

Ku バンド高速スキャンレーダと船舶用レーダによる桜島噴煙観測

西 隆昭^{1*}, 真木雅之², 牛尾知雄³, 今井克之⁴, 海賀和彦⁵, 藤吉康志⁶

Sakurajima volcanic smoke observation by Ku-band high speed scanning radar and marine radar

Takaaki Nishi^{1*}, Masayuki Maki², Tomoo Ushio³, Katuyuki Imai⁴,
Kazuhiko Kaiga⁵ and Yasushi Hujiyoshi⁶

Keywords: Ku-RAD, SSR, Marine Radar, Sakurajima, Volcanic smoke

Abstract

Mount Ontake, which is located in Nagano and the prefectural border of the Gifu Prefecture erupted on September 27, 2014, and 58 mountaineers died and five disappeared, and it was the worst volcanic hazard in Japan after the war¹). Ku-band high speed scanning radar observation system (Ku-RAD) was introduced into Kagoshima University by a revised budget from 2016 through 2017. Ku-RAD was used to observe Mt. Shinmoe after the enforcement of the Sakurajima volcanic smoke observation in the Sakurajima Kurokami district in Takaharu-cho, Miyazaki. Ku-RAD was installed in the Faculty of Fisheries Building No. 1, on the ridge roof and began to be used to observe Mt. Sakurajima from Kagoshima University in 2020²), but it was damaged by typhoon 10 on September 6 and had to be repaired³).

2014年9月27日長野県と岐阜県の県境に位置する御嶽山が噴火して登山者ら58名が死亡、行方不明5人、日本における戦後最悪の火山災害となった¹⁾。

2016年から2017年にかけて鹿児島大学にKuバンド高速スキャンレーダ観測システム(Ku-RAD)が導入された。Ku-RADは桜島黒神地区での桜島噴煙観測を実施後に宮崎県高原町から新燃岳を観測した。2020年には鹿児島大学から桜島を観測するために水産学部1号館棟屋に設置し調整を始めたが、大きな被害を出した9月6日の台風10号はKu-RADのレドームを剥がす被害を与えた²⁾。被害はレドーム内の機器を使用不能にする規模であったが、送受信機の更新と大阪大学の協力で、2021年度末に稼働できるまでになり調整を続け、2022年9月に

は期待した性能を発揮し観測結果を発信できるようになった。Ku-RADは他の気象レーダに比べて小さく機動的ではあるが、移動にはクレーン付きトラックが必要になる。小型船用レーダは人が持てる程度の重量であり普通車で持ち運びでき、機動性が高いので桜島で同時に観測し噴煙観測のプラットフォームを構築し観測することを目的とした³⁾。桜島の噴煙はpHが3くらいの酸性であるので、農地にも影響を与えるが、表面が弱アルカリの鹿児島湾に降灰が到達するとpHの変化が予想され、少なからず水産業への影響が考えられる。桜島降灰の機動的観測は農業・水産業へも貢献すると期待される。

¹ 鹿児島大学水産学部

² 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター桜島火山観測所

³ 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻センシングシステム領域

⁴ 住友電設株式会社

⁵ 光電製作所

⁶ 北海道大学低温科学研究所

* Corresponding Author: Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 4-50-20 Shimoarata, Kagoshima 890-0056, Japan
Email: nishi@fish.kagoshima-u.ac.jp

方 法

観測レーダの配置

桜島の噴煙観測は鹿児島大学下荒田キャンパスにある水産学部1号館棟屋のKu-RAD, 京都大学桜島火山観測所(SVO)屋上の固体化船舶レーダ, 有村川右岸の固体化船舶レーダそして京都大学黒神観測所の船舶用レーダを配置して連続観測した (Fig. 1)。



Fig.1. Sakurajima volcanic smoke observation radar configuration, Ku-RAD (Shimoarata), Solid State Marine Radar:SSR (SVO), SSR (Arimura Riv.), Marine Radar (Kurokami), Kashmir 3D.

