

(添付資料2)

X バンド船舶レーダを用いた桜島の噴煙高度の推定

Estimation of volcanic column heights using X-band marine radar at Sakurajima volcano

小堀壮彦⁽¹⁾ ・ 真木雅之⁽¹⁾ ・ 徳島秀彦⁽²⁾ ・ 福島 誠治⁽¹⁾

Takehiko KOBORI⁽¹⁾, Masayuki MAKI⁽¹⁾, Hidehiko TOKUSHIMA⁽²⁾ and Seiji FUKUSHIMA⁽¹⁾

(1) 鹿児島大学

(2) FRS コーポレーション

(1) Kagoshima University, Japan

(2) FRS Corporation, Japan

概要

船舶用のレーダを用いて火山噴煙の高度及び上昇速度を推定する手法を開発した。本手法を鹿児島県桜島の噴火事例に適用した結果、噴煙の高度を 1.25 秒間隔で推定することができた。得られた推定結果は気象レーダによる観測結果と整合しており、手法の妥当性が確認できた。さらに、噴煙高度の推定結果から噴煙の上昇速度を推定した。

キーワード: X バンドレーダ, 船舶レーダ, 桜島, 噴煙高度, 噴煙上昇速度

Keywords: X-band radar, marine radar, Sakurajima, volcanic column height, volcanic column vertical velocity

1. はじめに

火山の噴火によって立ち昇る噴煙とそれに伴う降灰は、航空機の飛行安全や周辺住民の生活に深刻な影響を及ぼす恐れがある。このため、噴煙を観測して各種の特性を把握することは防災上重要である。特に噴煙が到達する最大高度は噴火の規模を測る指標となるほか、その後の降灰分布を予測する数値モデルの初期値にも利用される重要な特性である。

現在、噴煙の観測には主に監視カメラが用いられているが、夜間や雲の存在など視界条件によっては噴煙の全体像を捉えることが難しい。このような問題を克服するため、近年は気象レーダを用いた噴煙観測が注目されている。しかし、通常の気象レーダは雨の水平分布を得ることを主眼に Plan Position Indicator (PPI) スキャンを行っているため、噴煙の高度を得るには時間分解能及び空間分解能が不足している。

我々は、船舶用のレーダを利用して火口付近を Range Height Indicator (RHI) スキャンすることにより、噴煙の鉛直断面画像を高頻度で取得する観測方法を研究している。この観測方法は、監視カメラを用いた既存の観測方法のように可視条件の制約を受けにくく、また気象レーダを用いた PPI スキャンによる観測と比較して高度方向の分解能が高い。

本研究では、船舶用レーダで取得した観測画像に対して画像処理を施し、噴煙高度の時系列データと最大高度、噴煙の上昇速度を推定する手法を開発した。また、開発した手法の妥当性を確認するため、気象庁の火山観測報、国交省の気象レーダを用いた場合の噴煙高度推定結果との比較を行った。

2. 手法

2.1 船舶レーダを用いた観測

桜島の南岳火口から立ち上る噴煙を観測するため、光電製作所製の船舶用レーダ MDC2920（表 1）を、京都大学防災研究所の黒神観測点（北緯 31.583469°，東経 130.70133°）に設置した（図 1）。通常、船舶レーダは水平面を操作することによって船舶や障害物を観測するが、ここではアンテナの回転軸を 90° 倒し、さらに、アンテナの回転面を火口の方位（264.45°）に向けることによって、噴煙の鉛直断面を観測した。船舶レーダの観測結果は 0 から 255 の整数の輝度値を持つグレースケールの画像として得た。画像は正方形で、1 辺の長さや画素数は事例によって (A) 3 NM, 640 pixel; (B) 2 NM, 640 pixel; (C) 2 NM, 1.024 pixel; (D) 4 NM, 1280 pixel の 4 種類に分かれる。

