った。今回の図上訓練は2025年2月13日に北海道七飯町役場で実施し、訓練参加者は、七飯町7名、森町4名、鹿部町1名、北海道渡島総合振興局2名、北海道防災行政合同会社4名、防災科学技術研究所1名、富士山科学研究所3名(うち北海道駒ヶ岳火山専門家1名)、見学者は函館地方気象台2名、伊達市2名、壮瞥町1名、洞爺湖町1名であった。今回実施した訓練の様子を図8に示す。



図8. 図上訓練の様子(左上:口頭による付与、右上:電話による付与、左下:避難対応の検討、右下:情報の確認)

今回実施した図上訓練では、図8左上や図8右上のように口頭や内線により状況付与を行い、図8左下や図8右下のように付与された情報を適宜情報防災課の職員を中心に他部署の職員と共に災害対応の検討を行った。

訓練後の振り返りでは（図9）、それぞれの対応の課題や避難基本計画では詳細が記載されていない部分や認識の違いなど新たな課題などを共有することができた。また同一協議会内の他町の参加者からは、自身の町に置き換えた際に同様の対応の課題などに気づくことができたとのコメントや北海道渡島総合振興局からは、市町村が対応に追われている中、防災情報システムの入力の依頼などは難しく、道から職員を派遣して市町村の支援を行うことが第一であることに改めて気づいたとコメントがあった。火山専門家からは、これまでの研究成果などにに基づき、過去の噴火による被害や注意すべきこと、状況把握で漏れがないように気を付けるべき点などの説明があった。このようにプレイヤーとコントローラーとで分かれて図上訓練を実施することで、参加者のそれぞれが課題に気づくことができる訓練となった。



図9. 図上訓練の振り返りの様子

次に事後アンケート調査も実施した。図10に回答者の属性を示す。この図から今回の回答者には訓練参加者に加えて、見学者も含まれ、市町村の防災担当者による回答である。図11に「今回の図上訓練の全体はいかがでしたでしょうか。」の設問の回答を示す。この結果、参加者と見学者のほとんども満足いただけた訓練になった。

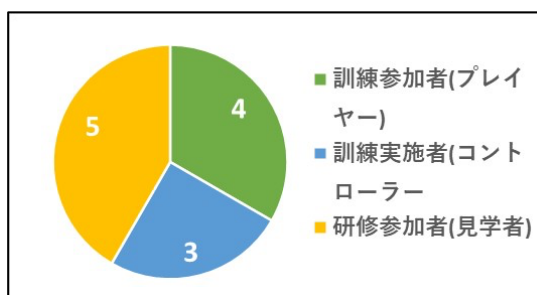


図10. アンケート回答者の属性
(図中の数字は回答数)

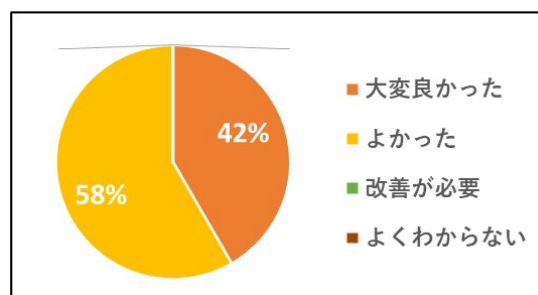


図11. 訓練全体の感想(n=12)

図 12 は、「こういった図上訓練を実施してみたいと思いましたか。」の設問の回答を示す。この図からこれまでのヒアリング調査の結果と同様に実施してみたいという意見が多くみられた。このうち、「実施したいが、難しい」と回答された理由について、自由回答から「普段の仕事上、何もない状態でも忙しすぎて、準備の段階で手に負えなくなりそう。」や「通常業務が多忙であり、また、令和 7 年度は津波の避難計画の改訂や備蓄品の整備等、町内会を対象とした訓練を計画しているため、困難である。」といったように通常業務が多忙であるため、自身の訓練対応まで対応できていないことがわかった。またさらにヒアリング調査したところ、業務の多忙化の要因として、国や都道府県からの調査が多くきており、それぞれに対応するために時間が割かれることで多忙化していることがわかった。このため、自治体の防災力向上のために時間を確保するために、市町村への調査の内容と件数の精査などが必要と考えられる。一方、「実施してみたい」と回答された方に自由回答で「こういった訓練を自身の組織で行うために必要なものや情報などあれば教えてください。」と伺ったところ、「コントローラー」や「関係機関の人的協力と庁舎内の人的協力」といった回答があり、今回の訓練実施形態のように火山防災協議会の枠組みを利用して、関係機関の人的協力によりコントローラーなどを対応いただくことが有効であり、引き続きこの実施方法の検討を進めていく。また、庁内の人的協力については、市町村長のトップダウンなどによって全庁として取り組むための体制を構築する必要があると考えられ、今回のような図上訓練を実施する際に対象市町村の関係者と連携を図り、全庁で参加できる仕組みを検討することが必要である。図 13 は、「今回の訓練シナリオや実施に関する資料を開発中の「火山防災情報ポータルサイト」に掲載しますが、「火山防災情報ポータルサイト」を利用してみたいですか。」の設問の回答を示し、この図から周知啓発教育用コンテンツ（火山防災情報ポータルサイト）の利用希望が高いことがわかり、引き続きこういった防災訓練支援コンテンツを充実させ、周知啓発教育用コンテンツを通じて提供していくことが必要であることがわかった。

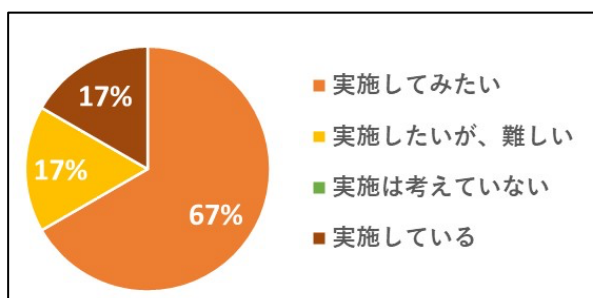


図 12. 訓練実施の要望 (n=12)

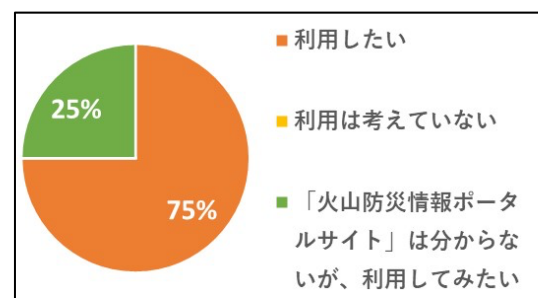


図 13. 周知啓発教育用コンテンツの利用希望 (n=12)

「火山噴火時に火山専門家に期待することを教えてください。」の設問については、自由回答で「現噴火活動に基づく今後の噴火災害の想定提示」や「WEB会議等を開催し、今後の対応についての意見をいただきたい。」といったように今後の噴火の推移やそれによる被害、注意点などのアドバイスを求めていることがわかった。

図 14 に「今回の図上訓練に見学や参加し、火山の噴火対応に必要と感じたものにチェックをしてください(複数回答可)」の設問の回答を示す。この図から今回の図上訓練は市町村の災害対応を中心とした訓練であるため、災害対応マニュアルや噴火警戒レベル、ハザードマップについて高いことが分かった。また、噴火シナリオや火山現象に関する知識なども高く、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの課題 B や C からの研究成果も活用することで火山防災の向上につなげることができると考えられる。

今後の火山防災研究に関するニーズについて自由回答で回答をいただき、「自身が携わる火山の火山噴火シミュレーション動画を協議会として作成したいと考えますが、ご助言を頂きたいです。」や「噴火現象の規模の転換に係るキーワード的現象を知りたい。」、「自治体の防災担当者は、訓練一つとっても手探りの部分もあり、マンネリしている部分もあると思う。今回プレイヤーとしての訓練の重要さも認識できた。今後もいろいろ火山防災に必要と思われることを研究し、現場におろして行ってほしい。」といった回答があり、引き続き、シミュレーション動画等のデジタルコンテンツを掲載していくことが必要であることなどが分かった。

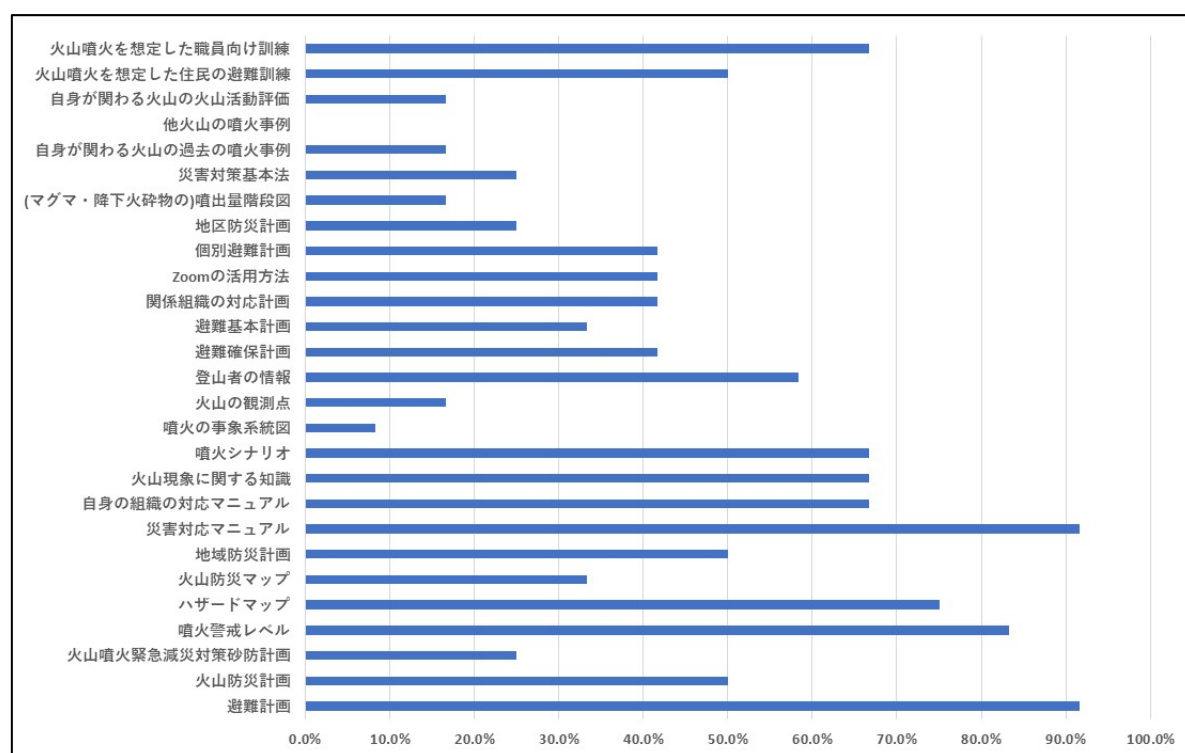


図 14：図上訓練を通じて火山の噴火対応に必要と感じたもの(n=12)

c) コンテンツの充実化

今年度は、これまで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、今年度も火山灰に関するコンテンツを中心に収集を行った。防災関係機関へのヒアリング調査などから、通信や電力、災害時の情報収集で使用するドローンなどへの火山灰の影響について要望が高いことがわかり、これまで降灰被害予測コンテンツで実施してきた降灰実験を参考に実験を行った。今年度作成したコンテンツは、ソ

ソーラーパネルへの降灰の影響とミニドローンへの影響、Bluetooth 通信への影響、NTT 東日本と共同で実施した移動通信局への影響について実験を行い、結果をまとめた。今回実験で使用した火山灰は、2021 年 11 月に山梨県が実施した「火山灰堆積時における車両走行等の体験事業」³⁾で使用した桜島の火山灰を $250\ \mu\text{m}$ に篩ったものと、NTT 東日本と共同実験では、富士山の側火口の一つである大室山の噴火による火山礫を細かく砕き、 $250\ \mu\text{m}$ に篩ったものも利用した。火山灰の堆積厚さは前年度の研究で得られたそれぞれのみかけ密度の値⁴⁾を用いて、厚さに換算して使用した。

ソーラーパネルへの影響については、2024 年 11 月に山梨県富士山科学研究所の敷地内で実験し、ソーラーパネルに電流計を接続して電流の値の変化を計測した(図 15)。その結果、降灰深が 0.01 cm 程度で電流が約 70%低下し、降灰深が 0.05 cm で電流が約 97%低下した。このことから、わずかな火山灰によってソーラーパネルへの影響が大きいことがわかった。今回の実験では、平置きして実験を行ったことから、今後はソーラーパネルを傾斜させて実験を行い、堆積状況と発電への影響について組合せて検討を行う予定である。



図 15. ソーラーパネルへの火山灰の影響実験（左：実験の様子、右：降灰深 0.05cm の様子）

ミニドローンへの影響については、図 16 左に示す図のように $335\ \text{mm} \times 265\ \text{mm} \times 320\ \text{mm}$ の容器内に火山灰が循環して舞うような装置を作り、その中でミニドローンを動かしながら上部から火山灰を投入して、実験を行った(図 16 右)。降灰深が 0.01 mm、0.05 mm、0.1 mm になるように火山灰を投入し、一部火山灰が直上にかかるように降りかけたが、ミニドローンは継続して飛行することができた。実験後のミニドローンの様子を図 17 に示し、この図からミニドローンに火山灰が付着しているが、可動部分にはあまり付着していないことがわかる。これは飛行中にプロペラが動くことで空気が下方に強い気流が発生し、火山灰がかかった際にその気流により付着せずに火山灰が流されるためと考えられる。また実験後、外部で通常飛行させたが、問題なく飛行することができた。



図 16. ミニドローンへの火山灰の影響実験（左：実験装置、右：容器内の様子）

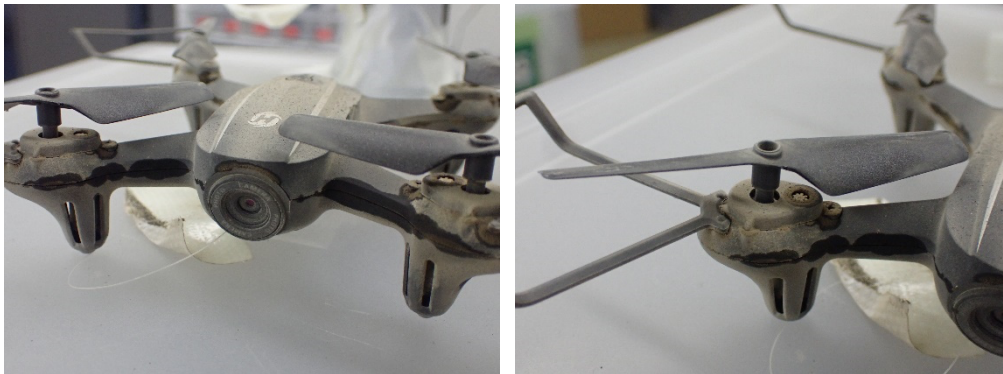


図 17. 実験後のミニドローン

Bluetooth 通信への影響については、火山灰に加えて水や雪などによる影響も考慮して実験を行った。実験に使用した機器は、Witmotion の加速度センサーでレシーバーを PC に接続し、Bluetooth5.0 で通信を行うものである。計測方法は、Python で RSSI 値を計測できるようにして、センサーとレシーバーの距離が 1m になるようにし、RSSI 値を 3 回計測して平均をとり、その変化を計測した(図 18)。今回の実験では、パッキングしたセンサーを直接火山灰や雪、水、大室スコリア(砕く前)などに埋めて実験を行った(図 19)。その結果、水中では、RSSI 値が 20 以上低下し、20 mm 程度の火山灰に埋めたケースと 50 mm 程度のスコリアに埋めたケースで RSSI 値が 5 から 10 程度の低下が見られた。また、図 20 に示すように、ミニドローンで使用した容器を使い、内部にセンサーを置き、火山灰が循環するような環境で降灰深が 0.01 mm、0.05 mm、0.1 mm になるように火山灰を投入したところ、降灰深が厚くなるほど RSSI 値が低下する傾向が見られたが、最大で 5 程度であった。次に 2025 年 2 月 3 日に山梨県富士山科学研究所で降雪があったことから、雪についても検証を行った(図 21)。その結果、センサーを積雪 7cm に埋めた場合は 10 程度の低下が見られたが、火山灰の上に雪のケースと雪の上に火山灰のケースでは(図 22)、逆に 4～6 程度高くなる傾向が見られ、距離を 8m にして再度実験を行ったところ、火山灰の上に雪のケースで 13 程度、雪の上に火山灰のケースで 11 程度の低下が見られた。このことから、1m ではあまり変化が見えにくい可能性もあるため、今後距離を長くした実験を行う予定である。また、今回の実験から Bluetooth 通信には水の影響が大きいことがわかり、このため雪の水分量にも留意して検討を行う必要があることと、今後火山灰と水を組合わせたケースも実施予定である。

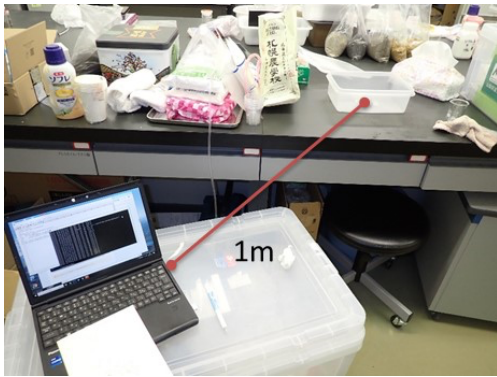


図 18. 実験の様子と使用したセンサー



図 19. 火山灰と水の検証の様子

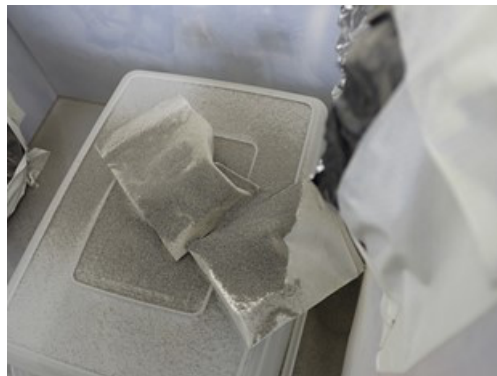


図 20. 容器内での通信実験の様子



図 21. 雪上での通信実験の様子



図 22. 火山灰と雪の組合せ（左：雪の上に火山灰、右火山灰の上に雪）

NTT 東日本と共同で実施した実験では、移動通信局とスターリンクの受信アンテナに検討を行った(図 23)。移動通信局のアンテナはパラボラ形状で、スターリンクの受信アンテナはフラットなタイプのアンテナ形状で、実利用影響が出ないように実験ではカバーをかけて行った。移動通信局のアンテナでは、桜島の火山灰を降灰深 0.2 cm、0.5 cm と積もらせたところ電波状況が低下し、0.5 cm に水を加えたところ、通話が切れてしまった。次にスコリア 2 mm を用いて同様に 0.2、0.5 cm で実験したが、影響は見られなかった。一方、スコリア 250 μm を用いて 0.2、0.5 cm としたところ、桜島の火山灰ほどではないが低下がみられ、0.5cm に水を加えたケースでも通話は可能だった。スターリンクの受信アンテナについては(図 24)、0.1、0.5 cm、さらに水を加えて実験を行ったが、いずれにおいても PC にインストールした通信速度を計測するアプリでは変化が見られず、YouTube の視聴にも影響がなかった。



図 23. NTT 東日本の移動局の実験の様子



図 24. スターリンクの実験の様子

2) 降灰被害予測コンテンツの高度化と社会実装に向けた準備等

a) 狭域降灰シミュレーションにおける再飛散過程の考慮の方法

i) はじめに

建物が密集する市街地への降灰では、建物による気流の乱れによって、上空からの降灰が一様に近くても、建物キャノピーの中の降灰は不均一となる。火山灰の空間濃度や道路への降灰の空間変動は、空調設備や道路交通への影響の出方や対策優先箇所の選定に関係する。本プロジェクト過年度では、その観点から都市街区に対する降灰シミュレーションを行い、降灰の不均一性について、その風の条件や火山灰粒子の粒径への依存性に関する検討を行ってきた。建物屋根や道路等に堆積した火山灰は、特にそれが乾燥状態にある場合、ある程度以上の強さの風によって飛散する。我が国は中緯度の偏西風帯に位置し、低気圧の通過も頻繁であることから、ある程度以上の強さの風が吹く頻度は高く、そのため風による火山灰の飛散は起こりやすいといえる。ここでは、降灰中の風による再飛散が都市の降灰分布に与える影響について降灰計算によって検討した。

ii) 風による再飛散の取り扱い

ある程度以上の強さの風があり、火山灰が乾燥状態にあると、地面や建物屋根などに降り積もった火山灰粒子が、風によって大気中に込まれて風下に流される。同時に重力落下するので離れた場所に再び堆積する。この間、地面近くの空気層では、上空から降ってくる火山灰と風によって巻き上げられた火山灰とが混在する状態になり、火山灰の空間濃度も上昇する。いったん堆積した火山灰粒子の大気中での再飛散現象 (remobilization、aeolian drift) は、乾燥地帯における砂嵐や多雪地域 (低温と強風が頻発する地域) での地吹雪などと類似の現象である。そのため、ここでは、それらの分野での研究でとられている方法を参照して火山灰の再飛散を扱うことにした。

風による再飛散過程は、地面における堆積層の削剥 (空気力学的な浸食、風食、erosion) による気流への粒子の取り込みと、補足された粒子の重力落下しながらの気流による移動 (再配分、redistribution) とからなる。再飛散は砂漠の風紋 (バルハンの移動もそのひとつ) や堆砂、雪の場合の吹き溜まりの形成などにつながる。いっぽうで、都市域では建物などの地面の凹凸が多く、再飛散の様態もそれらの影響によって都市に特徴的なものになると予想される。本研究では対象としていないものの、実際にはさらに街路樹などの都市植栽の葉や幹、車両の屋根、電柱等の送電設備など、風に直接的に触れるあらゆるものに堆積した火山灰も再飛散の元となる。風によって削剥されて砂嵐層 (sand drift layer) に空気力学的に捕捉 (aerodynamic entrainment) される砂粒子の量は、過剰応力 (excess stress) の考え方によって扱われてきている。堆積層表面の単位面積から単位時間당に、風による削剥で空気中に取り込まれる粒子の数 N_a ($\#m^{-2}s^{-1}$) は、Anderson and Hall⁵⁾ によって次の表式が示されている。

$$N_a = \rho \eta_a (u_{*a}^2 - u_{*f}^2) \quad (1)$$

ここで、 ρ は、空気密度 (kgm^{-3})、 u_{*a} は、表面における空気力学的摩擦応力を表す摩擦

速度 (ms^{-1}) である。因みに、 $\tau = \rho u_{*a}^2$ は、気流から地面に与えられる運動量フラックス密度を与える。 u_{*f} は、この大きさを超えると削剥が生じることを示す閾値である限界摩擦速度 (ms^{-1}) である。 η_a は、粒子の質量や大きさに関する係数で、観測、実験等で経験的に求められる。粒子が球形である場合について Shao and Li ⁶⁾ は次式を提案している。

$$N_a = \zeta u_{*a} \left(1 - \frac{u_{*f}^2}{u_{*a}^2}\right) \frac{1}{D^3} \quad (2)$$

ここで、 D は粒子の直径 (m)、 ζ は、実験等で決められる定数である。Nemoto and Nishimura ⁷⁾ は、吹雪に関する実験から $\zeta = 1.0 \times 10^{-3}$ としている。表面が一様な粒径の粒子からなるとすれば、式 (2) の N_a に個々の粒子の質量 $(4/3\pi) \rho_p (D/2)^3$ を乗じると、削剥率 E_A ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) は、

$$E_A = N_a \frac{4}{3} \pi \rho_p \left(\frac{1}{2}D\right)^3 = \zeta u_{*a} \left(1 - \frac{u_{*f}^2}{u_{*a}^2}\right) \frac{1}{D^3} \frac{4}{3} \pi \rho_p \left(\frac{1}{2}D\right)^3 = \zeta \frac{1}{6} \pi \rho_p u_{*a} \left(1 - \frac{u_{*f}^2}{u_{*a}^2}\right) \quad (3)$$

