

## X-Band 固体化船舶レーダの火山灰観測への適用

Applying the X-Band marine SSR(Solid State RADAR) to the mobile observation of volcanic ashes

西隆昭<sup>(1)</sup>・真木雅之<sup>(1)</sup>・小堀壮彦<sup>(1)</sup>・遠藤寛治<sup>(2)</sup>・海賀和彦<sup>(2)</sup>・井口正人<sup>(3)</sup>

Takaaki NISHI <sup>(1)</sup>, Masayuki MAKI <sup>(1)</sup>, Takehiko KOBORI <sup>(1)</sup>, Kanji ENDO <sup>(2)</sup>, Kazuhiko KAIGA <sup>(2)</sup>, Masato IGUCHI

(1) 鹿児島大学

(2) 株式会社光電製作所

(3) 京都大学

(1) Kagoshima University, Japan

(2) Kodan Electronics Co., Ltd., Japan

(3) Kyoto University, Japan

### Abstract

Volcanic smoke of Sakurajima and Kirishima has been observed by Ku band radar (Ku-RAD) of Kagoshima University. In addition, Marine Radar had shorter search time than Ku-RAD was able to observe volcanic smoke. On the other hand, Marine Radar produced a transmission signal in magnetron which was necessary to change magnetron in a fixed period. This time, we borrowed Solid-state Marine Radar which was no necessary to change solidified transmission device and can observe volcanic smoke. At first 100W and 400W Solid-state Marine Radar was installed in the Kagoshima University Shimoarata campus roof and measured the Sakurajima area in PPI and RHI. Furthermore, to move, and to observe eruption of Sakurajima, install the radar for the ship in the boat, while it traveled the sea, the volcanic smoke of Sakurajima was observed. These observation methods were effective for volcanic ashes observation.

## 1. はじめに

鹿児島大学は、火山観測用 Ku バンドレーダで桜島や霧島の火山観測を実施してきたが、船舶用レーダでも桜島観測で噴煙を観測した。一方で、船舶用レーダは送信信号をマグネトロンで生成することが多いが、一定の期間で交換する必要があった。今回は送信デバイスを固体化した X-バンド船舶用レーダを光電製作所から借用し火山の噴煙観測に適用する測定試験を実施した。

## 2. 観測装置

噴煙観測の固体化船舶レーダ(SSR:Solid state Marine Radar)はスロットアンテナを用いた空中線部と操作指示をするパーソナルコンピュータ(PC)で構成される(図 1)。空中線部は 6ft の回転するオープンアンテナと信号処理・I/F 部、周波数コンバータ、半導体アンプ、モータ制御部そしてモータが組み込まれた台座部分で構成されている。台座部の半導体アンプが SSR の最大の特徴であるが、信号処理・I/F 部で信号をデジタル化し Ethernet で操作指示装置と受け渡しができるのも特徴の一つである。Ethernet ケーブルを使用するので、従来の専用ケーブルを準備する必要がなくなっている。従来のケーブルはレーダのビデオ、トリガ、回転角、ヘディング信号を含む十数本の信号線をそれぞれの専用のケーブルを束ねて作成した専用ケーブルである。太さは LAN ケーブルがカテゴリ 6 準拠で直径 4mm マグネトロン 4kW レーダの専用ケーブルで直径 12mm と LAN ケーブルは 1/3 である(図 2)。電源は DC24V で直流電源装置を使用した。出力は 100W および 400W である(表 1)。

## 3. 試験方法

鹿児島大学の下荒田キャンパスは桜島噴火口から西に約 10km の距離であったが(図 3)、研究棟の屋上から桜島が見通しの中にあつたために、試作機の動作確認をこの場所で始めた(図 4)。動作確認・観測の期間は 2019 年 6 月末から 10 月初めまでである。

船舶用レーダの空中線のビームパターンはファンビームと言われるウチワの形であるために通常の回転方向を水平にする PPI(Plane Position Indicator) と回転方向を鉛直にする RHI(Range Height Indicator)の二つの方法で観測をした。

## 4. 観測結果

### 4.1 鹿児島大学下荒田キャンパス(2019 年)

噴煙が良く観測された噴火口から 4km 付近の桜島黒神に比べて、下荒田キャンパスは約 10km と遠かったた

めに動作確認のためのターゲットを降雨にして PPI で観測していると、噴火口付近の噴煙も観測された(図 5)。さらに RHI 観測では桜島斜面を移動する噴煙も観測され(図 6)噴煙の状態を気象レーダより速く把握できる可能性を示した。

