

船舶レーダによる桜島噴煙の機動的観測

Mobile Observation of the Sakurajima Eruption Cloud by the Marine Radar

西隆昭・眞木雅之・中道治久・海賀和彦⁽¹⁾・
藤吉康志⁽²⁾

Takaaki NISHI, Masayuki MAKI, Haruhisa NAKAMICHI, Kazuhiko KAIGA⁽¹⁾
and Yasushi FUJIYOSHI⁽²⁾

(1) 光電製作所

(2) 北海道大学

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

(2) Hokkaido Univ., Japan

Synopsis

Three dimensions of general eruption cloud observation of the volcano is conducted in meteorological radar, and pencil beam is used. When observe the meteorological radar in a spiral, take observing time from five minutes to around ten minutes. On the other hand, because fan beam can observe turn in the high speed of 2.5 seconds, the marine radar can expect that observe motion of the eruption cloud in the period that is shorter than meteorological radar. From 2018 including observation of the eruption cloud of Sakurajima, Continued RHI (Range Height Indicator) observation mainly in Sakurajima observatory (SVO: Sakurajima volcano observatory) and Kurokami. The RHI observation can measure vertical direction of the eruption cloud in detail, however, it is hard to get the horizontal direction of movement, In adding PPI observation to Kurokami in PPI observation, investigated whether this research could grasp horizontal displacement of the eruption cloud, and got the record which eruption cloud horizontally moved.

キーワード: 船舶レーダ, RHI, PPI, 桜島, 噴煙観測

Keywords: Marine radar, RHI, PPI, Sakurajima, eruption cloud observation

1. はじめに

火山の一般的な噴煙観察は3次元気象レーダで実施され、ペンシルビームが使われる(Radar for Meteorologists Third Edition, 1997, Ronald E. Rinehart). 気象レーダはらせん状に観測すると5分から10分程度の観測時間がかかる(気象と大気のレーダーリモートセンシング, 2005, 深尾昌一郎 他1名). 一方, 船舶レーダはファンビームが1回転を2.5秒の高速で観測できるので気象レーダに比べて短い周期で噴煙

の動きを観測することが期待できる(KODEN radar MDC5200-5500 product data). 2018年から桜島の噴煙の観測を始め, 主に桜島観測所(SVO: Sakurajima volcano observatory)と黒神でRHI(Range Height Indicator)観測を継続してきた(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, 2022, Mem. Fac. Fish. Kagoshima Univ., Vol. 71) (Figure 1).

RHI観測では噴煙の鉛直方向を詳細に測定できるが, 水平の移動方向はとらえにくいので, PPI観測を黒神にPPI観測を追加することで, 噴煙の水平移動を

把握できるか調査し、噴煙が水平移動する記録を得た。

2. 実験方法

既に設置している桜島の西側のSVO(Sakurajima volcano observatory)と東側の黒神に船舶用レーダで南岳をRHI(Range Height Indicator)観測している。2024年5月14日に黒神へPPI(Plan Position Indicator)観測を加えて、噴煙の水平移動を観測した。(Figure 1)。



Figure 1 Marine radar configuration of the Sakurajima eruption cloud observation.

RHI観測とPPI観測のための船舶用レーダは両方ともX-bandであるので、偏波面が違って干渉する可能性があったので、場所は黒神観測室を選択し距離を30mほどとった(レーダ工学の基礎, 1971,5吉村義弘他1名)(Figure 2)。



Fig. 2-a



Fig. 2-b

Figure 2 Antenna arrangement of the RHI radar and the PPI radar of Kurokami(a), PPI radar and Sakurajima crater (b)

PPI観測では水平から上でビーム角が 11° となり南岳山頂(13°)に届かないのでアンテナに迎角を加える治具で 25° にしてビームは水平から $36^\circ \sim 14^\circ$ となり南岳上空を観測できるようになった(Figure 3)。 11° はアンテナ仰角 0° での上側範囲、 $14^\circ \sim 36^\circ$ はアンテナの仰角を 25° にした場合の上下ビーム範囲。 13° は桜島南岳山頂の仰角である。

