

桜島降灰分布データベース (VASH)

Database of Sakurajima Volcanic Ash Fall Distribution (VASH)

真木雅之・佐野香那・中道治久・井口正人・西 隆昭・中村啓彦⁽¹⁾・

小堀壮彦⁽²⁾

Masayuki MAKI, Kana SANO, Haruhisa NAKAMICHI, Masato IGUCHI, Takaaki NISHI,
Hirohiko NAKAMURA ⁽¹⁾ and Takehiko KOBORI ⁽²⁾

(1) 鹿児島大学水産学部

(2) 三菱電機ソフトウェア株式会社

(1) Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Japan

(2) Mitsubishi Electric Software Corporation, Japan

Synopsis

In the present study, we have developed the ‘Database of Sakurajima Volcanic Ash Fall Distributions’ (VASH), which is based on weather radar observations. VASH provides basic information on eruption events, such as the eruption onset time, eruption cloud top height, horizontal distributions of ash fall amounts and ash fall durations, and the temporal changes of total ash fall amounts and total ash fall areas. VASH also provides specific information that is derived from a variety of research radars. X-band polarimetric radar provides the temporal change of the vertical structure of an eruption cloud on the range height indicator display. Marine radar provides information on the development of an eruption column, at 2.5 second intervals. The relationship between ash fall amount and the radar reflectivity factor is provided for each eruption event. VASH contributes studies not only on volcanic hazard prevention but also on eruption cloud dynamics, and ash cloud micro physics.

キーワード : 気象レーダ, 火山噴火雲, VASH, ウェブサイト

Keywords: weather radar, volcanic eruption cloud, VASH, website

1. はじめに

111 の活火山を抱え、火山近くに都市が形成されている我が国では、大規模噴火により放出される大量の火山灰は、交通機関の麻痺や公共インフラの被害などを引き起こし、その地域の日常生活や経済活動に影響を及ぼす。このような火山灰による被害を防ぐために

は、大気中の火山灰の挙動を理解し、その分布を把握することが求められる（内閣府、2013）。

これまで、大きな噴火があると各大学や国、地方公共団体が地上の降灰量分布のサンプリング調査をおこなってきた。チームを組んでおこなう場合もあるが、通常はそれぞれの機関の目的と体制で調査がおこなわ

れる。2020年5月に開催された内閣府火山防災対策会議において、降灰の現地調査を連携のとれたものにデータを共有しようという意見が提示された（内閣府調査企画委員会，2020）。現地調査は人と手間がかかるものの、得られる結果は火山防災のみならず学術的にも貴重なものである。しかしながら、たとえ連携が取れた現地調査が行われたとしてもいくつかの本質的な問題点がある。一点目は即時性に欠けること、二点目は気象などの影響を受けやすいことである。一点目の即時性に欠ける点は、具体的には、体制を整える時間も含め調査に時間がかかることである。また、噴火活動によっては調査を中断せざるを得ないこともある。そのために結果が報告されるまで速くても数日程度が必要であろう。この程度の時間は火山地質学的には無視できるかもしれないが、火山防災上では問題である。二番目の問題点は、調査が終了するまでの間に風や雨などの気象現象により降灰分布が変質する可能性があることである。

近年、気象レーダが噴煙や降灰の定量的な観測に有効であることが国内外の研究で示されている。特に、気象レーダは噴煙柱や噴煙のリアルタイムモニタリングの有効なツールであることがわかってきた。澤田（2003）によれば、世界で初めて噴煙がレーダで観測されたのはアイスランドの Mt. Hekla で 1970 年のことである。日本では 1973 年の爺爺岳の噴火を気象庁の釧路レーダによって観測されている。1980 年と 1982 年の Mt. St Helens の噴火では米国の現業気象レーダの観測データが本格的な定量的降灰量推定に利用されている（Harris et al., 1981; Harris and Rose, 1983）。

研究用レーダが火山観測に本格的に利用されはじめたのは 1990 年代末からである（澤田，2003; Schneider and Hoblitt 2013; Marzano et al. 2012; Hort and Scharff

2016; Melnikov et al. 2016; Maki et al. 2016, 2019）。初期の研究用レーダはビーム方向を火口直上に固定したドップラー機能を持つレーダが使われ、噴出物の上昇・下降速度が求められた（Hort and Seyfried, 1998 ; Hort et al., 2003 ; Donnadieu 2012）。2010 年代になると、PPI スキャンあるいは RHI スキャンが可能なドップラーレーダによる噴煙観測がおこなわれる（Schneider and Hoblitt, 2013; Melnikov et al., 2016 ; Maki et al., 2019）。偏波機能を備えたレーダを利用した観測は 2000 年の三宅島雄山の噴火で用いられたが、顕著な噴火は捉えられなかった（真木・岩波，2002）。偏波レーダによる噴煙の観測研究は 2010 年代になって盛んになる（Marzano et al., 2012, Oishi et al., 2016; 中道ほか，2018 ; 佐藤，2018）が、現時点で、偏波レーダパラメータの有効性については実証されていない。高感度、高空間分解能の Ka バンドレーダによる観測は Marzano et al. (2015) や Maki et al., (2016) によってなされている。最近の注目すべき研究として、船舶レーダを利用した噴煙柱の発達過程の観測や噴石エコーの検出がある（真木ほか，2020 ; 西ほか，2022）。詳細な国外での気象レーダを用いた噴煙観測の歴史は Marzano et al. (2013) や Hort and Scharff (2016) にある。