機器の構成

1. Ku バンド高速スキャンレーダ

Ku バンド高速スキャンレーダ観測システムはKu-RAD 空中線部, Control Panel, 信号処理部, 2次データ受信 PC そして外部出力用コンピュータで構成される (Fig. 2)。信号処理部は信号処理装置, データ処理 PC, データ保存 PC, 基準クロック用信号発生器, IF ユニット, AC100V 用 UPS そして AC200V 用 UPS で構成される (Fig. 3)⁴⁾。

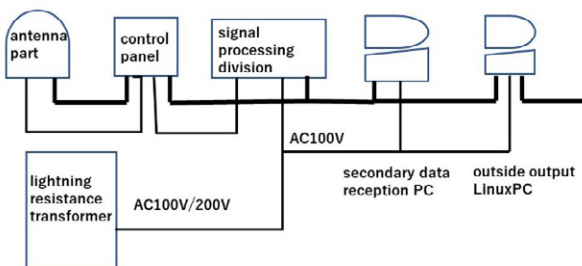


Fig.2. Ku-RAD signal processing system

Ku-RAD 空中線部の観測範囲は最大で方位角 360° 仰角 90° あり, 送受アンテナの指向特性は分解能 3° のペンシルビームである。一般的に気象レーダの指向特性はパラボラアンテナで実現するが, Ku-RAD はルネベルグレンズを使用するので, パラボラ方式より高速の走査が可能となり全周のスパイラル観測を1分強の速さで完了する⁴⁾。パルス繰り返し周期は260416nsで, 70km以上を観

測できることになるが, ビーム幅は 3° とXバンドMPレーダの約 1° に比べ3倍であることや出力が3Wと2桁以下に小さいので, 観測半径は20km以下としている⁵⁾。

これらの機器はLANで信号伝達を行い機能する。システム内のLAN接続は, 2次データ受信PC外部出力用PCまで接続されている。外部出力用PCはKu-RAD用のLANポート以外に, 外部出力用LANポートもあり積分された観測データをシステムの外部に供給できるようになっている。

耐雷トランスへは商用電源が供給されており, 耐雷トランスを経由してKu-RADシステムへAC100V/AC200Vが供給される。鹿児島では落雷が発生し, 梅雨の終盤には被害も報告される。被雷は空中からと電源からが考えられるが, 耐雷トランスは電源からの被雷を抑制する装置である。水産学部のレーダシミュレータ装置が電源から被雷した事例があるので効果が期待できる。空中からの被雷予防として避雷針が設置してあるが, 空中線側の被雷対策として筐体をED接地に接続した。



Fig3. Photograph of Ku-band high speed scanning radar

2. 固体化船舶用レーダ

京都大学桜島火山観測所(SVO)屋上と有村川右岸には固体化船舶レーダ (Solid State marine Radar: SSR) が設置され, アンテナユニットと制御監視PCで構成され, 信号の受け渡しはLANの protocolsで行われるので信号線はLANケーブルだけで良く, 取り扱いが容易になった⁶⁾⁷⁾。PCには保存用HDDが接続される (Fig. 4)。SSRの機器は人が持てるので, 比較的容易に設置できる (Fig. 5)。

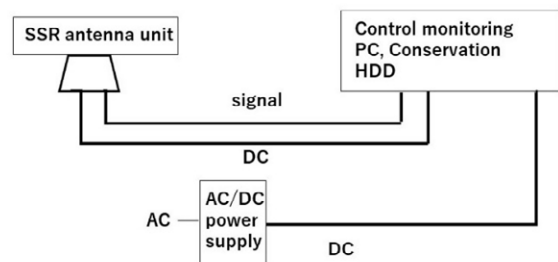


Fig.4. SVO, Arimura Riv. Solid State marine Radar configuration



Fig.5. SVO antenna unit (upper left), SVO Control monitoring PC (upper right), Arimura Riv. antenna unit (lower left), Arimura Riv. Control monitoring PC (lower right)

3. 船舶用レーダ（マグネトロン発振）

桜島を3方向から観測するためには、3台の船舶用レーダが必要であるがSSRは2台であるので、京都大学黒神観測所には従来のマグネトロンで発振する船舶用レーダを設置して桜島の噴煙を観測した（Figs. 6, 7）⁸⁾。

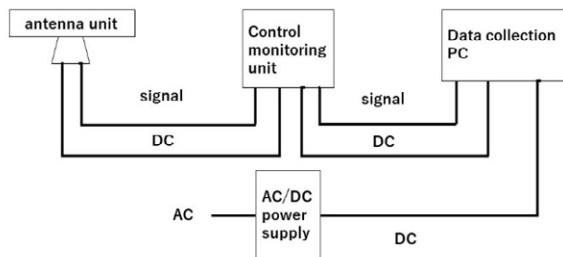


Fig.6. Kurokami marine Radar configuration



Fig.7. Kurokami antenna unit (left), control monitoring unit (right)

