

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 7 年度
成果報告書

令和 8 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7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7年度「課題D：火山災害対策技術の開発」の成果を取りまとめたものです。

グラビア

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

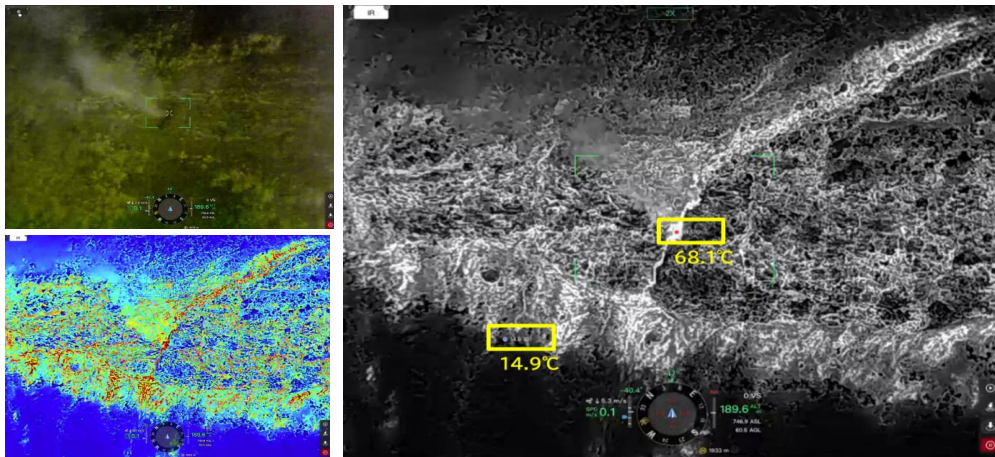


図 1-1 熱赤外カメラによる噴気温度の計測事例。左上：可視画像、左下：熱赤
外画像（Rainbow）、右：熱赤外画像（White Hot）

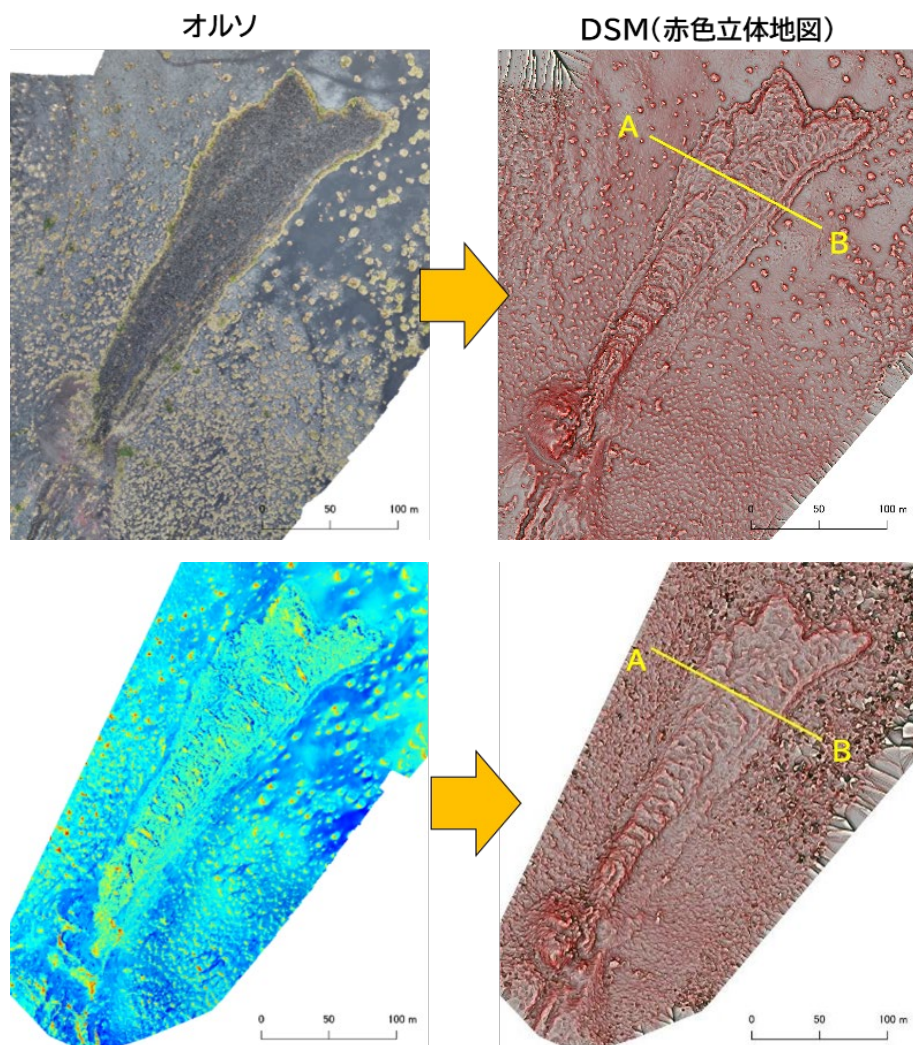


図 1-2 垂直写真からのオルソ画像及び DSM の作成例（上：可視画像、下：熱赤
外画像）

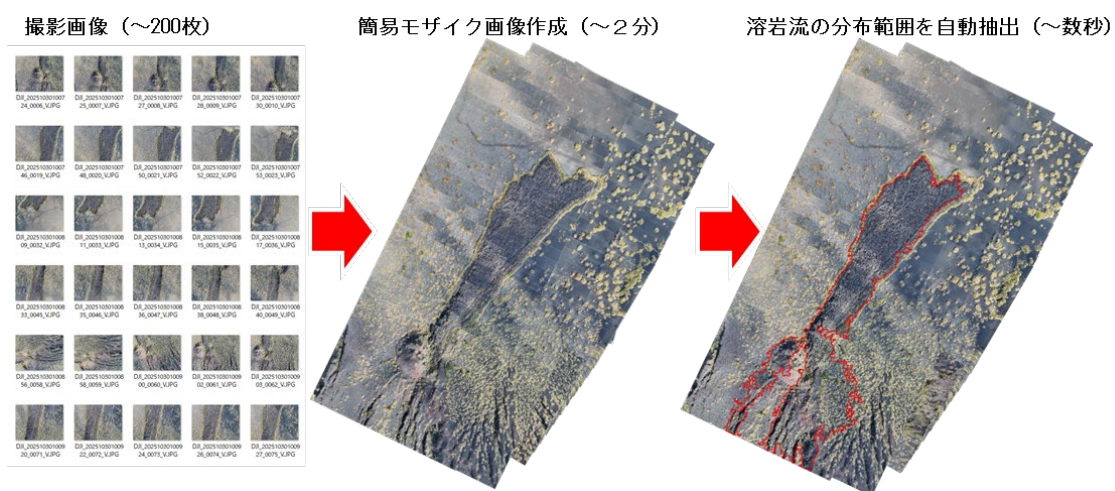


図 1-3 撮影画像から簡易モザイクの作成および溶岩流分布の自動抽出の流れ

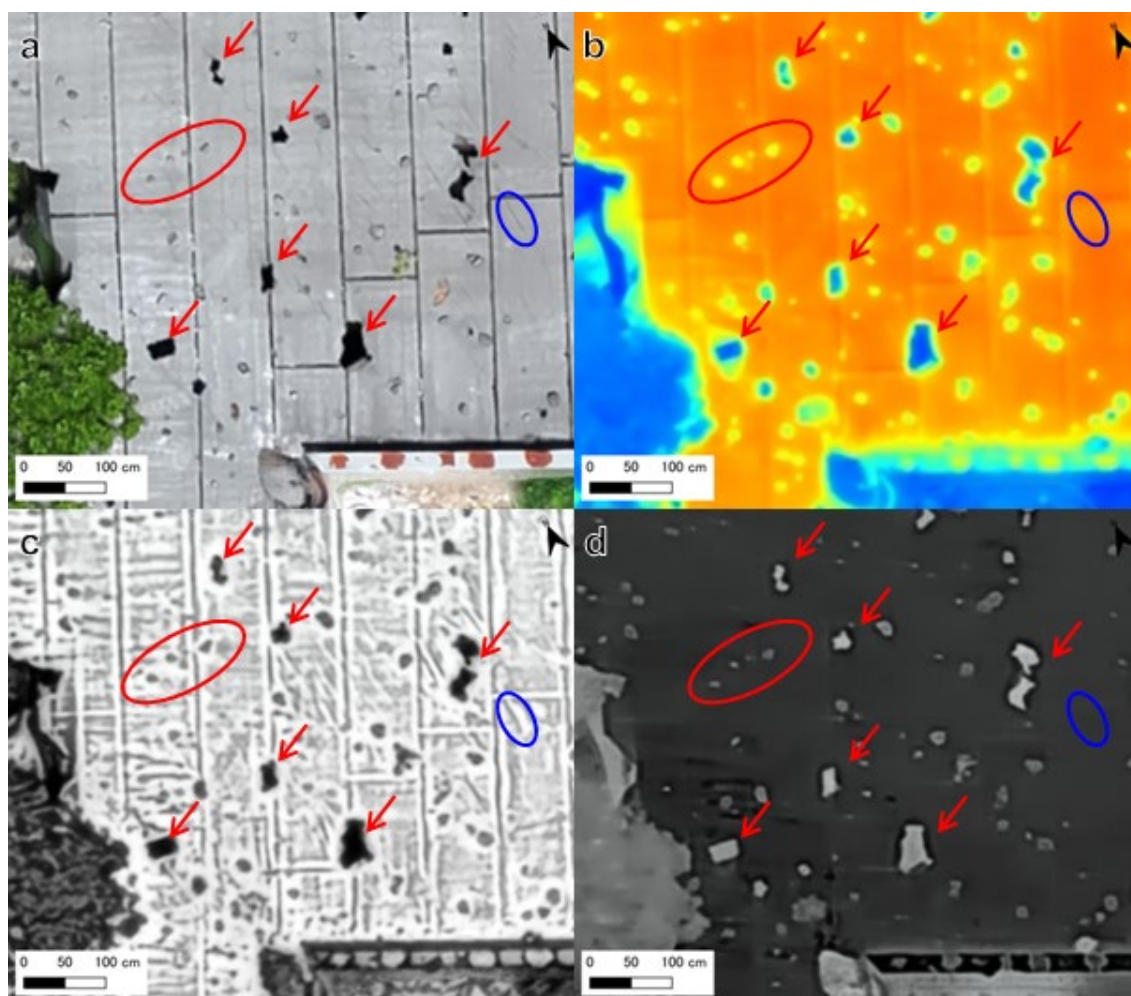


図 1-4 旧とうやこ幼稚園のオルソ画像拡大
 (a : 可視画像、b : 熱赤外画像 (日中 : Rainbow 2)、
 c : 熱赤外画像 (日中 : white hot)、d : 熱赤外画像 (夜間))

サブテーマ2「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」



図 2-5 桜島の噴煙観測に用いられた様々なタイプの気象レーダ。

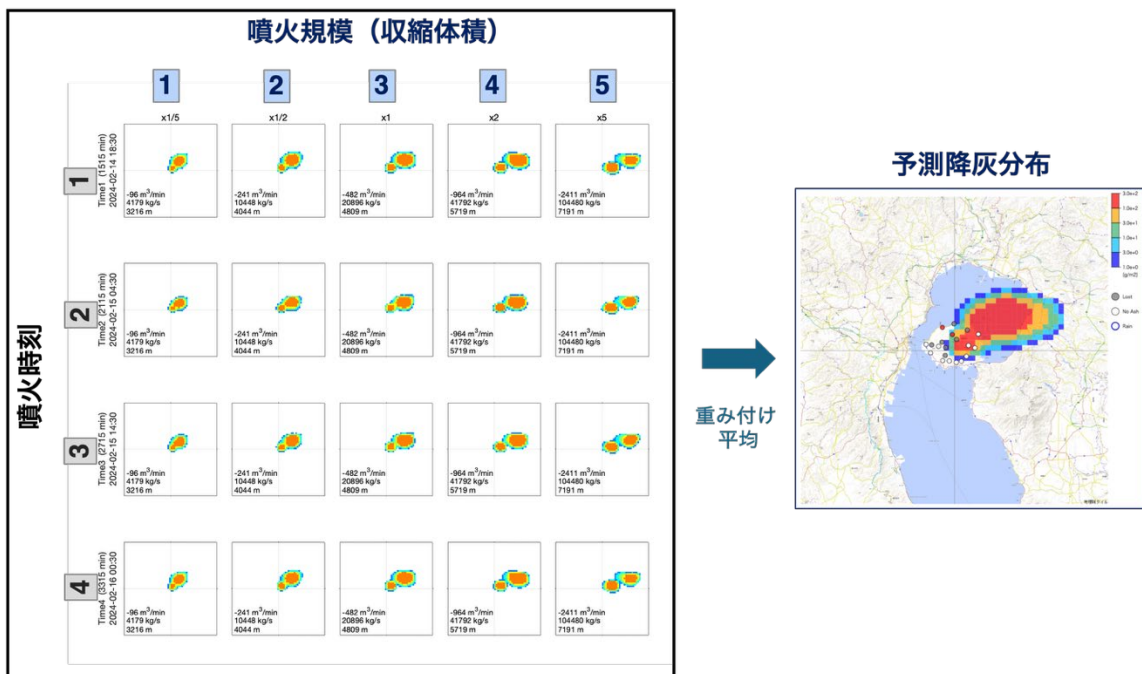


図 2-6 降灰シミュレータの概念図。

30cm深さの雪荷重で設計された建物

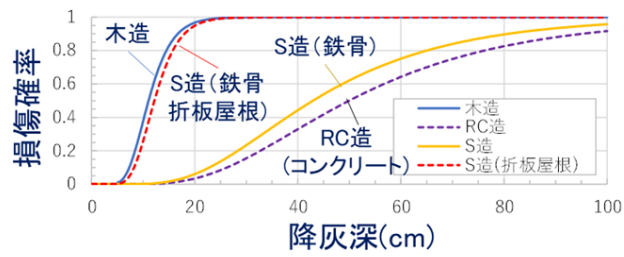


図 3-10 火山灰の堆積厚(降灰深)と建物構造種別による屋根の損傷確率の関係

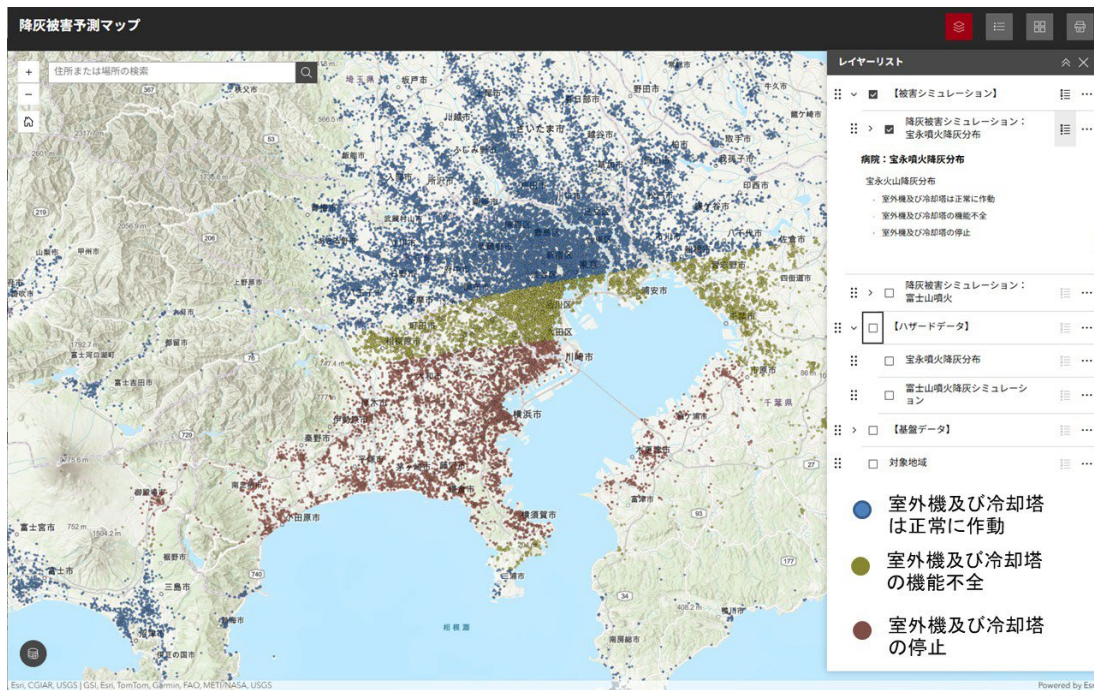


図 3-11 webGIS による病院施設などにおける室外機・冷却塔への影響評価例（富士火山宝永噴火の降灰を想定）

はじめに

本課題Dは「火山災害対策技術の開発」として、3つのサブテーマからなる。すなわち、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」、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」、サブテーマ3「火山災害対策のための情報ツールの開発」である。

サブテーマ1では、噴火時に無人機（ドローン等）や航空機によって遠隔で撮影した可視・赤外画像等を用いて、噴石飛散、溶岩流・火砕流の発生状況などを迅速把握するためのシステム開発を目的としている。これまで災害状況把握を遠隔自動化および時短化するための課題を整理し、遠隔自動化および時短化するための処理方法やツールの改良等を行ってきた。最終年度にあたる令和7年度には、ドローンドックの活用に関する実証実験、データ解析効率化、熱赤外画像を用いた状況把握に関する研究を実施したほか、これまでの研究成果をとりまとめ、火山災害のリアルタイム把握手法の研究を総括した。

サブテーマ2では、火山噴火に対する事前予測と噴火後の迅速な防災対応を目的に、桜島火山を対象に、多項目観測を実施し、火山灰放出量の即時推定や降灰予測の高度化を進めてきた。そこでは、リモートセンシングや地震・地殻変動観測、シミュレーション技術を統合し、連続噴火や広域降灰への対応技術や予測技術の向上を図ってきた。最終年度にあたる令和7年度には、これまでに進めてきた、「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」を引き続き研究し、降灰量予測システムや自治体向けインターフェースの改善を進め、桜島火山に関する実用的な降灰に関する防災情報の提供を目指した。

サブテーマ3では、火山災害時に自治体が迅速かつ適切に対応できるよう、防災情報の共有・活用手法を検討した。降灰影響の把握やリスク評価、避難行動支援、情報伝達手法の改善を進め、実践的な防災対応力の向上を目指した。最終年度にあたる令和7年度には、これまで開発してきた、周知啓発教育、降灰被害予測、避難救助支援の3コンテンツからなる情報ツールの社会実装を目指し、自治体や関係機関などの図上訓練などで実証的に使用するとともに防災関連インフラ事業者との意見交換を実施し、防災対応力向上のための情報ツールの利活用を検討した。

目次

1. 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	1
(a) サブテーマ1	1
(b) サブテーマ2	2
(c) サブテーマ3	3
(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7年度における業務の方法	11
(2) 令和7年度の成果	13
(a) 業務の要約	13
(b) 業務の成果	13
(c) 結論	44
(d) 引用文献	44
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	44
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	44
(3) 事業期間全体の代表的な成果	45
(a) 研究環境の変化の概要	45
(b) 事業期間全体の代表的な成果	46
(c) まとめ	50
2. 2 サブテーマ2	51
(1) 業務の内容	51
(a) 業務題目	51
(b) 担当者	51
(c) 業務の目的	51
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	52
(e) 令和7年度における業務の方法	53
(2) 令和7年度の成果	55
(a) 業務の要約	55

(b) 業務の成果	55
(c) 結論	161
(d) 引用文献	161
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	164
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	164
(3) 事業期間全体の代表的な成果	165
(a) 気象レーダによる噴煙研究の進展	165
(b) 定量的降灰量推定研究の進展	167
(c) 火山灰拡散予測のための連続化シミュレーションのオンラインシステム	168
(d) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発	169
2. 3 サブテーマ3	171
(1) 業務の内容	171
(a) 業務題目	171
(b) 担当者	171
(c) 業務の目的	171
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	172
(e) 令和7年度における業務の方法	175
(2) 令和7年度の成果	176
(a) 業務の要約	176
(b) 業務の成果	178
(c) 結論	236
(d) 引用文献	238
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	241
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	241
(3) 事業期間全体の代表的な成果	242
(a) 周知啓発教育用コンテンツの開発	242
(b) 降灰被害予測コンテンツの開発	244
(c) 避難・救助支援コンテンツの開発	248
(d) 情報ツール利活用方策	249
3. 会議録	252
(1) 10月30日@伊豆大島 D1, D3の研究協力についての打ち合わせ	252
(2) 11月25日オンライン会議：課題Dのサブテーマ間の連携について	252
4. むすび	252

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。

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。

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。

(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 衛星事業推進室長 先端技術研究所室長 社会システムコンサルティング部部長 社会システムコンサルティング部 社会システムコンサルティング部 社会システムコンサルティング部 国土保全技術部	佐々木 寿 千葉 達朗 野中 秀樹 森 貴章 谷口 宙河 西原 雅志 江川 香	【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、ドローンドックの活用、データ解析効率化、熱赤外面像を用いた状況把握に寄与する研究を進めることができた。また、これまでの研究成果をとりまとめ、火山災害のリアルタイム把握手法の研究を総括した。	R7.4.1～ R8.3.31	5,973,692 円	1,378,544 円

西日本国土保全 コンサルタント 技術部	若松 海				
国土保全技術部	藤原 季路				
国土保全技術部	濱田 明知				

(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。	R7. 4. 1～ R8. 3. 31	62, 568, 0 00 円	14, 438, 769 円
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・准教 授	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	メソ気象モデルに基づいて風速 場の再現を行った	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・技術補佐員	佐野香那	レーダデータをデータベース化した。	同上	-	-
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。	R7. 4. 1～ R8. 3. 31	-	-
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	-	-
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・研究員	Alexandros P. Poulidis	メソ気象モデルに基づいて風速場を再現した。	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	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。	R7.4.1-R8.3.31	9,311,736円	2,148,862円
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社会実装を担当し、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・センター長	清水洋	同上	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・調査役	棚田俊收	同上	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	宮村正光	同上	同上	同上	同上

一・客員研究員					
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の社会実装を担当し、都市街区への降灰について、火山灰再飛散、気象条件の影響を考慮した降灰計算を行いその性状を明らかにした。本プロジェクト全期間を通じた成果および今後の課題の整理を行った。	R7. 4. 1- R8. 3. 31	5, 638, 20 9 円	1, 301, 1 25 円
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の社会実装を担当し、積灰の荷重の屋根への影響のまとめ、病院機能被害の特性についてまとめた。本プロジェクト全期間を通じた成果および今後の課題の整理を行った。	同上	同上	同上
株式会社大林組 技術本部 技術研究所	野畑有秀	降灰被害予測コンテンツの社会実装を担当し、成果の取りまとめと今後の課題整理を行った。	同上	同上	同上
山梨県富士山科学研究所・研究管理幹	吉本充宏	<ul style="list-style-type: none"> ● 周知啓発教育用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 周知啓発教育用コンテンツの社会実装のため、市町村を対象とした図上訓練での活用とコンテンツの更新、課題の把握を行った。避難・救助支援コンテンツの社会実装のため、今後展開可能な実験環境の整備を行った。	R7. 4. 1- R8. 3. 31	9, 632, 29 4 円	2, 222, 8 37 円
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	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	同上

山梨県富士山 科学研究所・ 主任研究員	久保智 弘	同上	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	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	同上
東京大学 情報学環 特任教授	田中 淳	<ul style="list-style-type: none"> ● 周知啓発教育用コンテンツの社会実装 ● 情報ツール利活用方策の検討 周知啓発教育用コンテンツの充実と情報ツールの利活用に関して、ライフライン機関との意見交換を行い、利活用の方策を検討するとともに、今後の展開に向けた課題を把握・整理した。	R7. 4. 1- R8. 3. 31	4,900,428 円	1,130,868 円
東京大学 情報学環 教授	関谷直 也	同上	同上	同上	同上
東京大学 情報学環 特任助教	安本真 也	同上	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	←											→
ドローンドックを用いた実証実験	←								→			
データ解析効率化の検討							←					→

熱赤外面像を用いた建物被害の状況把握	←				→							
火山災害のリアルタイム把握手法のとりまとめ						←						→

(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

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

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
アジア航測株式会社	分担機関	衛星事業推進室 室長	佐々木寿
		先端技術研究所 室長	千葉達朗
		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
		社会システムコンサルタント部	西原雅志
		国土保全技術部	江川 香
		西日本国土保全コンサルタント技術部	若松 海
		国土保全技術部	藤原季路
国土保全技術部	濱田明知		

(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・赤外面像等を用いて、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面像から、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。

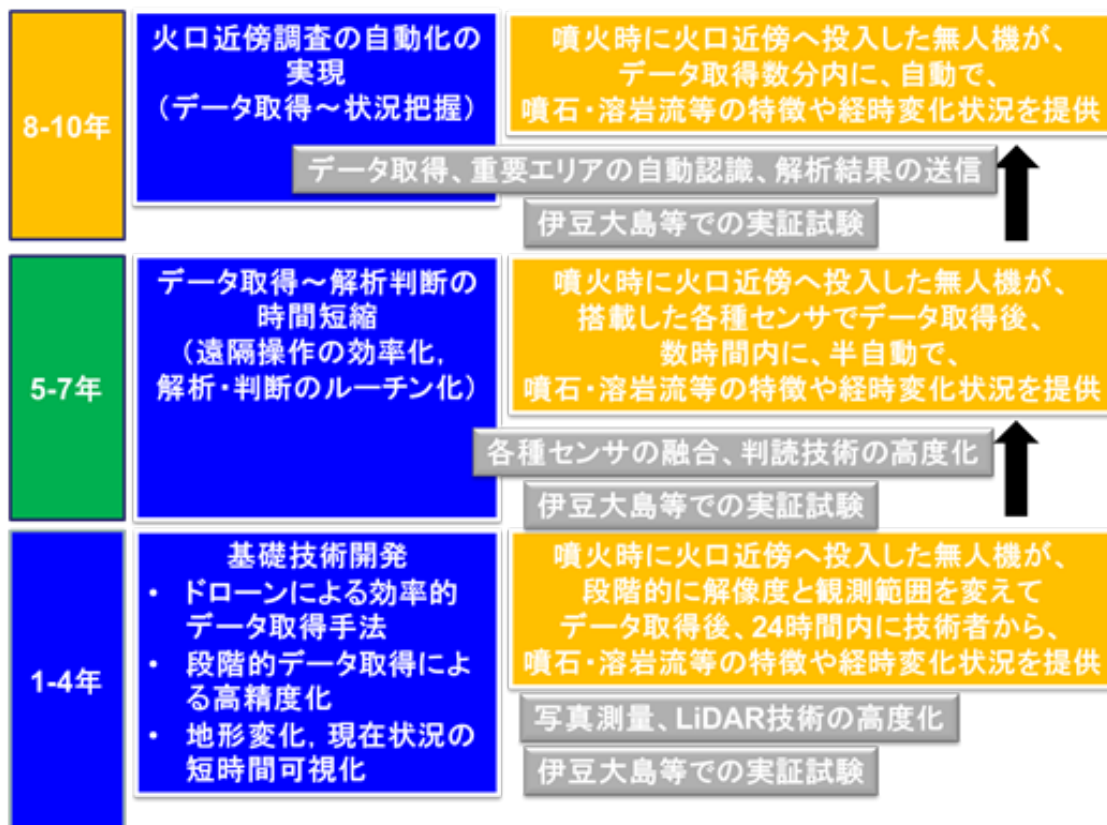


図 12 本業務の全体計画

(d) 10 年間の年次実施計画（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 :

ドローンドックの活用に関する実証実験、データ解析効率化、熱赤外画像を用いた状況把握に関する研究を実施したほか、これまでの研究成果をとりまとめ、火山災害のリアルタイム把握手法の研究を総括した。

(e) 令和 7 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。

2) 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。

3) 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。

4) 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。

5) 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) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

- プロジェクトの総合推進として各サブテーマとの連携を図った。
- 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った。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行った。
- データ解析効率化の検討として、実証実験で得られたデータに対して、これまで開発した簡易モザイク作成用のアプリケーションや溶岩流の自動抽出などの手法を適用し、社会実装の可能性の最終確認等を行った。
- 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面像を撮影し、熱赤外面像を用いた建物被害の状況把握を研究した。
- 火山災害のリアルタイム把握手法として、ドローン、航空機、人工衛星による状況把握の違いや使い分けなどについてとりまとめた。

(b) 業務の成果

1) プロジェクトの総合推進

a) サブテーマ2との連携

3D地形モデル作成前に取得画像の状態を確認するための補助アプリケーションを改良し、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

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が重要となる。建物の被害状況を調査するため、可視画像だけでなく熱赤外面像を用いた調査手法を検討した。

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、単写真を合成した簡易モザイク画像を数分以内に高速作成し、その画像と画像処理を組み合わせることで溶岩流境界の迅速抽出（数分以内）を試みる研究を行った。その抽出結果を地図上に重ね合わせることが可能な形式で出力することで、同一課題内での連携を推進した。

2) ドローンドックを用いた実証実験

伊豆大島においてドローンドック（ドローンポート）を用いた実証実験を行った。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・夜間で行い、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を行った。

a) 実施背景

火山噴火時に適切な防災判断を行うためには、火口位置や周辺状況、溶岩流などの噴出物の分布状況を迅速かつ継続的に把握することが重要である。ドローンの観測においては火口近傍から飛行を行う必要があるが、噴火警戒レベルが引き上げられると火口周辺への立ち入りが規制されるため、観測の継続性や安全性に課題が生じる。また離島火山では、噴火時に現地に迅速にアクセスし観測を行うことが特に困難となる。これらの課題に対して、ドローンドックを活用し、立入規制範囲内からの自動離発着によるリアルタイムでの映像取得・監視方法について検討した。

b) 実証実験の使用機材及び飛行ルート

伊豆大島において事前設置したドローンドックを用い、立入規制区域外からの自動離発着と遠隔操縦を組み合わせる映像取得と監視を実現する運用方法について検討した。

機材はDJI Dock 3（ドローンドック）、およびMatrice 4TD（機体）を使用した（図2、表1）。ドローンドックは総重量55kgで、緊急時にも人力（成人2人程度）で運搬可能である。機体には可視カメラ、サーマルカメラおよびレーザ測距機能が搭載されている。LTE通信による飛行に対応しており、カルデラ内など通信が地形的に遮蔽される場所でも飛行が可能である。また、耐風性能12m/s、IP55の防水・防塵性能を持ち、通常程度の雨であれば飛行可能である。ミッションを終えてドックに格納された機体は、約30分で充電が完了し、再び遠隔で飛行可能な状態となる。



図13 使用機材（左：DJI Dock 3（ドローンドック）、右：DJI Matrice 4TD（機体））

表1 使用機材のスペック

名称	DJI Dock 3 (ドローン Dock)	DJI Matrice 4TD (機体)
寸法 (長さ×幅×高さ)	ドックカバーを開いた状態： 1760×745×485 mm ドックカバーを閉じた状態： 640×745×770 mm	377.7×416.2×212.5 mm (プロペラなし)
重量	55 kg (機体を除く)	1850 g
耐風	12 m/s (着陸時)	運用時：12 m/s 離着陸時：12 m/s
入力電圧	100～240 V (AC)、50/60 Hz	—
入力電力	最大 800 W	—
保護等級	IP56	IP55
最大飛行時間	—	54 分
充電性能※	27 分	—
カメラ	—	広角、中望遠：1/1.3 インチ CMOS、有効画素数：48 MP 望遠：1/1.5 インチ CMOS、有効画素数：48 MP
赤外線サーマルカメラ	—	解像度：640 × 512 赤外線波長：8～14 μm 温度測定範囲：-40℃～150℃ (高利得モード) / 0℃～500℃ (低利得モード)
レーザ距離測定	—	通常の入射角範囲：1800 m (1 Hz) @20% 反射率ターゲット 斜入射範囲 (斜距離 1：5)：600 m (1 Hz) 距離測定精度：1～3 m：システムエラー <0.3 m、ランダムエラー <0.1 m @1σ

※25℃の環境下で、電源を切った状態の機体をバッテリー残量 15%から 95%まで充電した時の測定値。

実証実験は、2025年8月21日に事前検証を、2025年10月29日～30日に本試験を実施した。飛行ルートを図3に示す。

噴火時を想定し、噴火警戒レベル3-2の規制範囲内である御神火茶屋および、山麓の伊豆大島ミュージアム-ジオノス-(以下、ジオノス)にドローンドックを設置した。操縦は立入規制範囲外のジオノスから遠隔で行い、①ジオノス-三原山山頂火口間、②ジオノス-御神火茶屋展望台-三原山山頂火口間を飛行する計画とした。

事前検証では、御神火茶屋展望台-ジオノス間、御神火茶屋展望台-三原山山頂火口間で飛行を行い、LTE電波の通信状況および飛行条件等を確認した。本試験では、強風の影響で予定していたルートのうちジオノス-御神火茶屋間の飛行が困難となった。そこで、飛行ルートを変更し、御神火茶屋のドローンドックに事前に機体を格納し、ジオノスからの遠隔操縦により、三原山山頂火口周辺までの飛行を実施した。

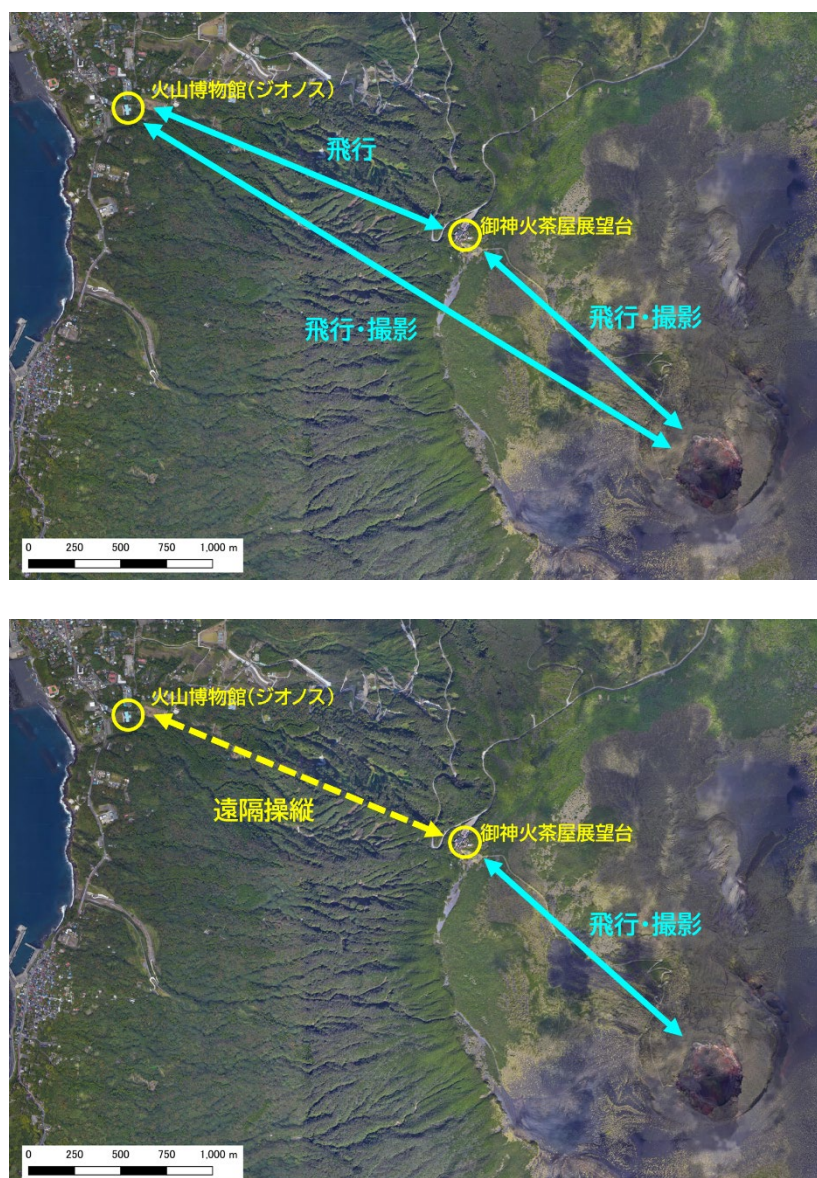


図14 飛行ルート（上：計画、下：実施内容）

c) 火口位置等のリアルタイム計測

火口位置等の即時取得を目的として、ドローンに搭載されたレーザ測距機能を用い、噴気の位置座標や火口底の深さ計測を検証した。計測例を図4に示す。右図はレーザ距離計で取得した座標をGIS上にプロットした結果となる。Matrice 4TDのレーザ距離計の計測可能距離は約1.8kmであり、対象物との距離にも依存するが、測定時のずれは数m程度以内に収まることが確認された。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、誤差による支障は小さく、十分な精度であると考えられる。また、操縦アプリケーション(DJI FlightHub 2)上には飛行中のカメラ画角が表示されており、これによっても対象物の大まかな位置を確認することができる。

また、噴気箇所の最高温度について熱赤外カメラによる遠隔測定を行った。図5に示す通り、画角内の最高温度と最低温度が数値で示されることから、夜間でも噴気の場所や温度を確認することが可能である。



図15 レーザ測距による噴気位置の計測事例

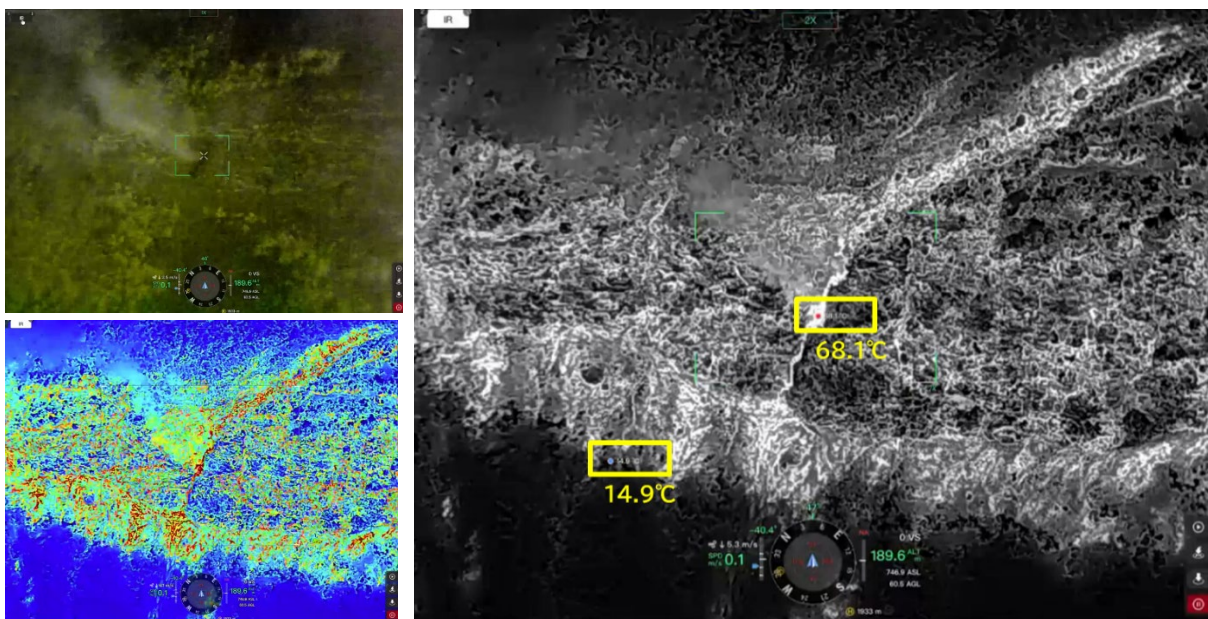


図16 熱赤外カメラによる噴気温度の計測事例(左上:可視画像、左下:熱赤外面像(Rainbow)、右:熱赤外面像(White Hot))

d) ドローン飛行時の映像のリアルタイム共有

ドローンドックの遠隔操縦画面は、Web 会議システムでの画面共有が可能である。これを活用し、火山学者によるリアルタイムでの飛行指示・情報共有を行った（図 6 左）。また、2025 年 10 月 30 日（木）に地元関係者限定の公開イベントを実施し、伊豆大島ジオパーク関係者や気象庁職員への飛行実演を行った（図 6 右、表 2）。前述のレーザ測距機能や熱赤外面像による温度測定と組み合わせることで、噴火時にも火口位置や溶岩流などの到達範囲についてリアルタイムで情報共有することが可能となる。



図 17 ドローン飛行時の映像のリアルタイム共有状況（左：火山学者の指示による遠隔操縦、右：公開イベントにおけるジオパーク関係者・気象庁職員への情報共有）

表 2 公開イベントの実施概要

日時	2025 年 10 月 30 日（木）18:30～20:00
場所	伊豆大島ミュージアム -ジオノス-（ジオノスラボ）
概要	火山噴火時を想定し、ジオノスの建物裏からドローンを遠隔操縦して三原山火口まで飛行させ、カルデラ内の様子を撮影します。
プログラム	<p>第 1 部 <実証実験の紹介・実演></p> <ul style="list-style-type: none"> • 実証実験の概要説明 • ドローンドックからの飛行実演 • ドローンで撮影した動画の上映 • 質疑応答・意見交換 <p>第 2 部 <講演会></p> <p>ドローンを用いた伊豆大島の調査報告 （千葉 達朗：アジア航測株式会社）</p> <p>アイスランドにおけるドローンの活用事例の紹介 （中田 節也：防災科学技術研究所）</p>

e) 3次元地形モデルの作成

火口やカルデラ内の溶岩流を対象として自律飛行による垂直写真撮影を実施し、SfM (Structure from Motion) を用いて3次元モデルを作成した。撮影写真は可視画像・熱赤外画像 (Rainbow、White Hot) を同時撮影するものとし、特徴点の少ない熱赤外画像にあわせてサイドラップ 90%、オーバーラップ 90%でコース設定した。作成例を図7に、図中のA-B間の断面図を図8に示す。処理にかかる時間は約1時間以内となり、時間はかかるものの、可視画像と熱赤外画像で地形の凹凸の傾向が一致していることから、夜間でも熱赤外画像から3次元モデルを作成し、大まかな地形を把握することが可能であると考えられる。

なお、垂直撮影で取得した画像の自動処理や自動抽出について試行した結果の詳細については、3) において報告する。

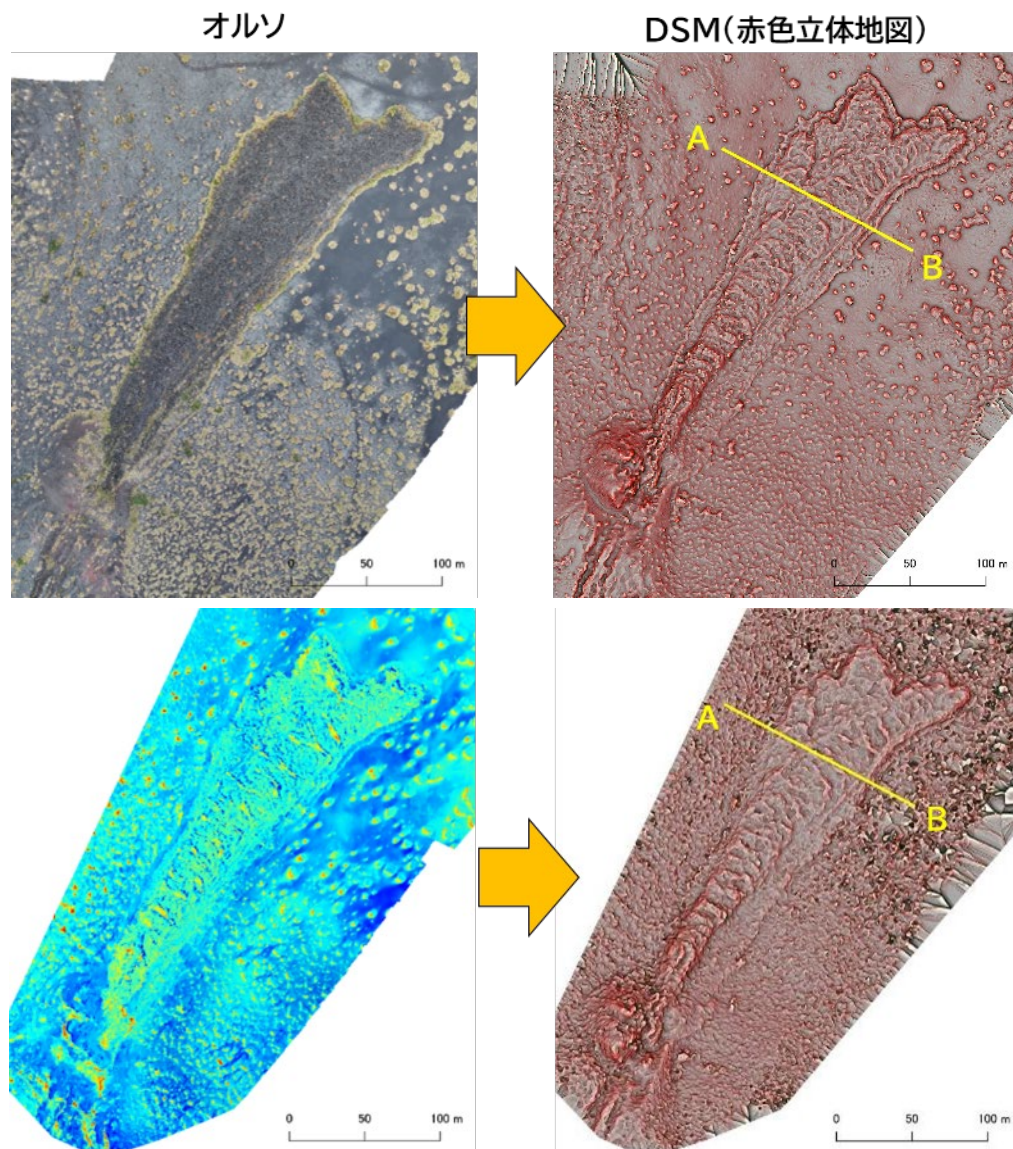


図18 垂直写真からのオルソ画像及びDSMの作成例

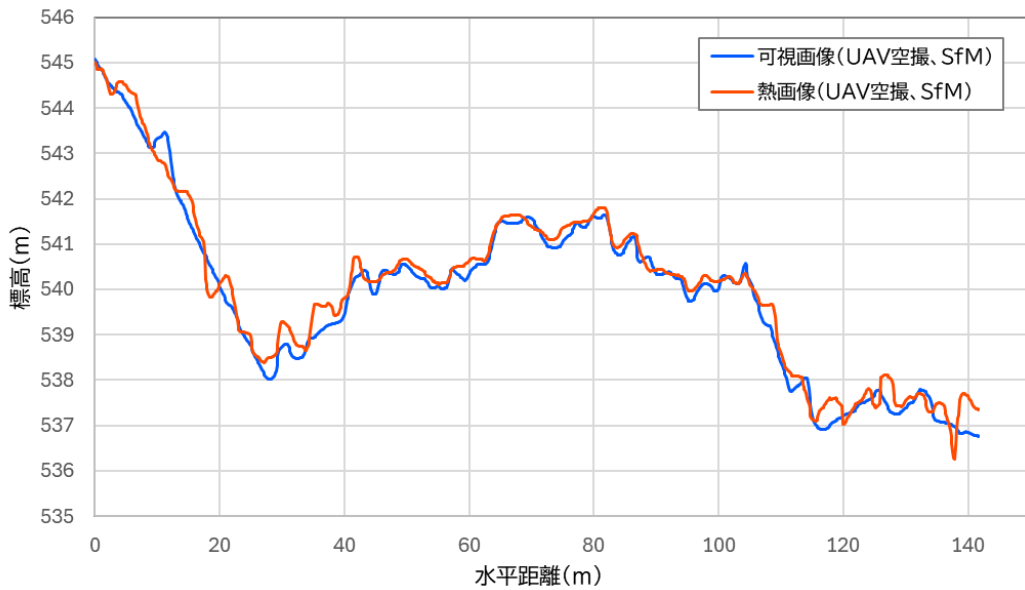


図 19 断面図 (図 7 の A-B 間)

f) 今後の課題

i) 気象条件 (風) の影響

当初計画ではジオノスと御神火茶屋展望台の 2 箇所にドローンドックを設置し、御神火茶屋を中継して火口やカルデラ内の調査を行う予定としていたが、強風に伴い山麓から御神火茶屋までの飛行は実施困難となった。強風下ではドローンドックからの離発着に時間を要し、バッテリー切れによる不時着 (ドローンドック外への着陸) のおそれがあるほか、飛行時のバッテリー消費増大により飛行距離が短くなる場合がある。

参考として、2020~2025 年のアメダス観測点「大島」の気象データ (日別値: 日平均風速、降水量日合計) を表 3 に集計した。DJI Dock 3 のカタログスペックは耐風速 12m/s であるため、安全側を見て、風速 10m/s 以上を不適 (飛行不可能) とし、一般的な UAV の飛行条件である風速 5m/s を注意 (注意すれば可能)、それ以下を適 (飛行可能) として整理した。結果として、飛行可能な気象条件は年間の 61% であり、強風または降雨のため、約 4 割は飛行不可となる可能性が示唆された。山頂付近はより気象条件が悪いことが想定されるため、飛行可能日がさらに限定される可能性がある。

表 3 解析結果 (気象条件別)

気象条件	飛行条件	日数	%
風速 5m/s 未満	適 (飛行可能)	814	37
風速 5~10m/s	注意 (注意すれば可能)	521	24
風速 10m/s 以上	不適 (飛行不可能)	30	1
降水あり	不適 (飛行不可能)	827	38
合計		2192	100

ii) ドローンドックの実運用に向けた課題

ドローンドックの長期運用には電源の確保、定期的なメンテナンスの体制構築が必要となる。本検証では一時的な設置としてバッテリー電源を使用し、夜間には機材を回収したが、平常時からの設置を想定する場合は、商用電源を確保したうえで盗難防止対策を講じることが望ましい。

また、伊豆大島のように火口位置が事前に特定できない火山では、噴火前にドローンドックの設置箇所を選定できないことが課題となる。このような場合には、近年登場している車載型のドローンドック（図 9）を活用することで、火山活動状況に応じて設置箇所を移動する手法が考えられる。



提供：JDRONE 株式会社

図 20 車載型ドローンドックの例

g) まとめ

本検証から、ドローンドックを活用することで、立入規制下においても安全かつ継続的な火山監視が可能であることが確認された。操縦者が危険区域に立ち入る必要がなく、緊急時に迅速な飛行とリアルタイムでの映像取得が実施できる点は、防災・火山観測において大きな利点となる。本試験では天候影響によりルート変更を行ったが、事前検証では御神火茶屋ージオノス、御神火茶屋ー火口のテストフライトを実現していることから、天候条件が良好であれば山麓（ジオノス）から山頂までの一連の飛行についても実現可能と考えられる。

一方で、ドローンによる観測は気象条件による制約が大きいことから、各火山において平常時から事前検証を行っておくとともに、状況に応じて航空機・衛星などの他のリモートセンシング技術と併用することが重要と考えられる。

3) 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った。

a) 概要

2024年度は、3D地形モデル作成に先立ち、取得画像の状態を事前に確認するための補助アプリケーションを試作した。これによりデータ取得作業の効率化を図った。また溶岩流が黒色として写る領域を画像から自動抽出し、その抽出結果に基づいて境界部を算出することで、状況の自動認識を高度化する手法について検討を行った。

2025年度は、これまでに開発したアプリケーションおよび溶岩流境界部自動抽出手法を実データに適用し、有効性や課題の整理を行うとともに、社会実装の可能性について最終的な検証を行った。

b) 補助アプリケーションおよび自動抽出手法の概要

i) 補助アプリケーション

ドローンによって取得した大量の撮影画像から SfM を用いて三次元地形モデルやオルソ画像を作成する場合、計算処理に時間を要するため、データ取得直後に撮影状況を把握することが困難であるという課題がある。

この課題に対し、本研究では SfM 処理を行うことなく、撮影画像（中心投影画像）を短時間で連結し、撮影範囲や撮影状況を俯瞰的に確認可能な簡易モザイク画像を生成する補助アプリケーションを作成した。本アプリケーションは、各画像に付与された GNSS 情報を用いてドローンの進行方向を推定し、撮影位置および進行方向に基づいて画像を配置するものである（図 10）。

連続する画像間の位置関係から撮影コースを判別し、画像を進行方向に合わせて回転させたうえで、撮影高度およびカメラ諸元から算出した地上画素寸法（GSD）を用いて簡易的な位置情報を付与することにより、地理的整合性を有する簡易モザイク画像を生成する（図 11）。

本アプリケーションは可視画像に加えて熱赤外画像にも適用可能であり、後続の溶岩流境界部自動抽出処理や三次元モデル作成に先立ち、データ取得の成否や取得範囲の妥当性を迅速に確認する手段として、データ取得作業の効率化に寄与する。

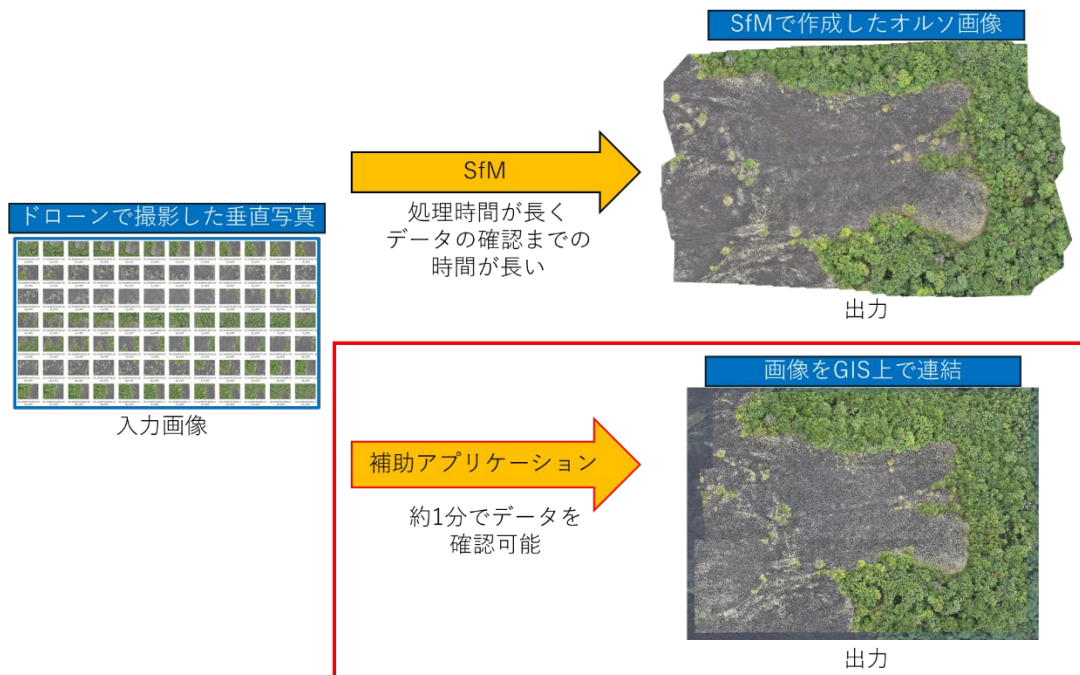


図 21 SfM と補助アプリケーションによる画像出力の模式図

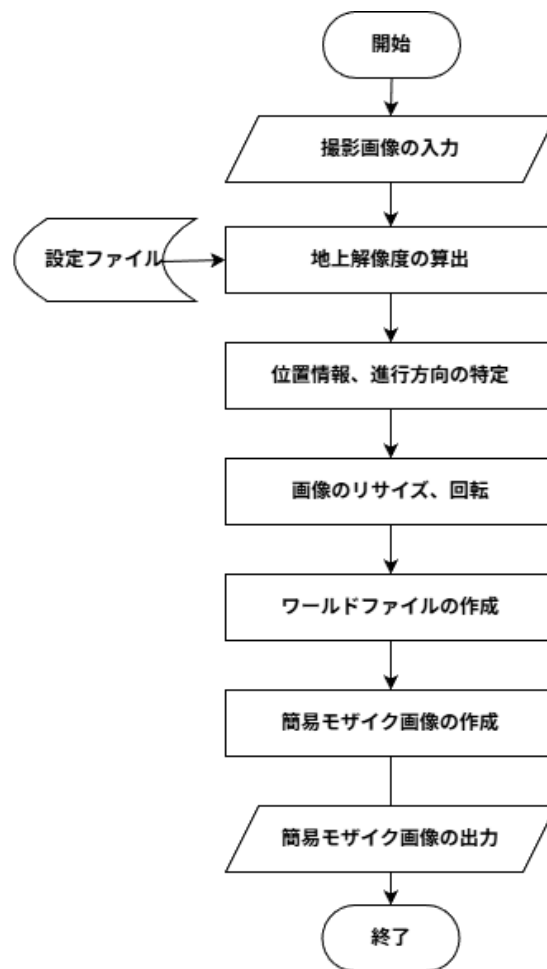


図 22 補助アプリケーションの処理フロー

ii) 熱赤外面像における補助アプリケーションの適用

使用したドローンの熱赤外カメラが記録するファイル形式は R-JPEG となっており、ファイル内に通常の JPEG 画像データに加え、放射輝度データも格納されている。しかし、撮影画像 (R-JPEG) では温度スケールが画像 1 枚ごとに自動で決定されているため、補助アプリケーションで簡易モザイク画像を生成する際に、場所によって色の基準がずれるだけでなく、温度差が色に反映されにくいという課題があった。そのため、全撮影画像のデータから全体の最高・最低温度を特定し、その範囲でカラーマッピングを固定したうえで、簡易モザイク画像を生成した。生成された簡易モザイク画像を図 12 に示す。全撮影画像のうち、最低温度は 2.5°C、最高温度は 33.0°Cであったため、図 12 右上の White hot の場合は 2.5°Cを黒 (r=0、g=0、b=0)、33.0°Cを白 (r=255、g=255、b=255)に固定した。図 12 右下の Rainbow の場合は 2.5°Cを青 (r=0、g=0、b=255)、33.0°Cを赤 (r=255、g=0、b=0)に固定した。これにより、全域で統一された温度スケールに基づき、温度差が明瞭に視覚化された熱赤外簡易モザイク画像を生成することを可能とした。

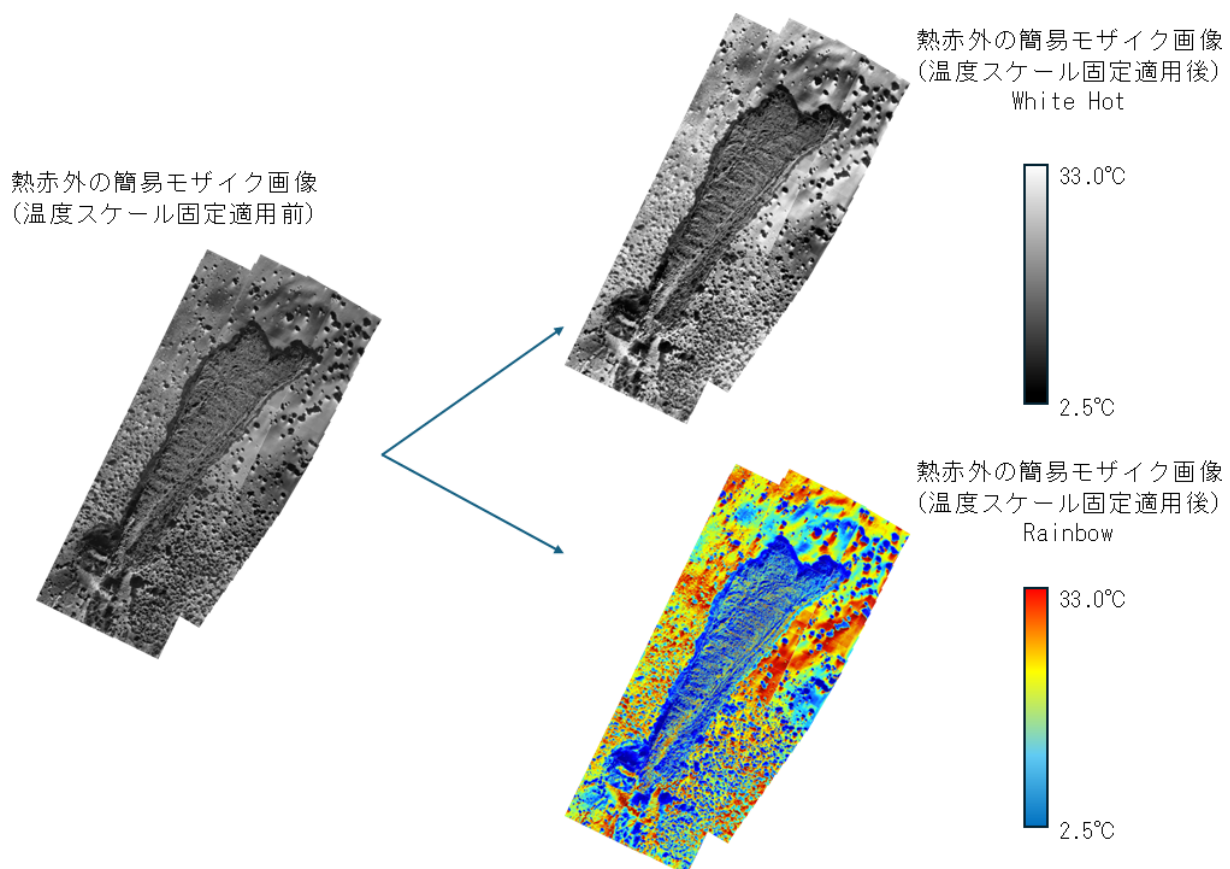


図 23 熱赤外簡易モザイク画像の作成例

iii) 溶岩流境界部自動抽出手法

補助アプリケーションにより作成した簡易モザイク画像、またはオルソ画像を対象として、溶岩流の分布範囲を自動的に抽出する手法について整理した。溶岩流は可視画像上において周辺地表と比較して黒色として写る特性を有することから、本手法ではこの色特性に着目した画像処理を採用している。

具体的には、OpenCV を用いて対象画像に対するマスク処理を行い、RGB 値の類似度に基づいて黒く写る領域を抽出する。得られたマスク画像に対して輪郭抽出処理を施すことで、溶岩流に該当する領域の境界部を算出する（図 13）。

しかし、色情報のみに基づく抽出では、溶岩流周辺に分布する砂地や陰影部など、溶岩流以外の暗色領域が同時に抽出される場合がある。このため、マスク処理後の画像に対してモフォロジー処理（膨張・収縮処理）を適用し、微小なノイズ領域や過剰抽出部分の除去を行うことで、溶岩流領域を強調する手法としている。さらに、抽出された領域の輪郭を Shapefile や KMZ 形式に変換することで、溶岩流の分布範囲および境界線を空間情報として取得することが可能である。これら一連の処理により、溶岩流の分布状況を比較的高い精度で把握でき、現場の状況認識に資する手法となっている。溶岩流境界部自動抽出の処理フローを図 14 に示す。

また、昨年度手法では一部の処理において計算コストが課題となっていたが、画像処理手順および実装方法の見直しにより処理の効率化を図った。その結果、溶岩流分布範囲の自動抽出処理をより短時間で実行可能となり、現場における迅速な状況把握への適用性が向上した。

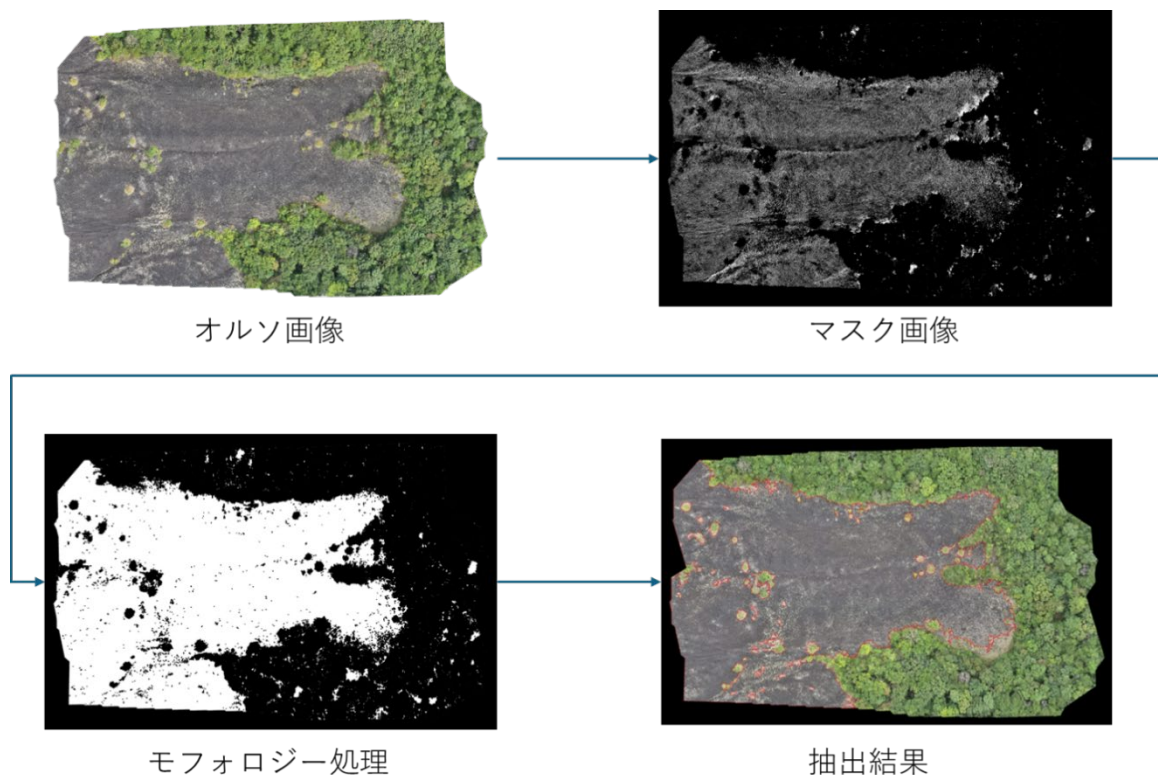


図 24 溶岩流境界部自動抽出の処理過程

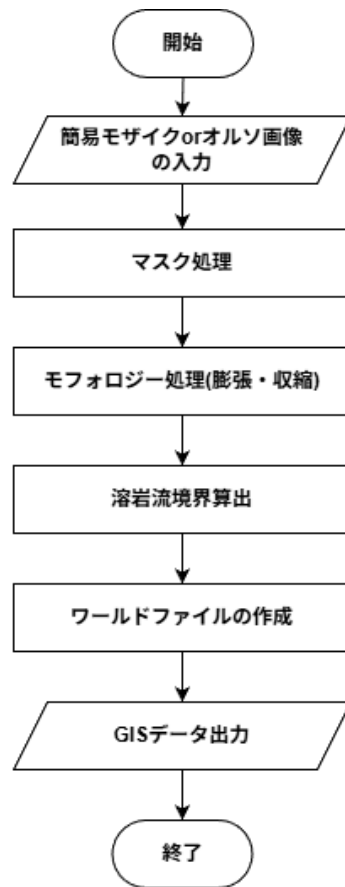


図 25 溶岩流境界部自動抽出の処理フロー

c) 実データ適用による検証結果

本手法の有効性を確認するため、伊豆大島において撮影した実データを対象として、撮影画像の取得から簡易モザイク画像の作成、ならびに溶岩流分布範囲の自動抽出までの一連の処理を通して適用し、現地において結果の確認を行った。取得した撮影画像に対して補助アプリケーションを適用することで、SfM 処理を行うことなく、短時間で簡易モザイク画像を生成することができ、撮影範囲や画像取得状況を現場にて俯瞰的に把握することが可能であった（図 15）。これにより、データ取得の成否や撮影範囲の妥当性について、現地作業の段階で確認できることが示された。

また、生成した簡易モザイク画像を入力として溶岩流分布範囲の自動抽出処理を適用した結果、溶岩流が分布する領域を概ね抽出でき、溶岩流のおおよその境界位置を把握できることを確認した。特に、現場における目視確認と整合的な結果が得られ、迅速な状況認識に有効であることが示唆された。

以上より、伊豆大島で取得した実データを用いた現場適用を通じて、本手法がデータ取得直後の状況把握や後続解析の判断支援に有効な手段となり得ることが確認された。

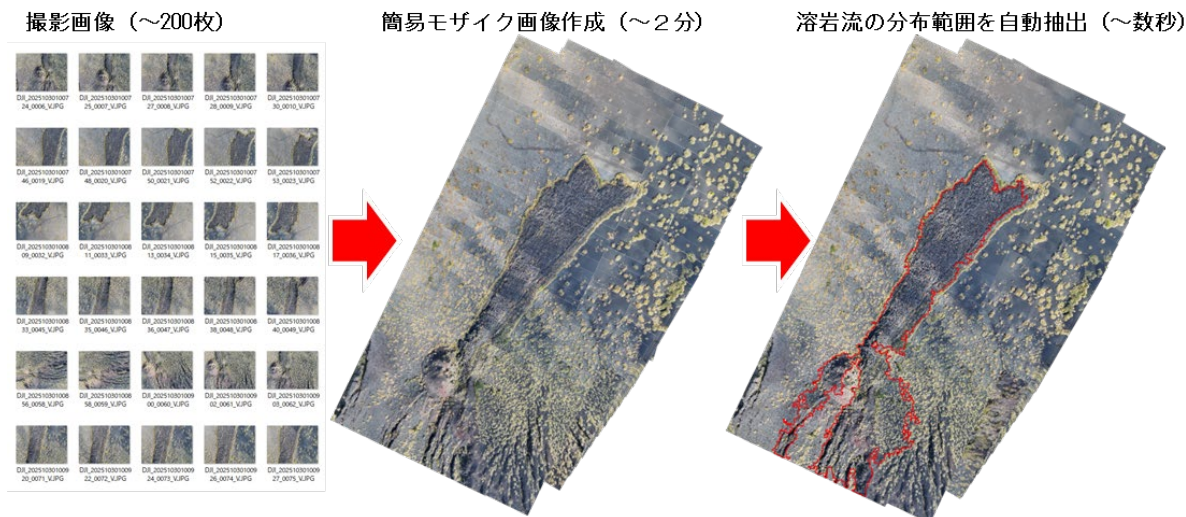


図 26 現場適用における処理結果（可視画像の例）

図 15 中央に示した簡易モザイク画像には、画像の左上から右下にかけて、筋模様が見られるが、これは撮影時の雲の影が映っているためである。そこで雲の影の影響が少ないと考えられる熱赤外面像の簡易モザイク画像（図 12）を用いて自動抽出を試みた（図 16）。White hot と Rainbow のどちらの画像でも抽出が出来ているが、White hot の方が溶岩流に該当する濃配色部分のみを抽出できていて、抽出精度が高い。

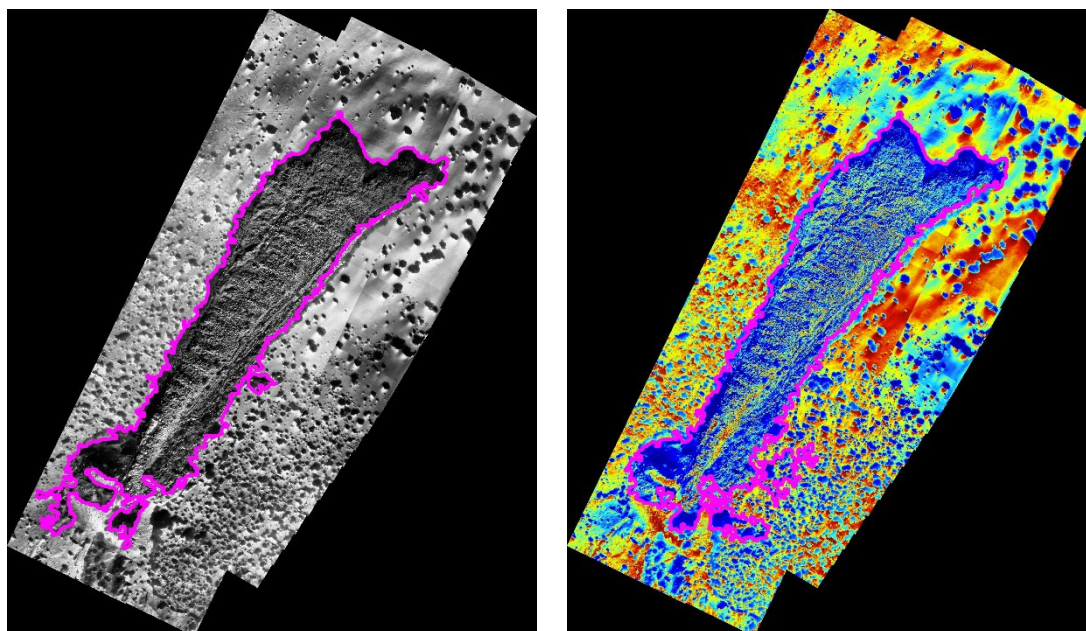


図 27 現場適用における処理結果（熱赤外面像の例）

左：White hot 右：Rainbow

d) 社会実装に向けた課題と今後の展望

本手法は、噴火後の溶岩流分布状況を迅速に把握することを目的とした火山防災分野への適用を想定しており、地方自治体職員や研究機関、現地調査担当者による初動対応や現地調査支援での活用が期待される。特に、ドローンで取得した撮影画像から簡易モザイク画像を作成し、溶岩流の分布範囲を自動的に抽出できる点は、現場における迅速な状況認識に有効であると考えられる。

一方で、社会実装に向けてはいくつかの課題が挙げられる。まず、本手法は溶岩流が可視画像上で黒色として写る特性に基づくものであるため、撮影条件や地表の状態、照度条件などによって抽出結果が変化する可能性がある。現時点では、さまざまな条件下の溶岩流データに対して十分な検証を行っているわけではなく、適用条件の整理が今後の課題である。また、抽出精度を確保するためには、マスク処理やモフォロジー処理に用いる各種パラメータの調整が必要となる場合があり、運用面での工夫が求められる。解決策の一つとして図 16 に示した熱赤外画像の利用も考えられる。

今後は、異なる撮影条件や地表環境における適用事例を蓄積し、抽出精度の向上と処理の安定化を図ることで、実用性の向上が期待される。あわせて、パラメータ設定の簡略化や処理の自動化を進めることで、専門的な知識を有しない利用者であっても扱いやすいシステムとすることが望まれる。これらの課題に対応することで、本手法は噴火後の溶岩流確認や現地調査の意思決定を支援する技術として、防災対応への活用可能性を有しており、社会実装に向けた有効な手法であることを示した。

4) 熱赤外面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面像を撮影し、噴火時の建物被害状況の把握手法等を研究した。

a) 概要

令和 4 年度に実施した有珠山の実証実験では、日中と夜間に自動巡回・自動撮影を行い、熱赤外面像は可視画像が利用できない夜間での調査に有効であることが示された（佐々木・他，2024¹⁾；図 17）。

熱赤外面像は夜間においても建物被害状況をリアルタイム把握に利用可能であるが、令和 4 年度の実証実験では高度 100m からの飛行のみであり、被害状況を把握するための詳細な検討は行われていない。

今年度は有珠山 2000 年噴火で被害を受け、噴火災害遺構として保存されている「旧とうやこ幼稚園」と「旧桜ヶ丘団地」を対象として実証実験を行った。実証実験は 2025 年 6 月 25 日～6 月 26 日に実施し、日中と夜間に可視画像と熱赤外面像を撮影した。

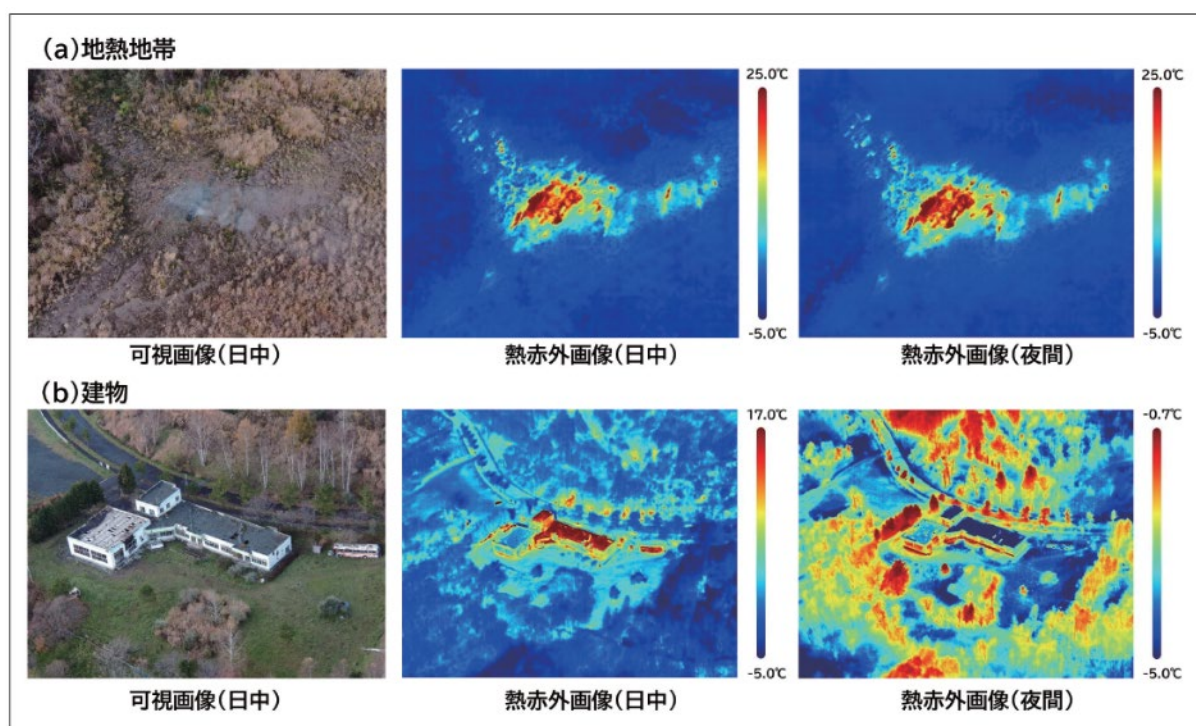


図 28 自動巡回による画像取得の例（佐々木・他，2024¹⁾）

b) 使用機材

使用した機体は、Matrice 4Tである（表 4、図 18）。Matrice 4Tは重量 1.2kg 程度の比較的小型の機体であり、可視カメラ、サーマルカメラおよびレーザ測距機能が搭載されている。

表 4 使用機体のスペック

名称	Matrice 4T
重量	1219 g
対角ホイールベース	438.8 mm
最大水平速度	21 m/s（前方飛行）
最大飛行時間	49 分
カメラ	広角、中望遠、望遠：1/1.3 インチ CMOS、有効画素数：48 MP
赤外線サーマルカメラ	解像度：1280 × 1024（スーパー解像度がオン） 640 × 512（スーパー解像度がオフ） 温度測定範囲：高利得モード：-20° C～150° C 低利得モード：0° C～550° C 赤外線波長：8 um～14 um
レーザ距離測定	測定範囲：1800 m（1 Hz）@20% 反射率ターゲット 距離測定精度：1～3 m：システムエラー <0.3 m、ランダムエラー <0.1 m @1σ



図 29 使用機体（Matrice 4T）

i) カメラの特徴

Matrice 4T に搭載されているカメラは、可視カメラが 24mm 相当 (35mm 換算)、熱赤外カメラが 52mm 相当 (35mm 換算) である (表 5)。そのため、熱赤外カメラの方が、可視カメラよりも約 2.1 倍「ズームされた状態」で撮影されていることになり、同じ位置から撮影しても熱赤外カメラの方が、対象物が大きく写る (図 19)。また、可視カメラと熱赤外カメラで撮影される画像の縦横比も異なり、熱赤外画像の方が横幅は小さい。対象物の大きさをそろえるためには、可視カメラを 2.1 倍ズームする必要があるが、今回はズーム撮影をしていないため、高度を 2 倍にした場合の画像を図 20 に示す。可視画像が高度 40m、熱赤外画像が高度 80m でほぼ同様の画像となる。

表 5 Matrice 4T に搭載されているカメラの諸元

	横 (pixel)	縦 (pixel)	縦横比	焦点距離 35mm 換算 (mm)
可視	4032	3024	1.33	24
熱赤外	1280	1024	1.25	52

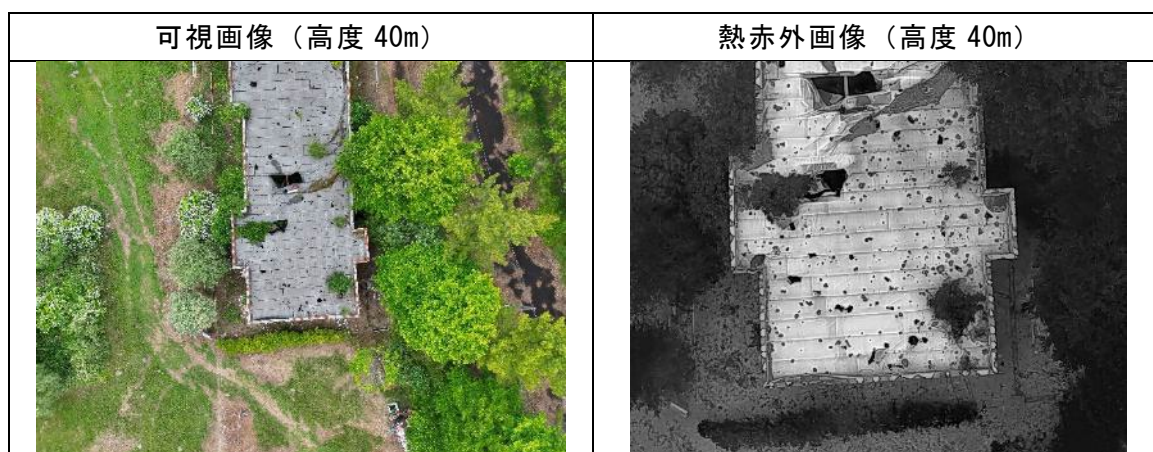


図 30 同じ高度で撮影した画像 (高度 40m)

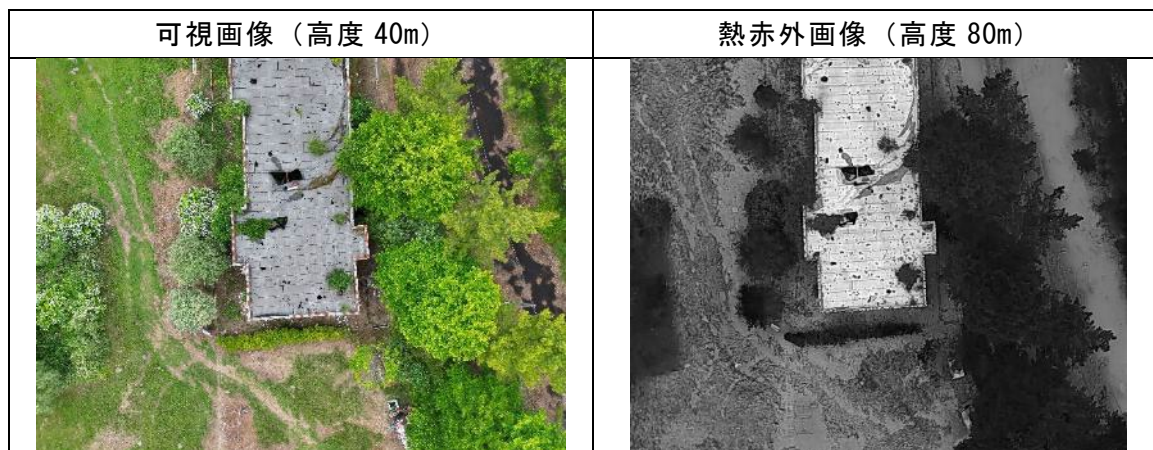


図 31 異なる高度で撮影した画像 (可視 : 高度 40m、熱赤外 : 高度 80m)

ii) 熱赤外面像の表示

Matrice 4T の画像は図 21 に示す 10 種類の温度表示色を選択できる。図 21 には比較のため可視画像も示した。本研究では、White Hot と Rainbow 2 による表示とする。White Hot は高温を白、低温を黒で表現する最も一般的に用いられている疑似カラーである。Rainbow 2 は色遷移が抑制され、暖色系と寒色系が適度な比率で配分され、高温および低温の対象の詳細を同時に可視化することが可能である。

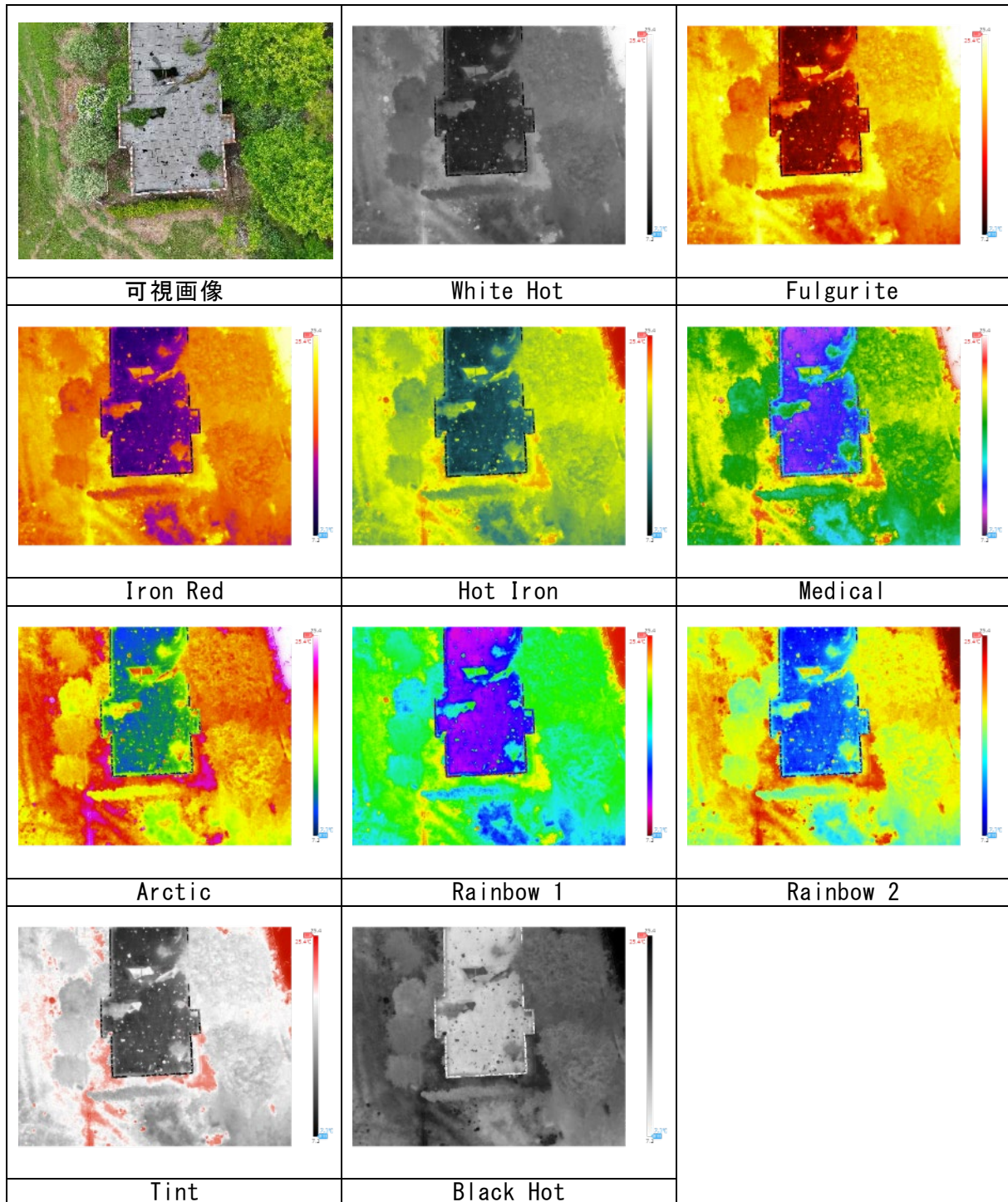


図 32 熱赤外面像の温度表示色比較

c) 垂直写真撮影および三次元データ作成

i) 作成方法

旧とうやこ幼稚園の建物および敷地を網羅する範囲について垂直写真（可視・熱赤外）を撮影した。対地高度は50m、ラップ率は90%とした。熱赤外画像は日中と夜間の2時期で撮影した。日中の熱赤外画像の温度表示色はWhite HotとRainbow 2とした。撮影した画像をPix 4Dで処理し、オルソ化したものを図22に示す。

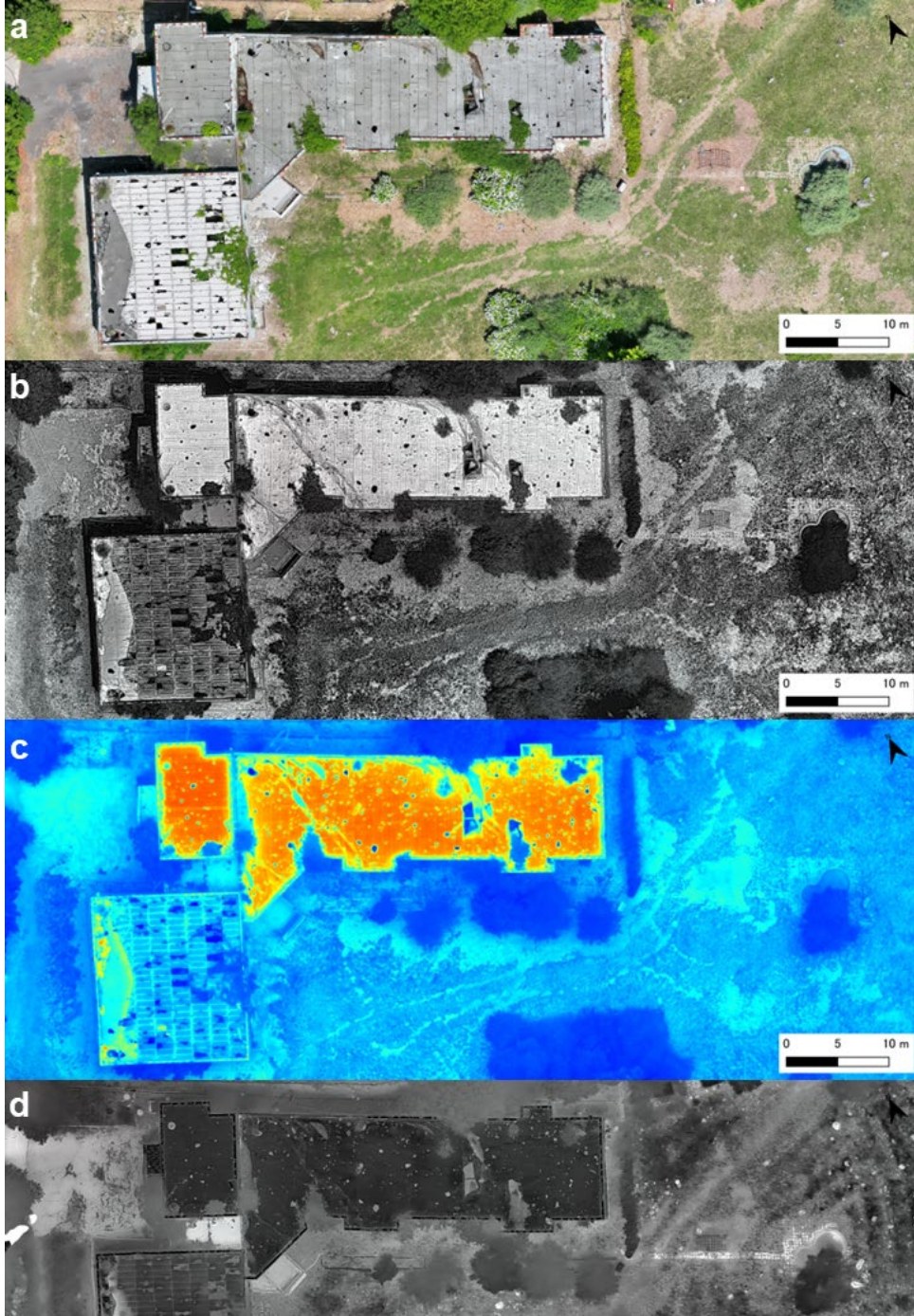


図 33 旧とうやこ幼稚園周辺のオルソ画像

(a: 可視画像、b: 熱赤外画像（日中: white hot）、
c: 熱赤外画像（日中: Rainbow 2）、d: 熱赤外画像（夜間））

ii) 損傷の判読

旧とうやこ幼稚園には 2000 年噴火で噴石が衝突して生じた陥没穴が多数確認される。旧とうやこ幼稚園の屋根の南東端を拡大した画像を図 23 に示す。図 23a の可視画像で黒く表示されている箇所が陥没穴（赤矢印）であるが、温度変化が大きくなる箇所であるため、図 23b～d の熱赤外画像いずれにおいても確認ができる。

一方、熱赤外画像を見ると、可視画像では不鮮明な陥没穴以外の損傷も認められる。図 23 に赤丸で示した箇所は図 23b では 4 つの損傷が確認できる。この箇所は陥没穴ではないが、噴石の衝突により損傷し、わずかに凹んでいる箇所と考えられる。また、図 23 に青丸で示した箇所は、図 23a の可視画像および図 23c の熱赤外画像（日中：white hot）には、線状のクラックのような構造が認められるが、図 23b および図 23d では認められない。撮影時間や温度表示色に工夫が必要となるが、建物の損傷を把握するためには、可視画像と熱赤外画像の併用が有効であると考えられる。

