

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

Deployment of Small-size X-band Multi-parameter Radars near Volcanoes in Southern Kyushu, Japan and Observation of Eruption Plumes

中道治久・井口正人・下村誠・竹中悠亮

Haruhisa NAKAMICHI, Masato IGUCHI, Makoto SHIMOMURA and Yuusuke TAKENAKA

Synopsis

Compact X-band multi-parameter doppler weather radars (Model: WR-2100 Furuno Electric Co.) were installed in August 2017 at six sites near Sakurajima, Kirishima, Satsuma-Iwojima, Kuchinoerabujima and Suwanosejima volcanoes, in Southern Kyushu, Japan. The X-band radars detected eruption plumes of Shinmoedake eruptions of Kirishima volcano from October 2017 to April 2018 and Minamidake eruptions of Sakurajima volcano. We estimated the eruption plume height of the eruption on November 13, 2017 at Sakurajima as 4 km by using the radar reflectivity, although the visual plume height was unknown due to bad weather. By comparing the radar reflectivity of the 2017 and 2018 eruptions of Shinmoedake with the plume heights by visual observation, we accumulated the basic data for establishing a method for estimating eruption plume heights using weather radars. For example, the plume height of the continuous eruption on April 5, 2018 is estimated to be 9 km by the weather radar, which is roughly equal to the height by the geostationary meteorological satellite Himawari-8.

キーワード: 噴火, 気象レーダー, Xバンド, レーダー反射強度, 噴煙高度, 南九州

Keywords: eruption, weather radar, X-band, reflectivity, plume height, southern Kyushu

1. はじめに

レーダー (radar) はRadio detection and rangingの略で、電波のエネルギーを散乱あるいは反射する特性を持った目標物を検出 (detection) し、その位置を測定 (ranging) するための電子機器の一つであり、多種多様な用途に用いられている。レーダーは用いる電波の周波数帯によって用途があり、降水粒子を対象とした気象レーダーはSuper-High Frequency (SHF, マイクロ波) 帯 (3–30GHz) を用いる。これまで、主にCバンド (4–8GHz) レーダーが用いられてきたが、近年、Xバンド (8–12GHz) レーダーも多く展開されてきている。例えば、近年頻発するゲリラ豪雨の予測や早期発見を目的として、既設建物の屋上や可搬コンテナを利用して小型Xバンド偏波レーダーが主要地方自治体で導入されている (例

えば、中北ら, 2009)。また、国土交通省により現業Xバンド偏波レーダー (XRAIN) が2009年から全国展開が始まり、2010年からデータ提供がなされている。しかし、火山観測を主目的とした定常的なレーダー観測の事例は少ない。

気象レーダーにて火山灰噴煙を検知した事例は1970年代から報告があり、例えば1970年アイスランドHekla火山噴火、1977年有珠山噴火、1982年アメリカSt. Helens火山噴火、1991年フィリピンPinatubo火山噴火、2000年有珠山・三宅島噴火、2011年霧島山新燃岳噴火など複数ある。それぞれについての詳細はここでは立ち入らないが、これらの事例についてレビュー論文 (Hort and Scharff, 2016) にて触れられているので参照していただきたい。

前述のXRAINのレーダーを活用して、火山噴煙の観測と定量化を試みた研究として安田ら (2012) と

真木ら（2015）が挙げられる．安田ら（2012）は桜島から10 km南南東にある垂水国道維持出張所に2011年に設置されたばかりのXRAINのレーダーを用いて桜島の噴煙観測に成功した．その後，真木ら（2015）は噴煙に対応する反射強度分布を求めるとともに，レーダー反射強度と降灰量の関係式の導出を試みた．このように，噴煙の定量化が進められている現状を鑑み，また土石流など二次的な火山災害の誘因としての降雨把握にXバンドレーダーが有用である．

そこで，京都大学防災研究所は平成27年度補正予算（国立大学法人施設整備費補助金）にて小型Xバンド偏波レーダーを南九州の火山近傍の6箇所に設置した．本論文では設置したレーダーシステムについてと，霧島山新燃岳と桜島南岳の噴火による噴煙観測事例について説明する．

