

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

Mobile Monitoring of Volcanic Eruption with Marine
Radar and Its Application to Volcano Disaster Prevention

令和3年3月
March, 2021

研究代表者
Cordinator

真 木 雅 之
Masayuki MAKI

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

Mobile Monitoring of Volcanic Eruption with Marine Radar and Its Application to Volcano Disaster Prevention

真木雅之⁽¹⁾・西隆昭⁽¹⁾・Yura Kim⁽¹⁾・井口正人・爲栗健・藤吉康志⁽²⁾・徳島秀彦⁽³⁾・佐藤英一⁽⁴⁾・海賀和彦⁽⁵⁾・林大介⁽⁵⁾・長屋勝博⁽⁶⁾・高松政彦⁽⁷⁾・山路昭彦⁽⁷⁾

Masayuki MAKI⁽¹⁾、Takaaki NISHI⁽¹⁾、Yura KIM⁽¹⁾、Masato IGUCHI、Takeshi TAMEKURI、Yasushi FUJIYOSHI⁽²⁾、Hidehiko TOKUSHIMA⁽³⁾、Eiichi SATO⁽⁴⁾、Kazuhiko KAIGA⁽⁵⁾、Daisuke HAYASHI⁽⁵⁾、Katsuhiko NAGAYA⁽⁶⁾、Masahiko TAKAMATSU⁽⁶⁾、Akihiko YAMAJI⁽⁷⁾

- (1) 鹿児島大学
- (2) 北海道大学 名誉教授
- (3) FRSコーポレーション株式会社
- (4) 気象庁気象研究所
- (5) 株式会社光電製作所
- (6) 日本無線株式会社
- (7) 一般財団法人日本気象協会

- (1) Kagoshima University, Japan
- (2) Hokkaido University, Honorary professor, Japan
- (3) Field Researchers Corporation, Japan
- (4) Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Japan
- (5) Kodan Electronics Co., Ltd., Japan
- (6) Japan Radio Company Co., Ltd., Japan
- (7) Japan Weather Association, Japan

Synopsis

安全運航に利用されている船舶レーダが、大規模噴火時の噴煙柱や降灰分布の監視に利用できることが本共同研究により確かめられた。桜島における2年間の噴煙観測より、爆発的噴火時の上昇する噴煙柱の成長過程、噴煙柱トップの高度、上昇速度の推定が可能であることを実証した。また、航空機を用いた疑似火山礫の自由落下試験や打ち上げ花火を利用した実験、および桜島での噴煙柱の実観測から、これまで高価（数千万円）な研究用気象レーダでも捉えることが困難であった火山礫や火山岩などの降下火砕物の検出が可能であることが示された。新たな噴煙モニタリング技術としてドップラー速度の測定が可能な固体化レーダを用いた試験観測が実施された。これらの研究成果は、小型で機動性に優れた船舶レーダは、低価格（百万円程度）の噴火監視技術として火山防災に活用できることを実証するものである。

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, 固体素子レーダ

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

1. はじめに

近年、北大の藤吉と FRS(Field Researches corporation) の徳島は船舶レーダのアンテナを縦に回転させることで、落下する降水粒子や鳥の移動を 1.25 秒間隔 という時間間隔で捕らえることに成功した。彼らの結果は船舶レーダを気象現象だけではなく噴火現象にも利用できることを示唆するものである。実際、鹿児島では桜島フェリーの船長が海上の降灰を船舶レーダで観測している。ただし、船舶レーダの問題点はビーム幅の広さから定量的な観測が困難な点である。本研究では研究用の気象レーダによる同時観測を通じて船舶レーダによる定量的降灰量推定アルゴリズムを開発し、これにより低価格で高時間分解能を有する船舶レーダを利用した火山噴火の機動的監視技術確立することを目的とする。

2. 研究課題

2. 1 船舶レーダによる降灰観測事例の調査

船舶レーダによる桜島および口永良部火山噴火の観測例について、桜島フェリー（鹿児島市）、垂水フェリー（いわさきコーポレーション）、フェリー太陽（屋久島町）などを対象にアンケート調査を実施する。

2. 2 機動的降灰観測実験

2. 2. 1 船舶レーダによる降灰観測

1 年目は桜島火山を対象に FRS の可搬型船舶レーダ（写真 1）を桜島に設置し、火口直上の噴煙柱の機動的観測を実施する。噴火が発生しない場合も想定して、セスナ機により上空から火山灰・礫を投下し、船舶レーダによる検出実験をおこなう。

2 年目は北大所有の船舶レーダを桜島京大防災研の黒神観測所に設置し、噴煙柱の通年観測を実施する。また、水産学部の船舶レーダ（写真 2）を改良し降灰の PPI 観測を実施して降灰の水平分布を求める。なお、北大の船舶レーダの桜島への移設、鹿児島大学の船舶レーダの改造はマッチングファンド（鹿児島大）で実施する。