となる。ここで、 ρ_p は火山灰粒子の密度であり、本研究では 2600 kgm^{-3} と仮定した。式 (2) では、 N_a は、粒子の体積に反比例するが、質量フラックス E_A に変換する際に質量（体積に比例）を乗じるため、式 (3) は、粒子形状を球とする場合、粒子の直径に依存しない形となっている。乾燥地帯における砂嵐によって運ばれる量については、風直角方向の単位長さあたり横切る飛砂の流量 (kgm^{-1})（高さ方向に積分されている）として、Bagnold ⁸⁾ によって経験式が与えられたが、ここでは、上記のようにその後の研究者によって示された、削剥率を直接与える式 (3) に従うことにした。なお、式 (3) は、流体による砂や積雪などの堆積物の流体中への取り込み、移動、重力沈降過程の中で、粒子の跳躍現象 (saltation) が卓越する堆積物表面上の薄い空気層 (saltation layer) に対して求められた式である。式 (3) による削剥量を、摩擦応力、あるいはその摩擦応力を与える表面（地面、屋根）上 0.5 m の風速の関数として表したものを図 25 に示す。

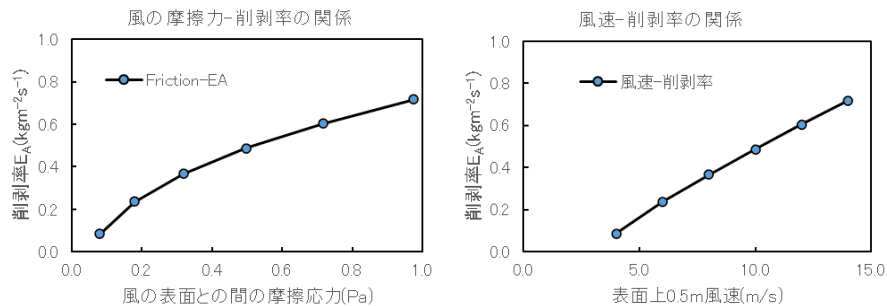


図 25. 風による摩擦力（左）、それを与える風速（右）と削剥率との関係

例えば、1 時間当たりの火山灰堆積厚さの変化が 3 mm/h で、堆積層の見かけの密度が 1600 kgm^{-3} のとき、降灰による下向きの火山灰質量流束密度は $0.00133 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ なので、

削剥率 E_A は、特に遠位領域でよくある程度の降灰強度の値よりもかなり大きな値である。降灰計算の条件設定 (iv 節) で後述する限界摩擦速度、 0.2 ms^{-1} を与える風速は 3.1 ms^{-1} (表面 50 cm 高さの風速、粗度長 0.001 m の場合) である。

iii) 降灰計算の支配方程式への再飛散(drift)の計算式の組み込み

風による火山灰堆積層表面での削剥率の数学的表式については、火山灰そのものに関する先行研究がないため、砂塵嵐や地吹雪で使用されているものを用いる。降灰計算の基本方程式は、粒径 D 毎に与えられ以下の式(4)、(5)になる。これらの式では、異なる粒径の粒子同士の衝突・併合による粒径の変化は考慮されていない。風による削剥に起因する濃度変化率を表す式(4)の最も右側の項は、地面や屋根面の直上の計算格子のみに対して有効な項である (それ以外ではゼロ)。

(火山灰空間濃度の移流拡散式)

$$\partial_t C_D + \nabla \cdot C_D \mathbf{U}_D = \mathbf{D}_{iff}(C_D) + \mathbf{E}_A(C_D)/h \quad (4)$$

(火山灰粒子の運動方程式)

$$m_D \partial_t \mathbf{U}_D + m_D \mathbf{U}_D \cdot \nabla \mathbf{U}_D = -\nabla p_a - (m_D - m_a) \mathbf{g} \\ - 1/2 \rho_{air} C_{draa}(Re) A |\mathbf{U}_D - \mathbf{U}_a| (\mathbf{U}_D - \mathbf{U}_a) \quad (5)$$

ここで、 ∂_t は局所時間微分、 ∇ は空間勾配演算子、 $\nabla \cdot$ はベクトル場の発散演算子、 D は粒径、 C_D は粒径 D の粒子の空間濃度 (kgm^{-3})、 \mathbf{g} は重力加速度、 \mathbf{U}_a は粒径 D の粒子の速度 (重力落下含む)、 m_D は粒径 D の粒子の質量 ($=4/3 \pi \rho_p (D/2)^3$)、 ρ_p は個々の火山灰粒子密度: 2600 kgm^{-3} 、 m_a は粒径 D の粒子と同体積の空気の質量、 A は粒子と気流との間の相対速度からみた粒子の断面積、 \mathbf{U}_a は気流の速度 (風速)、 ρ_a は空気密度、 C_{drag} は抗力係数、 Re : 粒径と粒子-気流相対速度による Reynolds 数 ($=D|\mathbf{U}_D - \mathbf{U}_a|/\nu$)、 ν は、空気の分子動粘性係数、 E_A は風による火山灰堆積層の削剥率 ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 h : は、跳躍層の厚さ (m) である。実際の数値計算では、 h は地面や建物屋根に接する計算格子の半分の高さ (格子中心の高さ) としている。

市街地の降灰計算では、建物があるため風による堆積火山灰層表面からの削剥による大気中への火山灰の質量フラックス (=削剥率 E_A) は、建物屋上や地面からの火山灰の発生として図 26 のように与えられる。したがって、火山灰の削剥による、地面や建物屋根に接する計算格子における火山灰空間濃度 C の増加率 $\Delta C / \Delta t$ は、

$$\frac{\Delta C_D}{\Delta t} = \frac{E_A}{\Delta z_*} \quad (6)$$

ここで、 Δz_* は地面や屋上の第 1 番目の格子の厚さである。式(4)の右辺の最も右側の項にある跳躍層の厚さ h は $h=1/2 \Delta z_*$ としているので、 $\Delta z_*=0.5 \text{ m}$ である。実際の計算では、式(3)の削剥率は、

$$E_A = \varsigma \frac{\pi}{6} u_{*a} \max \left\{ \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_{*a}^2} \right), 0 \right\} \quad (7)$$

とし、摩擦速度 u_{*a} が限界摩擦速度 u_{*f} を越えた場合のみ削剥が生じるとした。摩擦速度は表面近くでの風速の対数則分布を仮定し、 $u_{*a} = \kappa / \ln(\Delta z_*/z_0)$ から求められる値を用いた。ここで、 κ ($=0.4$) はカルマン定数、 z_0 は表面の粗度長さで任意的であるが 0.001 m とおいた。

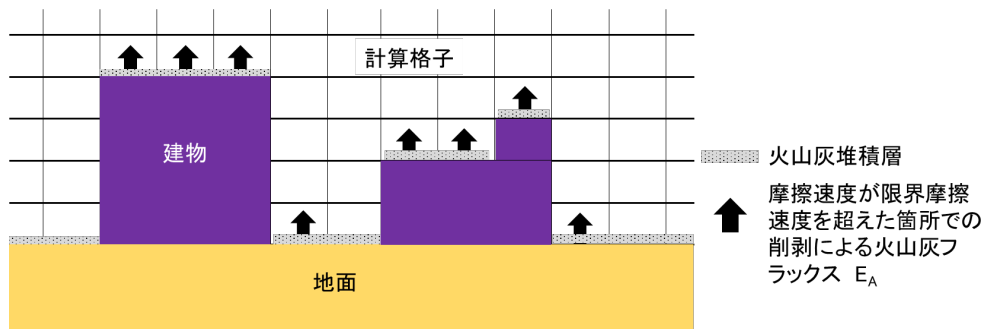


図 26. 削剥による大気への火山灰フラックス E_A の与え方

iv) 計算条件の設定

計算領域の概要を図 27 に示す。計算対象とする市街地は、中低層建物が密集し、そのほぼ中心を幅広い道路が南北に走る東西方向 200 m × 南北方向 280 m の長方形の範囲の市街地とした。計算領域の高さは 500 m とした。座標は東西方向（東向きが正）を X 、南北方向（北向きが正）を Y 軸、高さ方向（上向きが正）の Z 軸とした。数値計算では、計算領域全体を水平面内では分解能 2 m の等間隔の直交直線格子で分割し、高さ方向には、格子間隔 Δz は、地上高度 $0 \sim 40$ m までは 1 m 間隔、それより高い範囲では上に向かって徐々に広がるようにした。図 27 の矩形枠内に示されるように、対象街区の外側には、接近気流を発達させるための計算領域をさらに 2 段階設け、合計で 3 段階の格子となっているが、降灰計算の対象は最も内側のみとした。流入気流は、建築学会地表面粗度区分Ⅲに相当する高度 z に対する指数 0.2 のべき法則にしたがう勾配流として与えた。風速は、地上高度 35 m（便宜上東京管区気象台の風速計設置高さとした）での風速を参照風速とし、参照風速が 6 m/s の場合を主とし、一部、比較のため、 3 m/s、 9 m/s、 12 m/s の気流も用いた。

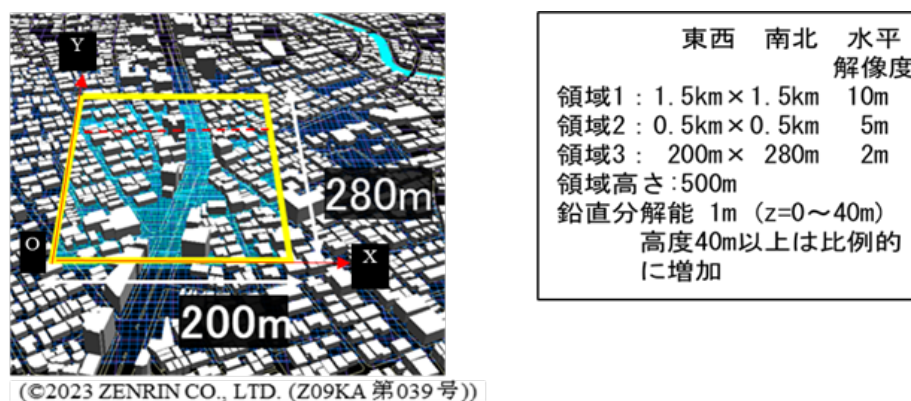


図 27. 計算対象とした市街地、および、計算格子の概要

限界摩擦速度は、気流による空気力学的な作用で表面の粒子が動き始める目安を与えるものであるが、粒子の大きさ・形状、乾湿などの表面の状態によって一般には幅を持った量である。ここでは、便宜的に地吹雪の数値シミュレーション⁹⁾で使用されている $u_{*f}=0.2$ m/s を用いることにした。Nemoto and Nishimura⁷⁾は雪面の場合、雪粒子同士の付着により、砂よりも大きい可能性を示しており、そのため火山灰では乾燥している場合この数値よりも小さい可能性もある。一方で、新鮮な火山灰粒子では、表面に付着した火山ガス成分の影響もあるかもしれな。しかしながら、これらについて先行研究がないためここでは 0.2 m/s を用いることにした。計算領域への上空からの降灰として、時間降灰量 3 mm/h 程度の強さの降灰を与え、降灰と堆積火山灰の風による飛散が同時に生じる場合をについて計算した。この降灰強度は、本プロジェクトの室外機の実験で用いた火山灰の見かけの堆積密度 1600 kgm^{-3} を用いると、下向きの火山灰質量フラックス密度 ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) で $0.00133 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ になる。与えた流入気流に対し定常状態になるまで数値積分を行った。また、地面や建物屋上には、定常状態に達するまでの間、摩擦速度が限界摩擦速度を超えている場所では火山灰の削剥が継続し、大気中に火山灰が止むことなく供給され続けると仮定してある。実際には、地面や屋根などの表面では、火山灰堆積量は有限であり風によって完全に吹き払われて無くなると削剥は停止する。こうした条件については、引き続き R7 年度における降灰被害予測コンテンツの拡充において行う。

v) 再飛散を考慮した場合の計算結果

流入風として西風（図の左から右に吹く）を与えた場合について、図 27 の Y=205 m の位置（市街地の図中に赤い破線が引いてある）における火山灰空間濃度分布の東西一鉛直断面を図 28 に示す。建物の断面が黒いシルエットで表されている。建物は屋根が平面であるよう簡単化してある。参照高度風速 3 m/s、6 m/s、9 m/s、12 m/s、火山灰粒子の粒径 62.5 μm 、125 μm 、250 μm 、500 μm について示す。火山灰の空間濃度は、計算領域上端での降灰の空間濃度（上記の $0.00133 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）に対する比率（ratio）として、無次元化して表現してある。計算領域上端では火山灰粒子は、粒径に応じた終端落下速度で重力沈降すると仮定しているが、このように降灰強度を与えた場合、空間濃度は終端落下速度 V_t に反比例する。そのため粒径 62.5 μm ($V_t=0.25 \text{ ms}^{-1}$) から 500 μm ($V_t=3.11 \text{ ms}^{-1}$) の間で、

空間濃度は 4.74 gm^{-3} から、 0.42 gm^{-3} へと大きく変化する。そのため、無次元化した値によって示すことにした。

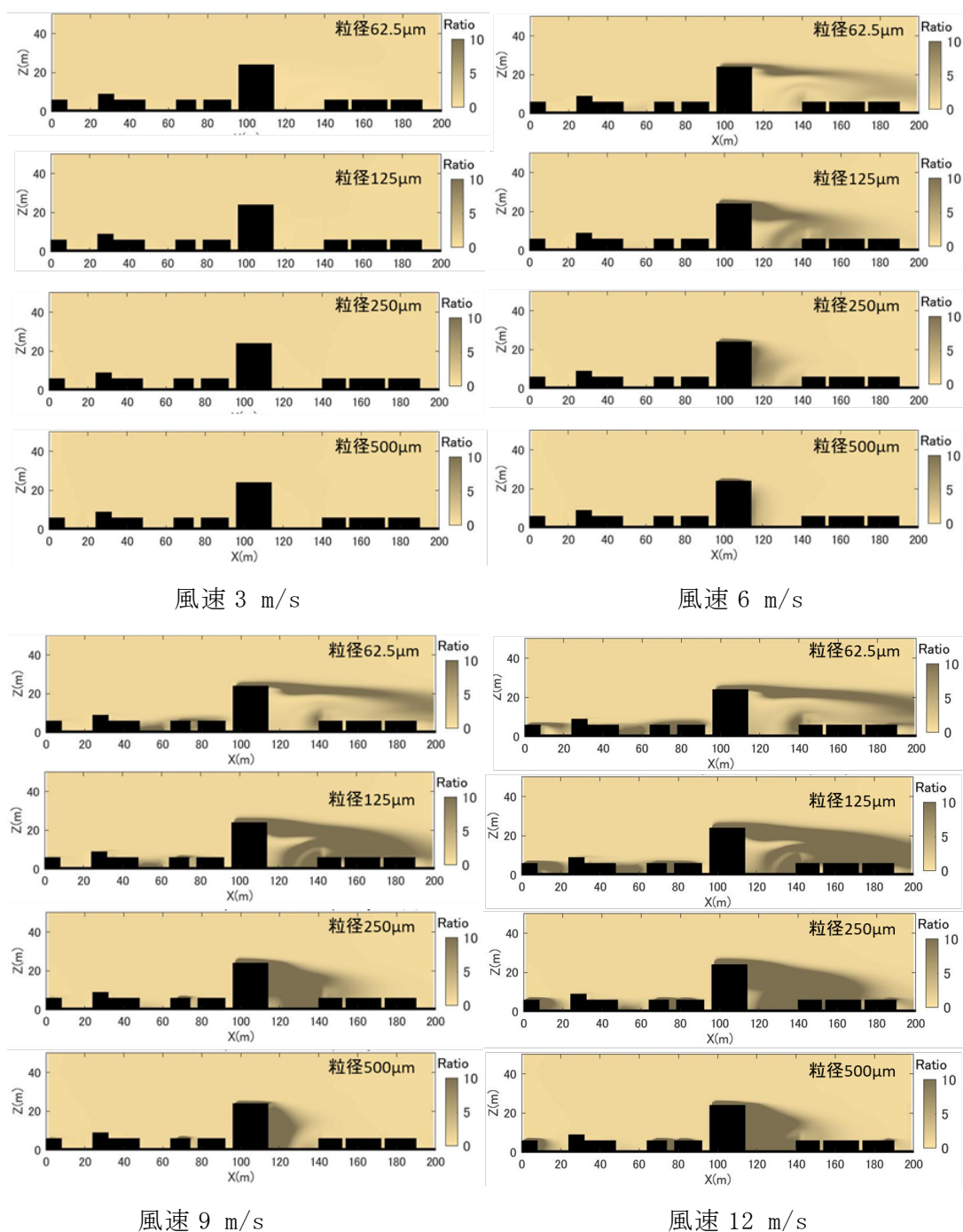


図 28. Y=205 m の位置における無次元化された火山灰空間濃度の東西断面（風は、西風、図の左から右に向かって吹いている）

流入気流の参照風速 3 m/s では、風による飛散はほぼ生じなかったが、それより大きな風速では再飛散の発生が明瞭である。特に図中央付近の最も高い建物（高さ 22 m）屋根からの飛散が目立つ。流入気流は、高度とともに風速が増加する勾配流であるため、高い位置にある屋根の上ほど風速が大きく、図 25 にあるようにそうした場所で風による削剥量

が大きい。再飛散した火山灰は風に流されながら重力落下するが、粒径が小さいほど発生源風下の広範囲に降り、逆に粒径が大きくなるとその範囲が狭くなってきている。風速が 9 m/s、12 m/s では風速が大きくなっただけ、飛散量が増えるとともに、風速 6 m/s で見られた再飛散火山灰の分布が、風速の増加に応じて風下側に引き伸ばされる形になっている。粒径 250 μm について見ると、風速 6 m/s では図の中央の建物から再飛散した火山灰は風下側すぐの位置（幅広い道路の路面上）に落下しているが、風速が 9 m/s、12 m/s では、風下の道路の先にある建物に降灰が広がっている。このように、図 28 は、都市のような凹凸に富む場所では、風による再飛散は、高い位置にいったん積もった火山灰をより低い位置に移動させる働きがあるのを表しているといえる。これは建物間の道路、路地、広場などの地面や、発生源より低い位置にある屋根の火山灰堆積量の増加を意味している。同じく再飛散火山灰のプルームに曝されると、火山灰濃度の増加と、設備機器への侵入火山灰量の増加でそれらの動作支障出現が早まることにもつながる。都市での降灰の特徴的な面のひとつであるといえる。

次に平面的な分布状況について見る。図 29 は、計算用にモデル化された建物の高さである（以下平面図全て上が北）。最も高い建物は 22 m である。南北に走る幅広い道路の両側に沿って、周囲より高い建物が立ち並んでいる。図中の番号は、説明の便宜のために付してある。図 30 に地面および建物屋根面から 0.5 m の高さの位置での風速値、風速ベクトルを示す。建物輪郭線の内側は屋根上の値を表している。流入気流は参照風速 6 m/s の西風である。周囲より高い建物上では、そのまわりより風速が大きい。①～⑥の番号の付近の高い建物では、屋根の風上にあたる西側端部付近で風速が大きい。また、それらの東側の風速の低い範囲（青が濃いあたり）は、それらの建物の風下の後流域に入り低風速となっている。堆積火山灰の削剥が生じる限界摩擦速度 $u_{*f}=0.2\text{ m/s}$ を与える、表面上 0.5 m 位置の風速は 3.1 m/s であり、それを超える風速のところで風による削剥（浸食）が生じる計算となっている。図 31 に図 30 と同じ風の条件に対し、再飛散がある場合と、そうで無い場合との間の、地面や建物屋根面での降灰強度の差を示す。記述の便宜上これを差分降灰強度と称することにする。赤い建物輪郭線の内側が屋根上の値である。計算領域上端で与えた降灰強度 ($0.00133\text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) で除した比率を示す。粒径が小さい粒子では建物屋根西側端部付近で負となっていて、気流への取り込みが上空からの降灰強度を上回っていることを示している。この計算では、式(4)、(6)に示したように、気流への取り組みで表面直上の計算格子では濃度が増えるが、風に流されながらその格子から即座に重力落下するような計算になっている。図では、正味ではなく火山灰質量流束密度の下向き成分が示されているため屋根上全体で値が大きく出ている。差分降灰強度分布には、高い建物の屋根で削り取られた火山灰が風下側で地面（道路含む）やより低い建物の屋根に降っている状況が表されている。粒径 62.5 μm では、図 28 の断面図から推察されるように、再飛散した火山灰は計算領域の東端を越えて飛散しているため、差分降灰強度は小さく出ている。粒径が大きくなるにつれ、差分降灰強度が大きい部分は次第に発生源側に寄ってきている。番号を付した建物の風下方向でその傾向が見やすく、また、風下側のいくつかの建物屋根に多く降り注いでいるのも認められる。

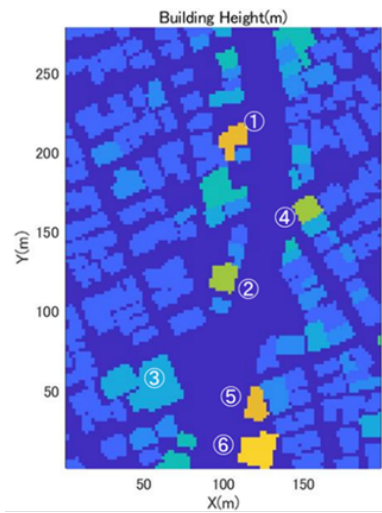


図 29. 計算領域内の建物高さ

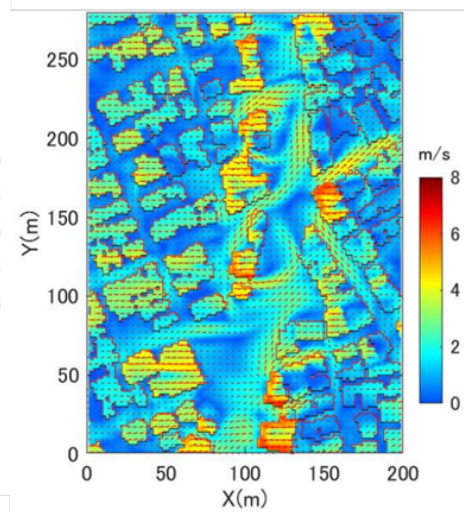


図 30. 地上および屋根上 0.5 m の水平風速

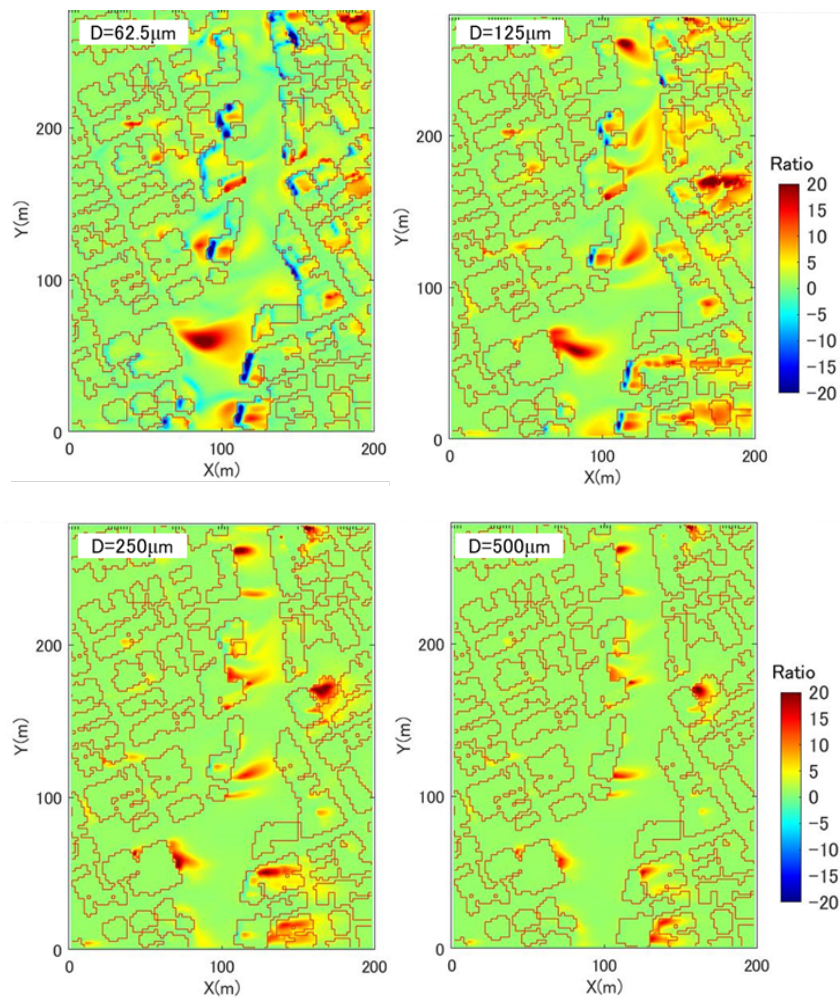


図 31. 再飛散ありと無しの場合の降灰強度の差（再飛散あり－無しの差分降灰強度、無次元比率として表現）参照風速 9 m/s の西風の場合（左から右に吹く）

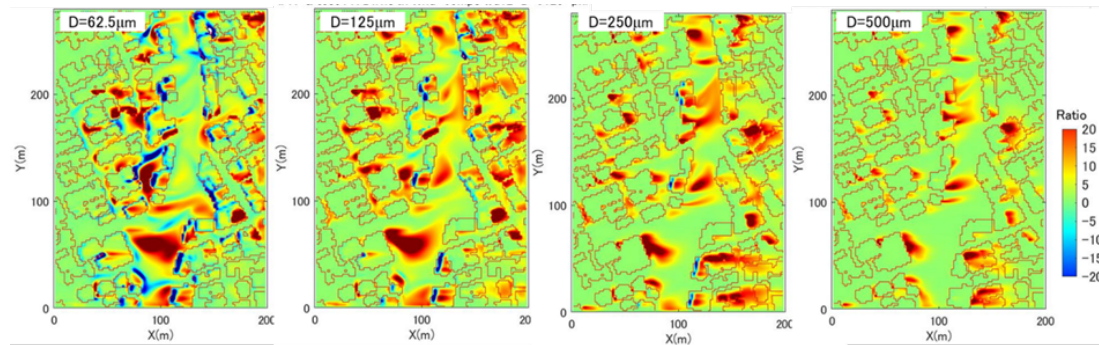


図 32. 再飛散ありと無しの場合の降灰強度の差（再飛散あり－無しの差分降灰強度、無次元比率として表現）参照風速 12 m/s の西風の場合（左から右に吹く）

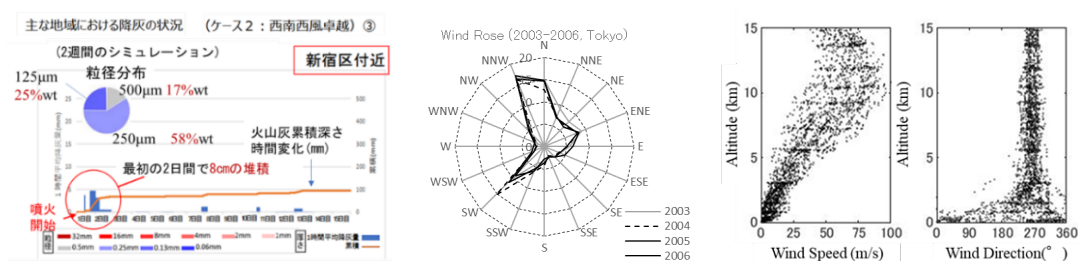
参照風速が 9 m/s の西風の場合の差分降灰強度を図 32 に示す。風速が大きくなることで（＝低高度での風速も増える）、低い屋根からの再飛散が増えている様子が認められる。建物間の地面、道路や建物屋根への差分降灰の風速 6 m/s の場合に対する増加が明瞭にみられる。図は示さないが、参照風速 12 m/s では、これらの傾向がもっと顕著になる結果が得られた。ここで、注意点がある。削剥率 EA の式(3)に現れる限界摩擦速度は、堆積層表面の状態によって変化する量であり、建物屋根は特に住宅を中心に平面でないものも多く、平面屋根でも多くの場合周囲にパラペット等の立ち上がりがあるなど、不確定な要素が多い。その他、計算に含まれていない再飛散過程に影響する要素も複数あるため、ここでの結果は、まだ定性的な傾向を与えるにとどまると見るべきである。さらに、ここでは、降灰量に関する量としては時間変化率である強度を扱っているが、降灰量に直すには継続時間に乗じる必要があり、また、屋根上の堆積量も有限なものとして扱う必要がある。その現在取り組んでおり、R7 年度に引き継ぐ。

