

3. 研究報告

3.1 「無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発」

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成 29 年度業務目的

(2) 平成 29 年度の成果

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

(3) 平成 30 年度の業務計画案

- (a) 汎用製品（ドローン）を用いた現地実証実験（大島・桜島を予定）
- (b) 画像ならびに作成モデルの活用方法検討
- (c) 状況認識方法検討と自動化のための整理
- (d) サブテーマ間の連携

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「無人機（ドローン等）による火山災害のリアルタイム把握手法の開発」

(b) 担当者

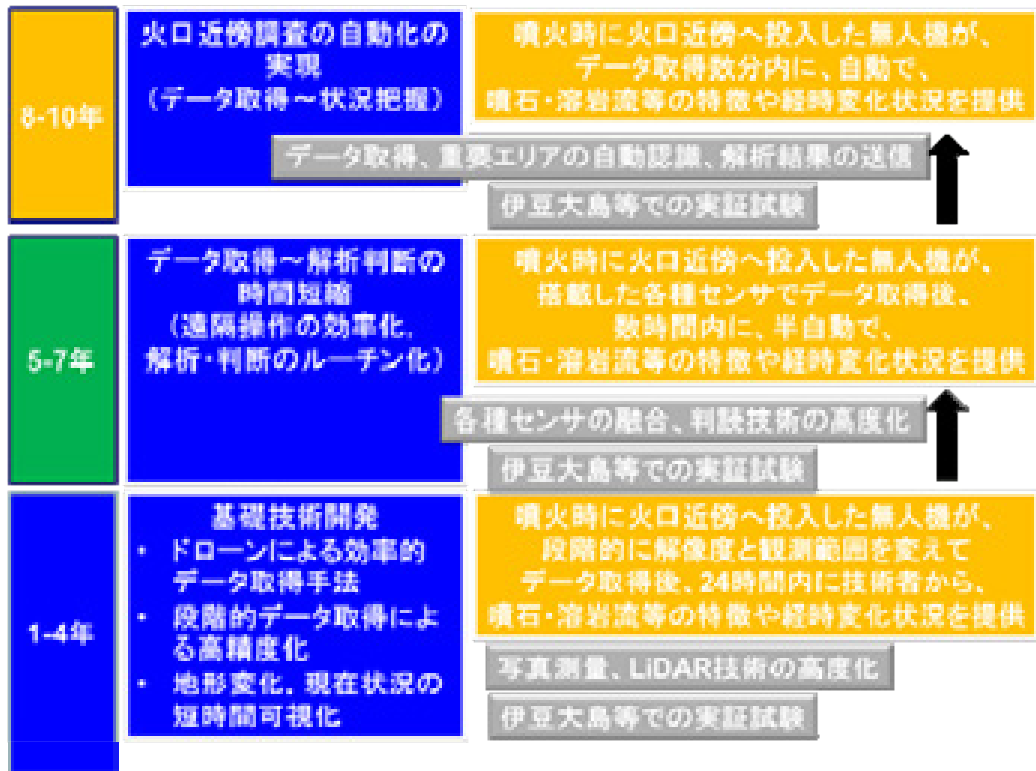
所属機関	役職	氏名	メールアドレス
アジア航測株式会社	先端技術研究所 室長	千葉達朗	ta.chiba@ajiko.co.jp
	国土保全技術部 課長	荒井健一	ken.arai@ajiko.co.jp
	国土保全技術部 主任技師	佐々木寿	hss.sasaki@ajiko.co.jp
	システム開発部 課長	野中秀樹	
	先端技術研究所 所長	織田和夫	
	事業戦略部 室長	渡辺智晴	

(c) 業務の目的

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

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

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



本業務の全体計画

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

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

表 1 火山災害状況把握のために活用可能な技術と特徴の優劣

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

3) 平成 30 年度 :

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

4) 平成 31 年度 :

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

5) 平成 32 年度 :

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

6) 平成 33 年度 :

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

7) 平成 34 年度 :

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

8) 平成 35 年度 :

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

9) 平成 36 年度 :

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

10) 平成 37 年度 :

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

(e) 平成 29 年度業務目的

近年急速に普及してきた無人機（ドローン等）について、火山災害状況把握を行う上で

参考になる事例や実際に適用された際に生じた問題などを整理する。また、国内のどこで噴火しても迅速に対応できるように、火山活動に伴う立入規制範囲等を考慮した上で、現時点で入手可能な市販の無人機・搭載機器を使用したときに必要な計測手法・設定条件や計測データの内容、無人機等の機能・仕様を調査して整理する。

また、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る。

なお、本研究では、実施期間中に噴火が起きた場合に、検討中の内容を反映する等して無人機（ドローン等）を運航して撮影した空域からの可視画像をもとに、3Dモデルを作成するなどして、ホームページで公開できるよう資料を作成する計画とした。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

近年急速に普及してきた無人機（ドローン等）について、火山災害状況把握を行う上で参考になる事例や実際に適用された際に生じた問題などを整理した。事例を参考に、火山災害発生時に迅速に状況把握するために必要な無人機等の機能・仕様や環境条件等を整理した。また、無人機（ドローン等）を用いて、写真測量技術、SfM 技術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。現地実証実験の結果から、無人機で取得した画像からモデル作成までのプロセスで、解決すべき課題を抽出できた。

(b) 業務の実施方法

1) 噴火時の無人機による観測手法の検討

a) 汎用製品（ドローン）を用いた現地実証実験（伊豆大島）

無人機（ドローン等）を用いて、写真測量技術、SfM 技術の活用等により、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。

前年度に検討した無人機（ドローン等）の最新状況や火山調査への適用事例等をふまえて、現地観測による実証実験計画に基づき、市販の無人機を使用した現地観測を行った。

b) ドローンで取得した画像を使った解析時間・解像度の検討

現地実証実験の結果から、ターゲット等の設置の有無、撮影方法・運航方法・運航時の環境条件等による撮影画像の解像度や処理時間の違いを検証した。

解析時間、解像度の検討については、取得画像を持ち帰り、写真測量技術を応用した画像解析システムや SfM 技術による 3D 化等を適用して、計測した。

c) 手法の標準化と課題整理

実証実験に必要となった諸手続きを整理し、発災時のために必要な手続きの簡素化や、突発的噴火に対処するための体制、安全管理方法の課題等について、現地実験の一連の流れを通じて経験したことをふまえて整理した。また、実現に向けた対応の標準的流れや、必要な書類書式、留意事項等をフロー形式等でとりまとめた。

上記までの検討結果について、実用可能なドローンを用いて火山状況を把握する際のノウハウ、活用できる技術、現状の問題点についてとりまとめた。また、ドローンで取得したデータの活用・解析技術の普及のために、火山研究者及びその関係者に対して、外部発表等を通じて働きかけを行った。

(c) 業務の成果

1) 汎用製品（ドローン）を用いた現地実証実験（伊豆大島）

平成 29 年 9 月 14 日・15 日に伊豆大島で実証実験をした。H28 年度に検討した市販ドローンのうち、固定翼タイプとマルチコプタータイプの 2 種類を選定して使用することとして飛行許可・申請を実施した。伊豆大島現地では、三原山火口内やカルデラ内の写真・動画撮影と、SfM による 3D モデル作成を実施した（図 1 ; 図 2）。

現地では、運航・撮影、空中三角測量、3D モデル作成のそれぞれの段階に掛る所要時間や運航時の注意事項等を把握して整理した。撮影は比較のため手動運航と自律航行をそれぞれ実施した。実験を通して明らかになった運航に関わる注意事項を以下に記す。

- ① 国土交通省、航空局への申請、認可までに最低でも 10 日間の時間が必要であった。
- ② 運航する機体ごとに操縦経験者が必要であり、日頃から操縦訓練を継続的に行える組織人員・環境の確保が課題になる。
- ③ 噴火時の警戒区域（立入規制）外からの離発着や、高高度・遠距離の運航に関わる動力確保、天候不順時の自律航行対応、作成するモデルの品質を考慮した飛行計画の立案等の課題を解決していく必要がある。

なお、現地撮影後ただちにノート P C で取得画像を確認した。ノート P C に搭載した SfM ソフトウェアを用いて計画範囲で取得した画像に不足や不鮮明等がないか確認して、不足する場合には補足撮影を実施した。



図 1 実験で使用したマルチコプターと固定翼機

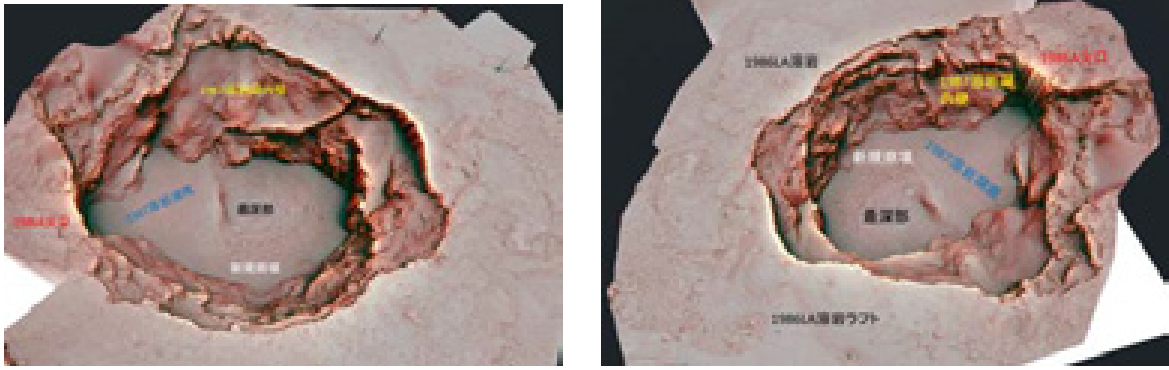


図2 ドローン画像から作成した三原山中央火口の3Dモデル

2) ドローンで取得した画像を使った解析時間・解像度の検討

伊豆大島で取得した画像（火口付近 983 枚、山麓 178 枚）を使い、撮影環境やモデル作成条件の違いを検証した（表1；表2）。その結果、モデルの品質と処理時間にトレードオフが存在することが分かった。また、モデル作成に使用する画像の枚数が増えると、同じ作成品質でも処理時間が大幅に伸びている。本研究の目的である「迅速な状況把握」を考えると、モデル作成に用いる画像の枚数は表1、2の結果から～500枚程度が適切ではないかと考えられる。

取得画像をもとに SfM 技術を適用したモデル化作業を実施した。デスクトップ PC での解析処理に加えて、現地作業を想定したノート PC による処理を実施した。また、処理時間や処理に掛る設定条件を変化させたときの成果の違いを比較検討した。

作成したモデルをもとに、火山地形の確認や遠隔から直接確認できない火口内のオーバーハング部等の形状、規模等を把握できた（図4）。また、三原山火口内モデルを構築できたことによって、現在の火口内空間の容積が 1000m^3 であることがわかった。

画像に Exif 情報が含まれていない場合、カメラパラメータや、飛行ログを使用し座標を付与してモデルを作成する必要があることがわかった。

使用する画像の内容や枚数、制約時間などの違いによる作成モデルの品質評価を実施した。評価する際の比較サンプルとして国土地理院の地形図や基盤地図情報標高 5mDEM 等を使用した。また、災害時の状況把握を想定して、モデル作成条件ごとの現地の構造物や作業員の識別度を整理した（図5）。

表1 各モデル作成品質に要する処理時間①

使用データ	三原山火口周辺撮影データ 983 枚(画像サイズ 5472×3078)			
モデル作成品質	最低	低	中	高
処理工程	処理時間 (分)			
アラインメント	9	37	107	158
高密度(Dense)クラウド構築	30	576	2714	22800
メッシュ構築	1	2	14	64
テクスチャ構築	17	11	13	17
合計	57	626	2848	23039

表2 各モデル作成品質に要する処理時間②

使用データ	三原山麓周辺撮影データ 178 枚(画像サイズ 5280×2970)			
モデル作成品質	最低	低	中	高
処理工程	処理時間 (分)			
アラインメント	1	2	2	3
高密度(Dense)クラウド構築	2	2	6	42
メッシュ構築	1	3	19	457
テクスチャ構築	4	5	7	11
合計	8	12	34	513

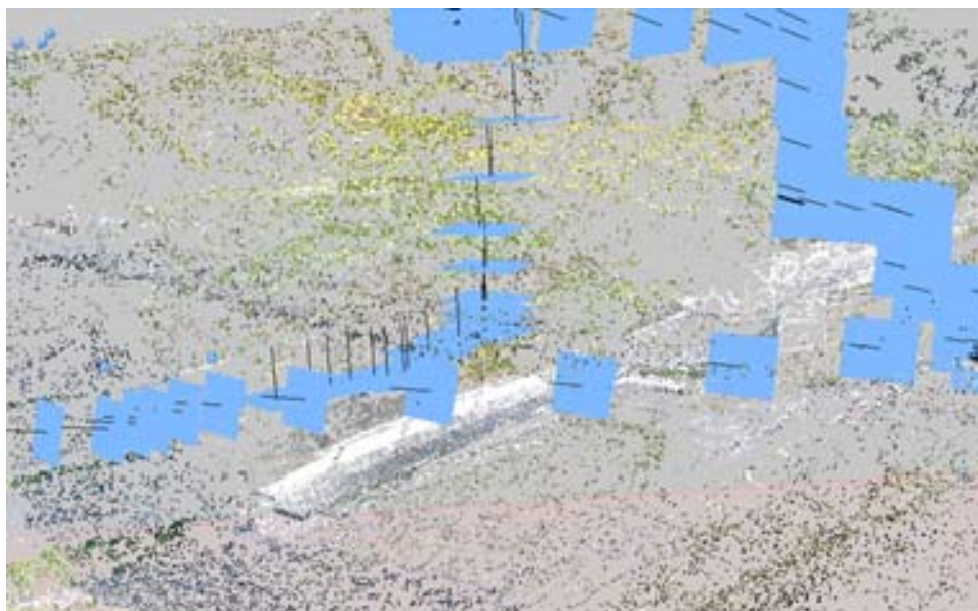


図3 SfM ソフトウェアによる空中三角測量結果の確認例

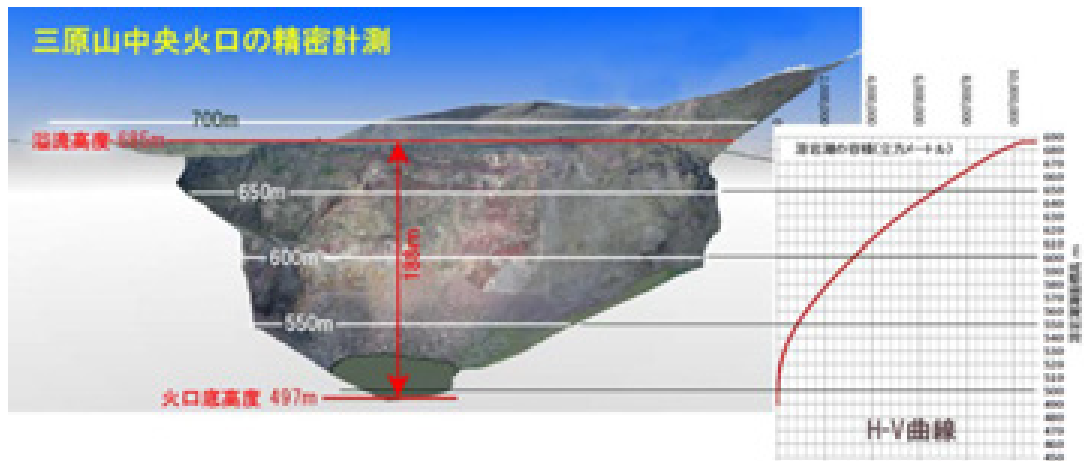


図4 精密地形モデルから推定した三原山中央火口の容積

テクスチャサイズ 4096pix

テクスチャサイズ 8192pix

テクスチャサイズ 12288pix

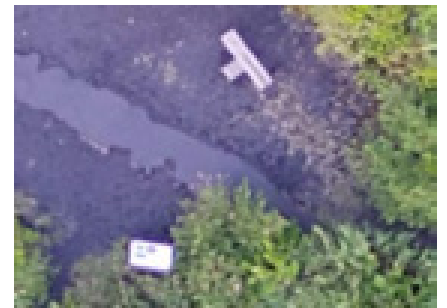
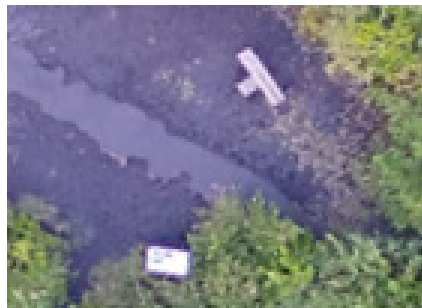


図5 テクスチャサイズによる構造物の認識比較

2018年3月1日からの新燃岳噴火を対象に、斜め写真から3Dモデルを作成、溶岩体積を推定してプロジェクトメンバー並びに火山噴火予知連絡会へ資料提供した。斜め写真撮影は朝日新聞社と熊本大学の協力を得て実施したものである。写真からSfMを用いて三次元モデル・数値表層モデル(DSM)を作成し、さらに赤色立体地図を作成した。噴気により三次元モデルが一部作成できていないエリアおよび精度が低いエリアがある。噴火前の数値標高モデル(DEM)と、作成した数値表層モデル(DSM)の標高差分から、2018年3月9日15時頃の溶岩体積を $15 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定した。また、火口縁付近の溶岩の厚さは作成した地形モデルを使うことで最大20m程度と推定できた。

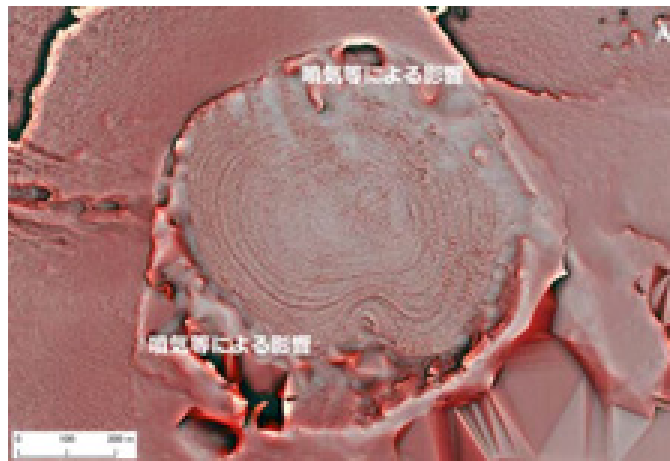


図6 噴火後の新燃岳火口周辺の3Dモデル(2018年3月9日15時頃)

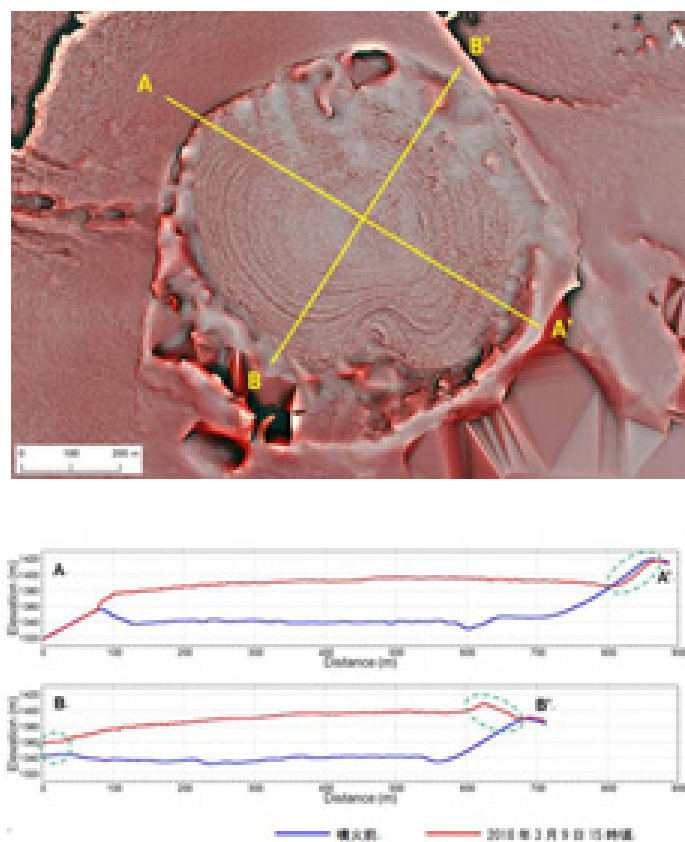


図7 火口の断面図(緑点線の範囲は噴気の影響が大きく精度が低い部分)

3) 手法の標準化と課題整理

実証実験を通じて作成・整理した書類や手続内容を整理するとともに、発災時の状況を想定して課題を抽出した。また、噴火活動時の噴火警戒レベルに伴う立入規制等をふまえた安全管理方法、噴火発生から運航・画像取得・モデル作成に要する想定時間等をふまえた課題を検討した。

SfMによる高精度な3次元モデル作成処理は、高スペックなPCと多大な処理時間を必要とすることが明らかとなった。しかし、短時間で低精度な3次元モデル（簡易3次元モデル）を作成しても、地形形状の乱れが生じることや、テクスチャ画像が劣化し、詳細な状況確認には不向きなことも判明した。

現地実験とモデル化作業をふまえて目的に合致したドローン選定の再検討を行うとともに、本サブテーマに求められている対象火山とその状況を再整理した上で、必要なセンサー等について検討した。

実証実験とその後の課題抽出・整理結果をふまえて、現段階で標準化のための整理を行った。現場での実証実験では、現場でモデルの作成を行ったもののPCのスペックが足りなかったため、モデル作成の処理が長時間となった。そのため、CPU:Corei7以上・実装メモリ32GB以上・GPU:GeForce GTX 1080程度のスペックは必要となると考えられる。モデル作成にかかる時間は解像度と枚数の違いによって変化するが、特に枚数が多い場合に処理時間が長くなるため、一回の撮影範囲を狭めるか、撮影画像枚数を減らす必要があると考えられる。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成29年度の目的であった無人機（ドローン等）を用いて、写真測量技術、SfM技術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。平成30年度には計画にそって現地実験を行い、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するための取り組みを行う予定である。

なお、今年度の伊豆大島での現地実証実験では現場でモデルの作成を行ったもののPCのスペックが足りなかったため、モデル作成の処理が長時間となった。モデル作成にかかる時間は解像度と枚数の違いによって変化するが、特に枚数が多い場合に処理時間が長くなるため、一回の撮影範囲を狭めるか、撮影画像を500枚程度に減らす必要があるとわかった。今後、これらのプロセスを高速化・高精度し、最終的には、噴火中の火口のリアルタイム状況把握手法の開発を行う計画である。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
千葉達朗・佐々木寿・荒井健一・佐野実可子	UAV 撮影による阿蘇山 2016 年 10 月 8 日噴火の状況把握	2017 年地球惑星科学連合大会（千葉市）	平成 29 年 5 月 21 日
千葉達朗・佐々木寿・荒井健一・佐野実可子	UAV による阿蘇中岳 2016 年噴火による地形変化の計測	日本火山学会 2017 年秋季大会（熊本市）	平成 29 年 9 月 23 日
千葉達朗	UAV による阿蘇山 2016 年噴火災害の状況把握	平成 29 年度土木学会全国大会研究討論会（資料 01 複合的自然災害に関する工学的視点からみた地域防災の有り方）	

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

(a) 汎用製品（ドローン）を用いた現地実証実験（大島・桜島を予定）

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 の活用等により、時間と抽出変化の内容・解像度の違いについて、市販の無人機等を使用した現地実証試験を通じてとりまとめる。

伊豆大島、阿蘇山等で実施した無人機（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する。さらに、阿蘇山や新燃岳、草津白根山等の近年の噴火事象の時間経過を整理して、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計画する。

あわせて、現地実証実験では、現象発生から初期状況把握までの総時間短縮のために、全体作業動作を点検する。

(b) 画像ならびに作成モデルの活用方法検討

無人機（ドローン等）で取得したデータから、3Dモデルだけでなく、詳細現地画像を

素早く提供するためのルーチン作成とシステム活用方法を検討する。

無人機（ドローン等）画像等から作成した3Dモデルをもとに、影響予測シミュレーション等で素早く使える形式での地形データ形式への変換・加工・提供方法を検討する。

(c) 状況認識方法検討と自動化のための整理

火口周辺亀裂、噴石等の新規火砕物や溶岩流等の流向・噴出量、性質や経時変化等の認識方法等の既往研究事例の収集整理と、取得した画像や3Dモデルから状況把握を自動化するための方法を検討する。

(d) サブテーマ間の連携

過去2ヶ年の成果や状況把握ルーチンの現地実証実験等を通して、同一課題内での連携を推進する。具体的には、サブテーマ2とは大量降灰時にドローンを活用した地形変化抽出を行い予測降灰量と照合することを目的として、桜島における実証実験を計画して実施する。サブテーマ3とは取得画像や作成3Dモデルを、避難・救助支援コンテンツのインプットデータとして利用するための計画を立案する。

3.2 「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 10か年の年次実施計画
- (e) 平成29年度業務目的

(2) 平成29年度の成果

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

(3) 平成30年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人京都大学	教授	井口 正人	iguchi.masato.8m@kyoto-u.ac.jp
国立大学法人京都大学	准教授	中道 治久	
国立大学法人京都大学	助教	山本 圭吾	
国立大学法人京都大学	助教	味喜 大介	
国立大学法人京都大学	助教	為栗 健	
国立大学法人京都大学	特定研究員	堀田 耕平	
国立大学法人京都大学	教授	石川 裕彦	
国立大学法人京都大学	准教授	竹見 哲也	
国立大学法人京都大学	特定研究員	Alex Poulidis	
国立大学法人京都大学	教授	丸山 敬	
国立大学法人京都大学	特定教授	辻本 浩史	
国立大学法人京都大学	特定准教授	佐々木寛介	
国立大学法人京都大学	特定助教	志村 智也	
国立大学法人京都大学	助教	古本 淳一	
国立大学法人京都大学	博士学生	日向 洋	
国立大学法人鹿児島大学	特任教授	真木 雅之	
国立大学法人鹿児島大学	特任准教授	石峯 康浩	
国立大学法人鹿児島大学	外来研究員 (釜慶大学)	Kim Yura	
国立大学法人鹿児島大学	特任研究員	高橋 忍	iguchi.masato.8m@kyoto-u.ac.jp
国立大学法人鹿児島大学	外来研究員 (釜慶大学)	Dong-In Lee	
	外来研究員 (釜慶大学)	Suh Sun-Ho	
国立大学法人筑波大学	教授	田中 博	
国立大学法人神戸大学	教授	大石 哲	
国立大学法人東北大学	准教授	太田 雄策	
国立大学法人東京大学	助教	鈴木雄治郎	
国立研究開発法人国立環境研究所	主任研究員	清水 厚	

一般財団法人日本気象協会 メトロウェザー株式会社	主任研究員 代表取締役	井上 実 東 邦昭	
-----------------------------	----------------	--------------	--

(c) 業務の目的

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

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成28年度：

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

2) 平成29年度：

桜島等5火山においてレーダー観測を開始し、既存のリモートセンシング観測を強化したうえで、降灰量との比較を行う。火山灰拡散予測の高速度化のためにデータベースを整備する。また、高精度化のために、再現された風速場を観測により検証するとともに、火山灰拡散モデルを改良する。

3) 平成30年度：

リモートセンシング観測および風などのモデルと観測量の相関の高精度化を図る。地盤変動及び火山性微動振幅から求められる噴出率から推定される噴煙柱高度、噴煙外形を火山灰粒子の初期座標とするように、火山灰拡散シミュレーションを改良する。観測量に基づく、粒径分布および粒径毎の落下速度をシミュレーションに組み込む。

4) 平成31年度：

リモートセンシング観測から推定される火山灰の3次元濃度分布を可視化し、サブテーマ3火山災害対策のための情報ツールの開発に解析結果を出力する。観測とモデルから推定される火山近傍の風速ベクトルを火山灰拡散シミュレーションに組み込むことにより、高精度化を図る。

5) 平成32年度：

平成32～34年度は、長時間継続する噴火に対応するために、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムを開発する。当該年度は、システム設計を行う。火山近傍での風の

データ同化による予測を試みる。

6) 平成33年度：

引き続き、火山灰拡散予測のためのオンラインシステムの開発を進める。大規模噴火による火山灰の広域拡散に対応するために、レーダーデータの合成処理手法を開発するとともに、3次元火山灰濃度分布を多点 GNSS 観測から推定する手法の広域化を図る。移動用ライダー装置の運用について研究する。

7) 平成34年度：

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

8) 平成35年度：

平成35～37年度は、噴火発生前の降灰確率の予測をめざす。過去の地盤変動データを整理し、前駆地盤変動継続時間および圧力源の前駆体積変化量をデータベース化して、発生時刻と規模の確率的予測を行う手法を開発する。また、気象庁により提供される風速ベクトル予測値から複雑な火山地形を考慮した高分解能の風速ベクトル場を予測する研究を行う。

9) 平成36年度：

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

10) 平成37年度：

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

(e) 平成29年度業務目的

桜島に X バンド MP レーダー、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシ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のためのマルチパラメータ観測網を構築して、火山灰予測のためのパラメータを決定するための観測を開始する。火山灰拡散予測の高速化するためには、噴火発生時の地震動や地盤変動データを解析することにより噴煙高度を求める。また、高精度化のために気象モデルを用いて高精細な風速場を再現し、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・風速観測を開始し、気象モデルの妥当性を検討する。

(2) 平成29年度の成果

平成29年度に実施した業務の柱は、「リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発」、「火山灰拡散予測の高速度化技術開発」、「火山灰拡散予測の高精度化技術開発」である。即時把握技術開発においては、これまでのGNSS、ライダー光学観測に加えXバンドMPレーダーの観測も開始した。マルチパラメータ観測網が起動し、火山灰観測がリアルタイムで行える状態が完成した。予測の高速度化技術においては、噴火に伴う地盤変動量から火山灰放出量及び噴煙高度の上限を求める経験式の妥当性を確認した。予測の高精度化においては、ドローンやドップラーライダーを用いた山岳地域での3次元の風速ベクトルの観測を異なる季節において実施した。さらに、複雑な火山地形上での風のシミュレーションを行い、観測された風の場合と比較し、シミュレーション結果の妥当性を検証した。

(b) 業務の実施方法

1) プロジェクトの総合推進

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

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

桜島においてはGNSSとライダー光学観測によるリモートセンシング観測に加え、2台のXバンドMPレーダーによる観測を開始した。また、4台のディストロメータを増設し、地上降灰量観測を強化した。既存データを解析してレーダーの反射強度と火山灰放出量の関係を検討した。また、21世紀以降噴火が発生した霧島山、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてもそれぞれ1台のXバンドMPレーダーによる観測を開始した。

3) 火山灰拡散予測の高速度化技術開発

2017年に桜島において新たに発生した火山噴火について、地震及び地盤変動データと噴煙高度の関係を検討し、噴出量及び噴煙高度を求める関係式を改良した。また、桜島南部の古里観測井に設置された埋設型地震・傾斜計を引き上げて改修し、地震及び地盤変動データの高精度化を図った。

4) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

火山体周辺では風速場が複雑なので、分解能の高いDEMを用い気象モデルに基づき、風の場合を再現する。風速場を予測するために、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・風速観測を実施し、気象モデルの妥当性を検討した。

火山灰拡散シミュレーションでは分解能の高い風速場におけるシミュレーションに着手した。また、粒子の初期座標を3次元配置に拡張し、2017年に桜島において発生した噴火の降灰分布と照合してその妥当性を検討した。

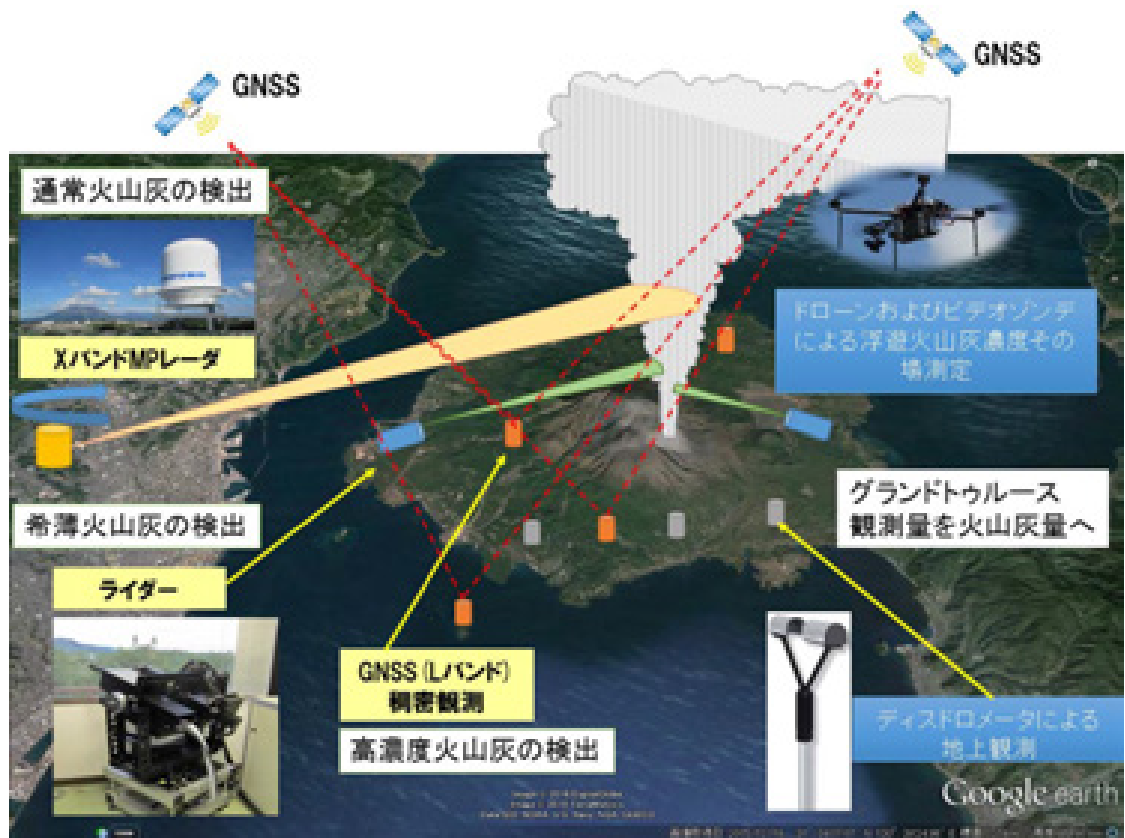


図 1 火山灰のマルチパラメータ観測の概要

(c) 業務の成果

1) プロジェクトの総合推進

平成 29 年 5 月 25 日に東京で打ち合わせを行い、また、平成 30 年 1 月 6 日には桜島において研究集会を開催した。東京での打ち合わせは課題 D 全体の連携、特に、課題 D サブテーマ 3 や課題 C サブテーマ 3 との連携について議論し、課題 D サブテーマ 2 の降灰量などの観測量を課題 D サブテーマ 3 に伝送することで合意した。また、桜島での研究集会では、課題 D サブテーマ 1 が解析するドローンによる画像データを桜島で取得することや、課題 D サブテーマ 2 で得られたレーダー観測データや降灰量予測値、及び火山灰やレキの空力特性を課題 D サブテーマ 3 に反映する方法について議論した。

2) リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

2-1) マルチパラメータ観測網の構築

桜島にレーダー、GNSS、ライダー光学観測によるリモートセンシングおよびディストロメータを用いた地上観測からなる火山灰観測のためのマルチパラメータ観測網を構築した。このうち、平成 29 年度に新たに観測を開始したのは、X バンド MP レーダー 2 台、GNSS 4 台、ディストロメータ 4 台である。図 1 にマルチパラメータ観測の概要を示す。

a) レーダー観測

21世紀以降、噴火が発生した霧島山、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島において、XバンドMPレーダーによる観測を開始した。設置場所は表1に示す通りである。また、走査の方位角等のパラメータは表2に示す。

表1 レーダー基地局の場所

火山名	施設名	住所	緯度・経度・標高
霧島山	霧島市立牧園中学校	鹿児島県霧島市牧園町 宿窪田751-1	31.85784, 130.75134 標高208m
桜島	京都大学防災研究所 火山活動研究センター	鹿児島県鹿児島市桜島 横山町 1722-19	31.58960, 130.60115 標高26.8m
桜島	鹿児島県立錦江湾高 等学校	鹿児島県鹿児島市平川 町4047	31.445607, 130.507227 標高88.5m
薩摩硫黄島	三島村竹島焼却所	鹿児島県鹿児島郡三島 村竹島	30.81314, 130.40938 標高59m
口永良部島	口永良部島避難所	鹿児島県熊毛郡屋久島 町口永良部島番屋が峰 207-4	30.470361, 30.176036 標高265.1m
諏訪之瀬島	諏訪之瀬島キャンプ場	鹿児島県鹿児島郡十島 村諏訪之瀬島	29.61125, 129.70547 標高103m

表2 レーダーの走査モード及びパラメータ

火山名	HSQ スキャン	セクターRHI スキャン	
	仰角 (°)	方位角 (°)	仰角範囲 (°)
霧島山	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	50~80	6~30
桜島 (センター)	15, 25, 30, 35, 40, 50, 60	95~115	11~45
桜島 (錦江湾)	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30	設定なし	
薩摩硫黄島	5, 10, 15, 20, 30, 45, 60	設定なし	
口永良部島	5, 10, 15, 20, 25, 35, 45	設定なし	
諏訪之瀬島	10, 15, 20, 30, 40, 50, 60	設定なし	

レーダーの設置状況を図2及び図3に示す。



図 2 レーダーの設置状況。鹿児島県立錦江湾高等学校に設置したもの。

使用したレーダーは古野電気（株）製 WR-2100 である。中心周波数は 9432.5MHz、空中線出力は 100W であり、およそ 30km の範囲を観測することが可能である。レーダーの観測範囲を図 4 に示す。データ収録装置（PC）により、制御され、生データはハードディスクに収録される。PC により雨量データに変換され、雨量データは火山活動研究センターのサーバーに転送される。生データはデータ量が大いので、定期的にハードディスクを交換することとした。

対象とした 6 火山のうち、霧島新燃岳、桜島、諏訪之瀬島において噴火が発生した。



図 3 レーダーの設置状況。霧島市立牧園中学校に設置したもの。

霧島新燃岳において2017年10月及び2018年3月に噴火が発生した際に取得されたレーダー反射強度の画像を図5及び図6に示す。2017年10月の一連の噴火活動での噴煙の最高高度は火口縁上2000mとされている。10月12日の12時ごろにはレーダーエコーは火口縁上2000mに達したことがわかる。

2018年3月9日のブルカノ式噴火では、噴煙高度は火口縁上3200m（海拔高度4633m）に達した。レーダーエコーの高度は約5000mまで観測された。4月5日のブルカノ式噴火では火口上2500m（海拔高度3932m）において雲入りと気象庁の地上観測では報告されている。レーダーでは、エコーが約9000mの高度まで観測されている。気象衛星データの解析により、火口縁上約8000mまで上がったと推定されており、レーダーエコーの高度は、気象衛星の解析結果とほぼ一致している。

桜島では、ブルカノ式噴火が頻繁に発生するが、2017年11月13日22:07に発生した南岳山頂火口のブルカノ式噴火は2017年に桜島において発生した噴火で最大規模である。山頂の上空は雲がかかっていたので、噴煙高度は報告されていないが、南岳火口から5.6kmの距離の桜島火山観測所に設置したレーダーでは、海拔高度約4kmまでエコーを追跡できた（図7）。



図4 XバンドMPレーダーの観測範囲

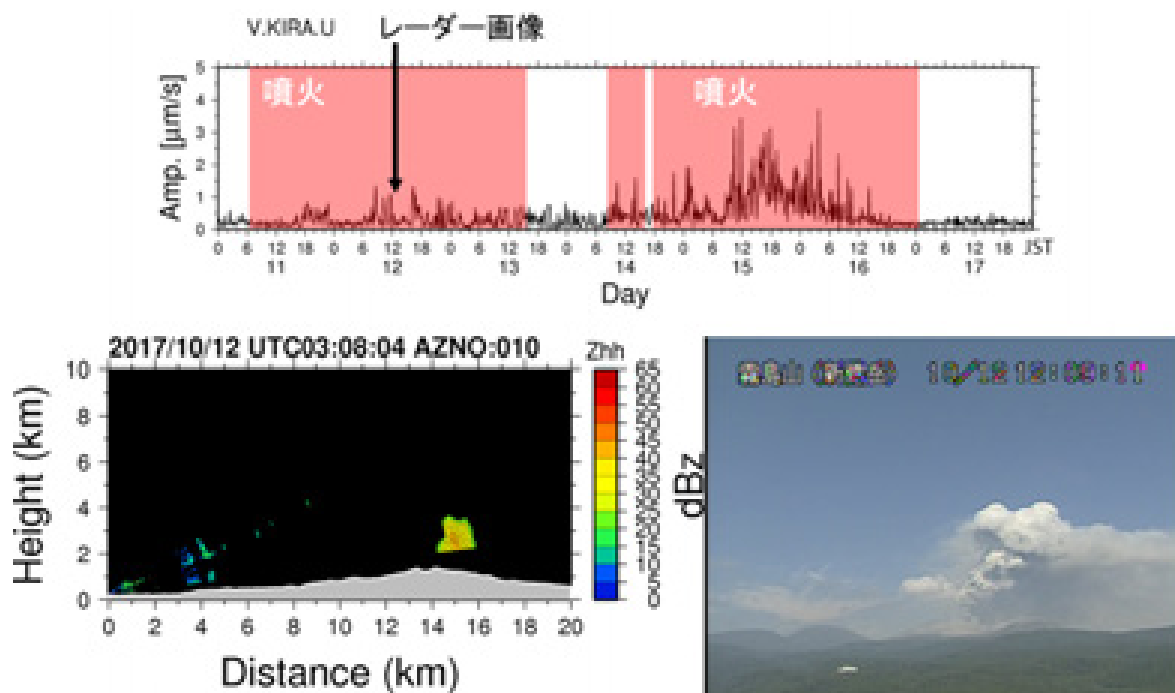


図5 2017年10月12日の霧島新燃岳噴火に伴う噴煙のレーダー強度画像。噴煙高度は火口縁上2000mと気象庁から報告されている。上段は地震動振幅を示す。

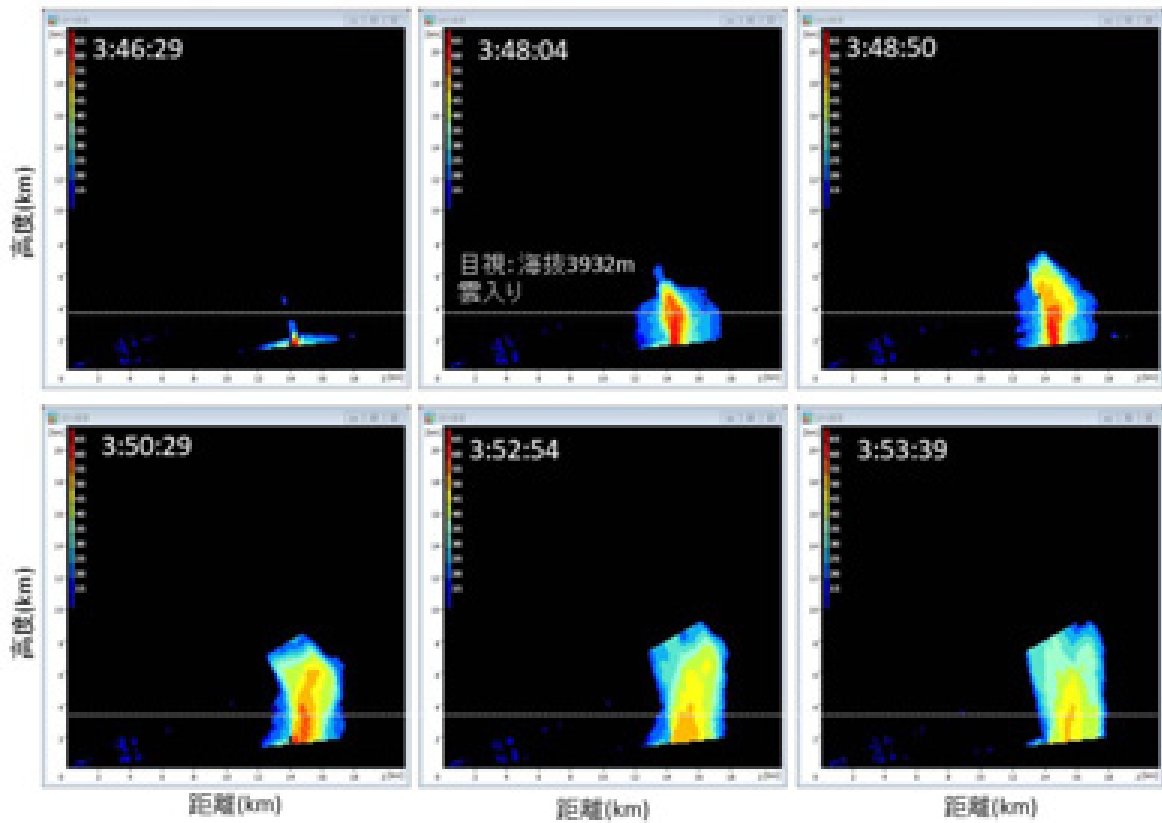
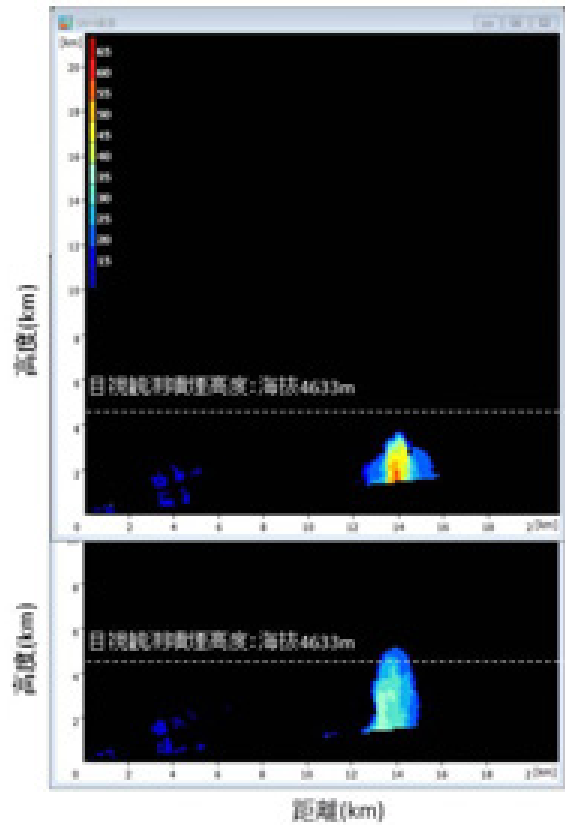


図6 2018年3月9日(上)及び4月5日(下)の霧島新燃岳におけるブルカノ式噴火に伴う噴煙のレーダー強度画像。

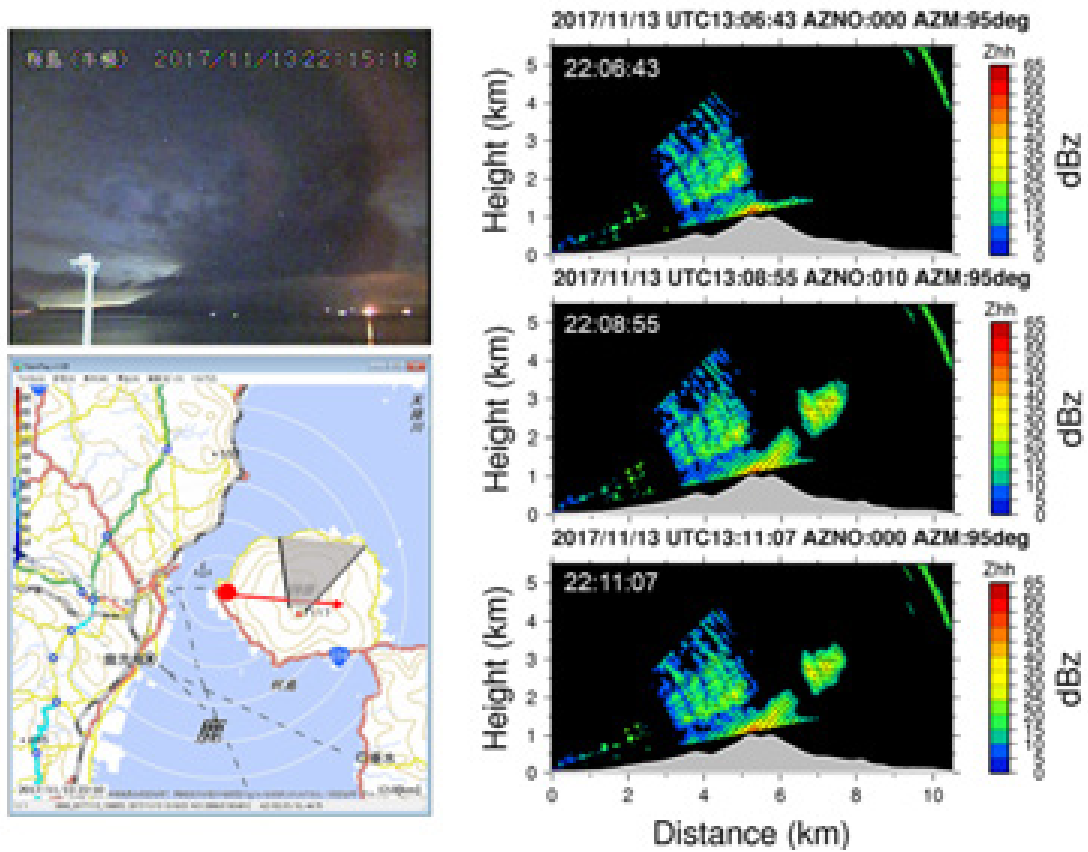


図7 桜島火山観測所に設置したレーダーにより観測された2017年11月13日22:07の桜島南岳の爆発的噴火の噴煙の反射強度。降灰は北北東（白浜方方向）へ飛散した。



図8 錦江湾高等学校に設置したレーダーにより観測された2017年11月13日の桜島南岳爆発的噴火の噴煙反射強度。錦江湾高等学校に設置したレーダーではHSQ スキャンでデータが取得されるが、高度4.2kmまではエコーが検出できたが、高度6.2kmではエコーが検出されなかった。

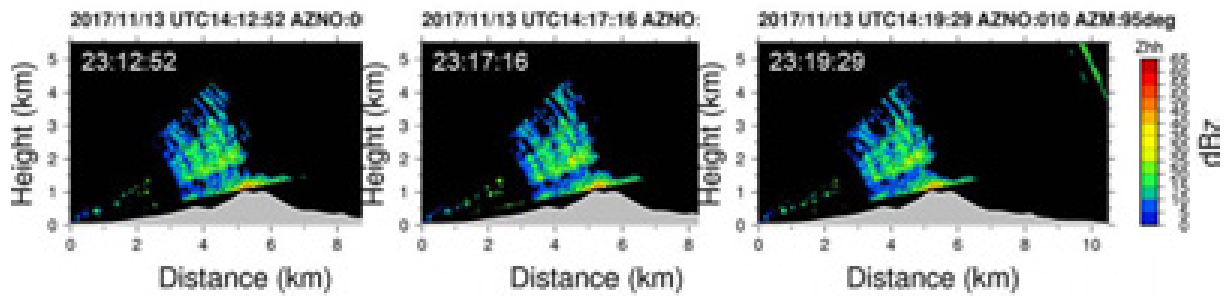


図9 2017年11月13日22:07の桜島南岳の爆発的噴火に引き続き発生したストロンボリ式噴火に伴う噴煙のレーダー反射強度。桜島火山観測所のレーダーによる観測。

桜島の南西20kmの錦江湾高等学校に設置されたレーダーでは海拔高度4.2kmのHSQスキャンで噴煙のエコーが検出されているが、6.2kmのスキャンでは検出できていない(図8)。このことから噴煙は5km程度の高度に到達したものと推定される。

また、桜島火山観測所に設置されたレーダーは南岳から距離5.6kmと近いので、低高度の噴煙も検出可能である。11月13日22:07に発生したブルカノ式噴火に引き続き、30分後からストロンボリ式噴火が約1時間半継続したが、火口から約1km程度の高さまでエコーを確認できた(図9)。

b) ライダー観測

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

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

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

2017年10月1日の1日間の自動解析を図10に示す。この日は6:26、9:51、10:12、20:31、21:35、22:01、23:50に昭和火口において噴火が発生しており、このうち、21:35は爆発的噴火であった。強い後方散乱を示す場所は南岳から放出される噴煙に対応する距離 5300mにあるが、5:30 ごろから8時過ぎにかけて強い後方散乱を距離が 500m 付近と減少しており、火山灰が桜島火山観測所に接近したことがわかる。同様の散乱体距離の減少は21時から22時ごろにもみられ、いずれも噴火に対応している。これに対応して大きい消散係数を示す部分が、距離 500~2000m に現れた。

ライダー装置から様々な情報が得られるが、今年度は大気中に浮遊する微小粒子の大きさを2波長比から検討した。使用しているライダーは波長 1064nm と、偏光方向が 90 度異

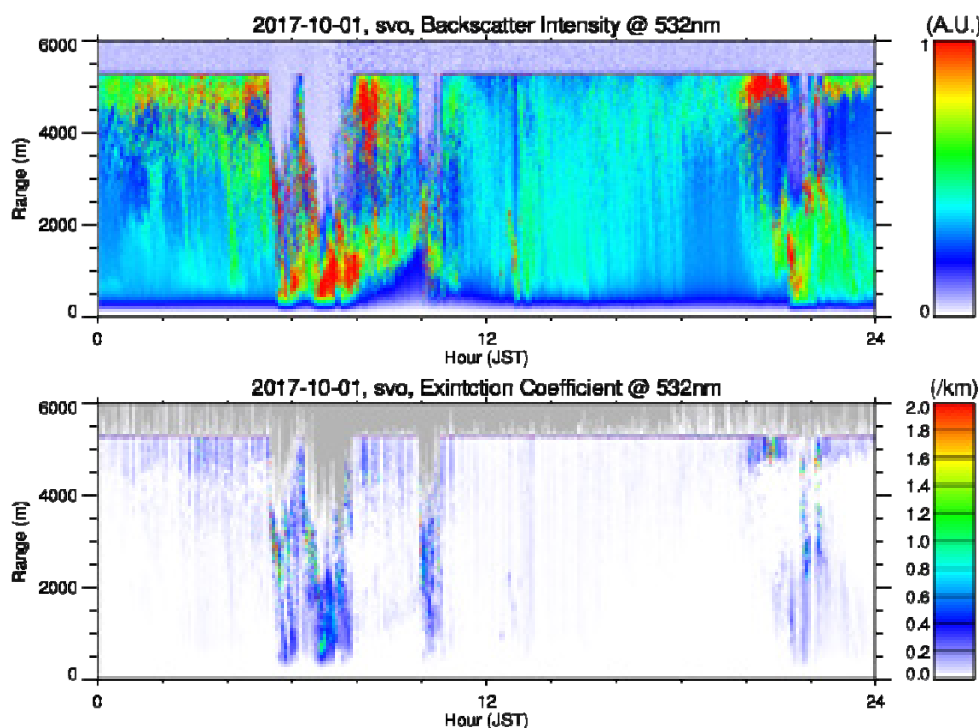


図10 2017年10月1日に桜島火山観測所のライダーにより観測された後方散乱強度(上)と消散係数。消散係数は観測ボリューム内の粒子表面積総和に概ね比例し、偏光解消度は非球形粒子が存在する場合に0でない値が得られる。

なる 2 種類の 532nm の波長のレーザーを発射するが、2 波長比とは、2 種類の 532nm レーザー光の散乱強度の和に対する 1064nm のレーザー光の比である。2 波長比が大きければ、散乱粒子の粒径が大きいと推測される。爆発的噴火については、時間の経過とともに 2 波長比は減少する（図 11）。大きい粒子が短時間で落下し、小粒径のものが長時間浮遊している状態であることが推定される。一方、多量の水滴と少量の火山灰粒子で構成されると考えられる白色噴煙では、火口上空から離れ、時間が経過するとともに、2 波長比は増加した（図 12）。火山灰粒子が水滴よりも大きければ、火口から離れるにつれて水滴の蒸発により、火山灰粒子が残り、2 波長比が増加したのかもしれない。

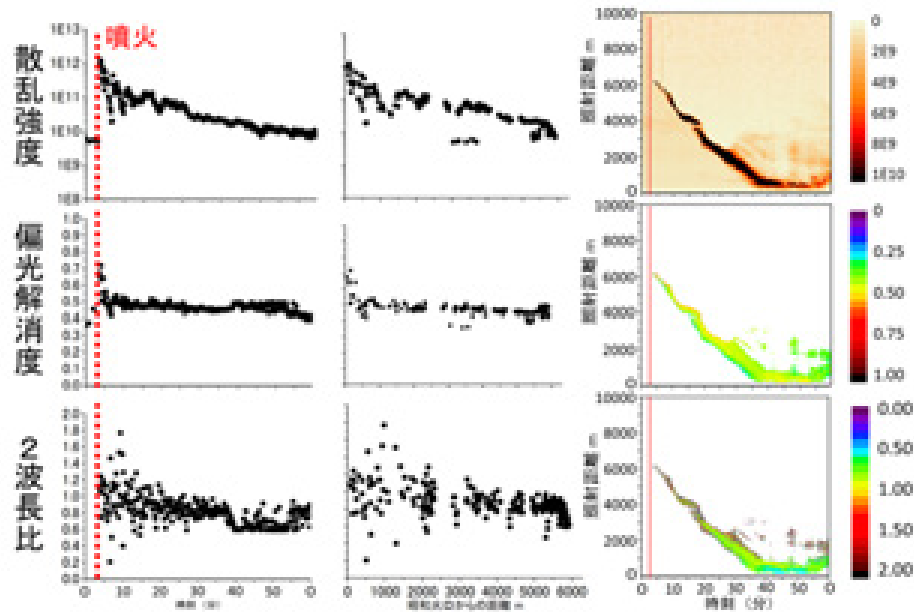


図 11 2016 年 7 月 26 日の昭和火口における爆発的噴火に伴う散乱強度、偏光解消度、2 波長比の時間変化、

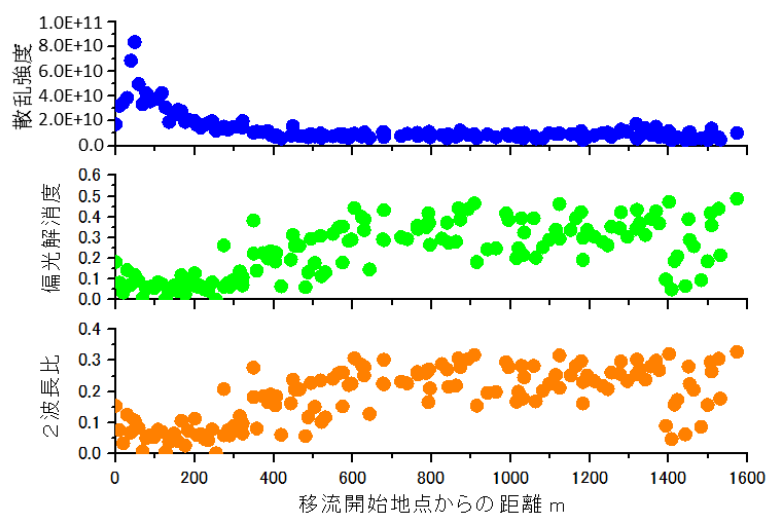


図 12 白色噴煙が定常的に放出されている時の散乱強度、偏光解消度、2 波長比の空間分布

c) GNSS 観測

GNSS を用いた火山灰モニタリングシステムの構築に向けて、GNSS 解析時の位相残差とその信号強度である SN 比データの比較を行っている。桜島における GNSS 観測点の配置を図 13 に示す。桜島の爆発的噴火により放出された火山灰では、位相残差と SN 比にそれぞれ特徴的な変化が確認され、これらのデータに反映される物性が異なる可能性が明らかになった (Ohta and Iguchi, 2015) ¹⁾。

この手法を 2017 年 11 月 13 日に桜島南岳において発生した爆発に適用した。この爆発は 2017 年に桜島で発生した最大規模の噴火である。山頂に雲がかかっていたので、噴煙高度は発表されていない。GNSS 解析の位相残差 (PPR) を用いて、噴煙柱の解析を行った。火山灰は北東方向に移流したので、桜島北東部の GNSS 観測点において PPR を検出できた。例えば、SNYM 観測点では、爆発発生後の 6 分後に 3 cm の PPR を検出できた (図 14)。3 cm の PPR は 2012 年 7 月 24 日に発生した南岳爆発の PPR より小さいが、ノイズレベルを十分超える大きさである。KURG でも同期する PPR の増加を検知できており、SNYM および KURG と GNSS を結ぶ直線の交差点の高度は 4.1 km となることから高濃度の噴煙は少なくとも 4 km 以上の高度に到達していたことがわかる。

11 月 13 日の爆発は、22:07 に噴火を開始し、一旦噴出率を低下させたのち、23 時ごろからはストロンボリ式噴火の活動が活発化したことが地震及び空振記録から推定されている。ストロンボリ式噴火の活動が活発化した時間帯には、桜島北部の観測点である FUTG や GSI0719 において、PPR が約 30 分にわたって 2~3 cm の値を保った (図 15)。噴煙高度については検討を要するが、噴煙の方向が桜島上空では北向きに変ったことが推定できる。このように GNSS の PPR は雲がかかって噴煙が目視できない状態でも、噴煙の拡散状態及びその変化を把握できる可能性がある。

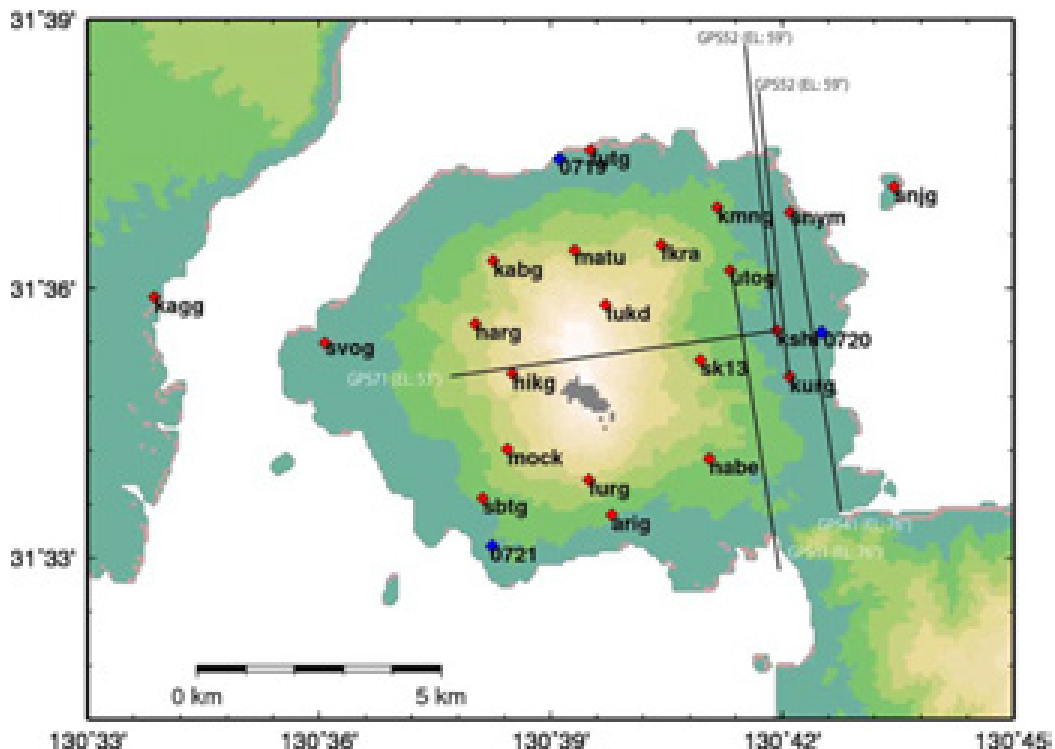


図 13 桜島における GNSS 観測網

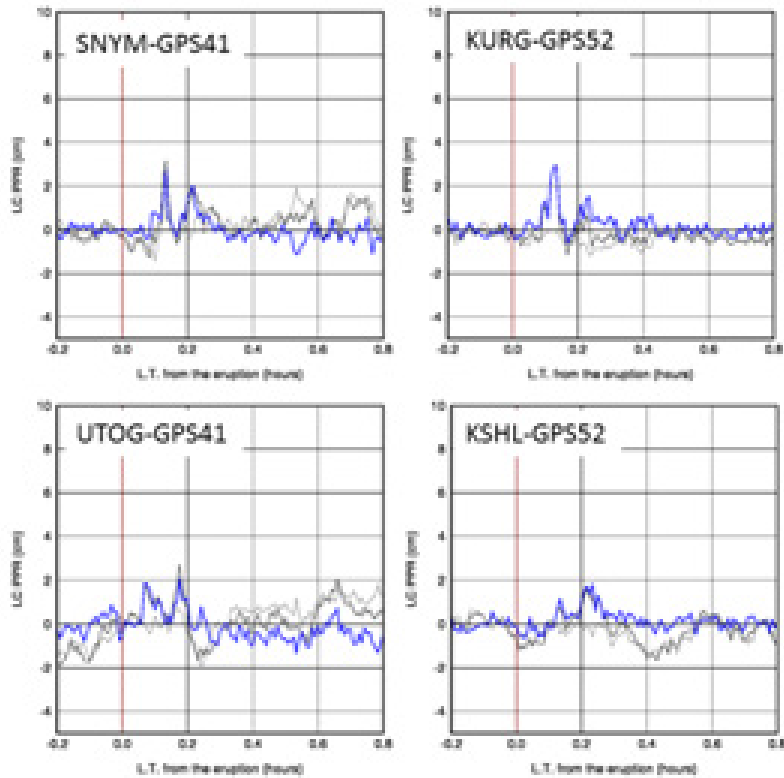


図 14 2017 年 11 月 13 日の桜島南岳の爆発的噴火時の噴煙を通過した GNSS 衛星からの電波の LC 位相残差の時間変化。横軸は 22:07 の噴火開始時刻からの経過時間である。

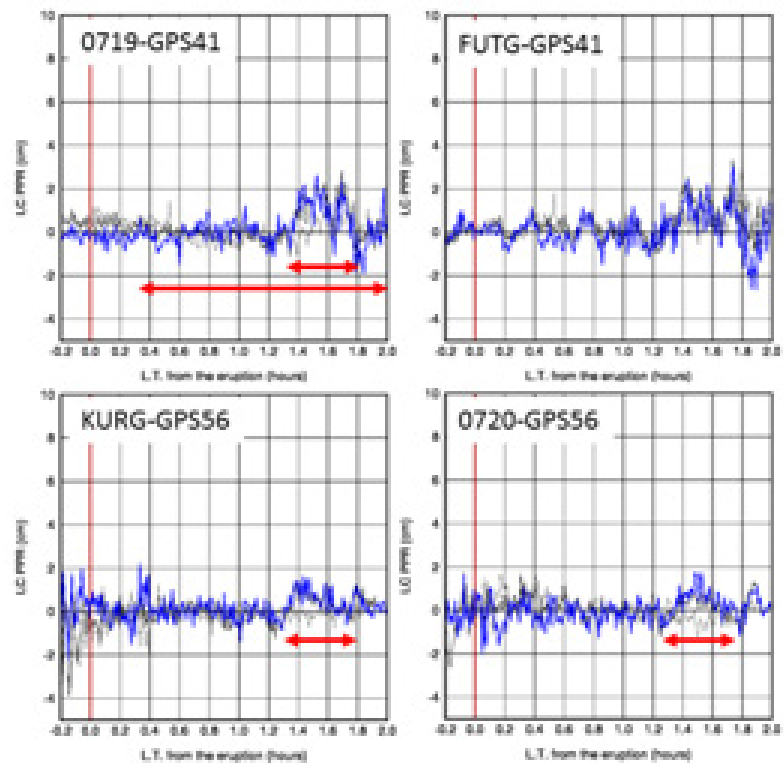


図 15 2017 年 11 月 13 日の桜島南岳の爆発的噴火時の噴煙を通過した GNSS 衛星からの電波の LC 位相残差の時間変化。噴火開始から 1.4 時間～1.8 時間後にも PPR の増加が見られ、桜島北部の観測点において大きい。

d) ディスドロメータによる地上観測

ディスドロメータによる地上降灰量観測を開始した。降雨観測に開発された1次元の光学式ディスドロメータ（PARSIVEL2、ドイツ OTT Hydromet 社製）を用いた。本装置は落下粒子によってさえぎられる光を計測することによって、粒径ごとに粒子を観測するパーティクルカウンターであり、粒径毎の個数と落下速度を求めることができる。粒径と落下速度の関係は、雨の場合、Gunn-Kinzer line に沿うとされるが、火山灰は、水よりも密度が大きいので、Gunn-Kinzer line よりも上にプロットされることが予想される。実際、火山灰で実験を行ったところ、Gunn-Kinzer line よりも下にプロットされた。このことにより雨粒と火山灰粒子の識別が可能である。

平成 28 年度は、6 台のディスドロメータを設置したが、火山灰の移流によっては、火山灰を観測できない方位があるので、平成 29 年度はさらに 4 台のディスドロメータを設置した。観測点の配置図を図 16 に示す。各観測点では、時間雨量相当量、粒子数、センサー温度、電源電圧に加え、粒径毎の 32 クラスと落下速度毎の 32 クラス、合計 1024 クラスに分けた粒子数が 1 分毎に記録される。