2. 2. 2 既存の気象レーダによる観測

小型 X バンド MP レーダ（京大防災研）、Ku バンドレーダ（気象研、鹿児島大学）による観測を実施し船舶レーダの降灰観測精度の検証をおこなう。検証には

鹿児島大学で開発された 3 次元気象レーダデータ解析ツール（ANT3D）を使用する。

2. 3 火山防災への利用

2. 3. 1 火山噴火情報のリアルタイム配信実験

船舶レーダで得られた火山噴火情報（噴火時刻、噴煙高度、降灰量など）をリアルタイムで配信し、火山防災への船舶レーダ情報の有効性を検証する。検証は、鹿児島地方気象台、国土交通省大隅河川国道事務所、鹿児島県、鹿児島市、垂水市などと連携して行う。

2. 3. 2 船舶レーダを活用した大規模火山噴火時の降灰観測技術の高度化

課題 1 と課題 2 での結果を踏まえて、より実用的な降灰監視技術の検討をハード面からおこなう。具体的には送信機の固体素子化、噴煙や降灰の検出に適した信号処理技術の検討やネットワーク化が中心となる。



写真 1 FRS の可搬型船舶レーダとデータ収録 PC



写真 2 鹿大水産学部に設置されている船舶レーダ

3. 研究成果

3. 1 セスナ機からの疑似火山礫の自由落下実験

3. 1. 1 目的

火山噴火時に放出される噴石は直接、人間の生命や建物に被害を与える。2014年9月の木曽御嶽山の水蒸気爆発によって放出された噴石は登山客58名の命を奪った。噴火活動が活発な桜島では噴石から住民の生命を守るために、登下校の児童のヘルメット着用や道路沿いに設けられた避難壕などの防災対策がとられている。また、島内の土石流対策工事や道路工事では噴火監視者を立てて作業員の安全対策としている。これらの既存の噴火防災対策をより効果的にするためには、噴火の発生や噴石の発生を迅速・的確に検出し、その情報を効果的に伝えることが必要である。本研究ではアンテナの高速スキャンが可能な船舶レーダによる噴石の検出の可能性について調査した。

上に設置した船舶レーダで検出できるかどうかを検証した。使用した船舶レーダは船の安全航行のために広く利用されている長さ2mのスロットアンテナのXバンド船舶レーダである。実験では、アンテナの回転軸を90°傾けることにより、方位角22°、仰角1.2°のファンビームで鉛直方向の空間をスキャンするようにした。アンテナの回転速度は48rpm（1回転1.25秒）で、これにより自由落下する粒子を検出することを試みた。投下物は安全面、環境面を考慮して、水、直径3cm程度の玉こんにやくと湿った麩を用いた。投下はチャータしたセスナ式172P型の小型飛行機の窓から人手により行った。航空機の飛行高度は海拔高度1000m、飛行速度は185km/hである（図3.1.1）。投下は、投下物質が船舶レーダの観測範囲に落下するようにタイミングを見計らい、それぞれの投下物質について2回ずつおこなった。1回あたりの投下物質の量は5リットルのポリバケツ約1杯分である（図3.1.2参照）。

3. 1. 2 実験方法

セスナ機から火山礫相当の大きさの粒子を投下し、地

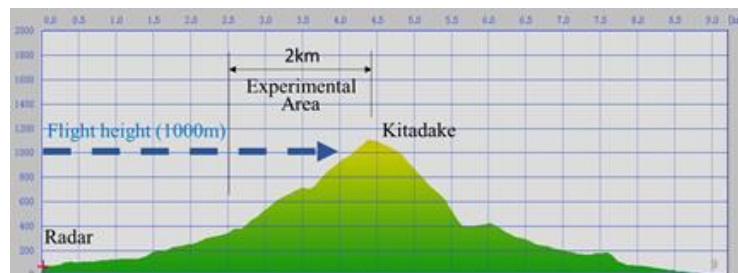


図 3.1.1 試験エリアの地形断面とセスナの飛行高度

新日本航空
セスナ式 172P型



Main specification	
Horse Power	160
Top Speed	123 kt (=228 km/h=63m/s)
Cruise Speed	100 kt (=185 km/h=51m/s)
Gross Weight	2400Lb (=1100kg)
Passengers	4 (include pilot)

疑似火山礫



たまこんにやく



水を含んだ麩

実験参加者



回転楕円体状(長軸3cm×高さ2cm) 円柱状(直径2cm×高さ1.5cm)

図 3.1.2 実験に用いたセスナ機と疑似火山礫

3. 1. 3 実験結果

3 種類の投下物のうち、水についてのみ検出できなかった。これは、投下直後に霧状の水になり反射強度がレーダの検知能力以下の値になったためと考えられる。玉こんにゃくと湿った麩は船舶レーダにより検出することができた。湿った麩の検出結果を図 3.1.3 に示す。船舶レーダは投下直後から落下するまで麩を検出できている。麩は落下中、鉛直方向に伸びるように落下している。これは、粒子の集団効果により先端部分の落下速度が速くなるため、および、落下中に空気抵抗を受けて麩が細分化され落下速度の遅い粒子ができたためと考えられる。玉こんにゃくについても集団効果が認められた。画像データは 1.25 秒間隔、鉛直方向 4.34m の分解能を持っており、十分な精度で粒子の落下速度を計算することができた。

