

桜島大規模噴火を想定した気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォーム

眞木雅之¹・西隆昭²・小堀壮彦³・牛尾知雄⁴・海賀和彦⁵・今井克之⁶・徳島秀彦⁷

川原一枝¹・佐野香那¹・藤吉康志⁸・木下紀正⁹

¹ 鹿児島大学地震火山地域防災センター, ² 鹿児島大学水産学部, ³ 三菱スペース・ソフトウェア株式会社, ⁴ 大阪大学工学部, ⁵ 株式会社光電製作所, ⁶ 住友電設株式会社
⁷ FRS コーポレーション, ⁸ 北海道大学名誉教授, ⁹ 鹿児島大学名誉教授

1. はじめに

計 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、火山噴火により放出される噴出物は様々な形の被害をもたらす。例えば噴火直後の噴石の飛散は住民、建物、農作物などへの直接的な被害をもたらす。噴火後、大気中に漂う火山灰は航空機の操縦席窓ガラスへの付着やエンジンの停止を引き起こす。市街地への降灰は鉄道などの陸上交通を麻痺させ日常生活や経済活動に影響を及ぼす。さらに、呼吸器疾患などの人体への被害をもたらす。近い将来、大規模噴火の発生が予測されている桜島の場合、大量に噴出される火山灰は人口約 60 万人を抱える鹿児島市を始め桜島周辺の地域に甚大な被害をもたらすことが懸念される。このような火山灰による被害を防ぐためには、噴火現象を検出することに加えて、放出される火山灰を監視しその分布を予測する技術を開発し、事前・事後の効果的な火山灰対策に活用する必要がある。このような社会的な要請に応えるために、鹿児島大学地震火山地域防災センターは、プロジェクト研究「大規模火山噴火にレジリエントな地域社会の実現に向けた防災減災の取り組み」(2016年～2021年)を立ち上げ、1) 降下火砕物の空間的予測手法や噴火被害の定量的評価手法の開発、2) 桜島及び島嶼部の火山を対象にした定量的な被害想定、更に、3) 平時の備えから災害発生時の防災対応、復旧復興までの一連の防災減災対策に資する防災情報の発信に関する研究をおこなった。本報告は、上記の研究項目 1) および研究項目 3) の中で開発した気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォームについてまとめたものである。

本報告書の構成は次の通りである。まず、本研究プロジェクト以前に鹿児島大学でおこなわれていた火山噴煙観測研究のレビューをおこなう。次に、気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォームの概要と各構成ブロックについて説明する。最後に、開発したプラットフォームの出力例を紹介し今後の展望について述べる。参考として、国内外での気象レーダによる噴煙観測のレビュー表を付録 A に掲載した。また、気象レーダモニタリングプラットフォームの開発に関連して鹿児島大学が実施した科研費研究、共同研究、受託研究の一覧を付録 B に掲載した。

2. 火山噴煙観測研究のレビュー

2.1. 現業気象レーダによる観測

澤田(2003)はスミソニアン協会の火山噴火活動報告と著者自身の調査から、2003年までの気象レーダによる噴煙の観測例を報告している。それによれば、噴煙エコーの世界で最初の観測例は1970年5月5日のアイスランドの Hekla 火山であると考えられる。この観測事例では、高度が

5300 フィートの噴煙が報告されている。観測事例が最も多い我が国では、1974 年 7 月 14 日の国後島北東部の爺々岳の噴火が最初のレーダ観測例である。この事例では風下側に筋状に伸びる噴煙エコーが PPI 画面に表示され、その時間変化が記録された。但し、当時のレーダエコーのスケッチや記録には積雲あるいは対流性エコーとの記述があり、当時の釧路気象台の職員が噴煙エコーと認識していたかどうかは定かではない。恐らく、現業レーダによる本格的な噴煙研究は 1980 年と 1982 年に発生した米国の St Helens の噴火であろう。この噴火はポートランドに設置された NOAA の S バンドレーダ (WSR-74) とシアトルに設置された FAA の L バンドレーダにより観測され、定量的な降灰量推定の研究が Harris et al. (1981) と Harris and Rose (1983) によってなされた。国内外での、現業用気象レーダによる噴煙観測例の一部と研究用気象レーダによる噴煙観測研究を本報告書の付録 A にまとめた。

2.2. 鹿児島大学・熊本大学噴煙研究グループによる研究

鹿児島大学で噴煙研究が開始されたのは 1980 年代後半である(木下, 1989; 木下・吉田, 1990)。本格的に開始されたのは 2002 年で、木下を中心とする噴煙研究グループは「南西諸島における火山噴煙の観測解析と配信」プロジェクトを立ち上げ、諏訪之瀬島・薩摩硫黄島の噴煙映像ネットワークカメラシステムを構築した。同時に桜島の多点観測体制が強化された。2003 年には「西太平洋域における火山噴煙自動観測体制の展開」プロジェクトにより近赤外映像観測が開始される(木下, 2006; 木下ほか, 2006)。これらの研究は、デジタルカメラ、ビデオカメラのインターバル撮影、近赤外ネットワークカメラなどによる噴煙の映像解析を特徴としている。収集された観測記録はアーカイブされ web サイト「火山と噴煙の写真やビデオ映像のページ」で閲覧できる。観測は限られるが、現在も桜島を対象にカメラによる観測が継続されており、2013 年 8 月 18 日の桜島昭和火口の爆発的噴火の映像が紹介されている。

2.3. 気象レーダを利用した新たな展開

筆者は、2013 年に鹿児島大学に赴任し、気象レーダを利用した噴煙柱や火山灰雲の研究を開始した。赴任当初は、ゲリラ豪雨の予測研究や災害情報のデータベース化などが中心で、火山噴煙の研究は京都大学防災研との共同研究の中で開始された。その後、鹿児島大学の火山プロジェクトや受託研究などを実施し噴煙研究が中心となった(付録 B 参照)。噴煙研究の内容を大別すると、1) 気象レーダデータの三次元解析ツールの開発、2) 現業 MP レーダ、研究用レーダ、船舶レーダによる噴煙柱の観測研究、3) 定量的降灰量推定手法および予測手法に関する研究が挙げられる。

第 1 の研究内容「気象レーダデータの三次元解析ツールの開発」では「三次元気象レーダデータ解析ツール (ANT3D: Analytical Tools for Three-Dimensional Weather Radar Data)」と名付けられたソフトウェアが開発された (Maki et al., 2021a; Maki and Kim, 2021)。積乱雲の解析用に開発されていた FORTRAN ベースのプログラムを MATLAB ベースの火山噴火雲の解析用に改良したもので、時空間内挿法による三次元 CAPPI データの作成時にレーダエコーの移流ベクトルを考慮している点が新しい (Maki and Kobori, 2021)。

第2の研究内容「気象レーダによる噴煙柱の観測研究」では、観測のターゲットや目的に応じて様々なタイプの気象レーダが用いられた (Maki et al., 2016; Maki et al., 2019; 真木ほか, 2020)。2017年には政府の補正予算により鹿児島大学に Ku バンドドップラーレーダが導入され Ku-band rapid scanning Doppler radar (KuRAD)と名付けられた (Maki et al., 2019a)。このレーダの特徴の一つは、1分間で噴煙の三次元観測が可能なことである。また、機器一式がコンテナに収納されており南九州地方の火山地域に移動することができる点も特徴の一つである。KuRADによる桜島噴煙柱の観測に加えて、他研究機関のレーダを用いた噴煙柱の観測もおこなわれた。例えば、国立研究法人防災科学技術研究所 (以降, NIED) が所有する、高い空間分解能と高感度の Ka バンドドップラーレーダによる噴煙柱の RHI 観測が 2015 年に実施された (Maki et al., 2016)。京都大学防災研究所 (以降, DPRI) が所有する小型 X バンド MP レーダによる桜島噴煙柱の RHI 観測データが蓄積され、文部科学省のプロジェクト「次世代火山研究と人材育成」(2016-2025) の中で公開されている。鹿児島大学はこのプロジェクトに参加し、過去の顕著な噴火事例のデータを利用して、噴煙柱の鉛直構造の解析を進めている。共同研究をおこなっている気象庁気象研究所から、同研究所の Ku バンド偏波レーダの観測データの提供を受け、噴煙柱の3次元構造の解析をおこなった。

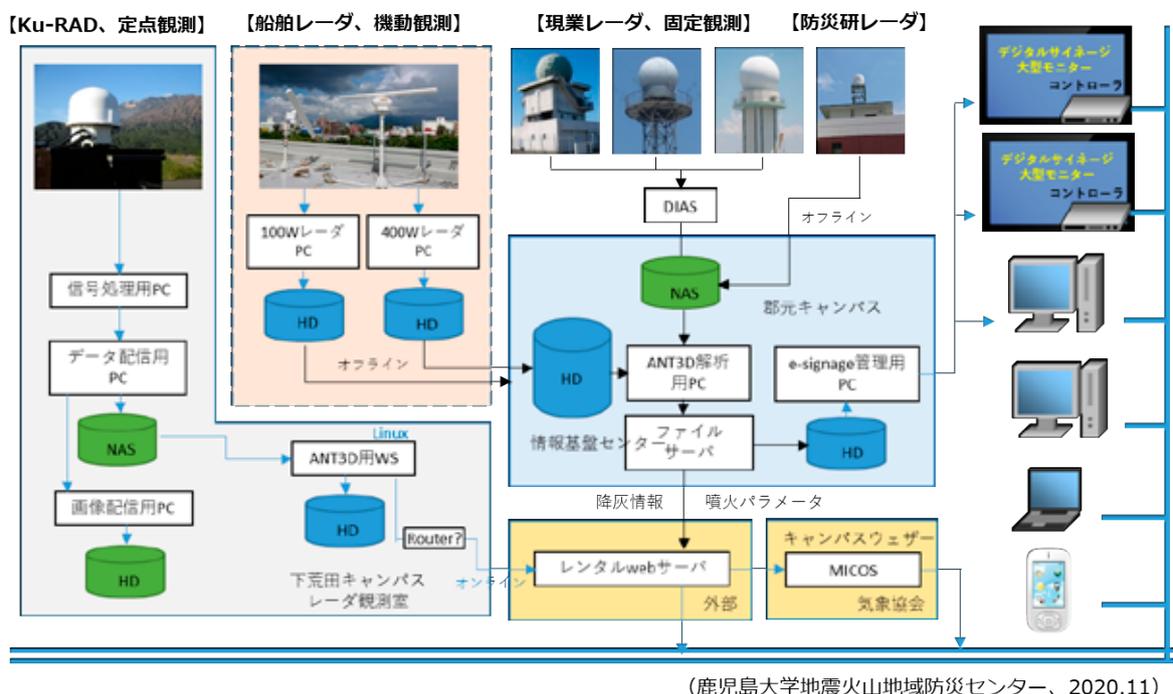
第3の研究内容「定量的降灰量推定手法および予測手法に関する研究」は、気象レーダを用いた噴煙研究の最終目標の一つである。気象レーダの反射因子 Z_A から降灰強度 R_A を計算するいわゆる R_A - Z_A 関係式の導出方法には工学的手法と理学的手法がある。前者は、実際のレーダ観測データと地上で計測された降灰量を比較することにより求める方法である。後者は、降灰粒子の粒径分布モデルから理論的に R_A - Z_A 関係式を求める方法である。工学的手法の例として、真木ほか (2019) は、2013年8月18日の桜島昭和火口の噴火事例で収集された地上の降灰量データと国交省の垂水 XMP レーダの観測データから時間積算降灰量を推定する関係式を求めた。理学的な手法に関して、Maki et al. (2021b) は、DPRI が桜島に展開している光学式ディストロメータ (Parsivel2) で観測された降灰粒子の粒径分布から R_A - Z_A 関係式を導出している。得られた関係式は内閣府プロジェクト「火山降灰等シミュレーション広域被災予測技術開発」(SIP2-II 国家レジリエンス (防災・減災) の強) (2018-2022) の中で過去の桜島噴火事例の降灰分布や総降灰量の推定に利用されている。偏波レーダパラメータを用いる理論的手法で必要不可欠な降灰粒子の形状と落下姿勢に関する研究は、NIED の大型降雨実験施設内でおこなわれた。高度 17m の高さから様々な粒径の降灰粒子を落下させ、地上に設置された 2次元ビデオディストロメータによる個々の粒子の形状と落下姿勢を求めた (Suh et al., 2019)。レーダ反射因子 (Z_{DR}) や比偏波間位相差 (K_{DP}) などの偏波レーダパラメータを利用した降灰強度推定式の理論研究は始まったばかりである。