いずれの観測点もオンラインによるデータ取得が可能である。

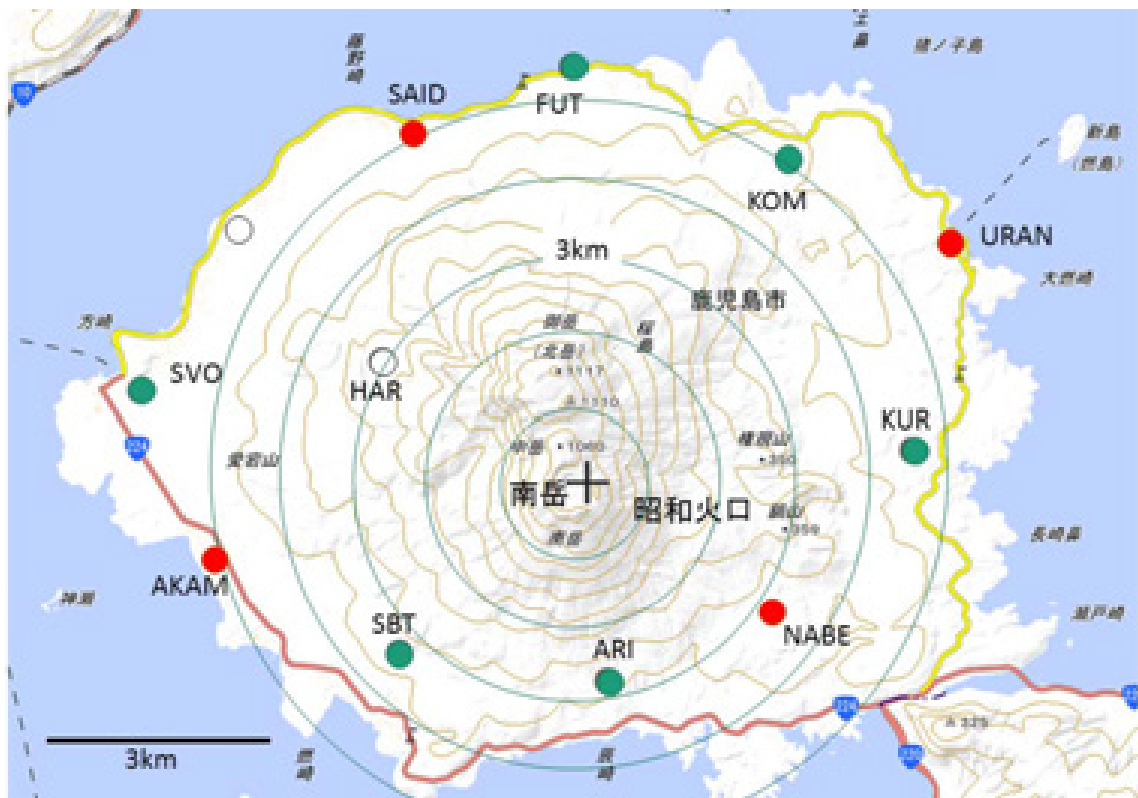


図 16 桜島におけるディスドロメータの位置図。緑丸：28 年度設置、赤丸：29 年度設置。白丸は他のプロジェクト。

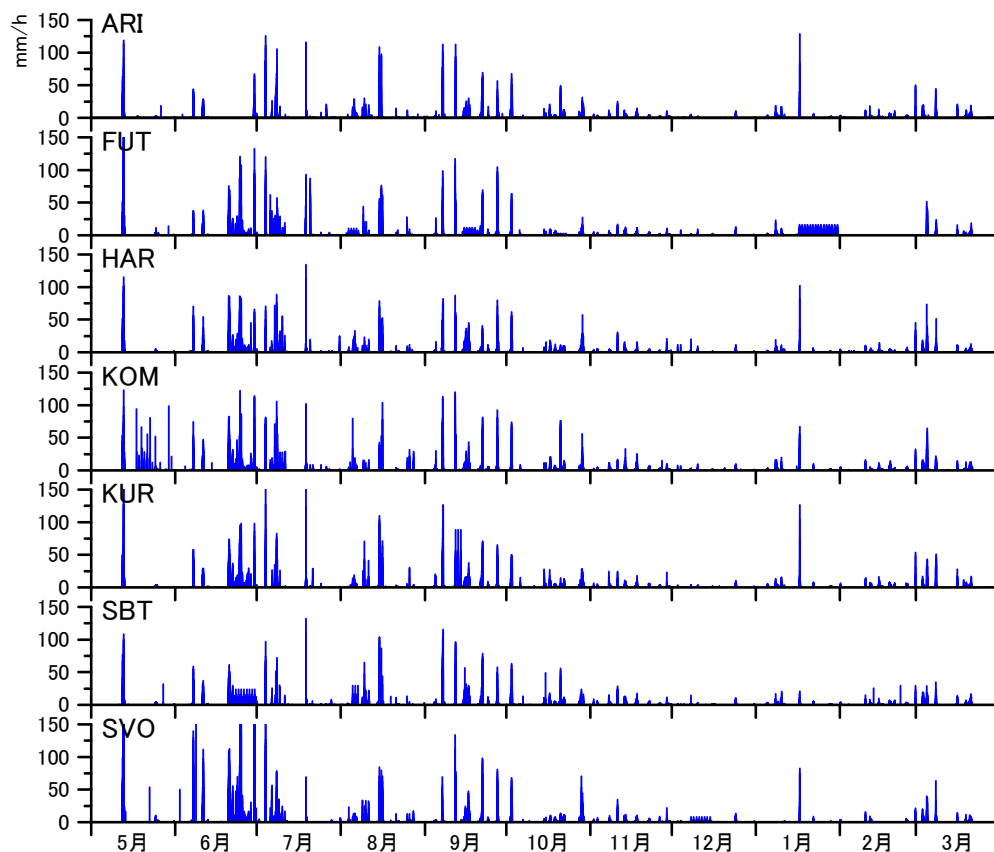


図 17 ディスドロメータにより観測された時間雨量相当量。

一次元ディスドロメータは、降雨観測に用いられることが多く、時間雨量相当量を出力する。2017年5月11日～2018年3月31日までの時間雨量相当量の推移を図17に示す。時間雨量（1分間の瞬時値）の最大値は266mm/hであり、ARI観測点では100mm/hを超えたものが15回観測された。

ディスドロメータで観測される粒子の多くは、雨滴である。桜島島内には、本プロジェクトで設置した11カ所に加え、合計13か所にディスドロメータが設置されているが、このうち、3か所以上で粒子を検出した場合を降雨とした。また、鹿児島地方気象台の観測報および島内に設置した雨量計のデータも参照した。降雨による時間雨量相当量は、ディスドロメータの出力とほぼ同じであり、99.95%が降雨によるものである。

次に、降灰によるイベントを抽出した。ディスドロメータの全出力から降雨によるものを除き、さらに、明らかにノイズと考えられるものを除去した時間雨量相当量を図18に示した。最大のピークは2017年11月13日22:07の爆発によって放出された火山灰によるものであり、時間雨量相当量はKOMにおいて32.9mm/h、FUTにおいて12.0mm/hであった。5mm/hを超えたイベントでは、2017年9月29日にARIで6.4mm/h、2018年1月17日にKURで9.0mm/hに達した。

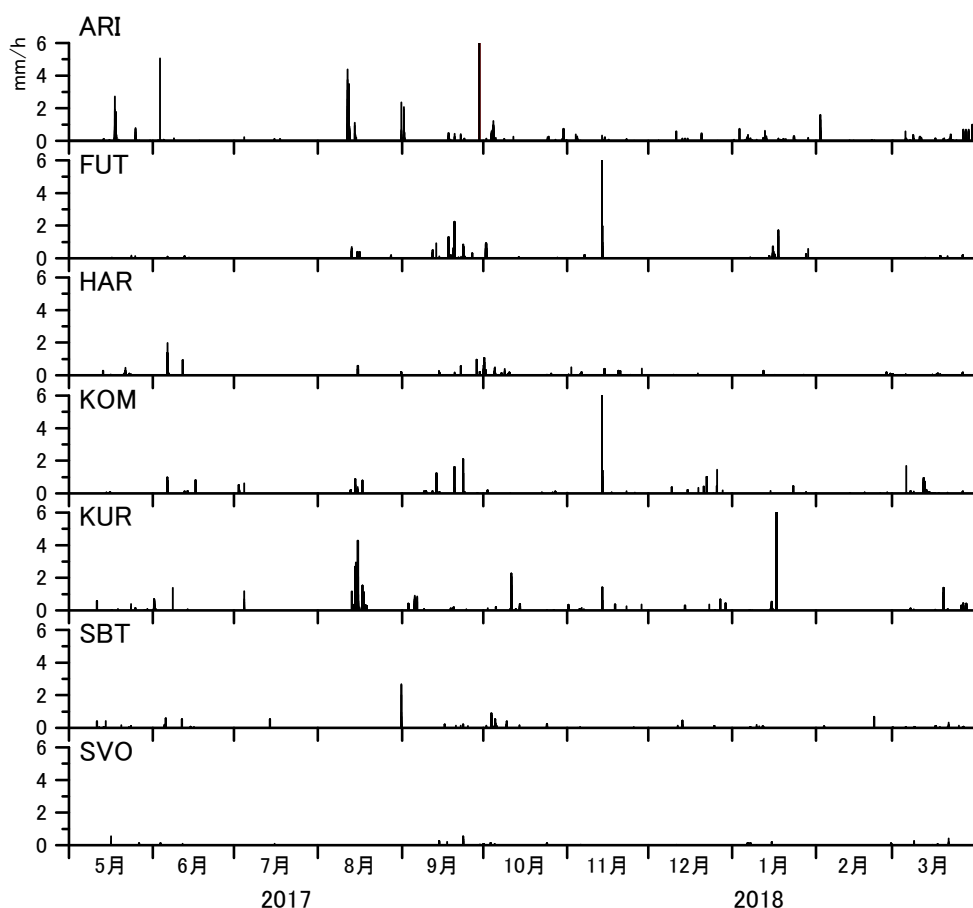


図 18 降灰時の時間雨量相当量の推移。2017 年 5 月 11 日～2018 年 3 月 31 日。

火山噴火は爆発地震や火山性微動などの地震動を伴うことが多いので、降灰時の時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅を比較して、代表的な降灰イベントについて、図 19～図 23 に示す。

2017 年 4 月 26 日から昭和火口において噴火が頻発するようになった。2017 年 6 月 6 日 7:56 に爆発的噴火が発生し、地震動の振幅の推移から火山灰の放出は 8:20 頃まで続いたものと推定される（図 19）。HAR においては 8:08 から火山灰粒子が検出され始め、8:11 には時間雨量相当量は 1.4mm/h まで増加した。8:13 まで約 3 分間ほぼ同じレベルを保った後、徐々に時間雨量相当量は減少し、8:28 まで火山灰が検出された。この噴火に対応する火山灰は KOM でも 8:21 から検知されている。8:26 には 1.0mm/h まで増加した。

続いて、8:35 には次の噴火が発生した。これに対応する火山灰は HAR において 8:54 から検出され、8:56 には時間雨量相当量が 2.0mm/h まで増加した。10-20 分後には HAR に火山灰が到達したことがわかる。8:58 にはさらに噴火が発生したが、これに対応する火山灰は HAR において検知されていない。風向が変わったことが推定される。

4 月 26 日から始まった噴火活動は、6 月中旬には低下したが、8 月 11 日から再び、昭和火口において噴火が頻発するようになった。8 月 11 日から 16 日までの KUR と ARI の時間雨量相当量及び地震動の RMS 振幅を図 20 に示す。RMS 振幅に示すようにこの期間は噴火が頻発しており、火山灰は連続的に昭和火口から放出された。8 月 11 日と 12 日には南部の ARI に、13 日以降は東部の KUR に火山灰が到達したことがわかる。

2017年11月13日の爆発的噴火は2017年に桜島において発生した噴火では最大規模である。北東部のKOMおよび北部のFUTにおける降灰時の時間雨量相当量と地震動のRMS振幅を図21に示した。10月31日から噴火が南岳において発生するようになり、この噴火も南岳において発生したものである。爆発は22:07に発生したが、KOMでは22:19に、FUTにおいては22:22に火山灰粒子が検出され始めた。KOMにおいては、22:25に時間雨量相当量が32.9mm/hに達したが、2017年にディストロメータによる火山灰観測を開始してから最大の値である。また、FUTでも22:30には12.0mm/hに達した。

22:07に発生した噴火の様式はブルカノ式噴火であるが、22:30ごろから噴火の様式がストロンボリ式噴火に遷移したことが空振記録から推定される。FUTではいったん、時間雨量相当量は低下したが、22:40ごろから再び増加し、22:54には7.7mm/hまで増加した。一方、KOMにおいてはこれに対応する火山灰はほとんど検知されていない。このことから最初に発生したブルカノ式噴火により火山灰が到達した高高度では北東向き、ストロンボリ式噴火で噴煙が到達できる低高度では北向きの風が吹いていたことが推定される。

2018年1月以降、南岳において噴火活動が活発化した。1月17日10:36の噴火ではKURにおいて多数の火山灰粒子が検知された(図22)。10:46には時間雨量相当量で、9.0mm/hに達した。3月には噴火が頻発するようになり、連続的な火山灰放出と間欠的な爆発が繰り返された。南部のARIと東部のKURで多数の火山灰粒子が検知された(図23)。

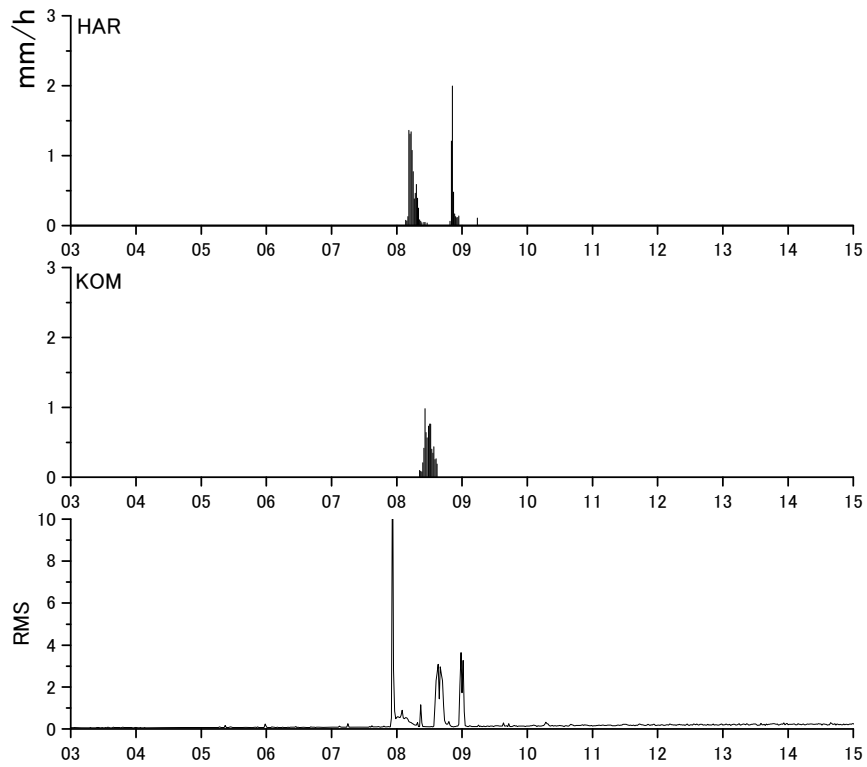


図 19 2017 年 6 月 6 日の噴火（爆発を含む）による降灰時の時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

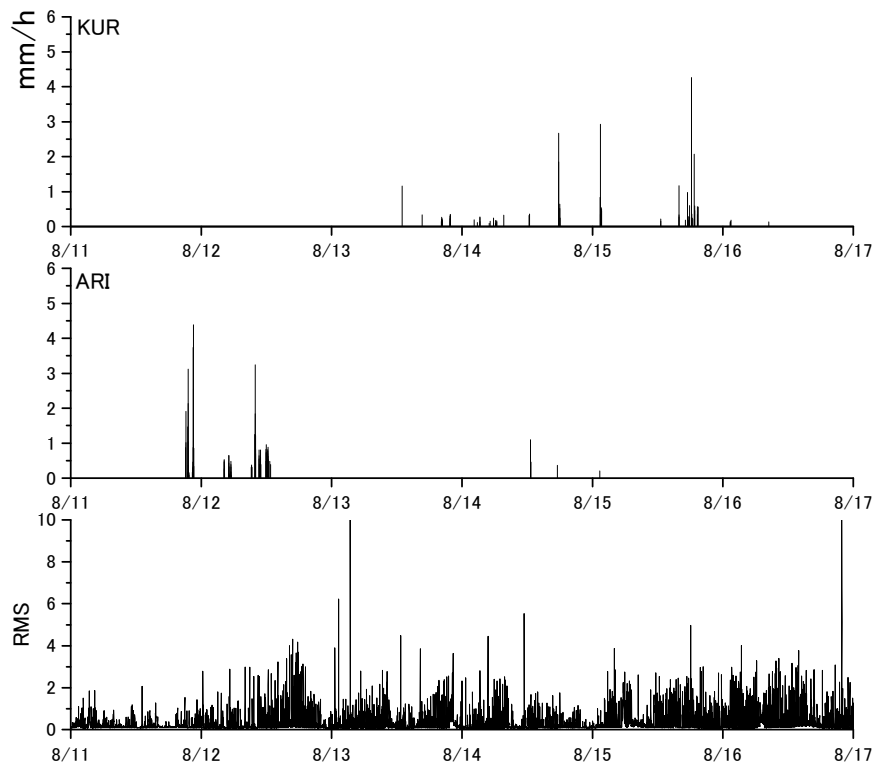


図 20 2017 年 8 月 11 日～16 日の噴火（爆発を含む）による降灰時の時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

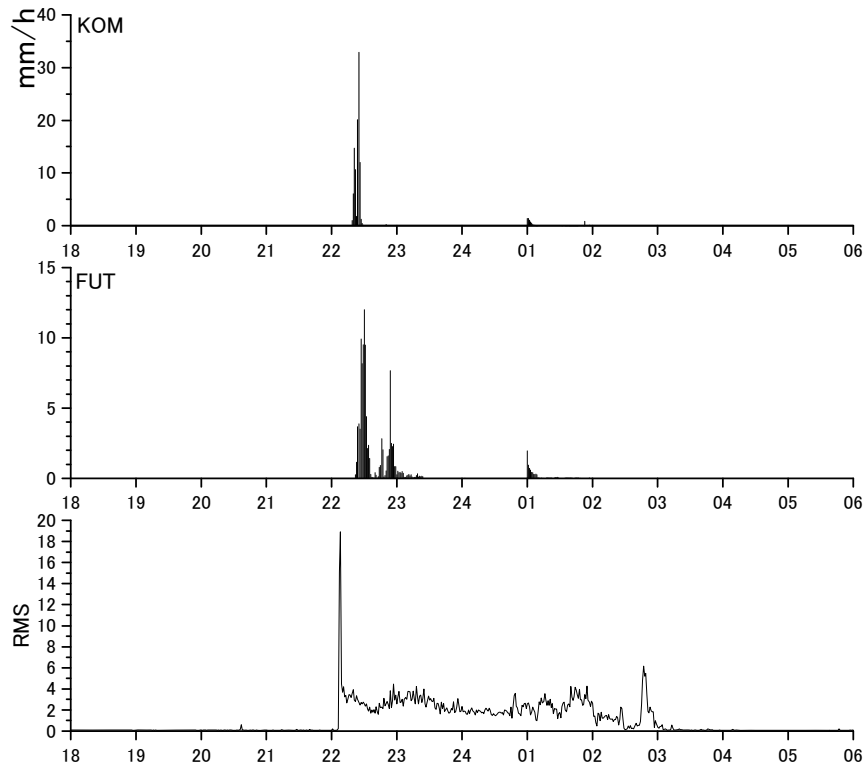


図 21 2017 年 11 月 13 日の爆発による降灰時の時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

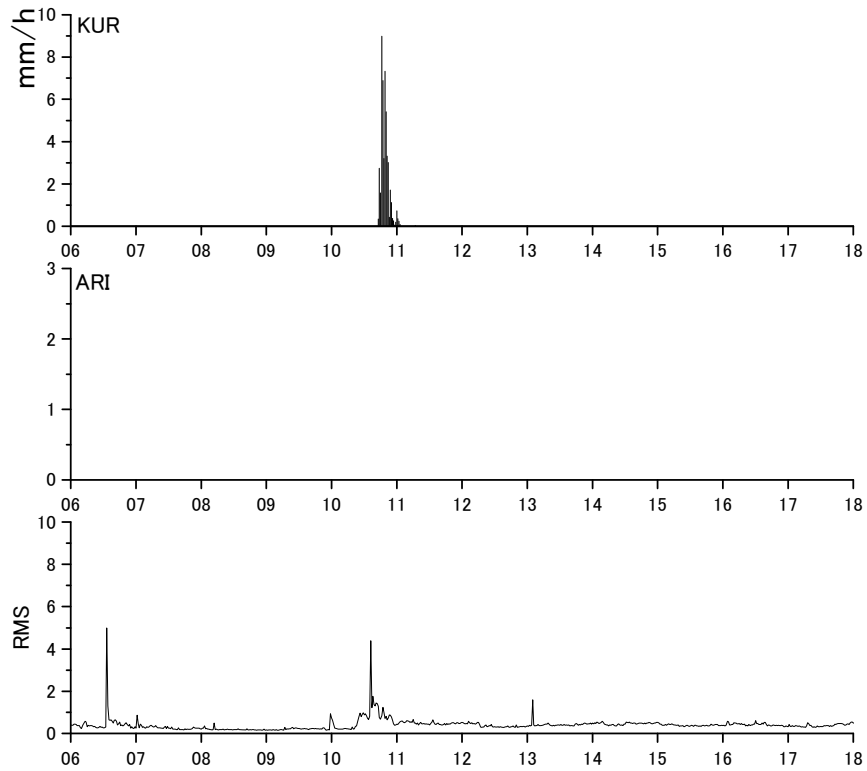


図 22 2018 年 1 月 17 日の爆発による降灰時の時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

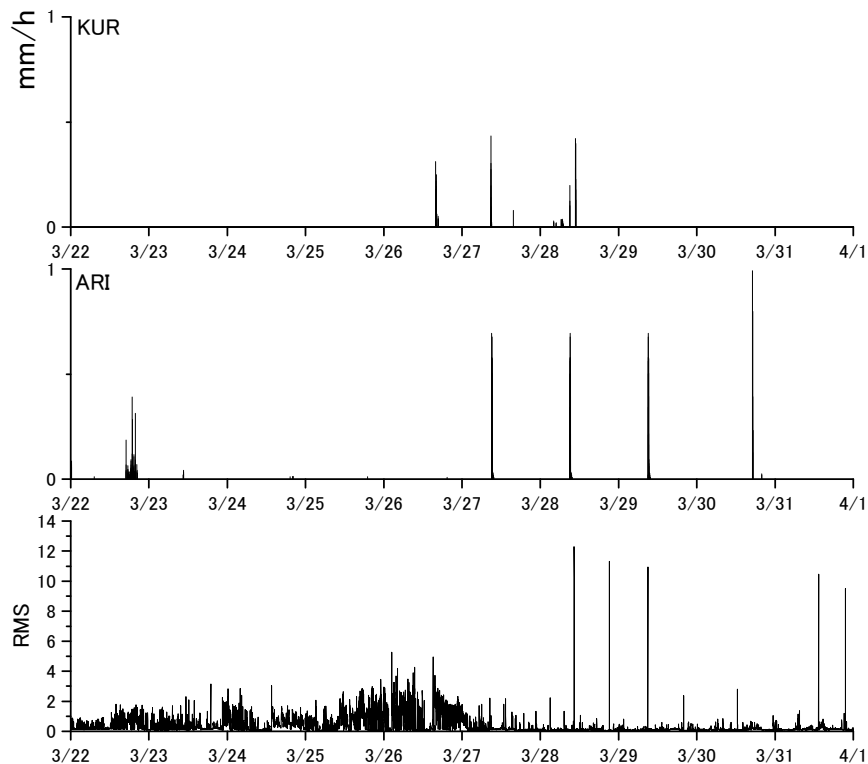


図 23 2018 年 3 月 22 日～31 日の噴火（爆発を含む）による降灰時の時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。

ディストロメータにより観測できるのは、時間雨量相当量及び、粒径と落下速度ごとの粒子数なので、これらの値を実際にサンプリングされた火山灰量と比較する必要がある。ここでは、ディストロメータにより得られた時間雨量相当量とその直近でサンプリングした単位面積当たりの降灰重量を比較することにより、経験的な両者の関係式を検討した。サンプリングした火山灰重量とそれに対応する時間雨量相当量の積算値を表 2 に示す。

表 2 をもとにサンプリングした火山灰とそれに対応する時間雨量相当量の積算値の関係を図 24 に示す。単位面積当たりの火山灰重量 (W) の単位を g/m^2 、ディストロメータの時間雨量相当量の積算値 (I_p) の単位を mm/h とすれば、両者は以下のように近似できる。

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

ディストロメータの時間雨量相当量にファクター 24 をかければ、火山灰重量が得られることになる。例えば、2017 年 6 月 6 日の 8:56 に HAR において時間雨量相当量 2.0 mm/h が得られているが、これは 1 分間に 48 g/m^2 の降灰があったことを意味する。なお、図 11 において、X を付したプロットは降雨期間を含む時間雨量相当量であるが、火山灰と雨滴は識別できないため、参考として示した。

表 2 サンプルングした火山灰の単位面積当たり降灰量とそれに対応する時間雨量相当量の積算値

ディストロメータの検出 開始時刻	観測点	降灰量 (g/m ²)	時間雨量相当量 積算値 (mm/h)
2017/05/15 21:32	有村	86	0.177
2017/05/17 18:29	有村	1004	41.843
2017/05/16 17:08	黒神	22	0.047
2017/05/21 08:00	ハルタ山	110	3.851
2017/05/16 13:00	桜島火山観測所	29	0.823
2017/05/23 03:56	ハルタ山	42	0.619
2017/05/24 01:24	二俣	24	0.320
2017/05/24 09:41	高免	6	0.793
2017/05/23 21:44	黒神	107	2.764
2017/05/19 06:08	有村	18	0.342
2017/05/23 21:58	柴立	57	1.030
2017/05/25 17:23	二俣	1515	28.742
2017/05/25 17:14	高免	397	9.199
2017/06/01 03:40	黒神	423	7.824
2017/05/25 13:48	有村	583	5.390
2017/05/25 17:20	桜島火山観測所	14	0.884
2017/06/01 21:51	黒神	91	0.163
2017/06/02 21:39	有村	287	5.733
2017/06/05 05:35	柴立	69	1.910
2017/06/06 08:21	高免	164	7.202
2017/06/06 08:43	二俣	46	0.349
2017/06/06 08:08	ハルタ山	321	13.011
2017/08/17 11:45	黒神	241	4.466
2017/08/17 14:00	黒神	737	19.741
2017/09/04 09:55	黒神	1094	18.002
2017/09/13 16:00	高免	329	12.827

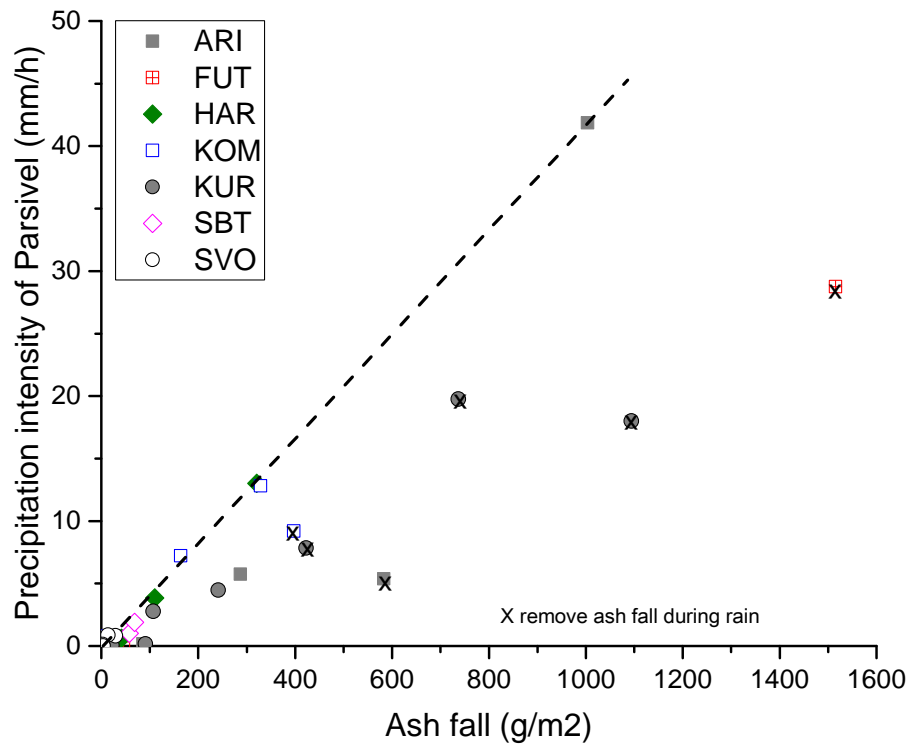


図 24 サンプルした単位面積当たりの火山灰重量と降灰期間に対応するディストロメータの時間雨量相当量の積算値の関係。

e) レーダー観測による火山灰推定の高度化

レーダーの反射強度と火山灰放出量の関係を検討する。気象レーダーによる降灰量の推定方法には工学的手法と理学的手法の二通りがある。工学的手法は降灰のレーダー反射因子と地上の降灰量の間関係式を観測から求める方法である。一方、理学的手法は、観測された降灰粒子の粒径分布から散乱計算をおこない理論的な反射因子と降灰量の関係式を求める方法である。いずれの手法も降灰粒子の観測データが必要不可欠である。

そこで、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、その上で、XバンドMPレーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディストロメータの出力値と地上降灰量の関係性を多くの噴火事例について調べ、その経験的関係式の精度を上げることを試みた。

ディストロメータによる降灰量と粒径分布の距離依存性

降灰粒子粒径分布の火口からの距離による変化を調べるために、冬季、桜島の風下側にある垂水市に計3台のディストロメータを設置（図25）してデータを取得した。取得したデータはLTE通信を用いた通信システムによりwebのデータサーバー上に自動アーカイブした。



図 25 降灰粒子粒径分布の距離依存性解明のためのディストロメータ設置箇所（黒丸）。

XバンドMPレーダーによる経験的降灰量推定式の導出

経験的降灰量推定式の導出にあたっての課題の一つに、弱い降灰を現業用気象レーダーで捉えられない場合があることが挙げられる。これは、気象レーダーが雨観測用に調整されているためと考えられる。そこで、本研究では、国土交通省のXバンドMPレーダーの受信電力とレーダー方程式から再解析レーダー反射因子を求めた（図26）。再解析レーダー反射因子を用いると、従来フィルター処理されていた弱い降灰エコーも捉えられるように

なった。例えば、図 26b に示すように、4dBZ 以下の部分（特に桜島島内の昭和火口上の弱い噴煙エコー）が捉えられている。このことから、再解析レーダー反射因子は低高度の継続的に発生する噴煙を捉えるのに有効である。

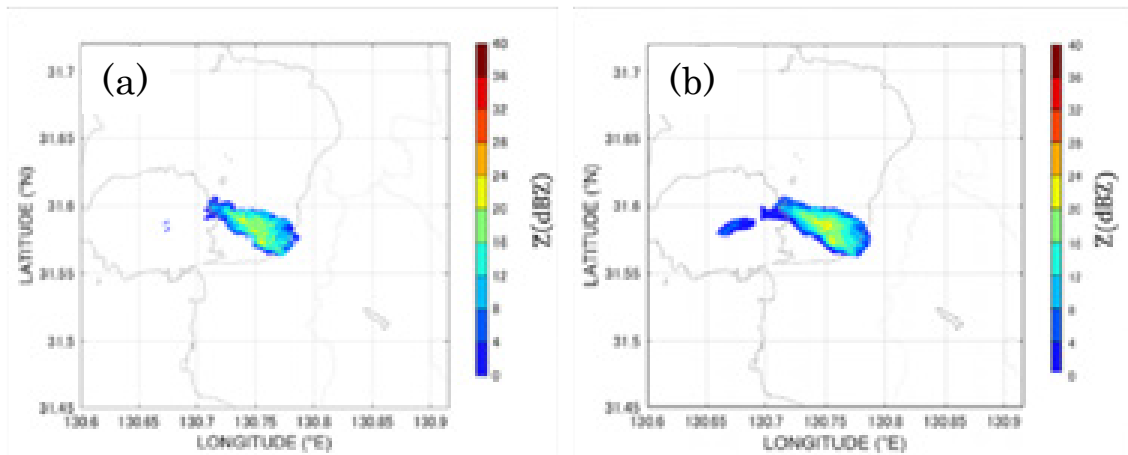


図 26 (a) 国交省が提供しているレーダー反射因子、(b) 本研究で求めた再解析レーダー反射因子。

以上のことを踏まえて、気象レーダーによる降灰量の推定を試みる。レーダー反射因子 $Z(\text{mm}^6\text{m}^{-3})$ と降灰強度 $R_A(\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1})$ の間に次のべき乗式が成り立つと仮定する。

$$Z = \alpha R_A^\beta \quad (2)$$

レーダー反射因子 Z と降灰強度 R_A の時間積算値をそれぞれ $S_Z(\text{mm}^6\text{m}^{-3}\text{h})$ 、 $S_A(\text{kgm}^{-2})$ とすると

$$S_Z = \int_0^T Z dt \quad (3)$$

$$S_A = \int_0^T R_A dt \quad (4)$$

である。ここで T は降灰が観測された時間である。

任意の点の S_Z はレーダー観測から得られる Z の時系列を (3) 式に代入して計算することができる。一方、 S_A は多くの場合 R_A の観測値が得られないので噴火後に行なわれる人手による地上降灰量の調査から推定される。桜島噴火事例（2013 年 8 月 18 日）と阿蘇噴火事例（2016 年 10 月 8 日）について地上降灰量の調査地点での S_A と S_Z を比較して両者の関係を表す経験式を求めた。噴火とレーダーに関する諸元は表 3 にまとめた。

桜島噴火事例（2013 年 8 月 18 日）と阿蘇噴火事例（2016 年 10 月 8 日）について求められた S_Z と S_A の関係を図 27 に示す。この図から桜島噴火についての S_Z - S_A 関係式は経験式として以下のように記述できる。

$$S_Z = 9.70 \times S_A^{2.12} \quad (5)$$

or

$$S_A = 0.307 \times S_Z^{0.504}$$

また、阿蘇山の噴火では、暫定的に以下のように求められる。

$$S_Z = 780 \times S_A^{0.302}$$

or

$$S_A = 3.42 \times 10^{-8} S_Z^{2.59}$$
(6)