レーダユニットと制御監視装置間の信号受け渡しは専用線で行われる。制御監視装置で受け渡しビデオ、トリガ、方位、船首の信号をデータ収集PCへ分岐して、高速A/D変換でデジタル化して1画面ずつ保存する。

結 果

2022年9月26日から連続観測記録ができるようになった。11月6日までの鹿児島地方気象台火山班資料の噴火記録⁹⁾によると51回噴火記録がある（Fig. 8）。噴火は高さ900mから1,800mの噴火が主で、2,800mの噴火が最大高さであった⁹⁾。

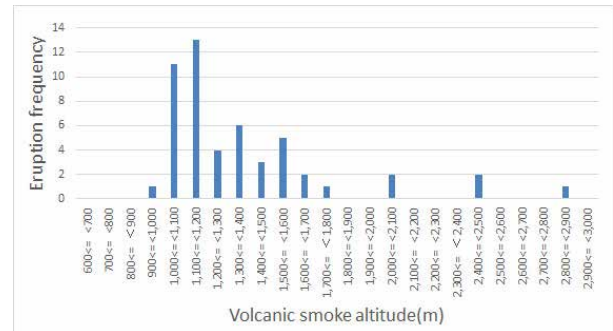


Fig.8. Eruption frequency for each volcanic smoke altitude from 9/26/2022–11/6/2022

鹿児島大学 Ku-RAD

桜島噴火口から約10kmの鹿児島大学水産学部のレーダサイトでは、9件の事象が観測できた。9月30日11時44分から11時57分の12分間の事象が最大である。気象庁の記録では、噴煙高2,800mであるが南岳が1,040mであるので、レーダサイトの高さから4000m近くまで上昇している（Fig. 9）。

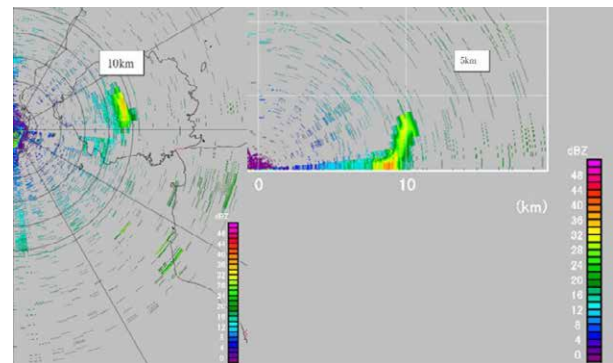


Fig. 9. Sakurajima volcanic smoke, Elevation angle 3 ° PPI (left), RHI (right) 09/30/2022, 11:49

9月30日11時44分から11時57分の12分間の桜島噴火の事象はKu-RADでは14回観測されているのに対して、垂水の国交省の二重偏波Xバンドレーダは観測間隔が5分であるので2回である。Ku-RADは次のRHI記録のように約1分毎に噴煙が成長して山頂の東側に落下している（Figs. 10, 11）。噴煙の成長を確認するには動画やアニメーションが適しているが、紙面では不可能であるので動きを示すために時刻が経過する画像を並べた。