2. Xバンド偏波レーダーの設置とデータ収録

古野電気（株）のXバンド偏波レーダーシステム（形式WR-2100）（以降，レーダー）が霧島市立牧園中学校（対象火山：霧島山），鹿児島県立錦江湾高校（対象火山：桜島），火山活動研究センター（対象火山：桜島），三島村竹島（対象火山：薩摩硫黄島），口永良部島番屋ヶ峰避難所（対象火山：口永良部島），諏訪之瀬島キャンプ場（対象火山：諏訪之瀬島）の各サイトに2017年8月に順次設置され，現在まで常時運用してきている（Table 1）．Fig. 1にレーダーサイト場所，活火山の位置を示す．WR-2100の中心周波数は9432.5MHzで，空中線出力は100Wであり，およそ30 kmの範囲を観測することが出来る．Fig. 1に各レーダーサイトを中心とした円はレーダー観測範囲（水平距離）を示す．また，レーダーのスペックをTable 2に示す．Xバンド偏波レーダーでは，レーダー反射強度（ Z_{hh} ）の他に，レーダー反射因子差（ Z_{dr} ），偏波間相関係数（ ρ_{hv} ），偏波間位相差（ ϕ_{dp} ），偏波間位相差変化率（ K_{dp} ）といった偏波パラメーターやドップラー

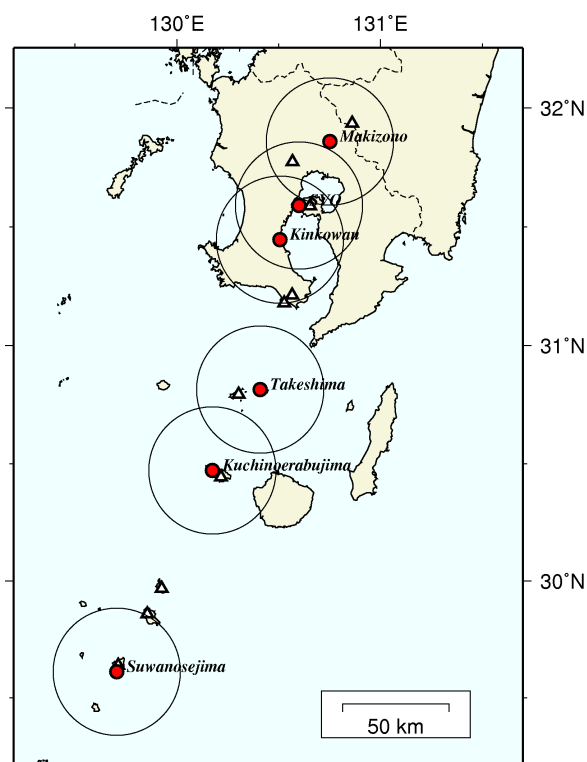


Fig. 1 Locations of small-size X-band multi-parameter weather radars in southern Kyushu.



Photo 1 Small-size X-band multi-parameter wether radar at Kinkowan High School

速度（ V ）のデータが得られる．レーダーは大まかに2つのパートに分かれており，空中線（アンテナ

Table 1 Locations and install date of radars

Radar site name	Longitude (°)	Latitude (°)	Height (m)	Installed date
Makizono Jr. High School	130.75140	31.85785	263	August 4, 2017
Sakurajima Volcano Research Center	130.60120	31.58960	76	August 5, 2017
Kinkowan High School	130.50717	31.44564	135	August 2, 2017
Takeshima	130.40939	30.81319	95	August 23, 2017
Kuchinoerabujima	130.17619	30.47028	309	August 10, 2017
Suwanosejima	129.70546	29.61122	148	August 27, 2017

Table 2 Main specifications of X-band multi-parameter weather radar Model WR-2100