vi) 無次元降灰強度から火山灰堆積深に変換した降灰計算

降灰計算の結果を実用的なものにするには、堆積量や堆積深さに変換する必要がある。複数粒径が混在する場合の堆積深への変換を行った。富士山の宝永噴火を想定した降灰シミュレーション¹⁰⁾のひとつに着目して堆積深分布の計算を行った。そこから抜粋して一部加筆した図、図 33(a)に示すように、東京地方に最も大きな影響を与える西南西風の上空風に対し、新宿付近で約 100 mm の火山灰堆積深が得られている。14 日間のシミュレーション期間のうちの最初の 2 日間に積もっている。火山灰のである（図からの読み取り値）。一方、街区への降灰の性状には、建物のある高さレベルの風が直接関係するため、上空風としては西南西風の設定であるものの、地上付近の風は、気象庁の風観測による高頻度風向（図 33(b)）のひとつである南西風に設定することにした。図 33(c)に高層観測の 1 例（2019 年 12 月 1 ヶ月分）を示すが、気象現象の 3 次元的な構造も関係し、偏西風が特に強くなる冬季では、火山灰ブルームの広域拡散を支配する上空の風に対よりも、高度 1～2 km より低空の風向の変化幅は大きくなる。火山灰粒子は、大気中では建物のごく近くを除いては、水平方向にはほぼ風速と同じ速度で移動する。そのため、計算領域の高さが 0.5 km 程度であるような大気圏内の低空のみを扱った本研究の降灰計算では、地上観測による

風向を用いることにした。図中の黒い矢印は風向を表している。ここでは、火山灰の再飛散は含まれていない。

図 34 に、建物のない仮想的な平坦面上で堆積深が 100 mm になるような降灰量を与えた場合の、街区内の火山灰堆積深 (cm) の分布を示す。参照風速 6 m/s の南西風の場合である。建物は輪郭線で表されており、その内部は屋根上の堆積深を表している。堆積深は、0.5 cm 未満の箇所がある一方、多いところでは 15 cm を越えている。道路に着目すると中央を走る幅の広い道路では、平均的には風下側の道路面で堆積深が大きい。ただし、道路は図中北から 1/3 あたりで曲がっており、風向と道路との角度がやや小さくなる南側 2/3 では南西、東北東の風に対し道路上の堆積深は一様性が高くなっている。降灰と風の条件が全く同じ計算を別の街区についても行った。結果を図 35 に示す。この街区は、途中で比較的大きくカーブする幅の広い道路が、北西から南東に通っている。風向によって、道路上の堆積分布には違いが出ており、南西の風の時には、曲線部を挟んで堆積量にやや大きな差が出ている。道路の方向と風向との差が比較的小さい北北西の風では道路上の堆積深の不均一の度合いが小さい。



a) 富士山噴火降灰計算結果¹⁰⁾ b) 風向頻度 (東京) c) 風の高層観測値 (つくば)

図 33. 街区内の降灰深の計算の条件設定に際し参照した粒径分布、気象データ

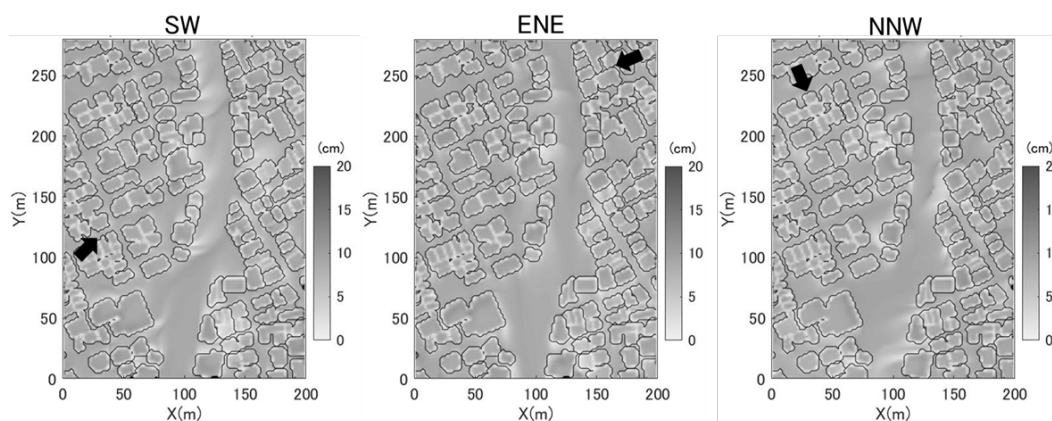


図 34. 南西、東北東、北北西の流入風に対する火山灰堆積深の分布 (cm) (図 27 に示した街区)

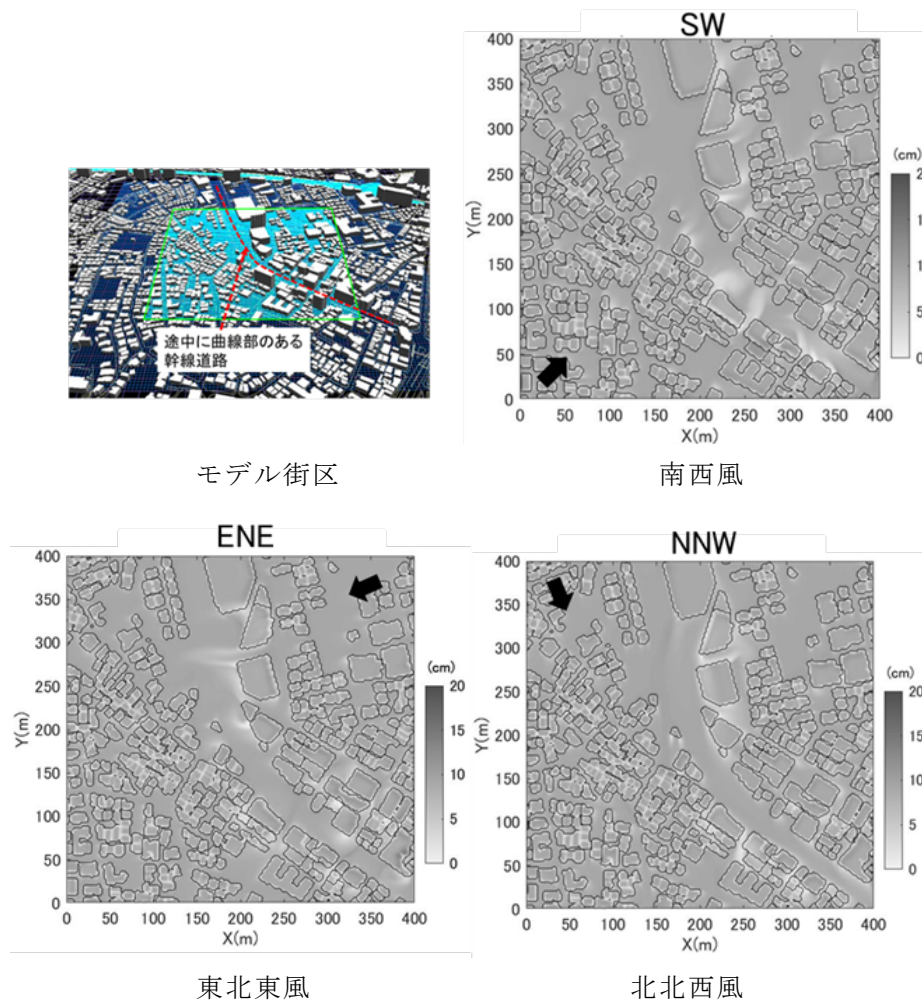


図 35. 南西、東北東、北北西の流入風に対する火山灰堆積深の分布 (cm) (本図左上に示した街区)

vii) 他課題等からの広域の降灰情報との関連付けについて

本プロジェクトの他の課題、あるいは公的な機関から出される広域の降灰予報と、ここで行った降灰計算とはひとつには図 36 に示すような関連連付けが一つの例として考えられる。広域の降灰の予報は、一般には水平の分解能がキロメートルのオーダーで提供されることが多い。したがって、それらは例えば、1～数 km 四方程度で平均された降灰量や火山灰堆積深などであり、図 36 の右側の 3 段のブロック図の最も上にあるブロックにある広域降灰予測の格子スケールの量、あるいは Large-Scale と書かれているものである。一方で、ここでの降灰計算は、市街地街区の中のより細かい分布を扱っており、同じくブロック図中段にある局所的な量である。降灰計算では、これまで降灰強度（時間降灰量 ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)）や設備機器に影響する火山灰空間濃度（降灰中の空気中の火山灰の濃度 (kgm^{-3})）を無次元量として、適当に定めたある種の参照値に対する比率として出力してきた。「ある種の参照値」としては、計算領域上部境界における降灰強度や空間濃度はその例となるが、領域内ではそれらに対する比率が計算されている。そのため、参照値として広域の予測情報や被害想定に用いられた広域の降灰シミュレーション結果などを与え、狭い領域の降灰計算で得られる比率を乗じることで、計算領域内の降灰に関する量（降灰強度、火山灰空間

濃度等) が次元を持った量に変換される。この手続きによって、広域の予測情報が時間経過的に与えられた場合でも、街区内で着目する箇所における降灰の推移を求めることができる。有次元の量が得られると、本プロジェクト過年度に実施した空調設備に関する実験や、屋根への降灰荷重の影響に関する検討の結果(降灰深、堆積深、堆積荷重などと被害率との関係)を介して、被害の予測に繋がられる。地面、道路、建物屋根などでの火山灰の堆積深さを扱う場合には、火山灰の堆積時の密度(見かけの密度、かさ密度)を設定する必要があるが、他課題あるいは既往の文献から得られる知見を活用することで対応可能である。図 36 の左側はここで示した手続きを建物外壁に設置された空調を例に概要を示したものである。ただし、実際の街区や建物は非常に複雑な形状をしているため、情報ツールへの搭載では、例えば降灰時の気象条件に対し、「風上を向いた外壁」、などのような簡略化した扱いが要ることになると考えられ、R7 年度も引き続いて検討することになる。

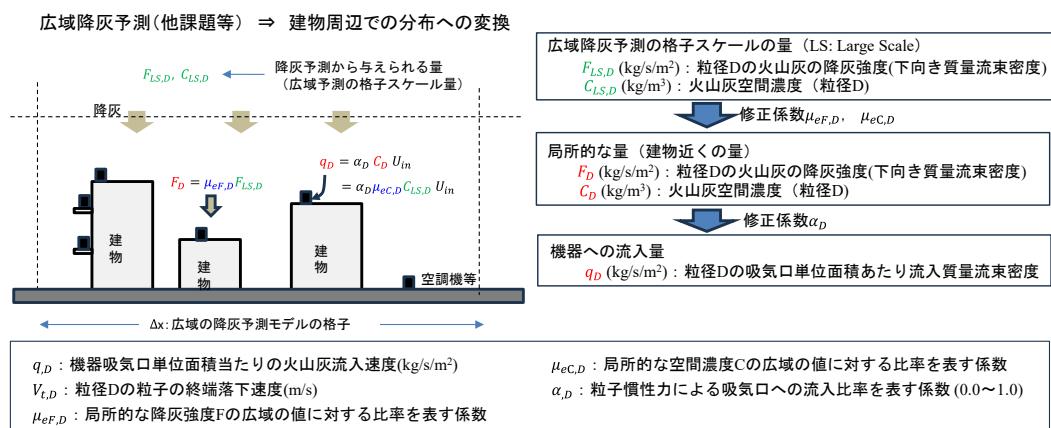


図 36. 広域の降灰に関する情報と街区降灰計算とのデータによる関連付けの考え方の一例

b) 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¹⁰⁾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¹¹⁻¹⁵⁾。

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の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」¹⁶⁾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。

2023 度は、体育館などの避難施設に採用されている 1 層 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の定式化を行った。

今年度は、生産施設などに採用されている 1 層 1 スパン片流れ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の定式化を行う。

ii) 降灰荷重により 1 層 1 スパン片流れ門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いて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/m²) は短期に生ずる力として次式により規定される¹¹⁾。

$$V_S = G + P + S \quad (8)$$

ここに、 G ：固定荷重 (N/m²)、 P ：積載荷重 (N/m²)、 S ：積雪荷重 (N/m²)

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、式(8)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/m²) は次式となる。

$$V_A = G + P + A \quad (9)$$

ここで、梁が負担する組み合わせ荷重 V (N/m²) 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。

$$W = B \times V_A = B \times (G + P + A) \quad (10)$$

降灰荷重 A が 1 層 1 スパン片流れ門形ラーメン構造物の梁に等分布に作用すると図 37 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。

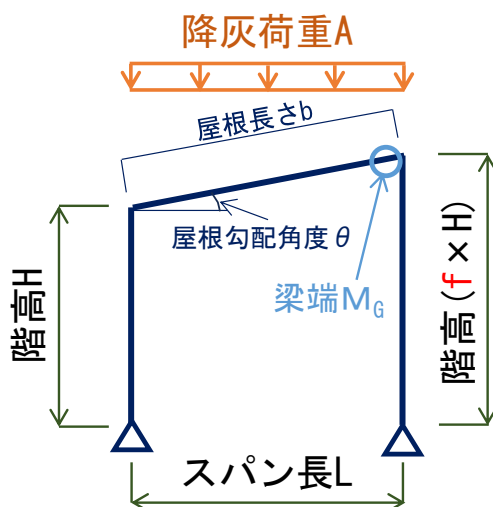


図 37. 1 層 1 スパン片流れ門形ラーメン構造物の梁に作用する降灰荷重

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

$$K_C = \frac{I_C}{H} \quad K_G = \frac{I_G}{b} \quad (11)$$

ここに、 I_C ：柱の断面 2 次モーメント (cm^4)

I_G ：梁の断面 2 次モーメント (cm^4)

b ：屋根長さ (m)

H ：階高 (m)

柱に対する梁の剛比 k は、

$$k = \frac{K_G}{K_C} \quad (12)$$

となり、式 (11) を式 (12) に代入すると柱に対する梁の剛比 k は次式となる。

$$k = \left(\frac{I_G}{b}\right) \times \left(\frac{H}{I_C}\right) = \left(\frac{I_G}{I_C}\right) \times \left(\frac{H}{b}\right) \quad (13)$$

柱に対する梁の断面 2 次モーメント比を S とすると、

$$S = \frac{I_G}{I_C} \quad (14)$$

となり、柱に対する梁の剛比 k は次式となる。

$$k = S \times \left(\frac{H}{b}\right) \quad (15)$$

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 ($\text{N}\cdot\text{m}$) は次式となる。

$$M_G = \frac{1}{8} \times W \times L^2 \times \frac{\{(1+f) \times f\} \times \sqrt{L^2 + \{(f-1) \times H\}^2}}{(1+f+f^2) \times \sqrt{L^2 + \{(f-1) \times H\}^2} + (1+f^3) \times (S \times H)} \quad (16)$$

ここで、 f は階高係数となり $f \geq 1$ とする。

屋根勾配 U を、

$$U = \frac{(f-1) \times H}{L} \quad (17)$$

とすると階高係数 f は次式となる。

$$f = 1 + U \times \left(\frac{L}{H}\right) \quad (18)$$

従って、屋根勾配 U と屋根勾配角度 θ (度) の関係は次式となる。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{U}{\sqrt{1+U^2}} \right) \times \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (19)$$

このとき、屋根勾配角度、スパン長、階高ならびに柱に対する梁の断面 2 次モーメント比が変化したとき、梁端に生じる曲げモーメント M_{Gm} は次式となる。

$$M_{Gm} = \frac{1}{8} \times W \times L_m^2 \times \frac{\{(1+f_m) \times f_m\} \times \sqrt{L_m^2 + \{(f_m - 1) \times H_m\}^2}}{(1+f_m+f_m^2) \times \sqrt{L_m^2 + \{(f_m - 1) \times H_m\}^2} + (1+f_m^3) \times (S_m \times H_m)} \quad (20)$$

ここに、

$$L_m = g \times L \quad (21)$$

$$H_m = c \times H \quad (22)$$

$$S_m = \beta \times S \quad (23)$$

$$f_m = 1 + U \left(\frac{L_m}{H_m} \right) = 1 + U \times \left(\frac{g}{c} \right) \times \left(\frac{L}{H} \right) \quad (24)$$

ここで、 g はスパン長の係数、 c は階高の係数、 β は柱に対する梁の断面 2 次モーメント比の係数となる。

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、式(17)の屋根勾配 U を 0 に設定する。また、式(21)～式(23)の係数はそれぞれ $g=1$ 、 $c=1$ 、 $\beta=1$ に設定して、基準モデルの梁端に生じる曲げモーメント M_{G0} を求める。

比較モデルの屋根勾配角度 θ が図 38 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・m) を求める。ここで、屋根勾配 U と屋根勾配角度 θ (度) の関係は式(19)より図 39 となる。

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 β を 1.0～3.0 に設定して、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 を求める。

$$r_1 = \frac{M_{G1}}{M_{G0}} \quad (25)$$

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 40 となる。梁端の曲げモーメントの比率 r_1 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 次モーメント比の係数 β が大きいほど梁端の曲げモーメントの比率 r_1 は小さくなる。

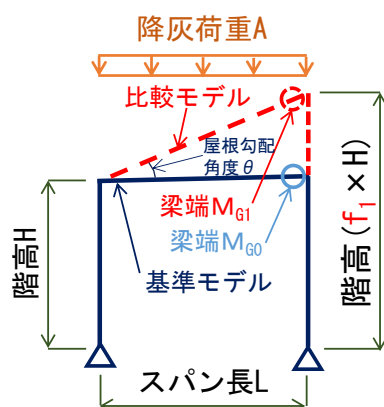


図 38. 1 層 1 スパン片流れ門形ラーメン構造物の梁に作用する降灰荷重
(屋根勾配角度が変化したとき)

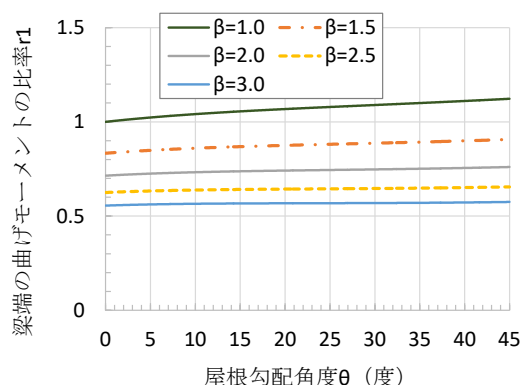
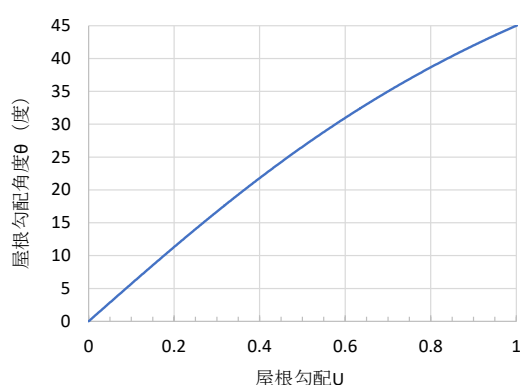


図 39. 屋根勾配と屋根勾配角度(度)の関係 図 40. 梁端の曲げモーメントの比率

スパン長さが変化した場合

基準モデルが図 41 のとき、比較モデルのスパン長が図 41 に示すように基準モデルに対して変化したとする。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} (N・m) と比較モデルの梁端に生じる曲げモーメント M_{G2} (N・m) を計算して、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 を求める。

$$r_2 = \frac{M_{G2}}{M_{G0}} \quad (26)$$

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 β 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 θ （度）は表 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 β 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 42 となる。梁端の曲げモーメントの比率 r_2 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 次モーメント比の係数 β が大きいほど梁端の曲げモーメントの比率 r_2 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 r_2 は小さくなる。