本論文では桜島における噴煙観測の現状を概説し、得られた結果を紹介する web サイトについて紹介する。

2. 桜島での気象レーダ降灰モニタリング

2.1 桜島でおこなわれた降灰観測

桜島では、これまで様々な大学や研究機関がそれぞれの目的に沿った観測機器により噴煙のモニタリングが行われてきた（Photo 1 参照）。例えば、X バンド

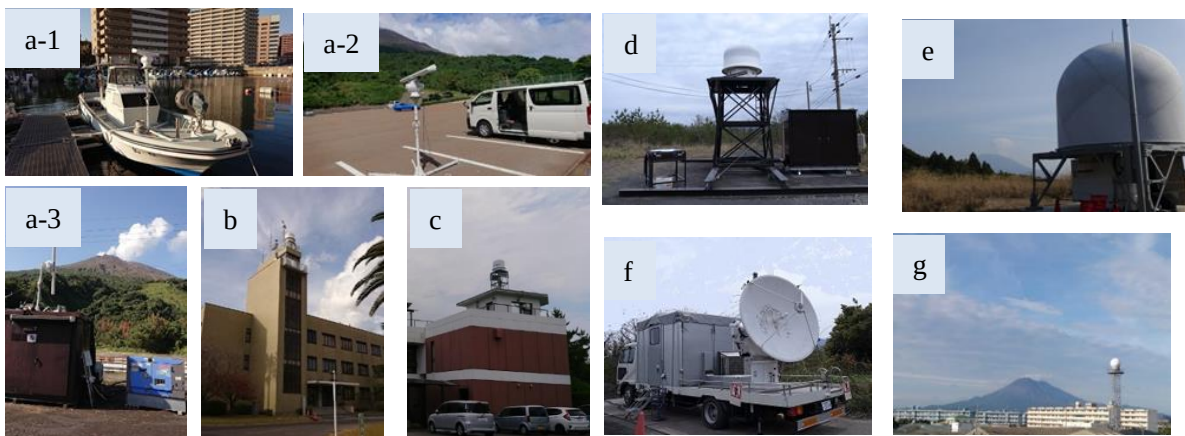


Photo 1. Different types of weather radar used for monitoring Sakurajima volcanic eruption clouds.

- a-1. Mobile observation with X-band solid state marine radar on a small boat (Kagoshima Univ. and Kodan Co.), 1921.
- a-2. Same as a1. except for onshore; a-3. Same as a1. except for stationary observations at Sakurajima.
- b. Ku-band Doppler radar: KuRAD (Kagoshima Univ. and Osaka Univ.), since 2022.
- c. X-band multi-parameter radar (DPRI/Kyoto Univ.), since 2017.
- d. Ku-band multi-parameter radar (MRI/JMA), 2017 – 2021; e. X-band multi-parameter radar (MRI/JMA), since 2017.
- f. Ka-band Doppler radar (NIED), 2015; g. X-band multi-parameter radar (MLIT), since 2012.

MP レーダによる噴煙柱観測（京都大学防災研究所，気象庁気象研究所，国土交通省），Ka バンドドップラーレーダによる噴煙柱の観測（防災科学技術研究所），X バンド船舶レーダによる噴煙柱の観測（防災科学技術研究所），X バンド船舶レーダによる噴煙柱観測（鹿児島大学，光電製作所，北海道大学，FRS コーポレーション，高知大学），Ku バンドドップラーレーダによる降灰観測（鹿児島大学，大阪大学），ライダーによる噴煙の観測（京都大学防災研究所），ドローンによる噴石や気象場の鉛直プロファイルの観測（京都大学防災研究所，日本気象協会），高速度カメラ撮影による噴石の観測（山形大学），高感度カメラによる噴煙監視（気象庁，国土交通省），光学式ディストロメータによる降灰粒子の観測（京都大学防災研究所，気象庁気象研究所），地上の降灰堆積物のサンプリング（国土交通省，鹿児島県，鹿児島市）などがある。

このため，過去 10 年間に桜島で発生した顕著な噴火事例の降灰量分布のデータベース化を開始した．本稿では VASH（Database of Sakurajima Volcanic Ash Fall Distributions）と名付けられたデータベースの概要と公開される降灰情報の例を紹介する．最初に，降灰量情報を求めるために利用される現業気象レーダと研究用気象レーダ，観測されたレーダデータから降灰情報を求めるための解析システムについて紹介する．

2.2 現業気象レーダによる観測

本研究が対象としている南九州地方の火山と利用可能な現業用気象レーダの配置と定量的な観測エリアを Fig.1 に示す．レーダの定量的解析範囲には新燃岳，桜島，口永良部島，薩摩硫黄島が含まれる．Table 1 に各レーダから桜島南岳火口までの距離，火口直上でのレーダビームの観測高度，ビーム幅を示す．表から明らかに，桜島の降灰分布のモニタリングに適しているのは垂水の X バンド MP レーダであるが，大正噴火級の噴火が発生した場合には，他の C バンドレーダで広域の降灰分布をカバーする必要がある．新燃岳，口永良部島，薩摩硫黄島などは，探知距離のある国見山や種子島の C バンドレーダを利用する必要がある．

2.3 研究用気象レーダによる観測

日常的に噴火を繰り返している桜島では，いくつかの大学や研究機関が独自の研究用レーダを設置して観測をおこなっている．Fig. 2 に現在，稼働中の研究用レーダの設置場所を示す．なお，図には全てのレーダの設置場所が示されている訳ではない．図中には示されていない研究用レーダや過去に観測がおこなわれたが現在は撤去されている研究用レーダを Table2 に掲載



Fig. 1 Target volcanoes and operational weather radars in the South Kyushu region. The locations of the volcanoes and the weather radars are shown by triangles and plus signs, respectively. KGS: C-band Doppler radar at Kagoshima airport, TRM: X-band polarimetric radar at Tarumizu, KNM: C-band polarimetric radar at Kunimiyama, and TNG: C-band polarimetric radar at Tanegashima. Circles show the quantitative observation area of each radar.



Fig. 2 Locations of the research weather radars (MRN-1, MRN-2, MRN-3, MRN-4, SVO-XMP, KuRAD) used for monitoring Sakurajima volcanic eruption clouds. The small white circles with three letter abbreviations indicate the locations of Parsivel+.