Unit	Parameter	Descriptions
Antenna unit (ATU)	Carrier frequency	9432.5 MHz
	Maximum range	Fixed observation level: 30 km
	Size and weight (Radome)	ϕ 1085 mm $\times$ H1025 mm, 68 kg
	Occupied band width	60 MHz or less
	Peak power	100 W, horizontal and vertical each
	Pulse width	0.5 to 50 μ s
	Pulse repetition frequency	600 to 2500 Hz
	Type and size	Cassegrain, ϕ 750 mm
	Gain	33.0 dBi
	Polarization	Dual polarimetric (vertical and horizontal)
	Beam width	2.7 degrees
	Azimuth rotate speed	0.5 to 16 rpm, adjustable
	Vertical scan angle	-2 to 182 degrees
Signal processing unit (SPU)	Data output	<i>Rain, Zhh, V, Zdr, Kdp, ϕdp, ϕhv, W</i>
	Scan modes	PPI, Spiral, Sector RHI, HSQ, Sector PPI
	Minimum receiving power	Under -110 dBm
	Dynamic range	Above 75 dB
	NF	Under 5.0 dB
	A/D convert resolution	14 bits
	Sampling frequency	125 MHz
	Power consumption	Max. 650W include ATU
	Rated ampere	0.8 to 3.0A
	Size	W680 mm $\times$ D680 mm $\times$ H1080 mm

ナ) 装置 (ATU) (Photo 1左のレドーム部) と信号処理装置 (SPU) (Photo 1右のラック部) からなる。SPUの構成をFig. 2に示す。ATUのレドームの大きさは直径1 m, 高さ1 m程度であり、SPUは高さ1 m, 幅0.6 m, 奥行き0.7 mのラックに収納されている。Photo 1は錦江湾高校に設置したレーダーの全景写真であり、既存建物の屋上に設置されている。牧園中学校、火山活動研究センター、竹島、口永良部島においても同様に既存建物を利用して設置している。一方、諏訪之瀬島においては適当な既存建物がないため、Photo 2に示す通り中古コンテナを改装して設置した上で架台をコンテナ屋上に設置してATUを設置し、コンテナ内にSPUを設置した。そして、各レーダーサイトと火山活動研究センターとはTable 3で示す電話回線などにて接続しており、リモートデスクトップソフト (TeamViewer) にてレーダーサイトに接続して稼働状態の確認や設定の変更や送信停止および開始などの操作を遠隔にて行っている。

レーダーシステムは通常はHSQスキャンモードにて運用しているが、2017年10月から2018年6月現在においてある程度の大きさの噴火が見込める霧島山

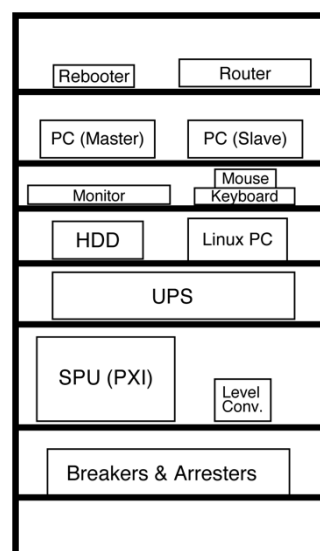


Fig. 2 Configuration of signal processing unit (SPU).

と桜島についてはセクタRHIモードにて観測をしている。Table 4に運用スキャンモードの設定を示す。ATUはSPUにあるデータ収録装置 (PC) により制御され、生データはPCにUSB接続されているハードデ

Table 3 Methods and speeds of data transmission of radars

Radar site name	Data transmission method	Communication speed (MB/s)	
		Upload	Download
Makizono Jr. High School	Wireless mobile (3G)	1.36	0.02
Sakurajima Volcano Research Center	Intranet (KUINS-III)	8.70	10.73
Kinkowan High School	Internet optical cable (NTT)	2.56	1.00
Takeshima	Wireless mobile (3G)	0.44	0.03
Kuchinoerabujima	Wireless mobile (3G)	0.18	0.01
Suwansoejima	Internet optical cable (Tokara Yui-net)	0.47	0.59