3. プラットフォームの構成

3.1. 概要

「気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォーム」の構成要素を図 3.1.1 に示す。プラットフォームはいくつかのブロックから構成される。鹿児島大学での運用を考えた場合、プラットフォームの中核は【KuRAD】、【船舶レーダ】、【ANT3D】の3つのブロックである。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 号館に集められる。これ以外のブロックとして、【現業レーダ】(例えば、国交省 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。これらは必ずしも物理的に「気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォーム」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除、新たなブロックの追加が可能である。このことから、「気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォーム」は自由度のあるバーチャルなプラットフォームと言える。以下、各構成ブロックについて説明する。



3.1.1 気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォームの構成。

3.2. KuRAD

このブロックでは、Ku バンド高速スキャンドップラーレーダ (KuRAD) による降灰観測がおこなわれ、収集されたレーダデータはリアルタイムで降灰情報に変換されレンタル web サーバへ転送される。このブロックで用いられる気象レーダ KuRAD は、周波数の有効利用という観点と、積乱雲の高速スキャン観測を目的に大阪大学と住友電工により開発された Ku バンド偏波レーダ (今井ほか, 2008 ; Yoshikawa et al., 2010; Yoshikawa, 2011) を基本にしている。鹿児島大学では、当該レーダの特長であるルネベルグアンテナ (Luneburg, 1944) を利用した高速スキャン性能を活かし、かつ、機動的に火山噴火を観測できるように機器をコンテナに収納した。表 3.2.1 に KuRAD の主な仕様を示す。2015 年度の補正予算により製作を開始し、NPO 法人雷嵐の協力も得て 2017 年 3 月に完成した (真木ほか, 2018)。KuRAD は 2017 年に桜島黒神川左岸に設置され、試験運転期間を含めて約 1 年間、桜島昭和火口で発生する噴煙柱の観測が行われた。その

後、霧島新燃岳の噴火観測のために 2020 年まで宮崎県高原町に設置された。新燃岳の噴火活動が弱まったこともあり 2020 年 7 月に KuRAD は鹿児島大学下荒田キャンパスの水産学部 1 号館の屋上に設置された。

表 3.2.1 KuRAD の主な仕様

アンテナ	タイプ	ルネラル	送信機	周波数	15.75GHz
	直径	45cm		出力	40dBm (max)
	ビーム幅	3° (AZ/EL)		変調	FM _π -7°
	利得	36dB		バンド幅	80MHz (max)
	偏波	単偏波	duty	0-100 %	
	回転速度	20-40 rpm	受信機	MDR	3dBZ@4km
	Scan範囲	AZ:360°, EL:90°		雑音指数	3dB (min)
	Scanモード	Spiral, PPI, FIX	信号処理	レンジゲート	8192
		出力		Zh, V, σ	

観測を開始する前の、9月5日、6日、7日にかけて鹿児島に接近し通過した台風10号により、レドームがレーダ本体から剥がされ、送受信システムが雨ざらしになるという深刻な被害を受けた(図3.2.1)。レドーム内の気温の変化や鹿児島地方気象台の最大瞬間風速の記録の調査などから、9月5日の22時頃、建物を吹き上げる風と強い水平風の組み合わせによりレドームが本体から剥がされたと推定された。



図 3.2.1 左：レーダ本体と剥がれたレドーム，右：レーダドーム接続部。

被災した送受信装置は災害復旧経費により新しいものに置き換えられた。また、剥がれたレドームおよびレーダ駆動部は、Ku バンドレーダの開発者の一人である大阪大学牛尾教授が所有するものを利用することにより、2021 年 12 月に以前と同じ場所に設置された。無線局変更届が総

務省九州総合通信局に受理され、観測が再開されたのは2022年1月中旬からである。図3.2.2(a)は水産学部1号館とその屋上に設置されたKuRADのアンテナ部分の写真である。アンテナ制御装置、信号処理装置、データ解析用WSなどはすぐ下のレーダ観測室に設置されている。レーダ観測室は、元々は水産学部の船舶レーダ用の部屋で、三方がガラス張りになっている。近くに県庁やホテルなどの建物があり水平線は遮られるが、桜島の噴火と噴煙を目視観測するには十分である。KuRADの最大観測範囲はレーダを中心として半径20kmで、桜島全島が観測範囲に入る(図3.2.2.(b))。図中の■はKuRAD、国交省のMPXとDPRIの小型XMPレーダの設置場所である。KuRADを中心とした半径5km以内には、鹿児島大学の郡元キャンパスや桜ヶ丘キャンパス(鹿児島大学病院)がある。また、県庁、鹿児島市役所、鹿児島中央駅、天文館などの主要な施設が含まれる。このように、KuRADの設置場所の利点から、大規模噴火があったとき、KuRADの噴煙モニタリング情報はこれらの地域の防災に役立つであろう。

図3.2.3はレーダ観測室に納められたKuRADの各装置の観測室内でのLAN構成である。レーダ観測はLANを介して、制御計算機とデータ収録転送用計算機内のソフトウェアによりおこなわれる。制御計算機にはBrsとCtrlServerの二つのソフトウェアがインストールされており、前者は観測パラメータの設定、開始/停止、機器の状態監視をおこなうGUIである。後者は制御計算機のサーバとして動作し、各機器との通信・制御を管理する。データ収録転送用計算機にはDataServerとLogServerがインストールされており、前者はリアルタイムに観測データ(rawデータ)の保存をおこなう。同時に2次圧縮データ(2ndデータ)の作成・保存・転送をおこなう。これらの詳細はKuRAD取扱説明書にある。図3.2.4にKuRADの観測データの流れを示す。画像収録転送用計算機は、データ収録転送用計算機から送られてきた2ndデータから画像を作成し指示された場所へ保存する。その際、使用されるソフトウェアがKuViewである。KuViewには仰角毎のPPI画面、任意高度のCAPPi画像、任意鉛直断面画像を作成する機能を有しており観測データのクイックルック用にも使える便利なソフトウェアである。KuViewは一般のPCにもインストールできる。KuViewの具体的な使用方法はマニュアル「火山観測用Kuバンド高速スキャンレーダ補足資料」にある。

図3.2.3および図3.2.4の降灰情報作成用WSは2022年1月に付加された計算機で、KuRAD観測データから降灰情報を作成する。WSの主な仕様を表3.2.2に示す。このWSはLANでレーダ観測室内のPCとつながっている。また、グローバルIPアドレスを持っており、許可された外部のPCとやりとりが可能である。用いられるソフトウェアのアルゴリズムはANT3Dであるが、リアルタイム性を重視してPythonベースのプログラムに変換している。WSはデータ収録転送用計算機から送られてくる2ndデータから、レーダを中心とする半径20km以内のエリアの降灰量分布を作成する。作成される画像のフォーマットは地図情報と重ね合わせることができるGeoTIFF形式である。作成された画像データは、外部のレンタルwebサーバや鹿児島大学の情報基盤センターのファイルサーバ等へ転送され保存される。このデータは、許可された学内外のユーザのダウンロードが可能である。

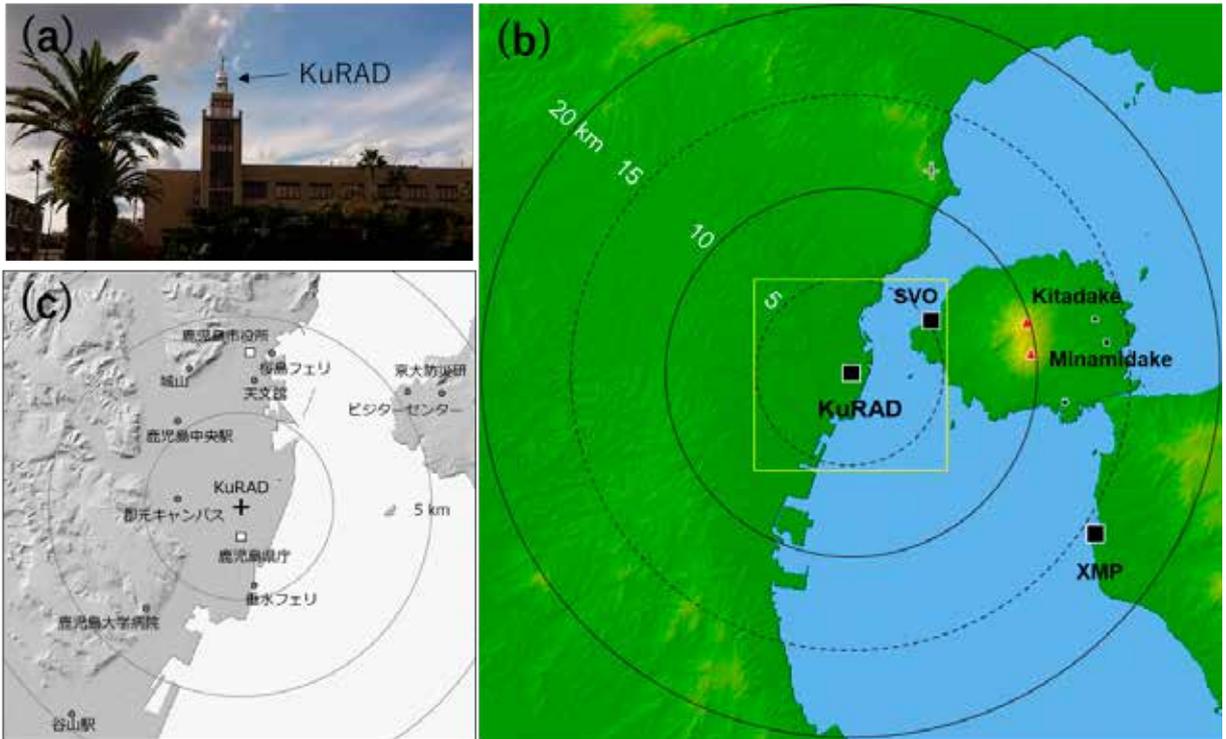


図 3.2.2 (a) 鹿児島大学下荒田キャンパス 1 号館屋上に設置された KuRAD, (b) レーダ観測範囲, (c) レーダから 5km 範囲.