桜島と阿蘇山の噴火で、係数 α および β がかなり異なっており、今後、解析事例を増やすとともに、理論的な関係を検討することにより、精度を向上させる予定である。

表 3 解析対象とした桜島及び阿蘇山噴火に関する諸元

	桜島噴火	阿蘇中岳噴火
発生時刻	2013年8月18日16:31	2016年10月8日1:46
噴煙高度	5000m	11000m
XバンドMPレーダー	国交省垂水	国交省宇城
風向・風速	風速 5m/s 風向 104° (8/18、高度 5000m)	風速 20m/s 風向 232° (10/7、高度 5000m)
レーダーから推定された総降灰量	約 20 万トン	

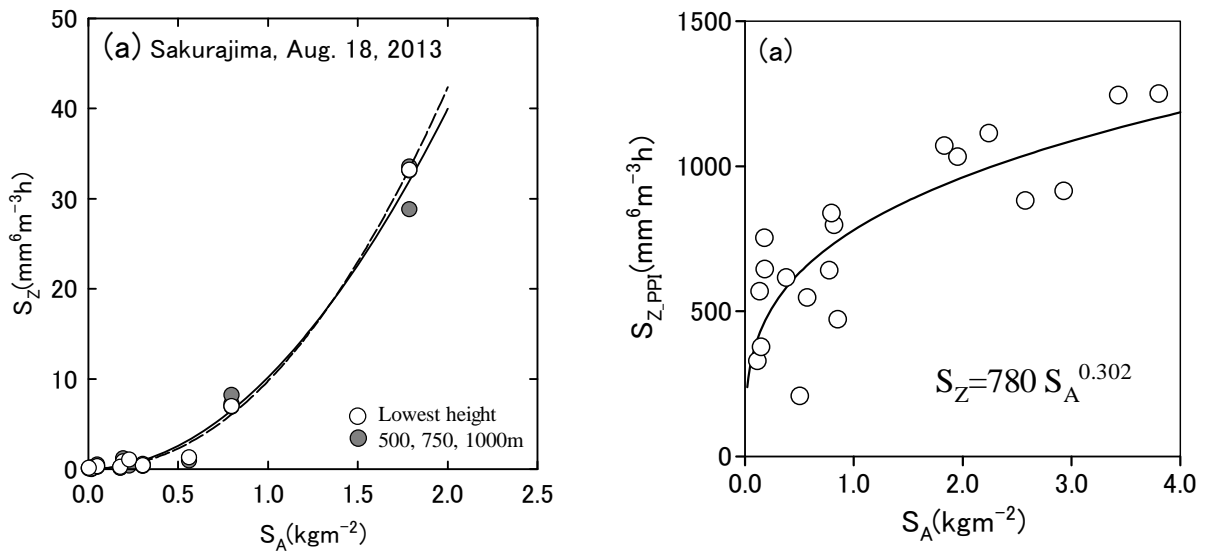


図 27 レーダー反射因子 Z の時間積算値と降灰強度 R_A の時間積算値の関係。左：桜島、右：阿蘇山。

(5) または (6) 式を用いて気象レーダーから求めた降灰量分布の時間変化を図 28 及び図 29 に示す。

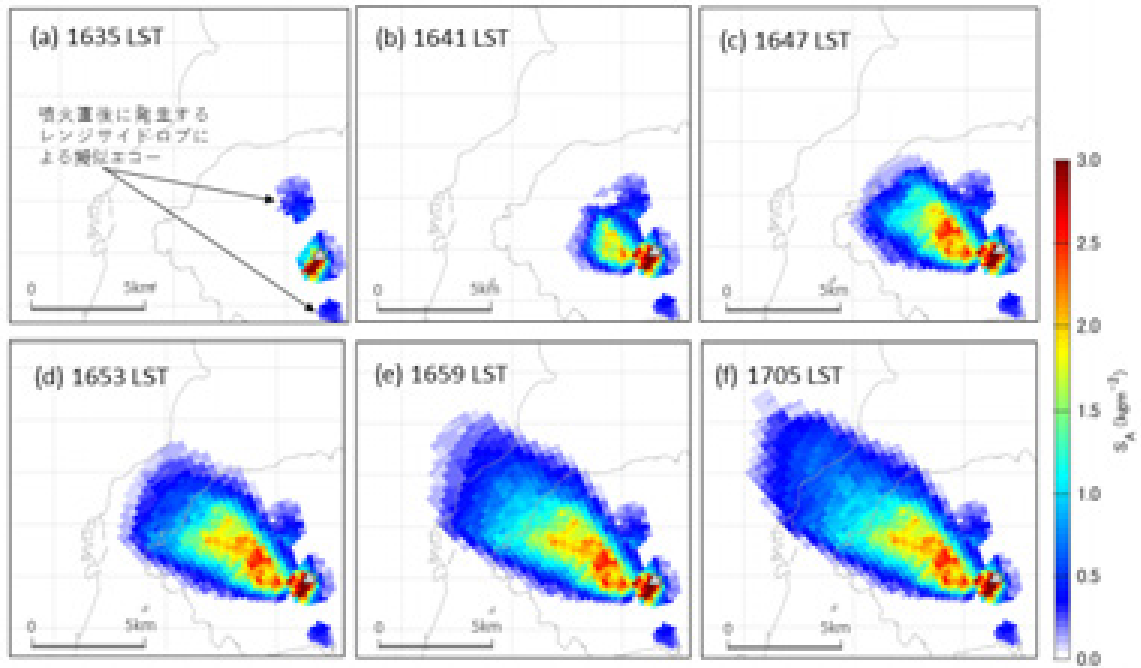


図 28 2013 年 8 月 18 日の桜島噴火について、レーダー反射強度から求めた降灰量分布の時間変化。

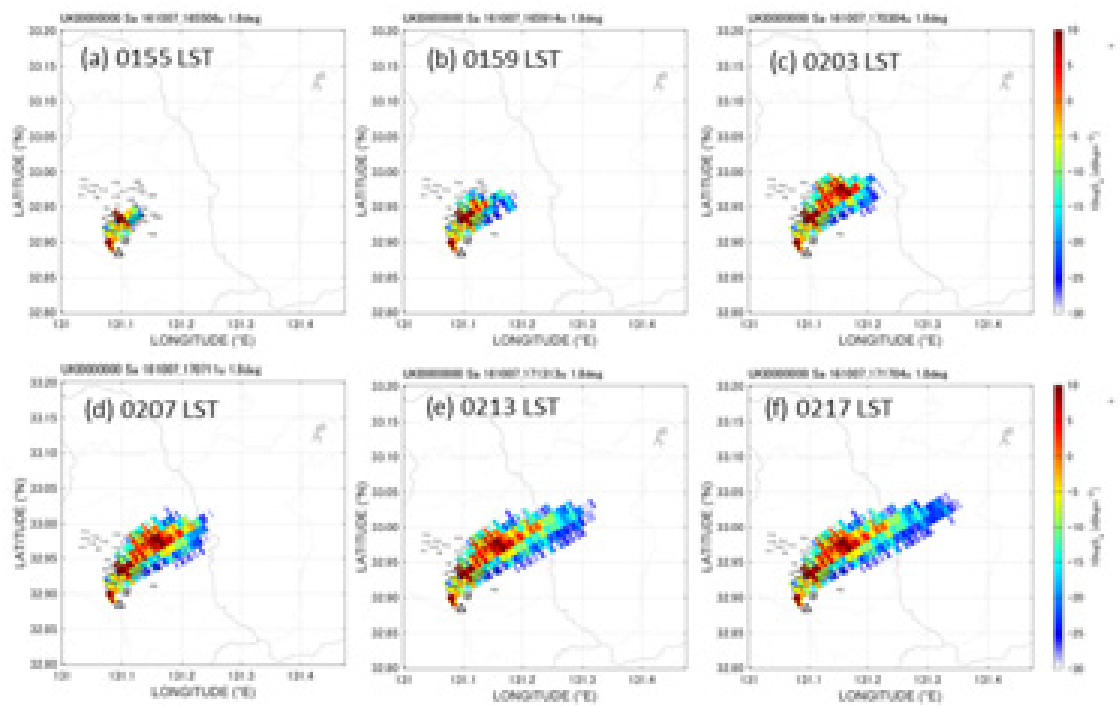


図 29 2016 年 10 月 8 日の阿蘇山噴火について、レーダー反射強度から求めた降灰量分布の時間変化。

2) 火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島の噴火活動に伴い、火口側地盤の沈降傾斜及び収縮と爆発地震・火山性微動が観測される。火山灰放出量は地盤変動量と火山性地震・微動のエネルギーと相関があることが知られており、火山灰放出重量 (W) は、2-3Hz の周波数帯のスペクトル (A) と地盤変動を励起する圧力源の体積変化 (ΔV) に対して以下の関係がある。

$$W_e = \alpha A + \beta V + \gamma \quad (7)$$

2013年までの昭和火口の噴火活動では、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.6$ 、 $\gamma = -1.03 \times 10^5$ と近似されている (Iguchi, 2016) ²⁾。ここでは、2014年1月から2018年までの火山灰放出量と地盤変動量、火山性地震・微動のエネルギーの関係を再検討する。2013年12月までに得られたパラメータを用いて(7)式に基づいて計算される火山灰重量と現地における火山灰の関係を図30(左)に示す。2013年12月までに得られたものと比べてばらつきが大きい、1:1の比を保っている。2015年7月以降、噴火活動が低下しているが、火山灰放出がほとんどない場合は、(7)式に基づく火山灰放出量はほぼゼロになることが期待されるが、負の値を取っている。これは(7)式の γ の値が適切でないためである。そこで、 γ を再調整したうえで、 α と β を決めなおした。その結果、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.9$ 、 $\gamma = -5.0 \times 10^5$ と再決定できた。再決定したパラメータを用いて(7)式に基づいて推定した火山灰重量を図30(右)に示した。

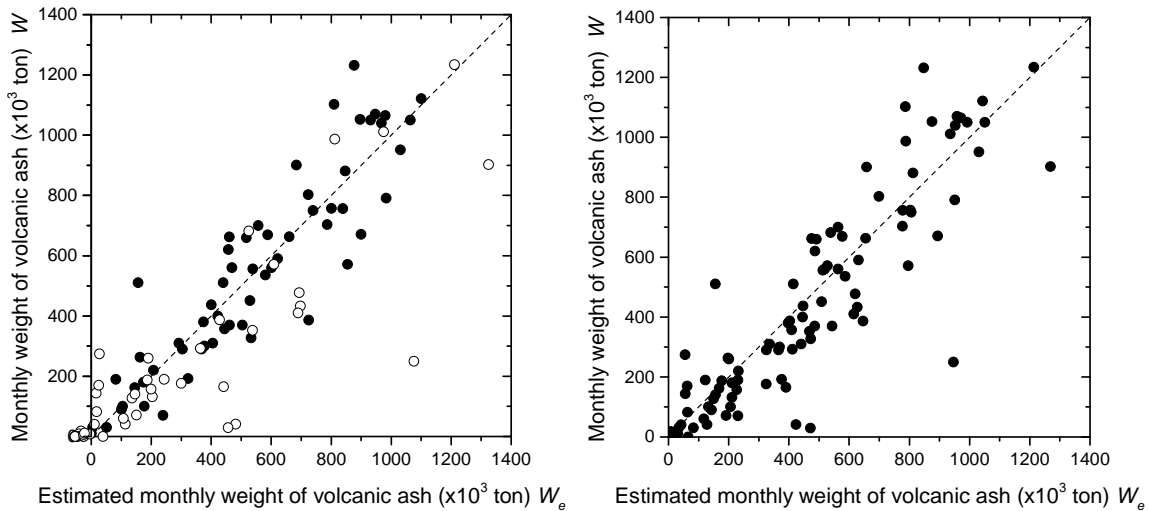


図 30 火山性微動振幅および地盤変動量から推定された火山灰放出重量と現地観測から推定された火山灰放出量の関係。左:2013年12月までの月毎のデータ(黒丸)に基づいて決定されたパラメータを用いて推定された2014年1月~2018年3月の月毎の火山灰放出重量(白丸)。右: $\alpha = 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 2.9$ 、 $\gamma = -5.0 \times 10^5$ と再決定されたパラメータを用いて見積もられた2009年1月~2018年3月までの月毎の火山灰重量。

月毎の火山灰放出量から決定された(7)式は、桜島の個々のブルカノ式噴火にも適用可

能である。この場合、(7)式の第2項の地盤変動による寄与が大きいので、火山灰放出重量は、地盤変動を励起する圧力源の体積変化に対して以下のように近似できる (Iguchi, 2016)²⁾。

$$W_e = \beta \Delta V \tag{8}$$

噴煙高度が推定できれば、火山灰拡散シミュレーションを行うことができるので、噴火に伴うひずみ及び傾斜変化と噴煙高度の関係を2016年2月～2018年3月に発生した噴火について検討し、前年度得られた関係式の妥当性を検討した。このうち、鹿児島地方気象台が噴煙高度を発表し(雲入りを除く)、5ナノストレイン以上のひずみ変化が有村観測坑道において検知され、かつひずみ変化の継続時間が5分以上続いた噴火は3398回発生している。南岳火口方向とそれに直交する方向のひずみ変化から微小球状圧力源を仮定して、圧力源の深さと体積変化量を求め、ひずみ変化の継続時間で体積変化量を割ったものを噴出率とした。噴煙高度と噴出率の関係を図31に示す。

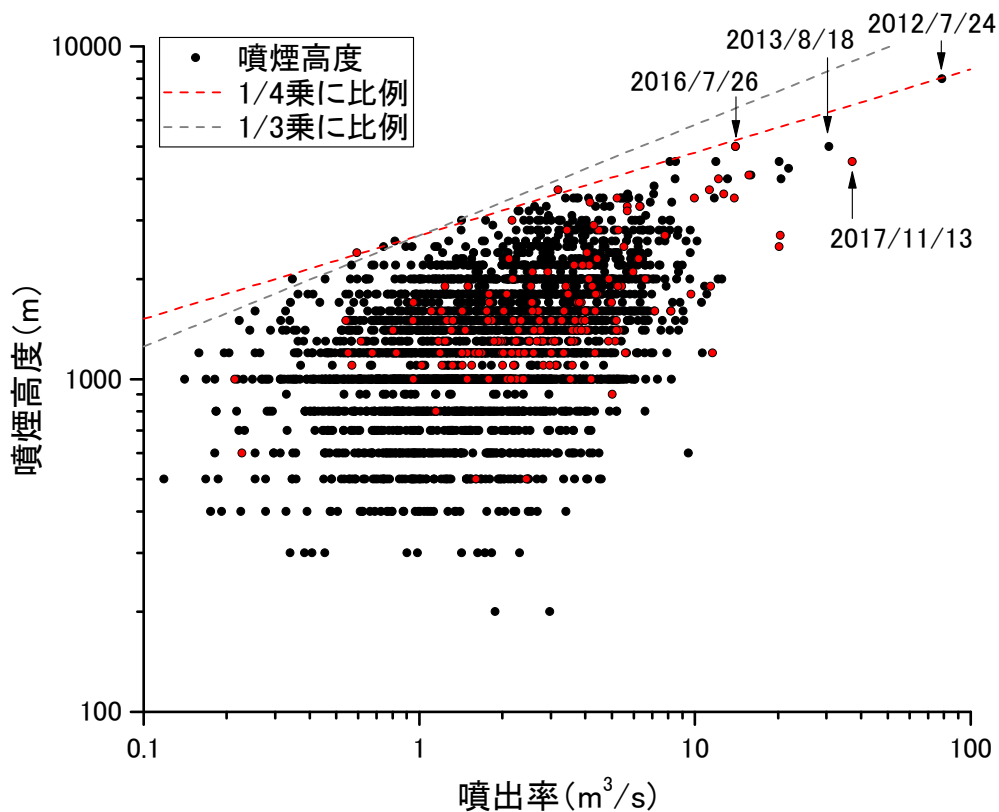


図31 噴煙高度と噴出率の関係。2009年2月～2015年12月までの噴火を黒丸、2016年2月から2018年3月までの噴火を赤丸で示した。

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、78m³/sに達している。この噴火について気象庁は噴煙高度を発表していないが、YouTubeにアップロードされた桜島遠方からの画像により噴煙高度は8000mと決定できる。噴煙高度が5000mに達した2013年8月18日および2016年7月26日の噴火の噴出率は大きい。噴出率は10m³/s以下のものが圧倒的に多いが、噴煙高度との間に相関が認められる。噴煙高度 (H) には噴

出率（ \dot{V} ）に依存する上限が認められ、上限の直線を以下のように決定できる。

$$H = 2700\dot{V}^{1/4} \quad (9)$$

噴煙高度は(9)式を超えることはないので、期待される噴煙高度の最大値として(9)式から得られる噴煙高度を用いて火山灰拡散シミュレーションを行うことが可能である。

Morton et al. (1956)³⁾によって、噴煙柱の高度は放熱率の1/4乗に比例することが、理論的に示され、大規模噴火についてそれが確認されている。小規模噴火であるが、図7はそれを桜島において圧倒的多数のデータによって検証したものである。(9)式は上限においてMorton et al. (1956)の式が成り立つことを示した。

2016年以降の噴火についてみると、それ以前の噴火により求められた(9)式を超えるものはなく、(9)式が妥当であることが示された。また、2017年11月13日の噴火の噴出率は2009年以降で、2番目に大きいことがわかる。XバンドMPレーダーの観測では6200mの高度に達していないことが示されているが、5000m程度の高度に達している可能性はある。

(7)～(9)式は有村観測坑道のひずみ変化から決定した式であるが、今後、それ以外の地盤変動データを用いて、体積変化量などの見積もりを高精度化させる必要がある。平成29年度は有村観測坑道に近い古里観測井の傾斜計を改修し、回収後に正常にデータが取得できることを確認した。回収前後の記録を図32に示す。直交成分において改修の効果が大きい。

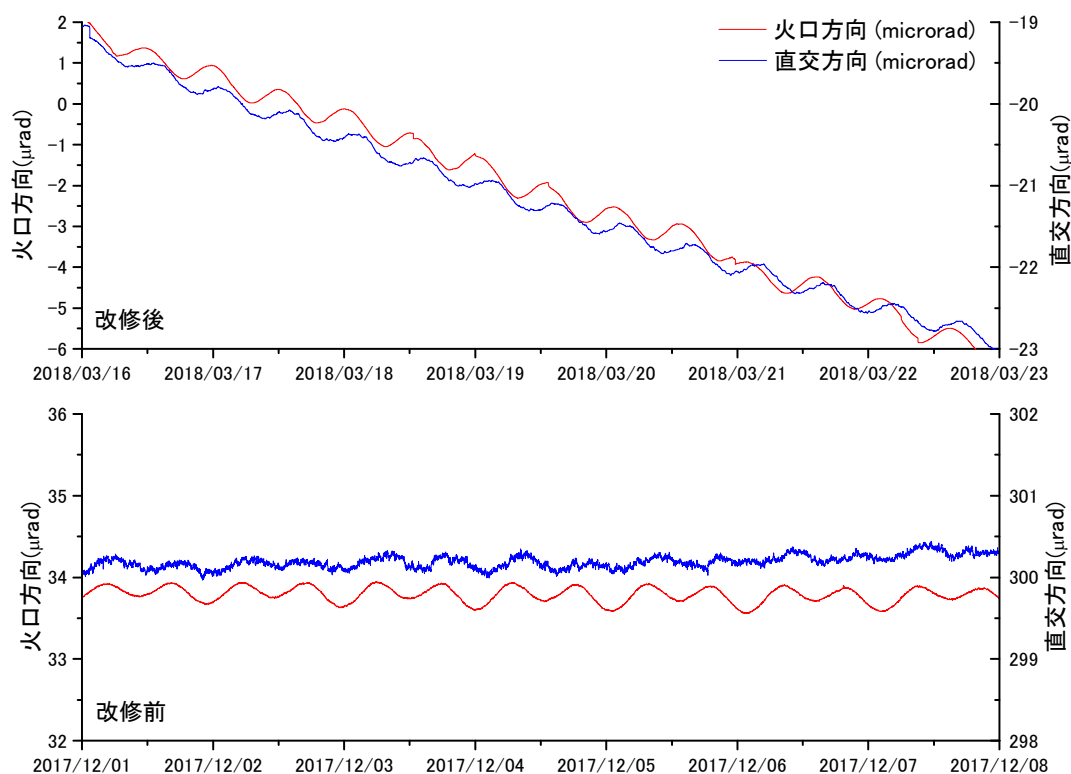


図32 有村観測井における改修前（下）と改修後（上）の傾斜計の記録の比較。

3) 火山灰拡散予測の高精度化技術開発

a) 風速ベクトルのその場観測

火山体周辺では風速場が複雑なので、分解能の高い DEM を用い気象モデルに基づき、風場を再現する。風速場の予測と検証のために、Compact Weather Station (CWS) を搭載したドローンによるキャンペーン観測を春季と冬季に繰り返すとともに、風速 3 成分を測定するドップラーライダーを用いた風速ベクトルの大気中その場観測を繰り返した。

春季のキャンペーン観測は、2017 年 4 月 19 日に桜島の南岳火口から 2.4km 南南東の有村から行った (図 33、右図)。ドローンに搭載する CWS は風向風速に加えて気温、湿度の観測も可能なものを用いた (図 33、左図)。同じ場所にドップラーライダーを設置し、同地点での鉛直方向の風速 3 成分を連続的に記録した。ドップラーライダーは最大高度 1000m までの風の鉛直プロファイル (30m 間隔) を測定した。センサーの取付け位置はプロペラによる影響を避けるために機体中央部の 50~60cm とした。使用したドローンは観測機器を搭載した状態で約 15 分の飛行が可能なので、所定の高度に到達するまでの最大上昇速度は 5m/s、観測終了後の最大下降速度は 2.5m/s とした。高度 1000m での観測を行う場合には、到達までに 200 秒、帰還に 400 秒を要するために高度 1000m での滞空時間は約 5 分となる。

ドローンと搭載した機器および離発着場所を図 33 に示す。

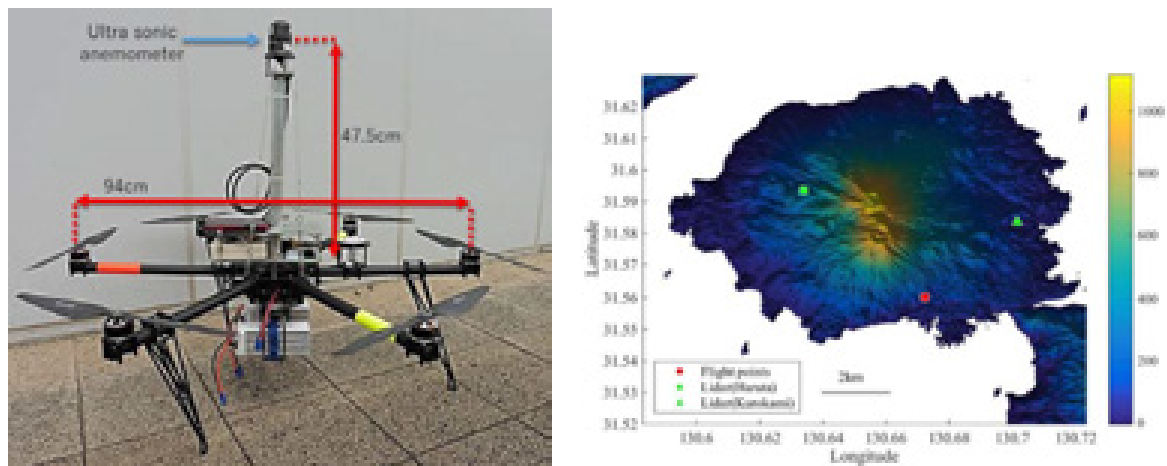


図 33 ドローンに搭載した風向風速計 (左) およびドップラーライダーによる風観測位置図 (右)。赤丸がドローンの離発着場所、緑四角がドップラーライダーの設置地点を示す。

ドローンに搭載した CWS とドップラーライダーによる風向・風速の並行観測の結果を図 34 に示す。この日は、高度毎の風向は 300° と安定していた。ドローンで観測した風向・風速の鉛直プロファイルはドップラーライダーによる観測結果と整合的で、概ね、再現できているといえる。

風向・風速に加え、気温と湿度の鉛直プロファイルを図 35 に示した。気温・湿度の鉛直プロファイルより、混合層高度が 850m 程度であることが推測された

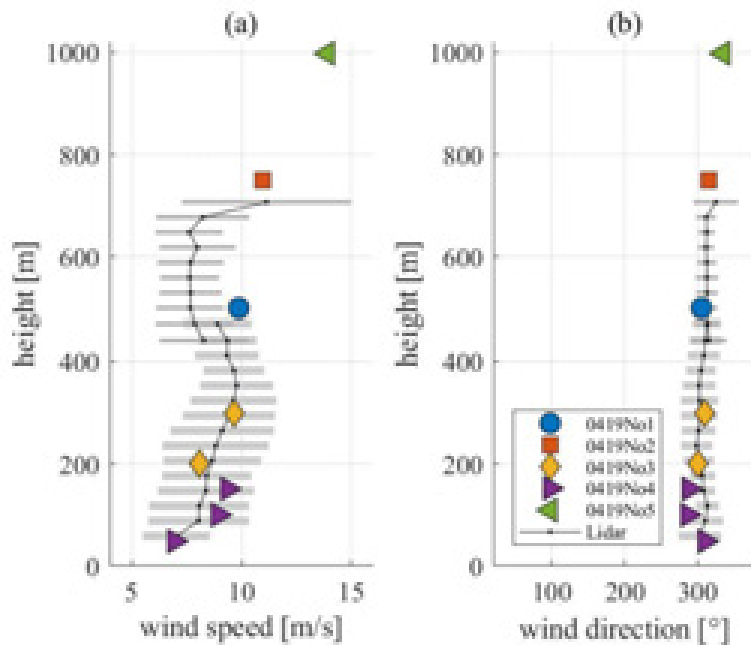


図 34 ドローンに搭載した CWS とドップラーライダーによる風向・風速の比較。左:風速、右:風向。シンボルは静止したドローンに搭載した CWS による計測（キャンペーンごとにシンボルを変えてある）、横線はドップラーライダーによる計測平均値を示す。

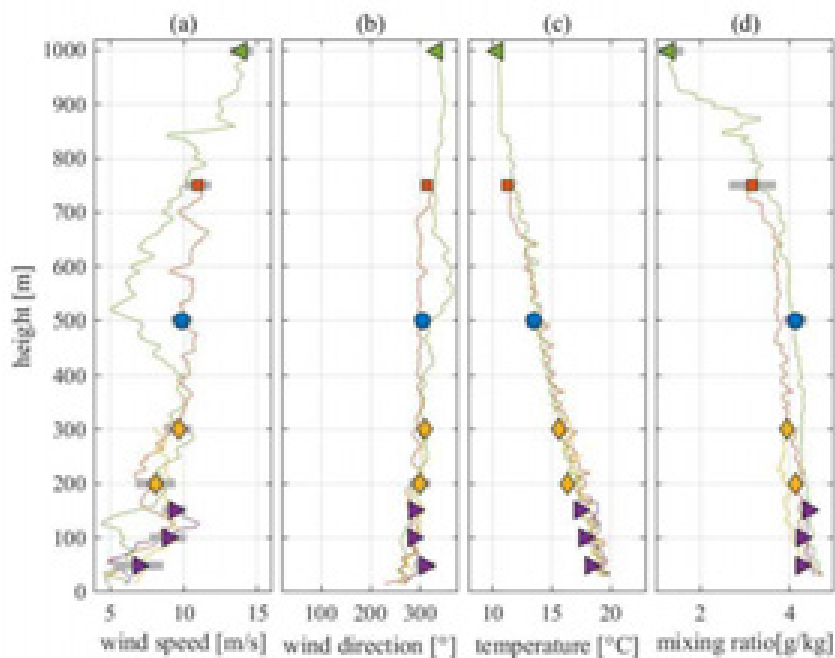


図 35 ドローンに搭載した CWS とドップラーライダーによる気象データの比較。左から風速、風向、気温、混合比を示す。シンボルは静止したドローンに搭載した CWS による計測（キャンペーンごとにシンボルを変えてある）、横線はドップラーライダーによる計測平均値を示す。細い線は、上昇時と下降時における計測値の平均をプロットした。

本研究では、ドップラーライダーによる風向・風速の連続観測も実施している。ハルタ山に設置したドップラーライダーを図 36 に示す。観測条件が良ければ、地上から相対高度 500m までの風の鉛直プロファイルを取得可能である。ハルタ山の山頂は標高 408m にあるので、ほぼ南岳と同等の高度までの風向・風速データを観測することができる。



図 36 ハルタ山に設置したドップラーライダー。

b) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーション

火山噴火による火山灰の大気中の拡散・沈着の問題は大気科学の視点からの研究も必要不可欠であるので、火山活動が活発で噴煙高度が数 km に及ぶ噴火も頻繁に発生する桜島を対象とし、領域気象モデルを用いて火山灰の大気輸送の数値解析をした。特に、火山灰輸送に及ぼす地形により励起される気流や波動の影響に着目して研究を進めた。研究成果は 29 年度に Poulidis et al. (2017)⁵⁾として、出版した。その概要は以下の通りである。

数値シミュレーションには気象モデルと化学過程・エアロゾル過程モデルとの結合モデルである WRF-Chem (version 3.6.1)を用いた。西日本・南日本をカバーする領域を第 1 領域 (12.5 km 格子) とし、九州をカバーする第 2 領域 (2.5 km 格子)、鹿児島県をカバーする第 3 領域 (500 m 格子) を設定した。モデル上端高度は 50 hPa として、鉛直に 90 層を取り、下層ほど細かい格子間隔とした。初期値・境界値には ERA-Interim を用いた。

対象とした噴火イベントは、2013 年 8 月 18 日に発生したブルカノ式噴火である。このときの噴煙の到達高度は火口から 5 km ないし 7 km と見積もられている。降灰は桜島から西・北西方向の広域に観測された。降灰の測定値として鹿児島県による 62 箇所の観測点でのデータを、火山噴火状況は気象庁によるデータを利用した。

噴火による火山灰の排出を模擬するため、火口上空にトップヘビーな傘型の火山灰プリュームのプロファイルを噴火時刻に与えた。プリュームの初期高度 HP は明確ではないため、ここでは、3 km、4 km、5 km の 3 通りの設定をした感度実験をすることで、プリューム高度の違いによる火山灰の拡散・沈着への影響も調べた。さらに地形の影響を明示するため、対照実験として第 3 領域の標高を仮想的にゼロとした実験も行った。

図 37 には、異なる HP の場合の実地形実験と平坦地形実験とで得られた降灰量の結果を示す。卓越風向が東・東南であったため、降灰は桜島から西・北西に広がっていることが

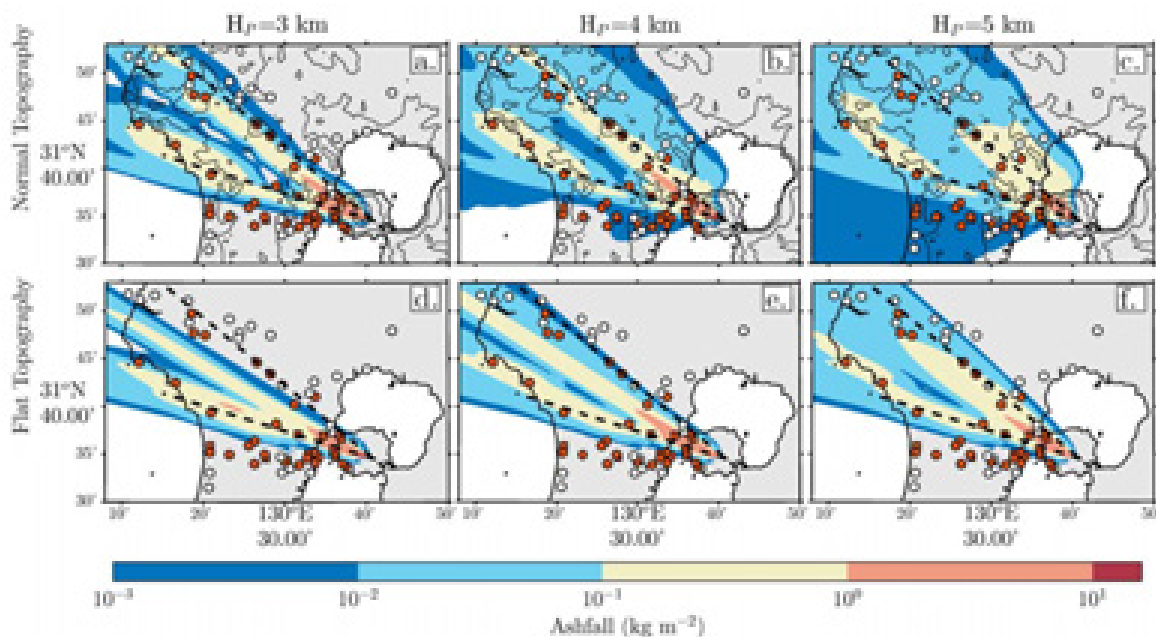


図 37 HP が 3 km, 4 km, 5 km の場合に計算された降灰量。実地形の場合 (Normal) と標高ゼロの平坦地形 (Flat) の結果を示す。色つきの丸印は降灰が観測された地点を示す。

分かる。降灰観測地点の結果と比べて計算は良好な結果を示している。実地形と平坦地形の場合を比べると、平坦地形の場合には降灰量が距離に応じて減少して分布パターンもスムーズである一方、実地形の場合には離れた地点でも降灰量の多い地域があり卓越風向に直交方向の分布の広がりも顕著である。距離に応じた降灰量分布や鉛直断面など他の角度から調べたところ、平坦地形の場合には HP が高いほどより遠くまで降灰が生じるが、実地形の場合には HP によらずに降灰は遠方まで達することが分かった。

このような違いは、桜島や下流側の薩摩半島の地形と大気成層の効果により励起された流れパターンの違いや重力波の生成の影響を受けていることが分かった。火山地形は重力波と風下側での下降流を発生させ、その影響は火山近傍及び遠方にも及ぶことがわかった。

平成 29 年度は WRF により桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーションを行った。桜島を中心として中国大陸から東日本まで及ぶ広領域 (PBL、図 38) では、D1、D2、D3 のドメインを設置し、空間分解能を 12.15 km→4.05 km→1.25km と段階的にあげて、計算した。南九州を解析範囲とする LES 領域では、D4、D5 のドメインを設定し、空間分解能を 270m まであげた。いずれの場合も、鉛直方向には 146 のレベルを設定し、高度 2km 以下は 80 のレベルに分解した。

特徴的な火山灰分布が得られている 2017 年 6 月 6 日 (図 19 参照) と 10 月 1 日について、気象要素を計算した。WRF により計算した風向、風速及、気温、混合比のプロファイルと高層気象観測の結果を比較して図 39 に示す。WRF による計算結果はおおむね高層気象観測のデータに一致している。

このシミュレーションの結果のうち、2017 年 6 月 6 日 7:56 に爆発的噴火が発生した時点での桜島周辺の風向・風速に図 40 に示す。また、南岳山頂から北へ 2.2km の位置の東西断面を図 41 に示す。この時点では南東の風が吹いているが、山頂の風下側で下降流が大きくなっており、さらに 2 km ほど風下側では上昇流となっている。また、桜島の東側では始良カルデラの縁を形成する山岳地形が存在するが、カルデラ縁を超えてカルデラ内に風が入ったところで、下降流と上昇流が繰り返されていることがわかる。