Photo 2 Small-size X-band multi-parameter wether radar at Suwanosejima volcano

ディスク（容量：3TB、4TBもしくは6TB）に保存される（Fig. 3）。生データはgzip圧縮され1ファイル当たり2MB程度の大きさで、1日当たり16–20GBと容量が非常に大きい。そのため、生データを回線（Table 3）にて伝送することはせずに、PCにて生データから雨量換算のデータ(CSVファイル)に変換され、火山活動研究センターのサーバーに回線（Table 3）にて伝送され、サーバーにて雨量分布の地図が自動生成され、Webブラウザにて閲覧できるようになっている（Fig. 3）。なお、生データが保存されているハードディスクは定期的にレーダーサイトに赴いて交換をしている。

3. 噴火観測事例

対象5火山の6箇所のレーダーサイトにて2017年

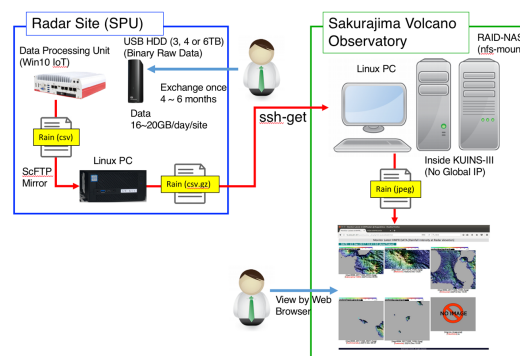


Fig. 3. Data flow from a signal processing unit at a radar site to the server at Sakurajima Volcano Research Center.

8月から観測を行っていて、2018年6月までに霧島山新燃岳、桜島、諏訪之瀬島において噴火が発生した。ここでは、2017年11月13日の桜島南岳噴火の事例と2017年10月および2018年3月と同4月の新燃岳噴火の事例を紹介する。

2017年より桜島は南岳にて噴火を頻発するようになったが、2018年6月現在において最大規模の噴火が2017年11月13日22時7分に発生した。この時にレーダーにて観測されたレーダー反射強度の時間変化をFig. 4aに示す。火山活動研究センターのレーダーから南岳火口方向の方位角におけるセクタRHIスキャン時のレーダー反射強度分布を示す。噴火があった時間帯における牛根（南岳から10 km東）の気象庁監視カメラ画像をFig. 4bに示す。気象庁が発出した「火山の状況に関する解説情報第93号」によると、噴煙高度は天候不良のため不明とのことであっ

Table 4 Scan modes and settings of radars as of June 11, 2018

Radar site name	HSQ scan mode	Sector RHI scan mode	
	Elevation angle (°)	Azimuth (°)	Elevation angle (°)
Makizono Jr. High School	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	50–80	6–30
Sakurajima Volcano Research Center	15, 25, 30, 35, 40, 50, 60	95–115	11–45
Kinkowan High School	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30	NA	
Takeshima	5, 10, 15, 20, 30, 45, 60	NA	
Kuchinoerabujima	5, 10, 15, 20, 25, 35, 45	NA	
Suwansoejima	10, 15, 20, 30, 40, 50, 60	NA	