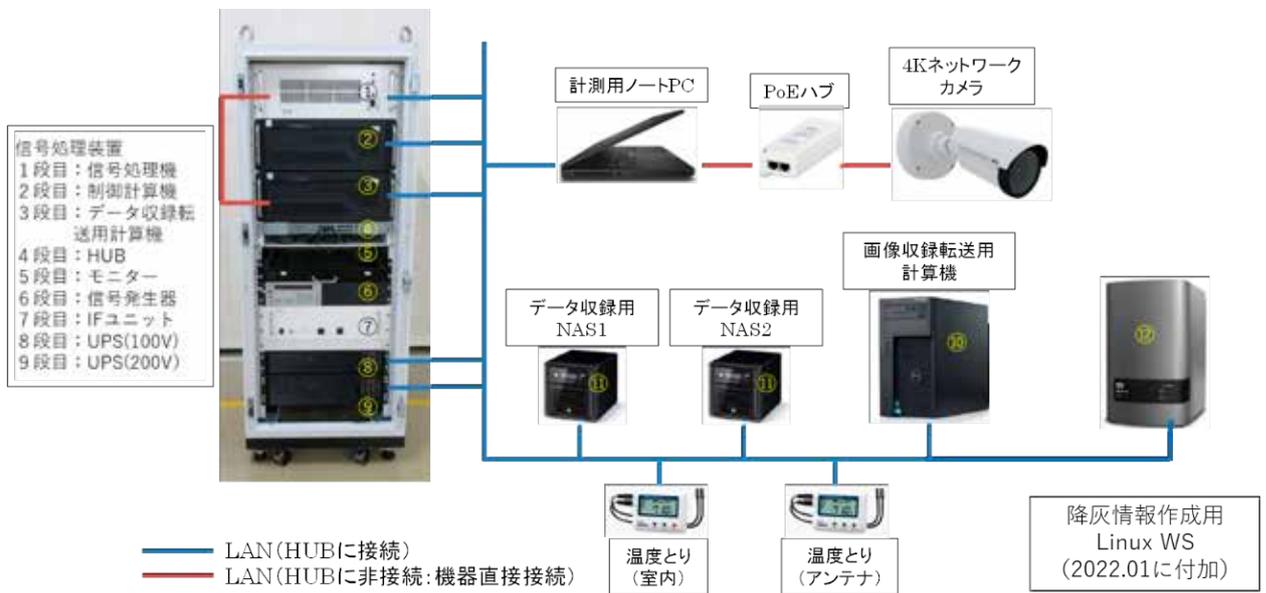


図 3.2.3 KuRAD のネットワーク構成

表 3.2.2 降灰情報作成用 WS の主な仕様

仕様	
機種	BL-i78700A1H1TTSD
Cpu	インテル®Core i7-8700, 動作周波数 3.2GHz 動作周波数 2.10GHz/Max3.0GHz
メモリ	64GB (16GBx4)
OS	Linux CentOS 7.5, 64bit
ドライブ	SSD/HDD1 1TB SSD/HDD2 4TB

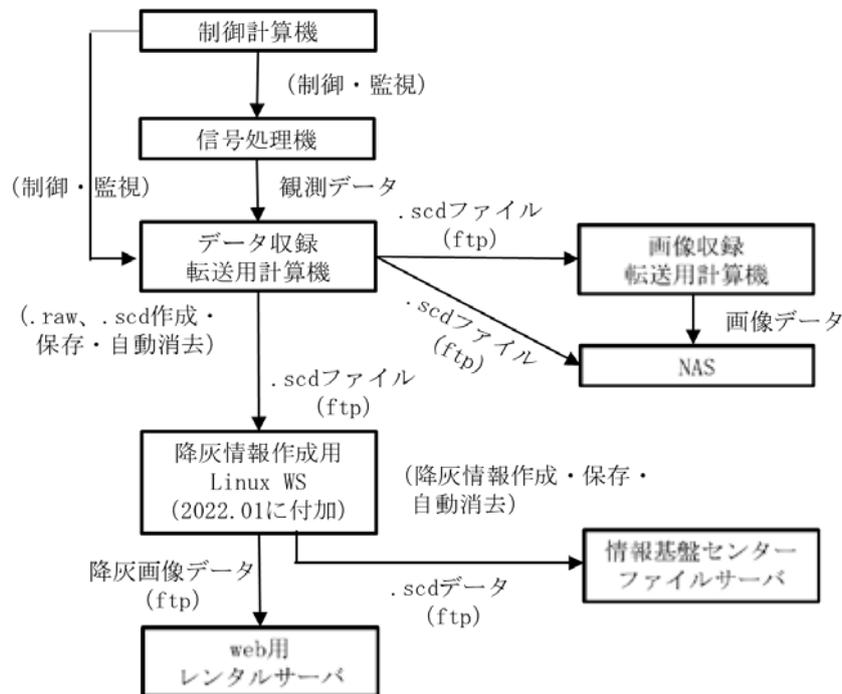


図 3.2.4 KuRAD の観測データの流れ.

3.3. 船舶レーダ

船舶レーダブロックは、船舶レーダにより観測された噴煙柱の発達過程を解析するブロックである。船舶レーダのハードウェアの特徴の一つに、ファンビームを射出するスロットアンテナがある。これは、海上を揺れながら航行する船舶の周りの障害物や他の船舶を検知できるように考慮したためである。また、障害物を素早く検知するためにスロットアンテナを高速度で回転させる。通常の船舶レーダは、仰角を固定してビームの方位角を変化させて船舶の全方位の障害物を探査する。Maki et al.,(2019b)と真木ほか (2020), は、アンテナの回転軸を 90° 傾け、火口方向に向けて縦回転させることにより噴煙柱の発達過程や噴石や火砕流の検出を試みた (図 3.3.1)。使用した船舶レーダは民間企業である FRS コーポレーションが所有する X バンド船舶レーダである。レーダの構成図を図 3.3.2 に示す。レーダはレーダ本体 (送受信機・アンテナ, レーダ制御

パネル) と観測画像収録ユニットの二つから構成される。画像収録ユニットは研究用に追加されたユニットで、レーダ本体から送られてくる画像データを PC のハードディスクへ保存する。レーダの波長は 3cm, アンテナは長さ 2m のスロットアンテナ, ビーム幅は水平 1.2°, 垂直 22°, アンテナの回転速度は 48rpm である (表 3.3.1)。これにより, 成長する噴煙柱の鉛直構造を方位角 22°, 仰角 1.2° のビーム幅で, 48rpm (1.25 秒毎) の時間分解能で観測することができる。

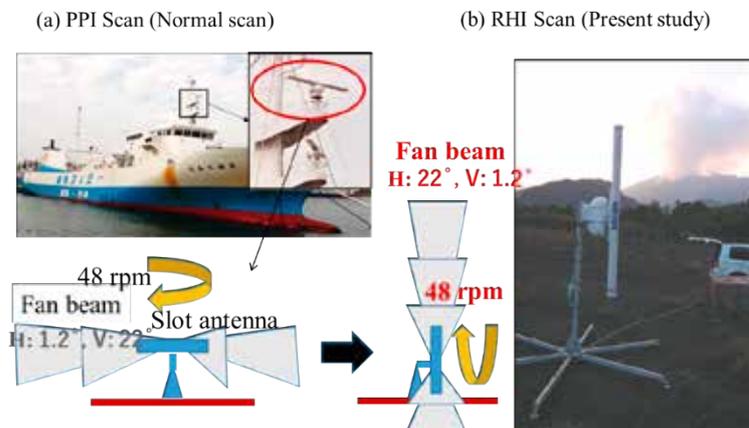


図 3.3.1 (a) 通常の船舶レーダのアンテナスキャンモード, (b) 噴煙柱の観測用のアンテナスキャンモード

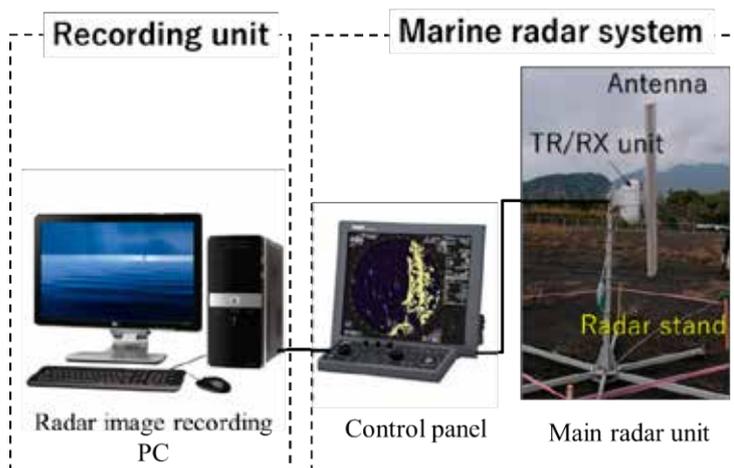


図 3.3.2 マグネトロンタイプの X バンド船舶レーダの構成. 真木ほか (2019) より.

表 3.3.1 マグネトロンタイプの X バンド船舶レーダの主な仕様 (FRC コーポレーションを参考).

Antenna	Length	197 cm
	Beam width	H: 1.2°, V: 22°
	Scan speed	24, 48 rpm
	Polarization	H
Transmitter	Frequency	9410 ± 30 MHz
	Peak power	25kW, Magnetron
	Pulse width	0.08, 0.2, 0.3, 0.6, 1.2 μs
	PRF	2000 Hz
Receiver	Range resolution	12, 30, 45, 90, 180 m
	IF (bandwidth)	60 MHz (5, 15 MHz)
Monitor	Noise figure	≤ 6 dB
	Size	19 inch colour LCD
	Resolution	1280 × 1024 pixel
	Range accuracy	8 m

近年、周波数の有効利用と保守の利便性からマグネトロンレーダに代わって固体化素子レーダが実用化されている（真木ほか，2019）．鹿児島大学では，株式会社光電製作所から2基の固体化素子レーダの貸出しを受け，船舶レーダによる噴煙モニタリングの研究をおこなっている．図3.3.3にレーダの外観を示す．固体化素子レーダの外観はマグネトロンレーダとほぼ同じである．図3.3.4に基本システム構成を示す．表3.3.2に主な仕様を示す．マグネトロンレーダと大きく異なるのは送信形式である．マグネトロンレーダでは高出力の単一パルスを利用するのに対して固体化素子レーダでは低出力の長パルスを利用し，パルス圧縮技術を用いることでマグネトロンと同等のレンジ分解能を得ている．但し，レーダの近傍の数 km レンジでは長パルスが使えないのでマグネトロンレーダと同様に短パルスでの観測である．固体化レーダシステムの構成や制御用アプリケーションソフトの詳細は，「火山噴火機動観測レーダーの基本設計」（2019年3月，非公開）に記載されている．また，遠隔操作などの将来の運用に関しても記載されている．



図 3.3.3 固体化素子タイプの X バンド船舶レーダの外観．(a) 鹿児島大学下荒田キャンパス水産学部 1 号館屋上での観測風景（2019 年 8 月 22 日撮影）．左は 400W レーダによる RHI 観測，右は 200W レーダによる PPI 観測．(b) 京都大学防災研 SVO の屋上へ移動しての RHI 観測（2021 年 10 月 8 日撮影）．固体化素子レーダは（株）光電製作所からの貸与による．

