

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—

Monitoring of Sakurajima Volcanic Eruption Columns with Marine Radar - Results of Observations in 2018 -

真木雅之⁽¹⁾・小堀壮彦⁽¹⁾・西隆昭⁽¹⁾・藤吉康志⁽²⁾・徳島秀彦⁽³⁾
佐藤英一⁽⁴⁾・井口正人・爲栗健

Masayuki MAKI⁽¹⁾, Takehiko KOBORI⁽¹⁾, Takaaki NISHI⁽¹⁾, Yasushi FUJIYOSHI⁽²⁾,
Hidehiko TOKUSHIMA⁽³⁾, Eiichi SATO⁽⁴⁾, Masato IGUCHI and Takeshi TAMEGURI

(1) 鹿児島大学

(2) 北海道大学

(3) FRSコーポレーション

(4) 気象研究所

(1) Kagoshima University, Japan

(2) Hokkaido University, Japan

(3) FRS Corporation, Japan

(4) Meteorological Research Institute, Japan

Synopsis

The present paper describes the results of observational studies of Sakurajima volcanic eruption columns using an X-band marine radar. The X-band marine radar was set up at the Kurokami Observatory located approximately 4 km from the Sakurajima Minamidake vent. We carried out observations by physically changing the rotational axis of the slot antenna, from vertical to horizontal, to achieve an elevation angle resolution of 1.2°. The observation period was from April 11 to May 31, and the collected data was for a total of 57 outstanding eruptions. To our knowledge, our observations represent the first time that marine radar has been used to successfully detect eruptions and falling pyroclastic particles. The radar revealed the fine structure of an ascending eruption column at 1.25-second intervals. The present study demonstrates that eruption source parameters such as eruption onset time, duration, height, and ascending speed can be estimated by marine radar observations.

キーワード: 噴火ソースパラメータ, 船舶レーダ, 桜島, 火山噴煙柱

Keywords: eruption source parameter, marine radar, Sakurajima, volcanic eruption column

1. はじめに

火山噴煙のモニタリングに気象レーダが有効な観測機器であることが国内外の研究から明らかになっている（澤田, 2003 ; Donnadieu, 2012; Schneider and Hoblitt, 2013; Marzano et al., 2013; Hort and Schar, 2016; Melnikov et al., 2016; Maki et al., 2016, 2019a, 2019b, 真木ほか 2019）. 澤田(2003)は気象庁のレーダのアーカイブデータとスミソニアン博物館の過去の火山噴火情報を調べ, 最初に噴煙がレーダで観測されたのは 1970 年のアイスランドのヘクラ山の噴火であったと述べている. また, 我が国では 1973 年の国後島の爺爺岳（ちゃちゃだけ）の噴火の観測が初めてであったと述べている. Donnadieu (2012) はドップラーレーダによる火山噴火のモニタリングについてレビューするとともに可搬型の VOLDRAD と名付けられたドップラーレーダにより噴煙柱内の上昇流と下降流が捉えられることを示した. Schneider and Hoblitt (2013) は米国地質調査所により開発された C バンドドップラーレーダによるアラスカの 2009 年リダウト山噴火の前兆ステージの観測から, 気象レーダは衛星や地震計による従来の観測手段を補完する貴重な手段であると結論づけた. Marzano et al. (2013) は過去の様々な研究から地上気象レーダは準リアルタイムで噴火雲を検出する能力があり, 定量的な降灰量の推定に利用できることを示した. Hort and Schar (2016)は気象レーダによる噴火雲の観測の歴史をレビューするとともに, 降灰の様々なレーダモニタリング方法について議論している. Melnikov et al. (2016)は米国現業ドップラーレーダ（WSR-88D）の感度は, これまで火山観測に利用されているレーダの感度よりも良く, 降灰を検出できる能力があることを示した. Maki et al. (2016) は, 国土交通省の X バンド偏波レーダは噴火雲のモニタリングに有効であることを示した. Maki et al. (2019b)は研究用 Ku バンド高速スキャンドップラーレーダにより噴火雲の 3 次元内部構造を 1 分毎に捉えることに成功した. また, Maki et al. (2019a)は船舶レーダを用いて桜島火山噴火時の噴煙柱の観測をおこない, 約 1 秒間隔での噴煙柱の成長過程や噴火時に放出された噴石を検出することに成功した.

2. 観測の概要

2.1 船舶レーダ

船舶レーダは船舶の安全運航目的として広く普及しているレーダである. 本研究ではFRSコーポレーション所有のマグネトロンタイプの船舶レーダを用いた. 船舶レーダの特徴の一つとして, ファンビー

ムを用いた高速スキャンがある. 本研究ではこの特長を利用して, 噴煙柱や噴石や火砕流の検出を試みた.

レーダの構成図をFig. 1に示す. レーダは送受信機・アンテナとレーダ制御パネルから成るレーダ本体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役割を果たす. 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 (Table 1を参照). 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. 本研究で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. なお, 近年, 送信機

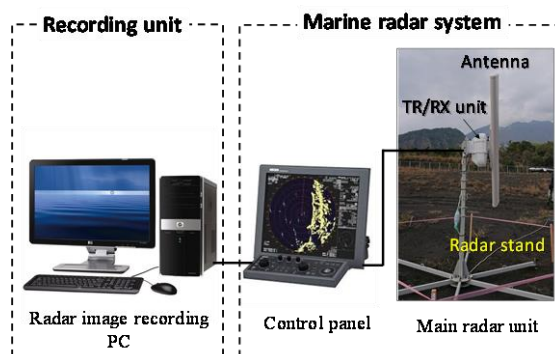


Fig. 1 Composition of the marine radar system used in the present study.

Table 1 Main specification of the marine radar used in the present study.

