



京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

一般共同研究

2023GC-02

極端現象のレーダマルチセンシング研究 Radar Multi-Sensing Study on Extreme Phenomena

令和 7 年 5 月

May, 2025

研究代表者 中村 啓彦

Coordinator Hirohiko Nakamura

「極端現象のレーダマルチセンシング研究」研究成果報告書

要旨

本研究では、「火山災害」と「極端気象災害」の両分野で利用可能な、レーダマルチセンシング手法を開発することを目的とし、3つの課題に取り組んだ。課題1では、桜島の大規模噴火を例として、噴煙柱情報とレーダ情報を入力情報とし、観測可能エリア、観測可能高度、ビームの広がり、地形遮蔽域、観測頻度を出力するシミュレータのプロトタイプを開発した。課題2では、鹿児島大学附属練習船「かごしま丸」に搭載されている船舶レーダを用いて、海水温分布に関連してバックビルディング型とブローケンライン型の混合型のような線状降水帯の形成・発達・消滅のライフサイクルを観測することに成功した。また、桜島の大規模噴火の観測には、船舶レーダを縦回転させる観測が有効であることを示した。課題3では、広く一般に桜島の火山噴煙に関する研究成果を公開することを目的として、電子ブック「レーダがとらえた桜島噴煙」(和文、英文)を出版した。本報告書では、これらの研究成果を詳述する。

目次

	【執筆者】
1. はじめに	中村啓彦
2. マルチレーダセンシング	
2-1. マルチレーダセンシングとは	真木雅之
2-2. マルチレーダセンシングシミュレータ	小堀壮彦
3. 極端現象のモニタリング実験	
3-1. 線状降水帯のモニタリング実験	中村啓彦
3-2. 桜島火山噴火のモニタリング実験	西隆昭
4. 研究成果の公開	
4-1. VASH	真木雅之
4-2. 電子ブック	真木雅之
5. おわりに	中村啓彦

付録資料：

資料1-1：電子ブック「レーダがとらえた桜島噴火」(和文)(CD ROM 版)

資料1-2：電子ブック「Sakurajima Eruption Cloud Observed by Radar」(英文)(CD ROM 版)

執筆者所属・職：

中村 啓彦： 鹿児島大学水産学部・教授(研究代表者)
真木 雅之： 京都大学防災研究所・特任教授
小堀 壮彦： 鹿児島大学農林水産学研究科・学術特定研究員
西 隆昭： 京都大学防災研究所・研究員

1. はじめに

本研究では、「火山災害」と「極端気象災害」の両分野で利用可能な、マルチレーダセンシング手法を開発することを目的とし、3つの課題に取り組んだ。

課題1（マルチレーダセンシングシミュレータの開発）では、桜島の大規模噴火を例として、噴煙柱情報（噴煙高度、粒径分布、時間変化）、レーダ情報（設置場所、仕様、スキャンモード）を入力情報とし、観測可能エリア、観測可能高度、ビームの広がり、地形遮蔽域、観測頻度を出力するシミュレータのプロトタイプを開発した。

課題2（船舶レーダを用いた極端現象のモニタリング実験）では、鹿児島大学附属練習船「かごしま丸」に搭載されている二周波レーダを用いて、梅雨期の東シナ海上の梅雨前線における線状降水帯の基礎データを取得し解析した。さらに、桜島の大規模噴火や積乱雲を対象として、船舶レーダを縦回転（RHI スキャン）させる観測を行い、火山噴煙を観測する新しい手法の開発を試みた。

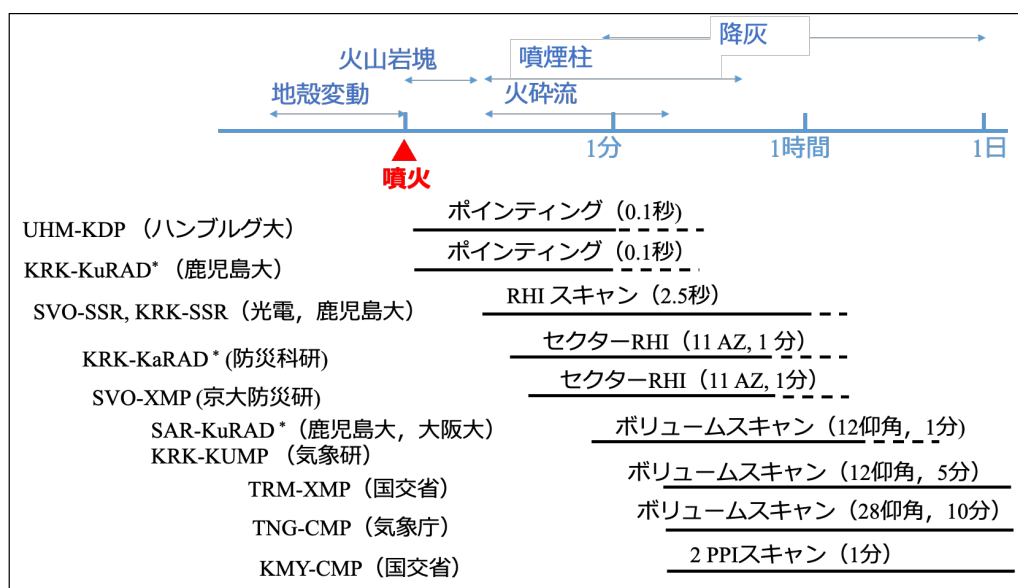
課題3（研究成果の公開）では、広く一般に桜島の火山噴煙に関する研究成果を公開することを目的として、電子ブック「レーダーがとらえた桜島噴煙」を作成し出版した。また、最終成果を取りまとめる目的で、共同研究参加者が一堂に集まり議論する全体会議を2025年1月13日に鹿児島大学水産学部で実施した。

本報告書は以下のように構成されている。第2章は課題1に関する報告である。2-1ではマルチレーダセンシング技術の概要が説明され、2-2では開発されたマルチレーダセンシングシミュレータが紹介される。第3章は課題2に関する報告である。3-1と3-2-1では「かごしま丸」のX-bandとS-bandレーダによる線状降水帯のモニタリング実験の結果を報告する。続く3-2-2では、船舶レーダを横回転（PPI スキャン）と縦回転（RHI スキャン）させて桜島噴煙を観測した成果を報告する。最後に、第3章は課題3に関する報告である。3-1でVASH（リアルタイム噴煙ハザードマップの作成に際して役に立つ情報を提供すると共に降灰による被害を軽減するために開設されたwebサイト）を、3-2で電子ブックを紹介する。

2. マルチレーダセンシング

2-1. マルチレーダセンシングとは

2010年代は我が国で噴煙の本格的なレーダモニタリングの研究が開始された時期である。その拠点になったのが頻繁に噴火を繰り返す桜島である。地理的に観測のしやすさもあり、各研究機関が、所有する気象レーダを桜島に設置して噴煙観測をおこなった。例えば、国土交通省の現業Xバンド偏波レーダによる桜島噴煙の解析（Maki et al., 2016）、神戸大学の小型XバンドMPレーダによる観



* 廃局

図1. 噴火現象とマルチレーダセンシングのタイムラインの例.

測 (Oishi et al., 2015; 中道ほか, 2018), 気象研及び鹿児島大学のKuバンド高速ドップラーレーダによる桜島噴煙の3次元内部構造の観測(佐藤, 2018; Maki et al., 2019), 船舶レーダによる噴煙柱の発達過程の観測とキャップロックの検出 (Maki et al., 2020; Maki and Tokushima, 2020)), 船舶レーダを利用した噴煙高度の推定 (Kobori et al., 2022) などがある。

真木ほか (2023) は様々なタイプのレーダを用いて火山噴火に伴う現象を定量的かつ時空間を連続して観測する方法をマルチレーダセンシングと定義した。マルチレーダセンシングの主なターゲットは、爆発的火山噴火に伴って発生する現象で、噴煙柱、火山灰雲、火砕流、降下火砕物 (火山岩塊、礫、火山灰) などである。図1 に噴火現象とマルチレーダセンシングのタイムラインを示す。桜島で個別におこなわれた噴煙のレーダ観測を噴火現象の時系列に対応させて整理した図で、理想的なマルチレーダセンシングの一例を示している。一般的に大規模火山噴火は数十年から数百年の発生頻度であるのに対して、個々の気象レーダの寿命は短い。過去の気象レーダの歴史を振り返ると、約10年から20年のサイクルで新たなタイプのレーダが開発され実用化されてきた。今後もその傾向が変わらないとすれば、噴煙のマルチレーダセンシングの概念は普遍で、その時代に対応して構成するレーダや観測方法が変化していくと考えられる。

参考文献

- 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>
- 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.
- 真木雅之・西隆昭・中道治久・井口正人・中村啓彦・佐藤英一・小堀壮彦・メンバー (桜島噴煙モニタリングプラットフォーム研究会). 日本火山学会講演予稿集, 2023 年度, A1-04.).

https://doi.org/10.18940/vsj.2023.0_4

- 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>

- Maki, M. and Tokushima, H. (2020): Collection of Sakurajima volcanic eruption echoes in 2018 observed with an X-band marine radar. Available from

<http://hdl.handle.net/10232/00031498>.

- 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.

- 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.

- 佐藤英一 (2018): Ku バンド高速スキャンレーダ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.

