

### 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30年度業務目的

##### (2) 平成30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31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	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	特任研究員	Kim Yura	
国立大学法人鹿児島大学	外来研究員 (釜慶大学)	Dong-In Lee	
国立大学法人鹿児島大学	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	准教授	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	主任研究員	井上 実	
メトロウェザー株式会社	代表取締役	東 邦昭	
三菱スペース・ソフトウェア(株)(鹿児島大学)	博士課程学生	小堀 壮彦	



(c) 業務の目的

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

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成28年度：

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

2) 平成29年度：

桜島、霧島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島火山においてレーダー観測を開始し既存のリモートセンシング観測を強化した。レーダーの反射強度と降灰量を比較し、両者の関係を検討した。火山灰拡散予測の高速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：

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) 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。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) 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) 令和 4 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) 令和 5 年度 :

令和 5 ～ 7 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) 令和 6 年度 :

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

10) 令和 7 年度 :

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

(e) 平成 30 年度業務目的

桜島において 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マルチパラメータ観測を継続して、火山灰予測に必要なパラメータを決定する。火山灰拡散予測の高速化のために、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、火山灰予測シミュレータの起動までの一連のプロセスの自動化を図る。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する。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る。その上で、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、降灰量予測の高精度化を図る。

## (2) 平成30年度の成果

### (a) 業務の要約

平成30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、XバンドMPレーダー、GNSS、ライダーによるリモートセンシング観測を継続することにより、このマルチパラメータ観測システムが噴煙高度や降灰量等の即時的把握に有効であることが示された。予測の高速化技術においては、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、火山灰予測シミュレータの起動までの一連のプロセスを自動化することにより、降灰予測の高速化が図られた。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、降灰量の予測が大きく改善された。

### (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

霧島、桜島、薩摩硫黄島（レーダー設置は三島村竹島）、口永良部島、諏訪之瀬島においてレーダー観測を継続した。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した。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した。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向上させた。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った。

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。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、關係式を提示した。また、地盤変動量から算出される火山灰放出量との関係についても検討した。

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った。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した。

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ダー観測による粗大粒子との差異についても考察した。

#### 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った。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した。

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させた。火山噴火の映像からシミュレーションの妥当性を検討した。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。

#### 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・風速観測を継続した。また、夏冬2回、ドローンによる大気中の風観測を行った。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った。

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った。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流れを把握した。

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た。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った。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流れ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。

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した。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た。今年度は密度の大きいレキを対象にして実験を行った。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した。

#### (c) 業務の成果

##### 1) プロジェクトの総合推進

平成 30 年 6 月 21 日および 12 月 19 日に東京で打ち合わせを行った。また、平成 30 年 12 月 27 日・28 日には鹿児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。特に、レキを用いた瓦屋根の破壊実験については課題 D サブテーマ 3 や課題 C サブテーマ 3 と実験計画等の詳細な情報共有を図った。

鹿児島での研究集会では、本サブテーマが実施する研究内容と成果について発表を行い、プロジェクトの内外からも様々な意見を出してもらい、議論を進めた。

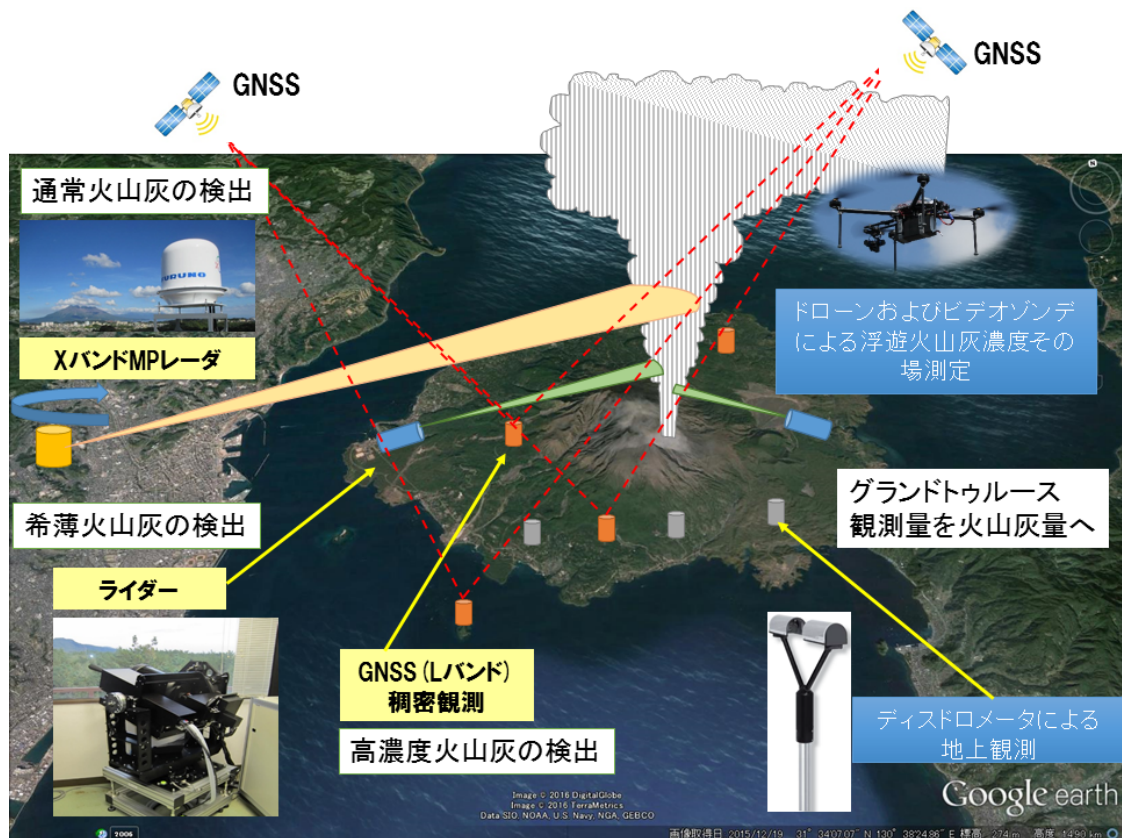


図1 火山灰のマルチパラメータ観測の概要

## 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を継続した。図1にマルチパラメータ観測の概要を示す。平成30年度には桜島の北東方向の大隅半島にGNSSを2台、また、桜島島内にディストロメータ4台を増設した。

### a) レーダー観測

#### a1) 観測の概要

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

対象火山名	施設名	住所	レーダーの緯度、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225m
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44m
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105m
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65m
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, 130.176036 標高281m
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119m

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(火山活動研究 センター)	設定なし	95～115	11～45
桜島 (錦江湾高等学校)	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30	設定なし	
薩摩硫黄島	5, 10, 15, 20, 30, 45, 60	設定なし	
口永良部島	5, 10, 15, 20, 25, 35, 45	115～135*	4～60*
諏訪之瀬島	10, 15, 20, 30, 40, 50, 60	設定なし	

HSQ スキャンは、水平面での走査、セクターRHI スキャンは鉛直断面での走査である。

\*口永良部島は 2018 年 8 月以降、セクターRHI スキャンで観測を継続している。

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している。レーダーの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。



図 4 X バンド MP レーダーの観測範囲

#### a2) 霧島新燃岳噴火

平成 30 年度は、対象とした 6 火山のうち、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島の 4 火山において噴火が発生した。

霧島新燃岳では 2018 年 3 月から 4 月にかけてブルカノ式噴火が頻繁に発生した。2018 年 3 月 9 日 15:58 のブルカノ式噴火では、気象庁の設置した監視カメラの映像から噴煙高度は火口縁上 3200m (海拔高度 4633m) に達したことが分かっている。この噴煙に対応するレーダー反射強度分布の高まりは海拔高度 5000m 程度に達している (図 5)。

2018 年 4 月 5 日には 3:31 と 3:45 にブルカノ式噴火があり、3:45 の噴火は連続噴火に移行し 7:15 まで継続した。3:31 の噴火は監視カメラによる測定で噴煙高度は火口縁上 5000m (海拔高度 6431m) と確認されているが、その後の 3:45 の噴火以降は山頂上空の雲により噴煙高度は火口縁上 2500m (海拔高度 3932m) より上と推定されている。

図 6 に 3:31 の噴火時のレーダー反射強度分布と同時刻の監視カメラ映像を示す。3:31 に発生した噴火のレーダー反射強度分布からみた噴煙最高高度到達時に図 6 は対応しており、反射強度分布から噴煙高度は海拔 4000m 程度と推定出来るが、監視カメラからの噴煙高度 (海拔高度 6431m) より明らかに低い。

一方、3:45 の噴火は連続噴火に移行したが、反射強度分布からみた噴煙最高高度到達時のレーダー反射強度分布の鉛直断面 (図 7a) と同時刻における監視カメラの映像 (図 7b) を示す。噴煙は雲入りしており噴煙高度は監視カメラの映像からは把握することができないが、レーダー反射強度分布の高まりからは、噴煙は海拔高度 9000m に達したことがわか



る。なお、反射強度分布図（図 7a）では、上端部がシャープに斜めに切れているが、これはセクターRHI スキャンにおける仰角の最大値に対応しており、それより上部はスキャンしていないからである。この時の噴煙は、気象衛星ひまわり 8 号により観測されたデータの解析から火口縁上約 8000m（海拔高度 9431m）まで上昇したものと推定されている（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台、2018）。レーダー反射強度から推定した噴煙高度海拔 9000m は衛星データから推定された噴煙高度におおむね一致している。

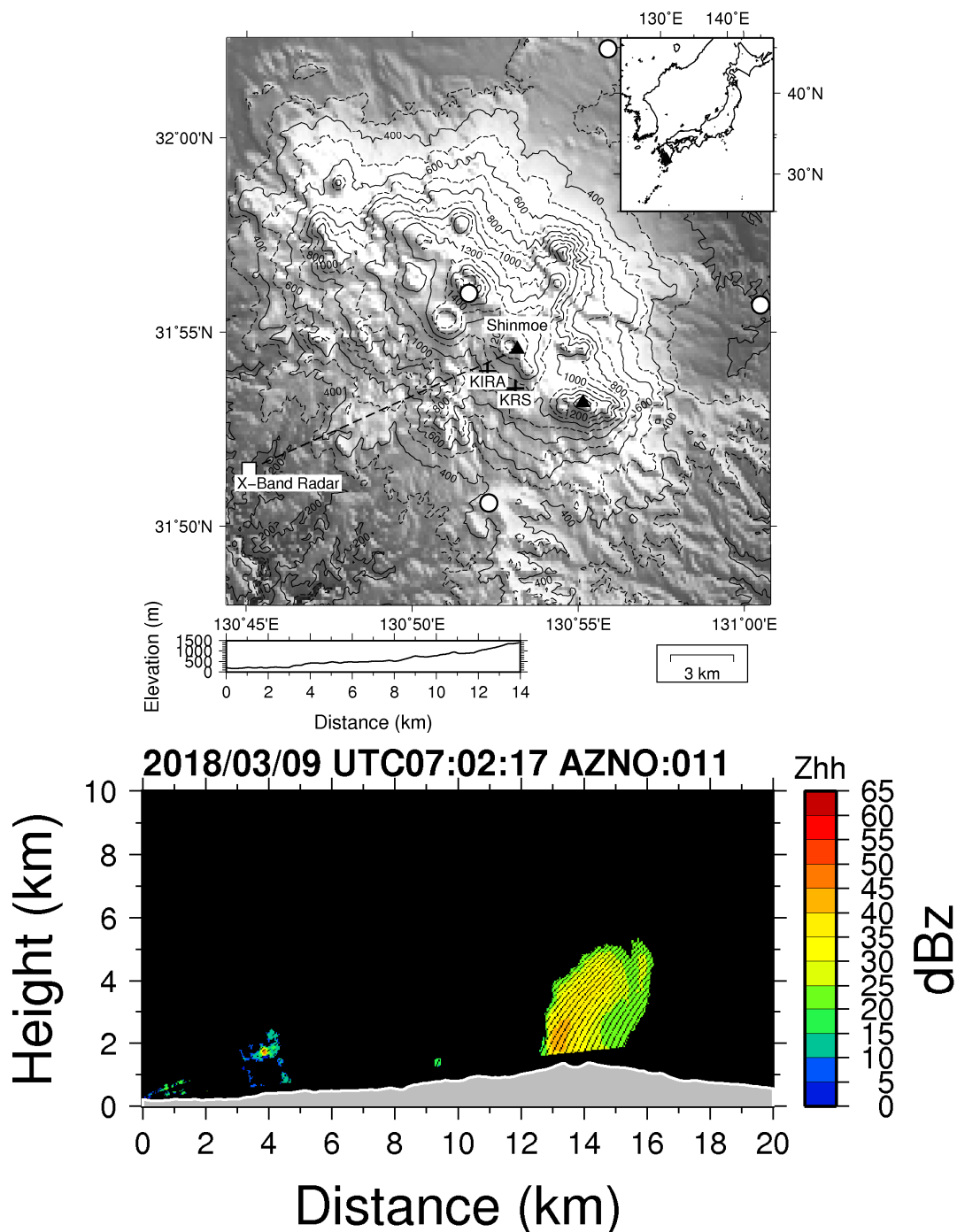


図 5 2018 年 3 月 9 日 15:58 に発生した霧島新燃岳噴火に伴う噴煙のレーダー強度画像。噴煙高度は火口縁上 3200m（海拔高度 4633m）と気象庁から報告されている。

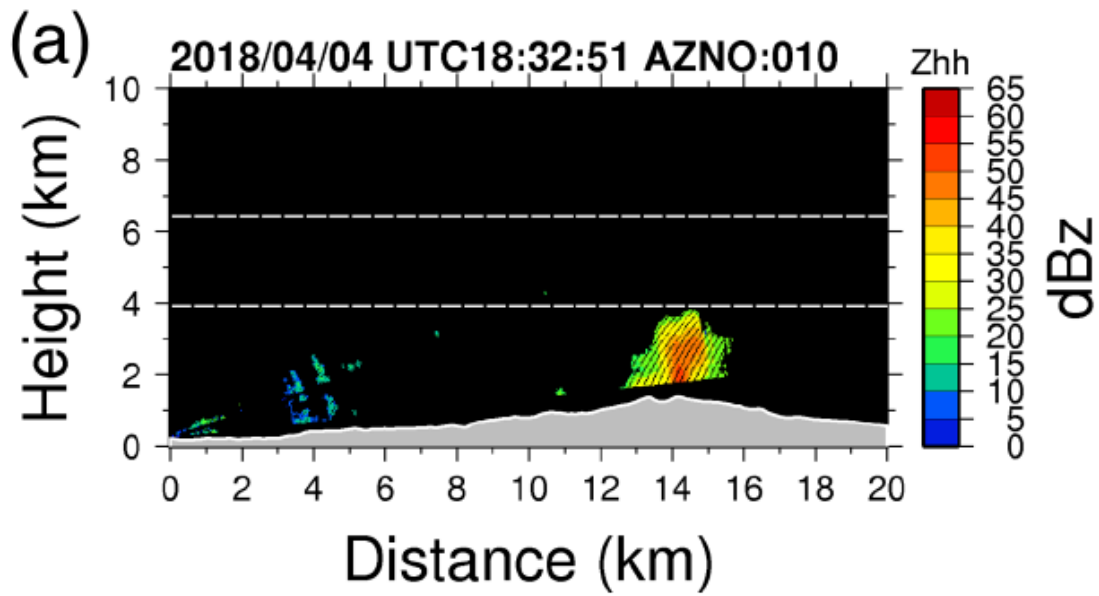


図6 2018年3月9日3:31に発生した霧島新燃岳におけるブルカノ式噴火に伴う噴煙のレーダー強度画像 (a) および監視カメラ画像 (b)。

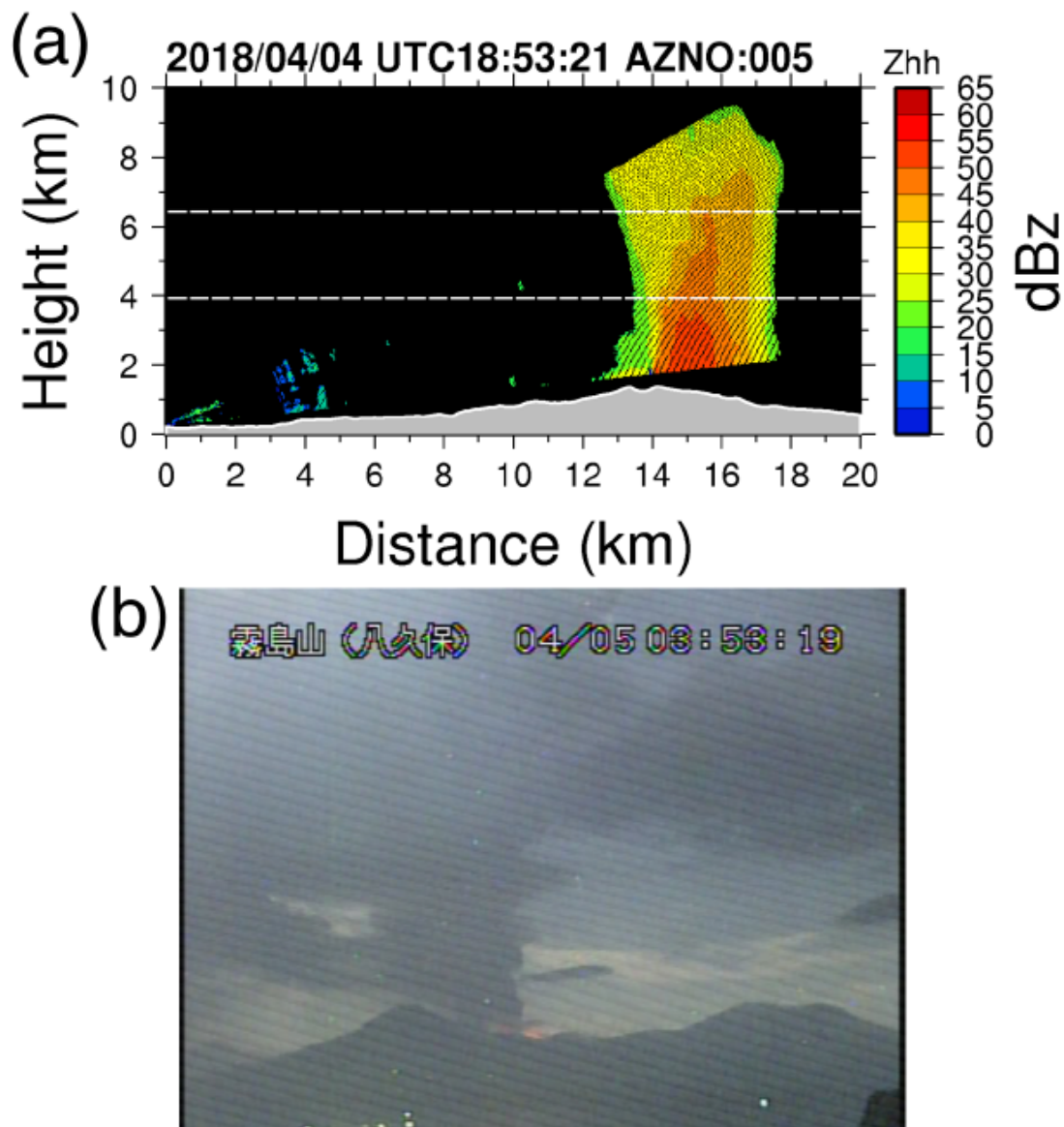


図7 2018年3月9日3:45に発生した霧島新燃岳におけるブルカノ式噴火に伴う噴煙のレーダー強度画像 (a) および監視カメラ画像 (b)。

### a3) 桜島噴火

桜島においては2018年4月から2019年3月までに259回のブルカノ式噴火が発生している。そのうち、最大規模のものは6月16日7:19に発生したもので、噴煙は南岳の火口縁上4700m(海拔5700m)に達した。火山活動研究センターに設置されたレーダーでは、反射強度の高い部分が海拔高度5000mに達したことがわかる(図8)。また、反射強度の大きい部分の形状は噴火発生時の高度別の風向・風速をよく反映していると考えられる。鹿児島地方気象台の09時の高層気象観測によれば、海拔3000m付近までは東風であったが、海拔4000m以上では西風に反転している。レーダー画像でも海拔3000m以下の高反射強度部分は西向きに移動するのに対し、海拔4000m以上では、東向きに高速で移動していることがわかる。

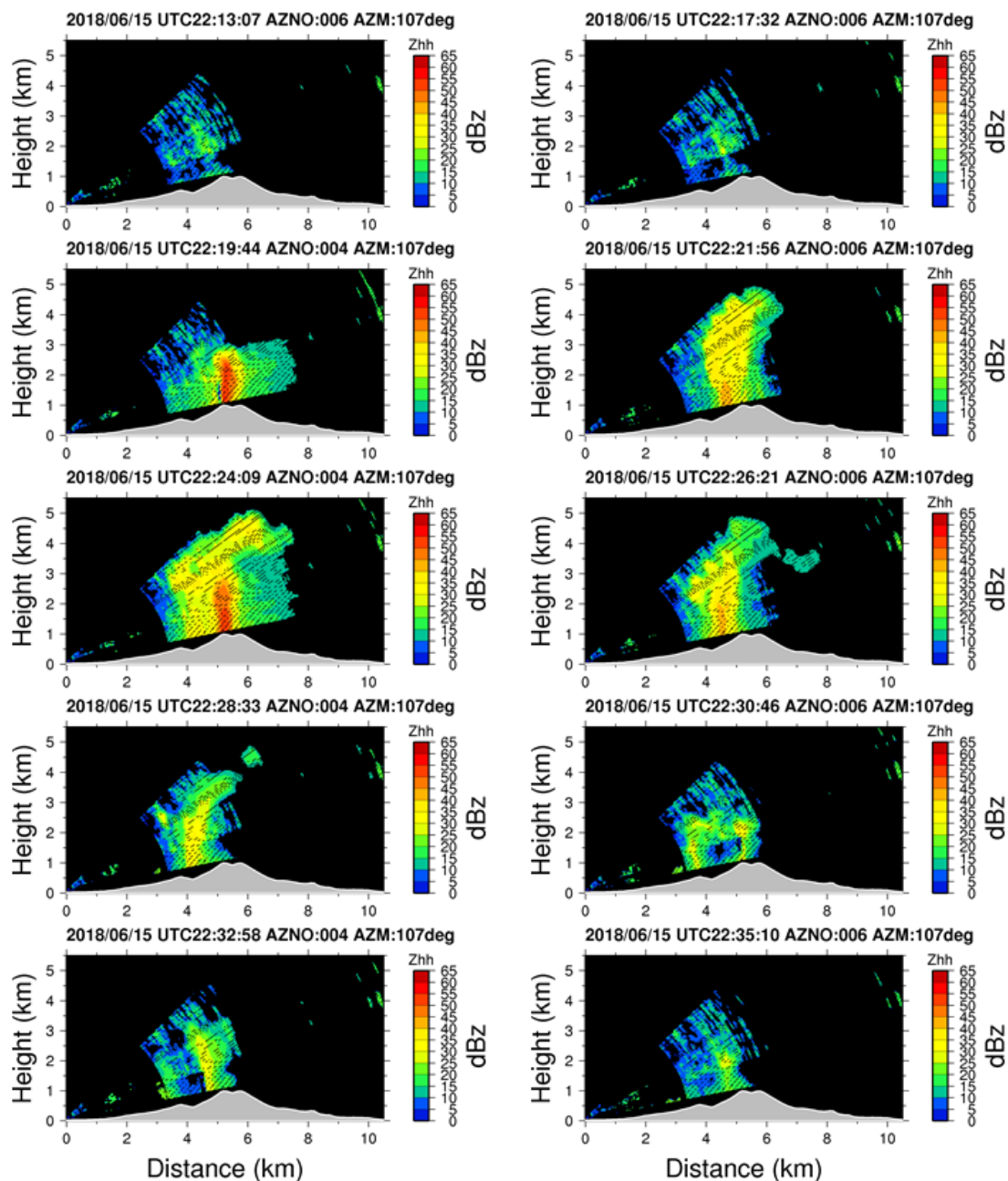


図8 火山活動研究センターに設置したレーダーにより観測された2018年6月16日7:19に始まった桜島南岳におけるブルカノ式噴火発生に伴う噴煙の反射強度の時間変化。反射強度の東西方向の断面図(左が西、右が東)を示す。水平距離0にレーダーがあり、南岳火口は水平距離5.6 kmに位置する。

口永良部島では 2015 年 6 月 18 日の噴火から約 3 年間、噴火が発生していなかったが、2018 年 10 月 21 日から再び新岳火口において噴火が発生するようになった。10 月 21 日から 12 月 13 日までは、火山灰放出が連続的に発生した。この噴火は小規模で、噴煙高度もおおむね火口縁上 500m 以下と低高度にしか達していなかったため、口永良部島に設置したレーダー（図 9）では噴煙を捕捉することができなかった。

噴火活動は 2018 年 12 月 18 日のイベントを契機に爆発的となり、2019 年 2 月 2 日の噴火まで 5 回の爆発的な噴火が発生した。2018 年 12 月 18 日の噴火は 16:38 に始まり、火砕流の発生を伴った。同日発表の「口永良部島の火山活動解説資料」によると、噴煙は火口縁上 2,000m まで上がり雲に入ったとされているが、本受託研究で設置したレーダーでは雲の中の噴煙を捉えることができた。レーダー観測では噴煙柱は海拔 3,000m に到達し、さらに風に流されながら海拔 5,000m まで上昇したことが明らかになった（図 10）。噴火発生時の風向は北西であったので、レーダーのセクター RHI スキャンの視線方向である南東方向に噴煙は移流した。

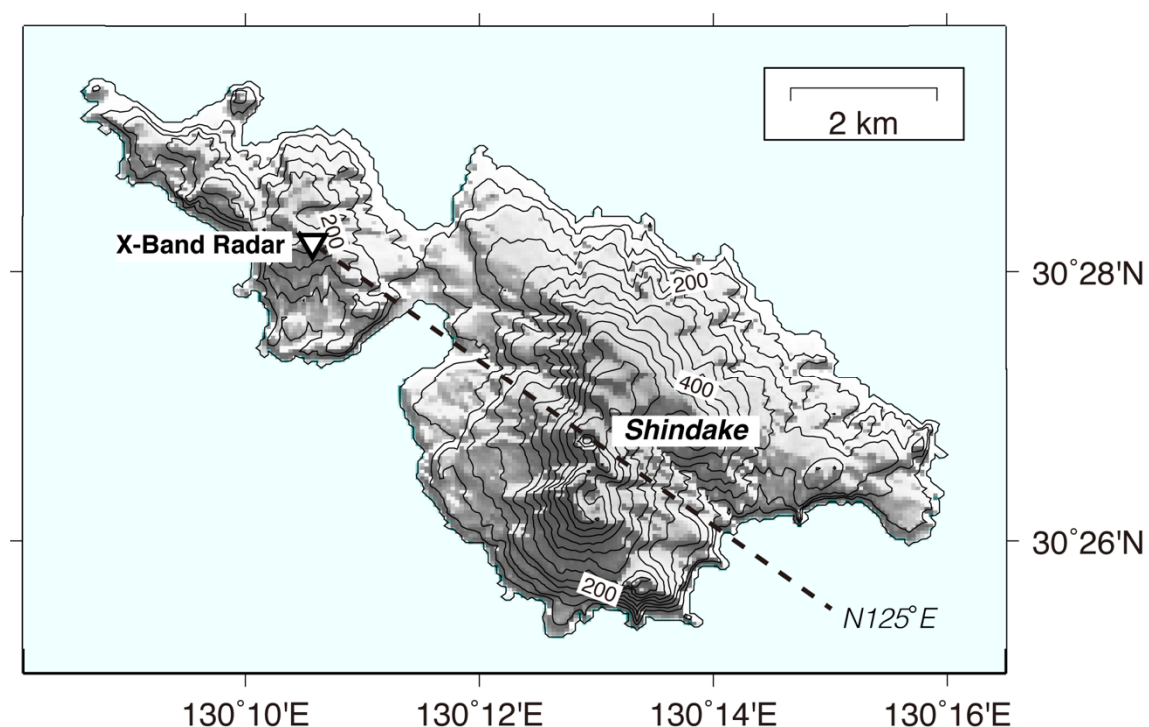


図 9 口永良部島に設置したレーダーと新岳火口の位置関係。レーダー（▽）は番屋が峰にある避難所の屋上に設置されている。レーダーからみると、新岳火口は方位角  $N125^{\circ}E$ 、水平距離 4.7 km に位置する。



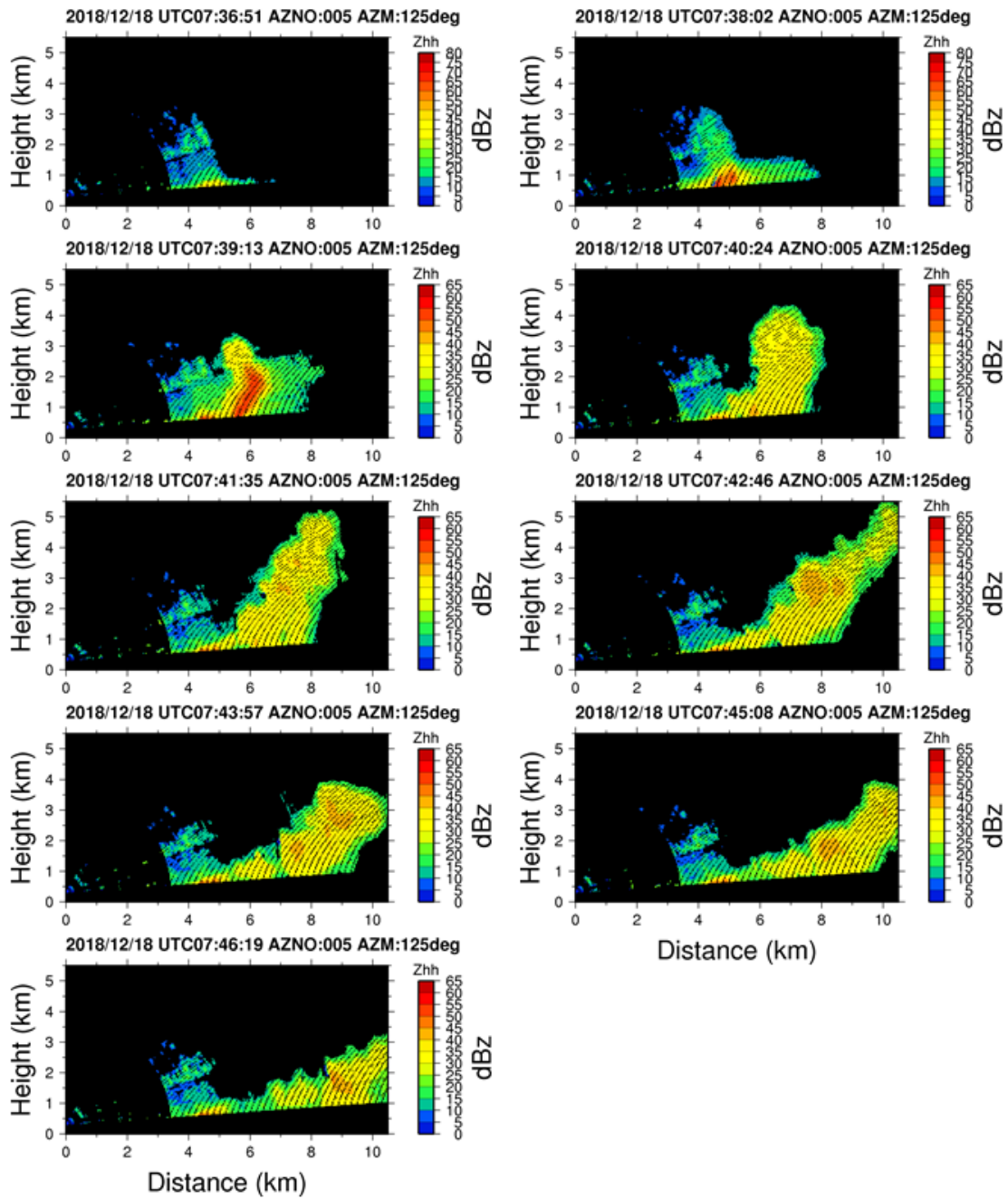


図 10 口永良部島の 2018 年 12 月 18 日 16:38 の噴火に伴う噴煙のレーダー反射強度の時間変化。反射強度の断面図を示し、水平距離 0 にレーダーがあり、新岳火口は水平距離 4.7 km に位置する。