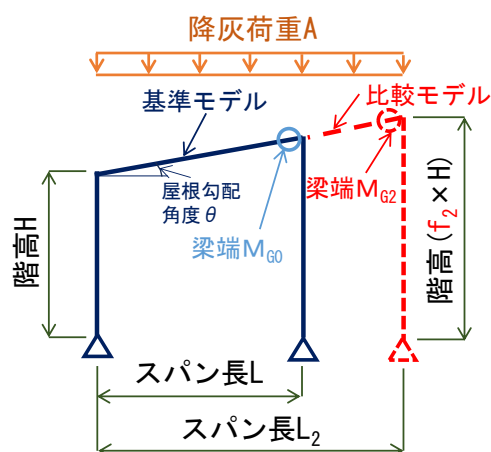


図 41. 1 層 1 スパン片流れ門形ラーメン構造物の梁に作用する降灰荷重
（スパン長が変化するとき）

表 4. 屋根勾配 U と屋根勾配角度 θ （度）の設定

屋根勾配 U	屋根勾配角度 θ （度）
0.25	14.0
0.5	26.6

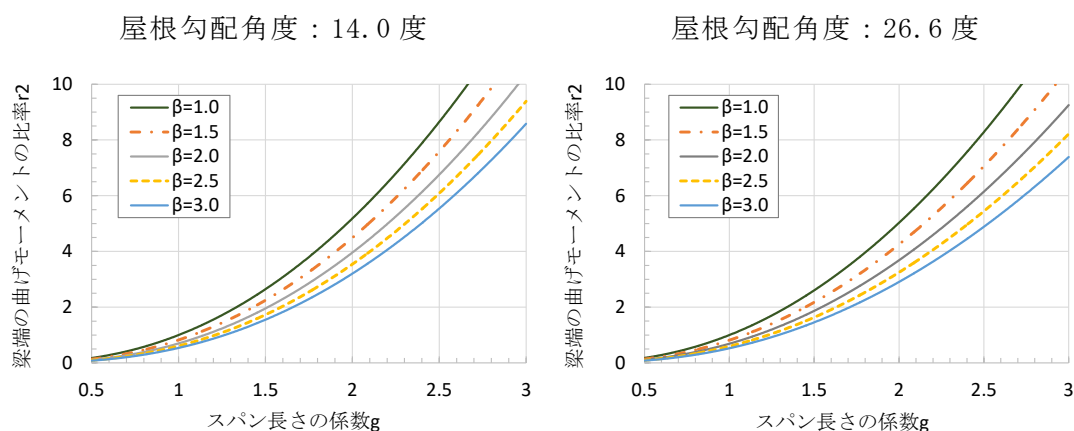


図 42. スパン長の係数と梁端の曲げモーメントの比率の関係

階高が変化した場合

基準モデルが図 43 のとき、比較モデルの階高が図 43 に示すように基準モデルに対して変化したとする。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} (N・m) と比較モデルの梁端に生じる曲げモーメント M_{G3} (N・m) を計算して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 を求める。

$$r_3 = \frac{M_{G3}}{M_{G0}} \quad (27)$$

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 β 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 θ (度) は表 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 β 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 44 となる。梁端の曲げモーメントの比率 r_3 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 次モーメント比の係数 β が大きいほど梁端の曲げモーメントの比率は r_3 小さくなる。また、屋根勾配角度が大きくなるに従い梁端の曲げモーメントの比率 r_3 は概ね大きくなる傾向にある。

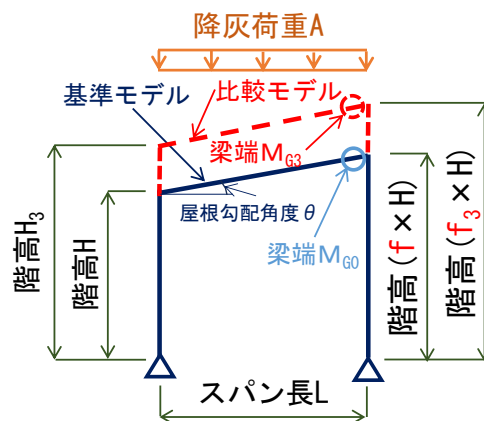


図 43. 1 層 1 スパン片流れ門形ラーメン構造物に作用する降灰荷重
(階高が変化したとき)

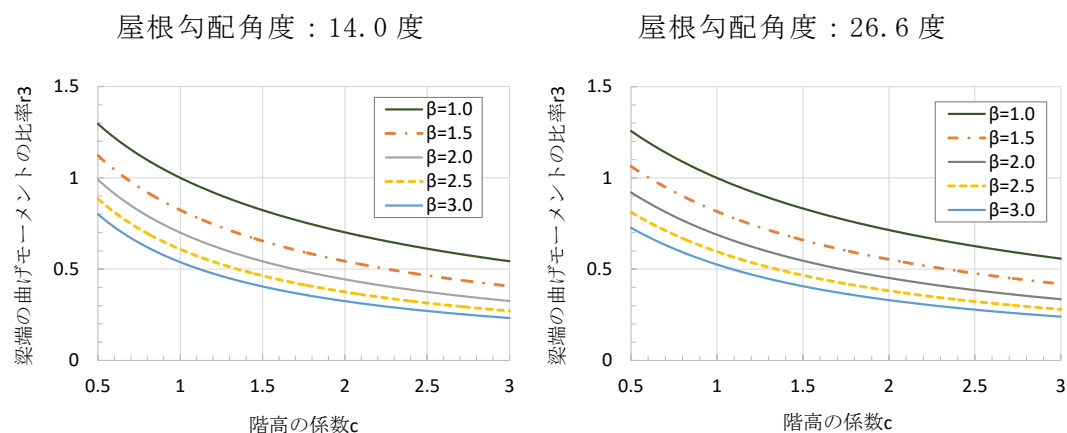


図 44. 階高の係数と梁端の曲げモーメントの比率の関係

iii) まとめ

1 層 1 スパン片流れ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の定式化を行った。つぎに、屋根勾配角度、スパン長、階高ならびに柱に対する梁の断面 2 次モーメント比が変化したとき、基準モデルに対する比較モデルの梁端に生じる曲げモーメントの比率について検討した。

c) 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 10 cm 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、2023 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¹⁷⁾を用いて、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した。

今後降灰による病院の機能被害を評価するとき、医療専門家からの意見が重要となる。今年度は、火山現象による医療リスクの考え方について、森村尚登教授（帝京大学医学部救急医学講座、ヒアリング当時）にヒアリングを実施した。

ii) ヒアリング結果

災害医療の基本は、表 5 の「CSCATTT」となる。「C」は Command/Control、「S」は Safety、「C」は Communication、「A」は Assessment、「T」は Triage、「T」は Treatment、「T」は Transport を示す。

表 5. 災害医療の基本

Com m and/Control	指揮・命令系統の確立
Safety	安全確保 (優先順位：1 自身、2環境整備、3傷病者)
Com m unication	通信手段の確保
Assessm ent	情報からの集計と評価、記録
Triage	患者トリアージ
Treatm ent	治療、処置
Transport	搬送

病院のボトルネックは、ヒト (STAFF)、モノ (STUFF)、スペース (SPACE)、システム (SYSTEM) となる。それぞれのボトルネックに対応した病院の要素、病院の機能は表 6 となる。

表 6. 病院のボトルネックに対応した病院の要素と病院の機能

病院のボトルネック		病院の要素、病院の機能	
STAFF	ヒト	スタッフ	・医療スタッフの参集
STUFF	モノ	医療資機材 薬剤	・医療材料 (手術、透析など) ・医療用液化酸素 (CE、LGCなど) ・検査機器 (レントゲン、CT、MRI、血液など) ・薬剤
		食材	・スタッフ用食材 ・患者用食材
		ライフライン	・水 ・商用電気 ・非常用発電機 (重油を含む)
		その他	・衛生材料 (リネンなど) ・救急車 (空調設備が必要)、ヘリ
SPACE	スペース	診療スペース	・建物 (躯体、仕上げ) ・建築設備 (電力設備、給水設備、空調設備) ・治療、検査 ・入院ベッド
SYSTEM	システム	院内体制	・業務フロー (災害時優先業務の決定) ・情報通信
		広域医療体制	・患者受入、搬送
		その他	・本人確認 ・外部薬局 ・治療費用の支払

人的被害を与える火山現象として、火砕流、溶岩流、噴石、火山ガス (フッ化水素、二酸化硫黄、塩化水素など)、火山灰などが考えられる。このような火山現象が、病院のボトルネック (ヒト、モノ、スペース) に与える影響をまとめると表 7 となる。なお、降灰の期間が長期化すると、病院の機能被害が長期化する可能性がある。

表 7. 火山現象が病院のボトルネックに与える影響

病院のボトルネック		病院の要素、病院の機能
ヒト	患者	<ul style="list-style-type: none"> ・呼吸器疾患（喘息） ・眼科疾患 ・心血管系疾患 ・外傷 ・熱傷（重症熱傷患者の集中治療病床数は少ない）
	スタッフ	・参集アクセス
モノ	院内	・インフラ
	院外	<ul style="list-style-type: none"> ・ケータリング補充 ・救急車両搬送
スペース		<ul style="list-style-type: none"> ・入院ベッド（減少） ・検査機能

iii) まとめ

火山現象が人的ならびに病院の機能に与える影響について、救急医学の専門家にヒアリングを実施した。これらのヒアリング結果に基づき、今後は降灰による病院の重要要素と病院の機能の設定方法などについて検討する必要がある。

d) 降灰被害予測コンテンツの社会実装に関する結論

- ・建物の密集する市街地街区における火山灰の再飛散について検討した。その結果、火山灰の再飛散は風速が大きい建物屋上でより起きやすくなり、風下側の道路や、再飛散の発生源より低い高さの建物屋上に再堆積することがわかった。これらは道路交通や屋外設置の建築設備に有意な影響を与える可能性がある。高さの異なる多くの建物が混在する都市での火山灰再飛散の特徴的な面であるといえる。
- ・これまで降灰計算結果は、無次元化された降灰強度、火山灰空間濃度として表されてきたが、有次元の量への変換として、富士山噴火における東京での堆積深の例に倣い、2つの街区に対して堆積深を求めた。広域の予測よりも細かい分布が得られ、降灰対策に対して有用な結果が得られたと考えられる。
- ・他課題からの降灰情報の活用について、考え方の一例を示した。これにより、コンテンツの情報ツールへの搭載におけるデータ仕様の具体的な点が示された。
- ・1層1スパン片流れ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の定式化を行った。また、屋根勾配角度、スパン長、階高ならびに柱に対する梁の断面2次モーメント比が変化したとき、基準モデルに対する比較モデルの梁端に生じる曲げモーメントの比率についても検討した。これらは、広域の降灰情報に基づく降灰荷重に対する屋根被害の程度に関連づけられる。
- ・火山現象が人的ならびに病院の機能に与える影響について、救急医学の専門家にヒアリングを実施した。これらのヒアリング結果に基づき、今後は降灰による病院の重要要素と病院の機能の設定方法などについて検討する必要がある。

ここで示した上記項目について、最終年度の情報ツールへのコンテンツ搭載に際しての改善や必要に応じたコンテンツの機能拡張が課題である。

e) 降灰被害予測コンテンツの表示法の検討

i) 概要

噴火ハザードの中でも最も広い範囲に影響を及ぼす火山灰（降灰）による都市部への影響を定量的に評価するために、これまで建築設備（エアコンの室外機や開放型冷却塔）やフィルタへの影響評価実験や降灰計算を行ってきた。今年度はこれらの結果を踏まえ、降灰量と建物等の機能被害との関係を GIS 上で閲覧可能にするツールを開発した。

ii) 手法・結果

首都圏における、1)建物、2)道路、3)鉄道、4)電力網の各基盤データと、富士山宝永噴火を想定した降灰シミュレーションの結果及び富士山ハザードマップ降灰影響想定範囲を Esri 社の ArcGIS Online で表示可能な形式に変換し、Web 地図上（WebGIS のインターフェース）でレイヤーとして掲載した（図 45）。さらに、閾値に関するデータとして過去に実施した降灰影響評価実験の結果他を参考にし、降灰量に対する影響度を 3 段階で評価した結果をレイヤーとして掲載した（図 46）。例えば被害対象が送電線ネットワークの場合 1) 倒木等による送電線の切断 2) 碍子の絶縁性低下 3) 降灰範囲外、被害対象が鉄道路線の場合 1) 運行停止（レール埋没）2) 運行停止（レール通電不良）3) 降灰範囲外、被害対象が高速道路の場合 1) 走行不能 2) 走行困難 3) 徐行（時速 20km 以下）推奨、被害対象が病院施設の場合 1) 室外機及び冷却塔の停止 2) 室外機及び冷却塔の機能不全 3) 室外機及び冷却塔は正常に作動、のように色分けをして掲載した。

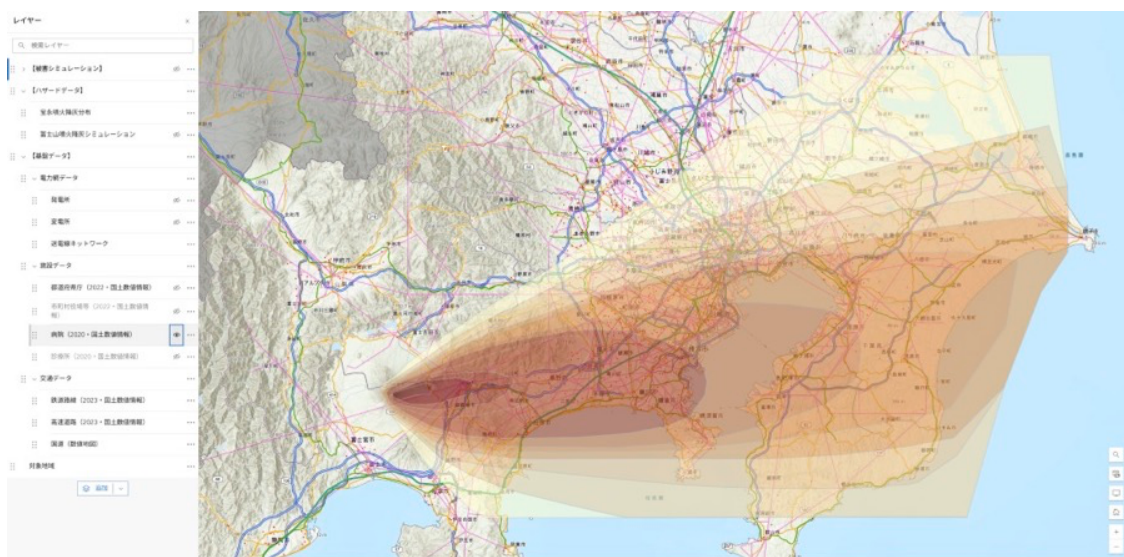


図 45. 富士山宝永噴火を想定した降灰シミュレーションの結果と各基盤データを Web 地図（ArcGIS Online）で閲覧可能にした。



図 46. 首都圏における降灰による影響度を 3 段階で示した。

今後は開発した降灰被害予測コンテンツから得られる情報を火山周辺自治体や火山防災協議会と共有し、演習や訓練等で活用していく。

3) 避難・救助支援コンテンツの高度化と社会実装に向けた準備等

a) 登山者参加型避難訓練

i) 概要

2014 年の御嶽山噴火災害後、2018 年から登山道の規制が緩和され一般登山者の利用が可能になり、徐々に登山者数が回復してきた。しかし、避難経路の設定や避難施設の設置位置の検討、また噴火時の情報伝達など登山者を想定した火山防災上の課題は残されている。これらの課題解決のために開発中の避難・救助支援コンテンツの基礎データ収集のために、2022（令和 4）年と 2023（令和 5）年に登山者動態データ取得実験及び状況共有実験（御嶽山チャレンジ 2022、2023）を実施した。これらの実験を通して登山者の動向（およその数、大まかな位置、行動パターン等）を把握することができ、地元自治体と共有することで事前防災に役立ってきた。2024（令和 6）年度は、登山者参加型避難訓練に参加者する登山者を対象とした登山者動態データ取得実験（御嶽山チャレンジ 2024、図 47）を実施し、登山者の避難行動をモニタリングし結果を地元自治体と共有した。また、別日には過年度に取得した登山者動態データをシナリオやバックデータに盛り込んだ防災図上訓練（情報伝達訓練）を、御嶽山火山防災協議会と協力して実施した。

御嶽山チャレンジ 2024

“GPS”で登山者避難行動を「見える化」

情報確認 行動把握 経路確認

GPS ロガーを活用した登山者避難訓練調査

8/10 (土)
※8/11 (日・祝) (実施予定日)

この調査は「御嶽山噴火災害」の際に課題となった登山者の避難行動の実態把握を行い安全安心な登山対策に役立てるもので、誰もが簡単に参加できる調査です。

参加方法

1人に1台 GPS ロガーをお渡しします。それを登山中に持って登山していただくだけです。
※GPS ロガーは下山後回収させていただきます。

GPS ロガー配布・回収場所

1 おんたけロープウェイ鹿ノ瀬駅 配布・回収時間 7:00～17:00
2 中の湯登山道入口 配布・回収時間 7:00～17:00
※上記以外の時間でも回収ポストにて返却いただけます。
※日帰り、宿泊登山者の両方を対象にしています。
※(8/11 までに下山する登山者のみ対象)
※岐阜県側への下山予定の方は参加できません。

【調査主体】

木曽町
国立研究開発法人 防災科学技術研究所

【協力】

御嶽山火山防災協議会
御嶽山火山マイスターネットワーク
国立大学法人名古屋大学 御嶽山火山研究施設
一般社団法人富士山チャレンジプラットフォーム

図 47. 御嶽山チャレンジ 2024 の告知用ポスター

ii) 手法

2024（令和6）年8月10日（土）に実施した登山者動態データ取得実験では、御嶽山の黒沢口登山道を調査範囲とし（図48）、GPS ロガー（アプリケーションをインストールしたスマートフォン、図49）を登山者に携行してもらい、山頂付近で実施する長野県木曽町の防災行政無線を用いた避難訓練に参加してもらった（訓練開始時間帯に山頂付近にいたことが予想される登山者に配布した）。GPS ロガーの配布と回収はおんたけロープウェイ山麓駅にあるセンターハウス前と6合目の中の湯駐車場で行われ、全部で48台配布した（図50）。GPS ロガーは電源を入れると毎秒位置を計測し携帯エリアの外でも計測が可能。

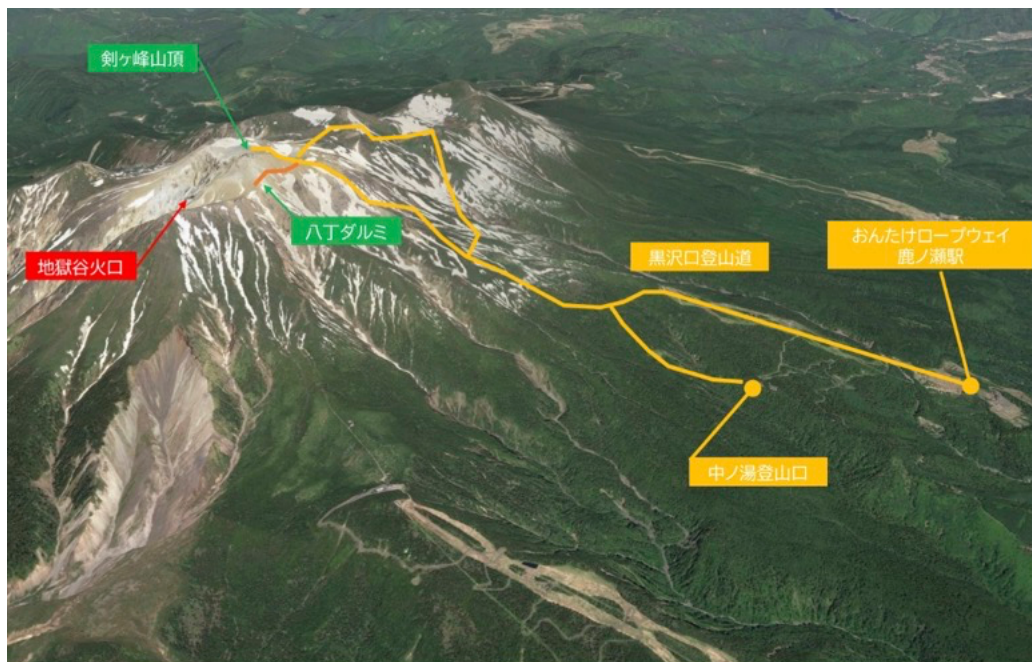


図 48. 登山者動態データ取得実験の調査範囲（御嶽山黒沢口登山道）

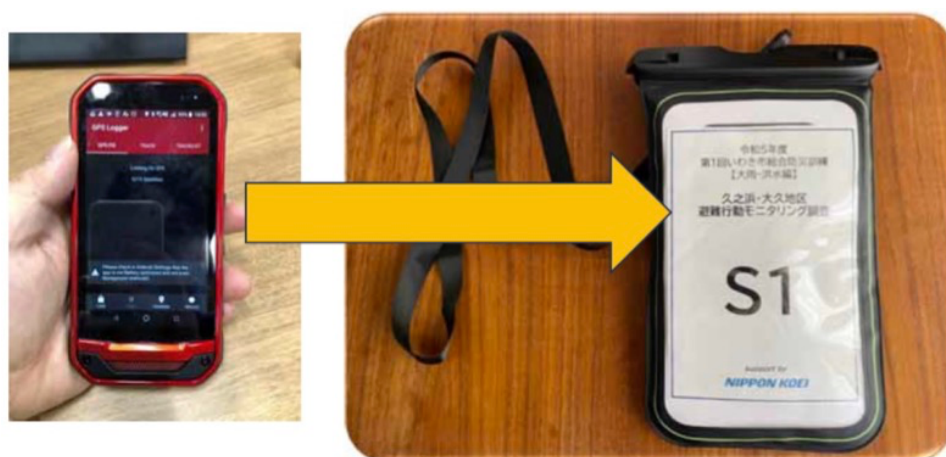


図 49. 登山者に配布した GPS ロガー（スマートフォン）とそれを入れたケース（約 15cm×20cm）



図 50. おんたけロープウェイセンターハウス前で登山者に GPS ロガーを配布し登山者参加型避難訓練への協力を依頼

iii) 結果

本実験では 48 台の GPS ロガーを配布し、その内 39 名分の登山者動態データを取得できた（図 51）。この内避難訓練が行われた時間帯のデータから、登山者のとった避難行動をモニタリングした。その結果、GPS ロガーをもった登山者の多くが何らかの避難行動をとったことが分かり、登山者の避難行動に対する意識が高いこと、またシェルターや山小屋の避難場所としての認知度が高いことも明らかとなった（表 8）。一方問題点として、防災行政無線からサイレンが鳴ってから避難行動に移るまでに 1 分以上かかっている登山者やシェルターや山小屋に到着するまでに 3 分以上かかっている登山者も見られた。火口からの距離を考えるとより迅速な避難行動が求められることから、そのような行動を促す対策（避難指示看板の設置、平時からの周知啓発等）が必要になると思われる。また、黒沢十字路と剣ヶ峰の間の登山道にいた登山者の多くがその場に留まっていることから、このエリアにおける避難場所の確保も課題の一つと考えられる。訓練に参加した登山者へのインタビューから、防災行政無線からのサイレンが聞こえにくい場所があったことが明らかになっており、スピーカー等を増設するなどのハード対策も必要と考えられる。



図 51. (上図) ロープウェイを利用して剣ヶ峰を往復した登山者の登山経路、(下図) 中の湯駐車場から出発して剣ヶ峰→ニノ池→三ノ池トラバースルートを通った登山者の登山経路。

表 8. 登山者の避難行動モニタリングの結果

登山者数(39名中)	避難行動
10名	シェルターに避難
9名	山小屋に避難
8名	その場に留まる
7名	建物・岩陰に隠れる
5名	なし・不明



図 52. （左図）剣ヶ峰下にあるシェルターに避難する登山者、（右図）黒沢十字路～剣ヶ峰間の登山道脇に身をかがめて待機する登山者。

b) 情報伝達訓練

i) 概要

主に 2023（令和 5）年に御嶽山で実施した登山者動態データ取得実験（御嶽山チャレンジ 2023）の結果を、訓練シナリオ及びバックデータに盛り込み、御嶽山火山防災協議会構成機関を対象とした防災図上訓練（情報伝達訓練）を実施した。実際の登山者データを用いることでより実践に即した訓練を行うことができた。

ii) 手法

2024（令和 6）年 6 月 10 日（月）13 時～15 時に、御嶽山が突発的に噴火した想定で、御嶽山火山防災協議会の構成機関による情報伝達訓練を行った（図 53）。本訓練は、1)「御嶽山火山防災避難計画」の実効性の検証、2)参加機関・参加者の業務遂行能力の向上、3)関係機関間の連携の円滑化、4)情報伝達を含む各機関による防災対応手順の確認、を主な目的として実施された。訓練参加機関は岐阜県側、長野県側合わせて 54 機関で、実際の噴火を想定して各機関の自席から参加した。本訓練のシナリオでは突発的な噴火を想定しているため、訓練開始時には登山者がいる想定で、登山者の数と初期配置の想定に 2023 年に取得された登山者データを用いた。なお、2023 年の実験では岐阜県側の登山道は調査範囲外だったため、長野県側で得られた登山者データと岐阜県側の登山届記録を基に、岐阜県側の登山者数を見積もった。訓練上実施される御嶽山火山防災協議会幹事会はオンラインミーティングツール（Zoom）を活用して開催され、参加者が一箇所に集まらない形で訓練は行われた。訓練参加者に訓練シナリオは事前に共有されていたが、一部ブラインドで状況が付与しアドリブでの対応を迫った。

iii) 結果

本訓練の結果、1)噴火発生及び噴火警戒レベル引き上げに関する情報の授受、2)登山者・観光客の避難に関する対応、3)住民に対する情報発信、4)山小屋等からの情報収集、5)通行規制、6)登山届の回収、7)警察・消防への協力依頼、8)報道機関対応、などの災害対応について各参加者が各自で考えて行動することで、上記目的を達成するための訓練を遂行