本実験の結果は、高速スキャンが可能な船舶レーダは火山噴火時に放出される火山礫相当の大きさの噴石を検出できることを示すものであった。この実験後、2018 年 4 月 11 日から、船舶レーダを用いた本格的な噴石・噴煙柱検出実験を桜島で実施した。この結果に関しては次節で述べる。

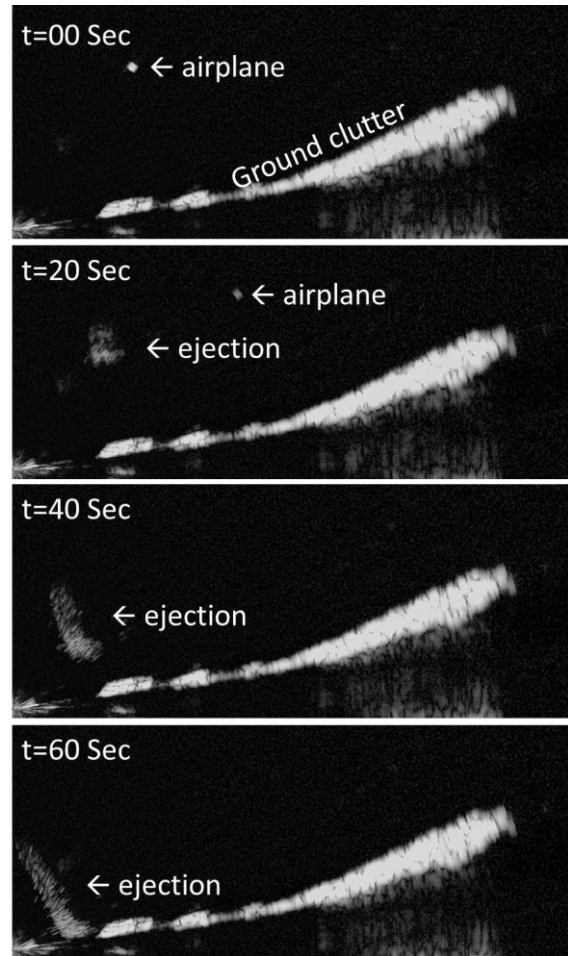


図 3.1.3 セスナ機から投下した湿った麩の検出結果。(2018 年 3 月 2 日)。

3. 2 桜島での噴煙柱観測

3. 2. 1 目的

船舶レーダが噴煙モニタリングに利用できるかどうかを桜島の噴煙観測を通じて、明らかにすることを目的とする。加えて、今後、従来のマグネトロンタイプのレーダにとって代わると考えられる固体化船舶レーダの噴煙モニタリングへの利用可能性について調査する。

3. 2. 2 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。そ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。用いた船舶レーダの波長は 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。船舶レーダは、通常、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 1.25 秒間隔で観測することができる。観測は 2018 年 4 月 11 日から 5 月 31 日の 50 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。

2019 年の観測では、FRS と北海道大学の船舶レーダをそれぞれ、京大防災研ハルタ山観測所と黒神観測点に設置して、長期連続観測を実施した。表 3.2.1 に設置場所の緯度経度を示す。いずれのレーダもマグネトロンタイプの X バンドの船舶レーダで、データ収録・処理方法は同じ手法を用いている。FRS レーダのデータ取得時間間隔は 2018 年度と同様に 1.25 秒毎であるが、北大レーダは約 2.5 秒間隔である。収録画像の分解能を表 3.2.2 と図 3.2.1 に示す。分解能は、レーダによって、また、観測期間によって異なるので、データ解析の際には注意が必要である。

表 3.2.1 船舶レーダの設置場所の緯度経度

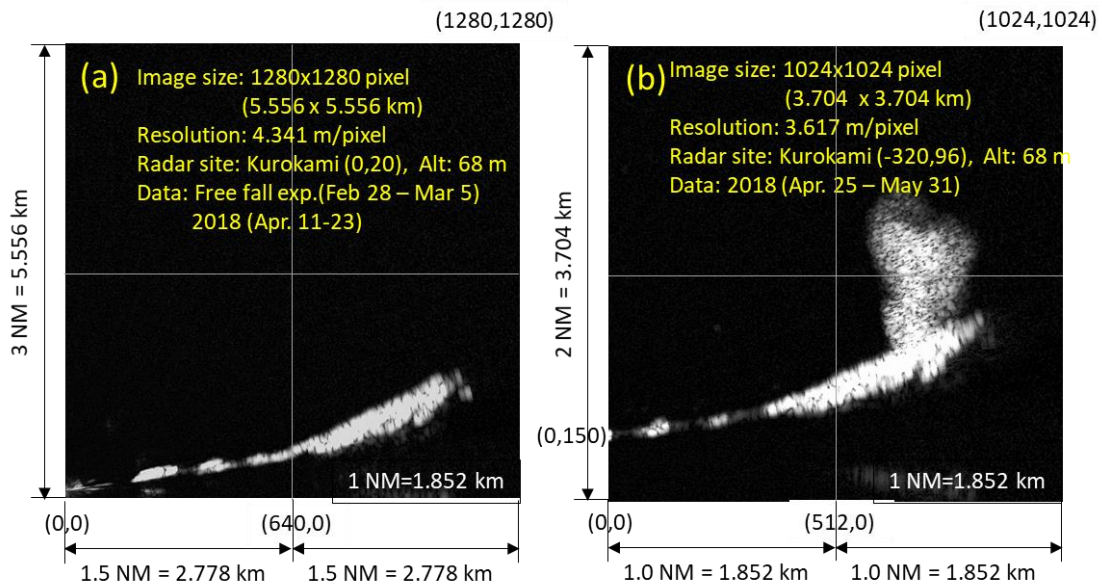
設置場所施設名	緯度・経度（度）	緯度・経度（度分秒）	標高 (m)
京大防災研黒神観測点	N 31.583469°, E 130.70133°	N 31° 35' 00.49", 130° 42' 06.24"	68
京大防災研ハルタ山観測所	N 31.593528°, E 130.633878°	N 31° 35' 36.70", 130° 38' 01.96"	408