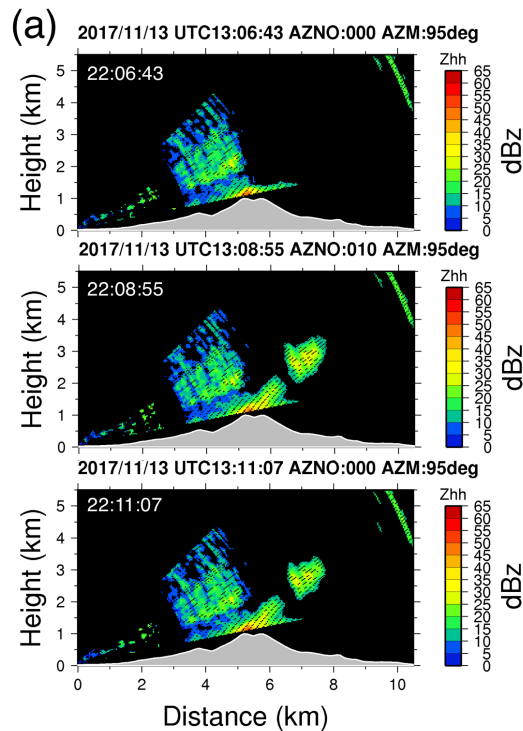


Fig. 4 (a) Temporal change of sector RHI image of radar reflectivity (dBZ) of volcanic ash plume after an explosive eruption on 22:07 JST, November 13, 2017 at Sakurajima. (b) a photo of the volcano monitoring camera at Ushine, which is 10 km east from Minamidake.

た。また、この時の噴火では鹿児島県及び宮崎県の一部で窓ガラスが揺れるほどの空振があった。

22:06:43時点の反射強度分布を見ると、桜島南岳山頂部に掛かっている雲に対応する反射強度の高まりが見られるが、22:08:55と22:11:07を見ると、それとは別に高さ200 mから3500 mに明瞭な噴煙に対応すると思われる反射高度の高まりが見られる。一方、同じ時間帯で錦江湾高校レーダーのHSQスキャン時の反射強度分布との比較を行ったところ、仰角10°スキャンでは桜島上空高度4200 mに対応し、噴煙に対応すると思われる反射強度の高まりが見られたが、仰角15°スキャンでは桜島上空高度6200 mに対

応し、反射強度の高まりは見られなかった。二つのレーダーの反射強度の高まりから判断すると、噴煙は5000 mくらいまで到達していたと推定される。

2017年10月11日6時ごろから霧島山新燃岳が6年半ぶりに噴火した。噴火の一報を受けて、牧園通学校レーダーのスキャンモードをHSQからセクターRHIに変更した(同日15時13分)。そして、翌日10月12日の11:40~13:00の時間帯で噴煙によるレーダー反射強度分布の高まりが確認出来た(Fig. 5)。この時の噴火は連続的な噴火で監視カメラによる測定で噴煙最高高度は火口縁上2000 m(海拔高度3421 m)、Fig. 5aに示すレーダー反射強度分布の高まりの上端の高さとほぼ一致する。

2018年3月9日15:58の新燃岳のブルカノ式噴火では、監視カメラの測定から噴煙高度は火口縁上3200 m(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5000 m程度に達している(Fig. 6)。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5000 m(海拔高度6431 m)と確認されているが、その後の3:45噴火以降は山頂上空の雲により噴煙高度は火口縁上2500 m(海拔高度3932 m)より上と推定されているに過ぎず、正確な推定値はない。Fig. 7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

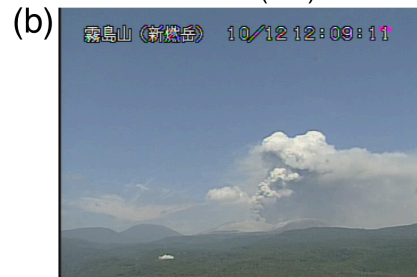
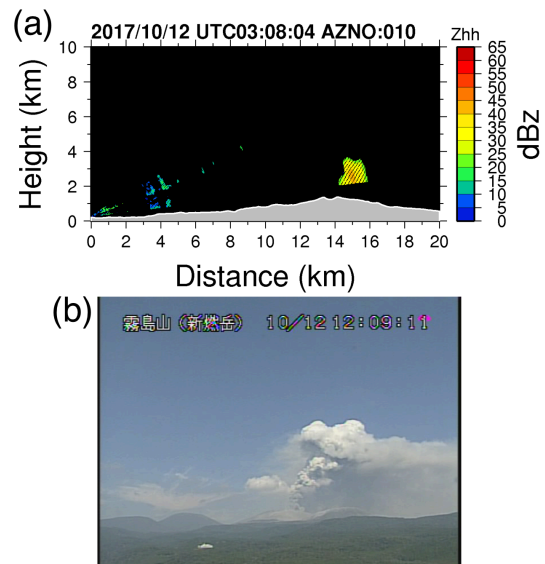


Fig. 5 (a) Sector RHI image of radar reflectivity (dBZ) of volcanic ash plume of a continuous eruption at Shinmoedake on 12:08 JST, October 13, 2017. (b) a photo of the volcano monitoring camera at a site which is 8 km south from Shinmoedake.

