

様々なレーダを用いた  
火山噴煙の定量的観測に関する研究

2023年3月

小堀 壮彦



## 要約

本論文は、レーダを用いて火山の噴火を観測し、可視条件によらず噴煙柱の立体構造や運動学的パラメータを取得する手法についてまとめたものである。Xバンド船舶用レーダ、XバンドMPレーダ、Kuバンド高速スキャンドップラレーダ及びKaバンドドップラレーダを用いて桜島の噴火を検知し、噴煙の立体構造と噴煙内部における火砕物の密度分布、噴煙柱の高度、成長速度及び水平移流速度を求める手法を開発した。得られた結果は近隣の気象観測結果等と比較し、整合することを確認した。

## 主論文

- (1) Kobori, T., Maki, M., Fujiyoshi, Y., Iguchi, M., & Fukushima, S. (2022). Estimating volcanic eruption column height and growth rate using X-band marine radar at the Sakurajima Volcano. *Sola*, 18, 231–235. <https://doi.org/10.2151/sola.2022-037>
- (2) Maki, M., & Kobori, T. (2021). Construction of three-dimensional weather radar data from volcanic eruption clouds. *MethodsX*, 8, 101535. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101535>



# 目次

要約 .....	i
主論文 .....	i
1. 序論 .....	1
2. データ .....	3
2.1. レーダの仕様.....	3
2.1.1. Xバンド船舶レーダ (X-MRN) .....	5
2.1.2. XバンドMPレーダ (X-MP) .....	5
2.1.3. Kuバンド高速スキャンドップラレーダ (Ku-RAD) .....	6
2.1.4. Kaバンドドップラレーダ (Ka-DOP) .....	6
2.2. スキャンモード.....	7
2.3. データの座標系.....	9
2.3.1. レーダ座標系.....	9
2.3.2. 局所座標系.....	9
2.4. 事例.....	10
3. 手法 .....	11
3.1. データの品質管理.....	11
3.1.1. ノイズ除去フィルタ.....	11
3.1.2. レンジサイドローブフィルタ.....	11
3.1.3. 地形マスク.....	13
3.1.4. ノイズフロアの除去.....	14
3.2. 噴煙の高度と成長速度.....	17
3.2.1. 噴火検知.....	17
3.2.2. 噴煙高度と成長速度の推定.....	18
3.3. 噴煙の移流ベクトル.....	20
3.3.1. 重心追跡法.....	20
3.3.2. パターンマッチング法.....	21
3.3.3. 移流ベクトルの関数形.....	22
3.4. 噴煙の内部構造.....	24
3.4.1. 鉛直断面の内部構造.....	24
3.4.2. 三次元CAPPIデータ .....	24
4. 結果 .....	28
4.1. データの品質管理.....	28
4.1.1. ノイズ除去フィルタ.....	28
4.1.2. レンジサイドローブフィルタ.....	28

4.1.3.	地形マスク.....	29
4.1.4.	ノイズフロアの除去.....	30
4.2.	噴煙の高度と成長速度.....	32
4.2.1.	噴火検知.....	32
4.2.2.	噴煙の高度と成長速度.....	33
4.3.	噴煙の移流ベクトル.....	38
4.3.1.	重心追跡法.....	38
4.3.2.	パターンマッチング法.....	38
4.3.3.	移流ベクトルの関数形.....	38
4.4.	噴煙の内部構造.....	41
4.4.1.	鉛直断面の内部構造.....	41
4.4.2.	三次元 CAPPI データ.....	42
5.	考察.....	46
5.1.	データの品質管理.....	46
5.2.	噴煙の高度と成長速度.....	47
5.3.	噴煙の移流ベクトル.....	49
5.4.	噴煙の内部構造.....	51
5.5.	桜島の噴煙観測システム.....	52
6.	結論.....	55
①	可視条件に依存しない観測.....	55
②	定量的な観測.....	55
③	内部構造の観測.....	55
	今後の課題.....	56
	謝辞.....	57
	参考文献.....	58
	付録.....	60

# 1. 序論

日本は火山大国である。気象庁によれば、日本国内には 111 の活火山が存在する。地球上にはおよそ 1,500 の活火山があると言われているので、そのうち約 7%が日本に存在することになる。火山現象のうちで、火山性物質が固体地球内部から表面へ放出される動的現象のことを噴火という。また、破片状または塊状の火山性物質を総称して火山砕屑物<sup>さいせつぶつ</sup>または火砕物という。火砕物はその大きさによって火山岩塊 (> 64 mm)、火山礫 (64 ~ 2 mm) 及び火山灰 (< 2 mm) に分類される (下鶴, 荒牧, 井田, 中田, 2008)。火山の噴火と、それに伴い放出される火砕物は、航空機の飛行安全や火山周辺に住む人々の生活にとって大きな脅威となる (Casadevall, 1994) (Webley, 2015) (Wilson, et al., 2012) (Wilson, Wilson, Deligne, & Cole, 2014)。このため、火砕物の特性を観測することは防災の観点から重要である。とりわけ、噴煙の最大高度と成長速度は噴火の規模を表す指標となるとともに、降灰予測の数値シミュレーションの初期値にも用いられる重要な特性である (Hasegawa, et al., 2015)。

現在、火山の観測には、主に地上に固定された監視カメラが用いられている。より正確に観察できるよう、複数のカメラで異なる方向から監視している。また、夜間でも観測できるように赤外線カメラも導入されている。しかし、光学カメラを利用する方法では、可視条件によって観測が困難な場合がある。また、噴煙の上端は噴煙自身の背後に隠れていることもあり、地上から正確に観測することは難しい。このような問題を解決するため、近年、気象レーダを用いた噴煙観測が注目されつつある (Marzano, Picciotti, Montopoli, & Vulpiani, 2013) (Hort & Scharff, 2016)。しかし、通常的气象レーダは、主に降水量の水平分布を得るための Plan Position Indicator (PPI) 観測を行っているため、十分な空間分解能で噴煙高度を観測することは難しい。また、PPI 観測の最大仰角と噴煙までの距離によって、観測可能な最大高度が制限されてしまう。(真木ほか, 2020) は、船舶レーダを用いて火口付近を Range Height Indicator (RHI) 観測することによって、噴煙の鉛直断面を高頻度で観測する手法を開発している。この手法は、光学カメラと比較して可視条件に影響されにくく、気象レーダより高い時間分解能で観測することができる。噴煙柱を高い時間分解能で取得できれば、浮

力による噴煙の上昇や移流，拡散する様子を定量的に計測することが可能となる。

本研究では，従来の光学カメラによる噴煙観測の課題を克服するために以下の目的を掲げ，様々なレーダを用いた火山噴煙の定量的観測に関する手法を開発した。

- ① 可視条件に依存しない観測
- ② 定量的な観測
- ③ 内部構造の観測

上記目的を実現するため，船舶レーダで観測した時系列の画像を解析することによって，噴煙柱の高度と成長速度を推定する手法を開発した。この手法によって得られた結果は，気象庁（以下，JMA という）が発表した噴火に関する火山観測報及び国土交通省の気象レーダで推定した結果と比較し，妥当であることを確認した。また，気象レーダの観測結果を時間補間，空間補間することによって分解能の低さを補い，噴煙の三次元構造を取得する手法を開発した。

2 章では本研究で用いたデータの源泉に関わる内容として，レーダの諸元や特徴，観測事例について示す。3 章では取得したデータの解析手法について示す。4 章では解析手法を観測事例に適用した結果を示す。5 章では開発した手法と観測結果について考察する。6 章では本章で設定した目標の達成度を評価し，今後の課題を示す。



## 2. データ

### 2.1. レーダの仕様

本研究では，図 2-1 に示すレーダで取得した桜島の噴煙の観測結果を利用した。

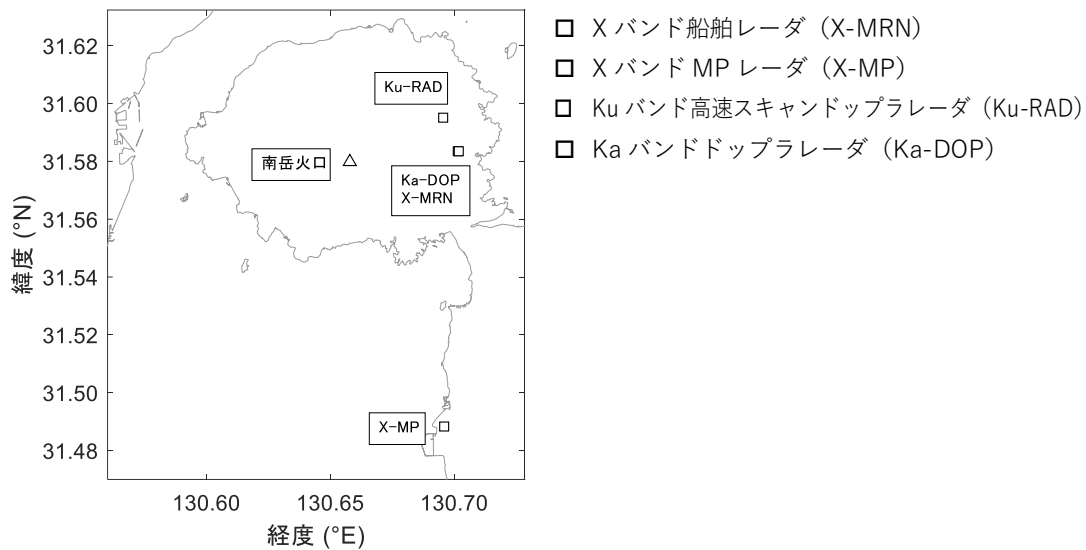


図 2-1. レーダの設置場所. △は火口，□はレーダの設置場所を表す。

レーダの名称に含まれる X, Ku 及び Ka は周波数帯に対応するバンド名を表している，図 2-2 に周波数帯とバンド名の対応を示す．周波数が高いほど細かな粒子を検出できるようになるが，減衰が大きくなり，遠方や噴煙の内部は見えにくくなる．表 2-1 に各レーダの諸元を示す。

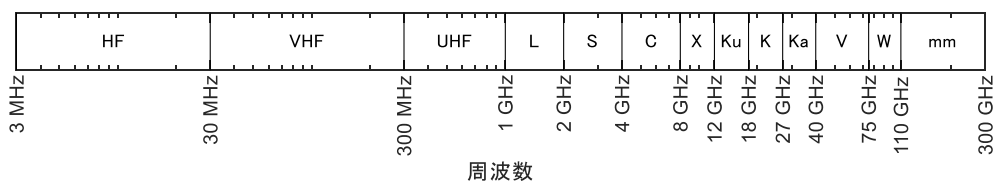


図 2-2. 周波数帯とバンド名. 横軸は周波数を対数スケールで示している. HF, VHF, ..., mm はバンド名.

表 2-1. レーダの諸元

項目	X-MRN <sup>注1</sup>	X-MP	Ku-RAD	Ka-DOP
周波数	9410 ± 30 MHz	9770 MHz	15.75 GHz	35.35 GHz
出力	25 kW	200 W	8.9 W	100 kW
ビーム幅	水平: 1.2° 垂直: 22°	1.0°	3°	0.3°
スキャン速度	24~48 rpm	1~4 rpm	20~40 rpm	方位角: 4 rpm 以下 仰角: 2 rpm 以下
スキャン範囲	方位角: 0~360° 仰角: 0°	方位角: 0~360° 仰角: 1.7~20.0°	方位角: 0~360° 仰角: 0~90°	方位角: 0~360° 仰角: -2~182°
スキャンモード	PPI	PPI	スパイラル, PPI, FIX	PPI, RHI
分解能	出力画像の設定に依存.	レンジ: 150 m 方位角: 1.0°	レンジ: 1.6 m 方位角: 3.0°	レンジ: 50 m ビーム幅: 25m
出力パラメータ <sup>注2</sup>	グレースケール画像	$Z_h, Z_v, Z_{DR}, \rho_{hv}, \phi_{DP}, K_{DP}, V, W$	$Z_h, V, W$	$Z_h, V, W$

注1 X-MRN はアンテナを 90° 倒して RHI スキャンするため、ビーム幅の水平/垂直、スキャン範囲の方位角/仰角が入れ替わる。

注2  $Z_h$ : 反射因子 (水平),  $Z_v$ : 反射因子 (垂直),  $Z_{DR}$ : 反射因子差,  $\rho_{hv}$ : 偏波間相関係数,  $\phi_{DP}$ : 偏波間位相差,  $K_{DP}$ : 比偏波間位相差,  
V: ドップラ速度, W: ドップラ速度幅

### 2.1.1. Xバンド船舶レーダ (X-MRN)

X バンド船舶レーダ (X-MRN) は船舶用のマグネトロンレーダであり、出力は 25 kW、スキャン範囲は最大 178 km である。通常、船舶レーダは周辺の船や障害物を検知するために水平面を走査するが、本研究では図 2-3 に示すようにアンテナを 90° 倒して火口付近に向け、後述する RHI スキャンによって鉛直断面を観測した。(真木ほか, 2020) は同タイプのレーダを用いて噴煙の観測に成功している。X-MRN のスキャン速度は最大 48 rpm であり、他のレーダと比較して高速にスキャンできる特徴がある。また、ビーム幅が 22° あるので、方位角を固定したままでも火口付近の一定範囲を観測することができる。高度方向の分解能は火口付近で約 87 m である。観測結果は、反射強度に基づいて変換された 256 段階の DN (Digital Number) 値を持つグレースケール画像として得られる。



図 2-3. X-MRN による噴煙観測。アンテナを 90° 倒して RHI 観測する。

### 2.1.2. Xバンド MP レーダ (X-MP)

X バンド MP レーダ (X-MP) は、国土交通省が運用する高性能レーダ雨量計ネットワーク XRAIN (eXtended RAdar Information Network) を構成するレーダである。二重偏波を利用したマルチパラメータレーダであり、反射強度の他に搬送波位相差などの情報も得ることができる。2022 年 12 月 1 日現在、X-MP の観測所は日本全国に 39 局設置されている。本研究では、桜島火口から南方約 10 km に位置する垂水レーダの観測データを利用した。桜島火口付近における高度方向の分解能は約 188 m である。X-MP の観測結果は、文部科学

省による「データ統合・解析システム (DIAS: Data Integration and Analysis System)」から取得した。固有のバイナリ形式で配布されているので (MLIT, 2022), 汎用的なデータフォーマットである NetCDF (Network Common Data Form) に変換して利用した。

### **2.1.3. Ku バンド高速スキャンドップラレーダ (Ku-RAD)**

Ku バンド高速スキャンドップラレーダ (Ku-RAD) は鹿児島大学の研究用噴煙観測レーダである。様々なスキャンモードを備えており、スパイラルスキャンでは対象物の立体構造を約 1 分間で取得することができる。固有のバイナリ形式で出力されるので、汎用的なデータフォーマットである NetCDF に変換して利用した。

### **2.1.4. Ka バンドドップラレーダ (Ka-DOP)**

Ka バンドドップラレーダ (Ka-DOP) は、防災科学技術研究所の研究用気象レーダである。雨粒よりも細かい粒子を観測できる雲レーダであり、これを噴煙に適用することで、より細かい噴煙を観測できると期待されている。固有のバイナリ形式で出力されるので、汎用的なデータフォーマットである NetCDF に変換して利用した。

## 2.2. スキャンモード

レーダには、観測の目的に応じた様々なスキャンモードが存在する。気象レーダのように用途が限定されたレーダでは、スキャンモードが目的に特化して固定されているが、研究用レーダのスキャンモードは柔軟に変更できる場合が多い。本研究で用いたスキャンモードの一覧を表 2-2 に示す。

表 2-2. スキャンモードの一覧

スキャンモード	仰角	方位角
PPI	固定	360° 回転
RHI	360° 回転	固定
セクタ RHI	一定範囲で往復	固定
スパイラル	一定範囲で往復	360° 回転

PPI は仰角を固定して方位角を 360° 回転するスキャンモードである。PPI の観測面はすり鉢状になっており、主に対象物の水平分布を観測するために用いられる。いくつかの異なる仰角で PPI スキャンすることで、対象物の立体構造を観測するボリュームスキャンが可能となる。RHI は方位角を固定して仰角を 360° 回転するスキャンモードであり、対象物の鉛直断面を観測する際に用いられる。PPI と同様、複数の方位角で RHI スキャンを行うことでボリュームスキャンが可能である。対象物を高頻度に観測するために、アンテナを周回させず特定の範囲で往復させて観測する方法をセクタスキャンという。本研究では仰角を一定範囲で往復させるセクタ RHI による観測結果を用いた。スパイラルスキャンは PPI と同様に方位角を周回させるスキャンモードであるが、仰角を固定せずに連続的に変化させながら観測することで、PPI よりも短時間でのボリュームスキャンが可能となる。Ku-RAD によるスパイラルスキャンの例を図 2-4 に示す。この例では、方位角を回転させながら仰角を 18° から 72° の範囲で変化させ、約 1 分間でボリュームスキャンを完了することができる。

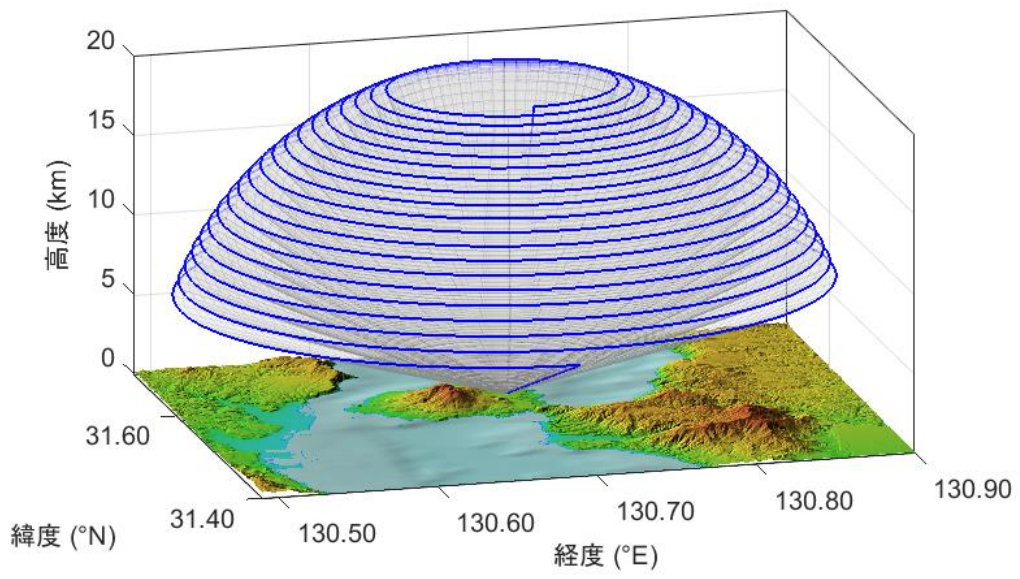


図 2-4. Ku-RAD によるスパイラルスキャンの例.