次に WRF によるシミュレーション結果をハルタ山に設置したドップラーライダーの風速と比較した。鉛直成分のプロファイルの時間変化を図 42 に示した。低高度は下降流が、高高度は上昇流が卓越しており、大まかに一致している。また、6:30~7:00 は上昇流が卓越し、7:10~7:50 は下降流が卓越する特徴は両者で一致している。

FALL3D⁶⁾を用いて火山灰拡散シミュレーションを試みた。火山灰は北西側に落下し、図 19 に示す北西側の HAR の降灰を再現できるが、北東側の KOM には火山灰が到達しないシミュレーション結果となった。今後、さらに空間分解能を上げて、風速場を再現する必要があると考えられる。

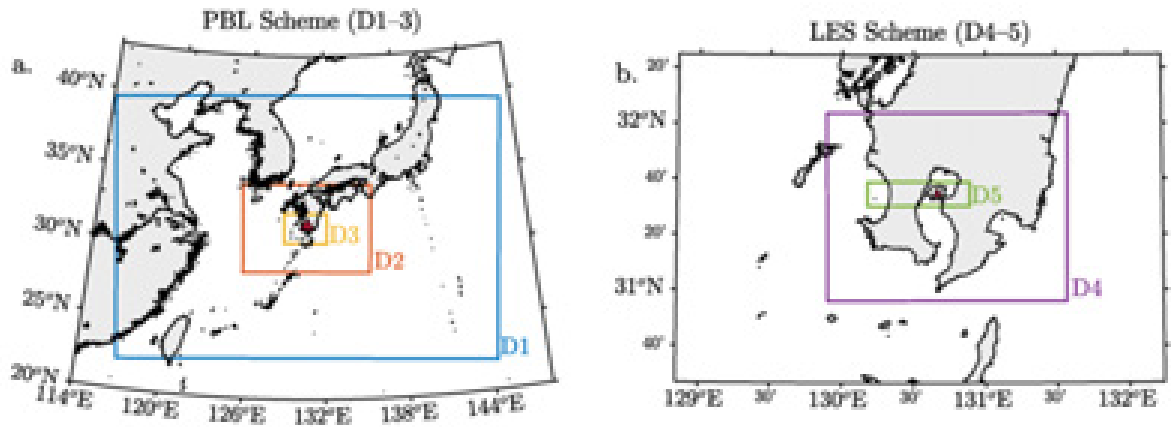


図 38 高分解能気象シミュレーションを行ったドメイン。

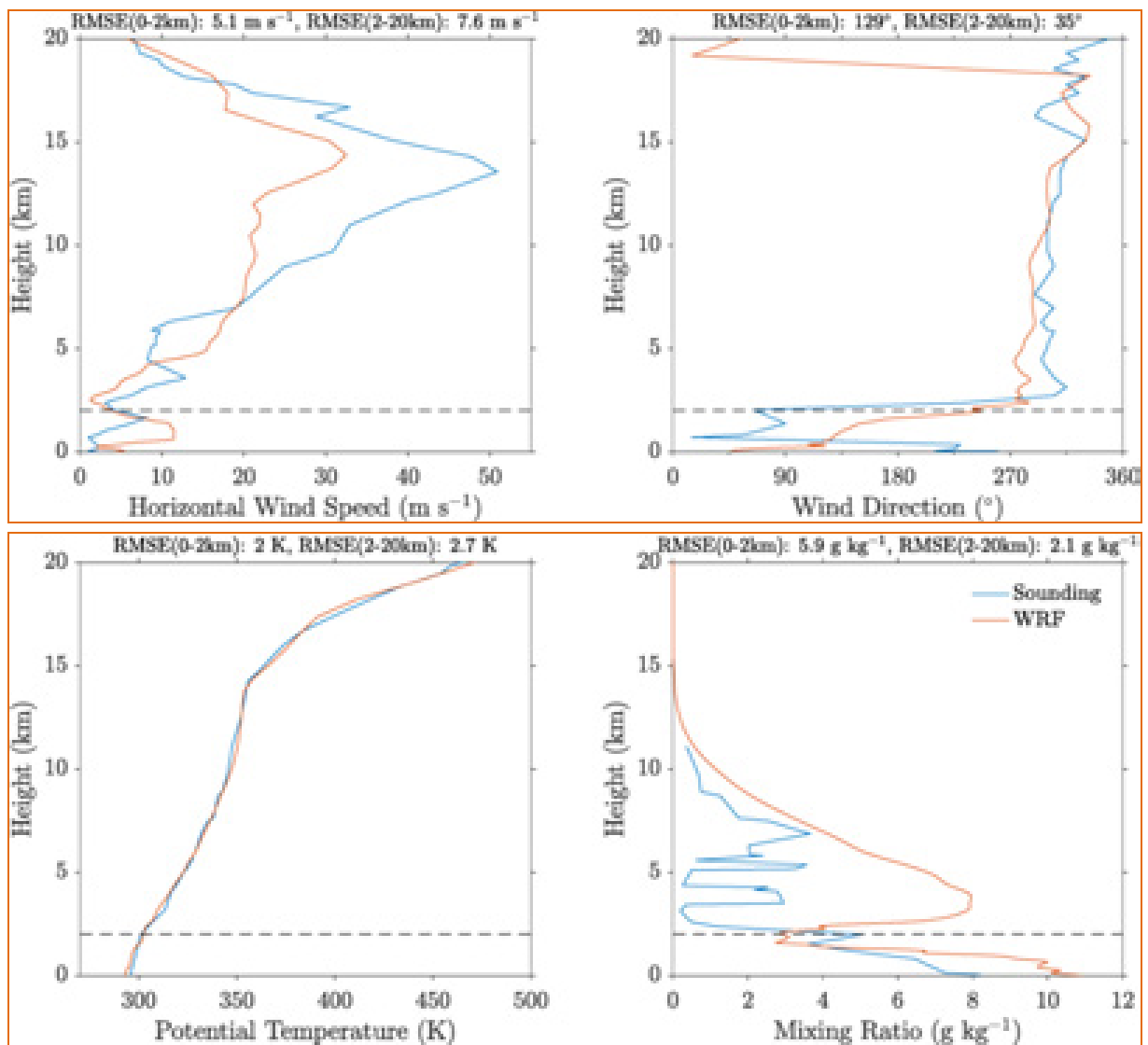


図 39 WRF により計算した風速、風向、気温、混合比のプロファイルと高層気象観測の比較。橙線は WRF による計算結果、水色線は高層気象観測。

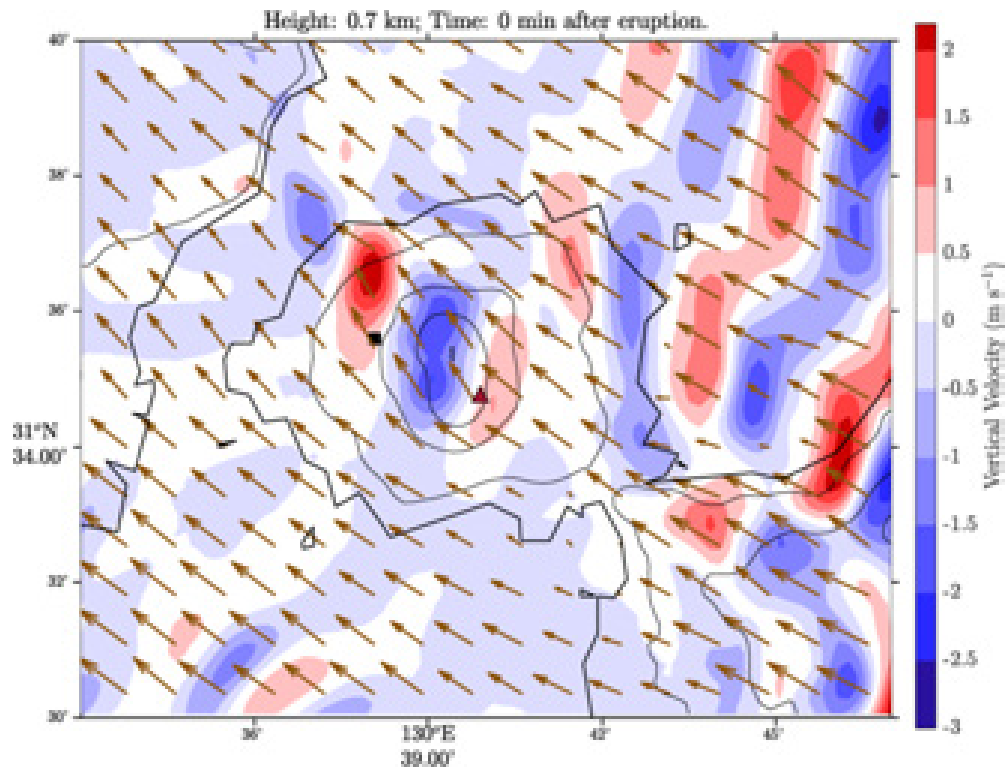


図 40 WRF により計算した桜島周辺の風速ベクトル。鉛直成分はカラーにより示した。

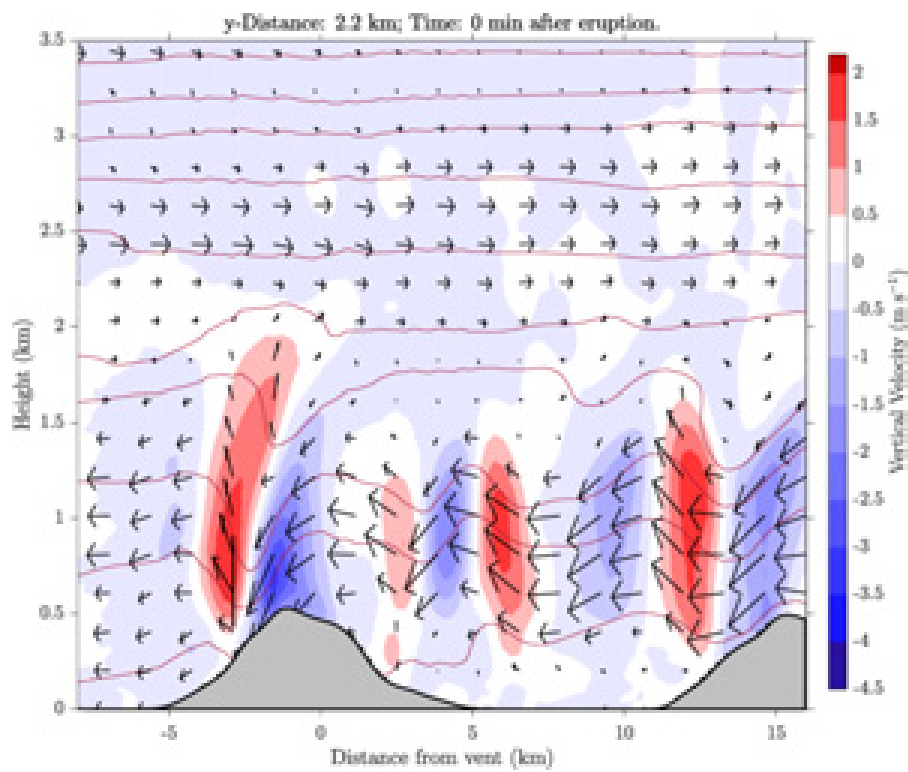


図 41 WRF により計算した桜島周辺の風速ベクトルの鉛直断面。鉛直成分はカラーにより示した。南岳山頂から 2.2km 北の東西断面を示した。

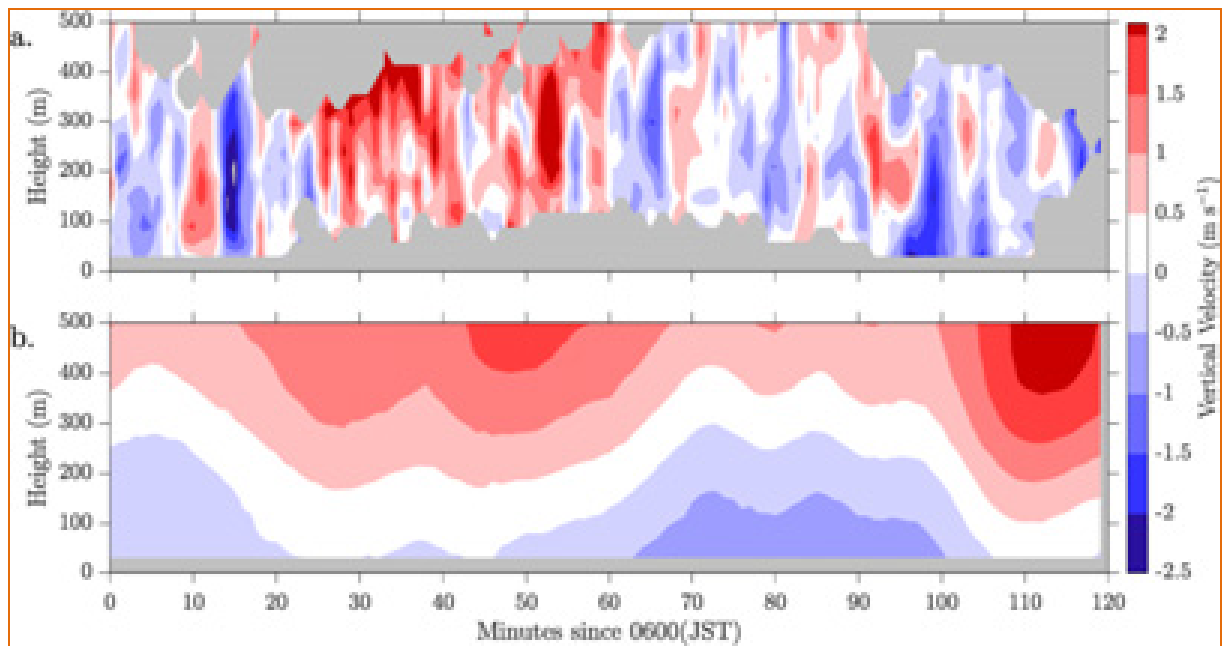


図 42 ドップラーライダーによる観測 (a) と WRF によるシミュレーション結果 (b) の風ベクトルの鉛直成分のプロファイルの時間変化の比較。ドップラーライダーはハルタ山に設置された (図 33、図 36) ものである。横軸は 6 月 6 日 6 時から経過時間である。高度はハルタ山 (海拔 408m) からの相対高度である。

c) 噴石の風力特性

噴石の落下速度を予測するために、噴石の風力特性を風洞実験により求めた。実験には噴石を模擬した模型（図 43、左）を作成し、風洞内に支持棒を用いて空力天秤に取り付け（図 43、右）、風向角を変化させて風力係数（図 44）を求めた。



図 43 噴石模型（左）および風洞内の設置状況（右）。

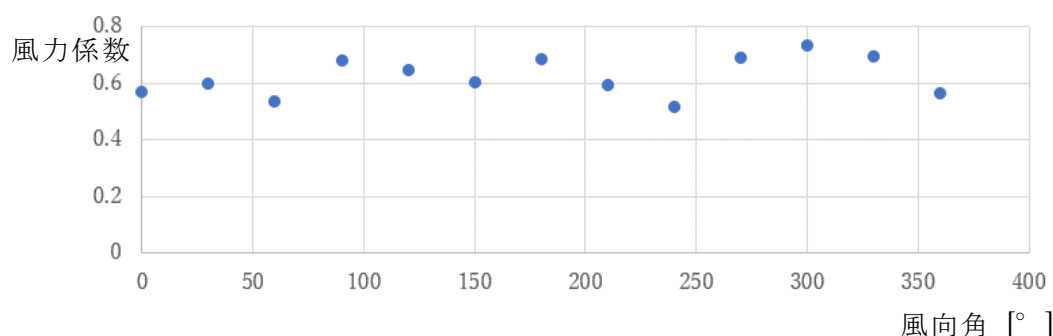


図 44 噴石模型を用いて求めた風力係数の風向角による変化。

d) 火山灰拡散シミュレーションの検討

PUFF モデルを用いた火山灰拡散シミュレーションの結果を桜島南岳において 2017 年 11 月 13 日に発生した爆発的噴火を対象に検討した。式(7)から推定される 1 分毎の火山灰放出量と噴出率から経験的に与えられる噴煙高度を図 45 に示す。噴煙高度は 4500m と推定された。気象庁は冠雲のために噴煙高度を発表していないが、この高度は、GNSS や X バンド MP レーダーから観測された値とほぼ同じであり、本研究で進めてきた火山灰検知の観測手法と噴煙高度の推定手法が有効であることを示すものである。

火山灰拡散シミュレーションによる火山灰移流の東西断面および南北断面を図 46 に示した。また、22:00 から 6 時間分の降灰量の分布を図 47 に示した。火山灰粒子はおおむね北東方向から北方向に堆積しており、実際の降灰分布の主軸と一致している。

桜島周辺の降灰分布を拡大して図 48 に示した。白丸はディストロメータを設置しているが火山灰粒子を検知しなかった観測点である。一方、シミュレーションでは桜島のほぼ

全域において $10\text{g}/\text{m}^2$ 以上の火山灰が予測されたが、実際に降灰があったのは、北東部から北部にかけての範囲であった。この原因は、2014年2月にインドネシアのケルート火山で発生した噴火を踏まえ、傘雲の形成を考慮した火山灰拡散シミュレーションに改良し、噴煙高度の増加とともに水平方向の拡散係数 (C_h) が、増加するような次式を提案したが、桜島の低高度の噴煙では拡散係数が過剰となっていたことが考えられる。

$$C'_h = C_h \times \left[1 + \frac{z}{z_0} \exp \left\{ - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \right] \quad (10)$$

降灰が観測された地点についてみると、シミュレーションでは桜島北東部および北部の KOM および FUT では、 $100\sim 400\text{g}/\text{m}^2$ の降灰が予測されたが、ディストロメータにより測定された降灰量は $2400\sim 2500\text{g}/\text{m}^2$ であり、シミュレーション結果が過少となっている。一方、桜島から 20 km 程度離れた隼人、国分、福山の降灰量は 8、11、63 g/m^2 であるのに対し、シミュレーションでは隼人、国分において $100\text{g}/\text{m}^2$ となっており、過剰予測となった。図 48 によれば、火山灰の堆積厚の中心が桜島北方の始良カルデラにあることから、粒径分布の中心粒径が小さい方に偏りすぎていることが考えられる。ディストロメータで観測された粒径分布と落下時刻を考慮してパラメータを調整していく必要がある。

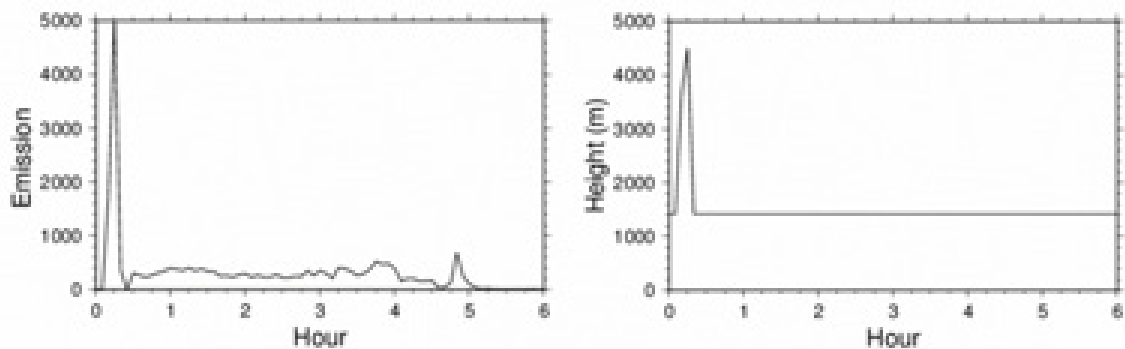


図 45 地盤変動および地震動振幅から推定される噴出率 (トン/5 分) と噴煙高度の時間変化。2017 年 11 月 13 日 22:00 からの経過時間。爆発発生時刻は 22:07。

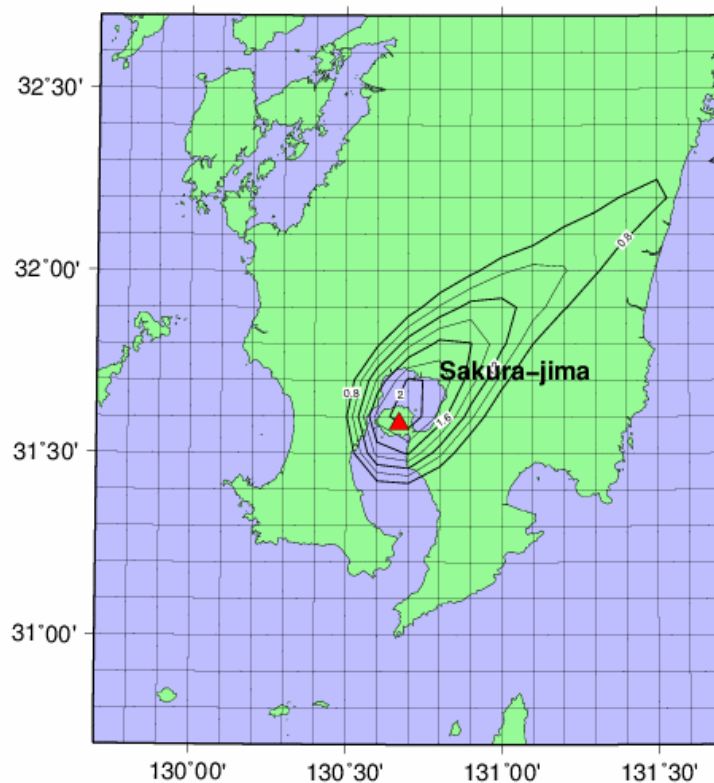


図 46 火山灰拡散シミュレーションによる降灰量の分布。降灰量は対数スケールで示しており、1=10g/m²、2=100g/m²である。22:00 から 6 時間分を計算した。

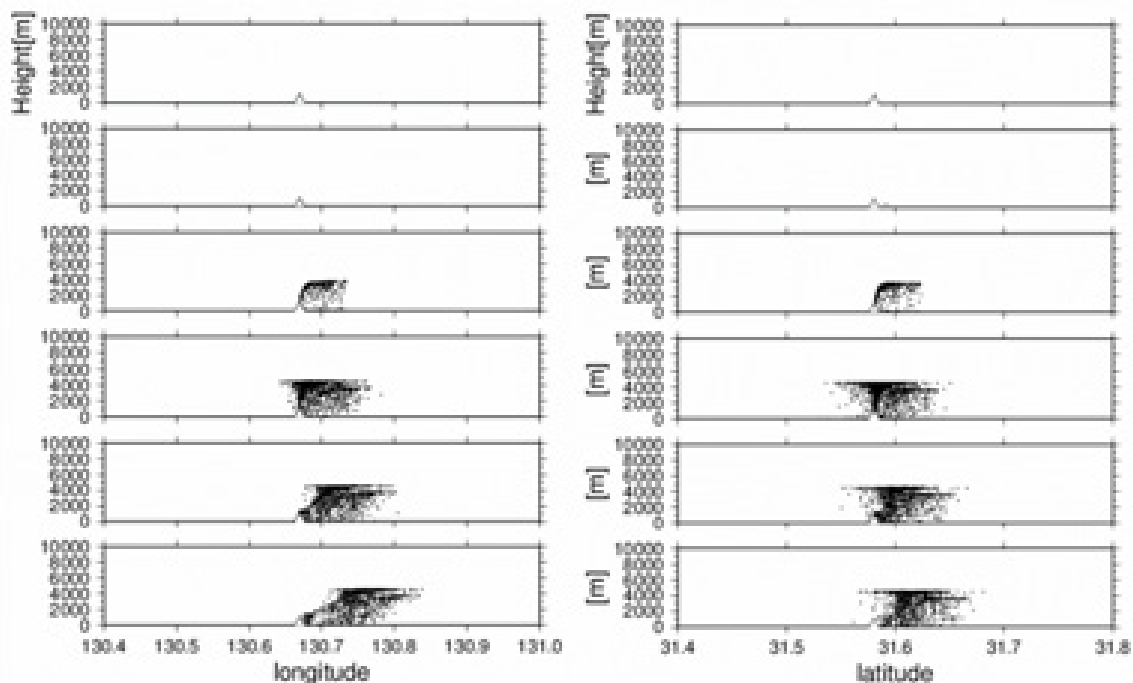


図 47 火山灰拡散シミュレーションによる火山灰移流の東西断面（左）、南北断面（右）。22:00 から 5 分毎の断面を示した。



図 48 火山灰拡散シミュレーションによる降灰量の分布と観測された降灰量。22:00 から 6 時間分を計算した。火山灰拡散シミュレーションによる降灰量は対数スケールで示した。1=10g/m²、2=100g/m²。カッコ内の数字は実測値（単位：g/m²）。FUT と KOM はディストロメータによる値。白丸はディストロメータを設置しているが火山灰粒子を検知しなかった観測点である。隼人、国分、福山は鹿児島県の測定値。

(d) 結論ならびに今後の課題

火山灰のマルチパラメータ観測網により火山灰観測がリアルタイムで行える状態となり、それを用いて、火山灰予測の高速化及び高精度化のための観測と解析を行った。2017 年 11 月 13 日の南岳の爆発では、山頂が雲に覆われていたので、噴煙高度は気象庁から発表されていないが、冠雲状態でも X バンド MP レーダーと GNSS 観測による PPR から噴煙高度を決定できたことは、火山灰拡散予測のために重要なデータが得られたことになる。さらに、噴火に伴う地盤変動量から火山灰放出量及び噴煙高度の上限を求める経験式が 2017 年に発生した火山噴火についても確認できたが、この経験式から見積もられる噴煙高度が X バンド MP レーダーと GNSS 観測から推定される噴煙高度とほぼ一致することは、噴煙高度が不明な噴火についても、噴煙到達高度と火山灰放出量を推定できることを意味し、様々な状況において火山灰の拡散予測が可能であることが示せた。

火山灰の拡散シミュレーションを火山近傍で高精度で行うためには精度が高く、高分解能の風速ベクトルデータが必要である。WRF を用いて風のシミュレーションをした結果はドップラーライダーの結果と定性的には整合しているため、サブテーマ自体の平成 29 年度における目標はほぼ達成できたといえる。

一方、ディストロメータの多点観測によって、降灰状況はより複雑であることがわかつ

てきた。2017年6月6日の火山噴火による降灰は桜島北西部では再現できたが、北東部に到達した火山灰は再現できておらず、より高精細な風速ベクトルを再現する必要があることが示された。また、2017年11月13日の噴火では、流向は再現できたものの、火山灰の拡散範囲と堆積した重量において大きな違いが依然として存在する。ディストロメータによる観測により、粒径分布が明らかになりつつあるので、粒径分布をチューニングすることにより、地上観測と整合性のあるシミュレーションを行える可能性があるが、来年度以降、地上観測を強化するとともに、観測に基づいた粒径分布を考慮したシミュレーションを行う必要がある。

(e) 引用文献

- 1) Ohta, Y., Iguchi, M.: Advective diffusion of volcanic plume captured by dense GNSS network around Sakurajima volcano: A case study of the Vulcanian eruption on July 24, 2012, Earth Planets, Space, Vol.67:157, DOI 10.1186/s40623-015-0324-x, 2015.
- 2) 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.
- 3) Morton, B. R., Taylor, G. and Turner, J. S.: Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 234, No. 1196. (Jan. 24, 1956), pp. 1-23, 1956.
- 4) Poulidis, A-P, Takemi, T., Iguchi, M., Renfrew, I.A.: Orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash: A case study of Mt. Sakurajima, Japan, Journal of Geophysical Research: Atmosphere, Vol. 122, pp. 9332-9350, 2017.
- 5) Tanaka, H. L., Iguchi, M., Nakada, S.: Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal from Kelud volcano in Indonesia on February 13, 2014, Jour. Disast. Res, Vol.11, pp.31-42, 2016.
- 6) Costa, A., Macedonio, G., and Folch, A.: A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes, Earth Planet. Sci. Lett., 241, 634-647, 2006.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
HOTTA Kohei and IGUCHI Masato	Ground deformation source model at Kuchinoerabujima volcano during 2006-2014 as revealed by campaign GPS observation	Earth Planets, Space	平成 29 年 7 月

Alexandros-Panagiotis POULIDIS, Tetsuya TAKEMI, Masato IGUCHI, I. A. RENFREW	Orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash: A case study of Mt. Sakurajima, Japan	Journal of Geophysical Research: Atmosphere	平成 29 年 7 月
Alexandros-Panagiotis POULIDIS, Tetsuya TAKEMI, Atsushi SHIMIZU, Masato IGUCHI S. F. JENKINS	Statistical analysis of dispersal and deposition patterns of volcanic emissions from Mount Sakurajima, Japan	Atmospheric Environment	平成 30 年 2 月
井口正人	火山噴火の発生予測（特集 未来予測）	Re : Building maintenance & management	平成 29 年 9 月
Alexandros-Panagiotis Poulidis, Tetsuya Takemi, Masato Iguchi, Ian Renfrew	Topographic and meteorological controls on the dispersal and deposition of volcanic ash	IAVCEI 2017 Scientific Assembly, Portland, Oregon, USA	平成 29 年 8 月 14 日
Sato, E., Fukui, K., Shimbori, T., Ishii, K., Tokumoto, T., Maki, M., Iguchi, M.	Fine structure of volcanic ash plume observed by advanced weather radars	IAVCEI 2017 Scientific Assembly, Portland, Oregon, USA	平成 29 年 8 月 14 日
Masato Iguchi	Probabilistic forecasting of amounts of volcanic ash ejected by vulcanian eruptions at the Sakurajima volcano, Japan	IAVCEI 2017 Scientific Assembly, Portland, Oregon, USA	平成 29 年 8 月 18 日
Kim, Yura, M. Maki, M. Iguchi, D.-I. Lee	Analysis of volcanic ash clouds under moist environment using ANT3D	日本気象学会 2017 年 春季大会、D459	平成 29 年 5 月
真木雅之・小堀壮彦	火山噴煙の三次元レーダデ ータ解析ツール (ANT3D) の 概要	日本気象学会 2017 年 春季大会、D458	平成 29 年 5 月
Alexandros-Panagiotis Poulidis、竹見哲也、井 口正人	火山灰の大気輸送に及ぼす 地形効果：桜島噴火の事例 解析	日本気象学会 2017 年 度春季大会	2017 年 5 月 26 日
Suh, S.-H., M. Maki, M. Iguchi, and D.-I. Lee	Physical parameters analysis of volcanic ash	日本地球惑星科学連 合大会 2017 年大会、	平成 29 年 5 月 23 日

	particles measured by 2D-Video Disdrometer	SVC-49-07	
Alexandros-Panagiotis Poulidis, Tetsuya Takemi, Masato Iguchi, Ian Alasdair Renfrew,	Orographic effects on the transport and deposition of volcanic ash - A Sakurajima case study	日本地球惑星科学連 合大会 2017 年大会、 SVC-49-08	平成 29 年 5 月 23 日
田中博・井口正人	火山灰追跡モデル PUFF の 開発と空中濃度推定	日本地球惑星科学連 合大会 2017 年大会、 MIS02-01	平成 29 年 5 月 23 日
佐藤英一・福井敬一・新 堀敏基・石井憲介・徳本 哲男・真木雅之・井口正 人	火山噴煙の気象レーダー観 測	日本地球惑星科学連 合大会 2017 年大会、 MIS02-P01	平成 29 年 5 月 23 日
日向洋・井口正人・鍵山 恒臣	桜島火山近傍 LIDAR 観測に よる火山噴出物の散乱特性	日本地球惑星科学連 合大会 2017 年大会、 MIS02-P06	平成 29 年 5 月 23 日
太田雄策・井口正人	Possibility of real-time volcanic plume monitoring using GNSS phase residual and SNR data	日本地球惑星科学連 合大会 2017 年大会、 MTT38-02	平成 29 年 5 月 23 日
堀田耕平・井口正人	2006~2014 年の GPS 繰り 返し観測から明らかにした 口永良部島火山における地 盤変動源モデル	日本地球惑星科学連 合大会 2017 年大会	平成 29 年 5 月 23 日
堀田耕平・井口正人	2017 年 3 月 25 日桜島南岳 噴火に前後する傾斜ひずみ 変化	日本火山学会 2017 年 秋季大会	2017 年 9 月 22 日
井口正人・園田忠臣・竹 中悠亮・味喜大介	Parsivel を用いた火山灰連 続観測	日本火山学会 2017 年 秋季大会、B3-14	2017 年 9 月 23 日
水落裕也・真木雅之・福 島誠治	降灰観測のための X バンド MP レーダ反射因子の再解析	日本火山学会 2017 年 秋季大会、B3-14	2017 年 9 月 23 日
小堀壮彦・真木雅之・福 島誠治	小堀壮彦・真木雅之・福島 誠治	日本火山学会 2017 年 秋季大会	2017 年 9 月 23 日
真木雅之	自由落下実験から得られた 火山灰粒子の空力学的特性	日本火山学会 2017 年 秋季大会	2017 年 9 月 23 日
井上実・佐々木寛介・小 林朋樹・辻本浩史・志村 智也	ドローン(UAV)を用いた高 層気象観測技術の実証	水文・水資源学会	2017 年 9 月 21 日

小林朋樹・井上実・佐々木寛介	気象関連分野におけるドローン活用と今後の展望	日本気象学会 2017 年度秋季大会	2017 年 10 月 30 日
味喜大介・井口正人・山元孝広	桜島火山における降下火山灰粒子の粒径分布の検討	京都大学防災研究所 研究発表講演会	2018 年 2 月 21 日
中道治久・井口正人・下村誠・竹中悠亮	南九州の火山における小型 X バンド偏波レーダーの展開と噴火観測事例と地震動との比較	京都大学防災研究所 研究発表講演会	2018 年 2 月 21 日
Alex Poulidis・Tetsuya Takemi・Masato Iguchi	Statistical Analysis of the Transport and Deposition Patterns of Volcanic Emissions from the Sakurajima Volcano	京都大学防災研究所 研究発表講演会	2018 年 2 月 21 日
堀田耕平・井口正人	2017 年の桜島南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化	京都大学防災研究所 研究発表講演会	2018 年 2 月 21 日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

① プロジェクトの総合推進

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

② リモートセンシングによる火山灰放出量の即時把握技術開発

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてレーダー観測を継続する。前年度までの桜島を取り巻くディストロメータに加え、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する。また、噴火頻発期には火山灰採取のキャンペーン観測も実施する。その上で、X バンド MP レーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量、また、ディストロメータの出力値

と地上降灰量の関係を多くの噴火事例について調べ、その経験的關係式の精度を上げる。さらに、ディストロメータにより取得された降灰粒子データベースを用い、理論的な降灰量推定式を導出し、過去の噴火事例に適用して理論的推定式の精度検証をおこなう。

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する。GNSS 観測から得られる LC 搬送波位相残差及び SN 比と地上降灰量との関係を調べ、關係式を提示する。また、地盤変動量から算出される火山灰放出量との關係についても検討する。