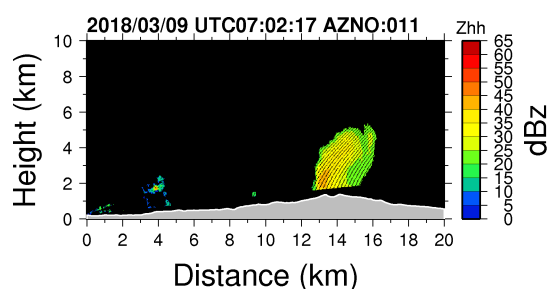


Fig. 6 Sector RHI image of radar reflectivity (dBZ) of volcanic ash plume after an explosive eruption on 15:58 JST, March 9, 2018 at Shinmoedake.

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Fig. 7は対応しており、反射強度分布から噴煙高度は海拔4000 m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6431 m）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（Fig. 8a）と同時刻の監視カメラ映像（Fig. 8b）を示す。監視カメラ映像（Fig. 8b）を見て分かる通り、噴煙は雲の入りしており噴煙高度を正確測定出来ていない。一方、レーダー反射強度分布の高まりから噴煙高度は9000 mと推定される。なお、反射強度分布が上端部でシャープに斜めに切れて表示されているが、これはセクタRHIスキャンにおける仰角の最大値に対応して、それより

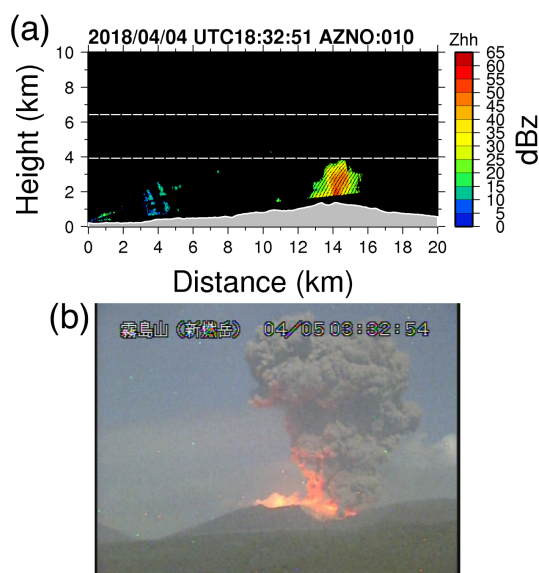


Fig. 7 (a) Sector RHI image of radar reflectivity (dBZ) of volcanic ash plume after an explosive eruption on 3:31 JST, April 5, 2018 at Shinmoedake. White dashed lines show the estimated plume heights by monitoring cameras. (b) a photo of the volcano monitoring camera at a site which is 8 km south from Shinmoedake.

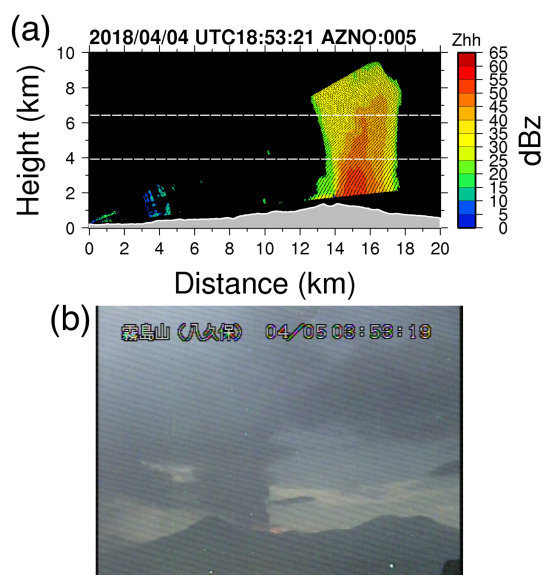


Fig. 8 (a) Sector RHI image of radar reflectivity (dBZ) of volcanic ash plume of a continuous eruption at Shinmoedake on 3:53 JST, April 5, 2018. White dashed lines show the estimated plume heights by monitoring cameras. (b) a photo of the volcano monitoring camera at a site which is 15 km NNE from Shinmoedake.