## 2.3. データの座標系

### 2.3.1. レーダ座標系

通常、レーダによる観測結果は対象物との距離（スラントレンジ） $r$  [m]、対象物の方位角（真北から時計回りに測った角度） $\psi$  [°]、仰角（水平面からの角度） $\theta$  [°]で表されるレーダ座標系で得られる。レーダ座標系の定義を図 2-5 に示す。なお、本研究で利用した X-MRN では、レーダ装置内で直角座標系への座標変換が行われ、鉛直断面の画像データが出力される。

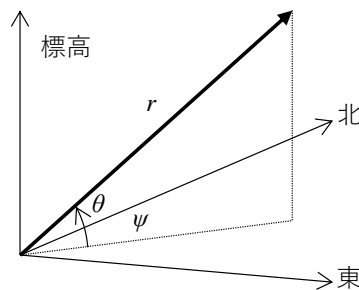


図 2-5. レーダ座標系の定義.  $r$ :スラントレンジ,  $\psi$ :方位角,  $\theta$ :仰角

### 2.3.2. 局所座標系

レーダの設置場所を原点として、東西方向の距離  $x$ 、南北方向の距離  $y$ 、標高  $z$  で表される座標系である。RHI 観測結果の場合は図 2-6 に示すように X 軸を方位角方向にとり、水平距離  $x$  と標高  $h$  の鉛直断面とする。

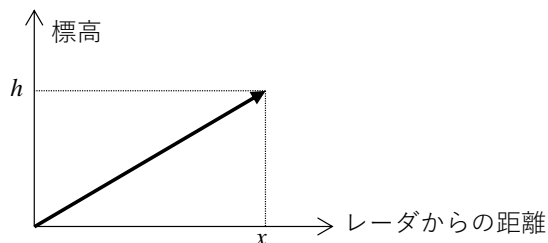


図 2-6. 局所座標系の定義.  $x$ :水平距離,  $z$ :標高

## 2.4. 事例

本研究で用いた観測データの概要を表 2-3 に示す。なお、本論文においては、断りがない限り、時刻は日本標準時（UTC+9 時間）で記している。

表 2-3. 観測データの概要

レーダ	観測データの概要
X-MRN	2019 年 6 月から 12 月までに観測した 127 の桜島噴火事例。 RHI 観測結果。
X-MP	2013 年の噴火事例のうち、噴煙の火口上高度が 3,000 m を超える 31 事例。 PPI 観測結果。
Ku-RAD	2017 年 4 月 29 日 18 時 9 分の桜島噴火事例。 スパイラル観測結果
Ka-DOP	2014 年 6 月 6 日 13 時 11 分の桜島噴火事例。 セクタ RHI 観測結果。



## 3. 手法

### 3.1. データの品質管理

#### 3.1.1. ノイズ除去フィルタ

レーダの観測結果に含まれるノイズを除去する際には、画像処理で汎用的に利用されているフィルタ技術を適用することができる。閾値フィルタは最も単純なフィルタであり、指定した閾値を境に画素値を消去する。閾値はノイズの特性に応じて設定する。例えば、ノイズの確率密度分布が正規分布であると仮定し、ノイズ成分の平均値と分散を求め、平均値 $+3\sigma$ を閾値にしてノイズを除去する。また、メディアンフィルタは注目している画素の値を周辺の中央値（メディアン）で置き換えるフィルタであり、外れ値の除去や2値画像（0と1で表される白黒画像）の「ごま塩ノイズ」の除去などに用いられる。

観測値の異常などにより観測結果に欠測が生じることがある。欠測箇所は画素値の平均やメディアンを算出する際の妨げとなる場合があるので、必要に応じて周辺の画素値のメディアンや最頻値（モード）、平均値に置き換える。

2値画像で1となっている領域の外周に沿って0を設定する処理を、収縮（erosion）という。逆に、外周の外側に1を設定する処理を膨張（dilation）という。収縮処理を繰り返すと孤立した小さな画素を除去することができるが、対象物の形状も収縮してしまう。そこで、収縮処理と同じ回数だけ膨張処理を行うことによって、対象物の形状を保持したまま小さな点を除去する。これはオープニングとよばれ、噴煙解析においては鳥や虫などによるエコーを除去する際に用いる。反対に、膨張処理を繰り返して画像の穴を塞ぎ、その後同じ回数だけ収縮処理を行うことはクロージングとよばれ、欠測箇所の補間や噴煙外縁部分の輪郭を明確化する際に用いる。収縮、膨張、オープニング、クロージングのような画像の形態に基づく画像処理をモルフォロジ処理という。

#### 3.1.2. レンジサイドローブフィルタ

X-MPのようなパルス圧縮レーダでは、対象物のエコーとは別にレンジサイドロー

ブと呼ばれる擬似エコーが生じる場合がある。図 3-1 に X-MP で観測した噴火直後の南岳火口付近の反射強度を示す。火口周辺で噴出物による強いエコーが観測されているのに加えて、これを通過するビームの前後にレンジサイドローブによる擬似エコーが生じている。

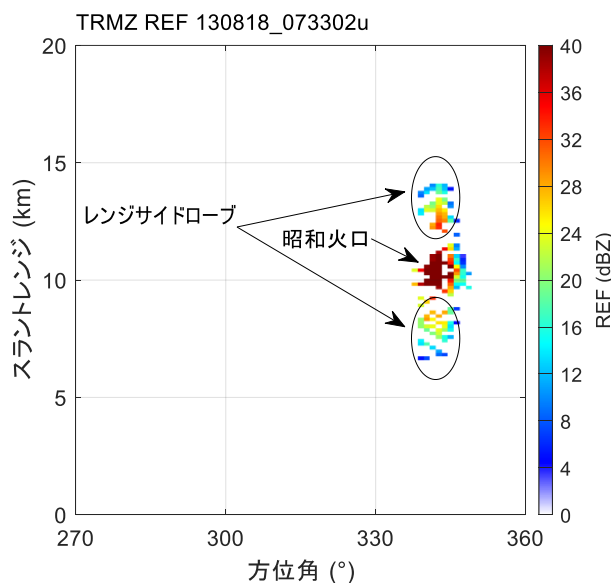


図 3-1. パルス圧縮レーダのレンジサイドローブによるエコーの例。2013/08/18 07:33:02  
仰角 16.0° の反射強度。

レンジサイドローブは噴煙の範囲や降灰量を過推定する原因となるため、取り除く必要がある。レンジサイドローブを除去するフィルタは、メディアンフィルタ、オープニング処理、クロージング処理といったノイズフィルタと、窓関数によって構成される。レーダからの距離を $r$ 、ノイズフィルタ後の反射因子を $f(r)$ 、窓関数を $w(r)$ とすると、レンジサイドローブ除去後の反射因子 $f_w(r)$ は式 3-1 で表される。

$$f_w(r) = w(r) f(r) \quad \text{式 3-1}$$

本研究では、窓関数として式 3-2 の一般化ベル関数を用いた。

$$w(r) = \frac{1}{1 + \left| \frac{r - c}{a} \right|^{2b}}$$

式 3-2

ここで、分布の中心  $c$  はレーダから火口までの距離 10,500 m とし、分布の形状を決定するパラメータ  $a$ 、 $b$  は、2013 年の桜島噴火 31 事例から統計的に  $a = 791$  m、 $b = 4$  を設定した。また、本フィルタを適用する方位角の範囲は  $342 \pm 6^\circ$  とした。図 3-2 にレンジサイドローブと、ベル型窓関数、フィルタリング結果の概要図を示す。

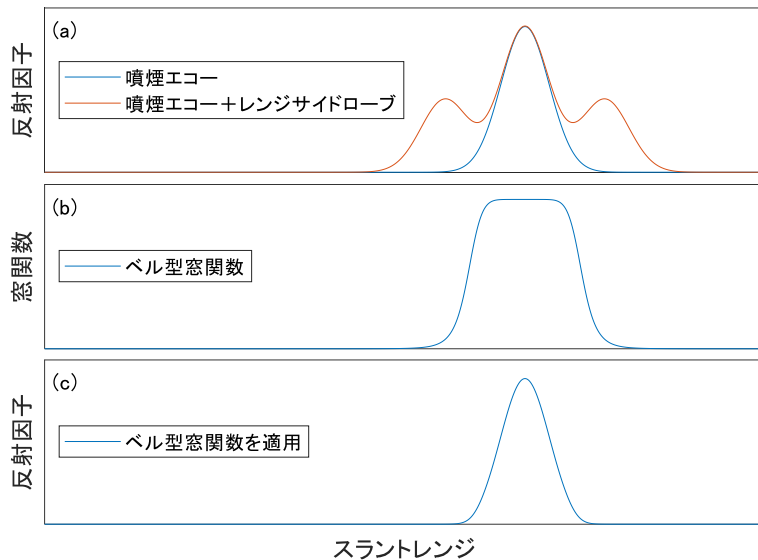


図 3-2. レンジサイドローブフィルタの概要。(a)は観測された反射因子、(b)はベル型窓関数、(c)は観測された反射因子に窓関数を乗じた結果。

### 3.1.3. 地形マスク

地表からのエコーもまた、解析の妨げとなる。レーダシステムの中には、動かないエコーを識別して除去する Moving Target Indicator (MTI) が組み込まれたものもあるが、除去する範囲が既知である場合はマスクを適用する方法も有効である。船舶レーダの観測画像には地形などによる固定エコーが含まれているので、地形マスクを作成して固定エコーを取り除く。地形マスクは、噴煙のない晴天時に取得した複数の観測画像を平均化したもの

(以下、平均画像という) から、閾値を用いてランダムノイズを分離することによって作成した。平均画像から地形や鳥の影響を受けない領域を切り出してランダムノイズの特性を調べた結果を図 3-3 に示す。DN 値がほぼ正規分布になっていることがわかる。そこで、切り出した画像から DN 値の平均値  $N_M$  と分散  $\sigma_N$  を求め、 $N_M + 3\sigma_N$  を閾値として平均画像を 2 値化した。さらに、メディアンフィルタを適用してごま塩ノイズを除去し、地形エコーの漏れを抑え、マスクの穴を埋めるために膨張処理を施したものを地形マスクとして利用した。ここでは、噴煙のない晴天時に取得した 48 フレームの観測画像から平均画像を作成し、桜島の標高約 1,000 m より十分に高い標高 2,000 m 以上の領域から閾値を算出した。

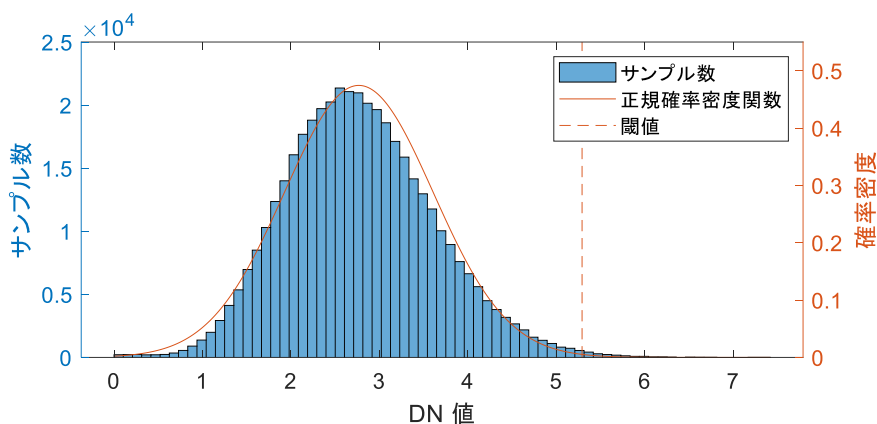


図 3-3. ランダムノイズのヒストグラム。赤線は正規確率密度関数、点線はランダムノイズの特性に応じて設定した設定した閾値  $N_M + 3\sigma_M$  を表す。

### 3.1.4. ノイズフロアの除去

観測データによっては、単一の閾値だけでノイズを除去するのは難しい場合がある。例えば、Ku-RAD で観測した反射因子  $Z$  には、図 3-4 に示すようにレンジに応じて大きさが変化するノイズフロアが含まれている。

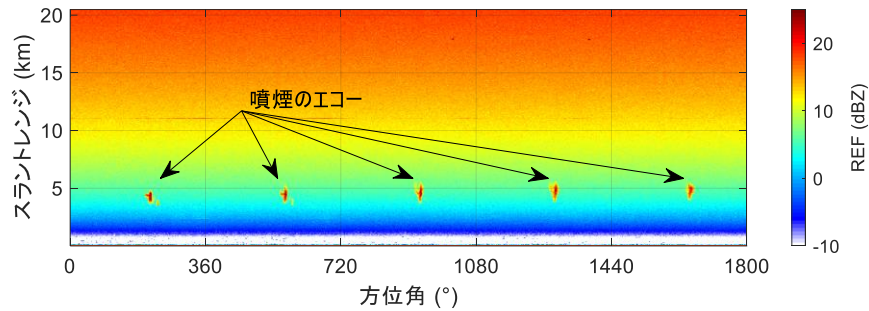


図 3-4. Ku-RAD 観測データに含まれるノイズフロア。

このようなノイズフロアは解析の妨げとなるため、以下の手順で取り除く。

最初に、観測した反射因子  $Z$  の単位を対数 (dBZ) から線形 ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ) に変換する。変換式を式 3-3 に示す。

$$Z [\text{mm}^6/\text{m}^3] = 10^{Z [\text{dBZ}]/10} \quad \text{式 3-3}$$

続いて、ノイズフロアの特徴を調べるため、閾値フィルタを用いてデータからノイズを取り出す。ここでは、レンジ毎に反射因子の中央値 (メディアン) を求め、観測値と中央値との差が、スケールされた中央絶対偏差 (scaled median absolute deviation: MADN) の3倍未満である要素をノイズとして取り出した。MADN は式 3-4 から求めた。

$$\text{MADN} = 1.4826 \times \text{median}(|f - \text{median}(f)|) \quad \text{式 3-4}$$

取り出したノイズ成分の平均値  $\overline{f_n(r)}$ 、分散  $\sigma_n$  を計算する。  $\overline{f_n(r)}$  は観測結果に含まれるノイズフロアのバイアス成分とみなし、観測結果から減じる。  $\sigma_n$  はノイズフロアのランダムノイズ成分であり、  $3\sigma_n$  を閾値とするフィルタで観測値から除去する (式 3-5)。残存するごま塩ノイズはメディアンフィルタで取り除く。

$$Z_p(r) = \begin{cases} Z(r) - \overline{f_n(r)} & 3\sigma_n < Z(r) - \overline{f_n(r)} \\ 0 & 3\sigma_n \geq Z(r) - \overline{f_n(r)} \end{cases} \quad \text{式 3-5}$$

最後に、式 3-6 を用いて反射因子を対数単位 (dBZ) に戻す.

$$Z \text{ [dBZ]} = \begin{cases} 10 \times \log_{10}(Z \text{ [mm}^6/\text{m}^3]) & 0 < Z \text{ [mm}^6/\text{m}^3] \\ \text{欠測} & 0 \geq Z \text{ [mm}^6/\text{m}^3] \end{cases} \quad \text{式 3-6}$$

## 3.2. 噴煙の高度と成長速度

### 3.2.1. 噴火検知

観測画像からノイズを取り除き、火口付近でエコーを検知した場合に噴火と判定する。ただし、降雨時に噴火と誤判定されるのを防ぐため、火口周辺の広い範囲でエコーを検知した場合は降雨の可能性があるとし、噴火検知の信頼性指標とする。

RHI 観測の場合は、火口付近とその周辺部分に、それぞれ噴火検知範囲と降雨検知範囲を設定した。図 3-5 に Ku-RAD を用いた場合の噴火検知範囲を示す。火口から半径 1 km までを噴火検知範囲とし、ここで閾値を超える反射強度が一定面積を超えた場合に噴火と判定した。過去の事例解析結果を参考に、反射強度の閾値は 3 dBZ、面積の閾値は 10%とした。また、火口から半径 3 km までは降雨検知範囲とし、この範囲で一定面積以上のエコーが検知された場合は降雨と判定した。噴煙は、無風の場合は火口付近に留まり、風がある場合は風向に沿って一定の方位に移流していく。従って、降雨検知範囲で広くエコーが検知された場合は降雨の可能性が高い。反射強度の閾値は 3 dBZ とし、面積の閾値は 50%とした。