2-2. マルチレーダセンシングシミュレータ

火山が噴火した際に、観測によって噴火の規模や噴煙の移流方向を把握することは、防災の面でもとても重要である。近年では、カメラによる観測に加えて、可視条件による制約を受けにくい気象レーダを用いた噴煙観測も行われている (Marzano et al. 2013; Hort and Scharff, 2016). レーダによる効果的な観測を行うためには設置場所や観測する方位の適切な設定が不可欠である。しかし、複数のレーダを用いた観測において、観測範囲や必要な感度、分解能などを総合的に判断して配置や設定を決定することは容易ではない。

これまでも、気象現象を対象としたレーダ配置に関する研究は行われている (Minciardi, 2003; Kurdzo, 2012). しかし、これらはレーダの仰角を固定して方位角を回転する観測方式 (PPI スキャン) を前提としており、その他の方式、例えば方位角を固定して仰角を回転する RHI スキャンに対応したものは見当たらない。そこで、a) 複数台の

船舶レーダによる RHI 観測をサポートし、b) 定量的な評価結果を計算する、c) 噴煙柱のように局所的な観測を想定した評価が可能なツール「マルチレーダセンシングシミュレータ」(以下、シミュレータという)を開発した。

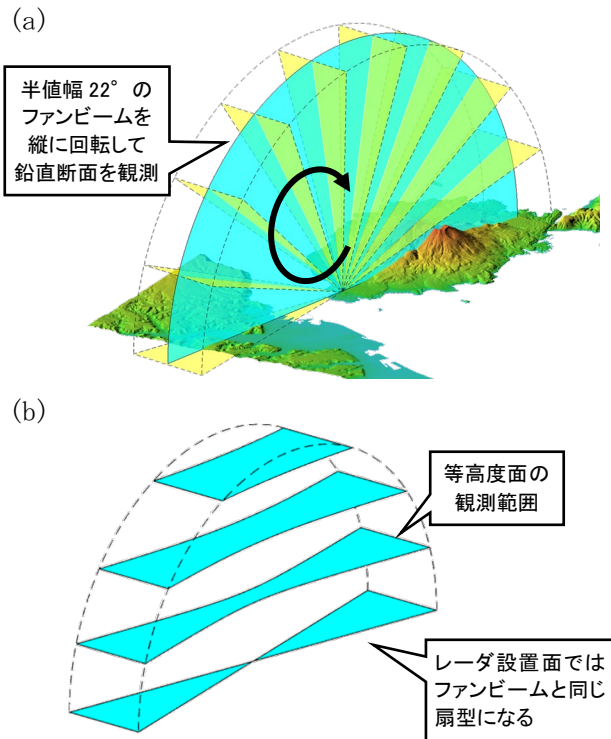


図 1. 船舶レーダの観測範囲.

2-2-1. シミュレータの機能

(1) 観測範囲の計算

船舶レーダを用いた RHI 観測では、アンテナを車輪のように回転されることによって鉛直断面を観測する (図 1. (a)). このとき、等高度面における観測範囲は中心のくびれた短冊のような形状となる (図 1. (b)). シミュレータは地形によって不可視となる範囲を考慮して、任意の等高度面におけるレーダの観測範囲を求める. 複数のレーダで観測範囲が重なる部分には、観測可能なレーダの数を設定する.

(2) 感度の計算

レーダの感度として、レーダ方程式から導かれる最小検出可能反射強度 (Minimum Detectable Reflection Radar: MDR) を計算する. MDR は下式から求める.

$$MDR = S_{min} - 10 \log C'_3 + 2 \int_{r_0}^{r_i} A_h ds + 2 \times 10 \log r + 10 \log f$$

$$C'_3 = |K_w|^2 \frac{\pi^5 \times 10^{-17}}{6.75 \times 2^{14} (\ln 2)} \frac{P_t \tau g^2 \theta_0 \phi_0 l_r}{\lambda^2}$$

ここで、 S_{min} は最小受信感度、 r はレーダからの距離、 $\int_{r_0}^{r_i} A_h ds$ は経路 $r_0 \sim r_i$ 間の降雨減衰量、 $10 \log f$ はその他の損失、 $|K_w|^2$ は水の誘電率に関するパラメータ、 P_t は尖頭送信電力、 τ はパルス幅、 g はアンテナ利得、 θ_0 は水平ビーム幅、 ϕ_0 は垂直ビーム幅、 l_r は受信機の有限バンド幅による電力損失、 λ は波長を表す. 複数のレーダで観測範囲が重なる部分では、最も小さい MDR を採用する.

(3) 空間分解能の計算

ビームの半値角を ϕ とすると、レーダからの距離 r におけるビーム幅 w_y は以下の式で表される.

$$w_y = r \sin \phi$$

また、標高 h の等高度面におけるビーム進行方向の分解能 w_x は、仰角 θ 、仰角の分解能 $\delta\theta$ を用いて下式で表される.

$$w_x = (h - h_0) \left| \frac{1}{\tan(\theta + \delta\theta/2)} - \frac{1}{\tan(\theta - \delta\theta/2)} \right|$$

以上より、空間分解能 δS を以下の式から求める.

$$\delta S = w_x w_y$$

複数のレーダで観測範囲が重なる部分では、最も小さい空間分解能を採用する.

(4) 時間分解能の計算

単位時間あたりの観測回数を時間分解能と定義する. 時間分解能は各レーダの特性として設定しておく. レーダの覆域ごとにその時間分解能を決定し、複数のレーダで観測範囲が重なる部分では、最も高い時間分解能を採用する.

(5) レーダ噴煙観測ポテンシャルの計算

レーダの配置やスキャンモードの有効性を評価するため、観測対象範囲を等高度・等緯度・等経度で分割したグリッドを定義し、個々のセルについて (1)～(4) のレーダ特性 (観測範囲、感度、空間分解能、時間分解能) を求める. 観測対象範囲の中で各レーダ特性が要求値を満たすパーセンテージ (V_{CVR} , V_{MDR} , V_{SPR} , V_{TPR}) を計算し、これらの重み付き平均 (下式) により、レーダの配置やスキャンモードの総合的な評価指標「レーダ噴煙観測ポテンシャル (Volcanic Eruption Cloud Monitoring Potential: VCMP)」を求める.

$$VCMP = \frac{C_{CVR}V_{CVR} + C_{MDR}V_{MDR} + C_{SPR}V_{SPR} + C_{TPR}V_{TPR}}{C_{CVR} + C_{MDR} + C_{SPR} + C_{TPR}}$$

ここで、 C_{CVR} 、 C_{MDR} 、 C_{SPR} 及び C_{TPR} はそれぞれ観測範囲、感度、空間分解能、時間分解能の重みであり、評価目的に応じて調整することができる。

(6) 噴煙柱モデル

シミュレータで扱う領域は、地図上の矩形範囲だけでなく、幾何学的にモデル化した噴煙柱の範囲に限定することもできる。噴煙柱モデルは鉛直軸に対称な形状として、高度と半径のルックアップテーブルを用いて定義する（図2）。

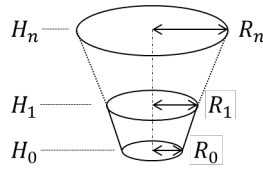


図2. 噴煙柱モデルの概要。噴煙柱の高度Hと半径Rの組み合わせで形状を定義する。

2-2-2. シミュレータによる解析例

(1) 桜島の船舶レーダ配置効率

現在桜島を観測している船舶レーダの配置と火口上3,000 mにおける観測範囲を図3(a)示す。これら9台のレーダは全て南岳火口に向けて設置されている。全レーダを組み合わせた $VCMP_S$ は、50.6であった。ここで、係数はカバレッジを重視して $C_{CVR} = 1$ 、 $C_{MDR} = 0.5$ 、 $C_{SPR} = 0.5$ 、 $C_{TPR} = 0$ とした。続いて、各レーダの貢献度を評価するため、 S_n ($n=1 \sim 9$)を除いたレーダの部分集合から $VCMP_{S \setminus S_n}$ を求め、 $VCMP_S$ との差分を調べた。この結果、 S_5 を取り除いたときの影響が最も小さい——すなわち、最も貢献度が低い——ことがわかった。同様の手順で2番目に貢献度の低いレーダは S_3 と識別された。

観測効率を向上するためには、貢献度の低いレーダの設置場所を移動したり、方位角を変更したりすると良い。図3(a)の観測範囲を見直すと、桜島の北部と南部に不可視の領域が残っている。そこで、 S_3 の方位角を 60° 、 S_5 の方位角を 80° に変更した。この結果、桜島の陸域がほぼ網羅され、火口上3,000 mを超える噴煙が桜島上空に存在する場合、いずれかの船舶レーダで噴煙を観測できるようになった（図3(b)）。 $VCMP_S$ は50.6から58.8に向上した。

表1 VCMPの比較。 $S \setminus S_n$ は $\{S_1, S_2, \dots, S_9\}$ から S_n を除いたレーダ群を表す。VCMPのカッコ内の数値はとの差分を示している。

レーダ	V_{CVR}	V_{MDR}	V_{SPR}	V_{TPR}	VCMP	
S	52.1	46.2	52.1	52.1	50.6	-
S \setminus S₁	49.1	44.0	49.1	49.1	47.8	(-2.8)
S \setminus S₂	48.9	44.4	48.9	48.9	47.8	(-2.8)
S \setminus S₃	50.1	44.5	50.1	50.1	48.7	(-1.9)
S \setminus S₄	51.3	45.3	51.3	51.3	49.8	(-0.8)
S \setminus S₅	52.0	46.0	52.0	52.0	50.5	(-0.1)
S \setminus S₆	47.4	41.5	47.4	47.4	46.0	(-4.6)
S \setminus S₇	49.6	43.7	49.6	49.6	48.1	(-2.5)
S \setminus S₈	46.0	38.5	46.0	46.0	44.1	(-6.5)
S \setminus S₉	47.0	39.1	47.0	47.0	45.0	(-5.6)