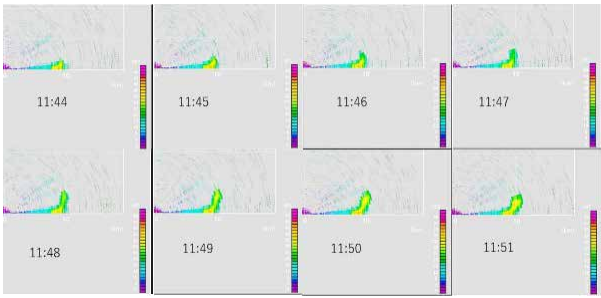


Fig.10. Sakurajima volcanic smoke record -1,09/30/2022, 11:44–11:57

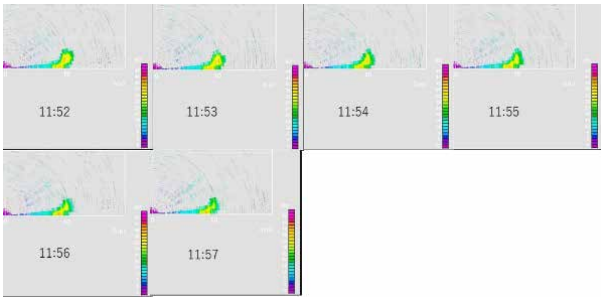


Fig.11. Sakurajima volcanic smoke record -, 09/30/2022,11:44–11:57

国交省垂水レーダ

桜島を観測できる気象レーダシステムとしては、垂水に国交省の二重偏波 X バンドレーダがあり、半径 80km を 5 分で観測する。ただし、仰角 1.7° と 6° についてはそれぞれ 2 分間隔で観測する。「三次元気象レーダデータ解析ツール」(ANT3D: Analytical Tools for Three-Dimensional Weather Radar Data)⁴⁾で分析した 2 分間隔の PPI 表示結果を Fig. 12 に示す。

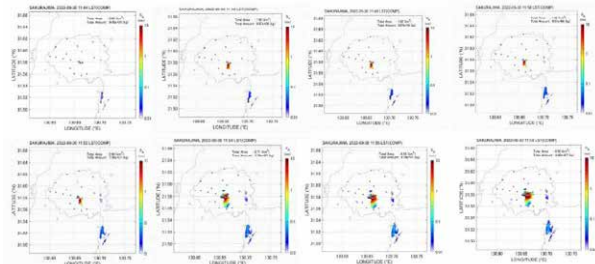


Fig.12. Sakurajima volcanic smoke record (Ministry of Land, Infrastructure and Transport Tarumizu XMP radar), 09/30/2022, 11:44–11:58

桜島船舶用レーダ

船舶用レーダはアンテナユニットがスロットアンテナであるので鉛直方向にビーム幅を狭くする向きに回転させる Range Height Indicator (RHI) で観測した。アンテナ回転数は 24rpm であるので 2.5 秒 / 1 回転と気象レーダに比べて高速に観測できる。

SVO (京大桜島火山観測所) SSR

Fig. 13 に SVO の 1 回転毎の結果を示す。左上は噴火

していないが 2.5 秒後には噴煙が観測されている。

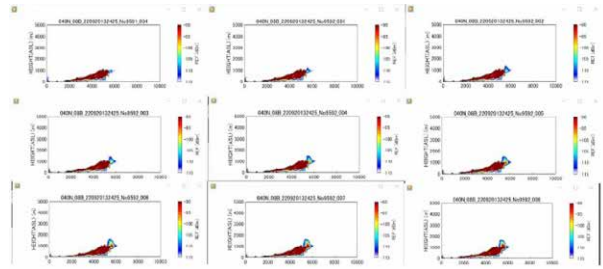


Fig.13. 9 observation image plane every 2.5 seconds in Sakurajima Volcano Observatory (SVO) just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 from 11:44:53 to 11:45:11 Left to right

観測結果を動画にすると、噴火して噴煙が上部に拡大するのがよくわかる。ここでは小さな変化に見えるので、Ku-RAD に合わせて 5 分ごとの結果を並べた図を作成した (Fig.14, Fig. 15)。縦軸はレーダ設置場所からの高度 (m)、横軸は水平距離 (m)、カラスケールは信号強度 (dBm) である。スケールが表示できるのは SSR の観測データに含まれる数値の信号強度を「三次元気象レーダデータ解析ツール」(ANT3D: Analytical Tools for Three-Dimensional Weather Radar Data) を利用して対応できるようにしたためである。14 分間の SVO からの観測では噴煙が真上に上昇して 3000m 付近まで達した後に東側へ傾きながら崩れて小さくなったことが分かる。

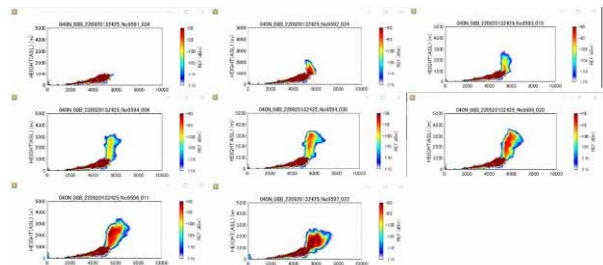


Fig.14. 8 observation image plane every one minute in SVO bank just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 11:44–11:51 Left to right