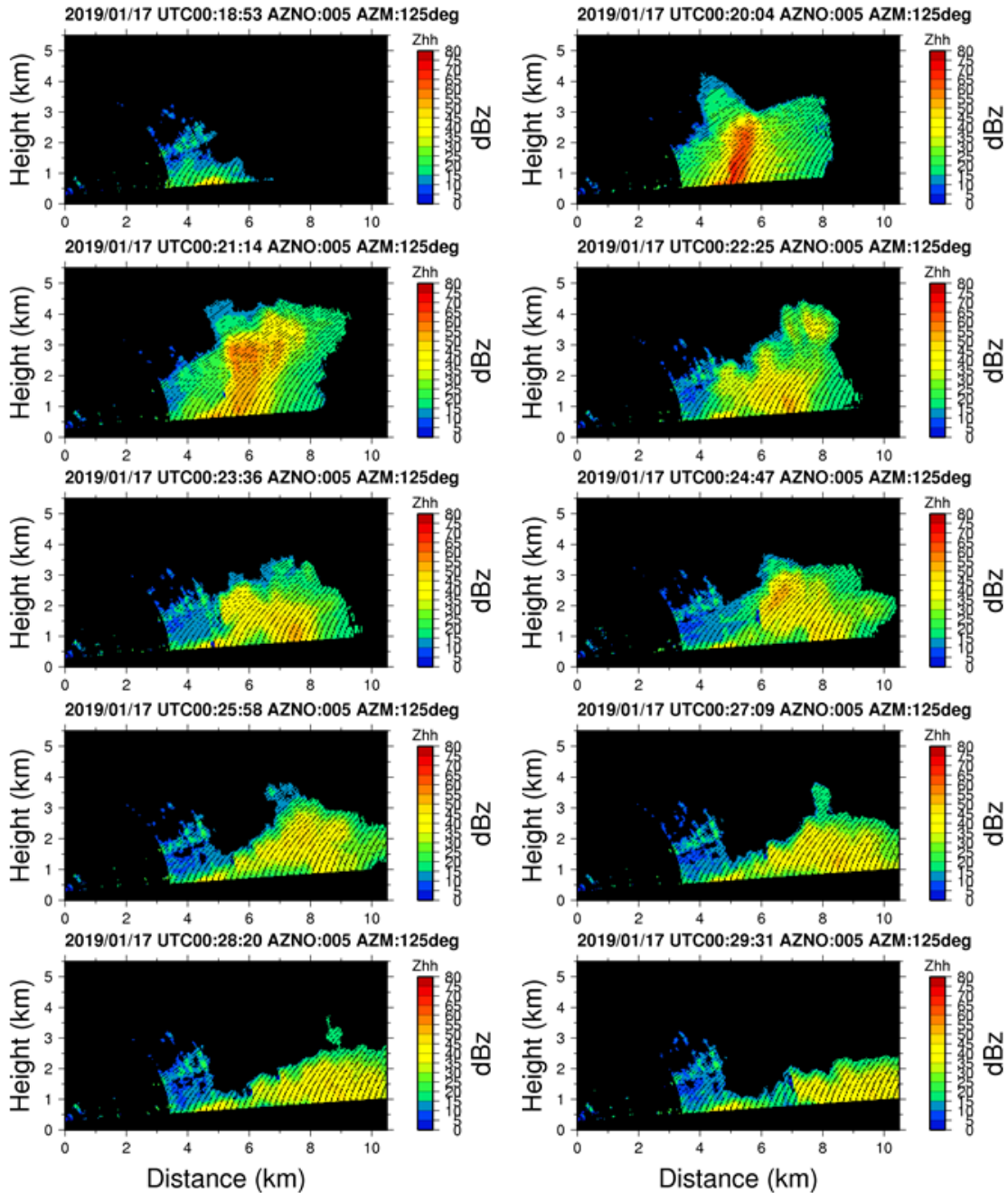


図 11 口永良部島において 2019 年 1 月 17 日 16:38 に発生した噴火に伴う噴煙のレーダー反射強度の時間変化。反射強度の断面図を示し、水平距離 0 にレーダーがあり、新岳火口は水平距離 4.7 km に位置する。

口永良部島では 2019 年 1 月 17 日 9 時 19 分にも噴火が発生し、火砕流を伴った。この時も新岳火口上空には雲がかかっていたので、噴煙は、新岳火口縁上 500 m まで上がり雲に入った（「口永良部島の火山活動解説資料」）。9 時 40 分の気象衛星画像では、新岳火口縁上約 6,000m の噴煙を観測したとされている。本受託研究で設置したレーダー観測では、反射強度の変化から噴火開始後 2 分で噴煙が海拔高度 4,000m に達したと推定される。この噴火の発生時でも風向は北西であったので、レーダーのセクター RHI スキャンの視線方向である南東方向に噴煙は移流し、レーダーの視線方向において反射強度の強い部分が降下

していくことがわかる。

このようにレーダーを使用することにより、火山の山頂付近が雲に覆われている場合でも、噴煙の高度やその形状を把握することが可能であることが示された。十分に高い高度に達した噴煙は人工衛星からも観測できるが、地上に設置したレーダーの使用は、即時的に噴煙高度を把握できることに最大のメリットがある。



#### 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  $\mu\text{m}$  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(図 16 参照)。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  $11^\circ$ 、黒神観測室では仰角  $15^\circ$  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>

#### b1) 浮遊火山灰濃度分布の統計解析

桜島火山観測所に設置された 2 波長偏光ライダーによる 2018 年 1 月から 11 月の観測データから粒子の光学特性の一種である消散係数を導出し、その気候学的な解析を行った。ある空気塊の消散係数は、その空気塊に含まれる粒子の粒径分布や複素屈折率にも依存するが、概ね粒子の表面積の総和に比例するもので、遠隔計測手法における粒子濃度の指標となる。ライダーの 532nm 観測結果から粒子の 532nm 消散係数(距離の関数)を計算し、観測所から距離毎に月平均値を求めた。その結果と、鹿児島気象台から公開されている「桜島の火山活動解説資料」に含まれる月毎の噴火回数・爆発的噴火回数・降灰量・降灰日数とを比較した。それらの結果を図 12 に示す。まず消散係数は火口付近では 5-7 月にピークとなるのに対して、観測所付近では 7-8 月にピークが見られる。これは近距離のエアロゾル濃度が火口付近の濃度と直接対応しておらず、上空の風による輸送プロセスが季節によって異なることとより強い関連があることを示している。鹿児島気象台における 2018 年風向別観測回数によると 7-8 月に南岳から観測所に向かう南東風の観測回数が最も多く、近距離の消散係数に見られるピークはこれと一致する。実際には気象台で記録される地上風のみならず、火口高度までの風系全体が輸送に影響するため、ウインドプロファイラー等による上空の風速観測結果との対比が今後の課題と考えられる。

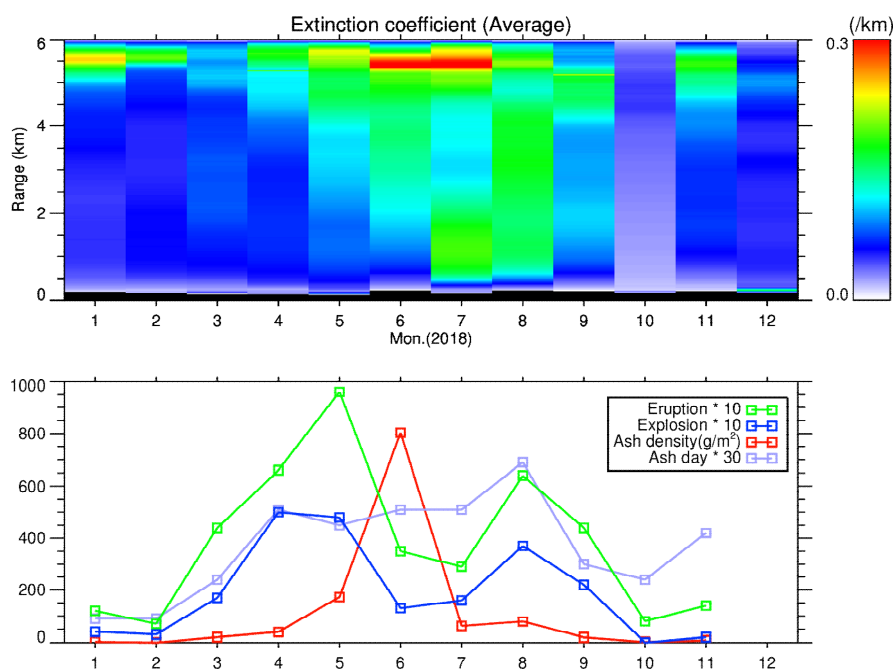


図 12 2018 年 1 月から 11 月までの距離別月平均消散係数(上段)と、火山活動関連データ(下段、緑:噴火回数、青・爆発的噴火、赤・降灰量、紫:降灰日数)との対応。

#### b2) 2 波長比による考察

ライダーでは 2 波長(可視 532nm と近赤外 1064nm)で観測を行っている。両波長は、 $1\mu\text{m}$  以上の粒子に関しては同じような感度を持つが、サブミクロンの粒子に関しては 532nm の感度が高く、1064nm の感度は低い。ある空気塊にサブミクロン粒子が多く含まれている場合、532nm の消散係数が 1064nm のそれよりも大きくなり、ある区間における信号の減衰が強くなる。即ち、一定の距離において 2 波長の信号を比較して遠方で 532nm が弱くなっている場合、その区間でサブミクロン粒子が卓越している可能性がある。この傾向を調べるため、2018 年 6 月 16 日の距離 2-3km 区間のデータについて、2 波長比の変化度合いを調べた。図 13 は午前 0 時から午後 11 時まで毎正時におけるプロファイルを利用し、2-3km 区間内各距離における 532nm・1064nm の後方散乱強度を横軸・縦軸にプロットしたものである。この区間内で粒径分布が一様であるとする、もしサブミクロン粒子が少なければ 2 波長の減衰は同程度となっており、後方散乱強度の比はほぼ一定、即ち散布図においては 1:1 の直線に沿ってデータが分布する。これに対して、この直線と離れる分布を示す場合には、532nm での消散が強い、即ちサブミクロン粒子が多いことが示唆される。この日の結果では 14-15 時に直線からやや離れるデータが見られた。この日は午前 7 時台に噴火があったため、数時間後の観測では噴火直後と異なり相対的に小さな粒子が卓越した空気塊が観測されることは不自然ではない。今回、特定の日の距離 2-3km における相対的な強度比の変化に注目して解析を行ったが、今後はより定量的な表現方法を工夫し、長期間・広範囲のデータに対してこのような処理を実施することが火山灰粒子の特性を捉える上で重要である。

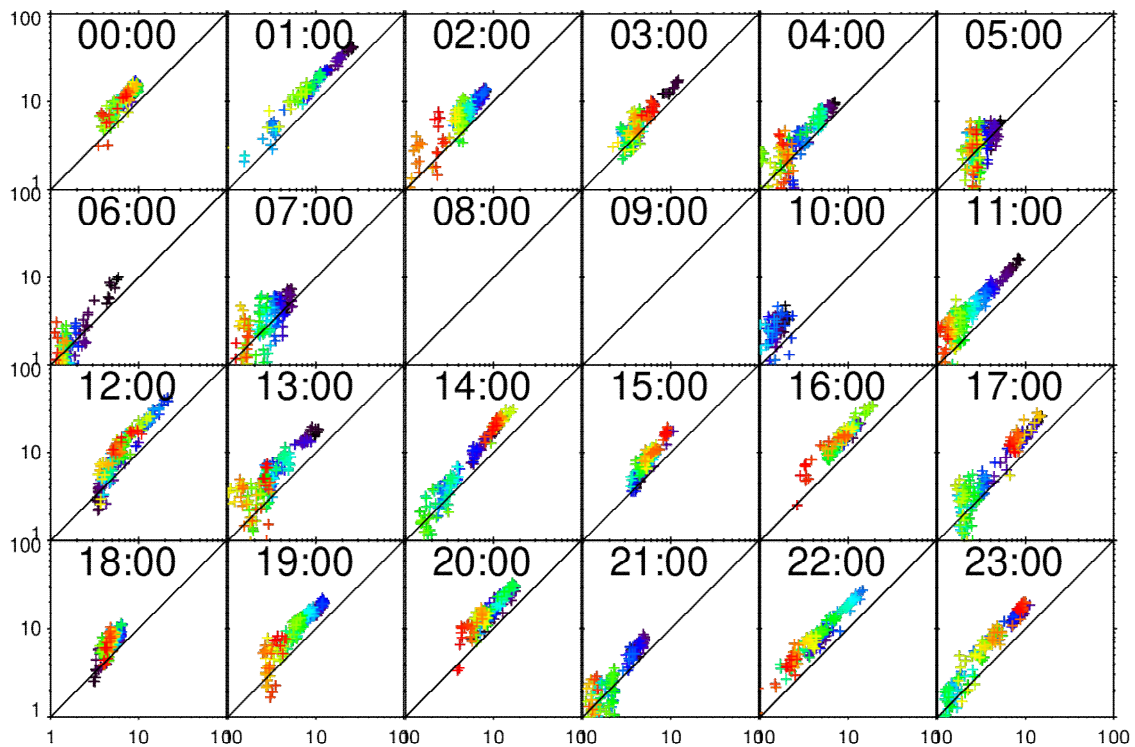


図 13 2018 年 6 月 16 日の毎正時における 2-3km 区間の後方散乱強度散布図(横軸・532nm、縦軸・1064nm)。左上から右に 0-5 時、その下段が 6-11 時、最下段右端が 23 時。各点の色は距離 2km から 3km に向かって寒色から暖色へと変化させている。データ点が斜め実線と平行であれば 2 波長比が一定であることを示す。

### b3) レーダー・ライダー同時観測

2018 年 6 月 16 日の噴火について、レーダーとライダーの視線方向が重なった時間の観測結果を比較し、両者の差異について考察を行った。図 14 は、日本時間 07:19 および 07:32 における方位角 102 度のレーダー反射強度距離高度断面図とライダー強度図である。まず、噴火直後の 07:19 においては、レーダー観測範囲の最下層で 30dBz の信号が受かっている水平距離 5km 付近でライダーの信号強度も最大となっている。この時点では粗大粒子に感度が高いレーダーと微小粒子にも感度があるライダーとでピークが一致していることから、噴煙のピークの手前にはほとんど粒子が存在しないクリアな状況であることが理解できる。一方 07:32 には、レーダー反射強度が 30dBz となるラインは依然水平距離 5km 付近に見られるものの、ライダーの後方散乱信号は水平距離 1.8km で最大となり、その先では強く減衰している。即ちこの時間には、レーダーでは感度がなくライダーでは感度の高い粒子(粒径数十  $\mu\text{m}$  以下)が観測所と火口の間に大量に浮遊し、可視光での消散係数が増大していることが分かる。これは顕著な例であるが、このように波長帯が異なる遠隔計測手法を組み合わせることによって、観測地点から火口に至る線上での粒子サイズ分布に関する情報を得ることが可能である。

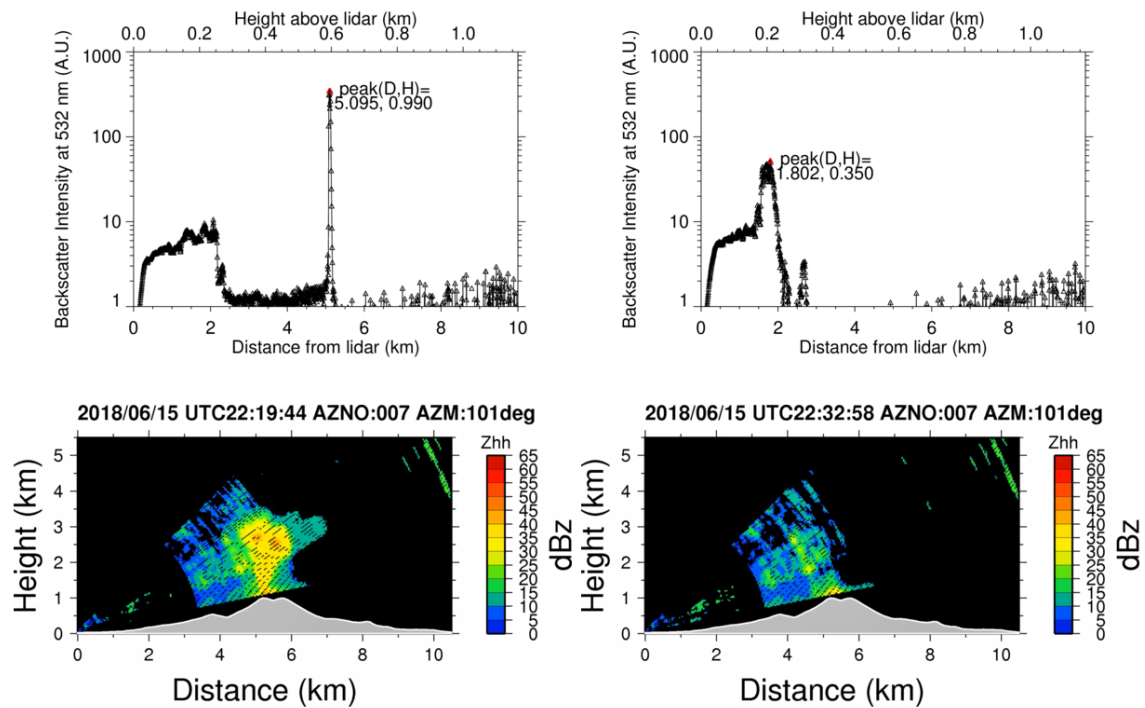


図 14 観測所から南岳火口付近を指向したライダーの 532nm 後方散乱強度(上)と、同じ方向のレーダーによる反射強度の距離高度断面図(下)。時刻は日本時間 2018 年 6 月 16 日午前 7 時 19 分(左)および同 32 分(右)。上段の図では後方散乱強度が最大となるデータ点を赤で示し、ライダーからの水平・鉛直距離を図中に示した。



### c) GNSS 観測

GNSS 衛星からの電波は噴煙を通過すると伝播遅延が生じ、位相残差として検知されること (Ohta and Iguchi, 2015) <sup>1)</sup> や SN 比が低下することが知られている (Larson, 2013) <sup>2)</sup>。桜島において発生する噴火についても噴煙高度が 4000m 以上に達する比較的規模の大きい噴火については、位相残差や SN 比の低下が観測されている。また、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) <sup>1)</sup>。このように、GNSS 観測は噴煙の検知にも活用可能である。

桜島および桜島南岳からおよそ 50km の範囲における GNSS 観測点の配置を図 15 に示す。日本列島では西風が卓越するので、火山灰は東方向に移流することが多い。平成 29 年度には桜島の東方の大隅半島側に 4 点の GNSS 観測点を設置した。平成 30 年度は、大隅半島側にさらに 2 点の GNSS 観測点を増設した。

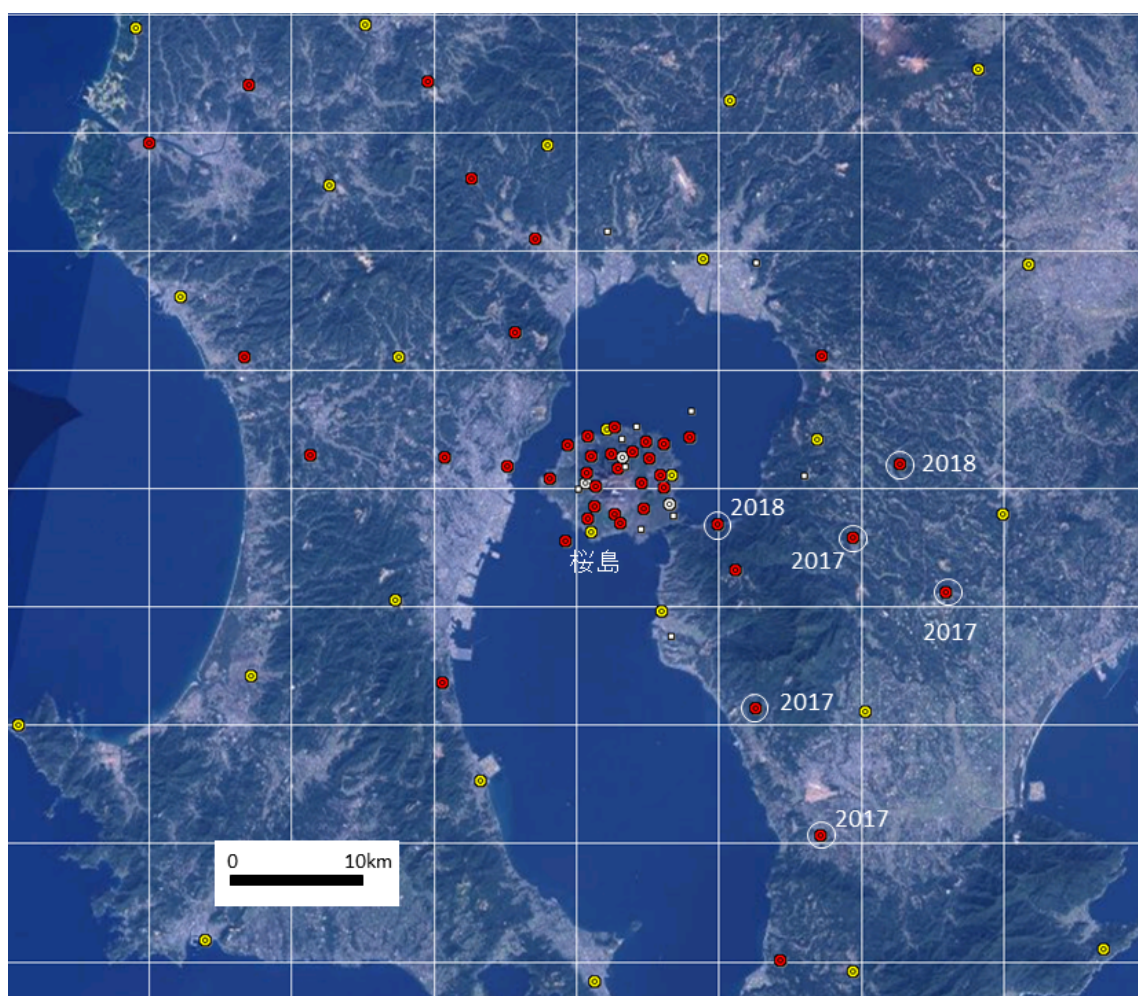


図 15 桜島およびその周辺における GNSS 観測点の配置図。黄丸は国土地理院の電子基準点。赤丸は京都大学防災研究所が設置した観測点。赤丸を白円で囲んだものが本プロジェクトで設置した観測点で、“2017”、“2018” は平成 29 年度及び 30 年度設置分を示す。

#### d) ディスドロメータによる地上観測

##### d1) ディスドロメータによる地上観測の概要

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 よりも落下速度が大きい側にプロットされることが予想される。一方、実際に降下火山灰をディスドロメータで観測したところ、予想に反し、Gunn-Kinzer line よりも落下速度が小さいものが多いものが多いことがわかり、Gunn-Kinzer line と異なる粒径－落下速度分布を示すことがわかった。粒径－落下速度分布の相違から雨粒と火山灰粒子の識別が可能であることが示された。

ディスドロメータの桜島における位置図を図 16 に示す。各観測点では、時間雨量相当量、粒子数、センサーの温度、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。平成 28 年度は 6 台、平成 29 年度は 4 台のディスドロメータを設置したが、平成 30 年度は、火口から距離による粒径分布特性を調査するために、南岳火口から西方には直線的にディスドロメータを配置した。

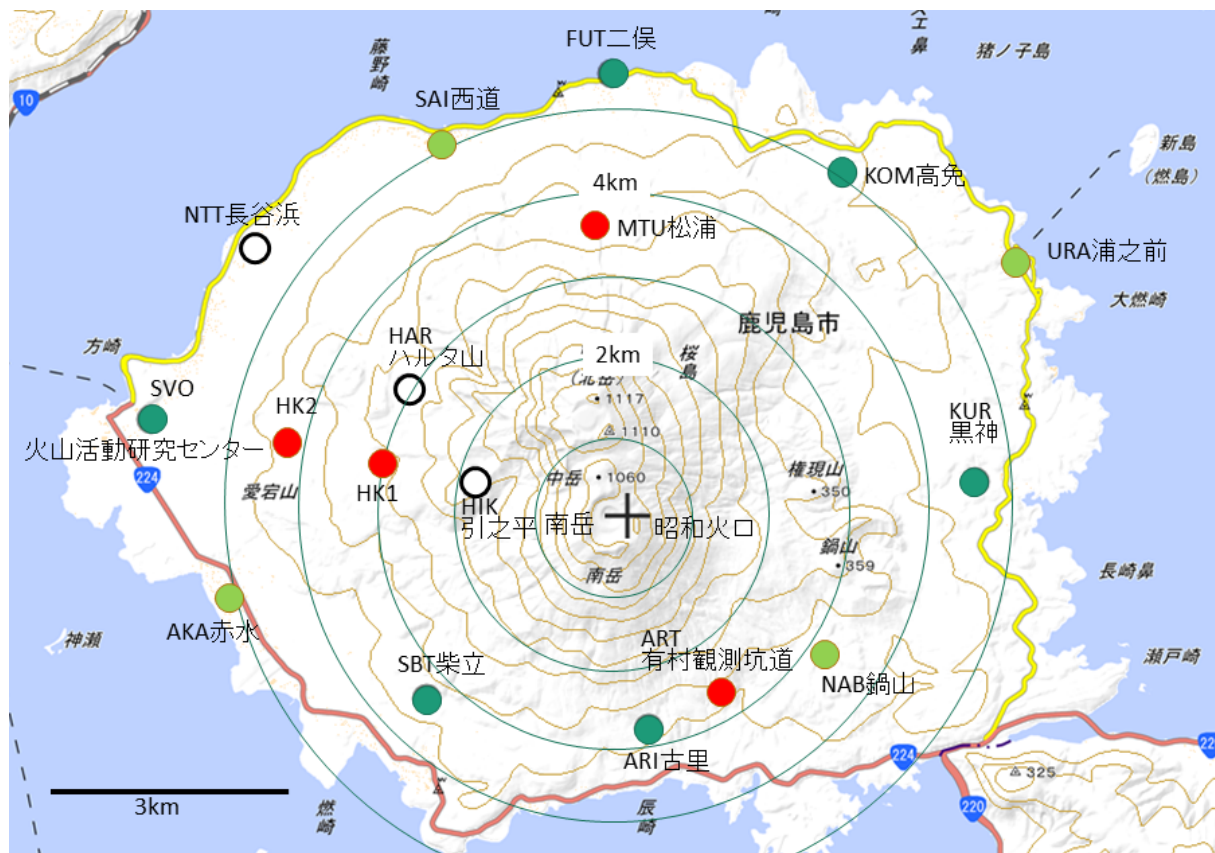


図 16 桜島におけるディスドロメータの位置図。緑丸：28 年度設置、黄緑丸：29 年度設置。赤丸：30 年度設置。白丸は他のプロジェクト。

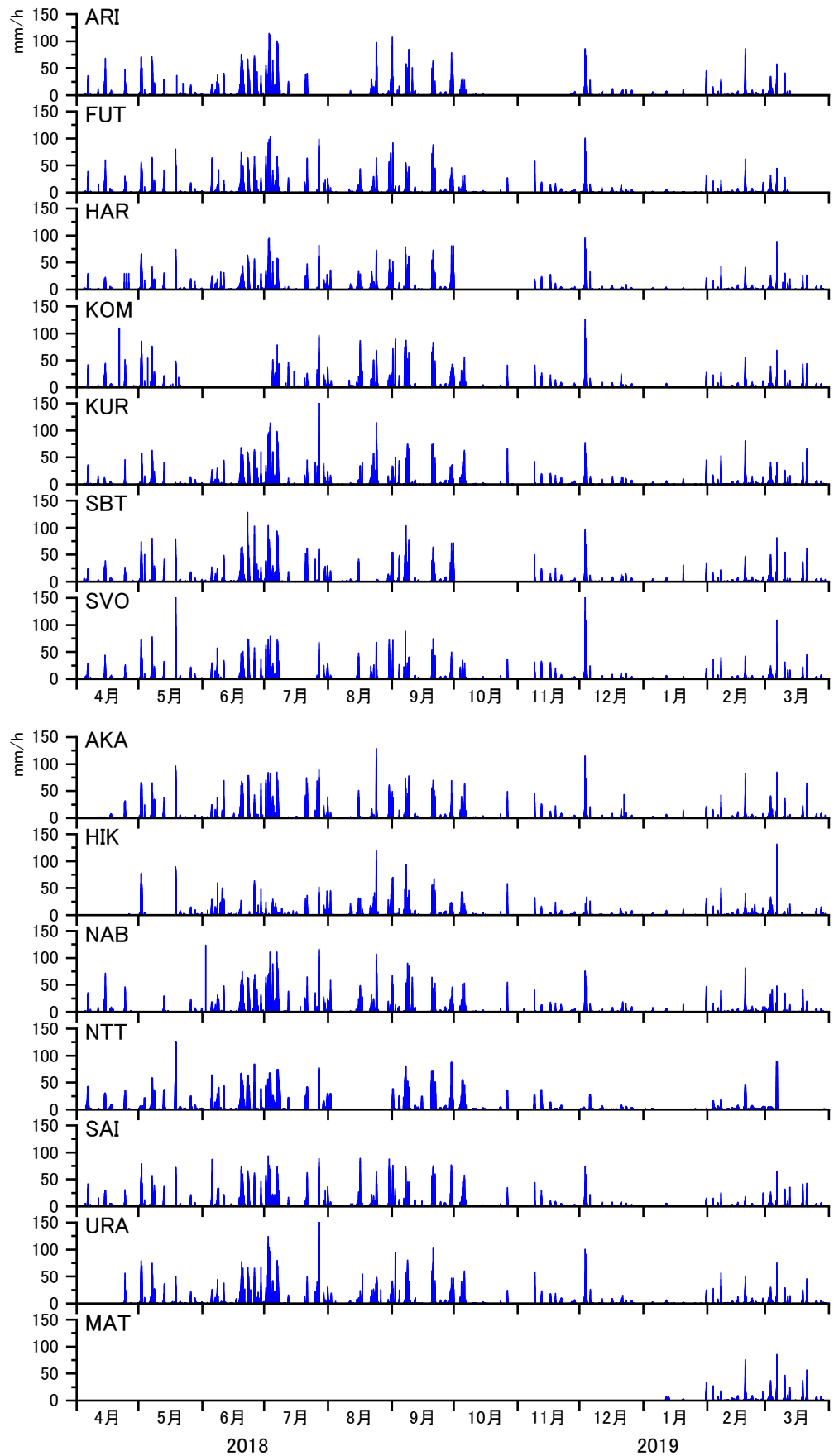


図 17 ディスドロメータにより観測された時間雨量相当量

#### d2) ディスドロメータ観測による降灰量の時間変化

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。2018年4月1日～2019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）の最大値は浦之前で226mm/hを記録しており、浦之前観測点では100mm/hを超えたものが17分間あった。

ディスドロメータで観測される粒子の多くは、雨滴であるので、その中から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。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18～図24に示す。

2009年から2017年10月まで昭和火口において噴火が頻発していたが、2017年10月31日から南岳において噴火が発生するようになった。2018年4月以降の噴火はほとんど南岳において発生したものであり、空気振動や弾道岩塊の放出を伴うブルカノ式噴火と噴煙の上昇のみを伴う非ブルカノ式噴火に分けられる。ここでは、非ブルカノ式噴火は単に噴火とする。

2018年6月10日には11:35、11:58に噴火が、14:22にはブルカノ式噴火が発生した。11:35に発生した噴火後に、11:50から引之平において降灰が観測され始め、11:52にはピークに達した（29mm/h、図18）。また、12:03からはハルタ山においても降灰が観測され始め、12:08には降灰量のピークに達した。11:58にも噴火が発生したが、11:35の噴火では噴煙高度が火口縁上3500mに達したが（気象庁噴火に関する火山観測報）、11:58の噴火では噴煙高度は1800mと報告されており、噴火に伴う降灰は識別できない。14:22にはブルカノ式噴火が発生し、引之平では14:33から、ハルタ山では14:42から降灰が観測され始めた。引之平では14:42に時間雨量相当量50mm/hの降灰が検知された。この量は11:35の噴火よりも多い。気象庁の噴火に関する火山観測報によれば、火口縁上1000mで雲入りとされているが、火山活動研究センターに設置したXバンドMPレーダーで観測された反射強度の解析によれば、少なくとも噴煙は4000mに達しており、より規模の大きい噴火が発生したと考えられる。

2018年6月16日7:19に発生したブルカノ式噴火の降灰強度の時間変化を図19に示す。この噴火に伴う噴煙は火口縁上4700mに達し、火砕流も発生しており、2018年に発生した噴火としては最大規模である。引之平では7:29に降灰が観測されたが、わずか0.1mm/hであり、多量の降灰は赤水および柴立で観測された。赤水では7:33、柴立では7:34から降灰が観測され始めた。赤水でのピーク値は7:35にあり、8.8mm/hに達したが、柴立におけるピーク値（1.8mm/h）は7:41と遅れている。図16に示すように赤水は柴立よりも南岳火口から遠方にあるが降灰開始時刻、ピーク時刻とも赤水の方が早いことは赤水が火山灰の主移流方向に位置していたことを示唆する。

2018年6月16日7:19に発生したブルカノ式噴火は3段階のフェーズを経て進行したものと推定される（図20）。それぞれのフェーズの始まり付近において地震動の振幅、空気振動振幅、地盤変動速度が増加している。これらのフェーズに対応した降灰量の時間変化が赤水のディスドロメータで15分程度遅れて見られる（図21）。これらの変化は噴出率の時間変化に対応したものと考えられる。



2018年7月9日の噴火による降灰時の引之平およびハルタ山における時間雨量相当量と地震動のRMS振幅を図22に示す。この噴火の噴煙高度は1300mとされるが、引之平におけるピーク時間雨量相当量は12mm/hに達しており、噴煙高度が低い割に降灰量が多い。

2018年7月16日のブルカノ式噴火による降灰時の引之平および赤水、ハルタ山における時間雨量相当量と地震動のRMS振幅を図23に示す。この噴火の噴煙高度は火口縁上4600mに達しており、2018年の噴火としては、6月16日の噴火に次いで、噴煙高度が高い。この噴火は長時間継続しており、降灰がディストロメータで観測されている時間も長い。赤水では23分間、降灰が検出された。また引之平では間欠的に39分間、降灰が観測された。

図16に示すように南岳を取り囲むようにディストロメータを設置しているが、1回の噴火では同時に火山灰が検出できるのは多くの場合1観測点のみであり、多くても3観測点である（図19、23）。図24に示した例は1回の噴火で5観測点において降灰を検知できた例である。噴火は6月9日の21:27に始まり、約40分間継続した。降灰を検知し始めた時間は、引之平で21:38、ハルタ山で21:41、長谷浜で21:48、西道で21:52、火山活動研究センターで21:58と、南岳火口からの距離が離れるにつれて、降灰開始時間が遅れることがわかる。また、地震動のRMS振幅の時間変化から2つのフェーズが識別できるが、それぞれに対応する時間雨量相当量のピークが引之平、ハルタ山、長谷浜で識別できる。