(2) 富士山への船舶レーダ設置計画

富士山の噴火を想定したシミュレーションとして、1707年の宝永噴火でできた宝永火口付近に噴煙柱（山頂付近で半径500 m、山頂上3,000 mで

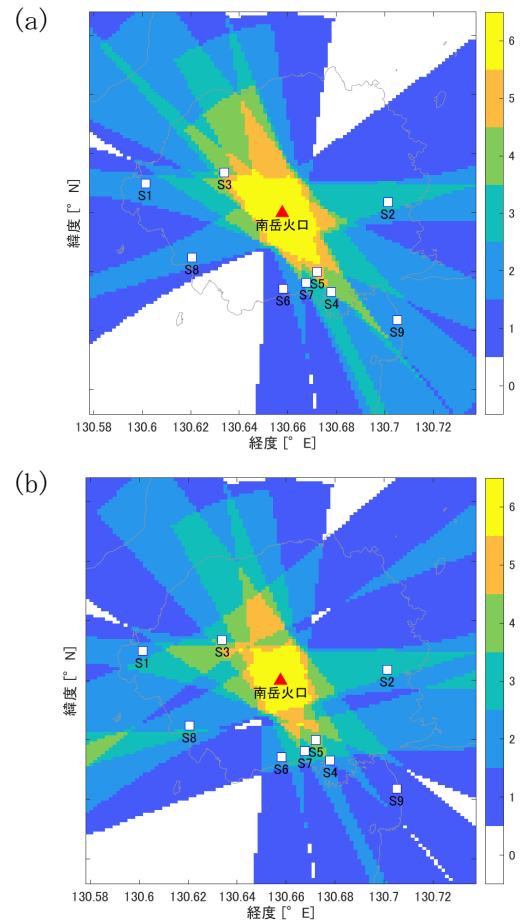


図3. 桜島に配置した観測点 $S_1 \sim S_9$ を用いた火口上3,000 mにおける覆域。左は全ての船舶レーダの方位角を南岳火口に向けたケース、右は観測点 S_3 と S_5 の方位角をそれぞれ 60° 、 80° に変更したケース。

半径 5,000 m の軸対称領域)を設定し、これを山腹に設置した船舶レーダから観測したときの可視性を評価した。さらに、噴煙柱が火口から東西南北に 10 km 移流した場合について同様の評価を行った。船舶レーダは噴煙柱の移流に伴い方位角を追尾できる仕様とした。

図 4 に船舶レーダの位置と噴煙柱の領域における観測範囲を示す。火口直上はもとより、東西南北に移流した場合でも複数の船舶レーダで観測できることがわかる。現状、実際の船舶レーダは方位角を固定した RHI 観測を行っているが、限られた観測点で継続的に噴煙を観測し続けるためには噴煙の位置に応じて RHI 観測の方位角を追従させる仕組みが必要と考えられる。

2-2-3. シミュレータの今後

マルチレーダセンシングシミュレータは、本書で紹介した噴煙柱モデルに移流と成長の効果を加えたシミュレーションにも対応している。また

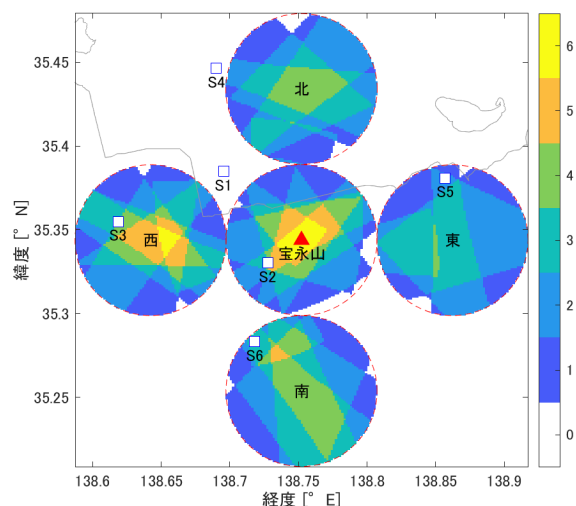


図 4. 富士山の仮想的な観測網による火口上 3,000 m における観測レーダ数の分布。赤点線は宝永山直上に設定した噴煙柱と、東西南北に移流した噴煙柱の範囲を示している。

RHI スキャンと PPI スキャンを組み合わせた評価が可能であり、現在検証を進めている。今後は、様々なスキャン方式への対応を拡充するとともに、有効な評価特性の追加や最適なレーダ配置を提案する機能の検討を進め、火山防災に活用可能な実用的なツールとなるよう、改良と検証を重ねていく。

参考文献

- F. S. Marzano, E. Picciotti, M. Montopoli and G. Vulpiani, "Inside volcanic clouds: Remote sensing of ash plumes using microwave weather radars," Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 94, no. 10, pp. 1567-1586, 2013.
- M. Hort and L. Scharff, "Volcanic Ash," in Detection of airborne volcanic ash using radar, 2016, pp. 131-160.
- R. R. S. a. F. S. Minciardi, "Optimal Planning of a Weather Radar Network," J. Atmos. Oceanic Technol, 2003.
- J. M. a. R. D. P. Kurdzo, "Objective Optimization of Weather Radar Networks for Low-Level Coverage Using a Genetic Algorithm," J. Atmos. Oceanic Technol, 2012.

3. 極端現象のモニタリング実験

3-1. 線状降水帯のモニタリング実験

3-1-1. はじめに

本節では、船舶に搭載されている X-band と S-band の船舶レーダを用いて、九州西方海上のメソ対流系（積乱雲の組織化した形態）の発達過程を観測した事例研究を報告する。まず初めに、その研究の背景と概要を説明する。ここでは、形態が線状の降水帯を指す場合は線状降水帯と表記し、それ以外はメソ対流系という用語を使用する。

近年の研究により、東シナ海北東部の黒潮流域では、黒潮系暖水が梅雨期の降水過程に強く影響していることが指摘されている。例えば、Qiao et al. (2024) は、近年 40 年間に東シナ海の黒潮上の海面水温は約 1℃ 上昇したため、対流圏下層での圧力調節による水平風収束と海洋の潜熱放出による対流圏中層での非断熱加熱によって対流活動が活性化され、黒潮域とその周辺の降水量が増加したことを示した。

このような東シナ海の黒潮上での大気環境場の変化は、黒潮上のみならず南西諸島や九州西方の梅雨期の降水、特に、西日本で近年顕著化している線状降水帯による集中豪雨の要因になっている可能性がある。そのため、2022 年 6 月 19~20 日にかけて、長崎大学・鹿児島大学・三重大学等と気象庁/気象研究所により、九州西方海上で船舶を用いた大気・海洋環境場の集中観測が実施された。

この観測は、黒潮系暖水と沿岸系冷水の境界域に梅雨前線帯が位置する絶好の条件のもとで、最大 80mm/h の非常に強い降水の中で実施された(図 1).

この観測データを解析し、Manda et al. (2024) は、この強雨が総観規模の低気圧がない状況で起こったこと、対流圏中層の大規模な水蒸気流入と海面付近のほぼ飽和水蒸気状態にある大気環境が重要だったことを示した. さらに、Nakashita et al. (2024) は、観測データを用いたデータ同化実験を通して、観測期間中に観測海域で発生した 2 回の広域降水イベントの内、2 回目の降水イベントは海面水温の影響が大きかったことを指摘した.

本研究では、この集中観測の際、鹿児島大学附属練習船「かごしま丸」の船舶レーダを用いて取得した、雨雲画像を解析した結果を報告する. 船舶レーダは、約 2.5 秒で 1 回転するため、積乱雲の成長と組織化のような短時間で発達するメソ対流系の現象の観測に適している. 本研究は、海上で発達するメソ対流系の発生・発達・消滅過程に関する数少ない観測事例であると伴に、人工衛星「ひまわり 8 号」の雲画像との比較を通して、船舶レーダの雲画像の特性とそれを利用した海上気象解析の有効性を示したものである.

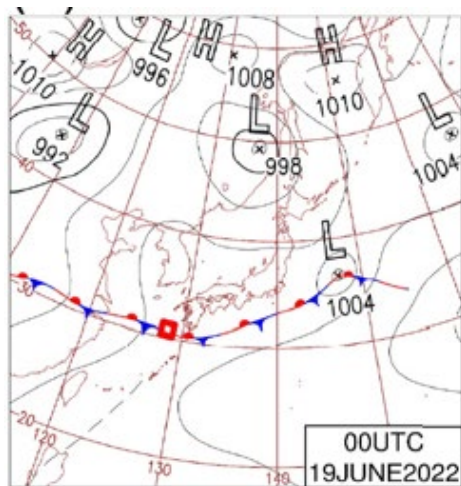


図 1. 観測時の天気図. 2022 年 6 月 19 日 9 時 (JST). 観測海域を赤色四角で示す.