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
	Range resolution	12, 30, 45, 90, 180 m
Receiver	IF (bandwidth)	60 MHz (5, 15 MHz)
	Noise figure	≤ 6 dB
Monitor	Size	19 inch colour LCD
	Resolution	1280×1024 pixel
	Range accuracy	8 m

として固体化素子を使った船舶レーダが実用化されているが、本研究で用いたレーダは従来のマグネトロンを送信機とする従来型のレーダである。

2.2 観測サイト

観測は2018年4月11日から5月31日の51日間、桜島南岳火口および昭和火口を対象に24時間連続しておこなった。Fig. 2に桜島の地形とレーダの設置場所およびレーダの観測範囲を示す。船舶レーダは京都大学防災研究所附属火山活動研究センター桜島火山観測所の黒神観測点構内に設置した。南岳火口からレーダサイトまでの直線距離は約4.1 kmである。図の白線で示された三角形は船舶レーダのモニタリングエリア（ビーム幅22°）である。

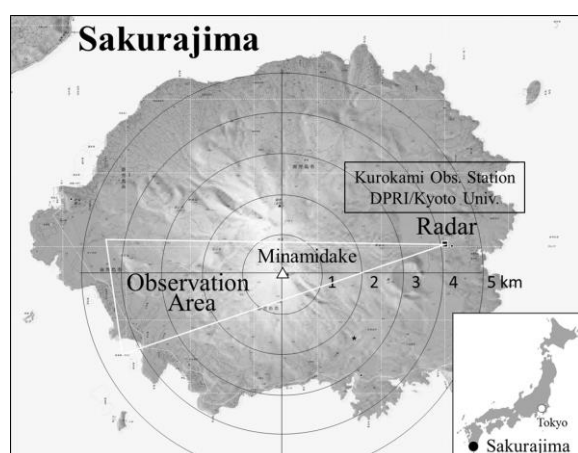


Fig. 2 Map showing Sakurajima, marine radar location, and observation area defined by radar beam width.

2.3 その他の観測機器

上記の船舶レーダによる観測に加えて、気象研究所Kuバンド二重偏波レーダによる観測、マイクロレインレーダによる観測を黒神観測点でおこなった。その目的は、船舶レーダから得られる降灰データの妥当性を確認するためである。本報では詳細は述べないが、いくつかの興味深い結果が得られている。Fig. 3に黒神観測点に設置された北海道大学のマイクロレインレーダと気象研究所のKuバンド二重偏波レーダの外観を示す。

これらのレーダのほかに、国土交通省が垂水に設置しているXバンドMPレーダのデータを使用してPPI画像やCAPPI画像を作成した。XバンドMPレーダはデータ統合・解析システムDIAS (Data Integration and Analysis System) のXRAIN原データダウンロードシステム (<https://www.diasjp.net/service/xrain-data/>) から入手した。

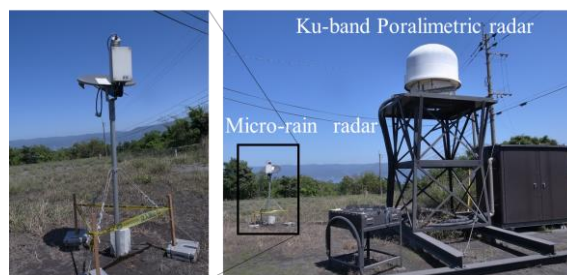


Fig. 3 Ku-band polarimetric radar (MRI) and micro-rain radar (Hokkaido Univ.) set up at Kurokami observation station of DPRI/Kyoto Univ. in Sakurajima.

3. データ解析方法

3.1 ノイズ処理

収録データに含まれるノイズ処理には、画像処理分野で一般的に使用されているフィルターを用いた。Table 2にその一覧を示す。

Table 2 Noise filters used in the present study. (Bovik, 2009; Tanaka, 2019)

Filter	Explanation
Thresholding	Sets signals zero if signals are lower than a threshold value.
Median (or Majority)	Removes too-small objects, holes, gaps, bays, and peninsulas, and it also does not generally change the size of objects or of background.
Dilation	Fills pour and cracks in connected component of images using an appropriate structuring element.
Erosion	Removes a noise-like pixel and a small projection scattering in the background of the analyzed image.
Opening	Applies the dilation following the erosion to binary images to remove noise-like 1-pixels.
Closing	Applies the erosion following the dilation to binary images to remove noise-like 0-pixels.
Masking	Sets undesired portions of the binary image to 0-pixels.
Connected components	Remove weak connected components as a noise

閾値フィルターはある閾値以下のピクセルの値をゼロとする最も単純なフィルターで、二値化画像の作成に用いられる。モルフォロジー演算はオブジェクトの形状を変化させないで、オブジェクト内外の小さな斑点、穴、突起などを取り除くフィルターである。その代表的なものにメジアンフィルター（大多数フィルターとも呼ばれる）がある。メジアンフィルターは注目画素の近傍画素を濃度値順に並べて、その中の中央値で注目画素の濃度値を置き換える。Fig. 4 (b), (c)に閾値法とメジアンフィルターを用いたドット状ノイズエコーの除去例を示す。

メジアンフィルターと同様な効果を持つモルフォロジー演算として、膨張処理 (dilation) と収縮処理

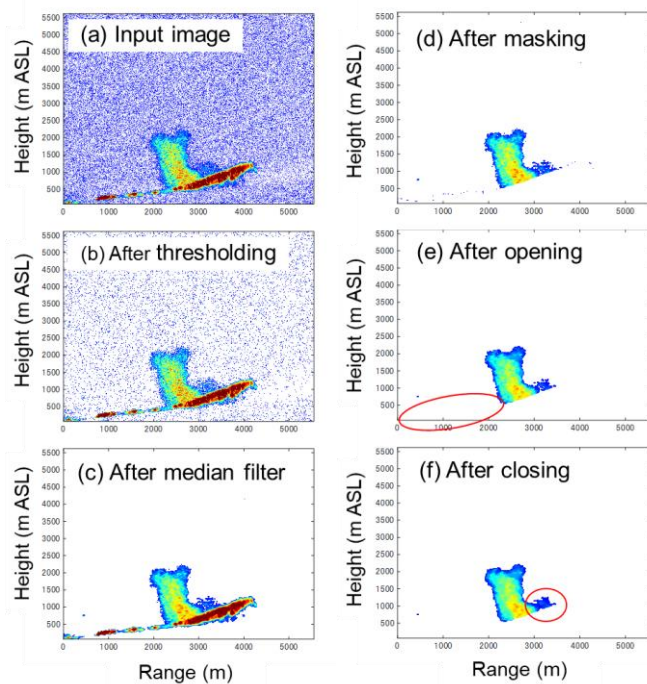


Fig. 4 Filtering non-target echoes. (a) Observed radar echo, (b) after thresholding, (c) after median filter, (d) after masking using ground echo information, (e) after opening, and (f) after closing.