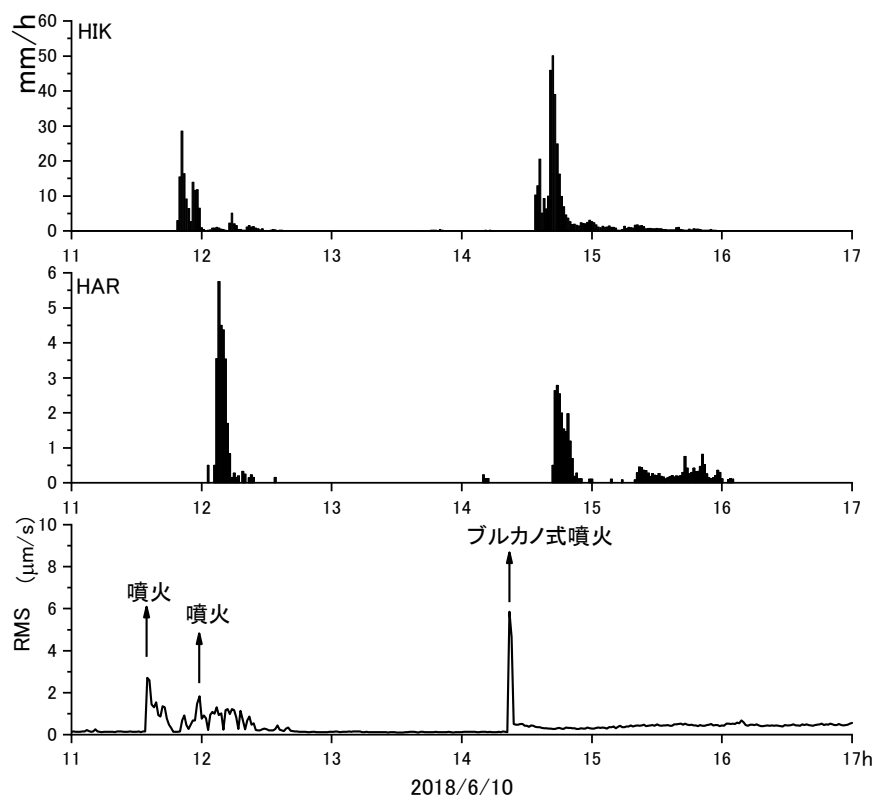


図 18 2018 年 6 月 10 日の噴火による降灰時の引之平およびハルタ山における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。RMS 振幅は有村観測坑道で計測された。

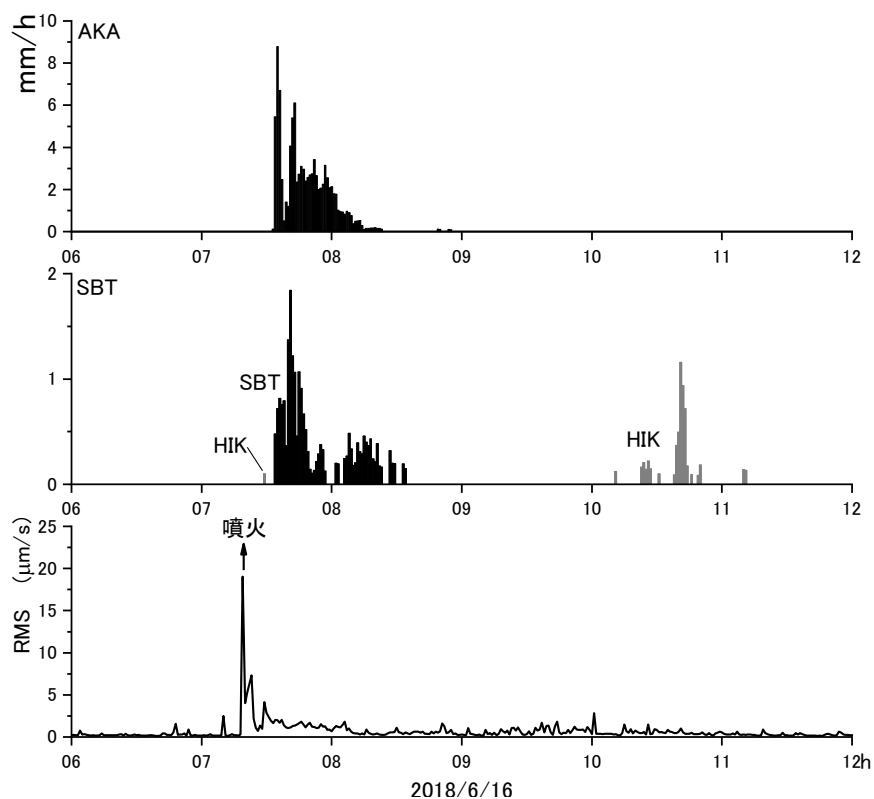


図 19 2018 年 6 月 16 日 7:19 のブルカノ式噴火による降灰時の赤水および引之平、柴立における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。RMS 振幅は有村観測坑道で計測された。

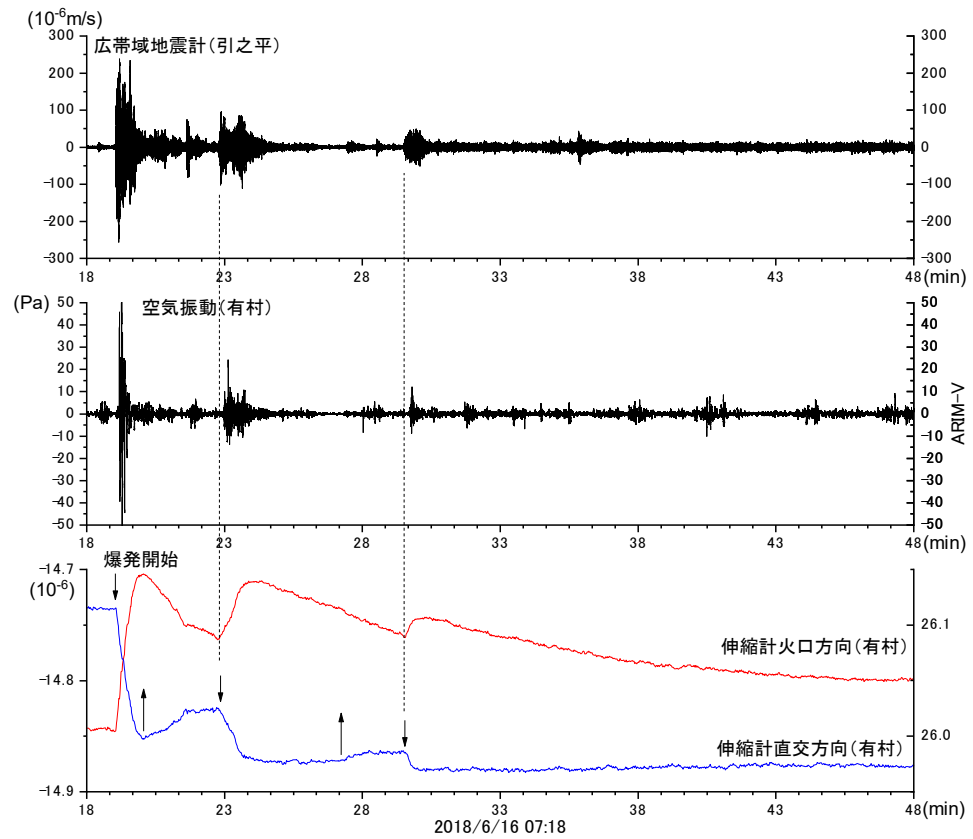


図 20 2018 年 6 月 16 日 7:19 に発生したブルカノ式噴火の推移。地震動（上）、空気振動（中）、地盤変動（下）。地盤変動は有村観測坑道の伸縮計によるひずみ変化。

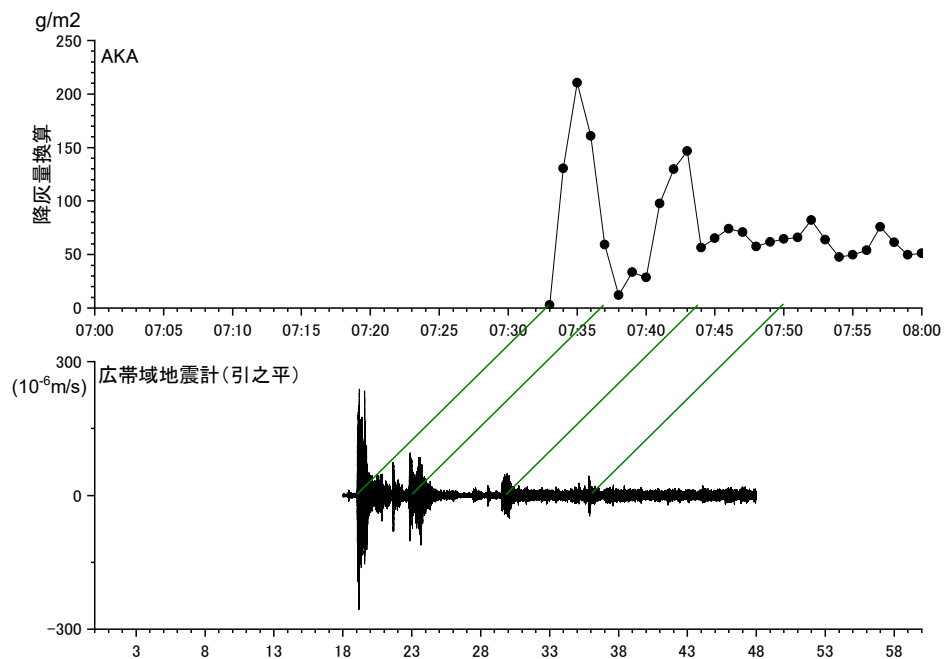


図 21 2018 年 6 月 16 日 7:19 のブルカノ式噴火に伴う赤水における降灰量の時間変化（上段）と地震動振幅（下段）の時間変化の対応関係。赤水における降灰量はディストロメータの時間雨量相当値から算出した。式(1)参照。

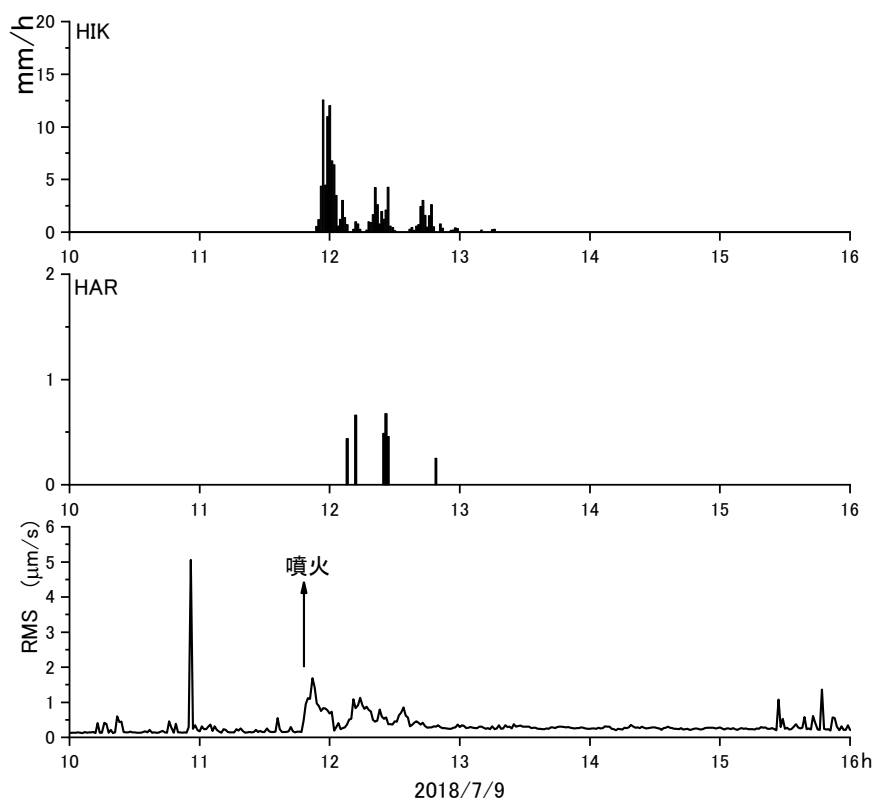


図 22 2018 年 7 月 9 日 11:49 の噴火による降灰時の引之平およびハルタ山における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅

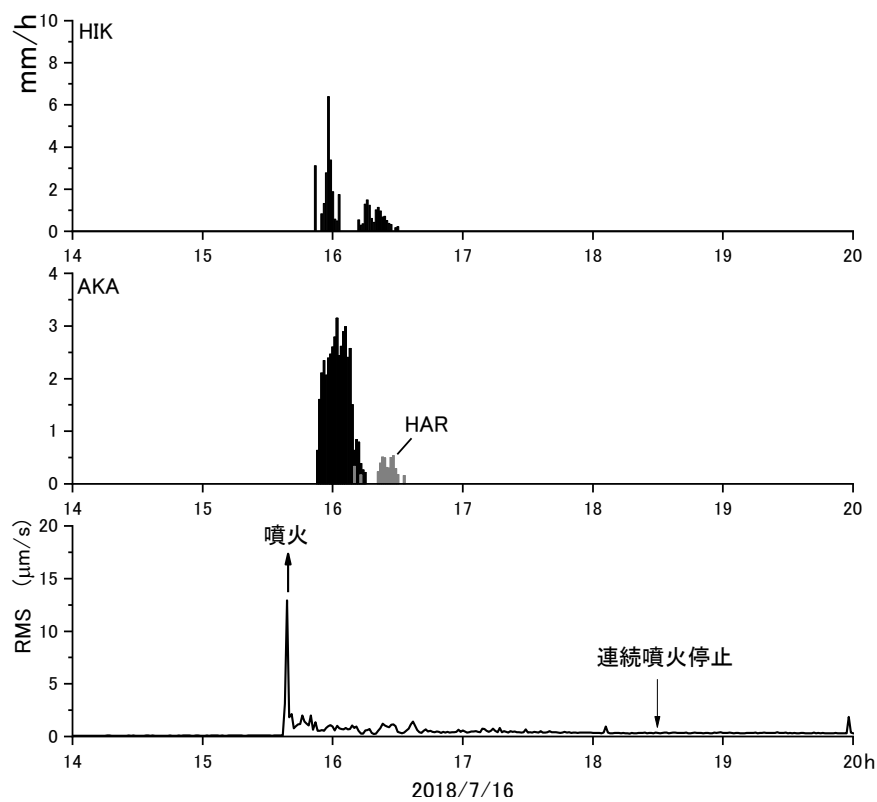


図 23 2018 年 7 月 16 日 15:38 のブルカノ式噴火による降灰時の引之平および赤水、ハルタ山における時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅

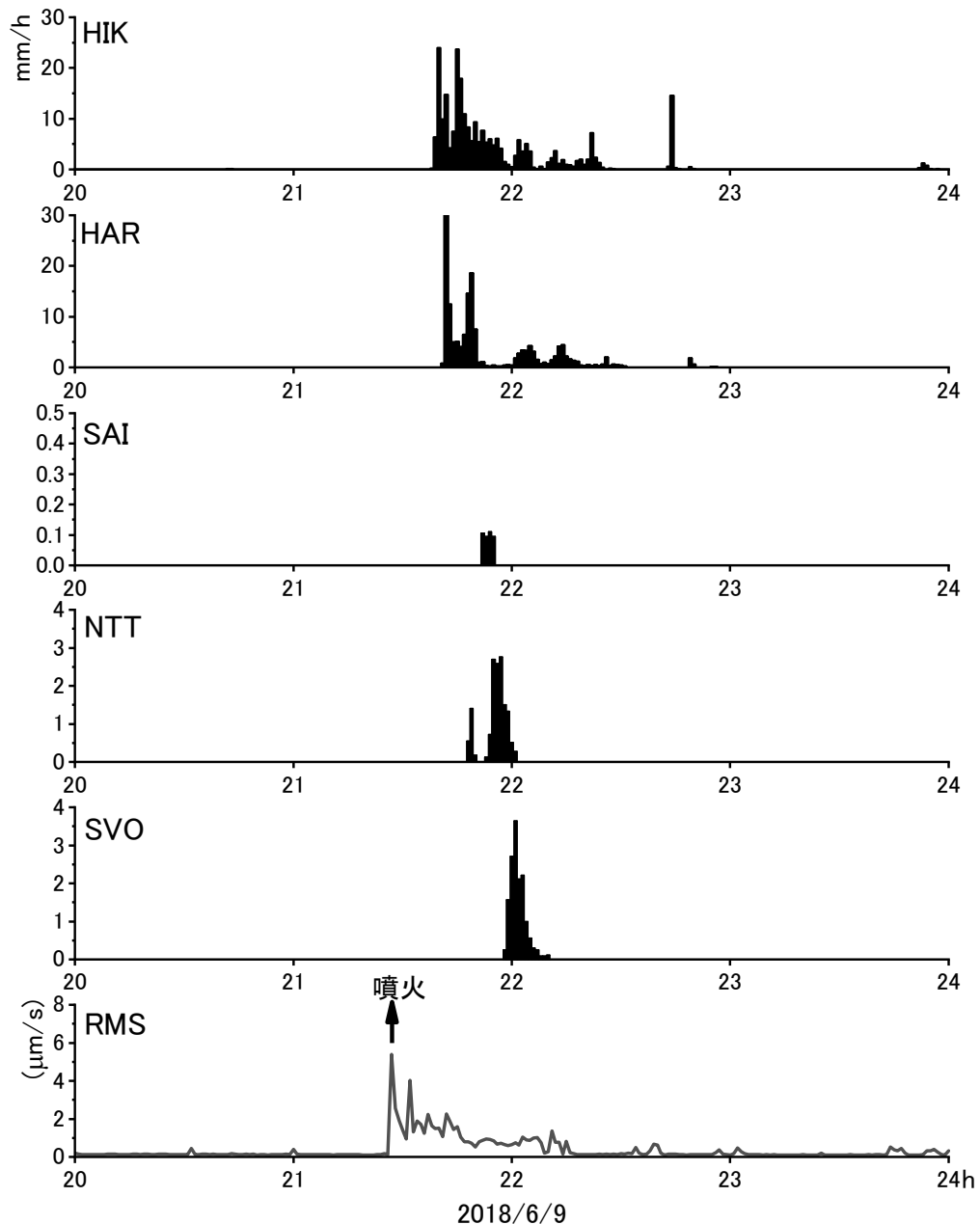


図 24 2018 年 6 月 9 日 21:27 のブルカノ式噴火による時間雨量相当量と地震動の RMS 振幅。引之平、ハルタ山、西道、長谷浜（NTT）、火山活動研究センター（SV0）における値を比較した。

#### d3) ディスドロメータによる降灰観測とキャンペーン観測の比較

平成 29 年度の報告書において、単位面積当たりの火山灰重量 ( $W$ ) の単位を  $\text{g}/\text{m}^2$ 、ディスドロメータの時間雨量相当量の積算値 ( $I_p$ ) の単位を  $\text{mm}/\text{h}$  とすれば、両者は以下のように近似できることを示した。

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

したがって、ディスド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。2018 年 6 月 16 日のブルカノ式噴火の際の赤水における単位面

積当たりの降灰重量の時間変化を図 21 に示した。この噴火では、降灰重量のキャンペーン観測も噴火後に実施している。調査結果を図 25 に示す。赤水の国道では  $1900\text{g}/\text{m}^2$  の降灰があった。近傍のディストロメータによる時間雨量相当量の積算値は  $99.8\text{mm}/\text{h}$  になるので、約  $2400\text{g}/\text{m}^2$  の降灰に相当することになり、現地観測の結果と整合的である。



図 25 2018 年 6 月 16 日のブルカノ式噴火後のキャンペーン観測による降灰量の分布

#### d4) 降灰量の空間分布

図 18、19 に示すように、いくつかの噴火については火口からの異なる距離において降灰が観測されている。異なる距離における粒径分布を比較して図 26 に示す。粒子数は火山灰粒子を検知し始めてから 10 分間について計測した。火口からの距離の近い引之平（1.7km）とハルタ山（2.7km）を比較すると、以下のことが指摘できる。まず、粒子数が引之平の方が 1 桁以上多いことである。2 番目に検出できた最大粒径が引之平の方が大きい。3 番目に粒径分布のピークが引之平の方が大きいことである。

2018 年 6 月 9 日 21:27 のブルカノ式噴火による降灰時には 5 観測点において火山灰粒子が検知された（図 24）。5 観測点における粒径分布を比較して図 27 に示す。引之平とハルタ山を比較すると、図 26 及び図 27 に示した例のような大きな違いはないが、粒径が 0.7 ～0.8mm 付近において粒子数に大きな差が見られる。さらに風下となる長谷浜（NTT）の粒径分布はハルタ山と類似しており、粒子数のみに大きな違いが見られる。さらに、遠方となる火山活動研究センター（SV0）では 1.3mm よりも大きい粒子は検知されておらず、0.5mm 程度に粒径にピークが見られる。

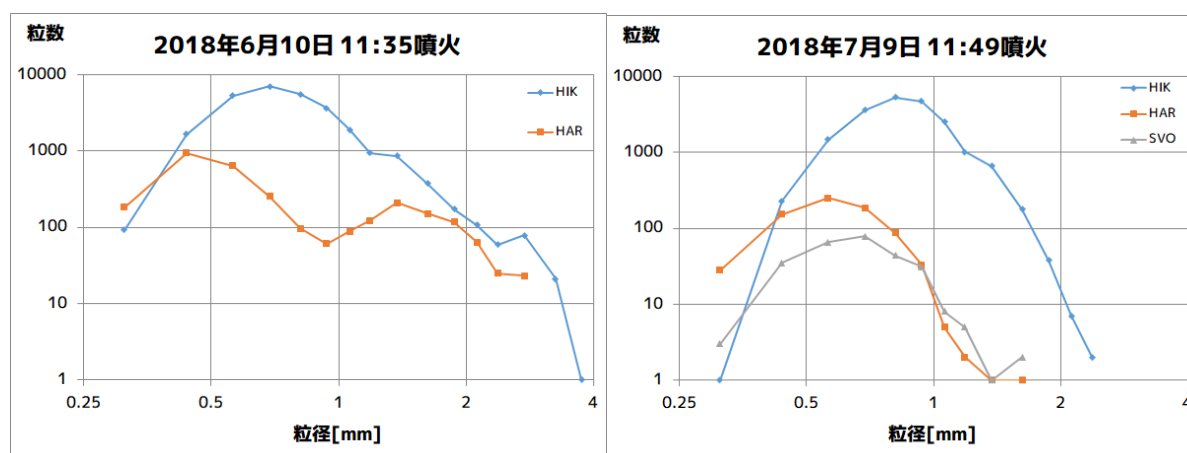


図 26 引之平とハルタ山におけるディストロメータにより観測された火山灰粒子の粒径分布の比較。降灰開始から 10 分間の統計解析。

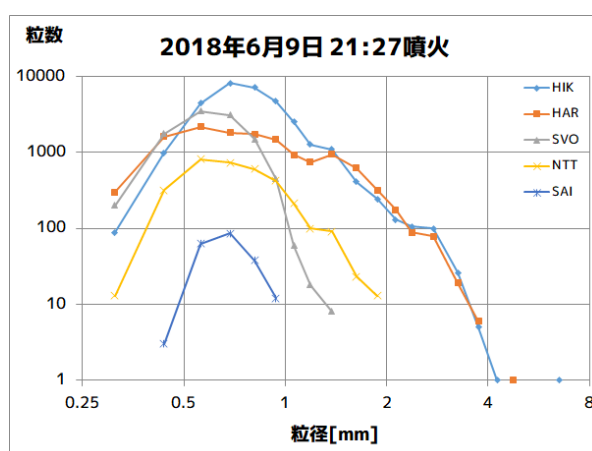


図 27 引之平、ハルタ山、西道、長谷浜（NTT）、火山活動研究センター（SV0）におけるディストロメータにより観測された火山灰粒子の粒径分布の比較

次に落下速度について比較する。引之平とハルタ山を比較して図 28 に示す。2018 年 6 月 10 日の噴火ではハルタ山において落下速度の大きいものが多いが、この 2 つの例では頻度分布のパターンは類似している。5 観測点において火山灰粒子が検知された 2018 年 6 月 9 日 21:27 のブルカノ式噴火でも、落下速度 1m/s 以下の微小粒子については頻度分布のパターンはよく類似している。落下速度 1m/s 以上の粒子については違いが見られる。南岳火口から見ると引之平－火山活動研究センター (SV0) が直線状に並び、ハルタ山－長谷浜 (NTT) が方位角は近いが異なる直線状に並ぶ。引之平に比べ SV0 では、落下速度 1m/s 以上の粒子数が急激に低下し、落下速度 3m/s を超える粒子は検知されていない。この落下速度の粒子は引之平を超えて SV0 に至るまでにすべて落下したものと考えられる。ハルタ山と長谷浜を比較すると落下速度 4m/s 以下では、落下速度の頻度分布のパターンはよく似ている。落下速度 4m/s 以上の粒子は長谷浜ではほとんど観測できておらず、ハルタ山と長谷浜の間においてほぼ落下したと考えられる。

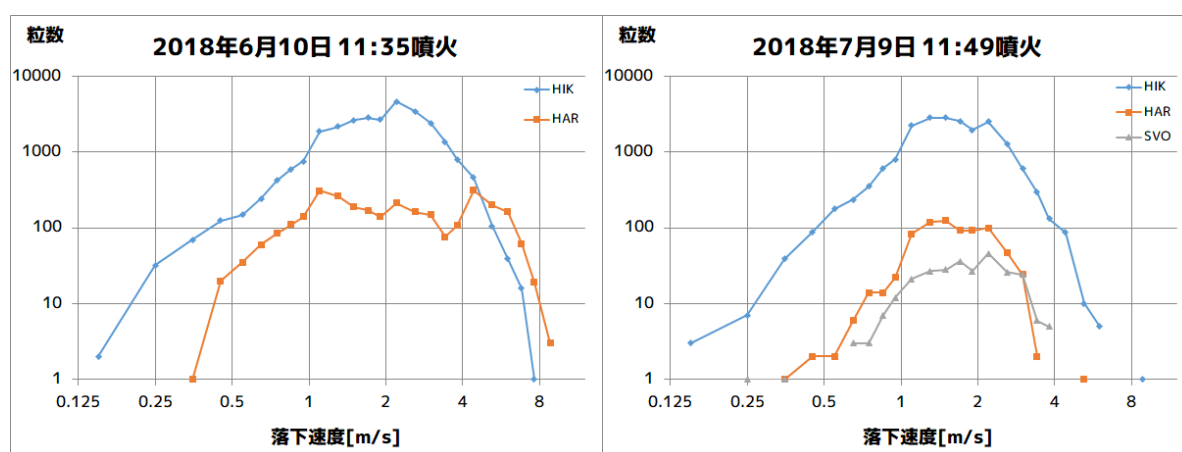


図 28 引之平とハルタ山におけるディストロメータにより観測された火山灰粒子の落下速度の頻度分布の比較。降灰開始から 10 分間の統計解析。

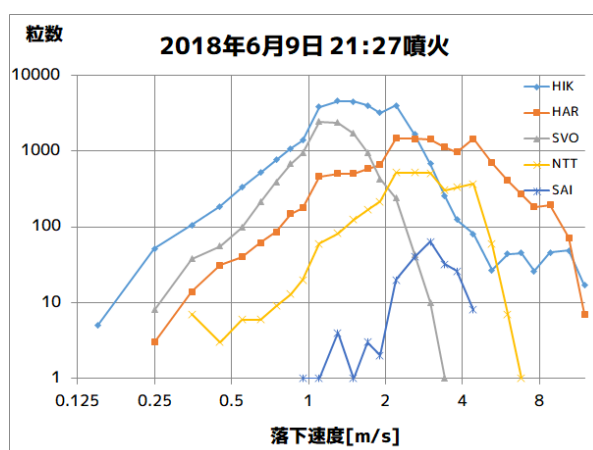


図 29 引之平、ハルタ山、西道、長谷浜 (NTT)、火山活動研究センター (SV0) におけるディストロメータにより観測された火山灰粒子の落下速度の頻度分布の比較



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との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と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との関係を多くの噴火事例について調べ、その経験的な関係式の精度を上げることを試みた。

XバンドMPレーダーにより観測される噴煙の反射強度と地上降灰量との関係式を2013年8月18日の桜島噴火事例と2016年10月8日の阿蘇噴火事例について調べ、下記の関係式を得た。

$$\begin{aligned} S_A &= 0.307 \times S_Z^{0.504} & ; S_A < 2.0 \text{ kg m}^{-2} \text{ (桜島2013.8.18噴火)} \\ S_A &= 9.23 \times 10^{-5} \times S_Z^{1.42} & ; S_A < 4.0 \text{ kg m}^{-2} \text{ (阿蘇2016.10.8噴火, 暫定式)} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $S_A$  [ $\text{kg m}^{-2}$ ] は単位面積当たりの時間積算降灰量、 $S_Z$  [ $\text{mm}^6 \text{m}^{-3} \text{h}$ ] は単位面積当たりの時間積算レーダー反射因子である。これらの式を用いて各噴火事例の総降灰量を推定した。その結果は、桜島2013.8.18噴火では総降灰量約6.7万トン（降灰面積100  $\text{km}^2$ ）であった（真木・他、2019）<sup>3)</sup>。一方、阿蘇2016.10.8噴火事例では総降灰量は約13万トン（降灰面積310  $\text{km}^2$ ）であった（図30参照）。また、宇城レーダーデータの三次元解析から噴煙の高度は海拔高度14,500mと推定された。

上述した関係式は、レーダーで観測されたレーダー反射因子と地上で観測された降灰量から求められる関係式で工学的な手法に基づくものである。これに対して、降灰粒子の粒径分布から計算される降灰強度とレーダー反射因子の理論的な関係を求める方法（理学的な方法）がある。理論的な関係式を導出するに当たって、桜島に設置された光学式ディストロメータ（パーシベル）により観測された降灰粒子の粒径分布の特徴を調べた。計6例の噴火事例のデータの調査から、平均的な降灰粒子の粒径分布 $N(D)$ は次式で表されることがわかった。

$$\begin{aligned} N(D) &= 1.55 \times 10^4 \exp(-\Lambda D) \\ \Lambda &= 5.11 R_A^{-0.16} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $D$  [ $\text{mm}$ ] は降灰粒子の粒径、 $N(D)$  は粒径分布、 $\Lambda$  [ $\text{mm}^{-1}$ ] は粒径分布の傾きパラメータ、 $R_A$  [ $\text{mm h}^{-1}$ ] は降灰強度である。上式の関係式は、平均的な粒径分布は指数分布で表され、その切片は一定（ $1.55 \times 10^4$ ）で、傾きは降灰強度が強くなるほど緩やかであることを表している（図31参照）。この関係式から次式の降灰強度とレーダー反射因子の理論的な式を導出した。

$$R_A[\text{mm h}^{-1}] = 0.940 Z^{0.350}, \quad Z[\text{mm}^6 \text{m}^{-1}]$$

上式は平均的な降灰粒子の粒径分布から導出された式であり、平均的な降灰強度を議論する場合や積算降灰量を推定する場合に利用できる。しかしながら、特定の地点のある時刻の降灰強度の推定に利用する場合には大きな誤差を伴うことに注意が必要である。Z-RA関係式は降灰粒子の変動に敏感であるために、今後、降灰粒子の時空間変動についての調査が必要である。

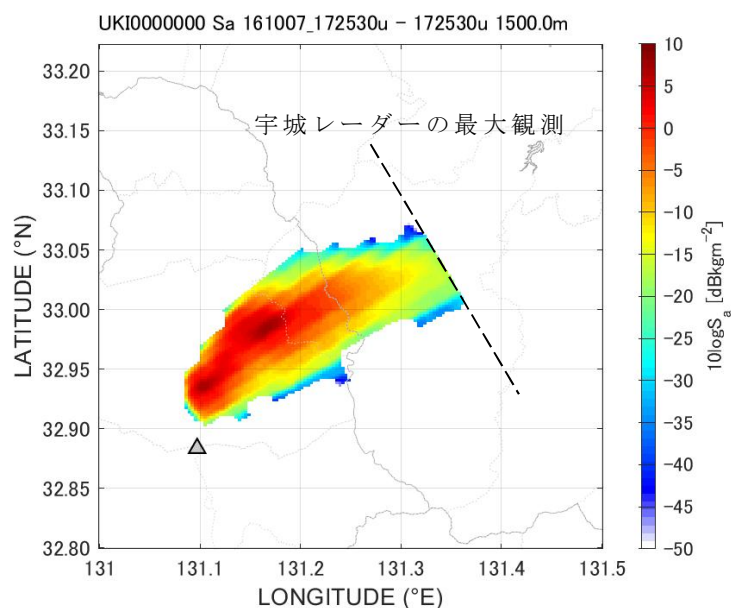


図30 国土交通省の宇城XMPレーダーの観測から求めた10月8日1時54分から2時25分（日本時間）の高度1500mにおける積算降灰量の分布。噴火時刻1時46分から8分間の降灰量分布は含まれていないことに注意。

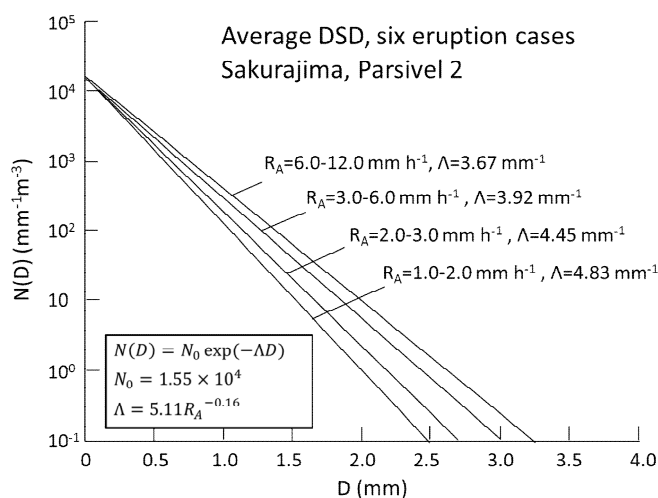


図31 6つの噴火事例のディストロメータ観測データから求められた降灰粒子の特徴



一方、地震動の解析プロセス (EQA) は地震動のスペクトル解析を行う。また、図 33 に示すように、地盤の収縮をしめすひずみ変化も同時に観測され、地盤変動の解析プロセス (FFP) は、地盤変動量から圧力源の体積変化を自動的に算出する。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 ( $\Delta V$ ) に対して以下の関係がある。

$$W_e = \alpha A + \beta \Delta V + \gamma \quad (4)$$

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) <sup>6)</sup>。EQA は式 (1) に基づいて 1 分毎の火山灰放出量を算出し、WEB 上に掲載する。