3-1-2. 観測概要

2022 年 6 月 19 日 8 時 (JST) から 21 日 11 時までの 26 時間、九州西方海域において、長崎・鹿児島・三重大学の練習船 3 隻を用いて、ラジオ

ゾンデを用いた高層気象観測と XCTD (水温・塩分計) を用いた海洋観測が実施された(図 2). 「かごしま丸」では、この観測に合わせて、X-band と S-

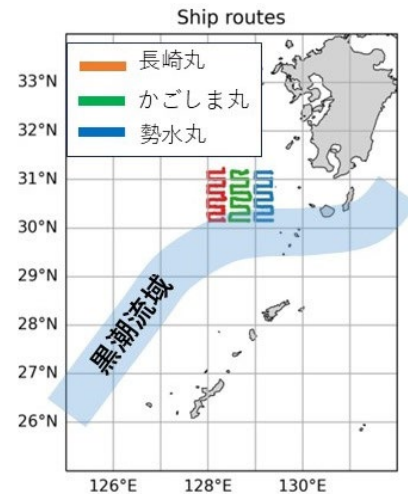


図 2. 観測海域と 3 船の航路.

band 船舶レーダの PPI スコープ形式の画像を、レーダのコンソールに接続したパソコンに 1400 枚/時 (S-band は 700 枚/時) の割合で保存した. 航海データ (船首方位と船位) を用いて、各画像の方位補正と緯度・経度の位置決定を行い、反射強度 (画像の輝度値) のデータセットを作成し解析した. 以後、本報告書では、雨雲画像、反射強度、輝度値の用語を同義として使用する.

船舶レーダの PPI 画像は、半径 50nm (約 90km) の範囲を、1024 ピクセル (172m 間隔) で解像している. また、レーダービームの仰角は±10 度なので、レーダから 45km 離れた地点では、海上から高度約 8km までの雨水の積算量を計測していることになる. X-band レーダの電磁波は、雨水によりエネルギーが吸収され減衰する性質があり、厚い雨雲の背後を計測できないのに対し、S-band レーダの電磁波は、雨水では減衰しないので厚い雨雲の背後も計測可能である.

3-1-3. 解析方法

まず、全観測期間の雨雲画像の動画を作成し、5 つのメソ対流系の降水イベント (ケース A~D) を抽出した. これらの降水イベントを、Takikawa et al. (2025) の Fig. 3 (気象庁/気象レーダの降水時系列) 上で整理した図を示す (図 3). 本報告書では、積乱雲とその組織化の状態が画像として明瞭に捉えられたイベント B について、個々の雲が組織化していく過程として、雲の発生位置、組織

化された形状・規模，発生から成熟および成熟から消滅までの時間を計測した．さらに，Kato (2020)に従って，組織化の過程を，線状降水帯を形成する a)バックビルディング型（次々に発生する積乱雲が線状に並ぶタイプ）と b)ブローケンライン型（いっせいに積乱雲が線状に発生するタイプ）に分類した．

本研究では，メソ対流系の発達過程について，人工衛星「ひまわり 8 号」の雲画像（熱赤外面像）と船舶レーダ画像を比較した．ひまわり 8 号の雲画像は時間解像度 10 分，空間解像度 2km で比較

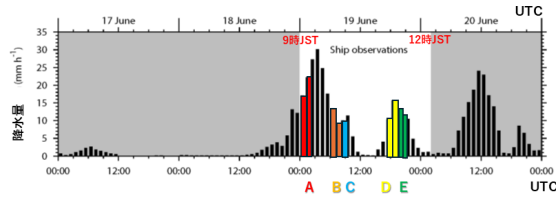


図 3. 観測海域における気象庁気象レーダによる降水量時系列 (Takikawa et al. (2025, Fig.3) を改変)．図中の A～E は，X-band レーダで観測されたメソ対流系の発達イベントを示す．

的高解像度であるが，積乱雲の発達過程のような 1 時間程度の時空間スケールの現象を観測するには不十分である．その点，船舶レーダは時間解像度 2.5 秒，空間解像度 2km なので，積乱雲の組織化によるメソ対流系の発達を捕らえるのに適している．さらに，ひまわり 8 号の雲画像が観測しているのは雲であり，降水を伴う雨雲かそうでないかを判別できない．一方，船舶レーダは雨雲（雨粒の集合）による後方散乱波を観測しており，両者の比較を通して，ひまわり雲画像の中の降水域を特定することができる．

船舶レーダは雨雲を観測しているので，その反射強度を利用すれば，大気中の雲水量（つまり降水量）を推定することが可能である．本研究では，その手法を試験的に確認するために，X-band と S-band 船舶レーダの輝度値を比較する．原理的には，以下の方法で雲水量の推定が可能である (Doviak and Zrnice, 1993)．

$$\begin{aligned} \frac{2}{r_2 - r_1} \int_{r_1}^{r_2} D(x) dx \\ = -\frac{1}{(r_2 - r_1)} \log_e \left(\frac{I_x(r_1)}{I_x(r_2)} \cdot \frac{I_s(r_2)}{I_s(r_1)} \right) \\ = -\frac{1}{(r_2 - r_1)} \left[\log_e \left(\frac{I_s(r_2)}{I_s(r_1)} \right) - \log_e \left(\frac{I_x(r_2)}{I_x(r_1)} \right) \right] \quad (1) \end{aligned}$$

ここで， x はレーダからの半径方向距離， $D(x)$ は雲水量に関連する物理量， I_x は X-band レーダの I_s は S-band レーダの反射強度（本研究の場合は PPI 画像の輝度値）， r_1 と r_2 は半径方向の位置である．つまり半径方向の 2 地点間の雲水量の積分値に相当する物理量が観測できる．本研究では，この関係式の有効性を試験的に確認する．

3-1-4. 船舶レーダ雨雲画像とひまわり 8 号雲画像の比較

X-band レーダの連続画像（図 4）から，ケース B の対流系は発生から消滅まで以下の経過をたどったことが分かる．19 日 15 時 30 分頃，最初の積乱雲が出現した後，約 25 分で孤立した 10 個程度の積乱雲が東北東～西南西に列状に配列した．その後，約 50 分かけて 16 時 45 分頃に個々の積乱雲が組織化し線状降水帯を形成し最盛期を迎えた．最盛期から衰退するまでの時間は約 45 分であり，この線状降水帯の発生から消滅までの寿命は約 125 分であった．最盛期の線状降水帯の長さは約 170km であった．Kato (2020) では，陸上で見られる線状降水帯の長さは 50-300km とされており，ケース B は中程度の空間スケールであったと考えられる．一方，時間スケールは，Kato (2020, Table

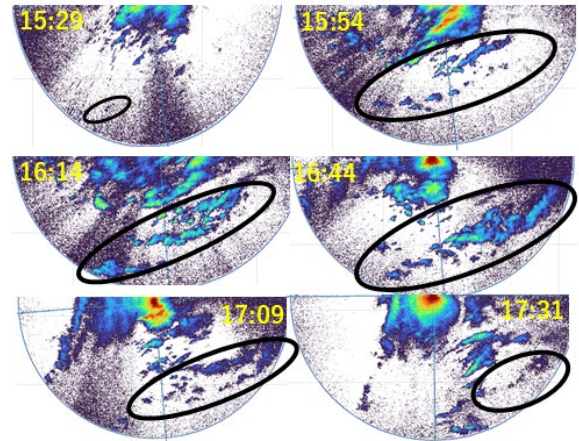


図 4. ケース B のメソ対流系の発達から消滅までの過程を示す X-band レーダ画像(2022 年 6 月 19 日 15:30～17:30)．黒色の楕円でメソ対流系（線状降水帯）の位置を示す．

2) がリスト化した 24 事例の線状降水帯の平均寿命が 4.1 時間であることを考えると，短めの寿命の線状降水帯に分類される．

海上で線状降水帯が形成される要因の一つとして、海水温の分布が上昇気流の形成を促すことが考えられる。図 2 の模式図に示すとおり、観測海域の南側では、ほぼ東西に黒潮が流れている。図 6a(同様に図 7a, b)には、観測された海面水温が等値線で示されている。線状降水帯は、海面水温フロントに平行に形成されている。海面水温フロントが下層大気の傾圧性を促し、ブローケンライン型の線状降水帯の形成に繋がった可能性がある。一方、形成初期の積乱雲群の西端の位置はほぼ一致している、その西側では、黒潮流路に依存して海面水温フロントは南北に伸びていることが予想される。背景場の西風によって空気塊が暖水域に入ったところで上昇気流が発生し、積乱雲が発生したと考えると、バックビルディング型の線状降水帯の形成過程に似ている。このような観点で考察すると、今回観測された線状降水帯は、ハイブリッド型と呼べるかもしれない。また、線状降水