した。

鹿児島大学は2017年に高速スキャンが可能なKuバンドドップラーレーダを導入した。このレーダはKuRADと名付けられ、噴煙のモニタリング技術の向上と噴煙柱の発達過程を調べるために黒神川左岸に設置された (Maki et al., 2019)。その後、KuRADは霧島の新燃岳の観測のために宮崎県高原町へ移設され霧島新燃岳の噴火活動の観測に利用された。2021年には鹿児島大学水産学部1号館の屋上に移設され、桜島の降灰のリアルタイム配信実験に用いられている (西ほか, 2022)。

京都大学防災研究所は、2017年から桜島を含む南九州の5か所の火山でXバンドMPレーダによる観測

を開始した (中道ほか, 2018)。桜島では、噴煙の鉛直構造を調べるためにセクターRHI観測が採用されている。図には示されていないが、気象庁気象研究所はXバンドMPレーダを国分に設置し、北から桜島の噴煙モニタリングをおこなっている。短期間ではあるが、2014年の4月から6月の約3ヶ月間、防災科学技術研究所がKaバンドドップラーレーダを黒神観測点に設置し、セクターRHI観測を実施した (Maki et al., 2016)。

鹿児島大学と京都大学防災研究所は、新たな試みとして、2018年に船舶レーダによる噴煙モニタリングに関する共同研究を行いその有効性を明らかにした (真木ほか, 2020 ; Kobori et al., 2022)。2021年からは次世

Table 1 Distance, height, and width of the operational weather radar beam above the Minami-dake vent of Sakurajima volcano.

Radar	Distance	Beam height above vent	Beam width above vent	Note
TRM	11 km	1.2 km - 4.0 km	190 m	X-band polarimetric radar, MLIT
KNM	45 km	1.1 km - 1.7 km	790 m	C-band polarimetric radar, NKIT
SKD	180 km	3.8 km - 5.4 km	3,140 m	C-band polarimetric radar, MLIT
TNG	109 km	4.4 km - 14.0 km	1,900 m	C-band Doppler radar, JMA
FKO	208 km	7.9 km - 13.7 km	3,630 m	C-band polarimetric radar, JMA
KGS	25 km	1.3, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 2.9, 3.4, 4.0, 2.9, 3.4, 4.0, 4.8, 5.8, 7.0, 8.5, 10.5, 13.0 km	260 m	C-band Doppler radar, JMA

Table 2 Research radars used for observations of Sakurajima volcanic eruption clouds.

Radar	Band, Type	Obs. period	Scan mode	Location	Distance to Vent, AZ	Beam width above vent	Note
KuRAD	Ku, Dop	2022.10 – present	Spiral	N31.56801°, E130.55735°, 1+h m	9.8 km, 82.4°	3 513 m	Kagoshima Univ, Osaka Univ. Maki et al. (2019) Nishi et al. (2022)
MRN-1	X, Dop	2021.5 – present	RHI	N31.58991°, E130.60131°, 25+h m	5.6 km, 101.6°	2150 m (117 m)	Kagoshima Univ., KODEN
MRN-2	X	2018.3 – 2018.5 2019.6 – 2019.12 2021.5 – present	RHI	N31.58360°, E130.70150°, 65+h m	4.0 km, 263.6°	1536 m (84 m)	Hokkaido Univ. Maki et al. (2020)
MRN-3	X, Dop	2022.6 – 2022.12	RHI	N31.55624°, E130.66763°, 30 m	2.7 km, 343.2°	1037 m (57 m)	Kagoshima Univ., KODEN
MRN-4	X,	Irregular	PPI	N31.56801, E130.55735°, 1+h m	9.8 km, 82.4°	3763 m (205 m)	Kagoshima Univ
SVO-XMP	X, Pol	2017 – present	SRHI	N31.58960°, E130.60120°, 25+h m	5.6 km, 101.6°	293 m	DPRI/Kyoto Univ. Nakamichi et al. (2018)
KNK-XMP	X, Pol	2017 – present	SPPI	N31.44564°, E130.50717°, 135 m	20.7 km, 44.2°	1084 m	DPRI/Kyoto Univ. Nakamichi et al. (2018)
MRG-XMP	X, Pol	2017 – present	SRHI	N31.66735°, E130.60225°, 452 m	11.1 km, 150.9°	581 m	MRI/JMA
TAK-XMP	X, Pol	2014.2 – 2020.8	SPPI	N31.60411°, E130.50903°, 128 m	14.5 km, 100.8°	759 m	Kobe Univ. Oishi et al. (2016)
KRK-KuMP	Ku, Pol	2016 – 2021	Spiral	N31.58347°, E130.70172°, 70 m	4.0 km, 263.9°	209 m	MRI/JMA Satoh (2018)
KRK-Ka	Ka, Dop	2014.4 – 2014.6	SRHI, SPPI	N31.58347°, E130.70172°, 69 m	4.0 km, 263.9°	21 m	NIED Maki et al. (2016)

代の船舶レーダである固体化船舶レーダによる噴煙観測を開始した（西ほか，2022）。

2.4 光学式ディストロメータによる観測

気象レーダによる降灰のモニタリングに加えて，光学式ディストロメータによる降灰モニタリングが京都大学防災研究所によりおこなわれている．使用されているディストロメータは2011年にOTT社が開発したParsivel²である．ParsivelはPARticleSize and VElocityの略で，そのプロトタイプは2000年に降水粒子の観測用に開発された（Löffler-Mang and Joss, 2000）。

Parsivel²の外観をFig. 3に示す．Parsivel²による落下粒子の測定原理は次の通りである．発光部と受光部の間に180 mm×30 mm×1 mmの水平平板状のレーザー計測面が形成される．計測面を粒子が通過するときに発生する電圧降下とその継続時間から，落下粒子の直径と落下速度が計算される．桜島では計21台のParsivel²が島内に設置され（Fig. 2 参照），1分毎の粒径分布と落下速度のデータが蓄積されている．データの詳しい解析方法は真木・井口（2022）にある．

2.5 気象レーダ降灰データ解析システム

Fig. 4に「気象レーダ降灰データ解析システム」（以降，解析システム）の構成と取得されたデータの解析から結果の外部配信までの流れを示す．「解析システム」はいくつかのブロックから構成される．鹿児島大

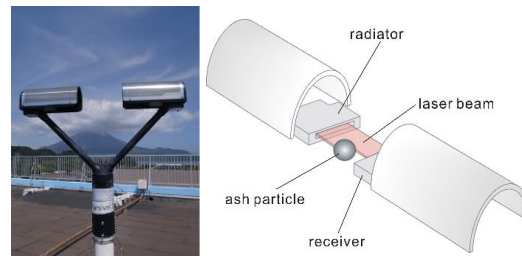


Fig. 3 Left: Outlook of Parsivel². Right: Schematic picture of ash particle measurement.