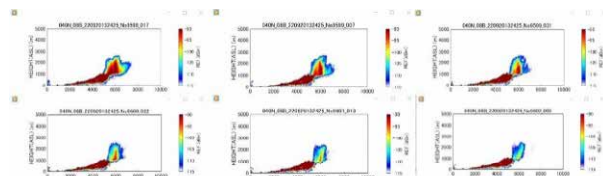


Fig.15. 6 observation image plane every one minute in SVO just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 11:52–11:57 Left to right

有村川 SSR

有村川右岸に設置して桜島南岳を RHI で 1 回転毎観測した結果を Fig.16 に示す。SVO より噴煙の様子が大きく映っている。

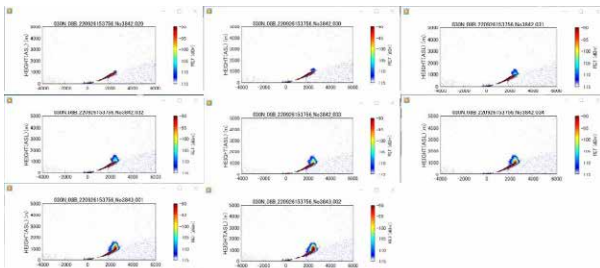


Fig.16. 8 observation image plane every 2.5 seconds in ARIMURA Riv. right bank just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 from 11:44:53 to 11:45:11 Left to right

5分毎の観測結果 Fig.17 および Fig.18 に示す。噴煙が3000m 付近まで上がってから、有村川の方向に崩れてきている。距離2000m 付近から円状の境界はP0N(単パルス)とQ0N(チャープ)の境である。有村川まで降灰が届いていることがわかる。

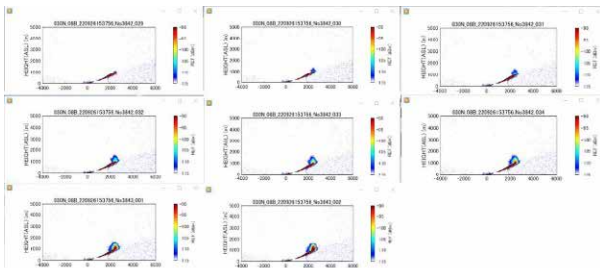


Fig.17. 8 observation image plane every one minute in ARIMURA Riv. right bank just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 11:44–11:51 Left to right

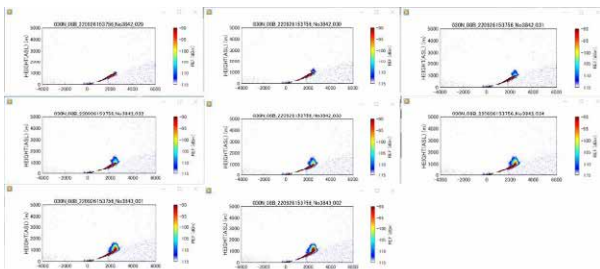


Fig.18. 6 observation image plane every one minute in ARIMURA Riv. right bank just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 11:52–11:57 Left to right

黒神レーダ

黒神に設置して桜島南岳をRHIで1回転毎観測した結果を Fig.19 に示す。黒神の1回転毎記録は2.5秒毎に噴煙が上がっていく様子が確認できる。5分毎に噴煙を並べた Fig.20, Fig.21 では、3000m 以上に噴煙が立ち上がった後に黒神の2,000m 近くまで降灰が届いていることがわかる。

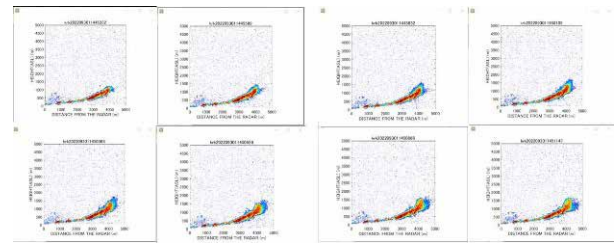


Fig.19. 8 observation image plane every 2.5 seconds in KUROKAMI just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 from 11:44:53 to 11:45:11 Left to right