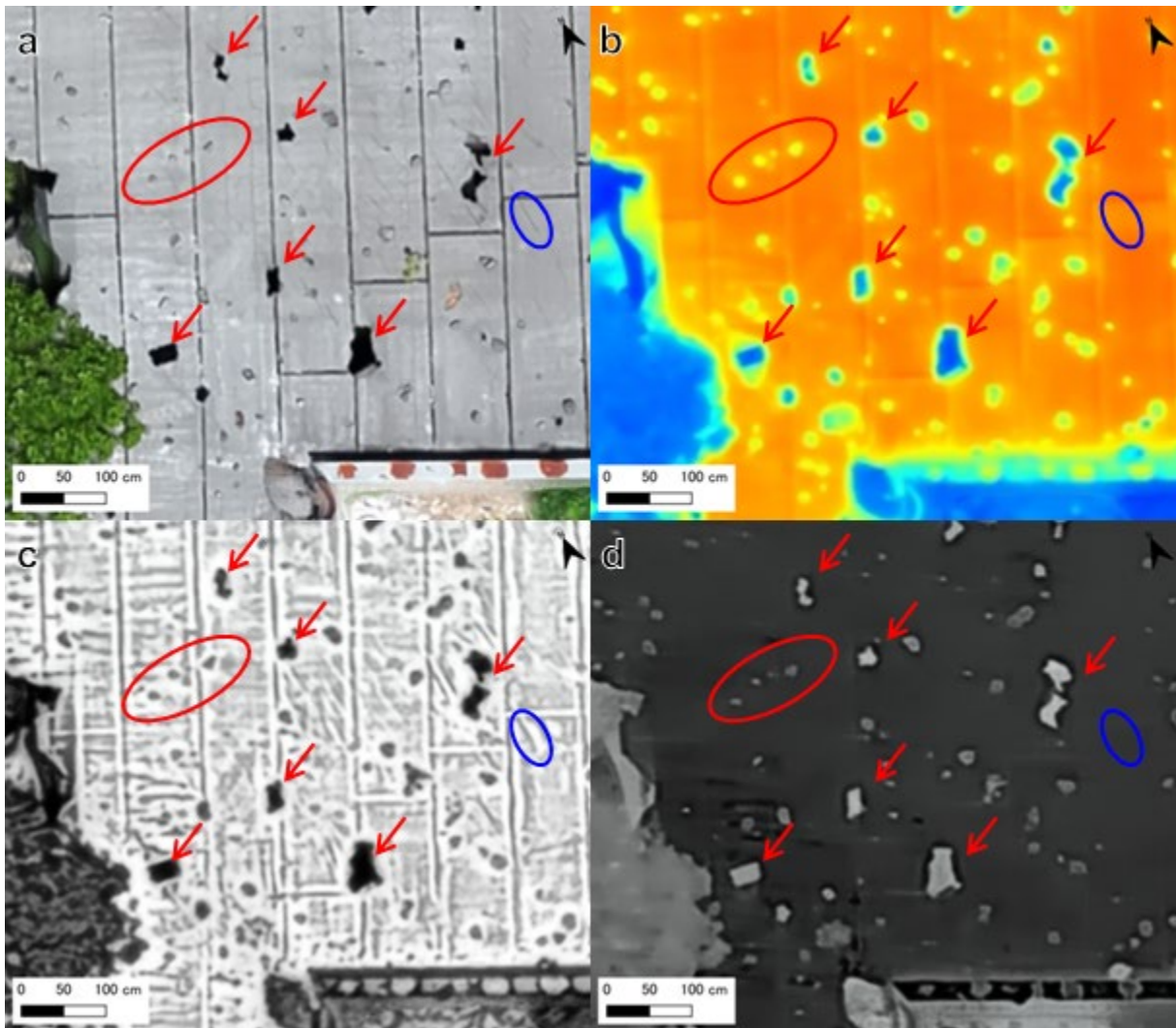


図 34 旧とうやこ幼稚園のオルソ画像拡大

(a：可視画像、b：熱赤外画像（日中：Rainbow 2）、
c：熱赤外画像（日中：white hot）、d：熱赤外画像（夜間）)

c)では飛行高度を変えて画像を撮影した際の認識性を確認するため、陥没穴の判読を行った。オルソ画像（可視）を用いて、陥没穴を判読して計測したところ、陥没穴の長径は0.1～0.5m程度であった。なお、図24の上部にある約3mの陥没（赤いライン）は噴火後の劣化により拡大した陥没である。

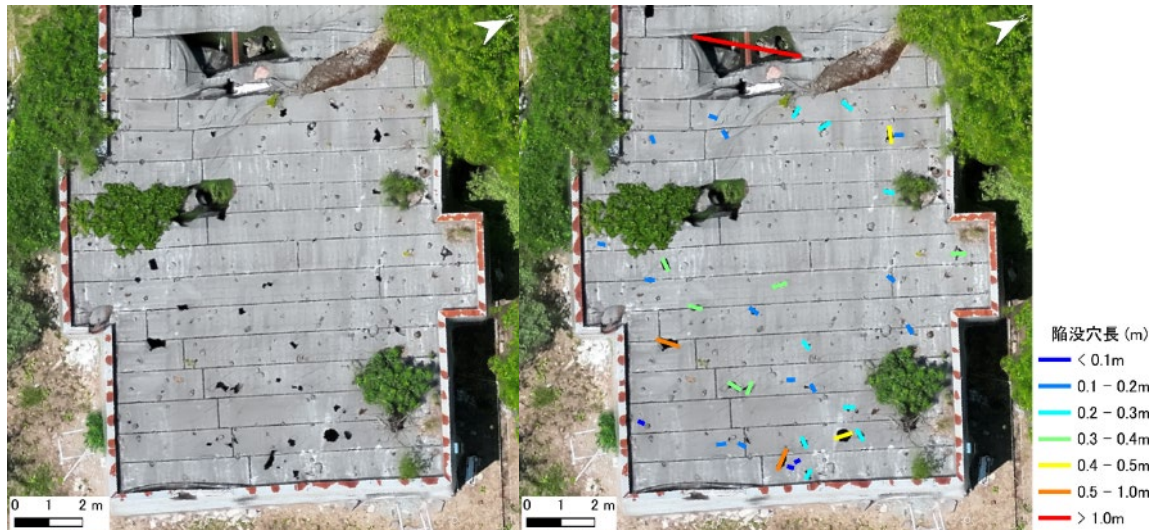


図35 屋根の陥没穴の判読結果（左：オルソ画像、右：判読結果）

d) 撮影高度による画像比較

図24で判読された陥没穴が飛行高度を変えた場合の視認性に变化があるか把握するため、飛行高度を変えて撮影した。飛行高度はMatrice 4Tに搭載されたレーザ距離計を用いて、建物からの高さを測定した。飛行高度を建物から高度30～100mの間を10m間隔で撮影した。

図25には高度別の熱赤外面像の温度表示色比較（日中）を示す。高度が高くなると右側のRainbow 2では陥没穴が識別しにくくなり、white hotの方が鮮明に判読できる。撮影しながら状況把握する場合はwhite hotを選択する方が望ましい。

図26は高度別の熱赤外面像（White Hot）である。高温が白色、低温が黒色を示す表示であるが、日中は屋根が日射で高温（白色）となるが、夜間は屋根の温度が低くなり低温（黒色）と反転したような表示色となっている。図23で示した結果と同様に日中の熱赤外面像（図26左）の方が鮮明に見えており、高度100mにおいても図24で判読した陥没穴が認識できる。一方、夜間の熱赤外面像（図26右）は高度80mで長径20cmの陥没穴がかろうじて認識できるが、高度100mになると長径20cm未満は判読不可能となる。

図27は高度別の熱赤外面像（Rainbow 2）である。日中の熱赤外面像（図27左）は赤色の部分が多く温度差が小さいため、高度が高くなると陥没穴の認識が難しくなる。一方、夜間の熱赤外面像（図27右）は屋根と陥没穴の温度差が大きいため、陥没穴が識別しやすい。

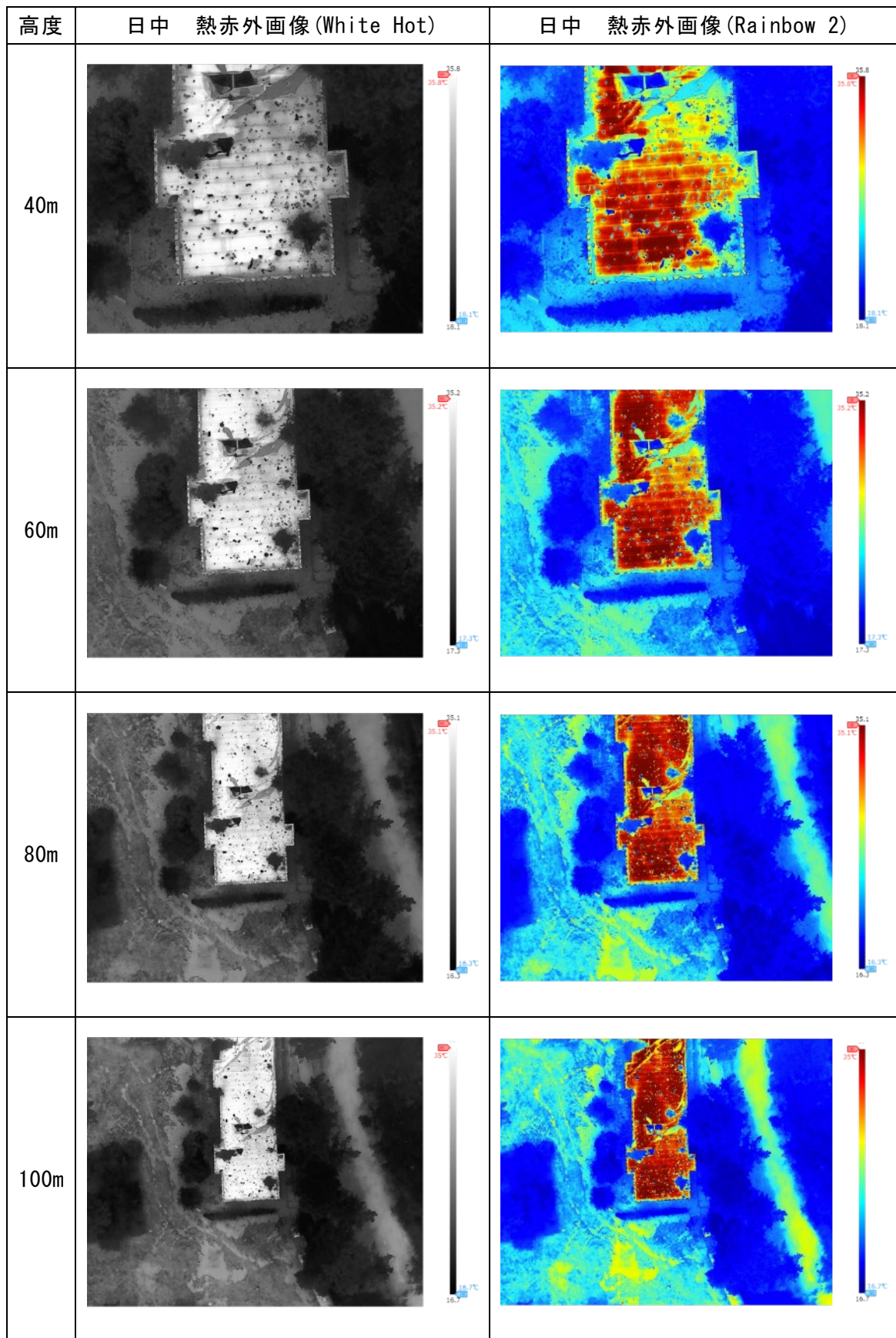


図 36 高度別の熱赤外面像の温度表示色比較（日中）

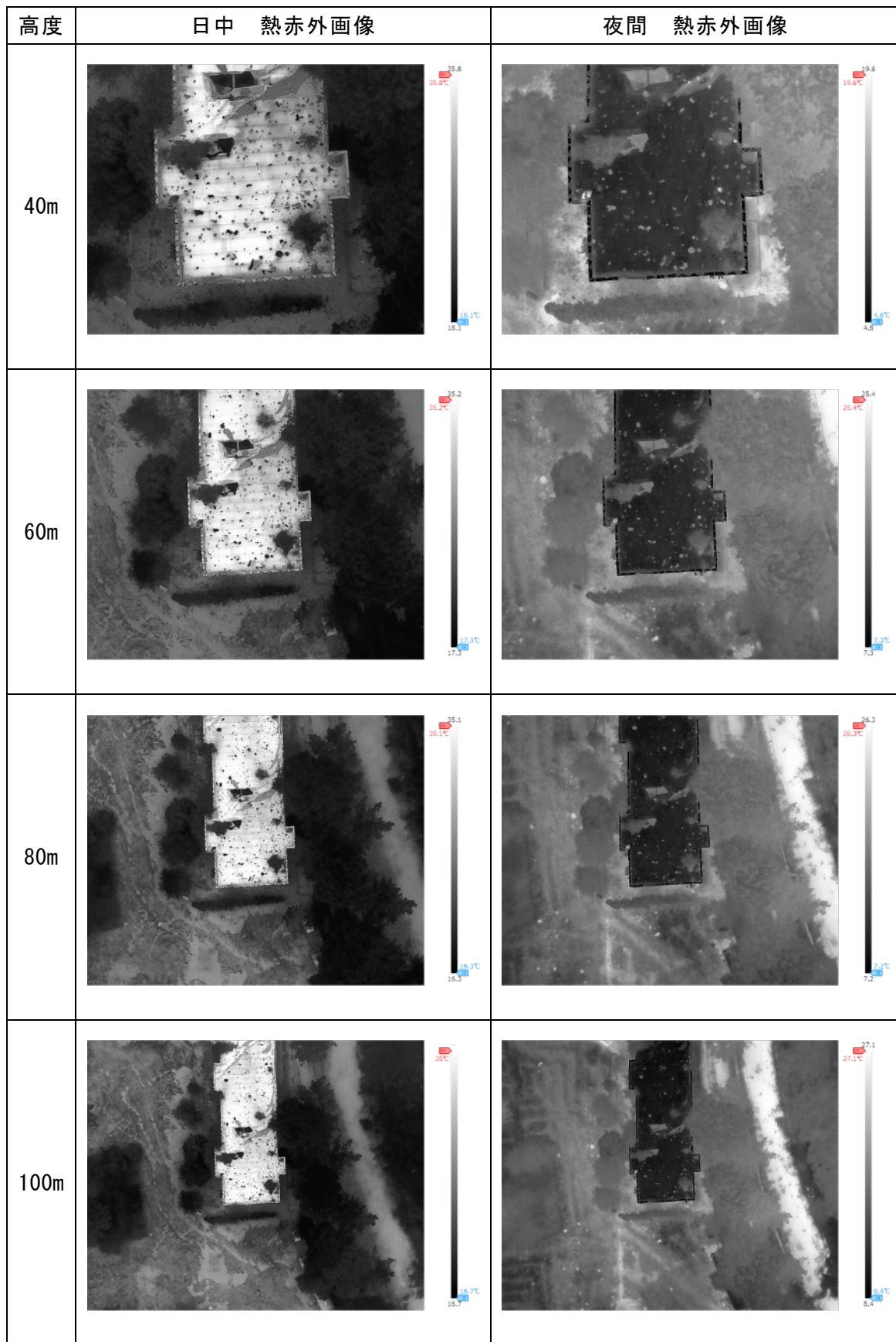


図 37 高度別の熱赤外画像（色は White Hot、白が高温、黒が低温）

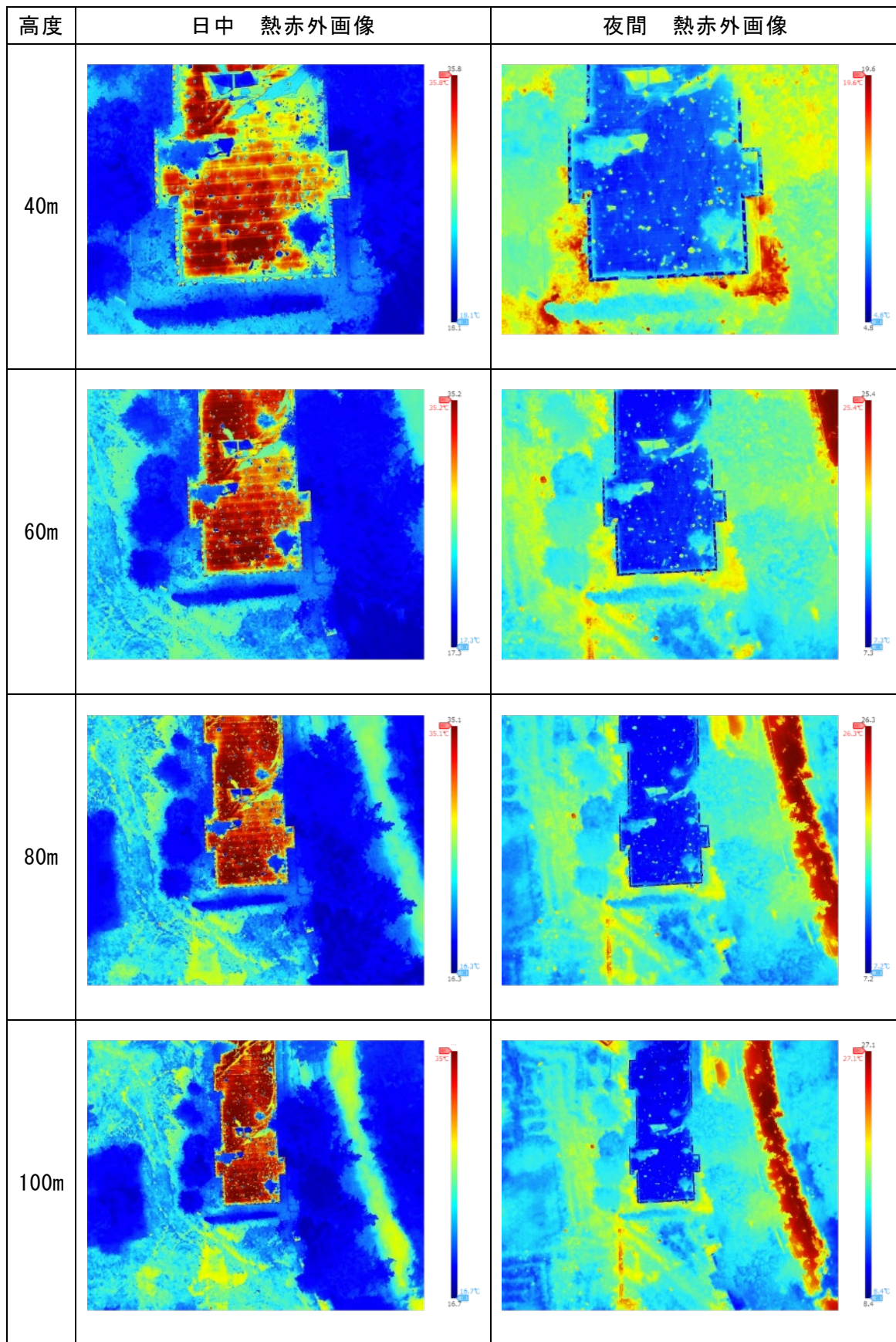


図 38 高度別の熱赤外面像（色は Rainbow2、赤が高温、青が低温）

e) まとめ

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検討した。熱赤外画像の温度表示色は White Hot（高温を白、低温を黒で表現）を用いると、温度差が分かりやすい傾向にある。夜間など周辺の温度が低い場合には、Rainbow も識別しやすいため、状況に応じて表示色を使い分けする方が良い。ただし、撮影後の画像の表示色変更は容易にできるため、撮影後に時間をかけて判読する場合には、あまり問題にはならない。

建物の損傷を把握するためには、可視画像では不鮮明な場合もあるため、熱赤外画像の併用が望ましいが、熱赤外画像で判読するためには飛行高度を 100m よりも低くする必要がある。できるだけ建物の近くで撮影することが望ましいが、地上に堆積した降灰の巻き上げなどの可能性もある。今回の撮影事例からは飛行高度 40m～80m で熱画像を撮影できれば、撮影中のリアルタイム損傷把握が可能であり、撮影後の詳細解析にも利用可能な画像を取得できると考える。

5) 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った。本サブテーマの研究成果は、(3) 事業期間全体の代表的な成果についてまとめて記述した。そのため、ここではドローン、航空機、人工衛星による状況把握の違いや使い分けなどについて記述する。

6) 火山噴火時の状況

新燃岳 2011 年噴火の降灰状況を図 28 に示す。噴火しておらず、噴煙が上がっていない場合、上空は降灰の影響は少ない。しかし、図 28 の赤丸で示した範囲のように、噴火はしていないものの、地表付近は堆積した火山噴出物の再移動があり、空中の火山灰濃度が高い状態となる。このような状況では、ドローンの飛行は困難になると考えられる。

火口内部は上空からしか見えないため、上空からの観測が必須となる。火口上空は噴火状況によって異なり、爆発的噴火後は、火口上空の噴煙が多く、噴煙を避けて、風上側を飛行する必要がある（図 29 左）。一方、おだやかな噴火では、噴煙・噴気が少なく、火口上空を飛行しやすい（図 29 右）。



図 39 新燃岳 2011 年噴火の降灰状況（2011 年 2 月 1 日 12:07 撮影）

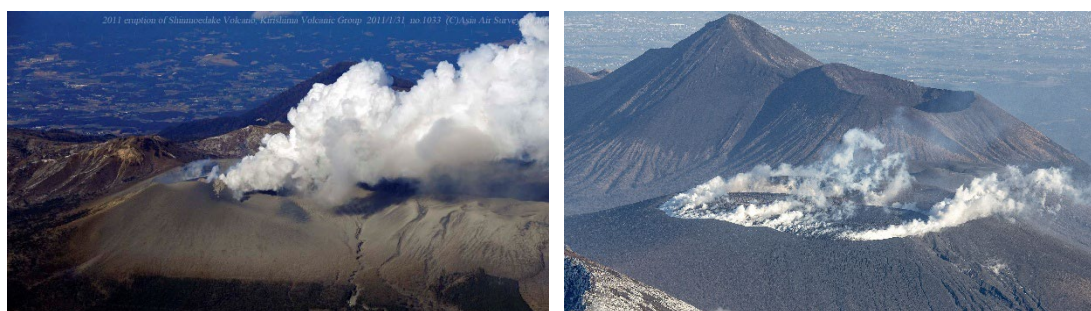


図 40 新燃岳の火口上空の噴煙の違い

左：2011 年噴火 2011 年 1 月 31 日 15:29 撮影

右：2018 年噴火 2018 年 3 月 9 日 17:00 撮影

a) 飛行・観測条件

ドローン・航空機・人工衛星の飛行・観測条件の比較を表6に示す。

火山噴火後は空中の火山灰濃度が上昇すると考えられるため、火山灰のドローンへの影響が懸念される。IP55 など IP 保護等級が高く、防塵性能の高いドローンも存在するが、火山灰には硫酸イオンや塩化物イオンが付着するため、佐々木・他(2025)²⁾では慎重な運用が求められると指摘されている。そのため、火山噴火前で空気中に降灰が無い状況や、噴火と噴火の間で空気中の火山灰濃度が低い状況の時にはドローンの利用が可能である。噴火時でも風上側の火山灰濃度が低ければ、飛行は可能となる。また、2) ドローンドックを用いた実証実験で示した通り、風速など気象条件の影響が大きい。風速 10m を超える場合や、雨や雪が降っている場合など悪天候には飛行は難しい。一方、ドローンは航空局への申請も必要となるが、夜間飛行が容易に行えるという利点もある。新燃岳 2011 年噴火の時のように夜間に火口内に溶岩が蓄積するなどの現象が生じた場合には、日中・夜間問わずに監視できることは強みである。

航空機もドローンと同様の条件ではあるが、地表付近の影響は少ないため、上空であれば飛行・観測は可能となる。火口周辺に噴煙が多い場合でも、火山灰濃度が低い風上側は飛行可能となることもある。悪天候時には飛行できない点はドローンと同様であるが、夜間時の飛行は難しい点が弱みとなる。

人工衛星は宇宙からの観測となるため、噴火の影響は受けず、夜間も観測可能である。光学画像は悪天候時には地表付近の情報が得られないが、合成開口レーダ (SAR) は全天候型のセンサであるため、観測が可能となる。

表6 ドローン・航空機・人工衛星の飛行・観測条件の比較

項目	ドローン	航空機	人工衛星
地表付近の降灰の影響	×：降灰の影響大	○：影響がない	○：影響がない
上空の噴火や降灰の影響	×：降灰の影響大	△：影響がある可能性がある（風上側は可）	○：影響がない
夜間の観測	○：申請すれば可能	×：夜間飛行できない	○：影響がない
悪天候時の観測	×：飛行不可能	×：飛行不可能	△：センサによる（光学：×、SAR：○）
センサ	可視画像、熱赤外面像、レーザ	可視画像、熱赤外面像、レーザ	可視画像、熱赤外面像、SAR、レーザ

b) 地形計測

可視画像や熱画像を用いた火山活動の監視は、ドローン・航空機・人工衛星の飛行・観測条件を満たせば、いずれのプラットフォームでも可能である。一方、地形計測に関しては、飛行・観測条件とは異なる条件が必要となる。

地形計測をする方法として、現在ではドローンや航空機から可視画像を大量に撮影し、SfM という方法で三次元モデルを作成することが一般的に用いられている。この手法では可視画像から三次元モデルを作成するため、植生や建物がある場合には、それらの三次元モデルも作ってしまう特徴がある。火口周辺や溶岩流など植生が少ない

裸地の部分では、正確な火山地形を計測できる（図 30 の白枠）が、植生が多い部分の場合は地形を正確に計測できない（図 30 の赤枠）。

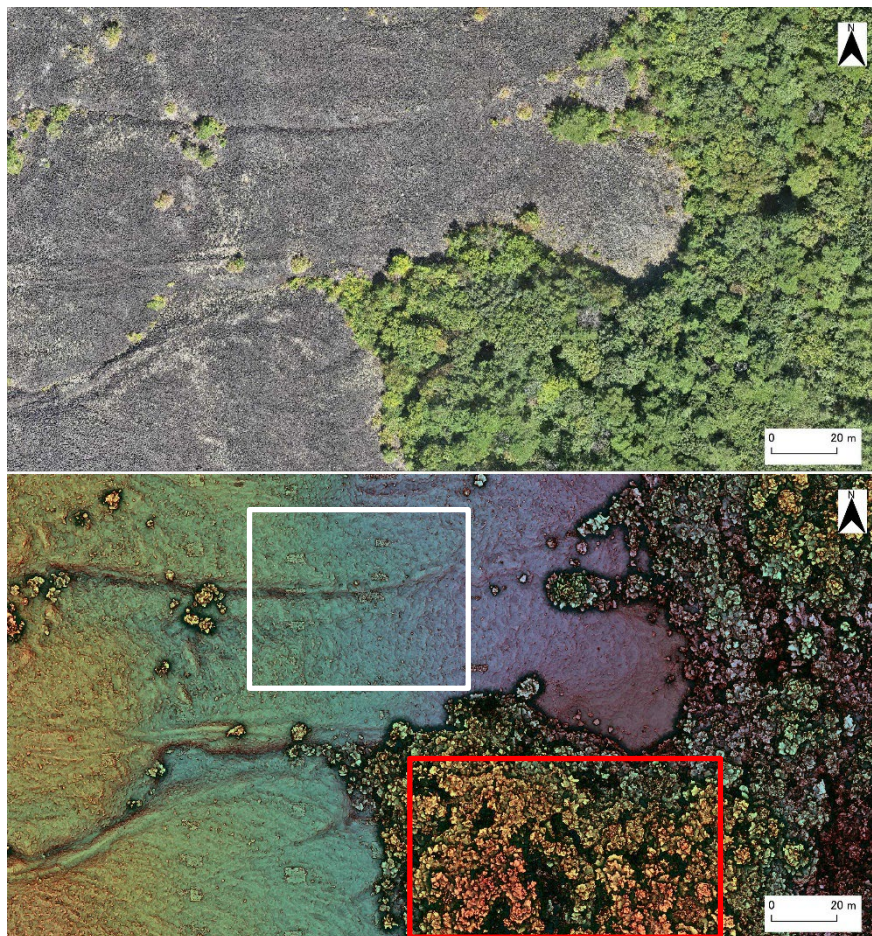


図 41 SfM で三次元モデルを作成した例（岩手山）

上：オルソ画像 下：赤色立体地図＋高度段彩図

三次元モデル作成には SfM が普及する前はレーザ測量が用いられてきた。レーザ測量では、建物や植生のほか地表面に到達したデータを取得することができ、建物や植生等を含む数値表層モデル（Digital Surface Model: DSM）に加えて、建物や植生等を除去した地盤高を示す数値標高モデル（Digital Elevation Model: DEM）が作成できる。レーザ測量の機材はヘリやセスナ機に搭載されてきたが、ドローンにも搭載が可能である。しかしながら、ドローンでレーザ測量をする場合には、対地高度が数十 m 未満と低空で飛行する必要があるため、地表付近の火山灰濃度が高い場合には飛行が困難となる。また、溶岩流など高温の噴出物上では対流などが発生し、気流が不安定となることが予想され、飛行が困難となる可能性が高い。したがって、レーザ測量を実施する場合には航空機の利用が基本となるが、航空機でも火口上空の飛行は大きな噴石の衝突などのリスクがあるため、高高度からの計測が望ましい。図 31 に箱根山でアジア航測株式会社が実施した高高度レーザの事例を示す。たとえば富士山の青木ヶ原樹海のような森林地帯で噴火し、溶岩流が樹木の下を流下する場合には、高高度からのレーザ測量による地形計測が基本となる。

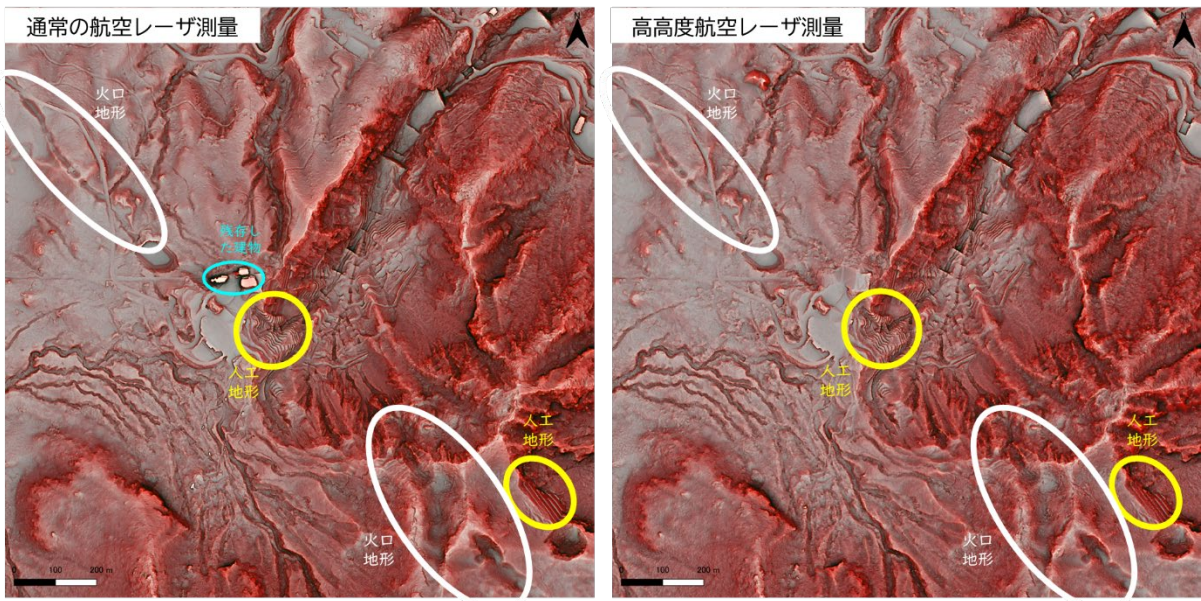


図 42 通常の航空レーザ測量と高高度航空レーザ測量の地形の比較
 (左) 通常の航空レーザ測量 (右) 高高度航空レーザ測量

地形計測手法の比較を表 7 に示す。裸地の地形変化把握であれば、SfM およびレーザ測量のいずれでも計測可能である。一方、植生が多い場所の地形変化把握にはレーザ測量の方が望ましい。近年では人工衛星によるレーザ測量が進められている。たとえば NASA の ICESat-2 はレーザ高度計を搭載しており、氷床、雲および陸域の高さを計測している。人工衛星からのレーザ測量は安全に計測できるため、今後の計測手法として期待される。

表 7 地形計測手法の比較

項目	SfM	レーザ測量
使用データ	画像 (可視画像、熱赤外画像)	レーザ点群
作成データ	数値表層モデル (DSM)	数値表層モデル (DSM) 数値標高モデル (DEM)
プラットフォーム	ドローン、航空機	ドローン、航空機、人工衛星
想定用途	裸地の地形変化把握	地形変化全般 (植生の下の地形変化も把握可能)

(c) 結論

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った。ドローンドックを活用することで、立入規制下においても安全かつ継続的な火山監視が可能であることが確認された。操縦者が危険区域に立ち入る必要がなく、緊急時に迅速な飛行とリアルタイムでの映像取得が実施できる点は、防災・火山観測において大きな利点となる。

データ解析効率化として、ドローンで取得した撮影画像から簡易モザイク画像を作成し、溶岩流の分布範囲を自動的に抽出する手法を考案した。本手法を伊豆大島の実証実験で取得した撮影画像に対して適用したところ、SfM 処理を行うことなく、短時間で簡易モザイク画像から自動抽出までを数分以内に処理することが出来た。火山噴火時の現場における迅速な状況認識に有効であると考えられる。

ドローンを用いて火山噴火時の建物の損傷を把握するためには、可視画像だけでは損傷が不鮮明な場合もあり見落とす可能性がある。そのため、可視画像に加えて、熱赤外画像の併用が望ましい。損傷を把握するためには、飛行高度 40m~80m で熱画像が撮影できれば、撮影中のリアルタイム損傷把握も可能となる。

火山災害のリアルタイム把握手法として、火山噴火時の状況、飛行・観測条件、地形計測の3つの観点から、ドローン、航空機、人工衛星の使い分けなどについてとりまとめた。ドローンは万能ではないため、状況に応じて航空機および人工衛星を併用することで、火山災害のリアルタイム把握が可能となる。

(d) 引用文献

- 1) 佐々木寿, 江川香, 杉下七海, 森貴章, 小森惇也: 火山噴火時を想定した UAV による自動巡回および画像取得手法の検討, アジア航測技術報 For the Future 2024, pp. 30-31, 2024.
- 2) 佐々木寿, 森貴章, 江川香, 千葉達朗: 霧島山噴火時の航空機およびドローンによる地形計測手法, 防災科学技術研究所研究報告, Vol. 523, pp. 126-131, 2025.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 事業期間全体の代表的な成果

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・赤外面像等を用いて、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した。

(a) 研究環境の変化の概要

本サブテーマでは無人機（ドローン）を用いた研究を実施したが、研究当初とプロジェクト 10 年目の現在では、機器の機能、周辺環境、研究条件等に大きな変化があった。本サブテーマでは周辺環境の変化についての最新情報を収集しながら、研究を進めてきた。研究当初と現在の状況の比較を表 8 に示す。研究に使用したドローンを表 9 に示す。

表 8 ドローンに関する研究当初と現在の状況の比較

分類	項目	研究当初	現在（プロジェクト 10 年目）
ドローン 全般	飛行時間	15～20 分程度	40～50 分程度
	位置測位	GPS 単独測位	RTK による高精度測位
	標定点	標定点（GCP）を地図上から読み取り	RTK 使用により設置不要
	伝送	無線	無線に加え、上空 LTE 使用で長距離伝送
	センサ	可視カメラ主体	可視カメラ・熱赤外カメラ・レーザ
	自動航行	手動飛行主体で、自動航行は垂直写真撮影など限定的	自動航行で垂直・斜め写真の撮影が可能、ズーム等も可能
	機体登録	なし	100g 以上は登録義務＋リモート ID 搭載必須
	資格	民間講習修了証（JUIDA 等）のみ	国家資格（無人航空機操縦者技能証明）
	法規制	DID 地区、150m 以上、空港周辺を飛行禁止	カテゴリー・レベル導入
	その他	—	災害時に緊急用務空域によるドローン飛行禁止
周辺環境	通信	携帯電話回線（4G）	携帯電話回線（4G、5G）、高速衛星通信
	WEB 会議	なし	Zoom、Teams、Webex など
研究環境	データ処理	会社に持ち帰り、半日～数日程度かかる	現地で数時間以内に処理、低分解能はリアルタイム処理
	モデル作成	可視画像のみ	可視画像と熱赤外面像
	定点観測	垂直写真、可視画像のみ	垂直・斜め写真、可視画像・熱赤外面像（ズーム可）
	位置計測	斜め写真測量システムを利用（数時間程度かかる）	レーザ測距によるリアルタイム計測（数秒程度）
	現地中継	中継できるツールなし、携帯電話不感地帯多く中継不能	WEB 会議システムを利用して中継が可能
			高速衛星通信を用いれば携帯電話不感地帯でも中継可能
	遠隔操作	現地にドローンを運搬する必要があり不可能	ドローンドック（ドローンポート）を設置することで、遠隔から操作可能
	データ共有	解析結果の HP 掲載、大容量サービスによる提供	WebGL を用いて HP 上で高速に赤色立体地図、JVND で結果の共有
自動抽出	研究事例なし	非常に高速・高精度なオープンソースの物体検出モデル等の登場	

表9 研究に使用したドローンの一覧

		
①TAROT 社 TAROT-X6	②DJI 社 Inspire2	③DJI 社 Matrice210
最大飛行時間：15分	最大飛行時間：27分	最大飛行時間：34分
		
④DJI 社 Phantom4 RTK	⑤DJI 社 Matrice300 RTK	⑥DJI 社 Dock3・Matrice 4TD
最大飛行時間：28分	最大飛行時間：55分	最大飛行時間：47分

(b) 事業期間全体の代表的な成果

1) 代表的な成果の概要

本サブテーマの最終目標は、「噴火時に火口近傍へ投入した無人機が、データ取得数分以内に、自動で、噴石・溶岩流等の特徴や経時変化状況を提供する」ことである。表10に事業期間全体の代表的な成果を示す。

表10 課題D1の代表的な成果一覧

項目	実施内容	成果
ドローンによる効率的なデータ取得手法の開発	三次元モデル作成用のマッピング飛行	可視画像に加え、熱画像の撮影方法の確立
	火口位置等の位置計測	カメラ搭載のレーザ測距によるリアルタイム計測
	ドローン飛行時の映像等のリアルタイム共有	WEB会議・衛星通信を利用した映像のリアルタイム共有
	ドローンドック（ドローンポート）の利用による自動巡視・自動撮影	伊豆大島で実証実験し課題整理、今後の活用に期待
段階的な現地データ取得による高精度化する手法の開発	処理時間の高速化	ソフト改良で数分～1時間以内に三次元モデル作成を実現
	位置精度の向上	NRTKを利用し、ドローンのみでも高い位置精度を取得
	可視画像・熱画像からの三次元モデル作成	可視画像に加え、熱画像からの三次元モデル作成を実現
	データ共有方法の検討	課題C3と連携し、データ共有用の標準フォーマットを作成
地形変化、現在状況を短時間で可視化技術の開発	地形の可視化	WebGLを利用した赤色立体地図の高速作成システム構築
	火山現象の自動抽出	噴気・噴石（着弾痕）・溶岩流分布の自動抽出手法開発

2) 自律飛行・自動撮影による空中定点観測

これまでの火山活動の観測は航空機やヘリからの上空からの斜め写真による観察が多かったが、毎回同じ場所から同じ画角で撮影する定点観測は困難であった。ドローンの機能であるライブミッション機能（あらかじめ設定した定点を自動で巡回・撮影を行う機能）を利用することで、噴気や熱源等の「空中定点観測」が可能となった（図 32）。



図 43 自律飛行・自動撮影による空中定点観測の実施例

3) 火口位置等のリアルタイム位置計測

ドローンで撮影した斜め写真から位置を計測する方法として、研究当初は斜め写真測量システムの高度化を計画した。しかし、既存の斜め写真測量システムは遠望観測を想定して構築されており、ドローンのような近接画像の適用が難しかった。近年、レーザ測距を搭載するカメラが開発され、1~3 km程度の位置を計測できるようになったため、火山噴火での適用を検証する実証実験を行った。実証実験により、レーザ測距で得られた位置は10m以内のずれに収まっており、防災対応や数値シミュレーションへの活用には問題ないことが明らかとなった（図 33）。

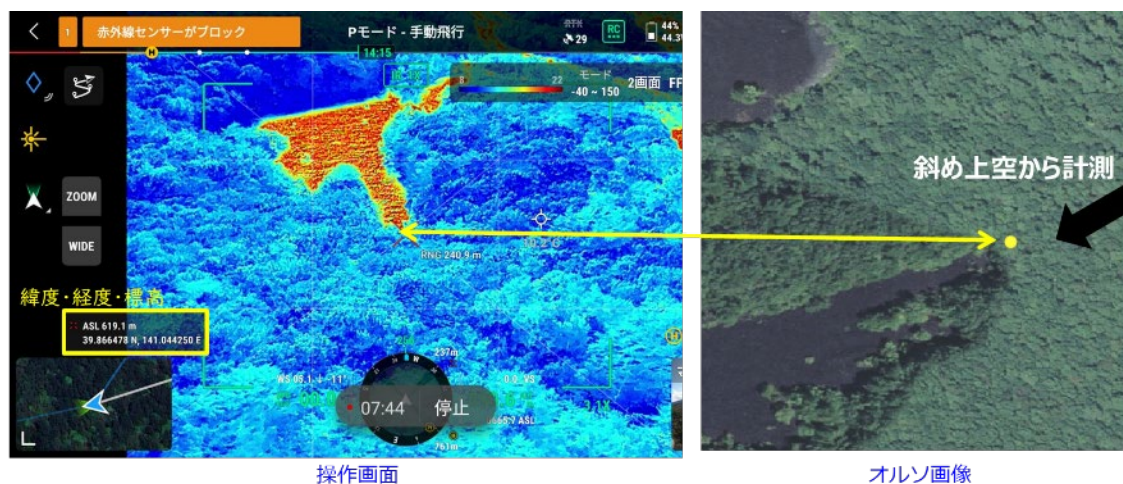


図 44 レーザ測距機能を用いた火口位置等のリアルタイム計測手法

4) 火山現象の自動抽出（噴気・噴石・溶岩流）

ドローンで得られた画像などから火山現象（噴気、噴石および溶岩流）の自動抽出の開発を行った。噴気と噴石は学習済みのモデルから物体検出をする YOLOv8 を用いた抽出を行った。噴気では火山の噴気以外に、「雲」、「工場の煙」、「野火の煙」などの画像も加えることで、抽出精度の向上を図った。噴石の自動抽出は、噴石そのものではなく、噴石着弾痕（インパクトクレーター）を抽出した。これは火口近傍には過去の噴石が多く存在するため、噴石の新旧の判断が難しいため、当該噴火により実現したと判断しやすい噴石着弾痕に着目して解析を行ったが、自動抽出はできるものの、空振りと見直しがあるため、今後事例を増やす必要がある。溶岩流は分布範囲を、オープンソースの OpenCV を利用した画像処理で輪郭を自動抽出し、GIS データの出力までできるツールを構築した（図 34）。

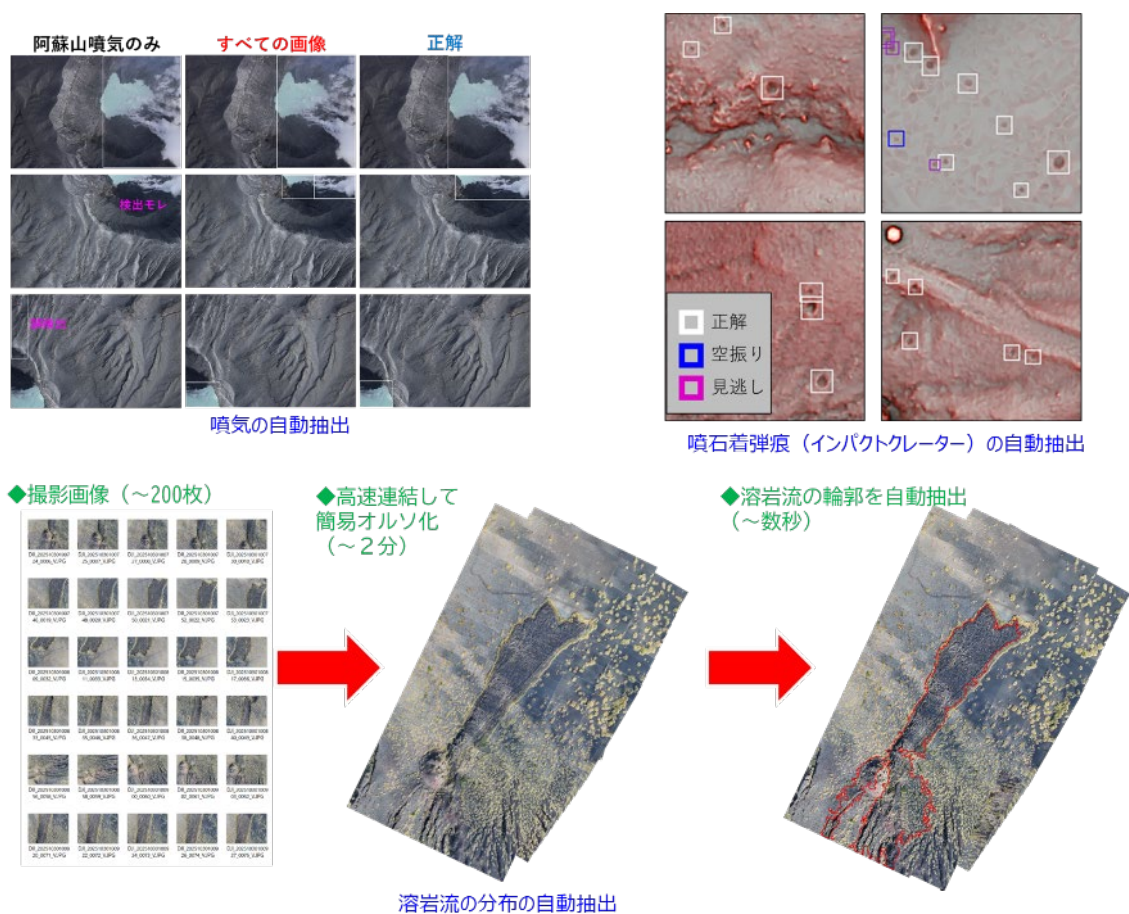


図 45 ドローンで取得した画像を用いた火山現象の自動抽出結果

5) ドローン飛行時の映像等のリアルタイム共有

ドローンの映像は操縦者の手元のコントローラーでしか見ることができなかったが、新型コロナウイルス感染症対策で急激に普及した WEB 会議を利用することで、現地からの中継を容易に行うことが可能となった。また、火山周辺は携帯電話の圏外であることが多いが、低高度を軌道する衛星を活用したブロードバンドインターネット（スターリンク等）を利用することで、通信手段の確保がしやすくなった。これらの周辺分野技術の進展により、ドローンの活用場面も大きく変化した。現地からの中継が容易に可能となったことから、遠隔地にいる火山学者の指示による飛行・状況確認、前述のレーザ測距を利用した位置計測などを、リアルタイムに提供できる仕組みを構築することが実現した（図 35）。



図 46 Web 会議を活用した現地映像共有

6) ドローンドック（ドローンポート）の利用による自動巡視・自動撮影・リアルタイム共有

ドローンを利用する際の一つの課題が、火山噴火時に迅速に現地に行くことである。これは離島火山においては特に重要な課題である。この解決策として、ドローンを格納したドローンドック（ドローンポート）の利用がある。現地に火山噴火前にドローンドックを設置することで、安全にいつでもドローンを飛ばせるような環境が構築できる。たとえば伊豆大島に設置したドローンドックから定期的に自動巡視・自動撮影をすることが可能であるほか、どこからでもマニュアル操作で飛行が可能となる。また、撮影した映像を関係者とリアルタイム共有が可能となることから、今後発展が期待される技術である（図 36）。



図 47 ドローンドックを用いた自動巡視・自動撮影・画像共有

(c) まとめ

本サブテーマの当初目標である「データ取得の数分内に情報提供」という目標は達成した。ドローン技術、周辺技術の進展の恩恵が大きいが、最新の情報収集、最新の機器を利用することで、複数の手法を開発し、実践的に利用できることを提示した。研究当初の10年前とは大きく異なり、ドローンやAIなどが様々な分野において普及している。研究後半は本サブテーマの技術を社会実装するというよりも、むしろ社会実装された技術を本サブテーマに適用し、火山噴火時にどう利用できるかを研究してきたとも言える。現在では、大学や研究機関でのドローン利用が進んでおり、今後の火山活動の監視・火山噴火時の状況把握の標準的な調査手法の1つになるであろう。

一方で、ドローンは万能ではないことに留意が必要である。ドローンを運航する上では、噴火の影響、気象条件、通信条件などの様々な課題があるため、各火山で実際に運用しながら課題解決を図ることが必要となる。現状ではドローンのみに依存することはできず、有人機（航空機やヘリ）による調査との併用が必要となる。また、将来的には人工衛星との併用も考えられる。火山現象の自動抽出は一部の火山現象のみで実施したが、今後、AIに関する技術進展により、精度の高い抽出や高速化（リアルタイム化）が図れることが期待されるため、今後も継続して検討すべき課題であろう。

本サブテーマにおいて確立された無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法が、我が国の火山防災および火山学研究の進展に寄与することを期待する。

2. 2 サブテーマ2

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立大学法人京都大学	共同実施機関	教授	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	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
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度化及び高精度化のための技術開発を開始した。

2) 平成 29 年度：

桜島、霧島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島火山においてレーダ観測を開始し既存のリモートセンシング観測を強化した。レーダの反射強度と降灰量を比較し、両者の関係を検討した。火山灰拡散予測の高速度化のために桜島南部の観測点の傾斜計及び地震計を改修した上で、地盤変動や地震動のデータベースを整備した。また、高精度化のために、再現された風速場をドップラーライダー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を検討して風の場の再現の高精度化を図った。また、FALL3D による桜島近傍の火山灰拡散シミュレーションを行い、地上降灰量と比較して、精度検証・高精度化を図った。ホノルルで開催される国際会議(Asia Oceania Geosciences Society)において、研究成果を発表するとともに研究に関する情報収集を行った。さらに、風洞実験装置を利用してレキの空力特性を把握した上で、瓦や壁材を対象にレキへの耐衝撃性能試験を行い、サブテーマ D3 に引き渡す基礎データを作成した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

即時把握技術開発においては、X バンド MP レーダ、GNSS、ライダーによるリモートセンシング観測を継続することにより、このマルチパラメータ観測システムが噴煙高度や降灰量等の即時的把握と噴煙量の推定に有効であることが示された。予測の高速度化技術においては、傾斜計及び地震計を改修することにより、噴火の発生、地震動や地盤変動データからの噴出率と噴煙高度の評価パラメータの高度化が図られた。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7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、自治体向けにインターフェース改良を行う。

1) プロジェクトの総合推進

当該プロジェクトと関係するプロジェクトと連携して、プロジェクト最終年度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

本サブテーマで観測対象としている火山周辺において、Xバンドレーダ観測を継続し、必要なメンテナンス作業（保守点検作業）も併せて行う。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バンドレーダにより観測される噴煙の反射強度の動画化とwebデータベース化を進める。また、レーダ観測結果のCFAD作成を行う。

これまでに設置したGNSSによる噴煙観測を継続するとともに、故障したGNSS装置の取り替えを行う。また、利用中のデータ通信回線の終了に伴い、新回線への移行を行う。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水水蒸気量と関連付けて検討する。

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、大気環境常時観測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度化技術開発

地震動および地盤変動のデータを用いて、噴火事例を増やすことにより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精度化技術開発

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

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度化を進める。そのため、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。

(2) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

令和7年度においては、これまでの観測および解析によって培われたブルカノ式噴火および長時間継続する噴火について、火山灰放出量の即時把握技術、予測の高速度化および高精度化技術の開発を進めた。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6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、これらの技術の検証を進めた。

また、火山灰拡散予測のための連続化シミュレータと同検証用シミュレータの運用を継続した。さらに、令和7年度に発生した噴火事例における予測精度の検証を実施し、火山灰噴出率予測の高精度化を念頭に、収縮関数の再検討を行った。

5月15日11時35分から16時にかけて、桜島において連続的な噴火が発生した。そして、5月15日から23日にかけて爆発および噴火が頻発した。そこで、いくつかの観測項目においては5月15日の連続的な噴火と5月の爆発・噴火についてトピック的に成果を報告する。

(b) 業務の成果

令和7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とりまとめの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担当者が閲覧し、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した。

a) 研究集会の開催と参加

令和7年11月11日に次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト評価会にて本課題のまとめの発表を行い、令和7年度事後評価を受けた。また、令和7年12月9日の次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト総合協議会にオブザーバー参加し、求めに応じて当課題の説明を行った。令和8年1月13日開催の次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトフォーラムにパネリストとして参加した。そして、令和8年1月14日と同15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成果報告会において当課題のまとめの発表を行い、関連課題の成果を含めて10年のプロジェクトの振り返りと、次のプロジェクトに向けての展望を議論した。

令和7年12月22日と同23日に、桜島などを対象とした大規模火山噴火総合研究グループと合同で研究集会を開催し、当課題からは2025年に桜島で発生した顕著な噴火についての船舶レーダや地盤変動による観測、落下速度から推定したテフラ粒子の密度、火山噴火時の密度流れ場の数値流体解析モデリング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インターフェース改良

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。

昨年度実施した鹿児島市役所危機管理局危機管理課の防災担当者からの意見聴取から以下の改善点が指摘された。

- ・内閣府の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。そのため、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。

- ・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。

これらの指摘された改善点を取り入れて、シミュレータのインターフェース改良を行った。シミュレータにおける表示部を図48に示す。図48の(a)と(b)は火山灰拡散連続予測シミュレータによるもの、(c)と(d)は噴火発生予測型火山灰拡散連続予測シミュレータによるものである。そして、図48の(a)と(c)は科学者向けである既往のインターフェースによる表示で、(b)と(d)は上記の防災担当者からの指摘された改善点を取り入れたインターフェースによる表示である。両者の違いは、科学者向けでは単位面積当たりの火山灰の質量の単位で示し、かつ数値を幅広い桁に対応するのと正確さを担保するために指数表示としているが、自治体担当者向けでは密度変換をすることで厚さ表示にしていることにより、直感的に分かりやすくしたところにある。また、火山灰拡散連続予測シミュレータの表示である(a)と(b)においては、火山灰放出率から推定される噴煙高度を画面表示しており、閲覧者の理解を促進できるようになった。一方、噴火発生予測型火山灰拡散連続予測シミュレータの表示では、科学者向けの(c)の画面では、噴火予想の経過時刻(min)と噴火予想時のひずみ変化量(nstrain)を表示しているが、自治体担当者向けでは省略して画面を簡素化している。これにより自治体担当者に煩わしさを与えないようにしている。

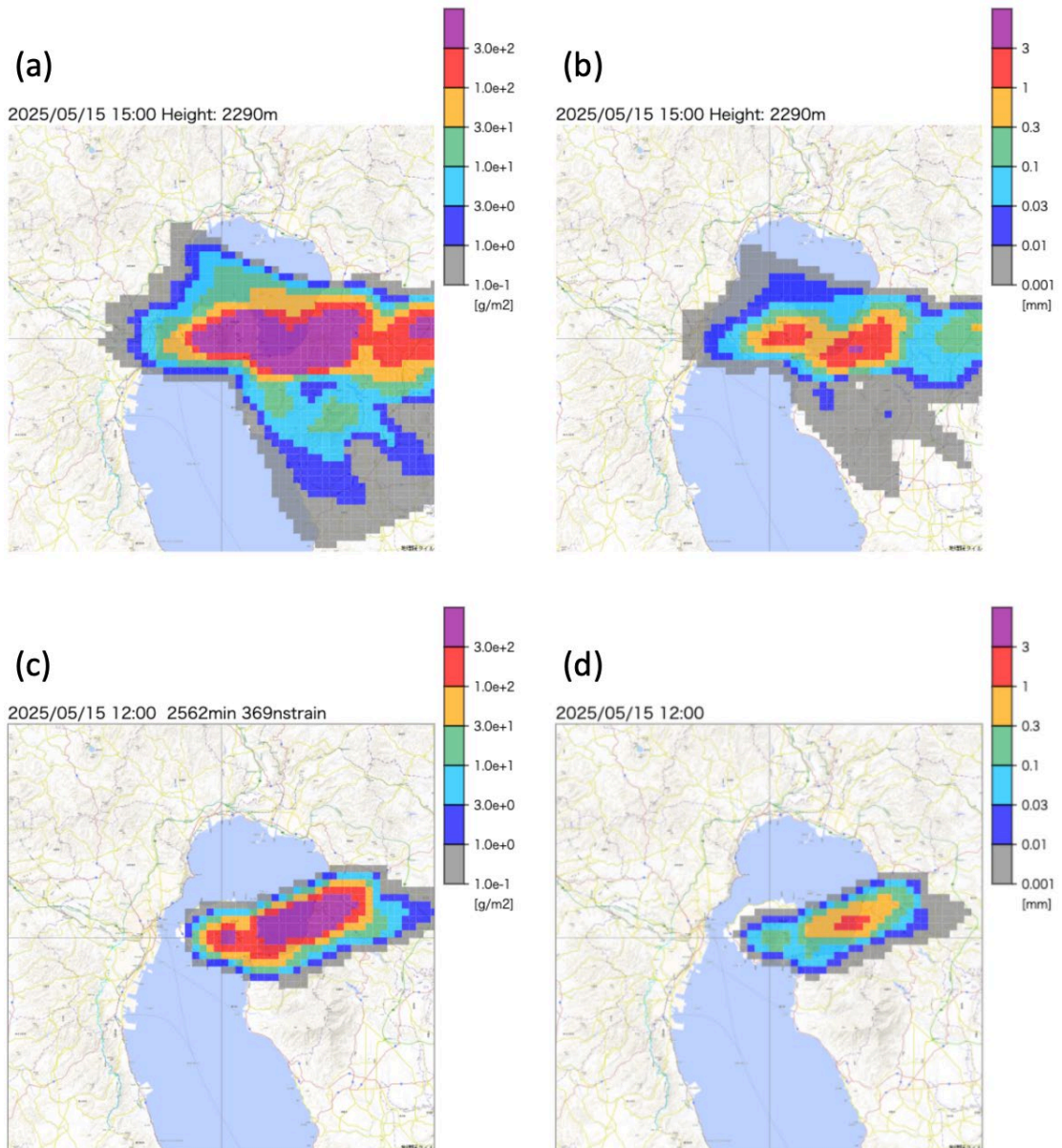


図 48 火山灰ハザード評価シミュレータのインターフェースの結果表示。

(a)と(b)は火山灰拡散連続予測シミュレータ。

(c)と(d)は噴火発生予測型火山灰拡散連続予測シミュレータ。

(a)と(c)は科学者向け表示、(b)と(d)は防災担当者向け表示。

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 49 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。

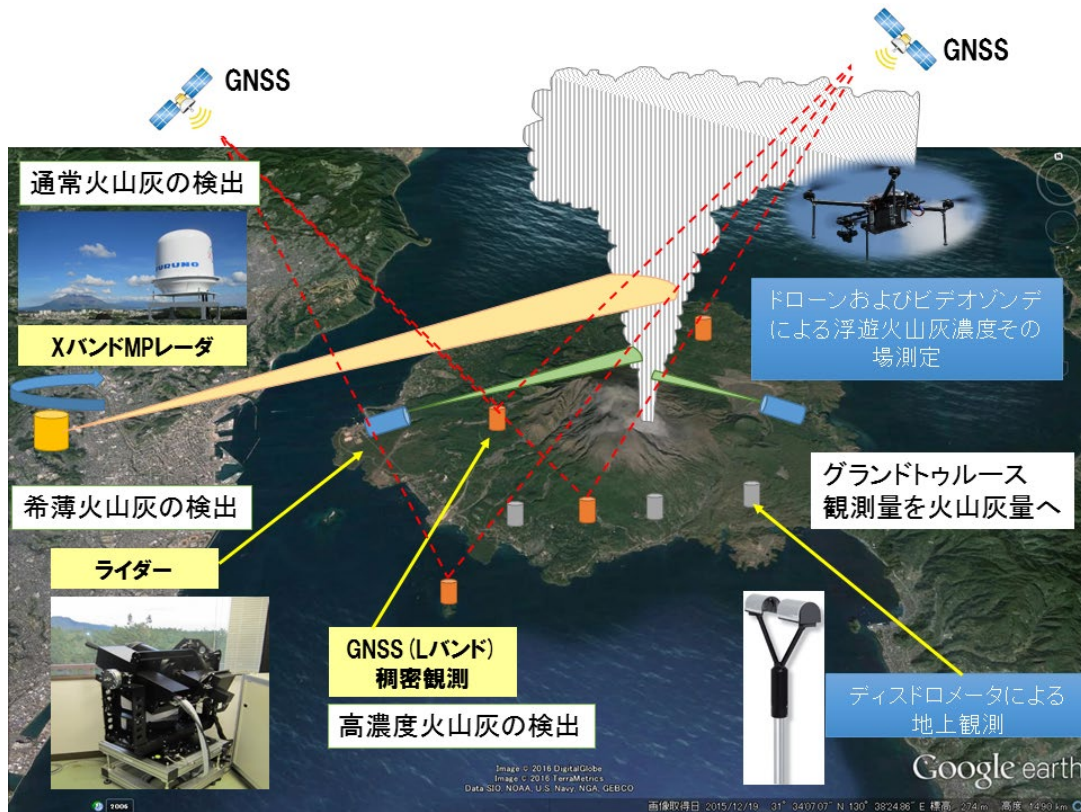


図 49 火山灰のマルチパラメータ観測の概要

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い。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は必ずしも年度に対応してはいない。

ii) 霧島山新燃岳噴火

霧島市牧園中学校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 9 月 18 日から 2026 年 1 月 29 日の期間において、鹿児島地方気象台及び福岡管区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。

2025 年 6 月 22 日 15:22 に新燃岳火口で噴火が発生し、その後継続し、7 月 2 日以降に噴煙量の増大が時々見られた。そして、2025 年 7 月 3 日 13:49（世界時刻

4:49) に噴煙が火口縁上 5,000 m となった。その後、7月8日以降は噴火活動が低調になったものの、噴火活動は2025年9月7日まで続いた。その間、噴煙高度が3,000 m 以上の噴火として、7月4日 16:40 (世界時刻 7:40) の噴煙高度 3,300 m で雲入りの噴火、8月10日 5:23 (世界時刻 9日 20:23) の噴煙高度 3,000 m で雲入りの噴火、8月28日 4:53 (世界時刻 27日 19:53) の噴煙高度 5,500 m の噴火があった。なお、8月7日 17:37 から8月11日 21:13 までメンテナンスのためレーダは稼働していなかった。そのため、8月10日の噴火については解析しなかった。

図 50 に7月3日 13:49 の噴火について、噴火開始3分後から14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 20dBz 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。噴煙は、噴火開始から3分から4分後には、高度 3,200 m から 3,500 m つまり、火口縁上に 1,800 m から 2,100 m に上昇したことが確認された。その後、5分後には、高度 4,200 m つまり、火口縁上 2,800 m に到達し、7分後には、高度 5,300 m つまり、火口縁上 3,900 m に到達した。そして、8分後から14分後においては、高度 6,000 m つまり、火口縁上 4,600 m でほぼ一定の噴煙高度を保った。目視による高度である 5,000 m よりは低い、レーダ反射強度で噴煙が確認されるにはある程度の火山灰濃度を有する噴煙である必要があることから、目視高度とは矛盾はしない。

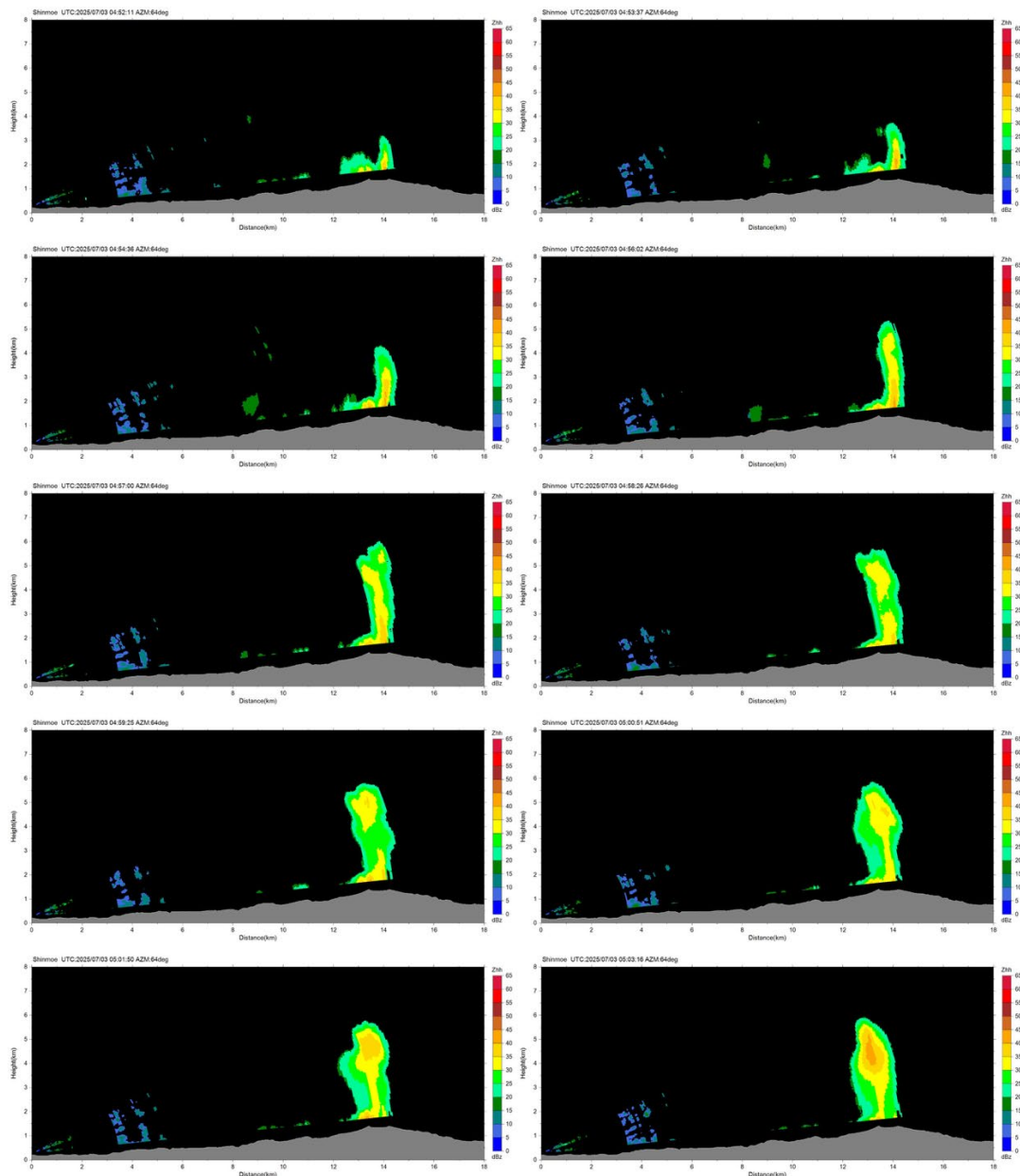


図 50 牧園中学校レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。
 2025 年 7 月 3 日 13 : 52 ~ 16 : 03 のレーダによる霧島山新燃岳の噴火映像。
 図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回りの方位角を示し、64 度である。

次に、図 51 に噴煙高度が 3,300 m にて雲入りとされた 7 月 4 日 16:40 の 3 分前から 8 分後までのレーダ反射強度分布を示す。悪天候のため反射強度分布は全体的に高い状況が続いている。この時間帯においては 16:37 (世界時刻 7:37) と 16:38 (世界時刻 7:38) において噴煙の形状が確認できるが、この時間以外は認識できなかった。悪天候下においては、レーダ反射強度分布のみでは噴火の認識は困難であるため、水滴と火山灰の判断に利用が検討されている偏波パラメータの利用を検討する必要があると言える。

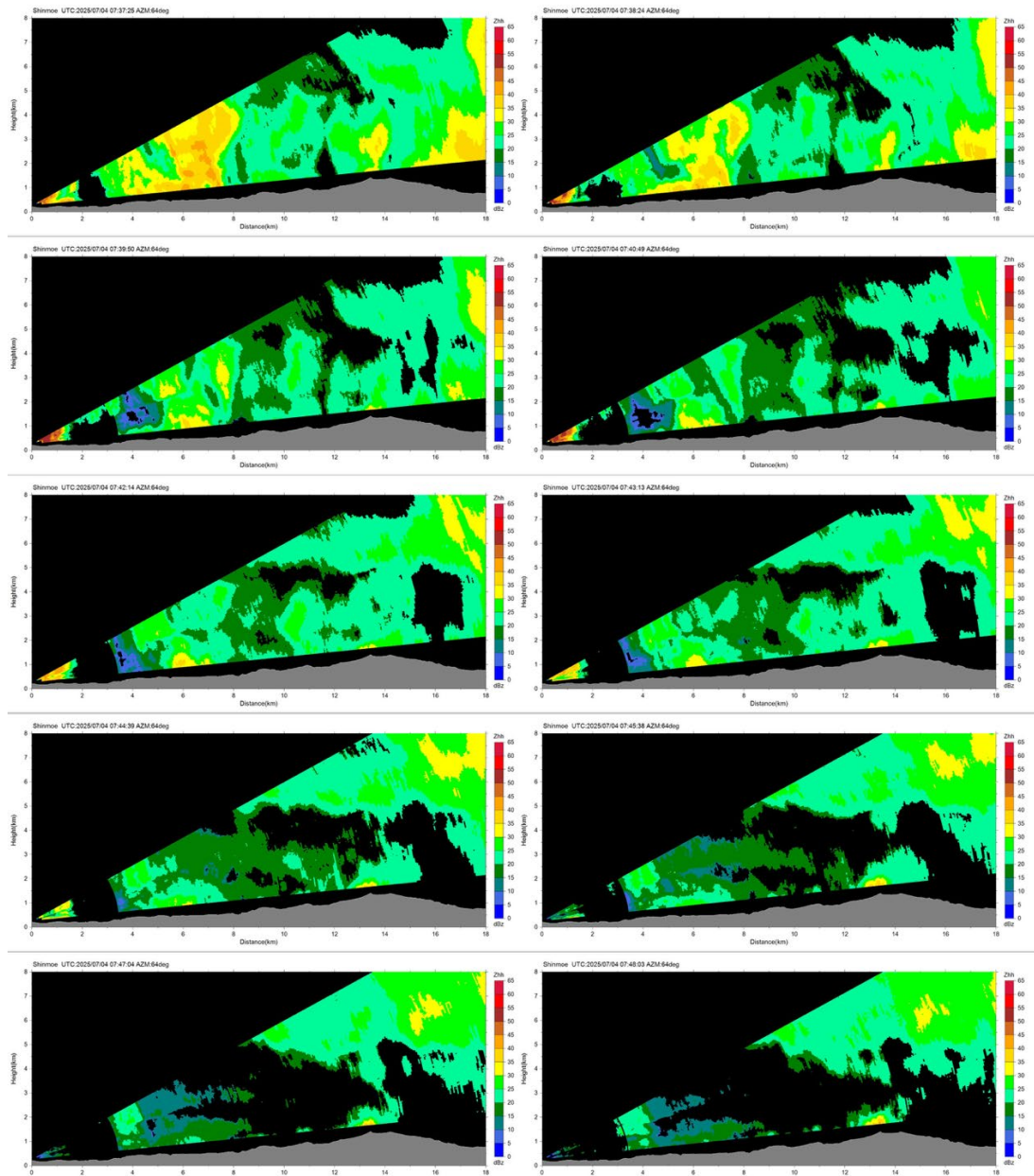


図 51 牧園中学校レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。
 2025 年 7 月 4 日 16 : 37~16:48 のレーダによる噴火映像。
 図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回りの方位角を示す。

図 52 に 8 月 28 日 4:53 の噴火について、噴火開始 1 分後から 14 分後までのレーダ反射強度分布を示す。噴煙は、噴火開始から 3 分後には、高度 3,500 m つまり、火口縁上に 2,100 m に上昇したことが確認された。その後、3 分後には、高度 4,600 m つまり、火口縁上 3,200 m に到達し、4 分後には、高度 5,400 m つまり、火口縁上 4,000 m に到達した。その後、6 分後には、高度 6,100 m つまり、火口縁上 4,700 m に到達し、7 分後には、高度 6,400 m つまり、火口縁上 5,000 m に到達した。目視による高度である 5,500 m よりは低い、レーダ反射強度で噴煙が確認されるにはある程度の火山灰濃度を有する噴煙である必要があることから、目視高度とは矛盾はしない。その後、噴火開始から 8 分後から 13 分後は、噴煙高度は 6,000 m から

3,900 mつまり、火口縁上4,600 mから2,500 mへと徐々に低下したことが認識できた。

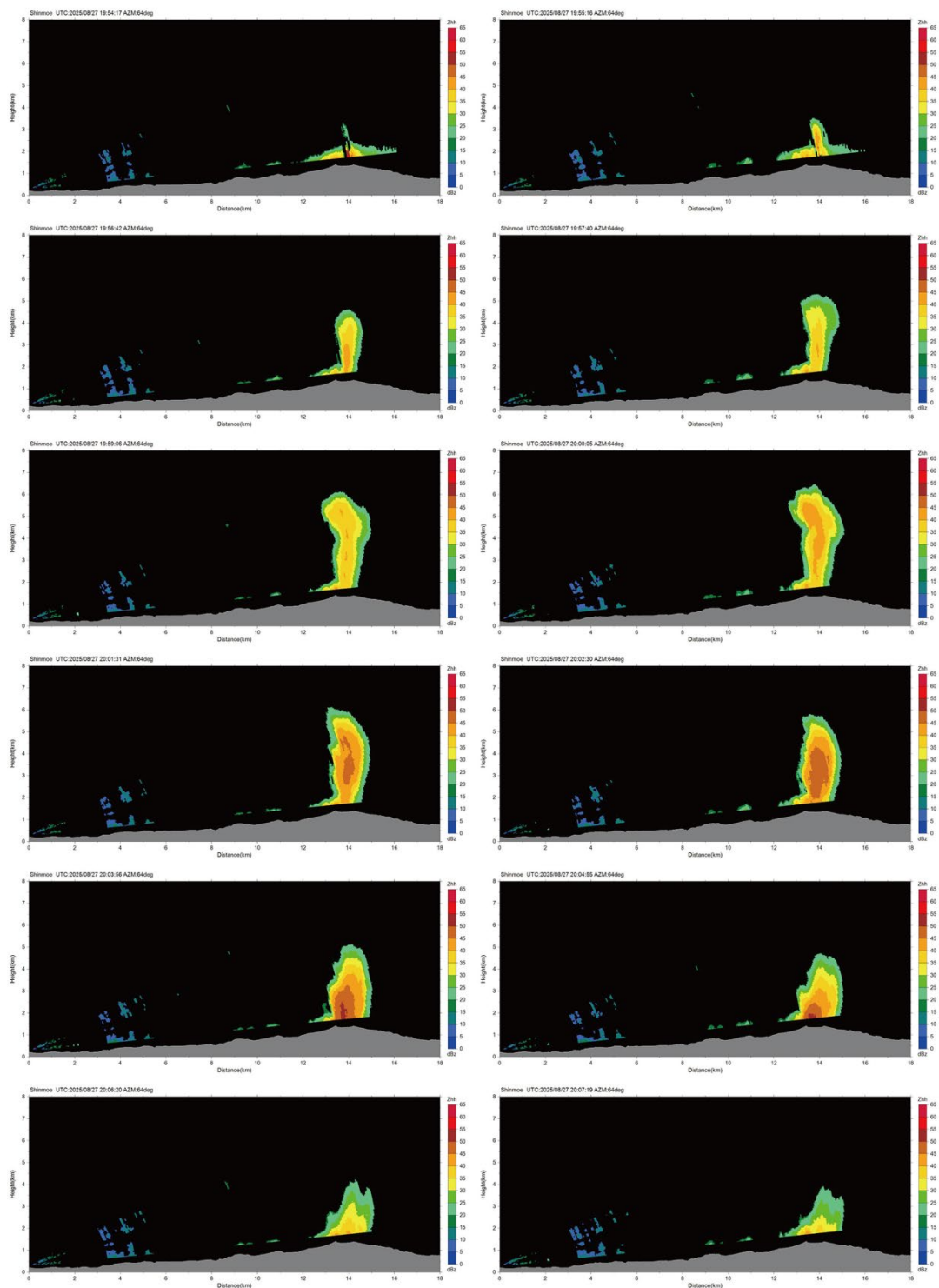


図 52 牧園中学校レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。
 2025 年 8 月 28 日 4 : 54~5:07 のレーダによる噴火映像。
 図に記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回りの方位角を示す。

iii) 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 2024 年 10 月 28 日から 2025 年 7 月 21 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。なお、2025 年 5 月 15 日の連続噴火についても解析の対象とした。

2024 年 12 月 23 日 7:29 (世界時刻 22 日 22:29) 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 3,400 m、噴煙の流向は南東である。図 53 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、噴煙は高度 1,700 m つまり、火口縁上 600 m に上昇し、2 分後には、高度 3,000 m つまり、火口縁上 1,900 m に到達したことが確認された。そして、噴火開始から 3 分後には、高度 3,500 m つまり、火口縁上 2,400 m に到達した。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 が噴煙高度であったが、6 分後には、高度 2,500 m つまり、火口縁上 1,400 m に低下し、8 分後には噴煙はレーダによる認識限界の高度に低下した。気象庁が目視で確認した最大噴煙高度の火口縁上 3,400 m よりも、1,000 m 低いのは、レーダの RHI スキャンの範囲外において噴煙の最高到達高度に達したからだと思われる。

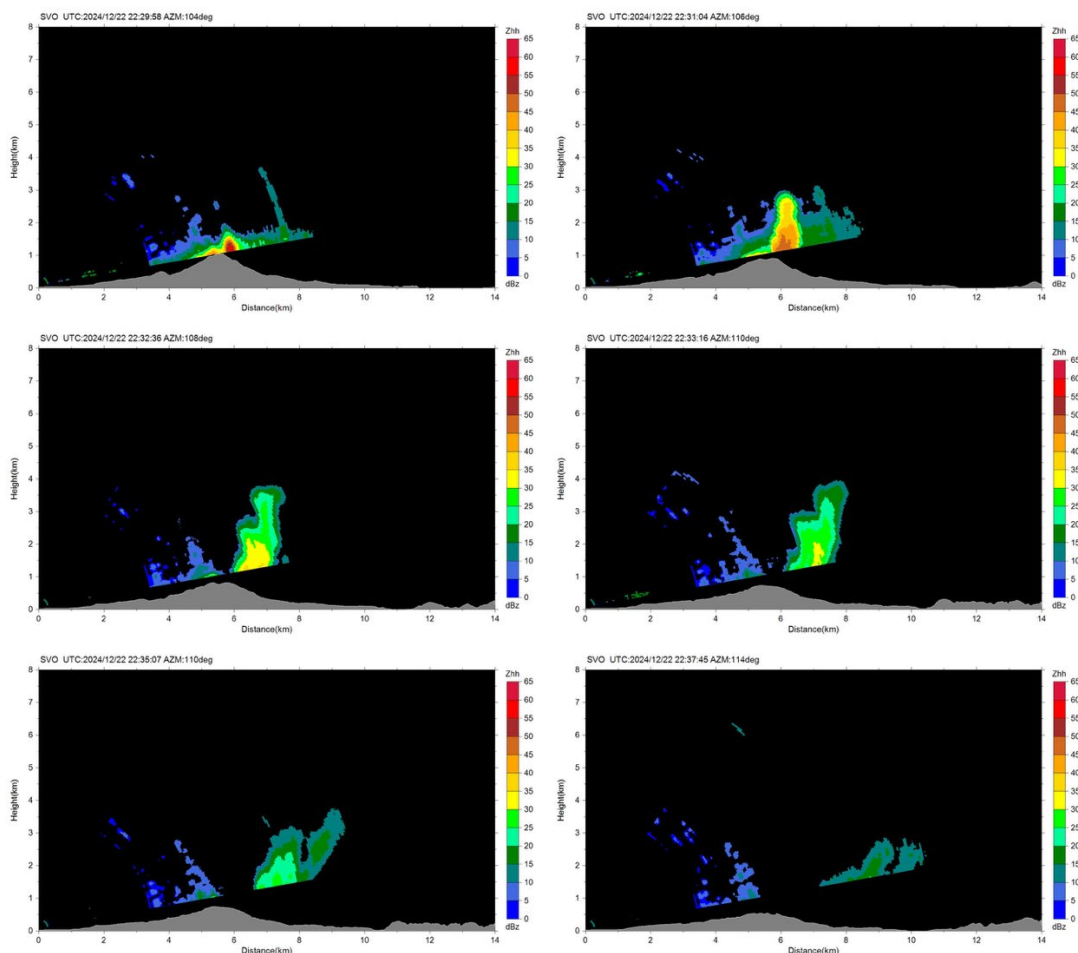


図 53 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。

2024 年 12 月 23 日 7:29~7:37 のレーダによる噴火映像。

図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2025年5月15日10:45（世界時刻1:45）に開始した噴火は、南岳A火口とB火口の両方からの連続的な噴火で、同日11:35に最大噴煙高度は火口縁上に3,000 mに達し、噴煙の流向は東である。噴火は同日の16時頃まで継続した。また、17時頃から噴火が再開し、18時30分頃まで継続した。図54に、11:32から11:43までのレーダ反射強度分布を示す。11:35に最大噴煙高度に達したとされているが、当該時間の前後である11:34（世界時刻2:34）と11:36（世界時刻2:36）のレーダ反射強度分布には明瞭な噴煙は確認されなかった。一方、11:37（世界2:37）から火口直上に噴煙が見え始め、噴煙は高度1,700 mつまり、火口縁上600 mに上昇し、11:38には高度3,000 mつまり、火口縁上1,900 mに達した。その後、11:39には高度3,800 mつまり、火口縁上2,700 mに上昇し、11:40には噴煙は高度4,400 mつまり、火口縁上3,300 mに、そして11:41には最高到達高度に達し、高度4,600 mつまり、火口縁上3,500 mであった。11:43には高度は低下し、高度3,800 mつまり、火口縁上2,700 mとなった。

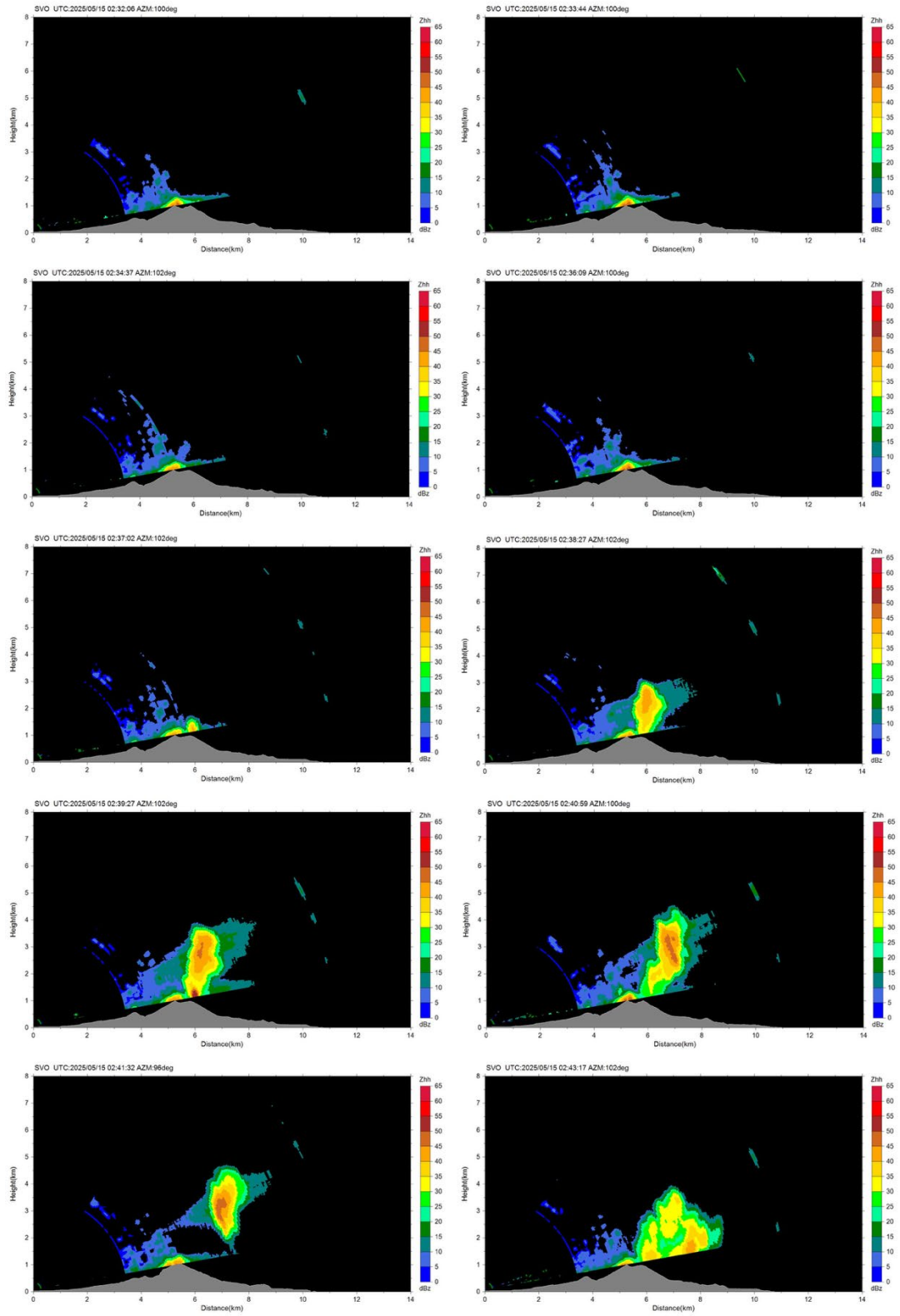


図 54 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。
 2025 年 5 月 15 日 11:32~11:43 のレーダによる噴火映像。
 図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

この時間帯の前である 10:45 から 11:36 と、この時間帯の後ろである 11:43 から 19:29 について、図示は省略するが、レーダ反射強度分布からみた噴煙高度の時間変化について述べる。10:45 に噴火が開始し、連続噴火とされているが、噴出が複数に分かれていることが確認できている。噴煙高度は 2,000 m から 2,600 m つまり、火口縁上 900 m から 1,500 m の間であった。そして、11:19 頃から徐々に噴火は弱まり、11:24 には停止した。そして 11:36 までは噴煙は確認されなかった。11:43 から 11:53 は、噴煙の途切れがみられず、噴煙高度は 3,000 m から 3,700 m、つまり火口縁上 1,900 m から 2,600 m を維持した。11:55 から 13:17 の時間帯では、噴煙高度がほぼ一定で 3,000 m、つまり火口縁上 1,900 m であった。13:18 からは噴煙が弱まり、高度は 2,000 m から 2,500 m つまり、火口縁上 900 m から 1,400 m となり、13:34 には噴煙が認められなくなった。その後、13:51 に噴煙が再び認められ、13:51 から 13:53 には噴煙高度は 2,000 m から 3,000 m つまり、火口縁上 900 m から 1,900 m であった。その後、13:55 から 14:00 は、噴煙高度は 3,000 m つまり、火口縁上 1,900 m を維持した。14:01 から 14:36 は、噴煙高度は 3,600 m つまり、火口縁上 2,500 m を維持した。その後、14:37 から 14:41 は、噴煙高度は 3,000 m つまり、火口縁上 1,900 m を維持した。それ以降は噴煙が弱まり、14:44 および 14:45 には噴煙高度は 2,000 m つまり、火口縁上 900 m となった。その後、14:50 には噴煙は止まった。14:51 に噴煙が再び認められ、高度 1,700 m つまり、火口縁上 600 m であった。その後、14:52 から 15:04 にかけて、高度 2,000 m から 3,200 m つまり、火口縁上 900 m から 2,200 m に高くなった。15:05 から 15:07 は噴煙が弱まり、高度は 2,000 m から 1,500 m つまり、火口縁上 900 m から 400 m に低下した。そして、15:08 には噴煙は認められなくなった。次に、噴煙が認められたのは 15:34 で、高度は 1,500 m つまり、火口縁上 400 m であった。そして、15:35 から 15:38 は、高度は 1,800 m つまり、火口縁上 700 m となった。15:40 から 15:42 に、高度 2,700 m から 3,000 m つまり、火口縁上 1,600 m から 1,900 m に上昇した。15:44 から 16:14 までは明瞭な噴煙は認められなかった。16:15 から 17:12 は連続的な噴煙があり、噴煙高度 2,500 m から 3,000 m つまり、火口縁上 1,400 m から 1,900 m の噴煙が認められた。その後、17:13 から 18:10 は明瞭な噴煙は認められなかった。18:11 に噴煙が認められ、高度は 1,600 m つまり、火口縁上 500 m で、18:12 から 18:13 には、高度は 2,000 m つまり、火口縁上 900 m となった。その後、18:15 から 18:16 には、高度は 3,000 m つまり、火口縁上 1,900 m に達し、19:17 に高度 3,400 m つまり、火口縁上 2,300 m となった。その後噴煙高度は低下し、18:19 に高度 2,800 m つまり、火口縁上 1,700 m となり、18:21 に高度 2,000 m つまり、火口縁上 900 m となった。18:23 から 19:29 において、明瞭な噴煙は認められなかった。ここで述べた通り、気象庁が発表している噴火に関する観測報において連続噴火とされている時間帯においても、明瞭な噴煙の有無や噴煙高度に変化があることが分かった。

2025 年 5 月 18 日 18:54 (世界時刻 9:54) 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 3,200 m、噴煙の流向は南東である。図 55 に、噴火開始 1 分後 (18:55) から 4 分後 (18:58) までのレーダ反射強度分布を示す。噴火開始 1 分後から 2 分後は、噴煙は高度 2,100 m つまり、火口縁上 1,000

m に上昇したことが確認された。そして、噴火開始から 3 分後から 4 分後には、高度 2,400 m つまり、火口縁上 1,300 m に到達し、風に流されて東に移動していった。気象庁が目視で確認した最大噴煙高度の火口縁上 3,200 m よりも、2,000 m ていど低いのは、レーダの RHI スキャンの範囲外において噴煙の最高到達高度に達したからだと思われる。また、高度 4,000 m に水平に強い反射強度分布があるが、これは水の融解層に対応しており、悪天候であることを示す。

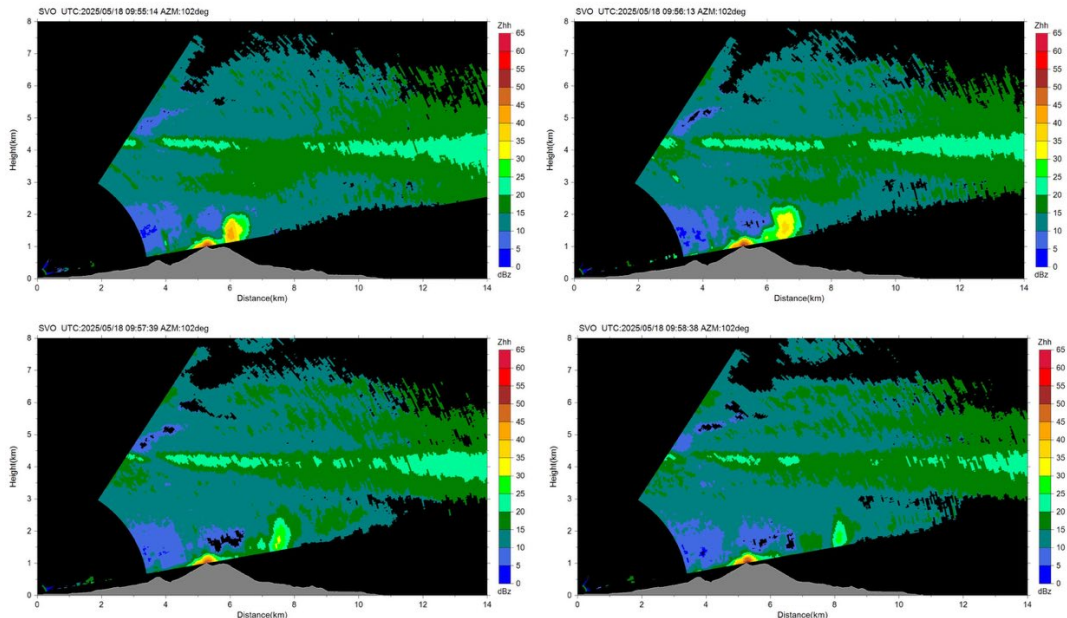


図 55 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。

2025 年 5 月 18 日 18:55~18:58 のレーダによる噴火映像。

図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2025 年 5 月 20 日 15:00 (世界時刻 6:00) 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 3,000 m、噴煙の流向は北である。図 56 に、噴火開始 1 分後 (15:01) から 11 分後 (15:11) までのレーダ反射強度分布を示す。噴火開始 1 分後に、噴煙は高度 2,000 m つまり、火口縁上 900 m に上昇し、噴火開始後 2 分後に、噴煙は高度 2,700 m つまり、火口縁上 1,600 m に到達したことが確認された。そして、噴火開始から 3 分後に、高度 3,900 m つまり、火口縁上 2,800 m に到達し、4 分後に、高度 4,200 m、つまり火口縁上 3,100 m に到達した。この到達高度は、気象庁が目視で確認した最大噴煙高と同じくらいである。