### 4.2 錦江湾サマーナイト大花火大会

桜島は地震計や傾斜計、伸縮計などの機器で数時間程度の範囲内で爆発的噴火の発生を予測することができると言われているが[1]、すべてを予報できるわけではなく噴煙の観測は予定してできるわけではない。錦江湾サマーナイト大花火大会はプログラムや打ち上げ場所が公開され、計画的に観測できた。

観測は 2019 年 8 月 24 日 19:30-20:40 に鹿児島港本港区で開催された。図 7 に SSR (Solid State RADAR)設置場所(◎)と花火打ち上げ場所(✖)を示す。SSR 設置場所は鹿児島大学水産学部練習船南星丸の係留場所である。打ち上げ時間は 1 時間 10 分であるが、安定した電源の確保や混雑する会場でアンテナを回転させるための安全な絶好の場所であった。南星丸船橋に制御監視の PC を置き、電源と信号線を前部甲板に設置した空中線部と接続した(図 8)。電源線と信号線(LAN ケーブル)が市中の電気店で入手可能であり、専用線より軽いのは移動観測に有利である。

図 9 は 2019 年 8 月 24 日 19 時 30 分に打ちあがった 20 号花火の着火爆発的燃焼の SSR 2 回転前からの記録である。(a)では打ちあがっている花火が早いために 63m ほど尾を引いた軌跡になっている。(b)で頂点の約 598m に達して(c)で花火に着火で直径 321m 程に割れている。花火は黒色火薬、色火、割薬の雷薬、笛薬で組成されるが、色火に使われる可燃剤にはニッケル、銅、アルミニウム、鉄、マグネシウムなどの金属粉が使われている[2]ので打ち上げ途中から割れるまでの 20 号(直径 60cm)花火が SSR に映っていると考えられる。SSR からの距離は 1.3km、高度は約 550m である。

### 4.3 移動中の船からの観測

桜島噴煙を複数個所で観測または移動して観測することを想定して、鹿児島大学水産学部の舟艇さくらじま(長さ 7.35m、幅 2.57m、総トン数 2.2 トン)に SSR 100W を装備し、12 月 8 日 2020 年 9:42 に鴨池港を出発して垂水市海潟港へ移動。帰りは桜島湯之持木港へ寄り、鴨池港へ帰港する行程で、南岳の噴煙を観測する実験を行った(図 10)。天気は晴れのち曇りで雨は降らなかった。風速は出発時には最大瞬間で 5.6m/s と高くなかったが海潟港に到着した 11 時頃には 10.5m/s となった。風向は北から北西であったので、直接風の当たる海潟では舟艇の操船が難しかった(3)。

固体化レーダの空中線部は前方甲板に架台を置き 3 フィートのアンテナとともに設置した。制御監視のパーソナルコンピュータ(PC)とデータ保存用ハードデ

イスク (HD)、空中線用バッテリーおよび PC 用バッテリーは後部甲板に置いた (図 11)。

海潟へ向かう途中の古里南で桜島から噴煙が上がったので、アンテナの回転を PPI から RHI に切り替えて観測した。図 12 上に南岳から噴出する噴煙の写真を示し、左に RHI のレーダ映像、右に PPI 映像を示した。丸の中が噴煙の映像を示しており、RHI のほうが分かりやすい。写真では、南へ噴煙が流れているが噴火口から離れるとレーダ映像には映っていない。

海潟港では強風で舟艇の操船が難しかったので、有村溶岩南へ戻り RHI で観測した。図 13 写真左のように、噴煙は山肌をそって吹き降ろされてきているが、右写真のようにレーダ映像としては観測されなかった。

この観測では風が強いときに操船が難しかったので、桜島の風が遮られた湯之持木港で観測した。図 14 のとおり噴煙は薄くて RHI のレーダ映像としてはとらえられなかったが、桜島の傾斜はよく映り舟艇が安定しているために映像のブレも少なかった。

## 5. まとめ

### 5.1 機器の構成

機器は図 1 のとおり構成されるが電源は、空中線部が DC24V、制御監視用 PC が AC 100V である。AC100V の商用電源があれば、問題ないが移動観測の場合はバッテリーに頼らざるを得ない。鹿児島大学下荒田キャンパスと南星丸では AC100V を確保できたが、舟艇桜島では 12V75Ah バッテリー 2 個で空中線部の電源とし、12V75Ah バッテリー 1 個と DC/AC 正弦波インバータで AC100V 電源とした。固体化レーダは 100W であったので、1 日は持ちそうであるが、火山の麓で商用電源の無い場所で 2 日以上観測する場合は太陽光発電などを検討したほうが良いかもしれない。