表 1 RADAR Specification

製品名	光電製作所製 MDC2920
指示機 型名	MRD-105
周波数バンド	X バンド 9410 MHz $\pm$ 30 MHz
アンテナ 型名	RW701A-06
長さ	197 cm
水平ビーム幅	1.2°
垂直ビーム幅	22°
距離分解能	12 m
アンテナ偏波	水平
スキャナ 型名	RB719A
タイプ	Up-mast
回転数	48 rpm
送信出力	25 kw
防水	IPX6

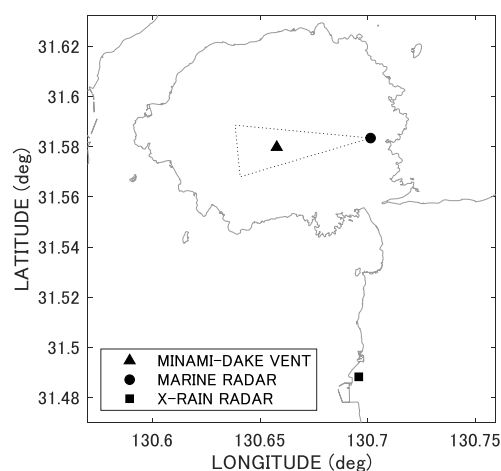


図 1 火口とレーダの位置関係。点線は船舶レーダで観測した方位 264.45 $\pm$ 11°の範囲を示している。X-RAIN RADAR は垂水に設置されている国土交通省の X-MP レーダ。

2.2 事例の選定

船舶レーダが観測する方位角は火口に向けて固定されているため、風によって噴煙の頂が火口から離れてしまうと、その高度を推定できない。そこで、国土交通省の X-MP 気象レーダで観測された噴煙の PPI データから、事例を通して噴煙が最も高く昇った水平位置を推定し、船舶レーダが噴煙全体の最大高度を捉えているケースを選定した（図 2）。なお、噴煙よりも上空で雨粒が観測されているケースについては、海拔 3,000m を閾値として PPI データから除去した。また、全体が雨で見えないケースは適用外とした。

2018 年 4～5 月の 2 ヶ月間に観測された 57 件の主要噴火事例から、上の基準に沿って 23 事例を選定した。

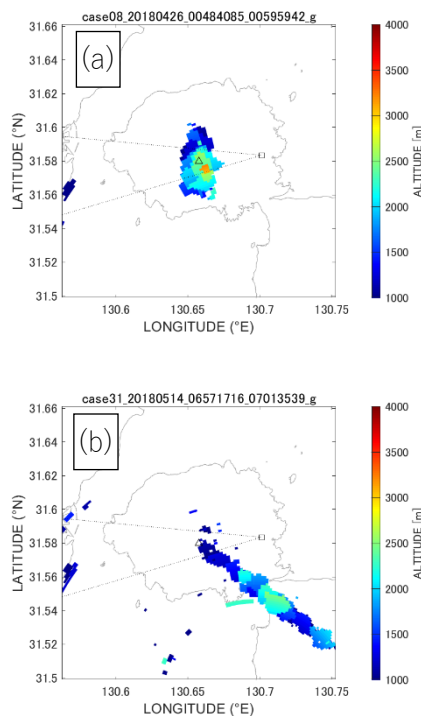


図2 気象レーダを用いた噴煙の水平位置推定.
(a)船舶レーダの観測範囲内で最大高度に到達した例, (b)船舶レーダの観測範囲外で最大高度に到達した例.

2.3 地形マスクの作成

上で得られた観測画像から噴煙のエコーを取り出すために、観測画像から地形等による定在エコーを除去した (図 3(a), (b)). 定在エコーを除去するための地形マスクは、あらかじめ以下の手順で求めた。

事前に取得した平穏時 (晴天かつ噴煙のない状態) の観測画像から、ノイズを除去して地形マスクを作成した。定在エコーと異なりノイズはランダムな位置に発生するので、複数の観測画像を加算平均すると定在エコーの有無によって平均画素値に差異が生じ、両者を閾値で分離できるようになる。ここでは、平穏時に取得した 48 フレームの観測画像から平均画像を作成し、地形から十分に離れた標高 2,000 m 以上の領域 (桜島の標高は約 1,000 m) から、ノイズの平均値 M_N と分散 σ_N を求め、 $M_N + 3\sigma_N$ 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施して残存する「ごま塩ノイズ」を除去し、地形マスクを作成した。