学水産学部で運用をされているブロックは【KuRAD】，【Marine radar】，【ANT3D】の3つである．それぞれのブロックは必ずしも1カ所に集約されている必要はない．2022年4月以降は【KuRAD】と【ANT3D】は鹿児島大学下荒田キャンパスの1号館に集められている．【Marine radar】は機動的な観測のために場所は限定されない．その他のブロックとして，【現業レーダ】（例えば，国土交通省XMPレーダや気象庁のCバンドレーダ），【DPRIレーダ】（DPRIの研究用小型XバンドMPレーダ）がある．また，降灰情報の配信と表示の役割を果たすブロックとして【サーバ】，【サイネージ】，【エンドユーザ】ブロックがある．これらは必ずしも「解析システム」に物理的に接続されている必要はない．各構成ブロックは単独でも運用できるようになっている．また，必要の無いブロックの削

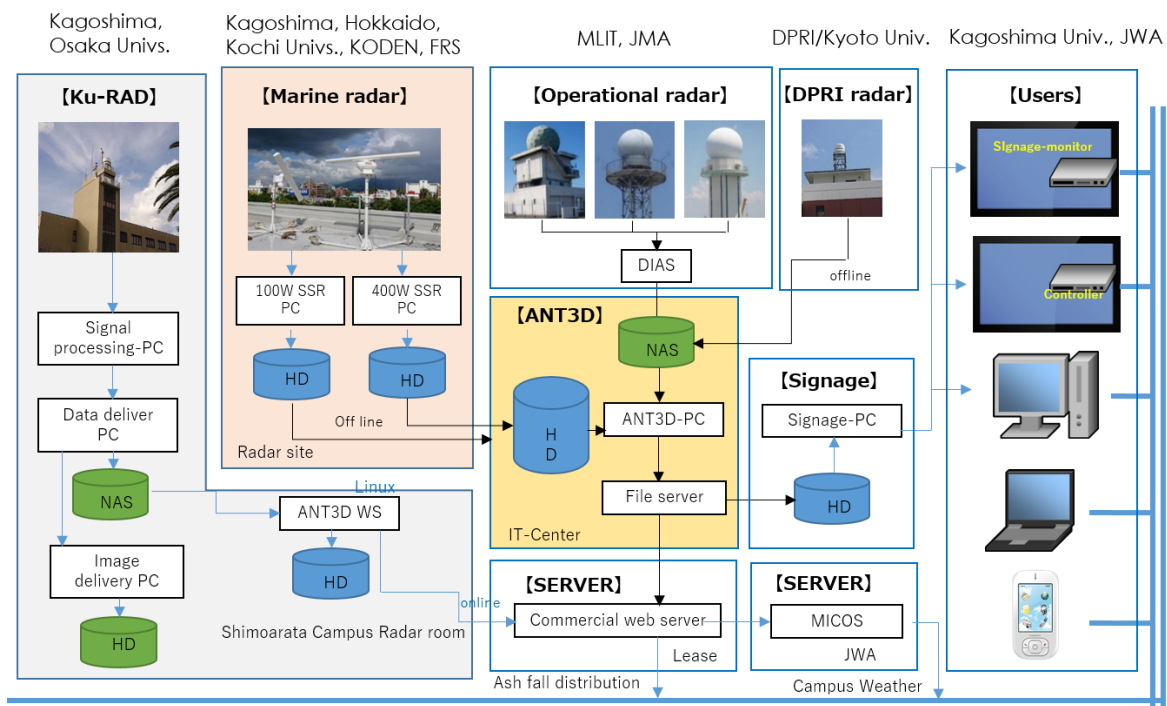


Fig. 4 Weather radar data analysis system of volcanic ash clouds.

除, 新たなブロックの追加が可能である. このことから, 「解析システム」は自由度のあるバーチャルなシステムと言える.

「解析システム」のソフトウェアの中核は, 三次元レーダーデータ解析ツール (Analytical Tools for Three-dimensional Weather Radar Data of Eruption Clouds: ANT3D) と名付けられた MATLAB ベースのプログラムである. ANT3D は次に述べる降灰分布データベースに掲載する情報を作成する上で重要な役割を果たす. 以下に, ANT3D から得られる降灰情報の例を説明する.

3. 降灰情報の web 公開

3.1 降灰分布情報の公開サイト

ANT3D で解析された降灰情報はレンタルサーバ上の公開サイト Database of Sakurajima Volcanic Ash-fall Distributions: VASH で公開される (<https://vash.jp/>). VASH のトップページを Fig. 5 に示す. VASH は市販のテンプレートを基に作られており, 検索機能を備えている点が大きな特徴である. トップページの下部に 4 つの検索用ボタンがあり, 噴火の年月, 噴煙高度などの他に噴石, 火砕流, 空振などのキーワードを指定することで該当する噴火を抽出することができる. また, 顕著な噴火事例として大規模な噴火や被害をもたらした噴火を抽出できるボタンも用意されている. 噴火情報の登録と管理は噴火事例 ID を用いておこなう. 独自に用意されたテンプレートを使って一括登録・管理することも, 個々の噴火事例についてマニュアルで登録・管理することも可能になっている.