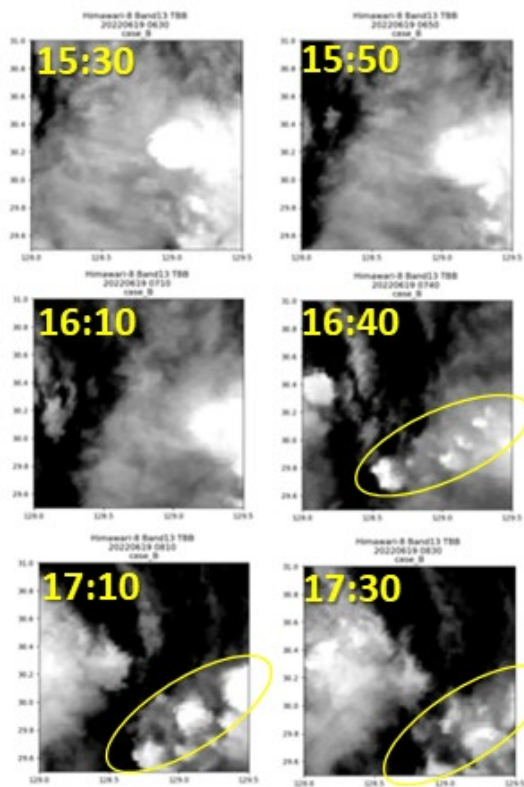


図 5. ケース B の X-band レーダ画像 (図 4) に対応したひまわり 8 号雲画像。黄色の楕円でメソ対流系 (線状降水帯) の位置を示す。

帯としては寿命がやや短かった理由として、典型的なバックビルディング型の線状降水帯ではない点があげられるかもしれない。

次に、船舶レーダの雨雲画像をひまわり 8 号雲画像 (図 5) と比較する。ひまわり 8 号の雲画像

では、輝度値が大きい孤立積乱雲の群集が観測されたのは 16 時 40 分以降である。この時刻は、船舶レーダ画像では線状降水帯が成熟期を迎えている時刻である。ひまわり 8 号雲画像と船舶レーダ画像における線状降水帯形成の時間差は以下のように理解できる。船舶レーダは海上から仰角 ± 10 度の範囲で上空の雨水量を観測している。線状降水帯はレーダ位置 (船の位置) から 50~70km 離れているので (図 6 参照)、船舶レーダは対流圏全体の雨水量をカバーしているとみなせる。一方、ひまわり 8 号は雲頂から放射される熱赤外線強度を計測しているので、十分積乱雲が発達した後でなければ計測できないと考えられる。積乱雲の発達段階が、両者の観測の差に繋がった可能性がある。

図 6 では、線状降水帯の位置は、ひまわり 8 号の方が船舶レーダに比べて南東に 10km 程度ズレていることがわかる。このズレの原因を明快に説明することは難しいが、以下の要因があげられる。

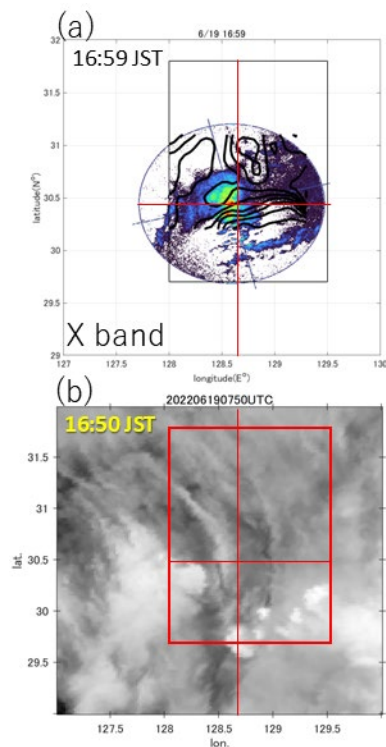


図 6. ケース B のメソ対流系の成熟期における、(a) X-band レーダ画像と (b) ひまわり 8 号雲画像の比較。長方形は同一海域を示す。図 6(a)の等値線は海面水温を示す。

線状降水帯が発達していた時刻、気象庁メソスケールモデル (MSM) の 500hPa 面の風向きは西風であったので、線状降水帯が上空に行くほど東に傾いていた可能性がある。しかし、風向き (前線に

吹き込むやや南よりの風)に基づいて南にズレている特徴を理由付けるのは難しい。

3-1-5. X-band と S-band レーダの反射強度の比較

ケース B の線状降水帯について、成熟期をやや過ぎた時刻 (16:59 JST) において、X-band レーダと S-band レーダの反射強度を比較した。X-band と S-band とともに、ほぼ同様の雨雲分布を捉えていることがわかる (図 7a, b)。しかし、X-band レーダの電磁波は雨雲により減衰するのに対して、S-band レーダのそれは減衰しないという特性の違いがある。その点を正確に比較するため、図 7b, c ではレーダの位置 (船の位置) を通る東西断面 (図 7a, b の赤横線) で両者の輝度値を比較した。

図 7a は、レーダ位置における反射強度で規格化した反射強度の東西分布である。東経 128 度付近で、両者の分布は顕著に異なる。ほぼ同時刻のひ

ダの輝度値の分布の差は、この特徴を反映しているとみなせる。つまり、X-band レーダの反射強度はレーダ西側の雨雲で減衰し、さらに西側にある雲を観測できなかったが、S-band のそれは減衰しないので観測できたと考えられる。

上述した事実に基づいて、本節の(1)式を用いて、X-band と S-band の反射強度から雲水量を見積もることが可能である。図 7d において S-band と X-band の折れ線グラフの差は、レーダ位置と任意の位置 x の間の雲水量の積算値に関連する物理量である。たしかに、図 6 のひまわり 8 号雲画像で、厚い雲が存在する位置で両者に差があることがわかる。現時点では、試験的な試みをしているに過ぎないが、将来的には、(1)式で計算される物理量と陸上の気象庁気象レーダによる雲水量を比較して両者の比例定数を決定すれば、S-band と X-band の船舶レーダを用いて、レーダが捉えた雨雲の雲水量を推定する経験式を導出できる可能性がある。

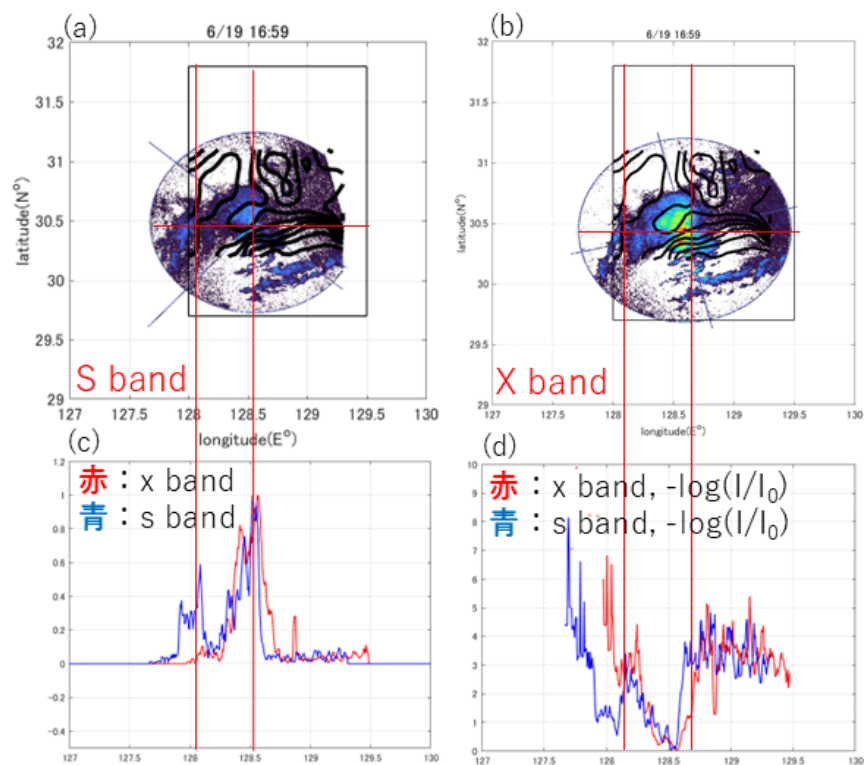


図 7. X-band と S-band レーダの反射強度 (輝度値) の比較. (a) S-band レーダの PPI 画像, (b) X-band レーダの PPI 画像 (レーダ位置の輝度で規格化), (c) レーダ位置を通る東西線の反射強度, (d) (1)式に従って対数を取ったもの (I は位置 x の反射強度. I_0 は中心の反射強度).

まわり 8 号雲画像 (図 6) からは、レーダ位置から西側に比較的厚い雲域があるのに対して、レーダ付近と東側には薄い雲しか存在していないことがわかる。図 7a における X-band と S-band レー

3-1-6. まとめ

本研究では、2022 年 6 月 19-20 日に九州西方海上で鹿児島大学附属練習船「かごしま丸」により観測された、X-band と S-band 船舶レーダの反射

強度を解析した。主要な結果は、以下のとおりである。

1) 海水温分布に関連して、バックビルディング型とブローケンライン型の混合型のような、線状降水帯の形成・発達・消滅のライフサイクルを捉えた。

2) 船舶レーダ画像は、ひまわり雲画像よりも時空間的に正確に、海域のメソ対流系の発達過程の特性を理解できる。

3) S-band と X-band レーダの反射強度を組み合わせることで、(1)式のレーダ方程式より雲水量（雲を構成する粒径状の水の量、つまり降水量）を推定できる可能性がある。

船舶レーダはほとんどの船舶に設置されており、かつ気象レーダと比べると比較的安価である。現段階では、雨雲画像の輝度値から雲水量を推測するまでには至っていないが、量的推定が可能になれば複数船の船舶レーダを組み合わせることで海上の広範囲の雨雲を観測するシステムを構築できる。今後、船舶レーダの利用は、海上での雨雲の有効な観測手段になると考えられる。

参考文献

- Doviak, R., and Zrnica, D. 1993, Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press. <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/books%3A19> (Original work published 1993)
- Kato, T., 2020, Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named "Senjo-Kousuitai", Causing localized heavy rainfall in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 98, 485-509.
- Manda, A., Y. Tachibana, H. Nakamura, et al., 2024, Intensive radiosonde observations of environmental conditions supporting development of a mesoscale convective system in the Baiu frontal zone. Earth and Space Science, 11.
- Nakashita, S., T. Enomoto, and S. Ishii, 2024, Multi-scale uncertainty of mesoscale convective systems in the Baiu frontal zone: a case study from June 2022. J. Meteor. Soc. Japan, 102, 599-631.
- Qiao, Y.-X., H. Nakamura, and T. Tomita, 2024, Warming of the Kuroshio Current over the last four decades has intensified the