(erosion)がある。近傍処理では構造化要素を利用して注目画素の近傍のピクセルを調べ、その中に値1のものが存在すれば注目画素の値を1とする。この処理を全ての画素に適用すると、画像内の穴が埋まる。ただし、処理するオブジェクトの境界に1ピクセルの画素が追加される（すなわち画像が膨張することになる。一方、収縮処理は、注目画素の近傍のピクセルの中に値0のものが一つでもあれば注目画素の値を0とする。この処理により、孤立した領域がなくなり実質的なオブジェクトだけが残ることになる。ただし、オブジェクトの境界から1画素が削除される（すなわち画像が収縮することになる。

膨張処理と収縮処理はそれぞれ画像の中の穴を埋め、バックグラウンドの斑点状ノイズを除去する効果があるが、画像の形態を変化させてしまう。このため、一般的に、単独で用いられることはほとんどない。変形された画像境界を元に戻すために、オープニング、クロージング手法が用いられる。Fig. 4 (e), (f)にその適用例を示す。

観測した画像データには地形等による定在エコーが含まれているため、これを除去するための地形マスクを以下の二通りの方法で作成した。第一は、国土地理院の数値標高データから、船舶レーダの観測範囲における最大標高を調べることによって作成した (Fig. 5(a))。第二は、事前に晴天かつ噴煙のない

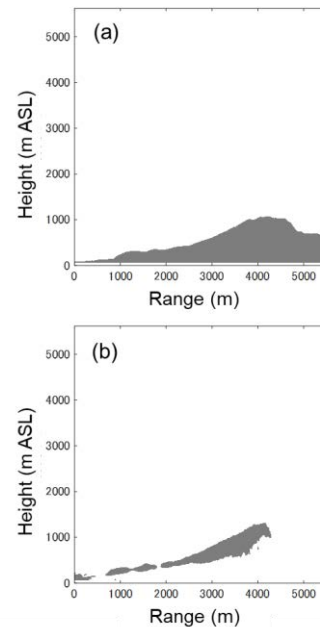


Fig. 5 Preparation of ground echo for masking: (a) from DEM, and (b) from accumulation of radar echoes under clear weather.

状態で一定時間取得した画像データを加算平均したものに対して、閾値フィルター及びメジアンフィルターを適用することによって作成した (Fig. 5(b))。

3.2 収録データの空間分解能と電力値

データの空間分解能は収録画像の設定に依存する。例えば、表示範囲、収録画像の画像サイズなどである。収録画像は観測の目的によって変えているためにデータの空間分解能はその都度変わる。Table 3に観測時期毎の表示画面の設定と空間分解能をまとめた。また、Fig. 6に船舶レーダ出力画像のサイズや分解能の例を示す。観測ではrawデータも収録しており任意の解析範囲と空間分解能を作成可能である。Table 3でReanalysisとあるのは噴煙高度が高い噴煙柱を再解析するためにrawデータから作成し直したデータである。

Table 3 Properties of marine radar output images.

	Obs. Date	Station	Image size	Resolution	Radar loc. Height
(a)	2018 Feb. 24-Mar.5 Apr. 11-23	Kurokami	1280 x 1280 pixel (5.556 x 5.556 km)	4.341 m/pixel	(0,20) 68 m
(b)	2018 Apr. 25-May 31	Kurokami	1024 x 1024 pixel (3.704 x 3.704 km)	3.617 m/pixel	(-320,96) 68 m
(c)	2018 Reanalysis	Kurokami	1280 x 1280 pixel (7.408 x 7.408 km)	2.89 m/pixel	(0,0) 68 m

本レーダの出力データはbmp形式の画像データであり、0から255の階調値 N で表現される。受信電力値 $P_r(\text{dBm})$ は階調値とスラントレンジ $R(\text{km})$ の関数で

$$P_r(\text{dBm}) = -100 + 0.352 N + 20 \log_{10} R$$

から求められる。

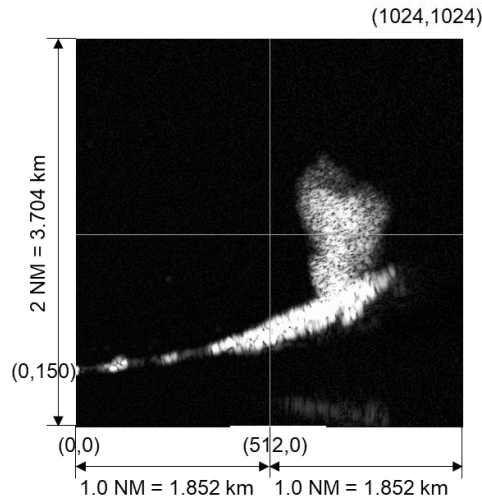


Fig. 6 An example of the size and resolution of a marine radar output image.