表 3.2.2 収録画像の距離分解能（FRS レーダ）

設置場所施設名	収録期間	画像サイズ	分解能	レーダ位置
黒神観測点 (図 3.2.1(a))	2018 年 2 月 28 日～3 月 5 日 (疑似火山礫落下実験)	1280 x 1280 pixel (5.556 x 5.556 km)	4.341 m/pixel	(0,20)
黒神観測点 (図 3.2.1(a))	2018 年 4 月 11 日～4 月 23 日	1280 x 1280 pixel (5.556 x 5.556 km)	4.341 m/pixel	(0,20)
黒神観測点 (図 3.2.1(b))	2018 年 4 月 25 日～5 月 31 日	1024 x 1024 pixel (3.704 x 3.704 km)	3.617 m/pixel	(-320,96)
黒神観測点 (図 3.2.1(c))	2018 年 5 月 20 日～5 月 31 日 (再解析データ)	1280 x 1280 pixel (7.408 x 7.408 km)	2.89 m/pixel	(0,0)
ハルタ山観測所 (図 3.2.1(d))	2019 年 6 月 5 日～8 月 23 日	1280 x 1280 pixel (11.112 x 11.112 km)	4.84 m/pixel	(0,0)
火山観測所 (図 3.2.1(e))	2019 年 8 月 24 日 (錦江湾花火大会)	1280 x 1280 pixel (3.704 x 3.704 km)	4.341 m/pixel	(0,0)

表 3.2 収録画像の距離分解能（北大レーダ）

設置場所施設名	収録期間	画像サイズ	分解能	レーダ位置
黒神観測点 (図 3.2.1(f))	2019 年 6 月 6 日～12 月 23 日	1280 x 1280 pixel (14.816 x 14.816 km)	11.575m/pixel	(640,0)
黒神観測点 (PPI)	2019 年 12 月 24 日～ 2020 年 1 月 2 日	1280 x 1280 pixel (14.816 x 14.816 km)	11.575m/pixel	(640,640)