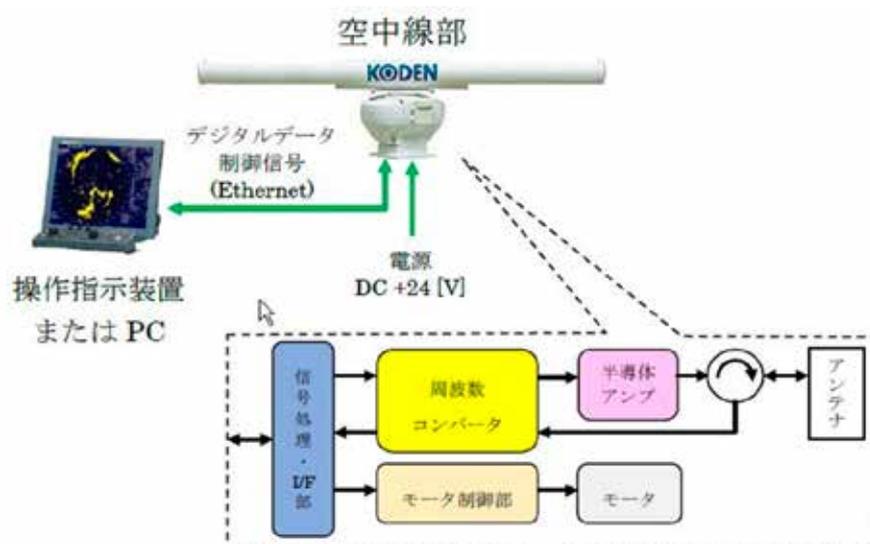


図 3.3.4 固体化素子船舶レーダの基本構成．

表 3.3.2 固体化素子タイプの X バンド船舶レーダの主な仕様

項目	仕様	備考
アンテナ型式	オープンアンテナ	アンテナサイズ 6ft,9ft(公称値)
送信出力 (尖頭値)	100 W \pm 50 % / 400 W \pm 50 %	
送信周波数	9380~9420 MHz	P0N : 9390 \pm 10 [MHz] Q0N : 9410 \pm 10 [MHz]
周波数安定度	\pm 2.0 ppm	
アンテナ回転数	24 or 48 rpm	0.250 or 0.125 deg/s
送信パルス幅	P0N : 0.08~1.2 μ sec Q0N : 5~18 μ sec	P0N : 24~360 m Q0N : 1500~5400 m
掃引周波数幅	Q0N : 5, 10, 15 MHz	
繰り返し周波数	450~2600 Hz	
探知距離レンジ (設定可能範囲)	0.125~64 NM (100 W) 0.125~96 NM (400 W)	0.2~118.5 km (100W) 0.2~177.8 km (400W)
最小探知距離	40 m 以内	
距離分解能	40 m 以内	
距離精度	8 m またはレンジの 1 %以内	
ドップラー周波数精度	TBD	
電源電圧	定格 直流 +24 [V]	
消費電力	100 W 以下 (100 W) 150 W 以下 (400 W)	空中線部のみ
質量	29 kg 以下 (100 W) 33 kg 以下 (400 W)	空中線部のみ
使用温度範囲	-25~+55 $^{\circ}$ C	空中線部のみ
防水	IPX6	空中線部のみ

船舶レーダによる噴煙観測の機動性を確認するために、車による陸域での試験観測 (図 3.3.5) や鹿児島大学水産学部が所有する練習船「南星丸」 (<https://www.fish.kagoshima-u.ac.jp/fish/brochure/r3/nansei2021.pdf>) と小型ボート (KG3-41178) による海域での試験観測 (図 3.3.6) を実施した。車を利用した試験観測 (2021 年 9 月 30 日) では、レンタカー (バンタイプ) の中にレーダ本体、アンテナ用支柱、計測用 PC、バッテリーなどを積み込み、桜島の南岳火口方向を見渡せる場所 (古里公園駐車場, 旧野尻川土石流観測所駐車場, 輝北うわば公園駐車場) に設置し臨時の観測をおこなった。レーダの組み立てから観測開始までの時間は約 60 分であった。小型ボートによる海上での機動観測実験は 2020 年 12 月 7 日におこなわれた。火口からたなびく弱い噴煙の検出を試みたが、当日の海上風の影響のため十分な結果は得られなかった。小型ボートによる観測は陸上での観測に比べてはるかに機動性に富むが、天候に大きく左右されるこ

とを実感した。海上での揺れの問題は、大型の船舶になれば解消されるかもしれない。総トン数 175 トンの南星丸を利用した試験観測は、2019 年 8 月 24 日に行われた。桜島フェリー鹿児島港発着所近くの棧橋に係留中の南星丸甲板に船舶レーダを設置して、当日の夜行われた錦江湾花火大会の打ち上げ花火の検出を試みた。特に、この花火大会の特徴の一つである直径 60cm の花火の玉を火山噴石とみなして、その打ち上げから爆発までの軌跡を捉えられるかに焦点を当てた。桜島フェリーが近くを通過する際の船体の揺れはあったが、それ以外は問題なく、実験は成功した。

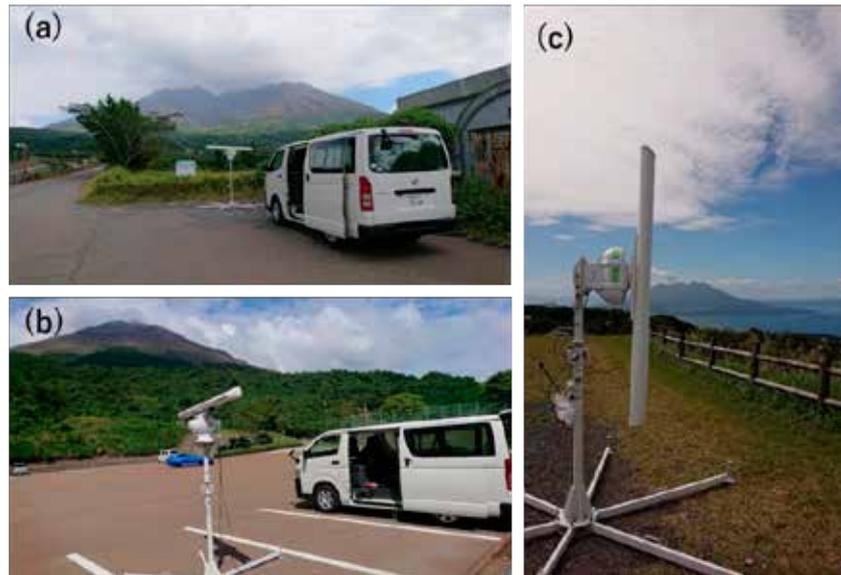


図 3.3.5 固体化素子船舶レーダによる陸域での機動的降灰観測実験。(a)旧野尻川土石流観測所駐車場（桜島），(b)古里公園駐車場（桜島），(c)輝北うわば公園駐車場（鹿屋市）。



図 3.3.6 固体化素子船舶レーダによる海域での機動的降灰観測実験。(a) 鹿児島大学水産学部の小型ボートにセットされた固体化素子レーダ，(b)小型ボートによる桜島噴煙の観測風景。(c) 鹿児島大学水産学部の練習船「南星丸」。(d) 「南星丸」に設置された固体化素子レーダ。

固体化素子船舶レーダの観測データは、.ksd という拡張子のファイル（以下、KSD ファイルという）に格納されている。1つの KSD ファイルには方位角複数周回分の情報が含まれており、長さは可変である。また、ファイル先頭の方位角は 0° とは限らず、方位角 1 周分 ($0\sim 360^\circ$) のデータが複数のファイルに跨って格納されている場合がある。そこで、KSD ファイルに含まれる観測データを方位角 1 週 ($0\sim 360^\circ$) 毎に分割して NetCDF ファイルに保存する Matlab ベースのプログラム (ksd2nc.m) を作成した。ksd2nc.m には、方位角 1 周分のデータが複数の KSD ファイルに跨っている場合には、これらを結合する機能を備えている。使用している固体化素子船舶レーダはプロトタイプのもので、いくつかの制約がある。その一つに、通信環境によってレーダからのデータ受信時に欠測が生じる可能性がある点である。このような場合でも、ksd2nc.m は正常に動作するように配慮されている。なお、ksd2nc.m は KSD ファイル内のデータが方位角の回転に沿って整列していることを前提としている。NetCDF に変換されたレーダデータは、ANT3D に組み込まれた関数 plot_ppixy.m で描画することができる。今後の課題であるが、NetCDF に変換された PPI データから 80×80 km 以内の降灰量分布情報を準リアルタイムで求めることが可能である。このためには固体化素子レーダ用の R_A-Z_A 関係式を確立する必要があり、研究を進めている。

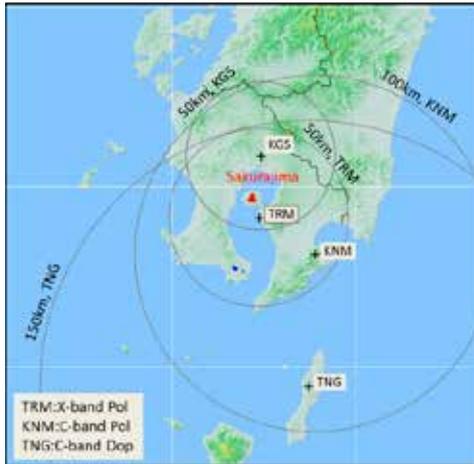
観測データのクイックルックは、上述したプログラム (ksd2nc.m と plot_ppixy.m) を使わなくても、レーダに付属しているソフトウェア (ssrplayer.exe) を用いて可能である。

3.4. 現業レーダ

(a) レーダネットワーク

桜島で大正噴火級の大噴火がおきた場合、降灰域は数百 km の範囲に及ぶと考えられる。その場合、広範囲をカバーする気象レーダネットワークが必要となる。その候補が気象庁や国土交通省の現業レーダネットワークである。図 3.4.1 に桜島を観測範囲に納める気象庁と国交省の現業レーダの配置と火口までの距離や火口上空でのレーダビームの高度、広がりを示す。よく知られたように、地球の曲率のためにレーダビームの高度はレーダからの距離が長くなるほど高くなる。また、ビーム幅も広がる。例えば、気象庁の福岡レーダは桜島から 208 km 離れており、桜島上空でのビーム高度は 7.9–13.7 km、ビーム幅は 3630 m である。このため、福岡レーダでは桜島の地上付近の降灰を観測できない。高い高度の降灰も空間分解能が粗い情報になる。現業気象レーダによる定量的な観測は 120 km 程度と言われている。地上付近から圏界面付近までの降灰分布を求める為には、複数台のレーダの観測データの合成をおこなうことが必要である。我々が開発している気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォームで開発した ANT3D には、複数台のレーダ観測データを合成する機能を備えている。

国土交通省の現業レーダの配置



桜島南岳火口までの距離, ビーム幅, 観測高度

レーダ	距離	観測高度 (火口上空)	ビーム幅 (火口上空)	備考
TRM	11 km	1.2 km - 4.0 km	190 m	X, POL
KNM	45 km	1.1 km - 1.7 km	790 m	C, POL
SKD	180 km	3.8 km - 5.4 km	3140 m	C, POL
TNG	109 km	4.4 km - 14.0 km	1900 m	C, DOP
FKO	208 km	7.9 km - 13.7 km	3630 m	C, DOP
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, DOP
MP-Ka	4 km	0-15 km (artificial)	20 m	Ka, DOP

昭和火口の大きさ: 東西279m南北365m深さ161m(2012年国交省調査)

図 3.4.1 桜島を観測範囲に桜島が含まれる現業用気象レーダの配置点.