ライダー観測を継続することにより、偏光解消度および 2 波長比を利用した粒径に関する統計的解析を多数の事例について行う。また、消散係数の出現頻度解析を行い、観測により得られた散乱強度を定量化する。

さらに、ライダー観測により得られた微小火山灰粒子とレーザー観測による粗大粒子との差異についても考察する。

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

③火山灰拡散予測の高速化技術開発

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

噴煙柱シミュレーションによって、噴出率と継続時間ごとの噴煙柱高度、噴煙外形のデータベースを充実する。火山噴火の映像からシミュレーションの妥当性を検討する。

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する。

④火山灰拡散予測の高精度化技術開発

ドップラーライダーと地上計器による各地点における風向・風速観測を継続する。また、夏冬 2 回、ドローンによる大気中の風観測を行う。今年度は 2 台のドローンを同時使用し、山頂を挟んで風上側と風下側、あるいは山頂に近い場所と離れた場所というように、空間分布を把握できるように観測を行う。

火山ガスセンサーや微小粒子状物質の濃度の測定可能センサーを搭載し、火山周辺の移流把握に資する観測を行う。また、ライダーをスキャンモードにすることにより、火山灰移流状態から空間的な風の状態を把握する。

WRF-CHEM メソ気象モデルにより複雑火山地形における火山体周辺の風速ベクトル分布を求める。今年度は高分解能 (90 m 格子) での風速場シミュレーションを行う。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状態の再現の高精度化を図る。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・高精度化を図る。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う。

桜島など過去の噴火活動で落下したレキの落下速度等の空力特性を、防災研究所（宇治市）の風洞実験装置を利用して明らかにする。レキの大きさと落下速度を実験的に求めるが、形状およびレキの姿勢との関係にも注目して解析を進める。今年度は密度の大きいレキを対象にして実験を行う。また、瓦や壁材を対象に耐衝撃性能試験を行い、サブテーマD3に引き渡す基礎データを作成する。

3.3 「火山災害対策のための情報ツールの開発」

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成 29 年度業務目的

(2) 平成 29 年度の成果

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

(3) 平成 30 年度の業務計画案

- (a) 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化
- (b) 自治体を対象とした火山対策の比較・分析
- (c) 都市部の施設に対する降灰影響評価実験
- (d) 登山者動向把握実験への参加・分担
- (e) サブテーマ間の連携

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

火山災害対策技術の開発

「火山災害対策のための情報ツールの開発」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	センター長	中田節也	nakada@bosai.go.jp
	総括主任研究員	棚田俊收	tanada@bosai.go.jp
	副センター長	藤田英輔	fujita@bosai.go.jp
	客員研究員	宮村正光	
	客員研究員	宮城洋介	
	契約研究員	久保智弘	tkubo@bosai.go.jp
災害過程研究部門			
	株式会社大林組 技術本部		
	技術研究所		
山梨県富士山科学研究所	上級主席技師	野畑有秀	
	上級主席技師	大塚清敏	
	主任研究員	諏訪仁	
	副部長	笠原修	
	主任研究員	吉本充宏	
	研究員	本多亮	
	契約研究員	川南結	

(c) 業務の目的

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

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

- ・過去の火山災害と降灰についての文献調査、情報収集結果の整理と分析を行う。
- ・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う。
- ・自治体を対象とした火山対策の現状調査と結果の比較・分析を行う。
- ・都市部の施設に対する降灰影響評価実験を行う。
- ・登山者動向把握実験への参加と分担。

3) 平成 30 年度：

- ・周知啓発用・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う。
- ・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う。
- ・自治体を対象とした火山対策の比較・分析を行う。
- ・降灰影響評価実験を受け、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する。
- ・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実験実施環境を考慮した降灰実験を行う
- ・登山者動向把握実験への参加・分担し、火山防災対策への利用に関して検討する。

4) 平成 31 年度：

- ・課題 D サブテーマ 2 から得られる解析結果をインプットとし、降灰被害予測コンテンツの試作版の開発に着手する。
- ・自治体防災担当者向けの教材を基に、周知啓発用・教育用コンテンツの試作版の開発に着手する。
- ・登山者動向把握実験で得られたデータと課題 D サブテーマ 1 から得られる成果を利用し、避難・救助支援コンテンツの試作版の開発に着手

5) 平成 32 年度：

- ・降灰被害予測コンテンツの試作版の開発を進める。
- ・周知啓発用・教育用コンテンツの試作版の開発を進める。
- ・避難・救助支援コンテンツの試作版の開発を進める。

6) 平成 33 年度：

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

- ・避難・救助支援コンテンツの試作版を利用した実証実験を行う。

7) 平成 34 年度 :

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

8) 平成 35 年度 :

- ・各種コンテンツの汎用化に着手する。

9) 平成 36 年度 :

- ・各種コンテンツの汎用化を進める。

10) 平成 37 年度 :

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

(e) 平成 29 年度業務目的

火山災害に対する防災上の課題を検討するために、前年度の成果を踏まえ、過去の火山災害と降灰についての文献調査結果の分析を行い、降灰量とインフラなどへの影響、災害時における情報の流れ方や自治体の対応、またそれらの効果について分析し、問題点を洗い出す。さらに、

降灰被害予測コンテンツの開発に向けて、都市部における火山灰に対する防災上の課題を検討するために、平成 28 年度に作成した実験計画に沿って、都市部の施設（病院、官庁等）に対する降灰による影響を評価するための降灰実験を行う。

避難・救助支援コンテンツの開発に向けて、日本国内に 50 ある常時観測火山の内、10 火山（十樽前山、北海道駒ヶ岳、岩手山、蔵王山、吾妻山、新潟焼山、草津白根山、箱根山、雲仙岳、九重山）のハザードマップに載っている情報をデジタル化する。さらに、基礎データ収集のために、富士山で行われる登山者動向把握実験（富士山チャレンジ）に参加する。

周知啓発用・教育用コンテンツの開発に向けて、既に自治体が行っている火山対策の現状等を調査し、その結果を比較・分析する。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 29 年 5 月に東京で課題 D 全体の会議を行った。本会議では、課題 D 内のサブテーマでの年度計画の共有とサブテーマ間連携について議論した。その結果、サブテーマ D1 と D3 の連携については、サブテーマ D1 から火口情報をサブテーマ C3 に提供するなどし、サブテーマ C3 等のシミュレーションや予測結果をサブテーマ D3 が利用することや、サブテーマ D1 で得られた火口周辺の情報等の地形データなどについて、サブテーマ D3 を通じて自治体に提供するなどして連携することで進めていくこととなった。一方、サブテーマ D2 と D3 の連携については、情報ツールでサブテーマ D2 からの情報を利用できるよう課題 A とも連携し、ツールの見せ方や情報の表示方法について検討を進めていくこととなった。さらに 2018 年 1 月に課題 D 全体での会議を行い、今年度の成果報告や次年度の連携などについて議論を行った。

避難・救助支援コンテンツの開発として、今年度は富士山チャレンジと連携して、登山者の動向把握実験を行い、約 2000 人の登山者動向データを入手することができた。さらに、昨年度から継続的に実施している火山ハザードマップのデジタル化について、今年度も 10 火山実施し、さらにこれまで行った火山ハザードマップを利用し、火山周辺の観光施設や防災施設を重ねることによって火山災害における人命にかかわるリスク分析を行った。

降灰被害予測コンテンツの開発として、火山災害において都市部に与える影響を考慮するために、災害対応を行う建物や病院施設などの機能継続を検討する際に重要な役割を持つ空調施設を対象として、降灰実験を行った。その結果、降灰条件(乾燥・湿潤)によって空調機の室外機に対して与える影響の違いを確認するとともに、一定量までの降灰については、空調機が機能することなどがわかった。また、日本建築学会と連携し、火山災害が建築物に与える影響の調査を行い、報告書の作成を行った。

周知啓発用・教育用コンテンツの開発については、中部圏の防災担当者を対象にアンケート調査と富士山周辺の火山防災担当者に火山防災に関する講習会を実施し、現状把握を行うとともに、2017 年新燃岳噴火において、周辺自治体にヒアリング調査を行った。さらに国外における火山対策や火山防災行政の調査としてニュージーランドでの取り組みなどを調査した。協力機関として参加している栃木県、那須塩原市、那須町の防災担当者にも協力を頂き、那須岳火山防災協議会での課題把握や必要としている情報の把握、防災訓練への参加などを行い、周知啓発用・教育用コンテンツの開発のための情報収集を行った。

(b) 業務の実施方法

火山災害に対する防災上の課題を検討するために、平成 28 年度に実施した過去の火山災害および降灰に関する文献調査の結果を分析するとともに、過去に火山災害に対応した経験のある自治体や今後の噴火に備えて対策に取り組んでいる自治体などを対象にヒアリング調査やアンケート調査を実施する。さらに、現状の火山対策などを把握するため、継続的に火山防災協議会等に参加するなどして現状と課題の把握を行う。また、公開されているハザードマップのデジタル化を実施し、火山災害による影響を把握するための情報を整備するとともに、社会基盤データと重ねることにより火山災害の影響を把握するための情

報を整理する。

降灰被害予測コンテンツの開発に向けて、平成 28 年度に作成した実験計画を基に、都市部の施設（病院、官庁等）に対する降灰による影響を評価するために事業継続に必要な建築物の空調機器を対象に、複数の条件下での降灰実験を行う。さらに日本建築学会とも連携し、建築物への影響や過去の被害などについて現地調査や整理を行う。

避難・救助支援コンテンツの開発に向けて、富士山の登山者を対象に動向を把握する富士山チャレンジに実施者として参加することで登山者動向データを収集し、避難・救助支援コンテンツに必要な登山者動向データの整備に着手する。

周知啓発用・教育用コンテンツの開発に向けて、既に火山対策に取り組んでいる自治体を対象としてヒアリング調査やアンケート調査等を行い、当該火山の状況や地域の状況について分析するとともに、火山防災協議会等に出席し現状の課題などを把握する。さらに、国外における火山対策や火山防災行政を把握するためにヒアリング調査を実施する。

(c) 業務の成果

火山災害に対する防災上の課題を検討するために、平成 28 年度に実施した文献調査結果やヒアリング結果の整理を行った。その結果、火山災害が与える影響は、火口と対象となる人や社会基盤との距離によって異なる。また、火山災害は風水害と比べると頻度の低い災害のため、防災担当者が経験したことが無いといったことが考えられる。このため、火山周辺自治体について、近年、噴火による災害対応を経験している、活動的な火口周辺まで人が近づける、離れた地域住民にまで噴火による被害が及ぶなど複数のタイプに分け、知識や経験に基づく防災意識や得られるニーズに明確な違いがあること、また火山専門家の発信する情報が十分に伝わっていないこと等が明らかになった。また、自治体職員の多くは専門的知識がなく 2~3 年で異動になる。これらを考慮すると、発生頻度が低く発生予測が容易ではない火山災害に対する、火山周辺自治体における知識の積み上げが難しいことも明らかになった。

i) 避難・救助支援コンテンツの開発

避難・救助支援コンテンツの開発については、火口近くまで登山することができる火山において、噴火が発生した際にもたらず被害は大きくなり、迅速な避難や救助活動といった初動対応が必要となり、避難や救助活動において登山者の動向情報が重要となる。このため、登山者の動向を把握する仕組みが必要とされており、今年度は富士山における登山者動向調査を行うことを目的に富士山チャレンジに参加し、登山者の動向のデータを収集した。この富士山チャレンジは、御嶽山噴火を受けて、2015 年から実施されたもので、登山者にビーコンを配布し、ビーコンの電波を山小屋などに設置した携帯電話をベースにしたレシーバーが受信し、登山者の動向と登山道の混雑状況などを把握する取り組みである（図 1、図 2）。

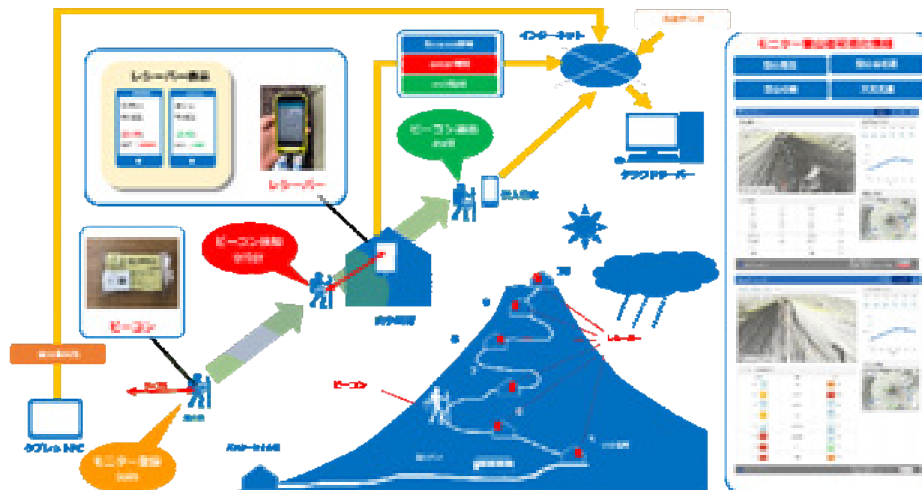


図 1 ビーコンによる登山者動向把握の仕組み



図 2 富士山チャレンジで配布したビーコン(左)と山小屋に設置したレーザー(右)

今年、その富士山チャレンジにおいて、登山者にも有益となる天候に関する情報や自分がどこまで登っているかといった情報を提供することで協力者にとってもメリットのある形で実施し、ビーコンの配布とレーザーの設置する登山道を増やしたことで参加者を多く募った(図 3)。ビーコンの配布は、2017年8月19日から8月31日にまで実施し、富士宮口、御殿場口、須走口、富士吉田口の各5合目、4箇所で行った。ビーコンの設置は、書く登山道口から山頂までに設置許可の取れた場所に設置を行い、4ルート26箇所に設置した(図 4)。その結果、2,368名の方に協力頂き、実施することができた(表 1)。



図 3 ビーコンの配布及びアンケート調査(左)とビーコン回収ボックス(右)

レーザーに用いたスマートフォンの動作や設置環境によって電源で問題が発生するなどして一部で正常に受信できないといった課題が見られたが、登山者に提供したリアルタイムでの自分の登山状況が分かるページについては、家族にその URL を伝えるなどして、状況を伝えるなどができ、Shared Value といった使い方も見られモニター協力者から好意的なご意見をいただいた。アンケート調査で富士登山の回数を調査したが、約 54%の登山者は富士登山が初めての方だった(表 2)。また、登山届けの提出についても約 78%が行っておらず、特にツアー参加者の多くは、ツアー実施者やガイドが提出しているかもしれないといった回答が見られ、登山者自身が把握できていないことも確認でした(表 3)。今回モニターに参加した 2,368 人中 218 人がデータの取得ができなかった。これは、全モニター参加者の約 9%に当たり、ビーコンを所持する際、レーザーが検知しにくいバックの奥といった可能性やビーコンそのものの品質の可能性があり、検証が必要である。

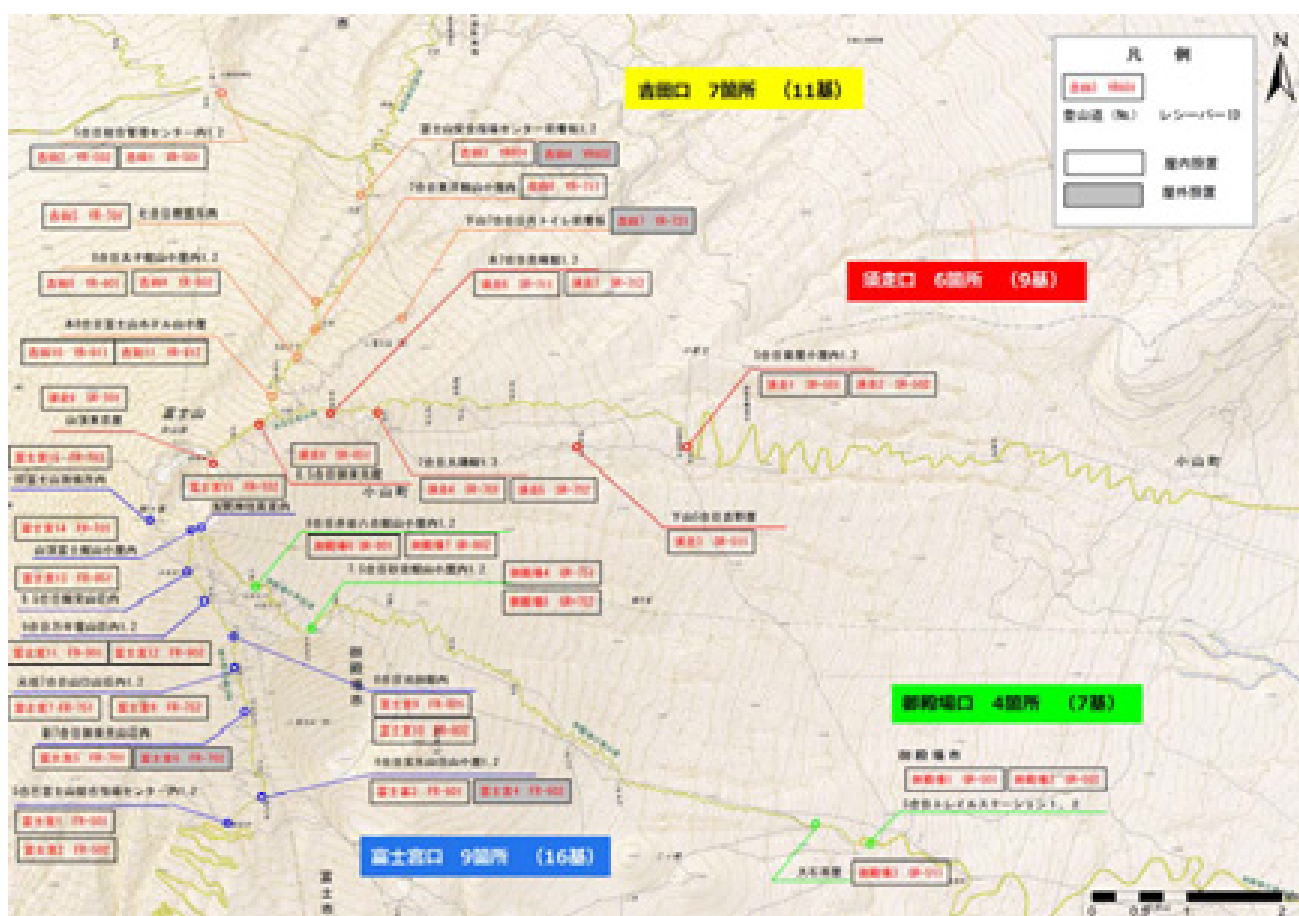


図 4 レーザーの設置箇所

表 1 モニター協力者数

登山道 期間		モニター数(人)						
		富士宮	御殿場	須走	吉田	合計	全登山者数	割合
8月19日	土	99	7	54	112	272	6,223	4.4%
8月20日	日	44	7	25	100	176	5,150	3.4%
8月21日	月	82	5	21	110	218	4,164	5.2%
8月22日	火	69	1	21	91	182	3,641	5.0%
8月23日	水	59	8	26	106	199	3,882	5.1%
8月24日	木	57	14	35	77	183	3,822	4.8%
8月25日	金	59	12	36	93	200	4,928	4.1%
8月26日	土	91	0	37	101	229	7,327	3.1%
8月27日	日	52	3	23	102	180	6,437	2.8%
8月28日	月	44	2	27	77	150	3,967	3.8%
8月29日	火	33	6	11	56	106	3,676	2.9%
8月30日	水	23	4	16	76	119	3,203	3.7%
8月31日	木	76	0	10	68	154	2,584	6.0%
合計		788	69	342	1,169	2,368	59,004	4.0%

表 2 富士登山回数

富士登山回数						
初めて	2回目	3-5回目	6-9回目	10回以上	無回答	total
1289	448	406	111	112	2	2368

表 3 登山届けの提出

登山届け			
あり	なし	無回答	total
528	1837	3	2368

次にビーコンの検知率について、各登山口で整理した表を表 4 に示す。

表 4 富士宮ルートでのビーコンの検知率

レシーバー位置	富士宮口														
	Up↑							top	Down↓						
	5合目	6合目	新7合目	元祖7合目	8合目	9合目	9.5合目	山頂	9.5合目	9合目	8合目	元祖7合目	新7合目	6合目	5合目
	FR-501	FR-601	FR-701	FR-751	FR-801	FR-901	FR-951	FR-T01	FR-951	FR-901	FR-801	FR-751	FR-701	FR-601	FR-501
FR-502	FR-602	FR-702	FR-752	FR-802	FR-902		FR-T02		FR-902	FR-802	FR-752	FR-702	FR-602	FR-502	
							FR-T03								
							SR-T01								
検知数	406	491	414	375	426	392	267	377	183	296	321	329	247	436	490
検知率	82.5%	99.8%	84.1%	76.2%	86.6%	79.7%	54.3%	76.6%	42.8%	69.2%	75.0%	76.9%	57.7%	88.6%	99.6%
登山数	492 (プリンスルート下山64)														

表 5 御殿場ルートでのビーコンの検知率

レシーバー位置	御殿場口									
	Up↑				top	Down↓				
	5合目	5合目2	7.5合目	8合目	山頂	8合目	7.5合目	5合目2	5合目	
	GR-501	GR-511	GR-751	GR-801	FR-T01	GR-801	GR-751	GR-511	GR-501	
GR-502		GR-752	GR-802	FR-T02	GR-802	GR-752		GR-502		
				FR-T03						
				SR-T01						
検知数	42	23	0	34	41	28	0	17	55	
検知率	76.4%	41.8%	0.0%	61.8%	74.5%	50.9%	0.0%	30.9%	100.0%	
登山数	55									

表 6 須走ルートでのビーコンの検知率

レシーバー位置	須走口									
	Up↑				top	Down↓				
	5合目	7合目	本7合目	8.5合目	山頂	8.5合目	本7合目	7合目	下山5合目	5合目
	SR-501	SR-701	SR-711	SR-851	FR-T01	SR-851	SR-711	SR-701	SR-511	SR-501
SR-502	SR-702	SR-712		FR-T02		SR-712	SR-702		SR-502	
				FR-T03						
				SR-T01						
検知数	204	254	243	198	216	130	165	242	251	253
検知率	78.5%	97.7%	93.5%	76.2%	83.1%	50.0%	63.5%	93.1%	96.5%	97.3%
登山数	260									

表 7 吉田ルートでのビーコンの検知率

レーザー位置	吉田口										
	Up↑						top	Down↓			
	5合目	6合目	7合目1	7合目2	8合目	本8合目	山頂	本8合目	下山7合目	6合目	5合目
	YR-501	YR-601	YR-701	YR-711	YR-801	YR-811	FR-T01	YR-811	YR-721	YR-601	YR-501
YR-502	YR-602		YR-712	YR-802	YR-812	FR-T02	YR-812		YR-602	YR-502	
					YR-813	FR-T03	YR-813				
						SR-T01					
検知数	655	875	818	585	627	840	796	419	88	853	933
検知率	69.1%	92.3%	86.3%	61.7%	66.1%	88.6%	84.0%	44.2%	24.0%	90.0%	98.4%
登山数	948										

その結果、富士宮ルートにおいては、検知率が約 77%となり、9.5 合目はレーザー機器の不具合により、検知率が低下していると考えられる。御殿場ルートでは、検知率が約 49%と低く、5 合目以外は登山道と山小屋の位置がやや離れているため検知率が低迷していると考えられる。さらに、7.5 合目ではレーザー機器の不具合により、検知できていない可能性があった。須走ルートについては、検知率が約 83%となっており、下山の 8.5 合目、本 7 合目で検知率が低く、下山道の通過を上手く検知できていない可能性がある。吉田ルートについては、検知率が約 73%となっており、登りの 7 合目 2、8 合目で検知率が低く、レーザー機器の不具合およびバッテリー切れによるものと考えられる。また、下山の本 8 合目での検知率が低下しており、下山道利用の場合通過しないことによるものと考えられる。さらに、下山 7 合目（トイレ前）については、下山者が立ち寄らず通過した場合、検知できない可能性も考えられる。以上のように検知率については、ビーコンの所持状況やレーザーの設置環境によって検知率が左右したが、約 70%以上の検知率があることが確認された。

最後に登山に掛かる時間については、表 8 に各ルートの平均的な登山時間を示し、この表から平均して 21~22 時間掛かることが分かった。次に図 5 は富士宮ルートでのコースタイムを示す。この図からパンフレットに載っている標準時間よりも掛かっていることが分かり、また山頂において時間が長くかかっている事からご来光渋滞が発生していることも分かる。

表 8 各ルートでの平均登山時間

	平均登山時間
富士宮口	20:53:46
御殿場口	21:39:10
須走口	22:07:40
吉田口	21:55:56

位置		標準時間 (min)	結果時間 (min)	結果時間 (min)	標準時間 (min)	位置
↑ Up	山頂	30	69	49	15	山頂
	9.5合目	30	44	24	15	9.5合目
	9合目	40	60	29	15	9合目
	8合目	50	58	35	20	8合目
	元祖7合目	50	47	25	25	元祖7合目
	新7合目	60	74	49	25	新7合目
	6合目	20	26	17	10	6合目
	5合目					5合目

図 5 富士宮ルートでの登山所要時間

以上のことから、登山者の動向把握を目的とした富士山チャレンジに参加し、登山者の動向や登山に掛かる時間、登山に臨む意識などについて調査することができ、避難・救助支援コンテンツを開発するために必要となる動向データを入手することができた。今後はこのデータを分析し、火山災害を対象とした避難シミュレーションでのパラメータとして静止するとともに、来年度は動向データに加え、バイタルデータも取得することから、引き続きデータを入手し、コンテンツの開発に必要なデータを収集する予定である。

次に避難・救助支援コンテンツの基盤となる火山ハザードマップについて、常時観測火山の内、樽前山、北海道駒ヶ岳、岩手山、蔵王山、吾妻山、新潟焼山、草津白根山、箱根山、雲仙岳、九重山の10火山について実施した(図6)。今回実施した火山について、草津白根山では、2018年1月に水蒸気噴火が発生し、1名が死亡する災害となった。図7にデジタル化した草津白根山のハザードマップのうち、噴石によるものを示す。この図の中心は白根山となっており、今回噴火を起こした本白根山が中心となっていないが、スキー場のロープウェイなどが噴石のハザードマップ内であることが分かり、災害が発生した際に危険な場所で死亡者が出る災害となったことがわかる。しかし、こういった情報は観光客などに十分周知されていないことから、本課題でデジタル化を進め、WEBGISなどにより閲覧できる環境を整備することで、観光客や住民、自治体の防災担当者がスマートフォンなどで自分の位置情報を重ねて、その場所の危険などを知る情報とすることもできることから、引き続きデジタル化を進め、平時及び災害時にも利用できるようにする必要がある。

また、今年度は昨年度実施した那須岳のハザードマップのデータを利用し、中村 洋一 宇都宮大学名誉教授から那須岳周辺の社会基盤データを頂き、ハザードマップと重ね合わせることで、リスクを把握することができた(図8)。今後は、火山災害によるリスク分析を行うことで、災害時や災害を想定した対応を検討するための資料とするため整理及び分析を進めていく。



図6 デジタル化した10火山のハザードマップの概要

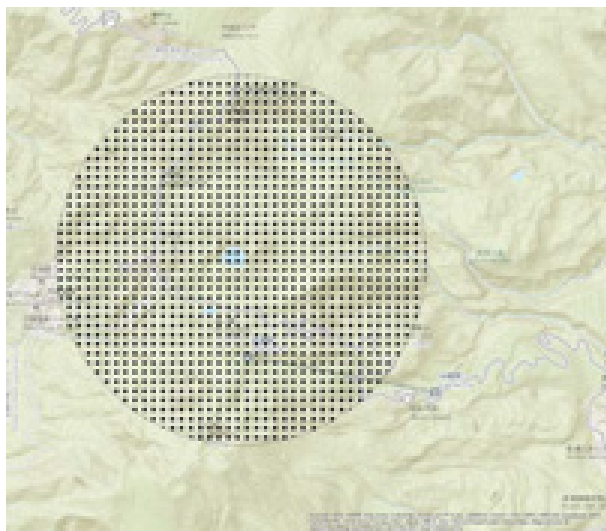


図7 草津白根山における噴石によるハザードマップ

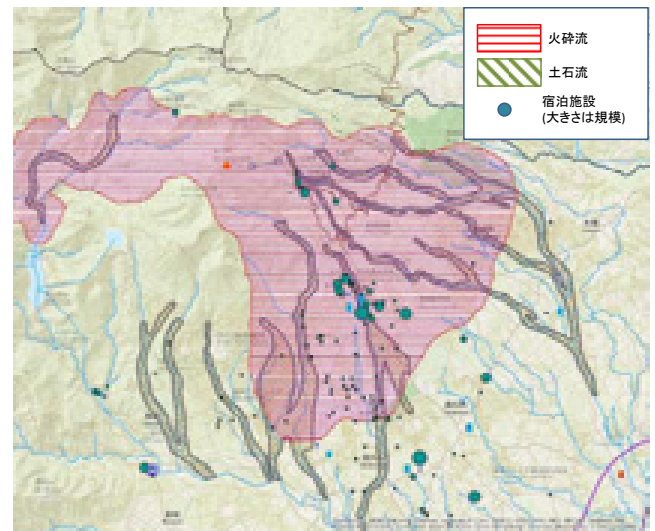


図8 那須岳におけるハザードマップと社会基盤データの重ね合わせ

ii) 降灰被害予測コンテンツの開発

降灰被害予測コンテンツの開発に向けて、平成28年度に作成した実験計画を基に、都市部の施設（病院、官庁等）に対する降灰による影響を評価するために事業継続に必要な建築物の空調機器を対象に、複数の条件下での降灰実験を行った。実験は、平成28年度に作成した計画に従い、大林組東京機械工場で2017年10月から12月まで実施した。

実験を行うにあたり、都市部における施設に対する影響であることから、富士山や浅間山に対する東京程度の距離感を基に遠位(distal)における建物への降灰被害を主対象として、降灰深さで20~30mm程度を想定とした。次に実験の対象とした室外機は、通常、送風ファン・熱交換フィン・熱媒体管の他に、圧縮機・膨張弁・制御用センサー・プリント基板等が内蔵されている。空調する場合、送風ファンによって外気を取り入れ、機器内部の熱交換器を通過させることで熱媒体と屋外空気との間で熱交換を行い、熱交換後の空気を再び屋外に排気するという動作になる。よって通風する構造から、火山灰は室外機内部に容易に侵入してくる。ビル用マルチエアコンの室外機では、機器の側面から熱交換器

および熱交換フィンを通して吸気し、上面の送風ファンで上向きに排気するものが多い(図9)。空調は、季節や1日の中でも時間帯によって、停止・運転といった稼働状況が変化する。室外機は運転中、停止中に関わらず降灰を受けることになる。停止中の降灰では、送風ファンプロペラへの堆積等により、室外機の起動不良になる可能性が高い。運転中の降灰では、給気に伴う熱交換フィンへの付着、内部への侵入が稼働状態に影響する恐れがある。火山灰はまた、乾燥状態で降ることもあれば、水分を含んで湿潤な状態で降ることもある。湿潤な火山灰の成因は、火山ガス中の水分に起源するもの、火山灰粒子への大気水分の凝結、降雨時の降灰など気象的要因が関与するもの等複数ある。こうしたことから、停止中、運転中の降灰、火山灰の乾燥・湿潤を基本的な実験ケース分けとし、表9に示すとおり実施した。

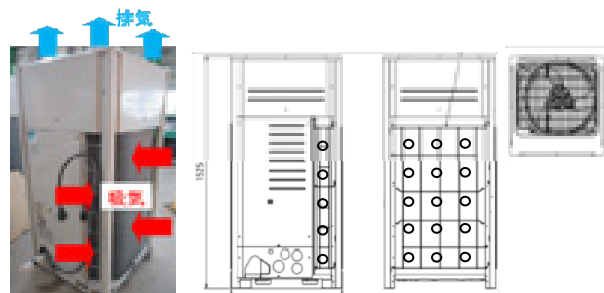


図9 実験に用いた空調室外機 (図中の○は風速測定位置 (携帯用サーミスタ風速計を使用し、降灰の前後に計測))

表9 実験ケース

実験 No	対象機器	火山灰の状態	室外機の稼働部位	室外機の稼働条件	降灰深 (mm)
1	室外機	乾燥	ファンのみ	降灰後稼働	2~50程度
2				稼働中の降灰	
3		降灰後稼働			
4		稼働中の降灰			
5	室外機+室内機	湿潤	ファン+圧縮機	稼働中の降灰	

表9に示す実験条件について、前述の通り、空調機は、室内機と室外機間の熱のやり取りを冷媒を介して行うことにより室内の冷・暖房を行うもので、火山灰の影響評価をする上では、灰が室内に侵入し難いという状況を考えた場合、直接火山灰を蒙るであろう室外機への影響を確認することが重要である。室外機は、冷媒を圧縮し流動させる圧縮機と外気を側面から吸入し上部へ吹出すファン・モーターと外気と熱交換する為の熱交換器と電子回路で構成されている。実験対象機器は、室外機のみを基本とし、室内機をつなげた場合を1ケースのみ実施した。Barnard¹⁾は、家庭用エアコンを使って実験を行い、降灰深さと室内機の吹出しエアの温度変化を確認している。しかし、ビル用マルチエアコンで室内機を接続し温度変化を直接的に確認するためには、室内機の環境を温・湿度一定下の空間にする必要があり、実験が大がかりになることが予想された。そこで本実験では、室内機をつないだケースは、暖房をフルパワー運転で行い、フィンに結露を生じやすくする条件下での実験ケースにとどめた。火山灰については、乾燥(無処理)状態と湿潤状態の場

合を考え、降灰深さ 2~50mm の範囲での実験を行った。降灰深さは、影響評価する対象が都市部であり遠位領域であることを考慮したものである。稼働中の降灰実験ケースでの降灰強度は、概ね 5mm/h となるよう火山灰の供給量をコントロールした。遠位領域での降灰強度はおよそ 2~3mm/h 程度とされており 5mm/h はかなり強い。しかしながら、5mm/h 程度の強度では、今回の実験に関しては本質的な影響は与えないと考え、実験時間の制約もありこの強度をとることとした。実験時の室外機の状態としては、①降灰中は機器を停止させ積灰後稼働させるケースと、②稼働中に降灰させ変化を確認するケースの 2 ケースを実施した。①の場合は灰を吹き出し口の直上より灰を降らせ、②は吸込口部に落ちるよう灰を降らせた。

実験の実施方法としては、室外機ファンの回転数を一定値に設定し、実際のファン回転数及びモーター電流値の変化を確認することとした。稼働中の降灰実験（実験 2、4、5）では、室外機の吸込口と吹出口の風速を計測し、実験前の風速との変化を確認した。また、ケース終了毎に室外機外部パネルを開け、内部の火山灰の積灰や付着状況を確認した。室内機をつけた実験 5 も同じ条件で実施したが、フルパワー運転を実現するために冷所に温度センサーを置き、室内温度 30℃になるよう暖房の運転をした。