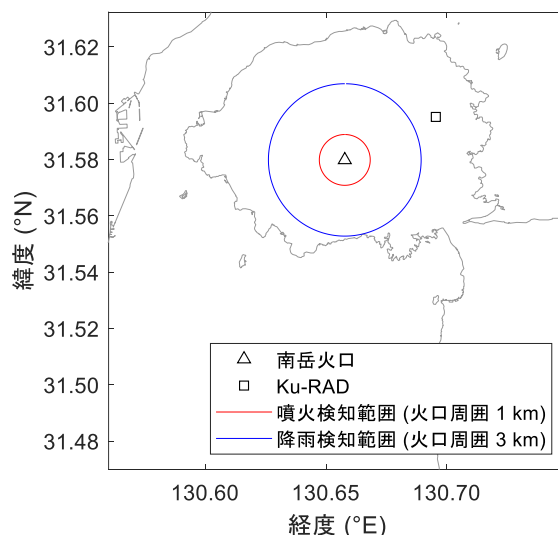


図 3-5. Ku-RAD を用いた噴火検知範囲の設定。赤線の内側は噴火検知範囲，青線の内側は降雨検知範囲。

### 3.2.2. 噴煙高度と成長速度の推定

X-MRN を例に，RHI 観測結果から噴煙高度を推定する手順を説明する．最初に，RHI 観測画像から地形エコーを取り除く．次に，降雨などの観測時の気象状況に起因するノイズを除去するため，噴火直前の観測画像を用いて地形マスクと同様の方法で閾値を求め，観測画像を2値化する．さらに，メディアンフィルタを適用し，ごま塩ノイズを取り除く．最後に，鳥や虫によるエコーを除去するために，面積が 10,000 m<sup>2</sup> 未満のエコーを取り除き，残った噴煙エコーの上端を噴煙柱の高度とする．推定誤差による高度のばらつきを抑えるため，最大高度を求める際には各フレームの前後 5 秒間の平均高度を用いる．噴煙の成長速度は，平均高度の変化率を各フレームの前後 5 秒間で平均化して求める．

X-MRN の方位角は火口に向けて固定されているため，噴煙が X-MRN の観測範囲外に移流してしまうと噴煙の最上端を観測できない．そこで，X-MP の観測結果を利用して噴煙が最大高度に達した水平位置を推定し，噴煙が X-MRN の観測範囲内にあるか否かを判定する．まず，事例の期間を通して PPI の各仰角で噴煙のエコーが観測された位置を記録する．次に，記録した噴煙の位置を地理座標系（緯度，経度，高度）に変換する．最後に，最大高度が記録された位置を調べる．図 3-6 に判定結果の例を示す．「最大高度観測可」は船舶レーダの観測範囲内で噴煙が最大高度に達したケース，「最大高度観測不可」は観測範囲から外れたケース，「不明」は降雨などの影響によって噴煙の位置を特定できなかったケースである．



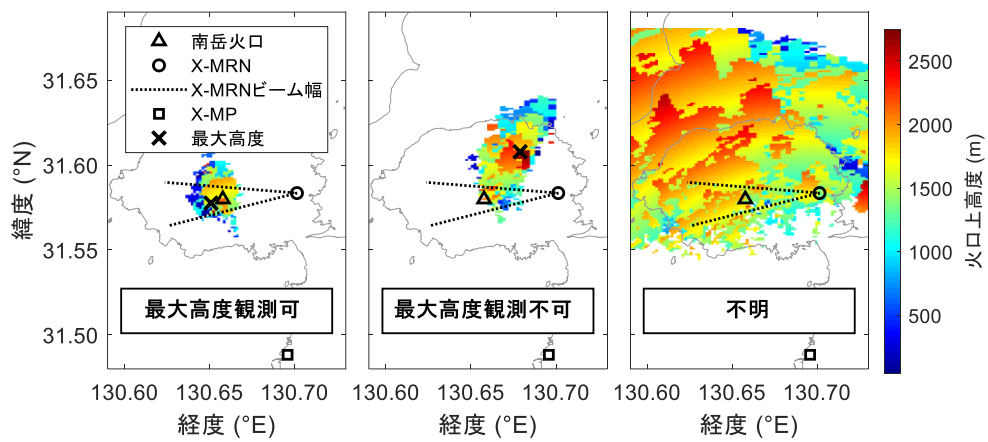


図 3-6. X-MP を用いて推定した噴煙柱の最大高度。△は火口，○は X-MRN の設置場所，□は X-MP の設置場所を表す。

### 3.3. 噴煙の移流ベクトル

噴火後、噴煙は風によって移流・拡散する。風向と風速は高度によって異なるので、噴煙の立体的な形状や構造は徐々に変形していく。この節では、異なる仰角の PPI 上の噴煙エコーから移流ベクトルを求め、風の鉛直分布を推定するアルゴリズムを示す。また、噴煙の移流ベクトルを求めるアルゴリズムとして、重心追跡法とパターンマッチング法を示す。降雨エコーの移流ベクトルを推定する手法は、対象の位置に注目するラグランジュ方式と、対象を含む空間の変化に注目するオイラー方式の 2 つに分類される。重心追跡法はラグランジュ方式、パターンマッチング法はオイラー方式である。

重心追跡法、パターンマッチング法のいずれも、噴煙が独立した単純な形状であることを前提にしているが、実際には地形や鳥、降雨などによるエコーが噴煙と混在する場合もある。不要なエコーは移流ベクトルの推定精度を悪化させるので、観測結果に対して事前に 3.1 節で述べたフィルタやマスクを適用しておくことが重要である。

#### 3.3.1. 重心追跡法

PPI 観測面上の噴煙の加重重心位置 $(r_g, \phi_g)$ は式 3-7 で求められる。

$$\begin{aligned} r_g &= \frac{\sum_{\phi=0}^{n-1} \sum_{r=0}^{m-1} r \times f(r, \phi, \theta_k)}{\sum_{\phi=0}^{n-1} \sum_{r=0}^{m-1} f(r, \phi, \theta_k)} \\ \phi_g &= \frac{\sum_{\phi=0}^{n-1} \sum_{r=0}^{m-1} \phi \times f(r, \phi, \theta_k)}{\sum_{\phi=0}^{n-1} \sum_{r=0}^{m-1} f(r, \phi, \theta_k)} \end{aligned} \quad \text{式 3-7}$$

ここで、 $f(r, \phi, \theta_k)$ は PPI のレーダ反射因子、 $r$ はレンジ、 $\phi$ は方位角、 $\theta_k$ は $k$ 番目の PPI スキャンの仰角を表している。 $n$ と $m$ は、それぞれ方位角方向、レンジ方向のデータ点数を表している。方位角-レンジ座標系で見た移流ベクトルの成分 $(v_r, v_\phi)$ は、式 3-8 に示すように目標エコーの重心位置を追跡することによって求めることができる。

$$v_r = \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{r_i - r_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

式 3-8

$$v_\phi = \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

ここで、 $(r_i, \phi_i)$ は時刻 $t_i$ における方位角-レンジ座標系の移流成分である。  $t_0$ は噴火時刻を表す。全ての仰角のPPI観測結果に対して上記の手順を適用することにより、 $(v_r, v_\phi)$ の鉛直分布が得られる。

### 3.3.2. パターンマッチング法

パターンマッチング法は相関法ともよばれ、連続する2つの観測結果の正規化相互相関係数を利用して画像の移動量を推定する手法である。対象とする画像全体の平行移動量を推定するので、本来は地理座標系や局所座標系などの直交座標系のデータに用いる手法である。本研究ではレーダ座標系のPPI観測結果から噴煙を含む領域のみを切り出し、範囲を限定して適用する。

時刻 $t - \Delta t$ ,  $t$ における反射因子を、それぞれ $f_{t-\Delta t}(r, \phi)$ ,  $f_t(r, \phi)$ とすると、両者の正規化相互相関係数 $C$ は式 3-9 で定義される。

$$C(\gamma, \eta) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \{f_{t-\Delta t}(i - \gamma, j - \eta) - \overline{f_{t-\Delta t}}\} \{f_t(i, j) - \overline{f_t}\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \{f_{t-\Delta t}(i - \gamma, j - \eta) - \overline{f_{t-\Delta t}}\}^2 \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \{f_t(i, j) - \overline{f_t}\}^2}} \quad \text{式 3-9}$$

ここで、 $\overline{f_{t-\Delta t}}$ と $\overline{f_t}$ は $f_{t-\Delta t}(r, \phi)$ ,  $f_t(r, \phi)$ の空間的な算術平均であり、式 3-10 で定義される。 $\gamma$ と $\eta$ はレンジと方位角の移動量である。

$$\overline{f_{t-\Delta t}} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} f_{t-\Delta t}(i, j)}{nm}$$

式 3-10

$$\overline{f_t} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} f_t(i, j)}{nm}$$

$\gamma$ と $\eta$ を変化させながら $C$ を計算し、最大値 $C_{max}$ となる移動量( $\gamma_{max}, \eta_{max}$ )を探索する。

図 3-7 に $C$ の計算例を示す。白い十字印は $C_{max}$ となった点を表している。

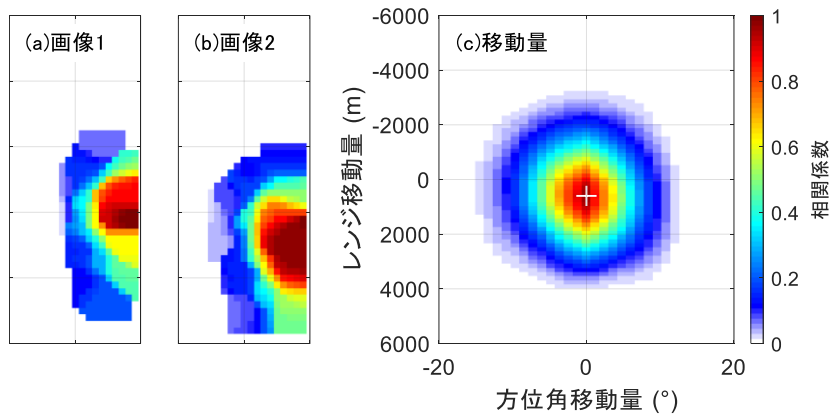


図 3-7.  $\gamma$ - $\eta$ と $C_{fg}$ の分布. (a)入力画像1, (b)入力画像2, (c)入力画像1と入力画像2の $C_{fg}$ 分布. 白い十字は $C_{max}$ の位置を表す.

移流ベクトルは移動量( $\gamma_{max}, \eta_{max}$ )を用いて式 3-11 で求められる。全ての仰角について以上の計算を繰り返すことによって、仰角毎の移流ベクトルを求める。

$$v_r = \frac{\gamma_{max}}{\Delta t}$$

$$v_\phi = \frac{\eta_{max}}{\Delta t}$$

式 3-11

### 3.3.3. 移流ベクトルの関数形

重心追跡法やパターンマッチング法により、各時刻、各仰角における移流ベクトルが求められる。ここでは、移流ベクトルを時刻 $t$ と仰角 $\theta$ の関数( $v_r(\theta, t), v_\phi(\theta, t)$ )で近似する

方法を示す。移流ベクトルの各要素が時刻に対して線形であると仮定すると、式 3-12 に示す関数型で表現できる。

$$\begin{aligned}v_r(\theta, t) &= m_r(\theta)t + n_r(\theta) \\v_\phi(\theta, t) &= m_\phi(\theta)t + n_\phi(\theta)\end{aligned}\tag{式 3-12}$$

$m_r(\theta)$ 、 $n_r(\theta)$ 、 $m_\phi(\theta)$ 及び $n_\phi(\theta)$ は仰角 $\theta$ に応じて変化する係数であり、以下の多項式で表現できると仮定する。

$$\begin{aligned}m_r(\theta) &= \sum_{i=1}^n a_{r_i} \theta^{i-1}, n_r(\theta) = \sum_{i=1}^n b_{r_i} \theta^{i-1} \\m_\phi(\theta) &= \sum_{i=1}^n c_{\phi_i} \theta^{i-1}, n_\phi(\theta) = \sum_{i=1}^n d_{\phi_i} \theta^{i-1}\end{aligned}\tag{式 3-13}$$

ここで、 $a_{r_i}$ 、 $b_{r_i}$ 、 $c_{\phi_i}$ 及び $d_{\phi_i}$ は回帰分析によって得られる係数である。

### 3.4. 噴煙の内部構造

#### 3.4.1. 鉛直断面の内部構造

通常のカメラでは噴煙の表面しか観測できないのに対し、レーダを用いた観測では噴煙の内部における火砕物の密度を反射強度の強弱によって観測することができる。X-MRN などによる RHI 観測では、噴煙の鉛直断面を観測することができる。

#### 3.4.2. 三次元 CAPPI データ

ボリュームスキャンの結果から三次元の Constant Altitude Plan Position Indicator (三次元 CAPPI) データを取得することができれば、噴煙の内部構造を分析するのに有用である。しかし、パラボラアンテナによる機械的なスキャンでは、三次元解析のために必要な時間的、空間的な分解能を得ることが難しい。解決策の一つは、研究用の高速スキャンレーダや、フェーズドアレイアンテナレーダを利用する方法である。例えば、(Maki, Takahashi, Okada, Imai, & Yamaguchi, 2019)では、Ku-RAD の観測結果から作成した三次元 CAPPI データを示している。高速なボリュームスキャンが可能な Ku-RAD のスパイラルスキャンを利用すれば、風速が大きい場合を除いて、噴煙全体を同時刻に観測したとみなして立体構造を得ることが可能である。

もう一つの解決策は、粗いサンプリングのレーダデータを時間的、空間的に補間する方法である。

X-MP は仰角  $1.7^{\circ}$  から  $20^{\circ}$  の範囲を 12 段階に分けて PPI スキャンしている。気象観測用のレーダなので、低高度における降水を高頻度で観測するために、図 3-8 に示すような複雑なパターンで仰角を変化させている。例えば、仰角  $1.7^{\circ}$ 、 $6.0^{\circ}$  は 2 分間隔で繰り返しスキャンする一方、他の仰角の PPI はおよそ 5 分間隔でスキャンしている。このため、ボリュームスキャンが完了するまで 5 分以上の時間を要する。最大仰角は  $20^{\circ}$  なので、桜島の南岳火口上では約 4,000 m が観測上限となる。また、仰角  $6^{\circ}$  までは桜島山体に当たるため、噴煙観測としては仰角  $6\sim 20^{\circ}$  までを利用することになる。

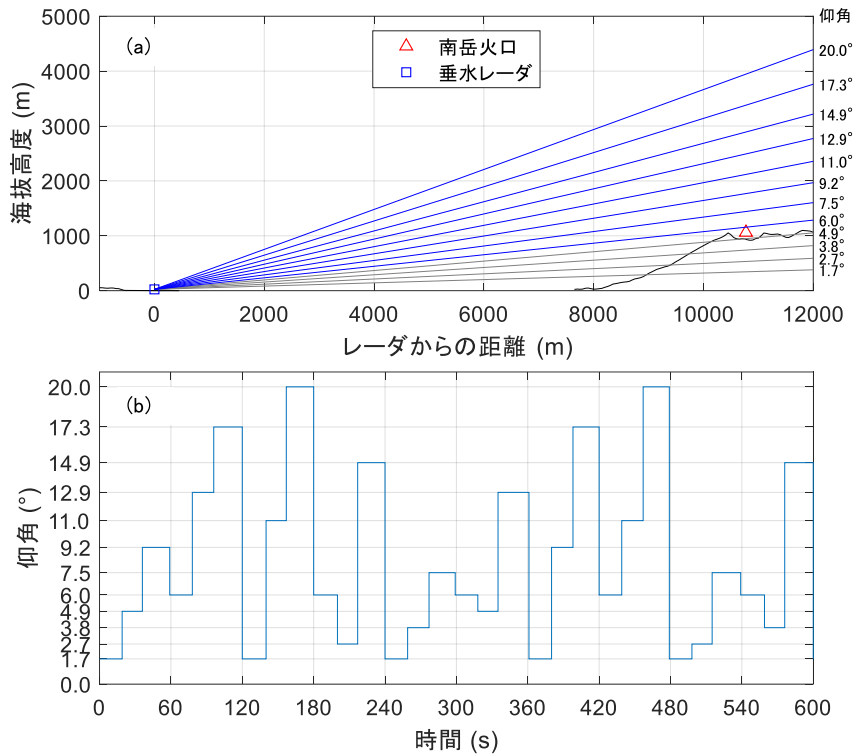


図 3-8. 気象レーダによる PPI 観測スケジュールの例. (a)は仰角, (b)は各仰角の観測スケジュール

図 3-9(a)は風向に沿って移流する噴煙と仰角毎のビームの概略図を示している. グレーの楕円はレーダによって観測されたエコーを表している. 図 3-9(b)に示すように, 2つの異なる時刻の PPI スキャンの間を補う必要があるため, 前節で示した手法で推定した移流ベクトルを用いて観測結果を時間内挿する. 時刻 $t_1 + \Delta t$ における反射因子 $Z_{t_1 + \Delta t}$ は, 単に $Z_{t_1}$ を移流するだけではなく,  $Z_{t_2}$ を同時刻まで逆移流した結果と合成し, エコーの形状や強度の変化を反映する.  $Z_{t_1}$ を $t_1 + \Delta t$ まで移流したエコーを $Z_{t_1(t_1 + \Delta t)}$ ,  $Z_{t_2}$ を $t_1 + \Delta t$ まで逆移流したエコーを $Z_{t_2(t_1 + \Delta t)}$ とすると,  $Z_{t_1 + \Delta t}$ は式 3-14 で求められる.

$$Z_{t_1 + \Delta t} = Z_{t_1(t_1 + \Delta t)} + (Z_{t_2(t_1 + \Delta t)} - Z_{t_1(t_1 + \Delta t)}) \cdot \Delta t / (t_2 - t_1) \quad \text{式 3-14}$$

上記の手順を全ての格子点に適用することによって, 一連の補間された $Z_t$ ,  $Z_{t + \Delta t}$ ,

$Z_{t+2\Delta t}, \dots$  を得る.