(b) 国土交通省垂水 X バンド MP レーダ

国土交通省の現業用 X バンド (波長 3cm) マルチパラメータレーダ (XMP レーダ) は, 桜島の土石流対策として 2011 年に国土交通省により垂水市に設置された. レーダの観測範囲を図 3.4.2 に示す. XMP レーダは仰角 1.7°から 20.0°までの計 12 仰角 (図 3.4.3) の PPI (Plan Position Indicator) により, 半径 80 km 以内の三次元データを 5 分間隔で取得する. ただし, 仰角 1.7°と 6°についてはそれぞれ 2 分間隔で, 下層付近の降雨量を高頻度で観測するために設定されている. レーダの主な仕様を表 3.4.1 に示す. 観測最大仰角が 20°であるため, 桜島昭和火口上空のビーム中心の最高到達高度は火口から約 4km である. XMP レーダは二重偏波機能を有しており, 国土交通省ではこのタイプのレーダを全国の主要な都市域に設置し高精度で高時空間分解能の雨量データを配信している (例えば, 真木ほか, 2017).

表 3.4.1 国土交通省の垂水 XMP レーダの主な仕様.

Code name		TRM (Tarumizu)
Antenna	Diameter	2.2 m
	Beam width	1.0°
	Gain	44.7 dB (H), 45.1 dB (V)
	Speed	1-4 rpm
	Scan angle, PPI	1.7° - 20.0° (12 tilts)
Transmitter	Frequency	9770 MHz
	Power	200 W
	PRF	1500/2000 pps
	Pulse width	1.0 μs
Receiver	Smin	-109.5 dBm
Measured radar parameters		$Z_h, Z_v, Z_{DR}, \Phi_{DP}, \rho_{hv}, V_d, \sigma$
Resolution		Range : 150 m Azimuth : 1.0°

Z_h : Reflectivity factor (horizontal polarization), Z_v : Reflectivity factor (vertically polarization),
 Z_{DR} : Differential reflectivity, Φ_{DP} : Differential phase, ρ_{hv} : Correlation coefficient, V_d : Doppler

XMPのrawデータはデータ統合・解析システムDIAS(Data Integration and Analysis System)からダウンロードできる。DIASは、地球規模・各地域の観測で得られたデータを収集、永続的な蓄積、統合、解析するとともに、社会経済情報などとの融合を行い、地球規模の環境問題や大規模自然災害等の脅威に対する危機管理に有益な情報へ変換し、国内外に提供することにより、我が国の総合的な安全保障や国民の安全・安心の実現に資することを目的として、2006年度に、東京大学地球観測データ統融合連携研究機構(EDITORIA)により運用が開始された(<https://diasjp.net/about/>)。XMPのrawデータは「XRAIN原データ検索・ダウンロードシステム」(<http://xrain.diasjp.net/original/>)に保存されており、任意の地点のXMPデータを入手することができる。我々は、2012年から2021年の10年間に桜島で発生した噴火のXMP観測データを収集した。その際、気象庁鹿児島地方気象台が公開している桜島火山噴火観測表(https://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/kazan_top.html)を参考にした。

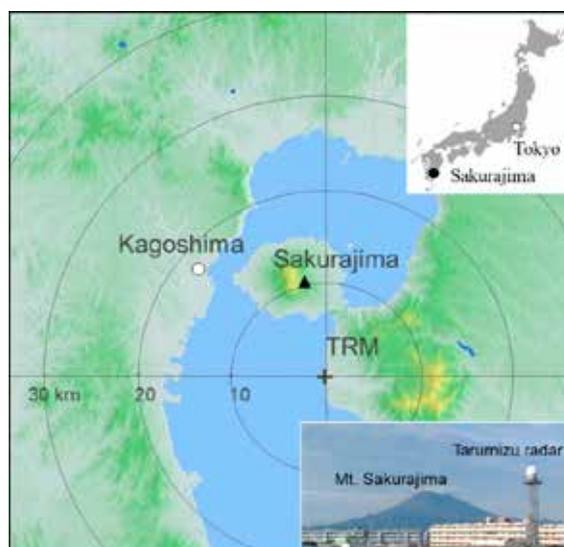


図 3.4.2 桜島と国交省 XMP レーダの位置。

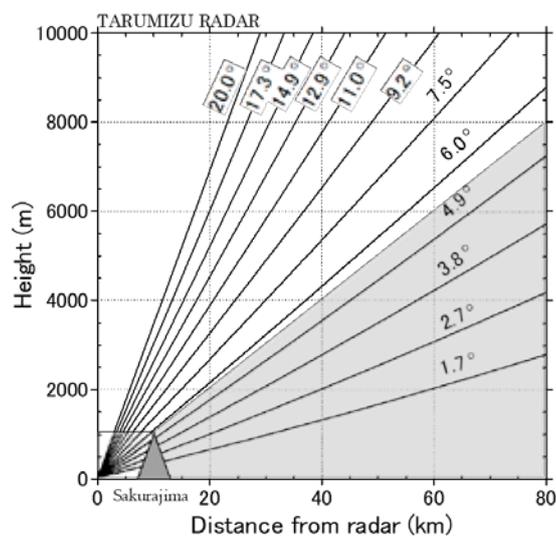


図 3.4.3 XMP レーダのスキャン仰角と桜島。

3.5. DPRI レーダ

京都大学防災研究所桜島火山観測所では 2017 年度に計 6 台の小型 X バンド MP レーダを導入して桜島，霧島，口永良部島，薩摩硫黄島，諏訪之瀬島の 5 つの火山の噴火の観測をおこなっている。データ収集と解析プログラムの作成は 2022 年 1 月から開始した。詳細は省略するが，本報告書の第 4 章に解析結果の一例を紹介している。

3.6. ANT3D

「三次元気象レーダデータ解析ツール」(ANT3D: Analytical Tools for Three-Dimensional Weather Radar Data) は観測されたデータを解析するためのプログラム集であり，気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォームの核となるブロックである。ANT3D は MATLAB がインストールされている Windows10 の PC で動作する。例として，本プラットフォームで用いている解析用 PC の仕様を表 3.6.1 に示す。

表 3.6.1 ANT3D がインストールされている PC の主な仕様。

仕様	
機種	WST-XS4110x2S3Q480TSD
CPU	インテル®Xeon®Silver4110 プロセッサ 2 基 コア数 8 コア 716 スレッド (1CPU 当たり) 動作周波数 2.10GHz/Max3.0GHz
メモリ	32GB (4GBx8) DDR4-2400/registered-ECC/DIMM
OS	Windows 10 pro
ドライブ	SSD480GB(SATA3/R500MB/s/W330MB/s/高耐久仕様) HD4TB (7200rpm/キャッシュ 128MB/SATA3/高耐久/平均故障 間隔 MTBF200 万時間) /RAID 対応 光学ドライブ DVD スーパーマルチ

ANT3D の概要は ANT3D のリーフレットにある。ANT3D を利用した国交省 XMP レーダのデータ解析例は真木ほか(2019), Maki et al., (2021a; 201b), Maki and Kobori (2021), Maki and Kim (2021)にある。図 3.6.1 は三次元解析のフローチャートである。図 3.6.2 は，二仰角 PPI 法による降灰量分布推定手法のフローチャートである。解析結果の例は本報告書の第 4 章にある。

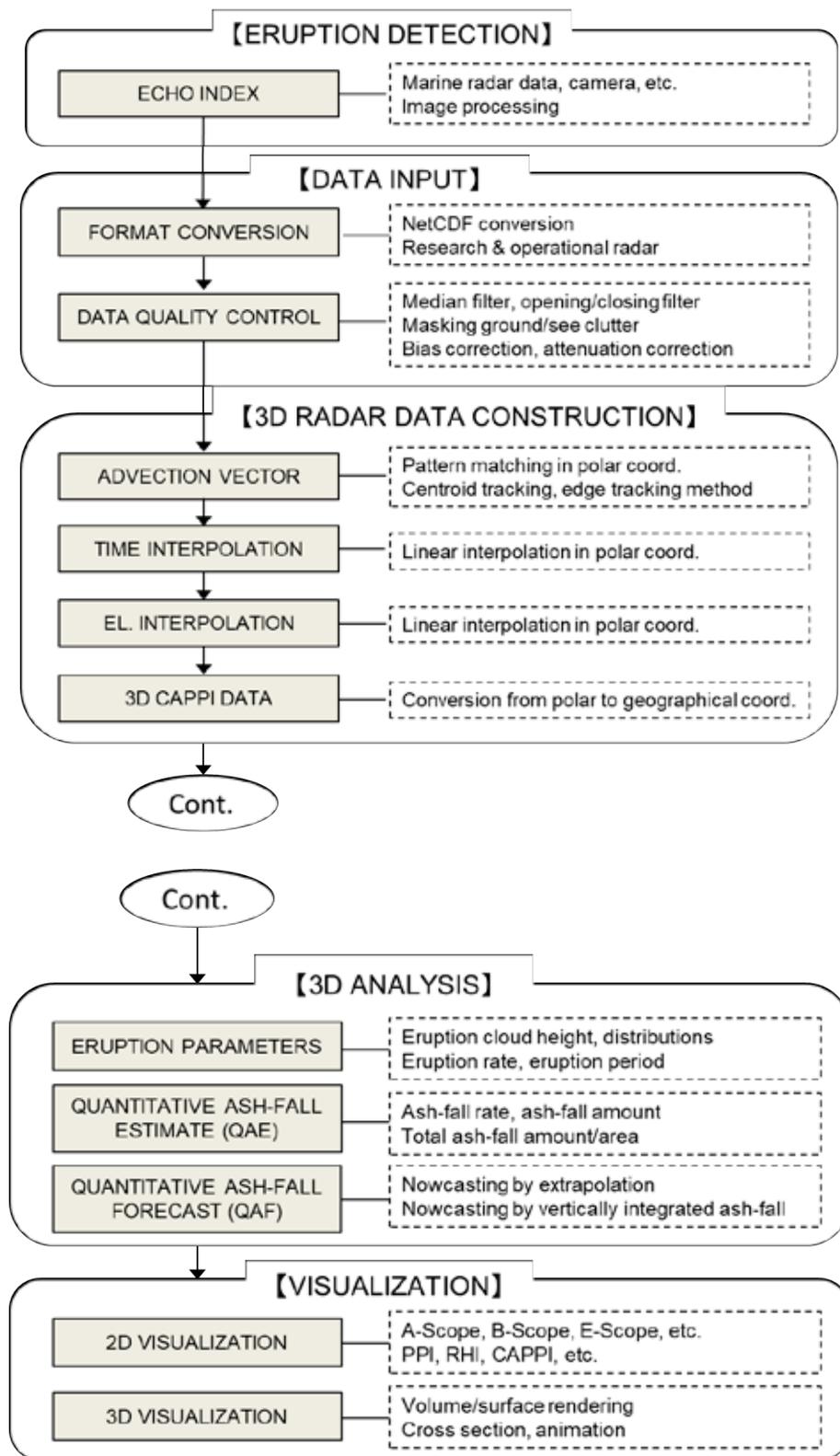


図 3.6.1 三次元解析のフローチャート.