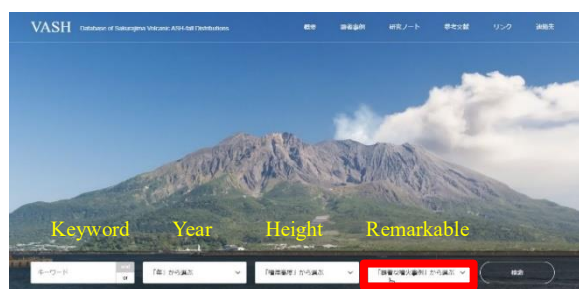


Fig. 5 VASH Home page (<https://vash.jp/>)

3.2 第一階層の降灰情報

VASH を通じてどのような情報が得られるかを紹介するために, 2019 年 11 月 8 日 17 時 24 分に発生した桜島噴火を例に挙げた. 鹿児島地方気象台の火山班の記録によれば, この噴火は南岳火口で発生した爆発的噴火で噴煙柱の最高高度は火口から 5,700 m であった.

VASH のトップページで噴火発生の年月日から検索すると Fig. 6 に示したような, 当該噴火の基本情報 (第一階層の情報) が表示される. この噴火情報は, 19-0245 という ERUPTION ID がつけられて管理される. この ID は VASH で便宜上に付けられたもので, 最初の 2 桁の数値は西暦の下二桁である. ハイフン以降の 4 桁の数値はその年の噴火の通し番号で, 鹿児島地方気象台が公開している噴火リストの通し番号と一致する. 噴火の基本情報として, 噴火年月日と時刻, 気象庁発表の噴煙高度, 国土交通省垂水レーダから求められた総降灰量と総降灰面積がある. 降灰分布が視覚的にわかるように, 国土交通省の垂水 X バンド MP レーダ観測から求めた降灰量分布図と降灰時間分布図が表示されている.

Fig. 6 には, 詳細な情報 (第二階層の情報) の有無が表示される. 例えば, 噴煙の写真, 国土交通省 XMP レーダーデータの三次元解析結果や, 大学や研究機関のレーダーデータの解析結果, 船舶レーダより観測された噴煙柱の発達の様子, ディスドロメータ観測から得られた降灰粒子の情報等である. これらの情報は必ずしも全ての噴火について用意されている訳ではないが, 閲覧が可能な情報にはリンクがはられ第二階層の降灰情報をダウンロードすることができる. 具体的な例を以下に示す.

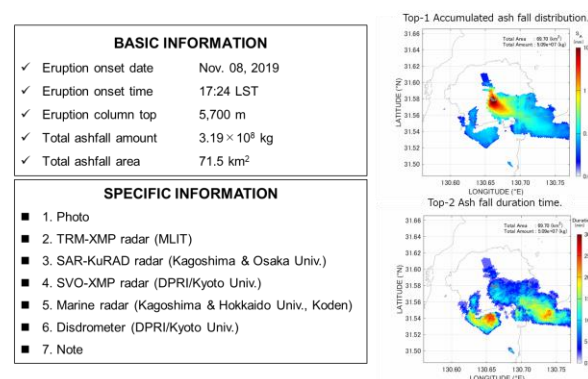


Fig. 6 Example of a search result page. Basic information and available specific information are presented on the page.

3.3 第二階層の降灰情報

第二階層の降灰情報の多くは動画ベースである. これは VASH の大きな特徴の一つであり, 降灰の時間変化を直感的に理解できるようになっている. 各動画には URL 情報が付加されているので, ユーザは必要ならダウンロードして閲覧することが可能である. 以下, 第二階層の降灰情報の例を紹介する.

1) Photo

噴火直後の噴煙の発達の様子をタイムラプス動画で紹介する。例として Fig.7 に示した噴煙の写真は熊本大学の飯野准教授から提供されたもので、動画は下記からダウンロードできる。

https://vash.jp/images/skr19-0245_photo-01.mp4

https://vash.jp/images/skr19-0245_photo-02.mp4

動画は錦江町と垂水市の二カ所から撮影された 1 分毎のコマ撮り画像である(飯野・金柿, 2008)。噴火直後の火口から真上に成長する噴煙柱とその後の風に流されて垂水方面に広がっていく噴煙の様子が捉えられている。

Web カメラの噴煙画像は、京大防災研、気象台、大隅河川国道事務所、南日本新聞などでも撮影・公開されている。様々な地点から撮影された噴煙画像は噴火の様子を理解するのに有効であることから、所有者の許可を得てこれらの画像も VASH で収集・公開する予定である。

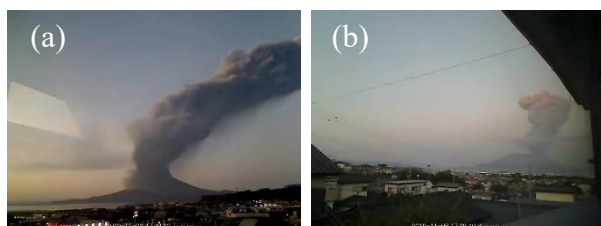


Fig. 7 Time lapse videos from (a) Tarumizu and (b) Kinkowan, Kagoshima (courtesy of Dr. Iino, Kumamoto Univ.).

2) TRM-XMP

国土交通省垂水 X バンド MP レーダ(本論文では TRM-XMP と名付けた)の観測データの解析結果が紹介されている。二仰角 PPI 法から求められた降灰量分布と降灰観測時間の分布 (Fig.8(a)と Fig. 8(b)) が動画で示されている。動画は下記からダウンロードできる。

https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_mlit-01.mp4

https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_mlit-02.mp4

動画によれば、降灰量の分布は火口付近ほど多く 10mm 以上の降灰深となっている。時間の経過とともに降灰域は風下である南東方向に弱まりながら伸びている。興味深いのは、降灰継続時間は火口付近では 10 分程度であるのに対して、火口から約 8 km 離れた所で約 25 分と長くなっている点である。

総降灰量と降灰面積の時間変化をそれぞれ Fig. 8(c)と Fig.8(d)に示す。総降灰量は噴火から 20 分後位まで

急速に増加し、その後の 30 分は緩やかに増加している。噴火から 50 分経過すると降灰量の増加は認められない。噴火継続時間は噴火から噴火後 50 分まではほぼ線的に増加している。Fig. 8 (c)と Fig.8 (d)はそれぞれ下記からダウンロードすることができる。