同様に、同時刻の観測値と時間内挿値を使って仰角  $\theta$  を線形内挿する.

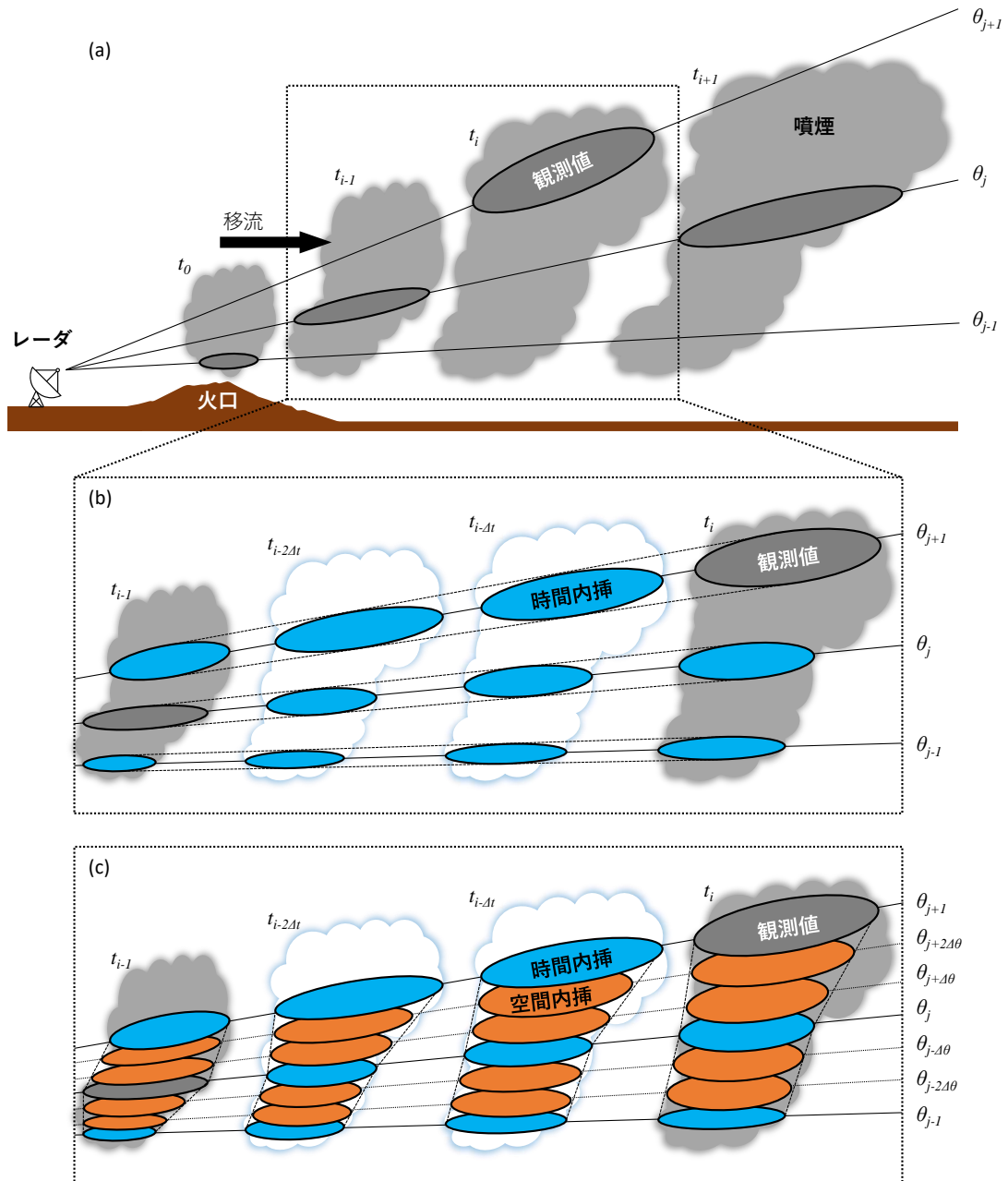


図 3-9. 噴煙の 3D-CAPPI を作成するためのレーダデータの補間の概略図. (a)観測したエコーと移流ベクトル, (b)時間内挿, (c)仰角内挿



最後に、三次元 CAPPI データの格子点を地理座標系（緯度、経度、高度）で定義し、前項で時空間内挿したレーダ座標系におけるデータ点群から、各格子点に最も近い点の値を取り出す。本研究では、総務省統計局が定義している 4 分の 1 地域メッシュ（1 辺の長さは約 250 m）の等高高度面を、高度方向に 250 m 間隔で重ね合わせた格子点を定義し、三次元 CAPPI を作成した。

## 4. 結果

### 4.1. データの品質管理

#### 4.1.1. ノイズ除去フィルタ

X-MP の観測結果に 3.1.1 項で示したノイズ除去フィルタを適用した例を図 4-1 に示す。図 4-1(a)は 2013 年 8 月 18 日 7 時 39 分 UTC、仰角  $6^\circ$  の観測結果、図 4-1(b)はノイズ除去フィルタとしてメディアンフィルタを適用した結果である。図 4-1(b)では噴煙周辺に存在した微小なエコーが除去されている。また、噴煙エコー内部の外れ値も取り除かれ、全体が平滑化されている。

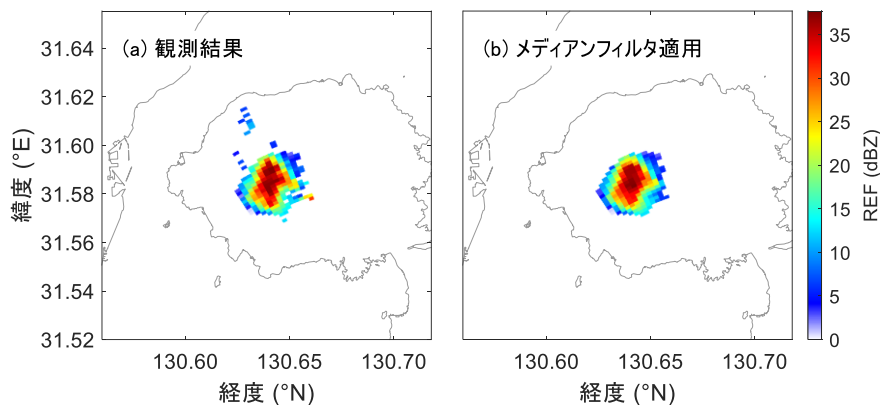


図 4-1. ノイズ除去フィルタ適用結果の例。(a)観測結果, (b)ノイズ除去後

#### 4.1.2. レンジサイドローブフィルタ

前項で示した例のおよそ 6 分前、噴火直後における X-MP の観測結果にレンジサイドローブフィルタを適用した結果を図 4-2 に示す。図 4-2(a)の観測画像では、火口上の噴煙柱による強いエコーの前後に疑似エコーが見られる。図 4-2(b)は、観測画像に含まれる欠測箇所を周辺画素のメディアンで置き換え、また画像全体にメディアンフィルタを適用した結果である。エコー内部の欠測箇所が埋まり、孤立した小さな点を含む外れ値が取り除かれている。この段階ではレンジサイドローブの存在が強調されているが、図 4-2(c)に示す通り、

最終的にベル型の窓関数を適用することによって、レンジサイドローブが効果的に取り除かれている。

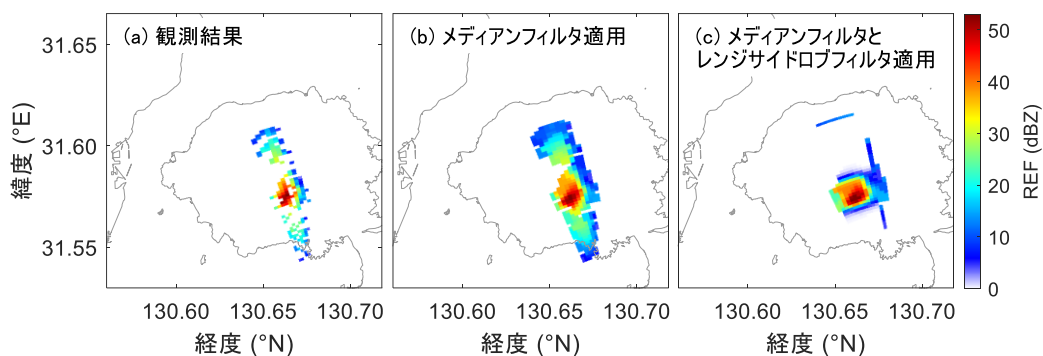


図 4-2. レンジサイドローブフィルタの適用結果. (a) 観測結果, (b) ノイズフィルタリング後, (c)レンジサイドローブフィルタリング後

#### 4.1.3. 地形マスク

X バンド船舶レーダ (X-MRN) の観測結果に地形マスクとノイズ除去フィルタを適用した結果を図 4-3 に示す. 図 4-3(a)は 2019 年 6 月 11 日に発生した桜島噴火の観測画像である. 事前に作成した地形マスクを使って地上エコーを取り除いた結果が図 4-3(b)である. さらに閾値を設定してノイズを除去した結果が図 4-3(c)である. オープニング処理により鳥や虫などに起因する微小なエコーを取り除いた結果が図 4-3(d)に示されている. 最終的に、噴煙のエコーだけが取り出されていることがわかる.

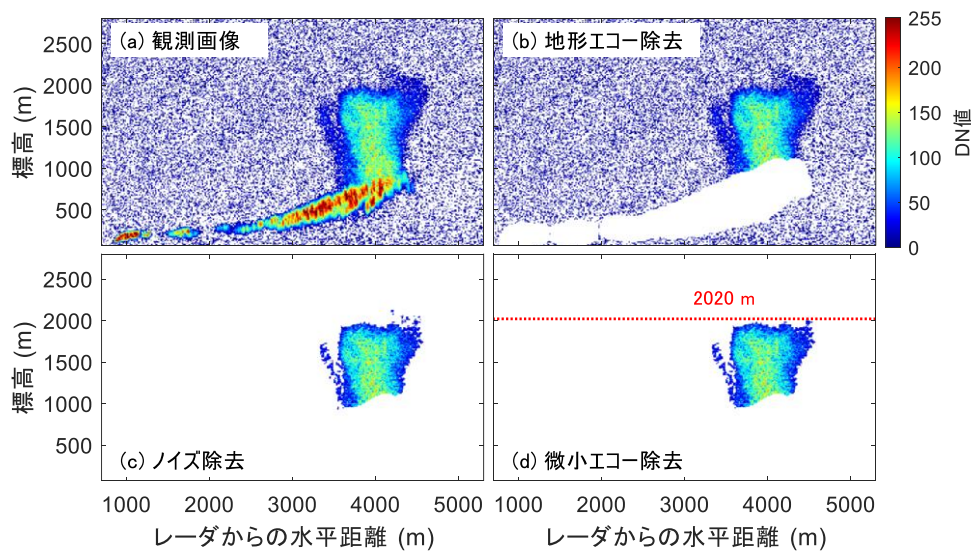


図 4-3. 船舶レーダ観測画像の処理手順。(a)観測結果，(b)地上エコー除去後，(c)ノイズ除去後，(d)微小エコー除去後（赤線と数値は噴煙柱の高度）

#### 4.1.4. ノイズフロアの除去

Ku-RAD の観測結果からノイズフロアを除去した結果を図 4-4 に示す。図 4-4(a)は 2017 年 4 月 29 日 18 時 14 分の観測結果である。観測結果に含まれるノイズフロアを推定し、補正した結果が図 4-4(b)である。さらにノイズ除去フィルタを適用して残存するランダムノイズを取り除いた結果が図 4-4(c)である。ノイズフロアが取り除かれ、噴煙のエコーだけが残っている。図 4-4(c)から三次元 CAPPI を作成した結果を 4.4.2 項の図 4-17 に示す。

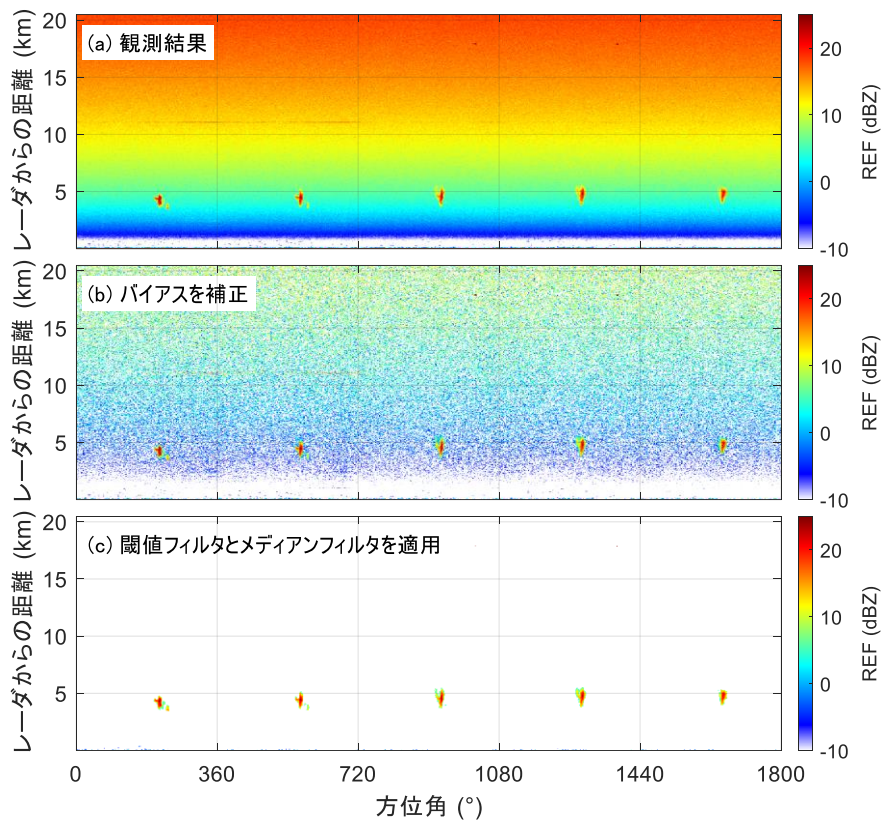


図 4-4. Ku-RAD 観測データからノイズフロアを取り除いた例。スパイラルスキャンのデータの一部（方位角  $0^\circ$  から 5 周回分）を示している。(a)観測結果，(b)バイアス成分を補正後，(c)閾値フィルタによるノイズ除去後

## 4.2. 噴煙の高度と成長速度

### 4.2.1. 噴火検知

Ku-RAD による 2017 年 4 月 29 日の桜島噴火事例の観測結果を用いて噴火検知を行った結果を図 4-5 に示す。図 4-5(a)は噴火検知領域及び降雨検知領域において検知されたエコーの面積比をプロットしたものである。噴火のタイミングで噴火検知領域の面積比が判定閾値である 20%を超え、図 4-5(b)の噴火検知フラグが立っている。プロット中の星印は気象庁が発表した噴火時刻を表しており、Ku-RAD による噴火検知と一致していることがわかる。図 4-5(c)には、参考として Ku-RAD で観測したドップラ速度をプロットした。青線は噴火検知領域内のドップラ速度の最大値、赤線は最小値、黄線は平均値を表している。平均値に注目すると、噴火検知のタイミングでわずかに変化が見られる。

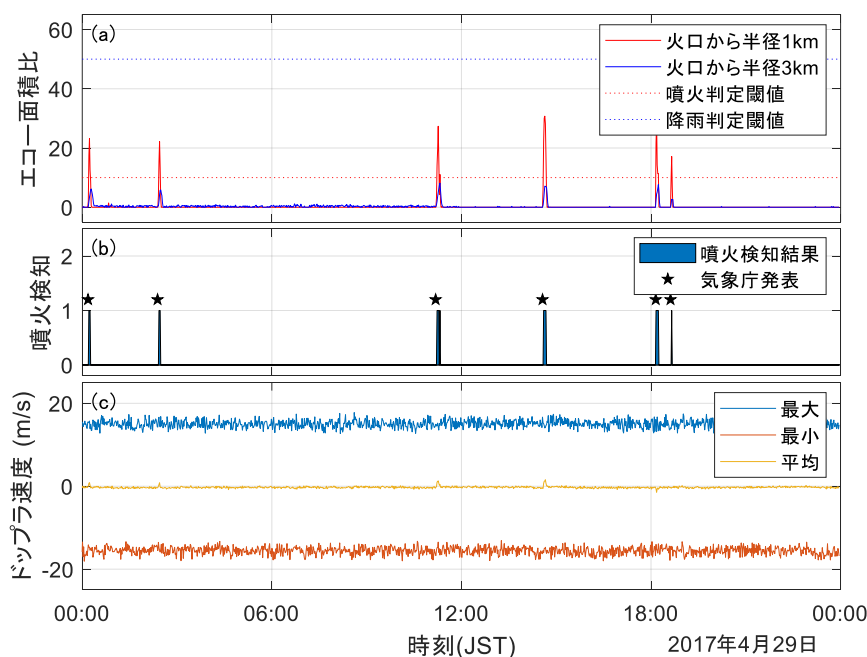


図 4-5. Ku-RAD を用いた噴火検知結果. 2017/4/29 の事例. (a)エコーを検出した面積の割合, (b)噴火検知結果, 星印は気象庁が発表した噴火時刻, (c)ドップラ速度の変化