した。参加者によるアンケート調査から行った達成度評価によると、噴火に関する情報伝達（情報発信、情報収集、情報共有）に関しては、県（岐阜県と長野県）を跨いだ情報の伝達に一部苦労している様子が見られたが、他の災害対応との共通点も多く達成度は高かった。登山者対応に関しては、情報収集が不十分な参加者が一部見受けられた。訓練自体の課題としては、山小屋を始めとする避難促進施設の参加がなかったこと、積極的に訓練中に考えて動く機関（担当者）とそうでない機関に分かれたこと、が挙げられる。他方、現状の避難計画には明記されていないが、訓練で活用したオンラインミーティングツールが発災時の情報共有に極めて有効であることが明らかとなった。



図 53. 訓練中に Zoom を使って実施された御嶽山火山防災協議会幹事会

c) 退避施設の耐衝撃対策

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これまで実験を実施してきた。今年度はこれまでの実験結果を整理し、耐衝撃対策に資する情報をまとめた。

これまで実施した木造屋根を対象に人工軽石を使った衝撃緩衝効果の実験について、図 54 に示す実験結果を基に人工軽石敷設厚さと衝突エネルギーの関係について、式(28)に示す経験式を構築した。

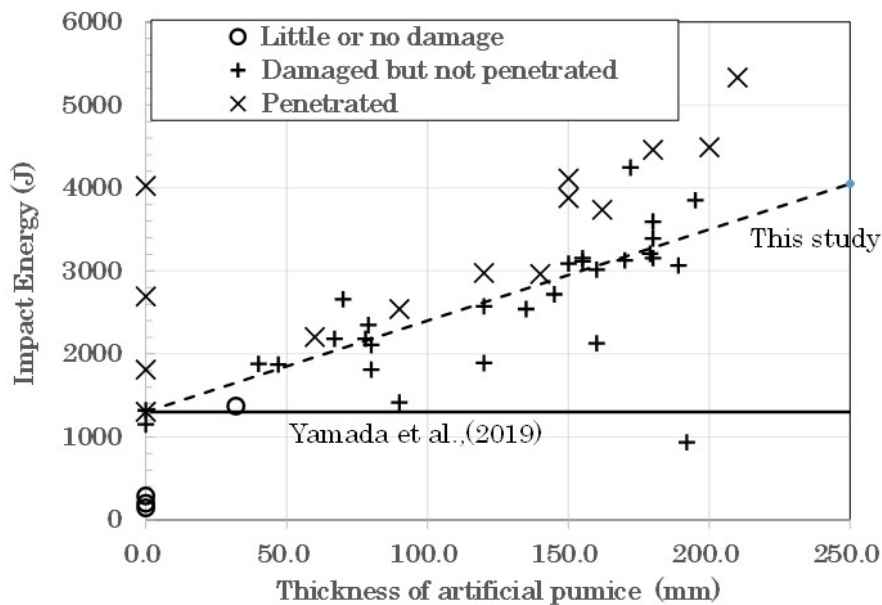


図 54. 木造に対する人工軽石敷設厚さと衝突エネルギーの関係

$$E_b = 11.0t_p + 1300 \quad (28)$$

ここで、 E_b は貫通境界エネルギー（J）、 t_p は人工軽石厚さ（mm）を示す。図 54 の破線が式(28)による境界エネルギーを示し、貫通したもの（×）を下回るように経験式を構築した。これにより補強設計時に目標とする噴石の大きさなどから衝突エネルギーを求め、その衝突エネルギーから人工軽石敷設厚さを求めることができる。しかし、今回の実験範囲は人工軽石敷設厚さの上限は 200 mm 程度であることと、木造では積雪荷重の許容値にも注意することが必要である。

同様に RC 造についても人工軽石敷設厚さの効果について整理し、図 55 に示すようにスラブ厚さ 150 mm の場合、速度 102 m/s の人工軽石敷設なし(150 mm No. 1)では、裏面のひび割れが裏面広範囲に広がっており、裏面剥離限界の影響を受けていると考えられる。しかし、速度 110 m/s の人工軽石敷設厚さ 110 mm 程度（150 mm No. 2）では、ひび割れが 150 mm No. 1 と比べて少なくなり、さらに人工軽石敷設厚さ 310 mm（150 mm No. 3）では、より裏面のひび割れが軽微になっていることから、人工軽石を敷設することで衝撃吸収の効果が表れて裏面剥離を低減できることを確認した。次にスラブ厚さ 220 mm でも図 55 に示すように人工軽石敷設なし(220 mm No. 1)と比べて、人工軽石敷設厚さ 295 mm（220 mm No. 2）では、裏面のひび割れが軽減されることが確認でき、人工軽石の敷設の効果を確認できた。

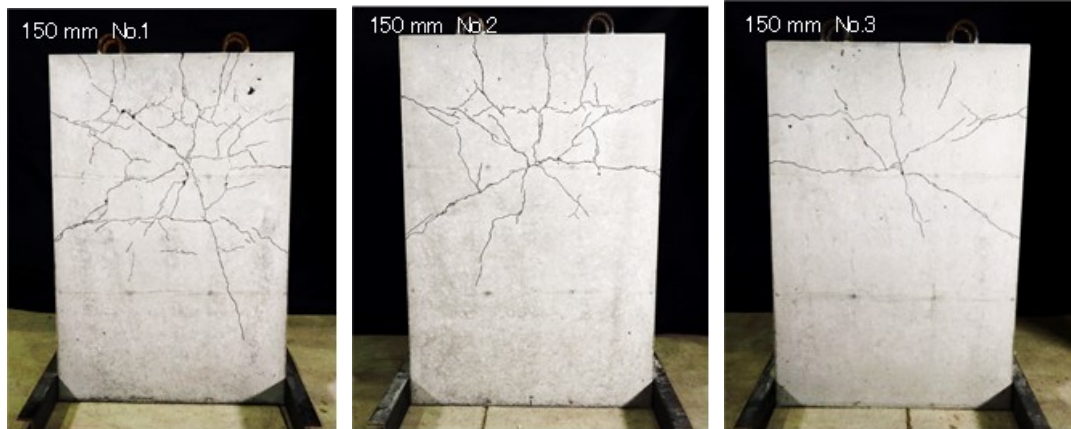


図 55. RC 造における人工軽石の効果（スラブ厚さ 150 mm）

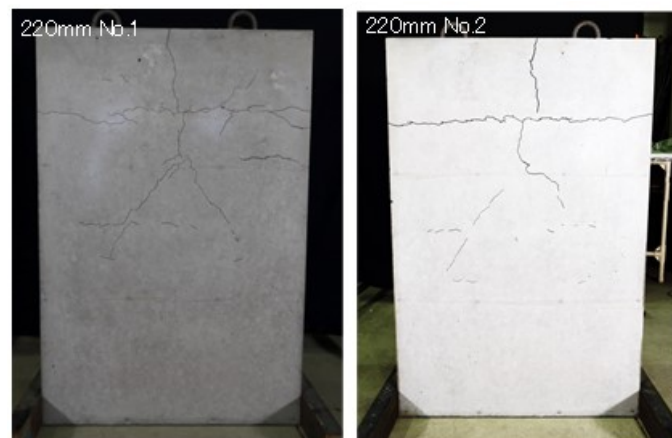


図 56. RC 造における人工軽石の効果（スラブ厚さ 220 mm）

今後の社会実装に向けた準備として、本研究では十分に検証できていない砂による衝撃緩衝効果について、実験に必要な縦型実験装置の整備と研究プロジェクトが終了後も利用できるように実験環境整備のための調査を実施した。縦型実験装置の整備として、既往研究で防衛大学校に設置された実験設備の検証を行った。その結果、射出のために必要な圧力タンクの機構（図 57）に課題が見つかったが、ホーニング管（図 58）や射出機構の一部資機材が利用できることを確認した。次に実験環境整備のための調査として、研究協力者の助力をいただき、室蘭工業大学の校舎内の設置について調査を行った（図 59、60）。その結果、縦型実験装置を設置するための環境が整備されており、その環境を活用することで、常設化できる見通しを確認した。



図 57. 縦型実験装置の圧力タンク



図 58. 縦型実験装置のホーニング管と速度計測機構

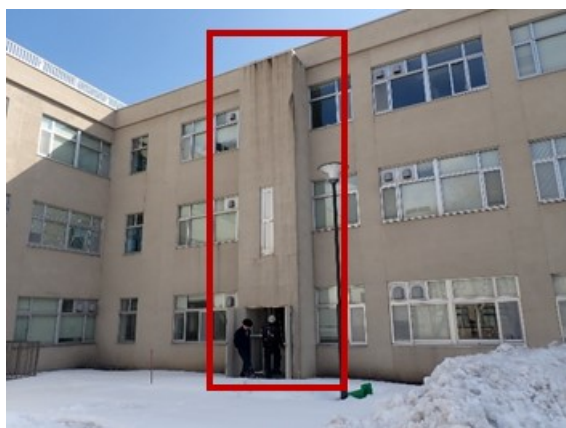


図 59. 室蘭工業大学の縦型装置設置予定箇所

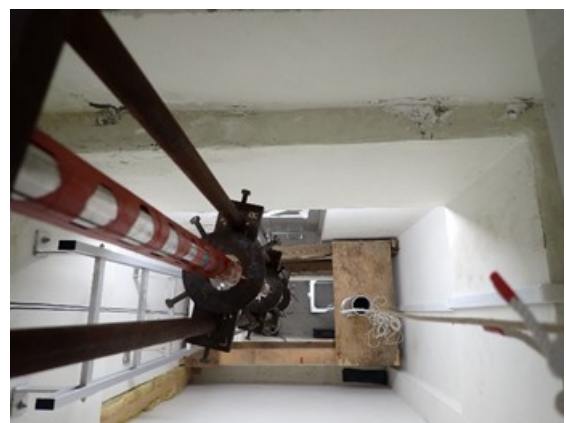


図 60. 室蘭工業大学の縦型装置設置予定箇所の内部

4) 情報ツールの利活用方策の検討

a) 利活用に資する要件の具体化

i) 道路管理者

昨年度の予備的意見交換を踏まえて、4月24日に本プロジェクトの火山学の専門家と関東地方整備局道路部幹部との意見交換を実施した。

まず、宝永噴火に依拠する富士山広域降灰の特徴について本プロジェクト参加の火山専門家から概要を提示し、その後、意見交換を行った。

道路管理者としては、溶岩流の影響と火砕流、噴火後の降雨時の土砂災害とともに、降灰への対応が求められる。このうち溶岩流については、現在、国の被害想定では想定火口は250か所にのぼり、火口場所によって影響範囲が異なること、最近は確認された火口もあり、山北等神奈川県にも溶岩流が到達する可能性も出てきたことが共有された。また大規模であった貞観噴火では、溶岩の流出は長期に継続した点への留意も専門家から補足された。火砕流は、人命にかかわる災害であるが、火砕流の事例は富士山では少ないこと、1分から数分の現象であることも共有された。

降灰については、広域に影響し、土石流や道路・鉄道等交通障害が生じた場合には広範囲の生活に影響することから、道路管理者としての降灰への対応は重要な業務となる。具体的には、道路管理者として、どれくらい積もるかによって、交通規制ならびにう回路をどう設定するかを判断をすることとなる。この降灰については、宝永噴火規模を前提としたシミュレーションでは、横浜まで火山灰は20分程度で到達する想定で、首都圏にも早期に影響を及ぼしかねないこと、火山学的には最初にクライマックスがあるだけではなく、最後にもクライマックスがある可能性もあり、影響は長期に及びかねないことが共有された。さらに、火口によっては、溶岩流も非常に多量の降灰も受ける地域がありうることも確認された。

道路管理者として、二次災害への対応も考えつつ、いつからどこまで救助や支援に入れるのか、いつから除灰を始めるかを分析し、計画を立案していく必要がある。しかし、火山噴火災害、特に大規模な火山噴火災害の経験は少ないため、噴火想定と被害や社会的影響の程度が計画を検討するうえで必要となる。その際、最大リスクは検討しておく必要があるとのことだった。被害によって対策の優先順位は変わり、たとえば住民等の命は最優先であり、また中央道は通行可能かどうかや国民の経済行動も変わってしまう可能性があるかどうかでも方針は影響される。

また、東名高速道路が止まると物流への影響は大きくなる。最低でも装甲車が通れるくらいまでは除灰をする必要がある。このため、噴火規模の大中小と風向き3パターン程度で、3時間経過後、6時間経過後など時系列で状況想定が提示されると計画策定時に有効である。この際、想定シミュレーションの空間的な解像度は5～10 km メッシュで十分とのことだった。

発災時には、実績をリアルタイムで把握できるかも、発災後のオペレーションを判断するには必要であり、その体制も同時に必要とのことだった。得られた降灰実績や今後の見通しにより、除灰の方法や規制の閾値を何 cm とするかを判断をすることになる。後藤・柴山(2023)¹⁸⁾は、降灰厚 0.1 cm 以上の場合は 0.1 cm 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を前提にシミュレーションを行っているが、道路管理者の現実の判

断については、状況が厳しければ、たとえば1 cmの厚みを閾値とせざるを得ない事態もありうると想定していた。その判断をより妥当なものとするためには、全体の降灰状況に対して最適となる閾値を設定する必要がある、降灰深が道路交通に与える影響について詳細な評価への要望があった。

このように道路管理者としての具体的な対応の検討をしていくうえで、第1に、異なる噴火様式や規模に応じた検討のひな型となる科学的想定が不可欠であり、最大規模に加えて生じうる複数のシナリオごとに、時系列の推移予測の情報提供をすること、第2に、降灰深による影響想定に関する知見を提供することが有効であると考えられる。昨年度までのライフライン事業者からも同様の指摘を受けており、研究成果の提示に関する今後の方向性の一つであろう。

ii) 自治体

今年度は新たに自治体との意見交換を行った。その前提として、自治体が火山噴火災害時に行う災害対策等の判断対象とその判断に求められる情報を明らかにしておくため、実際に発生した火山噴火災害の記録と各火山で計画されている避難計画や地域防災計画を分析した。ここでは、今年度に聞き取り調査を行った静岡県と山梨県に関連する「富士山火山避難基本計画」を中心に紹介し、必要に応じて関連する文献から知見を補足する。

計画における判断の対象と必要な情報

「富士山火山避難基本計画」¹⁹⁾(以下基本計画と略す)を対象に、「必要に応じて」や「状況に応じて」など「～に応じて」という表現を含む記載を抽出し、それぞれ、誰が(判断主体)、何に関して(対象)、何に基づいて判断するか(火山活動や需要量などの判断基準)の観点から分析した。これは、自治体の判断が一定程度は火山活動の状況や需要量などに「～に応じて」、その場で決断に迫られる余地があることを示唆する。もし、その決断を支援する火山情報が必要であるならば、火山研究の成果を火山防災へと改善していく方向性について示唆が得られると考えられるためである。

その結果、基本計画の「第1編 総論」から「第4編 今後の検討事項」までに、「必要に応じて」が59件、「状況に応じて」が25件、それ以外の「応じて」が30件、合計114件の記載があった。このうち、用語解説中に現れるものが7件あり、自治体等の判断とは無関係とみなした。また、噴火警戒レベルによるものが8件あった。噴火警戒レベルに応じて「入山規制をする」、「避難する」、自治体の「配備体制」や災害警戒(対策)本部、交通規制を実施するなどである。この場合、噴火警戒レベルが発表されれば、自治体の判断は噴火警戒レベルという明確な基準に依拠することから、以下の分析から除外した。これら除いた残り99件を対象に、上述したように「誰が」(主体)、「何に関して」(対象)、「何に基づいて」(判断基準)から分析した。

対策の実施に判断の余地がある対象については、表9に示したように、最も多いのは、「避難」に関する諸判断である。避難対象範囲や避難所設置、広域避難など全部で43件とほぼ半数を占める。本分析が避難の基本計画を取り扱っていることから当然ではある。しかしながら、命に関わる重要な対策でありかつ迅速な判断が求められる対策対象であり、それだけに、まさに火山研究等が支援すべき判断内容を考える上で参考となる可能性がある。

表 9. 対策の実施に判断の余地がある対象と件数

判断の対象	件 数
避難対象範囲や避難所開設等	43 件
協議会の運営や情報共有	6 件
国や自治体の体制や役割	26 件
鉄道運行規制や交通規制	14 件
その他	10 件

避難対策に関する判断と必要な情報

避難に関連する内容は、さらに表 10 に示したように、いくつかのカテゴリーに細分される。富士山の噴火災害については、想定される噴火現象が多様であり、大規模となった場合には避難の対象人口も多い。このため、第 1 次避難対象エリアから第 6 次避難対象エリアまでのエリアごとに避難を行う計画となっている。第 1 次避難対象エリアは想定火口範囲、第 2 次避難対象エリアは火砕流等や大きな噴石が到達する可能性がある範囲であり、以下、溶岩流の到達時間により第 3 次から第 6 次の避難対象エリアが設定されている。

表 10. 避難対象範囲や避難所開設等の細目

判断の対象	件 数
避難対象範囲や避難開始時期	19 件
広域避難先の調整	10 件
避難所開設や準備等	9 件
医療福祉施設・学校の避難	5 件

このように、本基本計画では「火山の状況（噴火現象の状況）に応じて」、「段階的に避難させる地域を拡大する」ことを基本としている。また、噴火後は、噴火現象の到達が見込まれる地域において必要に応じて「避難対応ステージ」を引き上げることとなる。2000 年有珠山噴火災害でも、3 月 31 日 13 時 07 分に西側山麓で始まった最初の噴火において、事前の想定よりもかなり西寄りであったことから、虻田町のほぼ全域に避難指示を拡大している²⁰⁾。

溶岩流については、溶岩流が短時間で到達する地域では、ひとまず避難行動を開始し「噴火の状況に応じて順次、避難対象範囲を解除または縮小する」計画となっている。具体的には、噴火後、火口と到達時間の予測をみながら第 4 次避難対象エリアから外側では火口位置とリアルタイムハザードマップにより、「詳細な溶岩流の予測流下範囲が判明した場合には、必要に応じて避難対象範囲を拡大または縮小する」計画となっている。

降灰については、降灰の加重でただちに家屋が倒壊しないと予測される地域では「原則として屋内退避とし、必要に応じて救助、救援を待つこととする」。融雪泥流についても、

噴火開始直後に「観測等で得られる火口位置や積雪の状況に応じて噴火前の避難対象エリア以外の地域での避難について検討する」とされている。

入山規制は、噴火警戒レベル 1（解説情報（臨時））が発表されると五合目から上に滞在する登山者へ下山指示がだされ、レベル 3 で第 1 次避難対象エリア、レベル 4 で第 2 次避難対象エリアへの入山禁止となる。噴火状況判明後には「火山活動の状況に応じて、入山規制」が実施される。このように噴火警戒レベルに応じて実施されるが、噴火状況判明後は火山活動の状況による。

小康期になり「火山活動が低下し、噴火による影響が限定される場合は、状況に応じて避難対象エリアを縮小」、具体的には火口位置が特定された場合や拡大のおそれがなくなった場合、ならびに終息した場合、「避難対象範囲の縮小・解除について検討を行うことになる。災害が長期化しやすい火山噴火災害では過去にも問われてきた点である。たとえば、1991 年雲仙岳普賢岳噴火災害では「警戒区域の設定から 100 日が経過すると、家財道具の運び出し等で自宅に戻りたいとの要望が出てきた」という²¹⁾。また 2000 年有珠山噴火災害では、避難住民から一時帰宅の要望が高まったことを受けて、「カテゴリー区分」を導入し、柔軟な対応が実施されている。このカテゴリーは、「現地対策本部が、気象庁や火山専門家などによる科学的知見を基礎とし、地元市町が避難経路やコミュニティ単位などを考慮して決定し」、警察や消防、自衛隊などが火山監視と緊急避難に関する支援体制を整備したうえで、避難指示区域への一時立ち入りを可能とする対策を取った²⁰⁾。

基本計画では、警戒区域の設定について「必要に応じて合同会議において協議を行う」し、噴火状況判明後には「火山活動の状況に応じて、警戒区域の見直しを合同会議で協議」する。県や市町村間で整合的な対策を実施するため、合同会議での協議事項となっている。この警戒区域の設定は、危険地域から住民を強制的に立ち退きさせることが法的に可能となるため、避難指示よりもより安全度が高い。実際に、雲仙普賢岳噴火災害では、溶岩ドームが崩壊し死者・行方不明が発生したが、その後の再崩壊に伴う火砕流の際には、災害対策基本法に基づく警戒区域が前日に設定されており、住民全員が避難を強制されていたため、死者は出なかったとされる²¹⁾。その一方で、生活への影響は大きいなど課題も指摘され、災害による警戒区域の設定は多くはない。ただ廣井他の調査では、警戒区域を設定し立入禁止としたことに、住民の 90%が「住民の安全を考えれば、やむを得なかった」とし、「住民の生活への影響を考えると、指定すべきではなかった」とした人は 5%と少なかったという調査結果もある²²⁾。

自主避難や避難手段について、基本計画では「地域の実情に応じて噴火前の避難を妨げるものではない」としている。また避難の手段については、「一般住民は、徒歩により避難所（場所）等へ移動し、必要に応じて行政が手配する車両により更なる移動を行う」、あるいは噴火警戒レベル 3、4 の段階で、「（必要に応じて）避難者輸送に関する調整」することも想定されている。また、「必要に応じて、登山者の避難のための車両を手配」も想定されている。これらの記述からは、火山活動の状況に加えて、高齢化といった地域事情や避難者数、登山者等の人数、自家用車の保有の程度など社会の側の需要に応じて対策の実施が判断されることになると考えられる。

なお、この自主避難については、火山噴火災害では避難勧告・避難指示発令前の段階で避難を開始する住民も少なくないことから重要な視点となる。廣井他は、三宅島の島外で

避難生活をするために、島を離れたのは、「島外への避難指示が出る前」が 45.9%、当該への避難指示が出た後」が 52.7%、覚えていないが 1.2%、無回答が 0.2%と半数近くが避難指示発令前に避難を開始している²³⁾。有珠山の避難開始にも同様の傾向が見られる²⁰⁾。

基本計画では、このように避難開始に関する判断は、火口の位置及び溶岩流流下に関するリアルタイムハザードマップの結果、さらに冬季であれば積雪状況を参考にすることになる。降灰については 30 cm 以上の降灰深の予測や生活支障によるが、その判断根拠としては、今後の降灰の継続時間や量の予測に依拠することになる。

広域避難については、火口位置や影響範囲は噴火後にならないとわからないため、「事前の避難先は定めずに必要に応じて、三県や合同会議において調整」することとしている。具体的には、「受入れ可能人数を超えた場合や噴火の規模に応じて市町村外へ避難を拡大する」。その際、避難実施市町村は住民に対して「避難指示の発令に併せて、受入市町村及び一時集結地を指示」し、広域避難者は「指示された受入避難所へ各自で避難を開始する」が、噴火状況判明後に必要に応じて「広域避難路（路線）の周知や広域避難路の状況把握、移動手段の確保及び避難誘導」をする。

それに備えて事前から、「市町村外への避難が必要となる見込みの避難者数等について、必要に応じて検討」するとともに、避難実施市町村は、事前から「必要に応じて一時集結地の施設管理者と災害時の使用に関する協定等を締結」しておき、実施市町村及び受入市町村は、「必要に応じて、その他の公共施設や民間施設にある駐車場の活用を検討するなど、駐車スペースの確保に努める」。また、噴火警戒レベル 3 から避難実施市町村ならびに受入市町村は「一時集結地及び受入避難所の開設や広域避難者の人員整理等のため職員を派遣。県は、必要に応じて支援のための職員を派遣」するとともに「受入市町村は、必要に応じて受入避難所の開設準備」する計画となっている。ここでは、降灰や火口の状況によって避難者数が増加した場合の対策が想定されている。

一般の避難所に関しては 9 件あり、噴火警戒レベルと避難所の立地場所により、「必要に応じて開設準備」を前倒しする。また、地域を離れることはできない住民向けに「夜間、住民が避難所で過ごすことを希望することも想定されるため、市町村は必要に応じて避難所の開設を検討する」と柔軟である計画となっている。いずれも、これらの判断は避難者数やその要望によるが、それらの要望は噴火の規模や継続期間に影響される。

また、事前から「必要に応じて、避難所等の施設管理者と災害時の使用に関する協定等の締結」し、「火山の状況等に応じて開設期間の延長にも柔軟に対応」する。さらに長期的には、「県は、応急仮設住宅の建設候補地の調整など、必要に応じて支援を行う」。

避難所の設置場所に関しては、避難中も通勤や一時帰宅を望むことが想定され、「噴火の状況に応じて一時帰宅を希望する方も多く存在する可能性が高い」ので、溶岩流から安全を確保できる範囲でできるだけ近くに避難所を設置する。これらの措置は、溶岩流の流下状況や今後の噴火活動の推移予測に依存する。