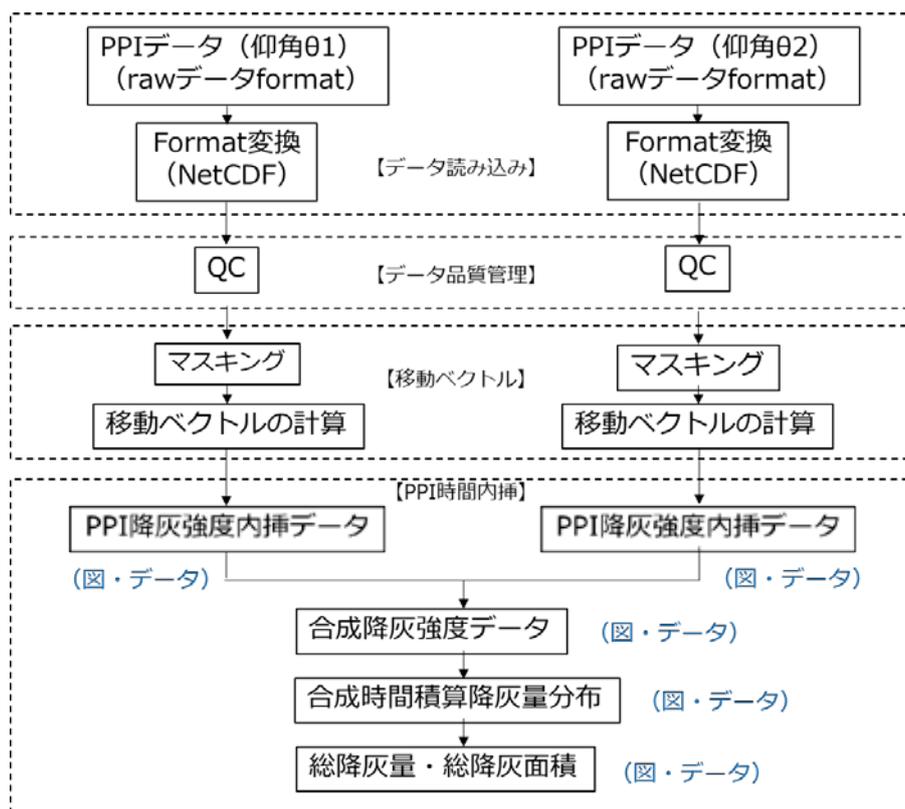


図 3.6.2 二仰角 PPI 法による降灰量分布推定手法

3.7. サーバ

2 台の商用 web サーバにより降灰情報の配信をおこなう。一番目のサーバはオフラインで作成した降灰情報を掲載する。過去 10 年間の国交省 XMP レーダの観測データから、作成される噴火毎の降灰量情報のデータベースが情報配信の基本である。2022 年 3 月から火山研究者、学生、火山防災関係者に公開予定である。二番目の web サーバは KuRAD 専用のサーバで、KuRAD 観測から得られる降灰情報をリアルタイムで公開する。サーバには、1) 降灰量分布図画像の蓄積、2) 古い画像 (1 ヶ月程度) の自動削除、3) 最新の降灰情報の自動更新表示、蓄積した画像から指定した日付の画像を表示する機能、等の機能が実装されている。2022 年 3 月から試験運用を開始する予定である。

3.8. デジタルサイネージ

デジタルサイネージは、2013 年に日本気象界との共同研究の中で、15 分先の雨の予測情報を配信する手段として導入された。開始当初は、鹿児島大学学習交流プラザ玄関のみの設置であったが、2017 年度学長裁量費の支援を受けて、学内の 5 か所と学外の 4 か所にデジタルサイネージモニターが設置された。表示するコンテンツは、鹿児島大学が所有している災害調査資料、桜島大正噴火時の資料、学内外の防災情報などである。これらのコンテンツは、TV 番組のようにスケジュールを組んで放映できるようになっている。また、日本気象協会との共同研究の中で、台風の

発生や地震の発生時には、台風の予想進路図や地震の震度分布図などが表示されるようになっている。今後、桜島の降灰情報も試験的に配信する予定である。

4. 噴火情報の例

ここでは、作成される噴煙情報（画像）についてギャラリー形式で紹介する

4.1. 噴煙柱

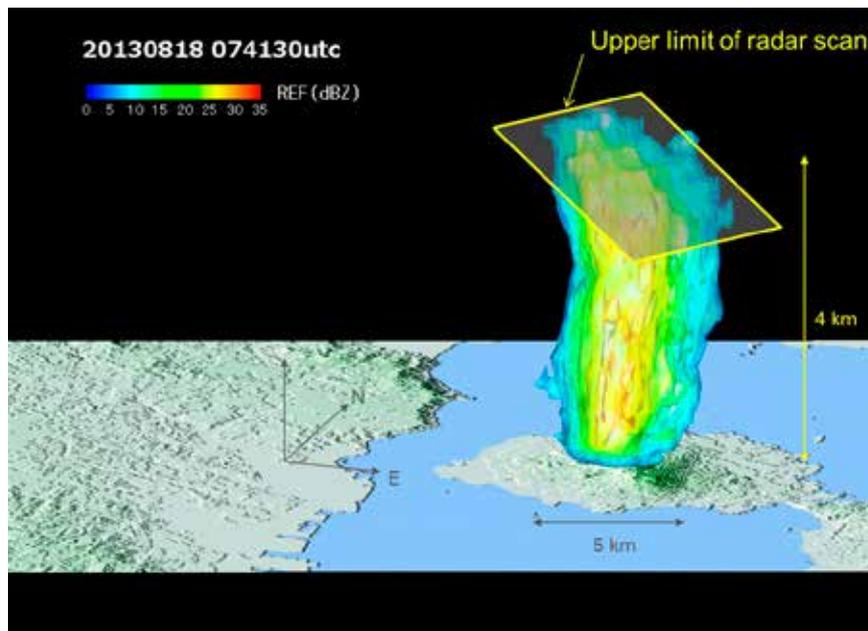


図 4.1.1 噴煙柱のボリュームレンダリング表示。2013年8月18日16時31分噴火、桜島昭和火口、噴煙高度5000m.

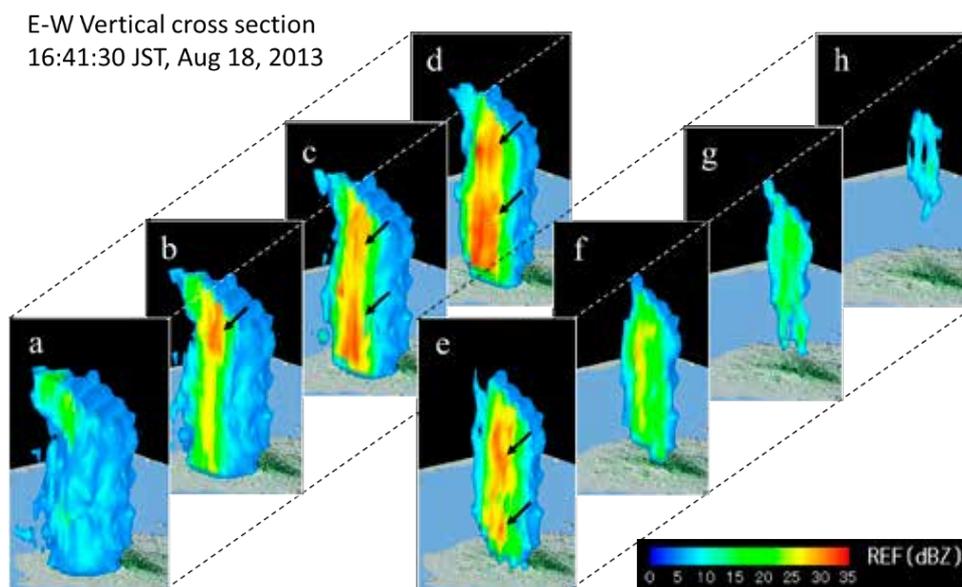


図 4.1.2 噴煙柱の東西断面。2013年8月18日16時31分噴火、桜島昭和火口、噴煙高度5000m.

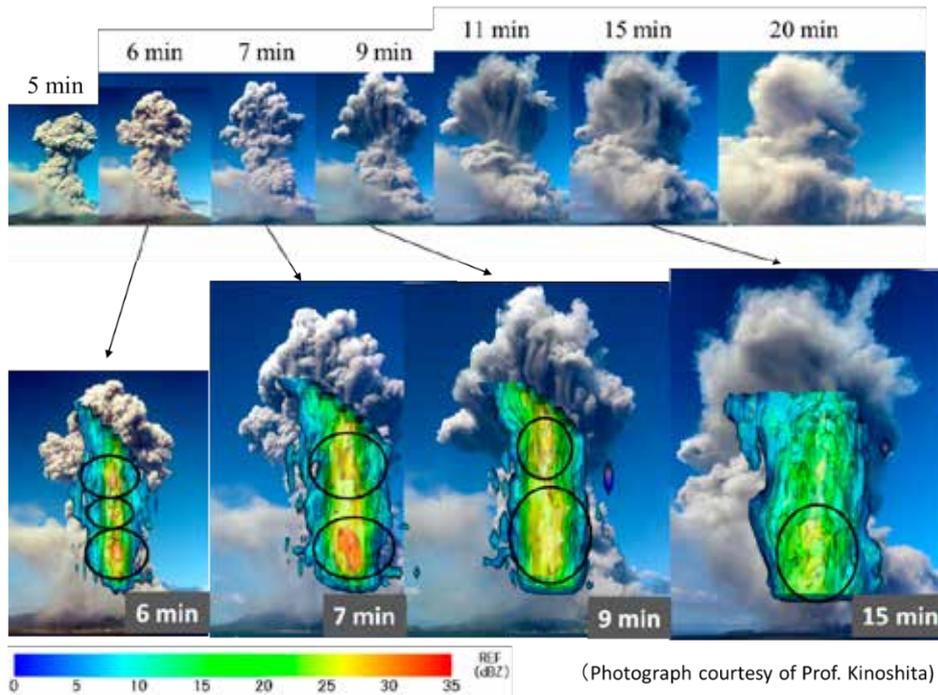


図 4.1.3 写真とレーダ画像の合成. 2013年8月18日16時31分噴火, 桜島昭和火口, 噴煙高度5000m.