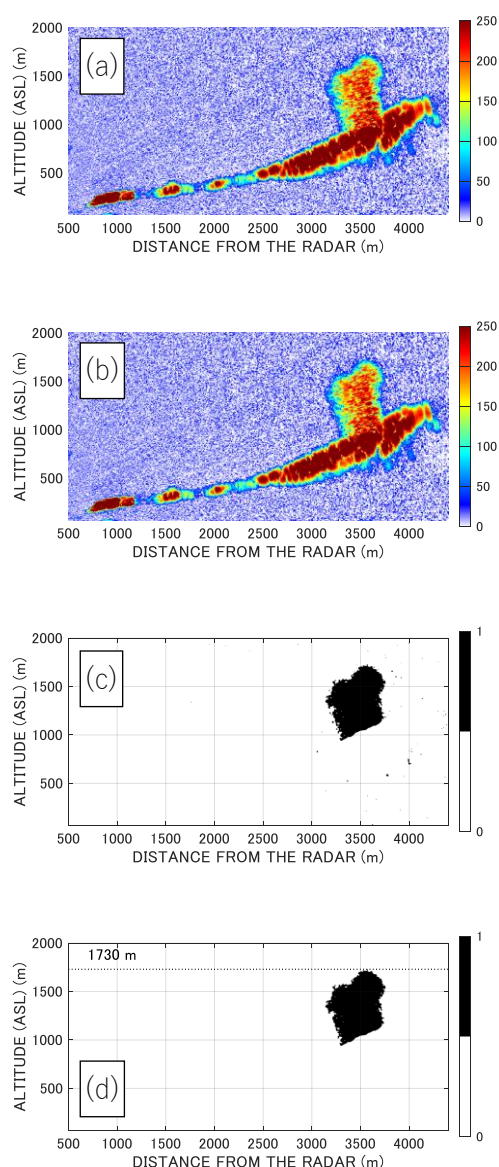


図3 画像処理の手順. (a)オリジナル画像, (b)地形マスク適用後, (c)噴火直前のノイズ特性に基づいて 2 値化し、メディアンフィルタを適用, (d)微小領域を削除して高度を推定.

2.4 観測データからのノイズ除去

降雨等によるエコーを含めてノイズを除去するため、噴火直前の観測データからノイズの平均値 M_0 と分散 σ_0 を求めておき、地形マスク適用後の観測データに対して、 $M_0 + 3\sigma_0$ を閾値として画像を 2 値化した。さらに、メディアンフィルタを施して残存する「ごま塩ノイズ」を除去した (図 3(c)).

2.5 噴煙高度の推定

サイズの小さい孤立したエコーは鳥や虫などによる可能性があるので、上で 2 値化した画像から縦横斜め 8 近傍の連結成分を調べ、この面積が 10,000 m^2 に満たないものは噴煙以外のエコーとみなして除去した。

以上の手順で抽出した噴煙のエコーの上端を調べ、フレーム毎の噴煙高度 h_i を推定した (図 3(d)).

2.6 最大高度の判定

噴煙高度の推定誤差によるばらつきを低減するため、フレーム毎に求めた噴煙高度の時系列データから当該時刻の推定値と前後 5 点の推定値（合計 11 点）で移動平均値を求め、事例の中での最大高度を調べた。また、推定結果のばらつきを見積もるため、フレームごとの噴煙高度推定値と移動平均との差から Root Mean Square (RMS) を求めた。

2.7 噴煙上昇速度の推定

移動平均により平滑化した噴煙高度推定値の時系列データの変化率から噴煙の上昇速度を推定した。ここで、変化率は(a)高度推定値を数値微分する方法と、(b)高度推定値を多項式でモデル化し、この導関数を求める方法の 2 通りで推定した。