3-2. 桜島火山噴火のモニタリング実験

2018 年から始まった船舶レーダによる桜島噴煙観測は、南岳噴火口から 10km の鹿児島大学下荒田キャンパスで薄くではあるが捕らえることができた。噴火口から 4km 程の京都大学黒神観測室に船舶レーダを置き噴煙を観測すると噴煙が良く映った。

本研究課題「マルチレーダセンシング」では、①XバンドとSバンド映像の比較（2023 年）と②京都大学桜島観測所、ハルタ山、黒神の RHI 観測に黒神の PPI 観測を加えて噴煙の移動方位の詳細な検出方法の調査を実施した（2024 年）。3-2-1 節で①について説明し、3-2-2 節で②について説明する。

3-2-1. 船舶用レーダ X-band と S-band による海上の雨雲観測

これまで桜島の噴煙を、桜島観測所や黒神観測所で船舶用レーダを使用して観測してきた。船舶用レーダは、約 2.5 秒に 1 回転するので、気象レーダに比べて短時間で噴火の傾向をとらえることができた（図 1、図 2）。

船舶用レーダは 3cm 波帯(X-band)と 10cm 波帯(S-band) が割り当てられているが、噴煙の観測に用いたのは X-band 船舶用レーダである。X-band は S-band と比べて波長が短いので、アンテナが小さくでき小型船で有利であるので、普及している。噴煙観測でもこの特徴を生かした機動的観測がで

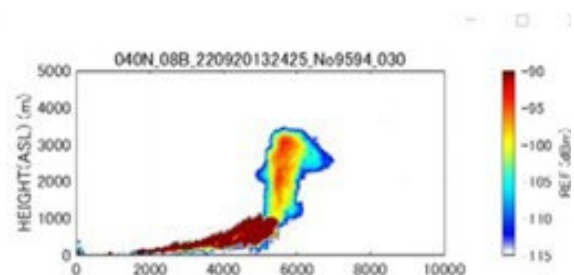


図 1. 桜島噴煙（2022/09/20 13:24）。桜島観測所。

きる（図 3）。S バンドは X バンドに比べて減衰が小さいので、X バンド信号に映らない信号を記録できることが期待される。

2022 年 6 月 18 日から 7 月 2 日の 15 日間、かごしま丸の観測された取得されたデータは、X バンドにおいて 501,683 個で 2.5 秒に 1 個保存できおり、ほぼ全てのデータを保存できている。一方で、S バンドで 245,123 個となり 1/2 であった(図 4, 図 5)。なお、この観測データは、3-1 節で解析されたものと同じである。

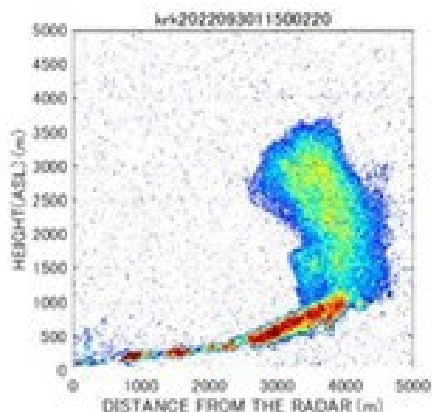


図 2. 桜島噴煙 (2022/09/30 11:50). 桜島観測所.

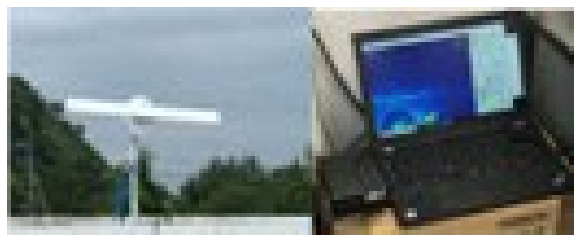


図 3. 固体化船舶用レーダ写真. 桜島観測所.

船舶用レーダは映像を外部に保存する機能がないので、PC にビデオ、トリガ、方位、ヘディング信号を取り込み保存する方法を取ったのでデータ保存の設定は 1 回転ごとであるが、PC の A/D 変換が追いつかないとデータ保存の個数が減る。表 1 と表 2 に X バンドと S バンドの船舶レーダの仕様を示す。周波数が高い分 X バンドレーダの分解能が高い。

2022 年と 2023 年の航海期間の航跡を図 7, 図 8 のように作成し航海期間の天気図と降雨やレーダ映像を比べると 2022 年 6 月 19 日に梅雨前線付近を航海しており特徴的な映像が得られた(図 6, 7, 8)。

船首からの方位 45° ~135° で X-band は 15NM くらいまで雨雲エコーが強いが、以遠は映像が無い。S-Band では中心のエコーはあるが 5NM 付近に筋状のエコーが観測されている(図 9, 10)。かごし

ま丸船舶用レーダの垂直覆域は 50NM で上空 16km から 20km であるので、レーダサイトから遠方であるほど覆域は地上から対流圏までを含む。

2022/06/19 同時刻の X と S バンドレーダ映像をレーダアンテナに一番近い雨雲映像で輝度調整(正規化)後に距離に対して輝度測定をしたのが図 11 と図 12 である。映像の中心付近は X-Band と S-band で違いはないが、中心から離れるに従い S-band の雨雲映像が際立っている。



図 4. かごしま丸レーダアンテナ. 上側が X バンド, 下側が S バンド.



図 5. かごしま丸レーダ制御監視部と観測用 PC.

レーダの距離に対する正規化した X-Band と S-Band の映像輝度を比較したところ 45°, 225° の両方向でアンテナ近くでは違いが無く距離が離れるにしたがって S-Band の映像が X-Band 映像より強いことがわかった(図 13, 14)。

図の左側スケールは比較のために追加した最小受信電力である。レーダ方程式を(1)に示す。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (1)$$



図 6. かごしま丸航跡図(2022/06/18-07/02).

表 1. X: JMA-9122-9XA の仕様.

電波型式 P0N	
距離範囲	0.125~24,48,96NM 観測時 48NM
距離分解能	30m 以下
空中線	
質量/外形	約 55kg/536×2825(mm)
偏波面	水平偏波
指向特性	水平ビーム幅 0.8° (-3dB 幅) 垂直ビーム幅 20° (-3dB 幅)
サイドローブレベル	-26dB(±10° 未満)以下 30dB(±10° 以上)以下
回転数 約 24rpm	
対風速性	相対風速 51.5m/s(100knots)
送信周波数	9410±30MHz
尖頭出力	25kW
送信管	マグネトロン[M1568BS]
送信パルス幅/繰り返し周波数	SP1: 0.07 μ s/2250Hz MP1: 0.2 μ s/2250Hz, MP2: 0.3 μ s/1900Hz, MP3: 0.4μs/1400Hz LP1: 0.8μs/750Hz, LP2: 1.0μs/650Hz, LP3: 1.2μs/510Hz 48NM: LP2

表 2. S: JMA-9132-SA の仕様.

電波型式 P0N	
距離範囲	0.125~24,48,96NM 観測時 48NM
距離分解能	30m 以下
空中線	
質量/外形	約 180kg/791×4000(mm)
偏波面	水平偏波
指向特性	水平ビーム幅 1.9° (-3dB 幅) 垂直ビーム幅 25° (-3dB 幅)
サイドローブレベル	-26dB(±10° 未満)以下 -30dB(±10° 以上)以下
回転数 約 24rpm	
対風速性	相対風速 51.5m/s(100knots)
送信周波	3050±20MHz
尖頭出力	30kW
送信管	マグネトロン[M1555]
送信パルス幅/繰り返し周波数	SP1: 0.07 μ s/2250Hz MP1: 0.2 μ s/2250Hz, MP2: 0.3 μ s/1900Hz, MP3: 0.4μs/1400Hz LP1: 0.8μs/750Hz, LP2: 1.0μs/650Hz, LP3: 1.2μs/510Hz 48NM: LP2



図 7. かごしま丸航跡図(2023/06/10-06/24).

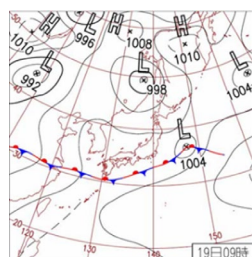


図 8. 地上天気図(2022 年 6 月 19 日 9 時 JST).

P_r : 最小の受信電力, P_t : 送信尖頭電力, G : アンテナ利得, λ : 波長, σ : 目標の有効反射面積

まとめ

X バンドと S バンドレーダの航海中映像観測ができた. S バンドデータは収集 PC の性能によって回転数の半分の数であったが, 比較することは可能であった.

レーダの探索範囲に雨雲がある場合 X バンド映像が強く表れるのは 10NM 弱くらいまでで, 遠方になると S バンド映像だけが得られるようになった. X-band が雨雲により減衰された結果と考えられる.

雨雲によって S-band レーダの減衰が小さいことが確かめられたので, 噴煙観測においても X-band レーダより遠方まで観測できる可能性がある.

謝辞

S バンドレーダのデータを収集するための PC を貸していただいた高知大学の佐々先生と観測に協力いただいた鹿児島大学かごしま丸の幅野船長・航海士の皆様に感謝いたします.

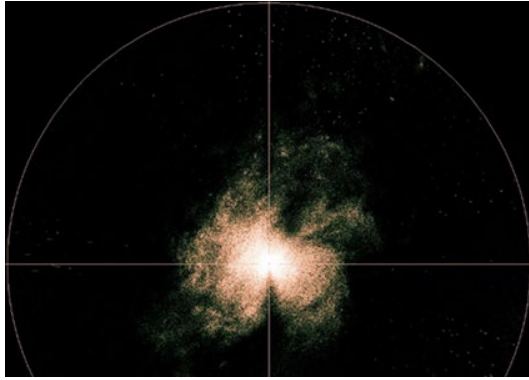


図 9. X-band PPI 映像(2022/06/19 08:30 JST).