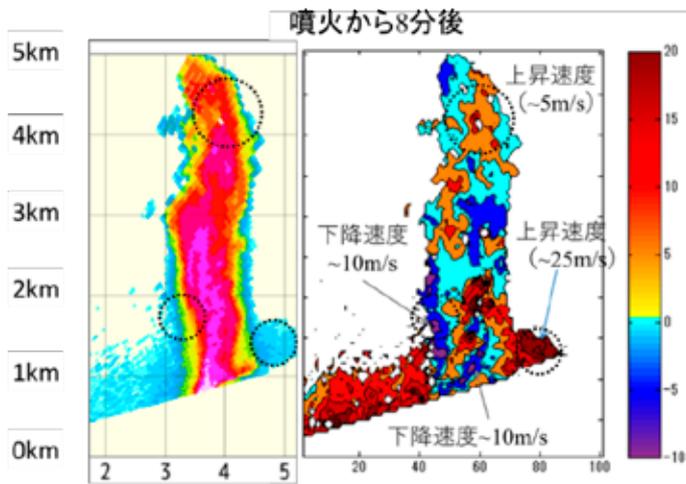


図 4.1.4 防災科学技術研究所のKaバンドドップラーレーダによる噴煙柱のRHI観測. 2015年5月10日13時07分噴火, 桜島昭和火口, 噴煙高度4500m.

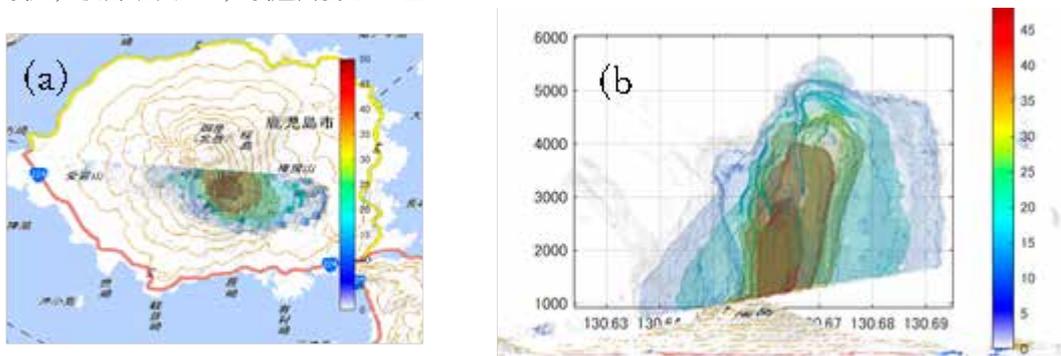


図 4.1.5 京都大学防災研究所の小型XバンドMPレーダによる噴煙柱のRHI観測. 2019年11月8日17時24分噴火, 桜島南岳, 噴煙高度5500m.

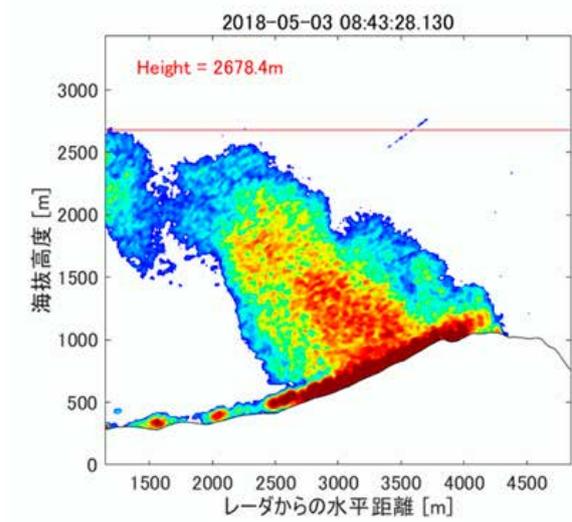


図 4.1.6 2018 年 5 月 3 日 8 時 40 分噴火，桜島南岳.

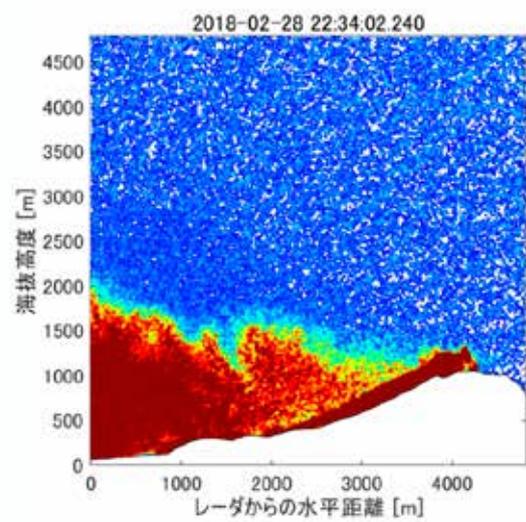


図 4.1.7 2018 年 2 月 28 日 22 時 30 分噴火，桜島南岳

4.2. 降下火砕物

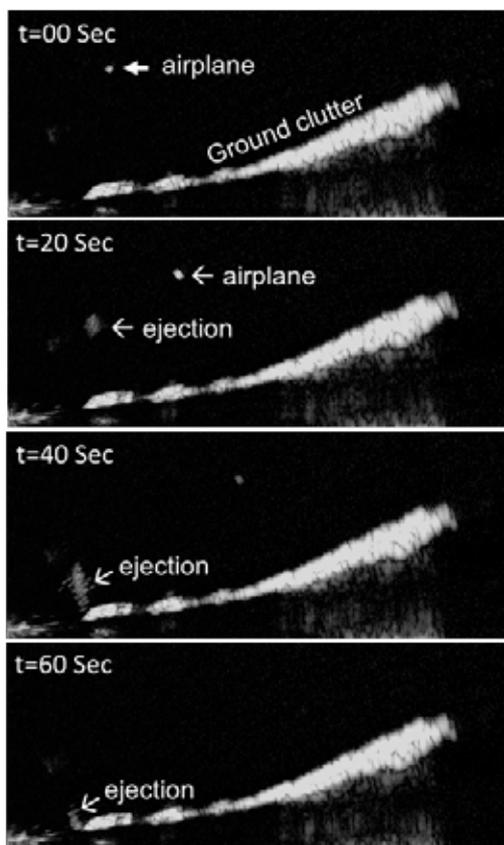


図 4.2.1 2018 年 3 月 2 日，船舶レーダによる疑似火山礫の検出実験.

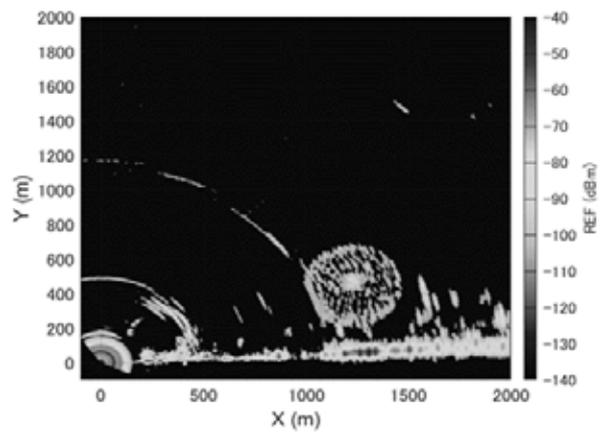


図 4.2.2 2019 年 8 月 24 日，錦江湾花火大会。
船舶レーダによる検出実験.

4.3. 降灰分布

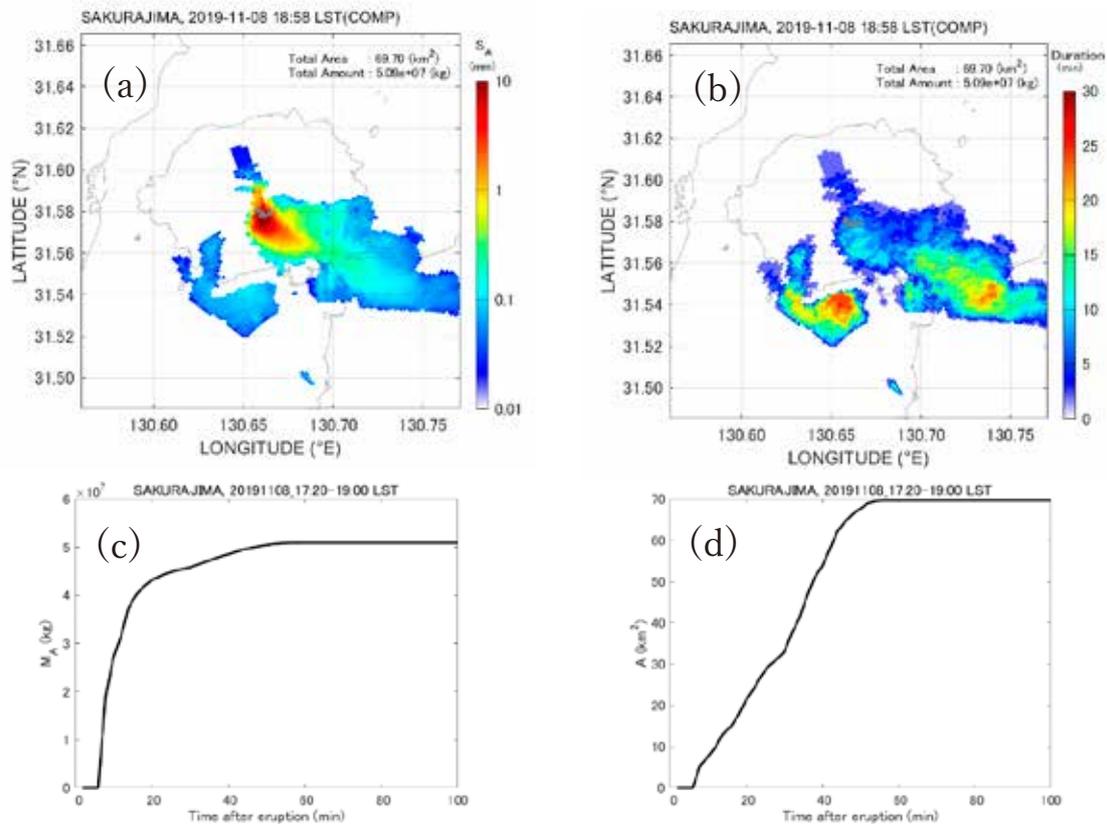


図 4.3.1 データベースに収録予定の降灰量分布情報の例. 2019 年 11 月 8 日 17:24 LST の桜島南岳噴火. (a) 時間積算降灰量の分布, (b) 積算降灰時間の分布, (c) 総降灰量の時間変化, (d) 総降灰面積の時間変化.

垂水 XMP の PPI 観測データを ANT3D (Maki et al., 2021, J. Volcanol Geoterm.) により解析.