筑波大学にあるサーバーは 1 分毎に DEQ が掲載する噴火ステータスを閲覧し、噴火を検知した場合は PUFF モデルを自動起動させる。このとき、EQA が WEB 上に掲載した火山灰重量を参照し、さらに、火山灰重量から噴煙高度を導く下記の経験式を用いて噴煙高度 ( $z_2$ ) を推定する (Tanaka and Iguchi, 2019) <sup>7)</sup>。

$$z_2 = z_1 + bW_e^{1/4} \quad (5)$$

ここで  $z_1$  は火口の標高である。 $b$  は経験的に 400 が与えられている。

#### b) 圧力源の体積変化と噴煙高度との関係の検討

(1) 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、(4) 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) <sup>6)</sup>。

$$W_e = \beta \Delta V \quad (4)'$$

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 34 に示す。

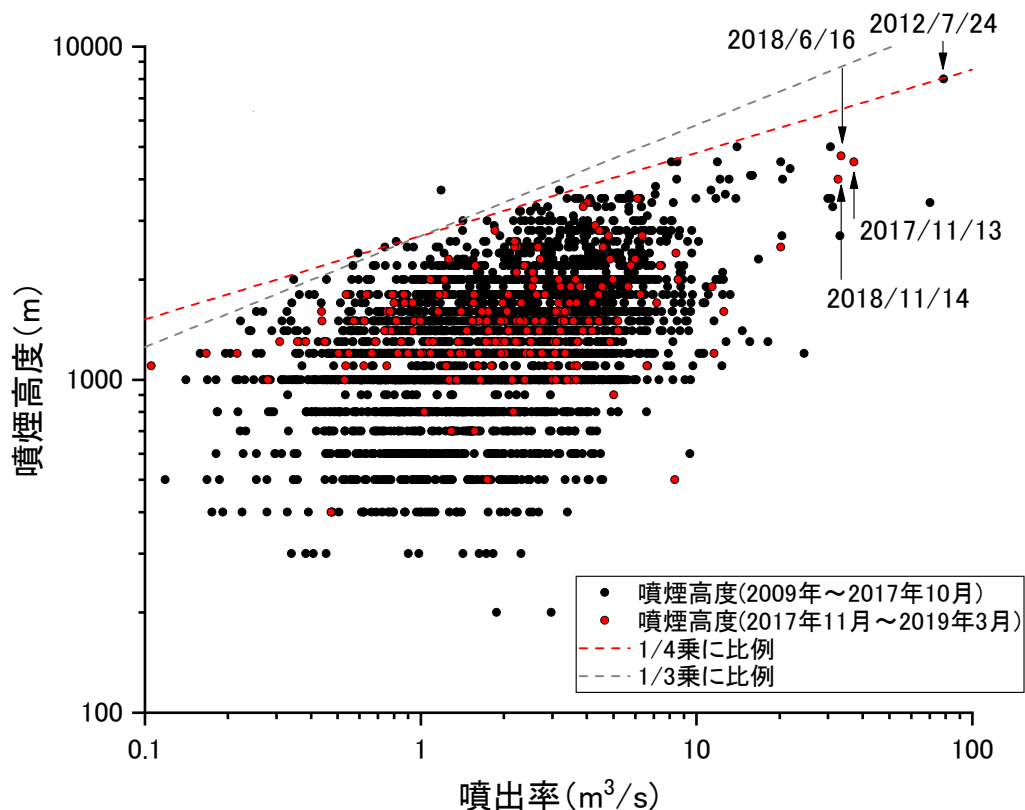


図 34 噴煙高度と噴出率の関係。2009 年 2 月～2017 年 10 月までの噴火を黒丸、2017 年 11 月から 2018 年 3 月までの噴火を赤丸で示した。概ね黒丸が昭和火口における噴火、赤丸が南岳の噴火を表す。

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、 $78\text{m}^3/\text{s}$  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  $8000\text{m}$  と決定できる。噴煙高度が  $5000\text{m}$  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い。噴出率は  $10\text{m}^3/\text{s}$  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されている。

$$H = 2700\dot{V}^{1/4} \quad (6)$$

噴煙高度は(6)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。なお、(6)式は(5)式と同じものであるが、係数の違いは、体積換算と重量換算の違いによるものである。

Morton et al. (1956)<sup>8)</sup>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。(6)式は上限において Morton et al. (1956)<sup>8)</sup>の式が成り立つことを示した。

2018 年 4 月以降の噴火についてしてみると、2018 年 6 月 16 日と 2018 年 11 月 14 日の噴火の噴出率及び噴煙高度が大きい、それ以前の噴火により求められた(6)式を超えるものではなく、(6)式が妥当であることが確認された。また、2018 年 6 月 16 日と 2018 年 11 月

14 日の噴火は、2017 年 11 月に噴火活動が南岳に回帰してから最も噴出率が大きかった 2017 年 11 月 13 日の噴火の噴出率に近い。

#### c) 地震及び地盤変動観測の高精度化

(4) 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、それ以外の観測点の地震及び地盤変動データを用いて、火山灰放出重量の見積もりを高精度化させるための検討を行う必要がある。平成 29 年度は有村観測坑道に近い古里観測井の埋設型地震計・傾斜計を改修したが、平成 30 年度は桜島東部の黒神観測井（図 16 参照）に設置されていた埋設型地震計・傾斜計を改修した。

改修作業は 2019 年 2 月から 3 月にかけて実施したが、深度 310m に設置されていた機器を引き上げることができなかった。そこで、深度 310m から深度 86.1m までを砂で埋め、その上に埋設型地震計・傾斜計を再設置することとした。再設置後の傾斜計の記録を図 32 に示す。埋設機器の下部を砂で埋めているので、依然として不安定でステップ上の動きが多い。安定するのを待って再調整を行う必要がある。なお、傾斜計の機器としての性能は正常であることが確認されている。

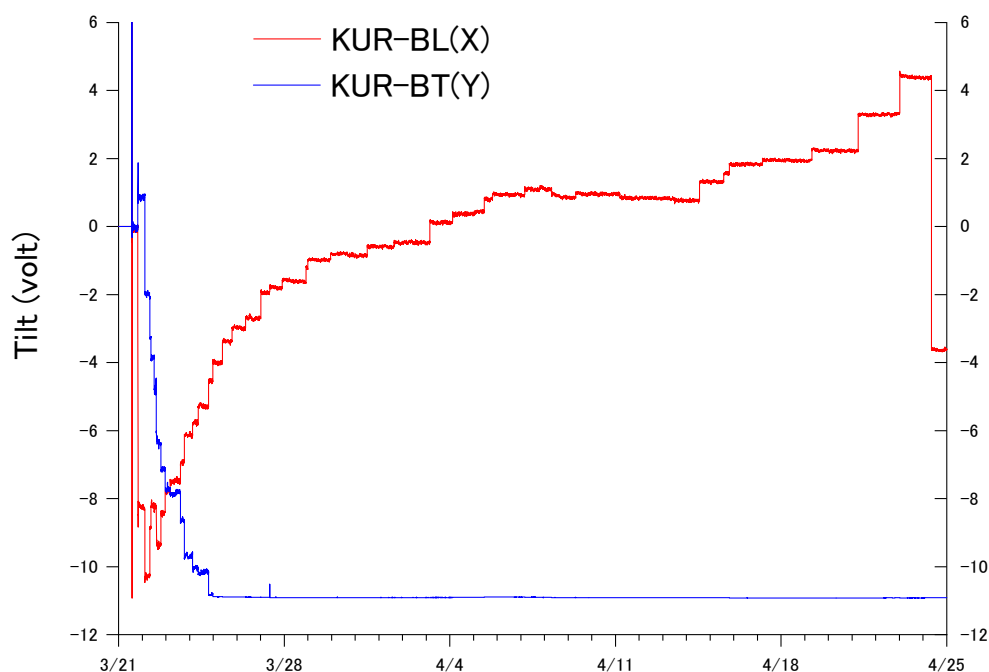


図 35 黒神観測井における傾斜計の記録の比較。赤線：火口方向、青線：直交方向。

次に、地震計によって観測される震動について検討する。有村観測坑道と黒神観測井における 1 分毎の地震動の最大振幅を比較して図 36 に示す。2019 年 3 月 28 日～29 日の地震動の例を示す。この期間には 3 月 28 日の 22:58、23:25、3 月 29 日の 0:52、15:50 に噴火が発生した。噴火活動に伴い火山性微動が発生した。特に、3 月 28 日の 22:58、23:25、3 月 29 日の 0:52 に噴火が発生したときは、28 日の 22:43 から 29 日の 0:42 にかけて連続的に火山性微動が発生した。これにともなって有村および黒神とも地震動の振幅が増加していることがわかる。なお、黒神においては、パルス状の振幅増加が多いが、機器の下部を砂で埋めているために不安定であることによるものと思われる。

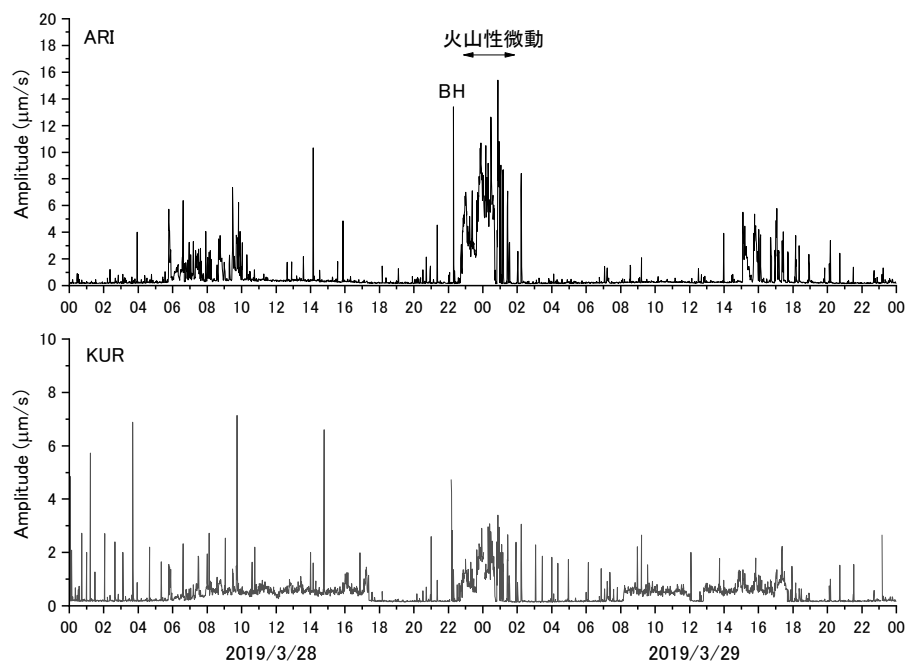


図 36 有村観測坑道と黒神における地震動振幅の比較。黒神におけるパルス状の振幅増加のうち、特に振幅の大きい 28 日の 22:07~0:09、29 日の 0:03~0:05、23:07~23:09 はプロットから削除した。

火山性微動の波形を比較して図 37 に示す。黒神における振幅の推移は有村とよく類似している。

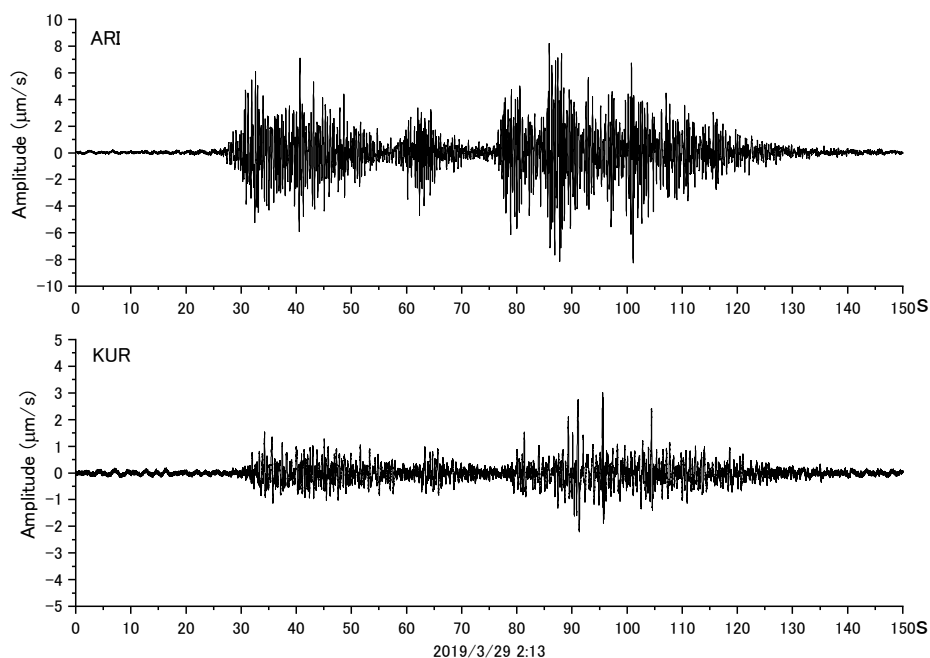


図 37 有村観測坑道と黒神観測井において観測された火山性微動の波形の例

式 (4) に示すように、火山灰放出重量を推定するのに用いるのは火山性震動のうち 2～3Hz の周波数帯域である。振幅の大きい 28 日 22:00 から 29 日 2:30 までの時間帯についてこの周波数帯域におけるスペクトルの時間変化、および有村と黒神のスペクトル比を図 38 に示す。スペクトルの時間変化はよく対応している。両者のスペクトルの比を見てみると、地震動の振幅が小さいときは両者の比は約 2 を示す。火山性微動が発生しているときは両者の比はおおよそ 6 となる。火山性微動の振幅が大きい 28 日 22:43～29 日 0:42 については平均値が 6.0、標準偏差が 0.66 であった。したがって、黒神で観測される火山性微動を使って火山灰放出率を見積もる場合は、(5) 式の係数  $\alpha$  を 6 倍すればよい。ただし、火山性のイベントが発生していない時の振動はおおむね脈動によるものであり、この時の比は約 2 である。常時微動の振幅は (5) 式においては係数  $\gamma$  に関連するので、 $\gamma$  を 2 倍にする必要がある。

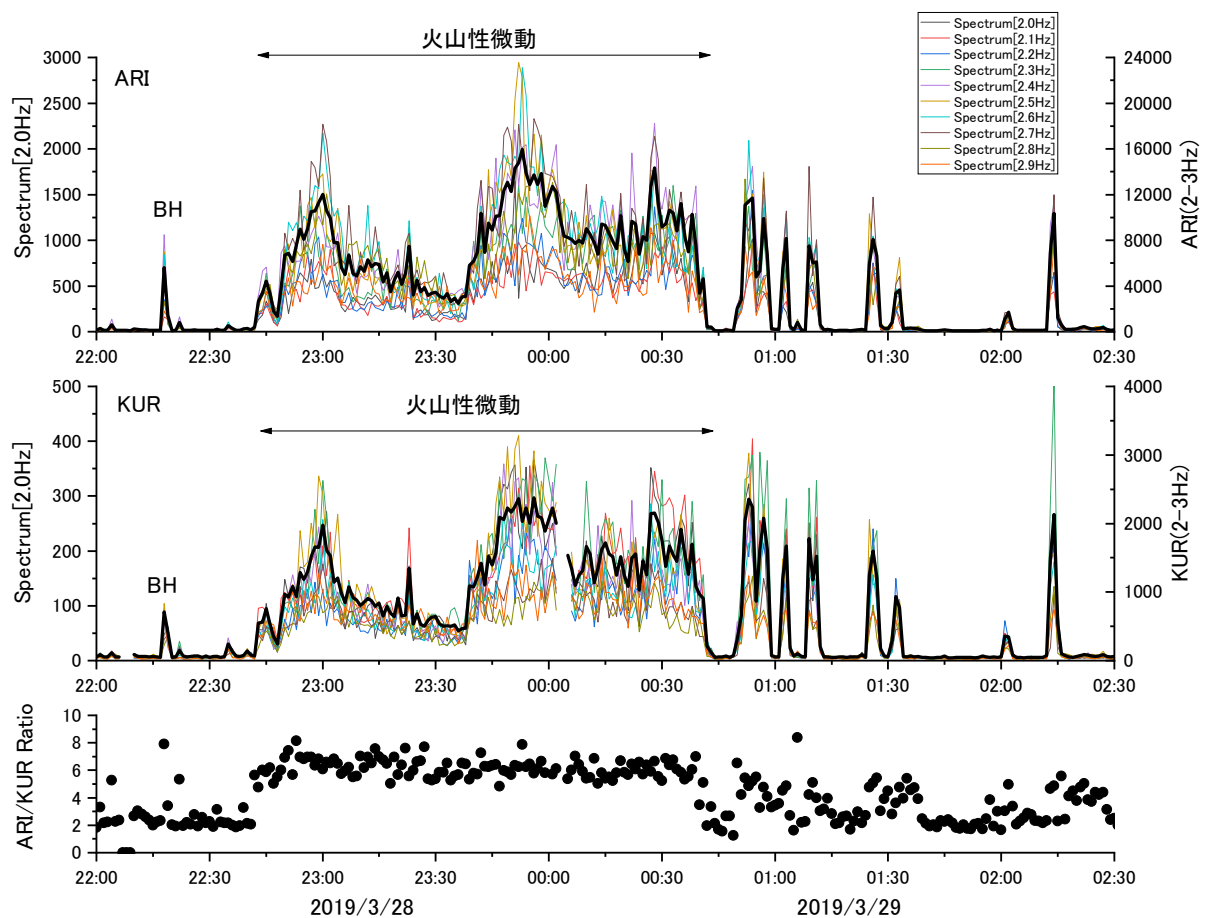


図 38 有村観測坑道と黒神観測井における地震動の 2～3Hz 周波数帯域スペクトルの比較。上段：有村観測坑道における 0.1Hz 毎のスペクトルの時間変化。黒線は 2～3Hz の和を示す。中段：黒神観測井における 0.1Hz 毎のスペクトルの時間変化。下段：有村を黒神のスペクトル比。2～3Hz の和の比の時間変化を示す。黒神観測井においてノイズとなる震動が特に大きかった 29 日 0:03～0:05 のデータは削除してある。

#### d) 噴煙シミュレーションによる噴煙高度の検討

噴煙ダイナミクスが火山灰拡散に与える影響を調べるため、グループ C3 と連携し、火口付近における噴煙ダイナミクスと火山灰輸送の 3 次元計算事例を蓄積した。特に、桜島



噴火規模のブルカノ式噴火を計算の対象とした。総噴出量を固定し、噴火継続時間や火口半径を変えたパラメータ・スタディをSK-3Dを用いて行った。3次元シミュレーションの結果、噴火継続時間または火口半径の違いによって噴煙高度、それに伴う火山灰放出高度が変化する様子を捉えた（図 39）。また、実際の火山灰粒子サイズに対応するトレーサー粒子を入れた火山灰輸送シミュレーションを行って、火山灰粒子輸送の再現を行った（図 40）。粒子サイズ毎に噴煙柱からの放出高度が異なり、堆積分布域が異なる様子を捉えた。

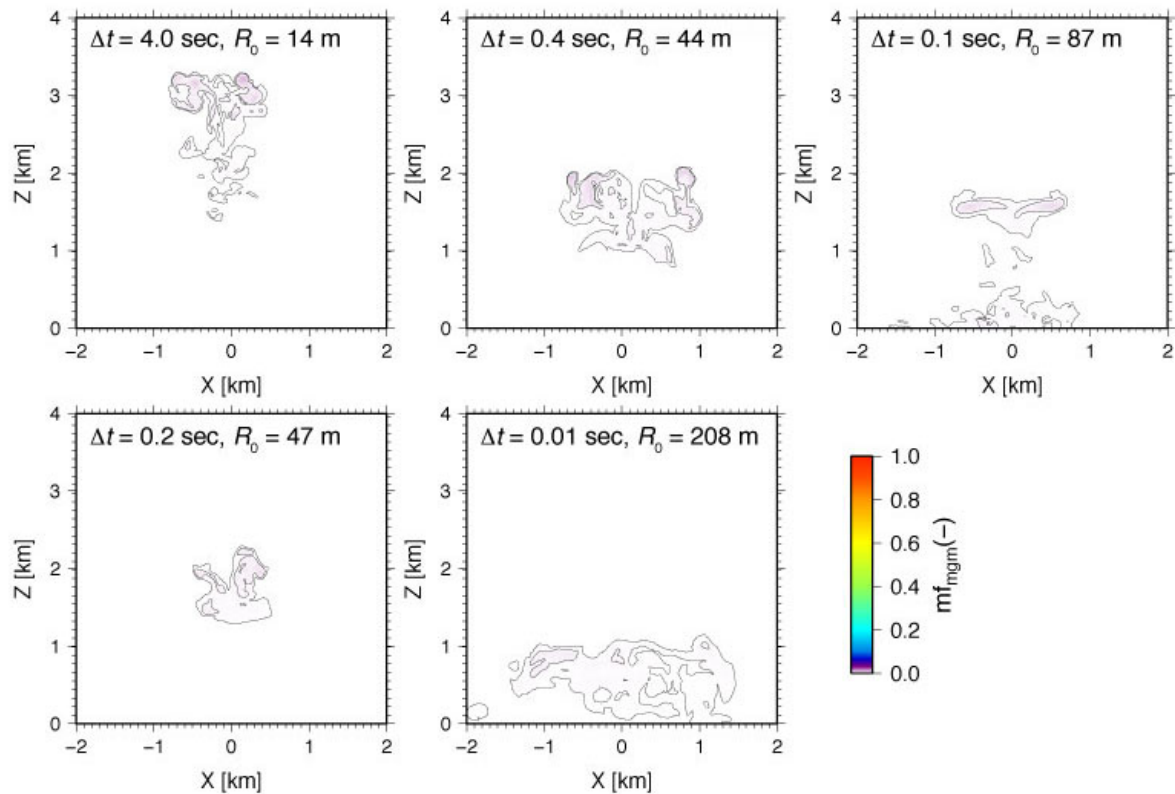


図 39 ブルカノ式噴火の3次元数値シミュレーション結果。噴火継続時間、火口半径を変化させた場合の、噴火開始から10分後の噴煙分布を示す。

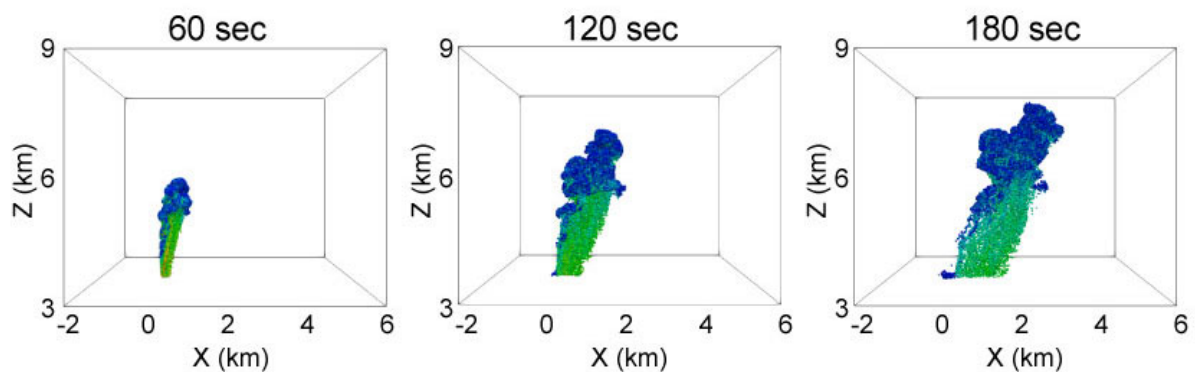


図 40 噴煙ダイナミクスとカップリングした火山灰粒子の輸送シミュレーション結果。色は火山灰粒子サイズを表す。火山灰粒子は噴煙とともに上昇し、噴煙から離脱して風で流される様子を再現した。

#### 4) 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、風の流れを再現する。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桜島上空のキャンペーン気象観測を実施した。

ここでは、2019 年 3 月に実施した観測について述べる。観測は 2019 年 3 月 25 日～27 日に実施した。桜島上空の気象要素（風向・風速、気温）に加え、火山灰や火山ガス濃度の鉛直プロファイルデータを取得することを目的とした。観測地点は、南岳火口の風下にあたる地点を選定した。観測点の位置を図 41 に示す。

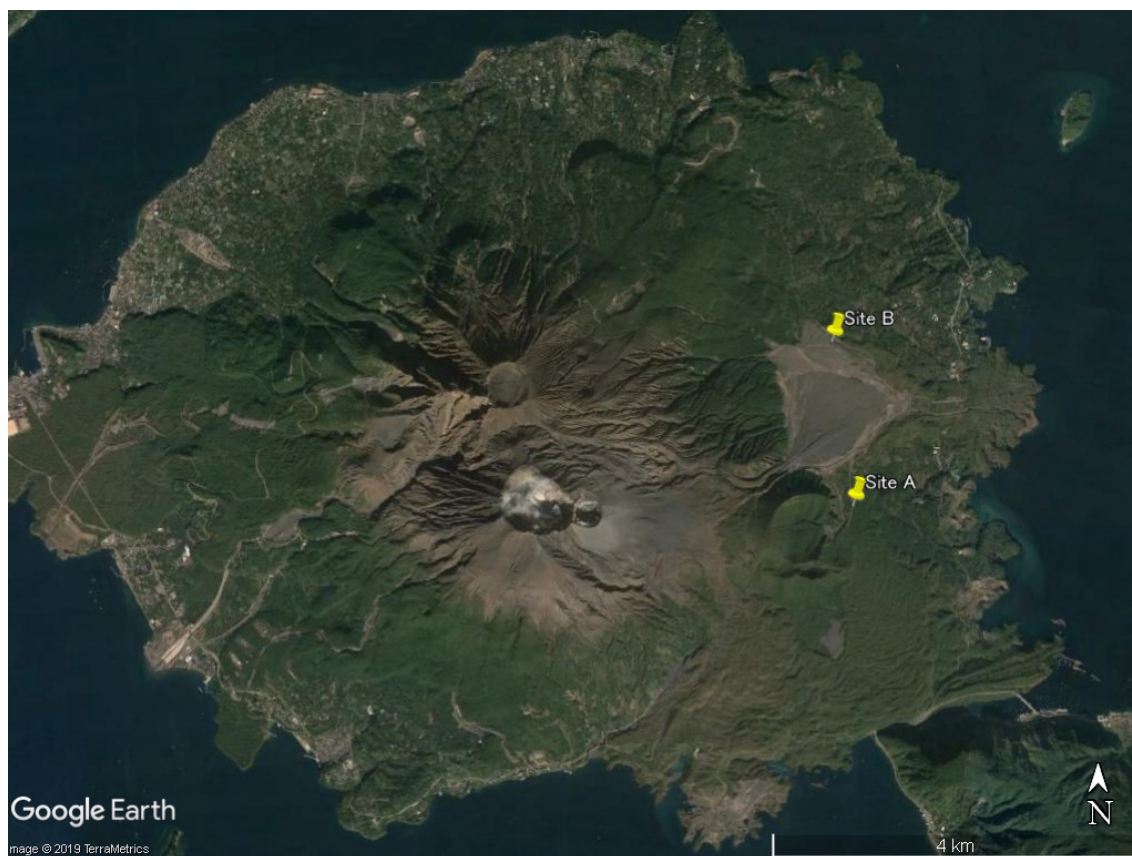


図 41 観測地点位置図

##### a1) 観測方法

ドローンは 6 枚のプロペラを有するマルチコプター（SPIDER CS-6; ルーチェサーチ株式会社）を使用した。機体に二次元超音波風速計 (FT702; FT Technologies) および温湿度センサー (SHT35; Sensirion) を取付け、気象データを取得した。さらに火山ガス ( $\text{SO}_2$  および  $\text{H}_2\text{S}$ )、火山灰 ( $\text{PM}_{10}$  および  $\text{PM}_{2.5}$ ) 濃度の計測のため火山ガスモニタ (QRAE3; RAE Systems) および PM モニタ (ヤグチ電子工業株式会社) を搭載した。これらの機器を搭載したドローンの外観を図 42 に示す。

鉛直プロファイルの計測においては、指定高度でドローンを 3 分間ホバリングさせ、データを取得した。



図 42 観測用ドローン外観

### a2) 観測実施状況

観測の実施概要を表 2 に示す。3 月 25 日には黒神鍋山 (Site A) で 4 回の、黒神地獄河原 (Site B) で 5 回の Run を、3 月 27 日にも黒神地獄河原で 5 回の Run を実施した。

表 2 観測実施状況一覧

Run	観測日時	ポート	離陸時刻	着陸時刻	指定高度	備考
1	2019/3/25	黒神鍋山 (Site A)	11:21:30	11:34:40	300m(11:22:50-11:25:50) 200m(11:26:30-11:29:30) 100m(11:30:15-11:33:15)	風速計欠測
2	2019/3/25	黒神鍋山 (Site A)	11:42:10	11:55:50	750m(11:45:20-11:48:20) 50m(11:52:20-11:55:20)	風速計欠測
3	2019/3/25	黒神鍋山 (Site A)	12:03:40	12:12:05	500m(12:05:50-12:08:50)	風速計欠測
4	2019/3/25	黒神鍋山 (Site A)	12:14:40	12:22:00	1000m(11:16:30-16:19:30)	バッテリー低下のため、730mで 観測中止
5	2019/3/25	黒神地獄河原 (Site B)	14:09:40	14:22:30	1000m(14:13:50-14:16:50)	火山ガスモニタ・スマホ欠測
6	2019/3/25	黒神地獄河原 (Site B)	14:26:40	14:39:40	1000m(14:30:50-14:33:50)	
7	2019/3/25	黒神地獄河原 (Site B)	14:44:20	14:55:10	750m(14:47:40-14:50:40)	
8	2019/3/25	黒神地獄河原 (Site B)	15:01:10	15:12:40	200m(15:02:10-15:05:10) 100m(15:05:50-15:08:50) 50m(15:09:10-15:12:10)	
9	2019/3/25	黒神地獄河原 (Site B)	15:16:40	15:28:23	500m(15:19:15-15:22:15) 300m(15:23:30-15:26:30)	
13	2019/3/27	黒神地獄河原 (Site B)	10:48:15	11:01:15	1000m(10:52:30-10:55:30)	
14	2019/3/27	黒神地獄河原 (Site B)	11:04:50	11:15:24	750m(11:08:00-11:11:00)	
15	2019/3/27	黒神地獄河原 (Site B)	11:17:35			バッテリー低下(No.3)のため観 測中止
16	2019/3/27	黒神地獄河原 (Site B)	11:20:58	11:29:00	500m(11:23:10-11:26:10)	
17	2019/3/27	黒神地獄河原 (Site B)	11:31:15	11:43:45	300m(11:32:35-11:35:35) 200m(11:36:15-11:39:15) 100m(11:40:00-11:43:00)	
※ Run 10～12は噴石模型投下実験を実施した。						
※ 指定高度は地表面からの高さ。						

### a3) 観測結果

各 Run の時系列に沿った風向、風速、気温、湿度、SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度を図 43～図 50 に示す。