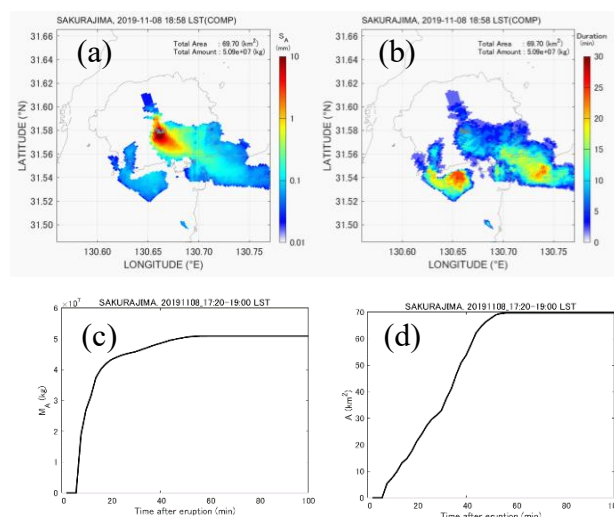


Fig. 8 (a) Accumulated ash fall distribution and (b) ash fall duration time. Temporal changes of (c) total ash fall amount and (d) total ash fall area.

https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_mlit-03.png

https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_mlit-04.png

3) SAR-KuRAD

鹿児島大学と大阪大学が共同でおこなっている Ku バンドドップラーレーダの観測情報である。桜島火山の当該レーダによる観測は 2017 年と 2022 年であるため、本事例の観測データは無い。KuRAD の観測範囲は鹿児島市の中心部をカバーしているため、噴煙が西へ流れるケースが増える夏期の噴火の降灰情報が期待される。

4) SVO-XMP

京都大学防災研究所桜島火山観測所 X バンド MP レーダ(本論文では SVO-XMP と呼ぶ)の観測データの解析結果が紹介されている。TRM-XMP が噴煙の水平分布の情報であったのに対して、SVO-XMP は鉛直断面での噴煙の情報である。噴煙の鉛直構造の時間変化が二通りの方法で示されている。第一は三次元表示で、11 方位角のセクター鉛直断面観測データから三次元格子データを作成している。Fig. 9 (a)と Fig. 9 (b)はそれぞれ、噴煙のレーダ反射因子の分布を真上から

眺めた図 (top view) と斜め上から眺めた図 (bird's eye view) である。内部の様子がわかるようにボリュームレンダリングの手法が使われている。Fig. 9 の動画は下記からダウンロードすることができる。

https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_svo-01.mp4

https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_svo-02.mp4

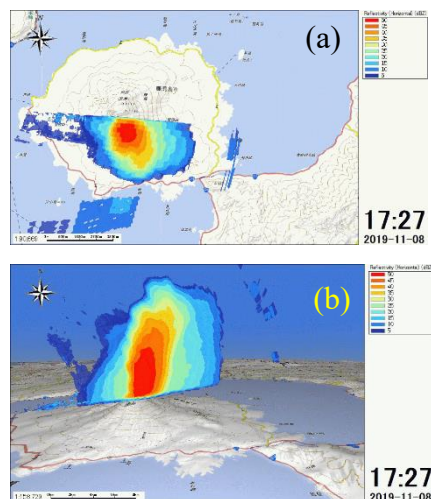


Fig. 9 Tree-dimensional view of the eruption column. (a) Top view and (b) Bird's eye view.

もう一つの手法は 11 方位角の鉛直観測断面のデータを積算して 1 枚の鉛直断面上に表示する方法である (Fig. 10 を参照)。この方法の利点は、セクター観測範囲内での噴煙の鉛直方向の発達を一目で把握することが出来る点である。レーダ反射因子とドップラー速度の二種類のデータが表示されており、前者からは噴煙の量に関する情報が、後者からは噴煙の動きに関する情報が得られる。Fig. 10 の動画は下記のサイトからダウンロードできる。

https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_svo-03.mp4

https://vash.jp/images/skr19-0245_xmp_svo-04.mp4

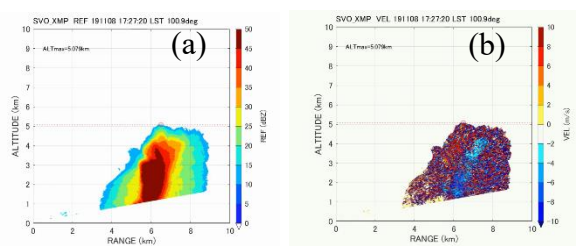


Fig. 10 Developments of the eruption column: (a) reflectivity and (b) Doppler velocity.

5) 船舶レーダ

鹿児島大学・光電製作所、北海道大学、FRS の船舶レーダ観測情報が紹介されている。前述した SVO-XMP の噴煙の鉛直構造の観測時間間隔が約 2 分毎であるのに対して、船舶レーダの観測時間間隔は約 2.5 秒と短いことが最大の特徴である。これにより、噴火直後の変化の激しい噴煙柱の成長過程を捉えることが可能である。また、噴石などが飛散する様子も捉えられる可能性がある。動画には、噴火後、噴煙柱が鉛直方向に発達後、火口から約 4000m の高度に達する様子が示されている。Kobori et al. (2022)の手法を用いて求めた、噴煙高度と噴煙の上昇速度の時間変化が図に示されている。それによれば、噴火直後の爆発で噴煙は 80m/s を越える速度で上昇し、その 20 秒後に次の噴火が発生し最大で約 30m/s の速度で上昇する。噴煙が 4000m の高度に達するのは噴火から約 3 分後である。Fig. 11 の動画と画像は下記からダウンロードできる。

https://vash.jp/images/skr19-0245_marine-01.mp4

https://vash.jp/images/skr19-0245_marine-02.png

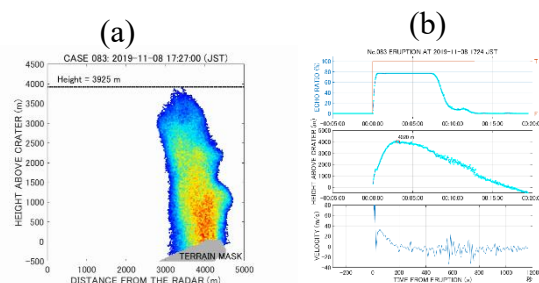


Fig. 11 (a) Development of the eruption column and (b) temporal change of the echo top height and upward motion.