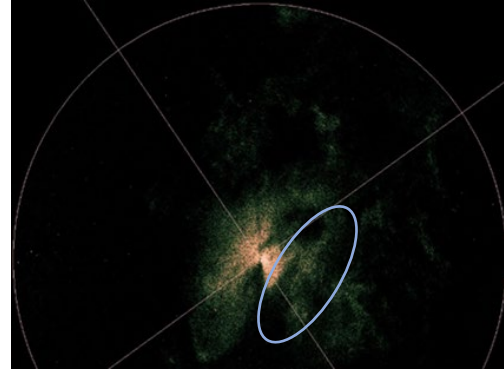


図 10. S-band PPI 映像(2022/06/19 8:30 JST).

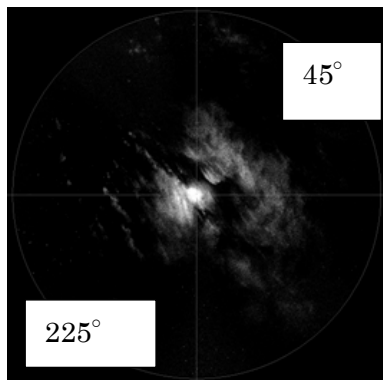


図 11. X-band 映像 Co.269.1° (2022/06/19 15:37 JST).

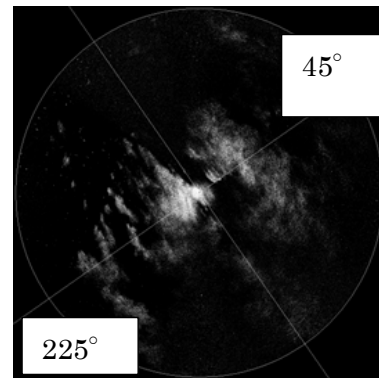


図 12. S-band 映像 Co.269.1° (2022/06/19 15:37 JST).

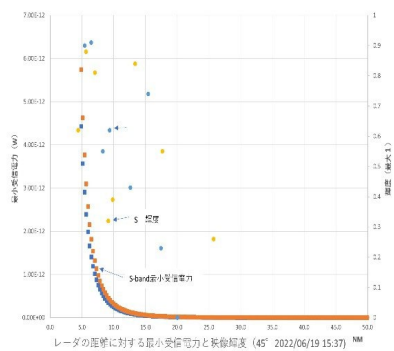


図 13. レーダの距離に対する最小受信電力と映像画像 (方位 45°, 2022/06/19 15:37 JST).

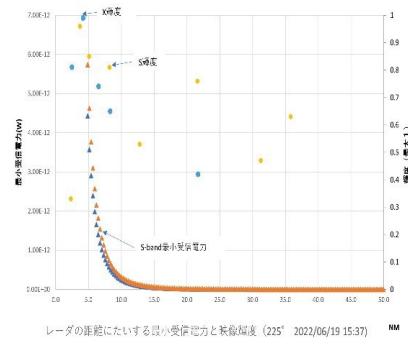


図 14. レーダの距離に対する最小受信電力と映像画像 (方位 225°, 2022/06/19 15:37 JST).

3-2-2. 船舶レーダによる桜島噴煙の観測

桜島の噴煙を機動的に観測するために、船舶レーダのアンテナを鉛直に回転させる RHI 観測を 2018 年から始めた。RHI の鉛直方向は 1.2° のビーム幅であるので細かく観測できる。水平方向のビーム幅は 22° であるので、黒神から放射した信号は南岳では 1570m の幅となり、広い範囲を 1 回のスキャンで観測できるが、噴煙の流れる向きが分かりづらいということにもなる。そこで船舶レーダの水平観測を追加することで、解決できないか調べた。

・船舶レーダ PPI (水平) 観測

仰角を $0^\circ \sim 25^\circ$ と変えて桜島の PPI 観測し、映像がどのように変わるか比較検討することで、噴煙の水平分布をとらえる方法を検討する。

桜島の京大黒神観測室に固体化船舶レーダ (SSR100W) を設置して PPI 観測した。

桜島の船舶レーダの観測体制は京大桜島観測所の SSR400W RHI (Range Height Indicator)、黒神観測室の RHI マグネトロン船舶レーダ 25kW SSR100W PPI となる (図 1)。黒神観測室の PPI 観測は設置時に仰角 0° にした場合に桜島山体の映像が映る。また RHI レーダと PPI レーダの距離を 30m 程度空けた (図 2)。

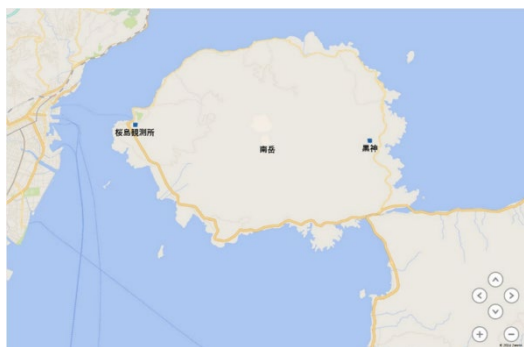


図 1. 船舶レーダの配置。

黒神から南岳山頂は迎角 13° となり、水平に回転する PPI アンテナではビームの上辺は 11° となり山頂より低くなる。そこで、アンテナの迎角を 25° としてビームの上下が $36^\circ \sim 14^\circ$ となるようにして桜島山頂付近から 3000m までを観測できるようにして、山腹のエコーを少なくすることを期待した。アンテナ仰角 25° になると水平より桜島山腹のエコーの面積が小さくなっているように見える (図 3)。

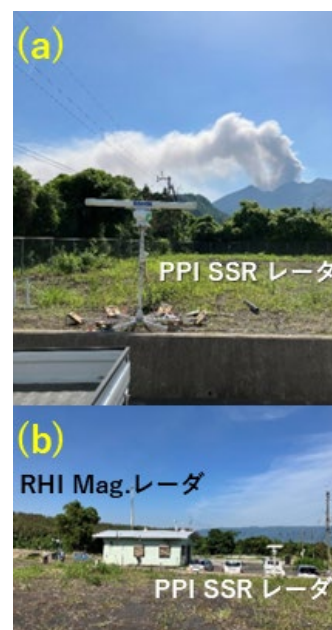


図 2. 黒神 SSR100WPPI 設置 (2024 年 5 月 14 日)。(a) PPT SSR レーダ、(b) RHI マグネトロンレーダ。

黒神から南岳までの経路で 2874m, 3214m, 3383m, 3478m, 3667m, 3783m, 4085m 20 分間の信号強度を読み取ると上図・下図のようになる。信号強度の強い部分を読むと仰角 25° は 0° より 7.7dB $\sim$ 3.9dB (標準偏差 2.0 $\sim$ 3.4) くらい低いので噴煙を良く観測できることが期待される (図 4)。

観測期間 2024 年 5 月 14 日—7 月 23 日で 2000m 以上の噴火は 3 回あった (表 1)。2024/5/15 の噴火では桜島観測所と黒神の RHI 観測で噴火後に噴煙が上昇した後に東側へ流れていることが分かるさらに、PPI 観測で東南へ噴煙が流れていることが確認できる (図 5)。2024/7/14 は RHI 観測で噴煙が東側へ流れていることが分かり、さらに PPI 観測で北東へ 8km 以上流れて行っていることが分かり PPI 観測の有効性が確認された (図 6)。一方で、2024/7/20 の PPI 観測は噴煙が桜島山腹エコーの強い場所を経てレーダアンテナ方向へ流れており、方位が確認できない場所が多く PPI レーダの配置によっては方位観測の効果が小さい場合があった (図 7)。

まとめ

- 1) 船舶レーダで噴煙鉛直方向の変化を観察するために桜島観測所と黒神に船舶レーダを

設置して RHI 観測してきた。RHI 観測では分からない噴煙の流向を求めるために PPI 観測を加えることを検討した。

- 2) PPI の仰角を 0° から 25° にすると grand clutter が 7.7-3.9dB 下がり効果が確認された。
- 3) 観測期間に 3 回の 2000m 以上の噴火があり、PPI で観測された噴煙は噴火直後から 8km 遠方まで噴煙の方位が観測された。ただし、弱くなっても桜島の grand clutter が残っているので、噴煙を確認できない場所があった。
- 4) 噴煙が PPI レーダに流れていくとエコーが弱くなった。これはビームが狭くなり当たらないことと、送信方式が PON と単パルス方式になるためであると考えられる。
- 5) RHI と PPI の初めての同時観測ができ、噴煙の移動状況が 2.5 秒ごとに鉛直・水平方向から把握できることから、噴煙の機動的観測に PPI 観測を加えることの有用性を確認できた。

謝辞

本研究は文科省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト（課題 22K03760）と京大防災研究所一般共同研究「極端現象のレーダマルチセンシング研究」の助成を受けた。