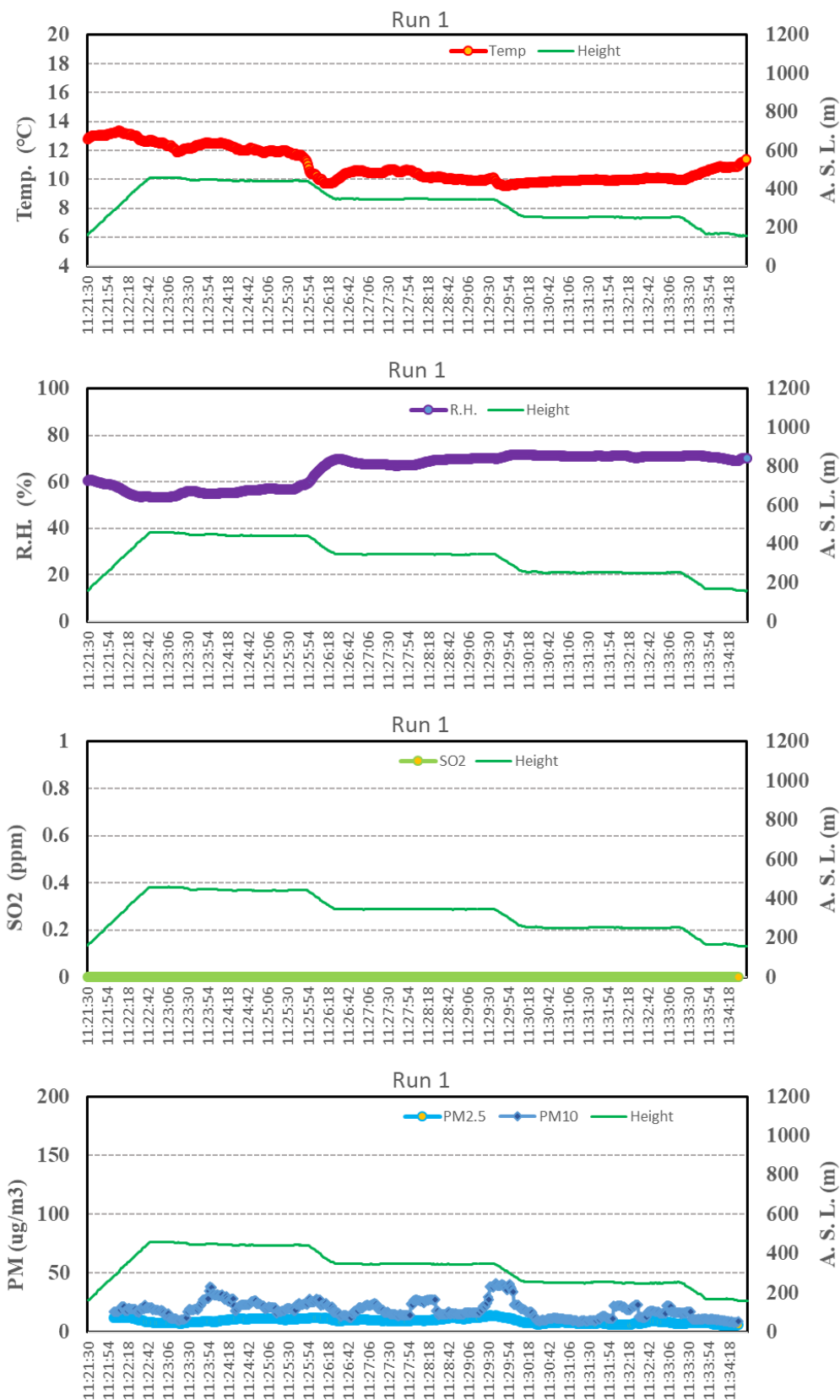


図 43 Run1 の気温、湿度、SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度

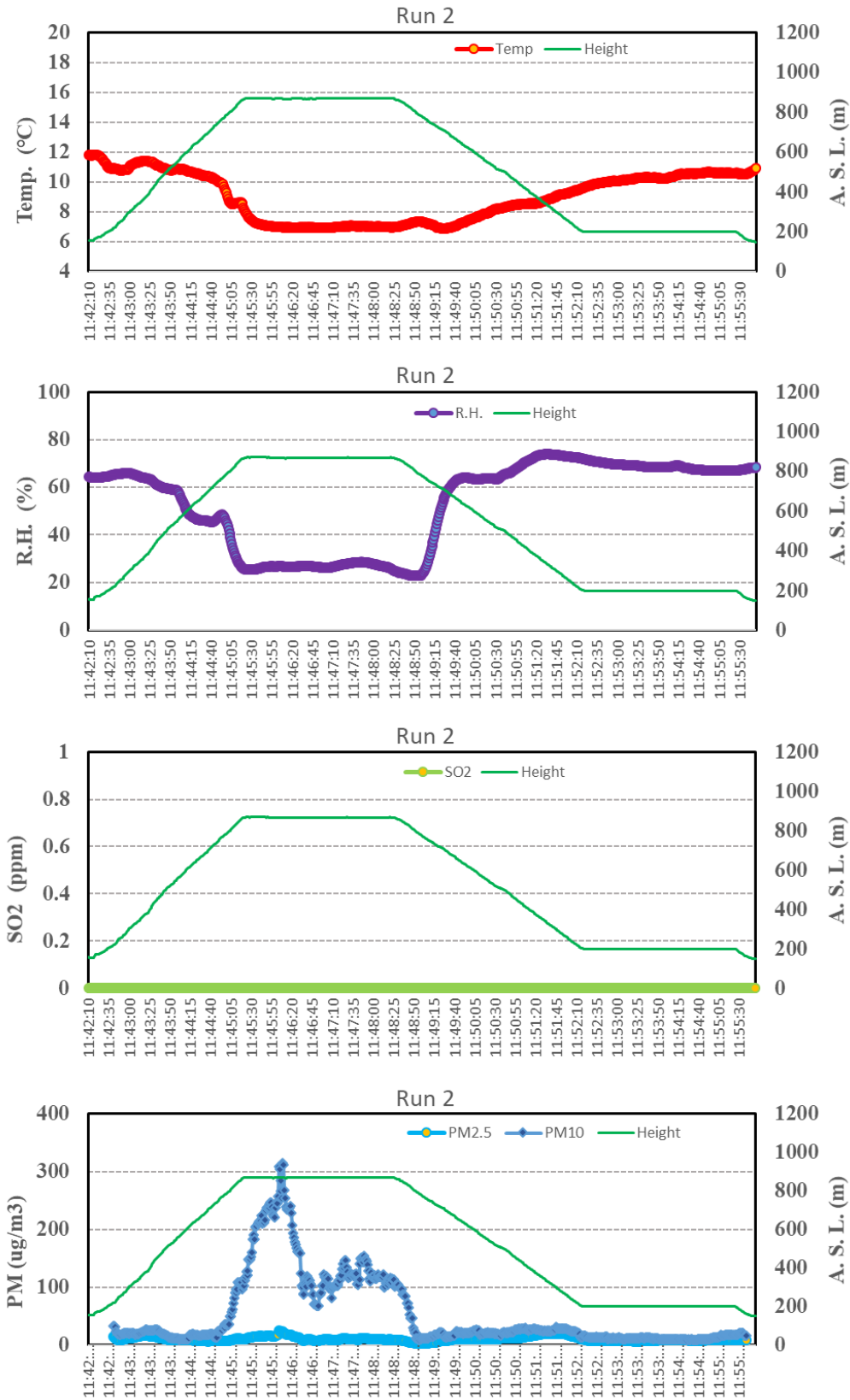


図 44 Run2 の気温、湿度、SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度

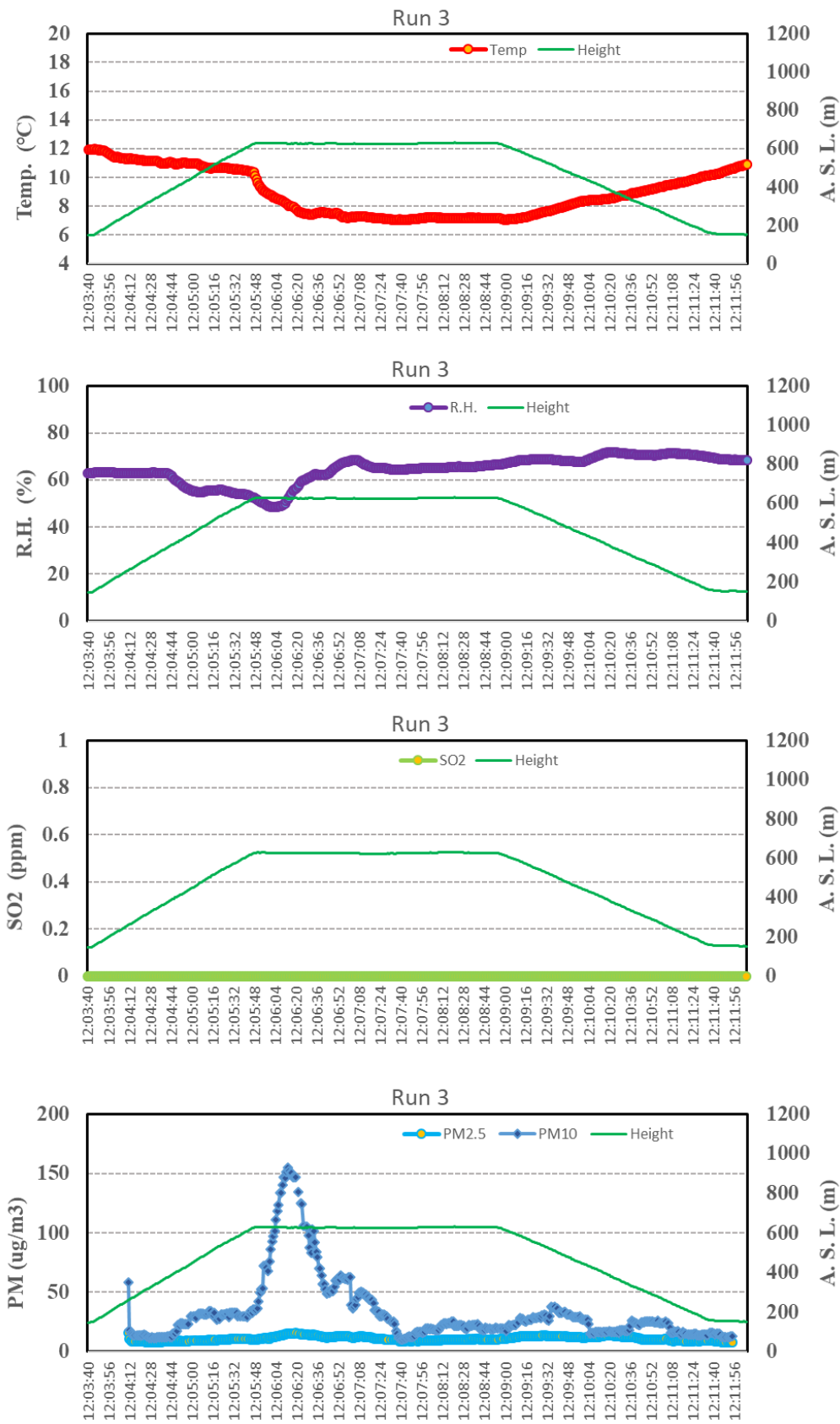


図 45 Run3 の気温、湿度、SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度



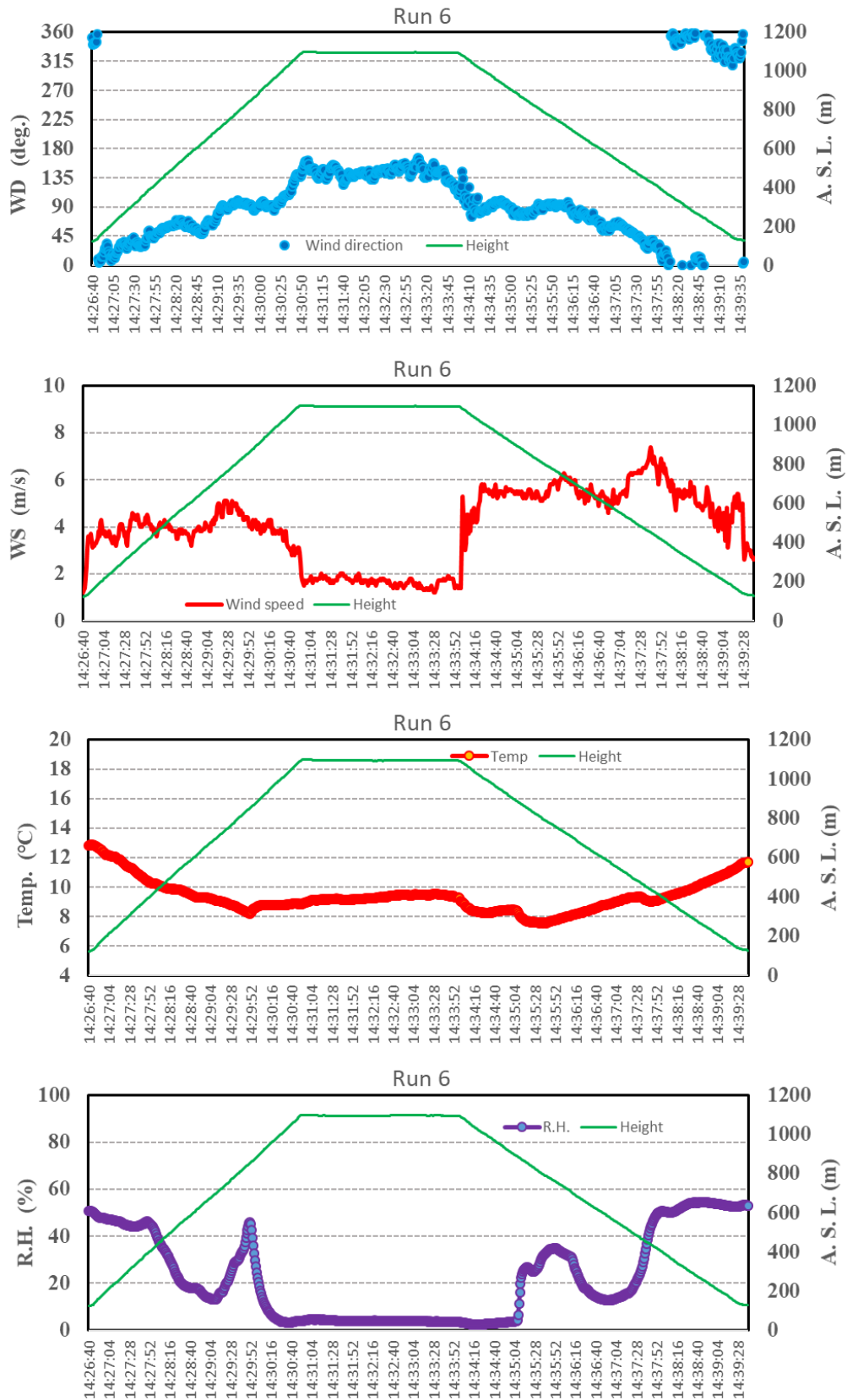


図 46-1 Run6 の風向、風速、気温、湿度

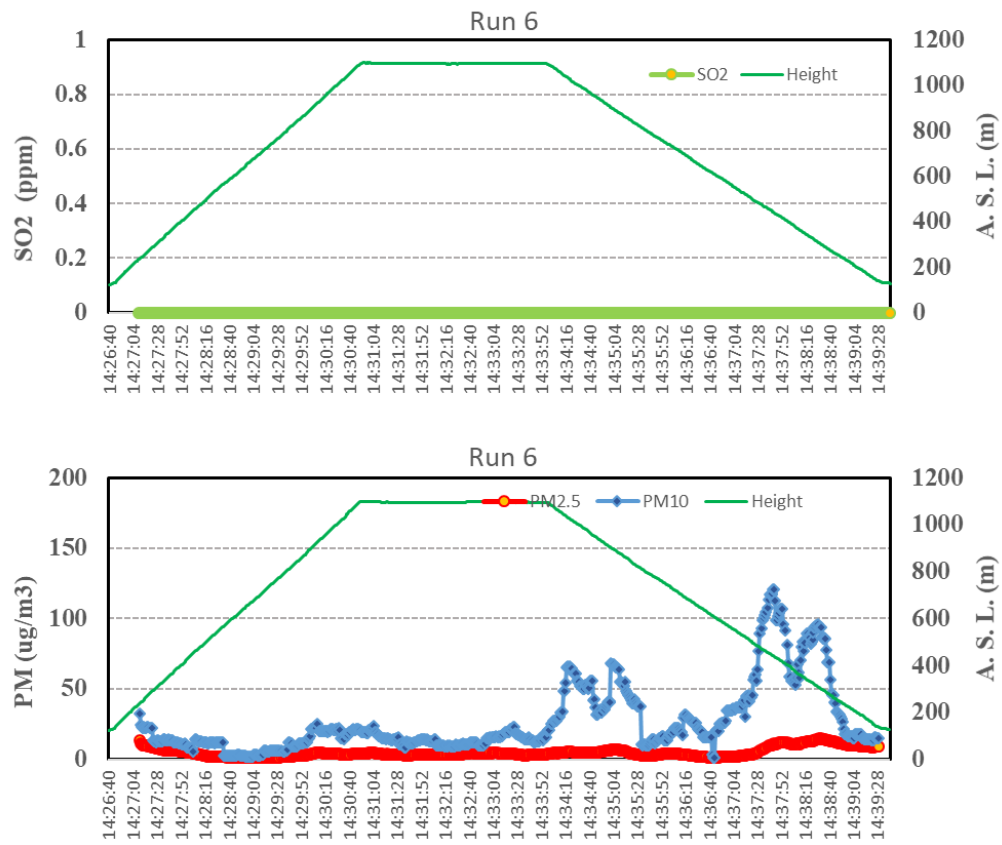


図 46-2 Run6 の  $\text{SO}_2$  および火山灰 ( $\text{PM}_{10}$ ) 濃度

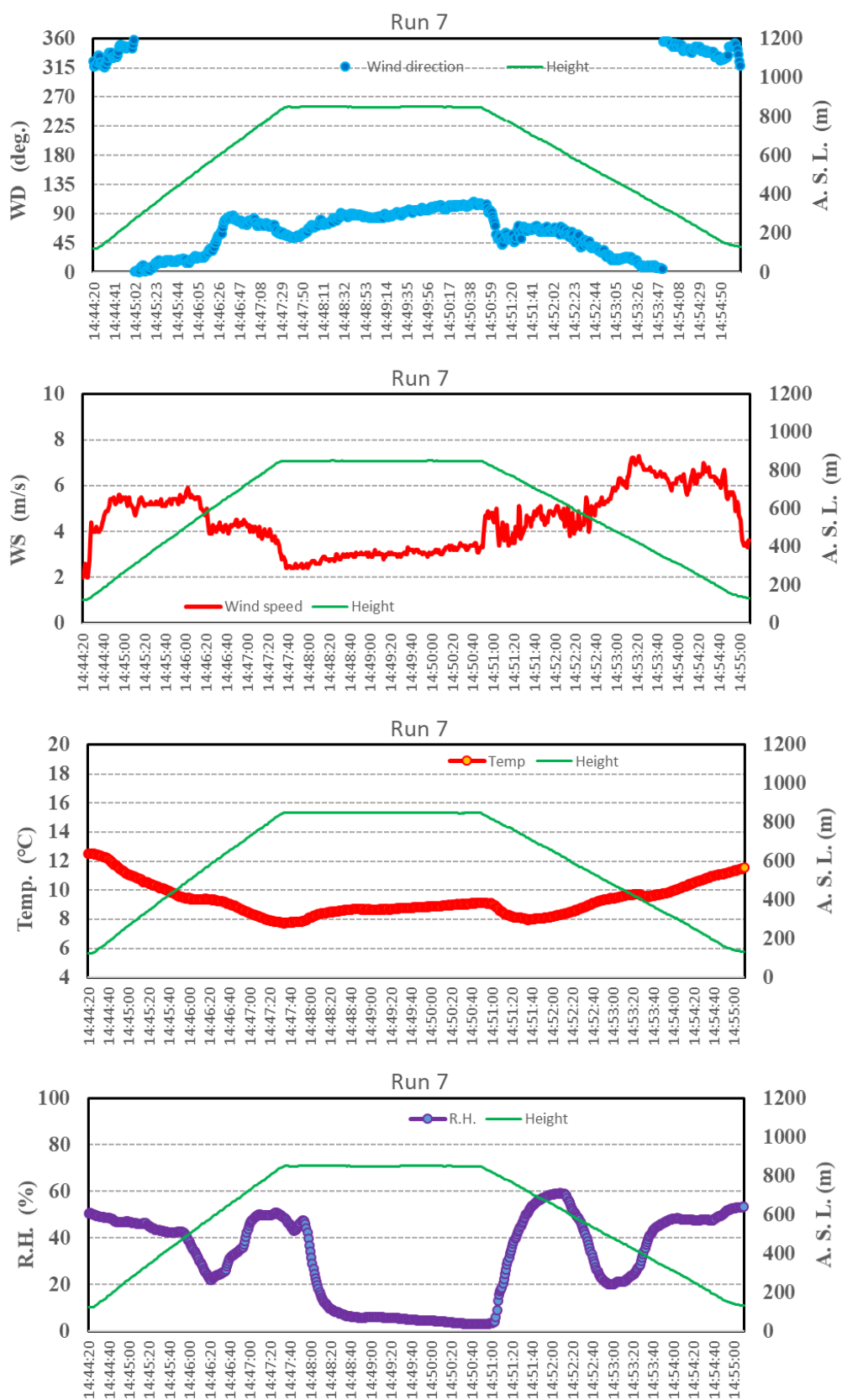


図 47-1 Run7 の風向、風速、気温、湿度

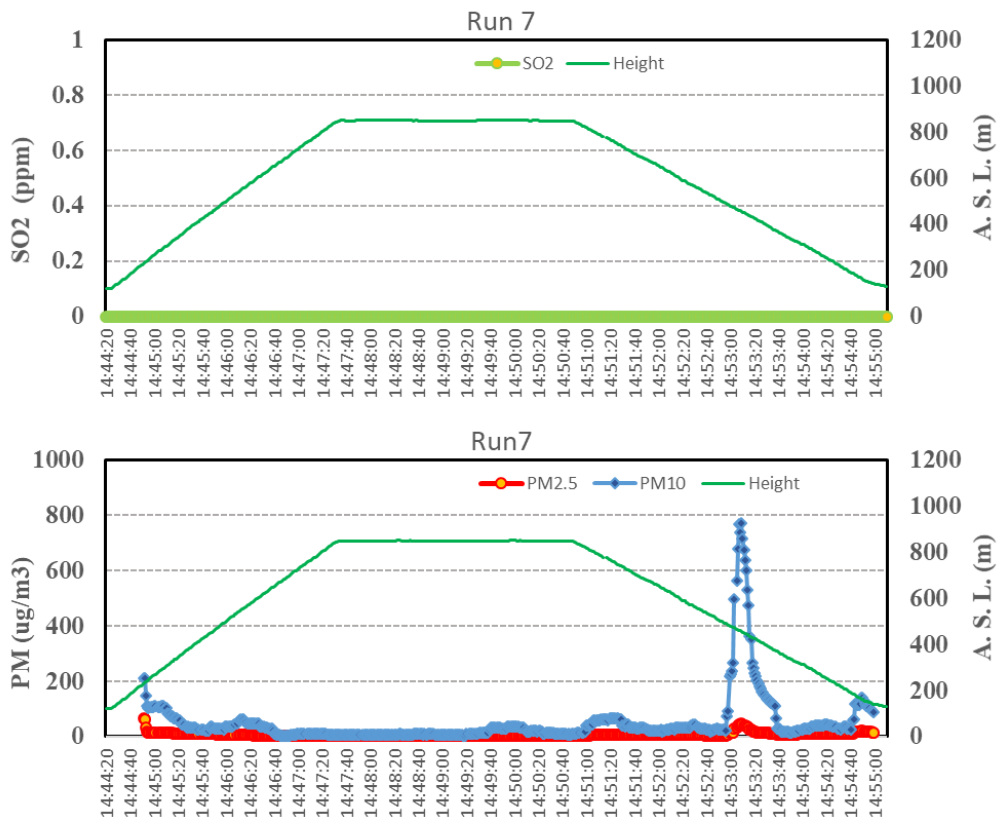


図 47-2 Run7 の SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度

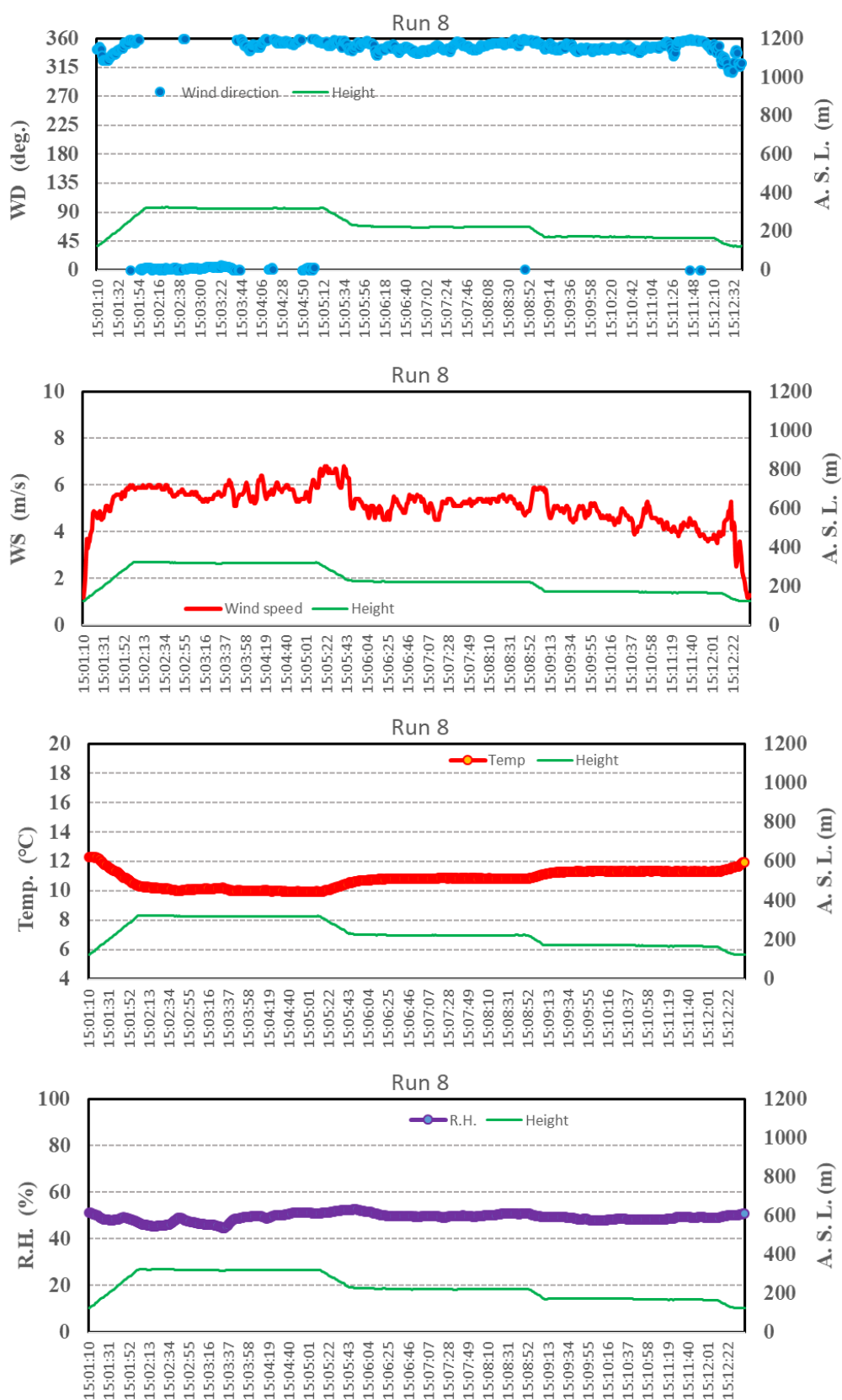


図 48-1 Run8 の風向、風速、気温、湿度

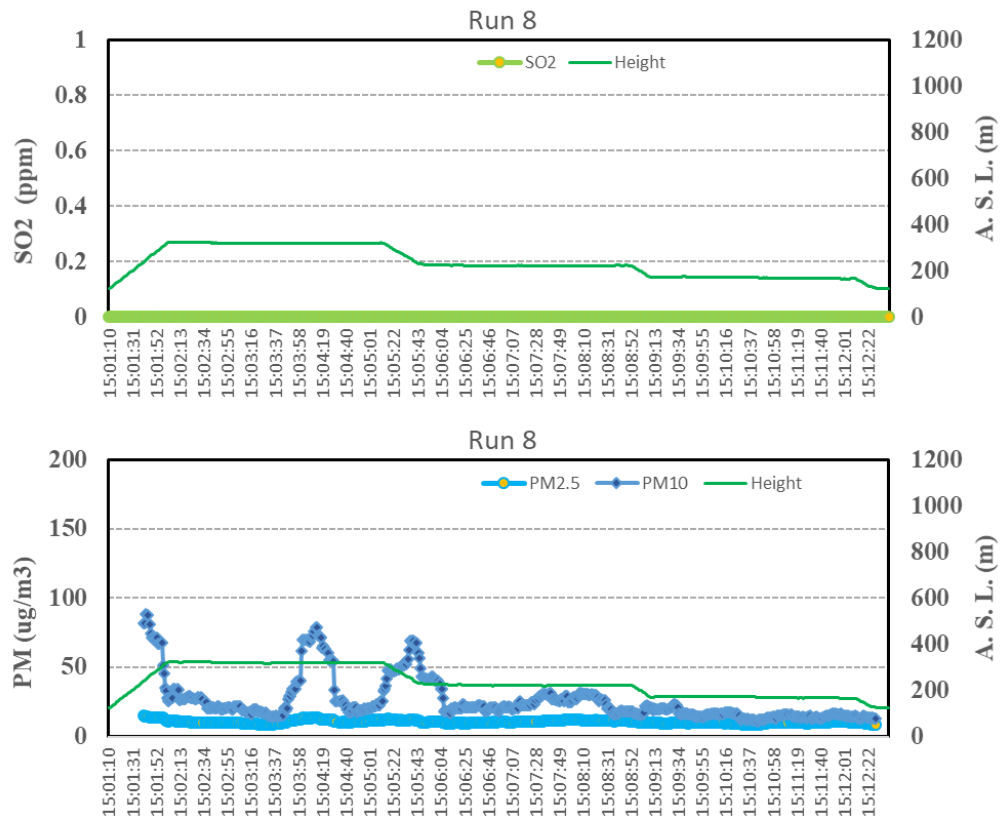


図 48-2 Run8 の  $\text{SO}_2$  および火山灰 ( $\text{PM}_{10}$ ) 濃度

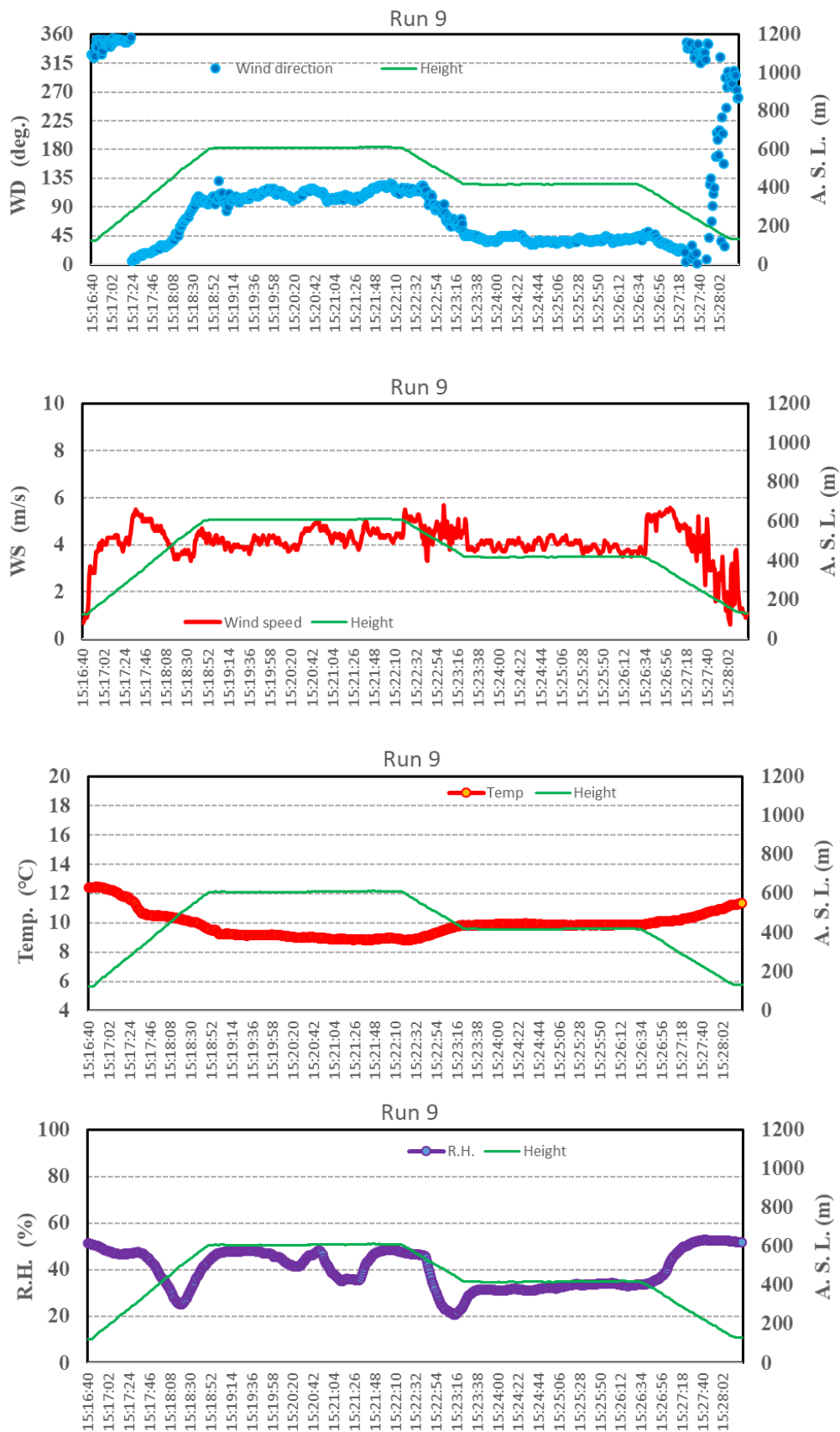


図 49-1 Run9 の風向、風速、気温、湿度



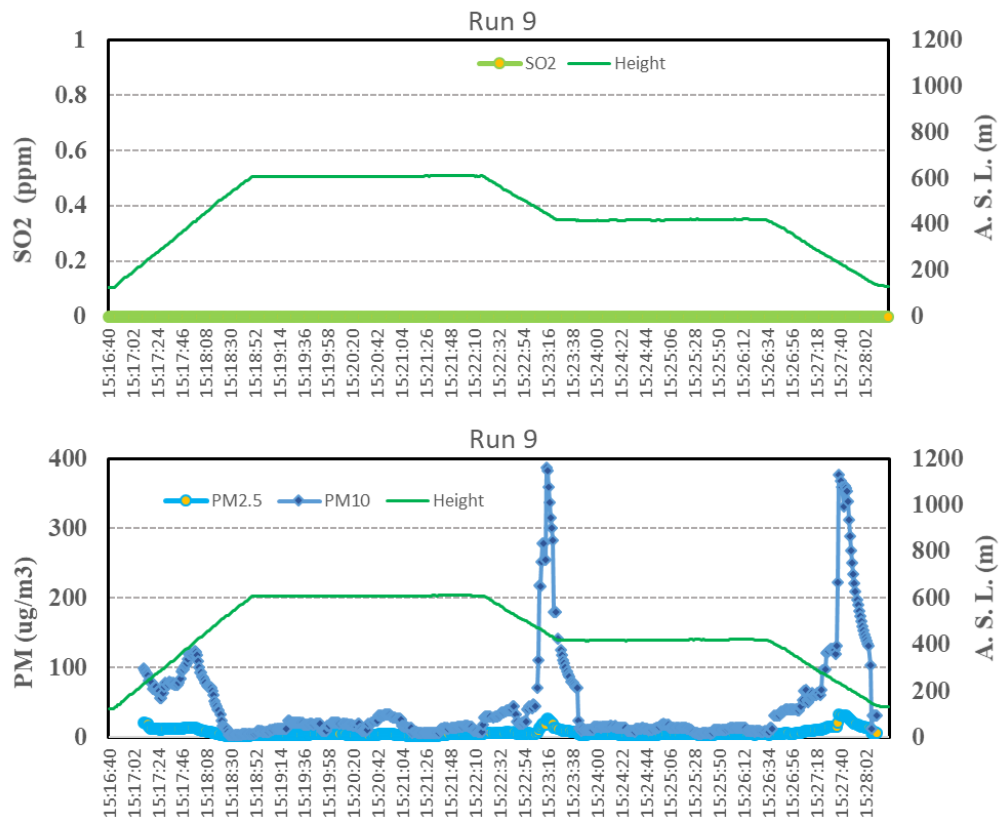


図 49-2 Run9 の SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度

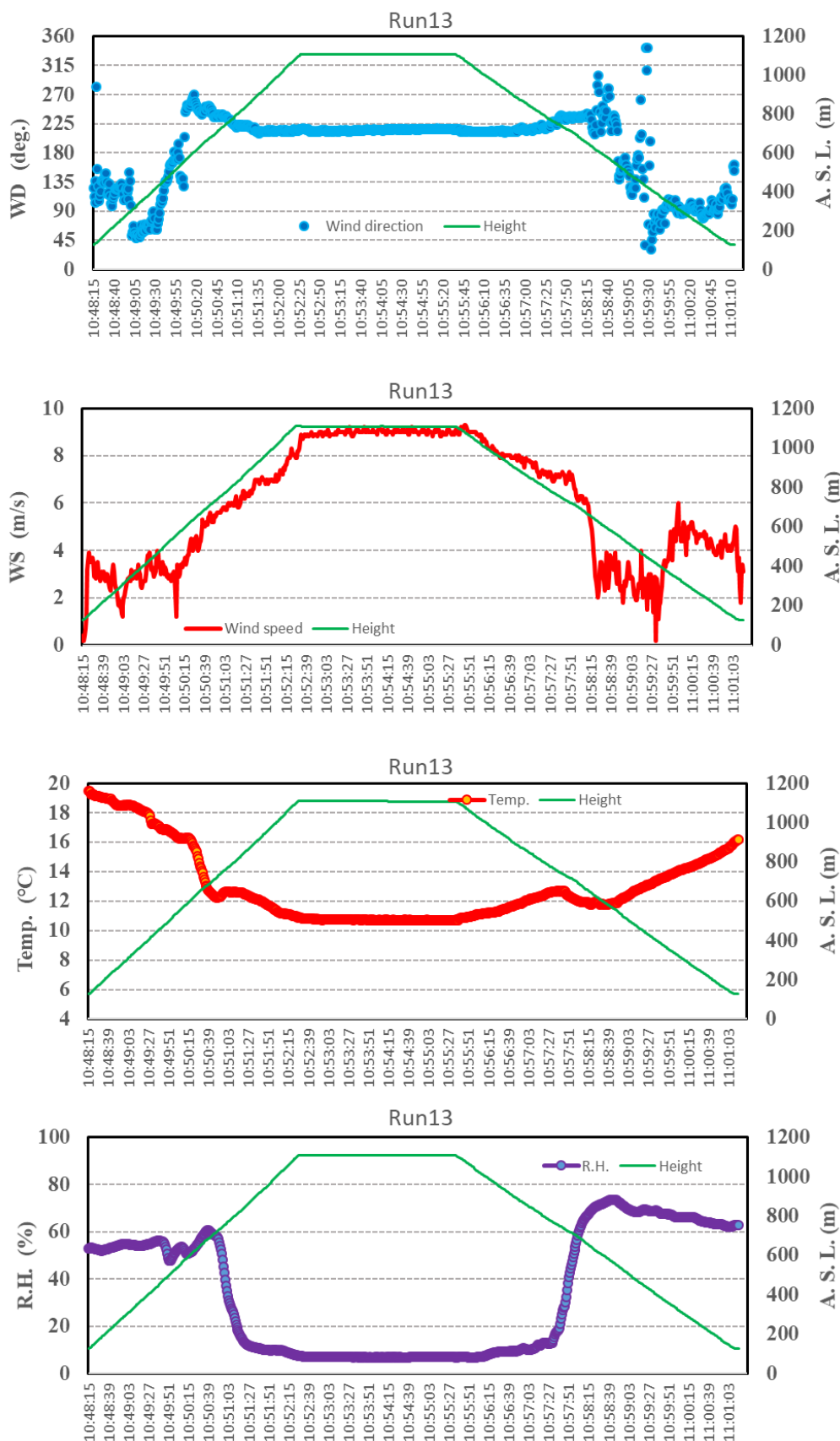


図 50-1 Run13 の風向、風速、気温、湿度

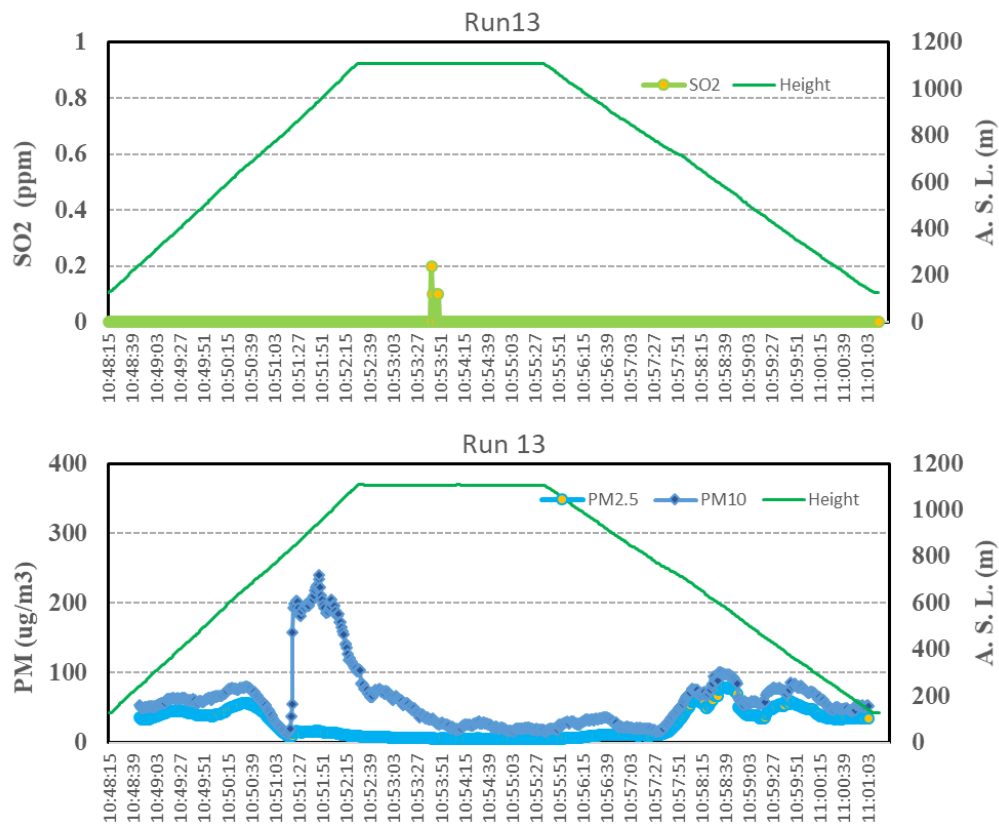


図 50-2 Run13 の SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度

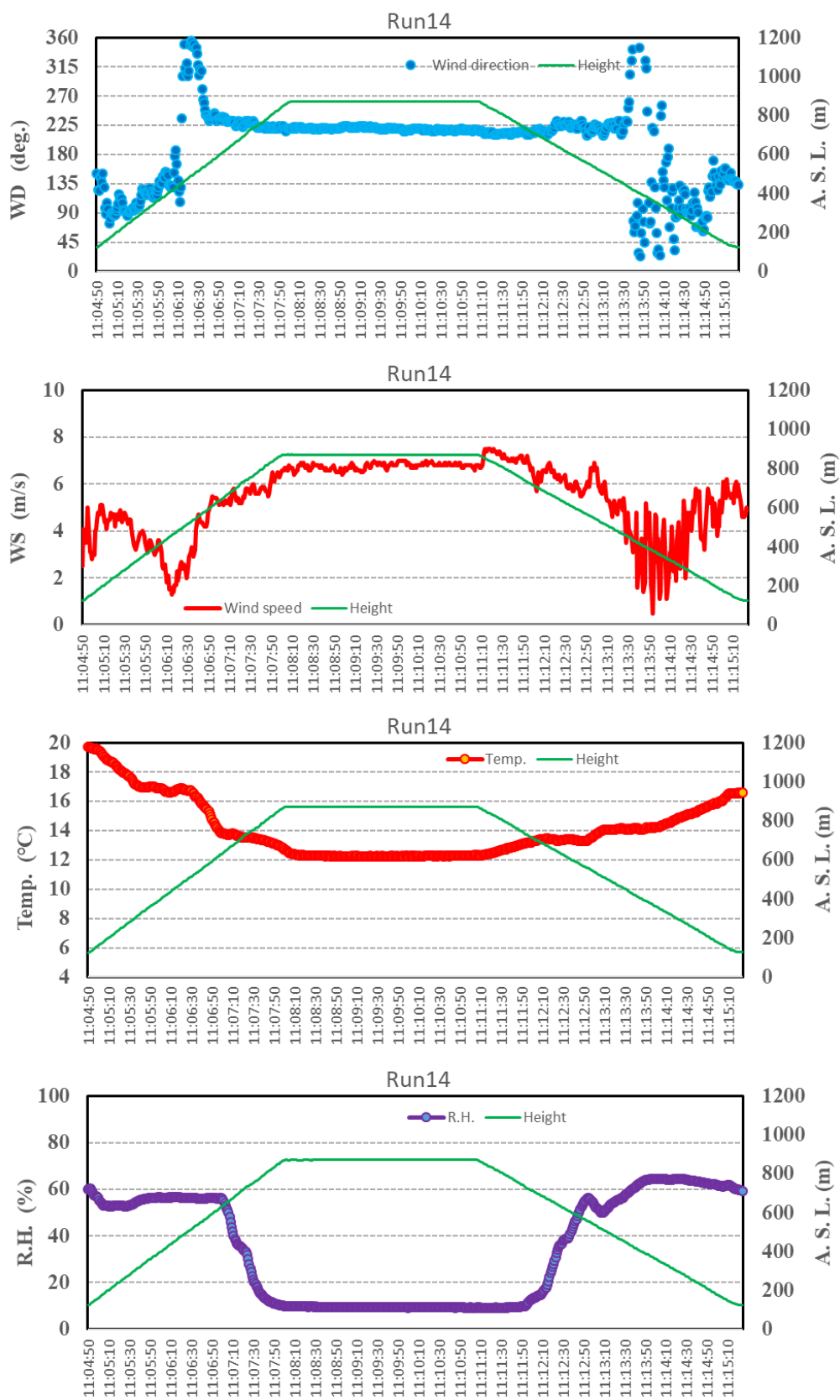


図 51-1 Run14 の風向、風速、気温、湿度

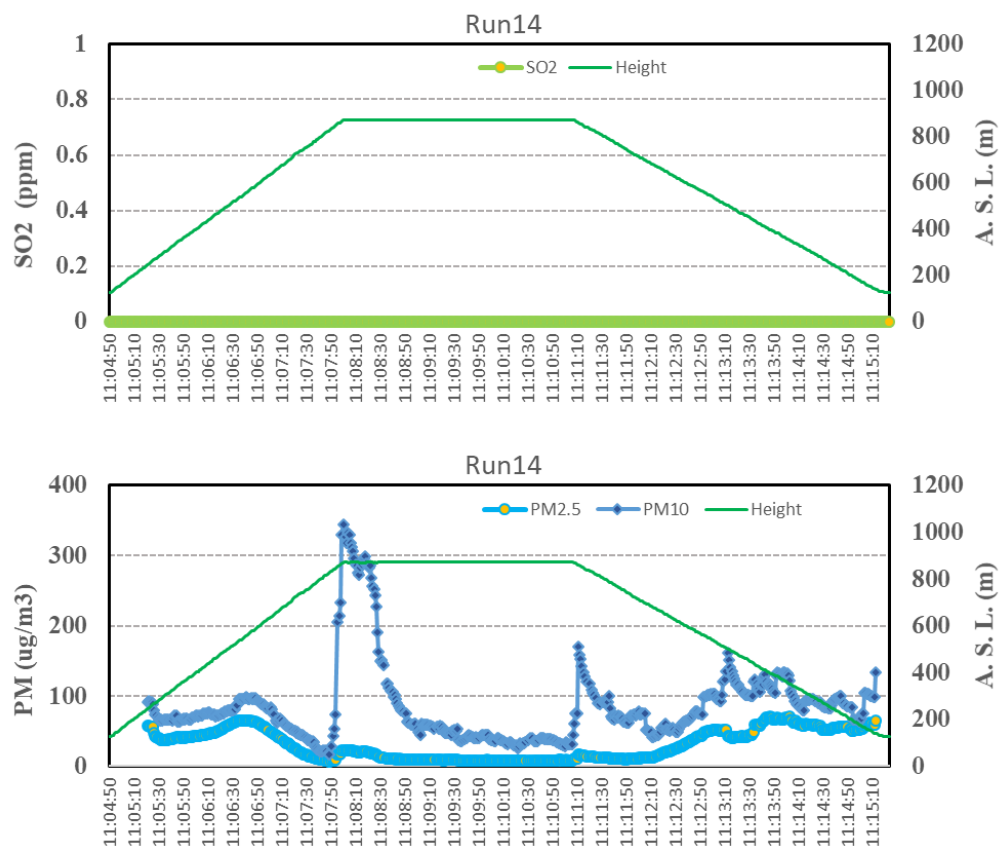