5. 今後の展望

個人的な話になるが、気象レーダによる噴煙モニタリングの研究は、筆者が 2013 年 2 月に鹿児島大学に赴任してから始めた研究である。噴煙と積乱雲は似たようなところがあり、筆者の専門であるレーダ気象学の知識と経験を活かすことができた。残念ながら、2022 年 3 月末で鹿児島大学を退職するために、地震火山地域防災センターでのこの研究は一区切りとなる。幸い、4 月からは新たな勤務先である京都大学防災研究所で降灰研究を続けることができるようになった。桜島は火山研究者の観測フィールドとして知られている火山であるが、近年はリモートセンシング、気象分野、災害リスク関係の研究者の関心を集めている火山でもある。噴煙・降灰をキーワードにして、異分野の研究者・実務者コミュニティを立ち上げることができるのではと考えている。本報告で紹介した気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォームがそのコミュニティで利用され、大規模噴火時の火山防災に役立てられることを期待したい。

謝辞

噴煙モニタリング研究を進める上で、以下の多くの方（敬称略）の協力を受けました。ここに記して感謝いたします。

- プロジェクト全般：小林哲夫・浅野敏之・地頭菌隆（地震火山地域防災センター長），中谷剛，センター事務職員の皆さん，産学・地域共創センター・知財部門
- ANT3D の開発：Dong-In Lee, Yura Kim, Sung-Ho Suh, (Pukyong National Univ.), 鈴木郁子
- 船舶レーダ機動観測：佐々浩司（高知大学），遠藤寛治（光電製作所）
- Ku バンドレーダ観測：升屋正人・古屋保（学術情報基盤センター），山口博史（住友電設），国交省大隅河川国道事務所，高原町
- Ka バンドレーダ観測：岩波超・前坂剛・Shakti P.C.・平野洪賓・棚田俊收（防災科技研）
- 降灰量推定：福島誠治・水落裕也・高岡蓮（理工学研究科）
- 国交省 MP レーダデータ：国土交通省，DIAS/JISTEC
- 噴煙データ：飯野直子（熊本大学），小園誠史（東北大学）
- 共同研究：井口正人（京都大学防災研究所），佐藤英一（気象庁気象研究所），山路昭彦・中垣壽（日本気象協会），三橋浩治・岡田澄哉（NPO 法人雷嵐）
- 研究の機会と環境：前田芳實・佐野輝（鹿児島大学学長）

参考文献

- 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., Rose, W. I., 1983: Estimating particle sizes, concentrations, and total mass of ash in volcanic clouds using weather radar. AGU Publications, 88(C15), 10969-10983. <https://doi.org/10.1029/JC088iC15p10969>
- 今井克之・浦康彦・中川貴央・牛尾知雄・河崎善一郎，2008：高分解能気象レーダーの開発，2008：SEI テクニカルレビュー，第 173 号，105-108.
- 木下紀正，1989：桜島火山噴煙と大気拡散 一序論的考察一．鹿児島大学教育学部研究紀要，自然科学，**41**，1-17.
- 木下紀正・吉田潔，1990：桜島噴煙流の写真解析．鹿児島大学教育学部研究紀要，自然科学，**42**，1-19.
- 木下紀正，2006：フィリピン・マヨン火山の噴火活動を捉える，科学，**76**，1179-1181.
- 木下紀正・八木原寛・金柿主税・三仲啓・土田理・松井智彰・飯野直子・福澄孝博，2008：南西諸島とフィリピン・マヨン火山の噴煙自動観測．南太平洋海域調査研究報告，**49**，29-39. <http://es.educ.kumamoto-u.ac.jp/arist/volc/vcpaperj/OP49Volcr.pdf>
- Lunenburg, R.K., 1944: The Mathematical Theory of Optics, Providence, Rhode Island, Brown University Press. Reprint: Lunenburg, Rudolf Karl (1964). Mathematical Theory of Optics. Berkeley & Los Angeles: University of California Press. p. 401.
- Maki, M., Y. Fujiyoshi, H. Tokushima, and M. Iguchi, 2019b: X-band marine radar detection of ejected lapilli and volcanic blocks. In: Program and abstracts of the 39th international Conference on Radar Meteorology, Nara, Sep. 2019. 5 pp.
- 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ー2018年の観測結果ー. 京都大学防災研究所年報, 63B, 136-148.
- Maki, M., Y. Fujiyoshi, H. Tokushima, and M. Iguchi, 2019b: X-band marine radar detection of ejected lapilli and volcanic blocks. *In: Program and abstracts of the 39th international Conference on Radar Meteorology*, Nara, Sep. 2019. 5 pp.
- 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**, 15-30.
- Maki, M., and Y. Kim, 2021: Visualizing weather radar data from volcanic eruption clouds. *Data in Brief*, **35**, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106942>
- Maki, M., Y. Kim, T. Kobori, K. Hirano, D.-I. Lee, M. Iguchi, 2021a: Analyses of three-dimensional weather radar data from volcanic eruption clouds. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **412**, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107178>
- Maki, M. and T. Kobori, 2021: Construction of three-dimensional weather radar data from volcanic eruption clouds. *MethodsX*, **8**, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101535>
- 真木雅之・鈴木郁子・井口正人・Shakti P.C., 2019: 気象レーダによる降灰量推定ー2013年8月18日桜島噴火のZ-R_A関係式ー. *火山*, **64**, 219-241
- 真木雅之・西隆昭・小堀壮彦・徳島秀彦・海賀和彦・遠藤寛治, 2019: Xバンド船舶レーダを用いた火山噴火の機動的観測. 鹿児島大学地震火山地域防災センターR01年度事業報告書.
- 真木雅之・高橋忍・岡田澄哉, 2018: 火山観測用Kuバンド高速スキャンレーダ. 地震火山地域防災センター平成29年度事業報告.
- Maki, M., S. Takahashi, S. Okada, K. Imai, H. Yamaguchi, 2019a: Ku-band high-speed scanning Doppler radar for volcanic eruption monitoring. *J. Disast. Res.*, **14**, 630-640. <https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0630>
- 真木雅之・上田博・中北英一, 2017: Xバンド偏波レーダーによる降水観測技術の開発及び社会実装ー2016年度岸保賞受賞記念講演ー. *天気*, **64**, 849-872.
- Yoshikawa, E., 2011: A Study of Meteorological Radar Network at Ku-band with High Resolution. Doctoral Thesis, Osaka Univ., <http://ir.library.osaka-u.ac.jp/dspace/handle/11094/1398>
- Yoshikawa, E., S. Kida, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, 2010: Vertical structure of raindrop size distribution in lower atmospheric boundary layer. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L20802, doi:10.1029/2010GL045174.
- Suh, S.-H., M. Maki, M. Iguchi, D.-I. Lee, A. Yamaji, and T. Momotani 2019: Free-fall experiments of volcanic ash particles using a 2-D video disdrometer. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, **12**, 5363–5379. doi:10.5194/amt-12-5363-2019

付録A 気象レーダによる噴煙観測の歴史

表 A-1 現業気象レーダによる噴煙観測のレビュー

Operational weather radar	Volcano	Year	References
Unknown	Hekla, Iceland	1970	Smithsonian Glob.Volc. prog.
C-band, Kushiro	Chachadake	1973	JMA
S-, WSR-74, King Salmon	Augustine, Alaska	1976	Kienle and Shaw (1979)
C-, Sapporo	Usu, Japan	1977	JMA
C-, WSR-74, Portland L-, FAA, Seattle, Spokane	Mt. St. Helen	1980,1982	Harris et al. (1981); Harris and Rose (1983)
:	:	:	:
C-, Pol., C-, Shizuoka	Miyakejima, Japan	2000	Maki and Doviak (2001); Sawada (2004)
C-, Sgonella	Etna, Italy	2002	Marzano et al. (2006a)
C-, IMO Keflavik	Grimsvotn, Iceland	2004	Marzano et al. (2006a, 2010a)
S-, WSR-88D	Augustine, USA	2006	Wood et al (2007); Marzano et al. (2009, 2010b)
C-, Dop., Tanegashima; C- C-. Pol., Kunimiyama	Shinmoedake, Japan	2011	Shimbori et al (2013); Maki et al (2014)
C-, IMO, Keflavik	Eyjafjallajokull	2011	Marzano et al. (2011)
X-, Pol, Tarumizu	Sakurajima, Japan	2013-	Maki et al. (2014, 2016, 2021)

表 A-2 研究用気象レーダによる噴煙観測のレビュー

Radar (Main specifications)	Volcano	Year	References
Modified Micro rain radar (Doppler, Pointing, K-)	Stromboli, Italy	1996, 2000, 2001,2008, 2011	Hort and Seyfried (1998); Urbanski et al. (2002); Hort et al. (2003); Scharff et al. (2008); Hort et al. (2010); Hort et al. (2013)
	Merapi, Indonesia	2001-2006	Voge et al. (2005); Hort et al. (2006); Voge and Hort (2008a, b, 2009)
	Mt. Erebus, Antarctica	2005/06	Cerst et al. (2008, 2013)
	Santiaguito, Guatemala	2007	Scharff et al. (2012, 2014)
	Colima, Mexico	2007-	Scharff(2012)
	Yasur, Vanuatu	2008	Meier (2014)
VOLDRAD (L-, Doppler, Pointing)	Etna, Italy	1998, 2001	Dubosclard et al. (1999, 2004) Donnadieu et al. (2005), Gouhier and Donnadieu (2008, 2010, 2011)
VOLDRAD2(L-, Doppler, Pointing)	Arenal, Costa Rica	2004, 2005	Valade and Donnadieu (2011), Donnadieu et al. (2011); Valade et al. (2012)
	Popocatepetl, Mexico	2004-2008	Donnadieu et al. (2012) Donnadieu (2012)

VOLDRAD2B	Yasur, Vanuatu	2009-	Donnadieu (2012); Gouhier et al. (2012a, b),
Mobile(X, Dop, scanning)	Sakurajima, Japan	2011	Sakai et al. (2013)
MP-Ka(Dop, scan, NIED)	Sakurajima, Japan	2015	Maki et al. (2016)
KuRAD(Dop, rapid scan, KGU),	Sakurajima etc. Japan	2017-	Maki et al. (2019)
MP-X (Pol., Scan, MRI)	Sakurajima. Japan	2017-	MRI/JMA
Small MP-X(Pol, Scan, DPRI)	Sakurajima et al., Japan	2017-	DPRI/Kyoto Univ.
Marine (X-, RHI, 48 rpm)	Sakurajima, Japan	2018, 2019, 2021-	Maki et al. (2020)
Marine(X-, Dop., RHI, 24 rpm, solid)	Sakurajima, Japan	2021-	Maki (2022, in the present report)

付録 B 噴煙研究プロジェクト一覧

本報告で紹介した研究成果は、学内の研究協力者および学外の研究機関との連携のもとで得られた。研究費等の支援を受けた研究プロジェクトを表 B-1 にまとめた。

表 B-1 噴煙モニタリングプラットフォームの開発と関連した研究プロジェクト

年度	研究テーマ (期間)	分類
2013-2014	気象レーダによる噴煙の実態解明と火山防災	共同研究 (京大防災研)
2013-2015	南九州地方における地域防災支援データベースの構築	委託研究 (防災科研/文科省)
2013-2015	気象レーダによる極端現象の監視と予測に関する研究	共同研究 (防災科研)
2013-2016	火山灰のレーダ散乱特性に関する研究	科研費 A (分担, 文科省)
2016-2019	降水時の爆発的火山噴火に関するレーダ気象学的研究	科研費 B (代表, 文科省)
2018-2019	船舶レーダによる機動的火山噴火監視技術の確立と火山防災への利用	共同研究 (京大防災研)
2016-2020	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/次世代火山研究と人材育成	委託研究 (京大防災研/文科省)
2018-2020	小型高精度マイクロ波レーダによる局地観測とその応用に関する共同研究	共同研究 (NPO 法人雷嵐)
2013-2021	MP レーダの観測精度向上と短時間予測に関する研究	共同研究 (日本気象協会)
2014-2021	気象レーダーを活用した火山噴煙に関する研究	共同研究 (気象研究所)
2016-2021	大規模火山噴火にレジリエントな地域社会の実現に向けた防災減災の取り組み	運営費交付金 (鹿大)
2018-2022	機動的レーダ観測による火口域降灰分布解析手法の開発/ 国家レジリエンス (防災・減災) の強化	委託研究 (内閣府)