3. 結果

噴煙高度及びその上昇速度を推定した結果の例として、単独の噴火による噴煙の上昇から下降までを捉えた事例を図 4 に示す。上段のプロットの水色の点は個々の画像から推定した噴煙高度を表しており、黒い実線は移動平均である。移動平均から推定した噴煙の最大高度は 1,480 m であった。移動平均の残差から求めた Root Mean Square Error (RMSE) は、噴煙が上昇して最大高度に到達するまでの区間（以下、浮力上昇フェーズという）で約 24.0 m、その後降下する区間（以下、降下フェーズという）では 88.0 m であった。下段のプロットは移動平均した噴煙高度を数値微分して得た噴煙の上昇速度である。浮力上昇フェーズ開始時の速度は約 15 m/s であり、その後ほぼ一定のレートで減速していく。

浮力上昇フェーズにおける噴煙高度を二次式でモデル化し、最小二乗法でフィッティングした結果、下式が得られた。決定係数 R^2 は 0.99 であった。

$$h_{MODEL}(t) = -0.062t^2 + 18.403t + 93.976 \quad \text{式 1}$$

上式の導関数を求めることにより噴煙の上昇速度モデルを得た。

$$v_{MODEL}(t) = -0.124t + 18.403 \quad \text{式 2}$$

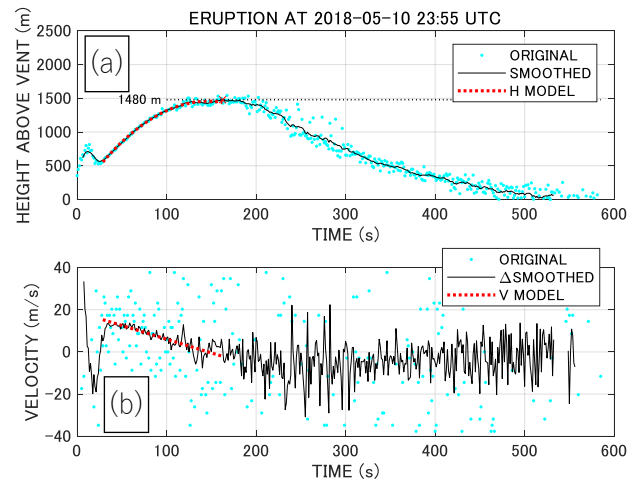


図 4 噴煙の高度と上昇速度の時系列データ。
(上)噴煙高度，(下)上昇速度。

図 4 のように、事例中に 1 回だけ噴火現象が含まれるものは上記事例を含めて 23 事例中 4 事例のみであり、その他の事例には複数の噴火現象が含まれていた。複数の噴火現象が含まれる事例を図 5 に示す。この事例では、噴煙の上昇速度に複数のピークが現れた。噴煙高度の移動平均から求めた最大高度は 1,807 m であった。また、浮力上昇フェーズにおける移動平均との残差の RMS は約 14.4 m、降下フェーズ（この事例では降下フェーズ中に再度噴煙高度が上昇している）は約 19.6 m であった。