### 5.2 固体化レーダの映像

桜島の火山灰直径は 0.15-1.00mm、雨滴の直径は 1-4mm 降雨は打ち上げ花火の星は 1cm 以上であることから、後方散乱が発生し信号を受信できた[4,5]。SSR は 9410MHz であることから後方散乱係数を読み取ると約  $10^{-2}$  の雨滴より 1 桁ほど小さくレイリー散乱の領域であった[4]。噴火口から 10km ほど離れた下荒田キャンパスで噴煙が観測されたのは、噴煙高さが 1400m 以上の場合であった。これより低い噴煙は薄くて後方散乱が閾値より小さいと説明できる。しかし、舟艇で噴火口から 6km 付近まで近づいたときに小さな噴煙があり、SSR の映像として観測できたので、観測できるので移動観測での有効な手段であることが検証できた。類似した結果は花火の観測でも得られた。

これらの結果は、X-Band SSR の電界強度のみで判断したものであるため、実時間で判断するためにドップラー信号なども利用できるようになったら良いかもし

れない。

## 謝 辞

花火観測に南星丸の甲板や船橋等の場所や設備を提供していただいた幅野正明・南星丸船長とて桜島の移動観測に舟艇を運用していただいた職員の皆様に謝意を申し上げます。

## 参 考 文 献

- [1]火山噴火予知の現状と課題、藤井敏嗣、地域防災 2016-Dec. No.11 pp.4-7
- [2]花火の燃焼 Combustion of Fireworks 日本燃焼学誌 第 50 巻 152 号 (2008 年) pp.100-106
- [3]気象庁 HP [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min\\_s1.php](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php)
- [4]レーダ水文学 吉野文雄著 森北出版 2002 年 10 月 10 日
- [5]桜島昭和火口噴出物の構成物・付着成分分析 (2008 年 2 月～5 月)、第 110 回火山噴火予知連絡会、産総研・地質調査総合センター.2008 年 6 月、予知連絡報告書

表

表 1 固体化レーダの主な仕様

項目	仕様	備考
アンテナ形式	オープンアンテナ	アンテナサイズ 3ft, 6ft, 9ft
送信出力（尖頭値）	100V±50%/400W±50%	
送信周波数	9380-9420MHz	PON:9390 ± 10[MHz] QON:9410 ± 10[MHz]
周波数安定度	±2.0 ppm	
アンテナ回転数	24 rpm	
送信パルス幅	PON:0.08-1.2μ sec QON:5-18μ sec	
掃引周波数	QON:5,10,15MHz	
繰り返し周波数	450-2600Hz	
探知距離レンジ （設定可能範囲）	0.125-64NM (100W) 0.125-96NM (400W)	
最小探知距離	40m 以内	
距離分解能	40m 以内	
距離精度	8m またはレンジの 1% 以内	
ドップラー周波数精度	TBD (Take Before Detect)	
電源電圧	定格 直流 +24[V]	
消費電力	100W 以下 (100W) 150W 以下 (400W)	空中線部のみ
質量	29 kg 以下 (100W) 33 kg 以下 (400W)	空中線部のみ
使用温度範囲	-25 -- +55°C	空中線部のみ
防水	IPX6	空中線部のみ