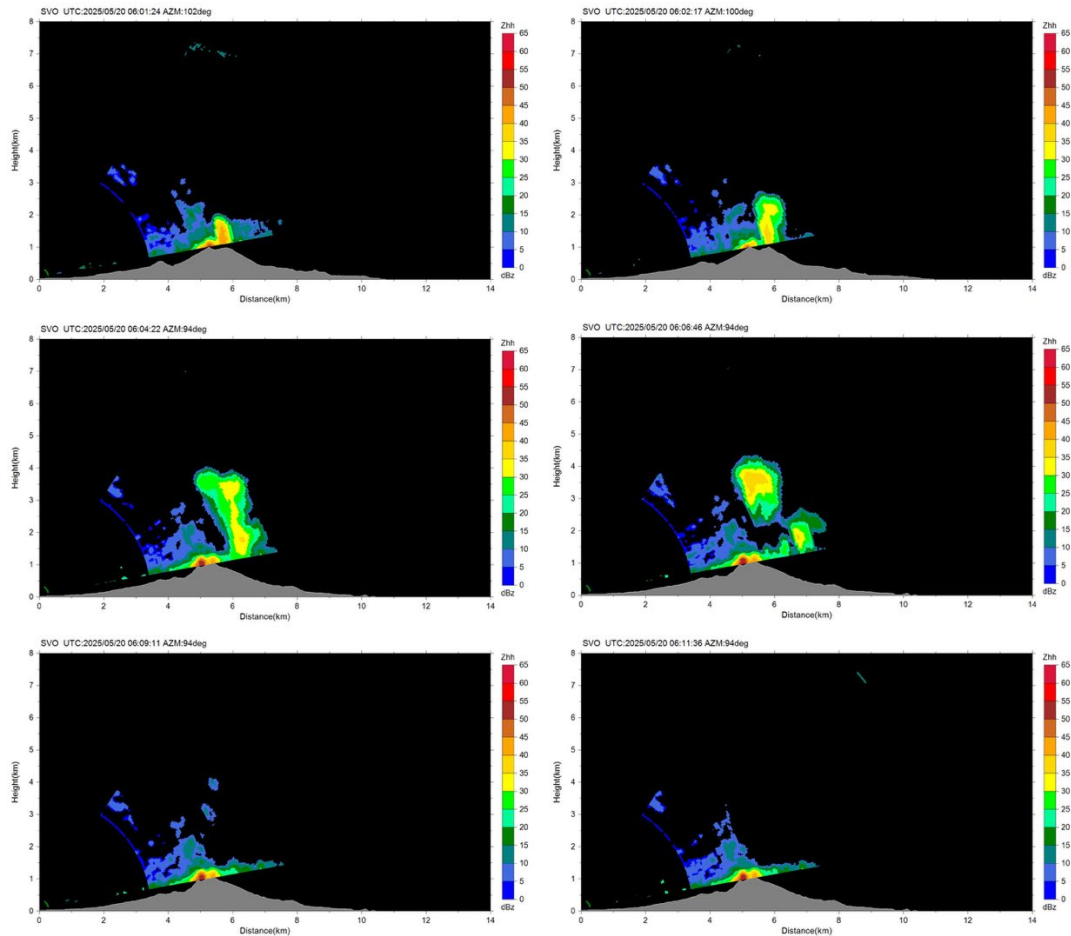


図 56 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。

2025 年 5 月 20 日 15:01～15:11 のレーダによる噴火映像。

図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2025 年 5 月 23 日 18:56（世界時刻 9:56）に開始した噴火について述べる。南岳の B 火口の爆発で、最大噴煙高度は火口縁上に 3,500 m にて雲入り、噴煙の流向は北東である。図 57 に、噴火開始（18:56）から 9 分後（19:05）までのレーダ反射強度分布を示す。噴火直後に、噴煙は高度 1,500 m つまり、火口縁上 400 m に上昇し、噴火開始後 2 分後に、噴煙は高度 3,000 m つまり、火口縁上 1,900 m に到達したことが確認された。そして、噴火開始から 3 分後から 4 分後は、高度 3,000 m つまり、火口縁上 1,900 m に到達した。その後、噴火開始から 7 分後から 9 分後は、噴煙は高度 2,000 m から 1,700 m、つまり火口縁上 900 m から 600 m に低下した。気象庁の観測では雲入りとされた噴火の噴煙であるが、レーダ反射強度からは噴煙の全容の把握ができた。

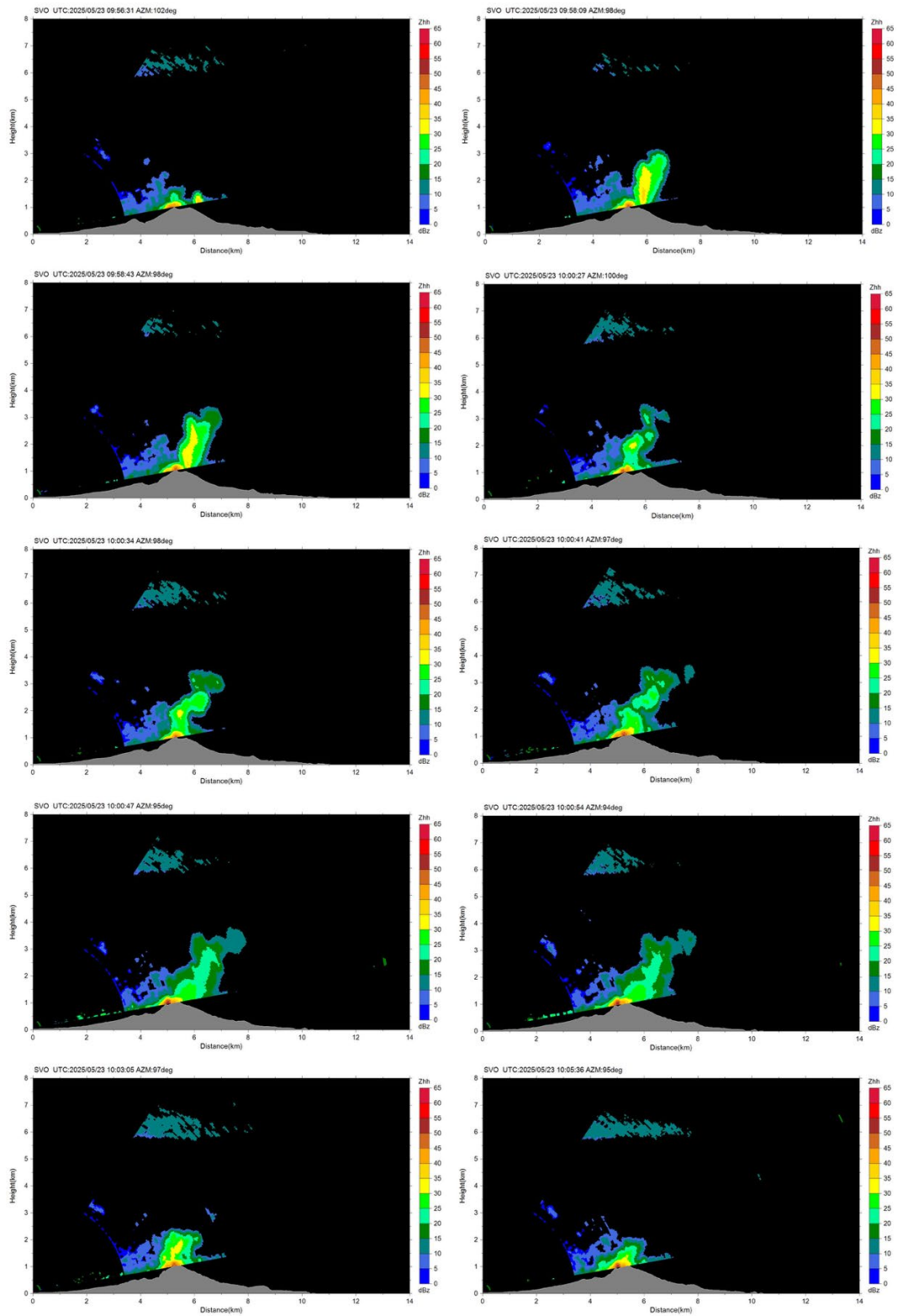


図 57 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。2025 年 5 月 23 日 18:56～19:05 のレーダによる噴火映像。図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2025 年 5 月 30 日 20:58 (世界時刻 11:58) 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 3,000 m、噴煙の流向は南である。図 58

に、噴火開始 1 分後 (20:59) から 4 分後 (21:03) までのレーダ反射強度分布を示す。噴火開始 1 分後までには、噴煙は高度 1,800 m つまり、火口縁上 700 m に上昇し、噴火開始後 2 分後に、噴煙は高度 2,200 m から 2,500 m つまり、火口縁上 1,100 m から 1,400 m に到達したことが確認された。そして、噴火開始から 3 分後から 4 分後は、噴煙は高度 2,300 m から 2,100 m、つまり火口縁上 1,200 m から 100 m に低下した。観測範囲の南方向の最大方位角である 114 度よりも、噴煙は南に流れ、観測範囲から外れたため、最大噴煙高度に相当する噴煙高度はレーダ反射強度分布からは把握できなかった。

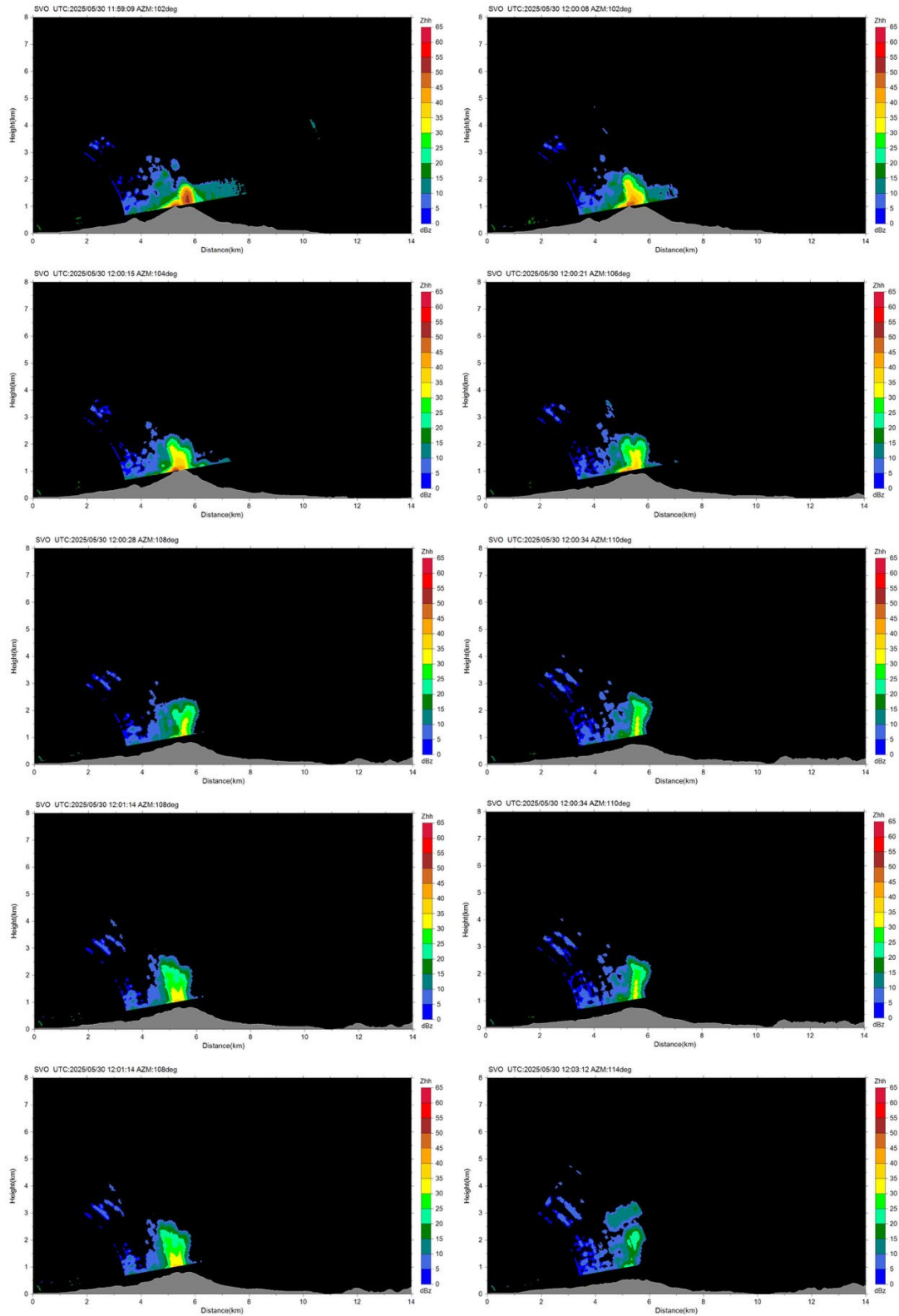


図 58 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。
 2025 年 5 月 30 日 20:59~21:03 のレーダによる噴火映像。
 図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2025年6月1日16:10（世界時刻7:10）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3,500 m、噴煙の流向は南東である。図59に、噴火開始直後（16:10）から11分後（16:21）までのレーダ反射強度分布を示す。噴火開始直後は、噴煙は高度2,300 mつまり、火口縁上1,200 mに上昇し、噴火開始後2分後に、噴煙は高度3,600 mつまり、火口縁上2,500 mに上昇した。そして、噴火開始3分後に、噴煙は高度3,800 mつまり、火口縁上2,700 mに達した。噴火開始4分後から、噴煙は低下し始めて、高度3,500 mつまり、火口縁上2,400 mとなり、噴火開始5分後に、噴煙は高度3,100 mつまり、火口縁上2,000 mに低下した。その後、噴火開始7分後から8分後には、噴煙は高度2,500 mつまり、火口縁上1,400 mに低下した。それ以降の時刻においては、レーダの観測方位から外れたため、反射強度分布には噴煙は認められなかった。

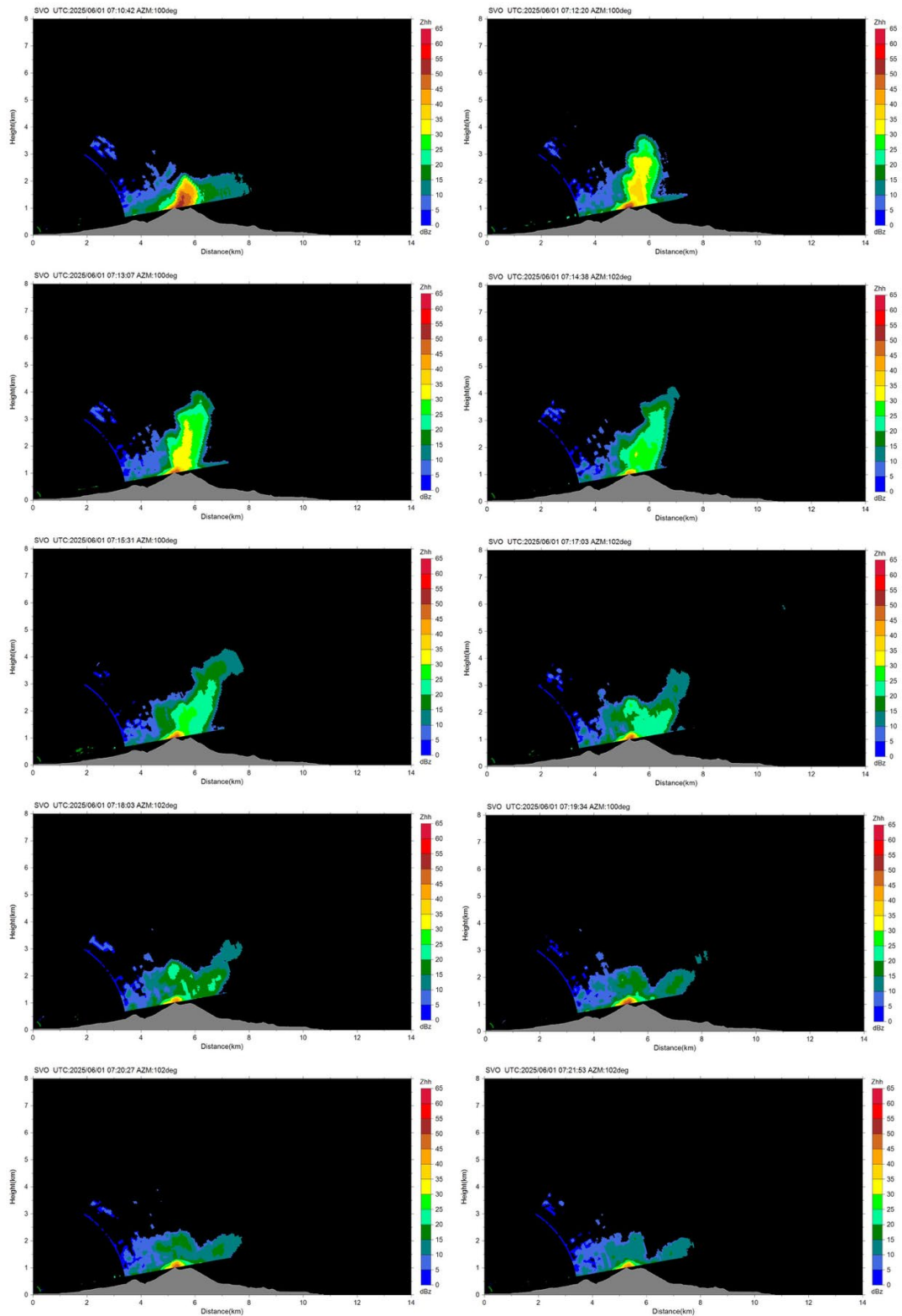


図 59 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。
 2025 年 6 月 1 日 16:10~16:21 のレーダによる噴火映像。
 図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2025 年 7 月 6 日 9:33 (世界時刻 0:33) 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 3,000 m、噴煙の流向は南東である。図

60 に、噴火開始 1 分後 (9:34) から 11 分後 (9:44) までのレーダ反射強度分布を示す。噴火開始直後は、噴煙は高度 2,700 m つまり、火口縁上 1,600 m に上昇し、噴火開始後 2 分後に、噴煙は高度 3,300 m つまり、火口縁上 2,200 m に上昇した。そして、噴火開始 3 分後に、噴煙は高度 3,800 m つまり、火口縁上 2,700 m に、噴火開始 4 分後に、高度 4,000 m つまり、火口縁上 2,900 m に達した。その後、噴火開始 6 分後からは徐々に低下し、噴煙は高度 3,700 m つまり、火口縁上 2,600 m となり、噴火開始 7 分後に、噴煙は高度 3,500 m つまり、火口縁上 2,400 m、そして噴火開始 8 分後から 11 分後では、噴煙高度は徐々に低下し、高度 3,300 m から 2,100 m つまり、火口縁上 2,200 m から 1,000 m になった。

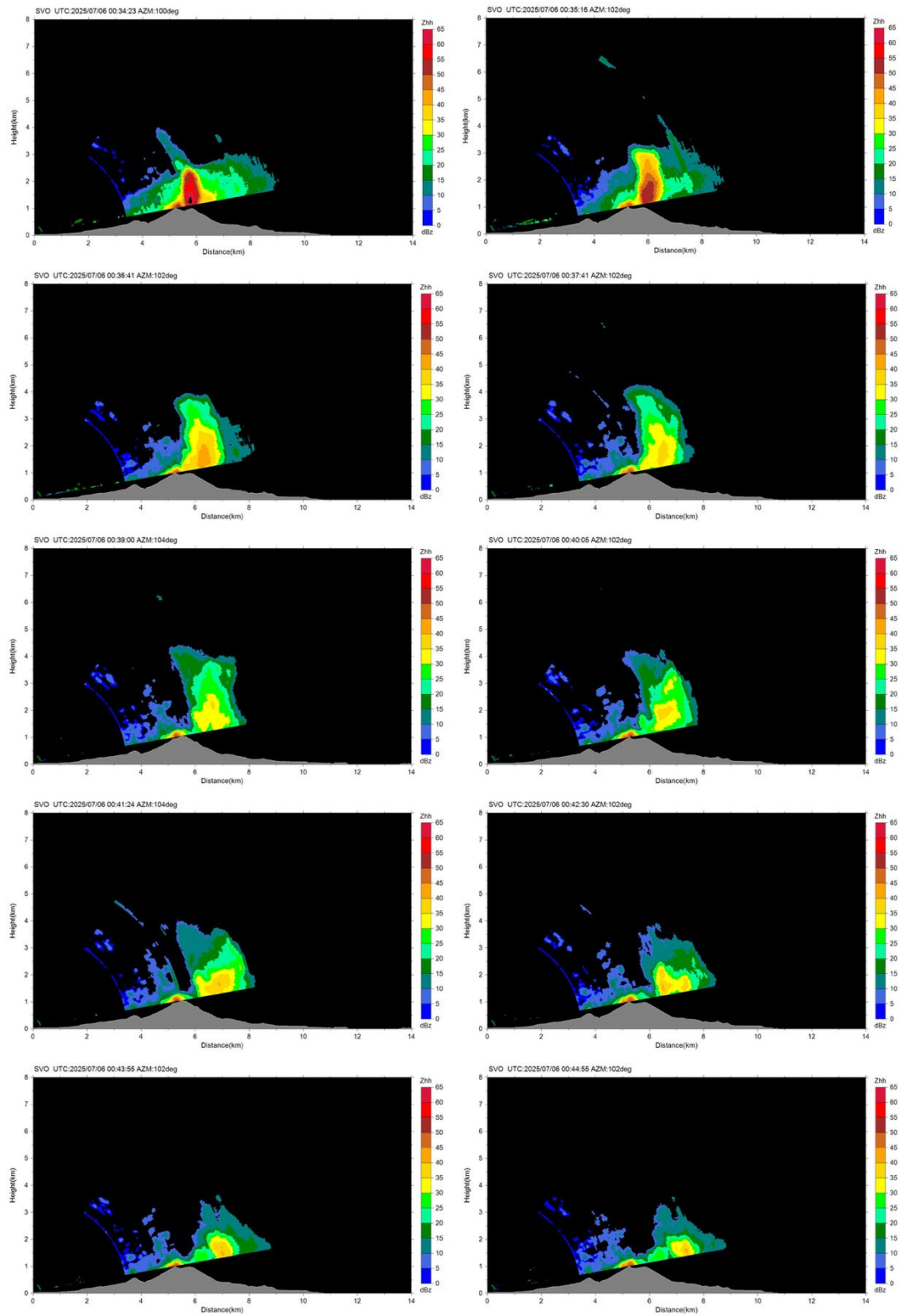


図 60 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。
 2025 年 7 月 6 日 9:34~9:44 のレーダによる噴火映像。
 図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

2025 年 7 月 17 日 13:28 (世界時刻 4:28) 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 3,300 m、噴煙の流向は北である。図 61

に噴火開始直後（13:28）から14分後（13:42）までのレーダ反射強度分布を示す。噴火開始直後は、噴煙は高度1,700 mつまり、火口縁上600 mに上昇し、噴火開始後2分後に、噴煙は高度3,000 mつまり、火口縁上1,900 mに上昇した。そして、噴火開始3分後に、噴煙は高度3,600 mつまり、火口縁上2,500 mに、噴火開始5分後に、高度4,300 mつまり、火口縁上3,200 mに達した。その後、噴火開始7分後からは徐々に低下し、噴煙は高度3,200 mつまり、火口縁上2,100 mになった。そして、噴火開始10分後から14分後では、噴煙高度は徐々に低下し、高度2,700 mから2,400 mつまり、火口縁上1,600 mから1,300 mになった。

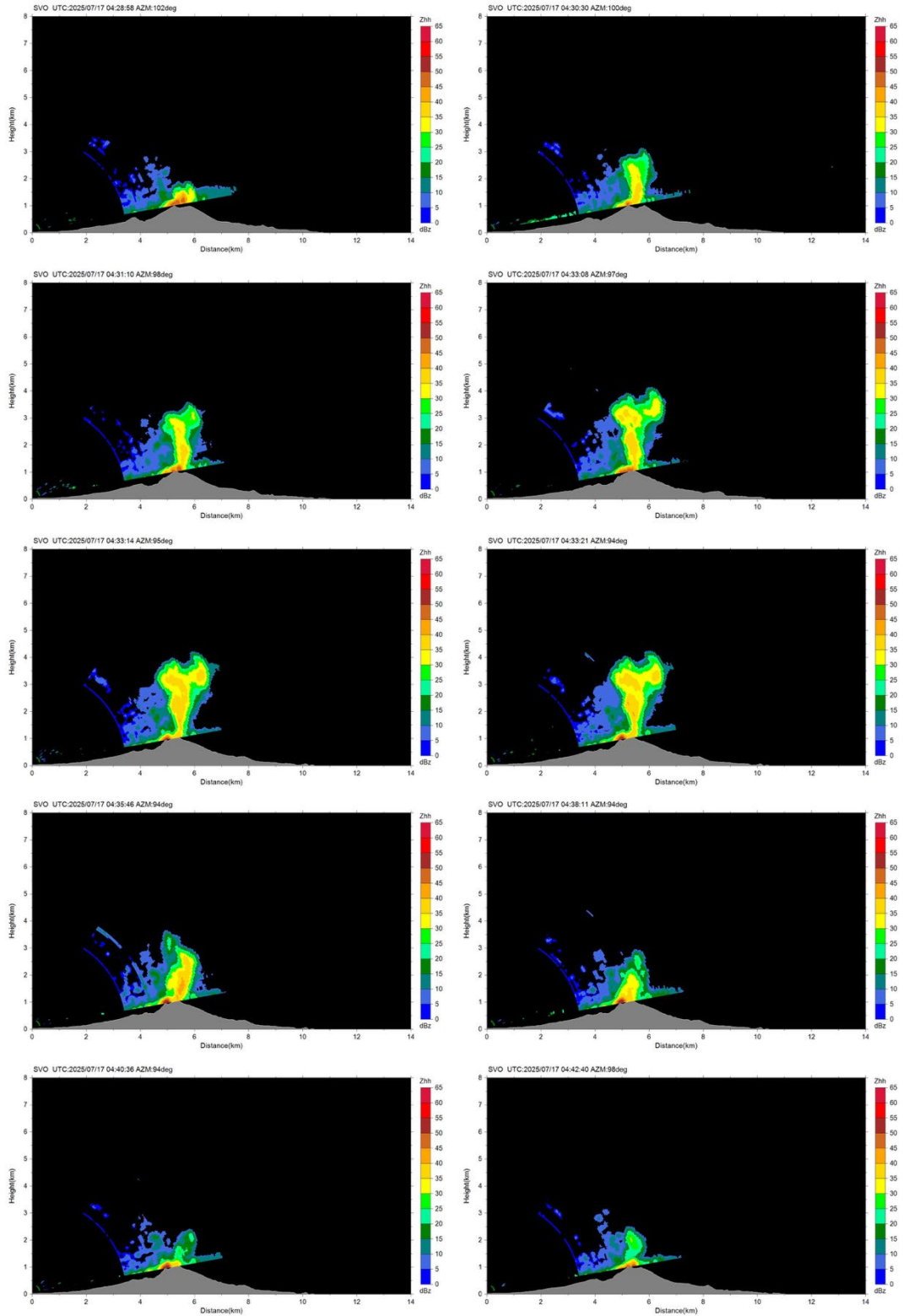


図 61 桜島火山観測所レーダによる RHI スキャンによる反射強度分布。
 2025 年 7 月 17 日 13:28～13:42 のレーダによる噴火映像。
 図の記載の時刻は UTC 時刻。AZM は北から時計回り方位角を示す。

b) ライダー観測

桜島に設置した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、消散係数と噴火活動の関係を検討した。2025年5月15日の連続的噴火では、消散係数が高い領域の移動を検出した。さらに、2025年に開始した火山灰計測のための粒子計による地上付近の粒子数と噴火活動との関係を検討した。

i) 令和7年のライダー稼働状況

2015年以降、桜島火山観測所本館と黒神観測室に設置された2波長偏光ライダーによる自動連続観測が実施されてきたが、装置自身の経年劣化に伴い2025年は桜島火山観測所本館においてのみ観測を行った。ライダー観測では装置から南岳火口付近に向けレーザーを射出し、火山灰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62に、令和7年の日毎の観測時間を示す。なお、2025年12月17日に観測用ソフトウェアの入れ替えが行われ以後のファイル形式が異なるため、その期間については今回の解析から除外している。



図 62 令和7年の桜島火山観測所本館における日毎のライダー観測時間。

ii) エアロゾル消散係数の季節変化

ライダー観測により得られた視線方向のエアロゾル消散係数を月平均し、鹿児島地方気象台から公表されている火山観測情報と対比した。なお、手法は Shimizu et al. (2021)¹⁾に準ずる。図63ではレンジ5.5 km付近が火口周辺にあたり、その付近での消散係数は1月から3月や7月と8月にやや大きい。これらの時期にはある程度噴火も観測されているが、最も噴火の回数が多く火山灰放出量も多い5月については高い消散係数は見られなかった。5月には鹿児島地方気象台における地上風速では西風または南風が卓越しており、火口西側からの観測では火山灰が検出されにくい条件にあった。一方、手前側の消散係数では7月に極大が見られた。同月の

月間降水量は平年値のほぼ半分であったことから、降水による火山灰の大気中からの除去が弱く長期間に渡って浮遊したと考えられ、地上風では東風が卓越していたため桜島火山観測所側に粒子が届きやすい状況だったことがこのような結果に繋がったものと考えられる。

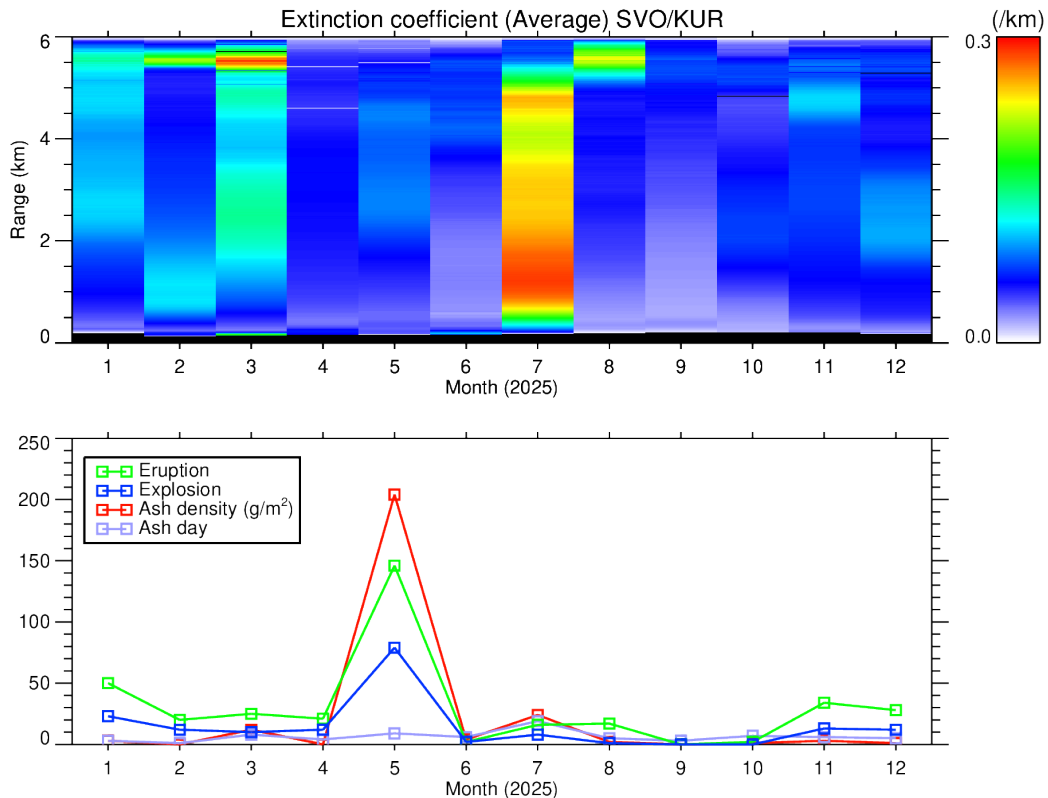


図 63 (上) ライダーにより得られた月平均 532 nm エアロゾル消散係数のレンジ方向分布 (下) 鹿児島地方気象台による月毎の噴火 (緑) と爆発 (青) の回数、降灰量 (赤)、降灰日数 (紫)。

iii) 2025 年 5 月 15 日に発生した噴火・爆発のライダー観測

2025 年 5 月 15 日の観測結果では、通常あまり見られない特徴的な信号の変動パターンが観測された。図 64 は、532 nm 後方散乱強度の距離時間断面図である。桜島の南岳火口直上が距離 5.5 km 付近で、その周辺や手前には雲による散乱がしばしば見えているが、11 時 40 分過ぎから距離 4 km あたりまで近づいてくるシグナルが見られ、11 時 35 分の噴火による火山灰が拡散する様子を捉えたものと考えられる。その後、14 時から 15 時にかけて距離 7~8 km 付近で強い散乱が確認され、火口よりも遠方 (上方) に輸送された火山灰が高濃度で浮遊していたことを示している。さらに 18 時以降において数度にわたり手前側に近づいてくるシグナルが見られるが、その出現時刻は気象台が報告する爆発の時刻 (21 時 38 分、21 時 46 分) とは対応していない。これら手前に進むシグナルは、火口から噴出した火山灰をその瞬間に捉えたものではなく、前述のように上空を漂っていた火山灰がライダー望遠鏡の視野内に輸送されてきたことを示すものと考えられる。なお、17 時頃に高度 7 km 付近に強い散乱が見られるが、これは一旦 18 時頃までに雲によって遮られた後

に再び 5.5 km 付近で観測されたものと同じ噴煙とみなすことが可能である。その後、距離 4 km より手前で見られた強い散乱部分の消散係数は 1 /km に地殻、Shimizu et al. (2025)²⁾で示された日最高消散係数の出現頻度分布と比較しても相当高濃度な火山灰噴煙であったと考えられる。

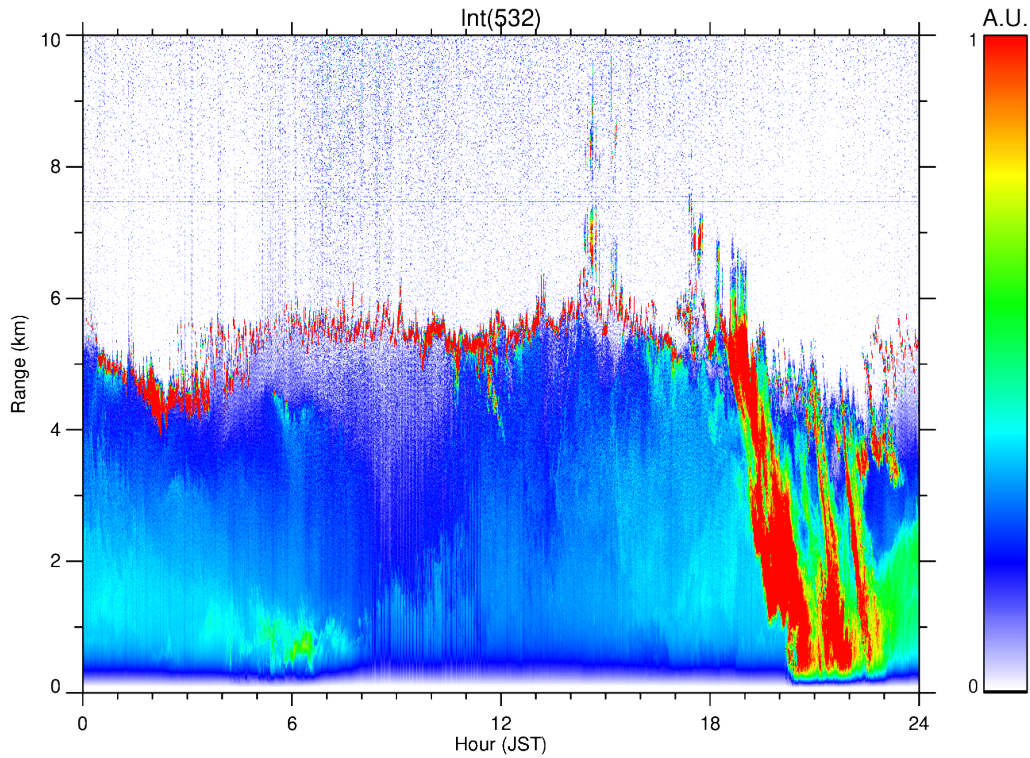


図 64 2025 年 5 月 15 日（日本時間）の 532 nm 後方散乱強度の距離時間断面図。

iv) 火山灰計測計により得られた地上付近の粒子数

2025 年 1 月に桜島火山観測所本館、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。この粒子計は、吸引した空気にレーザー光を照射し含まれる粒子からの散乱光強度をモニターすることで粒径 15 μm 以上の粒子数をカウントするものである。2025 年通年での粒子数変動を図 65 に示す。年間を通じて卓越する西寄りの風の影響で、ほとんどの期間で黒神観測室における値が桜島火山観測所における値を上回っているが、7 月後半に限り桜島火山観測所の値が高い。前述の月平均消散係数で 7 月に手前側で高い値が見られたことと対応している。また、図の上部には鹿児島地方气象台による噴火および爆発の時間を示している。噴火・爆発の間隔が広がった 6 月と 9 月から 10 月には粒子数が少なく、多数の粒子が観測されたのは噴火・爆発の時期から 1 ヶ月以内であることが分かる。

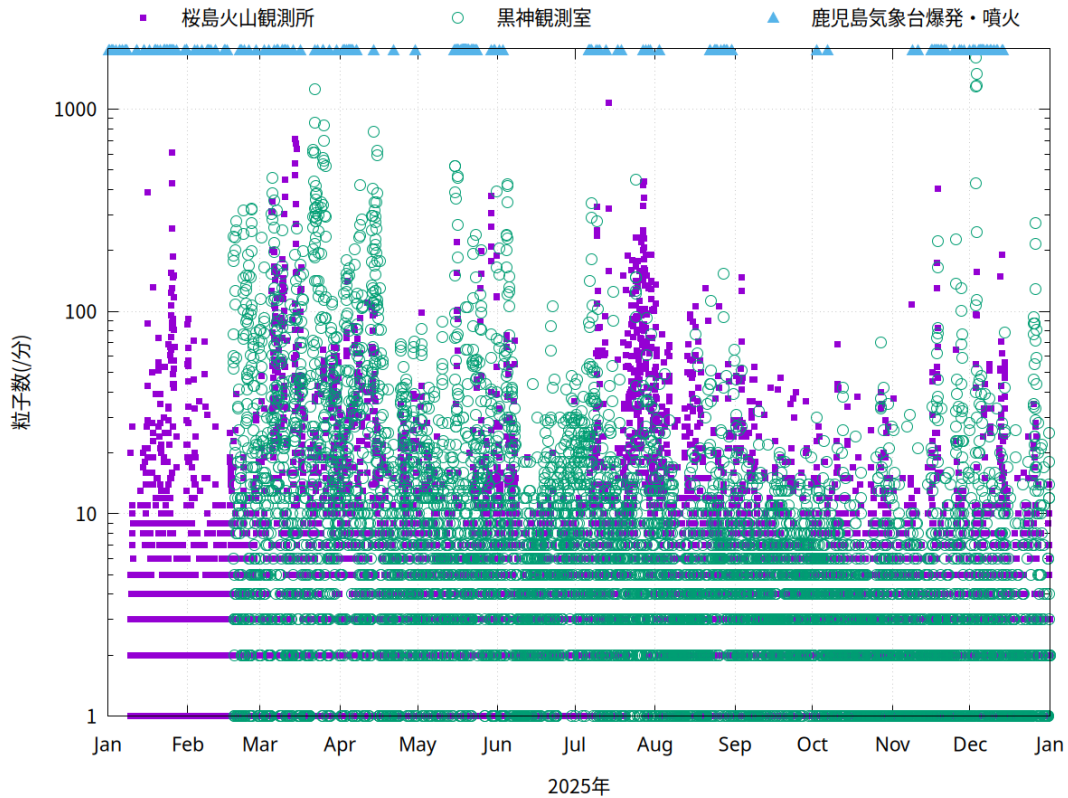


図 65 火山灰計測計により 2025 年に 2 地点で観測された毎分の粒子数
 (紫四角：桜島火山観測所、緑丸：黒神観測室)。
 鹿児島地方気象台における噴火・爆発の報告時刻を上部に青三角で示す。

v) GNSS 観測

GNSS 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水水蒸気量と関連付けて検討するために必要な、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解析を検討した。また、これまでに設置した GNSS による噴煙観測を継続するとともに、故障した GNSS 装置の取り替えを行った。また、利用中のデータ通信回線の終了に伴い、新回線に移行した。

vi) マルチパス低減解析法の検討

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。今年度は昨年に評価を実施した Multipath Hemispherical Map (MHM 法) を適用することによる長期のキネマティック GNSS 時系列の安定性を評価した。具体的には、衛星系として GPS、Galileo、QZSS を対象として、2023 年 1 月 1 日から 2023 年 12 月 31 日までの 1 年間にわたり、30 秒サンプリングのキネマティック相対測位解析を実施した。解析ストラテジとして通常用いられる double-difference (DD) 法を用いた。その結果、日々の中央値位置からの座標擾乱の水平分布に見られた斜行状の系統的パターンは、補正後に顕著に抑制され、マルチパスに起因するノイズが効果的に低減されることが確認された (図 66)。この改善は特定期間に限られず年間を通じて概ね一貫して

認められ、とくに水蒸気増加により座標時系列の安定性が低下しやすい夏季においても補正効果が維持された。以上より、本手法は 30 秒キネマティック測位における長期連続時系列解析に対しても安定したマルチパス低減効果を有することが示された。同成果は位相残差による噴煙検知の精度向上に直接つながる重要な成果である。

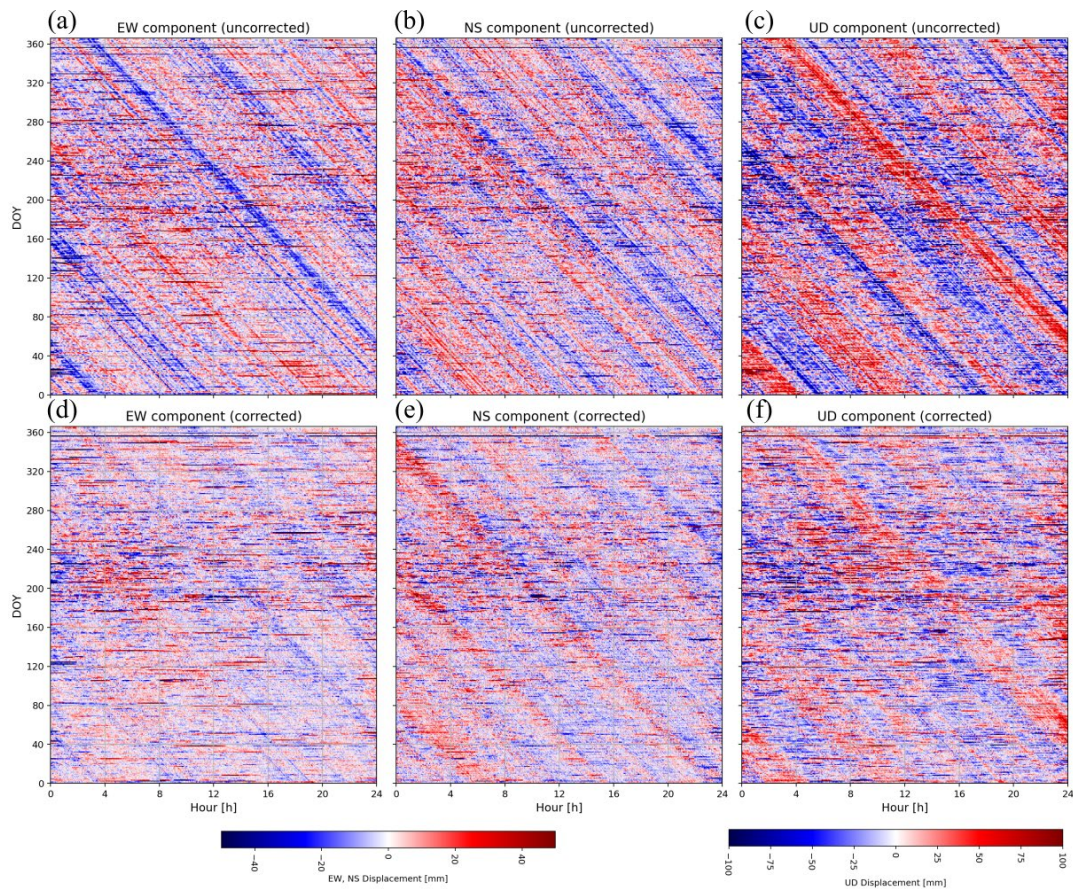


図 66 1 年間の 30 秒キネマティック相対測位解析結果 (GEJ) に対する MSS-MHM 補正の効果。DD 解析により、日々の中央値位置からの座標擾乱の水平分布に見られる斜行状の系統的ノイズが顕著に抑制され、年間を通じて安定したマルチパス低減効果が確認された。上段が補正前、下段が補正後。

vii) GNSS 受信機の更新

KASG 観測点において 2025 年 5 月に障害が発生した。同年 5 月 26 日からモバイル回線による通信ができなくなり、同 6 月 4 日に現地で調査したところ、GNSS 受信機が外部からの操作を一切受け付けないいわゆるハングアップの状態になっていた。GNSS 受信機の電源を強制的に切断してから再投入すると正常に動作するようになった。その後 2025 年 9 月に、KASG 観測点でもう 1 回、さらに TAKM 観測点でも同様の障害が発生し、同様の対処で復旧した。図 67 にこれらの障害発生による欠測期間を示した。今後も同様の障害が発生すると長期の欠測を招く恐れがあるが、この障害の発生原因は不明で再現も困難なため機器の修理による対応が難しい。そこで新たに GNSS 受信機を 2 台購入し、2026 年 3 月 13 日に KASG および TAKM 観測点の機器を更新した。更新後まだあまり時間が経っていないが、これまでのところ順調に連続観測を続けている (図 67)。

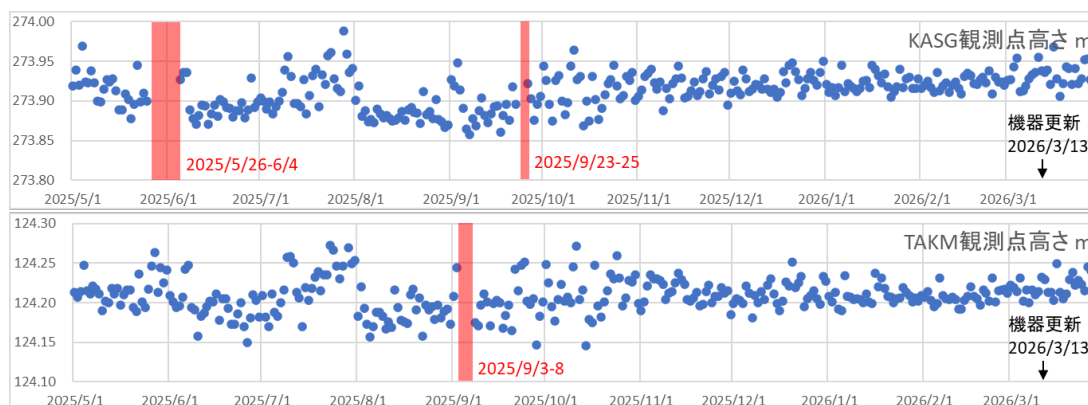


図 67 KASG および TAKM 観測点において観測された観測点の高さ。
赤の網掛け部分は GNSS 受信機の障害による欠測。

c) ディストロメータによる地上観測

令和 6 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と降灰調査を桜島で実施した。なお、2024 年の火山灰量は約 20 万トンと少なかったが、2025 年は噴火頻度が高く 2025 年を通じた火山灰量は約 112 万トン（鹿児島県³⁾の調査結果に基づく推定値）であった。また、2025 年 6 月 22 日に霧島山新燃岳において 7 年ぶりに噴火が発生したため、地上観測および降灰調査を実施した。

i) ディストロメータによる地上降灰観測

令和 6 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。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遮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配置を図 68 に示す。各観測点では、時間雨量相当量、粒子数、センサーの温度、電源電圧に加え、粒径ごとの 30 クラスと落下速度ごとの 32 クラス、合計 960 クラスに分けた粒子数が 1 分ごとに記録される。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されたものをあわせて 21 台のディストロメータが桜島において稼働している。今年度は、HIK、NAB、ARI、KIT の各観測点の機器を交換した。

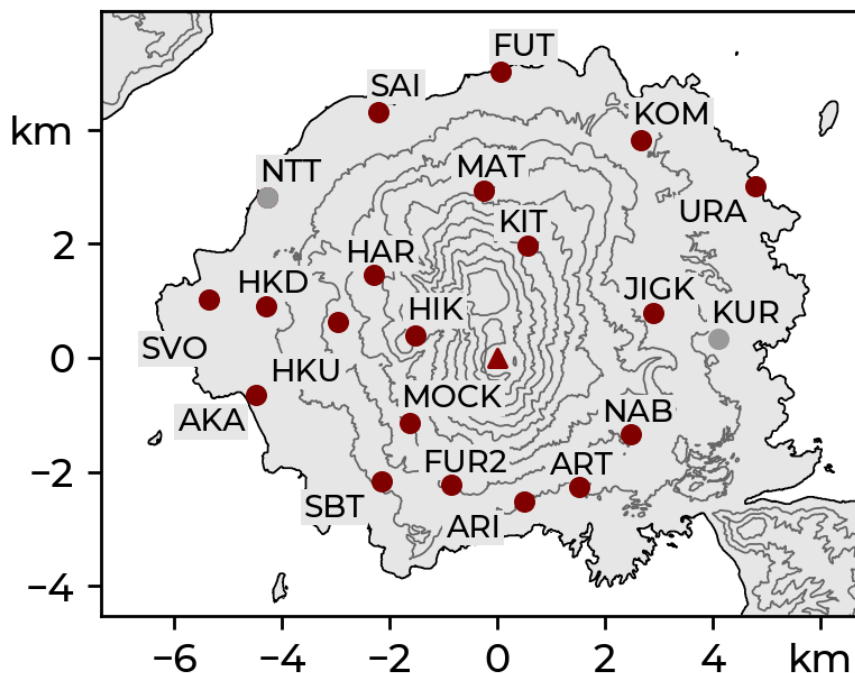


図 68 桜島におけるディストロメータの配置図。

赤丸は本プロジェクトにおいて設置した観測点、灰色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 火口の位置を示す。

ii) ディストロメータ観測による降灰の観測事例

2025年5月15日から16日にかけての南岳の噴火は、断続的な爆発的噴火を伴う連続噴火で、15日10時45分頃から正午頃まで比較的多量の火山灰を放出した後やや勢いを弱めながら翌朝未明まで継続した。最大噴煙高度は火口上約3,000mであった。この2日間は風が弱く、噴煙は当初東方に向かい、15日16時頃からは風向の変化に伴って次第に北方に流れた。南岳の東方のディストロメータ設置点のうち、降灰分布域の中央にあたるKURやJIGK観測点では計器の不調により火山灰の検出がなかったが、NABおよびURAにおいて降灰が検出された。

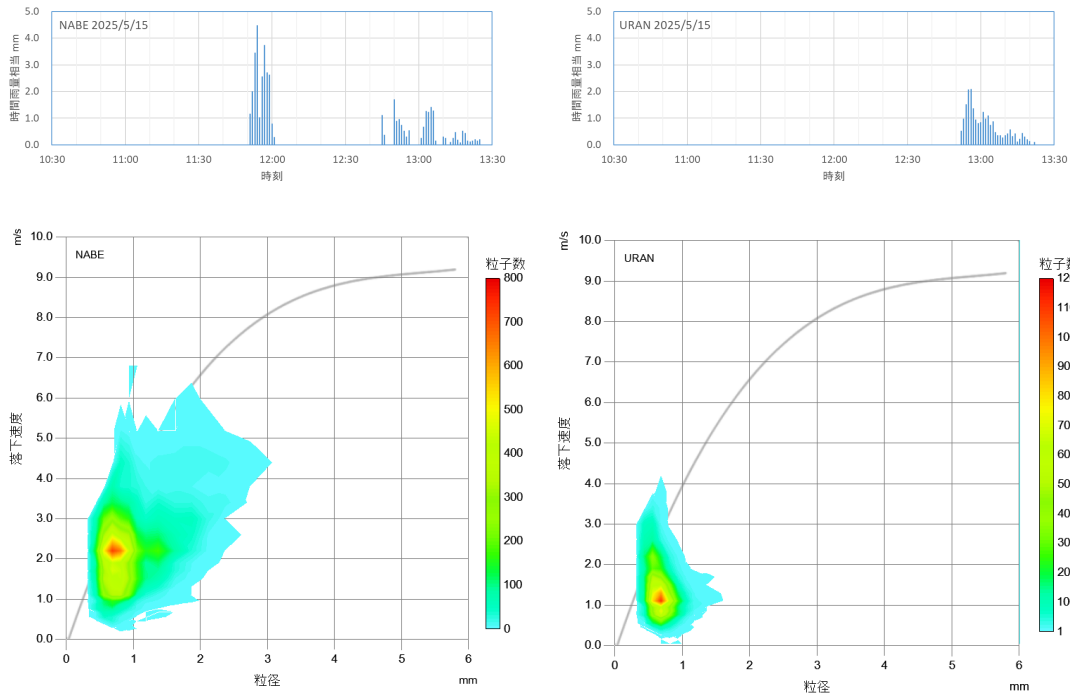


図 69 2025 年 5 月 15 日 10 時 30 分から 13 時 30 分までのディストロメータ観測による時間雨量相当量の推移（上段）とディストロメータ観測による検出粒子の粒径－速度分布（下段）。観測点 NAB（左）および URA（右）。

上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）⁴⁾。

NAB および URA におけるディストロメータ観測の結果を図 69 に示す。図 69 の上段は、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。降灰が検出され始めたのは、NAB では 11 時 51 分と 12 時 45 分、URA では 12 時 52 分であった。NAB と URA の降灰到達時刻の差は噴煙の運搬状況を反映していると考えられる。2025 年 5 月 15 日 10 時 30 分から 13 時 30 分の 120 分間にディストロメータで降灰が検出されたのは NAB で合計 42 分、URA で合計 30 分であり、累計の雨量相当量は NAB で 0.70 mm、URA で 0.35 mm であった。この雨量相当量は後述のキャンペーン観測の結果からみて過少であるように見える。運用中のディストロメータの一部は経年劣化が相当程度進行しており、NAB および URA においてもレーザー光強度が設置当初の 3 分の 1 から 4 分の 1 程度になっていたことから、本来検出可能な降下粒子の一部を検出できなかった可能性がある。粒径－落下速度分布をみると、双方の観測点で卓越する粒径はいずれも 0.8 mm 程度であるが、NAB 観測点の方が 1 mm より大きい粒子の割合が高く落下速度も速い傾向にある。これは、噴煙の運搬過程で粒径の大きい単独粒子はより早く地表に達し、見かけ密度の低い凝集粒子の割合が火口から距離が離れるにしたがって増すことによると考えられる。

2025 年 7 月 6 日から 7 日にかけての南岳の噴火は、6 日 9 時 33 分の噴煙高度 3,000 m の噴火、同日 12 時 57 分の噴火を経て、同日 13 時 46 分から 23 時頃まで連続噴火、さらに 7 日 2 時 24 分から 9 時ごろまで連続噴火が発生した。この噴火に

よる噴煙は南東方に流れ、降灰範囲内に位置するARIおよびNABのディストロメータ設置点で降灰が検出された。

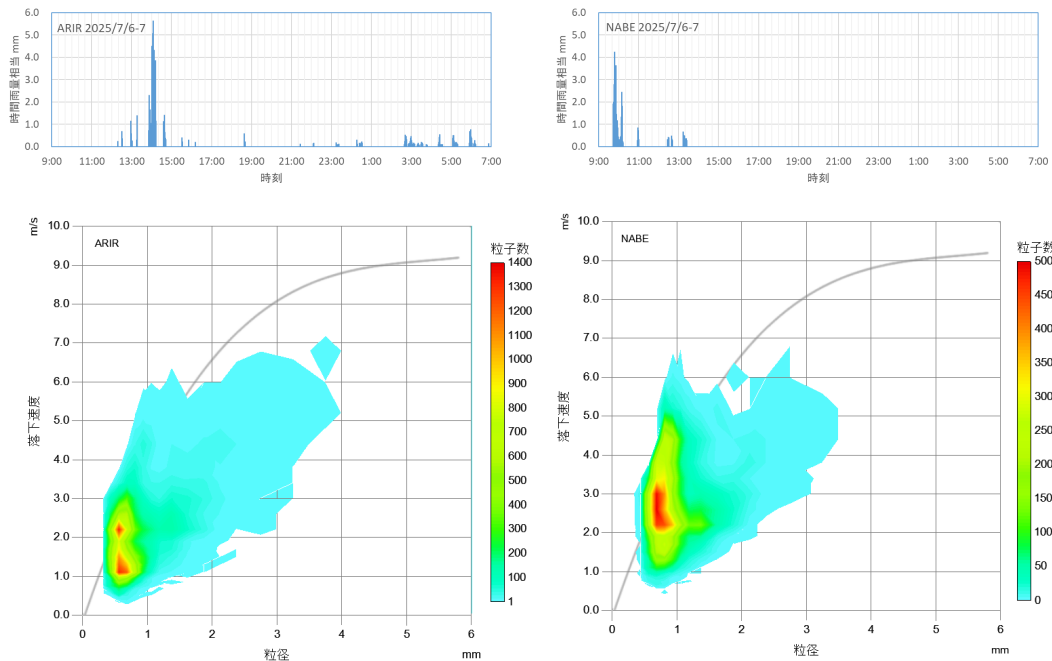


図 70 2025 年 7 月 6 日 9 時から 7 月 7 日 7 時までのディストロメータ観測による時間雨量相当量の推移（上段）と、ディストロメータ観測による検出粒子の粒径－速度分布（下段）。観測点 ARI（左）および NAB（右）。下段の図中の曲線は雨滴の粒径と落下速度の関係（Gunn and Kinzer, 1946）⁴⁾。

これら 2 点におけるディストロメータ観測の結果を図 70 に示す。同図の上段は、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。NAB 観測点において降灰が検出され始めたのは 6 日 9 時 33 分の噴火の 10 分後からで、同日 13 時 24 分以降は検出がない。他方 ARI 観測点では 6 日 12 時 18 分に最初の降灰の検出がみられ、7 日 7 時頃まで断続的に降灰の検出が認められる。このような差異は NAB 観測点が降灰の中心からやや離れた位置にあることを反映しているものと考えられるが、NAB 観測点のディストロメータのレーザー強度は設置当初に比べて ARI 観測点の 2 分の 1 程度に対して 6 分の 1 程度まで減少しておりディストロメータの検出感度が大きく低下していた可能性も否定できない。2025 年 7 月 6 日 9 時から 7 月 7 日 7 時までの間にディストロメータで降灰が検出されたのは ARI で合計 132 分、NAB で合計 50 分であり、累計の雨量相当量は ARI で 1.34 mm、NAB で 0.87 mm であった。先述と同様に計器の経年劣化による検出度の低下が疑われる。粒径－落下速度分布は双方の観測点で大きな差はなく卓越する粒径はいずれも 0.8 mm 程度である。これは、両観測点が南岳から概ね同距離に位置しており火山灰粒子の移流過程が似ていたものと考えられる。

iii) ディストロメータの更新

前節で述べたように、桜島に設置されたディストロメータは経年劣化が進行しており複数の観測点で十分な観測を行うことができなくなっている。そこで令和7年度に PARSIVEL²ディストロメータを4台購入し、令和8年2月時点の計器の劣化の状況を調査し、劣化の程度と卓越風向や観測点配置を考慮して、NAB、ARI、KIT、HIKの4か所のディストロメータを購入した機器に更新した（図71）。



図 71 機器更新したディストロメータの設置状況の例（左：NAB、右：KIT）。

iv) 霧島山新燃岳の地上降灰観測

2025年6月22日に霧島山新燃岳にて7年ぶりに噴火が発生し、その活動把握のためディストロメータおよび自動降灰採取装置 SATSUMA にて降灰観測を行った。

SATSUMA はシリンジを回転させ任意の時間間隔で火山灰を採取する装置である。シリンジの底には穴が開いていて雨水が排出され、その上に火山灰試料が流出しないように濾紙が敷かれている。ディストロメータは高時間分解能で即時的な観測が可能である利点があり、SATSUMA は分析によって火山活動推移を評価するのに利用できる火山灰試料が研究者の現地調査よりも高時間分解能で採取できる利点がある。6月26日にディストロメータのみの観測点が設置され、7月21日からは火口を囲むように5地点での観測体制となった（図72）。

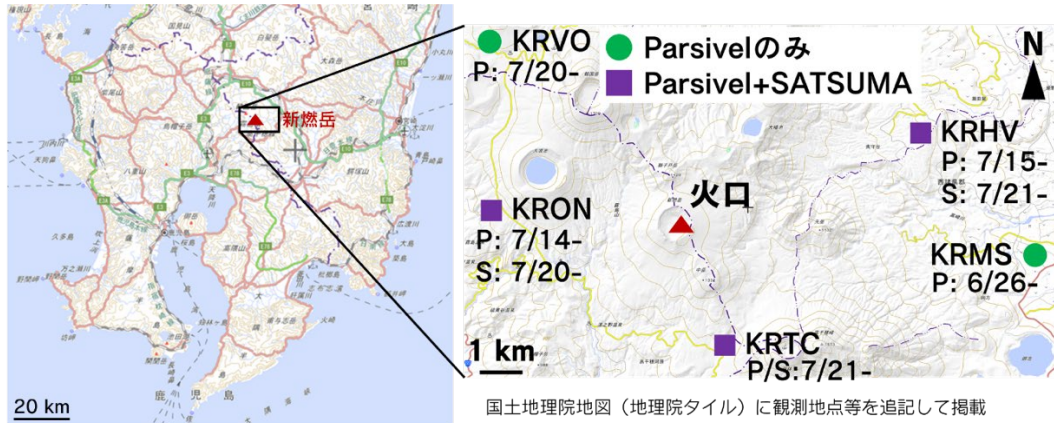


図 72 霧島山新燃岳におけるディストロメータおよび SATSUMA の位置図。

これらのうち 3 点はディストロメータと SATSUMA の併置観測（図 73）、2 点はディストロメータ単独での観測である。SATSUMA は設置から 9 月末まで 1 日 1 回の頻度で試料を採取する設定をし、それ以降の年度末までは 1 週間に 1 回の頻度で試料を採取するように設定した。



図 73 ディストロメータと SATSUMA の併置観測の様子。

7 月 15 日以降 SATSUMA で 10 g/m^2 以上の火山灰が採取されたのは 8 月 10 日と 8 月 28 日の 2 回であった。特に 8 月 28 日には 4 時 53 分に噴煙高度が火口縁上 5,500 m の噴火があり、5 時から 12 時にかけて 4 回の粒子検知が見られた（図 74）。

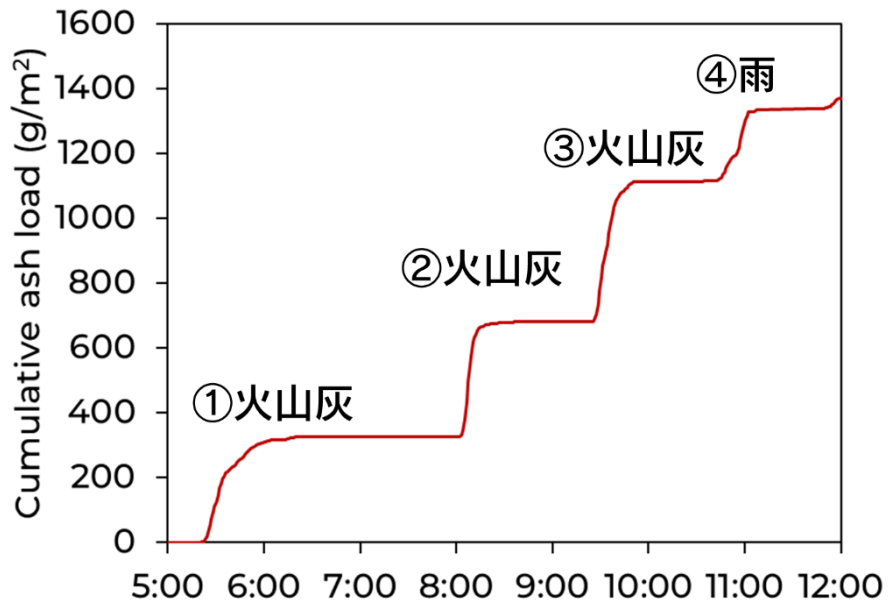


図 74 2025 年 8 月 28 日ディストロメータにより計測された降灰量の時系列。

それぞれの検知イベントにおいて降下したものが火山灰か雨かを粒径一落下速度分布によって判定した (図 75)。

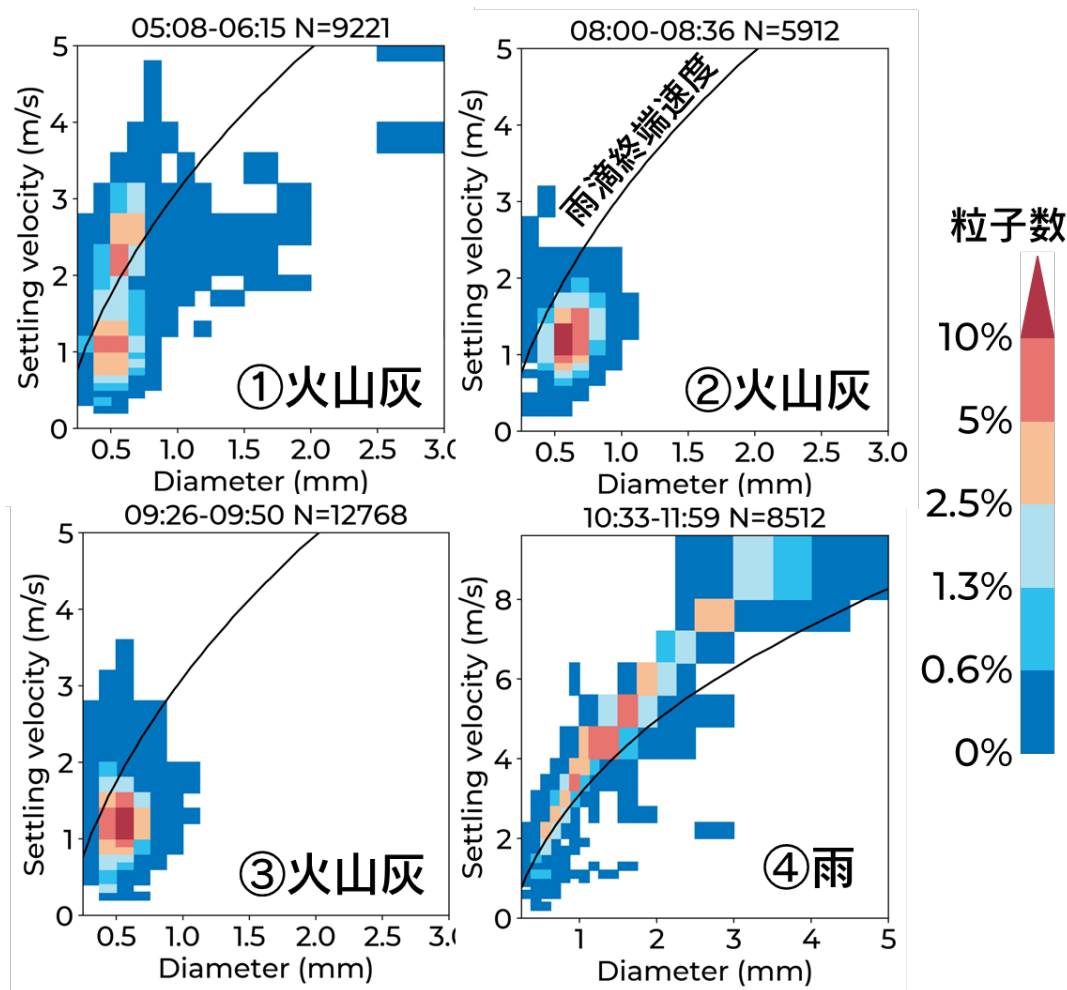


図 75 図 74 における 4 回の粒子検知における粒径—落下速度分布。
N は粒子数を示す。図内の曲線は雨滴終端速度を示す。

最初の 3 回の粒子検知は、検知が集中した粒径範囲がいずれも 0.375-0.75 mm と狭い範囲内であった一方、4 回目の粒子検知は 0.5 mm から 3 mm と広い範囲内にあった。また、4 回目の粒子検知では雨滴終端速度曲線に近い粒径と落下速度の相関が見られたが、1 回目から 3 回目では見られなかった (図 75)。降灰と判定した 3 回の粒子検知のそれぞれ 30 分前後の時間帯において気象庁の観測によって爆発があったと判定されていた。したがって、火山灰と雨の判別は適切に行われたと言える。

5 時から 11 時にかけて 3 回の 200 g/m² 以上の降灰がディストロメータで検知された (図 74)。3 回の累計の降灰量は 1.1×10³ g/m² と推定されたが、SATSUMA および採取皿で採取された試料に基づき見積もられた降灰量はそれぞれ 8.6×10² g/m²、9.1×10² g/m² であった。ディストロメータの観測結果は試料採取に対して 2 割程度の誤差で降灰量を見積もることができ、高精度な計測であることが示された。また、採取された火山灰をレーザー回折により粒度分析をしたところ、主に 2-3 φ の粒子からなり、1.5 φ から 8 φ までの広い粒径範囲の粒子が含まれていたことがわかった (図 76)。

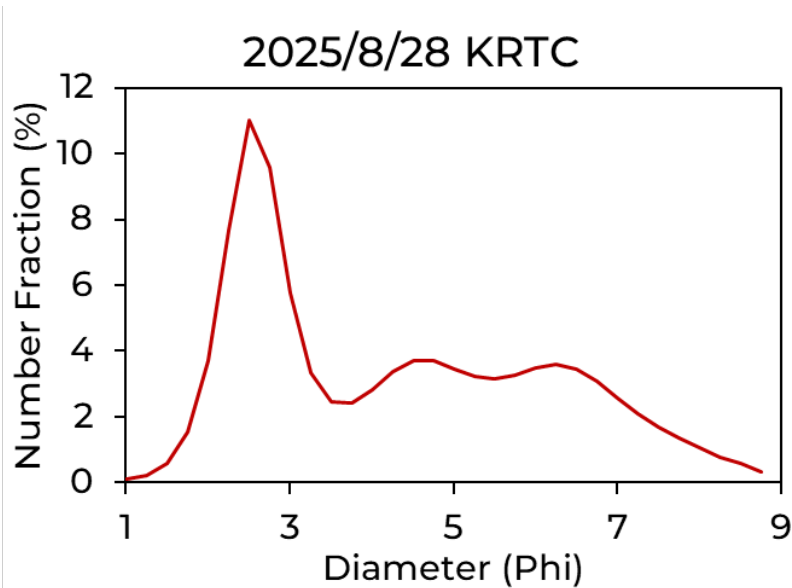


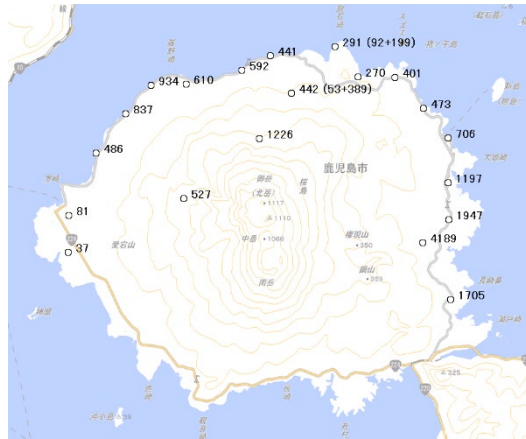
図 76 2025 年 8 月 28 日に SATSUMA により採取された試料のレーザー回折に基づく粒径分布。

この観測事例はディストロメータと SATSUMA を併置して降灰が観測および採取できた初めての事例であり、それぞれの機器によって得られる情報によって補完することで火山灰の噴出状況をモニタリングすることが効果的であることを示すことができた。

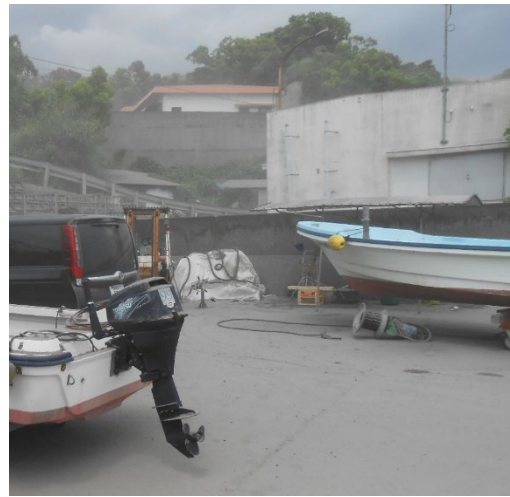
d) 地上における火山灰採集

2025 年は噴火が比較的少なく、降灰量のキャンペーン観測を行った事例も少ないが、いくつかの噴火において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。以下では、ii) 節でディストロメータによる検出事例を示した 2025 年 5 月 15 日から 16 日、および 2025 年 7 月 6 日から 7 日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。

2025 年 5 月 15 日から 16 日に発生した噴火では、降灰は当初南岳の東方に向かいその後次第に北方に向かった。降灰量のキャンペーン観測は 5 月 15 日および 16 日に実施した。図 77 に採取試料地点の位置と降灰量、および降灰の状況を示す。降灰は南岳の東方に多く分布し黒神観測室では 4.2 kg/m^2 が観測された。また、5 月 15 日 16 時台に桜島北方から北東方を通過した際には降灰は認められなかったことから、5 月 16 日の観測時に桜島北部で広く見られた降灰は 15 日 16 時以降のものと考えられる。



黒神観測室 (15日 12:06)



浦之前港 (16日 10:50)

図 77 2025年5月15日から16日に発生した噴火による降灰量分布
(上段: 5月15日、中段: 5月16日) および降灰状況 (下段)。

これらの調査結果を基に、江頭・石原(1979)⁵⁾、Eto (1989、2001)^{6), 7)}と同様の方法で推定した火山灰放出量は約18万トンであった。そのうち、15日16時頃までに降ったと考えられる南岳東方の中心角 30° の扇型の領域の降灰量が約8.5万トンを占め

る。ただし、この日は弱風であったため、火口近傍に降った火山灰量を正確には評価できず上記の推定火山灰放出量は過少である可能性がある。

2025年7月6日から7日に発生した噴火では、最大の噴煙高度は火口上3,000mであり、降灰は南岳の南東方に向かった。降灰量のキャンペーン観測は7月7日に実施した。図78に示すように、火山灰は南東方向の比較的狭い範囲に分布しており、最も降灰量の多かった身代湾では $1,698\text{ g/m}^3$ 、ARIR観測点では $1,613\text{ g/m}^3$ 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3万トンであった。



有村展望所 (7日 10:11)



垂水幹部派出所 (7日 12:27)

図78 2025年7月6日から7日に発生した噴火による降灰量分布(上段)および降灰状況(下段)。

e) 船舶レーダによる噴煙柱のモニタリング

令和 6 年度に引き続き、今年度は桜島火山観測所および黒神観測室に設置された船舶レーダによる噴煙観測を実施した。ここでは 2025 年の主要な噴火であった 5 月 15 日と 11 月 16 日の噴火についての観測結果を述べる。

i) 船舶レーダによる噴煙柱の観測状況

令和 7 年度は桜島火山観測所に固体化船舶レーダを設置し、黒神観測室には固体化船舶レーダとマグネトロン船舶レーダを設置することで、南岳を挟んで東西から噴煙を観測した（図 79）。なお、桜島火山観測所と南岳の間の距離は 5.7 km で、黒神観測室と南岳の間の距離は 3.8 km である。

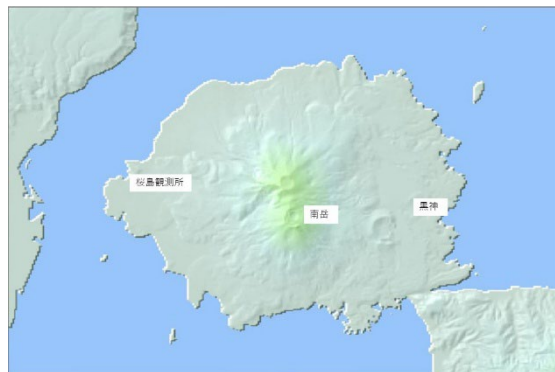


図 79 船舶レーダ配置（桜島火山観測所と黒神観測室）

令和 7 年度の観測においては、桜島火山観測所においては鉛直方向にアンテナを回転させる RHI 観測を行い、黒神観測室においてはマグネトロンレーダにて RHI 観測を行い、固体化レーダにて水平方向にアンテナを回転させる PPI 観測を通年で実施した。

令和 6 年度の観測においては PPI 観測時に噴煙をレーダ信号のビーム内で捉えるためにアンテナ設置仰角を 25° としたが、この観測によって距離 4 km から 5 km においてビーム幅より広い覆域からエコーが得られたので、令和 7 年度では仰角を 30° にして観測を行った（図 80）。



図 80 仰角 30° に設定された PPI 観測用レーダアンテナ

仰角を 30° にしたことで山腹における電波の反射であるグラウンドクラッターが減少した。

ii) 2025 年 5 月 15 日の噴火

ここでは、船舶レーダ観測結果を 2025 年 5 月 15 日 11 時 35 分からの噴煙高度が火口縁上 3,000 m の噴火について述べる。

2025 年 5 月は鹿児島地方気象台で噴煙高度が記録された噴火が 102 回と比較的高頻度であった。中でも 5 月 15 日は高頻度で噴火していて、船舶レーダにて検知された噴煙高度 1,000 m 以上の噴火は 109 回あった (図 81)。

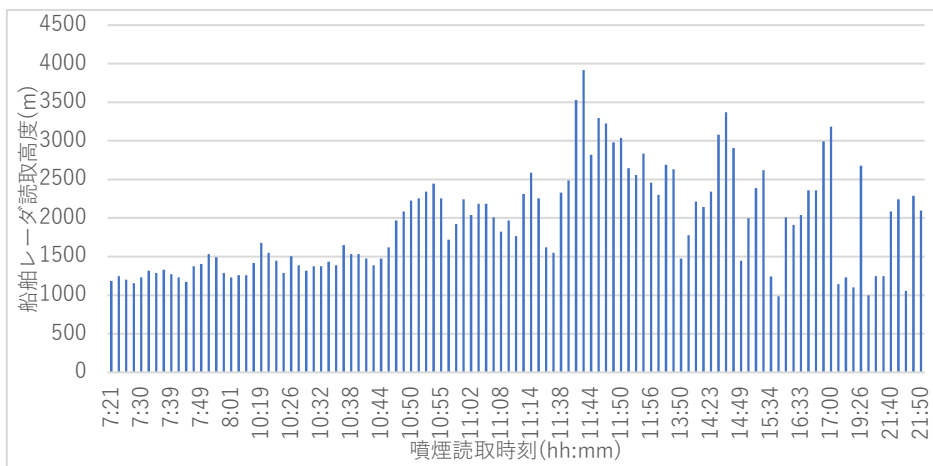


図 81 船舶レーダで読み取られた桜島南岳噴煙高度 (2025 年 5 月 15 日)。

鹿児島地方気象台の報告では噴煙高度（火口縁上）は7時8分の噴火では1,000 m、11時35分の噴火では3,000 m、21時38分の噴火では2,500 m、21時46分の噴火では2,500 mであった。図81に示すとおり、気象台報告の噴火の時間以外においても、10時50分から11時20分にかけて噴煙高度が2,000 mの噴煙が船舶レーダによって複数回検知されている。また、11時38分から13時50分にかけては噴煙高度が2,500 mを超える噴煙が複数回検知されており、このうち2回は3,500 mを超えていた。13時50分から21時50分までは、噴煙高度は徐々に低下の傾向はありつつも、14:23分から14時39分や16時33分から17時において噴煙高度が3,000 mを超えるものが検知されている。

11時35分の噴火について黒神観測室における二つの船舶レーダのRHIとPPIのそれぞれについてエコーを図82に示す。

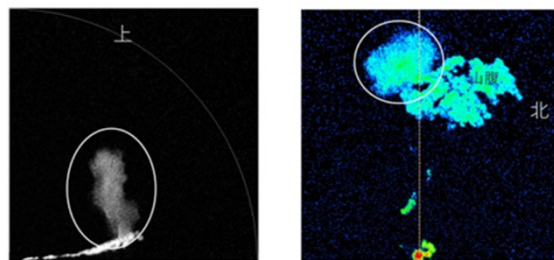


図2 2025/05/15 11:40:26桜島黒神RHI (左), PPI (右)
噴煙高度3000m

図82 2025年5月15日11時40分26秒の黒神観測室船舶レーダのRHI (左)、PPI (右)のエコー。

噴火の5分後では噴煙は3,000 mまで到達していて、南東方向に流れていたのが火口から2 km程の距離で北東方向に向きが変わったことがPPI観測から分かった(図83)。

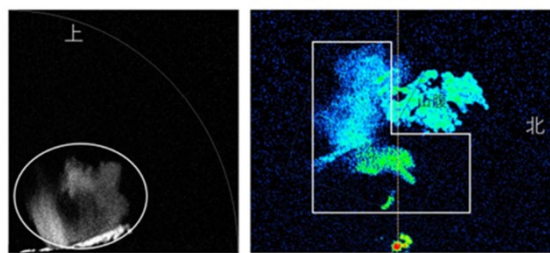


図3 2025/05/15 11:45:00桜島黒神RHI (左)・PPI (右)

図83 2025年5月15日11時45分0秒の黒神観測室船舶レーダのRHI (左)とPPI (右)のエコー。

21時38分の噴火は11時35分の噴火と同様に火口直上に噴煙が上がり（噴煙高度2,500 m）、火口から西方向に流れた(図84)。夜間でも噴煙の高さと水平方向の流れが分かる。

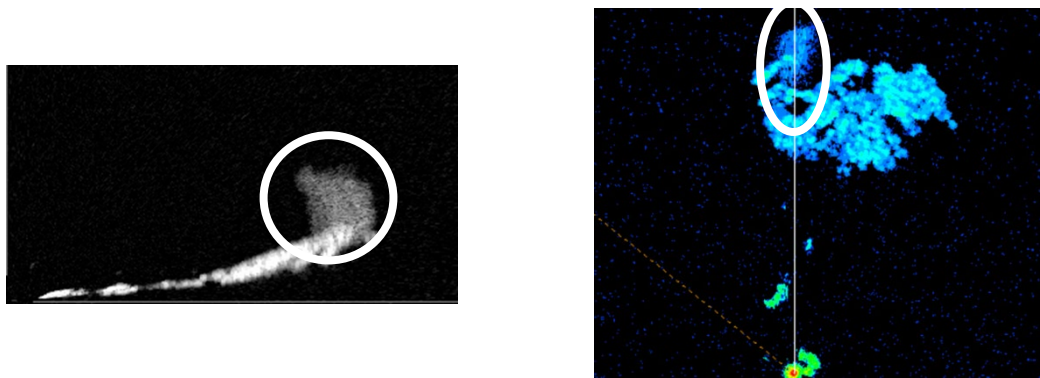


図 84 2025 年 5 月 15 日 21 時 39 分 59 秒の黒神観測室船舶レーダの RHI (左) と PPI (右) のエコー。

噴煙は火口から直上に吹き上がるが多いが、21 時 38 分の噴火直前において火口から斜面に沿って噴煙が流下しているのが確認できた (図 85、図 86)。

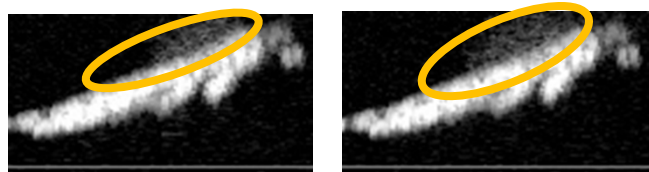


図 85 2025 年 5 月 15 日 21 時 38 分 58 秒 (左) と 21 時 39 分 59 秒 (右) の RHI エコー。

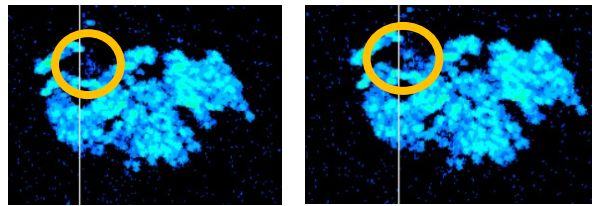


図 86 2025 年 5 月 15 日 21 時 38 分 36 秒 (左) と 21 時 38 分 38 秒 (右) の PPI エコー。

11 時 35 分の噴火直後の噴煙とは別に 11 時 38 分 37 秒と 11 時 38 分 40 秒の PPI 画像においてレキの落下に対応すると考えられるエコーが確認された。RHI 画像 (図 87) では噴煙と重なっているが、PPI 画像では読み取ることができる (図 88)。

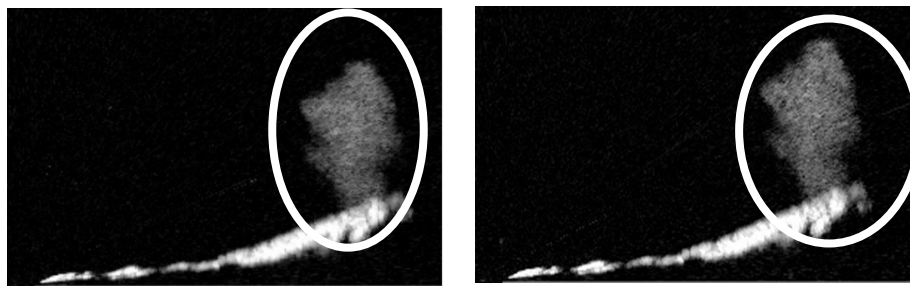


図 87 2025 年 5 月 15 日 11 時 38 分 37 秒 (左) と 11 時 38 分 40 秒 (右) の RHI エコー。

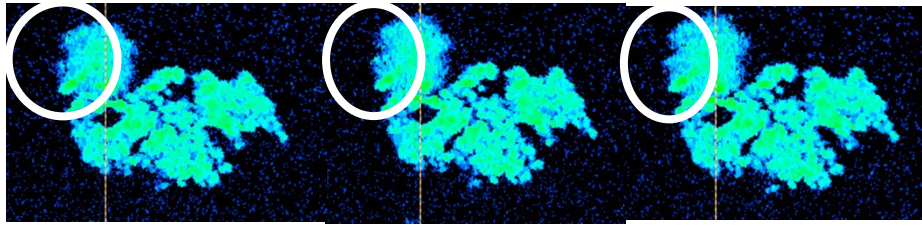


図 88 2025 年 5 月 15 日 11 時 38 分 37 秒 (左) と 11 時 38 分 40 秒 (中) と 11 時 38 分 42 秒 (右) の PPI エコー。

iii) 2025 年 11 月 16 日の噴火

ここでは、船舶レーダ観測結果を 11 月 16 日 0 時 57 分からの噴煙高度が火口縁上 4,400 m の噴火について述べる。桜島火山観測所の RHI 観測データから求めた噴火発生後から 6 時までの噴煙高度変化を図 89 に示す。

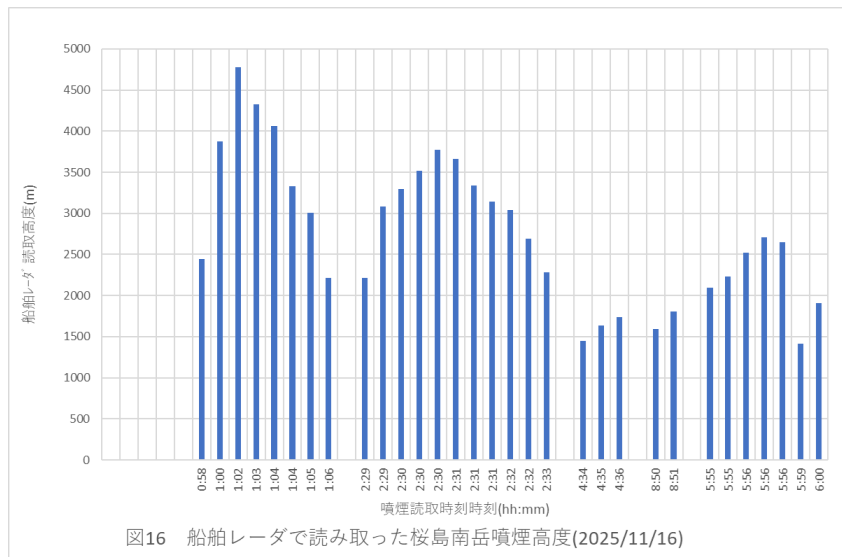


図 89 船舶レーダで読み取られた桜島南岳噴煙高度 (2025 年 11 月 16 日)。

噴火開始から 6 分後には 4,774 m に到達した。この値は気象台の報告である 4,400 m より高い。

噴煙は 5 月 15 日のケースと同様に RHI 観測で高さ方向が把握でき、PPI 観測で水平方向の移動が把握できた(図 90)。0 時 58 分の噴火直後は数回程度(6 回で 15 秒)での観測で噴煙よりも重い地面に落ちるレキに対応するエコーが確認できた。

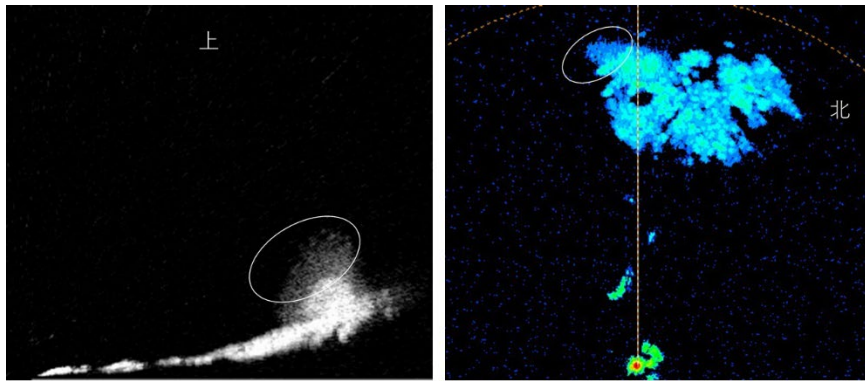


図17 2025/11/16 00:58:42 桜島黒神RHI (左) , PPI (右)
噴火直後の噴煙より重い礫様物質映像

図 90 2025 年 11 月 16 日 0 時 58 分 52 秒の黒神観測室船舶レーダの RHI (左) と PPI (右) のエコー。

以上をまとめると、RHI と PPI を同時に船舶レーダで観測することで、噴煙の移動状況の詳細を把握することがわかり、RHI 観測で認識されなかったレキといった噴煙よりも重い噴出物を PPI 観測と合わせることで認識できたことで同時観測の有用性が示された。重い噴出物に対応するエコーは噴煙高度が 1,500 m から 2,000 m 程度の噴火では確認できなかったが、3,000 m 空の噴火では確認できている。この場合、アンテナ 2 回転の時間以内で確認されている。1 回転が 2.5 秒であるので、高速スキャンの可能な船舶レーダであるからこそ、レキの降下といった重い噴出物の観測が可能となった。4,000 m 以上の噴煙高度であった 11 月 16 日の噴火では 5 月 15 日の噴火よりも 3 倍長い時間で重い噴出物に対応するエコーが確認された。今後の課題としては、船舶レーダのエコーとして移る噴煙やレキでは動態が異なるが、噴煙とレキを区別するために模擬物体などをつかった実験でエコーの比較を行うことが必要である。

f) レーダ観測による火山灰推定の高度化

i) はじめに

本プロジェクト最終年度にあたり、次の二点を意識して研究を実施した。

一つ目は、火山灰放出量の即時把握のために、レーダデータの解析時間を可能な限り短縮することである。従来、噴火事例の解析を行うときに参考とした噴火時刻は、気象庁の桜島噴火情報であるが、この情報は公表されるまでに数週間かかることがある。また、目視や監視カメラなどによる噴火のモニタリングは雨天や雲天時には精度が欠ける場合がある。即時把握には有効ではない。このため、本プロジェクトなどで開発されてきた「レーダデータ三次元解析ツール (ANT3D)」の改良を行った。具体的には、桜島火山観測所の X バンド MP レーダのデータから噴火を検出する機能を追加することである。

二つ目は、比較的、定性的であった噴煙柱の発達過程をより定量的に客観的に評価することである。このために、気象学で利用されている CFAD を用いる。CFAD は

Contoured Frequency by Altitude Diagram の略で、レーダ反射強度などのレーダ観測値が、高度ごとにどの頻度で出現するかを統計的に整理し、等頻度線として示した図である (Yuter and Houze., 1995⁸⁾)。CFAD は降水システムの解析のために開発され、その鉛直構造の統計的特徴の把握、対流雲・層状雲・降雪などのタイプ別比較、衛星レーダと地上レーダとの観測値の比較、モデルの検証などに用いられている。本研究では噴火直後に形成される噴煙柱の構造の変化を客観的に評価するために CFAD を用いた。

ii) SVO-XMP 噴煙柱解析プログラム

「SVO-XMP 噴煙柱解析プログラム」は、京都大学防災研究所の X バンド MP レーダ (SVO-XMP レーダと呼ぶ) のセクタ RHI 観測データを解析するために MATLAB ベースで作成され、三次元レーダデータ解析ツール (ANT3D) に組み込まれた。このプログラムには 2 つの機能が備えられている。噴火事例検出機能と CFAD 作成機能である。各機能とデータの流れを図 91 に示す。

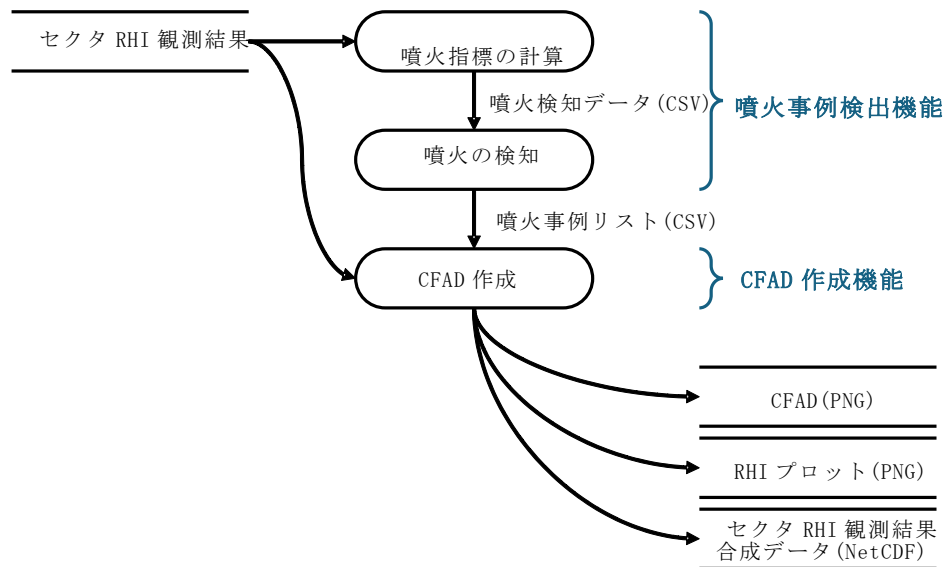


図 91 SVO-XMP 噴煙柱解析プログラムの 2 つの機能とデータの流れ。

・「噴火事例検出機能」

噴火事例検出機能は「噴火指標の計算」と「噴火の検知」から構成される。噴火指標の計算では、XMP 観測データ (.rhi ファイル) を読み込み、特定の領域における噴煙エコーの占有率など、噴火検知に関わる各種指標を計算する。図 92 に処理フローを示す。ここで、噴火検知の指標値の計算方法や事例抽出の具体的なアルゴリズムは何度かの試行錯誤を経て決定される。