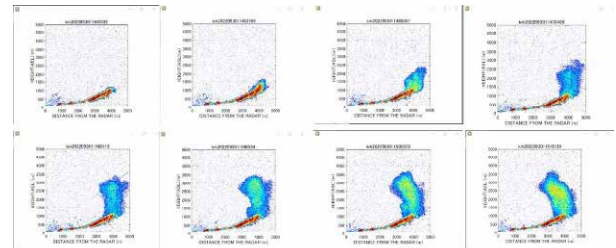


Fig.20. 8 observation image plane every one minute in KUROKAMI just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 11:44–11:51 Left to right

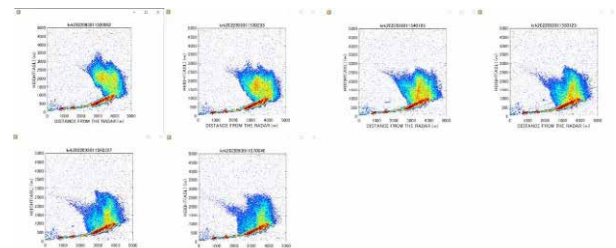


Fig.21. 6 observation image plane every one minute in KUROKAMI just after the Sakurajima eruption 2022/09/30 11:52–11:57 Left to right

考 察

桜島の降灰を観測するためにKuバンド高速スキャンレーダ、国土交通省のXバンドレーダそして固体化船舶用レーダ、マグネトロン発振の船舶用レーダを用いて同時観測を実施した。気象レーダは鹿児島市と垂水市にあり南岳を西側と東側から対向して観測できた。レーダサイトからの距離は10km程のであるがRHI, PPI (Plan Position Indicator) 表示と違いはあるが、噴煙の移動傾向は把握できる。一方で1分から2分間隔より短い間隔のデータは無く、桜島をSVO, 有村川右岸, 黒神に船舶用レーダで囲んで観測することによって2.5秒毎で2km–4kmの距離の観測データを補完できた。

SVOの1分毎の映像は直上に噴煙が上がり、東側に傾いて崩れ地上に落ちて映像に映らなくなる。有村川右岸の映像は噴煙が直上に上がった後にレーダサイト側に崩れて落下してサイトまで降灰があった。黒神の映像は噴煙が直上に上がった後にレーダサイト側に崩れて落下する

ところは有村右岸と同様であるが、降灰がレーダサイトに近づくのは2km付近くらいまでであった。したがって、降灰が広がってゆく方向は南側ということが推測できる。

結 論

気象レーダで概略を把握し、詳細を船舶レーダで機動的に観測するプラットフォームが有効であることが実験で確認できた。今後は船舶用レーダの映像を重ね合わせることによって、数十分の噴煙挙動の予想や、2.5秒という短い間隔で観測できることから噴火時刻の検出を期待でき、桜島近くの海面養殖の対策データとして活用まで可能性が広がる。

謝 辞

本研究はSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）、レジリエントな防災・減災機能の強化プロジェクトにより実施された。黒神の船舶用レーダとデータ収集PCは藤吉康志北海道大学名誉教授に提供頂いた謝意を申し上げる。SVOと有村川右岸の固体化船舶用レーダは光電製作所 海賀和彦様に提供いただいた謝意を申し上げる。京都大学防災研究所桜島火山観測所 井口正人所長には桜島観測所と黒神観測所を船舶用レーダの観測場所として提供・協力いただき謝意を申し上げる。国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所には有村川右岸の観測サイトを提供してくださり謝意を申し上げる。

引用文献

- 1) 御嶽山 有史以降の火山活動, 気象庁, 平成 26 年 9 月 27 日
- 2) 災害をもたらした気象事例 台風第 10 号による暴風, 大雨等, 気象庁, 令和 2 年 9 月 10 日
- 3) SKOLNIC, Introduction to Radar Systems, 1962, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. 40-43.
- 4) 桜島大規模噴火を想定した気象レーダ降灰モニタリングプラットフォーム, 鹿児島大学地震火山地域防災センター年報, 真木他, 2022 年 3 月
- 5) XバンドMPレーダの紹介, 防災科研, <http://mp-radar.bosai.go.jp/niedradar.html>
- 6) 海洋計測工学概論 (改訂版), 田口一夫・田畑雅洋, 成山堂, 218-220, 平成 17 年 8 月.
- 7) パケットキャプチャ入門, リックテレコム, 60-66, 2018 年 5 月.
- 8) レーダ信号処理技術, 電子情報通信学会, 11-44, 平成 3 年 9 月

9) 鹿児島地方気象台火山班資料の噴火記録, 2022 年