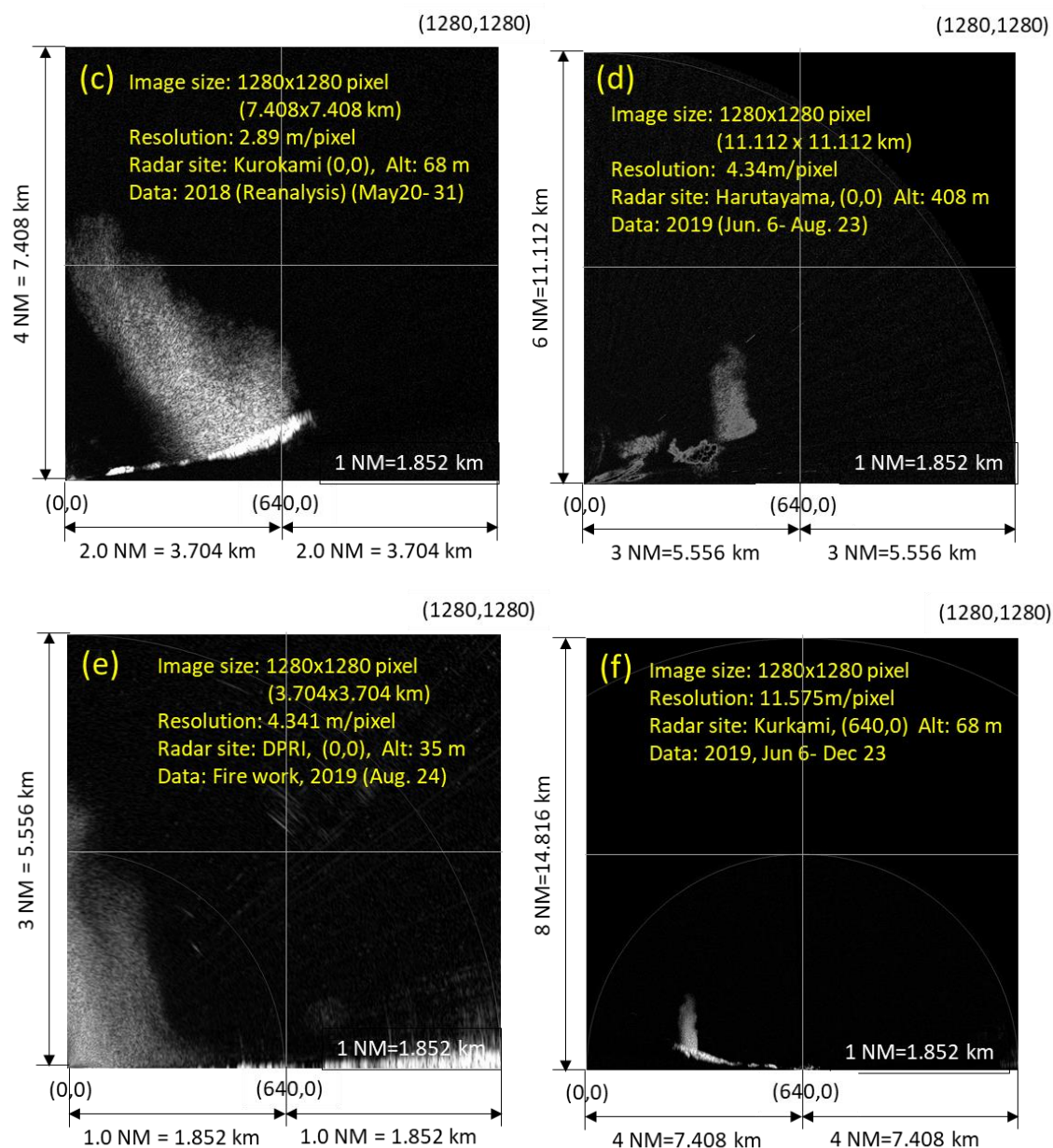


図 3.2.1 収録画像の分解能。 (a) 疑似火山礫落下実験 (2018 年 2 月 28 日ー3 月 5 日) および黒神観測点での噴煙観測 (2018 年 4 月 11 日ー4 月 23 日), (b) 黒神観測点での噴煙観測 (2018 年 4 月 25 日ー5 月 31 日), (c) 黒神観測点での噴煙観測 (2018 年 5 月 20 日ー5 月 31 日, 再解析データ), (d) ハルタ山での噴煙観測 (2019 年 6 月 5 日ー8 月 23 日), (e) 桜島火山観測所での錦江湾花火大会 (2019 年 8 月 24 日), (f) 黒神観測点での噴煙観測 (2019 年 6 月 6 日ー12 月 23 日)。

3. 2. 3 2018 年の観測結果の例

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。異なるタイプの噴火事例の画像を図 3.2.2 から図 3.2.4 に示す。図 3.2.2 の噴火は 2018 年 5 月 4 日 22:09 に南岳火口で発生し, 噴煙高度は 2800m であった。この事例では, 噴石の落下および噴煙柱が明瞭に上昇する過程がとらえられた。図 3.2.3 は 2018 年 2 月 28 日にとらえられた連続して発生する噴火の例で, 噴煙が斜面に沿って流れる様子が捉えられた。目視では良

く観測されるが, 高度が低いために通常の現業気象レーダでは観測が困難な現象である。この観測結果は火砕流の検出も可能であることを示唆する。図 3.2.4 は 2018 年 5 月 25 日 22:01 の噴火事例で, 弱い降雨中の噴煙柱の成長が捉えられている。

2018 年の観測結果は添付資料 1 の論文にまとめられている。また, 噴煙柱の高さと上昇速度の推定方法については添付資料 2 の論文にまとめられている。

本研究により船舶レーダによる噴煙の観測が可能であることが初めて（著者らの知る限り）示された。船舶レーダは低価格で小型であるために、機動的な火山噴火観測に有効である。今後は定量的な降灰評価に向けての取り組みが必要である。

3. 2. 4 2019 年の観測結果

2019 年は桜島の 2 カ所での船舶レーダの観測をおこなった。1 カ所目は、2018 年と同じ京大防災研黒神観測点で、2019 年 6 月 6 日から 12 月 23 日の期間、観測をおこなった。2 カ所目は南岳火口を挟んで黒神観測点とは反対方向に位置する京大防災研ハルタ山観測所で、FRS のレーダにより 2019 年 6 月 5 日から 8 月 23 日まで観測をおこなった。FRS レーダは次節で述べる錦江湾花火の観測に用いられた後、8 月 25 日に観測を終了した。

桜島における 2019 年度に取得した噴煙観測データは現在解析中である。冬期の噴煙柱の観測データが取得されており、0℃以下の大気中での噴煙の微物理過程の研究が期待される。

3. 3 疑似火山岩の検出実験

3. 3. 1 目的

前述した 2018 年の桜島での船舶レーダによる観測から、爆発的な火山噴火に伴って放出された噴石の検出とその軌跡を求めることに成功した。しかしながら、どの程度の大きさの噴石を検出できたかは不明であった。そこで、本実験では、大きさが既知の打ち上げ花火を利用して、船舶レーダの火山噴石の検出可能性を評価した。