病院や福祉施設、学校等の避難についても 5 件あり、「到達が見込まれる噴火現象や利用者の特性に応じて避難開始時期を検討」する。具体的には、「溶岩流が到達する可能性がある地域に位置する病院施設」では溶岩流の到達可能性に応じて、外来や手術、避難に関する計画を立てることになる。学校においては、第 6 次避難対象エリア内では噴火警戒レベルが 3 に引き上げられた時点で原則休校となるが、「立地条件に応じて、保護者への引き渡

し又は集団避難後に引き渡す等の具体的な引き渡し方法を検討する」。この場合の判断の根拠としては、山体に近いかどうかや当該施設が避難所に指定されているかどうか、遠方から公共交通機関を利用する生徒が多いかなどが例示されている。

社会福祉施設等の避難先については、一定の施設環境が必要となることから「複数の施設を避難先の候補とし、噴火の状況や避難者の人数に応じて対応できるよう検討」する。

「避難訓練を実施し、想定どおりに避難が可能か検証し、必要に応じて計画等の見直しを繰り返す必要がある」とされている。

協議会・合同会議等の設置・運営と必要な情報

火山防災協議会や国の体制、自治体の体制などについて合計 32 件が状況等に応じて判断することになっている。協議会に関しては、6 件の「～に応じて」という記載がある。このうち、4 件が情報共有や協議、合意形成に関するものであった。具体的には、「必要に応じて三県の各コアグループが一堂に会して方針の確認や調整を行」い、基本計画に記載のない事項については「必要に応じて協議会、既存の委員会、当該構成機関による打合せ等により迅速に合意形成を図る」ことになる。住民等からの通報は地元気象台及び協議会の会長県へ情報伝達される。この住民等からの異常の通知ならびに噴火警戒レベル 1～3 の段階で協議会内で共有すべき情報を得た場合、情報共有し、「必要に応じて協議会（会議）を招集し、報告内容について検討を行う」計画となっている。さらに、協議会や合同会議で合意した事項等については、「協議会（合同会議）の開催後、必要に応じて記者会見等により発表する」とこととされている。また、火山活動が小康期となり、噴火警戒レベルが引き下げられた場合、避難状況等「被災地域の復旧・復興の状況等に応じて、体制の見直しを行う」計画である。判断の基準は復旧・復興の状況によるが、その前提として「小康期」かどうかの難しい判断がある。

国や自治体の体制や防災面での役割についての記載は合わせて 26 件あった。このうち本部体制等に関する記載が多く、「噴火その他の火山現象に応じて」国の本部や同現地対策本部の設置等を行うし、都道府県についても噴火警戒レベルならびに火山の活動状況や被害の状況により体制が定められている。それ以外に、政府の現地対策本部等は「火山活動の状況に応じて、予め協議会が選定した候補施設から選定する」ことになっている。

体制以外には、現地対策本部長あるいは政府現地災害対策室長は「必要に応じて、災害応急対策的確な実施を」図るが、噴火後あるいはレベル 5 相当段階では、「必要な規制緩和や特例措置について、噴火等発生後の被災地のニーズに応じて、迅速に対処」および「市町村の長が行う避難指示等に関する事項について、必要に応じて、助言又は指示」をする。これらの判断には火山活動の予測や実際の被害に加え、被災地のニーズに応じて判断され、なかには政治的判断が求められる可能性がある。

前述したように、2000 年有珠山噴火災害では、避難対象地域の設定や一時帰宅に関するカテゴリーの判断には、現地対策本部に加わっていた火山専門家、国と道、市町村の職員との連携のもと実行された。火山活動の高まりによって設置されていた「有珠山現地連絡調整会議」および噴火後に設置された「非常災害現地対策本部」が有効だったことになる。なお、この現地対策本部は、平成 7 年 12 月に改正された災害対策基本に基づく初めての設置であった²⁰⁾。

以下に、内閣府防災が公表している災害情報「有珠山噴火について（平成 15 年 9 月 19 日）」²⁴⁾および廣井ほか²⁰⁾に基づいて、合同会議開催までの国の現地対策体制の動きをまとめた。3 月 28 日の 02 時 50 分に「臨時火山情報第 1 号」が発表され、同日午前 1 市 2 町は災害対策本部を設置し、自主避難の呼びかけを行った。翌 29 日 11 時 10 分に「緊急火山情報第 1 号」が発表され、「今後数日以内に噴火が発生する可能性が高くなった」と伝えた。同日午後には壮瞥町、虻田町は避難勧告を発出した。同日夕方 18 時 15 分には、北海道防災会議地震対策部会火山専門家委員会出席の岡田教授らが記者会見をし、これを受けて地元市町は避難勧告を避難指示へ切り上げた。また同 18 時 55 分には、「有珠山現地連絡調整会議」を開催し、派遣された国土庁審議官を中心に国と地元、専門家の情報共有をはかった。噴火発生とともに、国は、3 月 31 日 14 時 30 分、「平成 12 年（2000 年）有珠山噴火非常災害対策本部（本部長：国土庁長官）」を国土庁内に設置するとともに、30 日に現地入りをしていた国土総括政務次官を本部長とする「有珠山噴火非常災害現地対策本部」が伊達市に設置された。

- ・ 3 月 27 日午前 ：火山性地震が次第に増加
- ・ 3 月 28 日 02:50 ：室蘭地方气象台「臨時火山情報第 1 号」
- ・ 3 月 29 日 10:15 ：官邸連絡室を設置
- ・ 3 月 29 日 11:10 ：「緊急火山情報第 1 号」火山噴火予知連絡会拡大幹事会の見解
- ・ 3 月 29 日 11:10 ：災害対策関係省庁連絡会議を開催
- ・ 3 月 29 日 13:00 ：官邸対策室を設置
- ・ 3 月 29 日 18:15 ：北海道防災会議火山専門家委員会出席の岡田教授ら記者会見
- ・ 3 月 29 日 18:55 ：有珠山現地連絡調整会議開催
- ・ 3 月 30 日 09:00 ：第 3 回連絡調整会議(39 機関、59 名)
 専門家搭乗のヘリによる定期的なモニタリングと噴火時の緊急
 モニタリング開始
- ・ 3 月 30 日 11:00 ：上空からの観測で北西山麓の雪面に長さ 100m の地割多数確認
 「北西山麓での噴火というストーリーに近い状況」との共通認識
- ・ 3 月 31 日 14:30 ：非常災害対策本部ならびに非常災害現地対策本部を設置。
- ・ 3 月 31 日 14:30 ：有珠山噴火非常災害現地対策本部合同会議を開催（第 1 回）開催。

2000 年有珠山噴火災害では、岡田・宇井両北海道大学教授らの研究成果や予測、地元との信頼関係などが、噴火前の避難完了に結びついたが、地元市町、北海道ならびに国の「ミニ霞が関」とも呼ばれた現地対策本部・合同会議による政策立案と遂行も大きな役割を果たした²⁰⁾。

降灰に関する応急対応については、基本計画では、噴火状況判明後に「火山灰の堆積状況に応じて」、県への避難路の降灰堆積状況の報告、除灰、障害物除去等の要請や実施、放置車両の撤去の実施などを各主体が行うことと定まっている。前述の道路管理者との意見交換では、火山灰の堆積状況とその影響に加え、全体の被害状況に基づいて判断されることになる。

また、降灰後の土石流に関して「避難体制を継続するとともに、必要に応じて災害応急対策を講じる」という復旧・復興期の土石流に関する言及があった。さらに、平時から「優先度等に応じて資機材の備蓄、用地の確保、工事用道路の整備等を実施する」とある。降灰予測や土石流の影響範囲の予測が求められる。

一般住民に対する広報の基本的な考え方としては、「住民が必要とする情報は・・・火山活動の状況や時間経過に伴い変化することから、国、各県、市町村及び関係機関は、状況に応じて的確に情報伝達や広報を行う」。また協議会においても、その構成機関に速やかに情報伝達し共有を図るとともに、「必要に応じて広報・発信する」。そのために、気象庁は、噴火警報等を発表したときは、その重要性に応じて報道機関への発表を行い、国土交通省は、噴火警戒レベルでレベル3以上の段階あるいは噴火後に、「必要に応じて」土砂災害に関する調査、土砂災害防止法に基づく緊急調査の情報提供やリアルタイムハザードマップに関する情報の提供、緊急ハード対策を実施する。これらの対策では、住民のニーズや協議会等での共有の必要性、社会的影響等から広報がなされるが、それらの要因を規定するのは噴火現象の規模や被害の可能性あるいは被害発生状況となろう。

鉄道運行規制や交通規制と必要な情報

鉄道運行規制や交通規制については、14件あり、運行規制が7件、その情報提供が4件、交通規制が3件である。まず運行規制についてみると、鉄道路線は第2次避難対象エリアより外側を通っていることから、基本的に運行規制は噴火後に実施する。しかし、レベル3から「状況に応じて鉄道運行規制の検討（または実施）」し、また避難指示が発令された場合や合同会議が融雪型火山泥流や降灰後の降雨時に発生しうる土石流に対応するため避難対象エリアを設定した場合に、当該地域に「鉄道路線を有する場合は、状況に応じて当該区間の運行規制を検討」する。さらに、「火山性地震等により施設に被害が生じた区間は、状況に応じて運行規制」をし、「降灰による視界の悪化及び線路の状態の悪化等が生じた区間も、状況に応じて運行規制」することとされる。

運行規制に際しては、鉄道事業者は、噴火警戒レベル3「から「必要に応じて」報道機関や鉄道利用者へ鉄道運行規制情報の周知を行うとともに。鉄道利用者には火山状況も伝える」ことになる。これら情報提供4件についてみると、レベル3以上の段階で、運行規制の影響に応じて運行規制情報と火山の状況を伝えることになる。

このように、鉄道事業者は避難指示等の発令地域、火山性地震等による被害、降灰による視界悪化等の実際の噴火現象による影響を根拠として運行規制を判断する。

交通規制については3件の該当があったが、レベル3以降で道路管理者は高速道路において「火山性地震等により施設に被害が生じた区間は状況に応じて交通規制」し、警察とともに「影響範囲内への流入規制（不要不急の場合に限る）や火山状況の把握及び高速道路利用者への周知、火山性地震等により施設に被害が生じた区間は状況に応じて交通規制」する。また緊急交通路として指定対象となる道路のうち、「災害の状況に応じて路線を選択し、指定される」。このように、交通規制も火山性地震等による実際の被害や緊急交通路との関係が判断の根拠となる。

その他の判断対象と必要な情報

その他としては、第1に、気象庁は国・県の研究機関及び大学等の研究機関と連携して「必要に応じて観測班を組織して合同で速やかに以下の監視・観測の強化」し、「国、県及

び関係機関は、火山活動の状況に応じてヘリコプター等による上空からの調査や監視を行い、「必要に応じて官邸や現地対策本部等へ映像を配信する」といった監視に関わる3件である。

また第2に、3件の飛行制限の記載があり、国は合同会議において、「噴火発生後の飛行制限区域について噴火の規模や形態に応じて協議」し、「必要に応じてNOTAM（ノータム：Notice to Airmen）の発出を検討」し、「必要に応じて報道機関等へ飛行制限区域を周知」することになる。いずれも降灰予測によることになる。

これ以外に、「医療救護活動にあたっては、必要に応じてトリアージを行い、効率的な活動に努める」とのトリアージが2件、大規模降灰時に関する記述が2件あった。大規模降灰時に関する内容としては、ひとつは、今後の検討事項として、「知見が不足していることから、新たな知見が得られた際には、必要に応じて計画を見直す」とあり、例として、木造建築物に及ぼす詳細な影響や交通網に対する影響などがあげられている。降灰に関しては、ハザードの影響評価に関する今後の研究の進展が期待されていることがわかる。もうひとつは「必要に応じて避難者自身が、この物資集積拠点まで徒歩で移動し、物資を調達することを検討する」である。降灰堆積厚が30cm未満の場合は屋内退避とし、道路啓開をはじめとする迅速な応急対策による救助を待つこととし、その間、「各家庭で1週間程度の飲料水、食料、携帯トイレの備蓄を推奨」されるが、降灰による影響範囲や期間、道路啓開、備蓄状況によることになる。

これまで、基本計画に基づいて、自治体がその場の状況に応じた判断の余地が残されている項目について抽出した。その結果、第1に、噴火後に溶岩流からの避難範囲を検討するため、火口の即時把握とリアルタイムハザードマップに判断が依拠すること、第2に降灰からの避難は降灰予測とともに降灰の影響のより明確化が期待されていること、第3に広域避難に関しては降灰予測と降灰による生活支障の明確化を情報として必要としていることがわかる。第4に鉄道や道路交通に関しては火山性地震による被害や降灰の堆積深の予測や即時把握ならびに視界不良の程度が影響する。そこで、自治体に対する聞き取り調査では、避難対象範囲の決定と避難開示期の判断について課題を把握し、それらの判断に必要な情報を明確にする。さらに、事前の段階における訓練企画等における課題、そして最後に周知・広報に関する要望や改善点を把握する。

聞き取り調査の概要と避難対策をめぐる課題

火山防災に先進的に取り組んでいる山梨県および静岡県のおよび担当から、火山防災の課題とその解決に資する情報の内容と提供方法等について聞き取り調査を行った。まず、前述の実際の災害時記録および「富士山火山避難基本計画」をもとに、都道府県あるいは市町村が判断を求められるポイントを抽出し、事前に質問表を送付し、その後、対面で回答を得た。この両県の回答をもとに、火山研究に求められる情報提供を分析する。なお、以下、「」で表記した部分が両県の指摘であり、それ以外はそれらの指摘を受けてとりまとめた今後の課題である。

自治体として最も重要な対策の一つが避難指示の発令とその後の避難環境の整備・維持となる。富士山の避難基本計画では、概ね火砕流・火砕サージ及び大きな噴石の到達範囲、想定火口範囲では事前避難をし、その外側では噴火状況が判明し溶岩流の流下方向の住民は段階的に避難をすることと定められている。迅速かつ円滑に避難対策を進めるには、早

期の火口の特定と共有は避難対策の根幹をなす。しかし、自治体等では「火口特定に関する技術的進展が必要」と感じており、そのための情報提供が求められる。最も早い地域では3時間以内で溶岩流が到達することを考えれば、早期にかつ確実に火口を特定できる監視技術の展開が望ましいだろう。

また溶岩流は限られた範囲に流れるので、同じ自治会のなかでも、確実に逃げなければならない人と逃げなくても良い人がおり、「効果的な行政の避難指示区分について検討」をしている。その際、「避難計画策定の方向性を決める上で、シミュレーション結果の精度の問題」とともに「住民の受け止めなどと合わせて課題の抽出と解決」とが求められる。このように溶岩流からの避難は、火口の特定と精度の高い流下シミュレーションが必要となる。この自治体からの要望に対するひとつの方向としては、結果を信頼区間として示す情報提供について検討もありえよう。すなわち、予め前提条件を変えて流下シミュレーションを行った上で、一定の範囲に収まる確率が95%の範囲を提示するといった情報である。

他方、降灰からの避難は、規模がわからないこと、その影響も前例が少ないこと、風向きに影響されること、自動車による避難に影響を与えると想定されること、降灰範囲が広くなり暴露人口が膨大になりかねないことといった課題がある。このため、現行計画では、降灰堆積深が30 cm未満と想定される範囲を屋内退避としている。しかし、大量降灰時には、生活困難地区等に「避難指示を出す可能性はある。この考え方について、避難開始のタイミングや、生活避難、孤立可能性、広域避難といった観点から検討している」という。降灰による生活支障について今後も研究を継続していくことが求められよう。

現行計画では、現実的な対策とすることから、富士山火山避難基本計画では、「隣接市町村への避難を基本とし、火山活動の状況、地理的要因、避難者の希望等から、同一県内の市町村や県外への避難が必要な場合には、神奈川県、山梨県、静岡県の三県が相互に協力し、避難者の受け入れを行う」が、溶岩流の流下状況や降灰の規模によっては、広域避難も必要となってくる。

この場合、広域避難の受け入れに関しては、協定に基づき県が調整することになる。「富士山火山避難基本計画の改定前には、県内の市町村の避難について、郡内地域（富士五湖周辺の市町村）と国中地域（甲府方面の市町村）を1対1に対応させていたが、溶岩流からの避難では必ずしも広域に避難する必要がなく、近隣の市町村内での避難で足りることから、現時点では噴火後の判断としている」あるいは「県内での受け入れについては調整し、複数市町をグループ化する等一定の合意は得ているが、噴火の様相によって地域や避難者数が大きく異なることもあり、具体的に割り当てる受入避難者数や開設する避難所については、噴火後の判断としている」。

上記の避難対策を判断する上で、臨時情報などは、「地方気象台から県、そして市町村へとほぼ自動で情報が伝達される」。その上で幾つかの情報面での課題があると指摘する。

「具体的な噴火経験や噴火対応経験が少ない中で、共通認識をもてるような情報の出し方」に課題があると感じていた。たとえば、風水害の場合には、気象庁や河川管理者から情報が発表され、対応がなされる。したがって、行政の対応時には、住民もすでに多くの情報を知っており、その情報共有の上で避難情報の発表等対策を実施することができる。しかし、火山については、「噴火前後とも、国の各機関から発表される情報がより広く一般に配信される必要がある。たとえば、解説情報（臨時）は重要なトリガー情報となりうる

が、防災アプリ等の多くが活用しているＬアラートでは配信されておらず、それぞれのアプリ運営者において個別対応が必要である」。また、「大雨の際は気象庁のレーダーや川の防災情報（国土交通省）をみれば、どの地域が影響を受けているかイメージすることが容易だが、火山については地震回数等が一部公開されているものの、噴火現象そのものをリアルタイムにみられる観測情報や、その影響する地域を共通認識できるような情報は、他の災害と比べると少ない」。さらに、「噴火警報は緊急速報メールや観光庁の多言語アプリを含めて広く配信されるが、警戒すべき対象地域は市町村単位で表現されるにとどまり、火口位置も気象庁独自の端的な表現がされるのみと想定される。このため、”大正火口から噴火した”といった噴火の様相を共通認識できる表現がない火山においては、噴火警報だけではどの範囲が影響を受けるか住民も行政機関もイメージしづらいのではないか」。このため、社会の中でどの程度情報が共有されるか想定できないと感じている。

メディアとの関係について、山梨県下では、「マスメディアも関心が高く、FM・テレビが行政と一緒にイベントを行っている」という。しかし、噴火対応経験の乏しさによる課題も指摘されている。「発災時に報道される情報のイメージがついていない」という。自治体とマスコミとが共通認識を持つことが必要であるが、「各局がどのような放送をするのか想定できない」。また、本計画で、「マスコミ等で徒歩避難原則が強調され、車避難を想定している第１次・第２次避難対象エリアや要支援者までも徒歩避難と受け止められることがある」という。マスコミとの連携が望まれていた。

訓練等平常時の防災からみた課題

３県で市町村含む連携訓練を実施した。「計画策定後初の訓練で、内容はいわゆる図上演習である」。これ以外にも、「市町村はそれぞれ別途訓練している」という。

火山噴火を想定した訓練を企画する上で、「不確実性が高いことに対してシナリオを作ることに難しさがある」という。噴火現象や規模、さらには地域の課題により、対策の優先順位や猶予時間の設定等変化する。根拠をもってシナリオを作成し、提示する上で、「性質が近い火山あるいは噴火形態が近い火山噴火がわかれば参考になる」との提案があった。

また、訓練に関しては、異動があるなかで、どうやってノウハウを蓄積していくか、また中長期のゴールをたて、その中で毎年の訓練を位置付けていく必要がある、といった課題指摘もあった。このため、ノウハウの蓄積も含めて、山梨県では、火山防災職を置いている。

なお、訓練企画については、「内閣府の訓練の資料を参考にしているが、他の火山と富士山は地域特性や対象とする噴火現象や避難対策が異なるため、シナリオや訓練項目は必ずしも対応できるものではない」ことから、「海外の事例も含めて火山の特性ごとに訓練の事例を整理してもらえると助かる」との要望があった。同様に、「マグマの性質や火砕流等噴火ハザード、被害範囲などでカテゴライズしてほしい」との要望もあった。これは訓練企画に限ったことではなく、地域防災計画策定時全体に有効であろう。

火山災害に関する情報としては、火山学の成果に加えて、火山防災に関する情報が必要となる。自治体の各現局がやらないと進まない部分が多いためである。たとえば、「道路啓開、除灰、福祉等施設のBCP計画など、現局が危機管理部局と連携をとりつつも、全庁的にそれぞれの所管業務や団体の特性に応じた対応を検討していく必要がある」という側面がある。したがって、危機管理部局に加えて、「現局が参考にできる情報が欲しい」と指摘

する。同様に、県の研究所について「火山学と建築、火山学と医療といった専門家がおり、県の施策につながりやすい」との指摘も似た指摘といえる。

職員の育成については、新たに担当となった市町村職員のために、「県内のコアグループで、種々のレクチャーをしている。年に5回、奇数月の第3水曜日を基本に開催しており、富士山科研や内閣府の火山防災エキスパート制度を活用して火山防災対応の主導的な役割を担った経験のある実務者等も招いたりもしている」という。火山学的な専門知だけではなく、人的ネットワークの形成も重要な機能の一つであろう。

周知・啓発に関する課題

D3で開発している周知・啓発用コンテンツの参考となる意見についても把握することができた。そのひとつとして、自治体では対外的に、事前防災の成果を明示していく必要があり、「周知・啓発として、何をすれば効果的か最新の知見を把握しながら取り組みたい」との要望があった。たとえば、「登山者の8割は噴火の可能性自体を認識しているという知見がある。これを自治体の担当者が把握していれば、単に活火山ということだけを周知するだけではなく、ヘルメット着用等の行動変容に結び付けられる周知事業へとすることができ」と指摘する。「どのような情報が有用なのか、また効果的なのかが知りたい。そのために知見の整理をしてほしい」という。防災教育に関する基礎から実践的な研究を体系的に展開する必要があるが、現行制度では体系的な仕組みは不十分であろう。

ハザードマップの内容や表示について、「可能性マップは一つの事象と誤解されやすい。新人研修でも「全滅」という受け止め方」をされるという。また、経験の乏しい自治体ではあれば、「どのタイプの災害に備えるか、ハザードマップ作成段階から判断が必要となる。最大規模か、頻度が高い現象か。組長の判断による」という意見もあった。火山学からならびに防災行政から代表的なドリルマップについて選定し、作成目的や使用方法などの解説があっても良いだろう。同時に、道路管理者からの指摘にもあったように、それぞれのドリルマップにはイベントと影響予測を時系列に整理されたものの提示が必要であろう。

ハザードマップの空間的解像度について、「行政からの避難指示は、小学校区よりも小さい自治会単位で検討することになる。したがって、ハザードの予測結果を自治会単位に読み替える必要がある」が、住民理解しやすさを考慮したり、安全サイドに設定したりすることから、ある程度行政の裁量が必要である。

このほか、「質問回答例を載せると良い」、「実災害のクロノロが訓練等の参考になる」、「実災害時に必要になる火山関連以外の関係法令も含まれると良い」などの要望は参考となろう。また「各県が作ったものを持ち寄れると良い」というプラットフォーム的な機能も要望があった。次年度だけでは、解決できない項目もあり、今後の継続的な研究が求められるだろう。

iii) 利活用に資する要件の検討のまとめ

今年度は新たに道路管理者ならびに自治体との意見交換を行った。その結果、昨年度と同様に、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た。また、空間的な解像度としては、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ても有効な場合があること、などが明らかになった。これらの知見はネットワーク設備を持つ組織にはかなり

共通した要望とみなしうることから、ハザードの影響範囲を表示する上で、検討に値すると思われる。

またハザードの影響評価に関して、視界への影響や木造建物への影響などより多くの項目について知見を蓄積していくことへの期待があった。降灰の場合には影響範囲が広いことから、防災対策の対象を絞らない限り現実的な対応が難しくなるためである。実験的手法を継続し、影響内容をより広くするとともに、その影響をより精緻にしていく必要がある。

降灰深等の実績についても、「いかに早く把握できるか」といった期待もあった。また、観測ならびにその結果に基づく予測を社会で広く共有していくことへの要望もあった。社会全体で噴火災害の状況について共通認識を持つことが対策の実施しやすさや受容に影響するためである。