3.3 噴火ソースパラメータの推定アルゴリズム

前述したフィルター処理されたRHI観測エコーの時系列から噴火の発生時刻、継続時間、噴火の規模噴煙高度などの噴火ソースパラメータを推定する。

3.3.1 噴火の発生時刻と噴火継続時間

異なる時刻の差画像から噴火の発生を検知することができる。火口直上あるいは噴火発生の可能性がある場所に「噴火検出エリア」を設定し（Fig. 7），このエリア内に、ある輝度（受信電力）以上のエコーが占める面積割合を基に噴火の有無を判定する。また、噴煙が観測されない場所に「降水検出エリア」を設定し、そのエリア内に、ある輝度（受信電力）以上のエコーが占める面積割合を基に降水の有無を判定する。

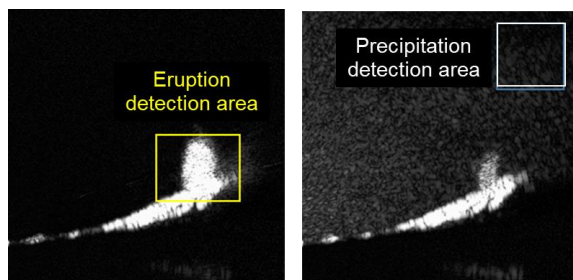


Fig. 7 Eruption and precipitation detection areas.

3.3.2 噴火エコーインデックス

噴火の継続時間と噴火の強さを求めるために、噴火インデックス（INDEX_E）を次のように定義する。噴火検出エリアのエコーの有無と強弱により、INDEX_Eに0-2の数値を割り当てる。同様に、降水の有無を判定するために降水インデックス（INDEX_R）を降水検出エリア内のエコーの有無と強・弱により0-2の数値を割り当てる。これにより、9通りの噴火の状況を表現できる（Table 4）。

Table 4 Echo index for volcanic eruption and precipitation.

Case	Eruption	Eruption index INDEX_E	Precipitation index INDEX_R
1	No eruption	0	0
2		0	1
3		0	2
4	Week eruption	1	0
5		1	1
6		1	2
7	Strong eruption	2	0
8		2	1
9		2	2

D_X: gray level of a pixel of observed echo (0–255)

D1_X: threshold for week echo (default value=40)

D2_X: threshold for strong echo (default value=150)

S0_X: no echo area (pixel number)

S1_X: week echo area (pixel number)

S2_X: strong echo area (pixel number)

S_X = S0_X + S1_X + S2_X

X: detection area (pixel number)

V1_X: acceptance value for week echo (default value=0.1)

V2_X: acceptance value for strong echo (default value=0.1)

I1_X: week echo index (0 or 1)

I2_X: strong echo index (0 or 2)

I_X = max(I1_X, I2_X): echo index (0 or 1 or 2)

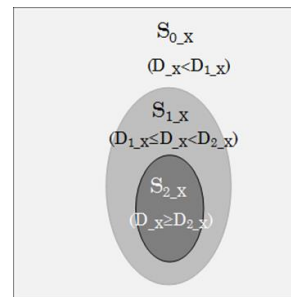


Fig. 8 Schematic figure showing the conditions for non-echo, week echo, and strong echo.

Table 5 Definition of echo index.

Index	Value	Condition
I_{1_X}	= 0	$S_{1_X}/S_{_X} < V_{1_X}$
	= 1	$S_{1_X}/S_{_X} \geq V_{1_X}$
I_{2_X}	= 0	$S_{2_X}/S_{_X} < V_{2_X}$
	= 2	$S_{2_X}/S_{_X} \geq V_{2_X}$
$I_{_X}$	$= \max(I_{1_X}, I_{2_X})$	

噴火エコーおよび降水エコーの強弱は次の方法で決定する．噴火と降水の抽出エリアの面積を S_{A0} , S_{R0} とする．それぞれの抽出エリア内に占める噴火および降水の面積を $S_{_X}$ とする．ここで添え字「 $_X$ 」は噴火か降水を識別する添字で， $X=E$ の時は噴火を， $X=R$ のときは降水を表す．エコーの有無（すなわち噴火の検出あるいは降水の検出），およびその強さ（弱いか強いか）は，抽出エリアに占める対象エコーの面積割合で判断する（Fig. 8, Table 5）．得られるエコーインデックスの時系列をFig. 9に模式的に示す．

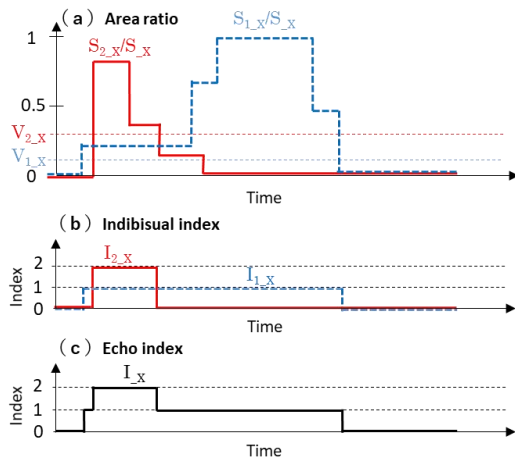


Fig. 9 Schematic picture of time series of echo index.

3.3.3 噴煙高度の推定

まず，観測した画像データから噴煙の領域を得るため，3.1で作成した地形マスクを用いて定在エコーを取り除き，閾値フィルターを用いてノイズを除去する．弱い降雨によるエコーもノイズとして除去できるように，フィルターの閾値は噴火直前の画像データに含まれる画素値の統計量を用いて設定する．具体的には，噴火前の上空の画像データからノイズの平均と分散 σ を求め，平均 $+3\sigma$ を閾値に設定してノイズを除去する．

続いて，噴煙が塊となって現れる特徴に注目し，上で得られた画像から8近傍の連結成分（縦横斜めに

接する画素を1つのグループにまとめたもの）を調べ，一定の面積を超える連結成分の中で最も高い位置を噴煙高度とする．この処理は1.25秒毎（アンテナスキャン速度が48rpmの場合）におこなわれ，噴煙エコーが無くなるまで計算が繰り返される．噴煙高度の確定値は1.25秒毎に得られた速報値を移動平均することにより求められる．さらに噴煙高度の時間変化から噴煙の上昇速度が求められる．