続いて雨天時の例として、2017 年 5 月 5 日の噴火検知結果を図 4-6 に示す。図 4-6(a)～(c)の構成は図 4-5 と同様である。図 4-6(a)を見ると、降雨に伴って降雨判定用領域のエコー面積比が高くなっている様子がわかる。しかし、気象庁が発表した噴火現象は 12:00 付

近の1回のみであり、Ku-RADによる噴火判定結果は多くの誤検知が発生している。図 4-6(c)に注目すると、雨の強い期間でドップラ速度の平均値が大きくなる挙動がみられる。このとき、ドップラ速度の区間最大値/最小値の差が小さくなることがわかる。

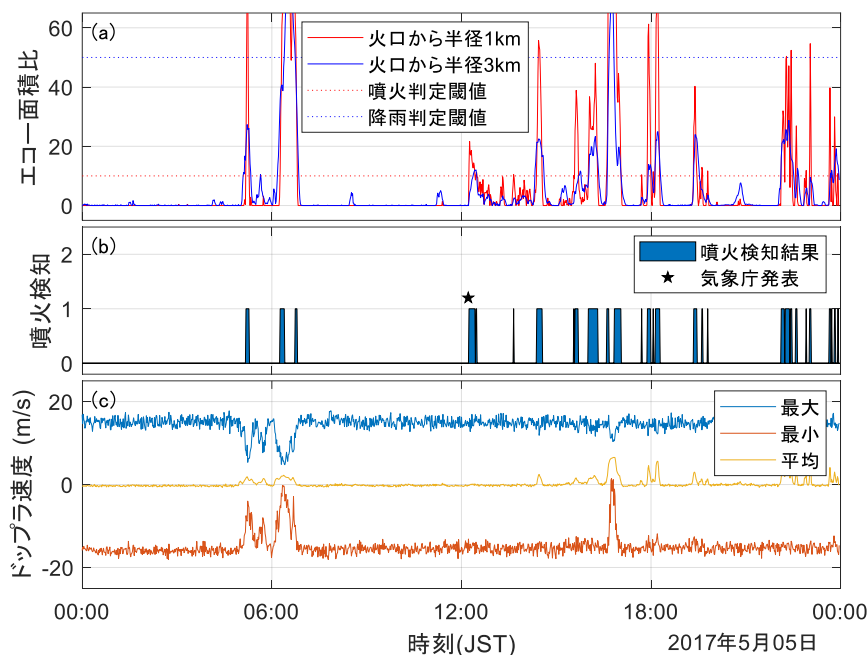


図 4-6. Ku-RAD を用いた雨天時の噴火検知結果。2017/5/5 の事例。(a)エコーを検出した面積の割合、(b)噴火検知結果、星印は気象庁が発表した噴火時刻、(c)ドップラ速度の変化

#### 4.2.2. 噴煙の高度と成長速度

X バンド船舶レーダ (X-MRN) によって取得した 2019 年 12 月 10 日 8 時 35 分の桜島噴火の画像を図 4-7 に示す。これらの画像は 3.1 節の手法によりノイズと地形エコーが除去されたものである。各画像の左上には噴火後の経過時間と噴煙柱の高度を記している。図 4-7(a)は噴火直後の様子を 2.5 秒間隔で示しており、火砕物が噴出して落下してくる様子が捉えられている。図 4-7(b)は 25 秒間隔の画像で、噴煙柱の成長する様子を読み取ることができる。噴煙柱の上端の輪郭は最初ははっきりしているが、徐々に拡散してぼやけてくる。

図 4-8(a)は噴火を検知してからの経過時間と船舶レーダで求めた噴煙柱の高度を示している。また、図 4-8(b)は高度の変化率から求めた噴煙の成長速度を示している。ケース 106 (黄実線) は JMA, XRAIN, 船舶レーダの全てで観測できたケースである。噴火後、噴

煙柱の高度は急速に上昇し、その後も減速しながら上昇を続け、噴火後約 246 秒後に最大高度 2,392 m に到達した。噴煙柱の成長速度は噴火直後に最大となり、約 90 m/s に達した。その後一旦負に転じ、約 30 秒後に再び 20 m/s 程度まで増加した。その後は徐々に減速していった。

ケース 099 (赤実線) はケース 106 と同様の振る舞いを示した。噴火直後、成長速度は瞬間的に 20 m/s に達し、一旦減速した後で、再び 20 m/s まで増速した。噴煙柱は最終的に 269 秒後に 2,894 m に到達した。船舶レーダと XRAIN で推定した噴煙柱の最大高度は同程度であったが、JMA と比較すると 1 km 程度高い結果となった。

ケース 015 (青実線) の成長速度は噴火直後では 5 m/s 程度であったが、約 130 秒後に 27 m/s まで増速した。図 4-9 で示す噴火検知後 130~150 秒後の観測画像からは、火口付近で再びエコーが現れ、火口上約 1,000 m のエコーが強くなっている様子が確認できた。船舶レーダで推定した噴煙の最大高度は 1,764 m であり、これは XRAIN で観測した結果とよく一致している。このケースの JMA の観測報では「火口上 600 m で雲に入る」と報告されている。

図 4-10 に示したケース 119 は、雨天時における噴煙高度の観測結果である。雨雲の影響により XRAIN で噴煙柱の水平位置を特定できず、船舶レーダが噴煙の最大高度を捉えているか否かは判断できなかった。しかし、噴煙柱高度の推定結果は最大で 2,848 m を記録した。このケースの JMA の観測報では「火口上 2,000 m で雲に入る」と報告されている。

X-MRN を用いた噴煙高度推定結果の一覧を表 付録-1. に示す。



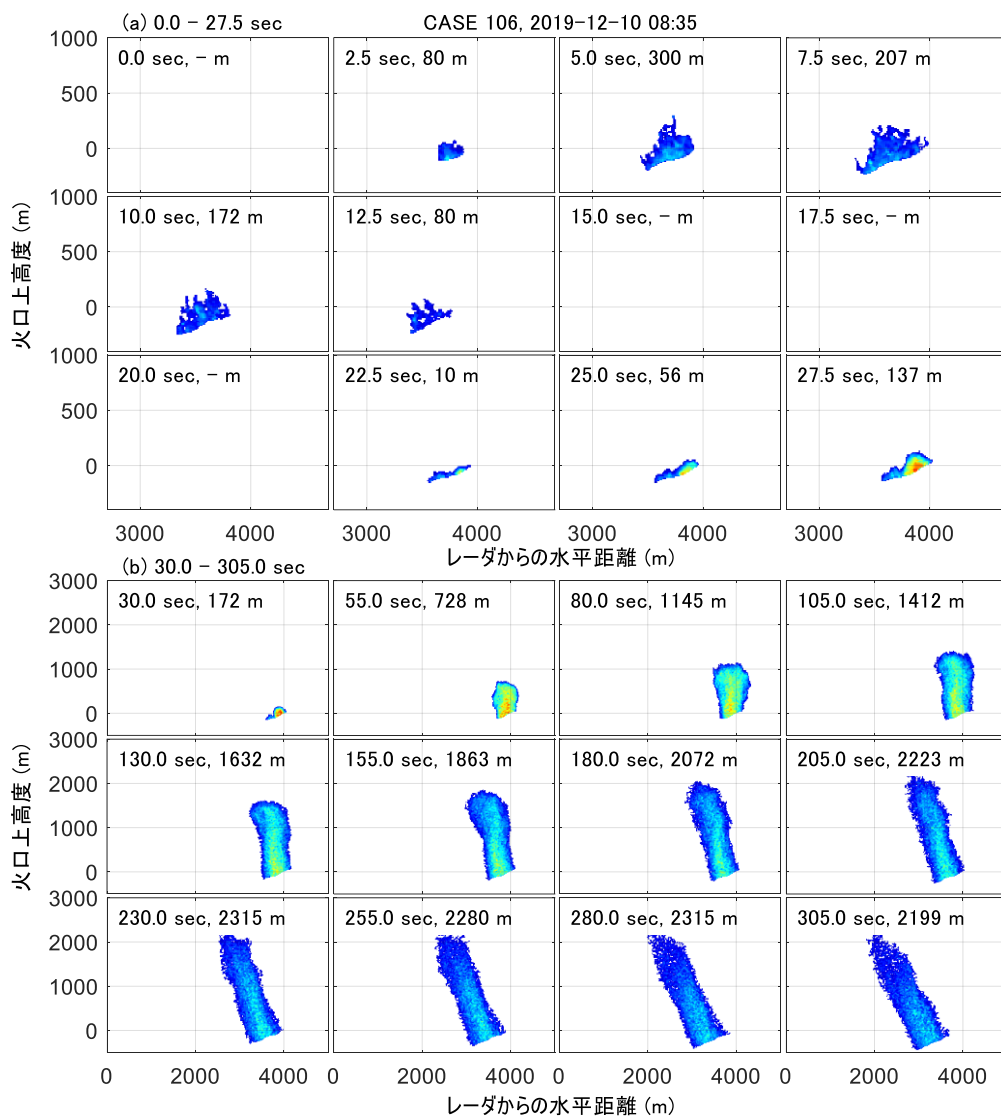


図 4-7. 船舶レーダで観測した噴煙柱の鉛直断面画像。各画像の左上には噴火後の経過時間と噴煙柱の高度を記している。(a)は噴火後0.0~27.5秒まで2.5秒間隔、(b)は噴火後30.0~305秒まで25秒間隔。

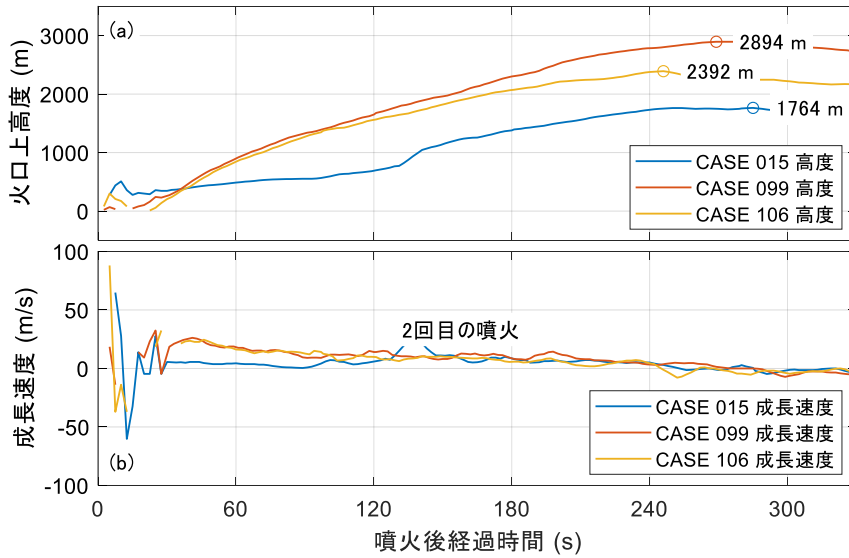


図 4-8. 船舶レーダで推定した噴煙柱の高度(a)と成長速度(b). 丸印は最大高度を指す.

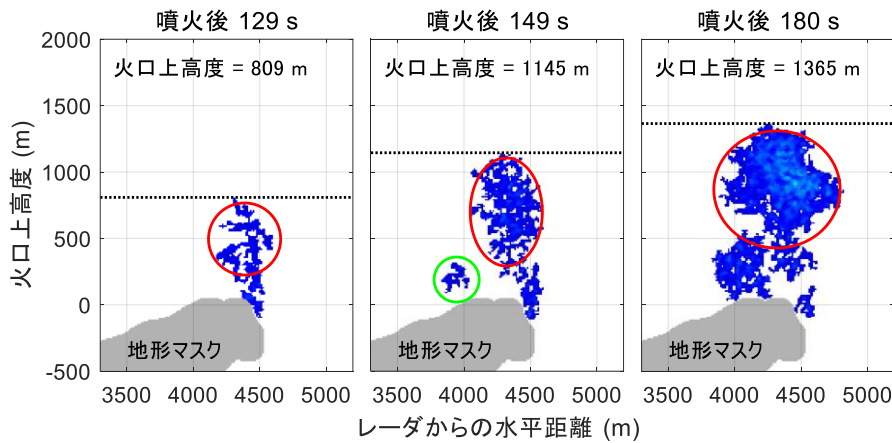


図 4-9. 火口付近で発生したエコーと上空のエコーの強まり. 噴煙のエコーは拡散して一旦弱まるが, 上空で再び強度を増す (赤丸). 火口付近では, 新たな噴煙のエコーが見られる (緑丸).

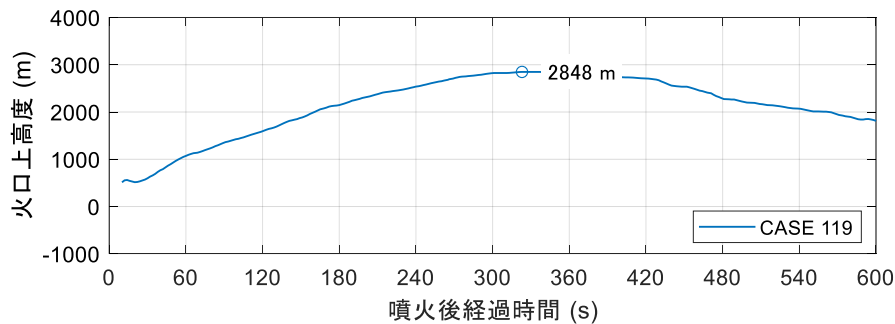


図 4-10. 船舶レーダで推定した噴煙柱の高度 (雨天時). 丸印は最大高度を指す.

127 ケース中 37 のケースでは、JMA と船舶レーダの両方で最大高度が得られた。これらのケースを用いて、船舶レーダと XRAIN, JMA それぞれの噴煙柱の最大高度推定結果を比較した。図 4-11 に XRAIN (a), JMA (b) と比較した散布図と回帰直線を示す。ここで、図 4-11 中の赤点は外れ値として回帰計算から除外した。XRAIN との比較では回帰直線の傾斜は 0.925 で、相関係数は 0.916, JMA との比較では回帰直線の傾斜が 0.771, 相関係数が 0.828 であった。

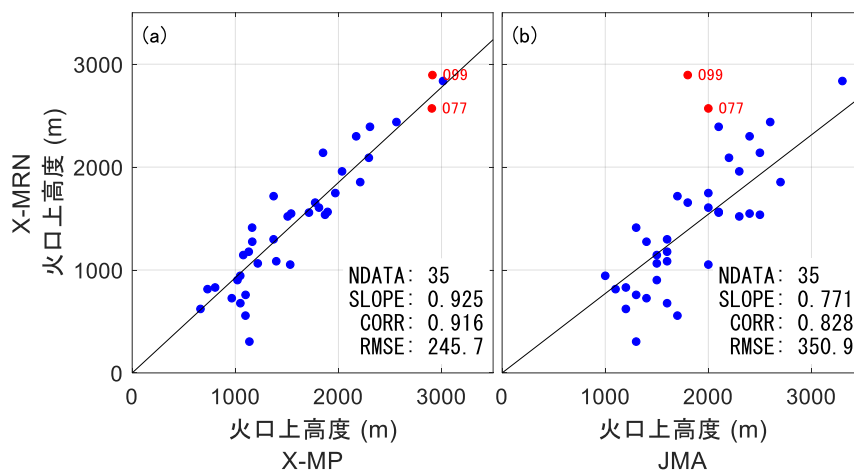


図 4-11. 噴煙柱の高度の散布図と回帰直線。(a)船舶レーダと XRAIN, (b)船舶レーダと JMA. 赤点の付いたケース番号は JMA との比較で外れ値として除外した。

### 4.3. 噴煙の移流ベクトル

#### 4.3.1. 重心追跡法

X-MP による 2013 年 8 月 18 日の桜島の噴火事例の観測結果を用いて、噴煙の重心位置を追跡した結果を図 4-12 に示す。各仰角の PPI に対して重心位置の軌跡が得られている。

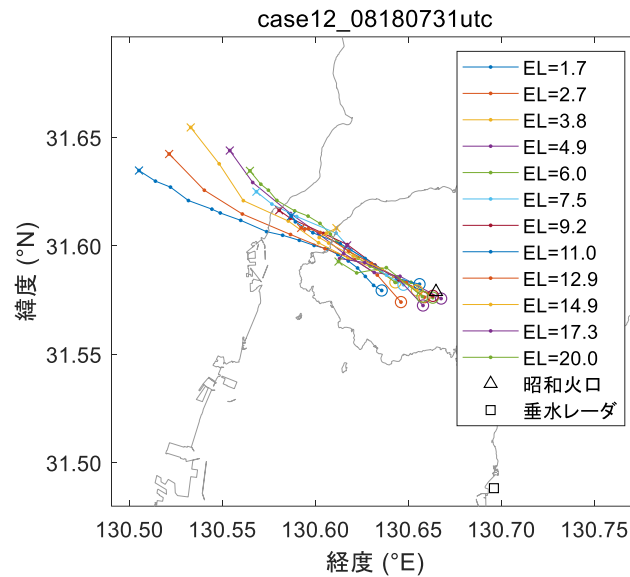


図 4-12. 2013 年 8 月 18 日の噴火における PPI 仰角 1.7~20° の重心位置の軌跡。

#### 4.3.2. パターンマッチング法

3.3.1 で示した重心追跡法と同様に、X-MP による 2013 年 8 月 13 日の桜島の噴火事例の観測結果から、パターンマッチング法を用いて噴煙の移流ベクトルを推定した。推定結果は、関数化した結果と合わせて次項の図 4-14 に示す。