6) Disdrometer

京都大学防災研究所の Parsivel² の観測データの計 6 種類の解析結果が紹介されている。Figure 12 は降灰粒子の落下速度の頻度分布で粒径による変化を示した図である。観測点は有村坑道 (ART) 点で、Parsivel² は 17 分間の降灰粒子のデータを収集している。ベキ乗式を仮定して求めた降灰粒子の落下速度と粒径との関係式は $V=4.08D^{0.586}$ であった (図中実線で示した曲線)。これは雨滴の落下速度 (図中の破線で示した曲線) に近い関係式である。

二番目から四番目の情報は粒径分布に関するものである。ガンマ分布で近似した 1 分毎の粒径分布が重ね合わせて示されている。また、粒子の総個数 (N_T)、ガンマ分布の各パラメータ (N_w , D_m , μ) の時間変化や、粒径分布が降灰強度との関係が時系列グラフに示

されている。これらの粒径分布に関する知見は、降灰の移流拡散モデルの素過程を記述する際に有効である。

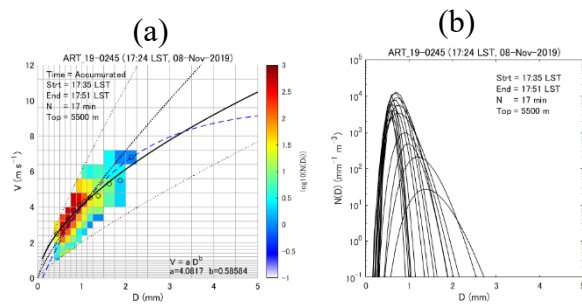


Fig. 12 (a) Distributions of particle fall speeds and (b) particle size distributions (PSD).

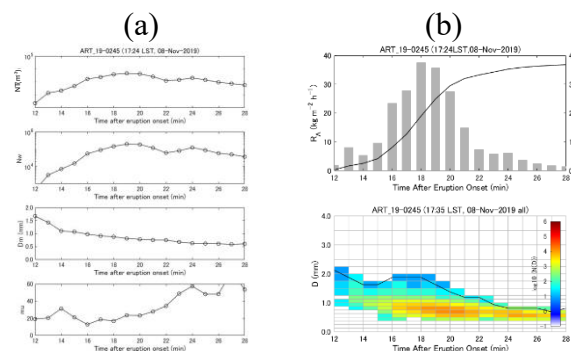


Fig. 13 Temporal changes of (a) gamma PSD parameters and (b) ash fall rate and PSD.

Fig. 12 と Fig. 13 の各図は下記からダウンロードできる。

https://vash.jp/images/skr19-0245_disdro-01.png

https://vash.jp/images/skr19-0245_disdro-02.png

https://vash.jp/images/skr19-0245_disdro-03.png

https://vash.jp/images/skr19-0245_disdro-04.png

五番目と六番目の情報は定量的降灰量推定式である。得られた関係式は降灰粒子の粒径分布から得られる理論式である。どちらの散布図も変数間のばらつきが大きいが、 $R_A = 2.26 \times 10^{-2} Z_A^{0.993}$ および $C_A = 1.46 \times 10^{-7} Z_A^{1.33}$ が得られた。これらの関係式はレーダによる定量的降灰量推定に必要不可欠な式である。

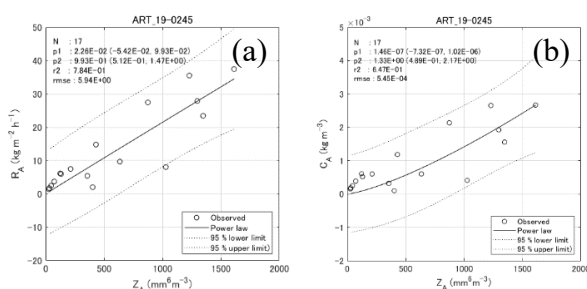


Fig. 14 (a) R_A - Z_A and (b) C_A - Z_A relationships.

Fig. 14 の図は下記からダウンロードできる。

https://vash.jp/images/skr19-0245_disdro-05.png

https://vash.jp/images/skr19-0245_disdro-06.png

4. まとめ

噴煙モニタリングに気象レーダが有効であることが国内外で示されている。本研究は、レーダ降灰情報をデータベース化し web 上で公開することにより火山防災に役立てることを目的にしている。

データベース化は火山防災での利用以外にも、統計解析や事例解析を通じて、火山噴煙内の微物理過程の理解に役立つであろう。今後の課題として、ドップラー速度や偏波レーダパラメータの活用が挙げられる。

ドップラー速度情報は噴煙のダイナミクスに新たな知見を与える。本論文では触れなかったが、比偏波間位相差や反射因子差などの偏波レーダパラメータは大気中の降灰粒子の凝集過程、rainout（雨による噴煙粒子の雲内除去）、washout（雨による雲底下除去）などの微物理過程の定量的な評価に利用できるかも知れない。

最後に、桜島では噴火に伴う地殻変動パラメータがデータベース化されつつあり、本研究で紹介したレーダ降灰量のデータベースと連携を図ることにより分野間を横断した研究が加速することを期待したい。

謝辞

本研究の降灰分布データベースの化に関しては JSPS 科研費(課題 22K03760)の助成を受けた。また、KuRAD および船舶レーダによる観測では内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP ii)」の助成を受けた。京都大学の SVO-XMP レーダおよびディストロメータの観測データは文部科学省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト (JPJ005391)」の中で収集された。国土交通省 X バンド MP レーダのデータは「データ統合・解析システム (DIAS)」からダウンロードした。船舶レーダの利用に際しては、北大の藤吉名誉教授、FRC の徳島氏、光電製作所の海賀氏の協力を得た。また、データベースの一部の噴煙画像は熊本大学飯野准教授の提供による。ここに記してこれらの方々に感謝します。