4. 観測結果

4.1 取得データのアーカイブ

観測期間中，計145事例の噴火（内，爆発的噴火は83事例）のデータを取得した．95の事例で噴石と考えられるエコーが確認された．顕著な噴火事例として57事例（内，爆発的噴火は49事例）を抽出し，各事例の動画を作成しアーカイブした（Maki and Tokushima, 2020）．以下，代表的な噴火事例について紹介する．

4.2 噴石を伴う爆発的噴火（2018年5月29日03時34分）

噴火は，南岳火口で発生した．噴煙高度は2800mで，この事例では，明瞭に上昇する噴煙柱と噴石の落下がとらえられた(Fig. 10)．Figure 11は噴火エコーインデックスの時間変化である．

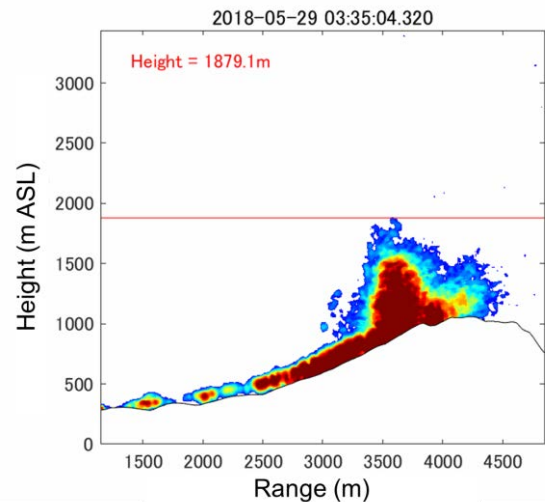


Fig. 10 Explosive volcanic eruption from the Minamidake vent. Sakurajima, 03:34 LST, May 29, 2018. See ‘Animation_1.gif’ in Appendix II.

噴火エコーインデックスの時間変化（Fig. 11 (c)）を見てみると，Index=1（弱い噴火エコー）が3:28以降に継続して見られるが，3:34に強いエコーが観測されIndex=2の状態が3:37まで続いている．その後，Index=1の状態が続くが，3:38頃には弱い噴煙エコー

の面積が一時的に大きくなり、3:44頃には小さな値となった。これらのことから、強い爆発的な噴火は3:43に発生し、噴火継続時間は約3分、弱い噴火はその後継続して発生していたと判断できる。降水インデックスは常に0であり、降水はなかったことがわかる。

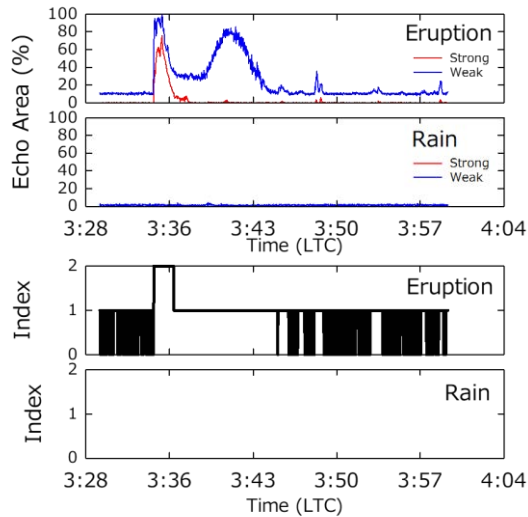


Fig. 11 Temporal change of eruption index.
Sakurajima, 03:34 LST, May 29, 2018.

噴煙高度の変化とその上昇速度の変化をFig. 12に示す。噴火後、噴煙高度は約 30 m s^{-1} の早さで上昇し、速度を遅くしながら約300秒後には最高高度約4100 m（海拔高度）に達している。噴火後の約30秒後に噴煙の上昇速度が一度0になりその後上昇している。これは2回目の噴火をとらえたものと考えられる。1回目の噴火との時間間隔は約50秒と推定された。

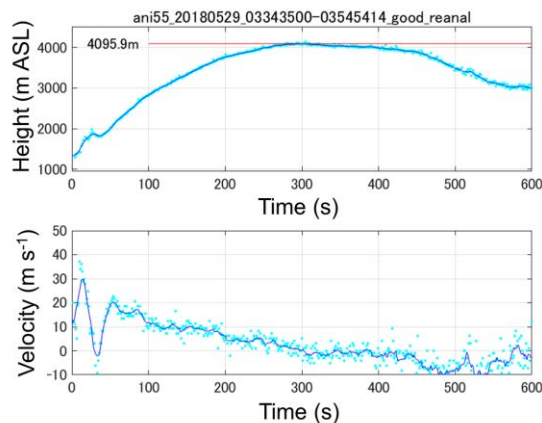


Fig. 12 Temporal change of the eruption column top height and its upward speed. Sakurajima, 03:34 LST, May 29, 2018.

4.3 連続噴火（2018年5月3日08時40分）

Figure 13は連続して発生した噴火の例である。噴

火後、噴煙はレーダに向かって進み、上空の噴煙エコーはオーバハングする様な形となった。下層の降灰は連続的な噴煙の供給を受け、桜島斜面を覆うようにゆっくりとレーダサイトへ進んだ。

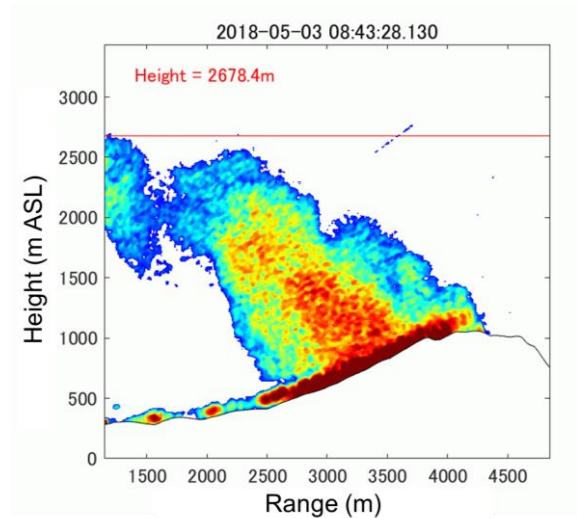


Fig. 13 Continuous volcanic eruption from the Minamidake vent, Sakurajima, 08:40 LST, May 3, 2018.
See 'Animation_2.gif' in Appendix II.