また、今回用いる火山灰は噴火直後の新鮮なものではないため、火山ガス成分の大部分は雨で流出しており、火山灰粒子表面には付着していない。そのため、火山ガス成分(主に亜硫酸ガス)による腐食の影響は扱わない。

火山灰は、実験 1~2 は乾燥、実験 3~5 は湿潤での実験としている。そこで実験毎に含水比[(湿潤灰-乾燥後灰)/乾燥後灰×100]を測定(電子レンジ法)し状態を確認した。図 10 に示すように実験時の含水比は、実験時の環境湿度により多少変動するものの 0.2~0.4%以内に収まっており、乾燥火山灰と称しても問題ないと考えられる。

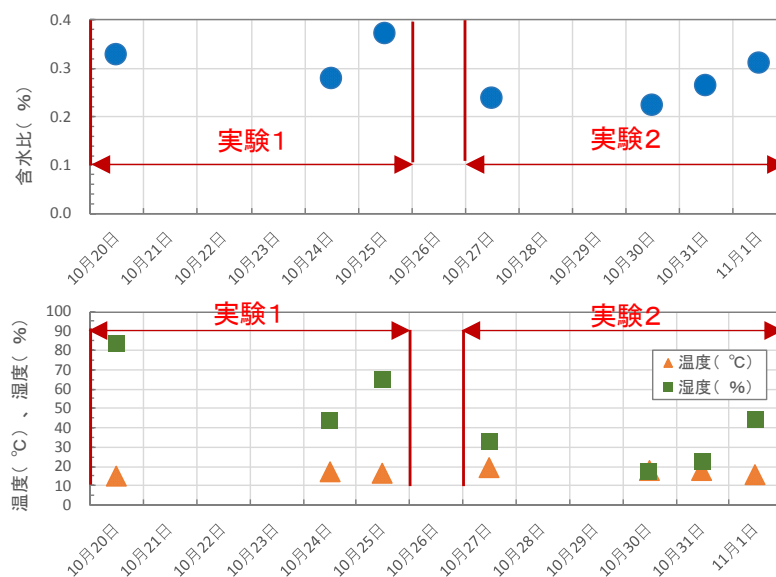


図 10 実験時の含水比

試料火山灰は、桜島(昭和火口から 3km の位置)で 2017 年 3 月に採取したものを用いた。桜島の火山灰は、流紋岩~安山岩質である。富士山の火砕物には玄武岩質のスコリアを主体とするものが多いが、入手の容易さ、国内の多くの火山灰は流紋岩~安山岩質であることから、桜島の火山灰を用いることにした。試料火山灰の粒度分布を図 11 に示す。粒径は 3~3,000µm の範囲にある。しかし、遠位領域の降灰では、粒径数 100µm 以下が代表

的である。本研究では、Barnard¹⁾に倣い篩で濾過し 250 μm 以下の粒子のみ用いることにした。濾過後の乾燥状態の火山灰の見かけの密度は、1,600 kg/m^3 程度であった(図 10)。

実験で用いた火山灰は、実験 1~2 は乾燥、実験 3~5 は湿潤としている。そこで実験毎に含水比[(湿潤灰-乾燥後灰)/乾燥後灰 $\times 100$]を測定(電子レンジ法)し状態を確認した。図 10 に示すように実験時の含水比は、実験時の環境湿度により多少変動するものの 0.2~0.4% 以内に収まっており、乾燥火山灰と称しても問題ないと考えられる。

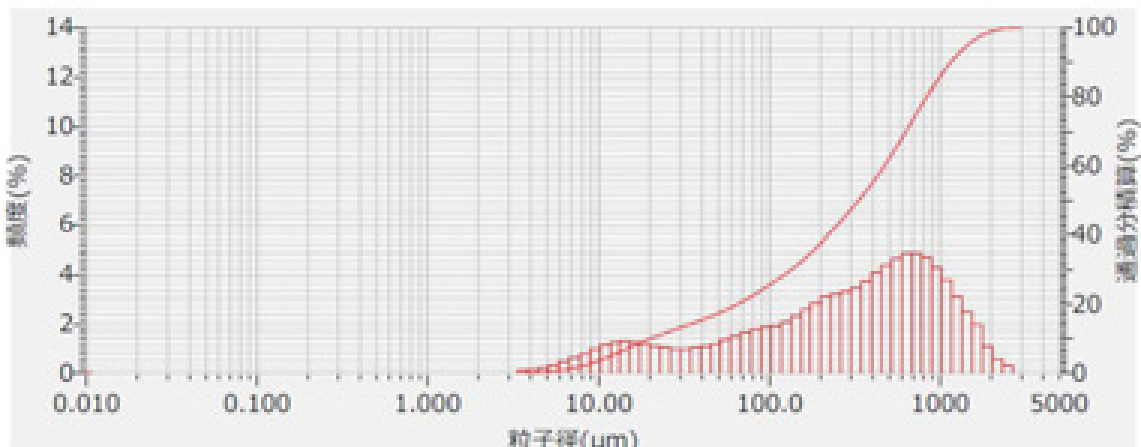


図 11 試験火山灰の粒度分布

次に実験の試験体(空調機)と実験装置の概要を以下に示す。実験装置の仕様を検討するにあたり、火山灰の落下速度について検討した。火山灰の抗力係数として、落下粒子の非球形の度合いを考慮し、Reynolds 数の関数として与えられる Ganser のパラメタリゼーション²⁾を用いた。重力・浮力、空気抵抗力の釣合から得られる終端速度を図 12 に示す。粒径 250 μm 以下では、落下速度は 1.5 m/s 程度未満である。落下距離と落下速度の関係を Lagrange 的に数値計算で求めたものを図 13 に示す。粒子の非球形因子 $\phi=0.8$ 、母岩の密度 2,600 kg/m^3 を仮定した。図 13 は便宜的に高さ 10 m からの落下として計算してあるが、粒径 250 μm の粒子は落下距離 1 m 未満で終端速度に達している。

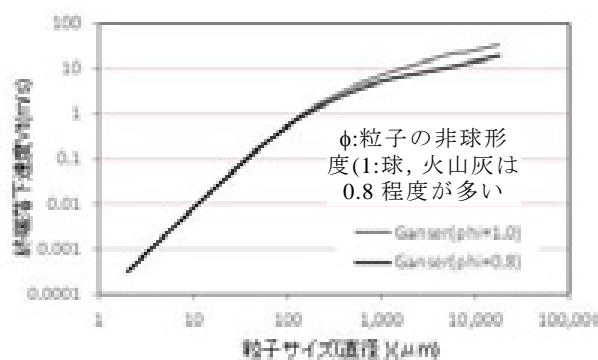


図 12 Ganser の抗力係数による終端落下速度

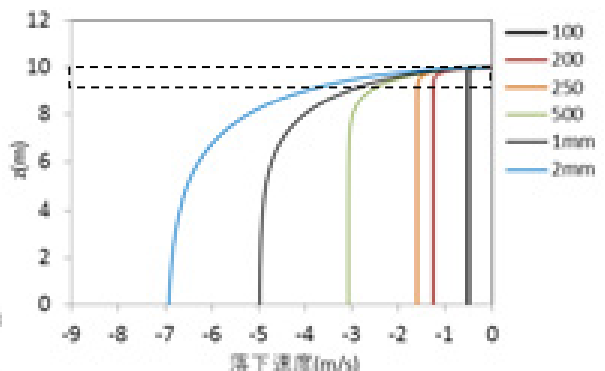


図 13 粒径(μm)の落下速度(10 m から落下と仮定)

次に実験装置の概要を図 14, 15 に示す。装置は、室外機と通風用のダクト、降灰用の篩からなり、室外機のファンを起動すると、主に矢印 A のように気流が生まれる。火山灰は、停止中降灰 \Rightarrow 起動では① \rightarrow ③のように、運転中降灰では、② \rightarrow ③のようにダクト内を流れる。流路は切替可能となっている。最下流には排気側に中性能フィルタを付けた集灰チャンバーを設けて火山灰を回収した。装置全体は HEPA フィルタ付テントハウス内に据え付

けた。

室外機の吹き出し風速は、4~5m/s 程度あり、図 12 の終端速度からみて、ファン運転中は室外機上面の吹出口からの火山灰の侵入は抑制され、ほとんどは機器側面の吸込みから流入する。逆にファン停止中は、主に吹き出し口から堆積し、側面からの流入は極めて少ない。こうした考えから、2つの場合でそれぞれ流路を切り替える方法をとった。篩直下の縦ダクトは図 13 の検討を参照し、火山灰が終端落下速度になるのに十分な落下距離をとった。

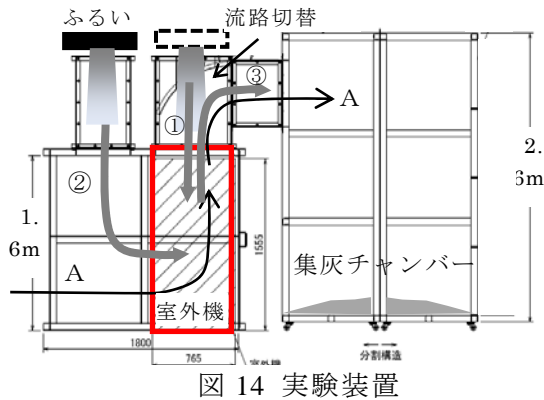


図 14 実験装置

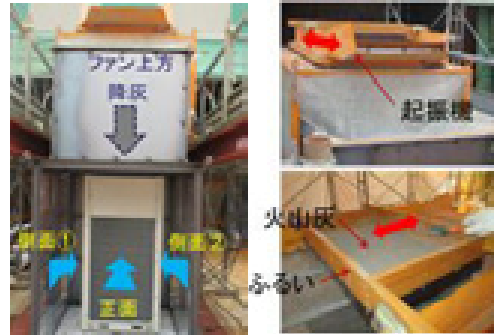


図 15 実験装置外観

実験は、停止状態で降灰深 2、5、10、20、50mm になるよう降らせ、各々の状態でファンを稼働させた。50mm のケースでのファンへの積灰状況(図 16)と、回転数と電流値の状況(図 17)を示す。ファン始動時に電流が変動するものの殆ど安定して指示回転数通り稼働していることがわかる。即ち、乾燥灰降灰後の停止から起動の実験では、降灰深が増加するにつれてファン始動時の動きが鈍くなるものの、始動の際の振動で火山灰は殆ど脱落し、降灰深 50mm まで正常に起動することを確認した。



図 16 ファンへの堆積と起動の状況(実験 1.50mm)

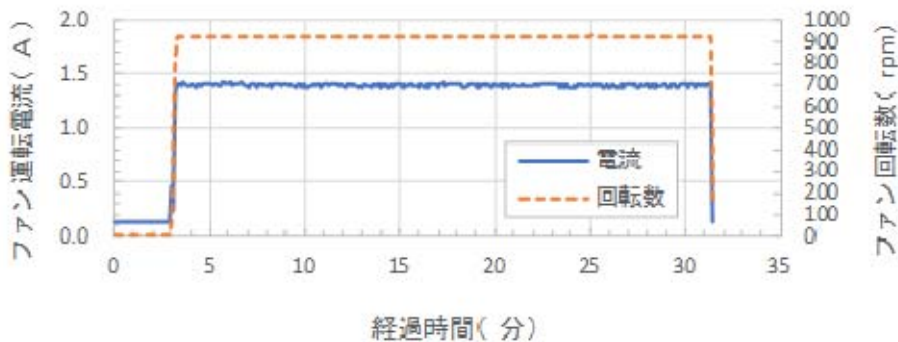


図 17 電流値と回転数の変化(実験 1)

次に稼働中の降灰実験(実験 2)の結果として、図 18 に降灰深と電流回転数の関係を示す。降灰深 30mm を超えたあたりから、電流値が若干上昇しモーターへの負荷がみられるが、回転数は安定しており異常は見られなかった。図 19 は飛砂計(SPC-91)で計測した吸入口と吹出口の灰の粒度分布を示したものである。吹出口では粒度の小さい灰が外に放出されており、内部には比較的粒度の大きな灰が残っていることがわかる。また、吸入口の風速変化を実験前の正常状態からの比率として図 20 に示す。灰は吸入口前面上方から降らせているため、正面上部で吸い込みが悪くなる代わりに、側面部の灰が回り込み難い位置では、風速が大きくなっている。乾燥灰の実験後の室外機内外部の状況を図 21 に示す。同図に見られるようにコンプレッサーやモーター部の上部に積灰が見られるのと同時に、乾燥していることにより、内部の電子回路にも細かい灰が付着している状況がみられ、実際には経年劣化の促進等が懸念される。

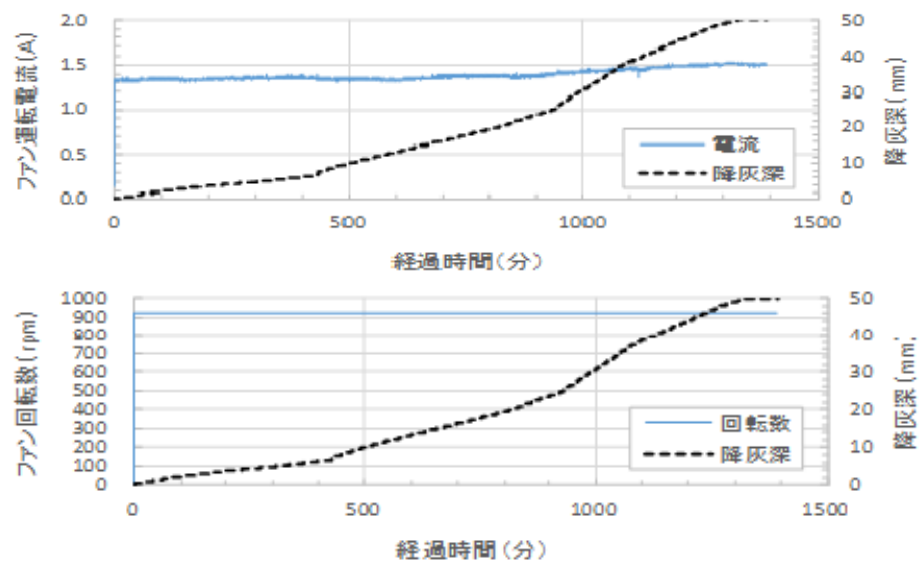


図 18 ファン回転数と電流(実験 2)

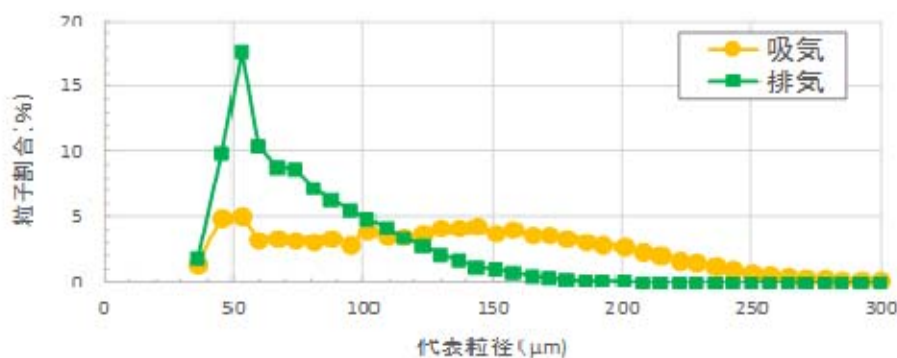


図 19 火山灰の粒度分布 (実験 2)

側面①			正面			側面②
0.75	0.70	1.07	0.41	0.58	0.93	0.75
0.16	0.14	0.54	0.12	0.30	0.68	1.05
0.33	0.73	0.92	0.29	0.58	0.93	1.22
0.75	1.21	1.45	0.81	1.00	0.99	0.98
0.39	0.62	1.08	0.83	0.95	1.00	0.50

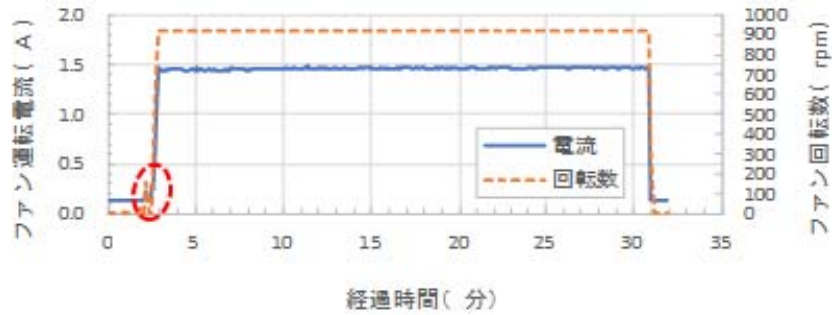
図 20 風速の実験前後の変化率(実験後/実験前)



図 21 乾燥灰実験後の熱交換フィンおよび内部の状況

実験 3 では、降灰深が 5 mm、10mm では、ファン運伝電流ならびに回転数は正常に稼働した。降灰深が 20mm、50mm のとき、ファン運伝電流と回転数の時間変化を図 22 に示す。20mm では、ファンの原点確認動作を経て起動した後に、ファン運伝電流と回転数は正常に稼働した。50mm では、ファン運伝電流および回転数がパルスのように上下した後にファンが停止した。これは、ファンに堆積した湿潤火山灰の重量で負荷が発生し、ファン電動機が瞬時過電流を検知した可能性がある。しかし、後日に室外機を再稼働すると、火山灰に含まれた水分の蒸発や火山灰の一部が落下して降灰荷重が多少減少したため、ファンは正常に稼働した。降灰深が 50mm のとき、室外機ファンに堆積した火山灰を図 23 に示す。室外機の内部では、火山灰が圧縮機のターミナル付近まで堆積し、センサー部分にも火山灰が付着した。

降灰深：20mm



降灰深：50mm

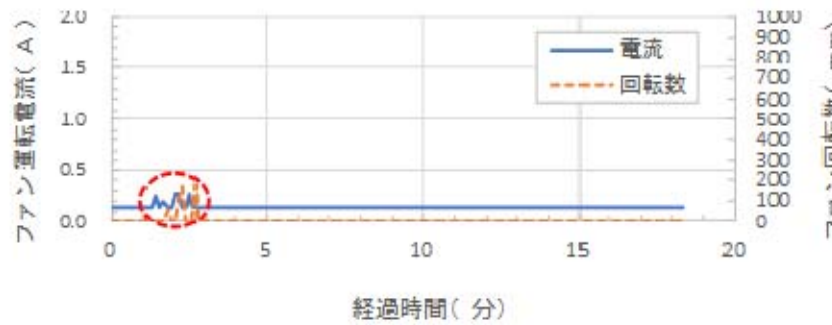


図 21 ファン運転電流と回転数の時間変化(実験 3)



図 22 室外機ファンに堆積した火山灰

実験 4 では、時間降灰深は約 5mm/h、火山灰の含水比は約 6~8%となるように調整した。ファン運転電流ならびに回転数と降灰深の関係を、図 23 に示す。火山灰のフィンへの付着と圧縮機への堆積を図 24 に示す。実験開始の直後より、熱交換器フィンへの火山灰の付着が急速に進行した。ファン回転数は一定値に制御されているため、フィン表面に火山灰が付着して通風抵抗が増加し、ファン運転電流のわずかな上昇が見られた。

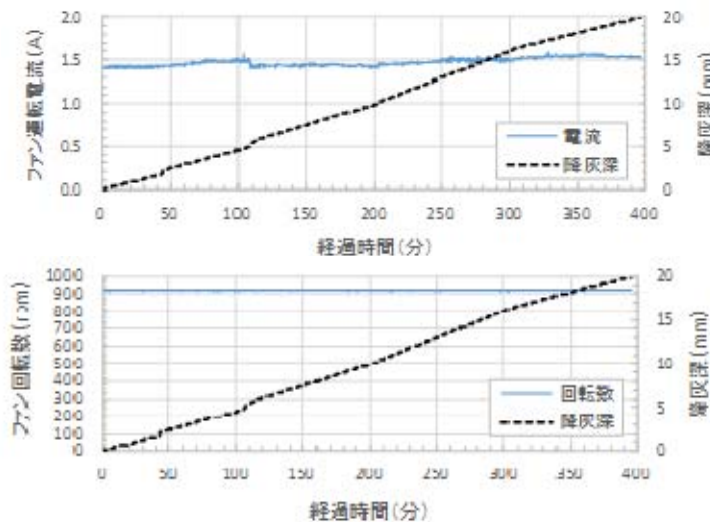


図 23 ファン運転電流、回転数と降灰深の関係(実験 4)



図 24 フィンに付着した火山灰(左)と 圧縮機に堆積した火山灰(右)
 室外機の吸気ならびに排気の風速を、携帯用サーミスタ風速計を用いて計測した。室外機の稼働中降灰の実験 2、4 ならびに 5 を対象に、降灰深と風速の関係を室外機正面、側面(図 9)ならびにファン上方について図 25 に示す。

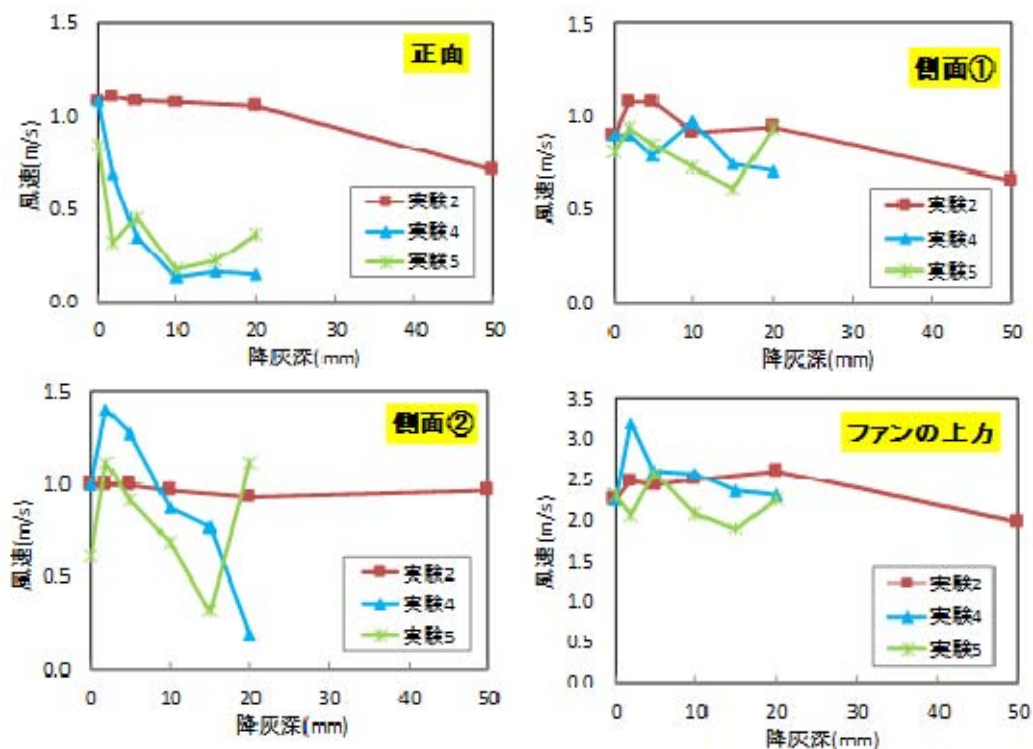


図 25 降灰深と風速の関係

湿潤状態での実験 4 と 5 の室外機正面の風速は、降灰深が増加するに従い顕著に低下している。側面の風速は正面の風速低下を補うため、正面ほど低下は見られない。火山灰で室外機正面が塞がる一方で、ファン回転数は一定値に制御されているため風速の増加も部分的に見られる。なお、ファン上方の排気の風速は、降灰深による影響は小さいといえる。室外機への吸気風量は、フィンに火山灰が付着してもこれ以外の隙間から吸気されるため、降灰深が増加しても室外機ファンはほぼ正常に稼働すると予想される。

本実験では、降灰による圧縮機への負荷などを検証するため、屋外に室内機を設置して暖房運転(設定温度 30℃)を行い、室外機を対象に降灰深 20mm まで降灰実験を行った。室外機電流、ファン回転数ならびに高圧センサーと降灰深の関係を、図 26 に示す。降灰深が増加しても、室外機のファン回転数は一定値に制御されているが、圧縮機の電流は高値で推移している。なお、ファン回転数が一時的に低下するのは、ファン回転数を一定値

から自動運転に切り替えたので、サーモがオフになったためである。火山灰のフィンへの付着と室外機の内部状態を図 27 に示す。暖房運転のため室外機のフィン表面は冷却されて結露が発生し、火山灰は付着、脱落を繰り返して一定の厚さまで付着した。なお、火山灰のフィン表面への付着が多いため、火山灰の室外機内部への堆積量は実験 4 と比較して少ない。

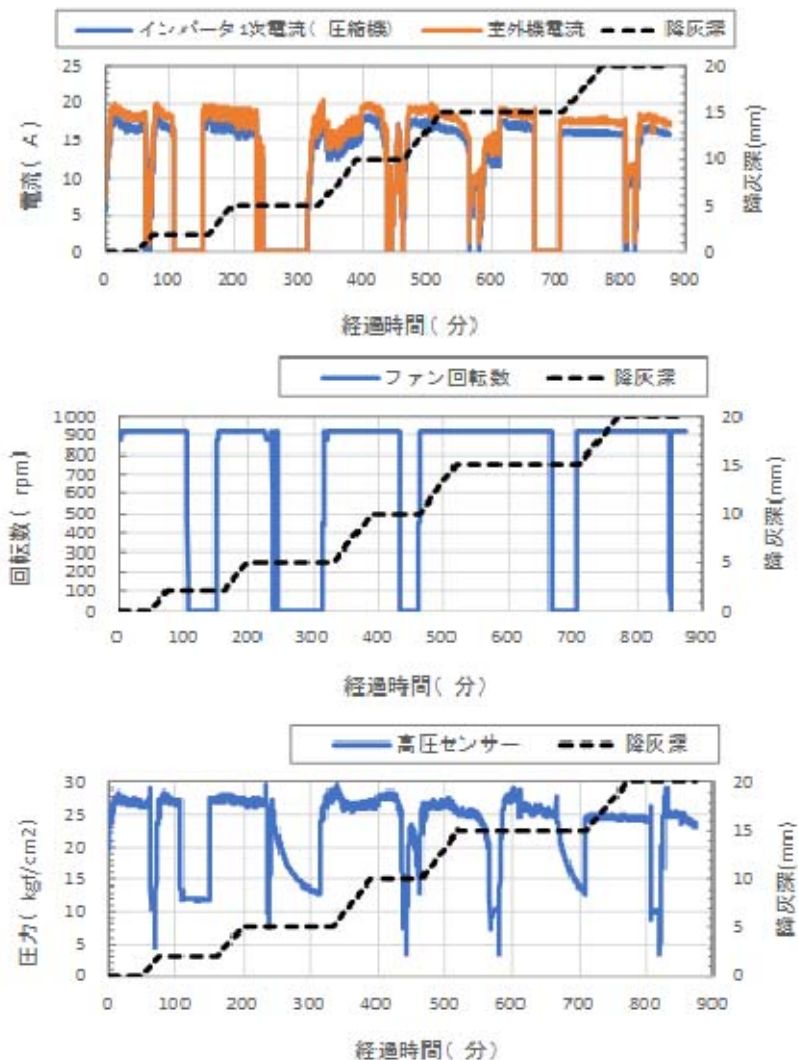


図 26 室外機の稼働データと降灰深の関係(実験 5)



図 27 火山灰のフィンへの付着(左)と 室外機の内部状態(右)

建物機能を維持するために重要となる空調用室外機を対象に、火山灰の降下直後を想定した実験を行い空調用室外機の稼働状態を検討した。降灰深の増加に伴い熱交換器のフィ

ンに火山灰が付着して通風抵抗が増加し、ファン運転電流にわずかな上昇が見られた。しかし、湿潤状態で降灰深が約 50mm のケースを除くと、空調用室外機はほぼ正常に稼働することを確認した。今後は、病院、庁舎など重要施設を対象に、降灰深に応じた建物機能への影響事例を作成し、自治体など防災担当者を支援するための情報ツール開発に繋げる予定である。

さらに日本建築学会とも連携し、上述の実験以外にも 2016 年 10 月阿蘇中岳噴火によって被害を受けた阿蘇ロープウェイ火口西駅の被害調査を 2017 年 5 月に実施した(図 28)。



図 28 阿蘇ロープウェイ火口西口駅

今回の調査は、阿蘇市役所と九州産業交通の許可を頂き、実施することができた。この調査により、建物内には噴石による穴が多く見られ、避難場所と計画していた建物内のロープウェイ乗り場(左下)は 2 重屋根としていたが、それを突き抜ける形で噴石が直撃しており、また、機械室の大梁にも噴石の直撃を受けていたため、構造的に甚大な被害を受けていたことを確認した。なお、この建物に使われていた鉄筋は丸鋼であり、建築年も昔であったため、現在の基準と比べると構造的な耐力は負っているといえる。

また、日本建築学会 火山災害調査特別委員会において、建築物への影響として火山災害によるさまざまな現象について、建築物への外力として整理するとともに過去の火山災害の整理や建築物や社会基盤へ与える影響などについて整理を行い、報告書³⁾を作成した。

c) 周知啓発用・教育用コンテンツの開発

周知啓発用・教育用コンテンツの開発については、常時観測火山 50 火山における周辺自

自治体を対象に 21 都道府県と 138 市町村の地域防災計画を収集し、火山災害に関する対策の内容を分析した。また、関連して火山防災協議会規約についても収集を行った。火山災害対策の内容として、避難計画や連絡体制等の記載事項、除灰、家畜、農作物の記載に関する有無などを中心に分析を行った。前年度の調査と同様に地域防災計画に関しては、近年の火山災害やそれに伴う活火山法等の改正を受けて、他火山での課題を取り入れつつ改訂されている現状が明らかとなった。収集した地域は以下の通りである。

- 東京都および 2 市町村（大島町、三宅村）
- 北海道および 29 市町村（斜里町、羅臼町、弟子屈町、中標津町、美幌町、釧路市、津別町、足寄町、白糠町、上士幌町、上川町、東川町、美瑛町、上富良野町、新得町、苫小牧市、千歳市、恵庭市、厚真町、安平町、むかわ町、登別市、伊達市、壮瞥町、洞爺湖町、函館市、七飯町、鹿部町、森町）
- 青森県および 6 市町村（むつ市、弘前市、平川市、鱒ヶ沢町、西目屋村、青森市）
- 秋田県および 6 市町村（鹿角市、小坂町、由利本荘市、仙北市、にかほ市、東成瀬村）
- 岩手県および 5 市町村（一関市、盛岡市、八幡平市、雫石町、滝沢村）
- 山形県および 6 市町村（酒田市、遊佐町、大蔵村、山形市、上山市、米沢市）
- 宮城県および 4 市町村（白石市、蔵王町、七ヶ宿町、川崎町）
- 福島県および 9 市町村（福島市、北塩原村、猪苗代町、郡山市、二本松市、本宮市、大玉村、檜枝岐村、西郷村）
- 栃木県および 4 市町村（那須塩原市、那須町、日光市、塩谷町）
- 群馬県および 7 市町村（片品村、高崎市、渋川市、嬭恋村、草津町、東吾妻町、長野原町）
- 長野県および 10 市町村（小諸市、佐久市、佐久穂町、軽井沢町、御代田町、茅野町、大町市、松本市、王滝村、木祖町）
- 新潟県および 3 市町村（糸魚川市、妙高市、上越市）
- 岐阜県および 3 市町村（高山市、下呂市、白川村）
- 神奈川県および 7 市町村（小田原市、南足柄市、大井町、松田町、山北町、開成町、箱根町）
- 山梨県および 6 市町村（富士吉田市、見延町、西桂町、富士河口湖町、山中湖村、忍野村）
- 静岡県および 10 市町村（三島市、富士宮市、富士市、御殿場市、裾野市、伊豆市、伊東市、伊豆の国市、長泉町、東伊豆町）
- 大分県および 5 市町村（別府市、宇佐市、由布市、竹田市、久重町）
- 熊本県および 2 市町村（阿蘇市、南阿蘇村）
- 長崎県および 3 市町村（島原市、雲仙市、南島原市）
- 宮崎県および 4 市町村（都城市、小林市、えびの市、高原町、）
- 鹿児島県および 7 市町村（霧島市、鹿児島市、垂水市、始良市、湧水町、屋久島町、十島村）

さらに自治体を対象とした火山対策の現状調査と結果の比較・分析について、北海道駒ヶ岳、有珠山、富士山（静岡側）、浅間山、伊豆大島、霧島など対象にヒアリング調査を行い、また、8 県（山梨県、静岡県、長野県、群馬県、岐阜県、富山県、新潟県、宮崎県）

および3市町村（鹿児島市、姶良市、壮瞥町）の自治体を対象にアンケート調査を実施した。アンケート調査では、火山防災に携わっている年数や体制、異動状況、必要とする火山に関する情報とその内容、火山専門家へのニーズなどを調査した。そのうち、平時における火山情報に関するニーズと活発化した際に必要と感じている情報を表10に示す。

表10 アンケート結果抜粋

設問10：平時、火山に関するどのような情報がほしいか（自由記述）

- 噴火に至らない範囲内での火山の地震、微動、ガスなどの状況の説明
- 月に1度程度でいいので、火山の活動状況についての解説
- 噴火警戒レベルが上がらない状況で火山活動が活発化した際の情報がほしい。
- 計画策定時の助言
- 常時観測データに関する定期的な評価の公表（東海地震の判定会評価に近いイメージ）
- 火山性地震、山体膨張などの観測結果や他の火山現象の弥陀ヶ原火山との関連性の有無
- 常時観測（地震回数、地盤変動等）で、少しでも変化があれば情報提供してほしい。対応すべき状態ではない場合は、情報は不要

設問11：【レベル1】火山活動が活発化した段階で火山に関するどのような情報が欲しいか（自由記述）

- レベル引上げに関する検討の有無、緊急的な調査
- 現在の状況、現在の火山活動と平時の活動の違い、地震活動や噴気等が起きた場合に位置や監視カメラ画像など状況のわかる資料の提供
- 気象庁の火山解説資料がほしい。また、それを補足するようなその後の火山活動の経過や推移に関する情報がほしい。
- 今後予測、現時点で起こりうる現象の説明（突発的含む）今後、どのような現象が見えたら、どのような危険が発生するのか
- どの程度危険なのか具体的に分かる情報が欲しい。例えば、火山性地震の回数など。ただしレベル2への引上げの基準が明確にされており、その基準と比較できることが前提。
- 火山活動が活発化しているエリアの情報、今後想定される火山活動のシナリオ、過去の噴火履歴との比較等、類似の動きをしたものはないか。