図

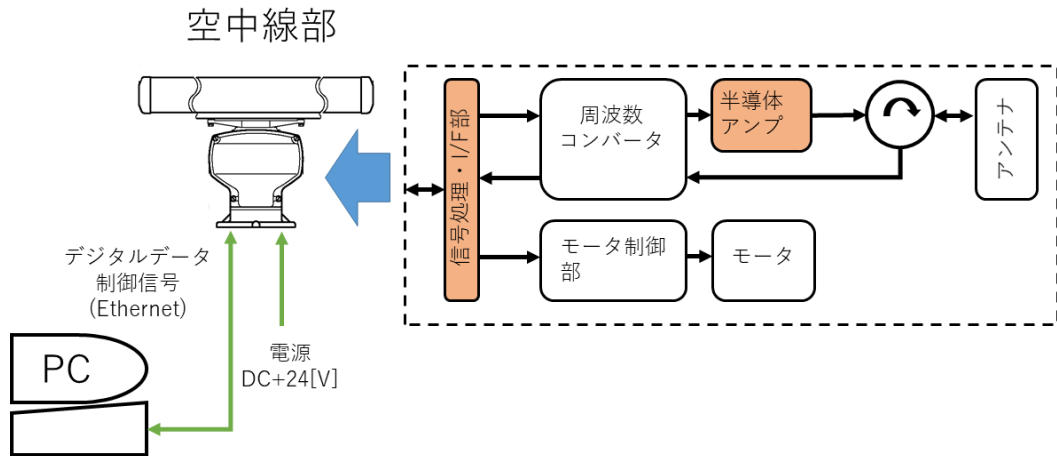


図 1 固体化船舶レーダ(SSR: Solid-state Marine Radar)基本システム構成

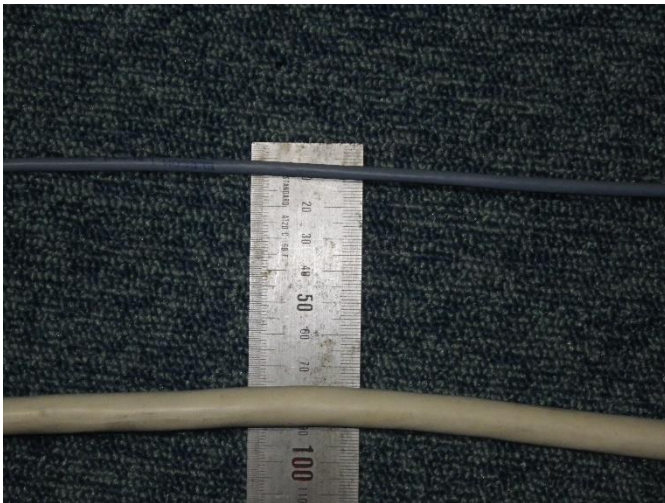


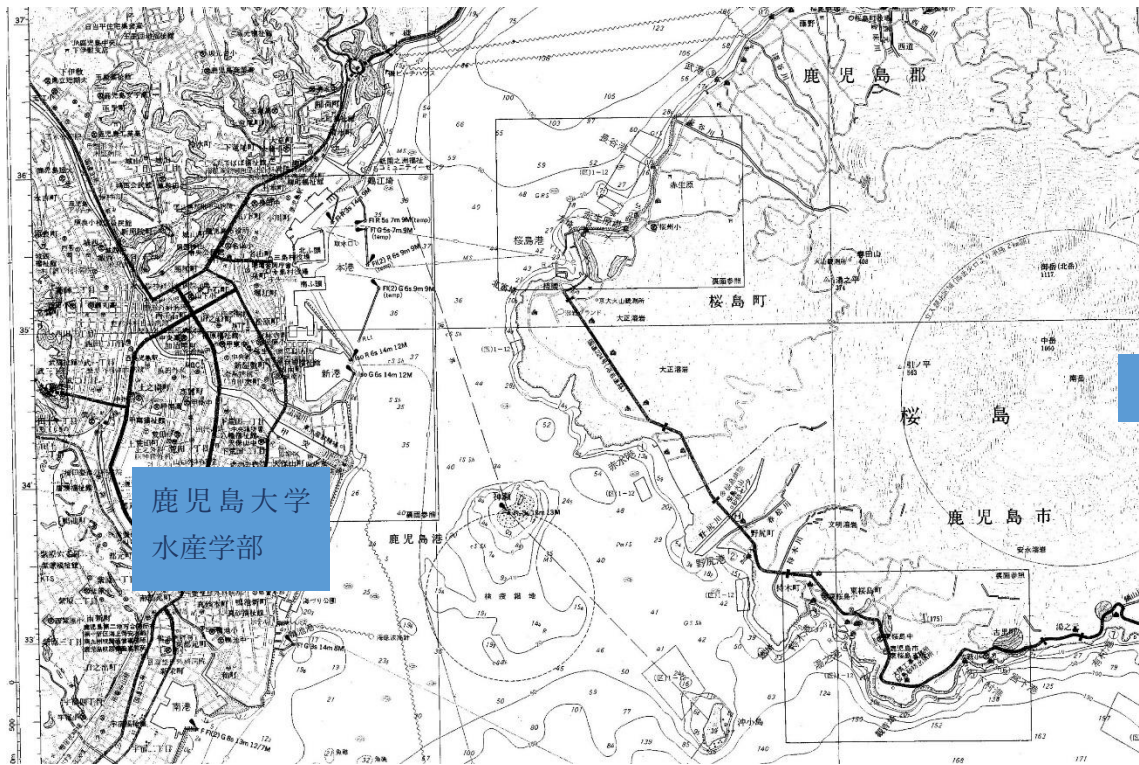
図 2 LAN ケーブル (上) とマグネトロンレーダ専用ケーブル(下)