3. 3. 2 実験

2019 年 8 月 24 日（土）19:30-20:40 に開催された第 19 回かごしま錦江湾サマーナイト大花火大会で打ち上げられた花火を対象に船舶レーダによる検出実験をおこなった。花火大会の海上は 鹿児島港本港区（31°35'40.9"N 130°34'06.5"E）である。

使用した船舶レーダは、FRS の X バンド船舶レーダ、光電製作所の X バンド固体船舶レーダ、鹿児島大学の X

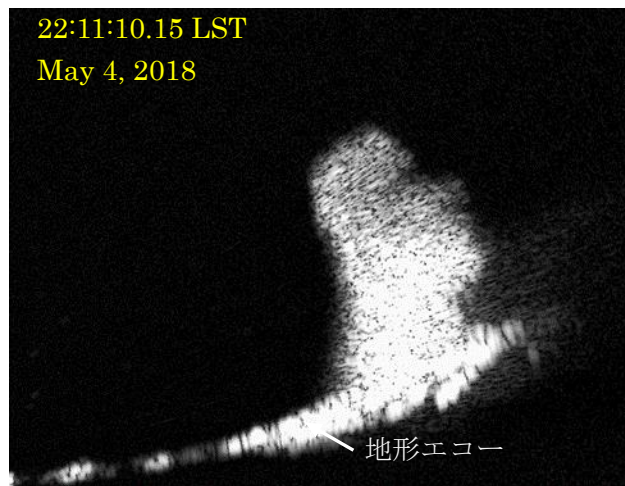


図 3.2.2 爆発的な噴火により成長する噴煙柱。

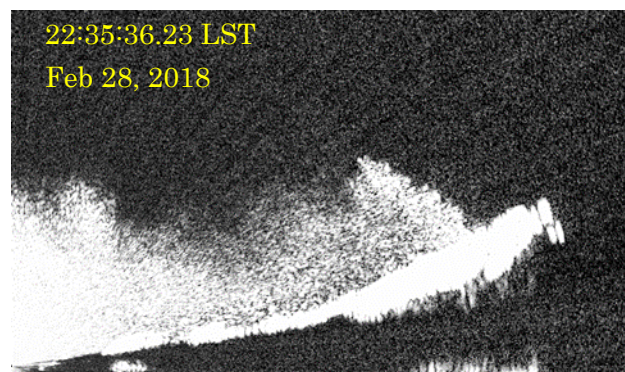


図 3.2.3 連続噴火により発生した斜面を下る噴煙。

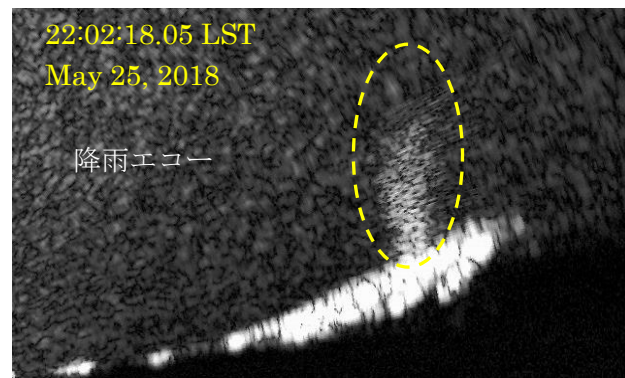


図 3.2.4 弱い降雨時の噴火に伴って発生した噴煙柱。

バンド船舶レーダの 3 台である。図 3.3.1 に各レーダの配置と観測範囲を示した。図中の番号は打ち上げ花火の場所である。光電製作所レーダは鹿児島大学の教育船、南星丸の甲板上に設置した。