図 51-2 Run14 の  $\text{SO}_2$  および火山灰 ( $\text{PM}_{10}$ ) 濃度

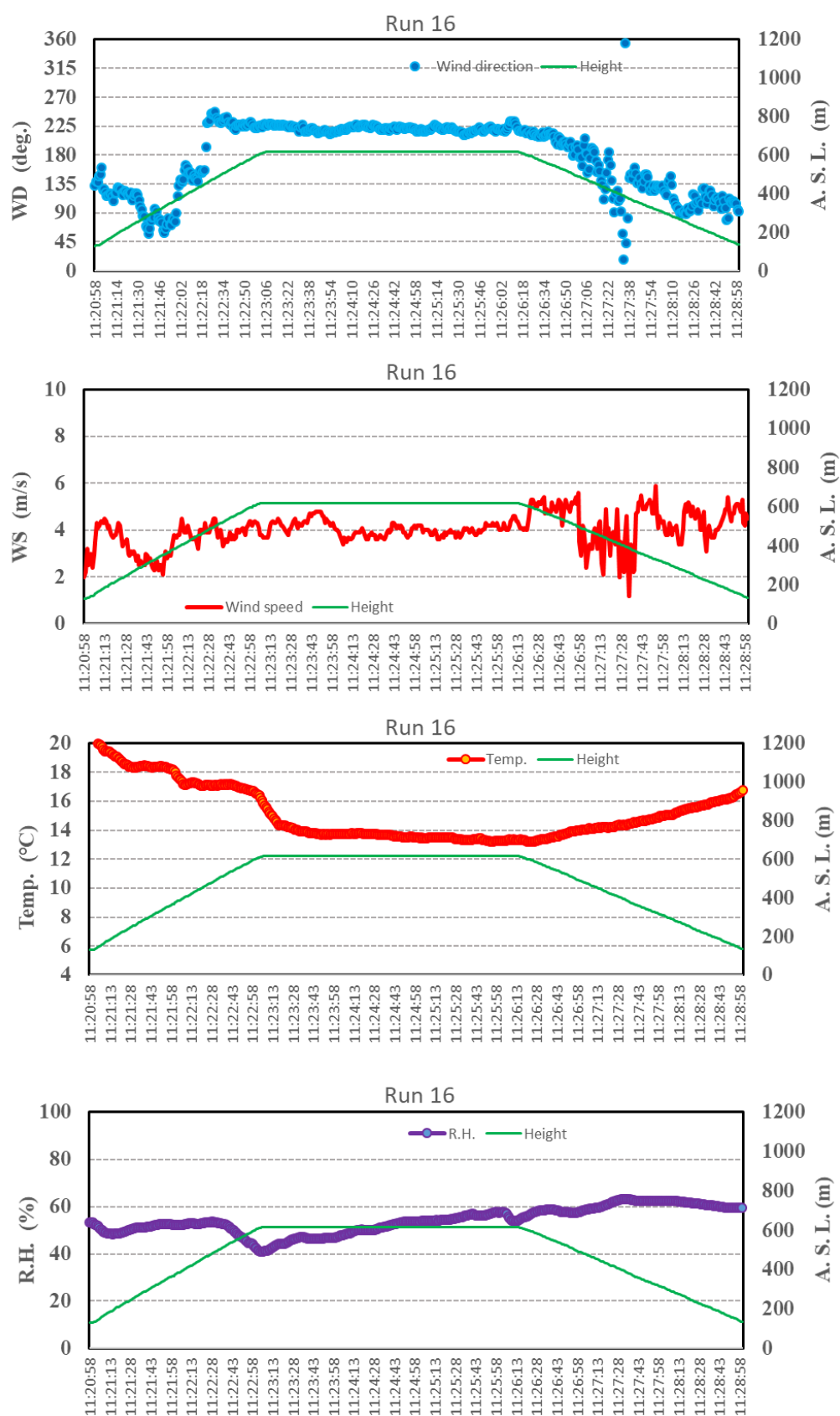


図 52-1 Run16 の風向、風速、気温、湿度

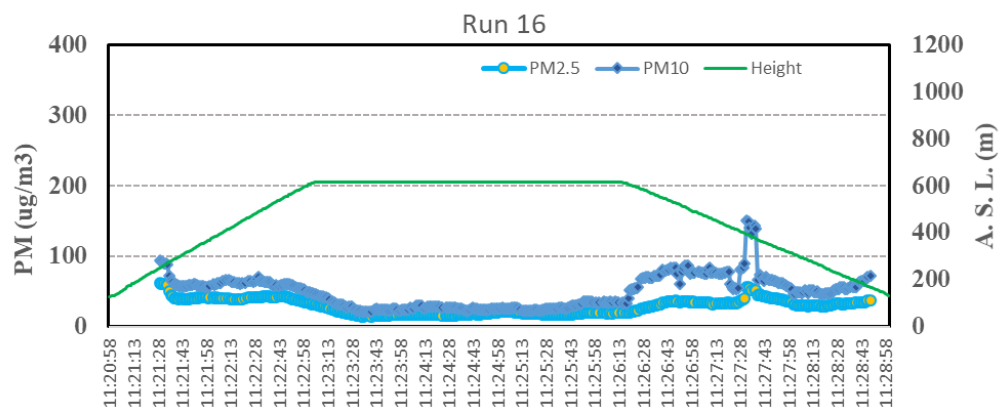
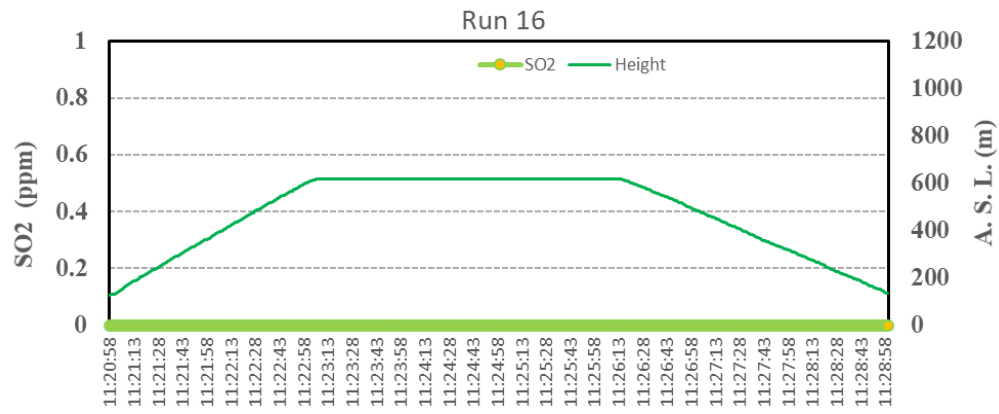


図 52-2 Run16 の SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度



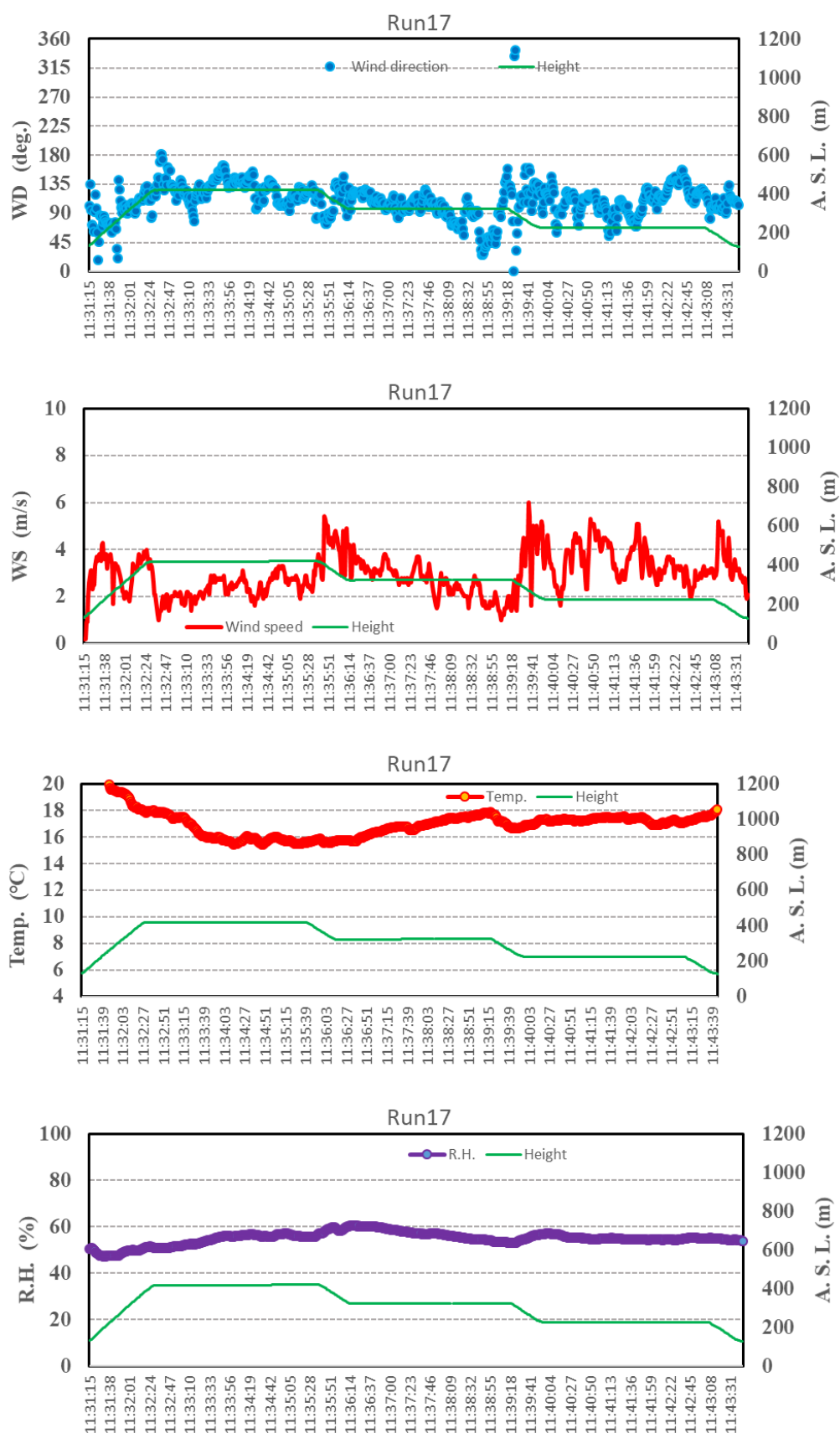


図 53-1 Run17 の風向、風速、気温、湿度

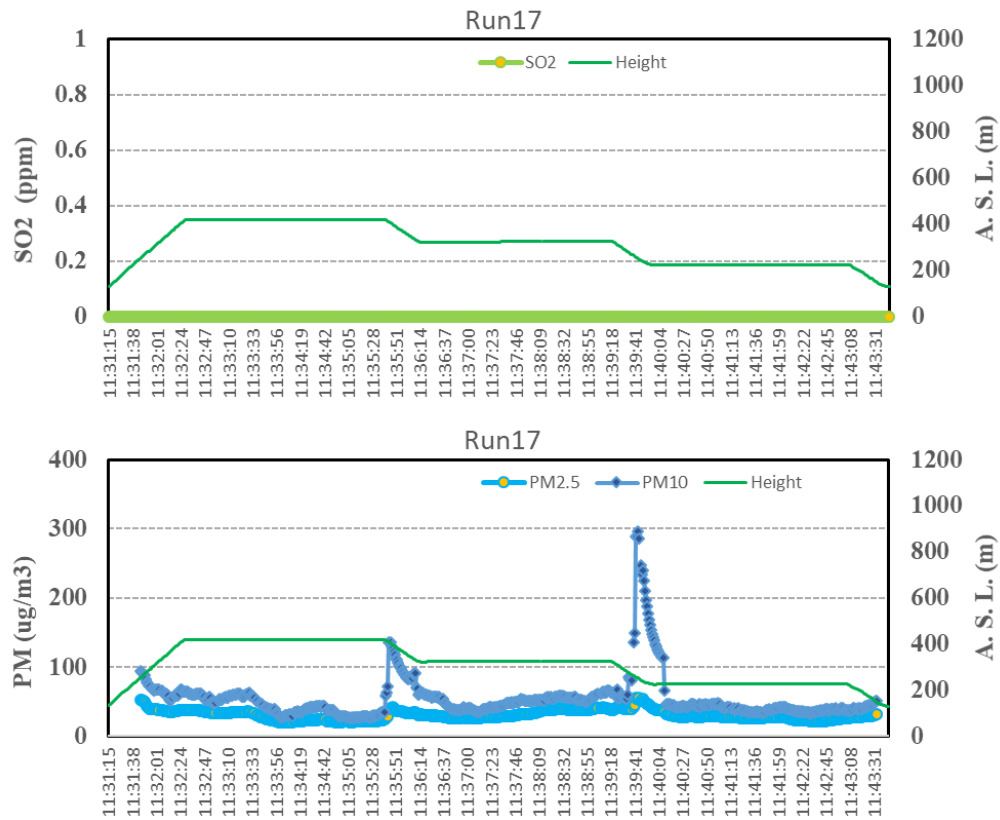


図 53-2 Run17 の SO<sub>2</sub> および火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度

なお、これまでハルタ山において継続してきた風速 3 成分を測定するドップラーライダーを用いた観測は、機器の不調により中断している。

### a3-1) 気象観測結果

3/25 AM に実施した Run1～Run4、3/25 PM に実施した Run6～Run9、3/27 AM に実施した Run13～Run17 をそれぞれグループ化し、1 セットの鉛直プロファイルとして整理した結果を図 54～図 56 に示す。

3/25AM の気温鉛直プロファイルより、海拔高度 500m 付近で大きなギャップが観測された。高度 500m 以下では、気温・湿度ともにほとんど一様であり、大気が混合されているものと推測される。

3/25 PM の気温鉛直プロファイルより、地上から高度 1000m 付近まで変化が小さかった。一方で相対湿度については高度 700m 付近で大きなギャップが見られた。風については高度 400m より下層では北寄りの風が 5m/s 前後観測されたが、これより上空では東風に変化し、風速も低下する傾向が見られた。

3/27 AM の観測結果から海拔高度 400m より上空で気温減率、風向・風速が大きく変化している。相対湿度については高度 700m 付近で大きなギャップが見られた。風については高度 400m 付近までは東風の弱風であったが、これより上空では南西風となり、風速も増大していく傾向が明瞭であった。

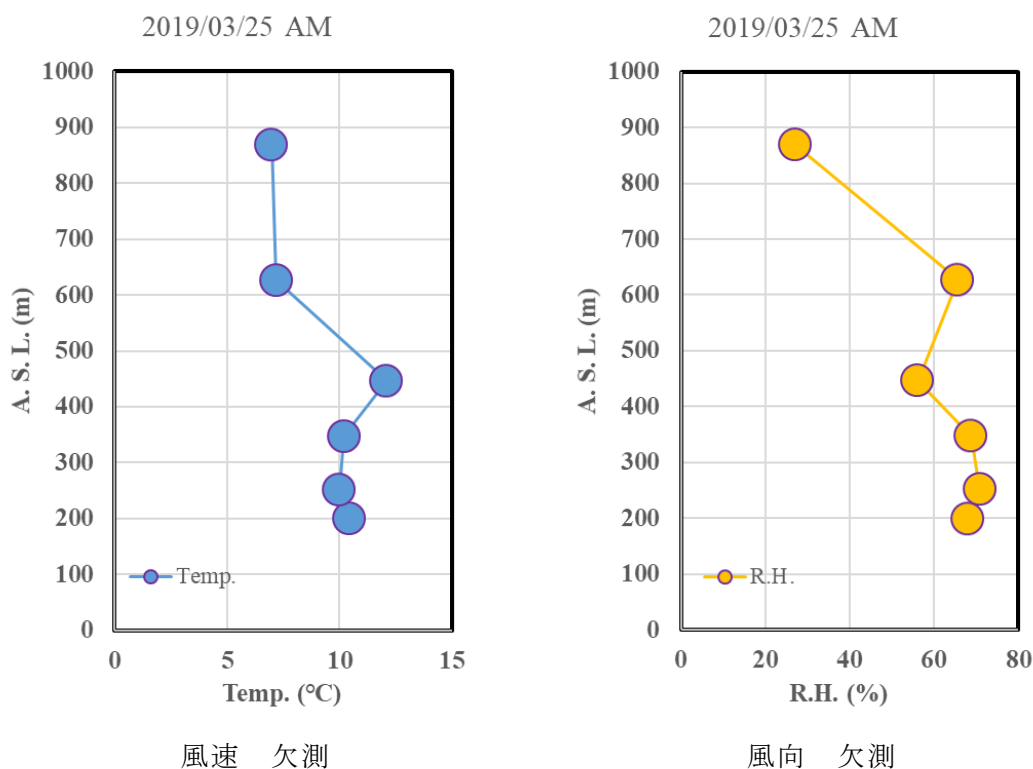


図 54 気象要素の鉛直プロファイル(3/25AM; 左図: 気温 右図: 相対湿度)

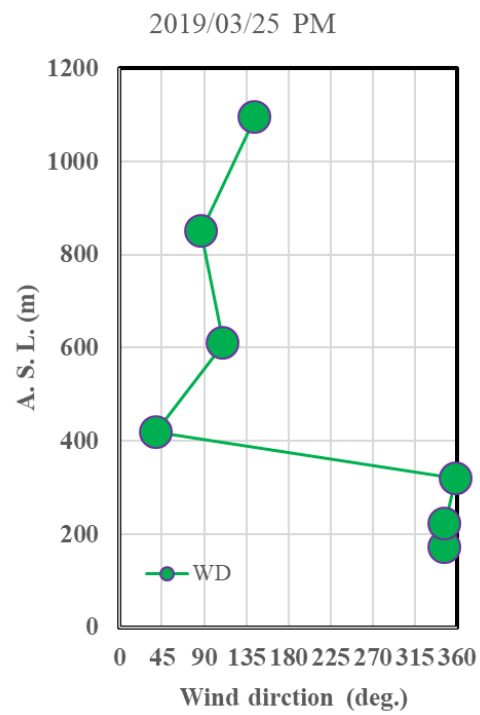
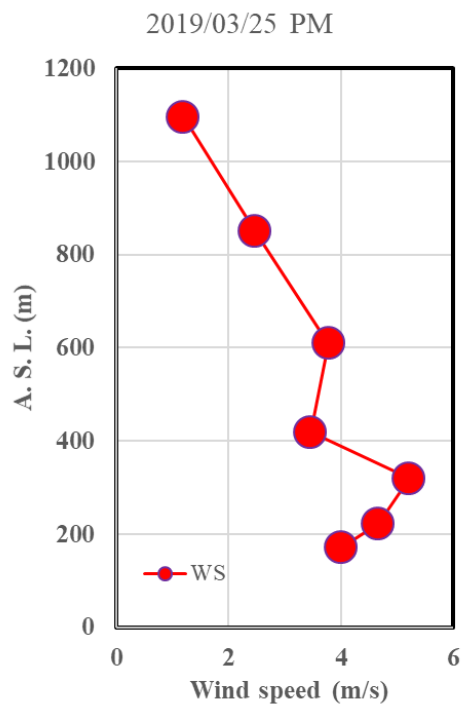
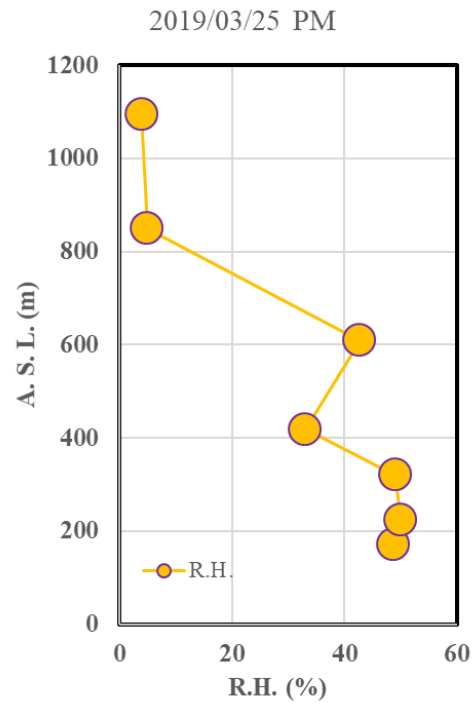
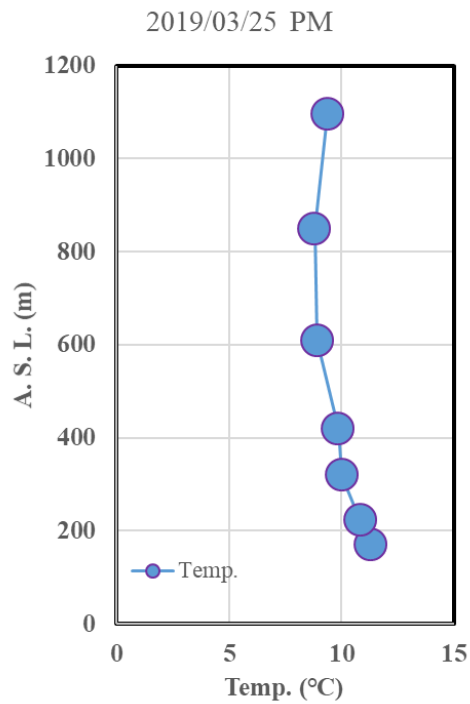