PPI

RHI

図3 鹿児島大学下荒田キャンパスに設置した  
 固体化船舶レーダ



南岳

図4 レーダサイトと桜島（南岳）の位置関係

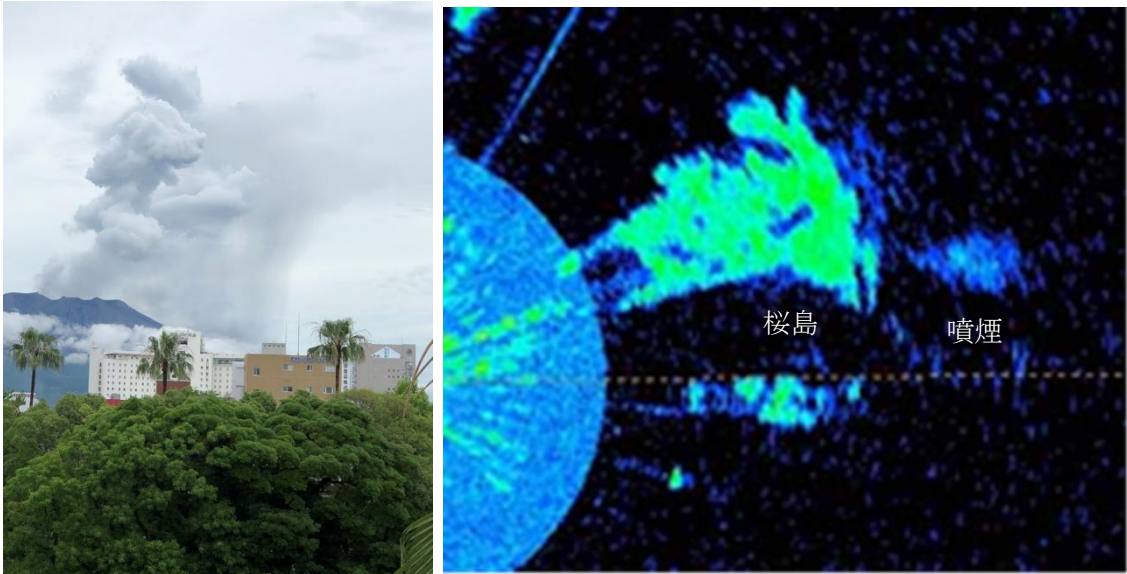


図5 2019年7月4日 10:54 桜島噴煙 噴火時刻 10:44, 3200m