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ものもあるが、今後とも取り組むべき課題であろう。

b) 火山噴火災害評価手法としての噴火イベントツリーの試作

i) 噴火災害評価手法のレビュー

本プロジェクトの主要なアウトプットの一つは、火山観測データやそれに基づく解析結果から、より噴火ハザードに関する切迫度や推移予測を如何に定量的に提示できるかということである。そこで、2000 年以降に世界中で展開された噴火災害評価手法に関して調査し、表 11 に示すように 8 つの手法を抽出した。それぞれの評価対象内容、時空間的適用対象、評価に必要な情報、使用の長短所などの特徴を表 12 にまとめた。降灰に関するものや、火道形成、および、噴火のタイミングに関するものを除くと、噴火のイベントツリー（ベイズ法に基づくものと USGS のもの）が総合的な噴火災害評価手法と考えられる。

本プロジェクト課題 C サブテーマ 2 においては、噴火事象系統樹や階段ダイアグラム作成が精力的に行われ、活火山毎の噴火の特性や時間変化を明らかにされつつある²⁵⁾。噴火事象系統樹はいわば一種の火山の履歴書であり、火山毎の噴火の様式や規模などの癖を過去の発生頻度確率で表示している。また、噴火の切迫度を表す指標として、Potter et al.²⁶⁾ の Volcanic Unrest Index (VUI) の日本での導入が提案されている²⁷⁾。VUI は観測によって、その火山のアンレストを定量的に診断するものである。ここでは、表 11 と 12 に基づいて、噴火の切迫度と推移の両方をタイムリーに確率的に予測する方法として噴火イベントツリーを用いて、新燃岳の過去噴火に適応した。その際、観測項目毎に閾値や確率分布を与えて、実際に観測されている状態から確率を包括的に算出する、やや複雑で、観測体制が十分な火山にしか適応し難いベジアンイベントツリー (BET) ではなく、より簡便な USGS のイベントツリーの包括的ハザード評価を導入する。これは噴火災害のアンレスト時に、より可能性のあるアウトカムを観測データやデータベースを元に検討し、それを相対的確率で表現する理論的枠組みであり²⁸⁾、インドネシアや南米の複数の火山ですでに使用されているものである²⁹⁾。特に、新燃岳を対象とした場合に、USGS 型の噴火イベントツリーがどのように導入可能かを検討した。

表 11. 噴火災害評価手法一覧

手法名称	手法名称(英語)	評価対象確率	実施研究機関(国籍)
PVAHA 法による 降灰超過確率評価	Probabilistic Volcanic Ash Hazard Assessment	噴火確率 到達確率	GeoScience Australia (オーストラリア)
世界規模での 降灰超過確率評価	Global probabilistic ash fall hazard assessment	噴火確率 到達確率	Gloval Volcanic Model (国際共同研究組織)
降灰シミュレーション による降灰超過確率評価	Probabilistic model of tephra dispersal	到達確率	University of South Florida etc(アメリカ合衆国など)
更新過程モデルによる 降灰年超過確率評価	Renewal model and tephra assessment	噴火確率 到達確率	Volcanic Risk Solutions, Massey University (ニュージーランド)
ベイジアンイベントツリー による 包括的ハザード評価	Bayesian event tree	噴火確率 現象発生確率 到達確率	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (イタリア)
ハイズ推定による 新規火道形成確率評価	Probability hazard map of future vent opening	噴火確率	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (イタリア)
点過程、カーネル密度 推定による 時空間的噴火確率評価	Spatio – temporal eruption forecasts	噴火確率	Volcanic Risk Solutions, Massey University (ニュージーランド)
イベントツリーによる 包括的ハザード評価	Event tree for estimating volcanic hazard and risk	噴火確率 現象発生確率 到達確率	US Geological Survey (アメリカ合衆国)

表 12. 各噴火災害評価手法の特徴

手法名称	ベイジアンイベントツリー(BET)による包括的ハザード評価	ハイズ推定による新規火道形成確率評価	点過程、カーネル密度推定による時空間的噴火確率評価	イベントツリーによる包括的ハザード評価	
評価対象確率	噴火確率、現象発生確率、到達確率	噴火確率	噴火確率	噴火確率、現象発生確率、到達確率	
評価内容	噴火の推移を系統樹的に表したイベントツリーとハイズ推定を用いて評価する。火山不安定の発生から噴火、そして噴火シナリオがどのように推移して、どのような被害を及ぼすまで一括して評価する。	ハイズ推定を用いて対象地域における次噴火時の火道形成位置を推定する。	対象地域において次の噴火が起きるまでの時間間隔、および噴火が発生する場所の確率密度分布、時間間隔はポアンソン過程、空間的確率密度はカーネル密度推定を用いる。	噴火の推移を系統樹的に表したイベントツリーを用いて評価する。火山不安定の発生から噴火、そして噴火シナリオがどのように推移して、どのような被害を及ぼすまで一括して評価する。	
評価可能時間スケール	火山不安定が発生後から任意の時間スケール	数年～数十年以内先	次回噴火が起きるまでの期間を評価	火山不安定が発生後から任意の時間スケール	
評価可能空間スケール(最小)	使用する影響範囲データに依存	0.5 × 0.5km	1 × 1km	使用する影響範囲データに依存	
評価に使用する情報	観測データ（地殻変動、ガス、地震）、噴火履歴、専門家による重みづけ	噴火履歴、地震・断層運動に関する文献	噴火履歴（火口位置、噴火年代）	観測データ（地殻変動、ガス、地震）、噴火履歴、専門家による重みづけ	
レビュー	長所	<ul style="list-style-type: none">地質学的データ（例：噴火年、地殻変動量、歪み速度など）、専門家による評価、モニタリングにより得られる最新の観測データなど、あらゆるデータを取り込んで準リアルタイムなハザード確率評価を行うことが可能である(Marzocchi et al., 2010)ほか。ハイズ推定に基づいた確率計算であるため、評価結果が内包する不確実性に対して自信度まで考慮した評価が可能である(Marzocchi et al., 2010)ほか。	<ul style="list-style-type: none">入力するパラメーターを少なくすることで、不確実なデータによる未知のバイアスが発生する可能性を減少させることができる(Selva et al., 2012)。この手法で出力した結果をベイジアンイベントツリー(BET)におけるノード4に転用し、より詳細な評価を実施することができる(Selva et al., 2012)。危険度の高い場所を視覚的に把握する事ができる。	<ul style="list-style-type: none">次の噴火がいつ生じるかだけでなく、どこで生じるか、時空間的な評価が必要となる単成火山群のような場所では、カーネル密度推定のような高次元に应用可能な表現方法が有効である(Bebbington and Cronin, 2010)。	<ul style="list-style-type: none">地質学的データ（例：噴火年、地殻変動量、歪み速度など）、専門家による評価、モニタリングにより得られる最新の観測データなど、あらゆるデータを取り込んで準リアルタイムなハザード確率評価を行うことが可能である。ハイズ理論を用いてはいるがハイズ推定による確率計算を伴わないため簡易的に確率評価が可能
	短所	<ul style="list-style-type: none">データ（観測網や歴史記録）が少ない火山に対しても評価が可能だが、導かれた確率評価の信頼度は低くなってしまふ。高度な統計学的処理を必要とする。	<ul style="list-style-type: none">評価対象期間が数年～数十年と比較的短く長期的評価には不向きである。カルデラ内にある地域など、本手法を適用できる場所に制限がある。	<ul style="list-style-type: none">同じ火道から複数回噴火が生じるような複成火山に対しては適用できない(Bebbington and Cronin, 2010)。単成火山地域、カルデラ内地域など、適用できる地域に制限がある。空間的評価に関してはバンド幅の設定で結果が大きく異なる為、注意が必要である。	<ul style="list-style-type: none">データ（観測網や歴史記録）が少ない火山に対しても評価が可能だが、導かれた確率評価の信頼度は低くなってしまふ。ツリーの各分枝の確率値の設定根拠が専門家の主観のみに依存してしまう場合がある。

手法名称	PVAHA法による降灰超過確率評価	世界規模での降灰超過確率評価	降灰シミュレーションによる降灰超過確率評価	更新過程モデルによる降灰年超過確率評価	
評価対象確率	噴火確率、到達確率	噴火確率、到達確率	到達確率	噴火確率、到達確率	
評価内容	評価対象地点における降灰荷重(kg/m ²)の年超過確率を評価する。噴火確率は過去噴火実績の頻度計算、火山灰の到達確率はFALL3Dによる計算結果の重ね合わせにより求める。	評価対象地域における任意の降灰厚(mm)の年超過確率を評価する。噴火確率は過去噴火実績の頻度計算、火山灰の到達確率はASHFALLによる計算結果の重ね合わせにより求める。	評価対象地点におけるある降灰厚(mm)の年超過確率を評価する。降灰到達確率はTEPHRAによる計算結果の重ね合わせにより求める。	評価対象地点におけるある降灰厚(mm)の年超過確率（○○年先に噴火が起き降灰する確率）を評価する。噴火確率は更新過程、到達確率は経験式より求める。	
評価可能時間スケール	100年～10,000年	100年～10,000年	制限なし	現在から200年先まで（任意に変更可能）	
評価可能空間スケール(最小)	1×1 km	10 × 10 km	指定した地点の降灰超過確率を評価する	指定した地点の降灰超過確率を評価する	
評価に使用する情報	GVPカタログ（スミニアン博物館）	GVPカタログ（スミニアン博物館）	噴火規模が明記された文献、風速風向データ	降灰厚と、噴火年代を報告している文献	
レビュー	長所	<ul style="list-style-type: none">分析結果を分解させて表示することで、評価対象サイトにおける降灰ハザードに最も影響を与える要因（給源火山、VEIなど）を容易に抽出することが可能となる。ハザードに寄与する要因を容易に抽出可能なため、より具体性をもった防災・減災対策の立案が可能となる(Bear-Crozier et al., 2014)。	<ul style="list-style-type: none">2次元シミュレーションツールASHFALLによる、世界規模での降灰ハザード評価が可能である。降灰シミュレーションは観測による実測の風データを取り扱っているため、実際の現象に近いハザード評価を行うことが可能である(GVM, 2014)。本手法による結果を活用することで、優先して詳細な研究、あるいは防災・減災計画の検討を行うべき地域を把握する事が可能である(GVM, 2014)。	<ul style="list-style-type: none">実際の気候条件などを考慮した到達確率が評価可能である。噴火確率評価と組み合わせ使用することで、さらに有効な評価となる。	<ul style="list-style-type: none">入力パラメーターが少なく、評価のための準備が比較的容易にできる任意の地点の降灰厚が評価可能である
	短所	<ul style="list-style-type: none">広範囲を対象としているため、局所的な地形的特徴や気象条件を十分考慮した評価は行えない(Bear-Crozier et al., 2014)。確率イベントは一つ一つが独立であり、前の噴火活動による影響が考慮されていない。火山の形態は時間の経過とともに変化しており、本評価に用いた形態分類が本来の火山活動の結果と必ずしも対応しているとは限らない(Bear-Crozier et al., 2014)。	<ul style="list-style-type: none">火山灰の噴出源の風向・風速のみが考慮されており、大気中を漂流拡散する火山灰が通過する地形グリッドの風データは考慮されていない(GVM, 2014)。VEI4-7の噴火事象を対象に評価しているため、VEI3以下の噴火による降灰被害や、VEI8の噴火により引き起こされる大規模な降灰被害は評価していない(GVM, 2014)確率イベントは一つ一つが独立であり、前の噴火活動による影響が考慮されていない。	<ul style="list-style-type: none">降灰現象のみを対象としている。到達確率評価に必要な入力パラメーターが多い。	<ul style="list-style-type: none">火山灰に限定した手法であり、他の火山災害の評価には現段階では転用できない(Bebbington et al., 2008)降灰分布はシミュレーションではなく経験式を使用するため既存の降灰厚分布がわかっていない火山では適用できない。

ii) 噴火イベントツリーの特徴

USGS の噴火イベントツリーは、噴火前・中に、観測データや火山現象の変化が見られた段階に応じて繰り返し作成される²⁸⁾。作成されたイベントツリーには、それを運用する体制に応じて、数週間から数ヶ月までの有効期間（予測の期間）がある。例えば、インドネシアのシナブン火山では噴火中に 6 回噴火イベントツリーが作成されており、予測の期間は短いもので 2 週間、長いもので 1 年であった²⁹⁾。

図 61 に示すような噴火イベントツリーの分岐点（ノード）において、条件付き確率は観測データと研究者の議論を踏まえて設定される。そこでは、その火山自身やその火山が属する火山帯、および、世界の火山噴火のデータベースが参考にされる。また、それぞれのノードにおいて、どのようなデータベースを用いて、どのように確率を判断したかを追跡できるように透明性を有するのが噴火イベントツリーの大きな特徴であろう。確率は、ほぼ発生が確実な事象の 90% から、ほぼ発生がありえない場合を 10% として、70%、50%、30% と付される。このような各ノードにおいて発生確率の付け方は、観測体制が十分でない火山や、噴火の観測経験がない火山においても、数値的な取り扱いができるようにしているのが特徴である。この点、Marzocchi et al.³⁰⁾などが提案している、観測項目毎に閾値や確率分布を与えて総合的に確率を算出するものとはかなり異なる。USGS の噴火イベントツリーは、最初のノード群のマグマ貫入、噴火の発生、噴火の規模については、主に観測に基づいて判断され、噴火の規模も含んでそれ以降のノード群については、主に、地質学的データやシミュレーション結果に基づく。

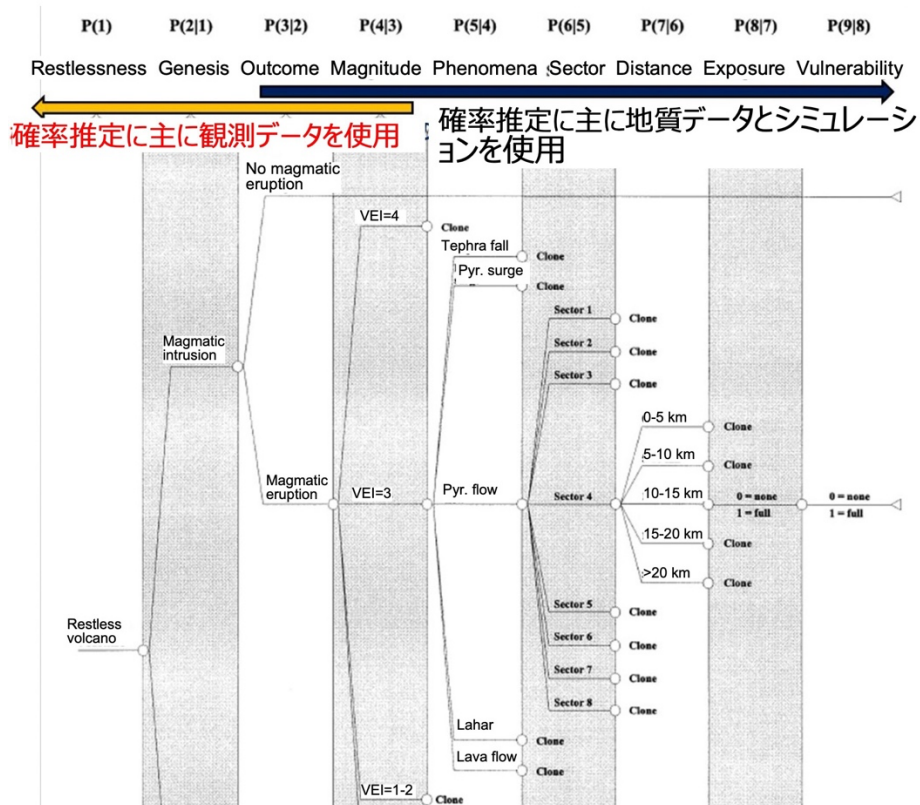


図 61. USGS 噴火イベントツリーの基本構造²⁸⁾。分岐点ノード1はアンレスト発生の有無（過去の噴火履歴に基づく）、ノード2はマグマ貫入の進行（観測に基づく）、ノード3は噴火発生（マグマ性か非マグマ性か。地震の増加、隆起の加速、ガス放出量増加に基づく）。

iii) 今回の作業手順

新燃岳の噴火イベントツリーを作成するに当たっては、USGS の多くのノード数から簡便化を行なった。ノード1では噴火の可能性を検討する。その判断には、噴火につながりうる前兆現象について VUI シートを用いる（図 62）。VUI シートでは噴火の基準（VUI=4）を噴火警戒レベル 3³¹⁾とした。理由は、新燃岳における 2011 年噴火以降の噴火警戒レベルの上げ下げの履歴³²⁾を考慮すると、レベル 2 で噴火に至った例がないためである。VUI 値のそれぞれは、噴火警戒レベル 3 の閾値を VUI=4 とし、それぞれの観測項目について、VUI の 4 から 0 までほぼ等配分した。また、VUI=1 から 4 について、それぞれ、25%、50%、75%、95%の確率を付すことにした。

ノード2においては発生する噴火の規模を検討する。そこでは、気象庁の噴火警戒レベル毎の観測項目の判定基準の合致数を使用する。新燃岳で導入されている噴火警戒レベルは、それぞれのレベルの事例として過去噴火が挙げられており、噴火警戒レベルの大きさと過去の事例噴火の規模（Volcanic Explosivity Index, VEI）との間には良い相関がある^{31, 33)}。すなわち、噴火警戒レベル 2 は 2008 年噴火や 2011 年 1 月 19 日噴火が事例とされている、これらは VEI=0-2 に相当すると考えられる。噴火警戒レベル 3 と 4 は、それぞれ、2011 年 1 月 26 日から始まる噴火（VEI=3）、1716～17 年の享保噴火（VEI=4）とされている。噴火警戒レベル毎の全判定基準と噴出物にマグマ物質含有の有無を図 63 に示す

が、これらの判定基準と検討する時期の観測状態が合致する項目を数え上げることで、噴火警戒レベル（すなわち噴火規模）の確率判断を行うことにした。すなわち、噴火警戒レベル（噴火規模）毎に合致する項目数に応じて順位をつけ、1位のレベルから、図 65 のノード 2 に示すような、順番に確率を付す。そこでは、順位を考慮しながら、全ての規模を合わせた合計が 100%になるように調整してある。これによって、噴火事象系統樹のように、噴火履歴やデータベースに基づく固定した発生頻度確率ではなく、その時々観測状態に応じた、噴火規模の確率的評価が可能となる。

ノード 3 は発生現象についてである。日本の活火山における過去 1 万年間に発生した噴火災害に関して日本活火山総覧（第 4 版）³⁴⁾ を用い、VEI 毎に整理した発生頻度を示した（図 64）。このうち報告がない噴火についても「降灰・噴石」および降灰時の「土石流」発生は、起こっていたか、発生する可能性が高いと判断し 100%として扱った。

ノード 4 は被害範囲である。これに関しては地形に依存しない現象と地形に依存する現象とに分け、前者については 8 方位について検討し、後者については既存のハザードマップに記載されている到達範囲に、噴火の活動中心の位置関係で重みを付ける作業を行うものとした（ここでは省略）。

以上の手順をまとめたものが図 65 である。

		Volcanic Unrest Index (VUI) worksheet					VUI =
		0	1	2	3	4	###
		No unrest	Negligible unrest	Minor unrest	Moderate unrest	Heightened unrest	
条 件		霧島山を挟むGNSSの基線の伸びが認められる時					
火山性地震	低周波地震	低周波地震なし	5回以上/24h or 1回以上/1h	10回以上/24h or 3回以上/1h	20回以上/24h or 5回以上/1h	50回以上/24h or 10回以上/1h	
	火山性地震回数	火山性地震なし	10回以上/24h	30回以上/24h	50回以上/24h	100回以上/24h	
地殻変動	傾斜量 新燃岳北東、高千穂河原、湯之野	変形なし	~0.1μrad	0.3μrad以上	0.5μrad以上	1μrad以上	
	傾斜変化 (マグマ溜まりの収縮)	兆候なし	わずかな収縮	緩やかな収縮	やや急な収縮	急速な収縮を示す変化	
ガス	火山ガス (二酸化硫黄)	通常の放出量	わずかな放出量の増加	緩やかな放出量の増加	やや急な放出量の増加	放出量の急増	

図 62. 手順 1 として、新燃岳で噴火発生の評価に使用した Volcanic Unrest Index。VUI 4 を、新燃岳の噴火警戒レベル 3 の閾値と設定し、それ以下の VUI の各項目は順次小さくなるように適当に按分している。

属性	観測項目	対応する噴火警戒レベル【想定規模】			
		Lv2	Lv3	Lv4	Lv5
局所的な地震	火山性地震回数 【2年以上噴火なし】 (300回以上/10日 or 100回以上/24 h or 20回以上/1 h) 【2年以内に噴火あり】 (100回以上/10日 or 20回以上/24 h or 10回以上/1 h)	●	○	○	○
	火山性地震回数 ^{※2} (100回以上/24 h)		○	○	○
	有感地震発生回数 ^{※3} (急激な増加)			○	○
	山体直下の地震多発 (10回以上/1 h)				○
	低周波地震回数 ^{※2} (30回以上/24 h or 10回以上/1 h)		○	○	○
	1分間平均振幅の継続 ^{※3} (100 μ m/sが2分以上継続)			○	○
地殻変動	傾斜変化 (短時間の変化 $>0.1 \mu$ rad)	○	○	○	○
	傾斜量 ^{※2} (1 μ rad以上)		○	○	○
	顕著な隆起 (10 μ rad以上/1h)				○
	GNSS変位速度 (新燃岳を挟む基線の急激な伸び)	○	○	○	○
	傾斜変化 ^{※2} (急速な収縮を示す変化)		○	○	○
熱・ガス	地熱 ^{※1} (熱異常域の高温化)	○	○	○	○
	噴気 ^{※1} (明瞭な増加)	○	○	○	○
	火山ガス：二酸化硫黄 ^{※1} (放出量増加)	○	○	○	○
	火山ガス：二酸化硫黄 (1日当たりの放出量急増)		○	○	○
調査結果	マグマ物質の有無		○	○	○

図 63. 手順 2 として、ノード 2 の判断基準に採用した噴火警戒レベルの項目

噴火規模	発生現象					
	降灰	噴石	火砕流・火砕サージ	溶岩流	火山泥流	土石流
VEI 1	98%	38%	14%	7%	16%	0%
VEI 2	97%	20%	17%	18%	15%	5%
VEI 3	96%	10%	20%	29%	7%	1%
VEI 4	94%	8%	45%	31%	8%	0%
VEI 5	87%	26%	74%	26%	9%	0%

日本活火山総覧(第4版Web版)に基づく
日本の火山災害現象の発生頻度 (VEI毎)

噴火規模	発生現象				
	降灰・噴石	火砕流・火砕サージ	溶岩流	火山泥流	土石流
VEI 1	100%	14%	7%	16%	100%
VEI 2	100%	17%	18%	15%	100%
VEI 3	100%	20%	29%	7%	100%
VEI 4	100%	45%	31%	8%	100%
VEI 5	100%	74%	26%	9%	100%

イベントツリーに用いる災害発生確率

図 64. 手順 3 として、ノード 3 で検討した日本の過去の噴火規模ごとの災害現象の発生頻度。

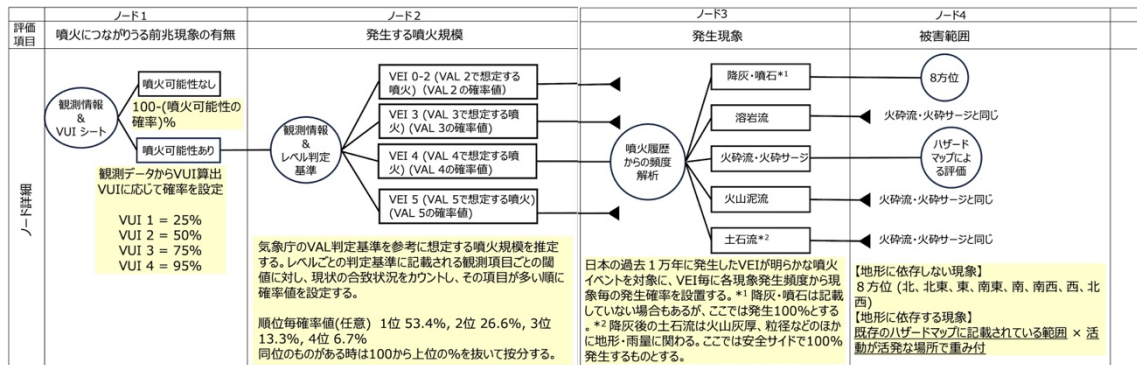


図 65. 今回新燃岳で提案した噴火イベントツリーの構成概念図。

iv) 過去アンレストへの適応と本手法の特徴

上の手順に従い、新燃岳の過去の3時期に対して、当時気象庁から提供された新燃岳の火山活動情報³²⁾に従い、噴火イベントツリーを作成した。すなわち、2011年1月18日、同年1月26日午前中、そして、2024年12月12日に噴火警戒レベル2に引き上げられた時の情報に基づいた。それらの結果（ノード2まで）を図66-68にそれぞれ示した。2011年1月18日は翌日19日に軽石を含む噴火が発生しており³⁵⁾、その当時の観測情報からは、ノード1で噴火の可能性が50%、ノード2の噴火規模ではVEI=0-2が25%と算出される。1月26日午後からは準プリニー式の本格的な噴火が開始するが³⁵⁾、19日の噴出物にマグマ物質が含まれたことと26日午前の観測状態からは、噴火の可能性が95%と噴火規模はVEI=3が50.7%と算出される。また、2024年のレベル2に上がった時点の火山活動情報の内容からは、噴火の可能性が25%となり、噴火したとしても規模の小さいものである確率が高い。