図 55 気象要素の鉛直プロファイル(3/25PM; 上左: 気温 上右: 相対湿度 下左: 風速 下右: 風向)

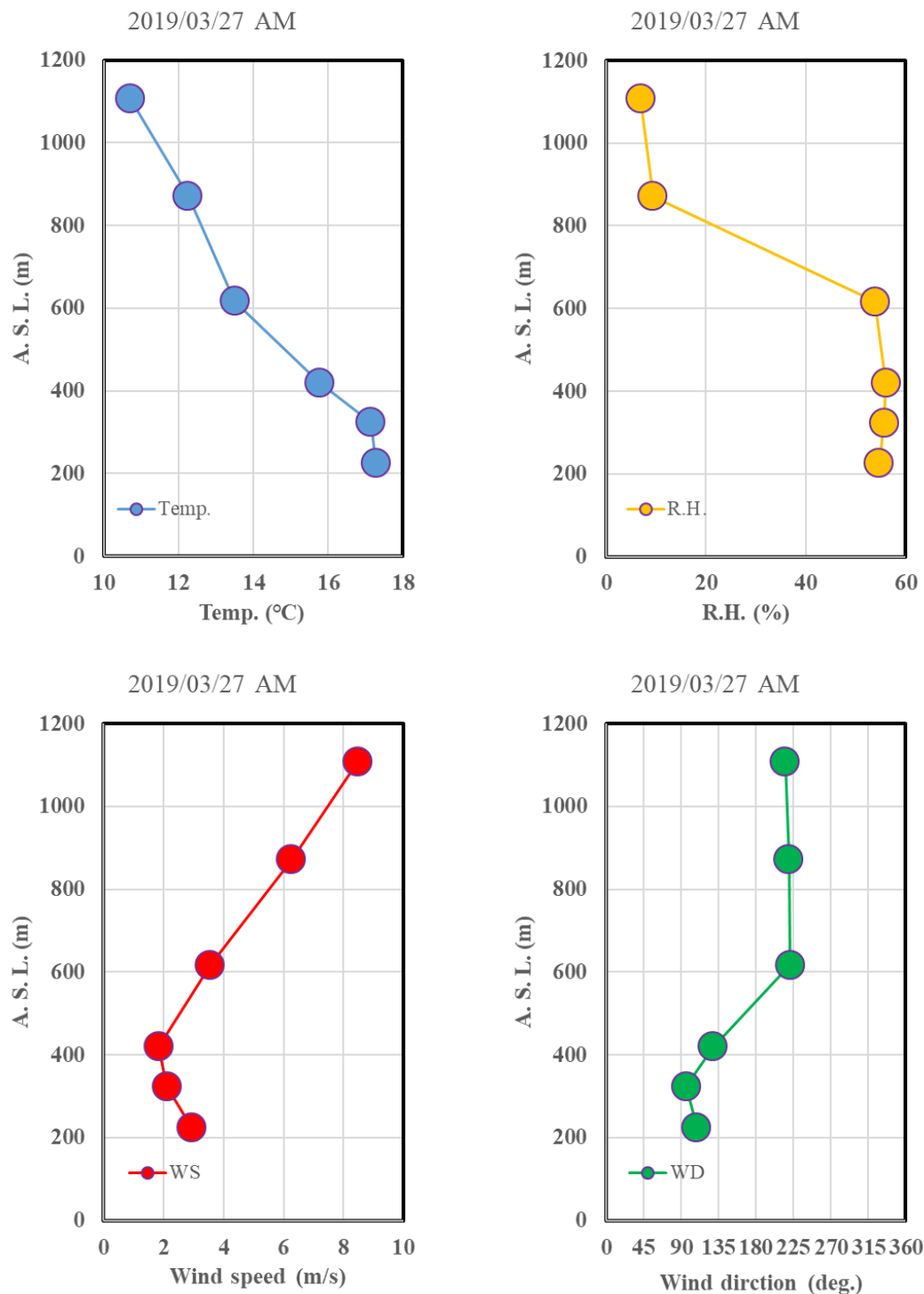


図 56 気象要素の鉛直プロファイル(3/27PM; 上左: 気温 上右: 相対湿度 下左: 風速 下右: 風向)

#### a3-2) 火山ガス・火山灰観測結果

火山ガスのうち、 $\text{H}_2\text{S}$  についてはすべての Run で検出下限値未満(<0.1ppm)であった。 $\text{SO}_2$  については、Run13 において地上 1000m でホバリング中に最大 0.2ppm の濃度が観測された以外は、検出下限値未満(<0.1ppm)であった。Run13 時系列観測図(参考資料)より、 $\text{SO}_2$  は

海拔高度 1000m でのホバリング中に数秒間検出されているが、PM 濃度の上昇とは同期していない。

火山灰については、PM<sub>10</sub> 濃度を 3/25 AM に実施した Run1～Run4、3/25PM に実施した Run6～Run9、3/27AM に実施した Run13～Run17 をそれぞれグループ化し、1 秒毎のデータを海拔高度とともにプロットした結果を図 57 に示す。この図にはホバリング中だけでなく、地上から指定高度までの往復の飛行中のデータも含まれている。一方で、離陸後 30 秒、着陸前 10 秒間のデータは地表面の巻上げ粉じんの影響を受けているため除外した。

3/25 AM の観測では、高度 700m 付近および 900m でのホバリング中に PM 濃度の上昇がみられるが、Run2、Run3 の時系列観測図(参考資料)によると、指定高度でのホバリング中に常に高濃度となっているわけではなく、高濃度継続時間としては 1 分程度であった。

3/25 PM の観測では高度 450m 付近で PM の濃度上昇が観測された。これは指定高度でのホバリング中ではなく、往復の飛行経路経路上で観測されたものである。この高度は気象観測の結果より、風向の鉛直シアが見られた高度とほぼ対応している。また、Run9 のみ高度 250 付近でも PM 濃度の上昇が見られた。

3/27 AM の観測では高度 800m～1100m の層で PM 濃度の上昇がみられた。Run13 では指定高度(1100m)に到達する直前、Run14 では指定高度でのホバリング中に高濃度が観測され、高濃度継続時間は 1 分程度であった。また、Run17 のみ高度 250m 付近でも濃度が観測された。

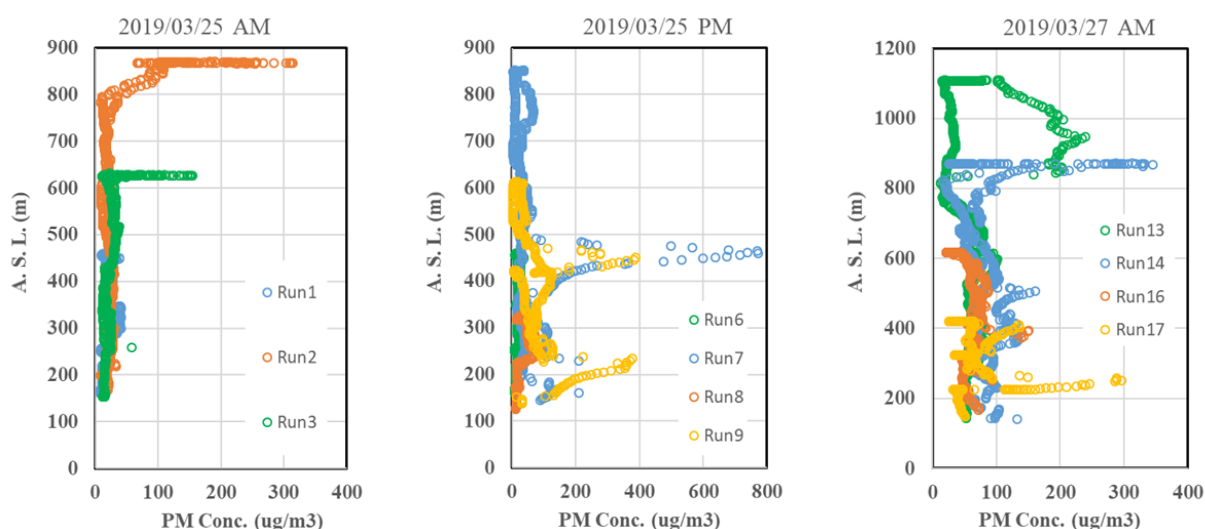


図 57 火山灰 (PM<sub>10</sub>) 濃度観測結果

### A3-3) ドローンによる PM 観測とライダー観測の比較

表 2 に示す観測は火山灰濃度センサーも搭載しているので、火山灰濃度センサーの PM2.5 および PM10 の測定値と黒神に設置したライダーにより観測された散乱強度の比較を行った。

黒神に設置されたライダーによりレーザー光は  $259^{\circ}$  N 方向（南岳 B 火口よりもやや南）の仰角  $15^{\circ}$  で照射されている。ドローンによる気象観測を実施した 2019 年 3 月 25 日及び 27 日の散乱強度および消散係数の時間変化をそれぞれ図 58 と図 59 に示す。3 月 25 日は散乱強度の強い部分が、視線距離 3000m 付近から 5000m 付近へと徐々に移動していることがわかる。午前中の観測時間帯では強い散乱体が黒神方向に移動してきているが、15 時から 20 時においては強い散乱体は視線距離 5000m 付近の南岳火口上にとどまっていた。

3 月 27 日は強い散乱体が黒神のライダーの近傍にとどまっている。

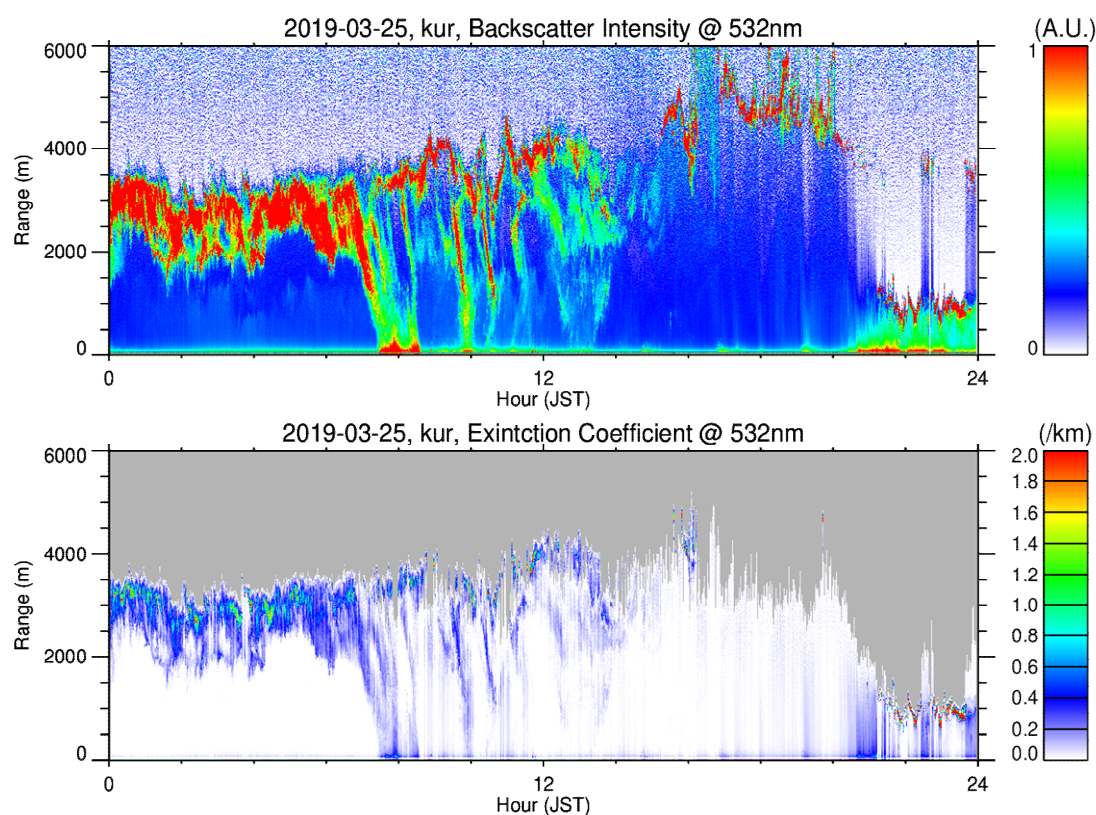


図 58 黒神ライダーによる 2019 年 3 月 25 日の散乱強度および消散係数の時間変化



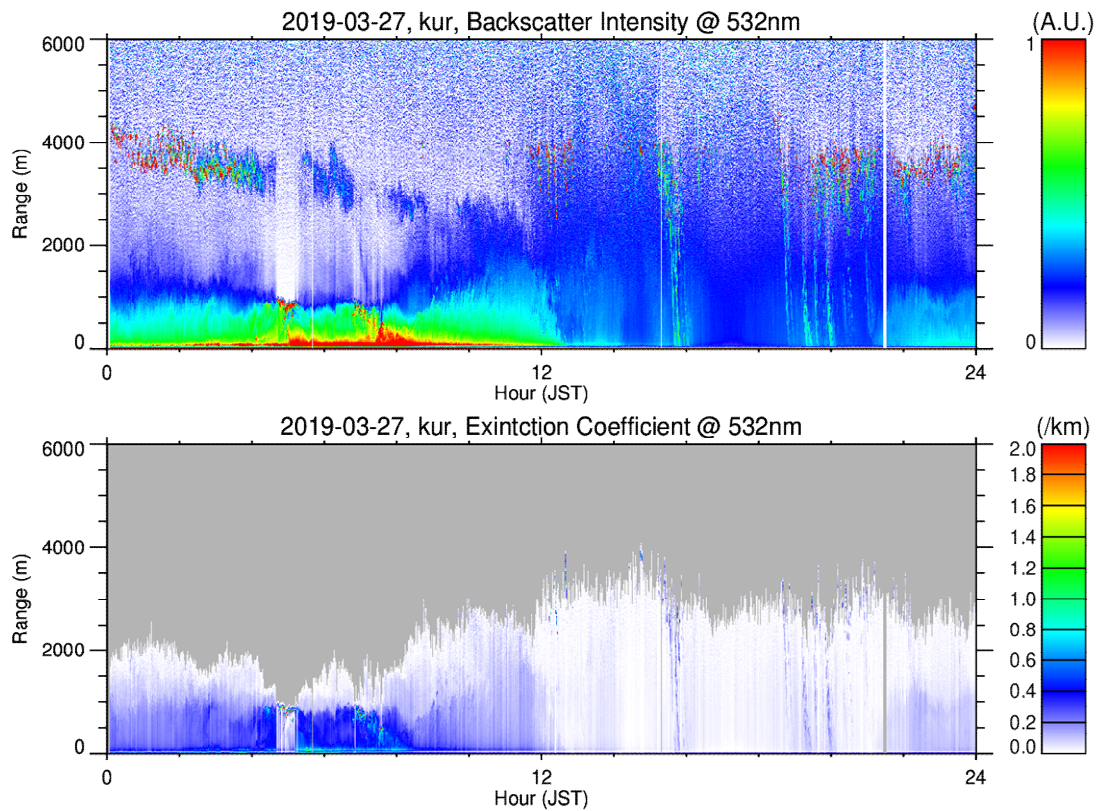


図 59 黒神ライダーによる 2019 年 3 月 27 日の散乱強度および消散係数の時間変化

ドローンによる気象観測を行った Site A は、黒神に設置したライダーのレーザー光から水平距離で 430m 離れている (図 60)。Site A に最も近い場所レーザー光の位置を最近点とし、最近点直上のライダーデータを参照することとした。また、ライダーデータの参照点は標高 237m に位置するため、ドローンによる観測データは高度 237m 付近の値を使用した。

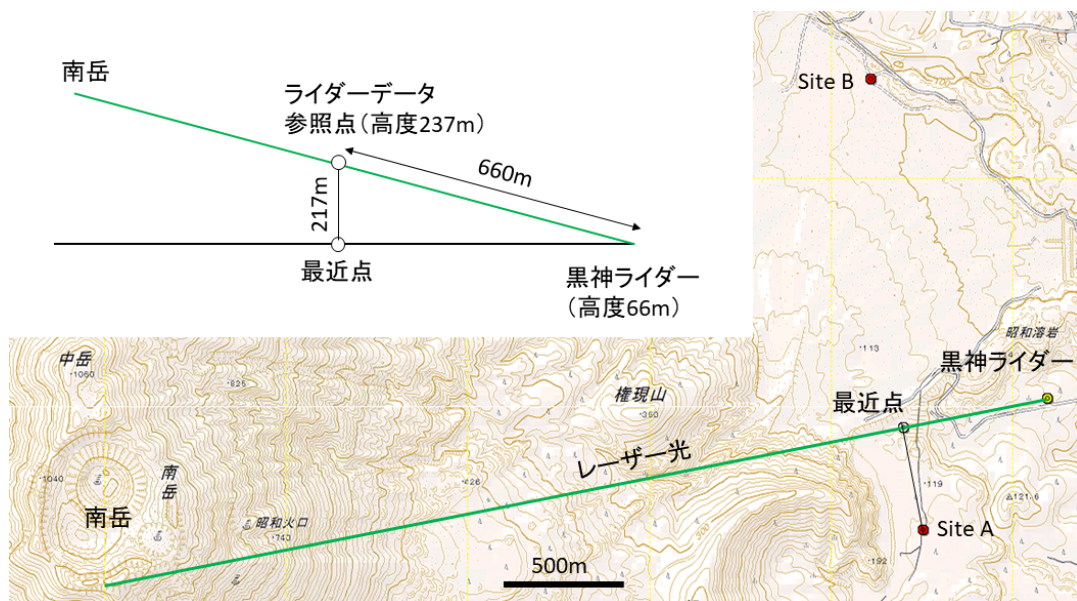


図 60 ライダーのレーザー光と Site A および Site B の位置関係

表 3 に Site A における高度 237m 付近の火山灰粒子濃度（PM2.5、PM10）とライダーで計測した散乱強度を比較して示した。ここで、散乱強度は、波長 532nm の 2 つの偏光波の後方散乱強度の和を距離補正した値を 5 分間平均したものである。

表 3 Site A におけるドローンによる火山灰濃度とライダーによる散乱強度の比較

日時	風速 m/s	風向 °	気温 ℃	湿度 %	PM2.5 μg/m <sup>3</sup>	PM10 μg/m <sup>3</sup>	RUN	ライダー散乱強度 ×10 <sup>8</sup>
2019/3/25								
11:33:26			9.98	71.14	7.2	16.1	RUN1	6.27
11:42:45			10.84	65.49	9.7	20.8	RUN2	5.13
11:52:05			9.36	72.64	15.1	23.7	RUN2	5.30
12:04:05			11.35	62.97			RUN3	4.85
12:04:10			11.31	63.04			RUN3	4.85
12:04:11			11.28	62.99	15.9	58	RUN3	4.83
12:11:10			9.54	71.26	9.1	16.6	RUN3	4.83

表 4 に Site B における高度 237m 付近の火山灰粒子濃度（PM2.5、PM10）とライダーで計測した散乱強度を比較して示した。3 月 25 日のドローンによる火山灰濃度測定では 100μg/m<sup>3</sup> を超える高濃度が検出されたが、ライダーでは安定して 4×10<sup>8</sup> の値が得られた。Site B はレーザーの最近点から 1.4km 離れているので対応関係はよくないのかもしれない。3 月 27 日はライダーによる観測では安定して 8×10<sup>8</sup> の値が得られており、黒神周辺の地域的な影響を受けているのかもしれない。

今回の測定ではライダーの通常の運用通り、レーザー光を 259° N 方向（南岳 B 火口よりもやや南）の仰角 15° で照射したが、今後の測定ではより精度を高めてドローンの位置に照射するとともに、地上の影響を受けにくいより高い高度において測定を行う必要がある。また、ドローン観測においては、ホバリングして同じ地点の火山灰濃度を安定して収集する必要がある。

表4 Site Bにおけるドローンによる火山灰濃度とライダーによる散乱強度の比較

日時	風速 m/s	風向 °	気温 ℃	湿度 %	PM2.5 μg/m <sup>3</sup>	PM10 μg/m <sup>3</sup>	RUN	ライダー散乱強度 ×10 <sup>8</sup>
2019/3/25								
14:27:11	3.7	23	12.06	46.56	13.4	32.3	RUN6	4.42
14:38:54	4.4	356	10.43	54.21	10.9	21.7	RUN6	4.08
14:44:53	5.3	345	11.4	46.78	34.4	147.2	RUN7	4.06
14:54:26	6.9	348	10.65	47.69	10.2	35.4	RUN7	4.09
15:01:41	5.4	352	11.23	48.43	14.9	81.6	RUN8	4.14
15:05:42	6.7	341	10.49	52.39	12	68.1	RUN8	4.13
15:17:13	4.3	351	11.98	46.79	20.1	93.8	RUN9	4.08
15:27:37	3.2	17	10.51	52.5	21.2	223.1	RUN9	4.14
15:27:38	2.3	2	10.52	52.59	32.4	376.7	RUN9	
2019/3/27								
10:48:44	3	123	18.75	53.34			RUN13	8.07
10:48:45	2.8	125	18.74	53.46			RUN13	8.07
10:48:46	2.6	129	18.67	53.57	35.8	53.1	RUN13	8.07
11:00:32	4.2	103	14.66	64.38	34.7	50.9	RUN13	8.02
11:05:20	4.7	86	18.17	52.97			RUN14	8.11
11:05:21	4.2	91	18.13	52.98	57.7	91.9	RUN14	8.11
11:14:41	3.6	107	15.34	63.3	55.3	96.8	RUN14	8.24
11:21:28	3.5	120	18.35	50.31			RUN16	8.24
11:21:29	3.6	121	18.37	50.52	62.7	94.3	RUN16	8.24
11:28:25	4.6	101	15.58	61.37	31.7	49.6	RUN16	7.74
11:31:45	3.8	76	20.11	47.69			RUN17	7.71
11:31:46	3.5	66	20.12	47.63	52.5	94.2	RUN17	7.71
11:39:49	4.6	138	16.66	56.44	53.3	239.9	RUN17	7.73

## b) 桜島火山周辺域の高分解能気象シミュレーション

メソ気象モデルを用いて、桜島火山および周辺の複雑地形を高解像度で表現することで、地形の微細構造に起因した火山近傍の詳細な風速場を数値シミュレーションにより再現する。また、気象モデルの風速場から火山灰拡散の再現シミュレーションを行い、風速場の再現性によって降灰量の再現性がどのように影響を受けるのかを調べる。さらに、噴火に係わる観測データから、予測計算に必要な噴煙モデル変数の特性を分析した。

火山灰拡散予測の高精度化を目指し、2018 年 6 月の桜島火山の噴火事象を対象として、気象モデルおよび噴煙モデルによる火山灰拡散の予測実験を実施した。

### b1) 風速場および拡散場の再現性

本節では、過去に生じた桜島火山の噴火イベントを数値モデルにより再現し、モデル解像度の違いによって桜島周辺の気流の再現性がどのように変わり、それが火山灰の輸送・沈着の再現にどのように影響するのかを事後解析により調べる。2017 年 6 月 6 日および 2017 年 10 月 1 日の桜島火山の噴火イベントを対象として、高解像度数値シミュレーションによる風速場・拡散場の再現性を検討した。気象場の再現には気象モデル WRF (Skamarock and Klemp 2008)<sup>9)</sup>を用い、特に水平格子幅を変化させた場合に地形の表現が異なることに着目し、火山近傍の風速場の再現性の影響が火山灰の拡散場にどう現れるのかについて調べた。火山灰の拡散・沈着のシミュレーションには、火山灰輸送・沈着モデル FALL3D (Folch et al. 2009)<sup>10)</sup>を用いた。

図 61 に、2017 年 10 月 1 日の噴火イベント時の降灰量の観測値とシミュレーション結果とを示す。数値シミュレーションでは、低解像度として水平格子幅が 1000 m の場合と高解像度として 70 m の場合を比較した。水平格子幅 1000 m は火山灰輸送・沈着モデルでしばしば使われるものであり、ここでは、高解像度の場合と比較することで、低解像度シミュレーションの問題を示すことを意図している。低解像度の場合には、桜島の海岸付近の地点でモデル結果は観測値に対して 13.9 倍という過大評価となっている。一方、高解像度の場合には、火口付近および海岸付近の地点においてモデル結果は観測値に対してそれぞれ

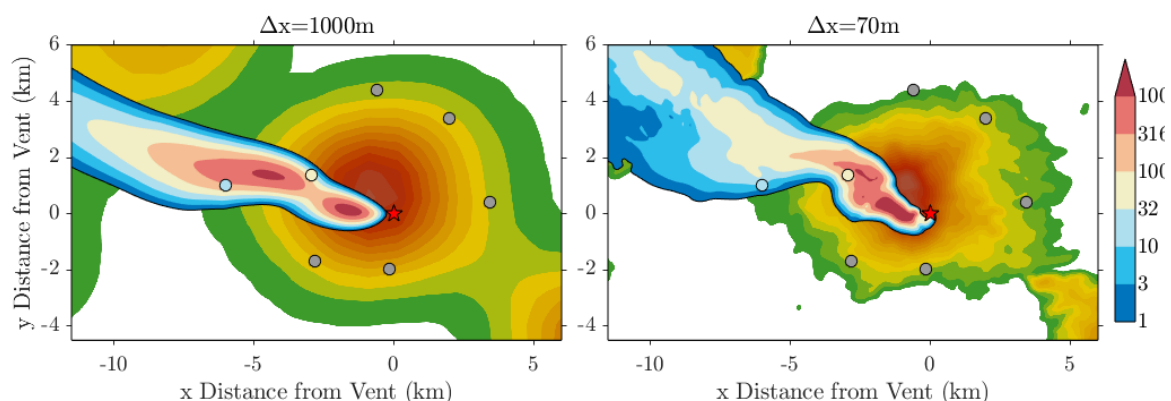


図 61 2017 年 10 月 1 日の噴火イベントの観測値(カラーの丸印)および火山灰の輸送・沈着シミュレーションで得られた降灰量(カラーのシェード)。シミュレーション結果は、水平格子幅(Δx)が(a) 1000 m の場合、(b) 70 m の場合を示す。昭和火口的位置を星印で示す。

1.9 倍、0.5 倍となり、良好な結果が得られた。

このように、解像度が異なることで風速場の表現性が異なり、結果として火山灰の拡散場も大きく影響を受けることが分かる。解像度を高くすることによって、複雑な地形の形状がより精緻に表現されるため、局地的な風系の再現性が向上する。このことによって、降灰分布がより局所的にメリハリのあるものとして数値モデルで表現される。

次に、モデル解像度の重要性を示すため、桜島噴火時の噴煙プルームの形状特性を 1 次元噴煙プルームモデル FPLUME (Folch et al. 2016)<sup>11)</sup>により 2009～2016 年の期間のデータから統計的に分析した。図 62 に、観測されたプルームの高さ毎に FPLUME によって計算されたプルームパラメータの分布を示す。ここでは、Degruyter and Bonadonna (2012)<sup>12)</sup>によるプルームのスケーリングパラメータ  $\Pi$  を用いてプルームの強さを分類し、 $\Pi$  が 1 未満の場合には弱いプルーム（傾斜角が大きい）、 $\Pi$  が 1 より大きい場合には強いプルーム（傾斜角が小さい）とし、強度の違いによるプルームパラメータの違いを示す。全般的な傾向として、弱いプルームの場合、プルーム角は 30-45°、プルーム長は 1000-3000 m となる。一方、強いプルームの場合には、プルーム角は 45-80°、プルーム長は 500-1000 m である。このようなプルームの特徴を数値モデルで的確に表現するためには、モデルの水平格子幅は、少なくとも 500 m 未満、あるいは数 100 m 程度が必要であることが示唆される。

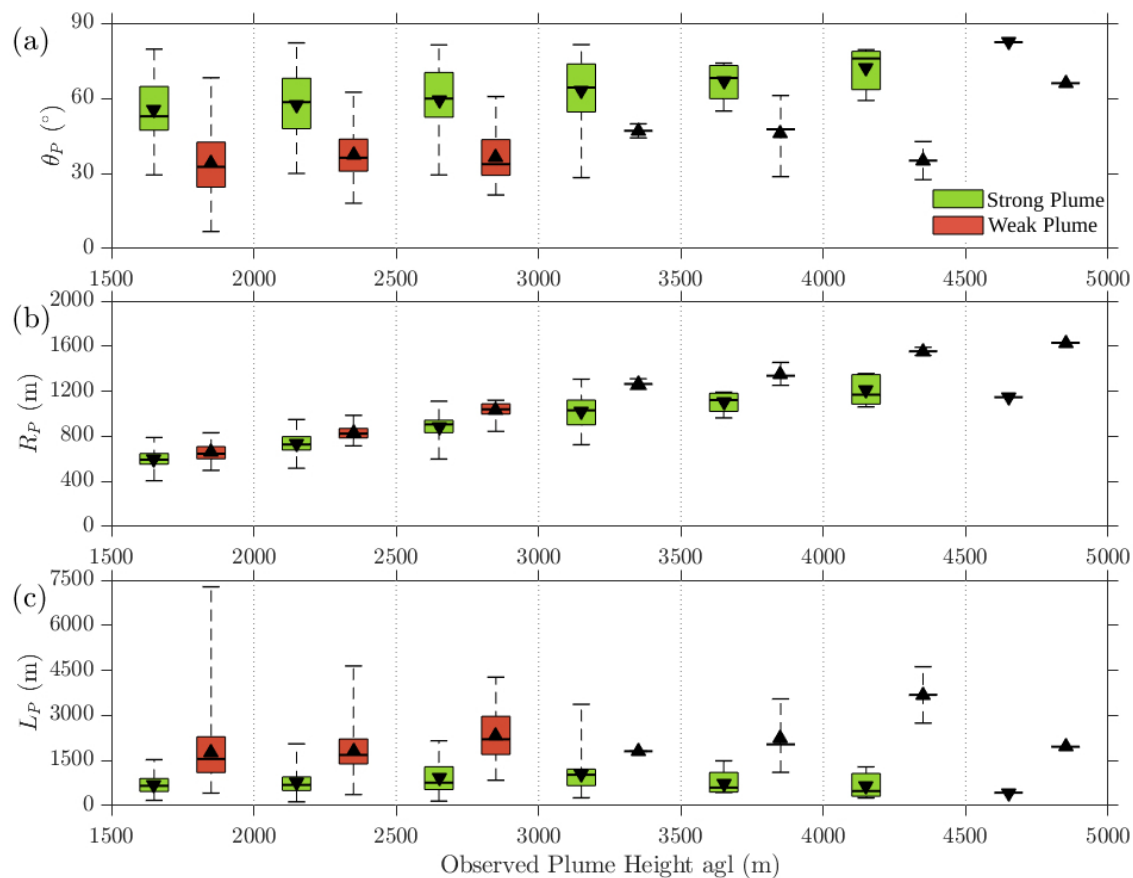


図 62 2009～2016 年の桜島噴火時のプルーム高さ別に示した形状特性。(a) プルーム角、(b) プルーム半径、(c) プルーム長。

## b2) 火山灰の拡散予測実験

本節では、既往の噴火イベントを対象として、気象庁の数値気象予測データを入力条件として用い、現業の気象予報よりも高解像度で予測実験することを試みた。気象場の予測は WRF モデルを用い、火山灰の輸送・沈着の計算は FALL3D を用いた。

予測実験をするにあたり、FPLUME により噴煙プルームの形状を決定した。FPLUME は計算初期状態における噴煙プルームの特性を決めるため、その入力に必要な噴火パラメータをより精緻に設定することが大事である。そのため、最初に、桜島火山観測所で観測された 2009～2016 年の 896 回の噴火時のデータから、噴出量を FPLUME で見積り、それを観測値と比較することにより、FPLUME の算出量の妥当性を検証した。その結果、観測値に対して FPLUME 計算値は、1～10 倍程度の範囲に収まることが分かった（図 63）。FPLUME 計算値の誤差としては、プルーム到達高度が正確に決められないといったことが考えられる。しかしながら、桁で大きく異なる結果ではないため、推定値としては FPLUME が十分に有用であると考えられる。