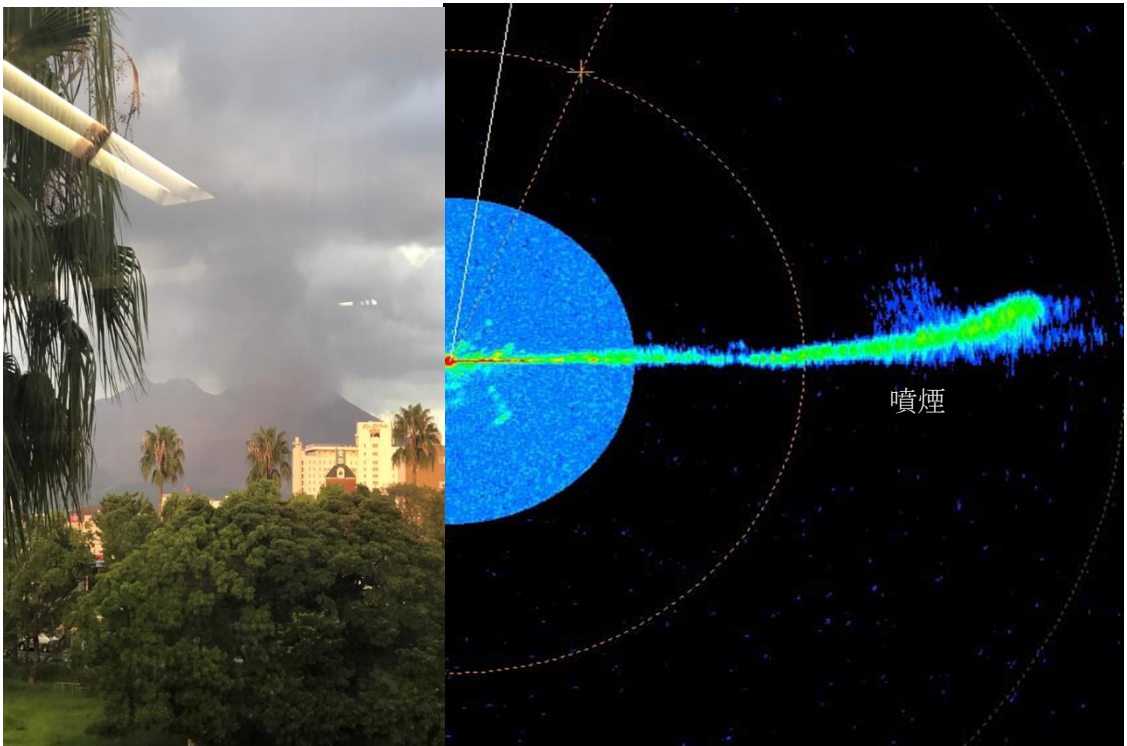


図6 2019年9月17日 18:00 桜島噴煙, RHI 桜島噴煙レーダ映像 17:58

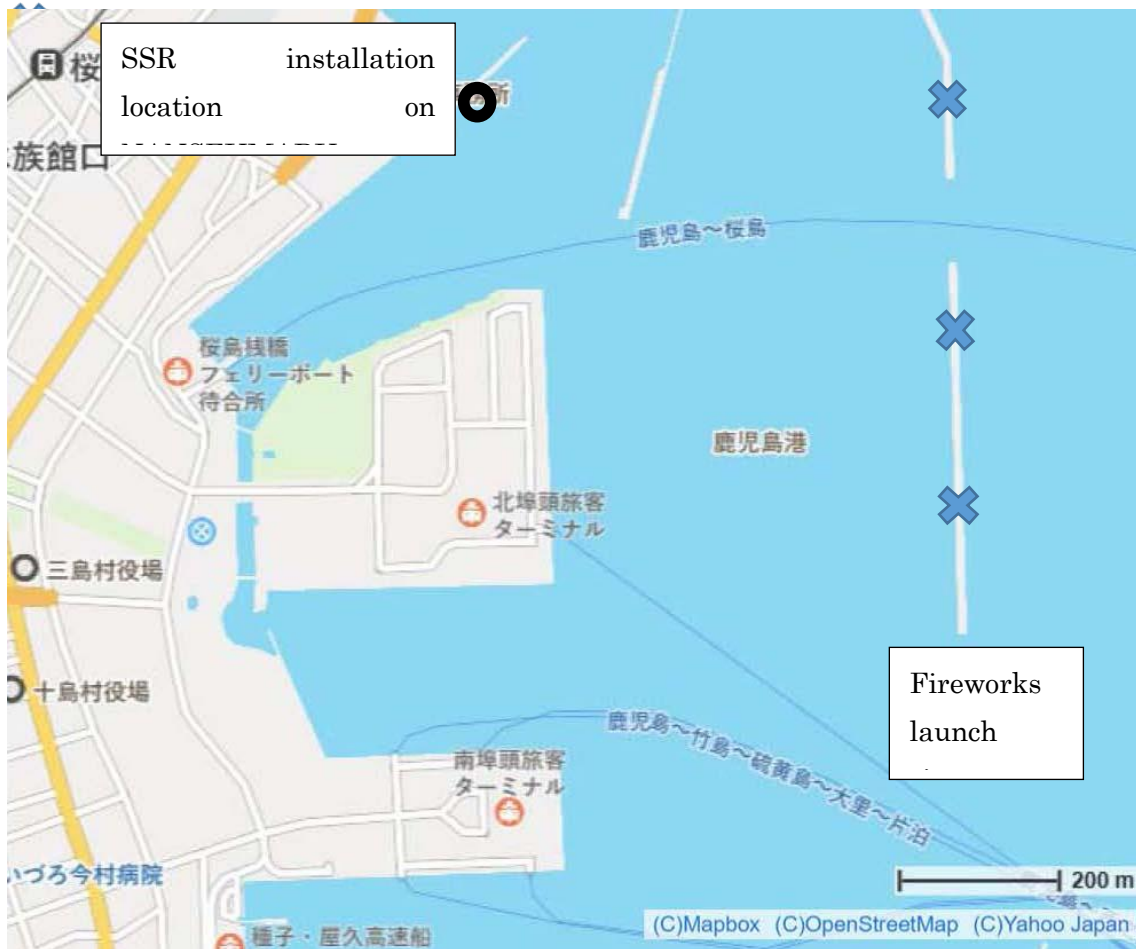
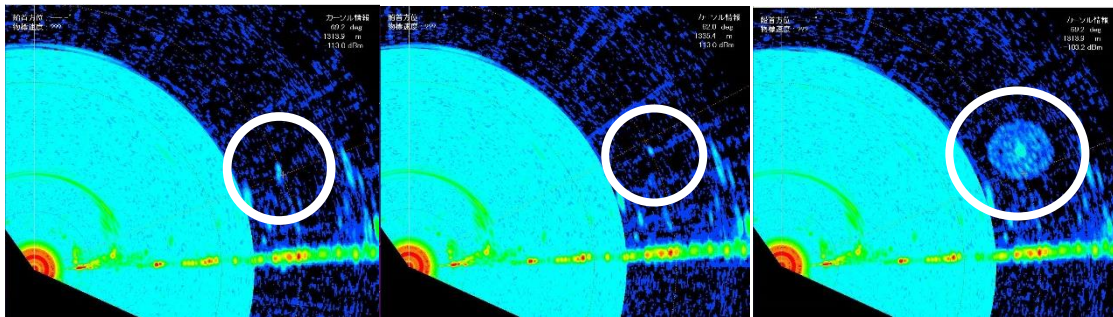