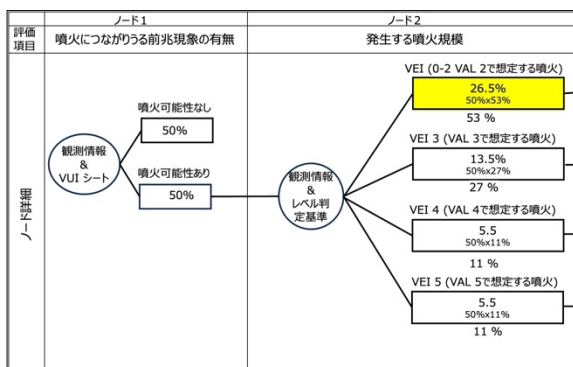


図 66. 今回の提案する手順で作成された2011年1月18日時点の新燃岳の噴火イベントツリー

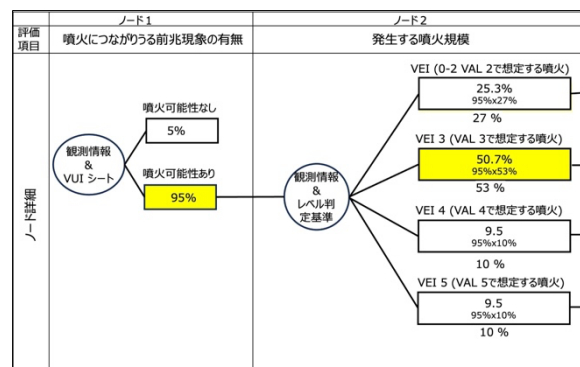


図 67. 2011年1月26日午前時点の新燃岳の噴火イベントツリー

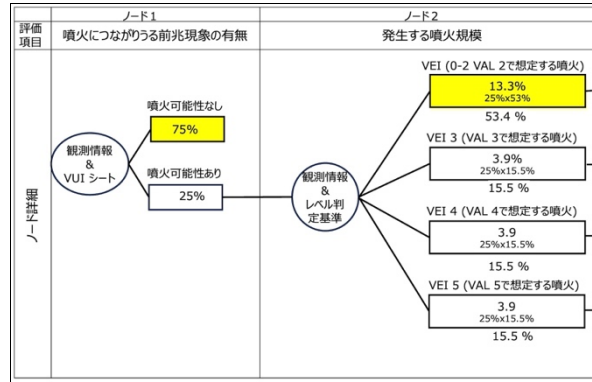


図 68. 2024 年 12 月 12 日時点の新燃岳の噴火イベントツリー

v) まとめ

ここでは火山噴火災害評価手法として USGS 型噴火イベントツリーを新燃岳に導入した。そのまとめと今後の課題を箇条書きにした。

- ・ Volcanic Unrest Index と噴火警戒レベルをノード 1 と 2 で使うことで、準リアルタイムで噴火イベントツリー作成が可能になった。
- ・ 噴火警戒レベル導入火山では監視観測の実績とレベル判断時の大量のデータが蓄積されているので、これらを噴火イベントツリー作成時のデータベースとして活用できる。
- ・ Volcano Unrest Index の閾値や割り振り方、確率値の付し方に課題が残るものの、それらは運用しながら変えていけば良いと思われる。ここでの閾値の割り振り設定がずれたとしても、確率の大小がひっくり返ることはなさそうである。
- ・ 多くの火山において、噴火警戒レベルと噴火規模とは必ずしも整合的ではない。例えば、有珠山は噴火すればレベル 5 に、桜島では噴石が火口から 3 km 以上飛ばばレベル 5 になる。そのため、今回のような規模判断を他火山で適応することはできず、何らかの工夫が必要である。

(c) 結論

最終年度に向け、情報ツールのコンテンツの社会実装の準備を進めた。周知啓発教育用コンテンツでは、防災担当者へのヒアリング調査を継続し、火山災害訓練のニーズを把握しながらコンテンツを整理・拡充した。情報へのアクセス性向上を目的にキーワード付与やページ構成見直しを行い、火山灰対策情報の収集・掲載も進めた。降灰被害予測コンテンツでは、建築物への降灰被害評価やシミュレーション結果を踏まえ、降灰量と建物機能被害の関係を可視化する情報ツールの表示方法を検討した。GIS 上で閲覧可能なコンテンツも開発した。さらに、避難救助支援コンテンツにおいては、御嶽山での登山者参加型避難訓練やシェルター耐衝撃性評価を実施、避難・救助支援コンテンツを高度化した。これらの情報ツールの利活用方策の検討においては、研究成果を JVDN を通じて防災関係者へ分かりやすく提示する方策を検討した。また、データベース活用による噴火災害評価手法の開発にも取り組んだ。の開発にも取り組んだ。

(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、吉岡薫(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、第 20 巻、第 7 号
- 2) 北海道駒ヶ岳火山防災協議会(2021)：北海道駒ヶ岳火山避難基本計画、令和 3 年 6 月、<https://www.town.nanae.hokkaido.jp/hotnews/detail/00007295.html>
- 3) 山梨県(2021)：火山灰堆積時における車両走行等の体験事業、<https://www.pref.yamanashi.jp/kazan/kazanbaitaiken.html>
- 4) 久保智弘、吉本充宏(2024)：工学的利用を目的とした火山灰特性の計測、日本建築学会大会(関東)、構造 I (火山・積灰荷重・温度荷重) No.20032
- 5) Anderson、 R. S. and P. K. Haff: Simulation of eolian saltation、Science、 241 (1988) 820-823.
- 6) Shao Y. and A. Li: Numerical modeling of saltation in the atmospheric surface layer、 Boundary Layer Meteorology、 91 (1999) 199-225.
- 7) Nemoto M. and K. Nishimura: Numerical simulation of snow saltation and suspension in a turbulent boundary layer、 Journal of Geophysical Research、 109、 D18206 (2004) doi:10.1029/2004JD004657.
- 8) Bagnold、 R. A: The physics of blown sand and desert dunes (Mathuen、 London1941) 265pp.
- 9) A. Komatsu and K. Nishimura: Calculation of Snowdrift Distribution over Complex Topography to Improve the Accuracy of Snow Avalanche Warning Systems、 SOLA、 2022、 Vol.18、 71-75. doi:10.2151/sola.2022-012
- 10) 中央防災会議 防災対策実行会議 大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ：大規模噴火時の広域降灰対策について-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

- 11) 荻野和臣、曾根孝行、山本雅史：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、2015
- 12) 荻野和臣、曾根孝行、山本雅史：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、2016
- 13) 曾根孝行：積灰荷重に対する建物の構造安全性の検討、2018 年度日本建築学会大会(東北)、特別調査部門、パネルディスカッション資料、2018.9
- 14) 諏訪仁、野畑有秀、大塚清敏、久保智弘、宮村正光、宮城洋介：降灰荷重による建物屋根の被害確率関数、日本建築学会大会(関東) 学術講演梗概集、2020
- 15) 諏訪仁、野畑有秀、大塚清敏：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、2020
- 16) 社会資本整備審議会 建築分科会 建築物等事故・災害対策部会：建築物の雪害対策について報告書、2014 年 10 月
- 17) 山下哲郎(研究分担者・工学院大学建築学部建築学科)：ライフライン・建築・設備の被災状況及び診療活動の状況 分担研究報告書、平成 23 年度厚生労働科学研究補助金「大規模災害に対応した保健・医療・福祉サービスの構造、設備、管理運営体制等に関する研究(研究代表者・笈淳夫・工学院大学)」、平成 24 年 3 月
- 18) 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、42-2、pp159-169
- 19) 富士山火山防災対策協議会、2023、『富士山火山避難基本計画』、山梨県 HP：<https://www.pref.yamanashi.jp/kazan/hinankeikaku1.html>
静岡県 HP：
<https://www.pref.shizuoka.jp/bosaikinkyu/sonae/kazanfunka/fujisankazan/1053271.html>
- 20) 廣井脩、伊藤和明、西出則武、中村信郎、田鍋敏也、田中淳、宇田川真之、中森広道、関谷直也、辻本篤、2002、2000 年有珠噴火における災害情報の伝達と住民の対応、東京大学社会情報研究所
- 21) 内閣府、2007、災害教訓の継承に関する専門調査会報告書、1990-1995 雲仙普賢岳噴火、内閣府 HP：
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan/volcano_disaster.html
- 22) 東京大学新聞研究所、1992、1991 年雲仙岳噴火調査資料、東京大学新聞研究所
- 23) 廣井脩、伊藤和明、木村拓郎、田中淳、宇田川真之、小林知勝、関谷直也、辻本篤、2002、2000 年三宅島噴火における災害情報の伝達と住民の対応、東京大学社会情報研究所
- 24) 内閣府、「有珠山噴火について(平成 15 年 9 月 19 日)」、内閣府ホームページ、災害情報、<https://www.bousai.go.jp/updates/usuzan/usuzan.html>
- 25) 中川光弘・松本亜希子・宮縁育夫ほか(2024) マグマ噴出量階段図の標準的な作成手法の提案と有珠山での作成例. 火山, 69, 101-114.
https://doi.org/10.18940/kazan.69.3_101

- 26) Potter, S.H., Scott, B.J., Jolly, G.E., Neal, V.E. and Johnston, D.M. (2013) Introducing the Volcanic Unrest Index (VUI): a tool to quantify and communicate the intensity of volcanic unrest. *Bull. Volcanol.*, Vol.77, 77: doi 10.1007/s00445-015-0957-4
- 27) 橋本武志 (2021) 火山の活動不安定評価における熱消磁現象の活用と噴火予測の可能性. *地学雑誌*, 130 巻 6 号, 771-781: doi:10.5026/jgeography.130.771
- 28) Newhall, C.G. and Hoblitt, R.P. (2002) Constructing event trees for volcanic crises. *Bull. Volcanol.* Vol.64, 3-20: doi 10.1007/s004450100173
- 29) Wright, H.M.N., Pallister, J.S., McCausland, W.A., Griswold, J.P., Andreastuti, S., Budianto, A., Primulyana, S., Gunawan, H., 2013 VDAP team, and CVGHM event tree team (2019) Construction of probabilistic event trees for eruption forecasting at Sinabung volcano, Indonesia 2013-2014. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, Vol. 382, 233-252: doi 10.1016/j.jvolgeores.2018.02.003
- 30) Marzocchi W, Sandri L, Gasparini P, Newhall C, Boschi E (2004) Quantifying probabilities of volcanic events: the example of volcanic hazard at Mt Vesuvius. *J Geophys Res* 109: B11201
- 31) 気象庁 (2025a) 霧島山 (新燃岳) の噴火警戒レベル判定基準. https://www.data.jma.go.jp/vois/data/filing/level_kijunn/551_level_kijunn.pdf 2025 年 4 月 8 日確認.
- 32) 気象庁 (2025b) 火山活動解説資料 (霧島山). https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly_vact_doc/monthly_vact_vol.php?id=551 2025 年 4 月 8 日確認.
- 33) 気象庁 (2021) 霧島山 (新燃岳) の噴火警戒レベルー火山災害から身を守るためにー, リーフレット. https://www.data.jma.go.jp/vois/data/filing/level/PDF/level_551.pdf 2025 年 4 月 8 日確認
- 34) 気象庁 (2017) 日本活火山総覧 (第 4 版追補版) Web 掲載版. https://www.data.jma.go.jp/vois/data/filing/souran/menu_jma_hp.html 2025 年 4 月 8 日確認.
- 35) Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T. et al. (2013) The outline of the 2011 eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), Japan. *Earth Planets Space*, 65, 475-488, <https://doi.org/10.5047/eps.2013.03.016>

(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7年度の業務計画案

① 周知啓発教育用コンテンツの社会実装

周知啓発教育用コンテンツの社会実装に向けて、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充実化等を行う。また、社会実装の成果と今後の課題について取りまとめる。

② 降灰被害予測コンテンツの社会実装

これまで実施してきた降灰に関する研究成果をもとに、降灰量と建物や道路等の機能被害との関係をまとめ、情報ツールの利便性に適合するようなデータの提供様式を検討する。また、降灰被害予測コンテンツの拡充・改善・調整等に必要な業務を行うことに加え、社会実装の成果と今後の課題について取りまとめる。

③ 避難・救助支援コンテンツの社会実装

これまで本州3火山での研究から得られた登山者動向に関する成果を、新たな火山の避難・救助支援に適用するため、登山者動向把握実験を、地元自治体と協力して実施する。取得した登山者データは地元自治体や火山防災協議会と共有し、これまでの研究結果とともに整理し、事前防災に役立てる。一方、これまで御嶽山で取得した登山者データを用いた避難シミュレーションを実施し、その解析結果の活用方法を地元自治体や火山防災協議会と検討し、避難・救助支援に関してより効果的な事前防災の展開を行う。

また、今後も避難対策で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研究が重要なことから、これまでの研究成果を基に今後展開可能な実験環境の整備を行う。さらに、社会実装の成果と今後の課題について取りまとめる。

④ 情報ツール利活用方策の検討

これまでに高度化した上記 3 コンテンツを含む情報ツールの社会実装に際し、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。また、噴火災害履歴のデータベースを活用し、迫った噴火災害を評価し分かりやすく発信する方策について研究する。さらに、情報ツールの利活用に関する成果と今後の課題について取りまとめる。

⑤ 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。

3. 会議録

(1) 2024 年度大規模火山噴火総合研究グループ研究集会

日時：2024 年 12 月 16 日（月）～17 日（火）

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）

研究集会「2024 年度大規模火山噴火総合研究グループ研究集会」において、出席者が各自の研究成果を報告するとともに、意見交換を行なった。

参加者：サブテーマ 2 担当者、課題 B および C 担当者

(2) 課題関連会研究集会

日時：2025 年 3 月 15 日（土）～16 日（日）

開催形態：対面

場所：鹿児島大学理工学研究科理学専攻理学部 2 号館

研究集会「火山学はどのように噴火様式・推移の予測を行うか：霧島火山を例として」において、出席者が霧島火山を対象として、各自の関連する研究成果を報告するとともに、意見交換を行なった。

参加者：課題 D サブテーマ代表者・担当者、課題 B および C 担当者

4. むすび

本研究では、火山災害への対応力を高めるため、噴火の状況をリアルタイムで把握し、そのデータをすぐに解析して、将来の活動予測や被害の見積もり、防災対策に役立つ情報の提供までを一体的に行う技術の開発を進めている。

今年度は、課題Dの各サブテーマが、10年目の完成を見据えた計画に沿って着実に研究を進めており、それぞれ順調に成果を上げた。以下に各サブテーマの進捗をまとめる。

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）

岩手山での実証実験により、ドローンを使った垂直写真や熱画像、レーザーによる溶岩流の位置測定が高精度で行えることが確認された。画像処理技術の改良により、3Dモデル作成や災害状況の把握が効率化され、地上写真からのオルソ画像作成により、噴火時の迅速な被害把握や飛行計画の支援にもつながることが確認された。

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）

桜島の噴火観測を通じて、レーダーやディスドロメータ（降水粒子測定装置）を用いた火山灰量の即時把握技術が進展した。また、噴煙データを電子ブック化する準備も進んだ。船舶レーダーによる高時間分解能の観測や、火山灰噴出量の高精度推定技術も開発中であり、火山灰の粒子の集まり方や電気的性質の検討により、観測精度も向上した。今後、自治体が活用できるよう、噴煙の高さや火山灰の厚さを地図上で確認できる機能も開発予定である。

サブテーマ3（火山災害対策のための情報ツールの開発）

最終年度に向けて、開発した情報ツールの実社会への導入を進めた。防災教育に役立つコンテンツを整理・充実させ、誰でも使いやすくするための見直しも行った。降灰による建物被害を視覚的に示す方法の検討や、GIS上で閲覧できるコンテンツの開発を進めた。御嶽山での避難訓練やシェルターの評価を行い、避難支援の機能を強化した。さらに、JVDNを通じた情報発信の検討を行うとともに、データベースを活用した噴火災害評価の手法づくりにも取り組んだ。

そのほかにも、課題内での連携だけでなく、課題Cが中心となって開催した「霧島研究集会」などの課題間連携にも積極的に参加した。また、人材育成コンソーシアムとの連携を意識した研究活動が行われた。

別添 1

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
火山噴火時を想定した無人航空機(UAV)による自動巡回・自動撮影・自動抽出の検討（口頭発表）	佐々木寿・江川香・森貴章・小森惇也・杉下七海・野中秀樹・千葉達朗	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月	国内
D-1 ドローンによる火山災害の把握手法のこれまでの成果と今後の課題（口頭発表）	佐々木寿・森貴章・江川香・千葉達朗	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト令和6年度合同研究集会	2024年12月	国内
霧島山噴火時における上空からの地形計測手法－航空機とUAVの併用－	佐々木 寿	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト，課題間連携研究集会	2025年3月	国内

2．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
なし				

別添 2

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
終端速度から推定された凝集テフラ粒子の密度（口頭）	真木雅之・井口正人	日本火山学会2024年大会	2024年10月	国内
桜島降灰分布データベース（VASH）- 第2版（ポスター）	真木雅之・佐野香那・西隆昭・中道治久・小堀壮彦・梶山稜輔・中村啓彦	日本火山学会2024年大会	2024年10月	国内
船舶レーダによる降下火砕物推定手法（口頭）	小堀壮彦・真木雅之・西隆昭・中道治久・中村啓彦・海賀克彦	日本火山学会2024年大会	2024年10月	国内
地震動と地盤変動を用いた火山灰噴出率評価の課題（口頭）	井口正人・山田大志・中道治久	日本火山学会秋季大会	2024年10月	国内
桜島ブルカノ式噴火の確率的噴火予測における検証と改良（口頭）	石井杏佳・井口正人	令和6年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2025年2月	国内
GNSS搬送波位相直接補正によるマルチパスノイズ低減手法の開発（口頭）	伊藤嘉秋，太田雄策	日本測地学会第142回講演会	2024年10月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
レーダがとらえた桜島噴煙（書籍）	編集：真木雅之・佐野香那・中村啓彦 著者：桜島噴煙観測プラットフォーム研究会	京都大学防災研究所火山防災研究センター	2025年3月	国内
Sakurajima Eruption Clouds Observed by Radar (Book)	Editors: M. Maki, K. Sanao, and H. Nakamura Authors: Study Group on the Observation Platform for Sakurajima Eruption Clouds	Research Center for Volcano Hazards Mitigation, DPRI/Kyoto Univ.	2025年3月	国内
Statistical analysis of the ground deformation of Vulcanian explosions at Sakurajima volcano, Japan	Ishii K., Iguchi M.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2024年11月	国外
水槽を用いた密度流れ場のPIVによる計測の試み	西嶋一欽, 丸山 敬	風工学シンポジウム講演梗概集 No. 28	2024年12月	国内
風洞実験による噴石の熱伝達率を求める試み	丸山 敬	風工学シンポジウム講演梗概集 No. 28	2024年12月	国内
Long-Term Lidar Observations of Volcanic Ash from Sakurajima	Shimizu A., Nakamichi H., Iguchi M.	J. Disaster Res.	印刷中	国外

別添3

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ルールの開発」

機関名： 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)		発表者氏名	発表した場所 (学会名等)	発表した時期	国内・外 の別
市街地の降灰分布に対する建物や地物の影響について	口頭	大塚清敏、諏訪仁、久保智弘、宮城洋介	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月	国内
都市街区の地面や道路への降灰に対する建物影響	口頭	大塚清敏、諏訪仁、久保智弘、宮城洋介	2024年度日本建築学会大会(関東)	2024年8月	国内
降灰対策のポイント	口頭	大塚清敏、諏訪仁、久保智弘、宮城洋介	第2回レジリエンス共創研究会	2024年11月	国内
市町村における火山防災訓練の在り方に関する検討	ポスター	久保智弘、吉本充宏	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月	国内
工学的利用を目的とした火山灰特性の計測	口頭	久保智弘、吉本充宏	日本建築学会大会	2024年8月	国内
RC 造を対象とした人工軽石による耐衝撃補強について	口頭	吉本充宏、久保智弘、立山耕平、山田浩之	日本建築学会大会	2024年8月	国内
御嶽山における登山者動態データの防災利用	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	JpGU2024	2024年5月	国内
御嶽山における避難訓練参加者(登山者)の避難行動モニタリング	ポスター	宮城洋介、田中義朗	日本火山学会2024年秋季大会	2024年10月	国内
アイスランドの噴火と溶岩流対策を中心に	口頭	中田節也	土木学会火山工学小委員会主催「令和6年度 火山工学セミナー」	2025年3月	国内
建築学からみた降灰の影響	口頭	久保智弘	土木学会火山工学小委員会主催「令和6年度 火山工学セミナー」	2025年3月	国内

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
退避施設を対象とした人工軽石を用いた耐噴石補強方法の実験的研究	久保智弘, 吉本充宏, 本多亮, 西澤達治, 立山耕平, 山田浩之	火山, 70, (1), 3-12	2025年3月	国内
Analysis of tire characteristics driving on asphalt paved roads covered with volcanic ash	Junya Yamakawa, Ryosuke Eto, Yasuhiro Ichikado, Mitsuhiro Yoshimoto, Tatsuji Nishizawa, Tomohiro Kubo, Hiroyuki Yamada	Journal of Terramechanics, 117, 101025-101025 doi: 10.1016/j.jterra.2024.101025	2025年2月	国外
遠地津波発生時の津波情報の伝達と避難行動の喚起に関する課題—トンガ海底火山噴火に伴う潮位変化に対する住民対応の質問紙調査—	三宅真太郎・佐藤翔輔・吉本充宏・石峯康浩・秦康範・安本真也・関谷直也	土木学会論文集(海岸工学, 80巻17号)論文ID: 24-17101	2024年11月	国内
2022年1月15日のトンガ海底火山噴火に伴う日本国内の潮位変化に自治体と住民はどうか対応したか,	三宅真太郎・佐藤翔輔・吉本充宏・石峯康浩・秦康範・安本真也・関谷直也	東大院情報学環紀要情報学研究 調査研究編, 41, pp.1-62	2025年3月	国内
火山防災体制の不足点—自治体の火山防災に関する調査に基づいて,	LEE SEUNGMIN・富澤周・吉本充宏・石峯康浩・横田崇・安本真也・関谷直也	東大院情報学環紀要情報学研究 調査研究編, 41, pp.285-374	2025年3月	国内
JVDNシステムを活用した降灰調査—阿蘇火山中岳2021年10月20日噴火の事例—	宮縁育夫, 長井雅史, 中田節也, 小澤拓, 古川竜太, 石塚治, 南裕介, コンウェイ クリス, 伊藤順一	火山, 69 (2), 61-70	2024年6月	国内
The color systematics of volcanic ashfall samples in estimating eruption sequences: a case study of the 2017-2018 eruption at Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Southwest Japan	Taketo Shimano, Yuki Suzuki, Atsushi Yasuda, Fukashi Maeno, Takahiro Miwa, Masashi Nagai, Setsuya Nakada, Michihiko Nakamura	Earth, Planets and Space 76(1), doi: 10.1186/s40623-024-02040-5	2024年7月	国外
Unified Scaling Law for Lengths of Basaltic Lava Flows: Dependence on Erupted Volume and Effusion Rate	Takafumi Maruishi, Tomofumi Kozono, Takahiro Miwa, Eisuke Fujita	Geophysical Research Letters, doi: 10.1029/2024GL113426	2025年4月	国外
火山噴火と防災および観光シンポジウム2023—草津白根山, 御嶽山, 箱根山—: 火山危機におけるコミュニケーションの改善へ向けて	寺田暁彦, 小川康雄, 金幸隆, 萬年一剛, 石坂恒久, 萬代洋信, 石崎泰男, 亀谷伸子, 阪本真由美	火山, 69 (2), 87-98	2024年6月	国内
降下テフラ分布図データベースに基づく降下テフラハザード評価Webブラウザ版GUIアプリの開発とその活用方法	上澤 真平, 竹内 晋吾, 土志田 潔	火山, 69 (3), 155-162	2024年9月	国内