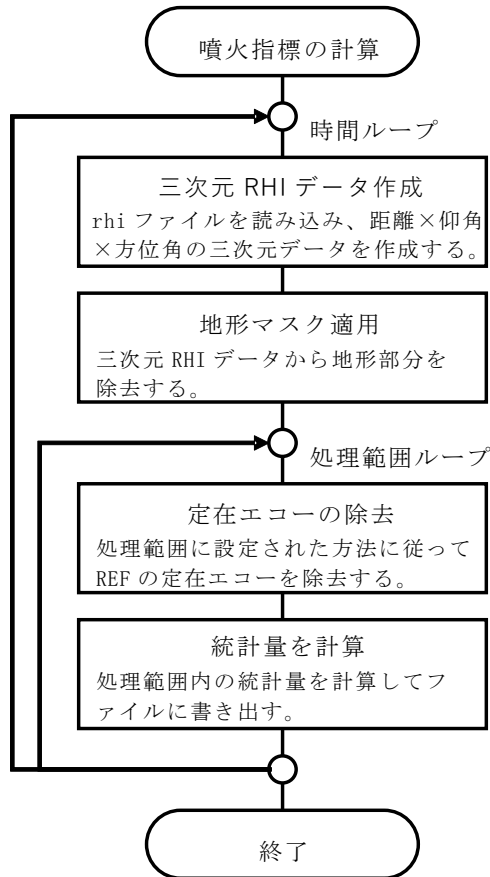


図 92 噴火指標の計算の流れ。

・地形マスクと定在エコー

地形マスクは、各レーダの観測方位毎に、数値標高データを用いて作成した。定在エコーは、各レーダの観測方位毎に、晴天かつ噴煙が無い条件における反射強度 REF[dBZ]の観測結果を平均化（線形単位に変換して平均化）して求めた。桜島を対象に作成した地形マスクと定在エコーを図 93 に示す。なお、同様な図は XMP レーダ観測を実施している口永良部島と諏訪之瀬島でも作成した。

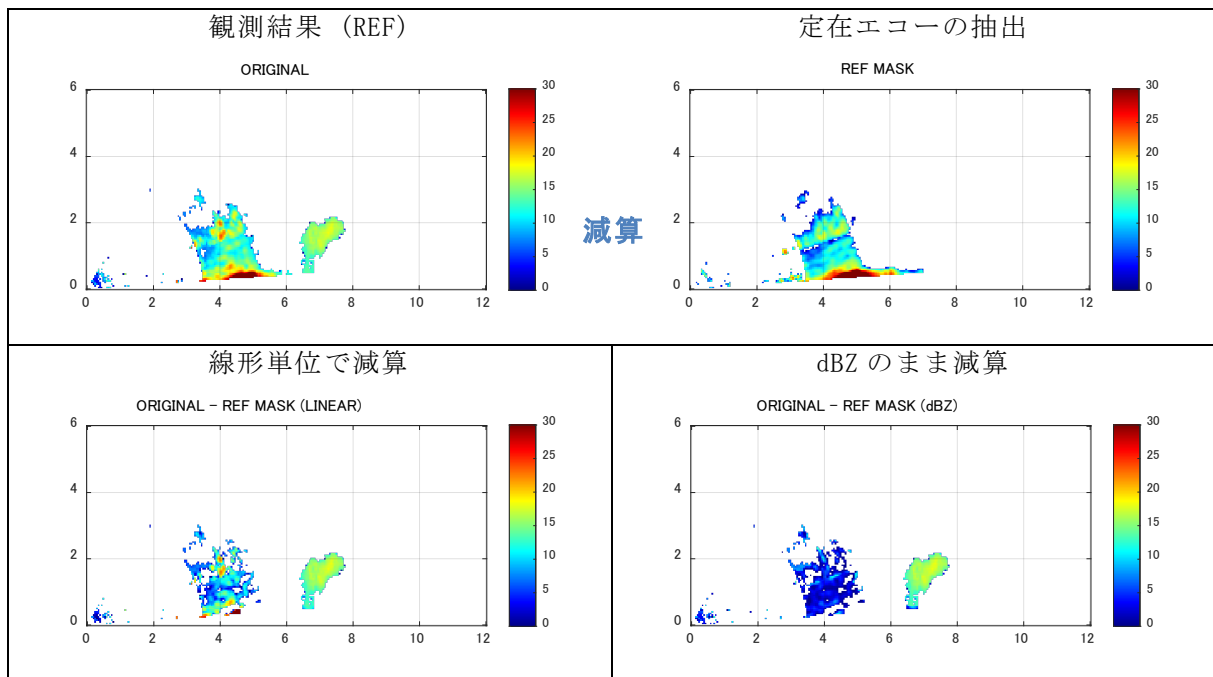
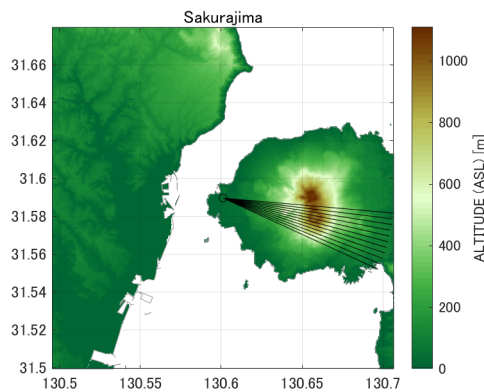


図 93 各方位角の RHI 断面図上の桜島の地形マスクと定在エコーの減算。

・定在エコーの処理

レーダの校正確認などの用途にも利用できるよう、定在エコーの処理方法はユーザが設定した処理範囲毎に以下から選択できるようにした。

- A) 適用：定在エコーが観測されている範囲を除去する。
- B) 非適用：定在エコーは除去しない。
- C) 減算：反射強度 REF から定在エコーを減算する。REF 以外のパラメータは非適用。

なお、定在エコーの除去効果を踏まえて、計算は線形単位に変換せず dBZ で行った。

・処理範囲

指標を求める範囲は火口直上や CFAD 計算領域など複数の範囲を指定することが可能である (図 94 参照)。指定した範囲毎に噴火検知データの CSV ファイルが出力される。

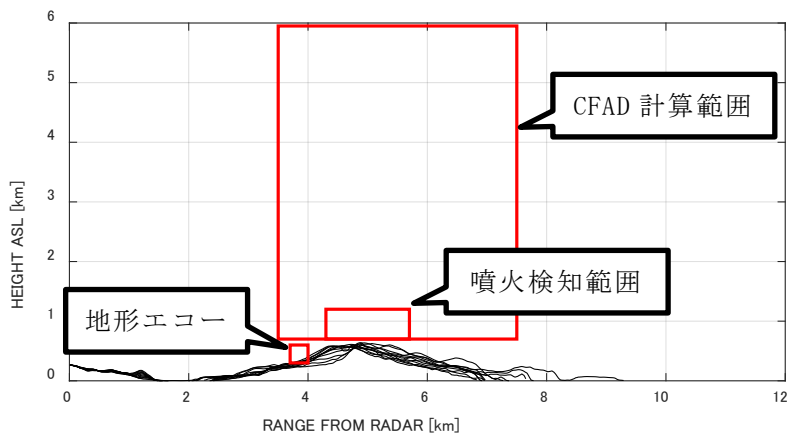


図 94 計算範囲の設定。

・統計量の計算

REF、PHIDP、VEL、AVL (VEL の絶対値) 及び WIDTH を対象に、表 11 の噴火指標を計算する。

表 11 噴火指標

接尾辞	内容	備考
_MAX	最大値	
_MEAN	平均値	REF の平均値は線形単位に直して計算。
_MODE	最頻値	
_MED	中央値	
_STD	標準偏差	
_SMEAN	平均値が閾値を超えた面積比	REF の平均値は線形単位に直して計算。
_SMAX	最大値が閾値を超えた面積比	

・噴火事例リスト

噴火検知データに閾値を設定して噴火事例を抽出し、噴火事例リストとして CSV ファイルに出力する。

・「CFAD 作成機能」

CFAD の具体的な作成手順を図 95 に示す。「①噴火事例検出機能」を使って作成した噴火事例リストに含まれる各事例について、.rhi ファイルを読み込み、各レーダパラメータについて CFAD を作成する。読み込んだデータは、別途解析処理で利用できるように NetCDF ファイルに保存する。

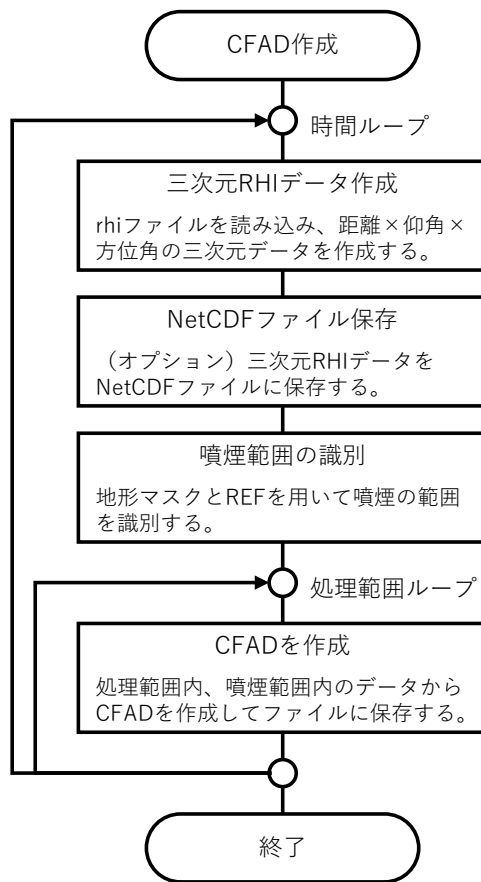


図 95 CFAD の作成フロー。

・噴煙範囲の識別

REF 観測結果から地形を除去し、定在エコーを減算した結果から、観測された噴煙の範囲を識別する。図 96 に識別結果の例を示す。

REF 減算マスク後

閾値で噴煙範囲抽出

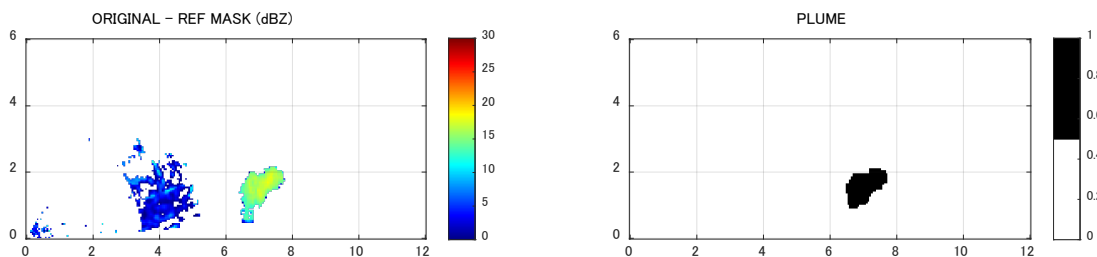


図 96 噴煙範囲の抽出と識別。

CFAD はユーザが設定した矩形範囲の中で、上で求めた噴煙の範囲内のデータのみを利用して計算する。

・CFAD の作成

ユーザ指定した時刻範囲、領域、パラメータから CFAD が作成され、画像ファイルが保存される。結果の確認用に、CFAD と合わせて RHI 画像が作成され、ファイルに保存される。

iii) 解析結果

2020 年 2 月 3 日に発生した桜島噴火の噴火指標（表 11）の時系列を図 97 噴火指標の時系列、2020 年 2 月 3 日桜島噴火。赤い△は噴火。に示す。噴火指標の変化から噴火は 05 時 32 分に発生したことがわかる。この噴火事例は鹿児島地方気象台による観測では報告されておらず、レーダにより検出できた例である。噴煙高度はレーダ画像によると火口から約 4,000m であった。

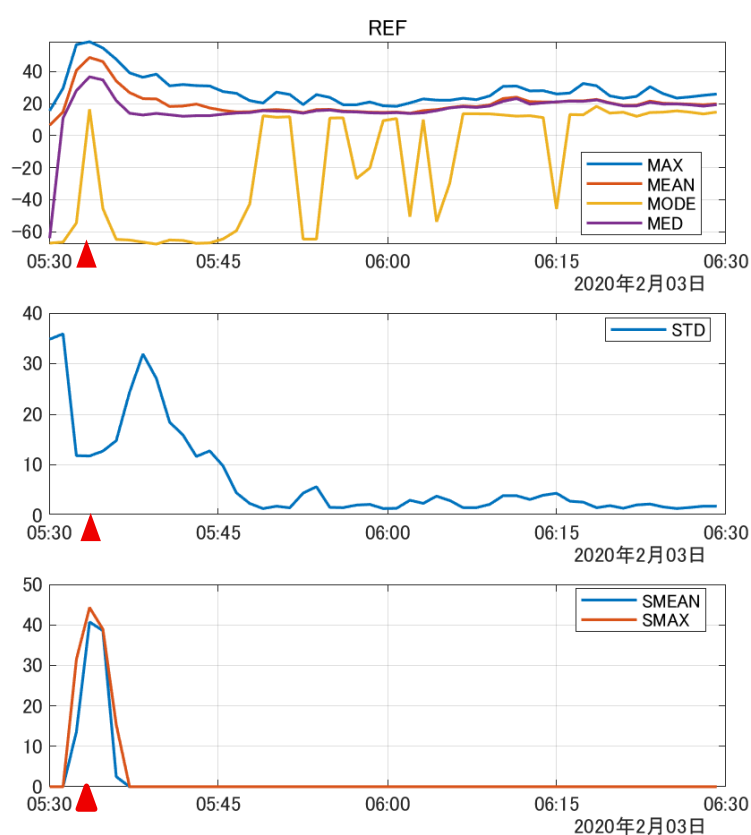


図 97 噴火指標の時系列、2020 年 2 月 3 日桜島噴火。赤い△は噴火。

・「CFAD 作成機能」

図 97 噴火指標の時系列、2020 年 2 月 3 日桜島噴火。赤い△は噴火。に示した噴火事例の CFAD 結果を図 98 に示す。一連の時系列データのうち、噴火から約 300 秒後の発達中の噴煙柱を解析した図である。偏波レーダパラメータの CFAD から以下のことがわかる。

・REF は火口から上空に行くに従って大きくなり高度 2 km 付近で大きくなっている。最大値は約 50dBZ と推定される。

・ZDR の最大値は高度 3 km 付近まではほぼ一定でそれより高くなると急激に小さくなる。

- KDP はほとんどゼロである。
- ROHV は高度 2.5km より高い所で大きな値をとる。
- VEL は-8m/s から +8m/s に分布している。モード値はゼロである。

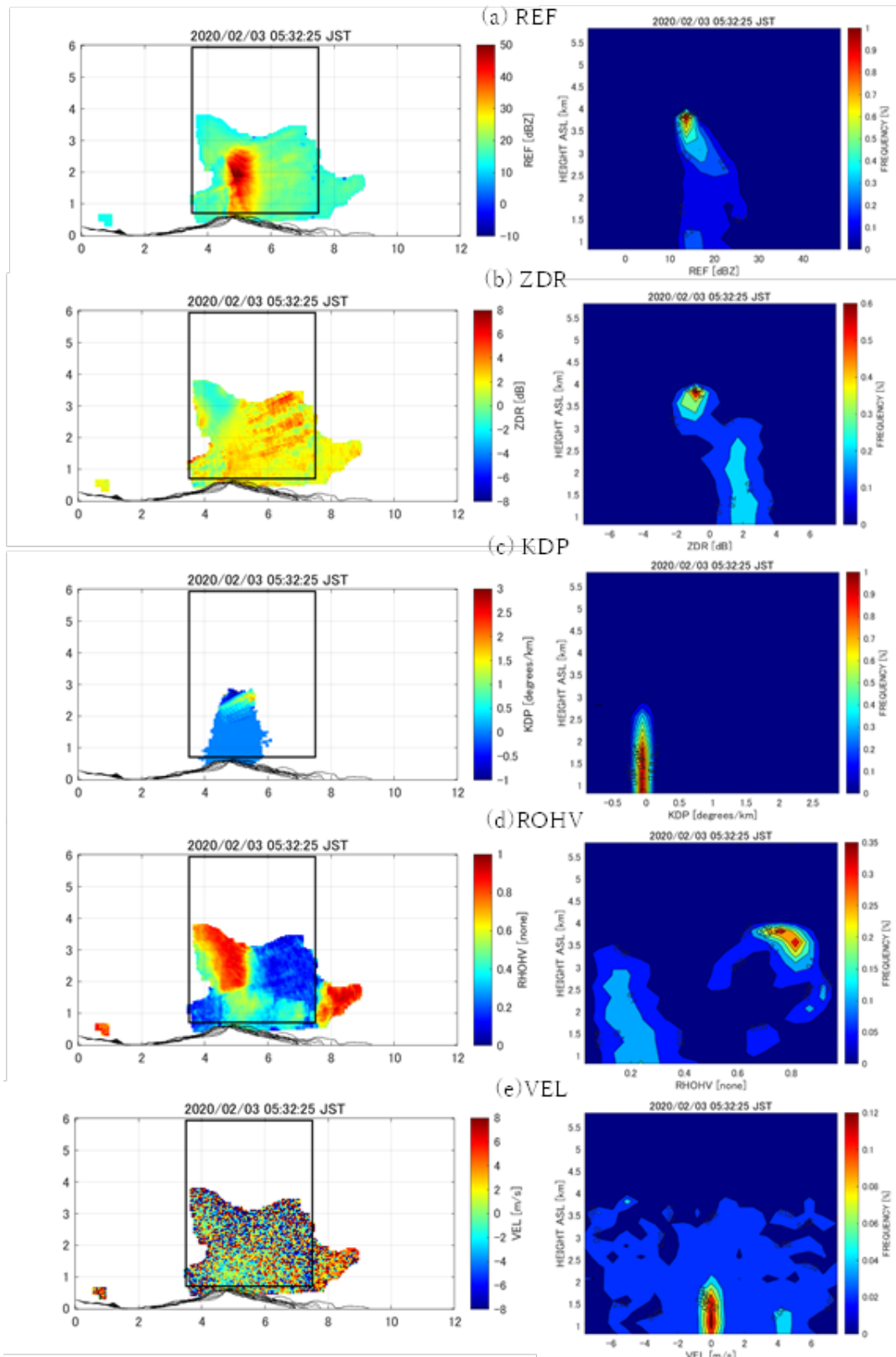


図 98 偏波レーダパラメータの RHI 画像（左列）と CFAD（右列）。

iv) まとめ

昨年度に引き続き、桜島噴火時の国土交通省垂水 X バンド MP レーダのデータを収集し、降灰分布情報を作成し、データベース化した。また、京都大学防災研究所 SV0 が運用している研究用 X バンド MP レーダの RHI 観測データから噴火を自動で検出するプログラム及び Contoured Frequency Altitude Diagram (CFAD) を計算するプログラムを作成した。これにより、噴煙柱の鉛直構造をより迅速に、定量的に、調べることが可能になった。作成したプログラムを 2020 年 2 月 3 日と 2025 年 5 月 15 日の噴火事例に適用した結果、初期の目的を達成していることを確認した。なお、2025 年 5 月 15 日の噴火事例については、ここでは触れなかったが、マルチレーダセンシング（垂水 X バンド MP レーダによる PPI 観測、京都大学防災研究所 XMP レーダによる RHI 観測、鹿児島大学・光電製作所・北海道大学の X バンド船舶レーダ観測）が実施され、プレリミナリーな事例解析が行われている。

3) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

2025 年に桜島において観測されたデータの解析により、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の精度を検証した。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の火山性震動を解析して推定式の拡張性について検討するとともに、インドネシア・シナブン火山におけるブルカノ式噴火について、噴煙高度－噴出率の経験式を再検討して、火山灰噴出量を再検討した。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 2025 年 4 月から 2026 年 3 月までの降灰量と地震動・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従来の経験式と齟齬がないことを確認した。

i) 桜島南岳第 3 活動期の噴火活動推移

昭和火口では、2009 年から 2017 年 10 月まで噴火が頻繁に発生した。その後、2023 年 2 月から 8 月を除き、昭和火口での噴火活動は静穏化している。一方、昭和火口活動期には噴火が稀にしか発生しなかった南岳では、2017 年 10 月 30 日から噴火が頻発するようになった。ここでは 2017 年 11 月以降の期間を南岳第 3 活動期と呼ぶ。

南岳第 3 活動期における噴火活動の推移を鹿児島地方気象台の観測による火口縁上噴煙高度、ハルタ山における空振振幅、有村観測坑道における爆発地震の最大振幅と地盤変動により図 99 に示す。2026 年 3 月までの噴火活動は、13 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。その後も噴火活動は繰り返され、Episode6～13 が識別できる

が、Episode5 に比べて噴火発生頻度も少なく、噴煙高度、空気振動および地震動振幅から評価される爆発強度も小さい。

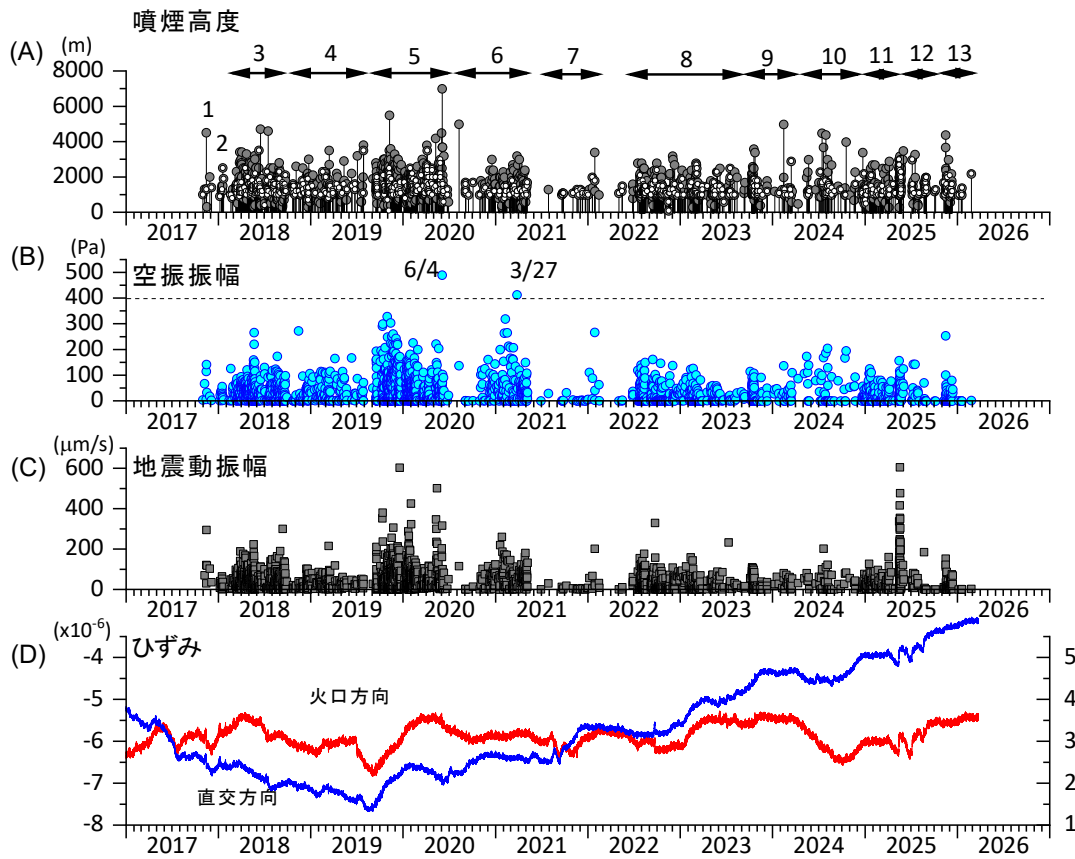


図 99 桜島南岳第 3 活動期（2017 年 11 月以降）の噴火活動の推移。上段の矢印付数字は Episode 番号を示す。(A)火口縁上噴煙高度（鹿児島地方気象台発表）。灰丸は爆発、白丸は噴火を示す。(B)ハルタ山における空気振動振幅。(C)有村観測坑道における爆発地震の最大振幅。灰色の□は爆発、白□は噴火を示す。(D)ハルタ山観測坑道におけるひずみ変化（南岳火口方向および直交方向）。

2024 年 12 月末に始まる Episode11 の噴火活動は 2025 年 4 月初旬まで続いた。これ以降の噴火活動の推移を図 100 に拡大して示す。

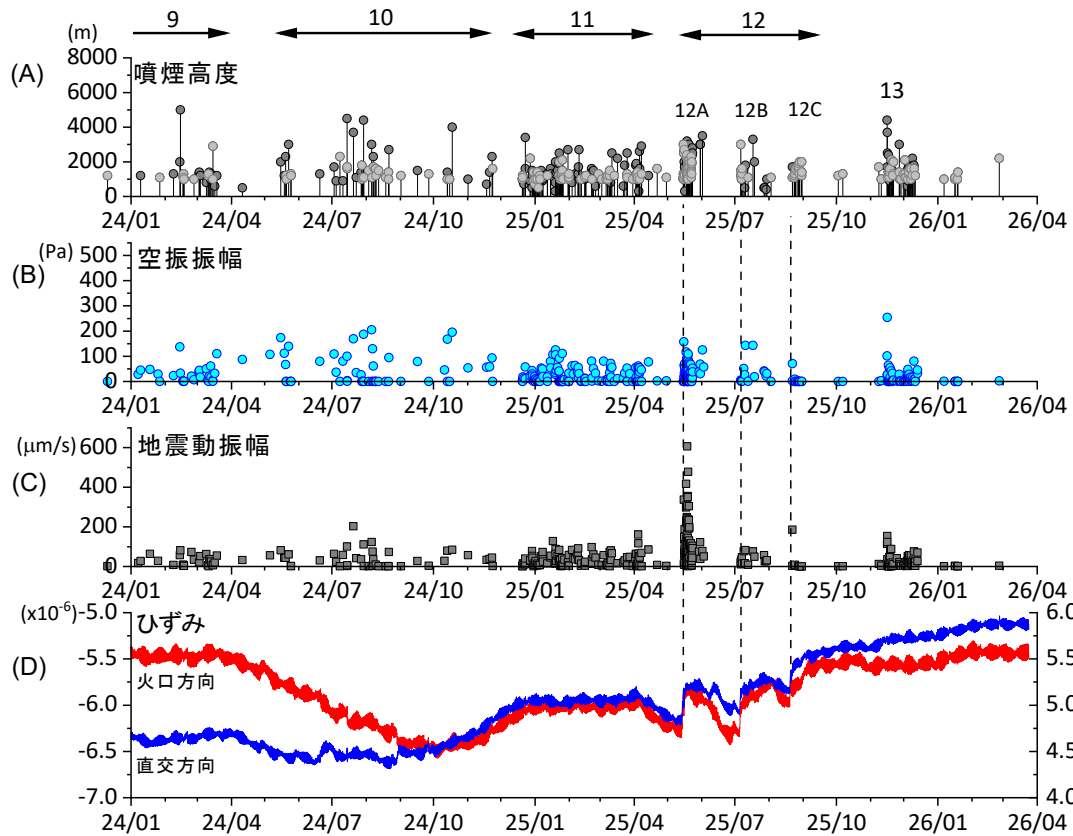


図 100 桜島南岳第 3 活動期のうち、2024 年 1 月から 2026 年 3 月までの噴火活動の推移。数字は Episode の番号を示す。(A) 火口縁上噴煙高度（鹿児島地方気象台発表）。灰丸は爆発、白丸は噴火を示す。(B) ハルタ山における空気振動振幅。(C) 有村観測坑道における爆発地震の最大振幅。灰色の口は爆発、白口は噴火を示す。(D) ハルタ山観測坑道におけるひずみ変化（南岳火口方向および直交方向）。

2025 年 4 月 8 日以降、約 1 ヶ月間は噴火活動が著しく低下したが、5 月 15 日から噴火活動が再開した。これ以降を Episode12 とする。Episode12 は噴火の発生頻度から 3 つのサブ Episode に分けられる。5 月 15 日から 6 月 2 日までを Episode12A、7 月 6 日から 8 月 2 日までを Episode12B、8 月 22 日から 30 日までを Episode12C とする。これらのサブ Episode の間には噴火活動の休止期間があるが、収縮地盤変動がサブ Episode に先行して 2~6 週間程度観測され、急速な地盤膨張に転じたのちに噴火活動が活発化するという共通の推移（図 100）を示したので、異なる Episode とはせず Episode12 とした。このうち最も活動的であったのは、Episode12A であり、81 回の「爆発」が発生した。空気振動の振幅は最大で 157Pa、噴煙高度は最大で 3,500 m と平均的であるが、地震動（爆発地震）は、最大で 606 $\mu\text{m/s}$ に達した（図 100C）。Episode12A の特徴として、爆発地震が大きいこと、Episode の直前に現れた膨張が大きいことがあげられる。膨張は 0.5 マイクロストレインに達しており、噴火に前駆する山体膨張としては、南岳噴火活動最盛期である 1986 年以降で最も大きい。一方、噴煙高度や空気振動には際立った特徴が認められない。

2025年11月16日から噴火が再び発生するようになった。これ以降を Episode13 とする。12月13日までに25回の爆発が発生した。11月16日の爆発では4,400 m と3,700 m の高度まで噴煙が達した。また、空振振幅は254Paに達するなど、初期段階での活動度は高い。その後、噴火活動は低下し、12月14日以降、爆発は発生していない。Episode13はEpisode12の特性を有しておらず、それ以前の Episode に類似している。

ii) 火山灰放出量の推定式の検討

火山灰放出量は地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーと相関があることが知られており、火山灰放出重量 (W_e) は、2~3Hz の周波数帯のスペクトル (A) と地盤変動を励起する圧力源の体積変化 (ΔV) に対して以下の線形関係がある (Iguchi, 2016⁹⁾)。

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

2008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, 2016⁹⁾)。ここで、 γ は常時微動を考慮した補正項である。

2025年4月から2026年3月までのデータを2009年から2024年までの昭和火口噴火および南岳噴火のデータと比較することにより、これまでに経験的に得られている火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーの関係式と齟齬がないことを確認した。

2008年1月から2026年2月までの17年間(205カ月)の月ごとの火山灰放出量(降灰量から推定)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54に示す。火山性地震・微動のエネルギーの項は全期間について評価し、地盤変動量の項はNED(Non-Eruptive Deflation, Iguchi et al., 2022¹⁰⁾)を除くため、鹿児島地方気象台が「爆発」と「噴火」とした噴火活動について評価している。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 (https://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/sonae/sakurajima/documents/74_20260119164858-1.pdf) から推定されたものである (Iguchi, 2016⁹⁾)。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、 $\beta = 2.2$ 、 $\gamma = -0.3 \times 10^5$ とした。

2025年1月～2026年2月の降灰観測による火山灰放出量および地盤変動量－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を桃色の丸で図101に示した。2025年5月には噴火活動が活発化し (Episode12A)、降灰観測による火山灰放出量は71万トンまで増加した。地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーからは102万トンと推定されており、これまでに得られた経験式の誤差の範囲にある。5月を除くと火山灰放出量はともに原点付近に集中した分布となっている。ばらつきの範囲は、これまでの経験式を適用した結果の範囲内にある。

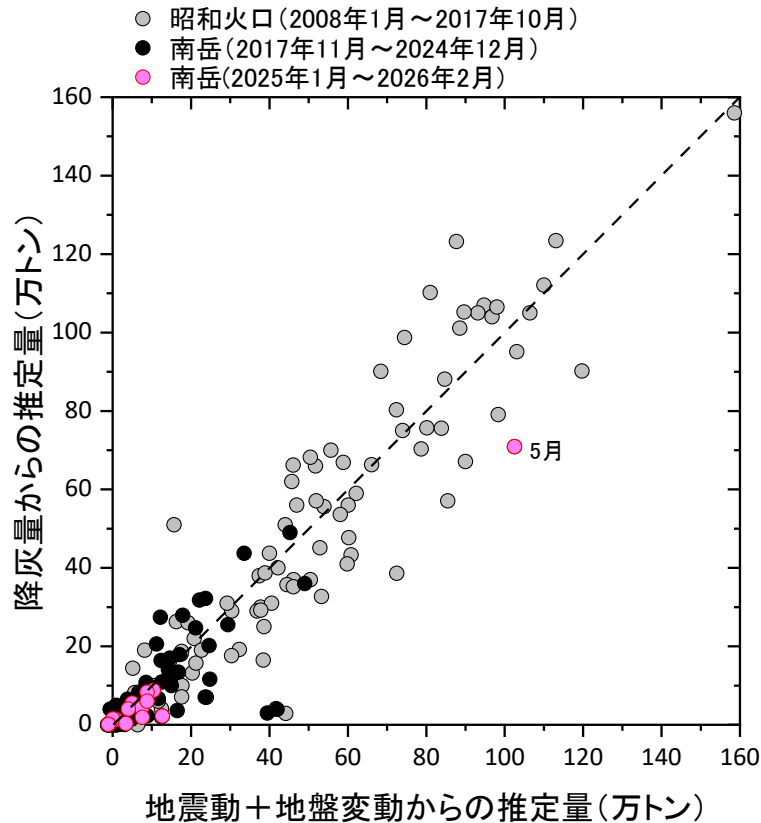


図 101 2008 年 1 月から 2026 年 2 月までの 18 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量
 -火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。

さらに、詳細にばらつきを検討するために図 101 を拡大して図 102 に示した。2025 年 11 月～2026 年 2 月は、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大となっている。この原因は BL 型地震の発生数が増加したことにある。2025 年 1 月から 10 月までの月別発生回数は 75 回～218 回であったが、11 月は 488 回、12 月は 638 回、2026 年 1 月は 670 回、2 月は 620 回、3 月は 858 回と増加している。井口・他 (2019)¹¹⁾は、南岳の噴火活動の最盛期である 1985 年について、「爆発」、BL 型地震群発に伴う噴火、連続微動に伴う噴火についてそれぞれの火山灰放出量を推定し、同じ火山性震動の振幅であっても BL 型地震群発に伴う火山灰放出量は連続微動に比べて 8%にすぎないことが示されている。BL 型地震については (1) 式における係数 α を小さくする必要があることを意味する。現在の推定式でも十分実用になるが、さらに高精度化させるためには、火山性震動の特性を分析し係数 α を適切な値を与える必要がある。

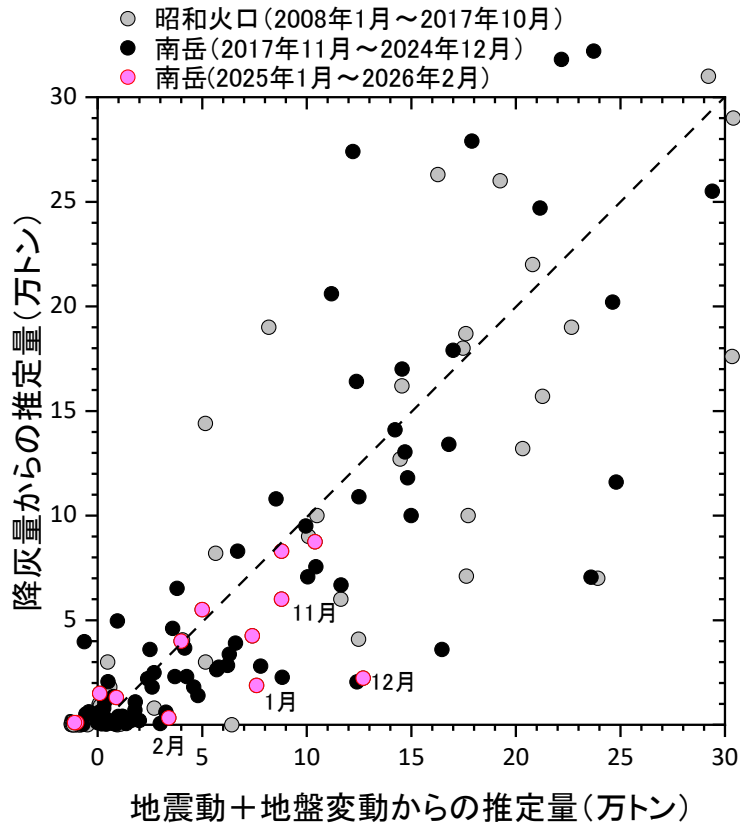


図 102 2008 年 1 月から 2026 年 2 月までの 18 年間の月ごとの火山灰放出量と地盤変動量－火山性地震・微動のエネルギーから推定した火山灰放出量の関係。図 101 の拡大。

iii) NED

火山灰放出率の推定において NED (Non-Eruptive Deflation、非噴火収縮地盤変動、Iguchi et al., 2022¹²⁾) を除外することが重要であることはこれまでの報告書でも述べてきた。桜島において「爆発」や「噴火」の発生に伴い、収縮地盤変動が観測されるが、収縮地盤変動は「爆発」や「噴火」を伴わず発生することもあり、火山ガスの放出に伴って発生すると考えられている。NED は噴火活動が活発なときに多発する傾向があり (例えば、2019 年後半から 2020 年前半の Episode5)、NED を除外しないと火山灰放出率が過剰に推定される。ここでは、2025 年 1 月から 2026 年 2 月までの NED の発生について述べる。

この期間に 390 回の収縮地盤変動が発生した (有村観測坑道の伸縮計において 5 ナノストレイン以上の変動)。このうち、「爆発」と「噴火」は 243 回であり、残りの 147 回が NED である。そのうち、63 回は噴火活動が最も活動的であった Episode12A において発生した。また、Episode12B では 10 回、Episode12C では 11 回発生しているので、噴火活動が活発な時期に NED が多いことが分かる。

Episode12A における典型的な地盤変動と地震動振幅の噴火活動との関係を図 103 に示す。火口方向の伸長ひずみと直交方向の短縮ひずみは圧力源の収縮を示す。このような収縮性地盤変動は 2025 年 5 月 20 日に 27 回観測されたが、そのうち 13 回は爆発、4 回は噴火、9 回は NED であった。これらのイベントに先行して観測される

火口方向の短縮ひずみと直交方向の伸長ひずみは圧力源の膨張を示す。1 時間程度の膨張の後に急速な収縮に至る地盤変動のパターンは、爆発、噴火、NED の間に違いはない。一方、地震動の振幅は異なり、爆発に伴って観測される火口方向の伸長ひずみと直交方向の短縮ひずみに対応する地震動は大きく、50 $\mu\text{m}/\text{s}$ を超えているが、噴火および NED に伴う地震動は爆発よりもはるかに小さい。

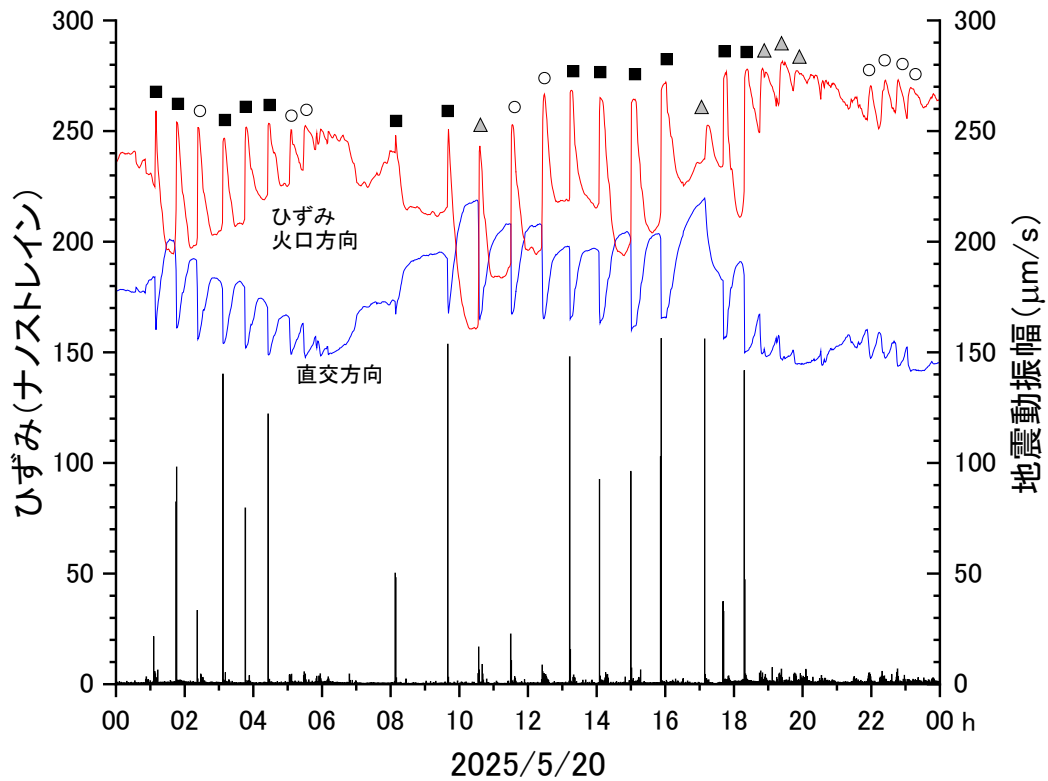


図 103 Episode12A における典型的な地盤変動と地震動振幅の噴火活動との関係。2025 年 5 月 20 日。赤線及び青線は有村観測坑道における南岳火口方向及び直交方向のひずみ変化。棒グラフは 1 分ごとの地震動振幅の最大値。■は爆発、▲は噴火、○は NED を示す。

地震動発生タイミングを地盤変動過程の中で詳細に検討するために、2025 年 5 月 20 日 11:29 に始まった NED に前後するひずみ変化と地震動を図 104 に示す。地震動は急速な収縮ひずみの開始とほぼ同時に始まっている。

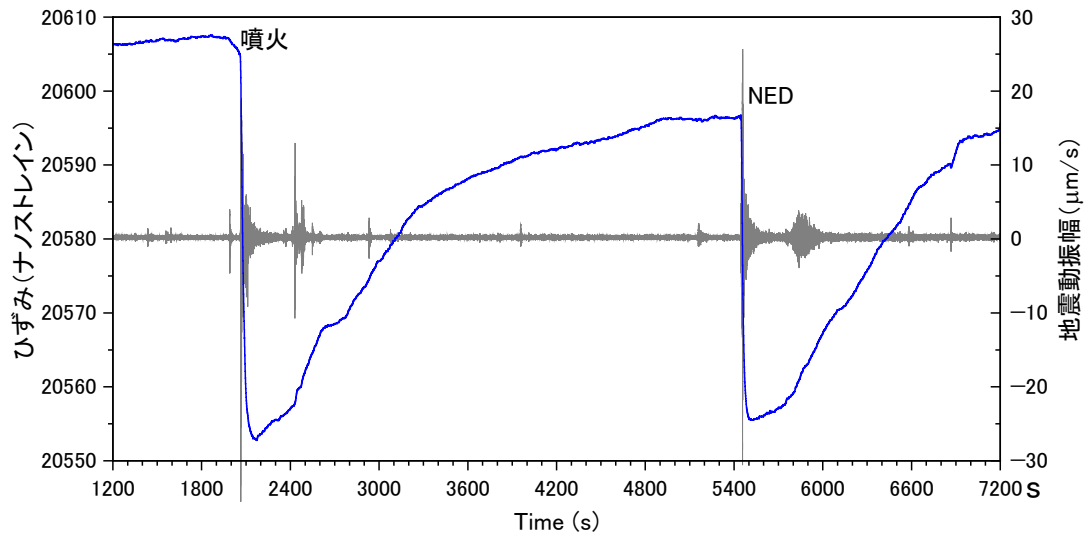


図 104 NED を伴う地盤変動と地震動。青線は有村観測坑道における南岳火口直交方向のひずみ変化。灰線は地震動を示す。

Episode12B においても 7 月 7 日 13:08 の噴火までは、Episode12A と同様の地盤変動パターンを示す NED が発生していたが、20 時以降、NED の地盤変動パターンが変化した。NED は爆発、噴火と同様に膨張ひずみが 1 時間程度継続した後に、急速な伸縮に転じて発生する（図 103、図 104）。一方、Episode12B の 7 月 7 日 20 時以降の NED は、緩やかな収縮の後に急速な膨張が繰り返されているように見える（図 105）。地震動は収縮ひずみのマイナスのピークに対応している。

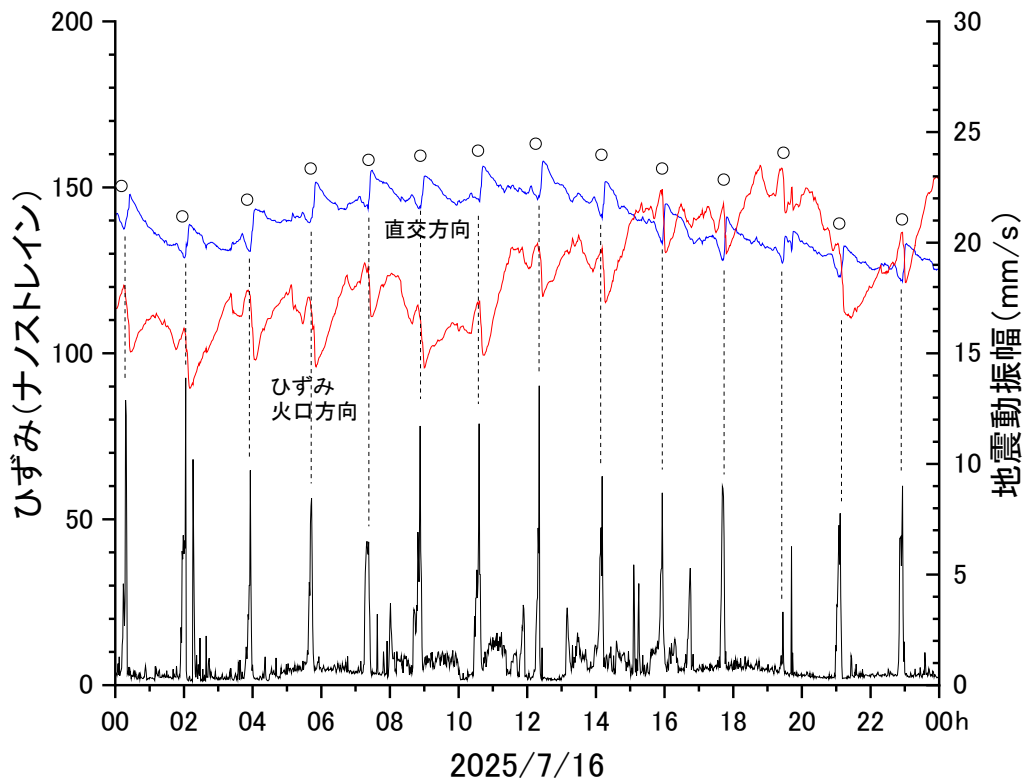


図 105 Episode12B において繰り返された NED に伴う地盤変動と地震動振幅。2025 年 7 月 16 日。赤線及び青線は有村観測坑道における南岳火口方向及び直交方向のひずみ変

化。棒グラフは1分ごとの地震動振幅の最大値。7月16日に爆発と噴火は発生しておらず、○で示したNEDのみが発生した。

一連のひずみ変化を拡大して図106に示す。膨張と収縮の繰り返しパターンから4つのステージに分けられる。Stage1は小規模な(2~3ナノストレイン)膨張で、Stage2は小規模な収縮である。Stage2において微動振幅は徐々に増大し、収縮ひずみのマイナスのピークに達した後、膨張に転じ微動振幅はさらに増大する(Stage3)。Stage3の膨張ひずみは10ナノストレイン程度に達し、Stage1の数倍である。その後、緩やかな収縮ひずみが1時間程度継続する。Stage1+Stage2の小規模な膨張-収縮がトリガーとなり、Stage3+Stage4のより変動の大きい膨張-収縮を引き起こしているように見える。

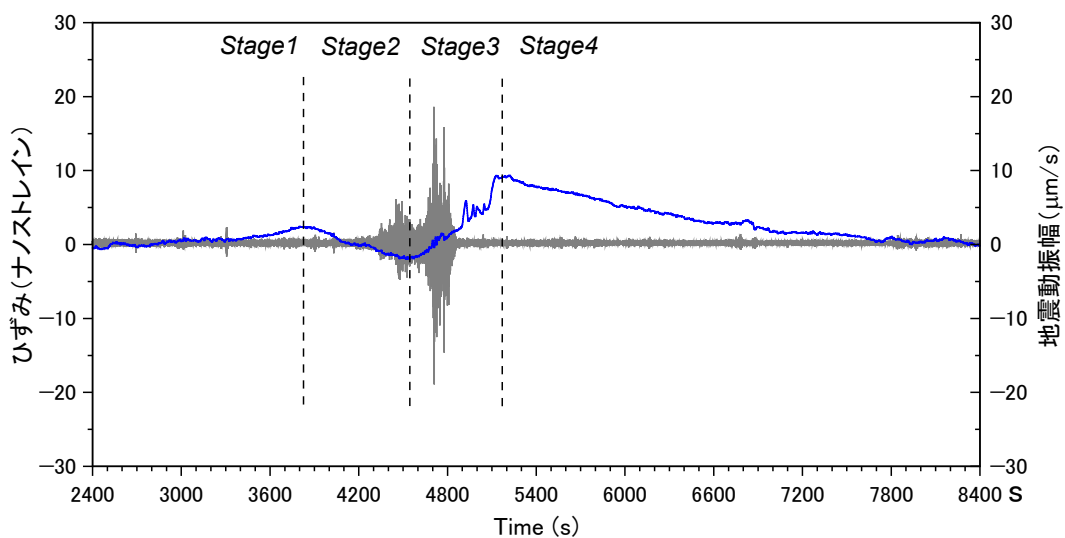


図106 図105に示したNEDの拡大図。2025年7月16日11:40~13:20。青線は有村観測坑道における南岳火口直交方向のひずみ変化。灰線は地震動を示す。

NEDを含めて見積もられた2025年5月の火山灰放出量は120万トンになった。サンプリングデータから推定される5月の火山灰量71万トンよりもかなり多い。NEDを除いた火山灰放出量102万トンは、これまで得られた経験式からのばらつきの範囲にあるので、NED頻発時におけるNED除外の重要性があらためて確認できた。

4) 火山灰放出率と噴煙高度の関係の検討

個々の噴火について式(1)から求められる火山灰放出率と噴煙高度の関係を検討する。

a) 桜島火山噴火に伴う噴煙高度の推移

2009年2月~2026年2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107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)¹³⁾に基づき8,000m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）。

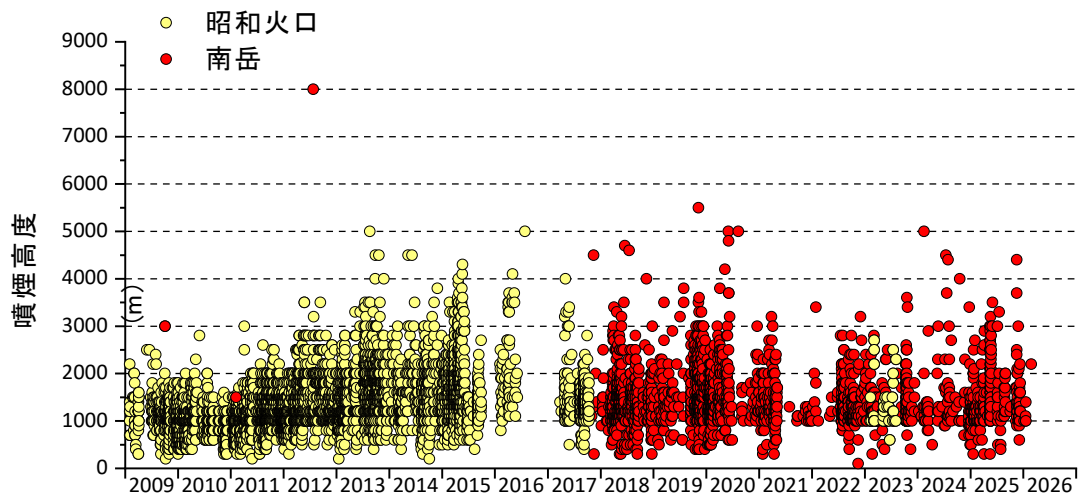


図 107 桜島の爆発に伴う噴煙高度の推移。鹿児島地方気象台の観測によるが、必要に応じて、噴煙高度データを補てん、修正した。赤丸は南岳、黄丸は昭和火口の噴火である。

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。2025年以降の Episode11 から Episode13 においては、噴煙高度が 3,000 m を超える噴火は 12 回発生しているが、そのうち 7 回は、2025年5月に始まる Episode12A において発生した。また、Episode13 の初期段階でも噴煙高度が高く、11月16日には噴煙高度が 4,400 m と 3,700 m に達する噴火が発生した。

Episode11 から Episode13 における噴煙高度の推移を拡大して図 108 に示す。噴煙高度が 2,000 m 未満の噴火が多く、全体の 87.5% を占める。Episode11 と 13 は噴煙高度 2,000 m 以上の噴火はそれぞれ 7.5%、8.7% に過ぎない。一方、Episode12 では、噴煙高度 2,000 m 以上の噴火は 17.3% に上り、特に 12A では 20% に達する。2017年11月以降の南岳第3噴火期全体を見ても高度 2,000 m 以上の噴火は 12.8% に過ぎず、Episode12A の噴煙高度分布の高い高度へのシフトが顕著である。

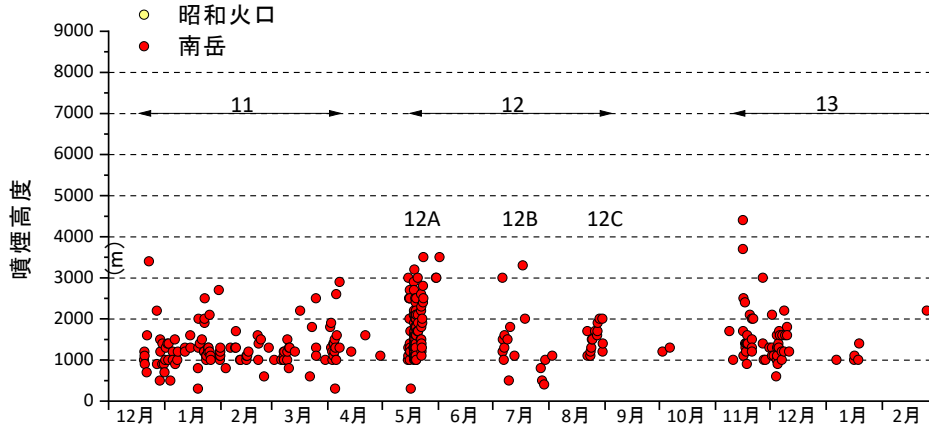


図 108 2024 年 12 月以降の桜島の爆発に伴う噴煙高度の推移。矢印付の数字は Episode を表す。

b) 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 107）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 4,144 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 109 に示す。

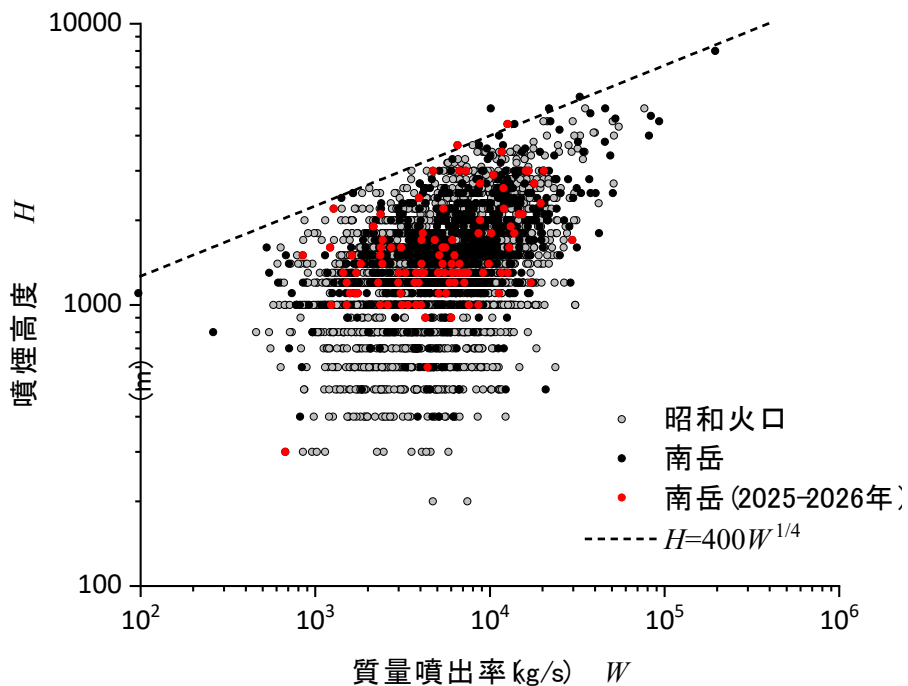


図 109 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。最近の 2025 年 1 月から 2026 年 2 月までの噴火については赤丸で示した。

2009 年から 2024 年 3 月までの期間では、2012 年 7 月 24 日に南岳において発生した爆発の噴出率が最大であり、195,000 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、2013¹³⁾)。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、上限の直線は以下のように決定される。

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

2025 年 1 月から 2026 年 2 月までに発生した噴火のうちでは、2025 年 11 月 16 日 0:57 と 2:28 に発生し、噴煙高度がそれぞれ 4,400 m と 3,700 m に達した爆発はこの上限式上にプロットされる。また、2025 年 6 月 1 日に発生した爆発も上限式に近い。5 月 20 日 10:31 の「噴火」はこの期間では最も質量噴出率が大きい、噴煙高度は 1,700 m にとどまっている。この噴火に伴う空振は 4Pa と爆発よりも小さいので爆発開始直後にプルームが十分形成されなかったのかもしれない。

なお、唯一 (2) 式の上限式を超えている噴火は 2020 年 8 月 9 日に発生した爆発である (噴出率 10,100 kg/s、噴煙高度 5,000 m)。この爆発による噴煙上昇には、大気中の水蒸気や火口内の天水が関与している可能性がある (令和 4 年度報告書)。

次に、式 (2) を式 (2)' のように一般化し、係数 k を検討したところ、ほとんどの爆発について係数 k は 100~400 の範囲にあり、平均的には $k = 200$ と評価された (令和 4 年度報告書)。

$$H = kW^{1/4} \quad (2)'$$

この結果は、図 110 に示すように 2025 年の噴火を加えても同様であり、火山灰重量放出率と噴煙高度の関係を見る限り桜島の山頂部の南岳や昭和火口では、類似した噴火が長期間繰り返されていると評価できる。

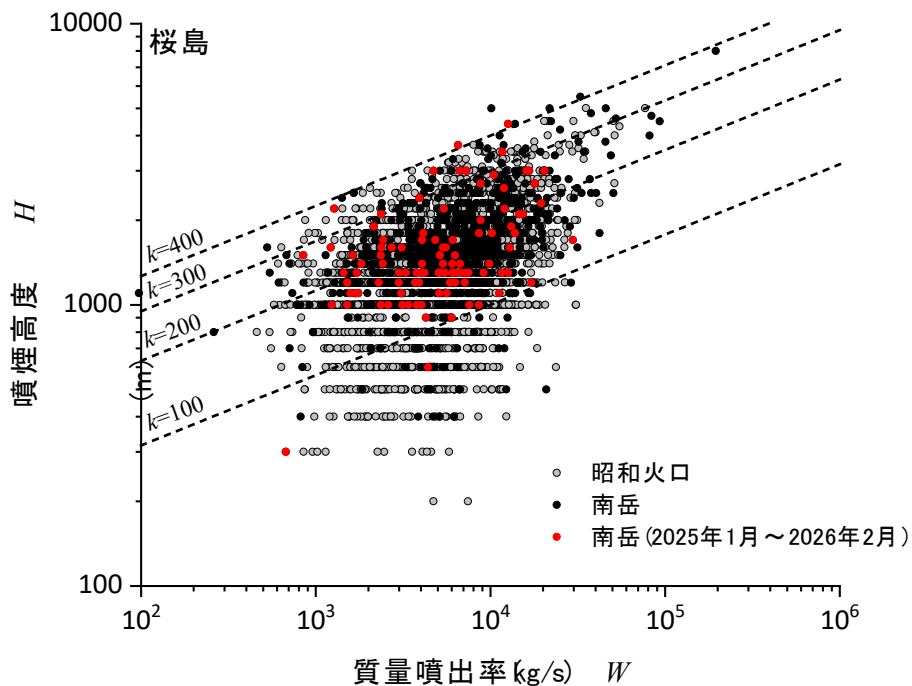


図 110 火山灰重量放出率と噴煙高度の関係。係数 $k = 100, 200, 300, 400$ とした。

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3～6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。今年度は、諏訪之瀬島については2025年のデータを追加して火山灰放出量の推移を把握するとともに、シナブン火山については、風の影響を考慮して火山灰噴出率を再検討した。

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6年度の報告書では2024年4月～2025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2025年4月から2026年3月までのデータを追加して、さらに検証を進める。

2020年1月～2026年3月までの噴火活動を図111に示す。同図には、日別の爆発回数、噴火回数、噴煙高度（いずれも福岡管区气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未満の爆発を含む。

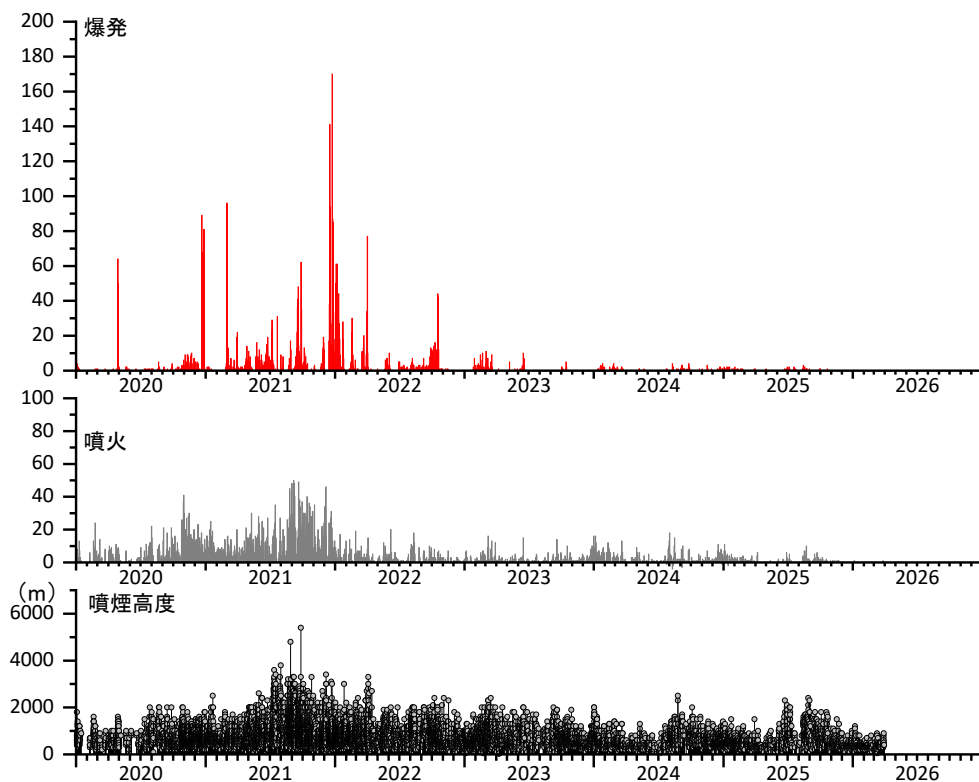


図 111 2020年1月～2026年3月までの日別の爆発回数、噴火回数、噴煙高度。

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 年であり、そのうち爆発回数が最も多い月は 2021 年 12 月である。2022 年には爆発回数は減少したものの引き続き爆発は発生した。2023 年はさらに爆発回数は減少し、爆発活動の低下傾向は 2026 年も続いており、3 月までに爆発は発生していない。一方、爆発的でない噴火もその活動は低下傾向にあるものの、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。

2024 年 1 月～2026 年 3 月までの噴火活動を図 112 に示す。2025 年は 2024 年に比べさらに噴火回数が減少した。2025 年 6 月から 7 月および 8 月に噴火回数が増加し、噴煙高度が 2,000m を超える噴火も発生した。2025 年の噴火には継続時間が長い噴火が発生した。継続時間が 50 分を超えるものは 11 回発生しており、10 月 3 日 6 時ごろに始まった噴火は約 24 時間続いた。

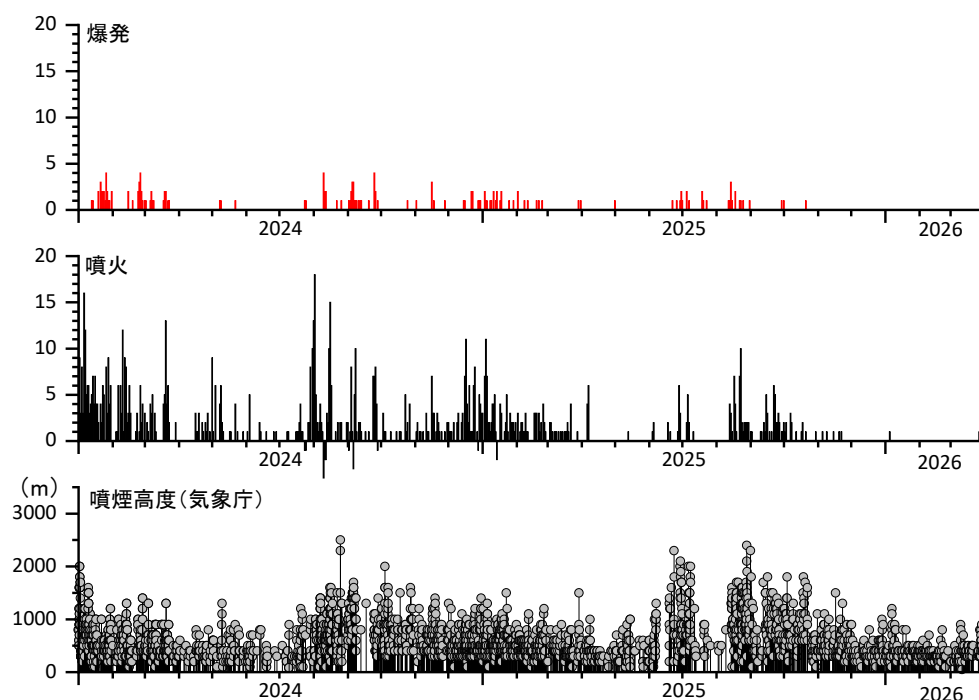


図 112 2024 年 1 月～2026 年 3 月までの日別の爆発回数、噴火回数、噴煙高度。

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式 (1) 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。そこで式 (1) を地震動振幅 (A) のみによって表現する式 (1)' 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、令和 4～6 年度の報告書では、この値を用いて 2023 年 3 月までの火山灰放出量を求めた。諏訪之瀬島では噴火活動は爆発地震と火山性微動を伴う。このうち爆発地震については、振幅は大きい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 111 に示すように爆発の発生回数は著しく少なくなっており、2023

年以降の火山灰放出は連続的で火山性微動を伴うものである。先に述べたように2025年には11回の連続噴火（連続微動）が発生している。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113に式(1)'を用いて推定した月別の火山灰放出量を示す。諏訪之瀬島では、2025年6月から7月にかけて悪石島から小宝島にかけての海域において有感を多数含む地震が発生した。また、9月にはマグニチュード4級の地震が複数発生するなど地震活動が高まった。これらの地震による震動は式(1)'を用いた評価からは除外した。

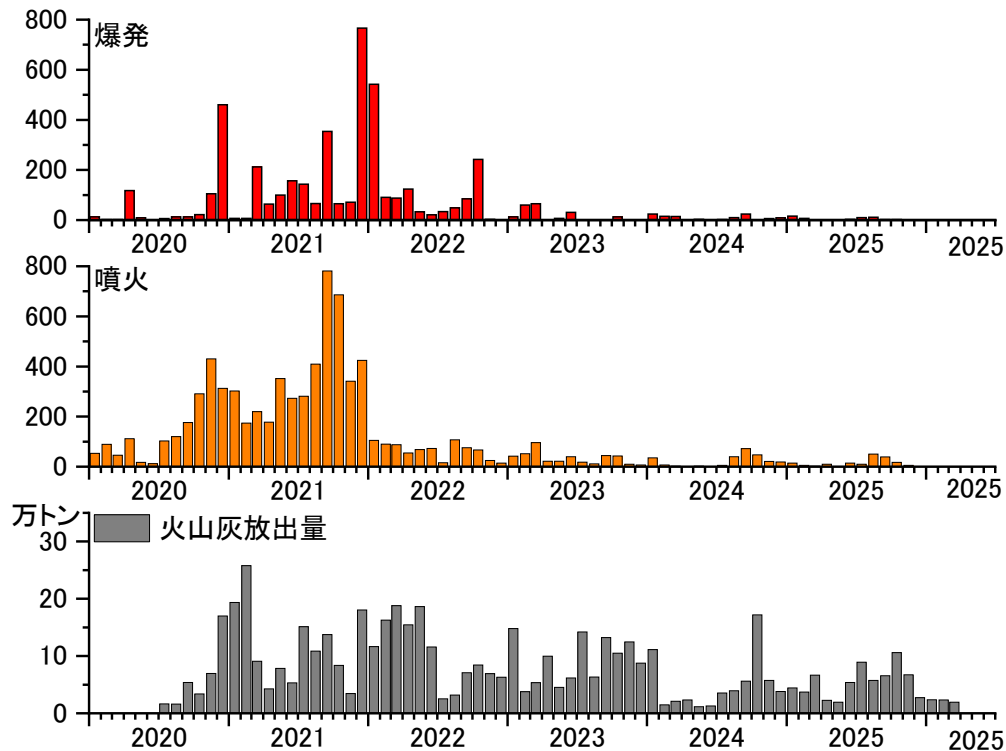


図113 諏訪之瀬島の月別の噴火活動。上段：気象庁観測による爆発回数（赤棒）。中段：気象庁観測による噴火回数。下段：式(1)'を用いて推定した火山灰放出量（2020年7月～2026年3月）。

ii) シナブン火山

シナブン火山はインドネシア・スマトラ島北部、トバ湖の北にある成層火山である。火山体は溶岩流と火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28日から9月7日まで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24日には山頂に溶岩ドームが出現した。2014年に入ると溶岩ドームは流下を始め、溶岩流を形成するとともに、溶岩ドームの崩落は火砕流を頻繁に発生させた。2014年と2015年の噴火のほとんどは、溶岩ドームの崩落による火砕流であった。ところが、2015年11月ごろから、桜島や諏訪之瀬島の噴火と同様に、噴煙柱のみを形成し、火砕流を伴わない噴火が発生する

ようになり、2016年以降は、噴煙放出のみの噴火（ブルカノ式噴火）の発生回数が急増した。この活動は2018年1月まで続き、2018年2月19日には噴煙高度が7 km以上に達する爆発が発生した（Syarifuddin et al., 2019¹⁴）。

火山灰放出量は先に述べたように、噴煙の高さから推定できる。しかし、視界が不十分な状況では噴煙の高さデータが観測できないため、この方法は必ずしも有効ではない。そこで、本稿では、噴煙の高さではなく、震動エネルギーに基づいてブルカノ式噴火の火山灰噴出率を推定する方法を提案する。

まず、ブルカノ式噴火に伴う震動エネルギーと噴煙の高さの関係を調べた。ブルカノ式噴火に伴う爆発地震の地震記録の例を図114に示す。

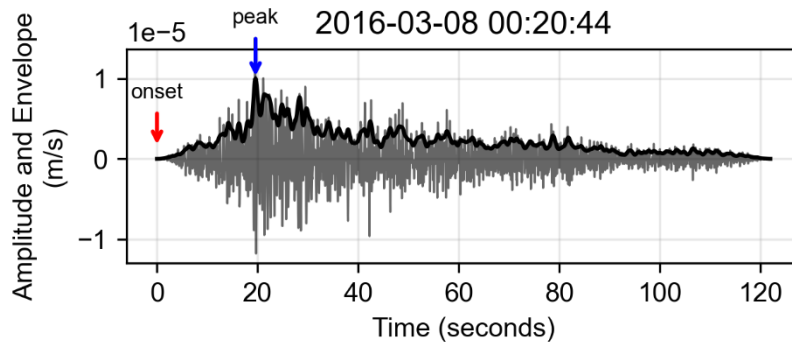


図114 ブルカノ式噴火に伴う爆発地震の地震記録。実線は波形の包絡線を示す。地震エネルギーは、振幅包絡線の開始点（赤い矢印で示す）からピーク（青い矢印）までの時間窓で計算した。

ブルカノ式噴火に伴う爆発地震の震動は不明瞭なまま始まり、その振幅は徐々に増加し、図114に示した例では発生から20秒後にピークに達した。桜島の爆発地震ではピーク振幅は、火道最上部における膨張の強度を表すことが知られている（Tameguri et al., 2002¹⁵）。そこで、発生からピークまでの振動が噴煙柱の成長に寄与する火道内のマグマの動きを表していると仮定し、発生からピークまでの振動の地震エネルギー E_{VE} を推定した。爆発地震のピーク周波数を考慮して、1~2 Hzの周波数範囲におけるエネルギーを計算した。地震エネルギーは、図115に示すように、観測されたプルームの高さ H と相関がある。

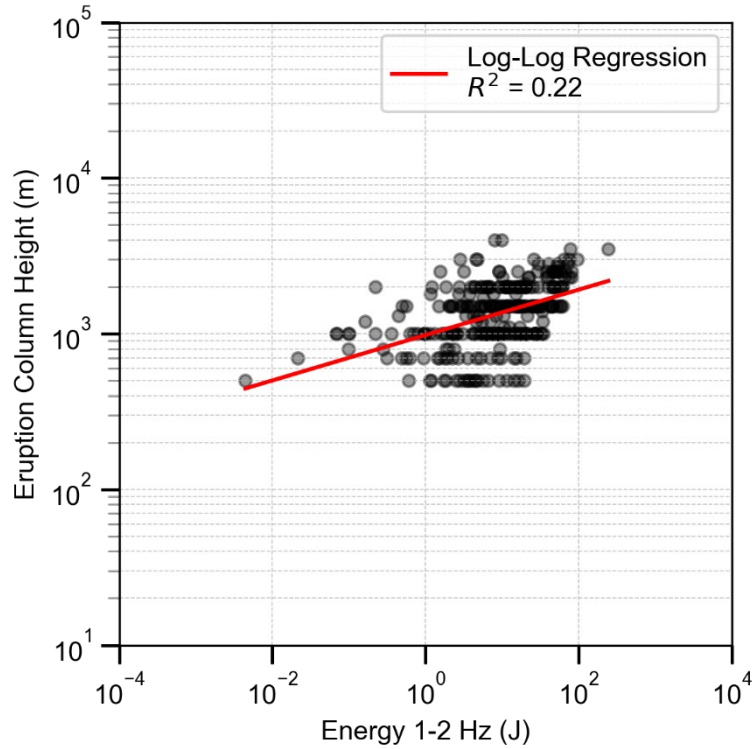


図 115 爆発地震の最大振幅（KBY 観測点における 1-2Hz の周波数帯域）と目視観測された噴煙高度の関係。赤線は対数線形回帰を示す。

対数-対数領域での回帰分析により、以下の近似式が得られた。

$$\log_{10} H = 0.15 \log_{10} E_{VE} + 3 \quad (3)$$

噴煙高度から噴出率 MER を求めるために、風速と浮力周波数を考慮して Woodhouse et al. (2013)¹⁶⁾ が提案した式を用いた。噴火時の大気条件データは、ERA5 コペルニクスデータセット (<https://cds.climate.copernicus.eu>) からダウンロードした。ブルカノ式噴火中に放出された質量 M_{VE} は、噴出率に継続時間 t_d を乗じることで計算した。 t_d の計測には SKN 観測点で記録された爆発地震を用いた。質量 M_{VE} は以下のように記載できる。

$$M_{VE} = t_d \times MER = t_d \left(\frac{1}{0.318} H_C \frac{1 + 6.143 \frac{v_w}{\bar{N} H_C} + 0.731 \left(\frac{v_w}{\bar{N} H_C} \right)^2}{1 + 4.519 \frac{v_w}{\bar{N} H_C}} \right)^{3.953} \quad (4)$$

ここで、 v_w は高度 H における風速、 \bar{N} は高度平均した浮力周波数である。 H_c は噴煙柱の最大中心線高度を表し、式(3)を考慮して噴火に伴う地震動エネルギー E_{VE} を導入すると、次のように表される。

$$H_C = \begin{cases} 667 E_{VE}^{0.15}, & \frac{22.2 \bar{N} E_{VE}}{\bar{v}_w} < 0.1 \text{ の時} \\ 1000 E_{VE}^{0.15}, & \frac{22.2 \bar{N} E_{VE}}{\bar{v}_w} > 0.1 \text{ の時} \end{cases} \quad (5)$$

最初の条件 $\frac{22.2 \bar{N} E_{VE}}{\bar{v}_w} < 0.1$ は噴煙柱の高さが風によって大きく影響を受ける状態に対応する。この閾値を超える時は、噴煙が垂直に上昇する状態を示す (Dürig et al.,

2023¹⁷⁾。Woodhouse et al. (2013)¹⁶⁾の噴煙柱モデルを適用するにあたって、すべての係数にDürig et al. (2023)¹⁷⁾が採用した値を用いた。

式(4)及び式(5)を用いて個々のブルカノ式噴火によって放出された火山灰重量を図116に示した。火山灰重量は $10^4 \sim 10^7$ kgの広い範囲に分布した。

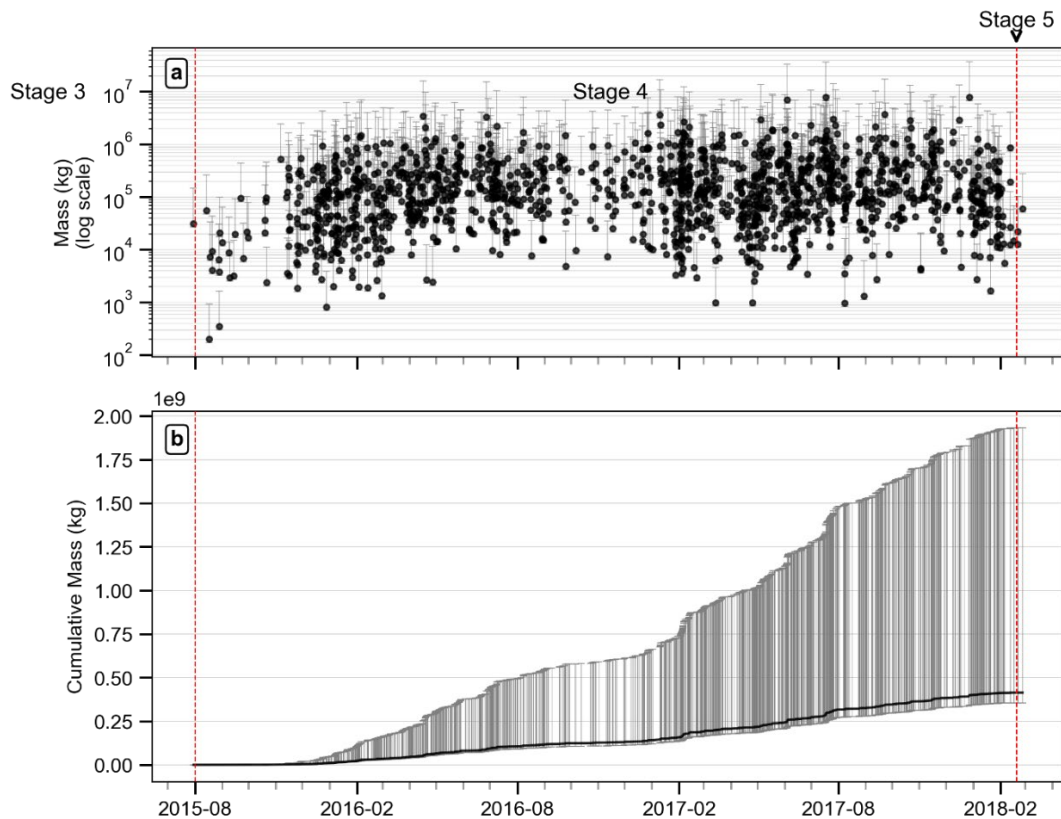


図 116 2014年10月から2018年2月までのブルカノ式噴火ごとの放出火山灰重量の推移 (黒点)、b: 積算重量 (黒曲線)。灰色の棒は誤差を示す。

d) 経験的火山灰噴出率推定式の有効性と今後の課題

10年間続いた本プロジェクトにおいて式(1)のように、地震動と地盤変動データを用いて火山灰噴出率の推定式を求め、段階的に高精度化を図ってきた。

火山灰噴出率の推定に関する先行研究においては、主に噴煙柱高度から求められてきた。基本的な式はMorton et al. (1956)¹⁸⁾により、得られた理論式であり、風速場を考慮するなどして改良が図られてきた。一方、この式は噴出率が噴煙高度の4乗に比例するものであり、噴煙高度から噴出率を求めると誤差が大きい。実際、Dürig et al. (2023)¹⁷⁾は6種類の噴煙柱モデルに基づいて噴出率を推定し噴火継続時間を掛けることにより噴出量を求め、テフラ体積量と比較したが、誤差は2桁程度に及んでいる。また、高感度カメラや熱赤外線映像カメラなどにより、以前に比べて噴煙高度把握率は大幅に改善しているとはいえ、目視観測等により噴煙高度を把握するには気象雲等により限界がある。また、噴煙高度と噴出率の関係は、火山灰噴出の定常性を仮定して初めて成り立つものである。噴出率が低下する過程においては、それ以前に噴出した火山灰は、ほぼ同じ高度に滞留、または移流するので、目視観測 (あるいはそれに相当する手法) で得られる噴煙高度が現在の噴出率を反映するわけではない。

本稿で提案した経験式は地震動と地盤変動データを用いるものであり、観測量としてはほぼ確実に入手可能なものであり、ロバスト性が高い。噴煙高度は逆に噴出率から推定することになるので、噴煙柱が目視できる必要がない。噴煙高度は噴出率の1/4乗に比例することになるので、噴出率の推定誤差が噴煙高度の推定誤差に波及しにくい。地震動と地盤変動データはほぼリアルタイムで取得できるので、火山灰噴出率を高時間分解能で推定できる。本プロジェクトでは1分の時間分解能で解析している(図117)。

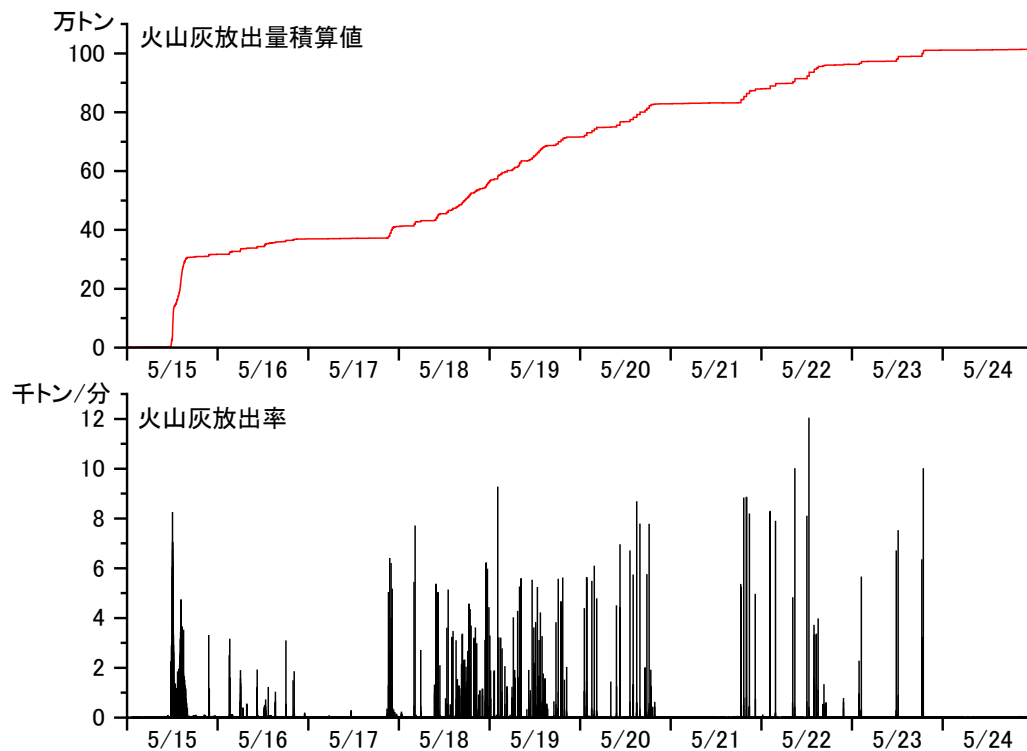


図 117 2025 年 5 月 15 日から 24 日までの 1 分ごとの火山灰放出率（下段）とその積算値（上段）。

この手法は地震動およびその補正項、地盤変動から得られる圧力源の体積変化の線形結合により火山灰噴出率を求めるものなので、観測そのものの精度に強く依存する。地震動の補正項 γ は火山活動起源ではない常時微動を補正するものである。本プロジェクトでは定数として扱ったが、海に近い観測点では常時微動が季節変化を示すので、注意が必要である。なるべくノイズの少ない観測点を選定するのは言うまでもない。地震動としては桜島では 2–3Hz の周波数帯域を用いたが、この周波数帯域は多くの火山で使用可能と思われる。地震動スペクトル振幅の係数が噴火様式によって異なることが重要である。桜島の山頂噴火は火山灰放出を主体とするので、ここで得られた係数 α はこれに対応するものである。揮発性成分が卓越し火山灰粒子が少ない時は係数 α を減ずる必要がある。揮発性成分が卓越するときの地震動として BL 型地震の群発やハーモニック微動があげられる。BL 型地震は 1972 年から 1990 年代までの南岳第 2 活動期において群発的な活動を頻繁に起こしたが、BL 型地震群発に対応する係数は火山灰連続放出に対応する連続微動の係数の 0.08 にする必要がある(井口・他、2019¹⁹)。

2026年1月～2月に増加したBL型地震でも同様に、係数を減ずる必要があることが指摘できる。また、2015年6月～7月に発生した間欠的なハーモニック微動（令和5年度報告書）や、2022年12月から2023年2月初めまで連続的に発生したハーモニック微動（令和4年度報告書）でも同様のことがいえる。

地盤変動から得られる圧力源の体積変化の項でも揮発性成分が卓越するイベント（NED）の除外が重要である。本プロジェクトにおいてはNEDでは係数 β を0として扱った。係数 α および β は噴煙の火山灰粒子と火山ガスの重量比で決定されるものである。噴火様式を火山灰粒子と火山ガスの重量比で記述する研究が今後必要である。これまでに得られている観測データからいえることは、ブルカノ式噴火や火山灰連続放出は、火山灰粒子と火山ガスの重量比が大きい噴火様式である。一方、ストロンボリ式噴火やハーモニック微動を伴う噴火はその比が小さい様式である。桜島においては未経験であるプリニー式噴火では重量比は小さくなると予想されるが、その値を推定しておくことが将来発生しうる大規模噴火時の降灰のリアルタイム予測に必要である。

e) 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。様々な噴火強度や大気風条件にたいする噴煙高度と火山灰輸送の応答に関するデータベースを充実させた。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、噴煙から離脱すると終端速度で降下する様子を再現できる3次元モデルSK-3Dの高度化を目指している。

桜島での爆発的噴火に伴う火山灰輸送を数値シミュレーションした。現時点では、SK-3Dを用いて再現できる連続噴火の噴出率は 10^6 kg/sのオーダーである。噴出率を $10^{5.5}$ kg/s、 $10^{6.0}$ kg/s、 $10^{6.3}$ kg/sと最小規模の計算を実施した。噴煙高度は5 kmから10 kmであり、2025年5月15日噴火（噴煙高度は火口縁上約3 km）よりも強く、桜島での噴火では強いクラスに属する。風速0 m/sと静かな待機状態で噴出率を変えたシミュレーション結果では、噴火から500秒後であっても、島内を覆う噴煙範囲が顕著に変化する様子を捉えた（図118上段）。噴出率を固定し、風速やその鉛直プロファイルを変化させたシミュレーションも実施した。その結果、噴火からの同時刻において、噴煙の島内を覆う範囲や最長距離が大きく異なった（図118中下段）。これらのパラメータ計算によって、様々な噴火条件における粒子サイズごとの大気粒子分布・堆積分布のデータベースが充実した。これらの結果はレーダ観測結果との比較材料としても今後使うことができる。噴煙高度2 kmから3 kmの噴火強度を再現するためには数値モデルの更なる効率化が求められる。

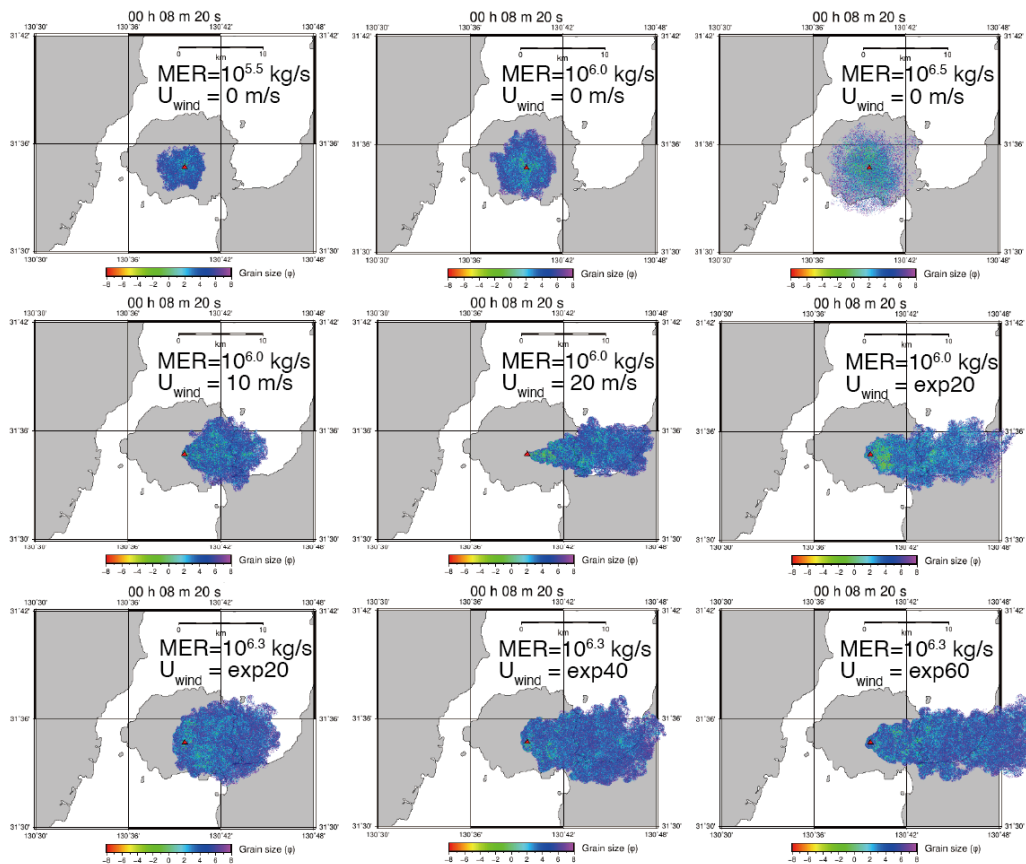


図 118 低噴出率噴煙の 3 次元数値シミュレーション結果。噴火から 500 秒後の大気中を浮遊する火山灰粒子の分布。色は ϕ スケールでの粒子サイズを示す。(上段) 風速 0 m/s で固定し、噴出率を $10^{5.5}$ kg/s、 $10^{6.0}$ kg/s、 $10^{6.3}$ kg/s と変えたケース。(中段) 噴出率を $10^{6.0}$ kg/s で固定し、風速プロファイルを変えたケース。(下段) 噴出率を $10^{6.3}$ kg/s で固定し、風速プロファイルを変えたケース。

5) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

令和 7 年度は気象モデルと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った。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った。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した。

a) 火山周辺の気流予測計算手法の改良

火山周辺の大気流れは、気象条件や地形、地表面の粗度の影響を受けた非定常な乱流場であり、火山災害の一原因となる火山噴出物は乱れた気流によって輸送される。それらの運動を予測する際、火山灰のような小さな粒子については濃度の移流拡散問題として扱われ、大きな粒子についてはその質点の運動をラグランジュ的に解析・追跡する方法がとられることが多い。しかし、実際の火山噴火では、ある程度大きな粒子の集団や火砕流のように、大気と異なる速度や物性を持った流体として扱うほうがよい場合がある。このような、大気の流れとは異なる運動を行う流れを大気と同時に

扱うためには、混相密度流れの解析を行う必要があるため、地面付近の大気における混相密度流れ場の支配方程式を定式化した。

火山噴出物の移流拡散の予測精度を上げる方法の1つとして、レーダやライダーなどで観測された実測データを取り込む方法がある。その際、観測値が示す速度は正確に言えば火山灰などの粒子の運動速度であり、周囲の大気の気流速度とは異なるので、その影響を取り込むためには大気流れとは異なる運動を行う粒子の運動を扱える方法を用いる必要がある。ここでは粒子の集合を流体として扱い、大気流れとは異なる速度をもつ流れとして扱うことのできる計算方法を開発した。その際、地面付近の流れは、地形や地表面粗度の影響を受けた乱流場となるので、非定常乱流場を扱うことのできるラージエディシミュレーション (LES) を用いた乱流モデルを用いて定式化を行い、数値解析を行うために必要となる流れ場の支配方程式を差分近似により離散化して数値的に解析するためのプログラムを開発した。