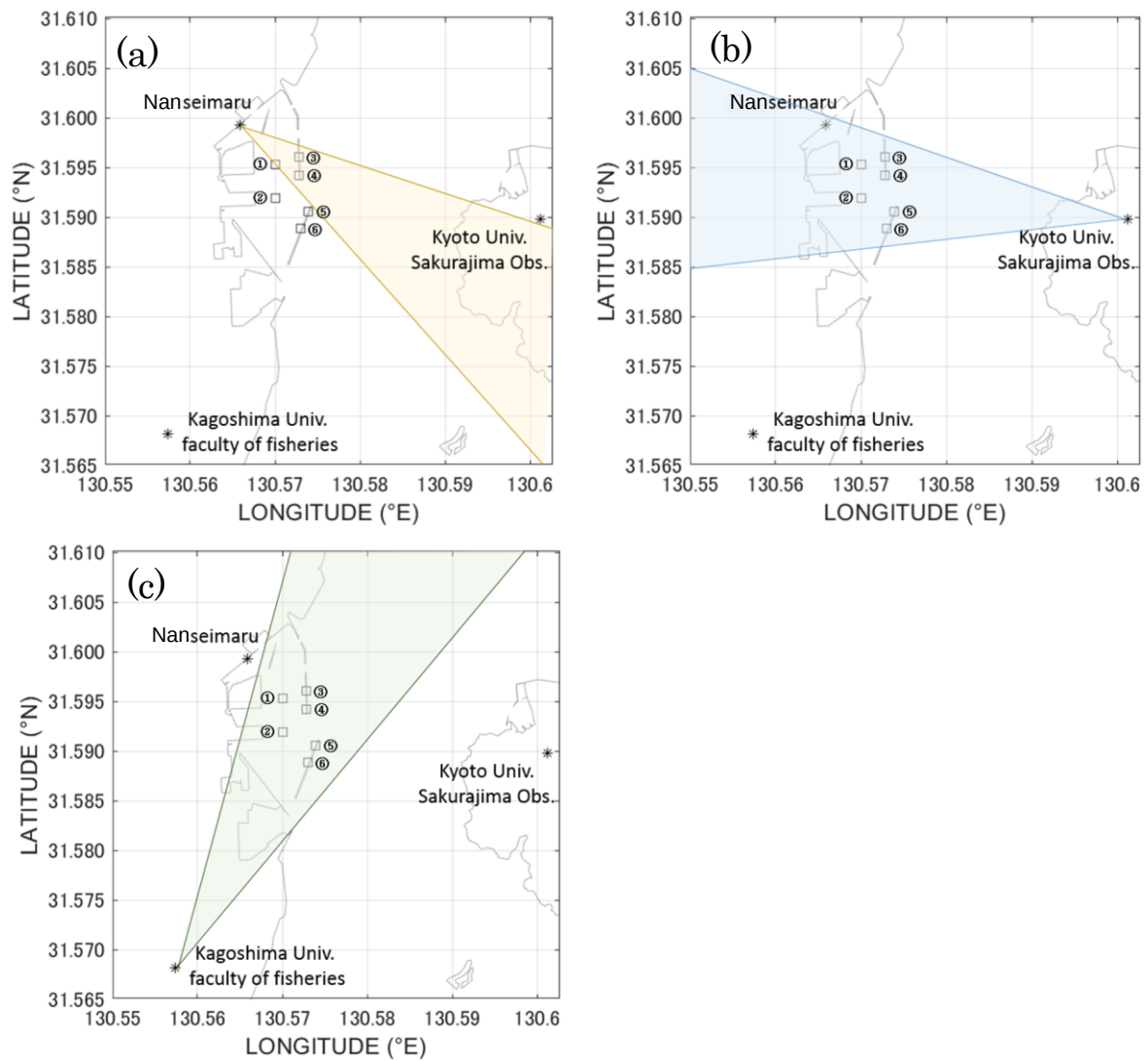


図 3.3.1 各レーダの配置と観測範囲．(a) 光電製作所レーダ，(b) FRS レーダ，(c) 鹿児島大学水産学部レーダ．①から⑥の数値は花火の打ち上げ場所地点．

3. 3. 3 結果

錦江湾花火大会では直径 60cm の花火が 2 カ所からそれぞれ 2 回ずつ打ち上げられた．1 個の重さは約 70kg で密度は 243kgm^{-3} である．この密度は火山岩に近い．花火の内部にはシュウ石，松灰，アルミ粉などが含まれている．2 カ所に設置された船舶レーダは上昇する花火の軌跡を捉えることに成功した．さらに，花火が爆発し星が広がる様子，広がった星が落下する様子を捉えることに成功した．図 3.3.2 は京大防災研火山観測所に設置された

FRS の船舶レーダにより捉えられた花火の様子である．図には示さないが，得られた花火の軌跡から，打ち上げの初速度，最高到達点が推定された．推定値は Mastin(2001)の理論計算値と一致した．固体船舶レーダの観測結果については添付論文 3 を参照．