#### 4.3.3. 移流ベクトルの関数形

前項で推定した各仰角の移流ベクトルを、式 3-12 の形式で関数化した。図 4-13 は回帰分析の結果である。図 4-13 の(a)~(d)は、それぞれ式 3-12 の係数 $m_r$ 、 $n_r$ 、 $m_\phi$ 及び $n_r$ に対応しており、各プロット中の丸印は観測値、点線は単回帰（次数  $n=1$ ）直線、実線は多項式回帰（次数  $n=3$ ）曲線を表している。観測値と回帰曲線の一致性を見ると、単回帰より

も多項式回帰の方が観測値との一致性がよい。次数を大きくするほど一致性は向上すると予想されるが、より多くのサンプルが必要となる。回帰分析に利用できるサンプル数は噴煙の持続時間に依存するので、3次式が実用的と考えられる。噴煙の持続時間が短くサンプル数が少ない場合、局所風が単純であれば単回帰で近似することも可能と考えられる。

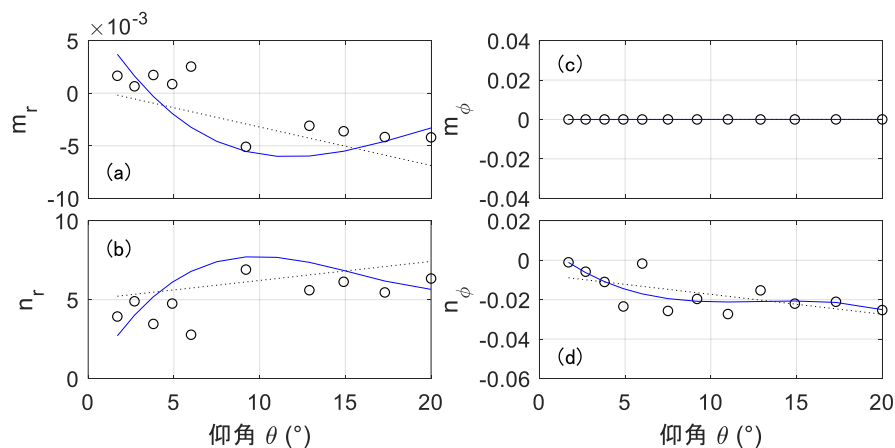


図 4-13. 観測値から求めた  $m_r$ ,  $n_r$ ,  $m_{\phi}$  及び  $n_{\phi}$  と回帰直線/曲線 (実線は 3 次の多項式回帰曲線, 点線は単回帰直線). 2013-08-18 の桜島噴火事例データ.

図 4-14 は仰角  $6.0^{\circ}$ ,  $7.5^{\circ}$ ,  $9.2^{\circ}$ ,  $11.0^{\circ}$  における移流ベクトル  $(v_r, v_{\phi})$  の時間変化を示している。回帰分析によって求めた値は観測値と一致している。他の仰角でも同様の結果が得られた。

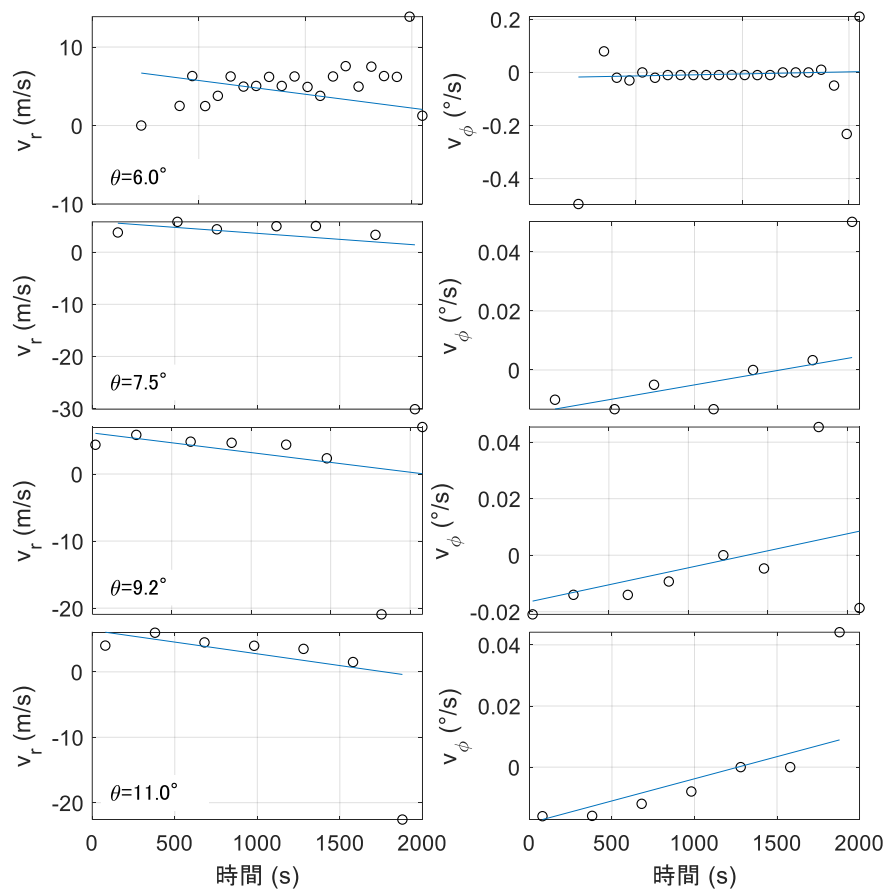


図 4-14. 移流ベクトルの時間変化. 丸印は観測値, 実線は関数値. データは 2013-08-18 の桜島噴火事例. 上段から順に仰角 6.0, 7.5, 9.2, 11.0° の結果. 左側がレンジ, 右側が方位角.

## 4.4. 噴煙の内部構造

### 4.4.1. 鉛直断面の内部構造

4.2.2 項で示した通り，X-MRN を用いた RHI 観測により，噴煙内部の反射因子の強弱を知ることができた。

Ka-DOP によるセクタ RHI で観測した反射因子とドップラ速度を図 4-15 及び図 4-16 に示す．三次元 CAPPI データが水平面を重ね合わせて三次元形状を把握できるのと同様，セクタ RHI では鉛直面を組み合わせて三次元形状を把握することができる。

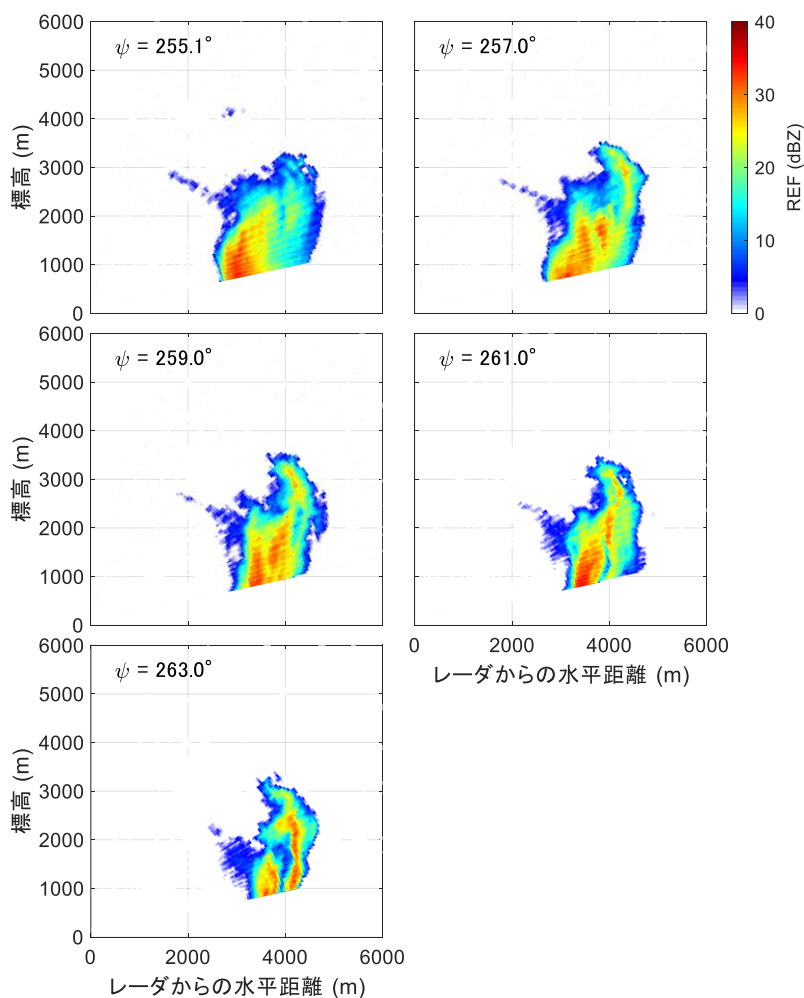


図 4-15. Ka-DOP を用いた反射因子観測結果. 2014 年 6 月 6 日 13 時 29 分. 255~263° のセクタ RHI 観測

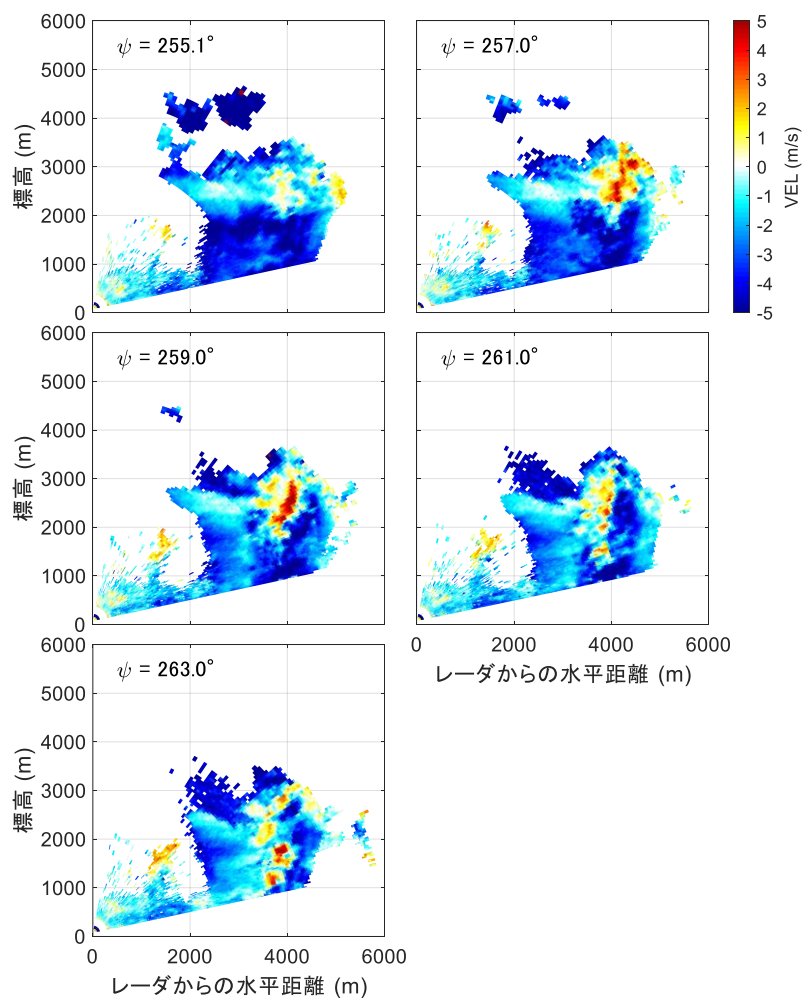
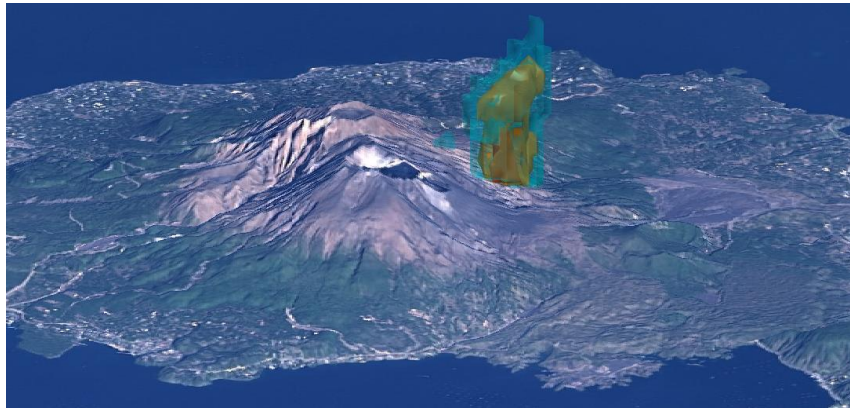


図 4-16. Ka-DOP を用いたドップラ速度観測結果. 2014 年 6 月 6 日 13 時 29 分. 255～263° のセクタ RHI 観測

#### 4.4.2. 三次元 CAPPI データ

Ku-RAD の観測結果から作成した三次元 CAPPI を図 4-17 に示す.





地理院タイル「電子国土基本図（オルソ画像）」を使用

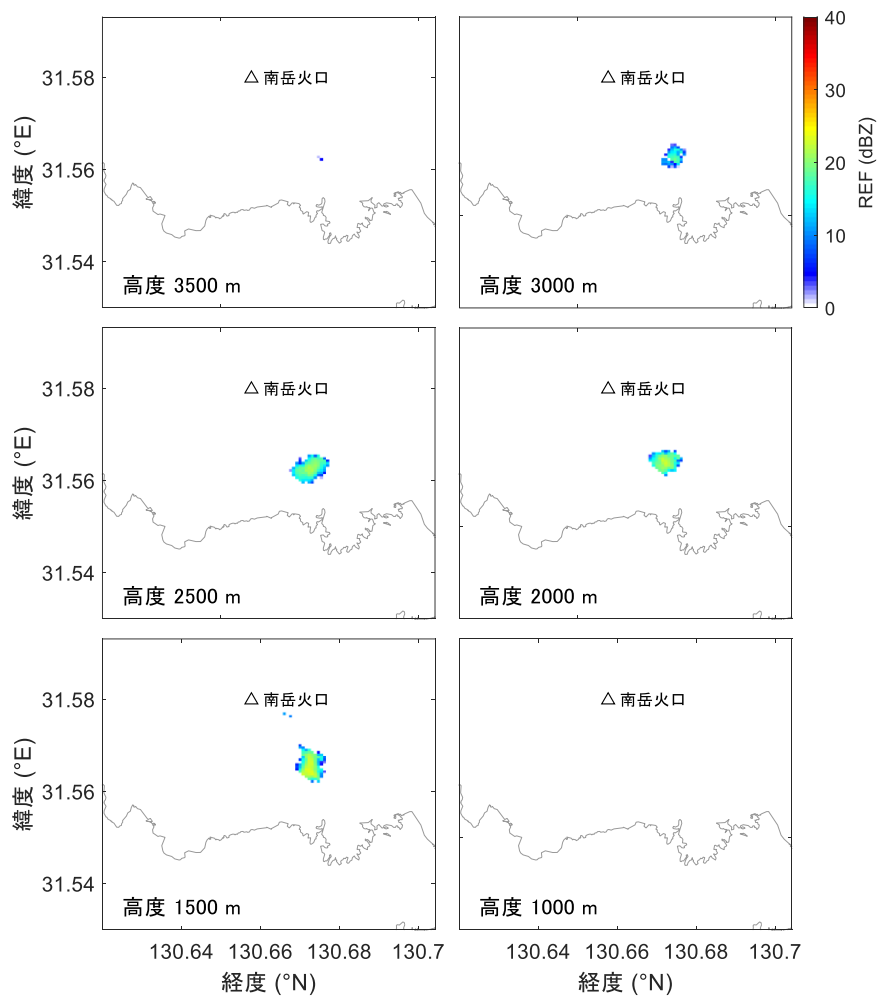


図 4-17. Ku-RAD を用いた三次元 CAPPI 作成結果.

図 4-18 にレーダエコーの時間内挿の例を示す. 2013 年 8 月 18 日の桜島噴火の事例で, 仰角  $7.5^\circ$  の PPI 観測結果に対して, 30 秒間隔の時間内挿を行った.