得られた混相密度流れの支配方程式は、表 12 に示すように乱れの影響をサブグリッドスケールの運動エネルギーを用いて表す 1 方程式系の LES を用いて定式化した。

表 12 定式化された混相密度流の支配方程式系

(1 方程式系のラージエディシミュレーションによる乱流モデルを用いる)

#相、n成分の保存式系	
・状態方程式：	$\bar{P} = R \overline{\rho_{gas} \vartheta_{gas}} = R \bar{\rho}_{gas} \bar{\vartheta}_{gas}$
・質量 (密度 $\bar{\rho}_{\#n}$) 保存式：	
n成分：	$(G_{\#} \dot{\bar{\rho}}_{\#n}) + \frac{1}{V_0} (V_0 G_{\#} \bar{U}_{\#n,j})_{,j} = -G_{\#} \bar{Q}_{\# \rho n,j} + G_{\#} \bar{S}_{\# \rho n} + \frac{1}{V_0} ([\rho_{\#n}^s v_k^s n_k] - [U_{\#n,j}^s n_j] - [Q_{\# \rho n,j}^s])$
全成分：	$(G_{\#} \dot{\bar{\rho}}_{\#}) + \frac{1}{V_0} (V_0 G_{\#} \bar{U}_{\#j})_{,j} = \frac{1}{V_0} \sum_n ([\rho_{\#n}^s v_k^s n_k] - [U_{\#n,j}^s n_j])$
・運動量 $\bar{U}_{\#i}$ = $\bar{\rho}_{\#} \bar{u}_{\#j}$ 保存式：	
	$(G_{\#} \dot{\bar{U}}_{\#i}) + \frac{1}{V_0} (V_0 G_{\#} \bar{U}_{\#i} \bar{u}_{\#j})_{,j} = -G_{\#} \bar{P}_{,i} + G_{\#} \bar{F}_{\#ij,j} - G_{\#} \bar{T}_{\#ij,j} + G_{\#} \bar{\rho} (\delta_{i3} g + f_c) + \frac{1}{V_0} ([U_{\#i}^s v_k^s n_k] - [(U_{\#i} u_{\#j})^s n_j] - [P^s n_i] + [F_{\#ij}^s n_j])$
・サブグリッドスケール運動エネルギー $\bar{E}_{S\#}$ 保存式：	
	$(G_{\#} \dot{\bar{E}}_{S\#}) + \frac{1}{V_0} (V_0 G_{\#} \bar{E}_{S\#} \bar{u}_{\#j})_{,j} = G_{\#} \left\{ \left(\bar{v}_{\#F} + \frac{\bar{v}_{\#F}}{\sigma_{\#S}} \right) \bar{E}_{S\#,j} \right\}_{,j} - G_{\#} (\bar{\epsilon}_{S\#} + \bar{T}_{\#ij} \bar{d}_{\#ij}) - \bar{E}_{PS} \left\{ \dot{G}_{\#} + \bar{u}_{Pj} \frac{1}{V_0} (V_0 G_{\#})_{,j} \right\}$
・エンタルピー $\bar{H}_{\#}$ 保存式：	
	$(G_{\#} \dot{\bar{H}}_{\#}) + \frac{1}{V_0} (V_0 G_{\#} \bar{H}_{\#} \bar{u}_{\#j})_{,j} = G_{\#} \dot{\bar{P}} + G_{\#} (\bar{F}_{\#ij} \bar{u}_{\#ij} + \bar{\epsilon}_{\#S}) + G_{\#} \left(\frac{\bar{v}_{\#SF}}{\sigma_{\#S}} \bar{H}_{\#,j} \right)_{,j} + G_{\#} \left\{ \bar{\lambda}_{\#} \bar{\vartheta}_{\#,j} + \bar{H}_{\#} \sum_n \left(\frac{\bar{\kappa}_{\#D}}{\sigma_{\# \rho n}} \bar{r}_{\#n,j} \right) \right\}_{,j} + G_{\#} \bar{S}_{H\#} + \frac{1}{V_0} ([H_{\#}^s v_k^s n_k] - [(H_{\#} u_{Fj})^s n_j] - [P_F^s v_k^s n_k] - [Q_{H\#j}^s])$
・上付きバー $\bar{\quad}$ は検査体積における空間平均値を、上付きチルダ $\tilde{\quad}$ はファール(質量加重)平均 $\bar{u} = \overline{\rho u} / \bar{\rho}$ を表す、検査体積： V_0 、体積分率： $G_{\#}$ 、拡散項： $\bar{Q}_{\#n,j}$ 、生成項： $\bar{S}_{\#n}$ 、相間・成分間輸送項： $[\quad]$	

得られた方程式系は乾燥空気の運動だけでなく、大気中に含まれる密度や物性の異なる各種ガスや、火山灰や火山礫などの固体の火山噴出粒子や、雨滴など液体粒などを含む流れ場を記述することができ、以下に示すようにそれらの運動を大気の運動とともに求めることができる。計算例として、桜島からの噴火を例にとり、噴火時に物性の異なる噴出物が混在する場合の移流・拡散を計算した。計算に関しては、周囲の気象条件や地面粗度の影響を取り込んだ変動風速場を発生させ、流入境界条件として用いた。以下に、いくつかの計算例を示す。

開発した計算手法を用いると、火山ガスのように乾燥空気とは異なる密度をもつ気体が混在する多成分密度流を解析することができる。はじめに火山周囲の気流が静穏なときに大気より重たいガスが火口から噴出する場合の例を図 119 に示す。

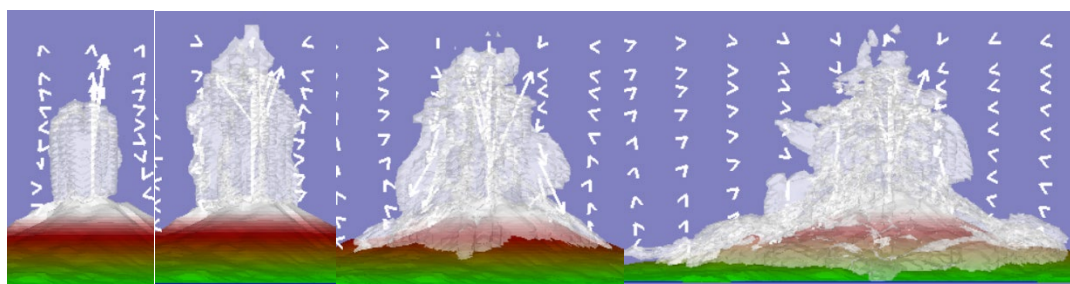


図 119 火山周囲の気流が静穏なときに大気より重たいガスが火口から噴出する場合。図は左から右に向かって時間経過する。白矢印の長さは流速を表す。白色透過面はガスの濃度が高い領域を表す。上昇するガスは自重により崩壊して降下し、回りの空気を連行しながら地面に降りてくる。地面に達したガスは山肌を沿って流れ下り拡散する様子が再現されている。

次に、周囲に風の流れがある場合の例を図 120 に示す。接近流として粗面上に発達した乱流境界層内の乱流場を用いて桜島周辺の気流場を再現し、流入条件とした。

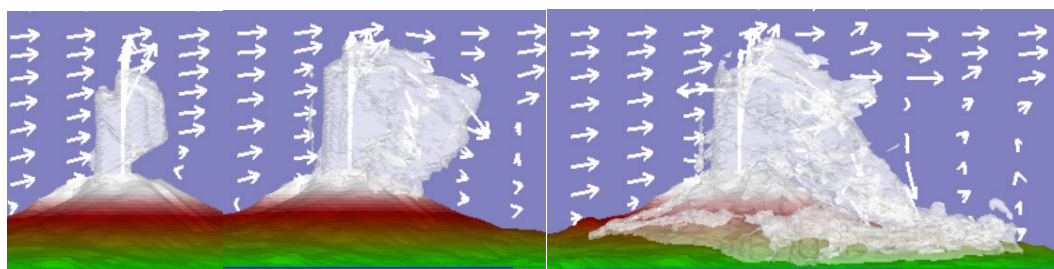


図 120 火山周囲に風の流れがあるときに大気より重たいガスが火口から噴出する場合。図は左から右に向かって時間経過する。白矢印の長さは流速を表す。白色透過面はガスの濃度が高い領域を表す。上昇するガスは自重により崩壊して下降するが、周囲の流れにより風下（右）側にながされながら地面に降りてくる。地面に達したガスは山肌に沿って流れ下り拡散する様子が再現されている。

開発した計算手法は火山灰や礫、雨水粒や氷などのように密度や粘性など物性が異なる固体や液体粒子の集合を流体相とし、大気流れと異なる速度で運動する流れとして扱い、大気と同時に解析することができる。火山灰や礫のような固体粒子を想定し、周囲の大気との間に風圧力と摩擦力による抗力を設定し、力のやり取りを想定した計算を行った。周囲に風の流れがある場合に、火口から大気よりも軽いガスと、固体粒子が噴出する場合の計算例を図 121 に示す。

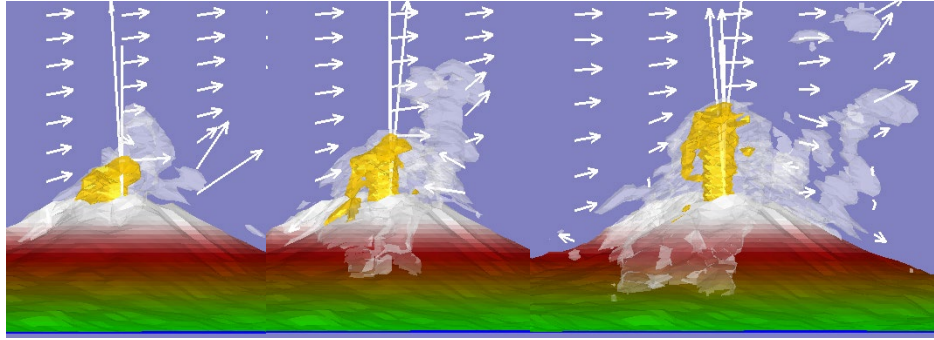


図 121 火山周囲に風の流れがあるときに大気より軽いガスと重たい粒子が火口から噴出する場合。図は左から右に向かって時間経過する。白矢印の長さは流速を表す。白色透過面はガスの濃度が小さい領域を表し、黄色面は粒子の濃度が高い領域を表す。粒子（を含む気流）はガスと共に上昇するが自重により崩壊して下降する。その際、周囲の流れおよびガスを連行して周囲の大気とは異なる速度で降りてくる。粒子流れに巻き込まれなかったガスの一部は、下降せずに風下側に移流拡散する様子が再現されている。

以上、本年度に開発した混相密度流れの解析手法により、火山の様々の噴火形態を再現することができることを示した。実際の噴火に対応した計算を行うためには噴出物の量や時間経過、流れの支配方程式中で用いている拡散係数や比熱などの物性値、乱流のモデル化で用いた係数などを観測値などとの比較による最適化を行うことが今後の課題である。

b) 降灰粒子の凝集効果

i) はじめに

噴火後の降灰粒子は凝集している場合が多く、凝集粒子の空隙内の含水率の大小により粒子の密度は変動する。密度の変動は落下速度の変動につながり、火山灰の地表へ堆積する速さを左右する。火山灰の拡散から地表への堆積までの輸送モデルの高精度化のためには降灰粒子の密度について正しく理解しておく必要がある。また、火山灰粒子の密度の変動を理解することはレーダによる降灰量推定精度の向上のためにも重要である。Maki et al. (2021)²⁰⁾や真木・井口 (2023)²¹⁾の研究では、粒子の凝集を考慮しておらず、岩石の固体密度の上限値 ($2,500 \text{ kg/m}^3$) を仮定してレーダ降灰量推定式を導出した。このため、推定された降灰量は過大評価されていると考えられる。このような背景のもと、昨年度の研究において、火山灰粒子の密度をディストロメータの観測から得られた落下速度の情報から計算するアルゴリズムを提案した。今年度は、そのアルゴリズムを Maki et al. (2021)²⁰⁾や真木・井口 (2023)²¹⁾が解析した噴火事例に適用して、降灰粒子の密度変化の影響を調べた。

ii) 手法とデータ

手法の詳細は昨年度の報告書に記載しているので、ここでは、簡単な記述にとどめる。筆者等は、火山灰粒子の密度は、終端速度に達した粒子に働く力の釣り合い

と Wilson and Huang (1979)²²⁾の抵抗係数に関する実験式から導き出される次式で表されることを示した。

$$\rho_p = \frac{3}{4} \rho_a g^{-1} \left(\frac{24\eta}{d_e \rho_a w} F^{-0.828} + 2\sqrt{1.07 - F} \right) d_e^{-1} w^2 \quad (6)$$

上式は、粒子の密度 ρ_p は、粒子の形状ファクター F 、球相当直径 d_e 、終端速度 w で決まることを示している。なお、 ρ_a 、 η 、 g はそれぞれ空気の密度、粘性係数、重力加速度で、いずれも既知である。 F は二次元ビデオディストロメータによる落下粒子の形状解析 (Suh et al., 2019²³⁾；酒井ほか、2020²⁴⁾) から得られた次の関係式を用いる。

$$F = 1.04 - 1.21e^{-4.02d_e} \quad (7)$$

式(6) と (7) に出てくる (d_e , w) は質量フラックス中心 (Ishizaka et al., 2016²⁵⁾) の座標とした。

使用したディストロメータの再解析したデータは、Maki et al. (2021)²⁰⁾が解析した 2018 年の 6 つの桜島噴火事例 (表 13) のデータである。また、真木・井口 (2023)²¹⁾が使った 2018 年の全ての桜島噴火事例のデータも再解析した。

表 13 解析した 6 つの桜島噴火事例。Maki et al. (2021)²⁰⁾を参考。噴火時刻、噴煙高度、移動方向は桜島の噴火についての統計資料 (気象庁) による。

ID	Eruption Onset (LST)	Cloud Top Height (m)	Movement	Disdrometer
18-169	08:08, May 15, 2018	2,500	Top	NAB
18-194	19:48, May 22, 2018	2,500*	Northwest*	HAR, HIK, SVO
18-227	08:01, May 30, 2018	2,500	Eastward	KUR, URA
18-243	11:35, June 10, 2018	3,500	Top	HAR, HIK
18-254	07:19, June 16, 2018	4,700	Westward	AKA, SBT
18-277	15:38, July 16, 2018	4,600	Westward	AKA, HAR, HIK

*SVO-XMP レーダ観測から推定

iii) 結果

凝集粒子の密度を考慮した結果と比較するために、固体密度 ($2,500\text{kgm}^{-3}$) を仮定して得られた結果を表 14 と表 15 に示す。

表 14 粒子の密度 $\rho_p = 2.50 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ を仮定して求めた降灰量推定式。Maki et al. (2021)を参考。 R_A ($\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) : 降灰強度、 C_A (kg m^{-3}) : 降灰の空間密度、 Z ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$) : レーダ反射因子。 R : 相関係数、 $RMSE$: 平方根誤差。バルク密度 $\rho_b = 1.25 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ 。

Case	Site	Sampling Period (LST)	(min)	R_A - Z Relationship (R , $RMSE$)	C_A - Z Relationship (R , $RMSE$)	Range
1	NABE	08:22–08:35, 15 May 2018	14	$R_A = 8.62 \times 10^{-2} Z^{0.809}$ (0.963, 0.300)	$C_A = 1.51 \times 10^{-2} Z^{0.680}$ (0.912, 0.046)	$0 \leq Z \leq 1 \times 10^2$
2	HART	20:03–20:11, 22 May 2018	9	$R_A = 5.44 \times 10^{-2} Z^{0.595}$ (0.910, 0.907)	$C_A = 0.629 \times 10^{-2} Z^{0.569}$ (0.950, 0.058)	$0 \leq Z \leq 2 \times 10^3$
	HIKP	20:00–20:14, 22 May 2018	12	$R_A = 3.03 \times 10^{-2} Z^{0.826}$ (0.977, 0.397)	$C_A = 0.496 \times 10^{-2} Z^{0.770}$ (0.980, 0.043)	$0 \leq Z \leq 1 \times 10^3$
3	KURP	08:09–08:13, 30 May 2018	4	$R_A = 14.6 \times 10^{-2} Z^{0.522}$ (0.959, 0.613)	$C_A = 1.72 \times 10^{-2} Z^{0.423}$ (0.903, 0.055)	$0 \leq Z \leq 1 \times 10^3$
4	HART	12:03–12:20, 10 June 2018	12	$R_A = 9.45 \times 10^{-2} Z^{0.568}$ (0.972, 0.929)	$C_A = 4.49 \times 10^{-2} Z^{0.294}$ (0.899, 0.073)	$0 \leq Z \leq 5 \times 10^3$
5	SBTT	07:35–08:21, 16 June 2018	31	$R_A = 3.55 \times 10^{-2} Z^{0.778}$ (0.917, 0.339)	$C_A = 1.20 \times 10^{-2} Z^{0.692}$ (0.960, 0.036)	$0 \leq Z \leq 4 \times 10^2$
6	AKAM	15:53–16:12, 16 July 2018	18	$R_A = 10.0 \times 10^{-2} Z^{0.653}$ (0.851, 1.123)	$C_A = 0.553 \times 10^{-2} Z^{0.782}$ (0.913, 0.100)	$0 \leq Z \leq 7 \times 10^2$
All	-	-	88	$R_A = 22.8 \times 10^{-2} Z^{0.436}$ (0.819, 1.247)	$C_A = 6.56 \times 10^{-2} Z^{0.261}$ (0.634, 0.147)	$0 \leq Z \leq 5 \times 10^3$

表 15 粒子の密度 $\rho_p = 2.50 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ を仮定して求めた降灰量推定式。真木・井口 (2023)²¹⁾を参照。2018 年から 2020 年の間に発生した噴火事例の粒径分布データ (計 203 噴火事例, 計 4741 サンプル) に基づく。 R_A : 降灰強度 ($\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)、 C_A : 降灰の空間密度 (kg m^{-3})、 Z : レーダ反射因子 ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$)。 S_A : 時間積算降灰量 (kg m^{-2})、 S_Z : 時間積算降灰量 ($\text{mm}^6 \text{ m}^{-3} \text{ h}$)、 ρ_b : バルク密度 ($1.25 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$) を仮定している。

Site	Erup	Smpl	$R_A = a_1 Z_A^{b_1}$		$C_A = a_2 Z_A^{b_2}$		$S_A = a_3 S_Z^{b_3}$	
			a ₁	b ₁	a ₂	b ₂	a ₃	b ₃
AKA	7	101	5.14×10^{-2}	0.896	2.08×10^{-5}	0.622	2.73×10^{-2}	1.12
ARI	35	600	11.7×10^{-2}	0.744	2.61×10^{-5}	0.61	7.75×10^{-2}	0.938
ART	50	756	8.16×10^{-2}	0.828	1.03×10^{-5}	0.837	3.47×10^{-2}	1.08
FUR	2	47	5.93×10^{-2}	0.975	1.45×10^{-5}	0.823	3.80×10^{-2}	1.18
FUT	4	67	5.05×10^{-2}	0.865	0.907×10^{-5}	0.747	2.76×10^{-2}	1.27
HAR	8	125	6.66×10^{-2}	0.855	1.26×10^{-5}	0.827	5.41×10^{-2}	1.00
HIK	30	615	4.59×10^{-2}	0.822	0.867×10^{-5}	0.738	2.39×10^{-2}	1.02
HK1	3	42	6.08×10^{-2}	0.808	0.809×10^{-5}	0.794	4.06×10^{-2}	0.992
HK2	3	70	3.94×10^{-2}	1.2	1.23×10^{-5}	0.865	5.98E-02	0.82
JIG	9	224	6.64×10^{-2}	0.939	1.04×10^{-5}	0.879	4.04×10^{-2}	1.05
KIT	4	88	6.56×10^{-2}	0.848	0.962×10^{-5}	0.91	4.50×10^{-2}	0.954
KOM	16	256	7.16×10^{-2}	0.778	0.105×10^{-5}	0.914	5.76×10^{-2}	1.01
KUR	26	356	11.8×10^{-2}	0.719	1.23×10^{-5}	0.812	6.29×10^{-2}	0.967
MOC	2	52	5.82×10^{-2}	0.993	1.41×10^{-5}	0.84	5.78×10^{-2}	0.996
MTU	14	258	8.06×10^{-2}	0.793	1.26×10^{-5}	0.866	10.6×10^{-2}	0.843
NAB	38	605	7.85×10^{-2}	0.831	0.973×10^{-5}	0.866	3.18×10^{-2}	1.07
NTT	5	79	3.91×10^{-2}	0.929	1.84×10^{-5}	0.643	2.84×10^{-2}	1.10
SAI	7	104	7.00×10^{-2}	0.747	1.54×10^{-5}	0.635	3.79×10^{-2}	0.938
SBT	11	203	8.22×10^{-2}	0.811	1.29×10^{-5}	0.832	5.62×10^{-2}	0.972
SVO	6	59	11.0×10^{-2}	0.605	1.30×10^{-5}	0.7	3.88×10^{-2}	1.01
URA	12	222	6.10×10^{-2}	0.808	0.878×10^{-5}	0.825	2.31×10^{-2}	1.03
ALL	203	4741	9.34×10^{-2}	0.745	1.81×10^{-5}	0.673	5.66×10^{-2}	0.972

本研究で得られた 6 つの事例の凝集粒子の密度を表 16 に示す。密度変化を考慮して求めた降灰量推定式を表 17 に示す。参考の為に、凝集粒子の密度の計算は、図 122 に示した三種類の代表点で行った。すなわち、最頻点の密度 ($\rho_{p,A}$)、質量重心の密度 ($\rho_{p,B}$)、そして、降灰強度の推定に必要な質量フラックス中心の密度 ($\rho_{p,C}$) である。6 月 16 日の噴火事例では $\rho_{p,C}$ は 841 kg m^{-3} と計算された。6 つの噴火事例では、 $\rho_{p,C}$ は 274 kg m^{-3} から $1,155 \text{ kg m}^{-3}$ である。 $\rho_{p,B}$ は $\rho_{p,C}$ に比べて若干、大きい。 $\rho_{p,A}$ は $\rho_{p,C}$ の 1/3 程度である。

表 16 6つの噴火事例の降下テフラの密度と粒径分布パラメータ。

Eruption ID	Disdrometer Point	Data (min)	$\rho_{p,A}$ (kg m ⁻³)	$\rho_{p,B}$ (kg m ⁻³)	$\rho_{p,C}$ (kg m ⁻³)	$\log_{10}NT$ (NT: m ⁻³)	$\log_{10}N_0$ (N_0 : mm ⁻¹ m ⁻³)	Λ (mm ⁻¹)	μ	D_{max} (mm)	$\log_{10}N_w$ (mm ⁻¹ m ⁻³)	D_m (mm)
18-0169	NAB	26	898	1,155	1,155	5.03	10.7	63.8	30.3	1.63	4.52	0.556
	HAR	13	1.176	902	757	4.08	4.22	7.55	3.95	3.25	3.15	1.09
18-0194	HIK	21	512	695	842	4.49	3.49	25.6	15.2	3.75	3.14	0.90
	SVO	22	702	658	538	4.48	3.88	11.6	6.20	3.25	3.19	1.01
	ALL	56	702	695	757	4.87	3.49	15.7	8.94	3.75	3.14	0.989
18-0227	KUR	14	1.439	987	1,102	4.01	3.10	43.3	28.3	3.70	2.65	0.986
	URA	23	201	261	262	4.94	17.1	44.4	21.3	1.06	4.76	0.570
18-0243	ALL	38	201	902	842	4.99	3.10	44.0	23.7	3.75	2.65	0.713
	HAR	22	310	726	822	4.61	3.40	15.0	6.79	2.75	3.16	0.995
	HIK	49	512	538	385	5.37	4.14	13.0	6.71	3.75	4.10	0.877
18-0254	ALL	71	201	583	557	5.44	3.40	13.5	6.73	3.75	3.16	0.910
	AKA	51	201	512	400	5.70	5.36	46.2	25.0	2.75	3.27	0.679
	SBT	61	201	538	757	5.01	4.16	38.8	21.4	2.75	2.76	0.729
18-0277	ALL	112	201	400	418	5.78	4.16	42.5	23.2	2.75	2.76	0.703
	AKA	23	898	851	695	5.06	3.41	16.0	9.03	3.25	2.80	0.877
	HAR	24	310	665	430	4.71	14.2	39.6	16.9	1.19	5.00	0.533
	HIK	39	201	313	274	5.05	4.13	16.3	8.80	3.25	3.48	0.865
ALL	86	201	658	695	5.44	3.41	20.9	10.5	3.25	2.80	0.802	
ALL	ALL	389	201	658	583	6.16	3.10	30.4	16.0	3.75	2.65	0.797

$\rho_{p,A}$ (kg m⁻³), $\rho_{p,B}$ (kg m⁻³), $\rho_{p,C}$ (kg m⁻³), $\log_{10}NT$ (NT: m⁻³), $\log_{10}N_0$ (N_0 : mm⁻¹m⁻³), Λ (mm⁻¹), μ , D_{max} (mm), $\log_{10}N_w$ (mm⁻¹m⁻³), D_m (mm)。

表 17 6つの噴火事例の降下テフラの密度を考慮して求めた降灰量推定式

Eruption ID	Obs. Point	$R_A = a_1 Z_A^{b_1}$			$C_A = a_2 Z_A^{b_2}$			$S_A = a_3 S_Z^{b_3}$			Conditions	
		a_1	b_1	r^2	a_2	b_2	r^2	a_3	b_3	r^2	$\leq Z_A$ (mm ⁶ m ⁻³)	$\leq S_Z$ (mm ⁶ m ⁻³)
18-0169	NAB	4.10E-02	0.884	0.959	1.05E-05	0.712	0.894	1.14E-02	1.16	1.000	0.5×10^3	60
	HAR	1.75E-02	0.684	0.557	1.90E-06	0.672	0.663	8.26E-03	0.696	0.962	4.5×10^3	300
18-0194	HIK	3.86E-01	0.336	0.485	1.85E-13	-0.797	-2.40	3.63E-09	3.17	0.934	7.0×10^3	450
	SVO	1.86E-01	0.280	0.396	4.47E-05	0.207	0.294	6.10E-08	2.58	0.992	8.1×10^3	450
	ALL	1.26E-01	0.408	0.363	2.84E-05	0.306	0.364	9.90E-04	1.03	0.511	8.1×10^3	450
18-0227	KUR	4.59E-01	0.354	0.623	4.82E-05	0.293	0.484	1.43E-07	3.09	0.934	6.0×10^3	250
	ALL	1.33E-03	1.16	0.793	8.26E-07	1.03	0.701	7.68E-03	0.742	0.996	0.3×10^3	45
18-0243	ALL	9.07E-02	0.543	0.637	2.36E-05	0.379	0.550	3.33E-04	1.52	0.954	6.0×10^3	280
	HAR	6.64E-02	0.580	0.914	1.28E-05	0.438	0.873	1.93E-05	1.63	0.997	1.7×10^4	1000
	HIK	4.39E-02	0.611	0.894	1.14E-05	0.521	0.863	7.56E-06	1.5876	0.993	8.5×10^4	4200
18-0254	ALL	5.18E-02	0.597	0.895	7.26E-06	0.557	0.820	4.70E-03	0.799	0.944	8.5×10^4	4200
	AKA	2.27E-01	0.719	0.878	1.52E-05	0.526	0.740	4.93E-04	1.25	0.990	9.1×10^3	900
	SBT	1.38E-02	0.753	0.670	1.12E-05	0.458	0.512	3.93E-03	0.961	0.992	1.6×10^3	250
18-0277	ALL	1.71E-02	0.750	0.868	8.16E-06	0.594	0.718	1.11E-03	1.12	0.993	9.1×10^3	900
	AKA	7.46E-03	0.681	0.635	1.05E-05	0.408	0.295	1.17E-02	0.550	0.887	3.6×10^3	500
	HAR	2.87E-02	0.674	0.796	5.01E-06	0.776	0.611	7.79E-03	0.933	0.998	0.16×10^3	20
	HIK	7.46E-03	0.681	0.635	1.05E-05	0.408	0.295	1.17E-02	0.550	0.887	1.2×10^4	710
ALL	1.96E-01	0.410	0.208	4.19E-05	0.320	0.212	1.15E-2	0.559	0.755	1.2×10^4	710	
ALL	ALL	4.76E-02	0.602	0.711	1.01E-05	0.521	0.629	3.42E-02	0.559	0.665	8.5×10^4	4200

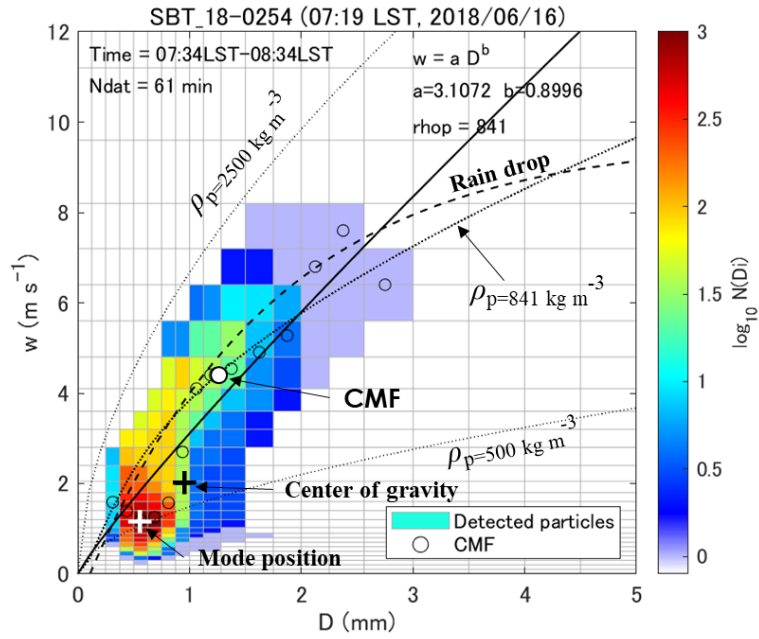


図 122 ディストロメータ観測から得られる、粒径(D)－落下速度(w)頻度分布における三種類の代表点：最頻値点、重心点、質量フラックスセンター。各代表点を通る曲線から密度が求まる。

密度の違いによって降灰量がどのように異なるかを 6 月 16 日の噴火事例（噴火 ID:18-0254）について調べた。粒子密度を $2,500\text{kgm}^{-3}$ とした場合が図 123 で、 841kgm^{-3} とした場合が図 124 である。時間積算総降灰量は前者が $6.27 \times 10^7 \text{ kg}$ 、後者が $3.02 \times 10^7 \text{ kg}$ であった。粒子密度を $2,500\text{kgm}^{-3}$ とした場合、約 2 倍の降灰量を推定していたことになる

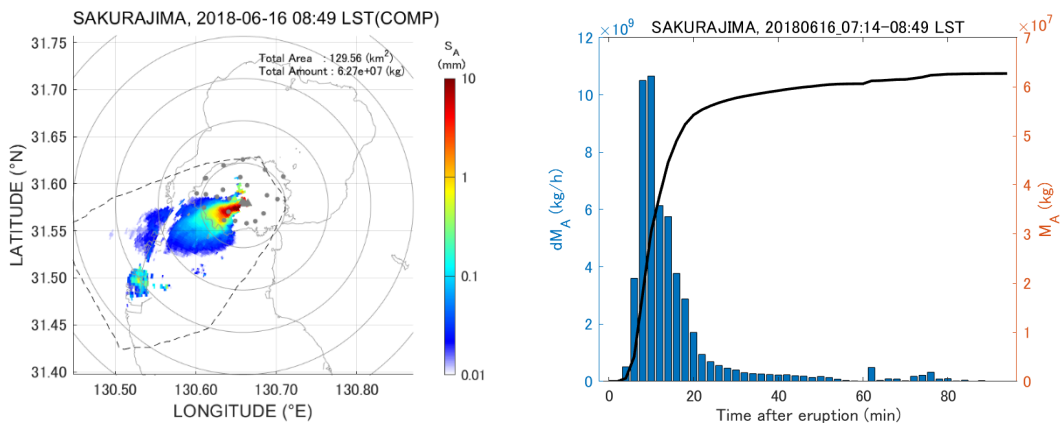


図 123 密度 $2,500\text{kgm}^{-3}$ とした場合の降灰量分布。左：時間積算降灰量の水平分布、右：時間積算降灰量の時間変化。

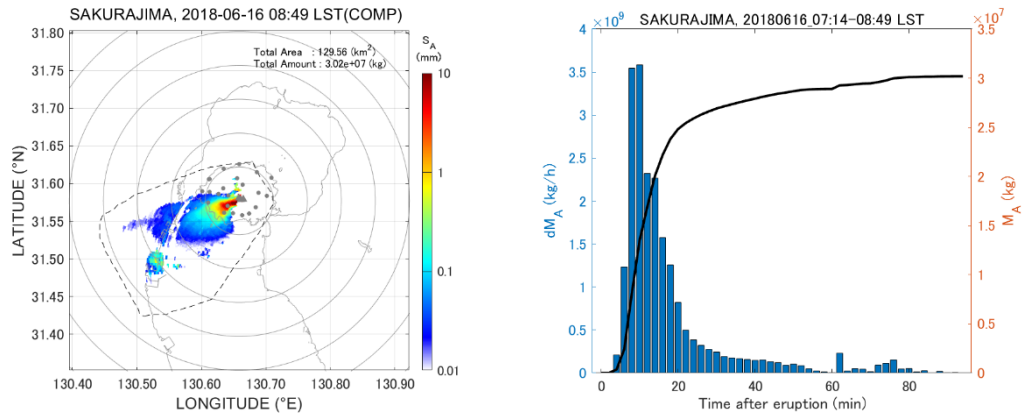


図 124 密度 841kgm^{-3} とした場合の降灰量分布。左：時間積算降灰量の水平分布、右：時間積算降灰量の時間変化。

次に、2018 年の全噴火事例について、各事例の観測点毎に降灰粒子の密度を求めた。その結果の一部を表 18 に示す。 $\rho_{p,c}$ のヒストグラムを図 125 に示す。 $\rho_{p,c}$ は 121kgm^{-3} から 1276kgm^{-3} までの範囲で変動するが、ピークは $300\sim 400\text{kgm}^{-3}$ と $800\sim 900\text{kgm}^{-3}$ の 2 か所にある。推定された密度を用いて計算した降灰量推定式を図 126 に示す。

表 18 2018 年の全噴火事例の降下テフラの密度と粒径分布パラメータ（抜粋）。

date	ierp	time	DiA	VjA	DiB	VjB	DiC	VjC	rhopA	rhopB	rhopC	FA	FB	FC	area	maxf	logNT
2018/6/2 18-0231_f	26	0.424	1.177	0.424	1.54	0.547	1.54	309.7	519.5	336.4	0.82	0.82	0.906	82	6.61E+02	4.71E+00	
2018/6/16 18-0254_f	51	0.547	1.177	0.673	2.259	0.804	2.259	200.5	511.5	400	0.906	0.959	0.992	182	5.60E+03	5.70E+00	
2018/6/16 18-0256_f	14	0.547	1.177	0.804	1.751	0.941	1.751	200.5	245.4	200.4	0.906	0.992	1.013	133	6.50E+01	3.71E+00	
2018/7/16 18-0277_f	23	0.547	2.569	0.804	3.345	0.941	3.345	898.4	850.5	694.7	0.906	0.992	1.013	229	1.31E+03	5.06E+00	
2018/7/26 18-0282_f	11	0.547	1.35	0.673	1.751	0.673	1.751	261.2	313.8	313.8	0.906	0.959	0.959	97	3.20E+02	4.35E+00	
2018/7/27 18-0288_f	6	0.547	1.35	0.547	1.54	0.547	1.54	261.2	336.4	336.4	0.906	0.906	0.906	78	2.37E+02	4.12E+00	
2018/1/13 18-0004_f	6	0.547	2.259	0.673	2.569	0.941	2.569	701.6	654.9	418.3	0.906	0.959	1.013	136	6.40E+01	3.85E+00	
2018/3/11 18-0023_f	13	0.547	1.177	0.424	1.177	0.547	1.177	200.5	309.7	200.5	0.906	0.82	0.906	63	2.34E+02	4.13E+00	
2018/4/13 18-0087_f	29	0.547	2.928	0.547	2.928	0.547	2.928	1155	1155	1155	0.906	0.906	0.906	79	3.05E+02	4.29E+00	
2018/4/25 18-0117_f	8	0.547	2.259	0.547	2.259	0.547	2.259	701.6	701.6	701.6	0.906	0.906	0.906	100	1.06E+02	4.03E+00	
2018/4/28 18-0126_f	10	0.304	1.35	0.304	1.751	0.304	1.751	774.3	1276.2	1276.2	0.683	0.683	0.683	42	8.70E+01	3.90E+00	
2018/5/14 18-0165_f	18	0.424	2.259	0.424	2.259	0.547	2.259	1083.5	1083.5	898.4	0.82	0.82	0.906	62	3.55E+02	4.21E+00	
2018/5/24 18-0201_f	6	0.547	2.928	0.547	2.928	0.673	2.928	1155	1155	842	0.906	0.906	0.959	55	9.40E+01	3.46E+00	
2018/11/29 18-0421_f	5	0.424	2.259	0.547	2.569	0.547	2.569	1083.5	898.4	898.4	0.82	0.906	0.906	64	2.98E+02	4.10E+00	
2018/12/13 18-0430_f	20	0.547	1.177	0.547	1.54	0.673	1.751	200.5	336.4	313.8	0.906	0.906	0.959	101	7.80E+01	3.89E+00	
2018/12/17 18-0439_f	63	0.547	1.177	0.547	1.751	0.673	1.751	200.5	430.4	313.8	0.906	0.906	0.959	130	1.57E+02	4.21E+00	
2018/12/19 18-0446_f	6	0.547	1.177	0.547	1.35	0.547	1.35	200.5	261.2	261.2	0.906	0.906	0.906	57	3.30E+01	3.26E+00	
2018/4/23 18-0109_f	6	0.804	1.54	0.804	1.751	0.941	1.751	191.8	245.4	200.4	0.992	0.992	1.013	87	3.10E+01	3.19E+00	
2018/4/27 18-0122_f	15	0.547	1.177	0.547	1.751	0.673	1.751	200.5	430.4	313.8	0.906	0.906	0.959	67	4.60E+01	3.51E+00	
2018/5/12 18-0157_f	12	0.547	1.177	0.547	1.751	0.547	1.751	200.5	430.4	430.4	0.906	0.906	0.906	91	8.80E+01	3.84E+00	
2018/5/25 18-0213_f	7	0.547	2.259	0.547	2.569	0.547	2.569	701.6	898.4	898.4	0.906	0.906	0.906	82	1.08E+02	3.78E+00	
2018/5/29 18-0223_f	16	0.424	2.259	0.547	2.259	0.547	2.259	1083.5	701.6	701.6	0.82	0.906	0.906	73	1.39E+02	4.07E+00	
2018/11/27 18-0418_f	8	0.547	2.259	0.673	1.989	0.673	1.989	701.6	400.5	400.5	0.906	0.959	0.959	98	3.20E+01	3.58E+00	
2018/12/16 18-0437_f	5	0.547	1.54	0.547	1.751	0.673	1.751	336.4	430.4	313.8	0.906	0.906	0.959	96	8.80E+01	3.69E+00	

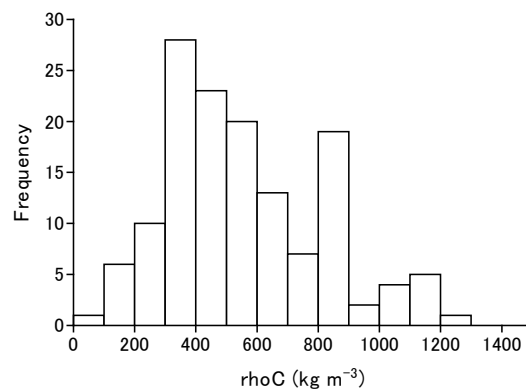


図 125 2018 年に発生した桜島全噴火事例の降灰密度のヒストグラム。

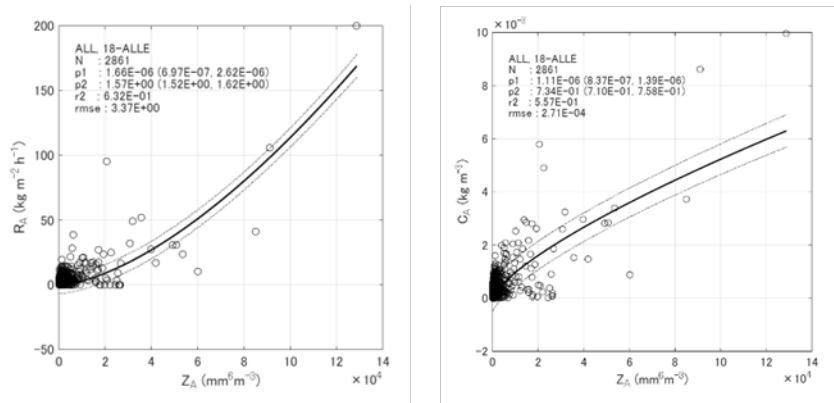


図 126 2018 年の全噴火事例のデータを基にした降灰量推定式。左： Z - R_A 関係式、右： Z - C_A 関係式。

iv) まとめ

ディストロメータ観測から得られる粒径-終端速度の散布図から、質量フラックスセンター (CMF) を求め、降灰粒子の密度を推定した。解析した 2018 年の六つの噴火事例の降灰粒子の密度は、300 から 1200 kgm^{-3} でこれまで筆者らが仮定していた密度 2500 kgm^{-3} の $1/8$ から $1/2$ であった。2018 年全噴火事例では、約 120 kgm^{-3} から 1300 kgm^{-3} の範囲で変動した。従って、従来の R_A - Z 関係式はテフラ量を過大評価していたことになる。今後、 R_A - Z 関係式の精度向上のために多くの噴火事例について密度 (CMF) の変動特性を明らかにする必要がある。

6) 火山灰拡散予測のためのオンラインシステム開発

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。

2025 年には 172 の爆発を含む全部で 361 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 46 回の爆発について比較する。

このうち、雨天時を除いてレーダにて記録されたものは 33 回であった。これらのなかから幾つかについてオンラインシステムの出力結果をレーダと比較して図 80 ~ 図 97 に示す。両者は降下火山灰の厚さ分布にて示している。上段がレーダの反射強度から推定された降灰量で、概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。下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。

2025 年 1 月 19 日 15 時 26 分の爆発 (図 127) は噴煙高度 2,000 m で、南岳 B 火口の噴火で、流向は東であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から東北東の方向である。一方、オンラインシステムでは南東から東の方向を予測し

ていた。オンラインシステムの実出力結果の方が降下火山灰の広がりが広いのは、レーダで捉えられる反射強度は火山灰の濃度に依存するからである。

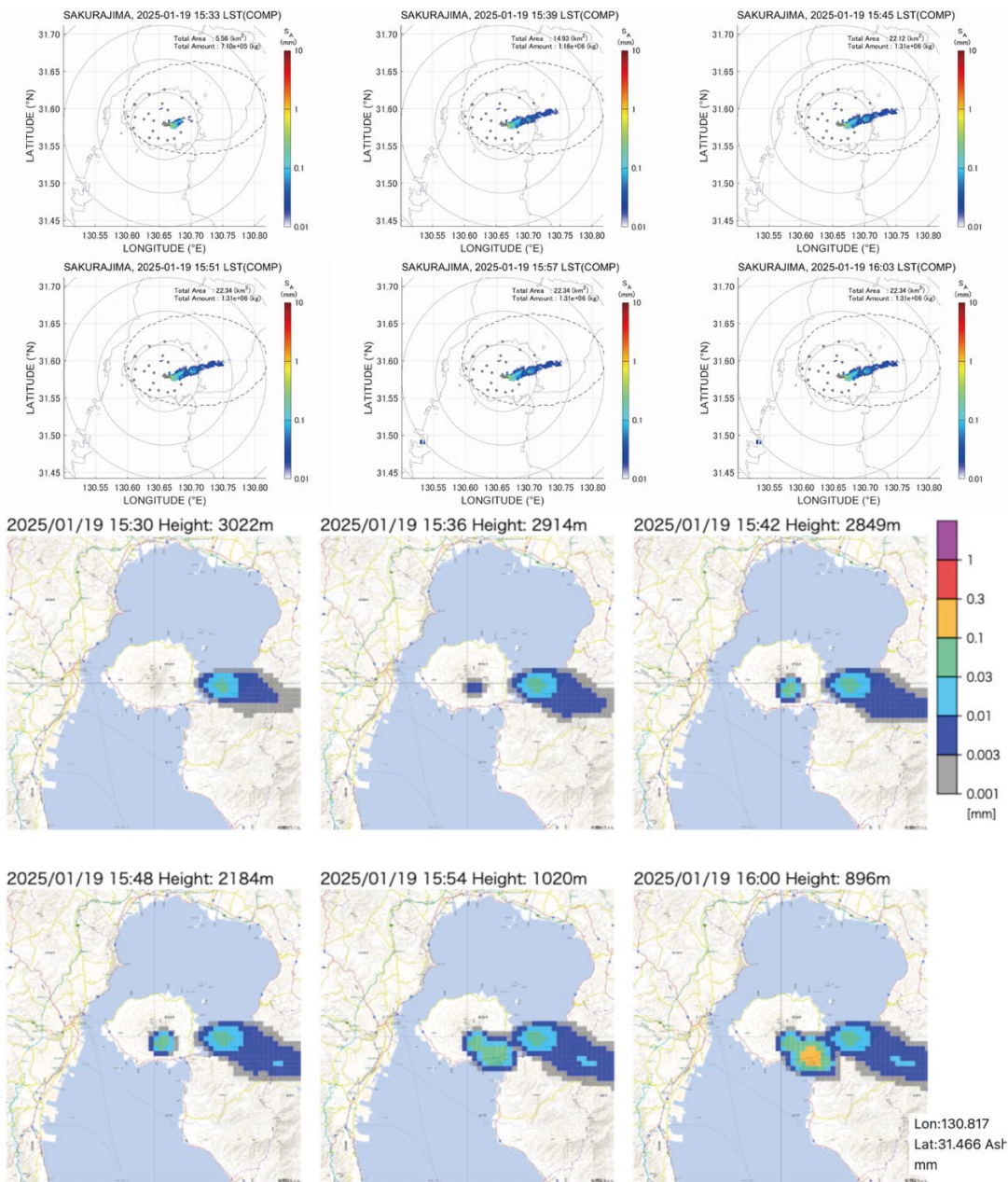


図 127 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025 年 1 月 19 日 15 時 26 分の爆発。

2025 年 1 月 30 日 20 時 13 分と 2025 年 2 月 9 日 20 時 3 分の爆発(図 128、図 129)はともに噴煙高度 2,700 m で、南岳 B 火口の噴火で、流向は南東であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から南南東から南東の方向である。一方、オンラインシステムでは、南から南東方向となり、レーダ観測とオンライン観測はほぼ傾向は似ている。

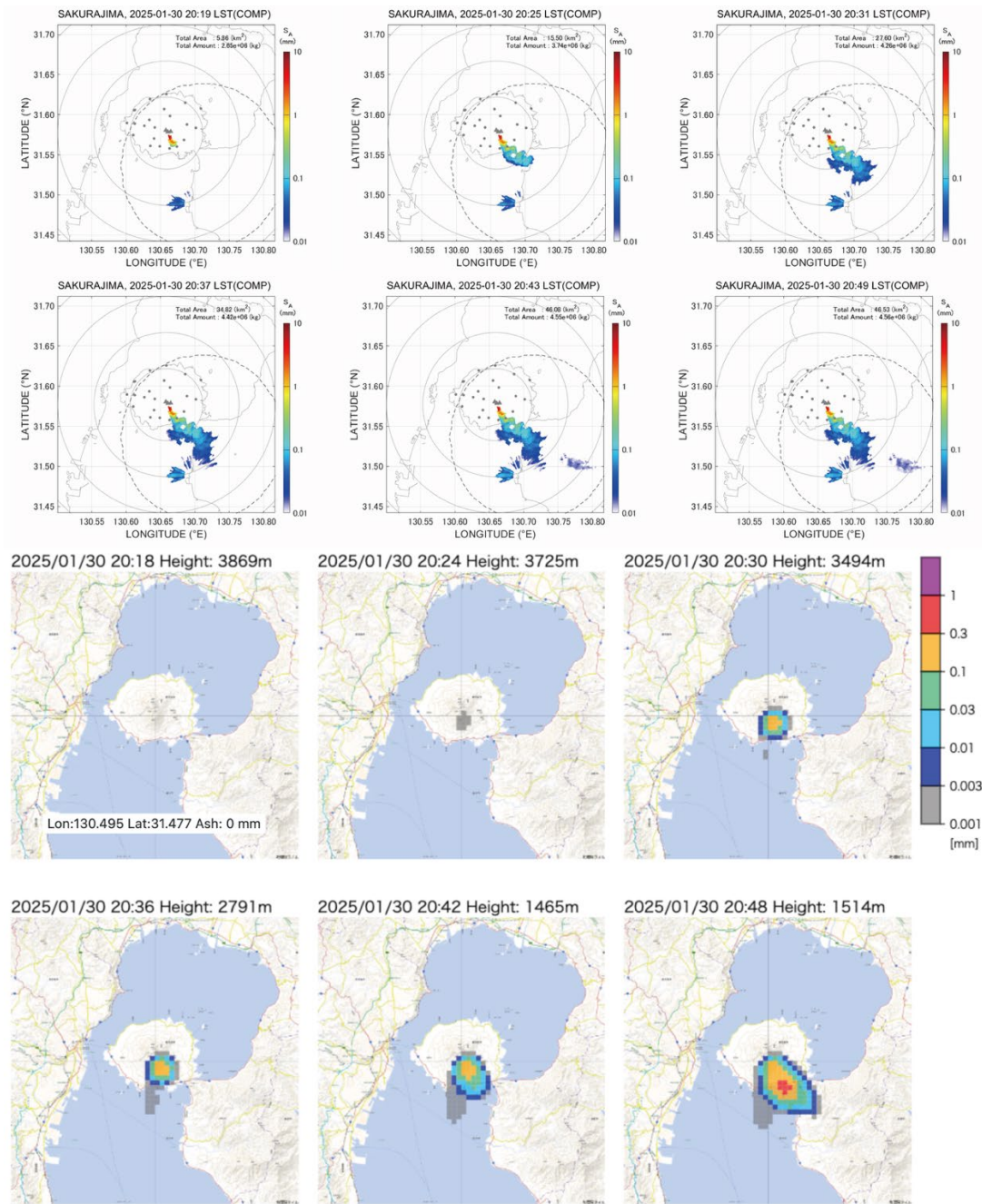


図 128 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年1月30日20時13分の爆発。

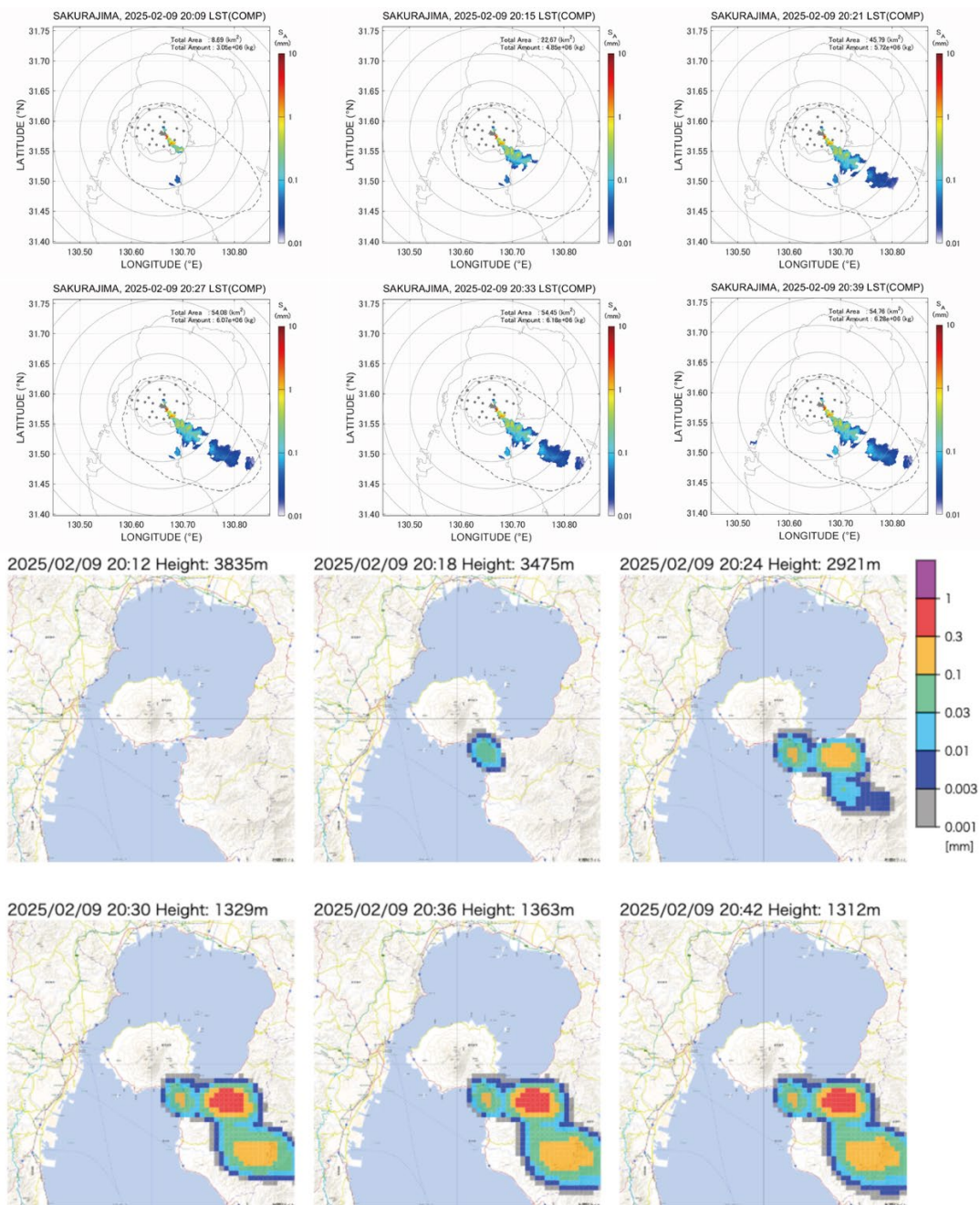


図 129 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年2月9日20時3分の爆発。

2025年3月11日17時6分の爆発（図130）は噴煙高度2,500mで、南岳B火口の噴火で、流向は直上であった。しかし、火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から東南東の方向であった。また、オンラインシステムでは、東南東から南東を予測しており、レーダ観測とオンライン観測はほぼ傾向は似ている。また、火口からの到達距離は両者で同様である。

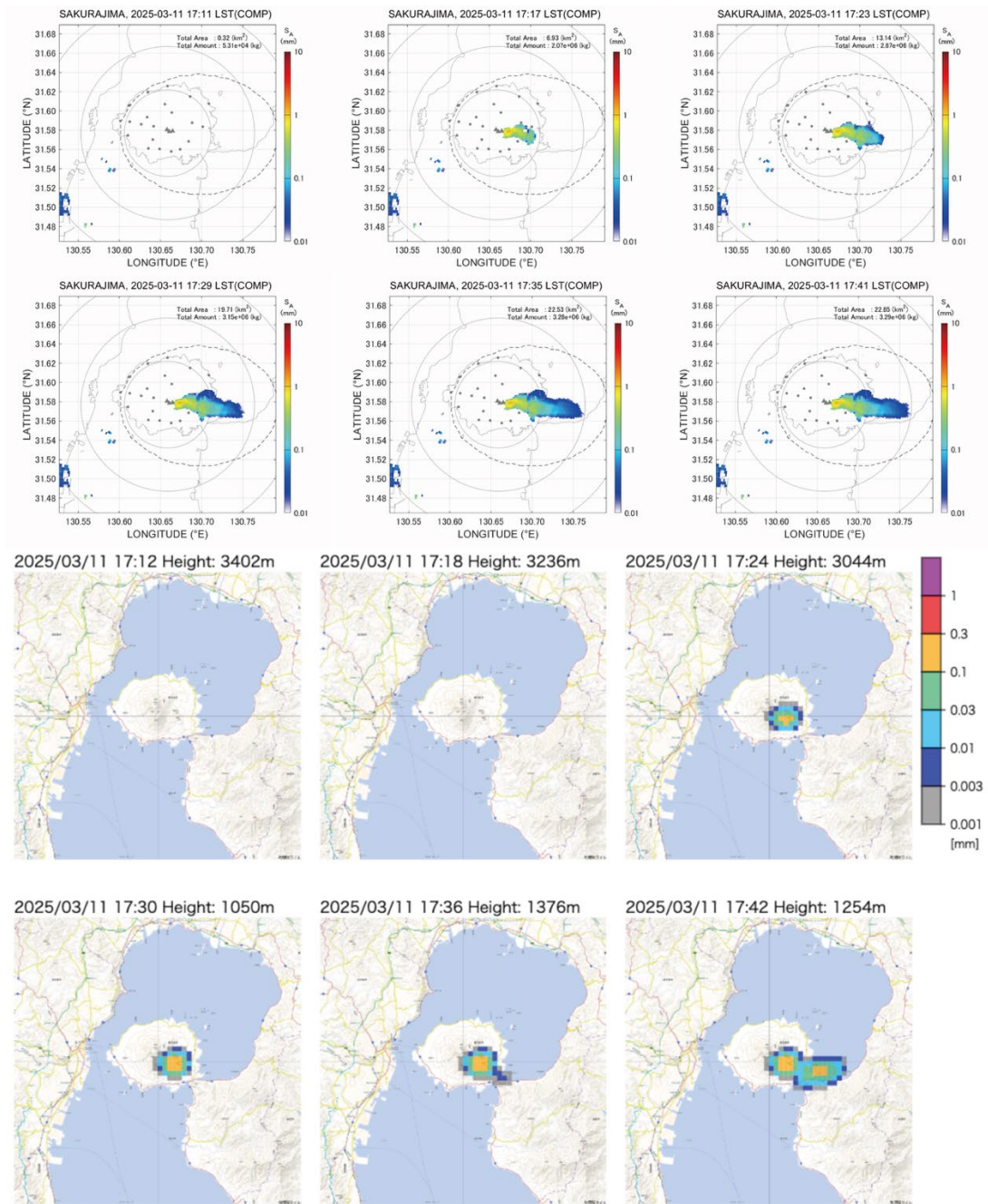


図 130 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年3月11日17時6分の爆発。

2025年4月5日15時24分の爆発（図131）は噴煙高度2,600mで、南岳B火口の噴火で、流向は北東であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から北東の方向であった。また、オンラインシステムでは、東から北東を予測しており、レーダ観測とオンライン観測はほぼ傾向は似ている。レーダ観測では幅が狭いのにに対して、オンラインシステムによる予測では広がりがある。

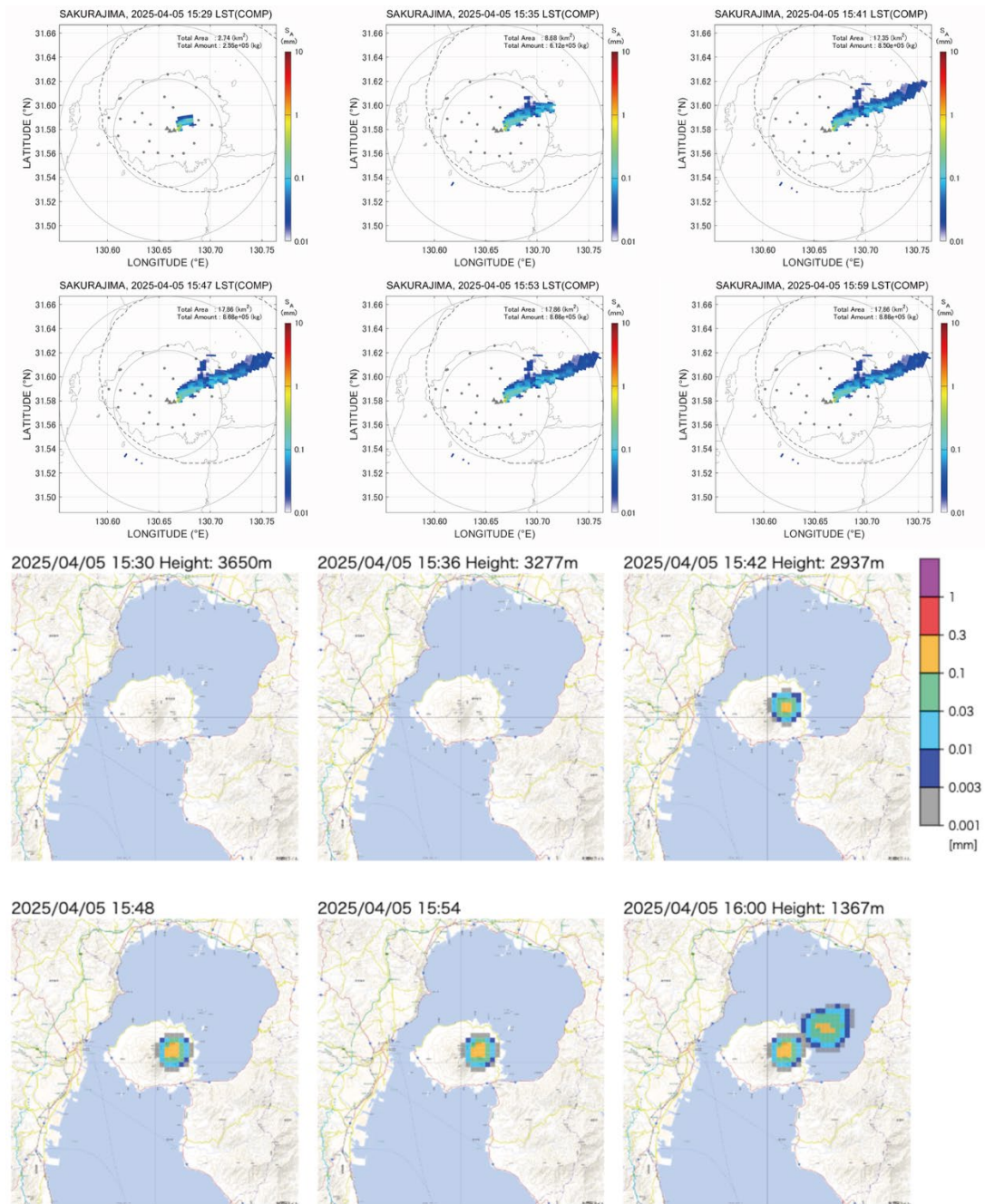


図 131 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年4月5日15時24分の爆発。

2025年5月15日21時38分と2025年5月16日3時11分の爆発（図132と図133）は、ともに噴煙高度2,500mで、南岳B火口の噴火で、流向は東であった。火山灰の移流が遅く、レーダ観測によると、噴火開始から30分経過後において山頂付近に降灰があり、東方向に広がっている。オンラインシステムでは、北東に流れていく予測をしており、レーダ観測と違いが大きい。当日の気象条件では南風であるので、噴煙は北に流れるが、風速が弱いのと、オンラインシステムで使っている気象場との違いがあるため、レーダ観測とオンラインシステムに予測との食い違いが生じたと考えられる。

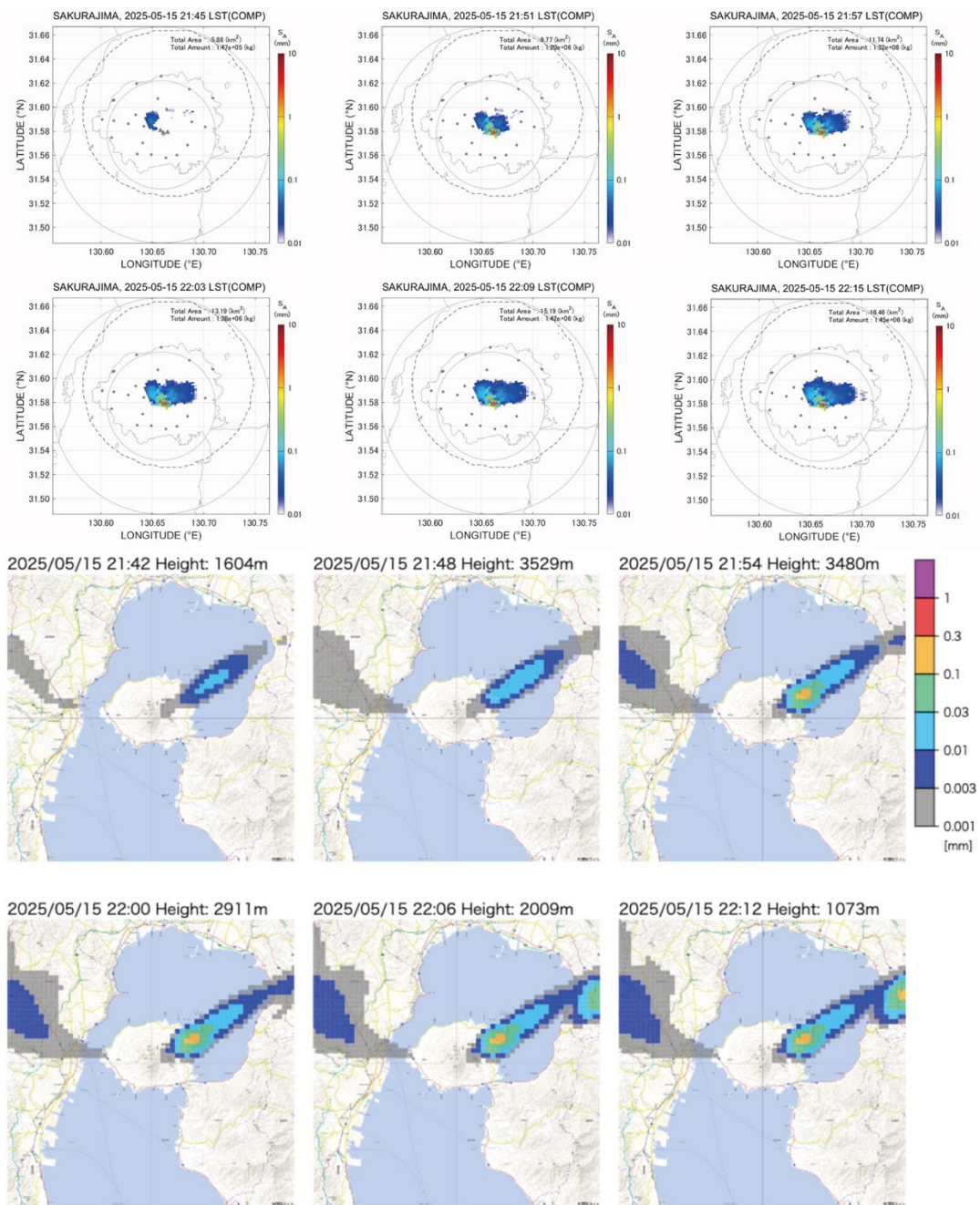


図 132 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年5月15日21時38分の爆発。

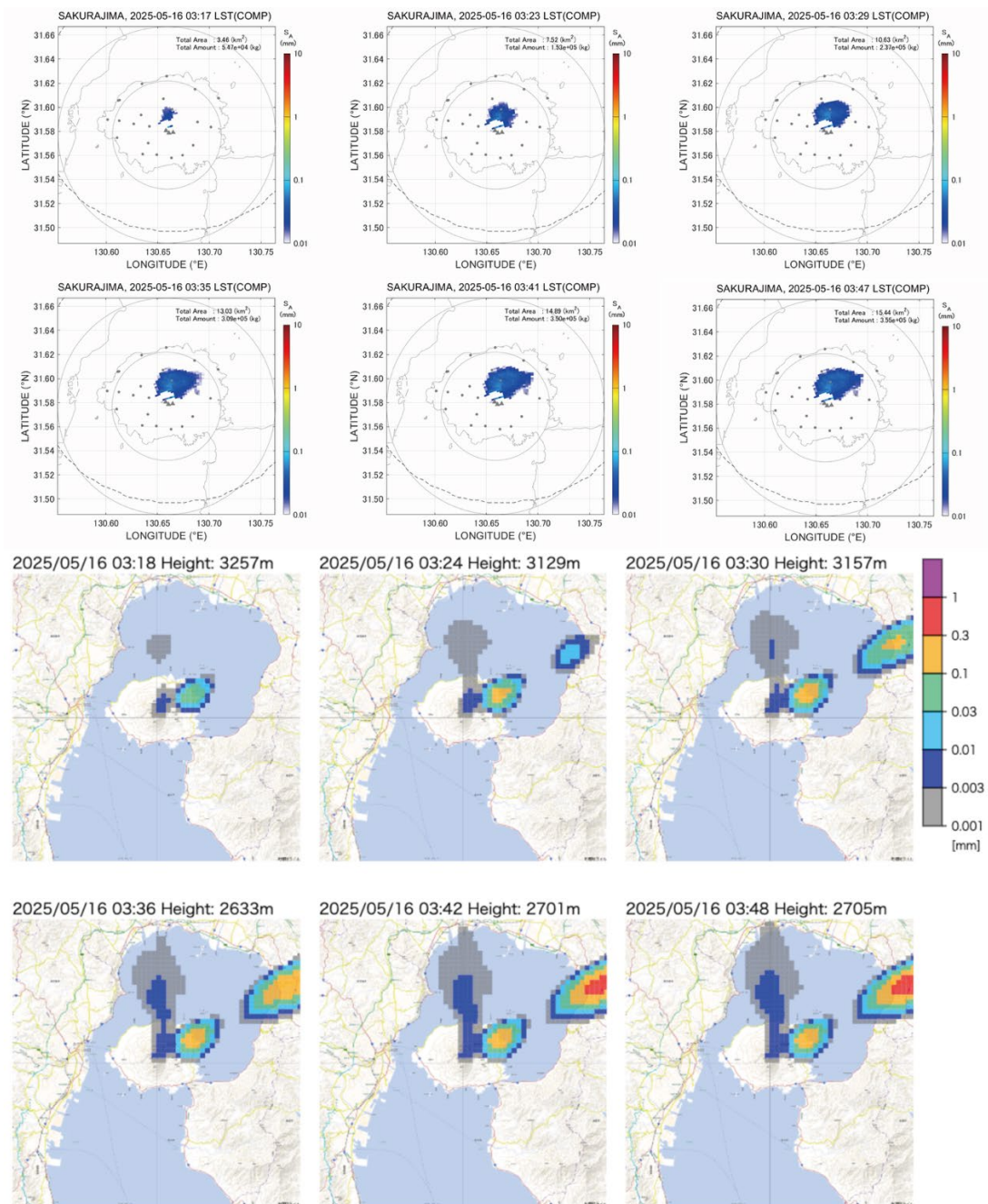


図 133 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年5月16日3時11分の爆発。

2025年5月18日10時8分の爆発（図 134）は、噴煙高度2,900 mで、南岳B火口の噴火で、流向は東であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から東南東の方向であった。また、オンラインシステムでは、南東を予測しており、レーダ観測とオンライン観測はほぼ傾向は似ている。レーダ観測では幅が狭いのに対して、オンラインシステムによる予測では広がりがある。

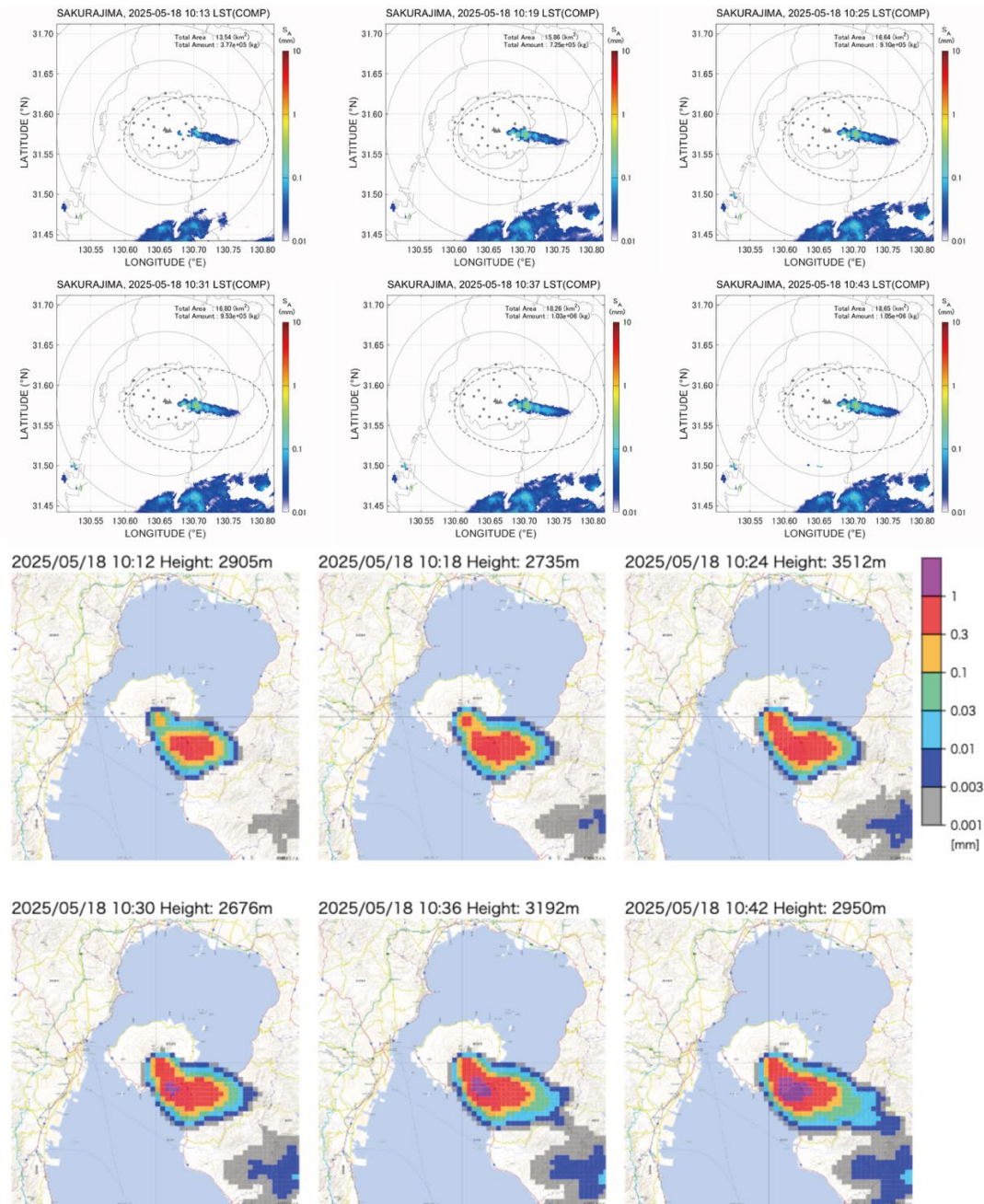


図 134 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025 年 5 月 18 日 10 時 8 分の爆発。

2025 年 5 月 19 日 10 時 50 分の爆発（図 135）は、噴煙高度 2,000 m で雲入りとされた噴火で、噴火口は南岳 B 火口、流向は東であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から東の方向で、移流はかなり遅かった。雲入りであるが、雨雲でないため、レーダでは明瞭に観測できている。オンラインシステムにおいて、流向は東を予想している点ではレーダ観測と同様である。

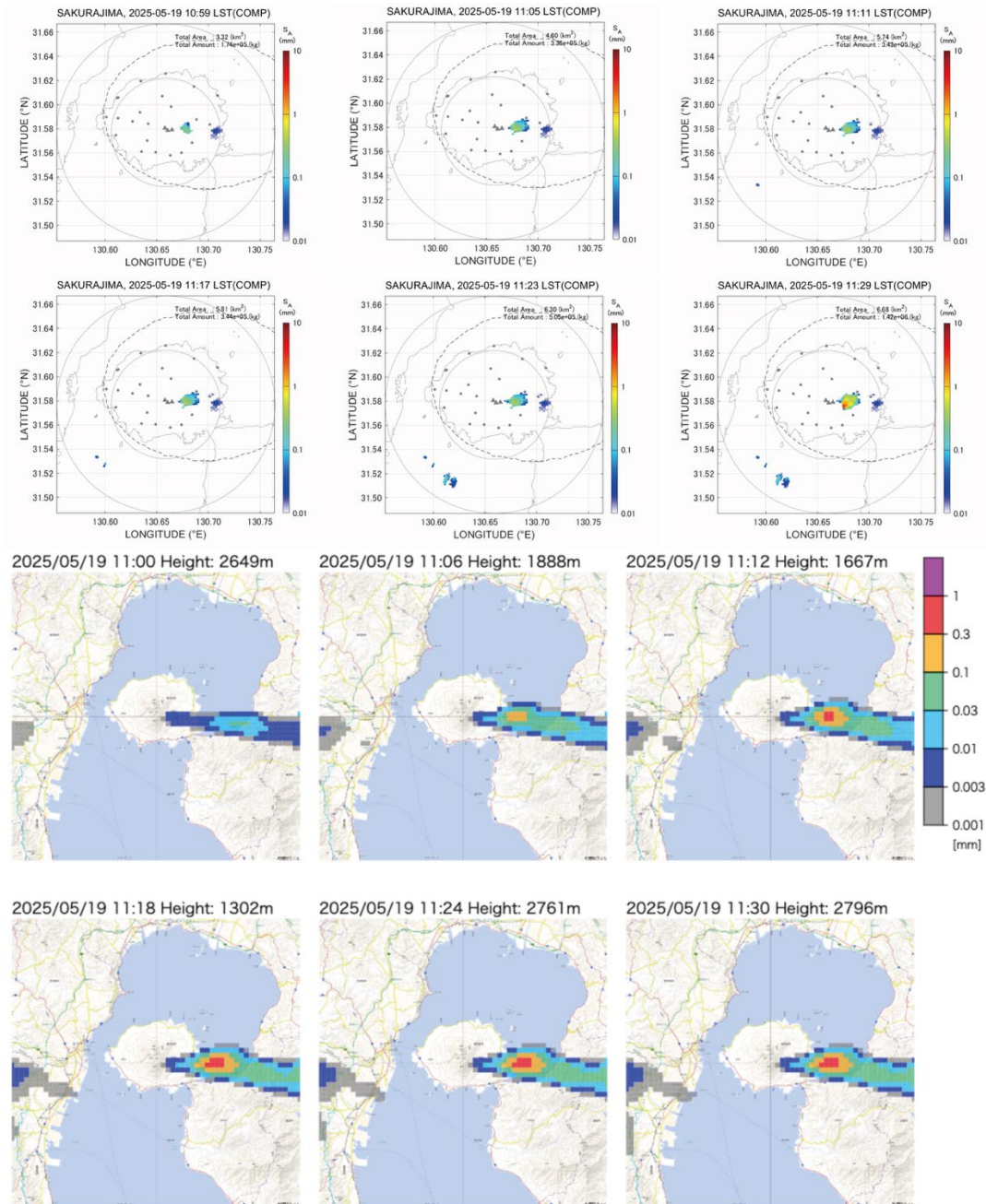


図 135 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年5月19日10時50分の爆発。

2025年5月19日12時15分と同12時41分に爆発があり、それぞれ噴煙高度は2,000 mと2,100 mで、ともに流向は東で、南岳B火口での噴火であった。図 136 は12時47分から13時17分にかけての時間帯であるため、両者の噴火の噴煙が反映されている。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から東の方向であったが、12時53分以降は北東に広がった。オンラインシステムにおいて、流向は南東方向を予測している。レーダ観測とオンラインシステムの予測において、流向に差違が見られた。同様の傾向は、同日の13時9分の爆発（図 137）と13時55分の爆発（図 138）においても見られた。

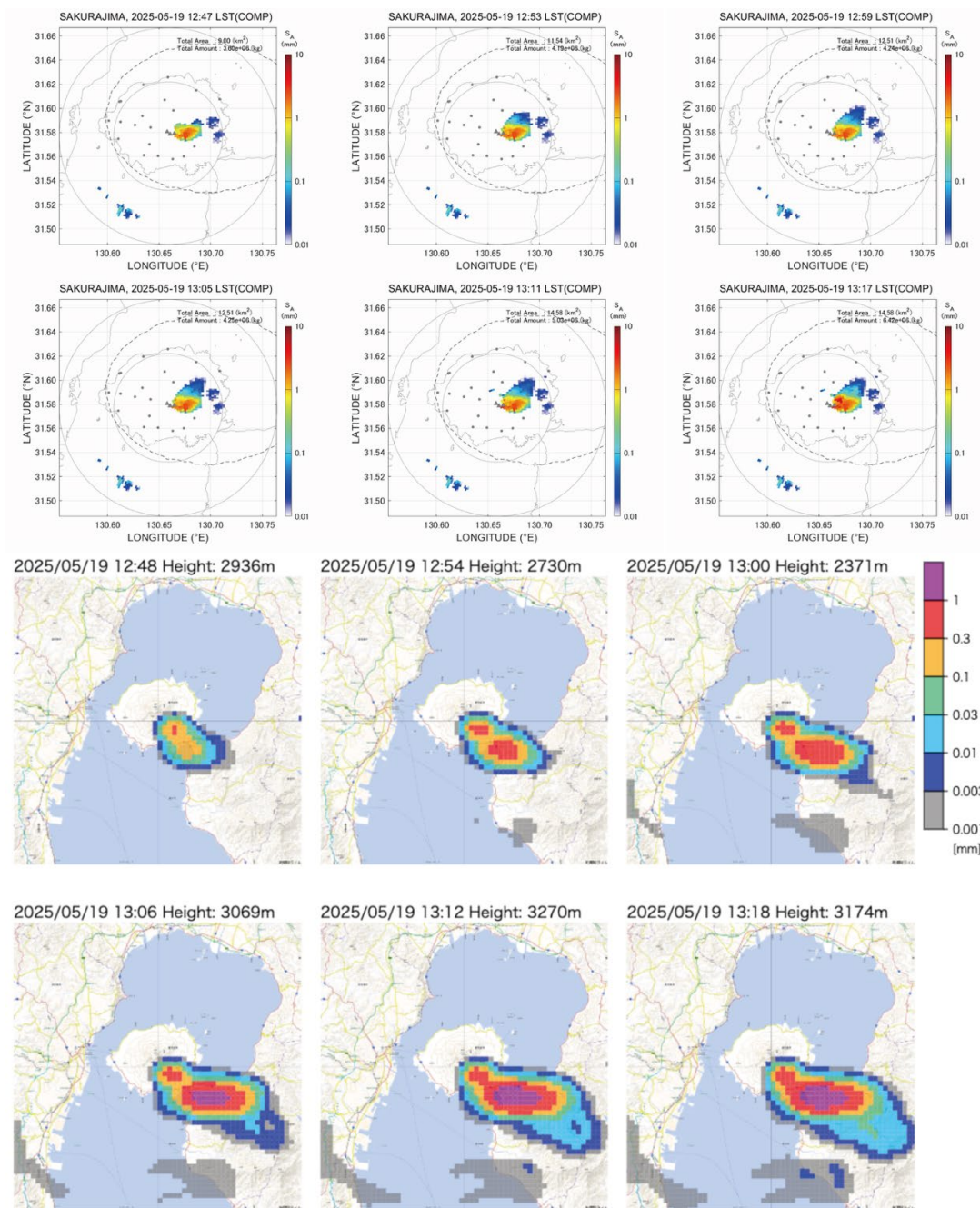


図 136 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年5月19日12時15分と12時41分の爆発。

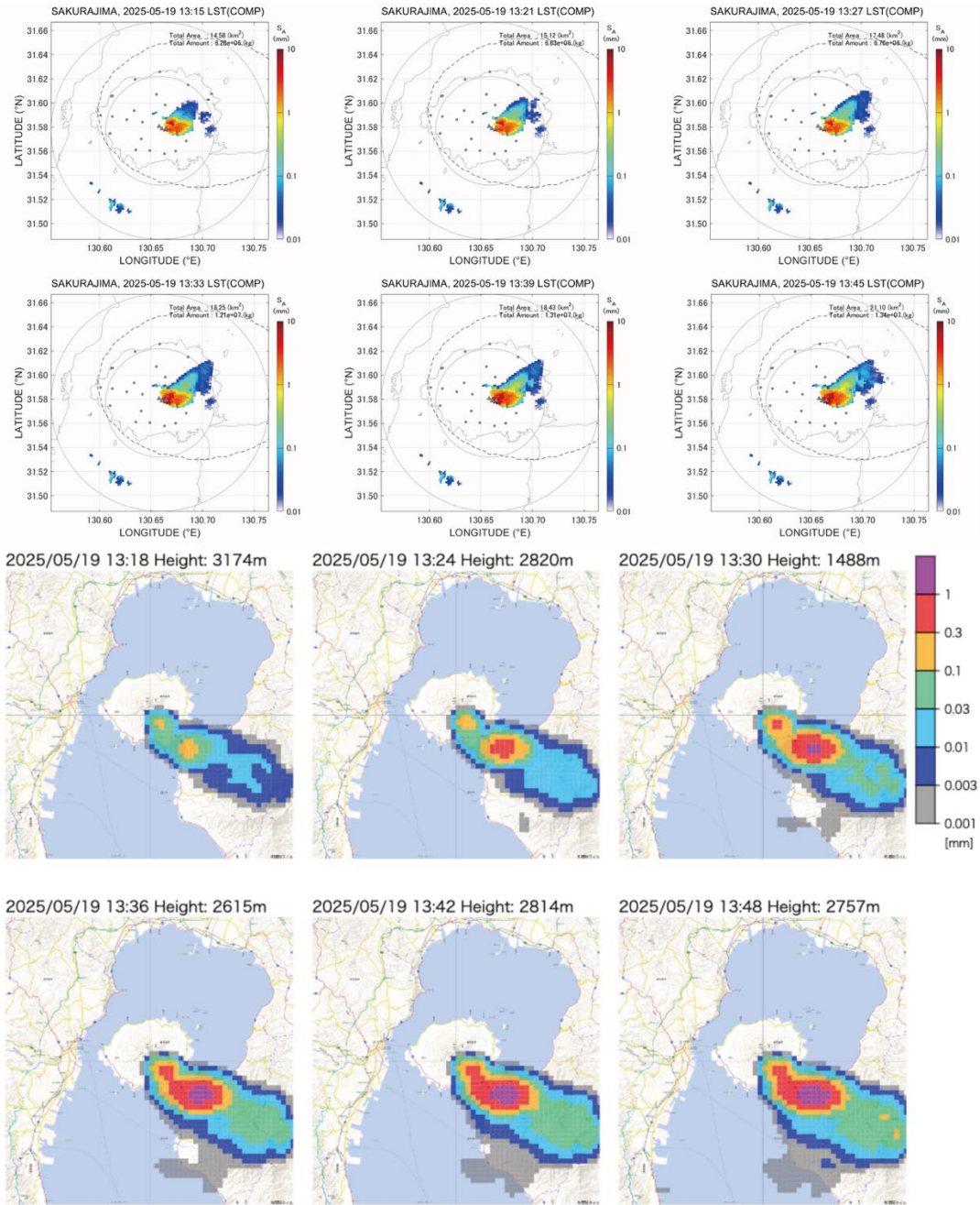


図 137 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年5月19日13時9分の爆発。

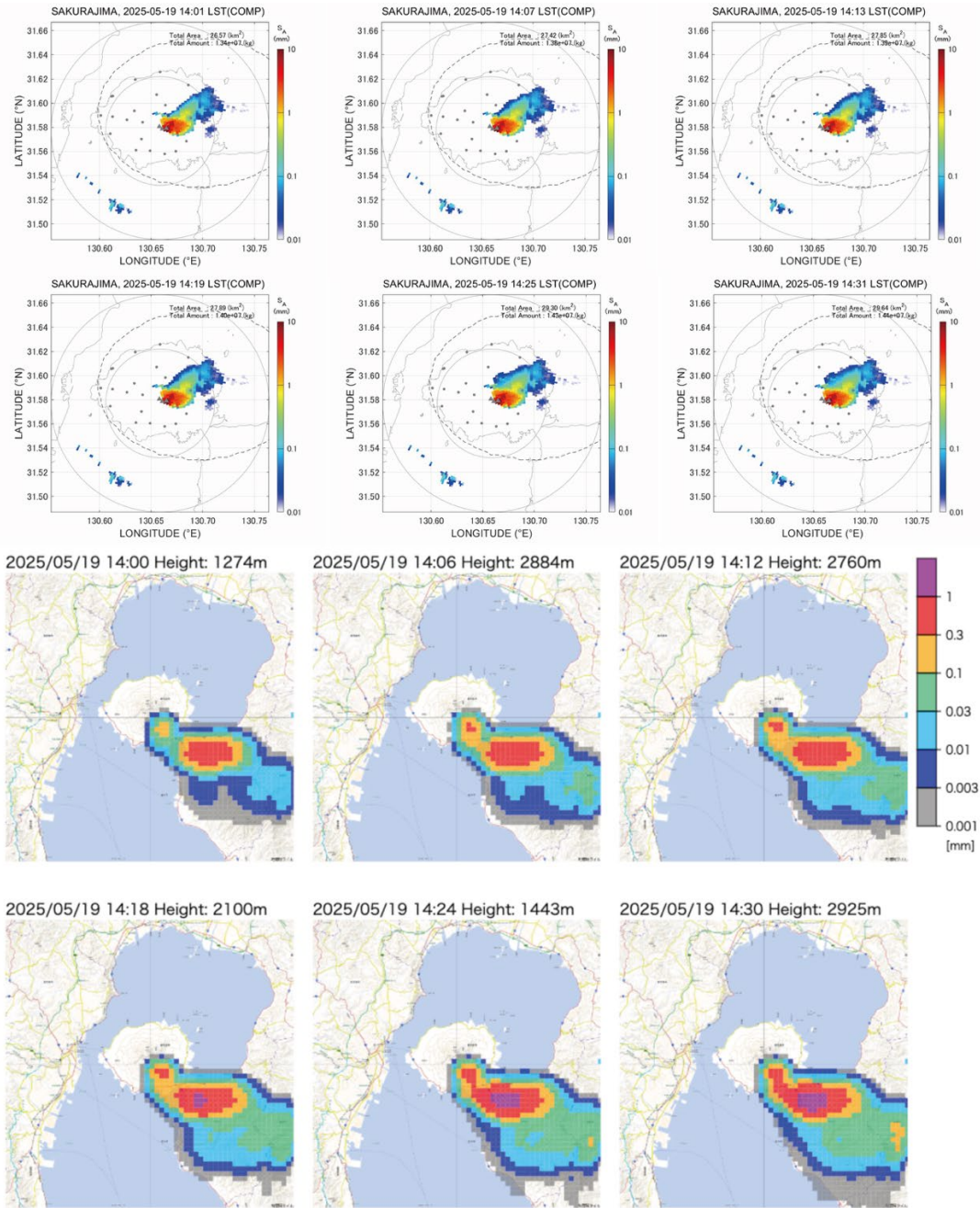


図 138 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年5月19日13時55分の爆発。

2025年5月19日18時13分に爆発（図139）があり、それぞれ噴煙高度は2,500mで、流向は東で、南岳B火口での噴火であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から東の方向で、移流は遅かった。オンラインシステムにおいて、流向は東方向を予測しており、レーダ観測と方向は同じであった。

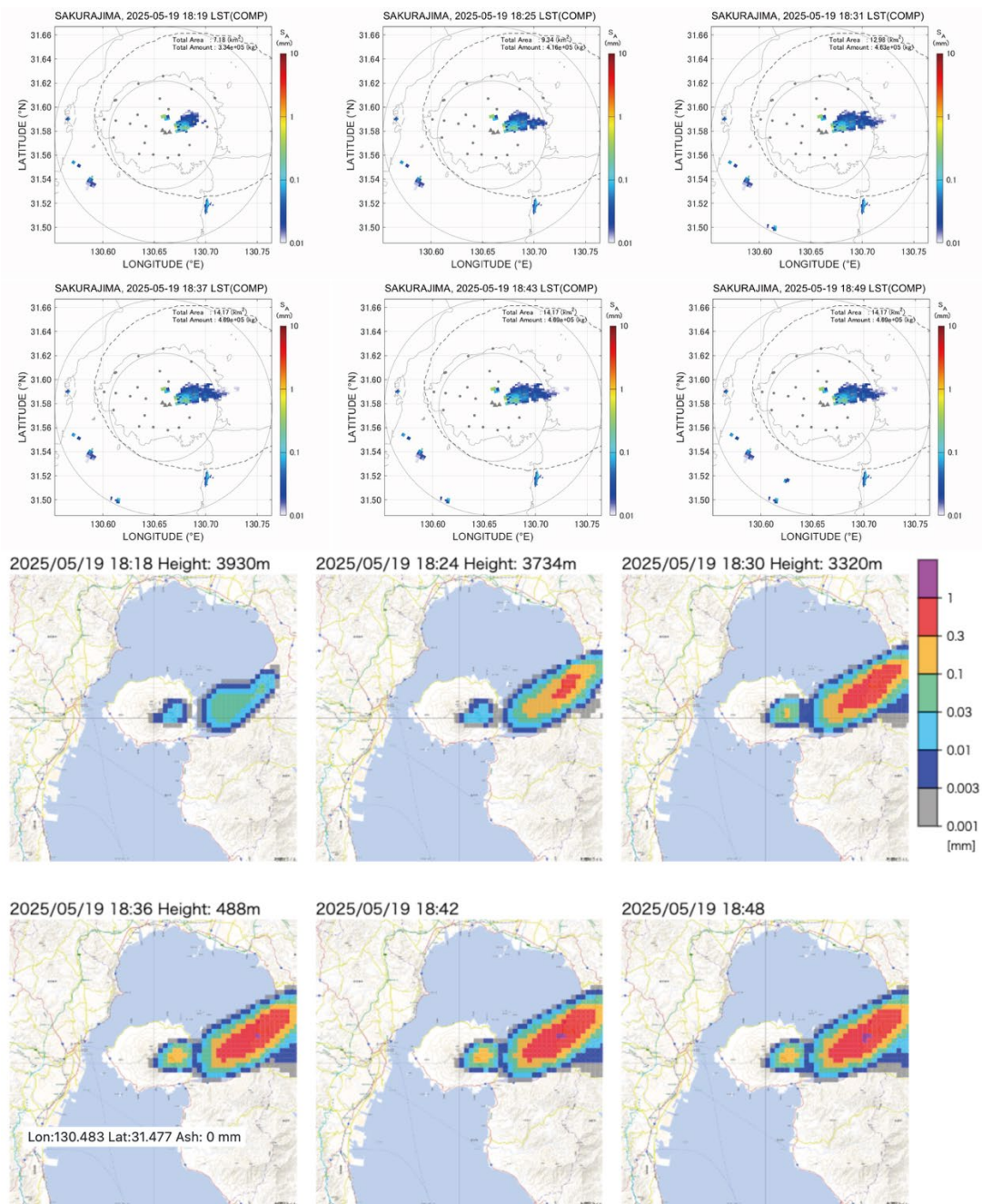


図 139 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年5月19日18時13分の爆発。

2025年5月20日15時0分に爆発（図140）があり、噴煙高度3,000m、流向は北、南岳B火口の噴火であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると火口から北から北東の方向に広がっていた。一方、オンラインシステムにおいて、流向は南方向を予測している。レーダ観測とオンラインシステムの予測において、流向に差違が見られた。このように両者に差違が見られるのは5月19日12時15分、同12時41分、同13時9分、同13時55分の爆発と同様であるが、5月20日15時0分の爆発の場合のほうが乖離は大きい。原因としては、5月20日15時0分の爆発