図7 2019年錦江湾サマーナイト大花火大会 Solid State RADAR(SSR)設置場所と花火打ち上げ場所 (8月24日(土)19:30~20:40 鹿兒島港)





図 8 錦江湾サマーナイト大花火大会空中線部(400W)と南星丸船橋から見える花火 (2019年8月24日 19:30-20:40 鹿児島港本港区)



(a) 着火 2 回転前

(b) 着火 1 回転前

(c) 打ち上げ花火着火

図 9 錦江湾サマーナイト大花火大会の打ち上げ花火 SSR 観測記録 (2019年8月24日 19:30)



図 10 2020 年 12 月 8 日 固体化レーダ観測航跡（鹿児島市鴨池港—垂水市海潟港—桜島湯之持木港）



図 11 舟艇桜島に設置した固体化レーダの空中線部（左）と制御監視部（右）

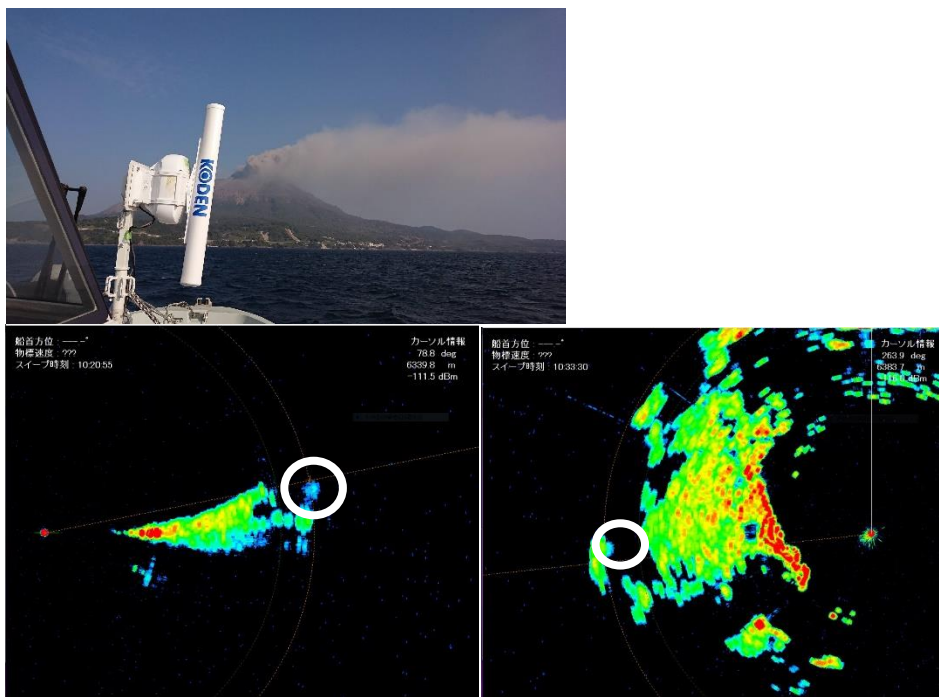


図 12 10時20分から10時34分の桜島噴煙写真(上)とRHI映像(左)およびPPI映像(右)  
(2020年12月8日古里温泉南)