噴火インデックスの時間変化（Fig. 14）から、噴火時刻は8:40、強い噴火の継続時間は約5分間、弱い噴火は強弱を繰り返しながら9時まで続いた。8:45から8:48までは噴煙エリアが検出エリアの約60%を占め約1分毎に増減を繰り返している。8:48からは噴煙エコーエリアは徐々に減少するが、約3分毎の増減が認められる。この事例では降水は観測されなかった。

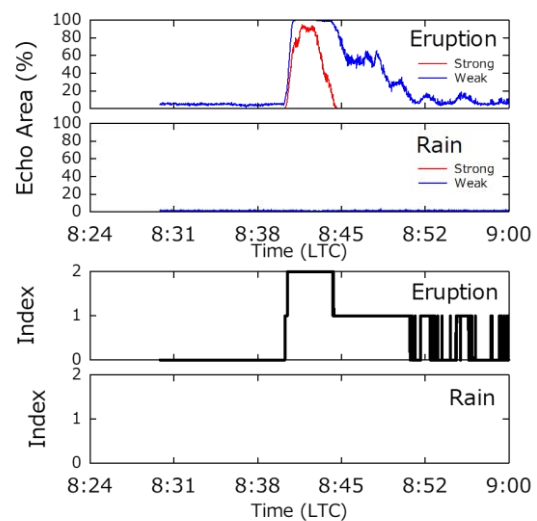


Fig. 14 Temporal change of eruption index.
Sakurajima, 08:40 LST, May 3, 2018.

See ‘Animation_3.gif’ in Appendix II.

噴煙高度の時間変化 (Fig.15) を見ると、噴煙高度は噴火後、ほぼ直線的に高くなり、噴火後約4分後に約2750mに達した。噴煙高度の上昇速度は、強弱はあるものの約 7 m s^{-1} であった。上昇速度の時間変動には約1分毎の変動が見られる。周期的な弱い噴火を示唆しているかも知れない。

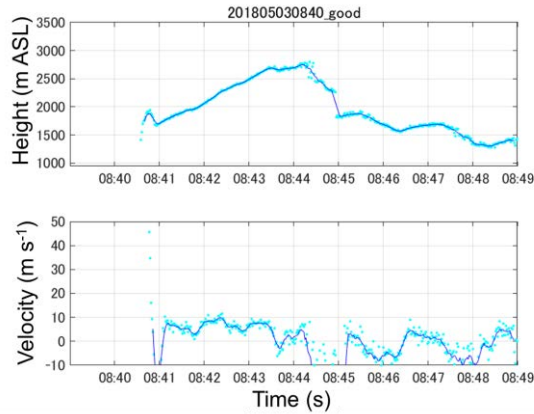


Fig. 15 Temporal change of the volcanic eruption column top height and its upward speed. Sakurajima, May 3, 2018.

4.4 弱い降雨中の連続噴火 (2018年2月28日22時:30分)

これまで、降水時の噴火に関してはほとんどその実態がわかっていない。本研究では、計6事例の降雨時の噴火をとらえた。その一例をFig. 16に示す。この事例では弱い降水が全層にわたって観測されている。その中を間欠的に小さな噴火が発生し、噴煙は斜面下降流のようにその高度を波状に変動させながらレーダサイトへ達した。

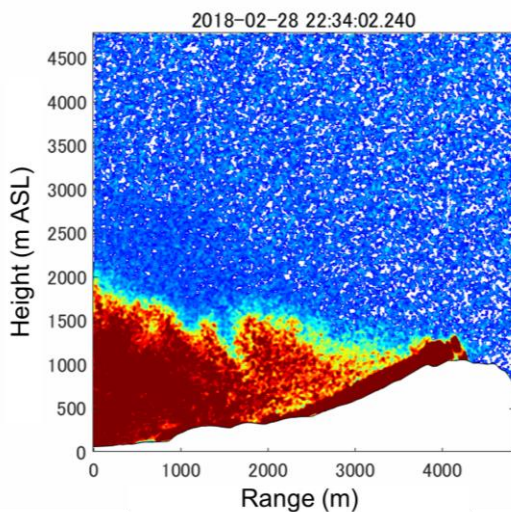


Fig. 16 Continuous volcanic eruption under rain condition. Sakurajima, 22:30 LST, Feb. 28, 2018.

噴煙高度はレーダに近づくに従って高くなり、最大値到達高度は約2000 mと推定された。噴煙エコーは斜面下流に進むほど強くなり、降水粒子との併合を示唆した。

4.5 弱い降雨中の噴火 (2018年5月25日22時01分)

降雨時の噴火事例として、降雨中の噴煙柱の上昇が捉えられた例をFig. 17に示す。この例では、高度約4000 mに、水平方向に帯状に伸びるエコーが観測されている。これは良く知られたブライトバンドと呼ばれるエコーで、降雪粒子が落下中に気温が 0°C 付近の高度を通過する際、溶けて水滴になるために現れるエコーである。層状性の降水の特徴である。この事例でも弱い降水エコーが全高度で観測されている。規模は小さいが、降水エコーとは明らかに異なる強さのエコーが火口に観測された。