の噴煙高度が、5月19日のよりも大きく、より高層において実際と予測の風の場
 違いがあったと考えられる。

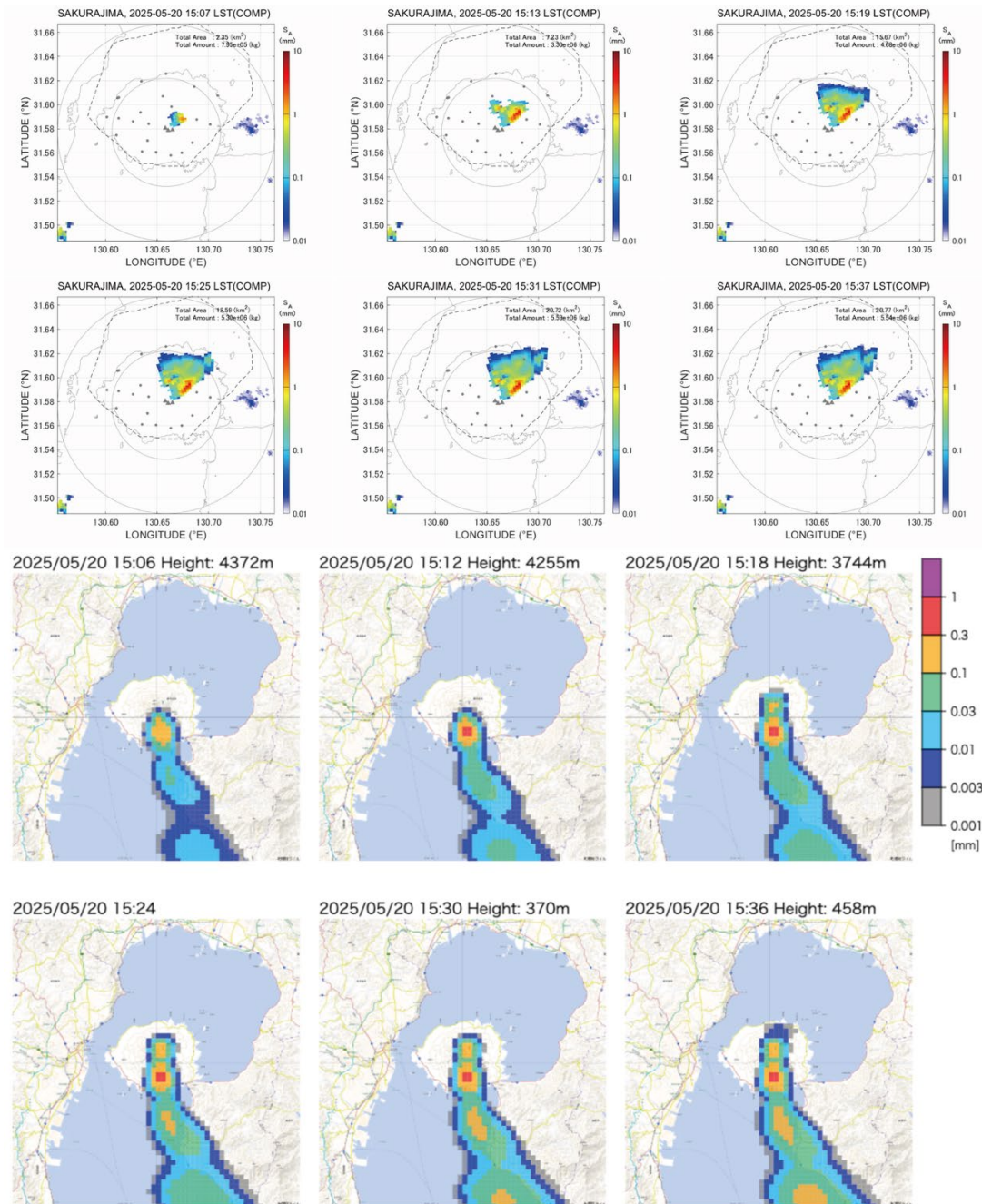


図 140 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下
 段）の比較。2025年5月20日15時0分の爆発。

2025年5月20日17時41分に爆発（図141）があり、噴煙高度2,300 mで雲入
 りとなり、流向は北東、南岳B火口の噴火であった。火山灰の移流方向は、レーダ
 観測によると火口から北方向に広がっていた。一方、オンラインシステムにおいて、
 流向は北方向を予測している。したがって、このケースではレーダ観測とオンライ
 ンシステムの予測は概ね一致していた。これらの特徴は同日の18時18分の爆発（噴

煙高度 2,900 m で雲入り、流向は北東、南岳 B 火口の噴火) においても同様であった。

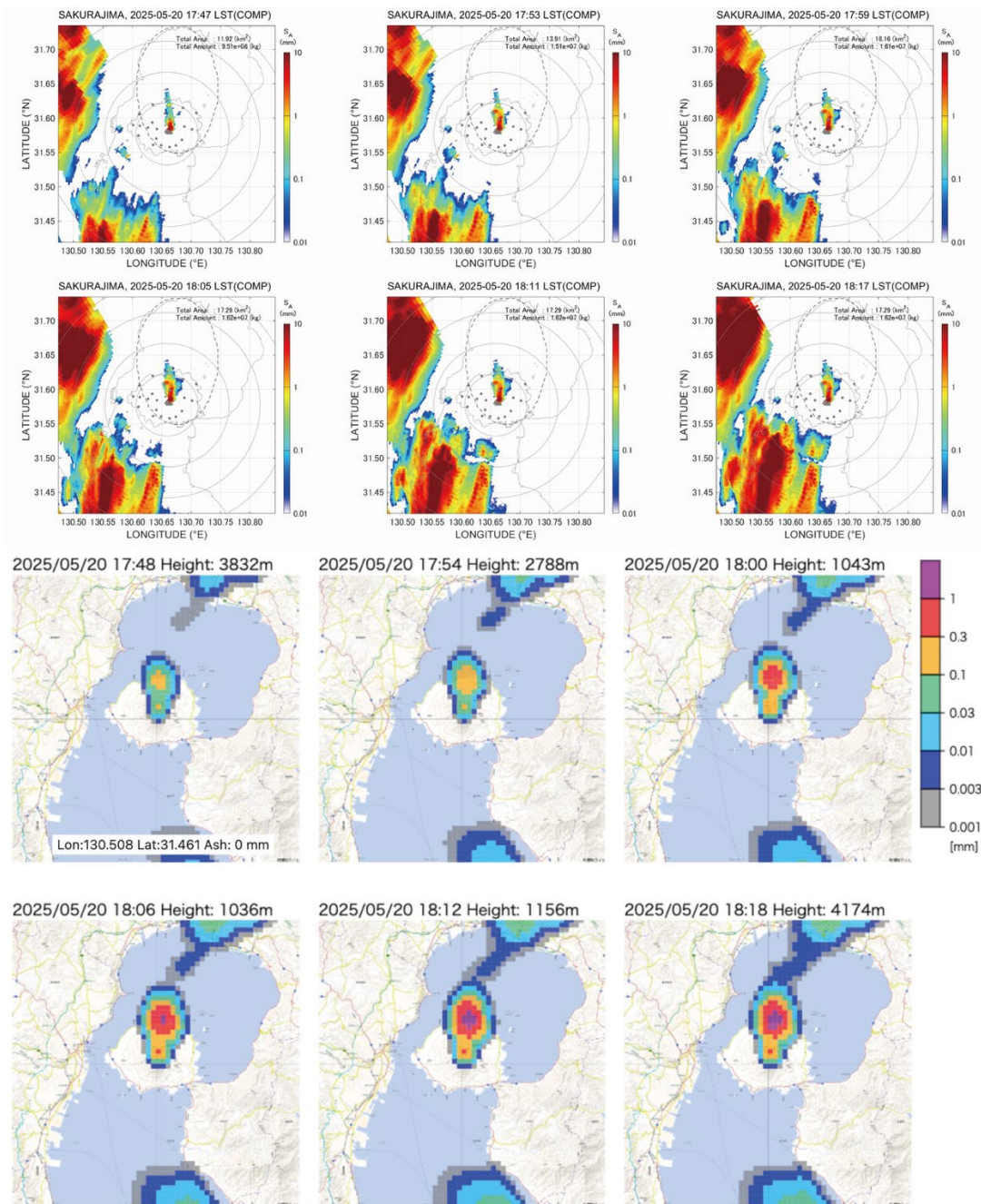


図 141 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025 年 5 月 20 日 17 時 41 分の爆発。

2025 年 5 月 22 日 12 時 5 分に爆発（図 142）があり、噴煙高度 2,200 m、流向は南、南岳 B 火口の噴火であった。火山灰は、レーダ観測によると南方向に一直線上に移流したことが見て取れた。オンラインシステムにおいて、流向は南方向を予測している。

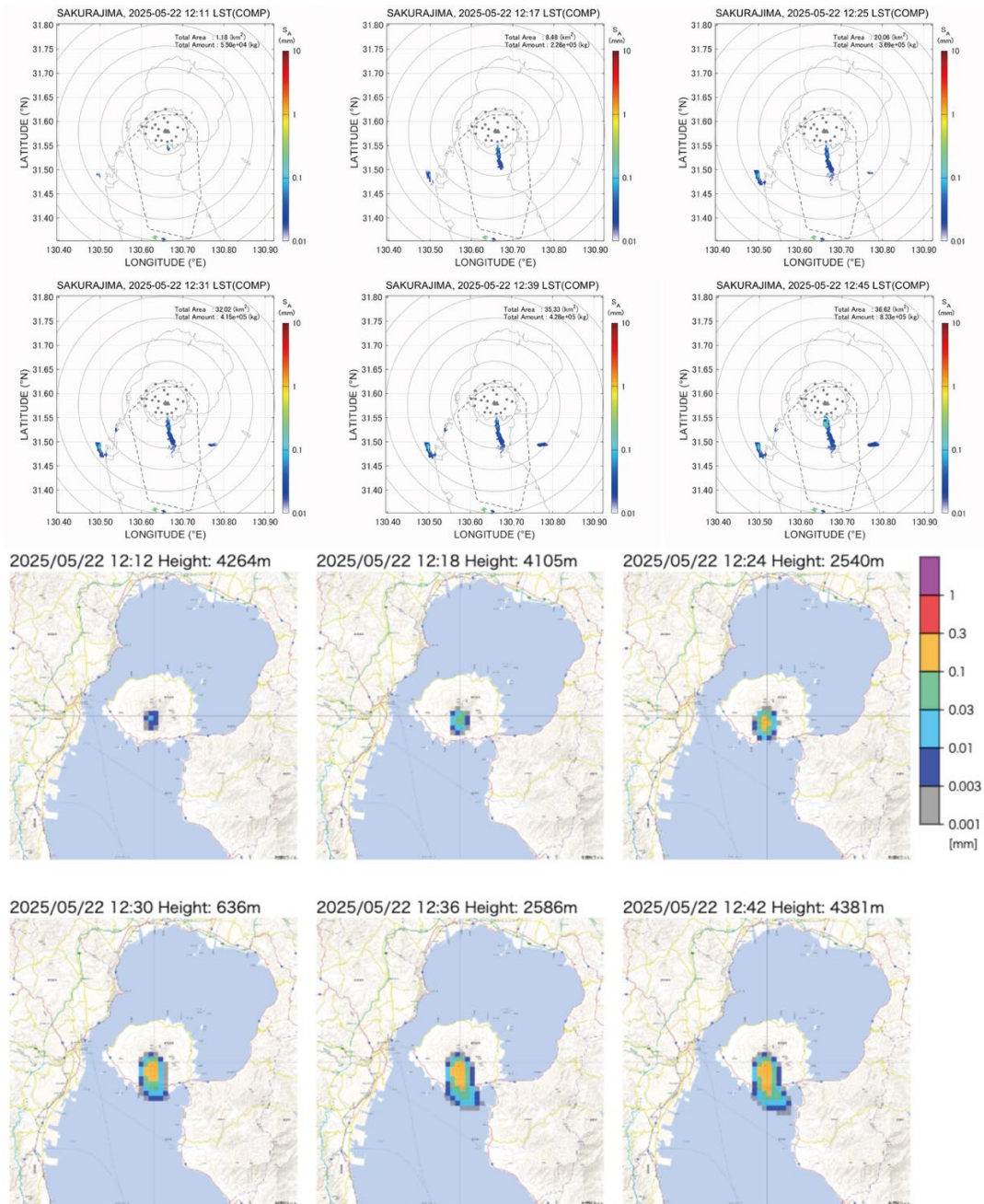


図 142 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年5月22日12時5分の爆発

2025年11月16日8時50分に爆発（図 143）があり、噴煙高度2,500 m、流向は北東、南岳B火口の噴火であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると北北東から北東であった。そして、オンラインシステムにおいて、予測の移流方向は北東である。よって、レーダ観測とオンラインシステムによる予測は概ね一致している。

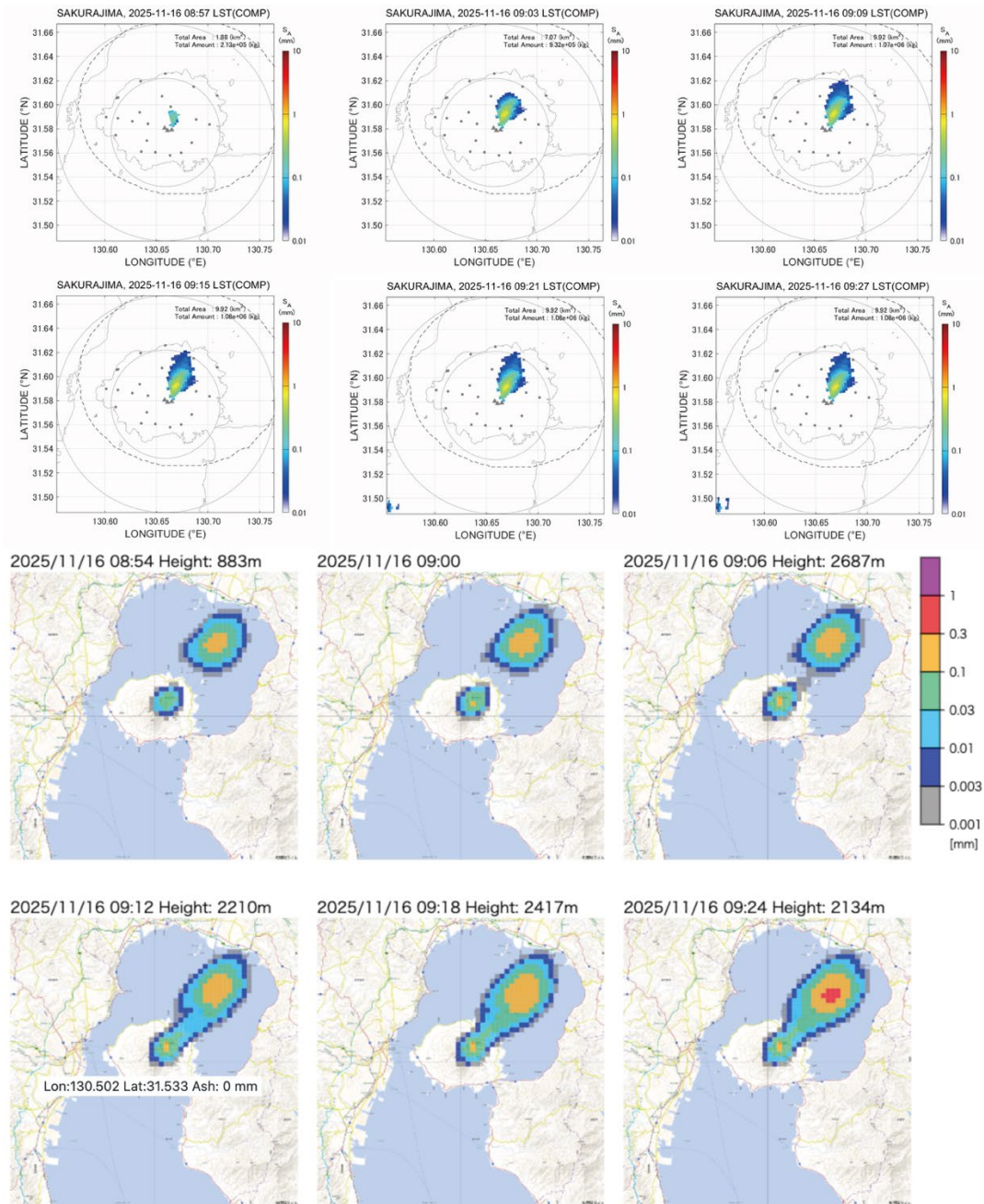


図 143 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025年11月16日8時50分の爆発

2025年11月17日5時54分に爆発（図 144）があり、噴煙高度2,400 m、流向は南東、南岳B火口の噴火であった。火山灰の移流方向は、レーダ観測によると東であった。そして、オンラインシステムにおいて、予測の移流方向は東である。よって、レーダ観測とオンラインシステムによる予測は概ね一致している。

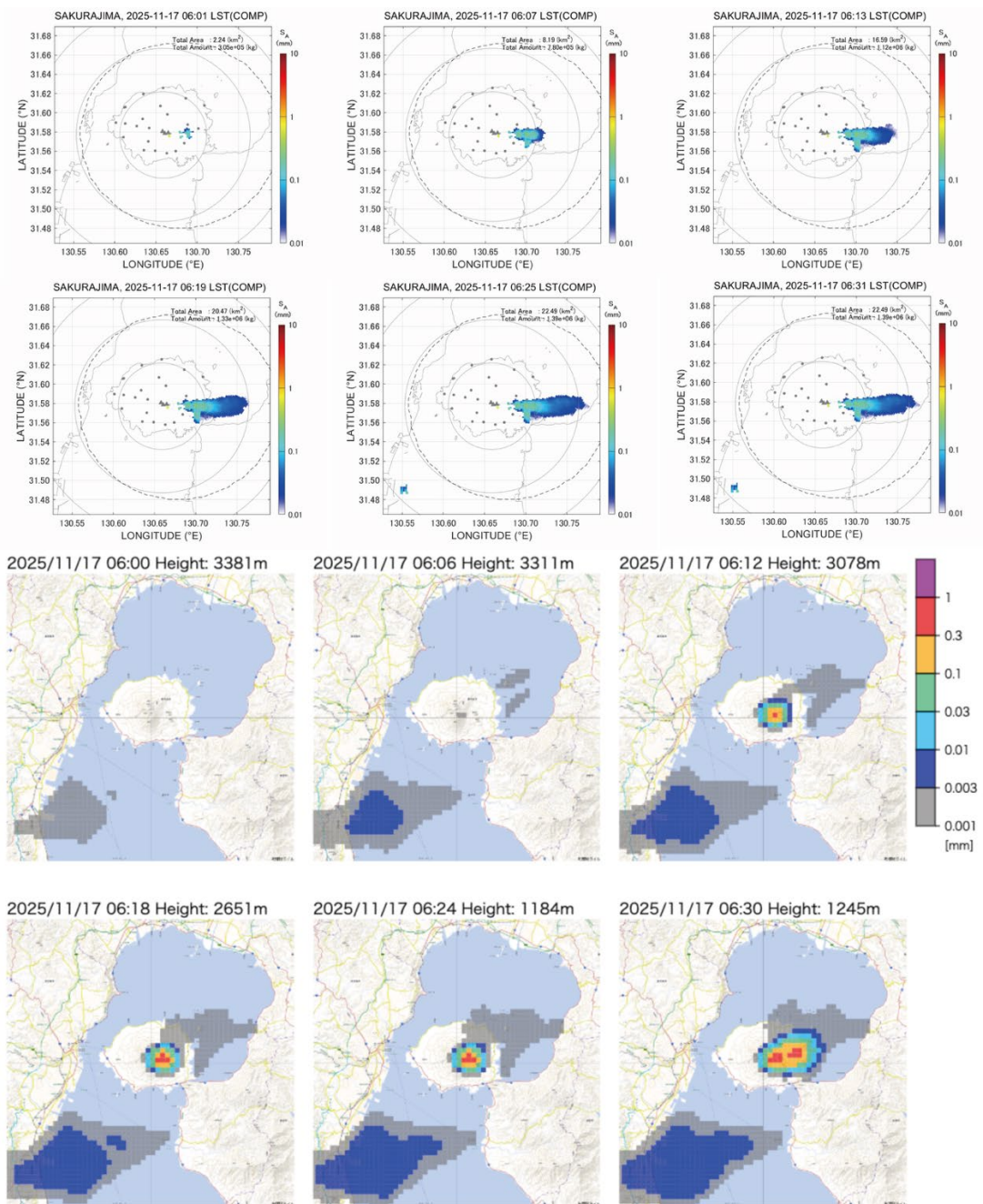


図 144 レーダ解析による結果（上段）とオンラインシステムによる降下火山灰予測（下段）の比較。2025 年 11 月 17 日 5 時 54 分の爆発

7) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

令和 7 年度は、令和 5 年度より運用している降灰予測シミュレータを用いて、今年度発生した噴火事例における予測精度の検証を実施した。また、火山灰噴出率予測の高精度化を念頭に、収縮関数の再検討を実施した。

a) 噴火事例を用いた予測精度検証

桜島南岳では 2025 年 5 月 13 日から大規模な膨張が観測され、5 月 15 日に噴火が発生した。近年発生した噴火事例の中でも噴火前の変動量・変動速度ともに群を抜いて

おり、有村観測坑道で得られた直交歪みの変動量は 460 nstrain を超えた。令和 5 年度より運用を開始した降灰予測シミュレータでは、13 日に膨張を検知し、同日夜から降灰予測を開始していた。ここでは、この事例での予測状況と課題を報告する。

表 19 に膨張開始からのタイムラインを示す。有村観測坑道の直交歪み記録が伸長を示し始めたのは、5 月 13 日 10 時 30 分ごろであった。降灰予測シミュレータでは 17 時 18 分に膨張を検知したのち、21 時 0 分に膨張判定が確定して噴火予測を開始した。15 日の朝からは、気象庁の噴火判定基準を満たす火山灰噴出が数回発生した後、11 時 35 分から急激な収縮が始まった。シミュレータは膨張量の 50%以上が解消されるまで予測を続けるため、12 時 18 分まで降灰予測を継続した。その後、直交歪み記録は 15 時ごろから再度伸長に転じた。シミュレータは、15 時 14 分に膨張を検知し、17 時 12 分から降灰予測を再開した。この一連のタイムラインの中で、気象庁は 14 日に 2 回の解説情報、15 日の噴火後に 4 回の降灰予報を発表している。本事例では、降灰予測シミュレータが気象庁の情報発表前に、噴火の可能性と具体的な降灰分布を提示できていることを改めて示した。

表 19 噴火発生までのタイムライン

日	坑道データ・降灰予測システム	気象庁
2025/5/13	10:34 膨張開始 17:18 膨張検知 21:00 膨張確定・予測開始	
2025/5/14		10:00 解説情報 16:00 解説情報
2025/5/15	11:35 収縮開始 12:18 最終降灰予測 15:14 再膨張検知 17:12 膨張確定・予測開始	7:08 噴火 10:14 噴火 10:45 噴火 11:35 噴火 11:39 降灰予報（詳細） 11:50 降灰予報（速報） 12:15 降灰予報（詳細） 15:13 降灰予報（詳細）

降灰予測シミュレータでは、噴火時の地盤収縮体積 5 通り×噴火時刻 4 通りからなる 20 シナリオとその確率を 6 分ごとに出力する。本事例においてシミュレータが出力した予測シナリオの時系列を図 145 に示す。収縮体積は時間経過とともに増加し、噴火直前には実際の収縮体積と概ね一致した。噴火時刻は、予測開始から噴火直前まで一貫して、現時刻で噴火する確率が最大のままであった。これは以前から指摘して

いる問題であるが、直交歪みの変化率が噴火直前に低下することを検出することによって、噴火時刻の予測精度を改良できる可能性を昨年度に提案した。本事例においては、図 146 に示す通り、噴火発生 の 21 分前に直交歪みの変化率が 0.1 nstrain/min (60 分窓で算出) を下回ったことがわかった。昨年度に実施した過去事例の調査でも、多くの事例で噴火直前に変化率が 0.1 nstrain/min 付近まで低下することが明らかになっていた。したがって、この基準は噴火の切迫性評価に有効である可能性が高い。

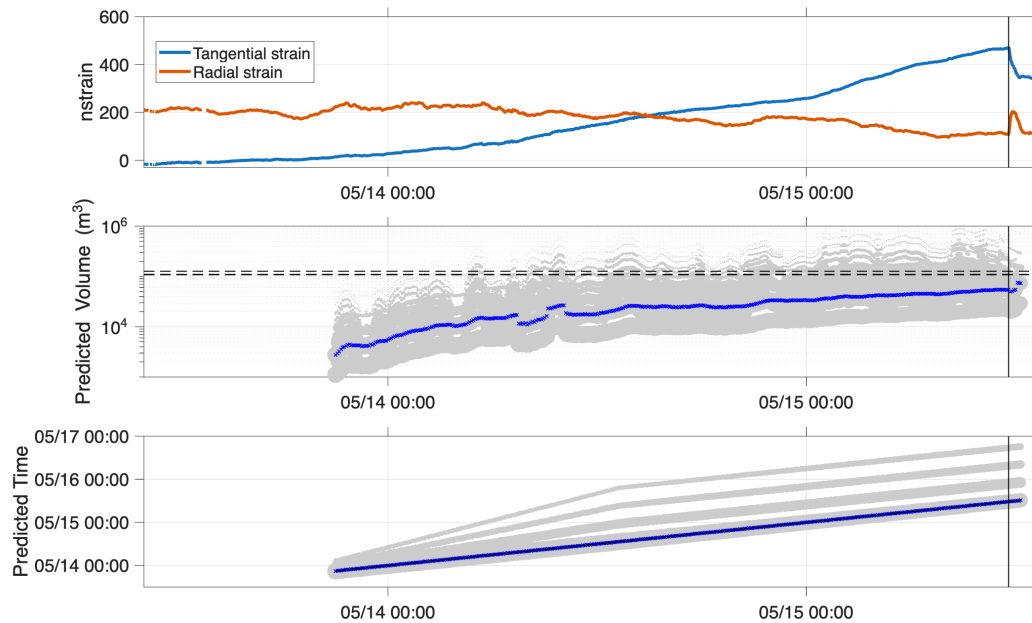


図 145 降灰シミュレータの出力結果。上：有村観測坑道の歪み記録。黒縦線が噴火にもなう収縮の開始時刻。中：20 シナリオ分の予測収縮体積の時間変化。灰色バブルが各シナリオを表し、そのサイズが各シナリオの発生確率を示す。黒点線は噴火時の実際の収縮体積。青で確率が最大のシナリオを示す。下：予測噴火時刻の時間変化。予測開始後、一貫して現時刻での噴火確率が最も高いことを示す。

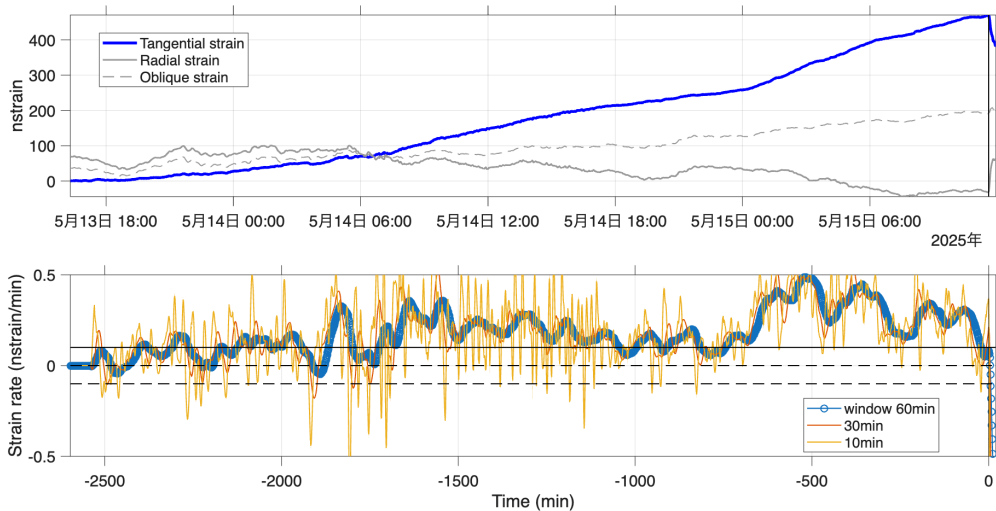


図 146 有村観測坑道でのひずみ記録（上）と直交ひずみの変化率の時間変化（下）。噴火発生の直前に変化率が低下傾向にあり、噴火 21 分前に 0.1 nstrain/min（黒線）を下回ったことが分かる。

図 147 には、各シナリオの収縮体積から推定された噴煙高度の時間変化を示す。図 145 で示した通り、予測収縮体積は時間経過とともに実際の収縮体積に近付いたのに対し、推定された噴煙高度は常に過大評価であった。使用した噴煙高度の推定式が最大高度を推定する式 (Iguchi et al., 2022²⁶) であるため、過大評価になること自体は問題ない。しかし、最大高度だとしても高度 10 km を超えるシナリオが多いことはやや非現実的である。これは、収縮体積から噴煙高度への変換に問題があることを示唆する。噴煙高度の推定には火山灰噴出率を制約する必要がある、本シミュレータでは地盤の収縮率からこれを算出している。この地盤の収縮率を過大評価していることが、噴煙高度の過大評価の最大の要因であると考えられる。この点については、次項目で詳細を述べる。

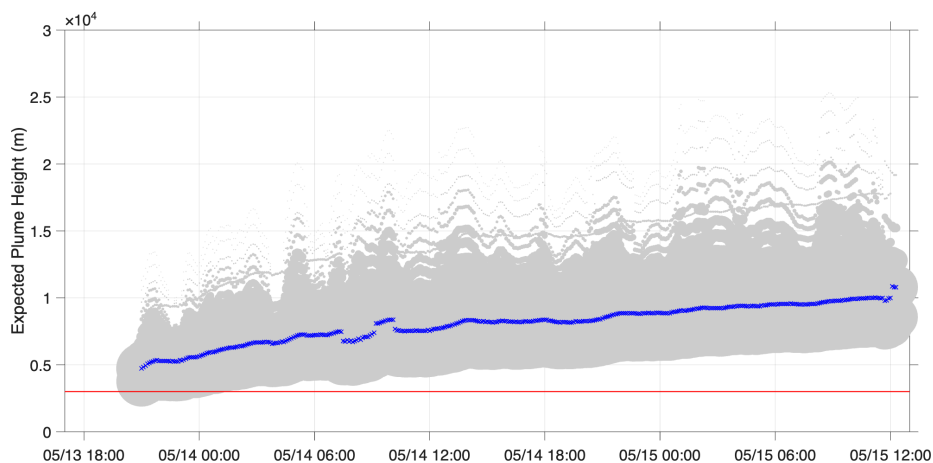


図 147 推定した噴煙高度の時間変化。図 145 の中段と下段と同一の描画様式である。赤線が実際の噴煙高度を示す。

図 148 には降灰分布の最終予測結果とパーシベルによる降下火山灰の検出結果の比較を示す。島内東側に位置する URAN・NABE で降灰が検出されており、予測された東側に偏った分布の傾向とは一致する。一方で、降灰が予測される範囲に含まれていながら、降灰を検出していない点も複数ある。これは、上述の噴煙高度の過大評価により、降灰範囲も過大評価されている可能性がある。

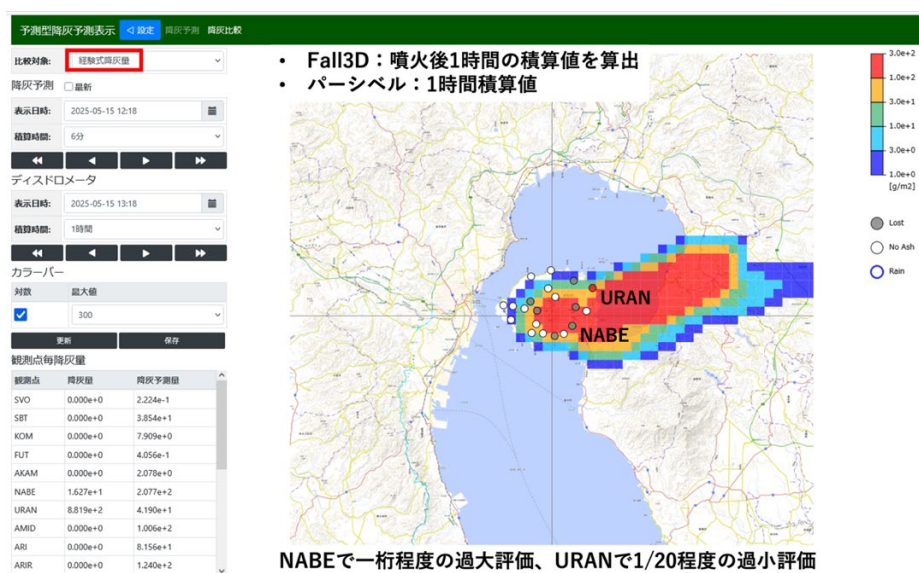


図 148 2025 年 5 月 15 日 12 時 24 分における予測降灰分布とディストロメータ（パーシベル）での降灰検出結果。

その他に明らかになった課題は、以下の 2 つである。

- 噴火が頻発する際には膨張を検出できない

5 月 15 日の噴火発生以降、南岳では一時的に活動度が高い状態が続き、1 日 40 回程度の噴火が発生した。降灰予測シミュレータでは、この時期の個々の噴火に前駆する膨張を検出できないことが多かった。これによって、活動度による検出基準の調整が必要であることが明らかとなった。

- 噴火の規模を視覚的に認識できない

5 月 15 日の事例は非常に規模の大きな噴火であったが、降灰予測シミュレータの降灰分布図上では、通常時の噴火と視覚的に明確な差が表れなかった。これは、カラーバーの範囲が適切でなかったことが要因であった。そこで、普段の小規模な噴火から年に数回程度の比較的大きな噴火までを網羅的にカバーできる範囲に調整し、加えて降灰質量 (g/m^2) だけでなく降灰厚さ (mm) での表示を加え、より直感的な仕様へ変更した (前述 1) -b) の通り)。

b) 収縮率の検討

前項目で指摘した収縮率の過大評価を解決するために、収縮の時間関数についての検討を行った。現在、降灰予測シミュレータでは、時刻 t についての以下の指数関数で収縮体積の時間関数 $V(t)$ を定義している。

$$V(t) = A(\exp(-Bt) - 1) \quad (8)$$

ここで、 A と B は定数である。シミュレータでは A を総収縮体積、 B を 0.85 として運用している。この B の値は、2017～2020 年に南岳で発生した爆発について、有村観測坑道のひずみ記録から収縮体積の時間変化を推定し、上記の関数をフィッティングして、全事例の残差総和が最小になるように決めた値である。しかし、用いた事例に多くの小規模噴火が含まれていたこと、また噴火直後の急激な収縮期間のみをフィッティングに使用していたことから、収縮が長期間継続する規模の大きな噴火に対しては不適切な値であった。実際、 $B = 0.85$ を用いると収縮体積によらず、10 分以内には収縮が完了することになる。したがって、近年南岳で発生した規模の大きな噴火に対して、完全に収縮が完了するまでの期間を用いて、改めてフィッティングを実施した。

用いた事例は表 10 に示す 9 事例である。火口直下の球状圧力源を仮定し、収縮体積の時間変化を推定した。いずれの事例でも、収縮途中に火口方向歪みの反転が見られ、収縮源の浅部から深部への移動が示唆された。したがって、以下の 3 通りの収縮源深さを仮定して、収縮体積を推定した。①収縮期間全体のひずみ 2 成分の比を用いて推定した深さ (Iguchi et al., 2013²⁷)、②収縮期間全体の面積歪みと傾斜の比を用いて推定した深さ (Ishihara, 1990²⁸)、③収縮期間を火口方向歪みの反転を境に 2 つに分け、前半は①の手法で推定した深さ、後半は②の手法で推定した深さ、の 3 通りである。各深さの収縮源を仮定して推定した収縮体積の時間関数を、上記の指数関数でフィッティングし、残差が小さくなる B を求めた。それぞれ B_1 、 B_2 、 B_3 としたときの推定結果を表 10 に示す。事例によるばらつきは大きい、ほとんどの事例で B は 0.1 以下となり、少なくとも現在採用している $B = 0.85$ は適切ではないことが明らかとなった。

表 20 指数関数のパラメータ推定

噴火発生日時	B_1	B_2	B_3
2017/11/13	0.04	0.02	0.022
2018/5/30	0.78	0.07	0.09
2020/6/1	0.013	0.05	0.05
2020/6/4	0.31	0.08	0.1
2022/9/23	0.024	0.016	0.016
2023/10/11	0.008	0.005	0.005
2023/10/24	0.08	0.04	0.04
2024/2/14	0.29	0.01	0.17
2025/5/15	0.012	0.008	0.01

検証用シミュレータで前述の 2025 年 5 月 15 日の事例について、推定された $B = 0.01$ を採用して噴煙高度を再計算した結果を図 149 に示す。図 147 と比較して、噴煙

高度の過大評価が解消されたことがわかる。今後、噴火規模と噴火時間のスケーリング則も考慮して、どの値を採用するか更なる検討が必要である。

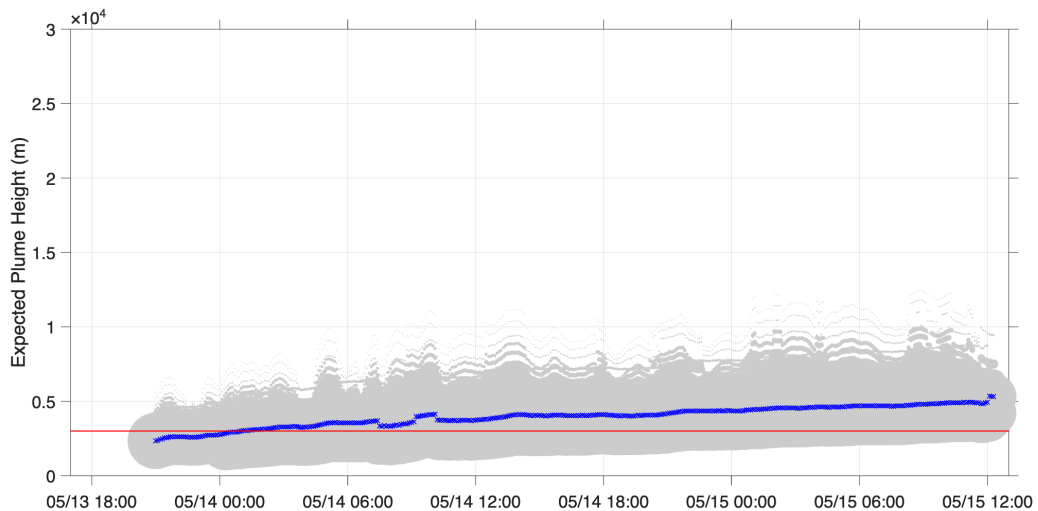


図 149 2025 年 5 月 15 日の噴火事例の噴煙高度再推定結果。推定高度は 10 km 未満の現実的な値に落ち着いている。

(c) 結論

2025 年 5 月 15 日の桜島における連続噴火について複数項目の観測やシミュレーションにて解析や検討を進めた。また、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およびライダーによる火山性エアロゾルの観測による噴火事例が充実した。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を進めた。霧島山新燃岳噴火に対してディストロメータならびに自動火山灰採取装置による観測を行い、降下火山灰観測に成功した。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た。地面付近の大気における混相密度流れ場の支配方程式を定式化し、LES シミュレーションを行い、大気より軽いガスと重い火砕物が異なる移流拡散の挙動を示した。仮定する降灰粒子密度の違いによってレーダ観測データからの火山灰量推定の評価を行うことで、従来の推定では火山灰量を過大評価していたことを明らかにし、火山灰量推定の精度向上のためには降灰粒子の密度推定が必須であることを明らかにした。レーダ観測による降灰分布と連続化シミュレーションの降灰量分布との照合を進めた。自治体防災担当者などの意見をもとに、連続化シミュレータの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機能を追加した。噴火予測型の連続化シミュレーションにおいて、噴煙高度を過大に評価している問題について噴煙高度に影響する収縮率の検討を行うことで、現実的な噴煙高度を推定することができた。

(d) 引用文献

- 1) Shimizu, A., Iguchi, M. and Nakamichi, H.: Seasonal variations of volcanic ash and aerosol emissions around Sakurajima detected by two lidars, *Atmosphere*, Vol.12, No.3, 326, 2021.
- 2) Shimizu, A., Nakamichi, H. and Iguchi, M.: Long-term lidar observations of volcanic ash from Sakurajima, *J. Disaster Res.*, Vol.20, No.3, pp.281-286, 2025.
- 3) 鹿児島県 (2025) 鹿児島県ホームページ,
URL:<https://www.pref.kagoshima.jp/bosai/sonae/sakurajima/index.html>
- 4) Gunn, R. and Kinzer, G. D.: *The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air*, *J. Meteorol.*, Vol.6, pp.243-248, 1949.
- 5) 江頭庸夫・石原和弘: 桜島火山周辺における火山灰の降下堆積状態, 火山, Vol.24, pp.88, 1979.
- 6) Eto, T.: 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*, pp.448-451, 1989.
- 7) Eto, T.: Estimation of the amount and dispersal of volcanic ash-fall deposits ejected by vulcanian type eruption, *Rep. Fac. Sci. Kagoshima Univ.*, Vol.34, pp.35-46, 2001.
- 8) Yuter, S.E. and Houze Jr, R.A.: Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.123, pp.1941-1963, 1995.
- 9) Iguchi, M.: Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash - case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan -, *Jour. Disast. Res*, Vol.11, pp.4-14, 2016.
- 10) Iguchi, M., Yamada, T. and Tameguri, T.: Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by non-eruptive deflation, *Frontiers in Earth Science*, Vol.10, 727909, 2022.
- 11) 井口正人, 為栗健, 平林順一, 中道治久: マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山, Vol.64, pp.33-51, 2019.
- 12) Iguchi, M., Yamada, T. and Tameguri, T.: Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan, as revealed by non-eruptive deflation, *Frontiers in Earth Science*, Vol.10, 727909, 2022.
- 13) 井口正人: 桜島火山の噴火活動—2012年7月～2013年6月—、桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究, 平成24年度分報告書, pp.1-8, 2013.
- 14) Syarifuddin, M., Oishi, S., Morinishi, M., Shiokawa, J., Mawandha, H. G., Hapsari, R. I. and Iguchi, M.: Estimating the volcanic ash fall rate from the mount Sinabung eruption on February 19, 2018 using weather radar, *Jour. Disast. Res.*, Vol.14, pp.135-15, 2019.

- 15) Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K.: Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima Volcano, Japan Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol.47, pp.197-215, 2002.
- 16) Woodhouse, M.J., Hogg, A.J., Phillips, J.C. and Sparks, R.S.J.: Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland, J. Geophys. Res.: Solid Earth, Vol.118, pp.92-109, 2013.
- 17) Dürig, T., Schmidt, L.S. and Dioguardi, F.: Optimizing mass eruption rate estimates by combining simple plume models, Front. Earth Sci., Vol.11, 1250686, 2023.
- 18) Morton, B.R., Taylor, G.I. and Turner, J.S.: Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci., Vol.234, pp.1-23, 1956.
- 19) 井口正人, 為栗健, 平林順一, 中道治久: マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山, Vol.64, pp.33-51, 2019.
- 20) Maki, M., Takaoka, R. and Iguchi, M.: Characteristics of particle size distributions of falling volcanic ash measured by optical disdrometers at the Sakurajima volcano, Japan, Atmosphere, Vol.12, 60, 2021.
- 21) 真木雅之, 井口正人: 光学式ディストロメータにより測定された桜島降灰粒子の解析, 京都大学防災研究所年報, Vol.65B, pp77-9, 2022.
- 22) Wilson, L. and Huang, T.C.: The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles. Earth and Planetary Science Letters, Vol.44, pp.311-324, 1979, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(79\)90179-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(79)90179-1).
- 23) Suh, S.H., Maki, M., Iguchi, M., Lee, D.I., Yamaji, A. and Momotani, T.: Free-fall experiments of volcanic ash particles using a 2-D video disdrometer. Atmos. Meas. Tech., Vol.12, pp.5363-5379, 2019. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5363-2019>.
- 24) 坂井紀之, 寺谷拓治, 内田良始, 吉村知祐, 田中剛: 降灰量推定精度向上のためのドローンを用いた火山灰落下実験, 砂防学会誌, Vol.72, pp.35-41, 2020.
- 25) Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Yamaguchi, S., Nakai, S., Shiina, T. and Muramoto, K. I.: Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for snowpack modeling applications, The Cryosphere, Vol.10, pp.2831-2845, 2026. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2831-2016>.
- 26) Iguchi, M., Nakamichi, H., Takishita, K. and Poulidis, A.P.: Continuously operable simulator and forecasting the deposition of volcanic ash from prolonged eruptions at Sakurajima volcano, Japan. J. Disaster Res., Vol.17 No.5, pp.805-817, 2022.
- 27) Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S. and Nakao, S.: Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater

during the period 2006 to 2011, Bull Volc. Soc. Jpn., Vol.58, No.1, pp.115-135, 2013.

28) Ishihara, K.: Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan, In: Ryan, M. (Ed.), Magma Transport and Storage. John Wileys & Sons, pp.335-356, 1990.

29) 真木雅之, 佐野香那, 中村啓彦, 桜島噴煙観測プラットフォーム研究会: レーダがとらえた桜島噴煙, 京都大学防災研究所火山防災研究センター, pp.76, 2025.

30) 瀧下恒星, 真木雅之: テフラ輸送研究この10年—小規模噴火へのまなざし—, 火山, Vol.71, No.1, pp.41-56, 2026.

31) Ishii K. and Iguchi, M.: Statistical analysis of the ground deformation of Vulcanian explosions at Sakurajima volcano, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.455, 108185, 2024. doi:10.1016/j.jvolgeores.2024.108185.

32) Iguchi, M. and Ishii, K.: Quantitative forecasting of volcanic ashfall prior to the onset of Vulcanian eruption by combining transport and dispersion simulation with ground deformation observation at Sakurajima volcano, Japan, J. Disaster Res., Vol.20, No.3, pp.259-268, 2025. doi:10.20965/jdr.2025.p0259.

(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
1. 火山灰拡散連続予測シミュレータ AshFall	1. 降灰量の予測を連続的に自動で行う。
2. 噴火発生予測型火山灰拡散連続予測シミュレータ AshFallEst	2. 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。
3. 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	3. 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、予測検証を行う。
	1. ~3. 共通として火山灰量を堆積厚で表示する機能を追加した。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 事業期間全体の代表的な成果

ここでは、事業期間全体において以下の代表的な成果(a)～(d)について述べる。(a)気象レーダによる噴煙研究の進展である。(b)気象レーダおよび光学式ディストロメータを用いた降灰量推定手法の開発である。(c)火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発である。そして、(d)噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発である。

(a) 気象レーダによる噴煙研究の進展

噴煙のレーダ観測は1970年のアイスランド・ヘクラ山噴火に始まり、日本では1973年の爺々岳噴火が最初であった。当初は現業レーダによる偶発的観測に限定されていたが、2000年代以降に研究用レーダの導入が進み、2010年のエイヤフィヤトラヨークトル噴火を契機として欧州を中心に導入が本格化した。日本では2011年新燃岳噴火や2014年御嶽山噴火災害を経て、噴煙・降灰の即時的かつ定量的把握の重要性が強く認識され、噴火頻度が高い桜島を拠点として多様なレーダ観測が展開された(図150)。その結果、この10年間で桜島における噴煙モニタリング研究は世界を先導する水準に達した。これらの研究成果は、2026年に開始された「火山ハザード対策に向けた研究・人材育成プロジェクト(V-LEAD)」において、協調型船舶レーダを中核とするマルチレーダセンシング技術(図151)へと発展する。すなわち、噴火開始直後から噴火終了に至るまでを高時間分解能で連続観測することにより、噴煙現象の定量的理解を深化させるとともに、数値モデルの高度化および実効的な火山防災研究への貢献を目指すものである(真木・他、2025²⁹⁾；瀧下・真木、2026³⁰⁾。

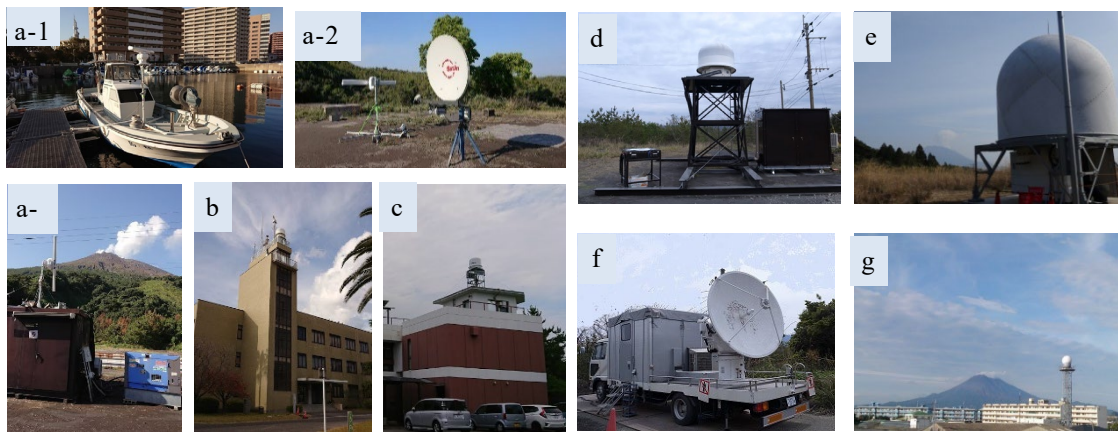


図150 桜島の噴煙観測に用いられた様々なタイプの気象レーダ。

a-1:小型ボートに搭載したXバンド固体化船舶レーダ(鹿児島大、光電製作所)。a-2:Kバンドポインティングドップラレーダ(ハンブルグ大)とXバンド船舶レーダ。a-3:Xバンド固体化船舶レーダによる噴煙の定点観測。b:Kuバンド高速スキャンドップラレーダ(KuRAD、鹿児島大学)。c:Xバンドマルチパラメータレーダ(京都大学防災研究所)。d:Kuバンドマルチパラメータレーダ(気象庁気象研究所)。e:Xバンドマルチパラメータ

レーダ（気象庁気象研究所）。f:Ka バンドドップラーレーダ（防災科学技術研究所）。g:X
バンドマルチパラメータレーダ（国土交通省）。

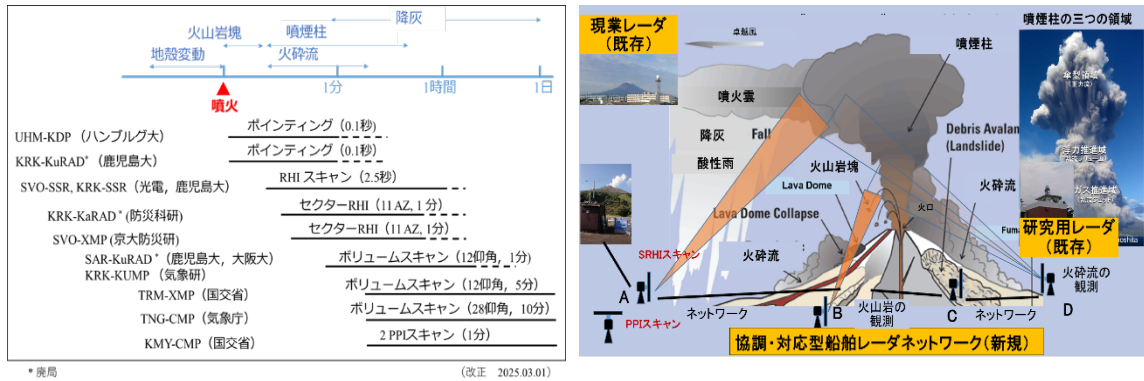


図 151 左：桜島で実施されたマルチレーダセンシング。

右：V-LEAD で計画されているマルチレーダセンシング。噴煙の変化に対応してスキャンモードを変える協調・対応型船舶レーダネットワークの開発がポイントになっている。

(b) 定量的降灰量推定研究の進展

気象レーダによる定量的な降灰量推定手法は、工学的アプローチと理学的アプローチに大別される。工学的アプローチは、レーダで観測された降灰の反射因子と、地上で採取された降灰量データとの関係を統計的に求める方法である。一方、理学的アプローチは、降灰粒子の物理特性（粒径分布、密度、落下速度など）に基づいて、レーダ反射因子と降灰強度を理論的に算出し、両者の関係式を求める方法である。工学的アプローチは観測値同士を比較するため推定精度に優れるが、地上降灰調査が噴火後に実施されるため、即時性に課題がある。一方、理学的アプローチは、降灰粒子の物理特性に基づくために、観測労力が比較的少なく、推定式に伴う誤差評価も可能である。具体的には、桜島に設置された光学式ディストロメータによって観測された火山灰の粒径分布および落下速度を用いて、降灰量推定式を構築した。降灰粒子の密度は、質量フラックス中心（Center of Mass Flux (CMF)）の解析結果から推定した（図 152）。解析結果から得られた降灰量推定式 $R_A = 0.0518Z^{0.597}$ を用いてレーダ反射因子から算出した降灰量分布を図 153 に示す。本手法は 2017 年以降に発生したすべての桜島の噴火事例に適用された。算出された降灰量情報は web サイト VASH (<https://vash.jp/>) および、JVDN システム

(<https://jvdn.bosai.go.jp/portal/ja/>) において公開され、火山防災対策研究や火山灰輸送過程の予測研究に活用されている。

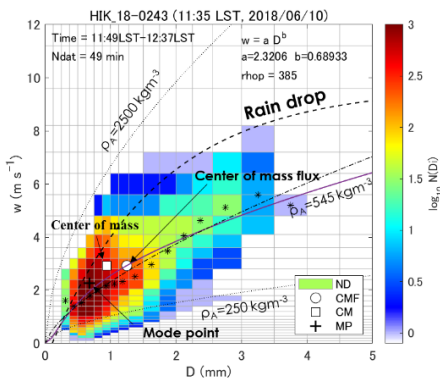


図 152 桜島噴火事例 18-0243 の落下速度-粒径 (w-D) 頻度分布。サンプル時間は 49 分。頻度分布の代表点として、モード点、重心、質量フラックス中心 (CMF) をそれぞれ +、□、○ で示す。実線は CMF を通る w-D 曲線で、密度 545kgm^{-3} に対応する。* は各粒径における実測された落下速度の平均値で、一点鎖線はその近似曲線（べき乗式）。参考として、降灰密度の上限および下限に対応する w-D 曲線を点線で示し、雨滴の w-D 曲線を破線で示す。

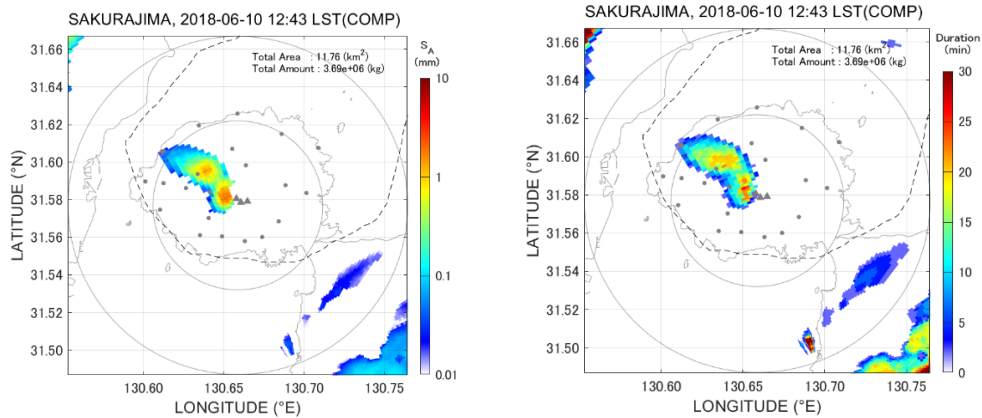


図 153 左：噴火事例 18-243 の積算降灰量分布。右：降灰観測時間の分布。

(c) 火山灰拡散予測のための連続化シミュレーションのオンラインシステム

火山灰の移流・拡散・降下をシミュレートし、場所毎の降下火山灰量を決定付ける重要な要素の1つは噴出量であり、もう1つの重要な要素は噴火継続中の風向、風速といった気象要素である。既往のシミュレーションでは、総噴出量と噴火継続時間のみ考慮されていたが、短時間で噴火が終了するブルカノ式噴火や、噴火の頻発、連続的な火山灰放出の噴火といった、噴出量が時間変化している場合の考慮がなされていなかった。そこで、連続的な観測である地震計およびひずみ計のデータからリアルタイムで噴出量を計算する。そして噴出量を入力条件として、対応する時間における風向、風速に対応した火山灰拡散シミュレーションを連続的に行って単位時間当たりの降下火山灰量および積算火山灰量を常時評価することができるシミュレーションシステムを構築した。このシミュレーションシステムはオンラインでデータの取得から結果の閲覧ができることが特徴である。

図 154 に火山灰の移流拡散の連続化シミュレーションシステムの概要と、シミュレーション結果のオンライン表示とディストロメータ観測による降灰量との比較を示す。このシステムでは、移流拡散シミュレーションを一定時間間隔で繰り返しており、各地点における降灰量の時系列を得ることができるので、指定する時間において降灰量を足し合わせることによって、時間あたりの降灰量分布を求めることができるとともに、前述のレーダやディストロメータによる降灰量との比較を行うことができる点にも特徴がある。風向、風速のデータは気象庁の提供する 5 km メッシュデータ（予測値）をそのまま使うのではなく、高精細化された風速場モデルである領域気象モデル WRF を数年分の計算をあらかじめ行い、計算結果データをシステムに保持しておき、その時間の気象庁のメッシュデータと最も類似している WRF データを抽出することで効率化と高精細化が実現されている。

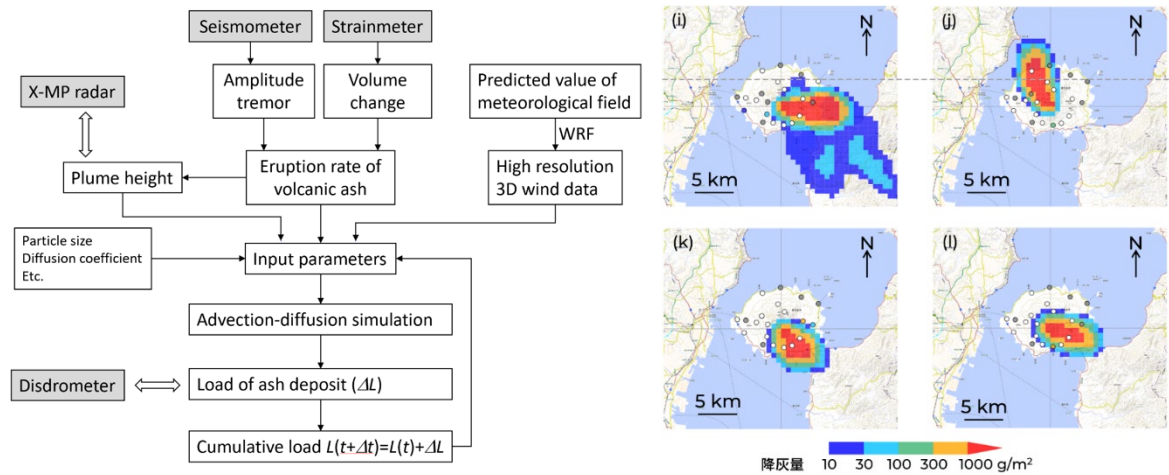


図 154 (左) 火山灰移流・拡散シミュレータの連続化のためのプロセスとデータのフロー図。(右) 連続化シミュレータによる予測降灰量分布とディストロメータ観測値から算出した降灰量 (○印) の比較。

(d) 噴火発生前の確率的降灰予測技術の開発

桜島で発生した過去の噴火事例をデータベース化し、その統計的性質を用いた噴火予測手法を開発した。昭和火口および南岳火口で 2009 年から 2020 年までに発生した噴火について、噴火に前駆する膨張の継続時間、膨張堆積、噴火発生にともなう収縮堆積、収縮堆積と膨張体積の比の 4 項目について頻度分布を求めた。これらの分布を最もよく説明できるモデル関数は Log-Logistic 分布である (Ishii & Iguchi, 2024³¹)。そして、モデル関数の形状パラメータが火山活動度に応じて時間変化しており、深部からのマグマ供給の増減との関連が示唆された。

また、このモデル関数を用いて、想定される噴火規模（噴火時の収縮体積）と噴火発生時刻の組み合わせを 20 シナリオ仮定し、各シナリオの発生確率を推定する手法を提案した。収縮体積は噴煙高度、噴火発生時刻は気象場の制約にそれぞれ利用でき、これらの情報を用いて降灰シミュレーションを実施することで、各シナリオでの降灰分布を予測できる。これらの降灰分布を、シナリオの発生確率で重み付けして足し合わせた分布を表示するシステムを構築した (Iguchi & Ishii, 2025³²)。このシステムは降灰シミュレータとして令和 5 年度から稼働中であり、リアルタイムの地盤変動データに基づいて、常時降灰予測を出力している (図 155)。

システムの枠組みの完成後は、現システムの予測精度向上に関わる課題に取り組んでいる。令和 6 年度には検証用シミュレータの運用を開始した。これによって、歪みの変化率を用いたステータス判定の導入や、各種パラメータの調整を実施し、噴火発生時刻および火山灰噴出率の予測の高精度化を目指している。

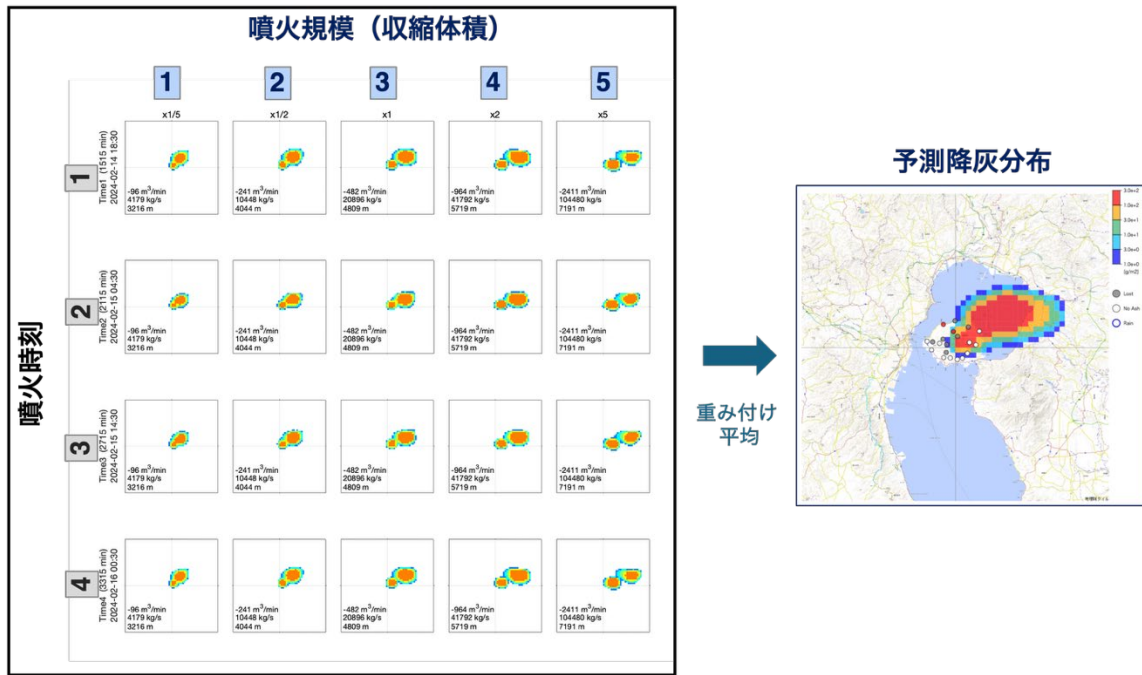


図 155 降灰シミュレータの概念図。

噴火規模と噴火時刻の異なる 20 シナリオでの降灰分布を算出し、各シナリオの発生確率で重み付け平均をとった分布を、予測分布として出力する。

2. 3 サブテーマ3

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発 「火山災害対策のための情報ツールの開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人 防災科学技術 研究所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 特任助教	田中 淳 関谷直也 安本真也

(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。この際、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けている桜島を対象として鹿児島県をフィールドとし、降灰被害予測コンテンツを含む情報ツールを使った実証実験を行う。

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：

- 過去の火山災害及び降下火山灰に関する文献調査、情報収集を行った。
- 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。

- 自治体を対象とした火山対策の現状を調査した。
 - 都市部の施設に対する降灰影響評価実験の実験計画を作成した。
- 2) 平成 29 年度：
- 過去の火山災害と降灰についての文献調査、情報収集結果の整理と分析を行った。
 - 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。
 - 自治体を対象とした火山対策の現状調査と結果の比較・分析を行った。
 - 都市部の施設に対する降灰影響評価実験を行った。
 - 登山者動向把握実験へ参加した。
- 3) 平成 30 年度：
- 周知啓発教育用コンテンツの基盤となる火山災害に関する調査や情報収集を行った。
 - 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。
 - 自治体を対象とした火山対策の比較・分析を行った。
 - 都市部の施設に対する降灰影響評価実験として、冷却塔を対象とする降灰実験を行った。
 - 平成 29、30 年度に実施された降灰影響評価実験の結果を受け、都市部の施設における建築設備の損傷度評価法の開発に着手した。
 - 登山者動向把握実験へ参加し、得られた登山者動態データの火山防災対策への利用に関して検討した。
- 4) 平成 31 年度（令和元年度）：
- 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化を行った。
 - 周知啓発教育用コンテンツの試作版として火山防災ポータルサイトを開設した。
 - 前年度までに実施した実験結果の妥当性を検証し、降灰被害予測コンテンツの試作版を開発した。そこでは、空調機給気口への粒径による火山灰侵入割合を数値的に評価した。
 - 降灰量に対する木造建築物の屋根の安全性について評価した。
 - 避難・救助支援コンテンツの試作版を開発した。
 - 登山者動向把握実験に参加し、避難・救助支援コンテンツ試作版のインプットデータを取得し、本試作版の活用について検討した。
- 5) 令和 2 年度：
- 周知啓発教育用コンテンツの試作版について、前年度開発した試作版について自治体防災担当者にヒアリングやアンケート調査を行い、課題を把握するとともに、新たなニーズを把握し、その結果を基に高度化を実施した。
 - 降灰被害予測コンテンツの試作版の高度化を実施した。そこでは、都市部の施設に対する降灰影響評価実験として、建物換気用エアフィルタの降灰実験を行った。
 - 降灰被害予測コンテンツの試作版について、防災担当者を対象とした火山灰対策の勉強会を行い、降灰対策に必要な情報の把握と降灰被害予測コンテンツへのニーズを把握した。

- 避難・救助支援コンテンツの試作版の高度化を実施した。
- 避難・救助支援において重要となる避難施設の耐衝撃性について、既存の建物への耐衝撃性を向上させるための実験を行い、補強方法の提案に資する結果を得た。

6) 令和3年度：

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

7) 令和4年度：

- 周知啓発教育用コンテンツを利用したアウトリーチ活動やアンケート調査を踏まえ、コンテンツの高度化を図った。
- インフラ関係各社の防災担当者とは大規模降灰の対策について意見交換した。
- 降灰被害予測コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、降灰の建物への影響について実験結果とシミュレーションから評価し、コンテンツの高度化を図った。ここでは、都市部の施設に対する降灰影響評価として、幹線道路沿い街区の降灰分布の数値計算的評価を行った。
- 降灰ハザードの評価の面から、降灰データからの降灰量見積もり及び降灰被害カーブについて検討した。
- 避難・救助支援コンテンツを利用した実証実験の結果を踏まえ、コンテンツの高度化を図った。その際、過去に実施した登山者の動態データを可視化する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：

- 周知啓発教育用コンテンツの活用方法の検討を行った。
- 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。
- 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。

- 降灰被害予測コンテンツの改善のために、都市部の施設に対する降灰影響評価として、複数の幹線道路沿い街区、道路での降灰分布の数値計算法の評価を行った。また、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。
- 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。
- 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。
- 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：

- 防災担当者などにヒアリング調査を実施するとともに、自治体の凶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。
- 降灰計算により、都市における火山灰再飛散の影響検討を行った。
- 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。
- 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。
- 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：

- 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た。
- 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た。また、降灰計算により、都市における火山灰再飛散計算高度化、噴火の時間推移を反映した街区内降灰推移の評価を行った。
- 避難・救助支援コンテンツに関するこれまでの研究成果の整理し事前防災に役立てた。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た。

(e) 令和7年度における業務の方法

令和7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。

なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、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場合は、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、緊急観測を実施あるいは緊急観測に協力することを可能とする。

(2) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

1) 周知啓発教育用コンテンツの社会実装

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充実化を行った。具体的には、火山災害の図上訓練での周知啓発教育用コンテンツの活用事例を作成し、火山防災担当者の実務で利用できるようにコンテンツの充実化を行い、火山防災担当者へのヒアリング調査と共に周知を行った。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。近年海外の火山での噴火事例も多いことから、海外のコンテンツの収集も行った。さらに、最終年度であることを考慮し、周知啓発教育用コンテンツの社会実装の成果と今後の課題について取りまとめた。

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した。降灰被害予測コンテンツの拡充・改善・調整のために、これまでに実施した積灰荷重が建物屋根に与える力学的な作用、降灰量と災害時重要施設の機能被害関係についての整理ならびに今後の課題点の抽出、他課題や公的機関提供の広域降灰予測を入力とする場合の、街区や道路などの狭域の降灰予測のさらなる高度化を行った。そこには、対象街区や火山灰粒子の粒径の追加および再飛散等の物理過程の考慮、などが含まれる。降灰予測に対する風向などの降灰時気象状況の影響についても整理を行った。また、火山周辺自治体と開発中の本コンテンツを共有し、演習等で活用した。

3) 避難・救助支援コンテンツの社会実装

これまで本州や北海道の4火山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した。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、事前防災に役立てた。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った。

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った。

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引き続き行った。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した。さらに、最終年度であることを考慮し、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た。

5) 自発的な活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進することとしていた。令和7年度においては、該当事例はなかった。

なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、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場合は、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、緊急観測を実施あるいは緊急観測に協力することを可能とすることとしていた。令和7年度においては、該当事例はなかった。

(b) 業務の成果

研究計画の4つの柱に沿って説明する。

1) 周知啓発教育用コンテンツの社会実装

a) 火山災害の図上訓練での活用

前年度の検討から、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なるが、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三者の支援がないと実施が難しい。そこで、引き続き久保他(2020)¹⁾を参考に、周知啓発教育用コンテンツを活用して、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と今後の利活用について検討を行った。

今年度は、北海道鹿部町を対象に実施した。北海道鹿部町は太平洋に面しており、漁業が中心の町であることから、前年度の北海道七飯町との違いとして、漁業関係の対応を中心とした訓練内容とした。鹿部町も対象とする活火山は北海道駒ヶ岳になることから、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ヶ岳を対象として作成されたシナリオを参考に、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(北海道駒ヶ岳避難基本計画²⁾内のレベル5-2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21に示す。鹿部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、住民や漁業関係施設等の付与情報に対応していく。想定時期は事前調査などから、想定時期を10月とした。

表 21 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
10/10	8:30(13:00)	解説情報(臨時)	状況把握、住民対応など
	8:40(13:10)	Lv2	今後の推移に応じた準備態勢
	9:10(13:40)	Lv3	住民、事業者(外国人)対応 観光客対応
	9:50(14:20)	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
	10:55(15:25)	Lv5-1(噴火拡大)	避難指示(第1次避難区域)
	11:10(15:40)	Lv5-2(中噴火)	全町避難、本部移設(Lv5-2)
	11:30(16:00)	終了	

付与情報は、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では、災害対応のトリガーは気象庁による噴火警戒レベルであるため、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、周知啓発教育用コンテンツの情報を活用した。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74作成した(表22)。

表 22 付与情報の抜粋

分	発着時間	退着時間	No.	種別	発信元	発信先	状況	付与方法	内容
0:00:00	13:00:00	8:30:00	J-1	解説情報(臨時)	函館管区気象台	すべてに		Zoomで配信	西山麓観測で継続時間2分の火山性微動が観測された。この後、13時10分にLv2に上げる予定
0:10:00	13:10:00	8:40:00	J-2	Lv2	函館管区気象台	すべてに		Zoomで配信	北海道駒ヶ岳の噴火警戒レベルを2に引き上げます。併せて火口周辺警報(噴火警戒レベル2、火口周辺規制)が発表されたので、臨時の管内防災担当者会を開催したい。8:50からZoom会議を実施したい。
0:12:00	13:12:00	8:42:00	M-1	マスコミ	NHK(井上さん)	総務・防災課			電話取材をさせていただきたい
0:15:00	13:15:00	8:45:00	F-1	連絡	住民(三浦さん)	役場代表			TVを駒ヶ岳の噴火警戒レベルが上がったと知ったが、駒ヶ岳は噴火するか？
0:20:00	13:20:00	8:50:00	F-2	連絡	道の駅の小倉さん	水産経済課			噴火警戒レベルが上がったようだが、こちらでは何もしらまいか。
0:20:00	13:20:00	8:50:00						Zoom	協議会による連絡会議 火山専門家から今後の留意点などの説明
0:22:00	13:22:00	8:52:00	F-3	連絡	鹿部消防	総務・防災課		消防のリエゾンから	降灰調査を行うと思うが、どの範囲を行ったらよいか。
0:27:00	13:27:00	8:57:00	F-4	連絡	町議会議員(佐藤さん)	総務・防災課			町議の佐藤だが、どうなっている。噴火するの？
0:30:00	13:30:00	9:00:00	J-3	解説情報(臨時)	函館管区気象台	すべてに			北海道駒ヶ岳で火山性微動が継続して観測されています。今後噴火する可能性もあります。
0:32:00	13:32:00	9:02:00	F-5	連絡	鹿の湯の武田さん	水産経済課			連泊しているお客さん(黒崎さん夫妻)2名が朝から北海道駒ヶ岳に登山に行っているが、大丈夫か。連絡したがつながらない。
0:35:00	13:35:00	9:05:00	F-6	連絡	道南ファームの柱谷さん	水産経済課			道南ファームの柱谷ですが、駒ヶ岳の山頂で噴火しているように見える。大丈夫か？
0:38:00	13:38:00	9:08:00	F-7	連絡	宮浜の住民の長谷川さん	総務・防災課			宮浜の長谷川だが、駒ヶ岳の山頂で噴火しているように見える。噴火していないのか？
0:39:00	13:39:00	9:09:00	F-9	連絡	大沼国際ゴルフ場の吉田さん	水産経済課			お客さんが駒ヶ岳が噴火したといっているが噴火したか？
0:40:00	13:40:00	9:10:00	J-5	噴火速報	函館管区気象台	すべてに			噴火速報を発表します。
0:41:00	13:41:00	9:11:00	J-4	Lv3	函館管区気象台	すべてに			北海道駒ヶ岳で小噴火しました。噴火警戒レベルを3に引き上げます。同時に噴火速報も出します。併せて、レベル3が発表されたので、各町の状況を知りたい。9:20からZoom会議を実施したい。
0:42:00	13:42:00	9:12:00	J-6	降灰予報	函館管区気象台	すべてに			降灰予報。風向きが北西から南東のため、鹿部町方面に火山灰が降る予報です。
0:42:00	13:42:00	9:12:00	J-6.2	府県気象情報	函館管区気象台	すべてに			夕方から雨が降り始め夜には強い雨が降る予報です。降灰後土石流にも注意してください。
0:45:00	13:45:00	9:15:00	M-2	マスコミ	HTB(前田さん)	企画振興対策部			電話取材をさせていただきたい
0:45:00	13:45:00	9:15:00	F-10	連絡	鹿部消防	企画振興対策部		消防のリエゾンから	消防車や消防団による広報活動の必要はあるのか？また、降灰調査はどの範囲を実施したらよいか。
0:46:00	13:46:00	9:16:00	F-11	連絡	火山本部の斎藤さん	建設水道対策部			火山本部の機動観測部隊が現地を観測調査をいたしたので、緊急通行車両の申請を行いたい。また、今後の通行によっては、規制範囲に入りたいので、その許可をもらいたい
0:47:00	13:47:00	9:17:00	F-12	連絡	セイコーマート小村さん	水産経済対策部			外国人の方や住民の方が多数来店し、商品がほとんどなくなってしまった。
0:50:00	13:50:00	9:20:00		到着	渡島総合振興局職員				渡島総合振興局職員(リエゾン)が災害対応支援のため到着
0:50:00	13:50:00	9:20:00						Zoom	協議会による連絡会議 火山専門家から今後、噴火が継続する可能性が高いことと、火砕流の発生も危惧されると解説
0:55:00	13:55:00	9:25:00	F-13	連絡	大岩の前川さん	民生対策部			大岩の前川だが、おばあさんが噴火にびくびくして、ベツから落ちてけがをした。助けてほしい。消防に連絡してもつながらない。
1:00:00	14:00:00	9:30:00	F-14	連絡	道庁	総務防災対策部			防災情報システムに現状を入力してほしい。
1:03:00	14:03:00	9:33:00	F-15	連絡	JR函館支社	水産経済対策部			鹿部駅で停車中の車両に114名の乗客があり、町からバスなど出してもらえないか。または、帰宅困難者をどこか滞在させることができる場所の提供をしていただけないか。
1:05:00	14:05:00	9:35:00	F-16	連絡	道南ファームの柱谷さん	水産経済対策部			道南ファームの柱谷だが、火山灰のようなものが降ってきて、音も大きく牛たちが不安に感じている。避難させたいがどこか避難先はないか。
1:07:00	14:07:00	9:37:00	F-17	連絡	鹿部ゴルフ場の橋本さん	水産経済対策部			ゴルフに来ているお客様が83名おり、67名は移動手段があり、函館方面に帰ってもらうが、残りの16名は当方のバスで避難させる。そこで、どこに避難させればよいか。
1:10:00	14:10:00	9:40:00	F-18	連絡	本別漁協の藤江さん	水産経済対策部			港に留まっている船10艘が沖出しに向かっています。そのまま、函館方面の港に向かいたいで、受け入れてくれる港を探してほしい。

作成した訓練シナリオを使い、前年度と同様に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11月20日に北海道鹿部町役場で実施し、訓練参加者は、鹿部町12名、森町5名、七飯町2名、北海道渡島総合振興局2名、森警察署1名、北海道開発局建設部1名、函館地方気象台2名、鹿部消防署1名、阪急交通社2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)、見学者は北海道危機対策局危機対策課1名、十勝岳ジオパーク2名、即戦力人材育成事業の関係者3名であった。今回実施した訓練の様子を図156に示す。

図上訓練での付与情報の流れは、鹿部町の災害対策組織に基づき、付与情報を情報班に付与し、その情報が分析班に渡り、担当する部局に情報が伝わり対応する流れとした。今回の鹿部町では、災害対策本部の関係部局の責任者がすべて参加して実施できたことで、各部が火山災害時に対応すべきことの確認ができた。一方、これまでこういった訓練を実施していなかったため、多くの課題も確認することができた。

また、警察や消防、道庁など関係機関も参加することで、町としての火山災害時における対応の連携などを確認することができた。これまででは北海道では振興局単位、それ以外の地域では都道府県単位などで行われていたが、こういった実践的な訓練を

市町村単位で実施できたことの意義は非常に大きい。また、今回の訓練の機会を利用して、町の災害対策本部のメンバーすべてと関係機関が参加したことで、火山対応の周知と周知教育用コンテンツを活用いただくことができた。



(a) 情報班による付与の受け取り



(b) 分析班による対応



(c) 関係機関との調整



(d) 災害対策本部の対応



(e) 道による情報収集の様子



(f) Zoom での気象台による噴火警戒情報と協議会内の情報共有

図 156 図上訓練の様子

図上訓練後、振り返りとアンケート調査を実施した。振り返りでは、今回こういった災害対策本部での対応を初めて行ったことで、本部のレイアウトや情報伝達の流れなどを見直す機会になったとのコメントが得られた。また、参加した他の市町村からも自

身の市町の訓練を見直したいといったコメントも得られた。さらに鹿部町特有の課題として、今後噴火が継続し、北海道駒ヶ岳避難基本計画²⁾の避難警戒レベル5-3になった場合、全町避難となることから、その際の住民の避難だけではなく、町の機能移転について、実践的な対応を検討する必要性を再確認できた。

次に事後アンケート結果について述べる。図157に回答者の属性を示し、回答者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(n=17)。図158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157 アンケート回答者の属性
(n=17 図中の数字は回答数)

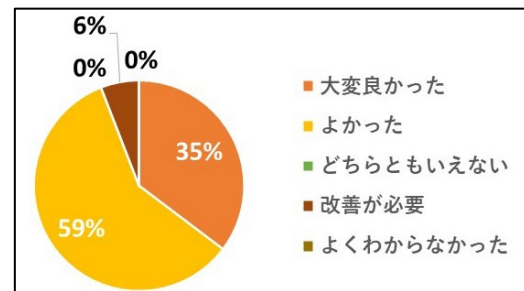


図158 訓練全体の感想(n=17)

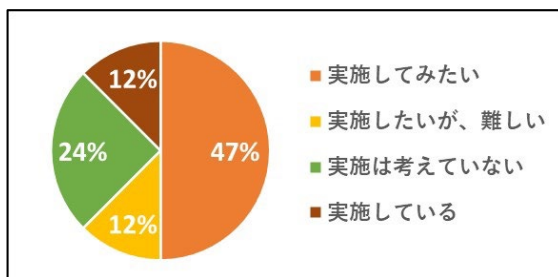


図159 訓練実施の要望(n=17)

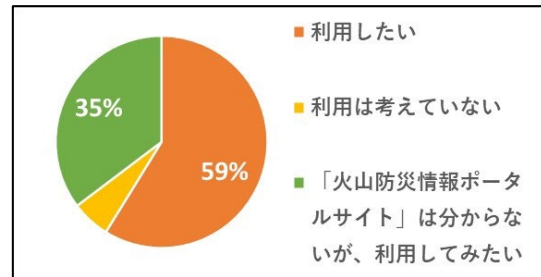


図160 周知啓発教育用コンテンツの利用希望(n=12)

図159は、「こういった図上訓練を実施してみたいと思いませんか。」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「各機関と連携してやらないとリアルさを体験できない」や「訓練を実施する時期、時間の確保が難しい」といったように訓練実施の調整の課題や通常業務の多忙が見られた。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、「コントローラーの確保と、プレイヤー参加者の拡大、特に防災担当課以外の職員参加を増やして役所全体で災害対策に当たる認識を深めたい」や「場所と設備」、「受援計画、広域応援計画、現場での活動マニュアルを町のマニュアルと照らし合わせ行くことが必要」といった回答があり、防災担当部局以外の職員を巻き込んだ訓練の必要性が上がった。

図 160 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る。このため、本事業が終了後も継続して「火山防災情報ポータルサイト」の運用が必要であり、これまでヒアリング調査などを通じて開発した「火山防災情報ポータルサイト」が火山防災対策の支援となることがわかった。

「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「噴火に応じたタイムラインの作成支援」や「北海道駒ヶ岳の特徴的な噴火活動をとらえた訓練のプロデュース」といった訓練や防災対策面でのアドバイスや「状況判断のタイミング」や「判断する後押し、根拠なども含めて専門家の意見だけで納得できる」といった災害対応時におけるアドバイスを必要としていることがわかった。

図 161 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な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「避難計画」や「災害対応マニュアル」といった災害対応に必要な情報が必要であることがわかる。また、「火山現象に関する知識」、「職員向けの訓練」といったように本コンテンツで構築してきた資料や情報のニーズが高いことを確認した。一方、噴火の事象系統図のような専門性の高い情報のニーズは低く、これは、専門性が高い情報は自治体の職員が利用するのではなく、火山専門家のアドバイスから提供される情報であり、火山防災の現場にはあまり必要がないのではと考えられる。同様に噴出量階段図についても、自治体の防災担当者からヒアリング調査などで必要といったニーズは見られず、次に起こる災害がどの程度になるかわからないため、最大想定や頻度の高い事象といった定性的な規模でのケースを基に対応を検討するといった視点に対して、噴出量階段図のように過去の累積情報を提供されても次の災害につながる情報ではないため、必要とされていないと考えられる。そのため、火山防災対策に資する情報は、想定最大や頻度の高い事象の噴火シナリオと、それによる社会の影響に関する情報、影響を低減させるための対策に関する研究成果である。

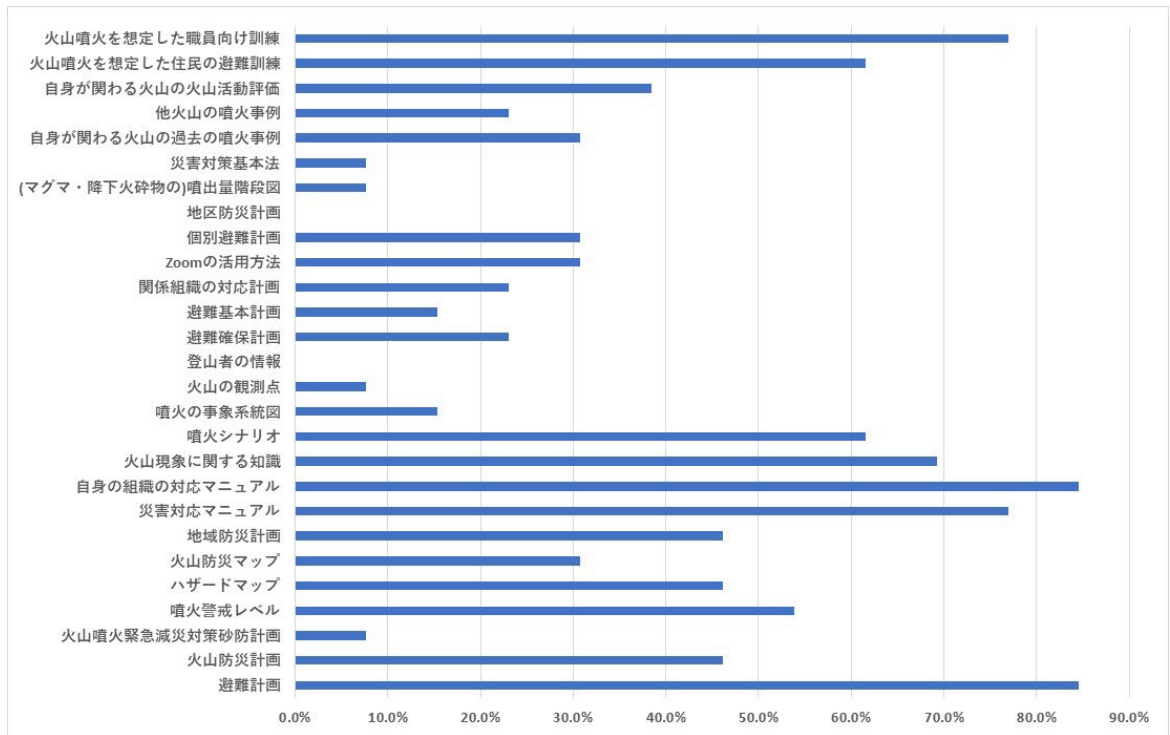


図 161 図上訓練を通じて火山の噴火対応に必要と感じたもの (n=17、複数選択可)

図上訓練のコンテンツの今後の課題把握として、2026年2月に図上訓練に見学者として参加した十勝岳ジオパークの方々にヒアリング調査を実施した。ヒアリング調査では、今回の図上訓練のシナリオは麓の住民避難までを対象としたが、頻度の高い登山者対応を中心とした水蒸気噴火によるケースに関するニーズも高いことを把握した。登山者対応については、3)避難・救助支援コンテンツにおいて登山者の動態把握訓練や情報伝達などを実施しているが、市町村の災害対策本部における対応を中心とした図上訓練シナリオを今後作成していく必要があることを確認した。

本事業は今年度で終了となるが、今後は水蒸気噴火による登山者対応に関するシナリオも含めてコンテンツを構築し、提供することでさらなる火山防災対策の支援ができると考えられる。

b) コンテンツの充実化

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から、引き続き火山灰に関するコンテンツを中心に収集を行った。前年度に引き続き、今年度はNTT東日本とNTTドコモと共同で、NTTドコモの通信アンテナとスターリンクへの影響について実験を行った。使用した火山灰は、桜島の火山灰を250 μ mに篩ったもの(以下、桜島)と、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 μ mに篩ったもの(以下、大室)を利用した。火山灰の堆積厚さは久保・吉本(2024)³⁾を用いて、厚さに換算して使用した。

NTTドコモの通信アンテナを対象とした実験を2025年7月に実施した。対象としたアンテナは、棒状のため、通常火山灰が付着しにくい形状であるが、ここではシビアな状況とするため棒状のアンテナに細長いビニールをかぶせそのビニールに火山灰

を付着させた。付着させる際に周囲に広がらないように図 162 左に示すようにカバーをかけて火山灰を降下させて、付着させた(図 162 右)。その結果、乾燥状態の桜島の火山灰でも大室でも影響は見られなかった。さらに水を噴霧したが、影響は見られなかった。



図 162 NTT ドコモの通信アンテナの実験の様子

次にスターリンクを対象とした実験を行った。本実験は昨年度も実施しているが、再検証として 2025 年 8 月に実験を実施した。この実験では桜島の火山灰を用いて行った。図 163 に乾燥状態の火山灰を 1 cm 程度まで堆積させた状況を示す。この状況では、若干の通信速度の低下は見られたが、影響はなかった。しかし、図 164 に示すような火山灰を 0.5 cm で湿潤状態にしたところ、通信が切断された。このことから、昨年度の実験では含水率が足りなかった可能性があることと、火山灰に水が付着することで水の影響が大きくなり、通信に影響が出ることがわかった。



図 163 乾燥火山灰 1 cm 程度の状況 図 164 湿潤火山灰 0.5 cm 程度の状況

さらに、2025 年 5 月に桜島でやや大きな噴火が見られ、また 2025 年 6 月に新燃岳で小規模な噴火があったことから、コンテンツ収集のため、現地調査を行った。

2025 年 5 月の桜島噴火では、6 月 16、17 日に現地調査と垂水市にヒアリング調査を行ったが、大きな影響は見られなかった(図 165、図 166)。



図 165 霧島市福山付近(降灰による汚れ)



図 166 桜島有村展望台 (2025年6月)

2025年6月の新燃岳噴火では、7月22、23日に霧島市と高原町で現地調査を行った。高千穂河原ビジターセンターでヒアリング調査を行ったところ、降灰時には、気象庁から情報は特になく、高原町側から降灰が見られたと連絡があり、確認したところ、高千穂河原ビジターセンターでも降灰が見られたと伺った。このことから、気象庁では噴火を把握できていなかったことがわかる。このため、火山災害対応として、噴火警戒レベル2などで、噴火検知のため、降灰観測装置を火口周辺施設に備えることで、降灰を検知することで噴火検知につなげるといった対応も必要であるように考えられる。

霧島温泉のホテルスタッフにもヒアリング調査を行い、降灰時は一面薄い火山灰に覆われ、白くなったことがわかった。しかしその後国交省などの除灰などによって通常の状態に戻っている。7月の現地調査では、高千穂河原ビジターセンターでは、断水が続いていたが、営業を行っていた(図167)。それ以外の場所については、えびのエコミュージアムや大浪池園地休憩所、奥霧島皇子原公園キャンプ場を調査し、降灰の様子を確認することができた(図168～図170)。



図 167 高千穂河原ビジターセンター (2025年7月)



図 168 えびのエコミュージアム周辺の降灰状況（2025年7月）



図 169 大浪池園地休憩所の降灰状況（2025年7月）



図 170 奥霧島皇子原公園キャンプ場の降灰状況（2025年7月）

また火山防災対応のコンテンツ資料として、2025年11月18日に北海道函館市で行われた恵山火山噴火総合防災訓練に参加し、沿岸自治体における火山災害対応での情報共有や船を使った避難訓練などのコンテンツを収集した(図 171)。



図 171 恵山火山噴火総合防災訓練の様子

これら国内の噴火以外にも国外の噴火についてもインターネット上で収集できる情報やコンテンツの収集も行った。

c) 火山防災情報ポータルの更新

社会実装として、自治体防災担当者や防災関係機関の担当者に利活用してもらうために、利便性を高める必要がある。そのため、これまでヒアリング調査を行い、火山防災情報ポータルを更新してきた。今年度も自治体へのヒアリング調査と東京大学情報学環との連携によるライフライン企業へのヒアリング調査を行い、更新を行った。

ヒアリング調査から、利用者の視点からトップページをユーザーごとの分類できるとよいつの意見をいただき、「業務から探す」の部分を図 172、図 173 に示すように「初めての方」、「自治体防災担当者」、「防災関係機関」として、それぞれの業務を基に必要な情報の整理を行った。



図 172 更新した火山防災情報ポータルのトップページ



図 173 更新した火山防災情報ポータルサイトのリンクページ（左：自治体防災担当者 右：防災関係機関）

さらに、これまで構築してきたコンテンツの掲載を行うとともにレイアウトの見直しと修正を行った(図 174)。



図 174 火山防災情報ポータルサイトのレイアウトの更新例(左：更新前 右：更新後)