時間補間したレーダデータは, 鉛直方向についてはまだ粗いままなので, 噴煙の構

造を表現するために仰角も補間する。任意の時刻  $t_i$  における観測したエコーと時間内挿したエコーを用いて、図 3-9(c)に示すように、仰角  $\theta_j$  と  $\theta_j$  の間で補間する。図 4-19 にレーダエコーを仰角内挿した例を示す。ここでは、図 4-18 と同じ事例で時刻 16:39 に観測された PPI エコーに、仰角を  $0.1^\circ$  間隔で内挿した結果を示す。この結果から、内挿されたエコーが観測されたエコーと滑らかに繋がっていることが確認できる。

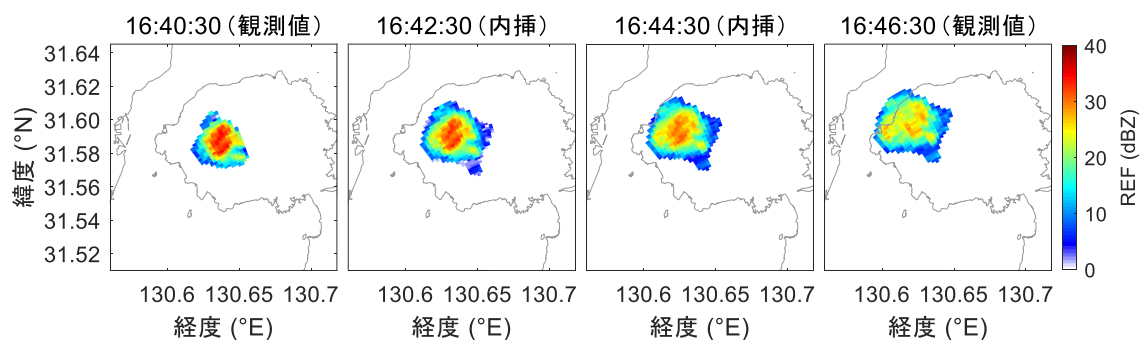


図 4-18. PPI 画像を 30 秒間隔で補間した例。2013-08-18 桜島噴火事例

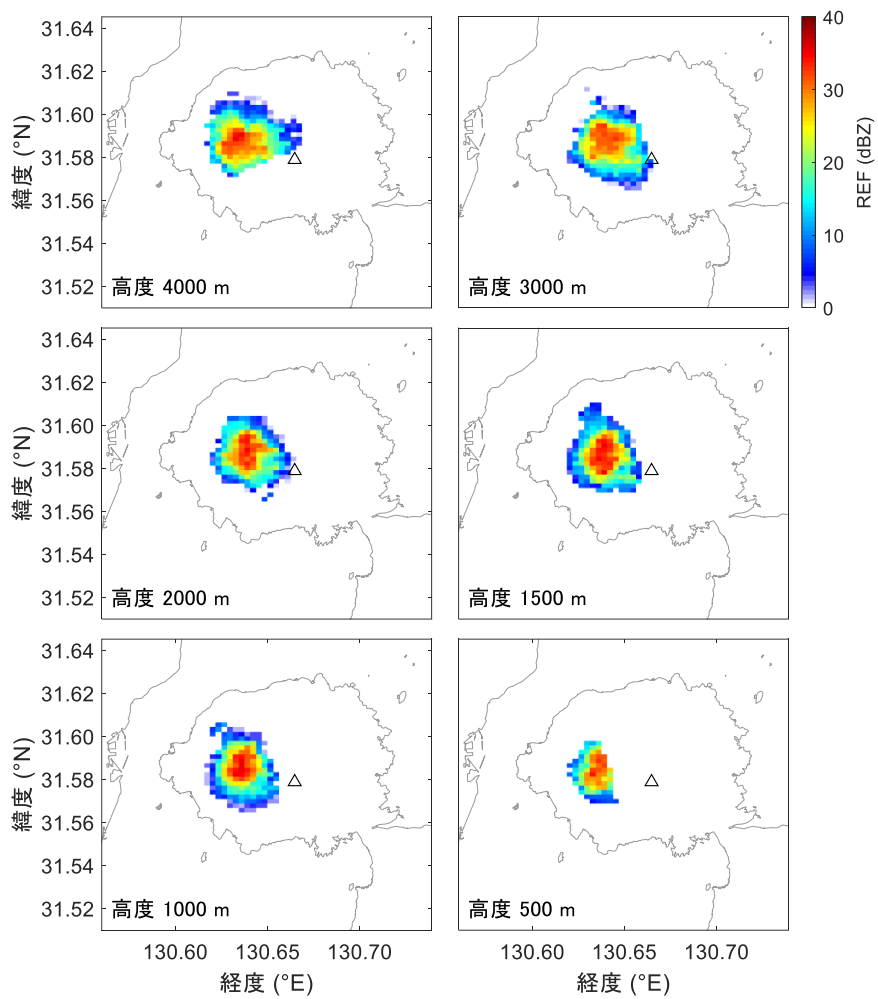


図 4-19. 高度 500~4,000 m の CAPPI 画像. 2013-08-18 16:40JST の桜島噴火事例

## 5. 考察

### 5.1. データの品質管理

ノイズ除去フィルタを適用することで、観測データに含まれる噴煙のエコーの特徴を維持しつつノイズを除去できることが確認できた。X-MP の観測結果に対するレンジサイドローブの除去も効果的に機能している。ただし、現状はレンジサイドローブの有無を目視で判断してフィルタを適用する必要がある。観測に応じてリアルタイムで自動除去するためには、レンジサイドローブの検知機能が必要になる。レンジサイドローブには、ビームに沿って火口を中心に線上にエコーが現れるといった形状の特徴があるので、これを手掛かりにすることで検知可能と考えている。X-MRN の RHI 観測結果からは、地形マスクを用いて地形エコーを取り除くことができた。ここで提案した手法は数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) などの地形情報を別途必要としないので、どのような地域でも適用可能である。Ku-RAD のスパイラル観測結果に対するノイズフロアの除去も適切に機能しており、対象物のエコーのみを取り出すことができた。

## 5.2. 噴煙の高度と成長速度

Ku-RAD による噴火検知結果から、晴天時であれば高い精度で噴火を検知できることがわかった。夜間や薄雲の中など可視観測が困難な状況では、レーダによる噴火検知が助けになると考えられる。しかし、雨天時の誤検知を抑えるのは難しい。図 4-6 では降雨時にドップラ速度に特徴的な変化が表れているので、これらの情報も活用する余地がある。

図 4-8 に示した通り、船舶レーダを用いた RHI 観測により噴煙柱の高度を高い時間分解能で推定できた。噴火直後に見られる高速な高度変化は、火砕物の噴出によるものと推測される。その後、浮力によって噴煙柱の高度が上がっていく様子が連続的に捉えられている。また、図 4-10 で示した通り、雨天や曇天など可視観測が困難な場合でも、船舶レーダによる推定値を得ることができた。船舶レーダの方位角は固定されているので、噴煙柱の最大高度が得られるのは、噴煙柱の頂点がビーム幅の範囲内にある場合に限定される。しかし、移流によって噴煙柱が観測範囲から外れてしまい、実際の最大高度が得られない場合でも、最低到達高度は得ることができる。これは、他の手法で観測が困難な場合に有用な情報となるだろう。

ケース 105 では、最初の噴火から約 150 秒後に火口付近でエコーが観測されており、2 回目の噴火が起こったことが推察される。同時に、火口上約 1,000 m にあるエコー強度が強くなっており、成長速度も増加している。これは、噴煙と雲の凝集によるものと推測される。噴煙の凝集モデルは (Herzog, Graf, Textor, & Oberhuber, 1998), (Costa, Folch, & Macedonio, 2010), (Folch, Costa, Durant, & Macedonio, 2010) によって提案されている。これらのモデルと船舶レーダの観測結果との比較評価は今後の課題である。

図 4-11 に示した XRAIN と船舶レーダの推定結果からは、両者がよく一致していることがわかる。ケース 077 と 099 (図 4-11 で赤点) では、JMA の観測結果と乖離が見られるが、XRAIN と船舶レーダは同等の結果を示している。いずれのケースも深夜 (それぞれ日本時間の 01:19, 01:55) に発生した噴火であり、可視観測では明瞭な観測が難しかったことが予想される。また、図 4-8(a)には異常な点も見られないことから、JMA の観測結果に誤差があると判断し、回帰計算から除外した。

JMA との比較では、噴煙柱の高度を過小評価する傾向が見られた。過小評価の原因

の一つに、ノイズ除去の過程で噴煙柱上端の弱いエコーが除去されてしまった可能性がある。解決策として、レーダの感度を上げる方法が考えられる。表 2-1 に示したように、本研究で用いた船舶レーダのパルス幅は、80 から 1,200 ナノ秒の範囲から選択可能であり、ここでは最も短い 80 ナノ秒で観測を行った。パルス幅を長くするとレンジ分解能は低くなるが、感度を上げることができる。可視観測では噴煙柱の形状や移流報告によって高度を見誤る可能性もあるので、今後は JMA の観測報との比較だけでなく、複数の監視カメラ画像を用いた比較検証が必要である。本研究で用いた船舶レーダの観測結果は DN 値であったが、2021 年から観測を開始した固体素子の船舶レーダからは電力値が得られており、より定量的な評価が可能となっている。

### 5.3. 噴煙の移流ベクトル

PPI 観測結果から噴煙の重心位置を識別し、追跡することができた。図 4-12 は噴煙の高度が火口上 5,000 m に達する事例のため、高仰角の PPI まで噴煙のエコーが観測されている。得られた移流ベクトルの応用例として、風の鉛直分布を推定する。式 5-1 を用いて移流ベクトルをスラントレンジー方位角の座標系（レーダスキャン面）から直角座標系（X-Y 面）に変換することによって、東西風、南北風を得ることができる。レーダエコーの動きから風に関する情報を得ることができれば、降灰モデルの精度向上に役立つ。

$$\begin{aligned}v_x &= v_r \cos \theta \sin \phi + r \cos \theta v_\phi \cos \phi \\v_y &= v_r \cos \theta \cos \phi - r \cos \theta v_\phi \sin \phi\end{aligned}\tag{式 5-1}$$

低仰角では  $\cos \theta \approx 1$  となるので、式 5-1 式は以下のようなになる。

$$\begin{aligned}v_x &= v_r \sin \phi + r v_\phi \cos \phi \\v_y &= v_r \cos \phi - r v_\phi \sin \phi\end{aligned}\tag{式 5-2}$$

図 4-12 で求めた移流ベクトルを利用して、風の鉛直プロファイルを推定した結果を図 5-1 に示す。黒線は重心追跡法によって推定した風の鉛直プロファイル、青点線は気象庁の毎時大気解析 GPV (Grid Point Value) を示している。全体的な傾向はよく一致している。

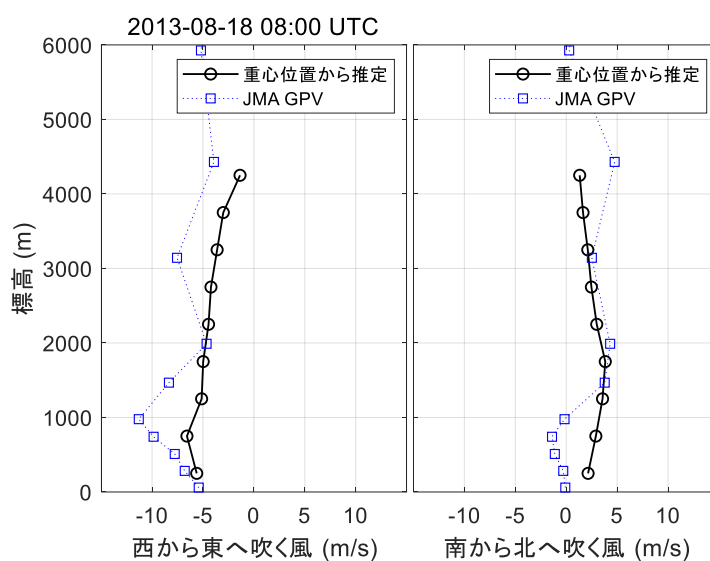


図 5-1. 2013 年 8 月 18 日の噴火における風の高度分布.

パターンマッチング法を利用した場合も、移流ベクトルを推定することができ、さらに移流ベクトルを仰角と時刻の関数として表すことができた。関数化することによって、外れ値に左右されることなく、任意の仰角、時刻における移流ベクトルを安定して得られるようになる。



## 5.4. 噴煙の内部構造

X-MRN 及び Ka-DOP の観測結果から、噴煙の鉛直断面の内部構造を得ることができた。図 4-9 で示した X-MRN の観測結果では噴煙が凝集する様子が捉えられており、降雨時における噴煙の振る舞いを理解する上で有用な情報が得られた。Ka-DOP では噴煙内部におけるドップラ速度の分布も得られており、水平移流速度と組み合わせれば火砕物の上昇／下降速度が求められるだろう。

Ku-RAD 及び X-MP の観測結果からは、三次元 CAPPI を作成することができた。前項で得た風向・風速と CAPPI または三次元 CAPPI データを組み合わせることによって、降灰量の予測に应用することができる。(真木, 鈴木, 井口, Shakti, 2019) は反射因子を降灰量に換算する式を提案している。降灰量の時間変化をモデル化する際には、観測結果から換算した降灰量の時間差分を用いる方法や、降水量のノウキャスト手法の一つである鉛直積算雨量 (VIL: Vertically Integrated Liquid) を用いたアルゴリズム (HIRANO & MAKI, 2018) を降灰量に応用した VIA (Vertically Integrated Volcanic Ash) 法などが考えられる。図 5-2 に VIA を用いた降灰ノウキャストの例を示す。

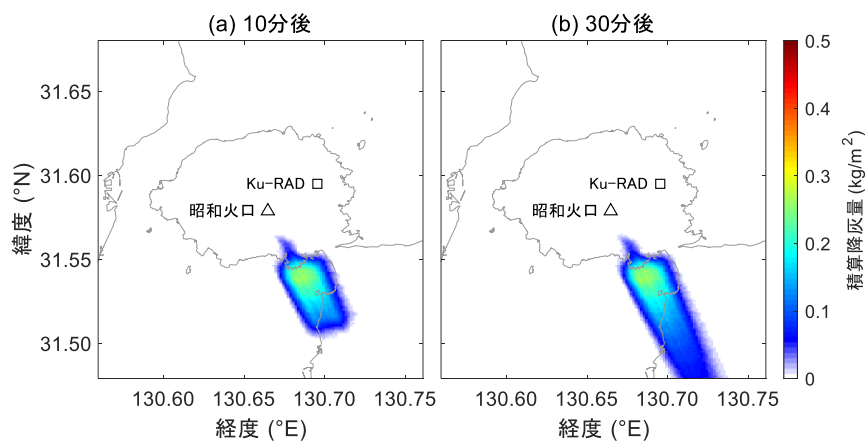


図 5-2. VIA 法による降灰ノウキャストの例。(a), (b)は、それぞれ噴火から 10 分後、30 分後までの積算降灰量を表す。

## 5.5. 桜島の噴煙観測システム

ここまで、主に個々のレーダの観測手法について述べてきたが、複数のレーダを組み合わせることによって新たな噴煙パラメータが導かれることもある。例えば、PPI 観測から求めた水平移流速度と RHI 観測で得たドップラ速度を組み合わせることで、火砕物の鉛直速度を求めることができる。また、同一対象を複数のレーダで観測し、互いに比較することによって、観測結果の妥当性を確認したり、欠測箇所を補ったりすることも可能となるだろう。そこで、本研究で明らかになった各レーダの可能性を考慮し、複数のレーダを用いて桜島の噴煙観測を効果的に行う方法を提案する。

2014 年から 2021 年までの JMA の火山観測報を調べると、噴煙の風向が記録されたケースが 3,399 件存在した。風向の内訳を図 5-3 に示す。図中、カッコ内の数値は各風向が記録された件数を表している。風向の分布は一様ではなく、南東方向に大きな偏りがあることがわかる。以上を鑑みて、図 5-4 に示すレーダ配置を提案する。火口南東に X-MRN を設置し、火口に向けて RHI 観測を行えば、噴煙の最大高度を捉えられる可能性が高い。ここに Ka-DOP も配置すれば、噴煙のドップラ速度を真下から観測し、火砕物の降下速度を得る機会が増える。火口を複数の方向から RHI 観測できるよう、さらに 2 台の X-MRN を、地形を考慮しながら均等に配置する。噴煙全体の立体構造取得と降灰量の観測のため、Ku-RAD を火口東側と鹿児島市市街地方面に配置する。降灰量を正確に予測するためには地表付近の観測値が必要になる。また、ここで提案した Ku-RAD の配置では噴煙が真上を通る機会は少ないと考えられるので、Ku-RAD のスパイラルスキャンの仰角は  $5^{\circ}$  から  $70^{\circ}$  程度とする。

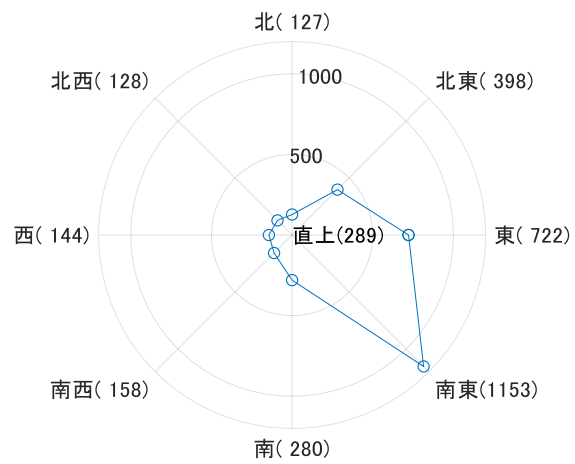


図 5-3. 2014 年から 2021 までの火山観測報に記録された風向の件数。カッコ内の数字は各風向が記録された件数を表す。

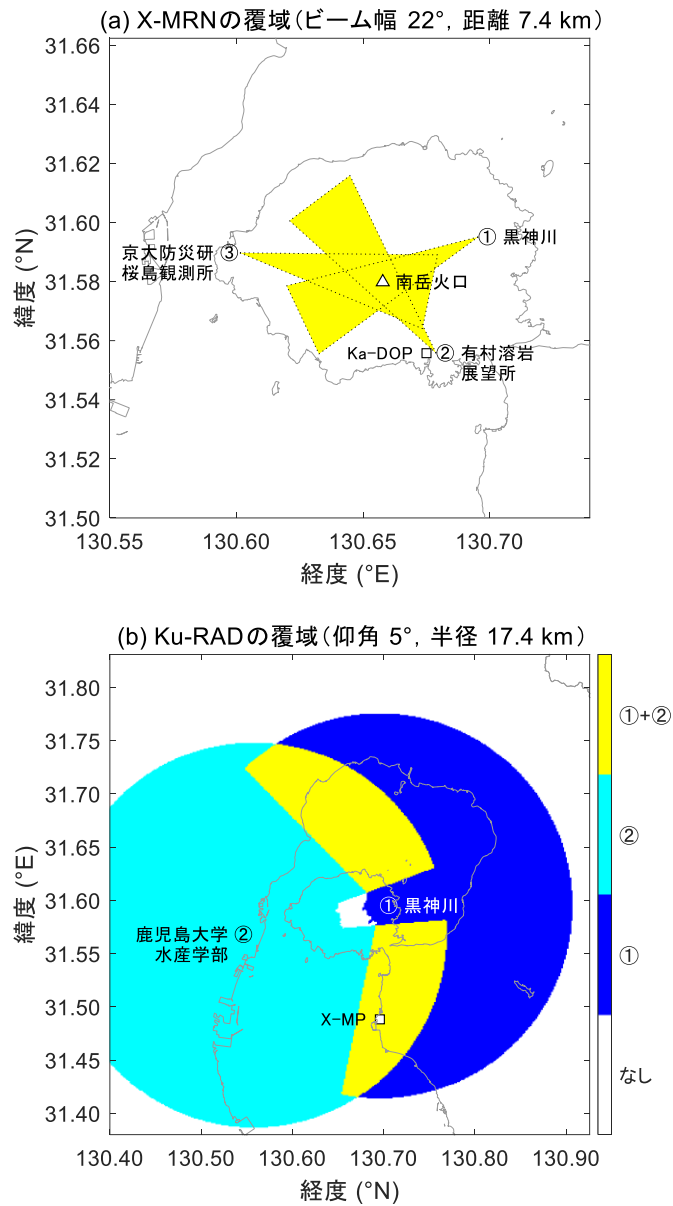


図 5-4. 桜島の噴煙観測システムの提案.