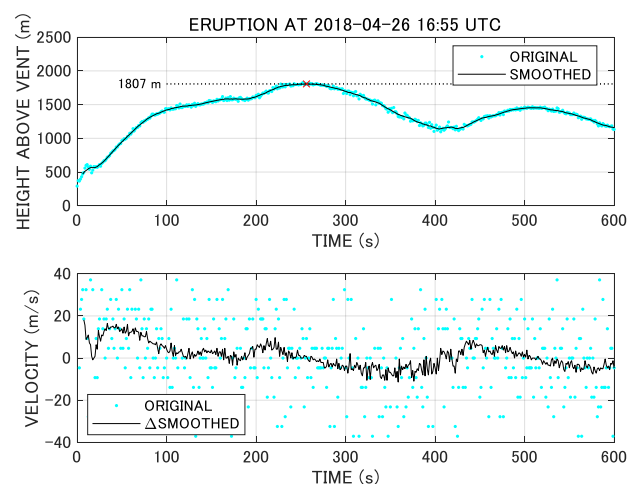


図 5 噴煙の高度と上昇速度の時系列データ。
(上)噴煙高度，(下)上昇速度。

全 23 事例の噴煙高度推定結果を表 2 に示す。また、船舶レーダと観測報，XRAIN の散布図を図 6 に示す。

表 2 噴煙高度推定結果

No.	ERUPTION TIME (UTC)	IMAGE*1	JMA (m)	XRAIN (m)	MARINE (m)	RMSE (m)
1	2018-04-22 02:44	A	1 600	1 451	1 835	19.4
2	2018-04-25 15:48	B	unknown	2 321	2 226	15.9
3	2018-04-26 02:16	B	2 000	2 047	2 125	31.3
4	2018-04-26 16:55	B	200 <*2	1 280	1 807	14.4
5	2018-04-27 22:08	B	2 400	1 889	1 957	15.9
6	2018-04-28 11:15	B	1 700	1 303	1 572	19.3
7	2018-04-28 14:51	B	1 100	1 573	1 260	35.7
8	2018-04-29 02:14	B	1 800	1 520	1 537	22.0
9	2018-04-30 11:35	B	1 500	1 590	1 780	18.8
10	2018-04-30 16:53	B	1 800	1 657	1 732	23.1
11	2018-05-05 05:39	B	1 600	1 816	1 599	30.5
12	2018-05-10 23:55	C	1 900	1 550	1 480	24.0
13	2018-05-11 03:02	B	1 300	1 106	1 062	35.8
14	2018-05-12 02:51	C	2 500	2 053	2 006	19.5
15	2018-05-14 23:08	C	2 500	2 451	2 321	21.3
16	2018-05-15 06:13	C	2 700	2 548	2 317	19.3
17	2018-05-17 01:14	C	1 000 <	1 486	1 718	15.2
18	2018-05-19 15:45	B	800 <*2	1 846	1 824	15.4
19	2018-05-19 17:08	B	1 300	1 777	1 963	13.8
20	2018-05-21 19:45	B	1 500	2 042	2 220	25.8
21	2018-05-22 10:48	D	unknown	2 867	2 615	13.0
22	2018-05-25 10:00	D	3 000 <*2	2 595	2 734	21.0
23	2018-05-28 18:34	D	2 500	3 016	3 101	22.2

*1 A: 640×640(3NM); B: 640x640(2NM); C: 1024x1024(2NM), D: 1280x1280(4NM)

*2 hid into clouds.

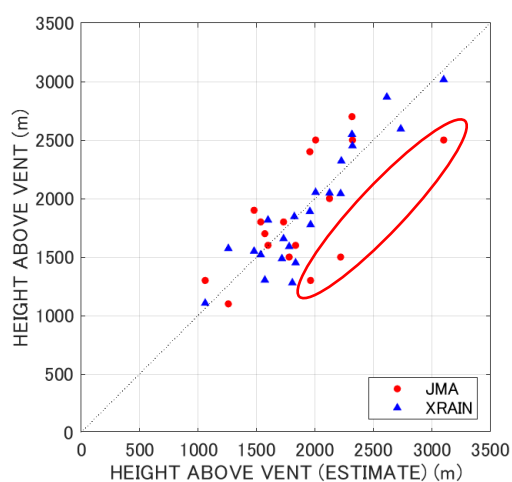


図 6 散布図．赤枠で囲んだ観測報は船舶レーダの推定結果と 500 m 以上の差がある．

4. 考察

図 4(a)では噴火直後に急激な高度の上下が現れており、その変化は火砕物が爆発的に噴出したことによるものと推察される。その後、噴煙が浮力によって高度を上げていく過程も連続的に推定できている。最大高度に到達した後に RMSE が大きくなるのは、噴煙の拡散によってその境界が曖昧になり、高度推定誤差によるばらつきが増大したためと考えられる。図 5 で示した複合噴火の事例においても、噴煙高度の増減が明確に捉えられている。この事例では拡散した噴煙が船舶レーダの観測範囲外に流れ出て行くと同時に、断続的な噴火により密度の高い噴煙が供給されることで、長時間に渡って RMSE が抑えられている。以上のように、本手法で推定した噴煙高度は噴火現象の特徴と一致している。