よくある質問についてもヒアリング調査から、「健康被害」や「フィルタ」、「火山灰の性質」項目の追加を行った(図 175)。



図 175 火山防災情報ポータルに追加した「よくある質問」ページ(赤枠：追加項目)

これにより社会実装に耐えうる火山防災情報ポータルの更新を行うことができた。すでに多くの自治体において、本コンテンツで開発した火山防災情報ポータルサイトを活用いただいております。火山防災対策の支援として役立っている。そのため、本事業終了後に継続的に運用していくことが必要とされている。また、継続的に利活用してもらうためには、情報の更新も定期的に行っていく必要がある。

一方、地震防災の分野ではこういったポータルサイトを文部科学省地震研究推進本部において、アウトリーチ活動として運用がなされている。

そこで、今後は防災科学技術研究所や文部科学省火山研究推進本部などにおいて、継続的な更新を行い、運用されることが望ましいと考える。

2) 降灰被害予測コンテンツの社会実装

a) 都市街区の降灰シミュレーション

i) 火山灰再飛散

はじめに

火山灰の再飛散は、地上に沈着し堆積した火山灰が風の作用で大気中に取り込まれて浮遊火山灰となって気流で流され、その間の重力沈降で最終的に風下の離れた地点に再び沈着し堆積する現象である⁴⁾。その生成や発達には、乾燥気象下での強風による土埃や砂塵嵐、あるいは寒冷気候における地吹雪などと類似の機構が働いている。再飛散は、上空の灰雲からの降灰が地上に積もったもの（1次堆積）を風の作用で別の場所に運び再び堆積させる（2次堆積）ものであり、火山灰沈着量(kgm^{-2})の再配分の過程であるといえる。こうした現象は長期的には風成火山灰堆積物であるレスの形成を促す⁴⁾。

火山灰の再飛散は、降灰をもたらすものであればどのような噴火にも随伴して生じ得る。堆積した未固結の火山灰（降下火砕堆積物）で、乾燥するなどして風で舞い上げられやすい状態にあるものは、大気への浮遊火山灰の供給源となる。噴火が終息した後でも、そのような状態が連続的、断続的に出現する限り、再飛散は長きにわたって発生し続ける。

再飛散の火山灰が飛来すると、煙霧や砂塵嵐のときのように視程を低下させ交通に支障を生じさせたり、呼吸器などの人の健康や生活に影響を与えたりする。米国アラスカ州での1912年のカトマイ火山の噴火では、噴火が終息した後でも春や秋の積雪のない時期の北西の強風の際に顕著な再飛散が発生し、火口から数百km離れた集落の住民の長期にわたる移転を強いた。カトマイ火山の再飛散は1912年の噴火以来現在に至るまで観測され続けている⁵⁾。欧州の航空機の運航に大きな影響を与えたアイスランドのエイヤフィラヨークトル火山の2010年の噴火⁶⁾、隣国アルゼンチンの国内全域の航空、道路交通に影響を与えたチリのプジュウエ＝コルドン・カウジェ火山の2011年の噴火⁷⁾に起因する火山灰再飛散は、再飛散現象が社会に与える影響の大きさを示す例である。

再飛散の都市における問題

建物が密集する市街地では、建物屋根や道路等に堆積した火山灰も条件が整うと再飛散する可能性が高い。日本列島は中緯度の偏西風帯に位置し、季節風や低気圧の通過に伴うある程度以上の強さの風が吹く頻度が高い。そのため、風による火山灰の再飛散も起こりやすいといえる。地上付近の風は一般に地面から離れるほど強くなり、再飛散は風が強い程起こりやすいため、地面より高い位置にある建物の屋上は再飛散する火山灰の放出源になりやすい。建物の屋根から空気中に放出された火山灰は風に流され、風下にあるより低い建物の屋根や建物間の地面、道路などに再沈着すると考えられる（図176）。

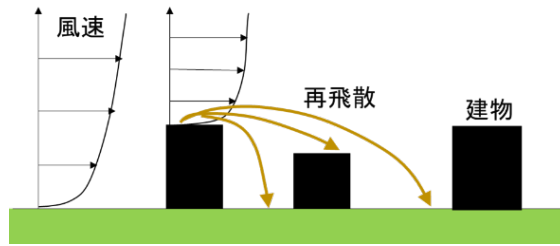


図 176 市街地における火山灰再飛散の概念図

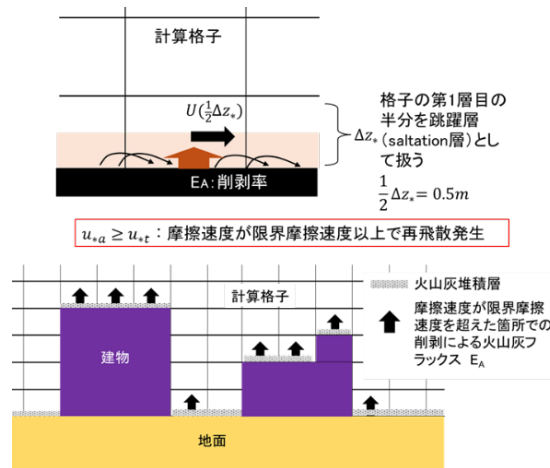


図 177 再飛散対象とした市街地

火山からある程度離れた場所（遠位領域）にある都市への降灰は、それ自身は建物を押し潰したりするような破壊的なものでなくても、都市に機能的な被害をもたらす⁸⁾。こうした視点に立った、降灰が電力や上下水道、交通、通信など、都市のインフラ全般に与える影響の検討⁸⁾、建物の空調機器の動作への影響の実験的研究⁹⁾、建物による市街地の降灰分布の不均一性に関する数値計算による研究¹⁰⁾、などいくつかの研究が行われている。これらの研究で扱われているような都市の機能被害は、火山灰の再飛散によっても同様のことが起こると考えられる。

粒子の再飛散現象である砂嵐は風食や堆砂、地吹雪は吹溜まりの形成などを引き起こすが、同様のことが火山灰の堆積した都市域で起これば、建物などによる地表面の凹凸の影響で、再飛散の様相も都市に特徴的なものになると予想される。ここでは、都市内の街区という狭い範囲についてはあるが、火山灰の再飛散に対する建物の影響に関して、降灰計算を行って考える。ただし、厳密な定量的な検討というよりは、むしろ都市における火山灰飛散の特徴的な点を理解するための予備的なものである。

再飛散の計算方法について

火山灰の再飛散過程は、いくつかの気象業務用降灰予報モデルに取り入れられており、計算方法の違いが予報結果に与える影響が議論されている¹¹⁾。再飛散は、前述のように火山灰堆積層表面で風によって削剥された火山灰粒子の大気中への放出、

補足された粒子の浮遊火山灰としての大気中での移流・拡散、および重力沈降と地表面への沈着・堆積からなっている。

これらの過程を計算するための基本方程式は、粒径 D 毎に与えられる以下の式(1)、(2)になる。ここでは、火山からの遠隔域での降灰を考えるため、対象とする火山灰粒子の粒径は 62.5、125、250、500 μm の 4 粒径とした。結果の多くは、このうち粒径 125 μm について示す。

(粒径 D の火山灰の空間濃度の移流・拡散式)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial C}{\partial x_j} + \frac{E_A}{h} \Big|_{sfc} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{m - m_a}{m} \delta_{i3} g - \frac{1}{2m} \rho_a C_D (Re) A |\mathbf{U} - \mathbf{U}_a| (U_i - U_{ai}) \quad (2)$$

ここで、C：粒径 D の粒子の空間濃度 (kgm^{-3})、K：乱流渦拡散係数 (m^2s^{-1})、 U_i ：粒径 D の粒子の速度 (ms^{-1}) の i 成分、 U_{ai} ：風速の i 成分、 $i=1, 2, 3$ ：それぞれ x、y、z 成分 (x：東西方向で東が正、y：南北方向で北が正、z：鉛直方向で上が正)。g：重力加速度 (9.8ms^{-2})、 δ_{ij} ：1 ($i=j$)、0 ($i \neq j$)、m：粒径 D の個々の粒子の質量 (kg) ($=4/3 \pi \rho_p (D/2)^3$)、 ρ_p ：個々の粒子の密度 (2600kgm^{-3})、 m_a ：粒径 D の粒子と同体積の空気の質量 (kg)、A：粒子と気流との間の相対速度からみた粒子の断面積 (m^2) ($=\pi (D/2)^2$)、 ρ_a ：空気密度 (1.2kgm^{-3})、 C_D ：粒子の空気力学的力係数¹²⁾、Re：粒子-気流相対速度による Reynolds 数 ($=D(|\mathbf{U}-\mathbf{U}_a|)/\nu$)、 ν ：空気の動粘性係数、EA：風による火山灰堆積層表面の削剥率 ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)。H：跳躍層の厚さ (m)、である。粒子は球形として扱い、空気力学的球形からのずれの影響は球形度 ($=0.8$) によって考慮した¹²⁾。

数値計算では式(1)中の削剥率 E_A (削剥による鉛直方向火山灰質量流束) は、図 177 のように与えられる。地面や建物屋根に接する計算格子 (後述) における火山灰空間濃度 C の、削剥による変化率 $\Delta C/\Delta t$ は

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = + \frac{E_A}{\Delta z_*} \Big|_{sfc} \quad (3)$$

と表される。sfc は、風による削剥が生じる表面における値であることを示す添字である。 Δz_* は地面や屋上の第 1 番目の格子の厚さである。式(1)の右辺の最も右側の項にある跳躍層の厚さ h は $h=1/2 \Delta z_*$ としており、後述する数値計算では $\Delta z_*=0.5 \text{m}$ である。式(2)に現れる風速 U_{ai} には、非圧縮中立流体計算によって得られた定常状態にある境界層乱流の 3 次元流れ場を用いた¹³⁾。式(1)右辺の渦拡散係数 K は、標準 k- ϵ 乱流モデルにおける乱流運動エネルギー k と乱流運動エネルギーの散

逸率 ε とから計算される。火山灰の存在が流体の運動には影響を与えないとしている。

風による削剥率 E_A

風による火山灰の削剥は、表面での空気力学的な摩擦応力（以下単に摩擦応力と称す）がある閾値を越えたときに発生し、その際空気中に単位時間当たりに取り込まれる粒子の量は摩擦応力と閾値との差の増加関数になるとして扱われる。ここでは、火山灰を用いた室内実験で得られ、砂塵や火山灰の再飛散計算で多用される式(4)を用いることにした^{11, 14)}。

$$E_A = \frac{k_s \rho_a}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2} \right) \quad (u_* > u_{*t}) \quad (4a)$$

$$E_A = 0 \quad (u_* \leq u_{*t}) \quad (4b)$$

式(4a, b)で、 u_* は表面における摩擦速度 (m/s) ($\tau = \rho_a u_*^2$ は、気流と地面との間の摩擦応力(Nm⁻²))、 u_{*t} 、はこの大きさを超えると削剥が生じる閾値である限界摩擦速度 (ms⁻¹) である。 k_s は表面の特性を表す有次元の係数で、その値には 5.0×10^{-4} (m⁻¹)を用いた^{11, 14)}、削剥率 E_A を与える経験式は、地吹雪の計算¹⁵⁾で用いられているものもあるが、ここでは火山灰に対する研究に基づく式(4a, b)を用いることにした。

限界摩擦速度は、粒子の粒径、形状、水分の有無などに依存するが、Folch 等(2014)¹⁴⁾の図1に与えられている乾燥粒子に関する値を参照し、ここで考慮する粒径 62.5、125、250 μ m に対しては 0.25 ms⁻¹、同 500 μ m に対しては 0.3 ms⁻¹を用いることにした。摩擦速度には $z = \Delta z_*$ における風速 $|Ua|_{z=\Delta z_*}$ から対数則 $u_* = \kappa |Ua|_{z=\Delta z_*} / \ln(z/z_0)$ によって計算される値を用いた。 κ はカルマン定数(0.4)、 z_0 は表面の空気力学的粗度長さで 0.001 m と仮定した。摩擦速度 0.25 ms⁻¹および、0.3 ms⁻¹を与える表面上 0.5 m における風速は、それぞれ 3.88 ms⁻¹および 4.66 ms⁻¹となる。

計算条件設定

計算対象とする市街地は、図178に示すような中低層建物が密集する東西方向 200 m × 南北方向 280 m の長方形の水平範囲である。そのほぼ中央を幅広い道路が南北に走っている。計算領域の高さは 500 m とした。粗くではあるが個々の建物を表現するため、対象市街地全体を水平方向に格子間隔 2 m で分割し、高さ方向には、格子間隔 Δz が地上高度 0~40 m で 1 m、それより高い範囲では上に向かって徐々に増加するような分割とした。

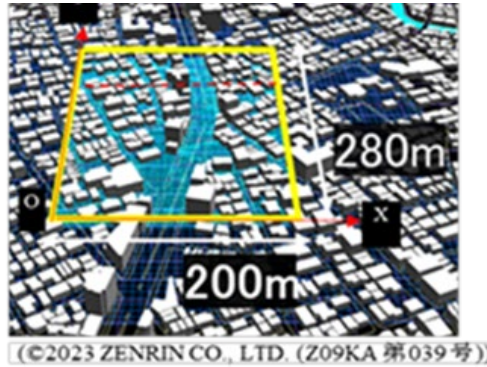


図 178 モデル市街地

対象街区の外側には、乱流境界層流を発達させるための計算領域をさらに 2 段階
 設け（東西×南北=480 m×480 m、水平分解能 6 m、および東西×南北 1200 m×1200
 m、水平分解能 6 m）、合計で 3 段階のネスティング格子となっている。計算領域の
 高さや高度方向の格子分割は 3 領域全て同じである。火山灰再飛散の計算は、最も
 内側の格子に対して行った。高解像度で表現された対象市街地に供給源をもつ再飛
 散を選択的に見るためである。

最も外側の計算格子の側面境界への流入気流は、日本建築学会の地表面粗度区分
 III に相当する、風速が高度 z の指数関数（指数が 0.2）に従う高度分布を持つ勾配
 流

$$U_a(z) = V_{ref} (z/35)^{0.2} \quad (5)$$

として与えた¹⁶⁾。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 (V_{ref}) とした。流入気流のこうした設定方法は、建築や土
 木工学の分野において、研究、実用問題の両面で多用されるやり方である。

計算では、摩擦速度 u_* が限界摩擦速度 u_{*t} を超える場所では火山灰の削剥が継続
 して起こり、大気中に火山灰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
 になると削剥は停止するが、ここでは市街地での再飛散の基本的な点を概観する目的
 のため、削剥による火山灰の放出は継続し続けるとした。

結果

図 179 にモデル化建物の高さ(m)を示す。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 180 に参照風速 V_{ref} が 12 m/s の西風時の地面および屋根面からの高さが 0.5 m の
 位置における風速コンター（東西成分のみ）、風速ベクトル（東西、鉛直成分）を。
 また、図 181 には図 179 の白い鎖線上の風速の東西-鉛直断面を示す。以下では、
 平面図は全て上が北である。図 180 の黒の実線は建物輪郭線を表しており、その内
 側は屋根上での値を表している。図 25、図 181 には、周囲より高い建物上ではその
 周りよりも風速が大きいことが表れている。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、④や⑤の建物の東側に広

がる風速の低い範囲（青が濃い付近）は、これらの建物の風下の後流に入る低風速域となっている。

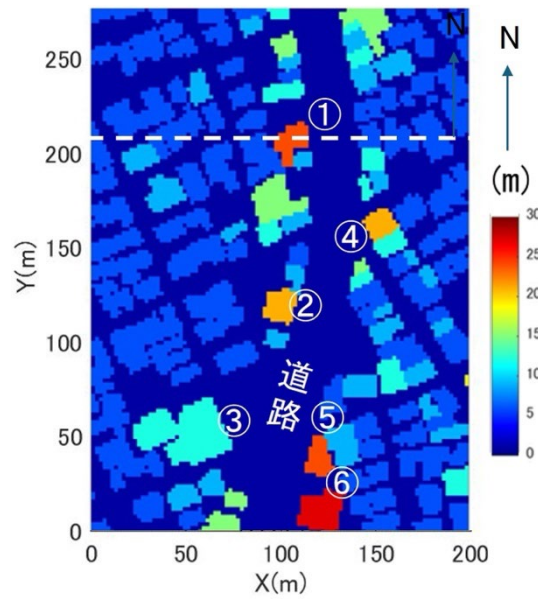


図 179 建物高さ (m)

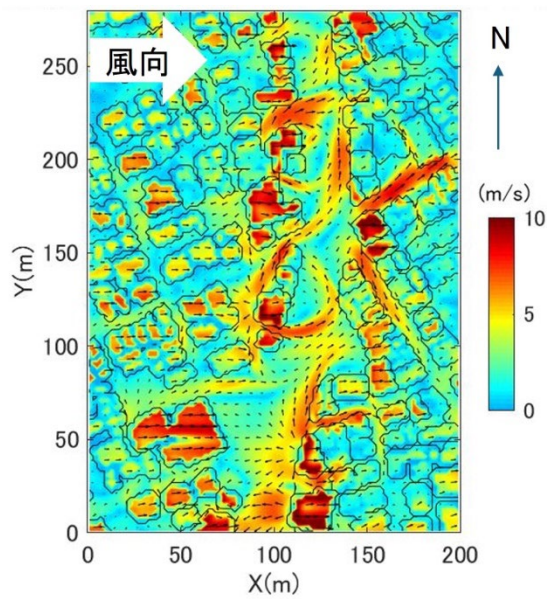


図 180 西風 ($V_{ref} = 12$ m/s) のときの地上および建物屋根上 0.5 m における風速分布および風速の水平成分のベクトル

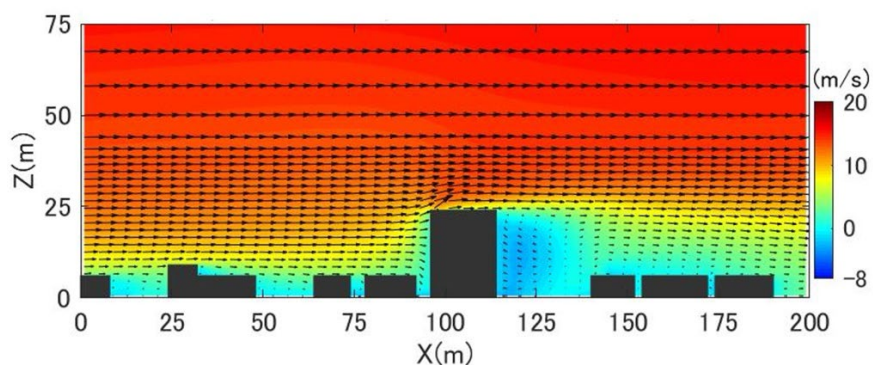


図 181 西風 ($V_{ref}=12$ m/s)のときの東西一鉛直断面内の風速東西成分コンター図。ベクトルは水平、鉛直方向ともに2格子点毎にプロットしてある。

再飛散状況の風速による違いを見るため、図 182 に西風 (図の左から右に吹く) に対する、図 25 の $Y=205$ m の位置 (図 179 の白い鎖線上) における、粒径 $125\mu\text{m}$ の火山灰の空間濃度の東西一鉛直断面内分布を示す。黒いシルエットは建物であり、白い部分では火山灰濃度が 0 である。参照風速 $V_{ref}=6$ m/s、9 m/s、12 m/s に対して示す。これらの風速は、温帯低気圧や季節風など台風以外の気象的原因で生じ得る程度の風である。風速が大きくなるにつれ、再飛散が強まっている。 $V_{ref}=6$ m/s では、 $X=100$ m 付近にある図中で最も高い建物 (高さ 24 m) よりも風上側 (図の左側) に位置する建物の屋根からは再飛散は生じていないが、風速が上がるにつれ次第に低い建物の屋根からの再飛散が起こっている。

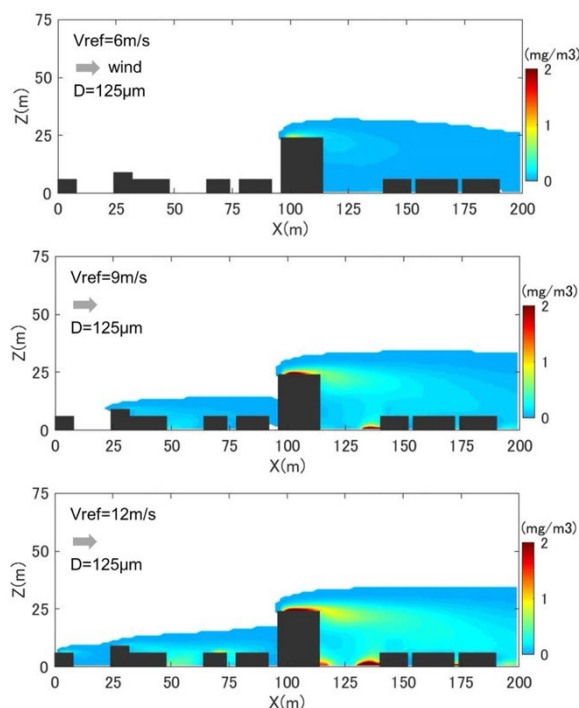


図 182 $V_{ref}=6\text{m/s}$ 、 9m/s 、 12m/s の西風のときの火山灰濃度 (粒径 $125\mu\text{m}$) の東西一鉛直断面内分布

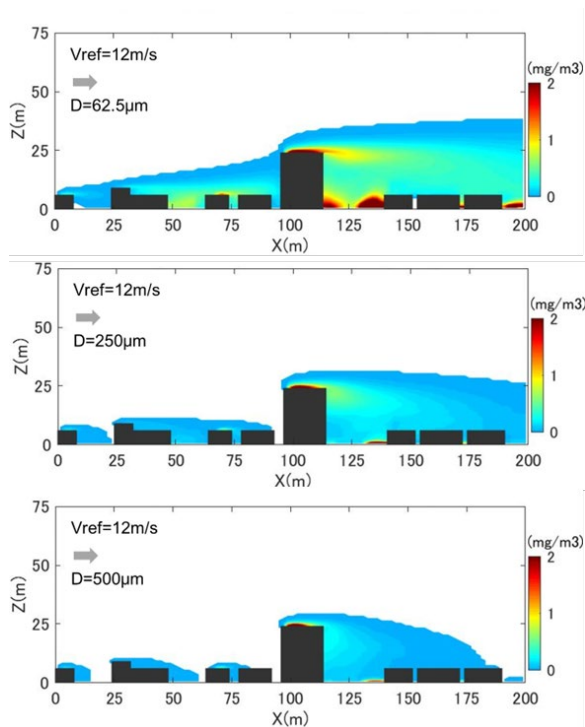
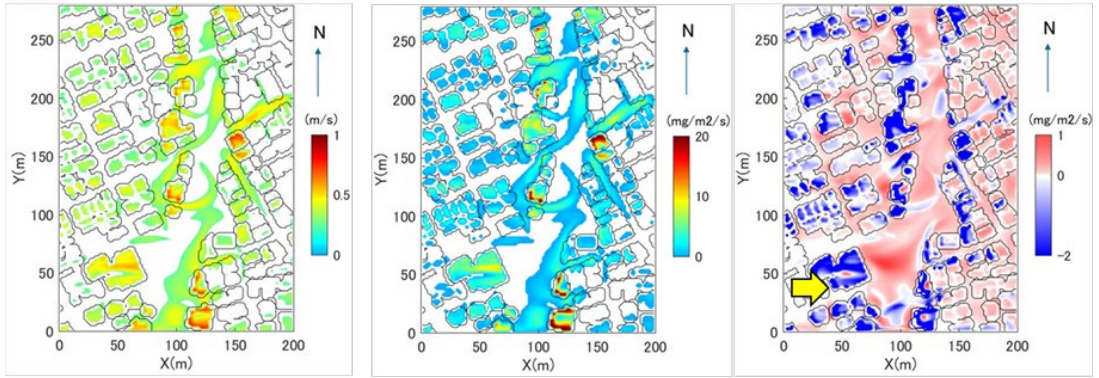


図 183 粒径 62.5、250、500 μm に対する火山灰濃度の東西一鉛直断面内分布。風は $V_{\text{ref}}=12\text{m/s}$ の西風

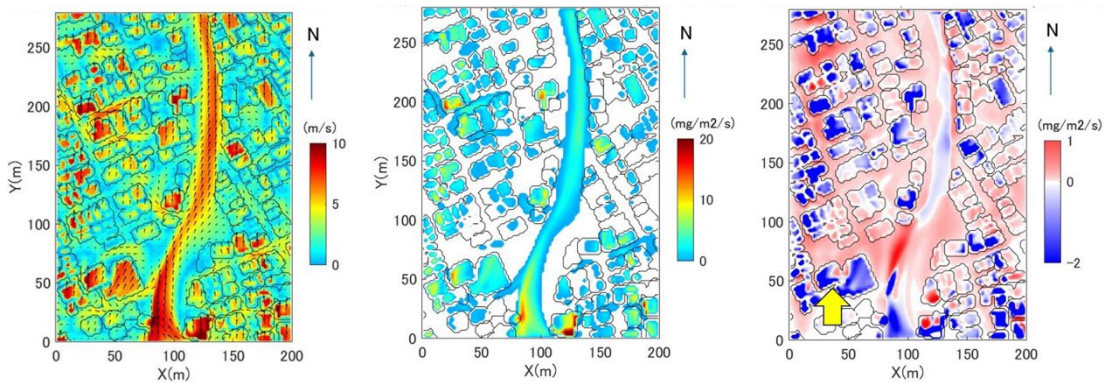
次に粒径による違いを見るために、 $V_{\text{ref}}=12\text{ m/s}$ の西風に対し、図 182 と同じ断面内での粒径 62.5、250、500 $\mu\text{ m}$ の火山灰空間濃度の分布を図 183 に示す（粒径 125 $\mu\text{ m}$ については図 182 の $V_{\text{ref}}=12\text{ m/s}$ を参照）。再飛散した火山灰は風下に流されながら重力沈降するが、重力沈降の速度が小さい粒径の小さい粒子ほど発生源風下の広範囲に飛散し、粒径が大きくなるとその範囲が狭くなるのが明瞭である。いずれの場合も、建物屋根から飛散した火山灰は、風下のより低い建物の屋根や建物間の地面、道路などに沈着する状況がこれらの図から推察される。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をしているといえる。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する。



摩擦速度 u^* (ms^{-1}) 削剥率 E_A ($\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 質量流束 F_{z_ash} ($\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

図 184 西風 $V_{ref}=12\text{m/s}$ 、粒径 $125\mu\text{m}$ に対する地面・屋根上の摩擦速度、削剥率、質量流束（黄色矢印は風向）

再飛散に関連するいくつかの量の平面的な分布状況について見る。図 184 に $V_{ref}=12\text{m/s}$ の西風の場合の、粒径 $125\mu\text{m}$ に対する地面・建物屋根面における摩擦速度 u^* 、削剥率 E_A 、および鉛直方向下向きの火山灰質量流束密度（以下では鉛直質量流束と略記） F_{z_ash} を示す。 F_{z_ash} は $F_{z_ash} = -E_A + CU_3$ で定義され、削剥により火山灰表面から大気へ持ちさらされる質量流束（-削剥率） $-E_A$ (<0) と重力沈降による下向きの質量流束（沈着率） CU_3 (>0) による正味の鉛直質量流束で、負値（青系統の色）は削剥による大気中への火山灰放出が、正值（赤系統の色）は重力落下による沈着の方が、それぞれ卓越していることを表わしている。摩擦速度は、その値が限界摩擦速度 ($u_{*t}=0.25\text{ m/s}$ 、粒径 $125\mu\text{m}$ の場合) 以上の部分がプロットしてあり、削剥率もそれに対応する場所で正の値を持っている。



摩擦速度 u^* (ms^{-1}) 削剥率 E_A ($\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 質量流束 F_{z_ash} ($\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

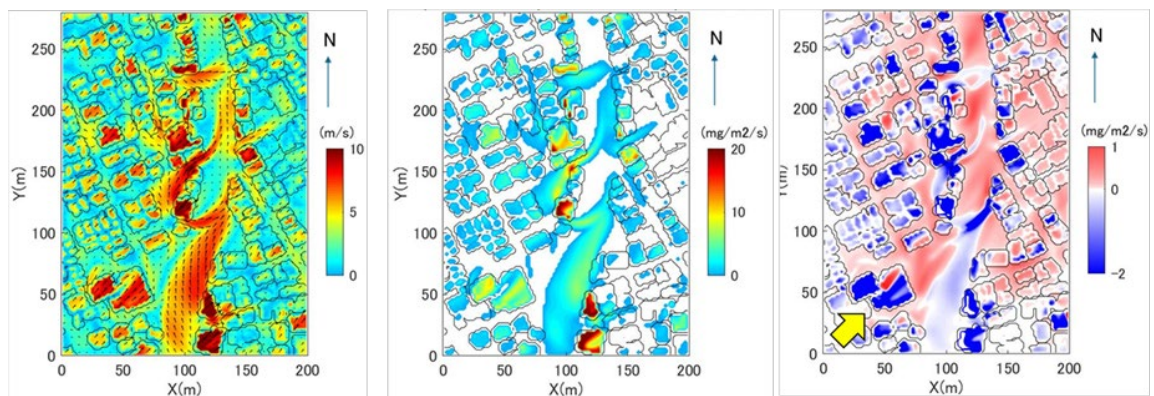
図 185 南風 $V_{ref}=12\text{m/s}$ 、粒径 $125\mu\text{m}$ に対する地面・屋根上の風速、削剥率、質量流束（黄色矢印は風向）

これらの図から、再飛散の多くは建物の屋根から生じていることがわかる。一方、建物と建物の間の路地や高さの低い建物（図 179 参照）の屋根では火山灰の沈着が卓越している。中央を南北に走る幅の広い道路では、多くの場所が道路西端沿いの

建物の風下後流の低風速域に入るため（図 180 参照）正味の沈着となっているが、速度回復が生じている一部の場所（例えば $Y=0\sim 100\text{m}$ の範囲の東寄りの道路面）では削剥が生じている。沈着が卓越するか（赤系統の色）、削剥が卓越するか（青系統の色）は、建物による風速の複雑な分布状況に依存している。

風向が幅広い道路の方向に近くなる南風 ($V_{\text{ref}}=12\text{ m/s}$) について、地面・屋根上 0.5m の高さにおける風速、粒径 $125\mu\text{m}$ に対する削剥率 E_A と鉛直質量流束 F_{z_ash} の分布を図 185 に示す。この風向では、幅広い道路が風の通り道になりそこでの風速が大きい。それに対応して道路上での削剥率も大きくなっている。 F_{z_ash} には負値の部分が多く、幅広い道路は再飛散火山灰の大きな供給源となっていることが現れている。また、再飛散の供給源になっている建物 (F_{z_ash} が負) の数が多い、道路より西側の街区では、そうした供給源となる建物が相対的に少ない道路東側と比べ、風下にあたる北側の路地での沈着が多いことが認められる。

図 185 と同様の図を風向が南西の場合について図 186 に示す。幅広い道路は、領域中央付近で方向が上空から見て 20 度程度左回りにカーブしている。道路上の風速はこの曲線部を挟んで南北で大きく変化している。道路の方向が風向に近い曲線部より南では風速が大きく削剥率が大きい。 F_{z_ash} は曲線部を境に正負が逆転しており、曲線部より南では削剥が卓越、北では沈着が卓越している。北では道路の中央部で沈着率が大きい部分もある。このように、道路の方向の僅かな違いで火山灰の削剥、沈着のいずれが卓越するのかに少なからず違いが出ることが示される。



摩擦速度 u^* (ms^{-1})

削剥率 E_A ($\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

質量流束 F_{z_ash} ($\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

図 186 南西風 $V_{\text{ref}}=12\text{m/s}$ 、粒径 $125\mu\text{m}$ に対する地面・屋根上の風速、削剥率、質量流束（黄色矢印は風向）

まとめ

降灰を伴う火山噴火があれば、噴火継続中はもとより噴火が終息した後でも一度堆積した火山灰の風による再飛散が発生し得る。ここでは、火山に対し遠位領域に位置する都市における火山灰再飛散について、数値計算による基礎的な検討結果を紹介した。ここでの検討は、特定の都市に対する特定の火山の噴火シナリオに沿った検討ではなく、建物の密集する都市における火山灰再飛散の特徴的な面の理解を少しでも得るための、予備的なものである。

数値計算を通じて、都市では建物の屋根や幅の広い道路は再飛散における火山灰の有意な供給源になることがわかった。また、計算結果は建物屋根を起源にして飛散した火山灰は、風下側のより低い建物の屋根や建物間の地面、道路に再沈着することを示している。このことから、高さの異なる建物の多い都市での再飛散は、地面から高い場所に堆積した火山灰を順次低い場所に移動させる過程であるといえる、

ここでの計算では、建物は近似的に直方体で表現されていたが、実際の建物は様々な形があり、住宅の屋根は傾斜しているものが多い。鉄筋コンクリートの建物など、屋根が水平に近いものであっても屋上の周囲には壁状の立ち上がり（パラペット）があるものが殆どであり、それらの影響は今回の計算には含まれていない。火山灰の再飛散は、降灰被害をさらに助長する向きに働く可能性があるため、より実際に近い建物の形を考慮した検討が今後望まれる。

ii) 噴火シナリオを考慮した降灰の時間変化的性状

火山噴火は一般に噴火の勢いの消長を繰り返しながらある程度の長さの期間継続する。ある地点における降灰は、その間の火口からの噴出率や風向風速等の気象条件の時間変化に従って推移する。ここでは、以下に示すように、噴火の時間的経緯、いわゆる噴火のシナリオを考慮した降灰計算を行った。

はじめに

火山から遠隔にある地域では噴火による被害は降灰によるものが主となる。内閣府は、想定される富士山噴火について、関東地方に大量の降灰をもたらした宝永噴火をモデルに降灰シミュレーションを行い、結果を公表している¹⁷⁾。最終的な火山灰堆積深と合わせ、2週間（1707年12月16日～31日）に及んだ噴火活動の消長を反映した堆積深の時間的推移も示されている。火山灰は上空の風で流されるが宝永噴火当時の気象データは存在しないため、例えば東京地方の降灰量が多くなるケースとして、宝永噴火の噴出率（kg/s）の履歴と噴煙柱高度による大気中への火山灰放出率、および、現在の高層気象観測（2010年10月14～28日を採用）からモデル化された西南西風卓越の上空風とを組み合わせた降灰計算が行われている。

しかしながら、火山灰は地上にある建物や道路には、重力落下しながら低高度の風に流される形で風上から流入してくるが、想定¹⁷⁾ではそうした地上付近の風は考慮されていない。一方、図187に一例としてつくばにおける気象庁の風速・風向の高層観測（2019年12月、1日2回）を示すが、高度3～4 kmより上空は風向が西（270°）を中心に西南西～西北西の範囲に集中しているのに対し、それより下層では風向の変動が著しい。日々の天気の変化をもたらす低気圧の通過等に伴う風向変化は、気象学的理由により地上付近で最も顕著になることが現れている。

ここでは、宝永噴火に関する内閣府の計算¹⁷⁾が与える東京における降灰の時間推移に対し、地上付近の風の街区の降灰分布への影響について、数値計算によって考察する。

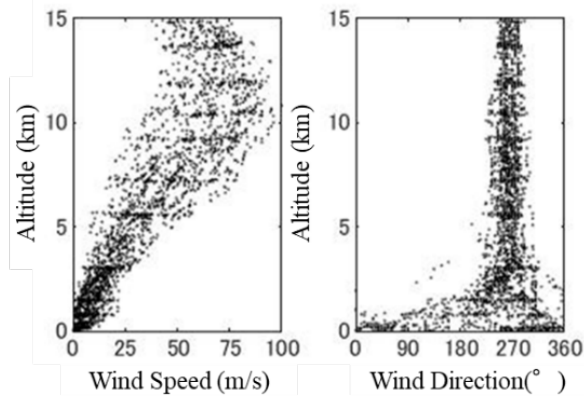


図 187 高層気象観測の例 (2019 年 12 月のつくば上空)

検討の方法

計算領域は低～中層建物が密集する東西 200 m 南北 280 m の範囲の街区で、粗くではあるが個々の建物が再現できる水平分解能 2m の直交直線座標上で格子分割されている。計算領域上端は地上 500 m で、上部および風上に面する側面境界から火山灰が領域内に落下・流入する。境界層内の気流は、非圧縮中立の標準 $k-\epsilon$ モデルで計算された定常気流とし、境界層発達のため上記の計算領域の外側にさらに 2 段階の格子を設けている。火山灰粒子は粒径別に運動方程式と空間濃度の保存式を用いて計算される。建物近傍での粒子慣性力による火山灰流と気流とのずれを考慮するため運動方程式を解いている。これらの計算仕様は筆者らの既往研究¹⁰⁾に示されたものと同様である。

降灰は中央防災会議資料¹⁷⁾の西南西の上空風卓越ケースに対する新宿付近における時間推移を図から読み取ったものを、1 時間当たりの降灰深増加量の時系列として宝永噴火の継続期間と同じ 14 日間分与えた (図 190 ①参照)。粒径 (質量%) はそのケースに現れる $125\mu\text{m}$ (25%)、 $250\mu\text{m}$ (58%)、 $500\mu\text{m}$ (17%) とした。気流計算の参照風には気象庁の東京観測点での 10 分間平均風速、風向の 1 時間毎の観測値を用いた。

降灰の時系列的計算は、あらかじめ 16 の風向、風速 10 段階 (3～12 m/s)、3 つの粒径に対して火山灰の流速および無次元化された空間濃度¹⁰⁾の定常状態の分布を計算しておき、降灰量および風向風速の時刻歴に逐次当てはめることで、領域内の任意点の有次元の降灰関連量の時刻歴を構成した。降灰は、粒径毎に領域上端から終端落下速度で、側面境界から終端落下速度 + 水平風速で流入するとし、空間濃度 (kg/m^3) は時間降灰量 ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$) と終端落下速度 (m/s) とから得られる値とした。

結果

計算は気象データの期間として、① 2010 年 10 月 14 日～27 日、および、② 2013 年 3 月 12 日～25 日の風向・風速を用いた 2 つの場合について行った。図 188 に風向風速の時系列を示す。風向は 1 (北北東) から 16 (北) までの数字で表されている。①は内閣府想定における上空風の期間と同じであり、風は 26 日から 27 日にかけての約半日間を除き弱く、風向は北より (北西 (14)～北東 (2)、括弧内風向番号) が

卓越している。②は南(8)～南南西(9)の強い風の日が含まれる期間として任意的に選んだものである。①には時間降灰量(mm/h)の時系列も記してある。

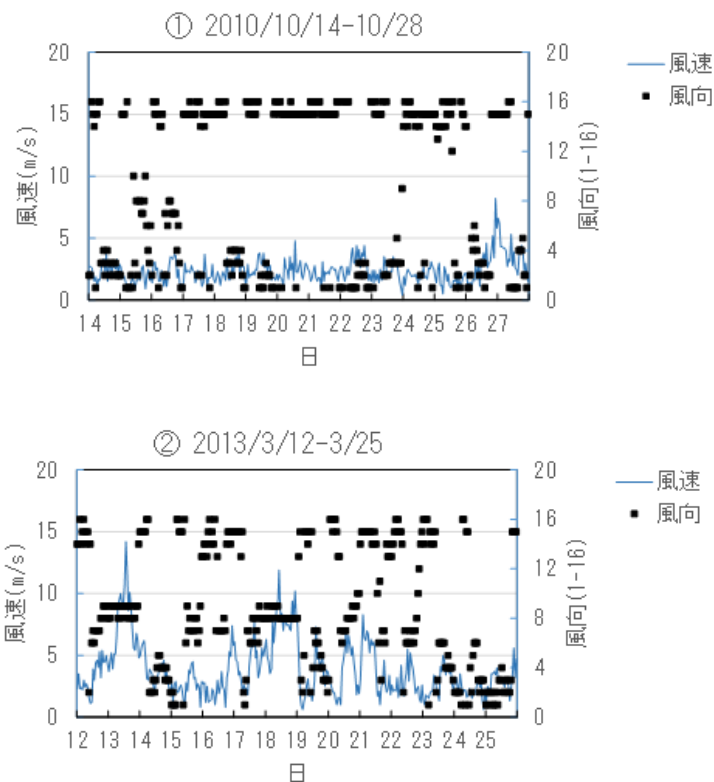


図 188 計算期間内の特別の風向・風速（東京）

図 189 に 3 つの粒径の質量分率を考慮した時系列計算の終状態における地上および建物屋根上の降灰深分布を示す。建物の輪郭が黒細線で表されている。ここでの計算では建物は体積占有率として計算格子に組み入れられている関係で、建物輪郭に沿った白い部分は計算精度が十分に確保できていない箇所である。領域中央を南北に走る幅の広い道路上で、②では降灰深の多い部分が東側に偏っているのははじめ、期間中の卓越風向が深さの分布に反映されている点がいくつか認められる。

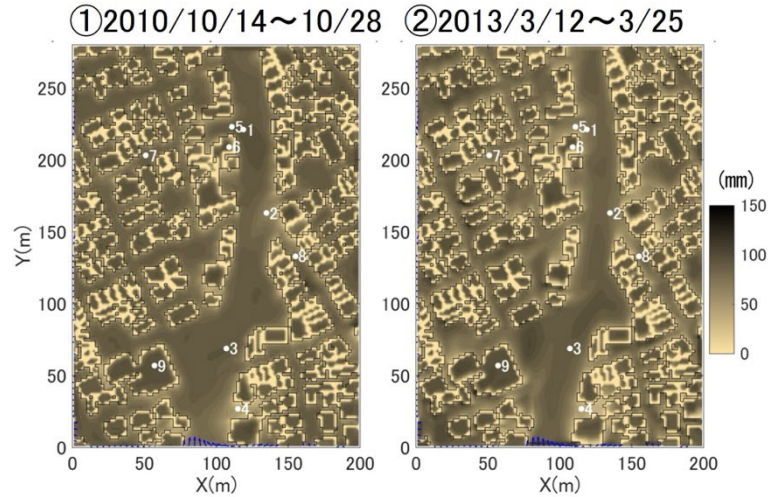


図 189 地面および建物屋根の最終的な降灰深(mm)

図 190 に図 189 に示した参照点(*印)の降灰深の時間変化を示す。宝永噴火では最初の 2 日間の噴火が最も活発で、東京の降灰の半分以上はこの 2 日間の噴出で生じている。噴火は断続的に起こりその度に降灰深が増加している。建物による街区気流の不均一を反映して、選択された参照点の間でも降灰深に最大で 2 倍程度の差がある（番号 3 と 8）。また、北寄りの弱い風が多い期間①と比べ、南寄りの強い風が含まれる期間②では地点間の降灰量の差が大きく、地点間の降灰深の順位も①、②間に入れ替わっている（例えば地点 1、6 など）。

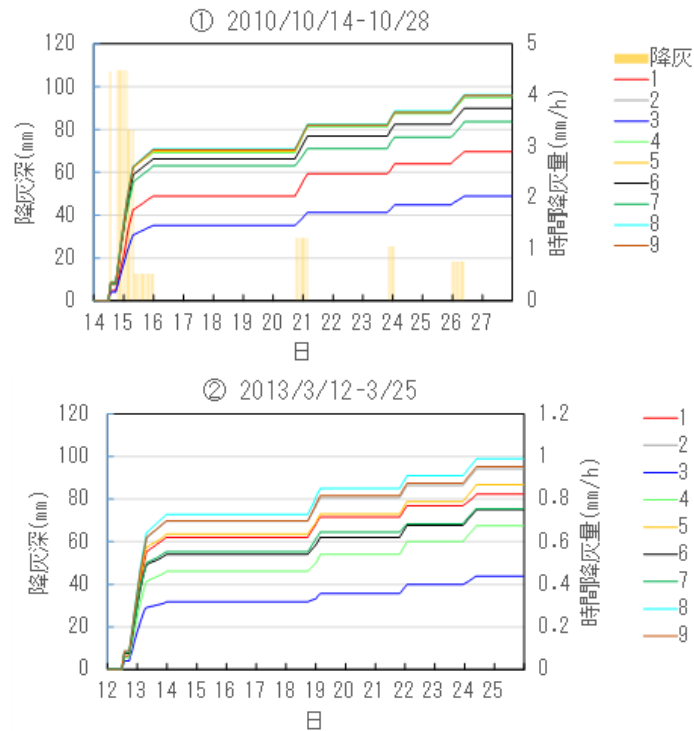


図 190 参照点における降灰深の時間変化
 (①には時間降灰深の時系列も記してある)

まとめ

大気の上層と下層とでは風の状況が大きく異なっていることが多く、建物や道路への降灰は下層の風の影響を強く受けるため、こうした検討を行った。ごく限られたものではあるが、ここでの計算結果は、都市街区のような狭い範囲でも、降灰被害顕在化のタイミングの場所による違いが降灰時の気象状況によって少なからず異なる可能性のあることを示唆している。これらを考慮することが降灰対策の効果や効率を高めるのに役立つと考えられる。

b) 火山灰の堆積による建物屋根への影響

富士山の宝永噴火を想定した降灰シミュレーション¹⁷⁾によると、東京都心（新宿など）を含む首都圏において火山灰の最終堆積厚が約 10 cm を超過している。このため、火山灰の堆積による降灰荷重が建物屋根の安全性に与える影響について検討した。

i) 降灰荷重を用いた建物屋根の被害確率関数

建築基準法施行令において、建物屋根に作用する荷重として積雪荷重は規定されているが、降灰荷重の規定は無い。積雪荷重は、一般の場合（多雪区域ではない場合）、積雪時の組み合わせ荷重は短期に生じる力として規定されている¹⁸⁾。このため、建物屋根に作用する積雪荷重を降灰荷重に置き換えて、降灰荷重に対する建物屋根の被害確率関数を作成し、建物屋根の安全性を評価する。ただし、積雪荷重と降灰荷重は同時には作用しない条件とした。

ii) 建物屋根の被害確率関数

積雪荷重を垂直積雪量が 30、35、40、50 (cm) として設計された建物について、構造種別（木造、RC 造（鉄筋コンクリート造）、S 造（鉄骨造）、S 造折板屋根（鉄骨造で屋根が金属折板のもの、工場、倉庫などの柱間のスパンの大きい事業所の建物に多い））に応じた被害確率関数を作成した（図 191）。火山灰が湿潤状態のとき、構造種別ごとに被害確率関数を以下に示す。なお、湿潤状態の火山灰の単位重量は $166.6 \text{ (N/m}^2/\text{cm)}$ 、堆積深 1 cm あたりの重量、比重にして約 1.7 に相当) に設定した。木造と S 造建物（折板屋根）損傷確率は RC 造建物と S 造建物と比較して高くなっており、火山灰の堆積により建物屋根に損傷が発生する可能性があることがわかる。

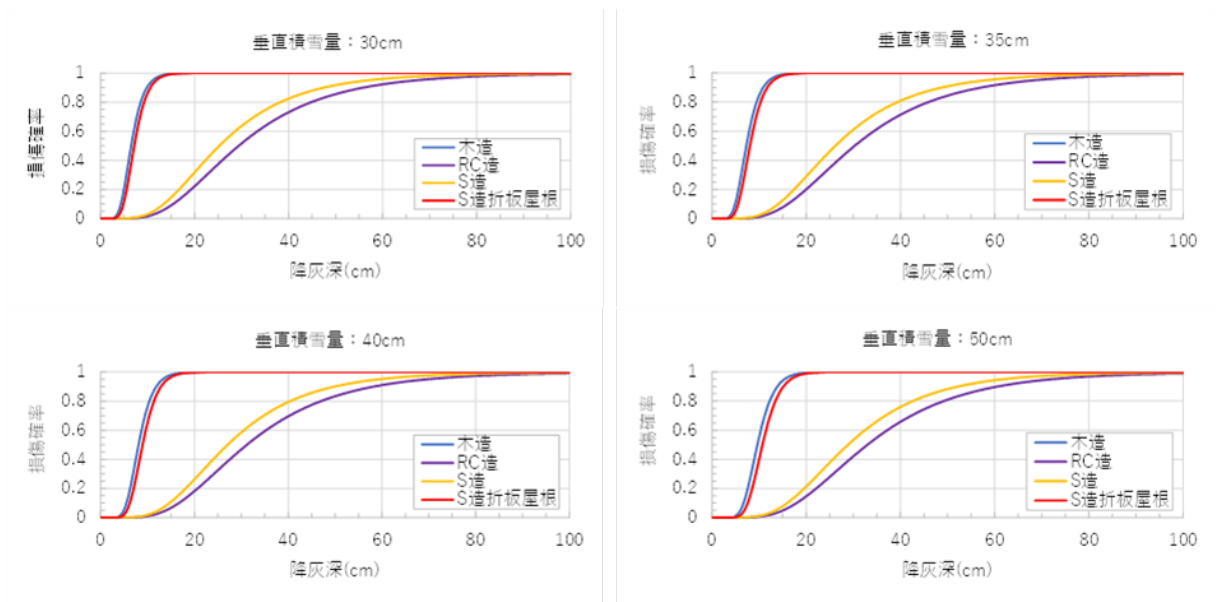


図 191 構造種別による被害確率関数の比較

iii) 富士山噴火による建物屋根の損傷確率の評価例

宝永噴火を模した富士山噴火による降灰シミュレーション¹⁷⁾では、上空の風の状況に応じてケース 1~3 に対して実施されている。ケース 1 は宝永噴火のときと同様の西風が卓越するケース、ケース 2 は東京方面への降灰が多くなる西南西風が卓越するケース、ケース 3 は風向変化が大きいケースである。ここでは、これらのうちケース 1 (西風卓越) と 2 (西南西風卓越) を対象に、建物屋根の損傷確率を評価した (表 3)。

表 23 降灰ケースの設定 ¹⁷⁾

	ケース1	ケース2
規模・噴出率	宝永噴火の規模・噴出率	
継続時間	15日間	
風向	西風卓越	西南西風卓越
	2018年12月16～30日	2010年10月14～28日
降灰分布	神奈川県と千葉県に降灰分布の中心	神奈川県と東京都に降灰分布の中心
ケースの特徴	宝永噴火の実績と類似	10cm以上の降灰範囲の人口・資産が比較的大きい

御殿場市、秦野市、小田原市、横浜市、相模原市、新宿区を対象にしたとき、各ケースの最終の降灰深は図 192 となっている。ケース 1 では御殿場市と秦野市の降灰深が特に大きいですが、ケース 2 では相模原市と新宿区も降灰深が大きくなっている。

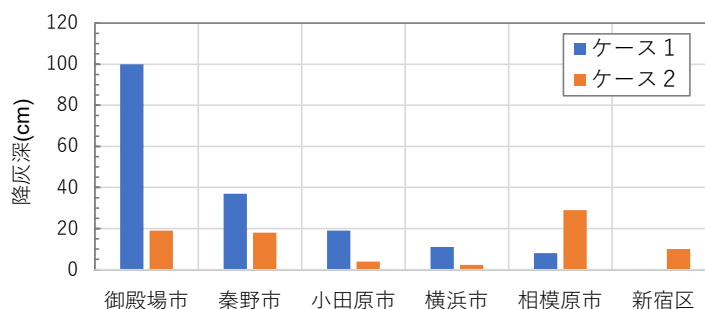


図 192 各ケースの降灰深

各地点を対象に構造種別による被害確率関数を計算し、各ケースを対象に建物屋根の損傷確率を図 193 に示すように評価した。ケース 1 では御殿場市と秦野市における建物屋根の損傷確率が高く、御殿場市では RC 造建物でも損傷確率が約 1.0 となっている。一方、ケース 2 では相模原市における建物屋根の損傷確率が最も高く、新宿区においても木造建物と S 造建物（折板屋根）の損傷確率が高くなっている。

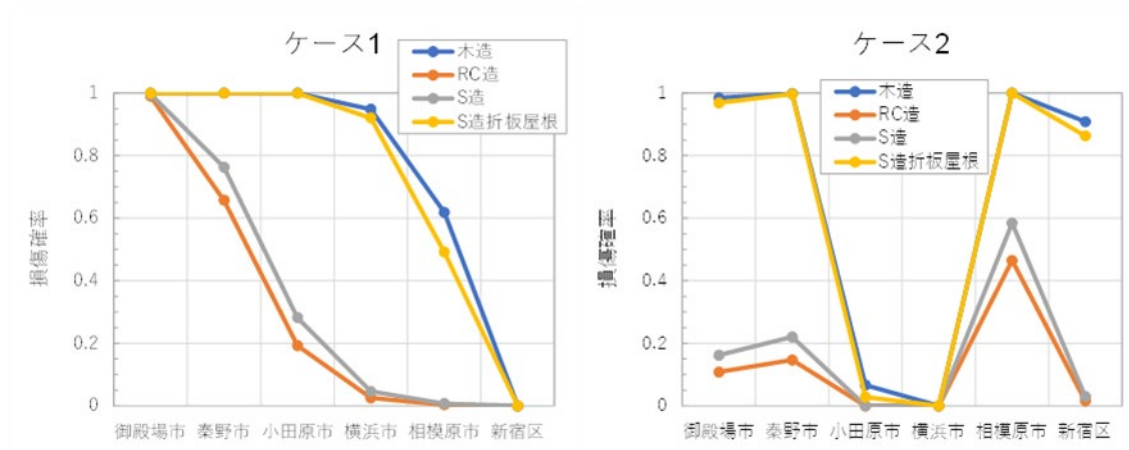


図 193 建物屋根の損傷確率

iv) 降灰荷重による S 造建物の限界降灰深

建築基準法に基づいて設計された、工場などの生産施設に多く見られる S 造折板屋根の 1 階建ての建物について、建物の構造部材（建物を力学的に支える部材、建物を支えるのに関係しない内装材などは構造部材ではない）に対する限界降灰深の検討を行った。ここで、設計クライテリアとして、応力度検定比（許容値は短期許容応力度）、たわみ角検定比（許容たわみ角は 1/300）、たわみ検定比（許容たわみ 6cm）を設定する。降灰荷重が建物に作用したとき、部材（小梁、大梁、柱）に生じる応答値が規定値以下に収まるための限界降灰深¹⁹⁾を評価する。

v) 対象建物

X 方向は 77 m（7 m×11 スパン）、Y 方向は 30 m とする。X 方向の構造形式はブレース構造、Y 方向はラーメン構造とする。屋根種別はシングル折板屋根として屋根伏図を図 194 に、Y 方向 7 通り軸組図を図 195 に示す。構造架構の違いによる降灰深を比較するため、ケース 1 は中柱無し、ケース 2 は中柱有りとする。

応力の組み合わせは、長期に生じる力（常時作用している力で自重も含まれる）と短期に生じる力（積雪時、暴風時、地震時）とする。固定荷重と積載荷重は表 4 とし、積雪荷重、風荷重、地震荷重の条件は表 5 とする。

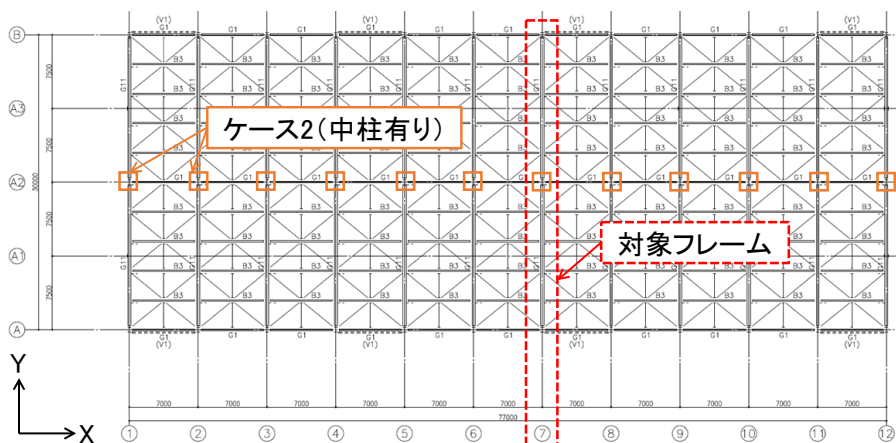


図 194 屋根伏図

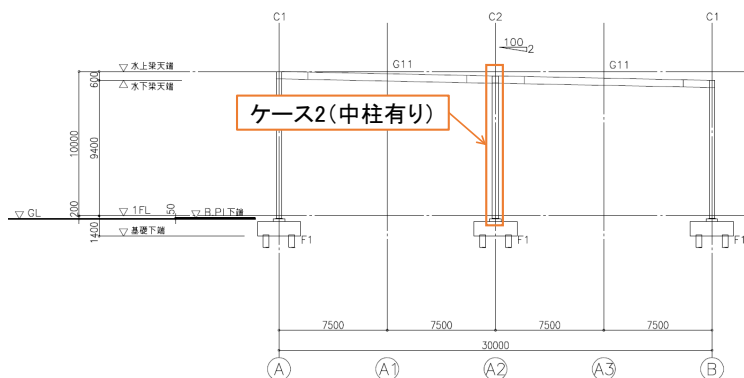


図 195 Y 方向 7 通り軸組図

表 24 解析ケース

	ケース1	ケース2
中柱の有無	無し	有り (A2通り)
Y方向スパン長さ(m)	30.0	15.0
固定荷重(N/m ²)	520.0	410.6
積載荷重(N/m ²)	0	0

表 25 外力荷重の条件

固定荷重	ケース1:520.0N/m ² ケース2:410.6N/m ²
積載荷重	0N/m ²
積雪荷重	垂直積雪量:30cm 積雪の単位荷重:20N/m ² /cm
風荷重	基準風速:34m/s 地表面粗度区分Ⅲ
地震荷重	地震地域係数:1.0 第2種地盤

vi) 限界降灰深の評価結果

限界降灰深の検討は大梁のスパンが長く降灰荷重による影響が大きくなるY方向7通り(図194赤破線枠)フレームを対象に行う。火山灰が乾燥状態と湿潤状態のとき、フレームの限界降灰深を表6に示す。フレームの限界降灰深はケース2が大きくなり、湿潤状態では約11.0cmとなった。また、建物の継続使用を考えると、大梁のスパン長さが長いケース1では降灰荷重によるたわみの影響が重要となる。

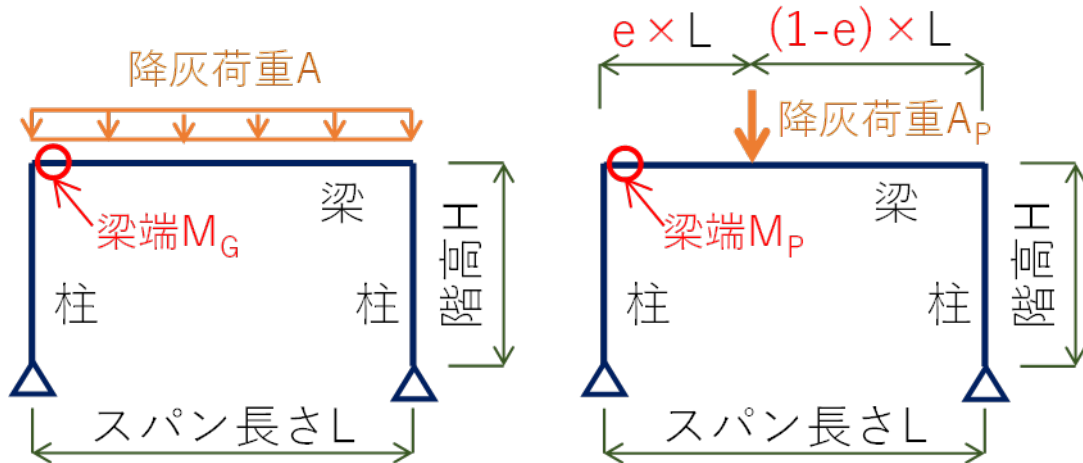
表 26 フレームの限界降灰深(cm)

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

vii) 降灰荷重による建物の限界降灰深の定式化

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の定式化を行った。なお、火山灰の堆積

は均等になるとは限らず、偏在する可能性があるため、梁への荷重条件が厳しくなる状態も考慮し検討しておく必要がある。このため、火山灰の梁への堆積が等分布の場合（図 196a）と、火山灰の梁への堆積が偏在して 1 箇所に集中した場合（図 196b）との 2 ケースを対象に検討した。



(a) 火山灰の堆積が等分布 (b) 火山灰の堆積が 1 箇所に集中

図 196 門型のラーメン構造の梁に作用する降灰荷重

鉛直荷重による梁の損傷を評価するときに、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が損傷の発生時点であると見なすと、梁の限界降灰深を過小に（安全側）に評価し過ぎると考えられる結果が得られた。このため、多雪地域外にあたる関東地方に積雪による建物被害が多く発生した 2014 年の大雪による「建築物の雪害対策についての報告書」²⁰⁾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 ($a > 1$) を考慮に入れることにした。その結果、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 を考慮した値どうしを等しいと置くことにより、梁の限界降灰深の定式化を行うのが適切であるという結論を得た。

c) 空調設備と換気設備の被害確率関数

屋外設置ならびに外気取入のため降灰による影響を受けやすい空調設備（空調室外機、冷却塔）と換気設備（エアフィルタ）を対象に、桜島で採取した後 $250 \mu\text{m}$ のふるいで濾過した粒径 $250 \mu\text{m}$ 以下の火山灰を用いて過年度に行われた降灰実験²²⁻²⁵⁾の結果に見られた、空調室外機、冷却塔、エアフィルタに動作不良が発生した累積降灰深を用いて、累積降灰深と被害確率との経験的な関係を導いた。

累積降灰深に対する被害確率が対数正規分布に従うと仮定し、最尤法を用いて両者の関係を求めた。結果を図 197 に示す。図中には、被害データの対数正規分布への適合性を見るため、降灰実験より求められた被害確率もプロットしてある。累積降灰深と被害確率の関係は、対数正規分布を用いて概ね回帰できているといえる。累積降灰深が約 5cm を超えると、空調室外機、冷却塔ならびにエアフィルタの被害確率は約 1.0

となり、ほぼすべてのこれらの機器には何らかの動作支障が発生する可能性が高いことがわかる。

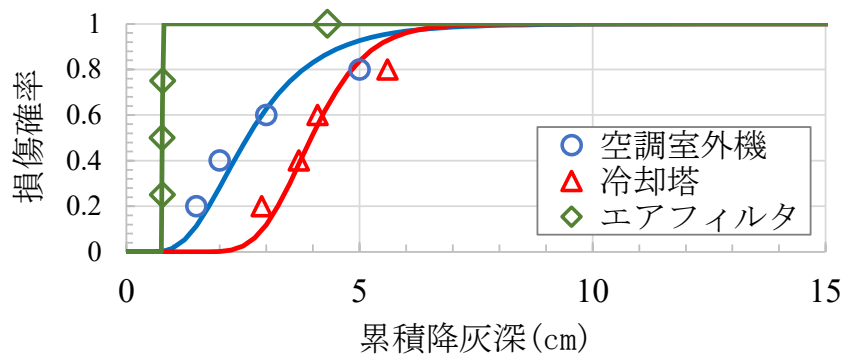


図 197 空調設備と換気設備の累積降灰深と被害確率との関係

d) 病院の機能被害

富士山の大規模噴火では、東京都心部でも 10cm 程度の降灰が想定されており、降灰による都市機能への影響が懸念されている。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本プロジェクト平成 16 年度にヒアリング調査を行ったが、桜島の活動が活発であった 1980 年代と比べると、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ということであった。このような背景を踏まえ、東北地方太平洋沖地震における医療施設被害データ²⁵⁾を用いて、病院の重要要素と病院機能の被害関係を検討した。

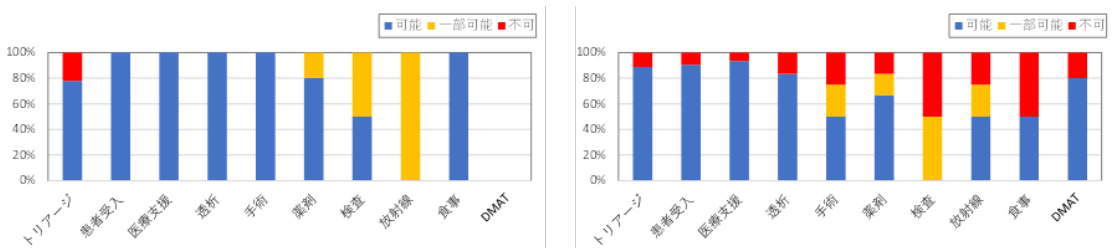
被害を考えるにあたり、病院の有する重要な要素（通常の病院の機能を果たすために重要な因子）を、上水、電気、医療スタッフの通勤、医療提供とする。一方、災害時における病院機能として、災害時医療に着目する。災害時医療の項目として、トリアージ（外来）、患者受入（搬送、他病院からの受入など）、医療支援（避難所、保健所、他病院など）、透析、手術、薬剤、検査、放射線、食事、DMAT からの支援受入とする。一例として、上水の被害と災害時医療との関係、電気の被害と災害時医療との関係を以下に示す。

i) 上水の被害と災害医療の関係

上水の被害と災害時医療の対応関係を、上水の被害無し、被害有りの場合に区別して図 198 に示す。

上水の被害有りの結果を見ると、手術については一部可能と不可の病院を合計すると約 50%となり、上水の被害による影響を大きく受けていること、また、食事も約 50%の病院で不可となり影響を受けていること、などがわかる。ただし、災害時においては非常食による対応等により、食事が全く提供されなかったというわけではない。

透析では、上水の被害有りの場合でも約80%の病院で可能になっている。これは、ヒアリング調査が透析の可否を直接的に質問していないため、問題無し等の回答は可能と判定したためであることが考えられる。また、透析の可否が不明の病院も多数有り、不明の判定法は今後の課題となる。ヒアリング結果を見ると、上水が停止したため、透析が不可になったあるいは控えた等の回答があった。また、水の補給を受けて透析を継続したという回答もあった。従って、透析において上水の供給は必要不可欠と考えるべきである。



(a) 上水の被害無し

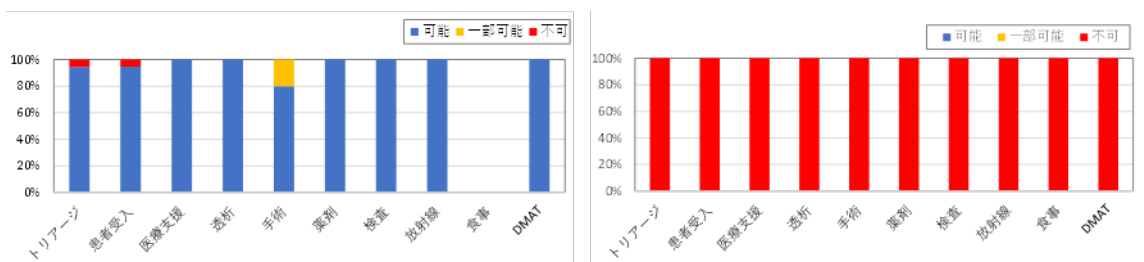
(b) 上水の被害有り

図 198 上水の被害と災害医療の対応関係

ii) 電気の被害と災害医療の関係

電気の被害と災害医療の関係を、電気の被害無し、被害有りの場合に区別して図 199 に示す。

電気の被害有りを見ると、全ての病院において災害時の医療が不可になっている。一方、電気の被害無しの場合では、手術が一部可能となっている病院が有るものの、医療支援、透析、検査、放射線は可能であったことがわかる。



(a) 電気の被害無し

(b) 電気の被害有り

図 199 電気の被害と災害医療の関係

iii) 病院の機能被害のまとめ

東北地方太平洋沖地震における医療施設被害データを用いて、病院機能の被害分析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

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

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

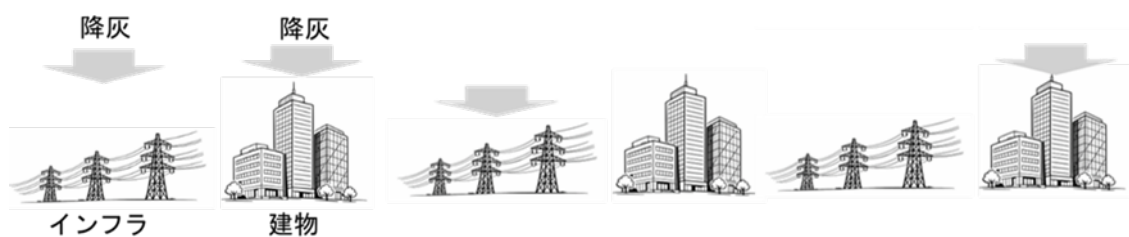
・医療提供は、医療スタッフの通勤の可否により影響を受ける。ただ、各病院では日頃より災害時の体制に備えており、今回の地震災害では病院間の協力、DMAT、自治体、消防、自衛隊等の援助により医療提供を維持し、災害医療を可能な限り継続したと考えられる。

今回の被害分析は地震災害によるものであり、地震の大きな揺れによる建物被害や機器の破損等が病院の機能に影響を与えた。一方、火山災害では降灰が広範囲に及ぶことにより、上下水や電気などのライフラインや交通等への影響が懸念される。さらに、浄水施設への降灰による水質の悪化や、送電システムにおいては火山ガス成分を含む降灰で広範囲に漏電・閃絡が発生して復旧には時間のかかることが予想される。このように、病院の被害形態は地震と火山とでは異なる部分があるものの、病院の被害と病院の機能被害の関係は災害の種類に依らずに共通した部分が多くあるといえる。

e) 建築設備に関する降灰対策の考え方

富士山宝永噴火のような大量の降灰をもたらす災害は、いわば低頻度の大量災害である。そのため、建物耐震化のような常時的な備えを、想定規模の噴火に対して広く都市レベルで行うことは容易でない。ある長さの期間にわたり、消長を繰り返して断続的に続く火山噴火の性格上、その影響は噴火前から噴火最中、終息後にかけて多岐にわたり、様態も多様である¹⁷⁾、²⁶⁾。このことが対応の難しさの要因のひとつになっている。火山灰は雪のように融けて無くならず、雨風で除去されない限り、自然には残り続けることも難しさを助長している。

建物設備は外部のインフラとつながって機能するものが多く、建物とインフラ経路の両方で降灰がある場合、いずれか一方に降灰がある場合などがあり(図200)、降灰に対し建物自身で対策できるものとそうでないものがあることになる。空調や換気設備は、電源、あるいは、開放型冷却塔における水の供給以外は、建物側で対応できる範囲に含まれるが、対策検討では、噴火現象および建物設備のこうした性格を考慮して考えることになる。



a) インフラ・建物両方に降灰 b) 建物の場所は降灰無し c) 建物の場所でのみ降灰

図 200 建物とインフラ

他の災害とも同様であるが、降灰への対策は被害をできるだけ小さく抑え復旧作業の手間の軽減を図ることが基本的な方向性であろう。それに向けた行為は、事前の準備、降灰中の被害軽減・回避の対応、噴火終息後の復旧などの段階からなる。ある長さの期間にわたる継続性という火山噴火の特徴から、対策のための行動も軽重を織り交ぜながら、長期間続く可能性を念頭に置いて行う必要がある。

低頻度の災害である大規模降灰に対し、被害を完全に回避できる対策を行うことは技術的にも費用的にも実際は無理である。優先順位をつけて対応するのが現実的である。建物設備では、建物内や屋外設置の設備機器の内部には火山灰を全く侵入させないのが理想的である。新鮮な火山灰粒子には金属腐食性の火山ガス成分が付着しているため、屋内外の機器や金属配管等も含め、火山灰粒子にはできるだけ接触させない方がよいが、現実には火山灰から完全に遮断するのは不可能であり、そのため、高い重要性や損傷や腐食発生後の復旧の手間が大きいものから優先順位をつけて火山灰から守ることになる。屋外設置で火山灰に暴露される空調関係の室外機や冷却塔などは、降灰中は停止させ、シート等でカバーして機器を保護し、噴火終息後の稼働再開を円滑に行うことが最も望ましい。しかしながら、建物や居室の用途、それらの運用によっては、簡単には停止できないこともある。

空調室外機は、ある程度の降灰までは熱交換フィンに通風が確保されることが実験でも示されており、その範囲では機器内部に火山灰の侵入はあるものの運転を続けることは可能である。但し、内部には気密でないカバーで覆われた状態で設置された回路基盤類があることもあり、火山ガス成分の影響を考えると、そうした機種はできるだけ早期に停止させるのが望ましい。室外機での熱交換不良が進むと、温度調整不良が出てくるが、稼働させ続けると安全制御で停止する。

一方で、火山灰が冷却水に直接接する開放型冷却塔は、前述の実験結果が示すように冷却水の火山灰の混入が深刻な損傷を起こす。完全な復帰のためには、火山灰の混入した冷却水を全て排水した上で、配管や冷却塔本体内の水が通るところの火山灰を全て除去し、火山灰粒子の研磨性で損傷した逆止弁、ポンプの止水シール材等の部品交換の必要も発生し、かなりの手間が予想される。冷却塔の流通品は原則的に清水用にできており、火山灰には対応していない。その上、下水処理施設への影響から火山灰の混入した水を安易に下水に流すこともできない。開放型冷却塔は、降灰中の停止の優先度が高いといえ、シートなどによるカバーでの保護が推奨される機器である。

換気用エアフィルタに多く使用される中性能フィルタは、フィルタ目詰まり実験から、10 mm 未満の降灰でメーカーの交換推奨圧損を越える可能性が高い。目詰まりの進行は換気不足を招くので、この程度の降灰量に達するとフィルタの掃除や交換を行うことが望まれる。ただ、十分な備蓄ができない場合も含めて、様々な理由ですぐには交換できないこともある。フィルタにはその構造上火山灰はろ材の屋外側に付くので、屋内側から軽く叩いたり、圧縮空気ですべて外部に吹き飛ばしたりするのはフィルタ掃除のひとつの方法である。掃除用の道具や交換用フィルタの備蓄は大切である。実験では 50mm 弱の降灰で濾材の固定枠からの一部外れが生じたが、機械換気を行っている状態でフィルタが破損すると、火山灰が急激に室内に流れ込むことになる。そのため、フィルタの交換ができない場合は、換気不足による空気質悪化もあり、この程度

の降灰量に達する前に、重要な機器を布かけなどで火山灰がかからないようにし、人は建物外に出るなど、機械換気を停止してもよいような建物の運用にしておくことが必要である。停電時に用いる非常用発電機には、火山灰が侵入すると航空機のエンジンと同様発電タービン内で火山灰が融解し、機器を著しく損傷させるため、降灰中の使用では頻繁なエアフィルタの交換が必要となり、相応の備蓄が要る。米国地質調査所は、交換頻度が30分毎程度になる可能性を示している⁵⁾。

屋内に火山灰が侵入すると、建物用途に応じて中に置かれている様々な機器類にも火山灰が触れることになる。影響を受ける程度は機器の種類によって様々であるが、火山灰に触れることがよい方向に働くものは何もない。呼吸器や目をはじめとする人体への作用もあり、火山灰侵入はできるだけ抑えるほうよい。因みに、パソコンに火山灰を掛けて動作を調査した研究があるが、デスクトップ型と比べ、隙間の少ないノート型の方が、耐性が高いとしている²⁷⁾。

屋内や屋外設置機器内部への火山灰侵入の抑制は、火山灰除去作業における難点とも関係している。腐食性、研磨性のある火山灰は下水配管には極力流さないことが望まれる。配管内での堆積による狭窄・閉塞や、処理施設の設備破損に繋がるからである。一般の野外の排水溝には、道路上の火山灰が雨などで流れ込むのは避けられないが、建物や敷地内の排水用開口には蓋をするなどの火山灰侵入抑制の努力が必要である。屋内や機器内部の火山灰除去では掃除機で吸い取ったり、箒、刷毛で掃いたりするなどして水は極力使わず、公的な処分が利用可能になるまで、回収した火山灰は建物や敷地内に設けたスペースに仮置きしておく。降灰への対策検討は、復旧や処分、処分の流れの下流側の事情を意識して行われることが重要である。

本報告書でたびたび降灰の深さに関する言及があったが、建物側での対応では、それは建物の場所での深さになる。実際の噴火の際は、報道などで降灰量の実況やその後の予想に関する情報を得ることができるが、市街地では建物の影響で場所による降灰の強弱がある。建物の屋上や出入口近くや敷地内の適当な個所で、定規などを用いて測ると建物の場所での火山灰の深さの目安が得られる。停電が起これると、多くの場合機器が停止し、あわせて外気取入れに伴う機器への火山灰侵入も止まるが、それとは別に報道からの情報が取れなくなる可能性もある。実際的な基本的状況把握としてこうした計測は有用である。

空調機器をやむを得ず停止できない場合でも、給気口へのフード状の簡易的なカバーの設置で火山灰吸引量の減少に幾分かの効果は期待できる。屋上などの設備スペースで機器の上にグレーチング床等があれば、シートや板を敷くなども同様な効果をもつといえる。これらは、少しでも降灰による影響を受けることを遅らせ、機器への吸引量を減らし除去の手間を軽くすることになる。

f) 結論

降灰被害予測コンテンツの社会実装に関し、以下の結論を得た。

火山灰再飛散は火山噴火による降灰の後発現象として、社会に対し長期にわたり影響を与え続ける可能性がある。今年度は再飛散における大気への火山灰供給率の定式化に新たな経験式を導入した再飛散の数値計算により、建物の屋根が有効な火山灰供

給源になること、再飛散現象が建物間の地面、道路や高い建物の風下に位置するより低い建物の屋根への堆積量を増やす働きのあることが示された。

火山噴火は、一般に、活動の度合いの消長を繰り返しながらある期間持続するが、ある地点における降灰量の時間的推移はその間の風の状況の変化の影響を受ける。ここでは、宝永噴火を模擬した降灰シミュレーションから示される東京（新宿）における降灰量の時系列を例に、都市街区における降灰量の時間推移の計算を粒度分布も考慮して行った。その結果、都市街区という狭い範囲内でも、気象条件により降灰量に最大で2倍程度の差が出ることを示された。これは、降灰による被害が顕在化するタイミングが街区という狭い範囲の中でも場所によって大な違いが出ることを示唆している。

建物屋根への降灰荷重による建物の損傷について、4つの建物構造について、設計の時に考慮された雪荷重の違いによる降灰深—損傷率の関係を確認した。木造や鉄骨折板屋根構造の建物が損傷を受ける度合いの、鉄筋コンクリート造、鉄骨造のそれとの違いを量的に明らかにした。

建物空調、換気設備について、降灰深と動作の支障の度合いについて、降灰荷重と建物損傷と同様の関係式を導いた。過年度に行われた実験から得られた、降灰量と空調・換気設備の動作支障との関係に照らし、導出された関係式が適切であることが示された。

災害時の重要施設の降灰被害について、病院の機能について、改めてその特徴を整理した。その結果、災害時の医療の機能維持に必要な要件は、地震などの他の災害にこけるものとむしろ共通点が多いことが示された。

さらに、空調設備についてであるが、降灰に対する対策行動の考え方についてまとめた。対策を考えるにあたっては、復旧時の手間の大きいものを優先して火山灰から遮断することや、時間順的に後回しにできるものなどの仕分けを適切行うことの重要性を示した。

3) 避難・救助支援コンテンツの社会実装

a) 十勝岳を対象とした登山者動向把握実験と結果の利活用

i) 概要

これまで富士山、那須岳、御嶽山で実施してきた登山者動向把握実験（Miyagi et al., 2023）²⁸⁾を、北海道にある十勝岳で実施した。十勝岳は北海道中央部に位置する標高 2,077 メートルの活火山で、有史以来活発な火山活動を続けている。記録が残る 20 世紀以降でもとりわけ 1926 年、1962 年、1988-89 年にマグマの噴出を伴う規模の大きな噴火が、他にも小規模な噴火が多数発生している。十勝岳は多くの登山者・観光客が訪れる観光地でもあり、毎年夏（6～10 月）には 2 万人以上の、冬にもバックカントリーを目的とした多くの登山客が訪れる。十勝岳は 1926 年の大正泥流により上富良野町と美瑛町で多くの住民が亡くなった歴史があり、これまで主に融雪型火山泥流による被害を想定した火山防災対策を進めて来た。一方で、年間 2 万人以上の登山者が訪れるにも拘わらず、登山者を想定した火山防災の取り組みは十分に行われていない。そこで、避難・救助支援コンテンツの基礎データ収集及び登山者のリスク評価を目的として、十勝岳を対象とした登山者の動向把握実験及び避難行動モニタリング（十勝岳チャレンジ 2025、図 201）を実施した。本実験を通して登山者の動向や避難行動パターンを把握することで、十勝岳における登山者を想定した火山防災上の課題が明確になり、地元自治体と結果を共有することで事前防災に役立つことが見込まれる。



図 201 十勝岳チャレンジ 2025 の告知用ポスター

ii) 手法

本実験は 2025 年（令和 7 年）7 月 26 日（土）に上富良野町役場、美瑛町役場、十勝岳ジオパーク推進協議会の協力の下実施された。調査範囲は十勝岳望岳台登山口と十勝岳温泉登山口からそれぞれ十勝岳頂上までの登山道（図 202）で、あらかじめ実験への協力をお願いした 45 名の登山者に GPS 計測アプリをインストールしたスマートフォン（図 203）を各登山口で配布し、それを持って登山してもらった。使用した GPS 計測アプリ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 204）。また、実験中参加者には仮想の噴火を想定した連絡（エリアメールを模した連絡、図 205）を各自のスマートフォンで受信してもらい、参加者は各自それに応じた避難行動をとり、その避難行動をモニタリングした。



図 202 調査範囲（望岳台登山口～十勝岳山頂、十勝岳温泉登山口～十勝岳山頂）



図 203 実験に使用した、GPS 計測アプリをインストールしたスマートフォンとケース

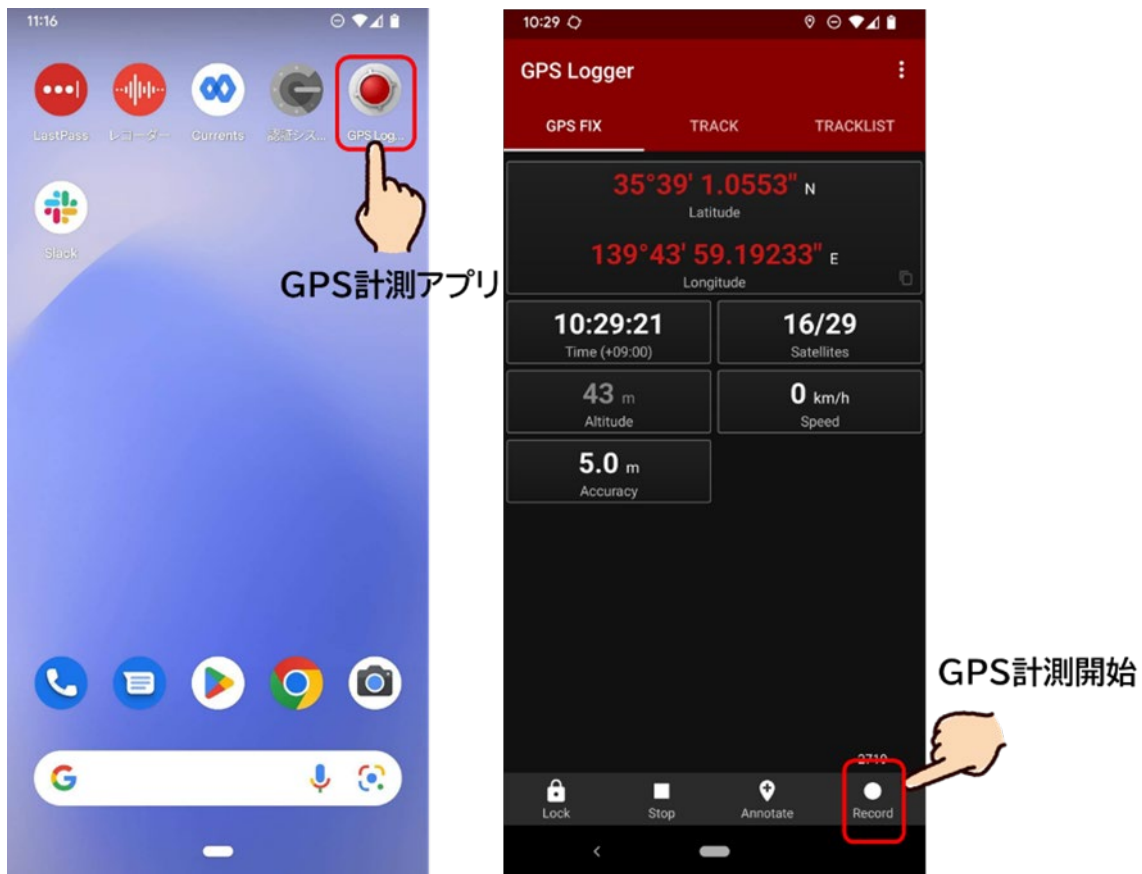


図 204 スマートフォンにインストールされた GPS 計測アプリ

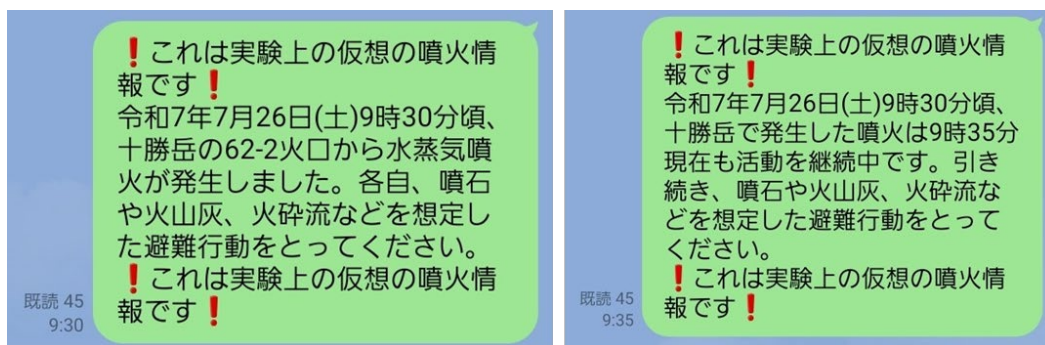


図 205 実験中参加者にエリアメールを模して発信した仮想の噴火情報。予め LINE グループに参加してもらい、それを利用して情報を発信した。

iii) 結果

本実験は 45 台のスマートフォンを配布し（望岳台登山口で 24 台、十勝岳温泉登山口で 21 台）、登山者データを取得した（図 206）。取得した登山者データから、登山者の登山パターンや移動速度、登山者の分布と時間推移等が明らかになった（富島他、2025）²⁹⁾。また、仮想の噴火を想定した避難行動モニタリングでは、各登山者の避難行動と要した時間が明らかになった（図 207）。実際にとられた避難行動例として以下が挙げられる（図 208-図 210）。

- 近くに山小屋がある登山者は山小屋に避難し常設ヘルメットを着用した。
- 周辺に大きな岩を探し岩陰に隠れるか身を寄せるなどした。
- 急いで下山した。
- ザックで頭を保護した。
- フードとタオルで顔を覆った。

本実験の結果浮き彫りになった十勝岳における登山者を想定した火山防災上の課題として以下が挙げられる。

- 登山道に隠れる場所が少ない。
- 登山口、山頂との距離感、火口の方向が分からずどちらに逃げれば良いか分からない。
- スマートフォンの電波が入らないエリアがある。
- 登山者に情報を伝達するための放送設備が望岳台登山口に一箇所しかない。

これら課題解決に向けて、登山者がいる想定 of 防災訓練を実施するなど周知啓発を続ける、シェルター、指示看板、放送設備等の設置を検討する、などが挙げられ、これらは地元自治体に提言された。

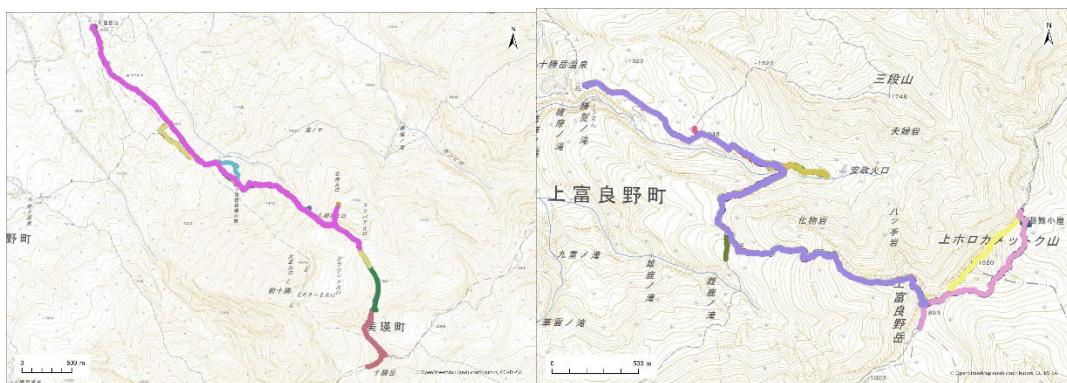


図 206 登山者 45 人の登山履歴（左図は望岳台登山口ルート、右図は十勝岳温泉登山口ルート）

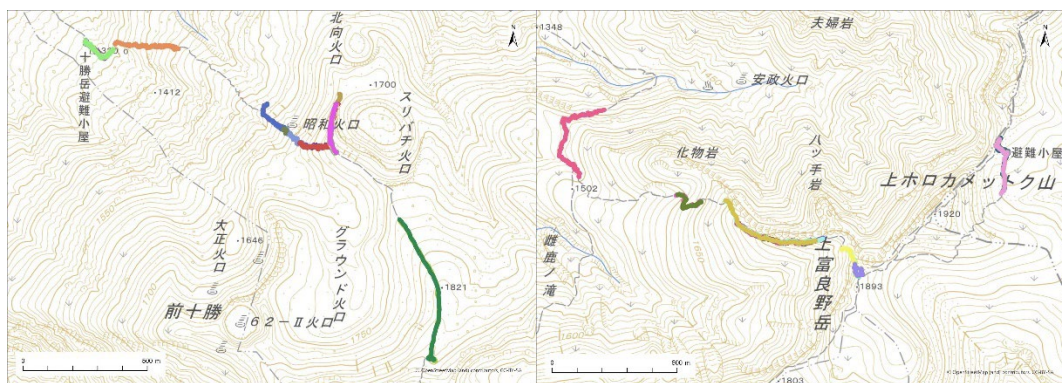


図 207 登山者による避難行動モニタリングの結果（左：望岳台登山ルート、右：十勝岳温泉登山ルート）



図 208 避難行動中の登山者の様子。山小屋に避難する登山者。

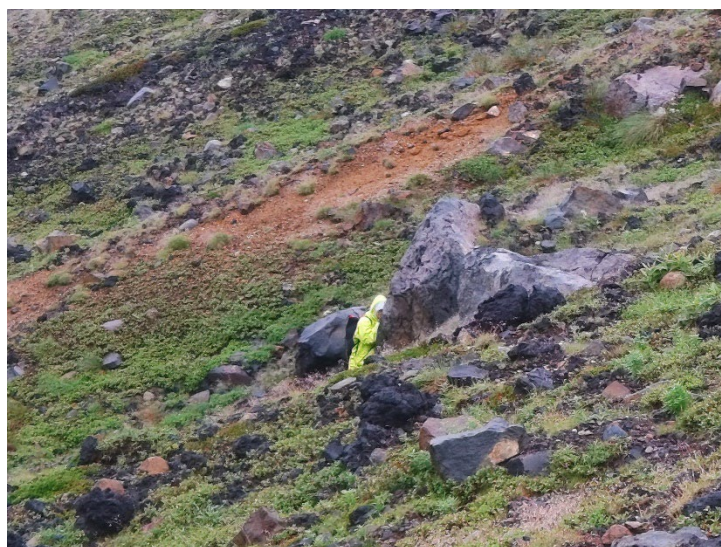


図 209 避難行動中の登山者の様子。近くの岩を探し岩陰に隠れる登山者。



図 210 避難行動中の登山者の様子。周辺に隠れる場所がなくその場に留まりザックで頭を保護する登山者。

b) 御嶽山で取得された登山者データを利用した登山者避難シミュレーション

これまで御嶽山では、2022～2024年にかけてビーコンやGPSロガーを用いた登山者動向把握実験を行い、登山者データを取得してきた。取得した登山者データから、登山者の登山パターンや避難行動、それに要する時間などを明らかにした。しかし、これらはいくまでも限られた条件下でのデータであり、様々な条件下での登山者の行動パターンを把握することは難しかった。そこで登山者が避難する際の課題や避難におけるボトルネックを明らかにすることを目的として、これまで御嶽山で取得された登山者データを利用した避難シミュレーションを行い登山者の避難行動を再現した。

ここでは避難シミュレーションにおける行動モデルとしてマルチエージェントモデル（実空間を2次元連続の仮想空間に置き換え、計算上の行動単位であるエージェント同士の相互作用を考慮するモデル）を採用した（南・他、2002）³⁰⁾（図211）。本研究では各エージェント（各登山者）に対して過年度までに得られた登山者データから初期位置、歩行速度等をインプットし、その他様々な条件（登山者数、避難経路、中継地点、怪我人の有無など）と目的地を与えてシミュレーションを実行した。対象領域は御嶽山の2登山道（黒沢口登山道（三ノ池トラバースルート含む）、王滝口登山道）とし、エージェント数の上限は3000とした。シミュレーションの結果、噴火直後から剣ヶ峰周辺のシェルターや山小屋への避難に要する時間や、怪我人がいた場合に避難する登山客が滞留する状況などが明らかになった（図212）。避難シミュレーションの結果は御嶽山火山防災協議会と共有し、避難計画改訂にあたっての検討（例えば、避難経路や避難施設の設置に関する検討）や登山者を想定した防災訓練を行う際に参考になることが見込まれる。