本実験から，船舶レーダによる火山岩の検出の可能性が示された．

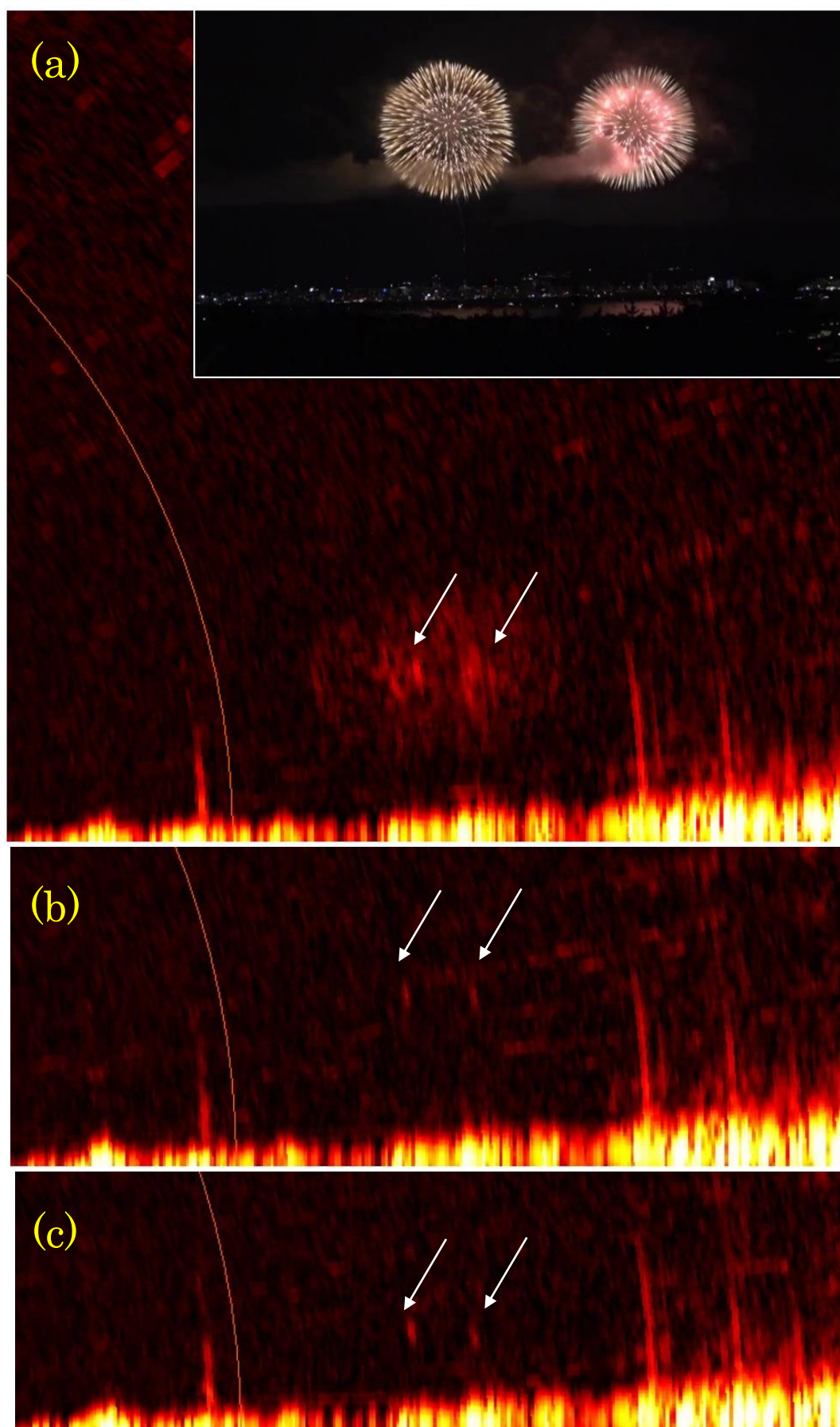


図 3.3.2 船舶レーダが捉えた打ち上げ花火（白い矢印）。時間を間引いて表示している。

4. まとめ

Smithsonian Institution の火山活動報告 (Smithsonian, 1970) によれば, スミソニアン火山噴火がレーダで初めて捉えられたのは 1970 年 5 月 5 日に発生したアイスランド Mt.Hekla の噴火と言われている (例えば, 澤田, 2003 ; Hort and Scharff, 2016 に記載). これ以前にも, レーダにより噴煙を観測する試みが 1950/51 年に Montserrat 近くで英国地質調査所によりなされているが, 噴煙を捉えるまでには至らなかった. 我が国では 1973 年に国後島の爺爺岳 (チャチャダケ) の噴火を釧路気象台のレーダが観測したのが初めてと言われている. その後, 現業用レーダによる火山噴火の観測例は数多くあるが, レーダデータによる本格的な降灰量の推定は Harris and Rose (1983)がおこなった米国 Mount St. Helens の噴火である. 様々なタイプの研究用レーダによる火山噴煙の観測が開始されるのは 2000 年頃からである. 例えば, アンテナを一方向に固定した K バンドマイクロレイレーダ (Hort and Seyfried, 1998; Urbanski, 2002) , Voldorad と名付けられたドップラー速度を測定できる L バンドレーダ (Dubosclard et al., 1999,2004; Donnadieu et al. 2005; Gouhier and Donnadieu, 2008, 2010, 2011) , スキャンが可能な C バンドレーダ (Maki and Doviak, 2001; Marzano et al., 2006, 2010) , X バンドレーダ (Scollo et al., 2005; Maki et al., 2011) などがある. これらのレーダ観測例の文献は Hort and scharff (2016)にある.

本研究で用いたレーダは大型船舶に搭載されている X バンドの船舶レーダである. 船舶レーダは船の安全航行を目的に, 高速で回転しながら広いビーム幅の電波を射出するスロットアンテナが特徴である. スロットアンテナを鉛直回転させることで, 火口上空数十 km までの噴煙を 1.25 秒間隔でスキャンすることが可能である. 広角のビーム幅は上昇する噴煙柱の水平方向の内部構造を観測できないが, 詳細な鉛直プロファイルを測定することができた. 更に, 噴石や火山岩の検出には広角のビーム幅が適していることが証明された. 本研究で示された上記の点は, 著者の知る限り, 国内外で初めてであろう.

本報告で使ったレーダはマグネトロンタイプのもので, 解析データは画像ベースであった. 今後, 反射強度とドップラー速度が測定可能な固体レーダによる噴煙観測をおこなう予定である.

参考文献

M. Hort, L. Scharff (2016): Chapter 8 - Detection of Airborne Volcanic Ash Using Radar, Editor(s): Shona Mackie, Katharine Cashman, Hugo Ricketts, Alison Rust, Matt Watson, *Volcanic Ash*, Elsevier, 2016, Pages 131-160
[https:// www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004050000136](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004050000136)