噴煙高度の推定結果を数値微分し、噴煙の上昇速度を時系列で推定することができた。フレーム毎の噴煙高度推定結果にはランダムな誤差が含まれているので、そのまま差分を計算すると速度が誤差に埋もれてしまうが（図 4 中の水色の点）、移動平均により平滑化した高度推定値を利用することで速度を得ることができた。このような平滑化手法を適用できるのは、目視による遠望観測や気象レーダによる PPI 観測と比較して圧倒的に高い頻度（1.25 秒間隔）で噴煙高度を推定している利点である。推定した上昇速度の増減からは、事例に含まれる複数回の噴火現象を読み取ることができる。

噴煙高度の時間変化を二次式でモデル化する方式は、単独噴火の事例に限定されるものの、非常に良い一致性が得られ、この導関数からは速度の時間変化式を推定することができた。このようなモデル化手法は、噴煙高度や速度の予測にも利用できる可能性がある。例えば、噴煙の頂上がレーダの観測範囲から外れてしまう場合でも、噴火直後から一定期間得られた観測結果をもとにモデルを作成し、最大高度を予測するといった使い方が考えられる。

図 6 の散布図からは、本手法で推定した最大高度が国交省の気象レーダによる推定値とよく一致することが確認できる。差異の要因としては、気象レーダは観測頻度が低いので最大高度を見落とししている可能性があり、仰角レベル 1 段階程度低い可能性がある。一方、気象レーダの方が高い結果では、本手法が噴煙の外縁部をノイズと誤認して除去してしまい、高度を低く見積もってしまったと考えられる。

観測報との差に注目すると 500m を超える差異がある事例（図 6 中の赤枠部分）についても本手法は XRAIN と同様の傾向を示している。観測報は目視による遠望観測に基づいたものなので、可視条件等に起因する誤差が生じたと推察される。観測報では噴煙高度が不明だった事例についても、本手法により推定することができている。

最後に、噴煙高度の推定精度について考察する。推定精度を決定する要因は、観測精度とアルゴリズム精度に分けられる。前者は観測した画像自体の精度であり、画像の解像度やレーダの性能に依存する。後者は噴煙の境界の曖昧さなどによって生じる推定結果のばらつきに相当する。表 2 で示した各事例の RMSE は画像の解像度と相関がなく、最小で約 13.0 m であった。この値は最も解像度の粗い画像データ（640x640, 3NM）の 1 画素あたりの距離よりも大きいので、解像度が推定精度を制限していないといえる。残差の分布を調べたところ、ほぼ正規分布になっていたので、上記の RMSE を標準偏差 σ に読み替えると、個々のフレームでの高度推定値のばらつきは約 ± 39 m (3σ) の範囲にほぼ収まる。これが観測精度の最悪値と考えることができる。船舶レーダのビーム幅は 1.2° であり、約 3500 m 離れた火口上で約 73 m まで広がるので、上の精度は妥当な大きさであると言える。遠望観測による観測結果が 100 m 単位であることを考えると、これと同程度の精度が得られると考えられる。

5. 結論

船舶レーダを用いて噴煙の高度を 1.25 秒間隔で推定し、噴煙の成長過程を捉えることができた。また、得られた時系列データから噴煙の最大高度を推定することができた。推定した最大高度は別途気象レーダで推定した結果と整合し、可視条件等の影響により遠望観測の結果が得られなかったケースについても推定が可能になった。さらに、推定高度を平滑化した結果の時間微分からは噴煙の上昇速度を時系列で得ることができ、複数の噴火を識別することが可能なデータが得られた。本手法による推定精度は最高で ± 39 m となり、観測報と同程度となった。