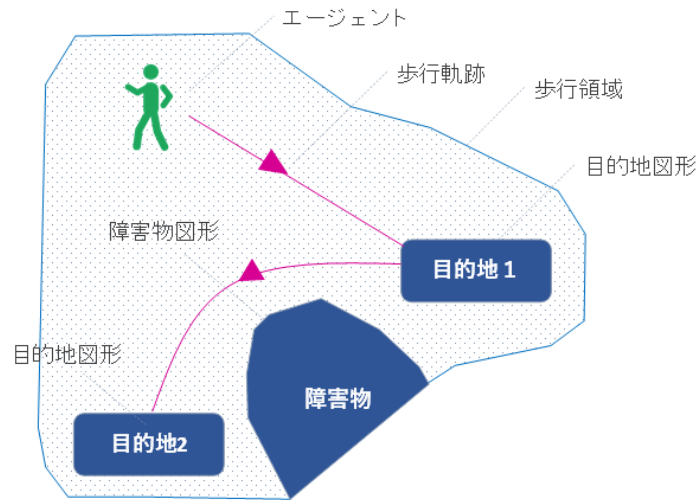


図 211 マルチエージェントモデルを採用した登山者シミュレーション概念図

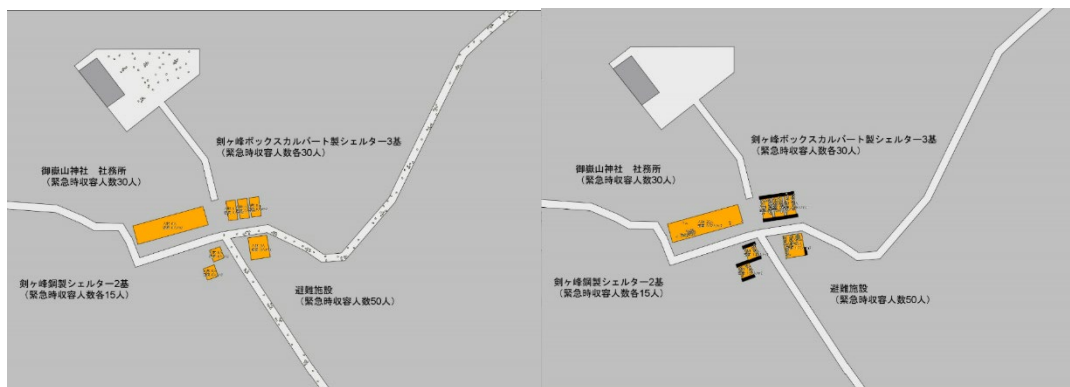


図 212 避難シミュレーションの結果の一部。剣ヶ峰周辺の登山者の初期配置（左）とシェルターが定員を超えた状態（右）を示す。

c) 退避施設の耐衝撃対策

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った。実験環境は研究協力者の室蘭工業大学に環境を整備するための施設があることから、前年度に下見を行った施設を利用して整備した。今後砂や厚く堆積させた軽石などによる対策研究のため、これまで実験で使用してきた横型の射出機構^{31,32)}から縦型に変更する必要がある。このため、縦型に射出するための機構を構築した。図 213、図 214 に構築した実験環境を示す。これにより、今後縦型による耐衝撃性を評価する実験を行うことができる。なお、射出速度の向上については今後検証が必要となっている。



図 213 縦型射出装置

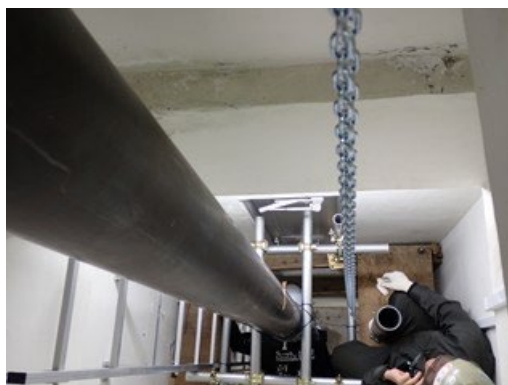


図 214 ホーニング管部分(左：上部、右：下部)

4) 情報ツール利活用方策の検討

a) 利活用に資する要件の具体化

利活用に資する要件を具体化するために、火山噴火が、ライフライン機能に与える影響について、またポータルサイトの利活用しやすさについて、論文の動向を補足するために、2023年以降のレビューを行った。

まず、「火山噴火 ライフライン」および「噴火 ライフライン」、「降灰 ライフライン」のキーワードでCiNiiの論文を検索したが、いずれも該当論文は見出されなかった。そこで、電力、ガス、通信ならびに道路交通ごとに検索した。

i) 電力に関する先行研究

電力については、「電力 火山」が31件、「電力 噴火」が10件、「電力 降灰」が2件となった。このうち、「電力 噴火」の10件中9件が、また、「電力 降灰」は2件とも「電力 火山」と重複していた。重複していない32件について、内容の確認を行った。その結果、著者の所属先に電力が入っており、基礎的な火山学に関する論文が大半を占め、直接的な電力への影響に言及した論文は少なかった。

本D3プロジェクトに関連するものとして、火山ハザードに関する自動描画テフラ分布図の作図とテフラハザード評価に関する論文（中田・他、2025；上澤・他、2024）^{33,34)}や福岡岡ノ場噴火後の漂流降灰シミュレーションらがあった。

上澤・他³⁴⁾は、降下テフラによる影響を評価するためには層厚だけでなく、粒径情報も重要な指標であると指摘している。この粒径情報は、通信事業者から自社設備への影響評価をするには重要であるとしていた。このことを考え合わせると、具体的な影響を分析する上で、予測とその結果の提供を検討する必要があるだろう。

また石毛・諏訪(2024)³⁵⁾は、福徳岡ノ場での爆発的噴火に伴う漂流軽石を受け、漂流軽石は船舶の航行障害のみならず、発電・工業設備の取水障害にもなりうることを指摘している。

ii) ガスに関する先行研究

ガスについては、「火山 都市ガス」、「噴火 都市ガス」ならびに「降灰 都市ガス」で2023年以降を検索したが、該当論文は見出されなかった。そこで、対象をガス全体に拡大したところ、「火山 ガス」では96件が、また「噴火 ガス」では32件、「降灰 ガス」では2件が抽出された。なお、「噴火 ガス」の32件のうち30件が「火山 ガス」と重複し、重複しなかったのは2件だった。また「降灰 ガス」は2件とも「火山 ガス」と重複していた。

「火山 ガス」の96件および「噴火 ガス」の重複していない2件について、内容を検討した。大半が、火山ガスの観測や分析、火山ガス組成など地球化学やマagma学の基礎的な研究領域に属する研究であった。

それらの中で、都市ガスへの影響ではないが、火山ガスが健康に与える影響についての論文が2件見出された。ライフライン企業等では作業員が火山灰や火山ガス等による健康被害を受けないような対策を講じることが課題のひとつとなってい

る。そこで、石峯(2025)³⁶⁾の論文から、いささか長文とはなるが対策を講じるうえで関連する箇所を引用しておきたい。

火山ガスについては、「高温の場合は水蒸気を主成分とすることが多いが、二酸化炭素や二酸化硫黄、塩化水素、硫化水素等の人体に有毒な成分も相当量、含まれる。フッ化水素やラドンが検出されることもあるが、一般的には濃度はあまり高くない」とする。このうち二酸化硫黄は、呼吸困難を引き起こす可能性があり、「健康な人でも5 ppmを超えると目や鼻、のど等の粘膜に刺激を感じたり、呼吸のしにくさを自覚したりする。40 ppmを超えると吐き気や嘔吐、胃痛ならびに気道や肺の損傷を引き起こす場合がある。100 ppmを超えると意識を失ったり、死亡したりする」危険性を指摘している。対策としては、「危険地域から立ち退くのが原則であり、移動時には濡れた布で口や鼻を覆うこと」を推奨する。

火山ガスのうち硫化水素は、致死率が高い危険な有毒ガスで、「500 ppm以上で呼吸麻痺や死亡事例が生じ、800 ppm以上では一呼吸でほぼ即死すると言われて」おり、「低濃度でも頭痛や吐き気、目への刺激等の症状等が出る」危険性を指摘しており、さらに、「卵の腐ったような独特の臭いがあると言われるが、高濃度では嗅覚が麻痺して臭いを感じなくなるため、『臭いがしないから大丈夫』と判断するのは危険」だとしている。

二酸化炭素については「大気中にも400 ppm程度は含まれているが、50,000 ppm (5 vol. %)を超えると呼吸が苦しくなり、頭痛や発汗等の症状が表れる」が、活火山、とくに火口周辺では「高濃度で観測されることが多い。10 vol. %以上で意識喪失、25 vol. %以上では痙攣を起こし、数回の呼吸で意識を失い死に至る。無色無臭で空気より重く、低地に溜まりやすい」とする。

他方、火山灰の健康被害については、「呼吸器疾患等の急性増悪は増えるものの、慢性的な影響はあまり大きくはないと一般的に考えられている」ことを紹介している。そのうえで、火山灰への曝露で影響を受けやすいのとして、呼吸器、目ならびに皮膚をあげている。なかでも、「呼吸によって空気と一緒に火山灰を吸い込むと、PM 2.5に分類される $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子が肺の抹消部にまで侵入する可能性」をあげ、「喘息や気管支炎、COPD（慢性閉塞性肺疾患）等の呼吸器疾患や心臓疾患の症状を悪化させると考えられている」こと、「火山灰には鋭利な表面形状をしたガラス状の粒子が多く含まれるため、火山灰が目に入ると角膜を傷つける可能性がある。充血や痛み、かゆみを引き起こすことがあり、目やにや涙が増える場合もある。状況を悪化させないよう、火山灰が目に入った場合は手で擦らずに水で洗い流す」といった対策が必要であるとしている。皮膚にも痛みやかゆみが生じるが、「火山灰表面に付着している火山ガス成分の酸性度が高い場合に症状が出やすいと言われている。長時間、皮膚を火山灰にさらすことで極度に乾燥し、肌荒れを引き起こす場合もある」ことも指摘しており、対策策定の上で参考となろう。

また、小山(2023)³⁷⁾によれば、2000年三宅島火山噴火時には、復旧要員は「① $\text{SO}_2 \leq 2$ ppm, ② $\text{H}_2\text{S} \leq 10$ ppm, ③ 2種類のガスよりI値(= SO_2 平均曝露濃度/2 + H_2S 平均曝露濃度/10)を算出し、I値<1、また測定値にかかわらず④刺激臭や強い臭気がない、以上の4条件のうち1つでも満たさなければ、防毒マスク

(亜硫酸、硫黄用の吸着缶を装着)あるいは空気呼吸器を装着し退避基準とした」とある。このような対策もあり、「火山ガス被ばくに関連した呼吸器・循環器疾患の増悪例は特になかった」としている。

iii) 通信に関する先行研究

通信機能について検索をした結果は、「火山 通信」が 20 件、「噴火 通信」が 7 件それぞれ抽出され、「降灰 通信」では該当論文はなかった。このうち、「火山通信」と「噴火 通信」とでは 6 件が重複していた。重複せず「噴火 通信」にのみ該当した論文では、国際的なジオパーク間連携に情報通信システムの活用が貢献していることを指摘した箇所情報「通信」システムに触れられているものだった。残りの 20 件のうち、著者の所属先に「通信」がつくもの、「衛星通信」や「モバイル通信」、「パソコン通信」などの記述があるものが 19 件を占めた。その結果、ここで関係の強い論文は、大和田・他(2024)³⁹⁾であった。

大和田・他は、現状では火山灰がロケットの飛行経路を浮遊する場合は打上げ不可となっており、火山灰浮遊が希薄であっても打上げできない。そこで、火山灰が電波通信に与える影響を定量的に評価する手法を確立することを目指している。その結果「静止衛星から常時送信される電波(S-band: 2GHz 帯)を桜島で受信・計測し、当該電波伝搬路を火山灰が通過した際の電波受信電力の変動量を観測」し、その時の電波伝搬路上の火山灰濃度を算出し、両者を比較している。火山灰の減衰率として、雨滴から火山灰粒子に適用できると仮定したが、整合的な結果となっていないことが報告されている。

iv) 道路交通に関する先行研究

「火山 道路交通」で検索した結果、2023 年以降では後期更新世に発生した山体崩壊によって岩屑なだれ堆積物の分析をした青山・千明(2023)³⁹⁾の 1 件だった。内容としてはこの青山・千明は降灰の道路交通への影響という観点では直接関係ないものの、榛名山は常時観測火山には選定されておらず「自治体が発行しているハザードマップにおいては、そのような火山災害リスクや火山活動履歴に関する記載(言及)はなされていない」点を課題として指摘している。火山調査研究推進本部では、常時観測火山に選定されていない火山についても評価を公表しているが、住民にどのようにリスクコミュニケーションをするかを検討する際に留意しておく視点といえよう。

また、「噴火 道路交通」および「降灰 道路交通」では該当する論文は見出されなかった。そこで、「火山 道路」に範囲を広げた結果、18 件が抽出された。また、「噴火 道路」では 5 件、「降灰 道路」では 2 件だった。ただし、「噴火 道路」では佐藤・他(2024)⁴⁰⁾を除く 4 件が、「降灰 道路」では 2 件ともに、「火山道路」と重複していた。

「噴火 道路」では抽出されたが「火山 道路」では抽出されなかった佐藤・他では、富士山噴火時の溶岩流を対象に、道路網と避難開始時間等を設定した避難シミュレーションにより避難行動の安全性を評価している。その中で、今後の課題と

して、最短経路だけではなく、火山灰等の影響によって想定していた最短経路が通行できない事態でのシミュレーションを指摘している。火山によっては、溶岩流の流下よりも降灰が早い可能性のある火山近傍では検討が必要となろう。

「火山 道路」で検索された18件のうち、多くは道路地質や道路の被害などに関する論文だった。その中で、後藤・柴山(2023)⁴¹⁾は、23年度報告ですすでに取り上げた論文であるが、富士山噴火に伴う降灰を季節ごとに予測したうえで、降灰厚0.1 cm以上の場合は、0.1 cmまで除去し、その後、ロードスイーパーで残りを除去することと仮定すると、一般道では1カ月以上かかる結果を得ている。

v) ポータルサイトに関する先行研究

CiNii 論文を対象に「ポータルサイト」に関して、2023年以降で103件が抽出された。その大半はポータルサイトの開発の紹介であった。そのため、本項の目的である「利活用に資する要件の具体化」に参考となるであろう「利用」や「利用者」を意識している論文に絞り込んで再抽出した。その結果、「ポータルサイト 利用」では20件が、「ポータルサイト 利活用」で4件、「ポータルサイト 利便性」で2件、「ポータルサイト ユーザ」で2件、「ポータルサイト 受け手」で1件が抽出された。その一方で、「ポータルサイト 使いやすさ」と「ポータルサイト わかりやすさ」では該当論文は見出されなかった。

これら抽出された29件のうち3件が重複しており、それを除く26件について内容を確認した。この26件においても、依然としてポータルサイトの仕組みや利用方法を紹介したものが含まれていた。

その中で、大矢(2025)⁴²⁾は、松原市がデジタルアーカイブで公開している事例を紹介し、画像とその説明として端的にまとめられた文章を組み合わせた情報発信をしている点を報告している。この画像の有用性については、ライフライン機関も指摘していた。これらのことから画像が火山学あるいは火山防災として、どのような意味を有するかを端的に付す必要性があると考えられる。

また、田村(2025)⁴³⁾ではイベントと組み合わせる普及と理解向上を図る試みが紹介されており、この指摘は本プロジェクトで実施している避難・救援支援コンテンツと訓練との連携への積極的支持となる。

さらに、藪(2023)⁴⁴⁾は、自治体が展開しているポータルサイト関連事業をレビューし、それらのポータルサイトに「共通しているのは明確なターゲット層の策定」である点とポータルサイトを整備することで「送り手の個人と受け手である自治体のマッチング機能を有している」点をあげている。この明確なターゲット層の策定が必要であるという指摘は、ライフライン企業からも指摘されている。この点に関連して、より利用しやすいコンテンツとするには、想定されるターゲットへのヒアリングの実施(大塚・大塚、2023)⁴⁵⁾や利用者のワークフローに合わせた設計(小林・他、2025)⁴⁶⁾が必要だと指摘されている。利用者のワークフローに合わせるには、利用者の層別化と深い理解が必要となる。この点では、本プロジェクトで開発している周知啓発教育用コンテンツにおいて、自治体の防災担当者と長期に連携し、信頼関係を醸成している。このように、利活用を図っていくためには、単発の

研究では限界があり、次世代プロジェクトのように比較的長期にわたる研究が望まれる。

ポータルサイトの構築・運営に関して何点か指摘されている。朝岡・他(2024)⁴⁷⁾は、分散型のデータ公開体制では、「潜在的なデータ利活用を妨げて」おり、その解決に「連携検索性ポータルサイト、データカタログの構築が様々な分野で進みつつある」としたうえで、外部連携機能を果たす規格を提示している。この点に関連して、ライフライン機関の防災担当者から「火山噴火への災害対応では、どこの情報を見ればよいのか経験的にわかっていない」という発言もあった。現在、火山学や火山防災でもデータの共通利用や研究成果の公開のための仕組みづくりは進んでいる。その一つとして、科学的な研究成果に基づく周知啓発のためのポータルサイトは重要であり、連携の取れた継続的な試みが必要であろう。

また、劉(2024)⁴⁸⁾は、ポータルサイト構築の課題として検索機能の不足、画像品質といった利用面での課題やデータ更新、個人情報管理、サーバ維持などの運営面での課題を指摘している。とくに、限定公開の場合には、「利用者アカウントの作成・管理機能が必要であるが、アカウントにはメールアドレスなどの個人情報も含まれており、情報漏洩を防ぐためのデータの保存・管理に労力を要する」ことを指摘している。本次世代プロジェクトで構築したポータルサイトでも、限定的な公開としていく場合には、同種の課題が発生しうる。

また、機械的取得に関しては、鈴木(2023)⁴⁹⁾は、「集めることによる機械学習による意図せざる編集などが課題」としてあげている。別の観点から、木村(2024)⁵⁰⁾は、通常の維持や改善とは異なる、小規模な改善のためのアップデートは現状維持の一環と見做される傾向にあり、助成金を得にくいという課題を指摘している。今後、ポータルサイトの維持には、これらの倫理的課題や財政的課題への目配りも求められることになろう。

b) ライフライン機関の防災担当者との意見交換

これまで述べてきた先行研究を踏まえ、ライフライン機関の防災担当者とポータルサイトに求める内容や使いやすさの改善への意見等を把握するため、以下のような意見交換会を実施した。

開催日時：2025年9月30日：16時～18時

開催場所：東京大学大学院情報学環ならびに web 参加

参加者：東京電力ホールディングス（株）経営企画ユニット総務・法務室、東京電力パワーグリッド（株）、東京ガスネットワーク株式会社 防災・供給部、NTT 東日本 災害対策室、NTT ドコモ サービスオペレーション部 災害対策室、NTT データグループ 災害対策室

次世代側：山梨県富士山科学研究所、防災科学研究所、東京大学大学院情報学環

意見交換会では、次世代プロジェクト側から、趣旨説明およびポータル概要を紹介した。趣旨として、本プロジェクトのポータルサイトの開発に際しては、自治体と相談しながら進めており、自治体においては、i) ハザードマップ、ii) 動画や写真、ならびにiii) 対象としている火山の特徴などへのニーズが多いことに対応して改善してきた。ポータルサイトの対象を少しずつ広げていくうえで、ライフライン機関からも改善等ご教示願いたい、との趣旨説明を行った。

それに引き続き、ポータルサイトの構成ならびに除雪車等の走行実験、Bluetooth、通信アンテナやスターリンクといった通信機器への影響、ソーラーパネルやディーゼル発電といった発電機能への影響に関する実験結果など内容の概要を説明した。

以上の趣旨説明と概要紹介のあとで、意見交換を行った。意見交換会では、幅広い内容について意見交換がなされたが、主な意見を以下の3項に大別して紹介する。なお、以下では「 」でくくられた箇所が、ライフライン機関からの意見箇所であることを示す。

i) ポータルサイトへの評価

自治体と同様に、ポータルサイトの個々の要素の中で映像や写真へのニーズがみられた。「具体的なイメージがわからない中で、映像を見て単発の影響についてはわかった」という意見に代表される。大規模な火山噴火災害の被災体験がない中で、火山現象の写真や動画は、自社への影響を検討する手がかりとして有効と考えられる。さらに、「映像や写真は活用できる」との意見には、社内での説明時にも活用しやすいという側面がある。それでも対策が進みにくい原因として、「火山災害は大変というイメージはあるが、具体的なイメージがないことにあるのではないか」という意見もあった。今後も、火山噴火に伴う影響について具体化が求められよう。

ライフライン機関においては、降灰の影響に関する実験結果へのニーズが高かった。まさに、「実験の結果は有益。影響が具体的にわかる。こういうことができなくなるといふ影響を具体的に知ることができる」という声である。被災体験による知見の蓄積が乏しいことから、広域降灰による自社施設・設備への直接的影響や対策を具体的に検討するうえで参考となっている。

他方、実験的研究への2つの要望があった。ひとつは「10 cmで車両は通行できないとあったが、条件等の詳細を知りたい」との意見にみられるよう、実験条件や手続きについても詳細に把握したいとの要望である。社内で影響を詳細に評価するためには、結果とともに具体的な実験条件等の提示が求められている。これに対して、火山専門家からは、走行実験では、2輪駆動よりも4輪駆動の方が強いことや、今回は実験で用いた火山灰の粒径が0.5~1 cmと粗く、より細かい灰だとより厳しい可能性などが紹介された。また御岳山噴火時には薄っすらと積もった程度でも、タイヤの溝に細かい灰や粘土がつまり、スリップするケースもあったという実例も紹介された。今後は、これらの内容についても、情報発信の充実が求められよう。

また、ライフライン機関としては、影響や被害に対して対策を立てる必要がある。まさに、「対策を立てたいので、たとえば前述されたワイパーをつける、カバーをかけるなどの事前対策や応急措置の有効性を知りたい」といった意見である。ただ、今回のプロジェクト期間では、室外機や通信機器等一部の機器への影響を実験的に評価したが、他の機器や道路の除灰などの評価は次のステップとなる。

使いやすさの面では、「ユースケースというか、こういう目線の人はこういう風に使って下さい」というマニュアルや目安があると良い」との意見が出された。同じライフライン機関であっても、提供しているサービスやネットワーク形態は異なる。また、提供しているサービスの停止判断には、安全サイドに停止する都市ガスや鉄道事業者と、可能な限りサービス提供を続ける電力や水道とでは、実験結果や基準の利用方法には違いがありうる。機器が停止する可能性のある水準を求めることもあれば、ぎりぎりどこまで継続できるかの水準を求めることもありうる。さらには、防災担当者といっても、設備担当と運用担当さらには事故対応など立場も多様である。ポータルサイトに関する論文レビューでも、明確なターゲット層の策定が求められていた。その面では、本プロジェクト内でライフライン機関との意見交換を繰り返してきたことは、その第一歩となろう。

ii) 火山噴火による広域降灰に関する質問

ポータルサイトに含めるべきコンテンツを考える上では、火山噴火による広域降灰で予想される状況や影響に関してどのような質問がなされるかを把握しておくことは有意義と考えられる。

そのひとつとして、「同じ富士山の火山噴火でも、噴火の様相によって、たとえば出てくる火山灰や火山岩などの粘性や付着物など性質は異なるのか」との質問があった。火山専門家からは、火山ごとに、また同じ宝永噴火でも、マグマの組成は変わったという事実、富士山では水蒸気噴火の事例は少なく、マグマ噴火してきたという過去の履歴も紹介された。そうは言っても、三宅島ではマグマ噴火してきたが、2000年の三宅島噴火はマグマ水蒸気噴火だったように変わることはあるとの留意点も指摘された。ただ、噴火の様相に関する予測は難しく、現時点での火山学では難しい。火山研究者からの回答として、水蒸気噴火になるのかどうか、あるいは大きな噴火になるのかなど噴火の形態や規模は、噴火してみないと確答できない現状が紹介された。

また、「降灰により気温にはどの程度の影響がありうるのか」との質問もあった。この気温に対する影響は火山噴火現象そのものというよりも、火山ハザードの影響に関する問であり、今後は幅広い影響に関する情報提供が求められる。気温変化は需要に大きく影響を与え、気温が下がると需要は夏であれば減り、冬であれば増えるという。石峯(2025)³⁶⁾によれば、インドネシア・タンボラ火山の1815年噴火では北半球全体の平均気温が約0.6℃低下したと見積もられているという。ピナツボ火山の噴火でも同程度下がっており、1度上がると100万kwオーダーで需要は増えるという変化量と比較考量すれば影響は少なくない。

「避難所がどこか等で応急設備などの対応が必要になる。荷重の基準が共有されていれば、その値から推測することはできるが、指針があると対応しやすい」という問いも、需要予測のひとつであろう。電力や通信は、避難所等に応急的な設備を設置することが求められ、その一方で降灰の状況によっては避難所が変更される可能性があるからである。自治体とライフライン機関とのニーズをマッチさせる機能が必要となる。

噴火災害への対応の指針を求める声も多い。妥当な社内指針を立てるうえで、根拠となる科学的かつ公的指針が必要とされるためであろう。たとえば、「灰が降っている中で、どこまで現場で作業ができるのか。安全確保、たとえば灰を吸い込んだ後の影響やマスク・ゴーグル・服装などの着用指針が欲しい」といった質問である。一般に、目についてはゴーグルが、呼吸に関してはマスクの装着が推奨されている³⁶⁾。火山灰は物質的にはガラスの粉のようなものなので、「目を保護する必要はあり、眼鏡だけでも軽減されるもののゴーグルのように密閉されていると安全である」とされる。吸い込むことに関しては、「N95であることが望ましい」とされる³⁶⁾。ただし、PM 2.5ほど細かくはないことが多く、アスベストのような毒性があるわけではない。実際、桜島の事例でも、肺に影響があるという結果は出ていないし、鹿児島県のPM 2.5濃度においても「噴火直後に1時間値が一過性の上昇を示すことはあるものの、日平均濃度に関しては噴火による環境基準の超過は確認されていない」³⁶⁾という。ただ、作業員は暴露時間が長いので、N95がより推奨されるとされるが、「PM 10やPM 2.5の濃度が示されたとしてもどのくらいの濃度以上であれば不織布製マスクで良いのか、それとも防塵マスクが必要なのかといった基準は十分に示されていない」(石峯、2013)⁵¹⁾という。これらの基準について、科学的ならびに公的に示されることが望まれている。

また、作業員の安全については、応急復旧には「動員が大事になる。このため、要員確保の問題が重視されてきている。どういう作業をどこまでさせてよいかの参考資料がポータルにあるとよい。一元化されていると使いやすい」との要望もあった。

さらに、降灰が継続すると火山灰を「屋根等から降ろさないといけないだろうが、どれくらいの重さで降ろさなければならないのか。1 m²で何 kg 程度になるのか」といった問いがあった。これに対して、火山専門家からは、建物への影響は建物の構造でも変わりうるが、荷重設計指針火山編に記載をしていく予定であることが報告された。

このように、広域降灰に関する防災対応の面からは、火山噴出物の科学的特性は自社施設に対する降灰の影響を評価するために、また気温への影響は需要変動という社会的影響を見積もるために望まれていた。さらに、作業員の安全基準、火山灰の除去の目安についてなど適切な基準について情報提供が求められている。これらの質問は、降灰の影響に加えて、根拠となる基準の設定への要望という側面も求められている。対策を検討し、社内外に示していく際には、職員の安全性の確保といった面で依拠する公的基準が必要となるからであろう。これらの要望に対応するため、1)「周知啓発教育用コンテンツの社会実装」中のc)「火山防災情報ポータルの

更新」の項でも前述したように、「健康被害」や「フィルタ」、「火山灰の性質」項目を追加した。

iii) 社会的影響と共有の場

ライフライン機関の担当者の関心は、降灰による被害とその解決策にあるが、関心の範囲は自社設備への直接的な影響にとどまらず、広く社会的影響に及んでいた。2021年度に行った2020年福徳岡ノ場噴火災害ならびに2021年フンガトンガ＝フンガハーパイ噴火災害を対象としたメディアの内容分析からも、被害への関心とその被害をもたらした災害誘因への関心が高いことが示されている。

今回の意見交換の場でも、「富士山噴火で、我々のビジネスにどれだけ影響があるのか。映像を見て単発の影響についてはわかったが、ビジネス、たとえば金融が止まってしまうのかのシミュレーションはあるのか」、あるいは「他のインフラの状況に依存するので、このようなケースでは、世の中はどうなるのかが分かる」といった社外の動きへの関心は高い。

後者の発言で「このようなケース」という表現がみられるが、事前に対策を検討する上で、異なる噴火の規模や風向き・風速で降灰シミュレーション結果あるいはハザードマップを複数示して欲しいとの要望は強い。「全部には備えられない。ある程度、影響の大きいものだけピックアップして備えることが現実的だと考えている」からであり、「復旧シミュレーションは一部済ませている。ケースごとに溶岩流の広がりによって、どこがどれだけ被害を受け、そのケースではどう復旧するかの検討はしている」からである。この噴火の規模や風向き・風速により異なる複数パターンの提示については、道路管理者がからも要望されている。

この要望に対して、すでに富士山の噴火については、内閣府の想定では3パターンを公表している。ただし、ライフライン機関は、それぞれ異なる形態のネットワーク設備・施設を有しており、影響の大きさもそれぞれのライフライン機関で異なる。それぞれのネットワーク形態に応じて最適な選択できるように、いろいろなシミュレーション結果が提示されることが求められていると言えよう。

その一方で、防災の領域ではイベントの開始から同期した対策を共有するタイムラインが注目されている。そのためには共通の想定に基づいて検討する必要であり、共有の対象となる典型的なパターンが複数用意されることも望まれる。降灰であれば、風向きや風速ごとの降灰予測について、科学的に妥当性のある典型的なパターンが用意されるとよい。しかも、降灰等災害誘因のパターンが事前に共有されていれば、「いざという時には、噴火後のシミュレーションの結果あるいは事前に想定されていたパターンのうちどれに当たるかの情報があると良い」といった要望にもこたえられることになる。

その際に「悩ましいのは、灰で動けないことが大きい。この観点から机上訓練で取り上げている事例があれば教えてほしい」、あるいは道路の「どこが生きており、どこに行けるかで対応は変わるので、規模と風向きとで影響を知りたい」といった道路の通行可能性に対する要望があった。

ただ、これらの要望は、火山学の領域を超えて広がっている。そのひとつの解決への道として、共有化やプラットフォームの可能性が示されている。「どこの道を通れるかなど、ポータルサイトに共有されるとよい。いろいろな機関のコミュニケーションの場となればありがたい」といった意見は参考になるだろう。「火山噴火への災害対応では、どこの情報を見ればよいのか経験的にわかっていない」、ポータルサイトに「活動状況をチェックできる情報発信はあるのか」といった意見もまた、共有化やプラットフォームの整備を求める要望であり、今後、その場を整備していくことが有益であろう。

c) 情報ツールの利活用と今後の課題

自治体ならびにライフライン機関の防災担当者との意見交換会を実施し、利活用に資する要件を把握した。また、その前段階として、関連する論文を分析した。それらの結果を踏まえ、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た。

i) ポータルサイトの構成

今回開発してきたポータルサイトには、キーワードを入力し検索するキーワード検索と利用目的やコンテンツから分類したカテゴリーから検索するカテゴリー検索の両方を用意した。キーワード検索では、コンテンツすべてにキーワードを貼り付ける負担が大きく、しかも防災担当者全員が用語を正確に記憶しているわけではない。その面ではカテゴリー検索の方が優位となる。ただし、利用目的と合致したカテゴリーがポータルサイトに用意されている必要がある。先行研究でも、利用者のニーズの把握と対応の必要性が指摘されており、またライフライン機関の防災担当者からもユーザーに合わせた構成やマニュアルの提供を勧める意見があった。これらの観点から、本プロジェクトの周知広報用コンテンツでは、「業務から探す」ならびに「はじめての方向け」を用意し、解決を図った。

ii) 空間的解像度

降灰シミュレーションの空間的解像度として、現状のサイズでも十分との意見が多かった。これは、応急復旧作業では、個々の施設の被害よりもネットワーク切り替え等の運用による戦略の方が重要となるためである。応急復旧戦略を立案するには、事業者によって異なるが、1 県数区分程度であれば問題はないとのことだった。

降灰シミュレーションについては、噴火規模と風向きを組み合わせた複数の代表的パターンを提供することへの要望が強かった。「ある程度、影響の大きいものだけピックアップして備えることが現実的だと考えている」ためである。それぞれの事業者にとって、重要拠点の立地は異なる。したがって、自社施設やネットワークに最も深刻な被害をもたらす降灰パターンは、事業者によって異なる。その一方で、ライフライン機能は相互に依存しており、他社の被害や復旧優先順位は自社の対応を立てる上で重要な要素となる。理想的には、各事業者が自社施設・設備に合わせて選べる降灰シミュレーション結果の提示と、共同で検討するための複数の代表的

な降灰シミュレーションとの提供とを示す必要がある。いずれにせよ、優先順位等自治体やライフライン機関と調整を図っていくことが望まれる。

iii) 写真や動画と端的な説明の付加

住民説明や社内説明時に、映像や動画は利用しやすいという意見が多かった。そのうえで、映像や動画には、説明時あるいは問い合わせ対応時に参考となる端的な回答例や説明を付すことを推奨する既往研究があった。本プロジェクトで開発したポータルサイトでは、VolFilmについてその解説を翻訳し付している。このVolFilmは比較的短い、このような短いビデオ・クリップを勧める既往研究もみられた。

iv) 実験で得られた具体的な影響の情報発信は有効

実験で得られた具体的な影響の情報発信は、応急対策計画等策定時に有効であると高評価であった。火山噴火は低頻度であるため、対策経験が乏しく、降灰による影響や対策の効果を蓄積しにくいためである。そのうえで、今後は、実験的手法の研究をより広い対象、たとえば個別の設備や機器への影響や対策機器の有効さ等へと展開していくことが求められている。さらに、対策立案時に根拠となるような、それらの結果に基づく基準や指標を公表していくことも求められている。なかでも、ゴーグルやマスクなど対応要員や住民の安全確保を検討する際の根拠となる指針への要望は強い。

このように、火山噴火災害では平常期が長く、そのなかで訓練や対応計画等事前対策を進めていくことになる。つまり、多くの場合には事前対策が主となる。そこに科学的な成果に基づく火山噴火現象やその影響の予測と観測結果を共有していくことへの要望がみられた。そのひとつとして、複数のパターンでハザードマップが用意され、緊急時はどのパターンに近いかが迅速に共有されることで、対策の実施が円滑になるものと予想される。また、実験的手法に基づく影響評価は今後とも継続されるとともに、影響の対象を広げていくことが望まれている。

(c) 結論

1) 周知啓発教育用コンテンツの社会実装

防災情報ポータルにおいて、火山防災担当者が必要とする知識および対策検討に資する情報を体系的に整理するとともに、本研究成果を掲載することにより、防災関係機関に対して可視性の高い形で最新の知見を提供した。特に、火山灰が建築設備、交通、通信機器等に及ぼす影響に関する資料や、これらの機器を用いた降灰実験の結果、「降灰被害予測コンテンツ」の研究成果を掲載したことは、他省庁が整備するポータルサイトとの差別化を明確に示すものとなった。さらに、市町村等の防災担当者を対象とした訓練の実施に資するシナリオおよび実施手法を提供した。これらの取組のうち後者については、2026年1月に火山防災強化市町村ネットワークの活動報告の中で、本コンテンツが市町村より共有・報告されている。

2) 降灰被害予測コンテンツの社会実装

火山灰の再飛散は、噴火後も長期間にわたり社会へ影響を及ぼす現象である。今年度は新たな経験式を用いた数値計算により、建物の屋根が主要な供給源となり、地面や道路、風下側の低層建物の屋根への堆積を増加させることを示した。また、宝永噴火を想定したシミュレーションから、都市街区内でも気象条件により降灰量に最大約2倍の差が生じ、被害発現の時期や程度が局所的に大きく異なる可能性を示した。さらに、建物の構造別に降灰荷重と損傷率の関係を整理し、木造や鉄骨折板屋根が相対的に脆弱であることを明らかにした。空調・換気設備についても降灰深との関係式を導出し、その妥当性を確認した。加えて、病院機能の維持要件は他災害と共通点が多いことを示し、対策としては復旧負担の大きい設備を優先的に保護するなど、適切な優先順位付けの重要性を指摘した。

地方自治体を対象として降灰被害予測コンテンツを活用した演習を行うことにより、これまで降灰対応経験のない防災担当者が降灰被害をイメージすることができた。これにより、訓練想定に降灰を盛り込み、除灰の方法や灰捨て場についても事前に議論・検討を始めるきっかけとなった。

3) 避難・救助支援コンテンツの社会実装

本年度は十勝岳で登山者動向把握実験を実施し、那須岳、御嶽山とあわせて、火山特性や登山形態の異なる3火山における登山者データを取得した。さらに、避難行動のモニタリングやデータに基づく避難シミュレーションを行い、各火山における防災上の課題を明確化した。取得データを用いて、火口からの距離やハザードマップ上の危険度と登山者分布を重ね合わせることで曝露評価を行い、被害推定が可能となった。加えて、実験を自治体や火山防災協議会と連携して実施したことで、防災関係者の意識向上に寄与するとともに、得られたデータや解析結果を反映したシナリオに基づく防災訓練の実施につながった。これらの取り組みを通じて得られた知見やコンテンツは、各火山における事前防災の強化に大きく貢献した。

また、御嶽山2014年噴火以降に進められてきた退避施設整備に関しても、これまでの研究成果により耐衝撃補強策の選択肢が拡充され、今後の対策研究の基盤整備が進んだ。

4) 情報ツール利活用方策の検討

これまでに高度化してきた上記3コンテンツを含む情報ツールの社会実装に向け、利活用要件の具体化を目的として、自治体およびライフライン機関の防災担当者との意見交換を実施した。その結果、実験的研究に対するニーズ、望まれる指針・基準、火山ハザード情報の提供方法等に関する要望を把握し、コンテンツ開発に資する基礎的知見を得た。

また、過去の噴火災害履歴データベースの活用については本年度新規の取組は行わなかったが、これまでの研究成果である有珠山2000年噴火の事例や降灰の単位面積当たり重量の等値線自動描画手法のJVDNへの反映を試みた。しかしながら、年度内での実装には至らず、今後は次期プロジェクトや火山研究体制における関連研究への継承が期待

される。一方、降灰の等重量線自動描画手法および新燃岳を対象としたイベントツリー作成手法については、本年度中に論文として公表した。

さらに、情報ツールの利活用に関する成果と課題を整理した。その結果、今後は対策機器への影響や需要変化を含むより広範な影響評価への展開、および関係機関間で情報共有が可能なプラットフォームへの発展が重要であることが示された。

(d) 引用文献

- 1) 久保智弘, 鈴木 亘, 大井昌弘, 高橋成実, 浅尾一巳, 吉岡 薫: 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, Vol. 20, No. 7, 2020.
- 2) 北海道駒ヶ岳火山防災協議会: 北海道駒ヶ岳火山避難計画の改訂について, <https://www.town.hokkaido-mori.lg.jp/soshiki/bosaikotsu/2/178.html>
- 3) 久保智弘, 吉本充宏: 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), 20032, 2024.
- 4) 新堀敏基: 火山灰輸送: モデルと予測, 火山, Vol. 61, No. 2, pp. 399-427, 2016.
- 5) Volcanic Ashfall Impacts Working Group (United States Geological Survey): Remobilization of Ash by Wind
- 6) https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/Remobilization_by_wind.html
(2026. 1. 3 閲覧)
- 7) Liu, E. J., Cashman, K. V., Beckett, F. M., Witham, C. S., Leadbetter, S. J., Hort, M. C. and S. Guðmundsson: Ash mists and brown snow: Remobilization of volcanic ash from recent Icelandic eruptions. *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 119, pp. 9463-9480, doi:10.1002/2014JD021598, 2014.
- 8) Del Bello, E., Taddeucci, J., Merrison, J. P., Alois, S., Iversen, J. J. and Scarlato, P.: Experimental simulations of volcanic ash resuspension by wind under the effects of atmospheric humidity. *Sci. Rep.* Vol. 8, 14509. doi:10.1038/s41598-018-32807-2, 2018.
- 9) Wilson, T. M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., Wardman, J., Wilson, G. and Barnard, S. T.: Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Vol 45-46, pp. 5-23, 2012
- 10) 大塚清敏, 野畑有秀, 諏訪仁, 久保智弘, 宮城洋介, 宮村正光 (2021): 空調室外機および冷却塔の降灰実験, 日本建築学会技術報告集, Vol. 65, pp. 580-585, 2021-2.
- 11) Otsuka, K., Suwa, H., Kubo, T. and Miyagi, Y.: Micro-spatial behavior of volcanic ashfall in built-up areas of a large city, *J. Disaster. Res.*, Vol. 20-3, pp. 287-293, 2025.
- 12) Crawford A. M., Loughner, C. P., Tong, D. Q. and Stein, A. F.: Reducing dependence of modeled resuspended volcanic ash on meteorological grid resolution, *Front. Earth Sci.* Vol. 13, 1511847, doi: 10.3389/feart.2025.1511847, 2025.

- 13) Dare, R. A.: Sedimentation of Volcanic ash in the HYSPLIT dispersion model. Tech. Rep. No.079, Centre Aust. Weather Clim. Res. Collaboration for Australian Weather and Climate Research (CAWCR), 2015.
- 14) 片岡浩人, 木梨智子, 川口彰久: 風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発, 大林組技術研究所報, No.64, pp.49-54, 2002.
- 15) Folch, A., Mingari, L., Osores, M.S. and Collini, E.: Modeling volcanic ash resuspension - application to the 14-18 October 2011 outbreak episode in central Patagonia, Argentina. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Vol.14, pp.119-133, doi:10.5194/nhess-14-119-2014, 2014.
- 16) Nemoto, M. and Nishimura, K.: Numerical simulation of snow saltation and suspension in a turbulent boundary layer. J. Geophysical Research, Vol.109, D18206, doi:10.1029/2004JD004657, 2004.
- 17) 日本建築学会: 建築物設計用荷重指針・同解説, pp.323-326, 2015.
- 18) 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ー首都圏における降灰の影響と対策ー～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, 2020.
- 19) 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.
- 20) 諏訪 仁, 最上利美, 大塚清敏, 久保智弘, 宮城洋介(2025): 降灰荷重に対する建物の限界降灰深の評価. 日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集, 2025.
- 21) 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, 2014.
- 22) 諏訪 仁, 野畑有秀, 大塚清敏, 久保智弘, 宮村正光, 宮城洋介: 火山噴火の降灰による建物被害評価法ー富士山の宝永噴火による評価例ー, 空気調和衛生工学, Vol.98, No.3, 令和6年3月, 2024.
- 23) 大塚清敏, 野畑有秀, 諏訪 仁, 久保智弘, 宮村正光: 空調室外機の降灰実験その1～その3, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.5-10, 2018.
- 24) 大塚清敏, 野畑有秀, 諏訪 仁, 久保智弘, 宮村正光: 建物空調の冷却塔を対象とした降灰実験その1～その2, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.29-32, 2019.
- 25) 大塚清敏, 野畑有秀, 諏訪 仁, 久保智弘, 宮城洋介, 宮村正光: エアフィルタに関する降灰実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.29-30, 2021.
- 26) 山下哲郎: ライフラン・建築・設備の被災状況及び診療活動の状況, 分担研究報告書, 平成23年度厚生労働科学研究補助金「大規模災害に対応した保健・医療・福祉サービスの構造, 設備, 管理運営体制等に関する研究(研究代表者・寛淳夫・工学院大学)」, 平成24年3月, 2012.
- 27) 宮地直道, 小山真人: 富士火山1707年噴火(宝永噴火)についての最近の研究成果, 荒巻重雄, 藤井敏嗣, 中田節也, 宮地直道編, 「富士火山」, 山梨県富士山科学研究所, pp.339-348, 2007.

- 28) Wilson, G. M.: Ash, gas and computers: the vulnerability of laptop computers to volcanic hazards. MS. Thesis, 2011, Canterbury Univ., NZ., 2011.
- 29) Miyagi, Y., Yoshimori, K., Kaneta, S. and Usuda, Y.: Consideration for solving problems related to volcanic disaster prevention by real-time grasping of climber movement, *Journal of Disaster Research*, Vol.18, No.7, pp.754-762, 2023.
- 30) 富島千晴, 宮城洋介, 田中義朗: 十勝岳における登山者避難行動調査 「十勝岳チャレンジ 2025」 実施報告, 日本火山学会講演予稿集, pp.109-109, 2025.
- 31) 南 一久, 村上陽平, 河添智幸, 石田 亨: マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション, 人工知能学会全国大会論文集, pp.97-97, 2002.
- 32) Yamada H., Sato, M., Ogasawara, N., Takayuki, K. and Yui, A.: Collision test of abrasive projectiles against steel sheet using large-scale lurching system. *Adv, Exp. Mech.*, Vol.1, pp.161-166, 2016.
- 33) Yui A., Sato, M., Yamada, H., Kitajima, T. and Ogasawara, N. : Study on protection performance of grinding wheel safety guard made of stainless steel, *Proc. Euspen's 16th Inter. Conf. Exhibition*, Nottingham, UK. pp.497-498, 2017.
- 34) 中田節也, 永田直己, 上澤真平, 宮縁育夫: 伊豆大島と阿蘇火山におけるテフラハザード評価: 自動描画テフラ分布図の応用, 日本火山学会講演予稿集, pp.92, 2025.
- 35) 上澤真平, 竹内晋吾, 土志田潔: 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法, *火山*, Vol.69, No.3, pp.155-162, 2024.
- 36) 石毛康介, 諏訪由起子 (2024): 機械学習と衛星データを用いた福德岡ノ場 2021年噴火の漂流軽石の検出および追跡手法の高度化, 日本地質学会学術大会講演要旨, pp.234-, 2024.
- 37) 石峯康浩: 火山灰ならびに火山ガスの健康影響, *化学物質と環境: 化学物質と環境との調和をめざす情報誌*, No.192, pp.5-7, 2025.
- 38) 小山 茂: 有事の島しょ医療Ⅱ 2000年三宅島雄山噴火一, *島嶼研究* Vol.24, No.1, pp.31-50, 2023.
- 39) 大和田陽一, 川邊 泉, 砂見幸之, 福添森康, 小池一稀, 井上文太, 宮川陸大, 白井美琴, 長浜宗治, 中道治久, 井口正人, 瀧下恒星, 片山勝之: ロケット打上げ時の無線通信に与える火山噴煙の影響の評価法, 日本火山学会講演予稿集 (2024年), pp.68, 2024.
- 40) 青山雅史, 千明拓斗 (2023): 榛名火山南東麓の流れ山からみた陣場岩層なだれの土砂供給量と人為的地形改変による流れ山の消失, 日本地理学会発表要旨集, pp.240-, 2023s.
- 41) 佐藤史弥, 孫 鵬飛, 秦 康範: 富士山噴火に伴う溶岩流からの徒歩避難に関する基礎的検討, *自然災害科学*, No.43, No.S11, pp.113-126, 2024.

- 42) 後藤大青, 柴山知也: 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, Vol. 42, No. 2, pp. 159-169, 2023.
- 43) 大矢祐司: 松原市における小規模デジタルアーカイブの活用事例 デジタル技術による文化財情報の記録と利活用, XR・LiDAR・3D・デジタルアーカイブ・知的財産権, pp. 7, 2025.
- 44) 田村隆太郎: 静岡県の文化財 3次元データ整備事業と「LEGA-SHIZU×3D」 デジタル技術による文化財情報の記録と利活用, XR・LiDAR・3D・デジタルアーカイブ・知的財産権, pp. 7, 2025.
- 45) 藪 諸栄: 地方自治体による親子ワークショップの推進に関する研究-五島市・糸魚川市・厚沢部町の比較分析-, 地域活性研究, Vol. 18, No. 1, pp. 281-289, 2023.
- 46) 大塚孝泰, 大塚 力: 国土地理院における「地理総合」への支援, 日本地理学会発表要旨集 2023a, pp. 41-, 2023.
- 47) 小林裕太, 熊崎由衣, 國本千裕: 千葉大学における RDM 支援ポータルサイトの構築: 大学院生・若手研究者を対象としたウェブサイト形式 RD 教材提供, 情報の科学と技術, Vol. 75, No6, pp. 283-288, 2025.
- 48) 朝岡 誠, 林 正治, 有田正規, 藤澤貴智, 片山俊明, 丹生智也, 山地一禎: データカタログにおける外部リポジトリ連携機能の検討と実装, 情報知識学会誌, Vol. 34, No. 4, pp. 349-352, 2024.
- 49) 劉 冠偉: HDIC Viewer の再開発: 日本古辞書ポータルサイトの構築に向けて, じんもんこん 2024 論文集 2024, pp. 255-260, 2024.
- 50) 鈴木親彦: 人文学研究者によるオープンデータ研究活用・公開の一考察, 大学図書館研究, Vol. 123, 2023.
- 51) 木村 文: 博物館におけるデジタルアーカイブのリニューアルの課題: リトアニア共和国 LIMIS の事例, デジタルアーカイブ学会誌, Vol. 7, No. s2, pp. s119-s122, 2023.
- 52) 石峯庸浩: 火山噴火による降灰とその備え, 労働の科学, Vol. 68, No. 6, 2014, Vol. 69, No. 1, pp. 32-38, 2013.

(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) 事業期間全体の代表的な成果

(a) 周知啓発教育用コンテンツの開発

火山防災担当者が必要とする知識や対策を検討する上で必要な情報を火山防災担当者とのヒアリング調査やアンケート調査を通じて取りまとめるとともに、本研究成果を掲載することで、火山防災情報ポータルサイト(図 215)として火山防災対策を支援するための火山対策に必要な知識と情報、研究成果などを提供することができた。

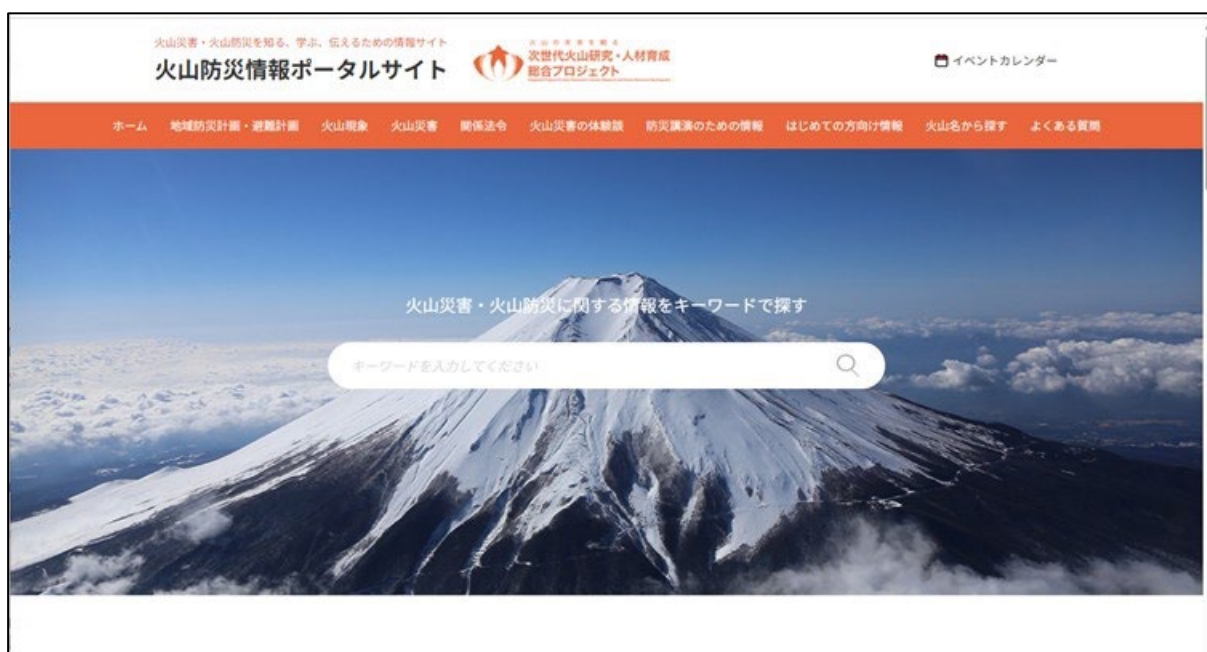


図 215 開発した火山防災情報ポータルサイト

特に火山灰による設備や機器などへの影響について、降灰被害予測コンテンツの成果や図 216 に示すようにソーラーパネルや通信機器などを対象とした降灰実験を通じて検証し、本コンテンツを通じて直接防災担当者や防災関係機関に提供することができた。



図 216 降灰実験の結果(左：ソーラーパネル 右：衛星通信機器)

さらに町村などの防災担当者自身を対象とした訓練を実施する上で必要なシナリオや実施方法を提供することができ、2026年1月に火山防災強化市町村ネットワークの活動報告として、本コンテンツについて市町村から発表も行われた(図 217)。

<p>火山防災強化市町村ネットワーク オンライン研修会</p> <p>取組紹介：北海道鹿部町 (北海道駒ヶ岳火山防災協議会) 北海道駒ヶ岳噴火図上訓練 令和7年11月20日実施</p>	<p>図上訓練の効果</p> <ul style="list-style-type: none">・災害対応の疑似体験により、現実的な行動イメージを構築・緊急を迫られる多様な対応について、優先順位の決定や判断能力の向上・関係機関の役割を再認識し、情報経路や連絡手段など、連携課題を把握・訓練を通じ、計画と実際の行動の乖離を把握
--	---

図 217 火山防災強化市町村ネットワーク研修会の資料(北海道鹿部町提供)

(b) 降灰被害予測コンテンツの開発

火山噴火による災害の中で降灰が主たる起災要因となるような、火山からやや離れた地域（いわゆる遠位領域）にある都市では、破壊的なものではなく都市の機能に支障をもたらす機能的な被害が主となる。本研究では、都市の構成要素のひとつである建物について着目し降灰による機能的な被害について、特に、現代の建物機能の中で重要な建物設備、建物使用性に大きく影響する屋根を対象とした。また、災害時の重要施設である病院に関しても降灰の影響について研究した。

1) 建物空調・換気設備の降灰実験

建物空調・換気設備の降灰による動作支障発生に関し、天然の火山灰(桜島で採取、ふるいでろ過し粒径 $250\mu\text{m}$ 以下を使用)と空調・換気設備の流通品を用い、機器動作への降灰影響を明らかにした。

a) 室外機（ビルマルチエアコン用）

熱交換フィンが目詰まり影響等を調査し、乾燥状態では降灰深 50mm でも7割程度の風量が保たれるが、湿潤状態では $10\sim 20\text{mm}$ で風量が大きく落ちることが示された(図 218)。

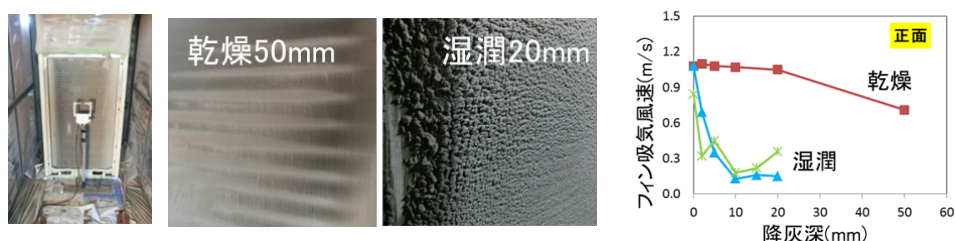


図 218 室外機の降灰実験（左 3 枚）及び降灰深と熱交換フィン前面給気速度（右）

b) 冷却塔の降灰実験

開放型の冷却塔に関する実験では、給気口にあり冷却水が流下する充填材からの冷却水配管への火山灰侵入の影響が深刻で、 50mm 程度の降灰で冷却水流量不安定、ポンプ摩耗漏水の深刻な影響が出ることが分かった(図 219)。



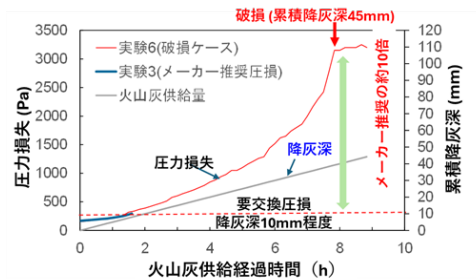
図 219 冷却塔の降灰実験状況（左）および累積降灰深と冷却水流量変化（右）

c) 換気用エアフィルタ

建物換気に多用される中性能フィルタについて、フィルタの要交換目詰まり、降灰中使用継続の場合の破損限界について調査。中性能フィルタは降灰深 7mm 程度で要交換圧損に達し、降灰深 40mm 程度で破損に至ることがわかった(図 220)。



中性能フィルタ 濾材の破損(外れ)



フィルタ圧力損失試験(時間経過)

フィルタの実験状況 (左 2 枚)、フィルタの破損 (中) 及び累積降灰量と圧力損失 (右)
図 220 中性能フィルタの降灰実験と結果

d) 空調換気設備の被害率曲線の導出

本研究で扱った空調室外機、冷却塔、換気用エアフィルタについて、累積降灰深と対数正規分布を仮定した被害率との関係式(曲線)を導出し、実験結果(図 221)とよく整合していることを確かめた。

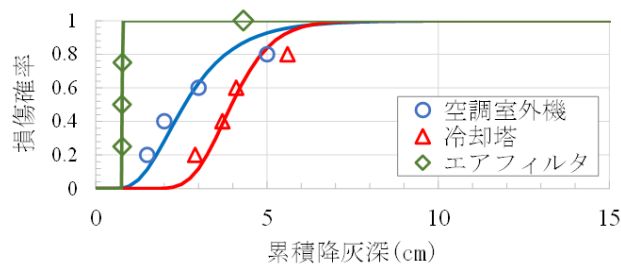


図 221 累積降灰量と被害率との関係

2) 降灰の数値計算

広域の降灰予測では扱われていない、建物の多い都市街区での小スケールの降灰の非一様性の程度や風による火山灰再飛散の特徴的な点の把握を、個々の建物を表現できる程度の高解像度の降灰計算によって行った。都市街区では降灰量は場所により広域予測の 1.5 倍程度に達する可能性のあること、建物屋根は再飛散火山灰の有効な供給源となり得、建物間の道路や風下側のより低い建物の火山灰堆積量を増加させる働きがあることがわかった(図 222)。

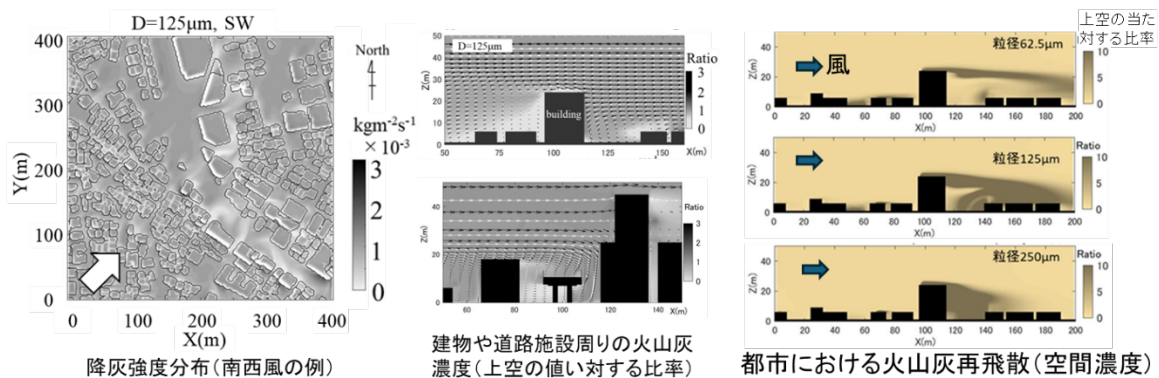


図 222 都市街区の降灰シミュレーション

3) 建物屋根への降灰荷重の影響

建物構造フレームモデルによる力学解析を行い降灰荷重の建物屋根への影響を調査し、代表的な4つの構造種別、木造、鉄筋コンクリート造（RC造）、鉄骨造（S造）、鉄骨造折板屋根（S造折板屋根）について、累積降灰深と被害率との関係を導いた。火山灰の荷重は積雪の荷重と同様に、建物の自重に対して追加的に付加された重量であるが、重量の大きな建物の方が軽い建物と比べ、付加的な荷重に対し余力があるため、重量が大きいRC造やS造の被害率は木造やS造折板屋根と比べ小さくなっている（図 223）。

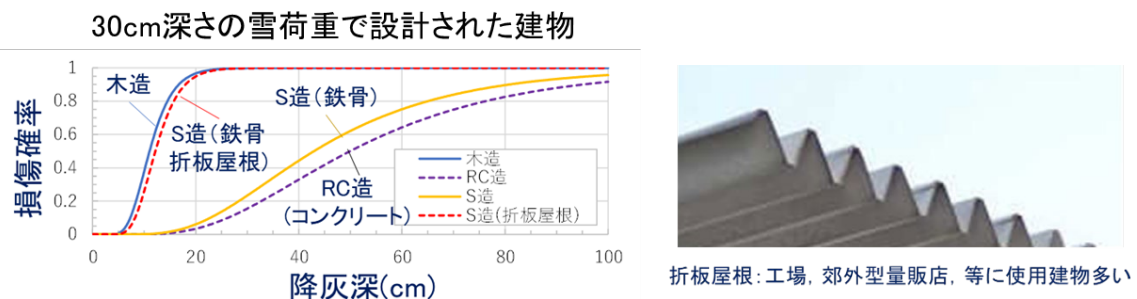


図 223 降灰深と建物構造種別による屋根の損傷確率（左）および折板屋根（右）

4) 災害時重要施設への影響

災害時重要施設として、病院に着目し、病院が機能するために必要な要素（上水道、電気、医療スタッフの通勤、医療の提供）に対する支障が、災害時の医療（トリアージ、検査、手術、診察等）に与える影響について調査した。火山災害についてはこれらについて利用可能な情報がないため、震災時（東日本大震災）の調査結果を参照した。火山災害では、火山灰堆積による道路閉鎖等、地震とは異なる点があり、地震に基づく検討ではカバーしきれない点があるものの、医療でとりわけ重要なのが電力と上水の確保である点を含め、火山災害で予想される支障と共通する事項が多いことがわかった。カバーしきれない点は課題として残るが、噴火時の病院の機能被害を想定するには、震災時の機能被害の参照がかなりの程度有効である可能性が示された。

地方自治体を対象として降灰被害予測コンテンツを活用した演習を行い、降灰対応経験のない防災担当者が降灰被害をイメージすることにつながった。その結果、訓練想定に降灰を盛り込み、除灰の方法や灰捨て場について事前に議論・検討を始めるきっかけとなった。上述の降灰の機器や設備に関する脆弱性評価の成果を、火山防災担当者が降灰による被害想定や訓練シナリオ策定などに活用できるように、降灰ハザード情報と合わせてwebGIS上で閲覧が可能な環境を整備した(図224)。このwebGISは、周知啓発教育用コンテンツとして開発した「火山防災情報ポータルサイト」を通じて、閲覧できるように環境整備した。

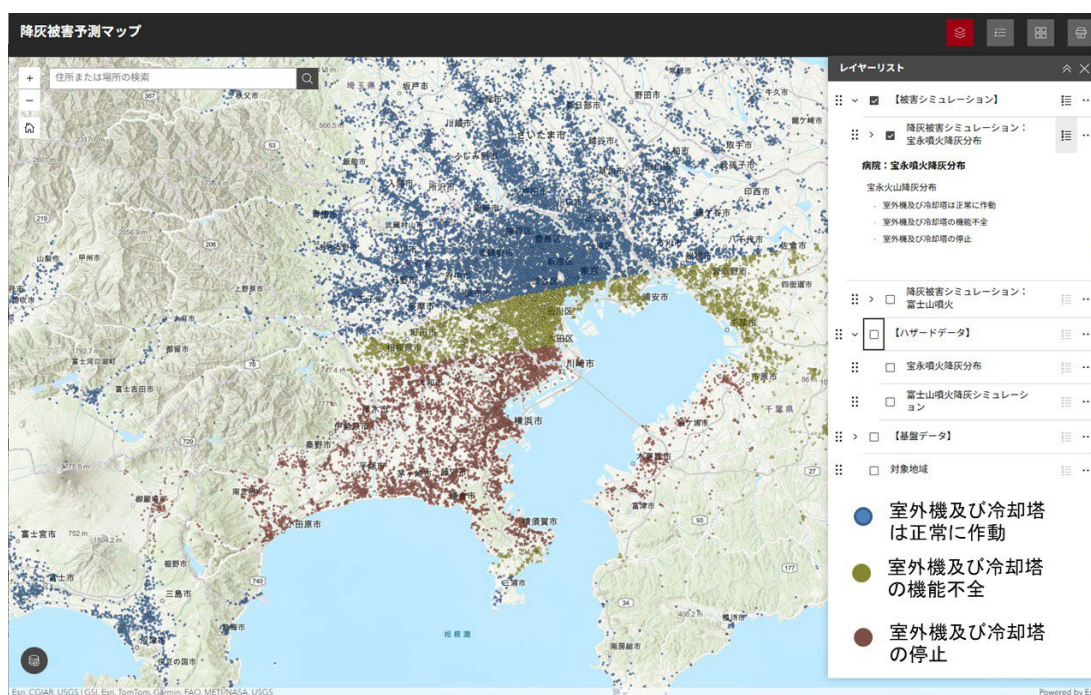


図224 webGISによる病院施設における室外機・冷却塔への影響評価例(富士山の宝永噴火を想定)

(c) 避難・救助支援コンテンツの開発

那須岳、御嶽山、十勝岳における登山者動向把握実験を通じて、特徴の異なる3つの火山における登山者データを取得することができた。さらに登山者の避難行動モニタリングや登山者データを用いた登山者の避難シミュレーションによって、各火山の登山者を想定した火山防災上の課題が浮き彫りとなった。取得した登山者データを使い、火口からの距離もしくはハザードマップによるハザード情報に対する登山者分布から登山者の曝露評価を行うことにより、登山者の被害推定が可能となった。また、実験を地元自治体及び各火山防災協議会と連携して実施することにより、火山防災関係者の意識啓発に繋がり、結果の利活用として実験の結果をシナリオ（バックデータ）に盛り込んだ防災訓練を実施することが可能となった。これら実験を通じて得られたコンテンツは、各火山の事前防災に大きく貢献できたと考えられる。

御嶽山 2014 年噴火以降、退避施設が設置されるようになったが、10 年間の研究成果により、避難促進施設などの避難計画策に必要な情報や既存の退避施設の耐衝撃補強策の選択肢の拡充など、避難救助対策の支援のための研究開発を行うことができた。具体的には、火山での動態把握実験として実施された富士山チャレンジにより収集した 2017~18 年の動態データを用いて、図 225 に示すように避難計画策定などに必要な登山者の移動データを整理した。また、既存の退避施設の耐衝撃補強策の選択肢として、既存の補強方法よりも安価な人工軽石を用いた耐衝撃補強策について、図 226 に示すように人工軽石敷設厚さと衝撃力の関係を整理した。

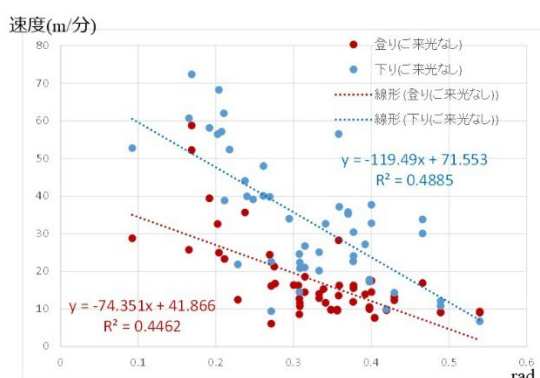


図 225 斜面勾配と登下山時の移動速度の関係

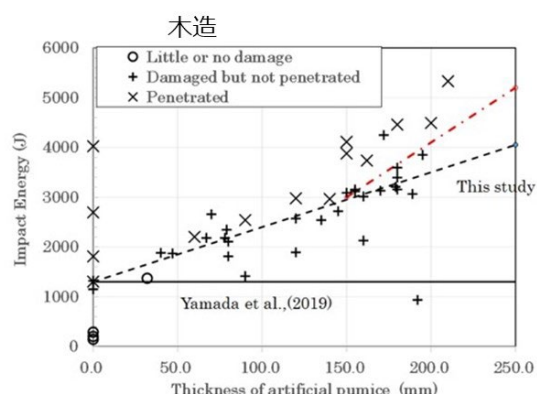


図 226 人工軽石敷設厚さと衝撃力の関係

(d) 情報ツール利活用方策

1) 意見交換による利活用方策の検討

自治体(都道府県・市町村)や道路管理者・ライフライン事業者の防災担当者と意見交換を実施し、利活用に資する要件を把握した。

火山防災は、平常期が長く、訓練や対応計画等事前対策等が主たる活動となる。そのため、事前対策に資する情報ニーズは高い。広域降灰対策では、降灰シミュレーションなど科学的情報に依拠する。この際、降灰想定空間的解像度として、ライフライン事業者からはメッシュの大きさは現状のサイズでも十分に有効であるとの評価が得られた。被害様相や応急復旧計画を検討するには、まずは個々の被害よりも、ネットワーク運用によるカバーを考えるためである。他方、自治体では、避難計画は自治会単位で考えることが望まれていた。このようにシミュレーションの計算単位を細かくすればよいというよりも、判断の対象に依存することになる。今後のシミュレーション研究に資する知見と考えられる。

降灰シミュレーションに関しては、噴火規模と風向きを組み合わせた代表的パターンを提供することへの要望が強かった。降灰による最大の被害を分析する上で、市町村にせよライフライン事業者にせよ、人口分布や自社の設備やネットワークの実態に合わせて、適切な降灰パターンを選択する必要があるためである。これに加えて、防災の分野ではタイムライン的分析が行われているが、この場合、関連する自治体や事業者等が、同じ想定のもと発災から時間を同期させて検討することが求められる。このように、科学的に根拠ある降灰パターンが自社設備評価や人口分布に応じて細かく選択できる複数パターンと、関連主体で共有される代表的パターンの提供への情報ニーズが確認された。なお、移流拡散中の粒径毎の密度分布が求められていることも判明した。

また、降灰が種々の機器へ与える具体的な影響について、実験的手法で得られた知見は有効であると評価され、情報ニーズの存在が明らかになった。火山災害は低頻度であるため、被害発生確率や対応の有効性などノウハウが蓄積されにくい。そのため、本プロジェクトで実施してきた実験的手法による影響評価は、影響や復旧方策を検討する上で、判断の根拠を与えるためである。ただし、その知見を利活用するために、実験条件も明示することも求められていた。今後も、実験的手法による評価を種々の設備や対応機器に広げていくことが求められる。

同様に、映像や動画は、住民説明や社内説明時に、利用しやすいと高評価であった。経験する機会が少ないため、具体的なイメージを共有しにくいためである。その際に、参考となる問い合わせへの回答例が、映像や写真に付されていると使いやすいとのニーズも明らかになった。また、VolFilm等短いビデオ・クリップの要望も確認された。短尺の動画であれば、短時間で視聴できる、あるいは相手に合わせて多様な組み合わせが可能だと考えられるためである。

他方、緊急時には、重要な情報の一元化へのニーズは高い。緊急時には、いろいろ機関が提供している情報を検索しまくる余裕がないので、情報の入り口が一元化されていると効率が良いためである。また、火山現象や影響の予測と観測結果の共有に対しても情報ニーズが高かった。少しでも早く対応をとることで影響の余波を少なくすることができたり、応援要員の動員計画を立てることができるなど利点は多い。また、Google

やマスクなど対応要員や住民の安全確保に資するガイドラインや基準への情報ニーズが高い。降灰による健康への影響についても社内的にも社会的にも蓄積されておらず、根拠となる科学的かつ公的基準が求められている。

2) 歴史噴火データを用いた降灰ハザード評価手法の開発

歴史噴火の降灰量の離散型データを用いて、等重量線を自動描画することにより任意の地点での降灰量をデジタルデータとして取得できることを利用し、歴史時代の一定期間における降灰量の総和分布を描き、火山周辺地域の降灰ハザードとして評価する方法を開発した。ここでは、すでに豊富な降灰量データが報告されている、伊豆大島火山の過去 1500 年間の噴火と阿蘇火山の過去 3 万年間の噴火を対象にした。

ベースとなるのは Yang & Bursik (2016) が開発したアルゴリズムで、それを応用しながら、対象噴火の離散型降灰量データから、その降灰量分布図を自動描画し、等重量線図作成や総降灰量（噴出量）計算を行った。Yang & Bursik では、Trending と Kriging をモデル化しているのが特徴である、従来の Kriging のみの方法では、降下火山灰厚の距離減衰を考慮していないため、外挿性について信頼性が低い。Yang & Bursik では、(1) 全体的な層厚の減少傾向をモデル化し、(2) Kriging を使用して、前ステップの残差を局所的な堆積量の変動としてモデル化。(3) これらのステップの結果を合計し、予測された堆積量分布をグリッドマップとして示している。降灰量は単位面積当質量 (kg/m^2) を使用している。

自動描画した分布図の精度確認のため、2014 年 9 月の御岳噴火と 2021 年 10 月の阿蘇噴火の降灰量観測データを使用し、地質専門家らによって作成された既報の等重量線図とそれにより計算された総降灰量を用いて、自動描画法の再現性を評価した。その結果、この自動描画法により、各等重量線図をほぼ再現し、類似の総降灰量を算出することができた (図 227)。これによって、手描き等重量線図の作成において必要だった研究者のスキルや経験に依存することなく、降灰量分布図を自動的に作成することが可能となった。

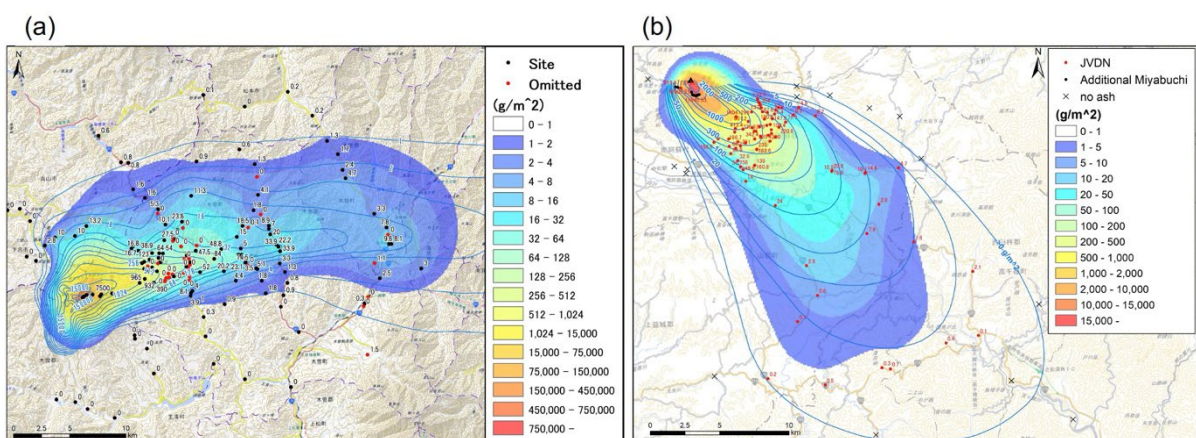


図 227 自動描画した火山灰の降灰量分布図。(a) 2014 年の御岳山噴火と (b) 2021 年の阿蘇山噴火。青いコンタは既報のもの。

続いて、伊豆大島と阿蘇火山における過去 1,500 年と 30,000 年に及ぶ一連の噴火に関する既報告の降灰量データを使用し、上記方法で各噴火イベントの降灰量分布を自動描画した。各火山におけるこれらの降灰量分布図（デジタルデータ）を重ね合わせることで、各火山周辺の任意の地点における長期的な降灰ハザードを評価できるようになった(図 228)。

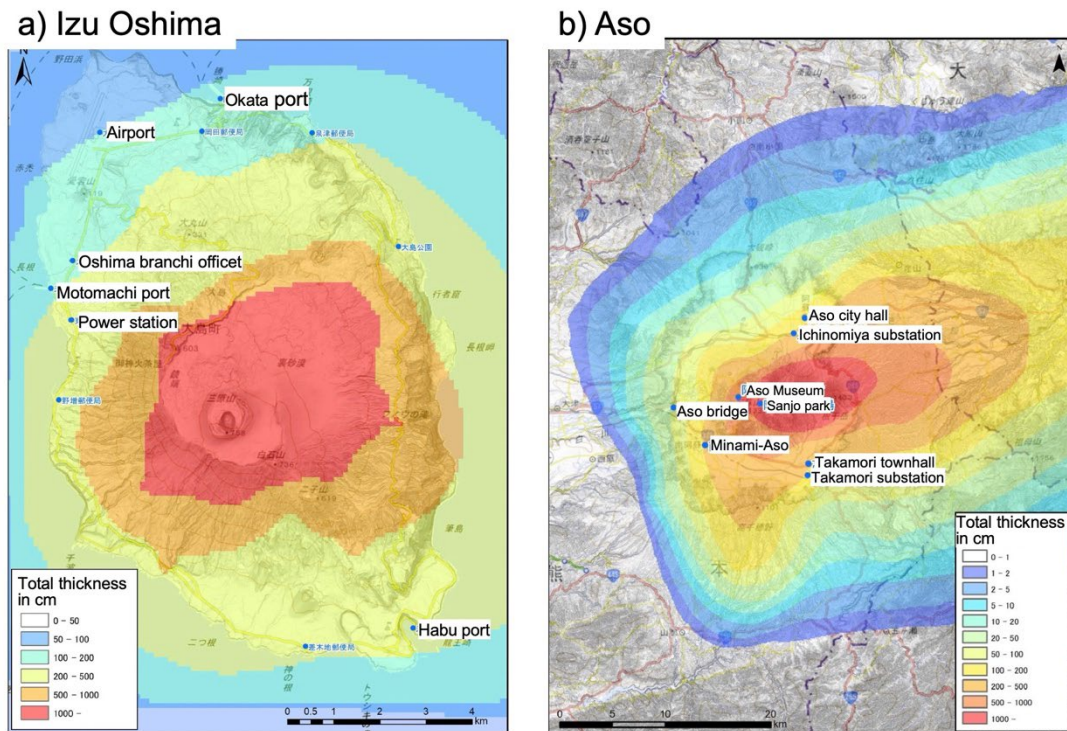


図 228 伊豆大島火山における最近 1500 年間と阿蘇火山における 3 万年以前以降の降灰量の積算図。これによって、火山周辺地域の降灰ハザードを評価できる。

本手法は、個人のスキルによらず等重量線を描くので、著作権が課題になりがちな共同観測で取得した降灰量データ（例えば、JVND に集められる噴火発生時の降灰チームのデータ）の等重量線や噴出量を表示するのに適している。ただし、本プログラムは R で書かれているため、誰でもすぐに使える環境とはなっておらず、JVND とどのように連携させて汎用化するかが今後の課題である。

参考：

Yang, Q. and M. Brisk (2016): A new interpolation method to model thickness, isopach, extent, and volume of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 78, Article No. 68, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1061-0>

Nakada, S., N. Nagata, S. Uesawa and Y. Miyabuchi (2025): Tephra Hazard around Izu Oshima and Aso Volcanoes, Japan: Application of the Automatically Generated Tephra Distribution Map. *J. Disaster Res.*, 20, 3, 298-307, 2025, doi: 10.20965/jdr.2025.p0298

3. 会議録

(1) 10月30日@伊豆大島 D1, D3の研究協力についての打ち合わせ

課題 D1 が伊豆大島火山において、ドローンポートを活用した実証実験をすることに際し、課題 D3 担当者も参加し、ドローンポートの活用について意見交換した。

(2) 11月25日オンライン会議：課題 D のサブテーマ間の連携について

11月11日の最終評価会における評価委員からの指摘に応じて、課題 D 内部におけるサブテーマ間の連携について意見交換した。この意見交換の結果をスライドにまとめ、12月に実施された総合協議会において報告した。

4. むすび

サブテーマ 1 では、「データ取得の数分以内に情報提供」という目標を達成し、ドローン技術を活用した火山調査の進展に大きく貢献した。研究開始から 10 年で技術は大きく発展し、取得したデータを社会実装できる段階に達したことで、火山噴火時にも利用可能な研究として注目されている。特に大学や研究機関でのドローン利用は進み、火山活動の基礎調査手法の一つとなりつつある。一方で、ドローンには噴火影響や気象条件による制約があり、有人機や人工衛星との使い分けが必要である。また、火山噴出物の自動抽出など未解決の課題も残されている。今後は技術開発を進め、無人機による火山災害のリアルタイム把握手法の確立を通じて、日本の火山防災と火山研究の発展への貢献が期待される。

サブテーマ 2 では、火山噴火時に発生する火山灰の放出量を迅速かつ高精度に把握するための技術開発を進めた。従来は把握が難しかった噴煙中の火山灰量や粒径分布について、気象レーダー、ドローン観測、地上観測、数値シミュレーションを組み合わせることで、リアルタイムに近い解析を可能にした。特に、桜島を対象とした観測では、レーダーデータと降灰シミュレーションを用いて噴煙高度や火山灰輸送の再現性を向上させ、噴出率、噴出量や噴出時期について統計的な解析を行い、降灰予測精度の改善につなげた。また、自治体や防災担当者との連携を通じて、必要とされる情報や表示方法を整理し、実際の火山防災に活用しやすい情報提供手法の検討を行った。これらの成果は、桜島火山だけでなく、他の活動的火山についても将来的に適用できるものと考えられ、噴火時の迅速な状況把握や避難判断、降灰対策の高度化に役立つことが期待される。

サブテーマ 3 では、まず、防災情報ポータルサイトを整備し、火山防災担当者が必要な知識や対策情報を体系的に得られるようになり、降灰の影響をまとめた教材や訓練シナリオを作成し、自治体職員向け研修にも活用された。降灰被害予測では、実験を通じて建築設備（室外機、冷却塔、エアフィルター）への降灰の影響を定量的に評価した。また、都市部での火山灰の堆積状況を解析し、風や気象条件によって降灰量が大きく変わることを示し、同時に、木造家屋や病院設備への影響も整理し、重要施設を優先的に保護する必要性を明らかにした。地方自治体と連携した訓練では、参加者が降灰被害を具体的にイメージし、防災計画や対応方法の検討を進めるきっかけとなり、登山者データやハザードマッ

プを活用した避難シミュレーションを行うことにより、火山ごとの避難課題を明確にした。御嶽山などで実施した登山者の動態把握実験の成果は、避難施設整備や防災訓練の改善にも役立てられた。加えて、自治体やライフライン機関との意見交換を通じて、火山ハザード情報の提供方法や指針づくりに必要な基礎知見が得られた。

課題 D の各サブテーマは異なる対象やそれらからの情報発信をテーマとしているため、サブテーマ間連携はこの 10 年間に於いて必ずしも十分ではなかったものの、今後、以下のような視点での連携した展開がありうる。サブテーマ 1 と 2 では、ドローンを共通のツールとして連携しながら研究が進められた。桜島のような活動的な火山にあらかじめ複数のドローンドックを設置し、必要に応じて自動で飛行できる仕組みの構築が可能である。これにより、噴火時には火口周辺の状況を迅速に観測し、正確な降灰情報を素早く収集・提供できる。また、ドローンによる観測データ、例えば、降灰範囲や降灰量などの情報は、パーシバルを含む多項目連続観測データや降灰予測情報と組み合わせることで、より高度な防災情報に活用できる。さらに、サブテーマ 1 と 3 の連携では、この 10 年間で複数の火山で、登山者にビーコンや GPS を持たせ、動態や避難行動を把握する大掛かりな実験が行われたが、今後、ドローンにより遠隔調査することで、面的な動態把握を繰り返し実施することが可能となり、限られた季節や曜日だけに依存しない避難計画を検討することができる。加えて、サブテーマ 2 で整備された JVDN に格納される予定の、桜島の過去 10 年間の噴煙レーダー画像や降灰解析結果などの蓄積データは、噴火を経験したことのない防災担当の自治体関係者などが利用することによって、異なる規模の噴火と降灰を視覚的にイメージしやすく、多様な火山災害の対策に役立てることにつながると期待される。一方、サブテーマ 3 と 1 や 2 との連携に関しては、自治体やインフラ事業者との意見交換を通じて、噴火発生時に各現場で真に必要な情報を把握でき、それらが研究者側にフィードバックされ、観測研究や遠隔観測技術などの開発につながることが期待される。本プロジェクトは終了を迎えたが、このようなアプローチは将来展開されるプロジェクトにおいて役立てられると期待される。

最後に、サブテーマ 2 においては、本プロジェクトが目指した噴火の確率的予測を、桜島火山の降灰被害予測に対して導入することに成功した。サブテーマ 1 で取得した地形データを、課題 C サブテーマ 3 で行うハザード予測のシミュレーション、さらには、それを本課題のサブテーマ 3 でのリスク評価に使える方向付けはできた。ただし、プロジェクト期間中に、サブテーマ 1 や 2 のデータが JVDN にそのまま格納するには巨大なデータ量の課題があり必ずしも十分ではなく、それをサブテーマ 3 が活用する流れはできなかった。しかし、桜島火山の観測データや過去噴火の解析結果については、最終年度までに JVDN 上で閲覧できるように整備できた。サブテーマ 3 においては、当初目的にあった、本プロジェクトのアウトプットとして、JVDN 上の研究成果や観測データを、情報ツールを使って自治体の防災関係者に提供する流れを作ることができなかった。また、課題 C や課題 D でハザード評価までは踏み込むことができたが、自治体担当者が対策判断のために必要となるリスク評価までは提供できる状態に至らなかった。これらの本プロジェクトの不十分点は本プロジェクトの反省点として、後継のプロジェクトにおいて解決、達成できるものと期待したい。

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目 D1「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 (学会名等)	発表した時期	国内, 外 の別
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」の研究成果の概要	佐々木寿	次世代火山研究, 人材育成総合プロジェクト 成果報告会	2026年1月	国内
ドローンポートを活用した火山活動把握手法の検討	江川香	次世代火山研究, 人材育成総合プロジェクト 成果報告会	2026年1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
霧島山噴火時の航空機およびドローンによる地形計測手法	佐々木寿, 森貴章, 江川香, 千葉達朗	防災科学技術研究所研究資料 第523号	2026年3月	国内

学会等発表実績

委託業務題目 D2「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(学会名等)	発表した時期	国内・外の別	
レーダマルチセンシング観測網の有効性評価手法	-	小堀壮彦, 真木雅之, 中村啓彦, 中道治久, Hort Matthias	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内
桜島噴煙のモニタリングプラットフォーム-新たな展開-	-	真木雅之, 中村啓彦, 小堀壮彦, 西隆昭, 中道治久, 海賀勝彦, 林大介	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内
電子ブックを活用した研究成果の紹介	-	真木雅之, 佐野香那, 中村啓彦, 中道治久	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内
ライダーによる桜島火山灰の遠隔計測	-	清水厚, 中道治久, 井口正人	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内
PPI観測を付加した桜島噴煙の機動的観測	-	西隆昭, 真木雅之, 中道治久, 海賀和彦, 藤吉康志	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内
大気密度流れのLES	-	丸山敬, 内田孝紀	2025年度日本風工学会年次研究発表会	2025年6月	国内
Probabilistic forecast of Vulcanian explosions at Sakurajima volcano using statistical features of ground deformation	ポスター	Ishii Kyoka, Iguchi Masato	IAVCEI Scientific Assembly 2025	2025年6月	国外
桜島周辺における粒子計を用いた火山灰粒子連続観測	ポスター	清水厚, 中道治久	第42回エアロゾル科学・技術研究検討会	2025年8月	国内
火山噴出物の大気中における移流・拡散のモデル化の試み	-	丸山敬	日本建築学会大会講演	2025年9月	国内
2025年5月桜島噴火の船舶レーダによる噴煙観測	-	西隆昭, 真木雅之, 中道治久, 海賀和彦, 藤吉康志	日本火山学会 2025年度秋季大会	2025年10月	国内
噴火地震動から推定される噴出体積に基づくシナプン火山噴火活動の推移(2015-2018年)	-	Vico Luthfi Ipawan, 井口正人, 大倉敬宏, 為栗健, 山田大志	日本火山学会 2025年度秋季大会	2025年10月	国内
霧島山新燃岳 2025年噴火の自動降灰観測	-	瀧下恒星, 森田裕一, 小澤拓, 棚田俊收, 長井雅史, 吉澤史尚, 中道治久, 味喜大介, 竹中悠亮, 嶋野岳人	日本火山学会 2025年度秋季大会	2025年10月	国内
MSS-MHM法によるGNSSマルチパスノイズ低減手法の高度化	口頭	伊藤嘉秋, 太田雄策	日本測地学会第114回講演会	2025年10月	国内
搬送波位相残差マップに基づくRINEX観測ファイルに対するGNSSマルチパスノイズ低減手法	口頭	伊藤嘉秋, 太田雄策	GPS/GNSSシンポジウム2025	2025年12月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外 の別
Integrated Research on large-scale eruption at Sakurajima volcano,	Iguchi, M.	Journal of Disaster Research	2025年4月	国内
Special Issue on Integrated Research for Volcano Hazards Mitigation	Nakamichi Haruhisa, Geshi Nobuo, Maki Masayuki	Journal of Disaster Research	2025年6月	国内
Long-Term Lidar Observations of Volcanic Ash from Sakurajima	Shimizu Atsushi, Nakamichi Haruhisa, Iguchi Masato	Journal of Disaster Research	2025年6月	国内
Quantitative Forecasting of Volcanic Ashfall Prior to the Onset of Vulcanian Eruption by Combining Transport and Dispersion Simulation with Ground Deformation Observation at Sakurajima Volcano, Japan,	Iguchi, M., Ishii, K.	Journal of Disaster Research	2025年6月	国内
船舶レーダによる桜島噴煙の機動的観測	西 隆昭, 真木雅之, 中道治久, 海賀和彦, 藤吉康志	京都大学防災研究所年報	2025年12月	国内
Multiscale Impact Assessment of Massive Ash Fallout from a Large Eruption: What may happen if Sakurajima Taisho Eruption occurs in Contemporary Japan?	Rahadiano, H., Tatano, Y., Iguchi, M.	Journal of Disaster Science and Management	2025年12月	国外

学会等発表実績

委託業務題目 D3「火山災害対策のための情報ツールの開発」

機関名：防災科学技術研究所

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会名等)	発表した時期	国内・外の別
火山灰による様々な機器への影響に関する予備実験	ポスター 久保智弘	日本地球惑星科学連合 2025年大会	2025年5月	国内
那須岳周辺自治体および関係機関による噴火を想定した防災訓練	口頭 宮城 洋介	日本惑星地球科学連合講演会2025年大会	2025年5月	国内
富士山における火山防災教育教材の開発 - 授業実践とその効果, その2-	口頭 吉本 充宏, 久保智弘, 亀谷 伸子, 本多 亮, 藤巻 桂吾, 横山 光, ミツ井 聡美	日本惑星地球科学連合講演会2025年大会	2025年5月	国内
火山防災訓練における位置情報を利用した情報共有アプリの試用	口頭 本多 亮, 荒木田勝, 吉本 充宏, 渡部 将太, 熊本 瑞樹	日本惑星地球科学連合講演会2025年大会	2025年5月	国内
風による火山灰の再飛散が市街地の降灰分布に与える影響について	口頭 大塚清敏, 諏訪仁, 久保智弘, 宮城洋介	日本惑星地球科学連合講演会2025年大会	2025年5月	国内
市街地への降灰における風による再飛散に関する数値計算	口頭 大塚清敏, 諏訪仁, 久保智弘, 宮城洋介	2025年度比本建築学会大会(九州)	2025年9月	国内
降灰荷重に対する建物の限界降灰深の評価	口頭 諏訪仁, 最上利美, 大塚清敏, 久保智弘, 宮城洋介	2025年度比本建築学会大会(九州)	2025年9月	国内
火山周辺自治体と連携した火山防災への取り組み(御嶽山・那須岳・十勝岳)	口頭 宮城洋介	第44回日本自然災害学会学術講演会	2025年9月	国内
伊豆大島と阿蘇火山におけるてふらハザード評価:自動描画テフラ分布図の応用	口頭 中田節也, 永田直己, 上澤晋平, 宮縁育夫	日本火山学会2025年秋季大会	2025年10月	国内
御嶽山登山道に設置された放送設備による音声到達範囲調査	口頭 宮城洋介, 庄司秀明, 長房 駿	日本火山学会2025年秋季大会	2025年10月	国内
十勝岳における登山者避難行動調査「十勝岳チャレンジ2025」実施報告	ポスター 富島千晴, 宮城洋介, 田中義朗	日本火山学会2026年秋季大会	2025年10月	国内
市町村を対象とした図上訓練の実施方法に関する研究	ポスター 久保智弘	日本火山学会2025年秋季大会	2025年10月	国内
富士山の最新期山頂噴火の再検討	ポスター 亀谷伸子, 吉本充宏, 渡部将太, 西澤達治, 藤井敏嗣, 安田 敦	日本火山学会2025年秋季大会	2025年10月	国内
山梨県による火山防災イノベーション事業2025年の取り組み	ポスター 本多 亮, 吉本充宏, 藤井敏嗣	日本火山学会2025年秋季大会	2025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
Tephra hazard around Izu-Oshima and Aso volcanoes, Japan: Application of automatically generated tephra distribution map	Nakada, S., Nagata, N., Uesawa, S., Miyabuchi, Y.	Journal of Disaster Research, vol.20, no.3, 298-306	2025年4月	国外
Micro-Spatial Behavior of Volcanic Ashfall in Built-up Areas of a Large City	Otsuka, K., Suwa, H., Kubo, T., Miyagi, Y.	Journal of Disaster Research, vol.20, no.3, 287-297	2025年6月	国外
Eruption products and damage caused by the 2018 phreatic eruption of Mount Motoshirane	Kametani, N., Yoshimoto, M., Ishimine, Y., Honda, R.	In: Ohba, T., Terada, (eds) "Kusatsu-Shirane Volcano". Active Volcanoes of the World. Springer, Cham.p.21-39.	2025年7月	国外
富士山噴火への建築設備の視点からの備え	大塚清敏, 諏訪仁, 久保智弘, 宮城洋介	空気調和衛生工学会誌	2026年3月	国内
噴火イベント類一の考え方と新燃岳での試行	中田節也, 金井啓通, 永田直己	防災科学研究資料 523号, p.138-142	2026年3月	国内
地方自治体の火山防災訓練から見たニーズと研究成果の活用について	久保智弘	防災科研技術資料 523号, p.19-22	2026年3月	国内
都市における火山灰の再飛散	大塚清敏, 諏訪仁, 久保智弘, 宮城洋介	月刊地球	2026年(印刷中)	国内