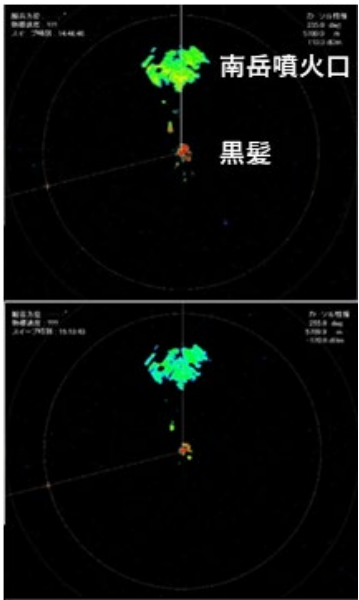


図 3. 桜島南岳噴火口を黒神観測室から（上）仰角 0° と（下）仰角 25° で PPI 観測した映像。

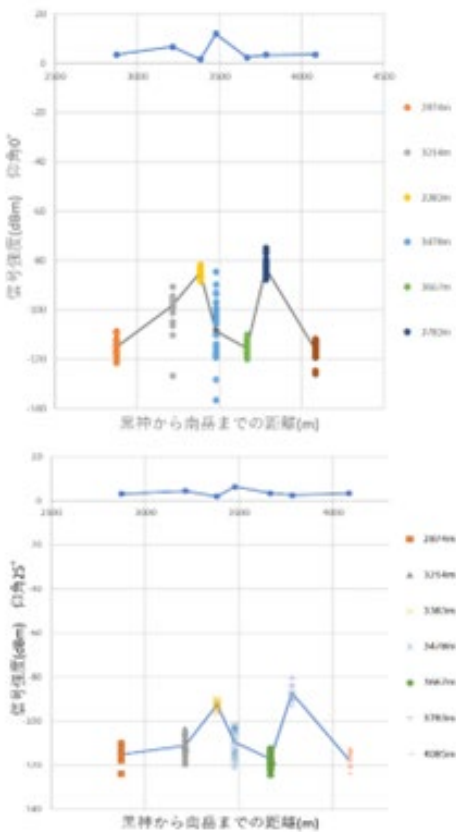


図 4. 黒神から南岳までの距離と信号強度（上）仰角 0° ，（下）仰角 25° 。

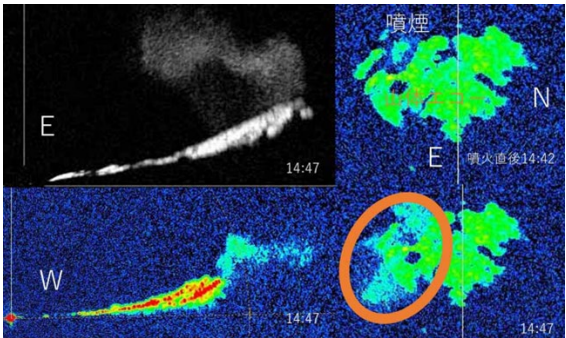


図 5. 船舶用レーダで観測した桜島噴煙（2024/05/15 14:42. 高度 2000m）。

表 1. 2024 年 5 月 14 日—7 月 23 日の 2000m 以上の桜島噴火（鹿児島地方気象台）。

年月日時分	高さ (m)	流向
2024/5/15 14:42	2000	SE
2024/7/14 18:19	4500	NE
2024/7/20 13:58	3700	N

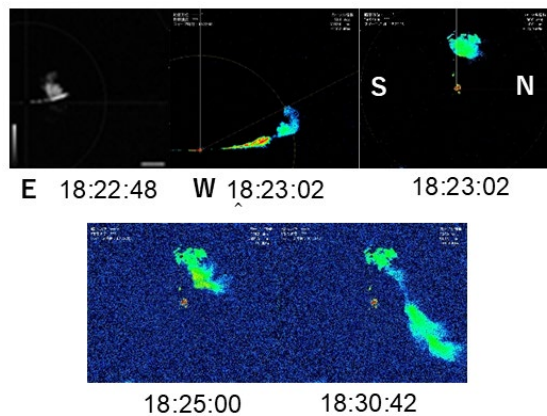


図 6. 桜島噴煙(上端は高度 4000m), (上) RHI と (下) PPI 映像 (2024/7/14 18:19).

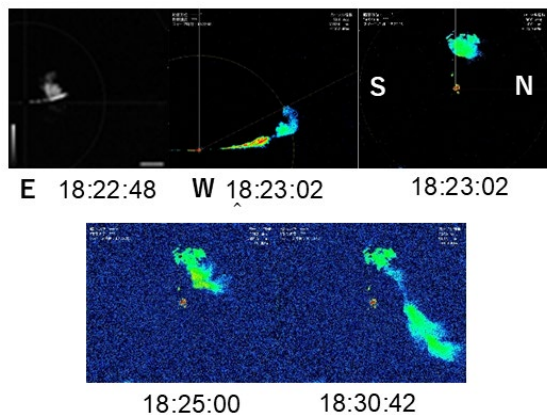


図 7. 桜島噴煙(上端は高度 3700m), (上) RHI と (下) PPI 映像 (2024/7/20 13:58).

4. 研究成果の公開

4-1. VASH

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。レーダ観測から得られた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レンタルサーバ上にウェブサイト Database of Sakurajima Volcanic Ash-fall Distributions: VASH (<https://vash.jp/>) を立ち上げた(真木ほか、2023)。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 を用いておこなわれる。独自に用意し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である。

VASH は火山防災での利用以外に、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。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。

4-2. 電子ブック

研究成果の発表にはその内容の完成度や発表の目的によりいくつかの段階がある。完成度がそれほど高くない場合には大学の場合だと研究室のゼミで途中経過が発表される。ある特定の分野において内容の完成度が高く新規性がある場合には学会での口頭発表や学術雑誌上発表がある。内容が普遍的な場合には教科書として出版される。このような最終目標を研究論文の投稿に置いた研究成果の発表経過は長い歴史があり過去も現在も大きく変わらないであろう。一方、発表媒体としては大きく変化している。以前は書籍や学術雑誌は紙ベースに限られていたが現在は電子ジャーナルあるいは電子ブックとして公開される場合もある。また、実験の様子などを動画で紹介できる雑誌なども登場している。

前述した研究成果の発表は学術研究に関するものであるが、もう一つの研究成果の発表として研究プロジェクトの報告書がある。例えば、科研費や受託研究の報告書である。この場合、学術雑誌のように査読もなく報告書の書式も自由度が多い。科研費では従来のような詳細な報告書を書く必要がなく、学会などでの研究発表のリストを提出すれば良くなった。委託研究の報告書の場合、発注者への報告であるために契約内容が着実に達成されているかどうか重要である。

本共同研究でおこなった「電子ブックを活用した研究成果の紹介」は、複数の研究プロジェクトの報告書をまとめるにあたって試みたものである。具体的には JSPS 科研費(課題 22K03760)、京大防災研「一般共同研究」・文科省「次世代火山研究・人材育成プロジェクト(JPJ005391)」の研究

成果を紹介するために電子ブックを利用した。電子ブックのタイトルは「レーダがとらえた桜島噴煙」（編集：真木雅之・中村啓彦，2025）である。Part1 と Part2 にわかれており，Part1 では噴煙に関する一般的な話題を計 14 名の研究者が説明をする。火山に興味を持つ学生や一般の人を読者として想定している。Part2 は桜島の過去に発生した噴火事例についてレーダの解析結果を紹介する。火山防災の担当者や火山学専攻の学生でレーダの初心者を対象にしている。電子ブックの一つの利点である動画を利用している点に注目して欲しい。

参考文献

真木雅之・佐野香那・中道治久・井口正人・西隆昭・中村啓彦・小堀壮彦（2023）：桜島降灰分布データベース（VASH）. 京都大学防災研究所年報，66B，100-110.

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

Editors: M. Maki, K. Sanao, and H. Nakamura,
Authors: Study Group on the Observation Platform for Sakurajima Eruption Clouds (2025): Sakurajima Eruption Clouds Observed by Radar. Research Center for Volcano Hazards Mitigation, DPRI/Kyoto Univ.

5. おわりに

本研究課題には，線状降水帯や大噴火による自然災害に備えるという防災上の強い意義に加えて，海上の積乱雲の成長や組織化，大気中の火山噴出物の飛散・拡散・流動を科学する新しい学問分野を創生するという学術的意義があると考えている。特に，噴石，噴煙・降灰といった火山噴出物の大気中での動態を扱う学問分野は，気象学においても火山学においてもこれまで確立されてこなかった。この問題認識から，日本地球惑星科学連合 2025 年大会において，複数領域に跨る計測技術・研究手法に関するセッション MTT-38「極端現象のマルチセンシング」を企画・開催し，共同研究参加者による 6 件の研究発表を行った（末尾のリスト参照）。本研究課題の次の展開として，「桜島噴煙モニタリングプラットフォーム研究会」を立ち上げ，複数の科学研究費の取得に向けた努力を開始した。

日本地球惑星科学連合 2025 年大会・MTT38（極端現象のマルチセンシング）における本研究課題参加者の発表リスト

真木雅之・中村啓彦・小堀壮彦・西隆昭・中道治久・海賀勝彦・林大介・桜島噴煙モニタリングプラットフォーム研究会メンバー，桜島噴煙のモニタリングプラットフォームー新たな展開ー

小堀壮彦・真木雅之・中村啓彦・中道治久・M. Hort，レーダマルチセンシング観測網の有効性評価手法

中村啓彦・西隆昭・仁科文子・須本祐史・真木雅之，船舶レーダによるメソ対流系の観測：九州西方海上の梅雨前線帯における事例解析

佐々浩司，船舶レーダーを用いた対流雲と噴煙の挙動計測，

真木雅之・佐野香那・中村啓彦・中道治久，電子ブックを活用した研究成果の紹介

西隆昭・真木雅之・中道治久・海賀和彦・藤吉康志，PPI 観測を付加した桜島噴煙の機動的観測