参考文献

- 飯野直子・金柿主税 (2008) : 桜島火山デジタルコンテンツの作成. 熊本大学教育学部紀要, 自然科学, 57, 33-41.
- 佐藤英一 (2018) : Ku バンド高速スキャンレーダーによる降水コアの観測と気象レーダーを用いた火山噴煙観測計画について. 気象研究ノート第 237 号「気象レーダー60年の歩みと将来展望」, pp. 246-251.
- 澤田可洋 (2003) : 気象レーダーで観測された噴煙エコーの記録. 測候時報, 70.4, pp. 119-169.
- 内閣府火山防災に係る調査企画委員会(2020) : 降灰の現地調査の連携・データ共有について (報告). 9pp. <https://www.bousai.go.jp/kazan/taisakukaigi/pdf/daillikai/siryo4-1.pdf> (2022 年 12 月 18 日閲覧)
- 中道治久・井口正人・下村 誠・竹中悠亮(2018) : 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第 61 号 B, pp. 337-343.
- 西 隆昭・真木雅之・牛尾知雄・今井克之・海賀和彦・藤吉康志(2022) : Ku バンド高速スキャンレーダと船舶用レーダによる桜島噴煙観測. 鹿児島大学水産学部紀要, 第 71 巻, pp. 1-6.
- 真木雅之・井口正人(2022) : 光学式ディストロメータにより測定された桜島降灰粒子の解析. 京都大学防災研究所年報第 65 号 B, pp. 77-96.
- 真木雅之・岩波 越 (2002) : マルチパラメータレーダによる三宅島雄山の噴煙観測, 防災科学技術研究所研究資料, No.226, pp. 1-21.
<http://doi.org/10.24732/nied.00001840>
- 真木雅之・小堀壮彦・西 隆昭・藤吉康志・徳島秀彦・佐藤英一・井口正人・爲栗 健 (2020) : 船舶レーダによる桜島火山の噴煙柱モニタリング -2018 年の観測結果-. 京都大学防災研究所年報, 63B, pp. 136-148.
- Donnadieu F. (2012): Volcanological applications of Doppler radars: A review and examples from a transportable pulse radar in L-band Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications', (Eds Bech J. and Chau J.L.), IntechOpen, pp. 409-446.
- Harris, D. M., Rose, W. I. Jr., Roe, R., and M. R. Thompson (1981): Radar observations of ash eruptions, in the 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington, edited by P. W. Lipman and D. R. Mullineaux, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1250, pp. 323-333.
- Harris, D. M., and Rose, W. I. (1983): Estimating particle sizes, concentrations, and total mass of ash in volcanic clouds using weather radar. AGU Publications, 88(C15), pp. 10969-10983. doi.org/10.1029/JC088iC15p10969
- Hort, M., and R. Seyfried (1998): Volcanic eruption velocities measured with a micro radar. Geophys. Res. Lett., 25, pp. 113-116.
- Hort, M., R. Seyfried and M. Vöge (2003): Radar Doppler velocimetry of volcanic eruptions: theoretical considerations and quantitative documentation of changes in eruptive behaviour at Stromboli volcano, Italy. Geophysical Journal International, 154(2), pp. 515 - 532. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01982.x>
- Hort, M., and L. Scharff (2016): Detection of airborne volcanic ash using radar. In: Mackie, S., Cashman, K., Ricketts, H., Rust, A., Watson, M. (Eds.), Volcanic Ash: Hazard Observation. Elsevier, pp. 131-160.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100405-0.00013-6>
- Kobori, T., M. Maki, Y. Fujiyoshi, M. Iguchi, S. Fukushima (2022): Estimating volcanic eruption column height and growth rate using X-band marine radar at the Sakurajima Volcano, Sola, 18, pp. 231-235.
<https://doi.org/10.2151/sola.2022-037>
- Löffler-Mang, M. and J. Joss (2000): An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. J. Atmos. Ocean. Technol., 17, pp. 130-139.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2)
- Maki, M., M. Iguchi, T. Maesaka, T. Miwa, T. Tanada, T. Kozono, T. Momotani, A. Yamaji, and I. Kakimoto (2016): Preliminary Results of Weather Radar Observations of Sakurajima Volcanic Smoke. J. Disast. Res., 11, pp. 15-30.
- Maki, M., S. Takahashi, S. Okada, K. Imai, and H. Yamaguchi (2019): Ku-band high-speed scanning Doppler radar for volcanic eruption monitoring. J. Disast. Res., 14, pp. 630 - 640. <https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0630>

- Marzano, F.S., Picciotti, E., Vulpiani, G., and Montopoli, M. (2012): Synthetic signatures of volcanic ash cloud particles from X-band dual-polarization radar. in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 50, pp. 193 – 211. doi: 10.1109/TGRS.2011.2159225
- Marzano F.S., Mereu L, Montopoli M, Cimini D, Martucci G. (2015): Volcanic Ash Cloud Observation using Ground-based Ka-band Radar and Near-Infrared Lidar Ceilometer during the Eyjafjallajökull eruption. *Ann. Geophys.* [Internet]. 2015Mar.3 [cited 2022Dec.18];57. Available from: <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/6634>
- Marzano, F. S., E.Picciotti, M. Montopoli, G. Vulpiani (2013): Inside Volcanic Clouds: Remote Sensing of Ash Plumes Using Microwave Weather Radars.. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, pp. 1567–1586.
<http://dx.doi.org?10.1175/BAMS-D-11-00160.1>
- Melnikov, V., R. Murnan, and D. Burgess (2016): Detecting and tracking of airborne volcanic ash with the WSR-88Ds. Report on task 8 of 2016 ROC MOU, 55pp.
- Oishi, S., M. Iida, M. Muranishi, M. Ogawa, R.I. Hapsari, and M. Iguchi (2016): Mechanism of Volcanic Tephra Falling Detected by X-Band Multi-Parameter Radar. *J. Disast. Res.* 11, pp. 43 – 52.
- Schneider, D.J., and R.P. Hoblitt (2013): Doppler weather radar observations of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 259, pp. 133-144.

(論文受理日 : 2023 年 8 月 31 日)