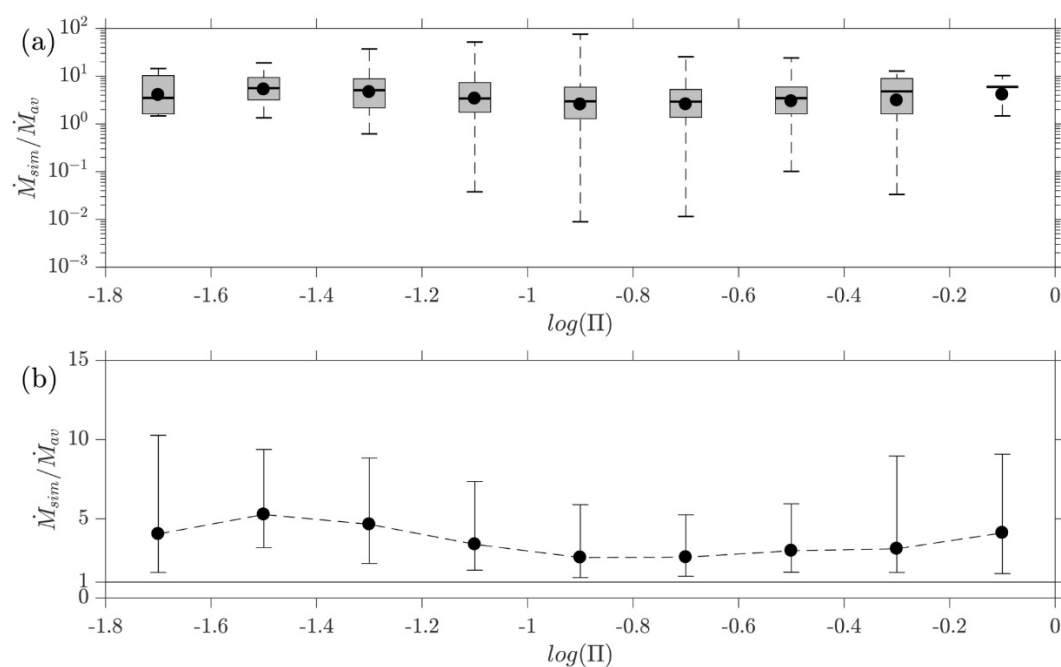


図 63 桜島噴火の噴出量の観測値（2009～2016 年）と FPLUME 計算値との比をプルームスケールパラメータ  $\Pi$  について示す。(a) 全データに対して示したもの、(b) 全データの統計から中央値と 25 および 75 パーセンタイル値を示したもの。

上記の検討に基づき、観測値から FPLUME の入力条件を決定し、予測実験を試行した。ここでは、2018 年 6 月 16 日の噴火イベントを対象として実験した。WRF モデルの初期条件・境界条件として、気象庁のメソ予報モデルの初期値・予測値を用いた。WRF モデルでは、水平格子幅を 5 km から 333 m にまで解像度を高くした。火山灰の輸送・沈着モデルとして FALL3D を用いた。

図 64 に、WRF/FALL3D による予測実験で得られた降灰量の分布および時系列を示す。ディドロメーターによる観測値や降灰の有無の観測と比較した。また、気象庁による予測分



布も示した。WRF/FALL3D による予測値は、1 mm 以上の高い降灰量が火口から桜島の西側に分布し、観測値と比較して良好な結果が得られた。0.1~1 mm の降灰量は、桜島から離れて鹿児島市内に広がり、さらに少量の降灰量は薩摩半島を横断して広がっている。この分布パターンを観測と比較すると、量的な観測は少ないものの、降灰の有無は良く捉えることができた。一方、気象庁の予測では、解像度が今回の計算よりも粗いため、火口の東側にも降灰を算出しており、高い降灰量もより広域に広がって表現されている。

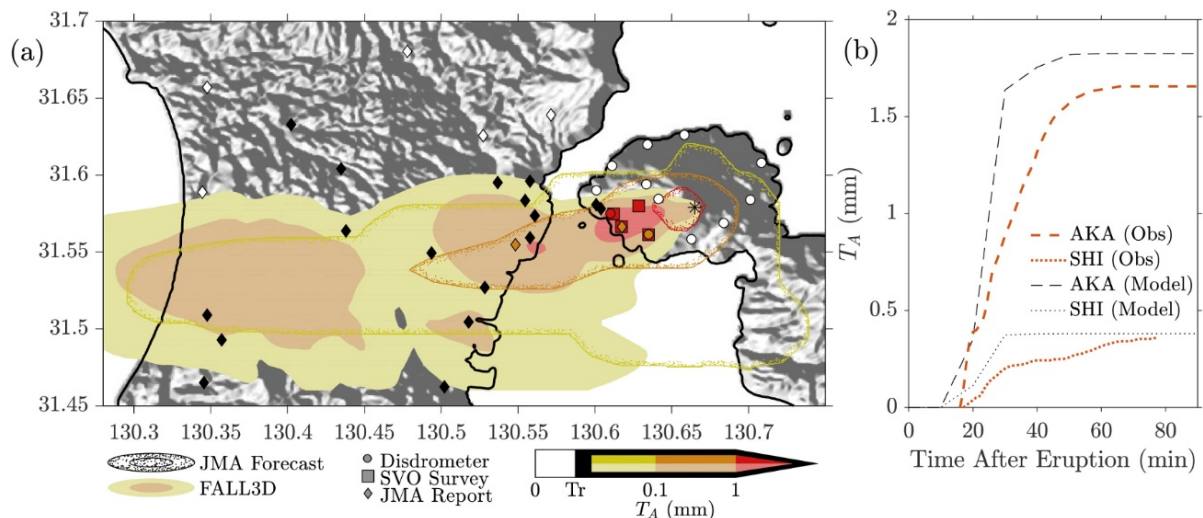


図 64 2018 年 6 月 16 日の噴火イベントの予測実験の結果。(a) WRF/FALL3D による降灰量の予測結果をカラーシェード(スケールはパネルの下)、気象庁の予測値をカラーの等値線で示す。正方形・ひし形はそれぞれ桜島観測所および気象庁の観測地点を示し、カラーは降灰量、黒印は降灰有り、白抜きは降灰がなかったことを意味する。アスタリスクは火口を示す。(b) 噴火時刻からの降灰量の時系列。赤は観測値、黒は計算値を示す。

予測実験では、予測の初期時刻を様々にずらし、噴火時刻に対してどの程度前の時点まで遡って予測できるのかどうかを調べた。気象庁メソモデルの予測値が 3 時間間隔で利用可能であるため、3 時間毎に時刻をずらして予測実験をした。図 65 は、6 月 15 日 18 時から 16 日 6 時まで 3 時間毎に初期時刻を設定して予測した場合の降灰量の予測値が観測値と比べてどの程度の精度があるのかを示したものである。赤水の観測地点では早い時刻に開始した予測になるほど予測誤差が大きくなるものの、15 日 21 時を初期時刻とした場合でも予測値が観測値の 1/4 に収まっている。このように 2018 年 6 月 16 日の噴火イベントでは、噴火時刻の約 10 時間前まで遡って降灰量が良好に予測できた。

ここでは、ひとつの事例を対象として予測実験を試みた。今後は、こういった予測実験を様々な事例を対象として積み重ね、局所的な降灰量の予測に必要な空間解像度や予測可能性を検討する。また、観測データを同化することによって、予測精度の向上を図ることを目指す。



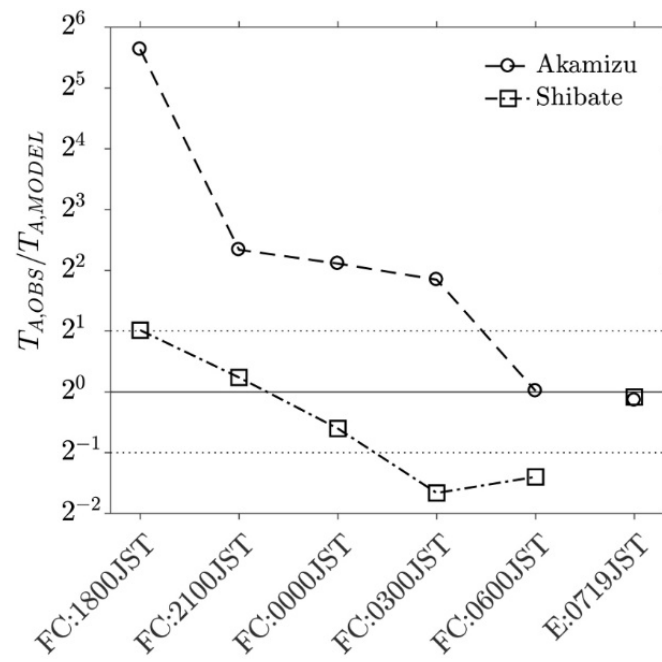


図 65 異なる初期時刻から開始した場合の予測実験で得られた降灰量の予測値と観測値との比較。E:0719JST は、噴火時刻を示す。図中の実線は観測値・予測値の比が 1、点線は 0.5 および 2 を示す。

c) 噴石の風力特性

c1) 噴石の空力特性の解明

火山から噴出した噴石の落下性状を明らかにするため、防災研究所（宇治市）所有の風洞実験装置を利用して噴石の空力特性を測定した。本年度は、噴石の形状および噴石の姿勢との関係に注目し、種々の形状(図 64 に示す 6 種類)の模型を用いて抗力測定を行った。求めた噴石の抗力係数および見つけ面積の風向角に対する変化を図 2 に示す。

噴石の抗力係数は図 65 に示す通り形状により変化するが、何れの風向角に対しても 0.5 付近の値を持つものが多かった。

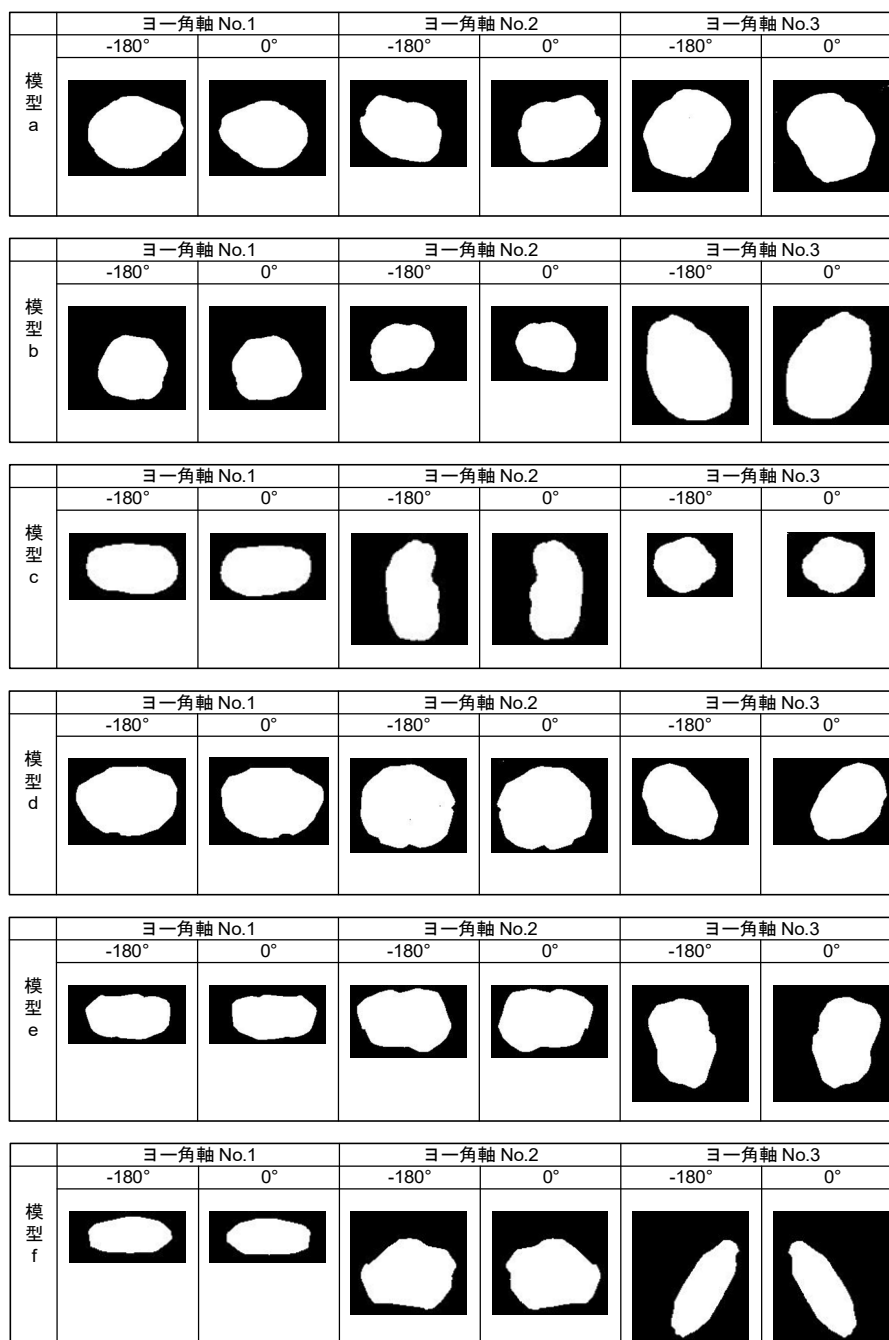


図 64 風洞実験に用いた噴石の形状。

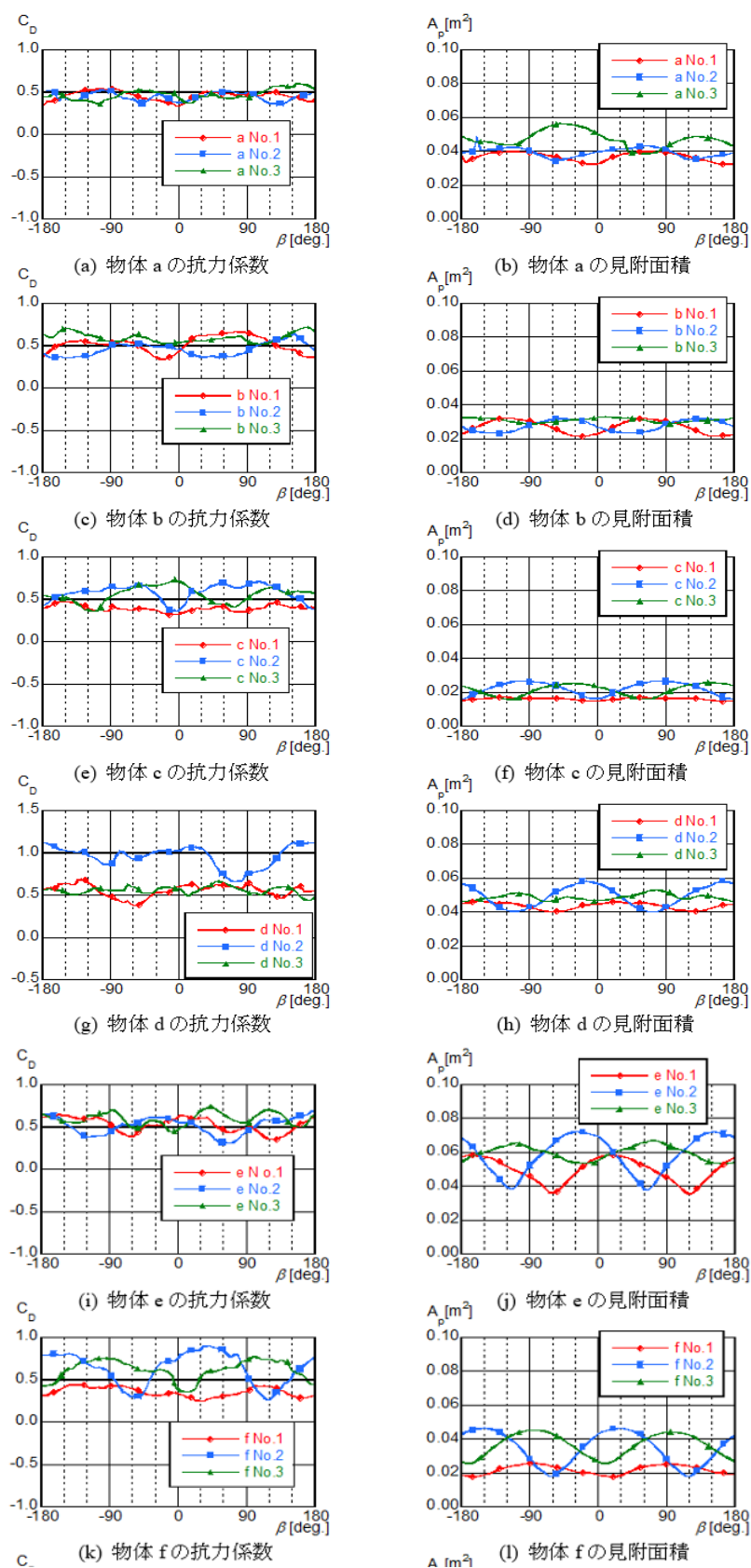


図 65 抵抗係数および見つけ面積と風向角の関係。

## C2) 噴石の衝撃力の解明

落下した噴石が衝突した際の衝撃により生じる屋根の被害状況を明らかにするため、防災研究所所有の衝撃試験装置を用いて、衝撃実験を行った。実験は、実物の建物の屋根を模擬した屋根模型を用い、それに噴石を衝突させ、噴石の形状・質量・速度などの変化により、破壊性状がどのように変化するかを明らかにした。

試験には、桜島で採取された噴石（図 66）を用い、衝撃試験装置（図 67）を用いて屋根模型（図 68）に衝突させた。屋根葺き材は、日本の住宅によく用いられているものとして、和瓦、カラーベスト、瓦棒（薄板鋼板）を選び、実際の屋根と同じ下地材の上に敷き詰めた。衝突は、衝撃力の最も大きいと考えられる屋根面に対して垂直に当たるように、衝撃試験装置の前方に垂直に試験体を設置した（図 67）。衝突させる噴石は質量と形状を変化させ、また、衝突速度も変化させて、各屋根模型の破壊の様子を明らかにした。（図 69）



図 66 実験に用いた噴石。

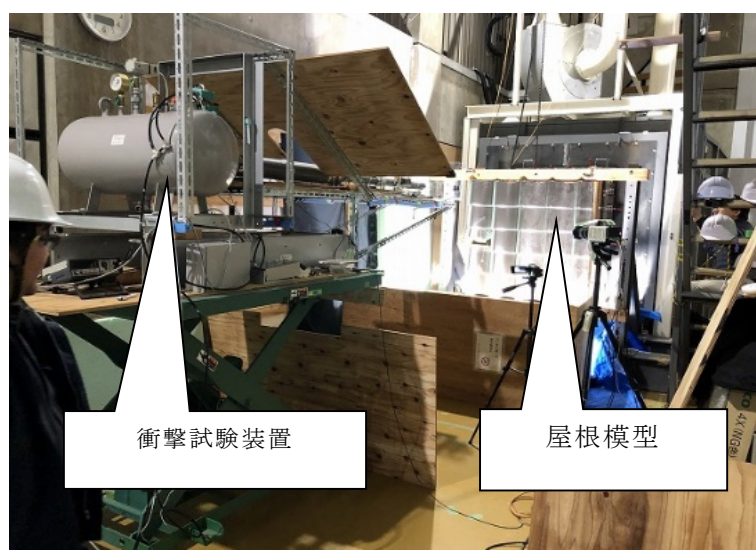
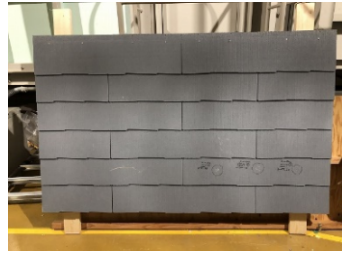


図 67 衝撃試験装置を用いた衝撃実験の様子。



和瓦

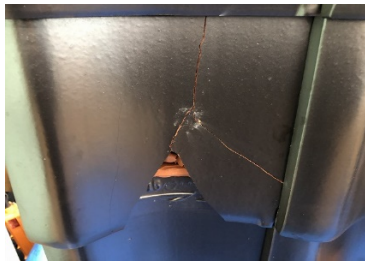


カラーベスト



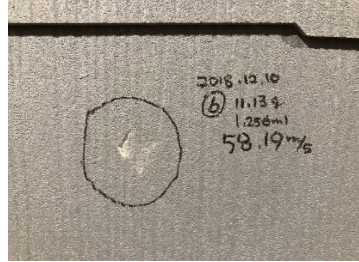
瓦棒（薄板鋼板）

図 68 衝突試験に用いた屋根模型。



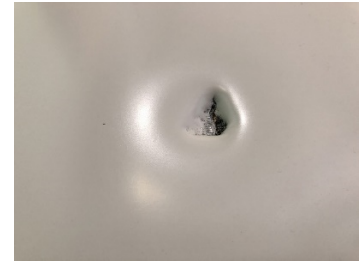
和瓦の割れ

（噴石 23g、衝突速度 32m/s）



カラーベスト上の衝突痕棒瓦（薄板鋼板）の衝突痕

（噴石 11g、衝突速度 58m/s）



（噴石 22g、衝突速度

54m/s）

図 69 噴石の衝撃後の状況。

#### 試験結果

噴石の形状・質量・速度などの変化により、衝突による破壊性状は変化する。ここでは、種々の形状と質量をもった噴石を和瓦、カラーベスト、瓦棒（薄板鋼板）に衝突させ、屋根葺き材が割れたり開口が生じるまで、種々の条件で衝突させて、破壊性状を明らかにした。図 6 に屋根葺き材の破壊の様子の一例を示す。結果としては、質量が大きくなるほど、衝撃速度が大きくなるほど被害の程度は大きくなるが、今回用いた噴石の材質、体積（最大 8.2cm<sup>3</sup>、20.0g、速度 27m/s）、質量（5.0cm<sup>3</sup>、最大 27.2g、速度 22m/s）、速度（1.3cm<sup>3</sup>、11.1g、速度最大 58m/s）の範囲では、屋根葺き材は割れたり開口が生じて被害が生じるものの、部材や下地を突き抜けて家屋内部まで侵入するような被害はみられなかった。

#### (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により火口上空から風下に移流する噴煙の観測と降下火山灰観測がリアルタイムで行える状態となった。特に X バンド MP レーダーを用いた観測では、火山の山頂が雲に覆われて噴煙を目視できない状態であっても、噴煙の高度と形状が把握できることが、霧島新燃岳や口永良部島でも確認できた。

桜島においては、火山灰予測の高速化のために、噴火発生に伴う爆発地震と空気振動を自動的に検知して、火山灰拡散シミュレーションを自動的に起動するシステムが完成した。これにより噴火の発生から 7 分程度で火山灰の拡散シミュレーションの結果を得ることができた。このシミュレーションは、気象庁 GPV の風向、風速データをもとに計算されるものであるが、パラメータとして必要な火山灰噴出率や噴煙高度を噴火に伴う地震動と地盤変動から自動的に求めるものであり、世界でも桜島以外には存在しないシステムである。

火山灰の拡散シミュレーションの高精度化については、WRF を用いて気象庁 GPV の風向、

風速データを空間的に高精細化することにより、降灰分布と降灰量を精度良く求められた。

一方、地上におけるディスドロメータによる火山灰観測においては、様々な知見が得られている。粒径分布は当然のことであるが、観測された火山灰粒子の落下速度は、シミュレーションにおいて用いるストークスの法則に基づく落下速度よりもかなり小さいことが明らかになっており、今後は、観測から得られた値をシミュレーションに反映させていく必要がある。また、高度によって風向が大きく変わる場合は、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。ディスド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必要がある。また、ディスドロメータによる観測の最大のメリットは時間分解能が高いことである。ブルカノ式噴火について考えると、降灰開始時刻や最大降灰時刻が観測量として得られていることを意味する。火山灰拡散シミュレーションにおいては、これまで噴火全体を通しての降灰量しか比較してきていないが、今後は、降灰量の時間経過も比較することにより、時間軸においても高精度の予測が可能となろう。

本研究プロジェクトにおいては、5年目から7年目の第2期においては連続噴火を念頭に、データ同化を利用した火山灰拡散予測を予定している。WRFを用いた高空間分解能の風速場の再現には時間がかかりすぎるので、気象庁GPVが示す典型的な風速場での高空間分解能の風速場を予めデータベースとして準備しておき、最適な高空間分解能の風速場を選択するような仕組みが今後必要となる。

#### (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) K. M. Larson: A new way to detect volcanic plumes, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 40(11), pp. 2657-2660, 2013.
- 3) 真木雅之・鈴木郁子・井口正人・Shakti P.C.: 気象レーダによる降灰量推定—2013年8月18日桜島噴火のZ-RA関係式—, 火山, 2019 (投稿中).
- 4) Tanaka, H. L., Yamamoto, K., Numerical simulation of volcanic plume dispersal from Usu volcano in Japan on 31 March 2000 using PUFF model, *Earth Planets Space*, Vol. 54, pp. 743-752, 2002.
- 5) Yokoo, A., Tameguri, T. and Iguchi, M.: Swelling-up of lava plug associated with Vulcanian eruption at Sakurajima volcano, Japan, as revealed by infrasound record: Case study on eruption on January 2, 2007-, *Bull. Volcanol.*, 71, 619-630, 2009, doi 10.1007/s00445-008-0247-5.
- 6) 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.
- 7) Tanaka, H., Iguchi, M.: Simulations of volcanic ash plume dispersal for

- Sakura-jima using real-time emission rate estimation, Jour. Disast. Res, 14, 160-172, 2019.
- 8) 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.
- 9) Skamarock, W. C., and J. B. Klemp (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, J. Comput. Phys., 227, 3465-3485.
- 10) Folch, A., A. Costa, and G. Macedonio (2009) FALL3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash, Comput. Geosci., 35, 1334-1342.
- 11) Folch, A., A. Costa, and G. Macedonio (2016) FPLUME-1.0: An integral volcanic plume model accounting for ash aggregation, Geosci. Model Dev., 9, 431-450.
- 12) Degruyter, W., and C. Bonadonna (2012) Improving on mass flow rate estimates of volcanic eruptions, Geophys. Res. Lett., 39, L16308.

(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
Iguchi, M.	Volcanic Activity of Sakurajima Monitored Using Global Navigation Satellite System	Journal of Disaster Research, 13, 3, 518-525, doi:10.20965/jdr.2018.p0518	2018年 6月
Poulidis, P. A., Takemi, T., Shimizu, A., Iguchi, M., Jenkins, F. S.	Statistical analysis of dispersal and deposition patterns of volcanic emissions from Mt. Sakurajima, Japan	Atmospheric Environment, 179, 305-320	2018年 4月
Shimura, T., Inoue, M., Tsujimoto, H., Sasaki, K., Iguchi, M.	Estimation of wind vector profile using a hexa-rotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 35, 8, 1621-1631	2018年 8月



	1000 m above surface		
Syarifuddin, M., Oishi, S., Hapsari, I, R., Shiokawa, J., Mawandha, G, H., Iguchi, M.	Estimating the Volcanic Ash Fall Rate from the Mount Sinabung Eruption on February 19, 2018 Using Weather Radar	Journal of Disaster Research, 14, 1, 135-150	2019 年 2 月
Hapsari, I, R., Iida, M., Muranishi, M., Ogawa, M., Syarifuddin, M., Iguchi, M., Oishi, S.	Ground Observation of Tephra Particles: On the Use of Weather Radar for Estimating Volcanic Ash Distribution	Journal of Disaster Research, 14, 1, 151-159	2019 年 2 月
Tanaka, L, H., Iguchi, M.	Numerical Simulations of Volcanic Ash Plume Dispersal for Sakura-Jima Using Real-Time Emission Rate Estimation,	Journal of Disaster Research, 14, 1, 160-172	2019 年 2 月
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	京都大学防災研究所年報, 61B, 337-343	2018 年 10 月
Suzuki, Y. J. and M. Iguchi	Numerical simulations of short-term eruption clouds	European Geosciences Union General Assembly 2018	平成 30 年 4 月
Alexandros-Panagiotis Poulidis・竹見哲也・井 口正人・清水厚	桜島からの火山灰輸 送の季節性・地域性に 関する統計解析	日本気象学会 2018 年度春季大 会	2018 年 5 月 19 日
Alexandros Panagiotis Poulidis, Tetsuya Takemi, Masato Iguchi	High resolution simulations of vulcanian eruptions at Sakurajima, Japan, using WRF-LES and FALL3D	日本地球惑星科学連合 2018 年 大会	2018 年 5 月 24 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	日本地球惑星科学連合 2018 年 大会	2018 年 5 月 24 日
鈴木雄治郎・小屋口剛博	火砕降下物と噴煙ダイナミクスのカップリング計算：ピナツボ 1991 年噴火シミュレーション	日本地球惑星科学連合 2018 年 大会	2018 年 5 月 24 日
中村仁美・鈴木雄治郎・ 入山宙・中尾篤史・岩森 光	島弧における火成活動・火山噴火プロセスの統合的理解に向けて	日本地球惑星科学連合 2018 年 大会	2018 年 5 月 24 日
Poulidis, A. P., T. Takemi, A. Shimizu, M. Iguchi, S. F. and Jenkins	Impact of accumulation period and seasonality on ashfall load approximation via an inverse power law model	AOGS 15th Annual Meeting	3-8 June 2018
Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi	Eddy-permitting simulations of eruptions at Sakurajima, Japan using WRF-LES and FALL3D	AOGS 15th Annual Meeting	3-8 June 2018
Yu, Cheng-Ku. Poulidis, A.	Mountain and island effects on airflow, precipitation, weather, and climate	AOGS 15th Annual Meeting	3-8 June 2018
Iguchi, M., Nakamichi, H., Maki, M., Tanaka, H., Ohta, Y., Shimizu, A., Miki, D.	Integrated monitoring of volcanic ash and forecasting at Sakurajima volcano, Japan	Cities on Volcanoes 10	2018 年 9 月 4 日
Maki, M., Kim, Y., Tokushima, H., Sato, E., Fujiyoshi, Y.,	Observations of Sakurajima Volcanic Eruption Columns	Cities on Volcanoes 10	2018 年 9 月 4 日

Iguchi, M.	with Three Different Types of Weather Radars		
Kim, Y., Maki, M., Iguchi, M.	Volcanic eruption clouds detected by weather radar under moist Environment	Cities on Volcanoes 10	2018 年 9 月 4 日
真木雅之・小堀壮彦・徳島秀彦・藤吉康志・井口正人	船舶レーダによる桜島噴煙柱の観測	日本火山学会 2018 年度秋季大会	2018 年 9 月 26 日～28 日
小園誠史・井口正人・三輪学央・眞木雅之・前坂剛・味喜大介	桜島噴火における火山灰降下過程の特徴：光学的ディストロメータによる長期連続観測	日本火山学会 2018 年度秋季大会	2018 年 9 月 26 日～28 日
Poulidis, A. P., T. Takemi, and M. Iguchi, 2019	Experimental ash hazard forecasting at Sakurajima volcano, Japan	2018 年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2019 年 2 月 19 ～20 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 31 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、4台のディストロメータを火口から南東方向に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、その経験的関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。

これまでに設置した大隅半島側のGNSSに加え、大隅半島北東部のさらに桜島から離れた場所にGNSSを追加設置し、桜島島外の火山灰観測の広域化を図る。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、関係式を提示する。また、地盤変動量から算出される火山灰放出量との関係についても検討する。

桜島島内に設置した2台のライダーによる火山灰観測を継続する。ライダーで観測可能な火山灰消散係数の上限を決定した上で2014年以降の火山灰消散係数について気候学的解析を行い、大気環境常時監視局データとの照合を行う。火山灰の輸送拡散数値モデルを検証するためのデータセットを作成する。

火山観測所のライダーと黒神に設置されたライダーによる同時観測結果を比較し、異なる輸送経路による火山灰光学特性の差異などについて解析を進める。消散係数を利用した火山灰輸送モデルの検証手法について検討を行う。

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。緊急観測等での機動的な活用を見据えてディストロメータを整備する。

## ③火山灰拡散予測の高速化技術開発

桜島北東部の新島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、桜島北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法を定式化し、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。

課題C3と連携し、噴煙柱形成・火山灰拡散を同時に再現する高精度シミュレーションを実行する。これにより、ブルカノ式噴火の噴火強度に対する噴煙高度と火山灰堆積分布の応答に関するデータベースを充実させる。

現在のPUFFモデルは噴煙の外径を高度に依存する関数で与えているが、レーダー観測から得られる噴煙の外形情報を用いて、シミュレーションできるように、PUFFモデルを改良する。

#### ④火山灰拡散予測の高精度化技術開発

ドローンによる上空の火山ガス、火山灰の濃度を計測(年2回程度)し、鉛直プロファイルを把握する。取得したデータにより、地上観測機器や気象データとの比較、モデルの妥当性評価等を実施する。

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場合と3次元的な火山灰粒子の分布を把握する。

火山近傍の風の場合のデータを取り込むように火山灰拡散シミュレーション手法を改良し、ディスドロメータによって得られた粒径分布や落下速度を考慮した入力条件を設定することにより、レーダーやディスドロメータのデータ等との比較などを通して、火山灰の拡散予測の高精度化を図る。特に、地上降灰量の時間変化と比較して、精度検証・高精度化を図る。また、データ同化や高分解能シミュレーションにより、予測精度向上の可能性について検討する。研究成果を国際測地学および地球物理学連合2019年大会において発表する。

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明らかにするため、防災研究所(宇治市)の風洞実験装置を利用して、レキの大きさと落下速度を実験的に求める。噴石の落下性状を明らかにすることを目的に、桜島周辺で噴石模型を用いた落下実験を実施し、大気中のレキの移動、回転、姿勢を明らかにする。その際、気象状況を気象モデルを用いたWRFにより、また、地面付近の乱流場を乱流モデルを用いたラージエディシミュレーション(LES)により周辺の気流性状を再現して、落下性状の再現計算に用いる。噴石模型を用いた落下実験では、加速度センサーおよび角速度センサーを噴石模型に組み込み、ドローンを用いて上空から落下させて、落下運動の計算結果との比較データを取集する予定である。

さらに、噴石の衝撃力に関しては、屋根や窓ガラス、特に太陽光パネルの被害程度を明らかにするため、噴石を太陽光パネルに衝突させる実験を行い、サブテーマD3に引き渡す基礎データを作成する。