次に火山が噴火した際の情報のニーズについて表11に示す。さらに火山専門家に求める期待について、表12に示す。この表12から、自治体の防災担当者は火山災害に関する知識が十分でないことを理解しており、それを補うためにも火山専門家と顔が見える関係を築くことを求めており、さらに知識を得ることや住民へ火山災害への理解を広めるために周知啓発活動への協力といった要望が強いことが分かる。災害時においても火山災害は様々な要因を持つことからそれに関する知識と必要な対応に関するアドバイスを求めていることが分かる。

表 11 噴火発生後に必要な情報

設問13 :【噴火発生後】火山に対するどのような情報がほしいか(自由記述)

- 11,12と同じ。
- レベル引き上げのタイミング
- いつ沈静化するか、継続するのか
- 現在の状況、今後予測、レベル引上げに関する検討の有無、レベル引上げの場合の想定時刻、噴火規模、
- 火砕流噴石火山灰等の規模、噴火が起きた位置や監視カメラ画像など状況のわかる資料の提供。火山活動の短、中、長期的予測、大規模噴火(マグマ噴火等)になる可能性や、その場合に発生する現象
- 噴火後に起きるその後の火山現象の規模や影響範囲、火山現象の推移に関する情報がほしい。
- どの程度危険なのか具体的に分かる情報が欲しい。例えば、火山性地震の回数など。ただし、レベル2への引上げの基準が明確にされており、その基準と比較できることが前提。
- どの程度の規模か、いつ噴火するのかなど。いつ沈静化するのかの見通し。想定される火山現象の規模(最大・最小)及び今後の見込み、火山現象の影響範囲に関する推定火口周辺規制や入山規制の範囲、避難対象地域の設定、避難の判断等の対応について市町村に助言を行うこと、噴火以降の今後の見通し(噴火継続の見込み、再噴火や今後の活動予測)

表 12 火山専門家への期待

設問14 :平時、火山専門家に期待することは何か(自由記述)

- 顔の見える関係で、異常時すぐに情報提供しあえる関係
- 防災計画の共同検討
- 一般への周知啓発の協力
- 観測方法や情報の読み方を教えてほしい
- 住民及び地元自治体等との顔の見える関係
- 県や市町等の関係機関が気軽に連絡や相談、意見交換などができる関係性の構築を火山専門家に期待したい。異変が発生した際の情報提供・防災対策(計画)の共同検討、計画策定などへの助言
- 各火山における噴火のメカニズムや火山現象の種類などを広く一般へ周知啓発するための協力を火山専門家に期待したい。火山対策の実施にかかる支援(協議会・行政機関への助言)、火山や噴火時の行動に関する住民レベルの理解促進(教育活動、普及活動への助言または参加)
- 火山専門家が行っている平時からの観測体制や観測している情報の読み取り方などを県や市町等の関係機関にレクチャーしてほしい。
- 火山を活用した地域の魅力の発信(ジオパーク的な活用の中心の主体になって欲しい)
- 現地調査等を行い、どのような火山現象が想定されるかなどの助言を行うこと
- 常に連絡や相談ができること
- 火山防災に携わる行政担当者へのアドバイスや教育

表 12 火山専門家への期待(つづき)

設問15 :火山活動が活発化した段階で、火山専門家に期待することは何か(自由記述)

- 現在の状況、今後活動予測、規制の検討の必要性
- 現在の火山活動と平時の活動の違い、現時点で起こりうる現象の説明(突発的含む)、今後、どのような現象が見えたら、どのような危険が発生するのか(回答11)で述べた情報について教えてほしい
- 県や市町等の関係機関が防災体制をとる必要がある事象かどうかを明確にするため、火山専門家からの助言がほしい。
- 県や市町等の関係機関が実施する上空偵察や現地調査への参加
- どの程度危険なのか具体的に分かる情報が欲しい。例えば、火山性地震の回数など。ただし、レベル2への引上げの基準が明確にされており、その基準と比較できることが前提。助言
- 状況の説明
- 観測機関から提供される観測情報の解釈
- 今後の推移に関する評価
- 緊急的な調査を実施すること
- 火山防災に携わる行政担当者等への活動状況や今後の活動の見通しの解説

設問16 :噴火しそうな段階で、火山専門家に期待することは何か(自由記述)

- 現在の状況、今後活動予測、規制の内容の確認
- 火山活動の短中長期的予測、大規模噴火(マグマ噴火等)になる可能性やその場合に発生する現象(回答12)で述べた情報について教えてほしい
- 気象庁の火山解説資料を補足し、噴火する場所がある程度特定できるのであれば、特定した根拠となる情報や、その後の噴火規模や推移に関する情報がほしい。
加えて、噴火する場所がある程度特定できるのであれば、対象住民に対する避難勧告等が行えるため、火山専門家からの助言がほしい。
警戒区域設定後における救助部隊の活動範囲の決定
- 根拠とするため、火山専門家から噴火場所の特定情報や助言がほしい。
- どの程度危険なのか具体的に分かる情報が欲しい。例えば、火山性地震の回数など。ただし、レベル2への引上げの基準が明確にされており、その基準と比較できることが前提。どの程度の規模か、いつ噴火するのかなど。助言
- 兆候となる現象をもとに、防災対策上最も警戒すべきリスク(火山現象)の分析
予想される噴火シナリオの提示
- 火口周辺規制や入山規制の範囲、避難対象地域の設定、避難の判断等の対応について市町村に助言を行うこと
- 火山防災に携わる行政担当者等への火山活動や防災行動などの技術的な助言

表 12 火山専門家への期待(つづき)

設問17 : 噴火後、火山専門家に期待することは何か(自由記述)

- 現在の状況、今後噴火活動予測、規制の内容の確認、現地対策本部の箇所、救助部隊の装備の内容、避難路及び救助箇所の確認
- 火山活動の短中長期的予測、大規模噴火(マグマ噴火等)になる可能性やその場合に発生する現象についての情報(回答13)を教えてください
(大規模含む)避難を考える際の、避難指示の誘因と判断できる現象の共同検討(実際は、ご教示をお願いするしかないのだと思いますが・・・)
- その後の火山現象の規模や推移における防災対応や影響範囲などについて、火山専門家からの助言
- どの程度危険なのか具体的に分かる情報が欲しい。例えば、火山性地震の回数など。ただし、レベル2への引上げの基準が明確にされており、その基準と比較できることが前提。どの程度の規模か、いつ噴火するのかなど。いつ沈静化するののかの見通し、助言
- 噴火現象の規模の分析(想定シナリオとの比較)
リアルタイムハザードマップの運用、情報提供
災害対策本部への常駐(とるべき応急対策への助言)
- 火口周辺規制や入山規制の範囲、避難対象地域の設定、避難の判断等の対応について市町村に助言を行うこと
- 現地調査等への協力(参加)
火山活動の推移や今後の見通しなど、地域住民等への解説(わかりやすい説明)

表 12 に示したように、自治体の防災担当者は火山災害に関する知識を必要としていることから、2017年11月と2018年1月に富士山科学研究所により、富士山周辺の防災担当者を対象に表 13、14 に示す内容で火山防災に関する講習会を実施した(図 29)。

表 13 2017年11月実施した火山防災担当者研修の内容

時限	時間	講義名	講師	学習目標
開会	13:15～13:30 (15分)	オリエンテーション	事務局	研修の目的や構成の説明、資料確認
1	13:30～14:05 (35分)	【産学】火山と噴火	富士山研 吉本充宏	当該火山の噴火史や噴火事例、対応事例等について学ぶ
2	14:15～14:50 (35分)	【産学】火山災害への 防災対応について	火山防災 新堀賢志	火山災害への防災対応の事例やその仕組みを学ぶ
3	15:00～16:50 (110分)	【演習】全体討論会 (班毎の発表)	火山防災 新堀賢志	図上訓練形式でふりかえり
閉会	16:50～17:00 (10分)	小テスト・アンケート、 閉会	事務局	次回に向けたアンケートや小テスト

表 14 2018 年 1 月実施した火山防災担当者研修の内容

時限	時間	講義名	講師	学習目標
開会	13:15～13:30	オリエンテーション	事務局	研修の目的や構成の説明、資料確認、前回の開催報告等
1	13:30～14:15 (45分)	【座学】 土砂災害に備える街づくり	富士山研 池谷浩	平時の火山地域で発生しうる土砂災害を学ぶ
2	14:25～15:10 (45分)	【座学】 御嶽山噴火災害	長野県危機 管理防災課 南沢修	実際の噴火対応を学ぶ
3	15:20～16:50 (90分)	【演習】 災害対応に学ぶ	火山防災 推進機構 新堀賢志	座学を受け、防災対応を考える
閉会	16:50～17:00	小テスト・アンケート、 閉会	事務局	小テストと、アンケート



図 29 2018 年 1 月に実施した演習の様子

この講習会では、火山噴火や災害などの基礎知識、実際の噴火災害対応に関する知識を学び、それらを振り返るための演習とし、演習の最後には全体討論会として班毎の討議と発表を行った。また、研修後にはアンケートを実施した。実施時間は半日、他の業務と連携して行えるように富士山火山防災会議協議会山梨県コアグループ会議に合わせて開催した。

11月の研修は、新年度から新たに火山防災担当に移動した職員もいたため、火山噴火や災害の基礎知識「火山と噴火」と防災対応事例を学ぶため「噴火危機時の当面の実行計画の策定ー2017年霧島山噴火を例にー」を実施した。演習は、状況予測型訓練として座学で学習した過去の被害事例を基に、被災者視点に立った状況予測を行い、対応目標を決定したうえで、目標に沿った具体の対応方針を決定した。

1月の研修は、年度内2回目であることから、座学1は、火山地域における噴火以外での災害を学習するために「土砂災害に備える街づくり」を実施し、また、座学2では、最近の災害事例として「御嶽山噴火災害」を実施した。演習は、「災害対応に学ぶ」と題してケースメソッド形式で座学にて学習した御嶽山噴火対応の事例から「学ぶこと」を整理し、「学ぶこと」から富士山のできることを検討した。演習は、その効果を測るため、状況予測型(11月)、ケースメソッド型(1月)と演習の方法をかえて実施した。いずれも受講者から好評価を得たが、特に富士山を想定して実施した1月の演習が活発に行われ、効果が上が

ったことが期待できる。

本研修会のアンケートの結果、総じて定期的な火山防災研修を望む声が多く、年に1、2回程度実施し、2回の場合は担当者が新規に入れ替わる4月と秋頃に各1回程度、火山防災協議会開催時と同時期に行うのが望ましいとの情報が得られた。火山防災研修プログラムとしては、年2回程度の開催で、開催時間は、座学が45分以下、演習が100分程度としたうえで、半日程度が適当であると考えられる。半日での研修構成は、座学2コマと座学を振り返るための演習1コマの組み合わせとし、座学の内容としては「現象」「対策」「経験共有」の3つの分野が必要である。「現象」分野では、火山災害は地震や風水害などの災害と異なる部分が多いため、防災対策等を検討する上で火山現象や災害のそのものの理解や当該火山の特徴を把握することがきわめて重要となる。「対策」分野では、避難計画、国や県の防災対策、降灰対策、観光客対応、具体的な避難訓練（登山者の避難救助）、情報発信等が必要であると考えられる。さらに、火山災害は他の災害に比べ頻度が少ないため実際の対応経験者がきわめて少ない。そこで、噴火対策をより実効的なものにするため「経験共有」として災害対応経験者の対応談、他県の防災体制等の仕組みなどが重要となる。また、野外での火山観察講習を取り入れることも効果的であると考えられる。座学の講師としては、「現象」分野は当該火山の火山防災協議会の専門家が適任であり、「対策」「経験共有」については災害対応経験者や実務者のほか、内閣府火山防災エキスパートなどの活用も有効である。また、これらの研修会は、演習での自由な意見交換の場をもつことなどで、火山防災協議会での顔の見える関係の構築にも一役買うことができると考えられる。

さらに、平成29年度中には2017年10月に新燃岳が噴火したため、周辺自治体である高原町や都城市、霧島市、宮崎県などにヒアリング調査を実施した(図30)。

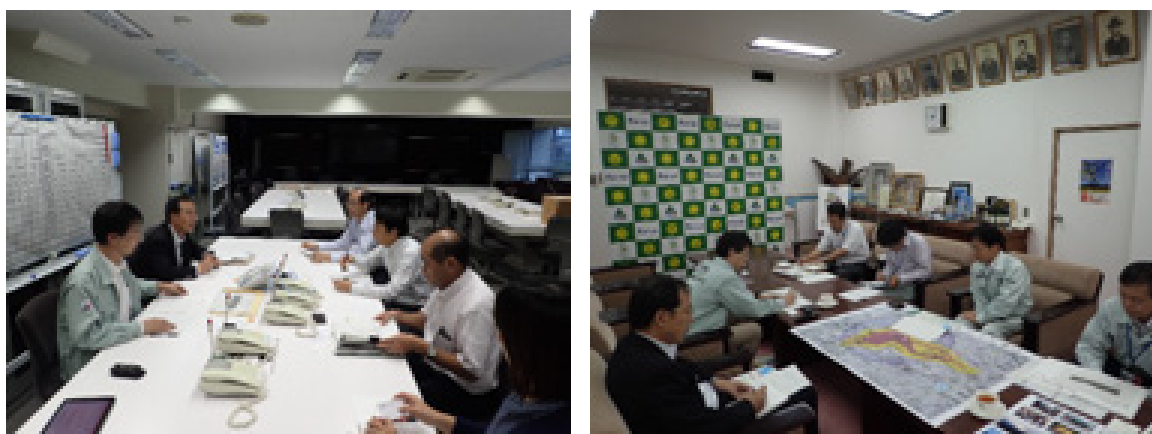


図30 2017年新燃岳噴火におけるヒアリング調査(左：宮崎県、右：高原町)

このヒアリング調査の結果、以下のことが分かった。

- 気象庁の噴火情報がリアルタイムで見れるようにはなっていないが、その提供の申し出は気象庁から受けている。少なくとも、震源情報は見たい。
- 防災情報に直結できるようなリアルタイムの情報がほしい。
- 気象庁が出す情報を定期的に解説する専門家が必要。
- 「噴火停止」表現で住民は「終息」と思ってしまった。また、NHK報道で噴火映像の「早送り」が、その断り書きが小さいため、激しい噴火の印象を与えた。また、「外出を控えましょう」報道が全国に流れ、風評被害が発生した。

- 研究上の議論は難しくてわからないが、そのまま報道されてしまうことに問題がある。専門家からその防災上の意味を説明してほしい。
- 土砂災害に対して、降雨・降灰を合わせてメッシュで対応することができるか？そのような情報がほしい。雨量によって土石流がどの程度危険かの情報があるとよい。メッシュサイズは 5km 程度。

このヒアリング調査からも、火山災害においてそれを取り巻くマスコミ等のステークホルダーにおいて、火山災害に関する十分な知識が無いこと、迅速な初動対応を行うためにリアルタイムでの情報を必要としていることが分かった。さらに、現象だけの情報ではなく、自分たちの街、すなわち社会基盤にどういった影響があるかに関する具体的な情報を必要としていることも分かった。

一方、海外における火山災害対策に関するヒアリング調査を実施した。今回、ニュージーランドの GNS サイエンスに調査協力を依頼し、課題 D3 の研究者によって実施した(図 31)。



図 31 GNS サイエンスにおけるヒアリング調査の様子

ニュージーランドにおける各ステークホルダーの立場としては、緊急時(Response to events)には、国レベルでは MCDEM(Ministry of Civil Defense and Emergency Management)が各地域(Region, Districts)で主体となる CDEM のコーディネーターとしての役割を持つ。さらに、CDEM が火山防災対応の実務を行う。情報の流れは、災害時、まず全ての情報は GNS に集約され、GNS から MCDEM に通達される。同時に横の連絡網も整備されており、GNS が集約した情報を関係各所と共有することにより、関係各所各々が災害時オペレーショナルプロセスを執行する。この際、平常時から関係各所間の密な情報交換並びに、人間関係の構築（特に信頼関係の確立）に重点が置かれているため機能しており、このため、各災害レベルや状況に合わせて独自で臨機応変に対応することが可能であることが分かった。一方、平常時(Peace time)においては、VAG(Volcano Advisory Groups)を構成し、ここでは計画(Planning)・調整(Coordinate)を行う。この VAG は 4 つ存在しており、その 4 つを以下に示す。

- CPVAG (Central Plateau VAG): ルアペフ・トンガリロ・ナルホエ対象
- AVAG(Auckland VAG):オークランド近郊対象
- Taranaki VAG: Taranaki 対象
- Caldera AG:タウポ・OKATAINA・ロトルア対象

次に VAG の構成員は、CDEM (Chair : 日本でいう都道府県の防災監)、科学者 (GNS や大学から)、ライフライン関係者 (水道、電気など)、政府機関 (保健衛生、農業など)、MCDEM からなる。また、Caldera AG では 1980 年代からの沈降を受けてリスク評価を実施しており、CPVAG では泥流(lahar)対策を中心に実施している。

さらに、情報発信については、ポスターシリーズを作成し、Web 展開している。また、SNS、スマホアプリ、ツイッターを活用している。さらに、年代に応じてリアリティが感じられる技術を活用しており、こういった情報発信は、5-6 人で実施し、その情報発信についても分析している。こういった情報発信を行う際にも、静穏時の発信内容は常に同じ内容にするのではなく、いくつかのサイクルを回すと効果的であると伺った。また、個行った情報発信について、SNS では情報収集を的確に行うとともに、情報を頻繁に更新することが必要であることや、火山情報(Volcanic Alert Bulletin) を発信する際には、その内容の Quotable part は何なのかを意識して発信することが重要であることを伺った。

次に、Tongariro National Park と GNS-science の連携についても調査を行った。この Tongariro では、2012 年に火山噴火が起こり、日本では 2014 御嶽山・2018 草津白根山と類似している。この National Park では次の手順で対応し、2 人体制で 24 時間/7 日対応している。

1. 自動アラートメッセージ受信
2. GNS へ電話確認
3. 独自のシステムによるデータ、情報確認
4. GNS へ電話にて状況認識伝達
5. 独自の是正措置執行

また、National Park では登山道の閉鎖、山小屋・スキー場の閉鎖などの判断し、年 1 回訓練をいろいろなシナリオを想定して実施している。さらに、登山道、山小屋にどのくらいの人がいるかといった情報については、登山道の入り口にセンサー (通過をカウントする赤外線や、足跡による圧力センサーなど) を設置して把握しているが、正確な数はわからないため、過去の実績値などから見積もりを行っている。一方、原住民であるマオリ住民とも信頼関係を構築しており、個人レベル、組織レベルで人間関係強化を図り、信頼関係を深め、災害時に迅速かつ効率的に情報が共有できる環境作りが重要と伺った。さらに、日本の問題点として防災ガイダンスが詳細にわたり、また日本人はマニュアルに頼りすぎる傾向があるため、実際起こりうる多様なシナリオに対応できないのでは、と危惧を頂いた。また、今回調査した GNS サイエンスから、新しいレンジャーのトレーニングを日本とニュージーランドと連携して行いたいと要望も頂いた。

また、今年度は周知啓発用・教育用コンテンツの開発として、2018 年 1 月に那須岳火山防災協議会と那須町によって実施された合同防災訓練で次世代火山プロジェクトの紹介と、火山災害に関する周知啓発活動を実施した(図 32)。この周知啓発活動において、国交省の梁政務官及び、高橋政務官にも紹介させていただくとともに、那須岳火山防災協議会の関係者、那須町住民の皆様実際に火山灰を触っていただくことや火山灰を顕微鏡で見ていただくことや、2011 年新燃岳噴火における映像などをご覧頂き、火山災害の影響について知っていただく機会を設けることができた。さらに、火山灰について、火山防災協議会の関係者を中心に過去に触った事があるかについて調査したところ、25 名中、

10名が触った経験があると答えたことから、近年噴火していない那須岳においても火山灰に触れた経験がある関係者が多いことが分かった。また、火山灰を触ってみた感想については、「降灰した後の除去が大変ということで、もっとサラサラしているのかと思っていた。」「とても軽いことが分かった」、「手に付く」、「冷たい」といった感想を頂いた。このように実際に火山灰に触れる機会を設けることで、各自がもつイメージと現実を確認することができ、これによりこれまで噴火災害を経験したことのない自治体で火山災害対策を進めるために、より具体的な対策を検討するための一助となる。

このようなことから、こういった周知啓発活動も引き続き実施し、自治体防災担当者が持つ火山災害に対するイメージを把握し、さらに実物に触れる機会を設けることで具体的な災害対策を支援する機会としていく予定である。



図 32 那須岳火山防災協議会 合同防災訓練

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 29 年度の当初計画である以下の 5 点について、実施し、成果を得ることができた。

- ・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う。
- ・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う。
- ・自治体を対象とした火山対策の現状調査と結果の比較・分析を行う。
- ・都市部の施設に対する降灰影響評価実験を行う。
- ・登山者動向把握実験への参加と分担。

具体的には、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については、火山との距離と近年の火山災害への対応などを基に整理することができた。さらに、海外における火山災害への対応や情報について収集することができた。しかし、火山災害は風水害などと比べて頻度が少なく、現象の継続時間や火山噴火に伴う災害要因が複雑であることから、災害要因や継続時間にも着目し、災害対応の整理を行うことが必要である。また、複雑な災害要因による社会インフラへの影響についても整理を行うことが必要である。

常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化では、今年度も常時観測火山 50 の内 10 火山実施し、そのうち対象としていた草津白根山で火山災害が発生した。また、前年度実施したハザードマップについては、今年度那須岳において観光施設への影響を把握

した。しかし、常時観測火山 50 の内半分以上のデジタル化が残っているため、今後も引き続きハザードマップのデジタル化を行い、さらに火山災害が発生した際に迅速に自治体に情報提供を行えるよう準備が必要である。また、平時にも利用できるよう作成したハザードマップと社会基盤データを利用し、簡易なリスク評価が行えるように準備を進める必要がある。

自治体を対象とした火山対策の現状調査については、地域防災計画を収集し整理することができたとともに、防災担当者を対象としたアンケート調査によって火山専門家や火山に関する情報のニーズについて把握することができた。また、平成 29 年度中に発生した火山災害においても、周辺自治体にヒアリングを行うことによって防災担当者が必要としている情報について確認することができた。さらに、那須岳火山防災協議会に継続的に参加することによって、警戒レベルが上がった際の対応や火山災害を対象とした防災訓練などにおいて課題を把握することができた。しかし、火山災害が継続した場合には、防災担当者の対応が変化することからそういった地域への継続的なヒアリング調査の実施と、平成 29 年度に発生した本白根山における噴火について人的被害が発生したことから避難・救助用コンテンツの開発において重要な意味を持つことから、詳細な調査を行う必要がある。さらに、平時から顔の見える関係を構築することの重要性は、国内でのヒアリング調査のみならず、国外でのヒアリング調査からも得られた。このため、今後、周知啓発用・教育用コンテンツの開発を行う際には、顔の見える関係を構築することにも寄与するコンテンツとすることが必要であることがわかった。

都市部の施設に対する降灰影響評価実験については、都市部施設の機能維持に重要となる建築設備への降灰の影響を把握するため、空調機の室外機を対象に降灰実験を実施し、降灰による影響について検討を行った。今後は実験結果の分析と現代社会の都市機能として重要な役割を持つデータセンターなどについても考慮し、冷却塔への影響について調査する必要がある。さらに、課題 D2 と連携し、火山礫による建築建物への影響などについても災害時における避難計画を検討する上で重要であることから検討を進める必要があるとともに、社会インフラへの影響についても前年度実施した文献調査などから影響度を整理し、降灰被害予測コンテンツで活用できるよう準備を進める必要がある。

登山者動向把握実験については、今年度富士山チャレンジ 2017 に参加することで富士山における登山者の動向データなどを取得することができた。しかし、現状のデータはレーザーを設置した付近における動態データとなることからレーザーのない地点における補間が必要である。このため、その他動態データなどの活用や得られたデータから登山道における詳細な情報や登山者のバイタルデータなどを組合せて、登山者の属性に応じたパラメータの検討が必要となる。さらに、パラメータを整理するに当たり、データ量を増やす必要もあることから引き続き登山者動向データを入手する必要がある。加えて、他火山でも同様の調査が行えるように検討を進める必要がある。

(e) 引用文献

- 1) Scott Trevor Barnard : The Vulnerability of New Zealand Lifelines Infrastructure to Ashfall, University of Canterbury, 2009
- 2) Dare, R.A.(2015), CAWTR Tech. Rep. No.079, CSIRO,.p3.

3) 日本建築学会 火山災害対策特別調査委員会 報告書、2018年3月

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

論文(査読なし)

著者	題名	発表先	発表年月日
草津白根山降灰合同調査班*(石崎泰男・石塚吉浩・金子隆之・亀谷伸子・神田径・小森次郎・宝田晋治・寺田暁彦・長井雅史・野上健治・平林順一・藤田英輔・古川竜太・本多 亮・前野 深・吉本充宏)	草津白根火山 2018 年 1 月 23 日噴火による降灰分布	火山噴火予知連絡会会報, 129 号	2018 年
中田節也	生きている火山との共生-ジオパークを活用した防災	野生復帰, 5,9-12.	2017 年
日本建築学会火山災害対策特別調査委員会	火山災害対策特別調査委員会報告書	火山災害対策特別調査委員会報告書	2018 年 3 月

学会発表

著者	題名	発表先	発表年月日
千葉達朗・岸本博志・吉本充宏	赤色立体地図模型を使用したアナログモデル実験	地球惑星科学連合 2017, O04-05, 千葉 (幕張メッセ)	2017 年 5 月 20 日
立山耕平・成田啓司郎・山田浩之・奥矢恵・吉本充宏	噴石衝突に対する木造建築物屋根の安全性噴石衝突に対する木造建築物屋根の安全性	地球惑星科学連合 2017, SVC49-12, 千葉 (幕張メッセ)	2017 年 5 月 21 日
吉本充宏・藤井敏嗣・新堀賢志・金野 慎・中田節也・井口正人,	富士山における火山防災担当者研修プログラムの試案	地球惑星科学連合 2017, SVC49-P12, 千葉 (幕張メッセ)	2017 年 5 月 21 日
吉本充宏・安田泰輔・馬場章・本多 亮	UAV 空撮による小規模土砂移動の観測-富士山噴火の噴出物調査への応用にむけて	日本火山学会秋季大会(熊本)	2017 年 9 月 21-23 日
吉本充宏・藤井敏嗣・川南結・新堀賢志・金野慎・井口正人・中田	地方自治体火山防災担当職員の火山研修プログラムの試案	災害情報学会, 京都大学	2017 年 10 月 21 日

節也			
久保智弘・宮城洋介・野畑有秀・諏訪 仁	2016年10月阿蘇山噴火における降灰被害調査について	A3-26、日本火山学会2017年度秋季大会(熊本)	2017年9月23日
宮城洋介・久保智弘・中田節也・吉本充宏	火山災害対策のための火山周辺自治体へのヒアリング調査	P030、日本火山学会2017年度秋季大会(熊本)	2017年9月21日
山田裕之・立山耕平・畠基太雄・奥矢恵・吉本充宏	スギ板屋根の重ね合わせによる耐噴石衝突特性の向上	日本火山学会2017年秋季大会(熊本), B1-06	2017年9月21日

その他の講演会・展示会・シンポジウム等

著者	題名	発表先	発表年月日
吉本充宏	富士山火山噴火の特性と噴火遭遇時の対処	登山ガイド研修会(富士吉田市案内人組合研修会), ふじさんホール	2017年5月1日
吉本充宏	富士山火山噴火の特性と噴火遭遇時の対処	富士山火山噴火対策研修会, 富士山科学研究所	2017年5月26日
吉本充宏	火山防災における火山専門家の役割と課題	内閣府火山防災に係る検討会, 内閣府	2017年6月5日
吉本充宏	富士山噴火・防災について	富士吉田高校校外学習, 富士山科学研究所	2017年6月7日
吉本充宏	北海道駒ヶ岳火山の噴火と災害	JICA 中南米地域火山能力強化研修, JICA 札幌	2017年6月12日
吉本充宏	富士山と御嶽山	JICA 中南米地域火山能力強化研修, JICA 札幌	2017年6月12日
吉本充宏	富士山の火山噴火とその災害	NHK甲府放送局富士山噴火に関する勉強会, NHK甲府放送局	2017年6月20日
吉本充宏・馬場章	富士山野外観察実習	茨城大学理学部野外実習, 富士山科学研究所・富士山	2017年6月22-25日

吉本充宏	富士山火山噴火の特性とハザードマップ	関東管区警察局山梨県情報通信部研修会，富士山科学研究所	2017年6月27日
吉本充宏	噴火事象系統樹による噴火推移予測	気象庁火山活動評価技術研修，気象庁	2017年7月26日
吉本充宏	火山防災協議会における研究者の役割? 「火山防災協議会に参画する火山専門家等の連携会議」参加して?	北海道駒ヶ岳火山防災協議会総会，北海道茅部郡森町	2017年8月1日
吉本充宏	火山噴火とその災害	北海道高等学校理科研究会函館大会，函館市（函館市国際水産・海洋総合研究センター）	2017年8月2日
吉本充宏	西湖青木ヶ原巡検	平成29年度山の日環境教育プログラム富士山巡検，環境省多様性センター	2017年8月11日
吉本充宏	駒ヶ岳の噴火と歴史	出前授業，北海道茅部郡鹿部町立鹿部小学校	2017年10月4日
吉本充宏	富士山の噴火とどう向き合うか	出前授業，富士吉田市立吉田中学校	2017年11月4日
吉本充宏	富士山の火山噴火とその災害	富士山科学研究所富士山科学講座，富士山科学研究所	2017年11月11日
高島基太雄・立山耕平・山田浩之・小笠原永久・奥矢恵・吉本充宏	噴石の貫通限界に及ぼす杉板屋根構造の影響	第49回 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム（一社）日本非破壊検査協会 亀戸センター，東京都江東区	2018年1月20日
吉本充宏・藤井敏嗣・川南結・新堀賢志・金野慎・井口正人・中田節也	富士山における火山防災担当者研修プログラム案	平成29年度 防災研究所研究発表講演会，宇治，	2018年2月20-21日
吉本充宏・濁川暁・亀谷伸子・石崎泰男・寺田暁彦	草津白根山、本白根火砕丘群の噴火履歴	「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」平成29	2018年3月14-16日

		年度成果報告シンポジウム, 東京大学	
吉本充宏・藤井敏嗣・川南結・新堀賢志・金野慎・井口正人・中田節也	実践的人材育成のための防災担当者研修プログラムに関する研究	「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」平成29年度成果報告シンポジウム, 東京大学	2018年3月14-16日

マスメディア（テレビ、新聞等）

著者	題名	発表先	発表年月日
久保智弘	「火山災害「想定外」を考える」において降灰被害について掲載	10/8 朝日新聞（科学の扉）	2017年10月8日 朝刊
久保智弘	12月18日 防災特集で「富士山チャレンジ2017」の特集の一部で本プロジェクトとの連携について取材対応を行った。	NHK 静岡、	2017年12月18日
中田節也	噴火遭遇時の回避行動(特に噴石)についての解説	NHKおはよう日本	2018年1月30日、 7:00~
中田節也	噴火遭遇時の回避行動(特に噴石)についての解説	NHK甲府、News かいドキ	2018年2月2日 18:10~
中田節也	草津白根山 2018年噴火の被害状況と富士山への備えについての解説	UTY ニュースの星	2018年2月2日 18:15~
中田節也	草津白根山 2018年噴火の被害状況と富士山への備えについての解説	UTY ニュースの星	2018年2月5日 18:15~
中田節也	新燃岳「溶岩ドーム」か火口内に円形に盛り上がり	毎日新聞朝刊	2018年3月7日
中田節也	新燃岳噴火 鍵は溶岩がどうなるか。	NHK オンデマンドニュース（ニュース9）	2018年3月7日

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

①周知啓発用・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

a. 常時観測火山におけるハザードマップのデジタル化

平成 29 年度に引き続き未整備の火山ハザードマップのデジタル化作業を行う。さらにこれらデジタル化したハザードマップについて WEBGIS 等で表示できるようにし、自治体等からの意見を参考に、平時利用するための手段について検討を進める。

日本国内に 50 ある常時観測火山の内、10 火山（恵山、秋田駒ヶ岳、安達太良山、磐梯山、焼岳、白山、伊豆東部火山群、三宅島、鶴見岳・伽藍岳、口永良部島）のハザードマップに載っている災害情報をデジタル化する。

各火山のハザードマップには、降灰や噴石の飛散範囲や火砕流や溶岩流の到達範囲、降灰の厚さの推定量などの情報が載せられている。これらの情報をデジタル化し、シェープファイル形式にすることで、GIS 等で直接利用できる形にする。

b. 自治体を対象とした火山対策の比較・分析

これまで行った自治体を対象としたヒアリング調査やアンケート調査の結果を基に、地域ごとの現在の火山対策の現状を比較・分析する。さらに、地域間での違いや災害対応に必要な知識・情報、専門用語などを整理し、自治体の防災担当者に必要な知識と情報を身につけるための教育用コンテンツの一部を作成する。さらに、鹿児島における降灰対策の現状などについても引き続き調査・分析を進める。また、那須岳火山防災協議会や協力機関等と引き続き連携を図り、火山対策の課題把握と周知啓発用・教育用コンテンツの開発に必要な利用者のニーズ把握を行う。加えて、これまで実施できていない他火山の火山防災協議会等へも可能な限り参加するなどし、情報収集を行うことで、他火山への展開に向けた準備を進める。

②都市部の施設に対する降灰影響評価実験

平成 29 年度に実施した実験結果を基に建物機能への影響分析を行い、建築設備の損傷度評価手法の開発に着手するとともに、都市部において重要な機能を有するデータセンターなどで多く利用されている冷却塔への影響を把握することを目的として、冷却塔を対象とする実験実施環境を考慮した降灰実験を行う。さらに、平成 29 年度までに収集した文献調査などの結果から、降灰による被害についてインフラ施設などを対象とした被害予測を行うための情報を整理するとともに、簡易的に評価するための試作版リスク評価の仕組みを構築する。

③登山者動向把握実験への参加・分担

平成 29 年度に行った富士山での登山者動向把握実験（富士山チャレンジ）のデータを活用し、登山者動向について整理・分析を進める。さらに、平成 30 年度も同実験に

参加することで、更なる情報の収集を行うとともに、他火山への展開を考慮してインターネットで公開されている情報や同様の取り組みのデータ等も収集し、避難シミュレーションに必要なパラメータの整理等を行う。これら整理や分析によって、避難計画等の火山災害対策への利用について検討を進める。

(f) サブテーマ間の連携

平成 30 年度 6 月頃に課題 D の各サブテーマ責任者で会議を行い、サブテーマ間での年度計画とサブテーマ間連携を確認し、4 年目の評価に向けて課題 D としての成果について議論を進める。また、各サブテーマの進捗状況や実証実験などについて、密な情報共有を行うことで、継続的な連携を図る。さらに、平成 30 年度後半に課題 D の各サブテーマ関係者による会議を実施し、進捗状況の共有と 4 年目の成果等について具体的な議論を行う。

一方、課題 A とも密な連携を図り、情報ツールの一部やイメージ等を協力機関などに利用してもらうことで自治体が必要としている情報の把握を行う。