(a) 3 台の X-MRN①～③と Ka-DOP の配置案. 黄色は X-MRN の観測範囲を表す. (b) 2 台の Ku-RAD①～②の配置案. 仰角 5° の観測範囲を, 地形による遮蔽を考慮して色分けした.

## 6. 結論

序論で定義した3つの目的について評価する。

### ① 可視条件に依存しない観測

いずれのレーダも昼夜や日照条件によらず噴煙を観測することができた。雲に遮られて可視観測が困難な状況においてもレーダでは観測結果が得られるケースが見られた。晴天時における Ku-RAD の噴火検知は信頼性が高いことが確認できた。可視観測による見落としの防止など、従来の観測方法を補強することが可能といえる。一方、降雨時の観測では雨の影響が強く、噴煙を識別するのが難しいケースが多かった。

### ② 定量的な観測

噴火検知と成長速度の観測では、時間分解能の高い X-MRN が優れている。ただし、本研究で用いた X-MRN の観測値は DN 値であるため、電力値への変換は難しい。X-MRN に次いで時間分解能の高い Ka-DOP のセクタ RHI 観測では、反射因子に加えてドップラ速度も取得できる。これらのパラメータは Ku-RAD でも観測できる。X-MP では、時間空間の分解能は低いが反射因子差や偏波間相関係数といった偏波パラメータも取得できる。これらのパラメータから噴煙と雨粒が凝集した際の特徴を得られれば、噴火検知などへの応用も期待できる。

### ③ 内部構造の観測

いずれのレーダも噴煙の内部を観測することができた。気象のレーダ観測では、強い降雨による減衰によって観測が遮られる場合があるが、本研究で観測した噴煙では、このような遮蔽は発生せず、噴煙の内部を透過的に観測することができた。Ku-RAD の観測結果から作成した三次元 CAPPI により、高い空間分解能で噴煙の立体構造を捉えることができた。X-MP についても、観測結果を時間内挿、空間内挿することによって分解能の低さを補

い、三次元 CAPPI を作成することができた。

## 今後の課題

X-MRN の観測結果は DN 値のみであったが、鹿児島大学で観測を始めている固体素子 X バンド船舶レーダでは、レーダ反射強度やドップラ速度が得られる。また、レーダ反射強度から降灰量を推定する経験式や理論式の研究も進められており、これらを組み合わせることで、噴煙の状態量を高い時間分解能で定量的に求めることが可能となるだろう。Ku-RAD については現在も鹿児島大学で観測が行われており、観測結果から積算降灰量を求めてリアルタイムで Web 配信する環境（気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォーム）も整備されつつある。今後、降灰ナウキャストへの発展も期待される。

考察では桜島の噴煙観測システムについて提案した。このようなシステムは機能面での要件を満足することも重要であるが、実際の運用を想定した検討も忘れてはならない。システムの充実に伴い多くの観測データが得られると同時に、これら进行处理する負担も増大する。市民生活に影響を及ぼすような災害が発生した場合は、迅速かつ正確な解析が求められる。このためには、処理の自動化やマニュアルの整備を進める必要がある。気象レーダ噴煙モニタリングプラットフォームを活用し、一定規模の噴火が発生したことを想定して解析訓練を計画し実施するのも有効であろう。

## 謝辞

本研究では、国土交通省が提供する XRAIN データを利用しました。このデータセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム (DIAS) の下で、収集・提供されたものです。Ka-DOP の観測データは国立研究法人防災科学技術研究所様から、毎時大気解析 GPV は気象庁鹿児島地方気象台様からご提供いただきました。X-MRN の観測では株式会社光電製作所様にご協力いただきました。また、Ku-RAD の観測では NPO 法人雷嵐様にご協力いただきました。

本論文は多くの先生方のご指導の下で完成しました。福島誠治教授には論文の内容はもちろんのこと、進捗についても常に気にかけていただきました。先生の叱咤激励がなければ、本論文は永遠に執筆中であったことでしょう。西川健二郎教授、重井徳貴教授からはゼミなどで的確なご指導をいただきました。深く感謝いたします。研究の内容や進め方に関しては、京都大学防災研究所の眞木雅之先生に多大なご指導を賜りました。深く感謝いたします。また、仕事を通して私に研究の魅力を伝え、研究の世界に導いてくださった故加藤敦様に心から感謝いたします。

最後に、最愛の妻・奈津と娘・多恵に、いつもありがとう。

## 参考文献

- Casadevall, T. (1994). The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1-4), 301-316.
- Costa, A., Folch, A., & Macedonio, G. (2010). A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: 1. Theoretical formulation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(9), 1-14.
- Folch, A., Costa, A., Durant, A., & Macedonio, G. (2010). A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: 2. Model application. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(9).
- Hasegawa, Y., Sugai, A., Hayashi, Y., Hayashi, Y., Saito, S., & Shimbori, T. (2015). Improvements of volcanic ash fall forecasts issued by the Japan Meteorological Agency. *Journal of Applied Volcanology*, 4(1), 1-12.
- Herzog, M., Graf, H., Textor, C., & Oberhuber, J. (1998). The effect of phase changes of water on the development of volcanic plumes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87(1-4), 55-74.
- HIRANO, K., & MAKI, M. (2018). Imminent Nowcasting for Severe Rainfall Using Vertically Integrated Liquid Water Content Derived from X-Band Polarimetric Radar. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 96A(0), 201-220.
- Hort, M., & Scharff, L. (2016). Volcanic Ash. In *Detection of airborne volcanic ash using radar* (pp. 131-160).
- Maki, M., Takahashi, S., Okada, S., Imai, K., & Yamaguchi, H. (2019). Ku-Band High-Speed Scanning Doppler Radar for Volcanic Eruption Monitoring. *Journal of Disaster Research*, 14(4), 630-640.
- Marzano, F., Picciotti, E., Montopoli, M., & Vulpiani, G. (2013). Inside volcanic clouds: Remote sensing of ash plumes using microwave weather radars. *Bulletin of the American*



- Meteorological Society*, 94(10), 1567-1586.
- MLIT. (2022). Retrieved 7 25, 2022, from MLIT XRAIN intermediated dataset:  
[http://metadata.diasjp.net/dmm/doc/MLIT\\_XRAIN\\_intermediated-DIAS-en.pdf](http://metadata.diasjp.net/dmm/doc/MLIT_XRAIN_intermediated-DIAS-en.pdf)
- Webley, P. (2015). Volcanoes and the aviation industry. In *Global Volcanic Hazards and Risk* (pp. 295-298).
- Wilson, G., Wilson, T., Deligne, N., & Cole, J. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148-182.
- Wilson, T., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G., Johnston, D., Cole, J., . . . Barnard, S. (2012). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth*, 45-46, 5-23.
- 下鶴大輔, 荒牧重雄, 井田喜明, 中田節也. (2008). 火山の事典 (第2版). 朝倉書店.
- 真木雅之, 小堀壮彦, 西隆昭, 藤吉康志, 徳島秀彦, 佐藤英一, . . . 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(63), 136-148.
- 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. 火山, 64(4), 219-241.

# 付録

表 付録-1. X-MRN 観測結果一覧

ケース 番号	噴火時刻 (JST)	噴煙柱の火口上最大高度 (m)			判定*
		X-MRN	JMA	X-MP	
001	2019/06/11 14:31	3,900	2,200	3,963	B
002	2019/06/11 15:01	1,275	1,400	1,164	A
003	2019/06/24 11:27	1,080	1,600	1,817	B
004	2019/06/24 12:58	-	1,300	233	B
005	2019/07/19 03:56	-	600	374	B
006	2019/07/22 09:47	1,532	>1,500	-	C
007	2019/07/24 13:09	1,743	1,500	1,866	C
008	2019/07/27 05:50	1,634	2,000	2,048	B
009	2019/07/27 06:58	814	1,100	730	A
010	2019/07/28 17:25	3,416	3,800	3,821	B
011	2019/07/28 17:54	2,167	3,500	3,417	B
012	2019/09/17 12:34	1,178	1,600	1,130	A
013	2019/09/17 13:27	758	1,300	1,099	A
014	2019/09/18 02:07	971	1,800	949	B
015	2019/09/18 04:35	1,764	>600	1,833	A
016	2019/09/18 06:15	1,412	1,300	1,163	A
017	2019/09/18 07:55	1,718	1,700	1,371	A
018	2019/09/18 09:46	1,972	1,800	2,310	C
019	2019/09/18 10:48	2,554	2,600	3,010	B
020	2019/09/18 11:31	1,958	2,300	2,035	A
021	2019/09/18 12:35	1,655	1,800	1,774	A
022	2019/09/18 14:27	1,748	2,000	1,970	A
023	2019/09/18 15:09	1,826	>1,600	2,152	C
024	2019/09/18 15:57	1,690	>1,200	1,732	A
025	2019/09/23 13:02	925	1,000	753	C
026	2019/10/07 14:01	784	>600	942	B
027	2019/10/10 02:48	1,854	2,700	2,211	A
028	2019/10/13 07:40	1,898	2,100	1,972	B
029	2019/10/13 09:42	362	1,200	464	C

ケース 番号	噴火時刻 (JST)	噴煙柱の火口上最大高度 (m)			判定*
		X-MRN	JMA	X-MP	
030	2019/10/13 12:00	830	1,200	804	A
031	2019/10/13 13:19	-	1,300	758	C
032	2019/10/13 17:29	1,150	>700	1,128	A
033	2019/10/13 21:00	1,826	>300	1,695	B
034	2019/10/14 09:32	1,565	2,100	1,895	A
035	2019/10/14 09:41	1,053	1,200	1,069	B
036	2019/10/14 14:29	1,298	1,600	1,371	A
037	2019/10/14 17:26	1,558	2,100	1,714	A
038	2019/10/16 05:46	2,633	>1,500	2,602	A
039	2019/10/16 12:55	2,438	2,600	2,563	A
040	2019/10/17 08:38	-	1,200	-	C
041	2019/10/18 20:29	548	>1,400	1,329	B
042	2019/10/19 10:29	2,742	>500	3,356	B
043	2019/10/20 00:42	1,539	>1,200	1,501	A
044	2019/10/20 04:56	1,393	>1,500	1,490	A
045	2019/10/22 02:32	2,091	2,200	2,295	A
046	2019/10/22 10:47	934	1,200	186	C
047	2019/10/23 04:04	1,460	2,800	2,393	B
048	2019/10/23 07:56	1,460	2,300	2,234	B
049	2019/10/24 18:27	2,139	2,500	1,851	A
050	2019/10/28 19:51	-	1,000	-	C
051	2019/10/30 07:09	-	1,000	-	C
052	2019/10/30 09:08	622	1,200	662	A
053	2019/10/30 14:02	253	1,300	869	C
054	2019/10/30 15:27	1,808	2,800	2,235	B
055	2019/10/30 22:03	726	1,400	966	A
056	2019/10/31 02:09	677	1,600	1,049	A
057	2019/10/31 02:46	-	700	-	C
058	2019/11/02 07:19	1,053	2,000	1,532	A
059	2019/11/02 08:46	-	1,000	847	C
060	2019/11/02 17:11	1,444	1,800	1,274	C
061	2019/11/02 17:51	1,539	>1,500	1,440	A
062	2019/11/02 18:28	1,968	>800	2,007	A
063	2019/11/02 20:34	1,064	1,500	1,218	A
064	2019/11/02 21:38	-	1,300	850	A

ケース 番号	噴火時刻 (JST)	噴煙柱の火口上最大高度 (m)			判定*
		X-MRN	JMA	X-MP	
065	2019/11/02 21:55	-	1,500	1,158	A
066	2019/11/02 22:55	297	1,500	1,165	C
067	2019/11/02 23:25	-	1,200	781	C
068	2019/11/03 01:46	1,085	1,600	1,397	A
069	2019/11/06 00:11	1,819	1,800	1,901	B
070	2019/11/06 01:41	1,606	2,000	1,811	A
071	2019/11/06 07:02	246	1,400	1,017	C
072	2019/11/06 07:48	557	1,700	1,098	A
073	2019/11/06 08:20	-	1,200	-	C
074	2019/11/06 16:24	-	1,200	1,099	A
075	2019/11/06 21:39	2,079	2,500	2,156	B
076	2019/11/06 23:00	2,299	2,400	2,172	A
077	2019/11/07 01:19	2,570	2,000	2,906	A
078	2019/11/07 02:36	2,906	2,600	2,692	B
079	2019/11/07 10:01	-	2,300	-	C
080	2019/11/07 11:50	-	1,500	1,021	C
081	2019/11/07 15:57	3,664	>3,800	1,939	C
082	2019/11/07 16:15	2,387	3,500	1,939	C
083	2019/11/08 17:24	4,020	5,500	4,124	B
084	2019/11/12 20:20	2,837	3,300	3,015	A
085	2019/11/12 21:10	1,145	1,500	1,077	A
086	2019/11/12 21:59	-	1,100	-	C
087	2019/11/13 02:00	-	3,600	1,938	C
088	2019/11/13 07:52	105	700	-	C
089	2019/11/13 09:01	-	400	21	C
090	2019/11/13 14:11	1,259	600	1,012	B
091	2019/11/13 15:41	-	900	-	C
092	2019/11/13 19:22	-	500	-	C
093	2019/11/15 14:28	728	1,500	989	C
094	2019/11/15 15:30	-	1,000	-	C
095	2019/11/21 17:45	1,419	2,700	2,029	C
096	2019/11/26 14:24	3,101	2,600	3,209	B
097	2019/11/28 11:04	2,021	2,400	-	C
098	2019/11/30 11:59	1,521	2,300	1,508	A
099	2019/12/01 01:55	2,894	1,800	2,912	A

ケース 番号	噴火時刻 (JST)	噴煙柱の火口上最大高度 (m)			判定*
		X-MRN	JMA	X-MP	
100	2019/12/01 03:01	2,174	1,500	1,931	C
101	2019/12/02 04:40	1,412	>1,400	-	C
102	2019/12/02 06:22	2,575	1,500	2,793	B
103	2019/12/07 13:31	-	1,500	-	C
104	2019/12/09 14:08	953	>500	1,637	B
105	2019/12/10 01:15	1,840	3,000	2,702	C
106	2019/12/10 08:35	2,392	2,100	2,306	A
107	2019/12/10 09:01	-	1,200	148	C
108	2019/12/10 09:27	902	1,500	1,021	A
109	2019/12/10 09:45	295	1,200	-	C
110	2019/12/10 19:29	1,537	2,500	1,870	A
111	2019/12/11 05:28	1,263	1,300	1,248	B
112	2019/12/11 14:18	-	2,800	-	C
113	2019/12/13 07:48	-	1,100	687	C
114	2019/12/13 09:35	304	1,300	1,137	A
115	2019/12/15 02:25	1,548	2,400	1,541	A
116	2019/12/15 17:45	944	1,000	1,048	A
117	2019/12/17 01:45	314	1,600	1,967	B
118	2019/12/17 08:18	33	800	275	C
119	2019/12/17 09:31	2,848	>2,000	-	C
120	2019/12/17 18:08	856	>1,300	1,623	B
121	2019/12/17 19:41	2,709	>1,500	2,959	B
122	2019/12/18 07:08	413	>1,000	790	B
123	2019/12/19 18:15	2,535	>800	-	C
124	2019/12/21 10:10	1,965	>400	-	C
125	2019/12/21 10:35	2,426	>1,200	-	C
126	2019/12/21 11:05	629	>1,200	1,307	C
127	2019/12/21 11:23	-	>1,100	1,351	C

\* A: 最大高度観測可; B: 最大高度観測不可; C: 不明