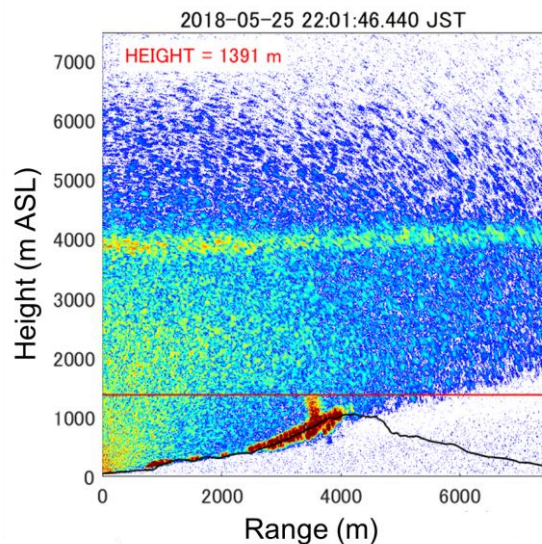


Fig. 17 Volcanic eruption under rain condition. Sakurajima, 22:01 LST, May 25, 2018.

Figure 18によれば、噴煙高度の情報は、噴火から約100秒間と限られた時間ではあるが、自動検出ができた。また、ブライトバンドエコーの高さも明瞭に求められている。噴煙柱、噴煙の降水中の振る舞いは不明な点が多く今後の課題である。

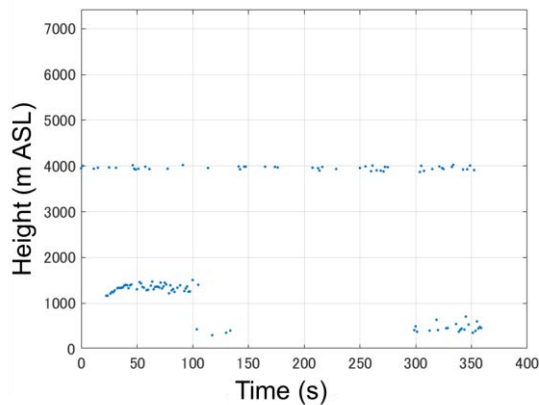


Fig. 18 Temporal change of the eruption column top height and its upward speed. Sakurajima, 22:01 LST, May 25, 2018.

5. まとめ

気象レーダによる噴煙観測の研究は1990年後半であるが、国内外での観測事実から、現在では気象レーダは噴煙観測の有効な手段であることを疑う人はいない。火口から離れた安全な場所から広範囲の降灰量の分布をリアルタイムで把握できるということから、気象レーダは火山防災のための有力な機器でもある。近年では、気象レーダによる観測から噴火ソースパラメータを推定する試みがなされている。噴火ソースパラメータとは噴煙柱の高度、噴火継続時間、質量噴出率などのパラメータで、噴火のタイプや規模を知る上で、また、降灰予測モデルの初期値として重要なパラメータである。本研究では、約1秒毎の鉛直スキャンが可能である船舶レーダが持つ特性を活かし、噴煙柱の発生過程をとらえるとともに、噴火時刻、噴火継続時間、噴煙高度を定量的に推定することに成功した。著者らの知る限り、船舶レーダによるこれらの成果は本研究が最初であろう。船舶レーダによる質量噴出率や総噴出量の推定は今後の課題であろう。近年、固体化素子の船舶レーダにより、電力値に加えて、噴煙エコー内のドップラー速度を取得できるようになった。今後の定量的な噴火ソースパラメータの推定研究が期待される。最後に、弱い降雨中の噴火を検出できることが示されたことも興味深い。

謝 辞

本研究の遂行にあたって、京都大学防災研究所一般共同研究費「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」(課題番号:30G-1)の助成を受けました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 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, 119–169.
- 田中敏幸 (2019): 画像情報処理の基礎, コロナ社, 206 pp.
- 真木雅之・鈴木郁子・井口正人・Shakti P.C. (2019a): 気象レーダによる降灰量推定—2013年8月18日桜島噴火のZ-RA関係式—, 火山, 64, 219–241.
- Bovik, Al. (2009): The Essential Guide to Image Processing. Burlington, MA: Academic Press (Elsevier), 853 pp.
- Donnadieu, F. (2012): Volcanological applications of Doppler radars: A review and examples from a transportable pulse radar in L-band. In: Bech J. and Chau J.L. (eds.), Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications. InTech, pp. 409–446.
- Hort, M. and Scharff, L. (2016): Detection of airborne volcanic ash using radar. In: Mackie, S., Cashman, K., Ricketts, H., Rust, A., and Watson, M., (eds.), Volcanic Ash: Hazard Observation. Elsevier, pp. 131–160.
- Maki, M., Fujiyoshi, Y., Tokushima, H. and Iguchi, M. (2019a): X-band marine radar detection of ejected lapilli and volcanic blocks, Extended abstract, 39th Conf. Radar Meteorology, 5pp.
- Maki, M., Iguchi, M., Maesaka, T., Miwa, T., Tanada, T., Kozono, T., Momotani, T., Yamaji, A. and Kakimoto, I. (2016): Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke. J. Disast. Res., 11, 15–30.
- Maki, M., Takahashi, S., Okada S., Imai, K. and Yamaguchi, H. (2019b): Ku-band high-speed scanning Doppler radar for volcanic eruption monitoring. J. Disast Res., 14, 630–640.
- 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>.
- Marzano, F.S., Mereu, L., Scollo, S., Donnadieu, F. and Bonadonna, C. (2020): Tephra mass eruption rate from ground-based X-band and L-band microwave radars during the November 23 2013 Etna Paroxysm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58, pp. 3314–3327.

doi:10.1109/TGRS.2019.2953167

- Melnikov, V., Murnan, R. and Burgess, D. (2016): Detecting and tracking of airborne volcanic ash with the WSR-88Ds. Report on task 8 of 2016 ROC MOU, 55pp.
- Schneider, D.J. and Hoblitt, R.P. (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 : 2020 年8 月31 日)

Appendix 1: List of Sakurajima volcanic eruptions observed by marine radar

Bold: Typical eruptions (Subjective) and files are available in Maki and Tokushima (2020). *: Reanalysis.