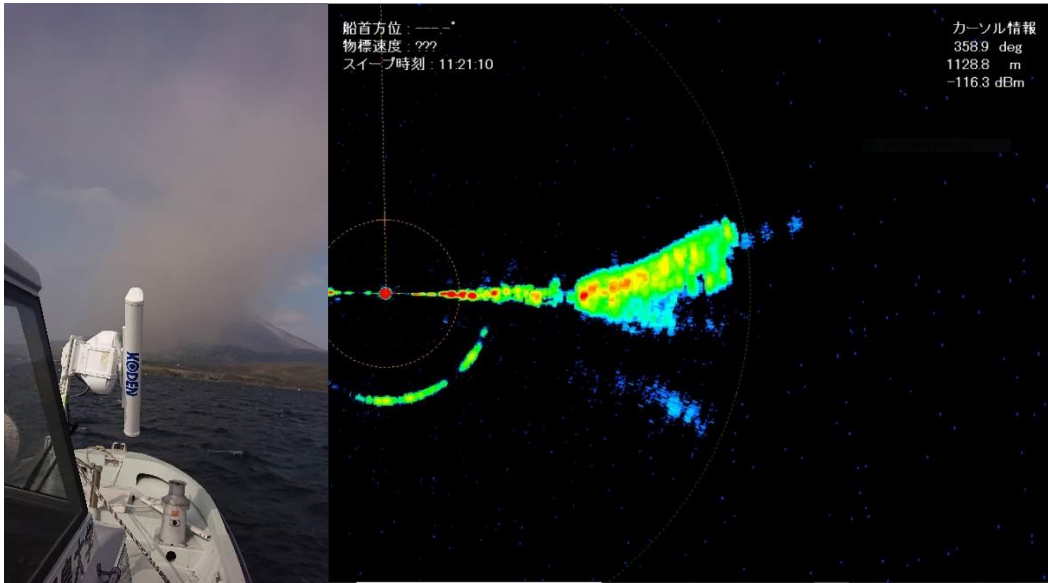


図 13 11 時 21 分の桜島噴煙写真（左）と RHI 映像（右）（2020 年 12 月 8 日有村溶岩南）

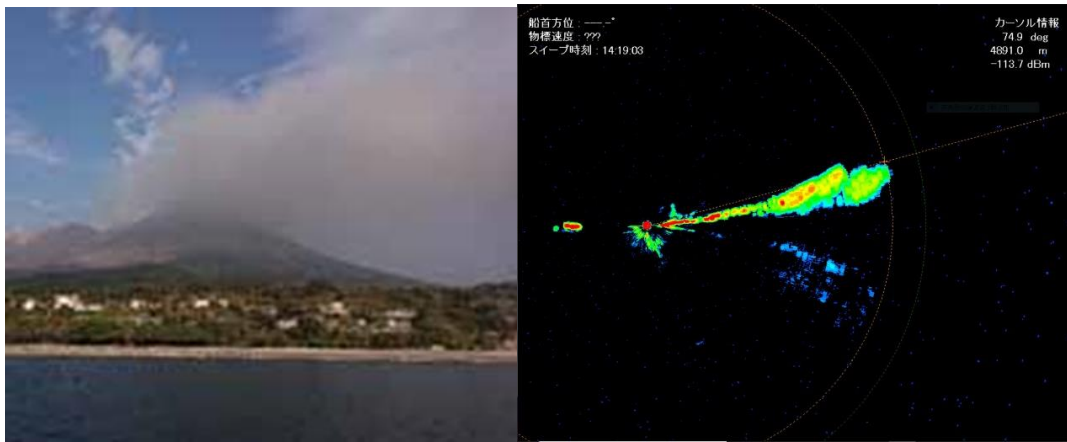


図 14 14 時 20 分の桜島噴煙写真（左）と RHI 映像（右）（2020 年 12 月 8 日湯之持木港）