上部はレーダースキャンが行われていなかったことに起因する。この時の噴煙は、気象衛星ひまわり8号データの解析から火口縁上約8000 m（海拔高度9431 m）まで上がったと推定されている（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台、2018）。よって、レーダー反射強度から推定した噴煙高度9000 mと衛星データからの推定した噴煙高度はほぼ一致している。

4. おわりに

京都大学防災研究所により2017年8月に南九州の5火山を観測対象として6箇所に小型Xバンド偏波レーダーが設置された。そして、霧島山新燃岳の噴火による噴煙に対応したレーダー反射強度分布を検出し噴煙高度を推定したところ、晴天時は監視カメラ画像から求めた噴煙高度とほぼ一致した。一方、2017年11月13日の桜島南岳噴火や2018年4月5日の霧島山新燃岳噴火では、どちらも雲が山頂部に掛かっており、監視カメラからは南岳噴火では噴煙高度が不明で、新燃岳噴火では雲高度までの噴煙高度推定であった。しかし、レーダー反射強度分布からは桜島南岳噴火の噴煙高度は5000 mと推定され、霧島山新燃岳の噴煙高度は9000 mと推定された。このように悪天候であってもレーダー反射強度から噴煙高度を推定できるケースがあることが分かった。設置して間

もない期間で噴煙観測するのに恵まれたが、桜島を除けば噴火は希な自然現象である。今回設置したレーダーは非噴火時にはHSQスキャンモードで運用されており、このケースがほとんどで、雨雲の観測など気象レーダーとしての役割をしている。さらに言えば、この地域は夏から秋にかけて台風が頻繁に通過する場所である。よって、火山噴煙の観測という用途だけでなく本来の気象研究用途でのデータ活用も勿論可能であり、そのためにも大容量のデータを持つデータベースの構築が課題となっている。

謝 辞

霧島市牧園中学校、鹿児島県立錦江湾高校、三島村、屋久島町、十島村にはレーダーの設置に許可と協力を頂いた。新燃岳および桜島の噴火の監視カメラ画像は鹿児島地方気象台から提供された。本研究は文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人京都大学防災研究所が実施している次世代火山研究推進事業の課題D:火山災害対策技術の開発（サブテーマ2：リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発）の一環として行われ、データ解析および取りまとめにてJSPS科研費16K12849の助成を受けている。関係各位に記して感謝する。

参考文献

- 中北英一・山口弘誠・山邊洋之 (2009) : レーダー情報を用いたゲリラ豪雨の卵の解析, 京都大学防災研究所年報, 第52号B, pp. 547–562.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2018) : 霧島山（新燃岳）の火山活動解説資料, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/18m04/201804052130_551.pdf
- 真木雅之・井口正人・藤田英輔・三輪学央・前坂剛・出世ゆかり・小園誠史・桃谷哲也・山路昭彦 (2015) : 気象レーダによる桜島火山噴煙の観測, 第58号B, pp. 76–85.
- 安田成夫・梶谷義雄・國友優 (2012) : XバンドMPレーダによる浮遊火山灰計測の試み, 京都大学防災研究所年報, 第55号B, pp.1–8.
- Hort, M. and Scharff, L. (2016): Detection of airborne volcanic ash using radar, in Volcanic Ash Hazard Observation, Mackie, S., Cashman, K., Ricketts, H., Rust, A. and Watson, M. Eds, pp. 131–160, doi:10.1016/B978-0-08-100405-0.00013-6.

（論文受理日：2018年6月13日）