Exp: Explosive eruption. Time: Eruption onset time.

Height: Eruption column top height. Dir: Direction of eruption cloud.

Ejecta: Number shows the relative distance to the vent (5: halfway, 10: vet, x: unknown).

Pic: Camera image of MLIT.

Ku: Ku-band radar data of MRI.

N0	Exp	File name	Time (LST)	Height (km)	Dir	Ejecta	Rain	Pic	Ku
1	1	ani01_20180411_17221187_17364883	17:22	1000	E	x			○
2*		ani02_20180416_13230022_13345898	13:23	2500	SE	x		○	○
3	2	ani03_20180422_00380067_00465990	00:38	2100	T	5		○	
4		ani04_20180422_11440114_11595992	11:44	1600	N	-			
5*	3	ani05_20180423_05460074_05545997	05:46	2800	NE	8		○	
6	4	ani06_20180425_08260035_08311055	08:26	1800	SE	x			
7		ani07_20180425_14500066_14595918							
8	5	ani08_20180426_00484085_00595942	00:48	x	x	x		○	
9		ani09_20180426_11160121_11264832	11:16	2000	T	-		○	
10	6	ani10_20180426_23273045_23465416	23:27	2100	E	4			
11	7	ani11_20180427_01555111_02195890	01:55	>200	NE	7			
12		ani12_20180427_07180076_07355978	07:18	1900	SE	-			
13*	8	ani13_20180428_07090024_07135936	07:08	2400	SW	-			
14	9	ani14_20180428_20160033_20255913	20:15	1700	T				
15	10	ani15_20180428_23513940_00095896	23:51	1100	T	-			
16	11	ani16_20180429_11143037_11243815	11:14	1800	NE	-		○	
17*	12	ani17_20180429_21130036_21295897	21:13	2600	NE	6		○	
18	13	ani18_20180430_20354009_20495887	20:35	1500	SE	8	○		
19	14	ani19_20180501_01531361_02045934	01:53	1800	E	-			
20	15	ani20_20180502_06450085_06582835	06:45	x	x	x	○		
21	16	ani21_20180503_08402913-08481716 (Animation_2)	08:40	1500	SE	-			
22*	17	ani22_20180504_22090043-22185903	22:09	2800	SE	5		○	
23	23	ani23_20180505_14390048-14959999	14:39	1600	E				
24*	18	ani24_20180510_19220066-19315847	19:22	2800	S	8		○	
25	19	ani25_20180511_08551617-09065945	08:55	1900	NW	-			
26	20	ani26_20180511_12023863-12095447	12:02	1300	NE	-			
27*	21	ani27_20180512_11512349-11574196	11:51	2500	N	-		○	
28	22	ani28_20180512_21395078-21433419	21:38	300	N?	7			
29	23	ani29_20180513_12570240-13033043	12:57	1100	E	x			
30	24	ani30_20180514_00425687-00471407	00:42	1800	SE	9			

N0	Exp	File name	Time (LST)	Height (km)	Dir	Ejecta	Rain	Pic	Ku
31	25	ani31_20180514_06571716-07013539	06:57	1900	SE	x			
32	26	ani32_20180514_09221328-09253132	09:22	2200	SE	x		○	
33	27	ani33_20180514_17414101-17444458	17:41	1500	S	-			
34	28	ani34_20180514_20483575-20513965	20:48	2000	S	8			
35*	29	ani35_20180515_08083441-08300012	08:08	2500	T	-			
36*	30	ani36_20180515_15124524-15320912	15:13	2700	T	-		○	
37	31	ani37_20180516_22201561-22310420	22:20	2200	NE	7		○	
38	32	ani38_20180517_10141926-10242072	10:14	1000	E	x			
39	33	ani39_20180518_03082517-03144879	03:08	x	x	x			
40		ani40_20180518_16282774_16342457	16:28	1200	SE	x			
41	34	ani41_20180519_13125328_13244350	13:12	1900	SE	x			
42	35	ani42_20180520_00455444_00591530	00:45	800	T	6			
43	36	ani43_20180520_02091671_02242535	02:08	1300	E	9		○	
44*	37	ani44_20180520_04095977_04210579	04:09	300	T	6			
45	38	ani45_20180521_09103288_09110979	09:10	700	W	x	○		
46	39	ani46_20180522_04455750_04484356	04:45	1500	W	5		○	
47*	40	ani47_20180522_19485872_20034874	19:48	-	-	5			
48	41	ani48_20180523_23582126_00051528	23:58	1900	SE	5			
49	42	ani49_20180524_15343115_15403556	15:34	2000	SW	-			
50*	43	ani50_20180524_19374913_19504402	19:37	3200	SW	5		○	
51	44	ani51_20180525_10430849_10480036	10:43	1800	N	-			
52*	45	ani52_20180525_13260046_13345904	13:26	3000	NE	6		○	
53	46	ani53_20180525_19000489-19163618	19:00	3000	N	8			
54		*ani54_20180525_22011483-22065414	22:01	2200	NE		○		○
55*	47	*ani55_20180529_03343500-03545414	03:34	2500	T	6			○
56*		*ani56_20180530_08010768-08211578 (Animation_1)	08:01	2500	E				
57	48	*ani57_20180531_11454884-11490928	11:45	1700	SE	-	○		
A0		aniA0_20180228_22300062-22495890 (Animation_3)	22:30	<2000	E		○		

Appendix II: Animation gif files

Following files are available in Maki and Tokushima (2020).

Animation_1.gif: Sakurajima eruption, 03:34 LST, May 29, 2018.

Animation_2.gif: Sakurajima eruption, 08:40 LST, May 3, 2018.

Animation_3.gif: Sakurajima eruption, 22:30 LST, Feb. 28, 2018.