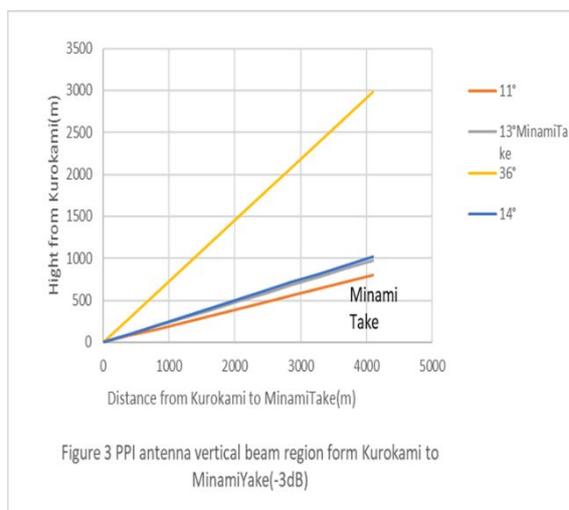


Figure 3 PPI antenna vertical beam region form Kurokami to MinamiTake(-3dB)

船舶レーダのアンテナは回転台に仰角 0° で据え付けられているので、回転台とアンテナの間に 10° と 15° の仰角付加治具を装着して、仰角を 25° とし、アンテナの上下方向-3dBビーム下端が桜島南岳になった(Figure 4).

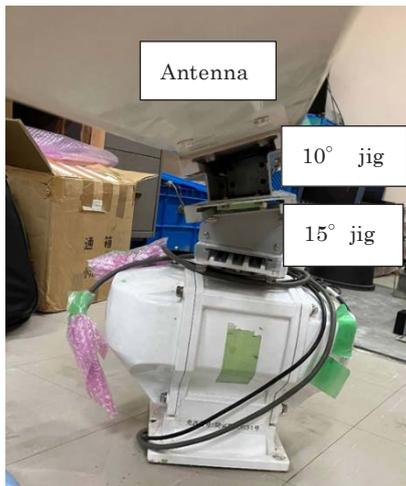


Figure 4 Jig arming example of antenna elevation angle 25 degrees

Table 1 Marine radar specification

Item	Specification	Remarks
Antenna		195cm(6ft)
Horizontal beam width	1.2°	-3dB
Vertical beam width	22°	
Rotation number	24rpm	2.5s/Rotation
Solid State Radar (SSR) Transmission output (Peak-to-peak value)	100W±50% 400W±50%	
Transmit frequencies	9380~9420MHz	P0N:9390 ± 10MHz Q0N:9410 ± 10MHz
Transmission pulse width	P0N:0.08~1.2 μs Q0N:5~18 μs	
Sweep frequency	Q0N:5,10,15MHz	
Mag. Radar Transmission output (Peak-to-peak value)	25kW	
Transmit frequencies	9410±30MHz	
Transmission pulse width	0.08~1.2 μs	

X-band船舶レーダは水平ビーム幅1.2°，垂直ビーム幅22°長さ195cm(6ft)のアンテナを使用し，黒神のPPI用レーダは固体化レーダ，RHI用レーダはマグネトロンレーダである．そして，SVOの船舶用レーダは固体化レーダでRHI観測である．発振器の違いでマグネトロンまたは固体と呼ばれる．マグネトロンレーダはパルス幅0.08~1.2 μs出力25kWの信号を出力し，固体化レーダは固体化出力素子を使用しパルス幅5~18 μs出力100Wから400W信号を出力する．固体化レーダの出力はマグネトロンより小さいので，パルス圧縮を使いマグネトロンレーダと同等の出力とパルス幅を実現している．マグネトロンレーダと同等の性能を実現できるので，固体化レーダは真空管の交換が必要ないことや送信信号が安定していることなどが有利である(Table 1).

3. 結果

黒神に設置したPPIレーダの映像はFigure5左のようになった．中心が黒神で上に桜島の山体が映り，山体の左側に南岳噴火口が影となっている．仰角0°では上方向ビーム幅11°であるから，山頂の13°より低くなり映像の強度が強い．そこで，アンテナの仰角を25°上げて14°~36°にした．結果がFig. 5(a)となった．

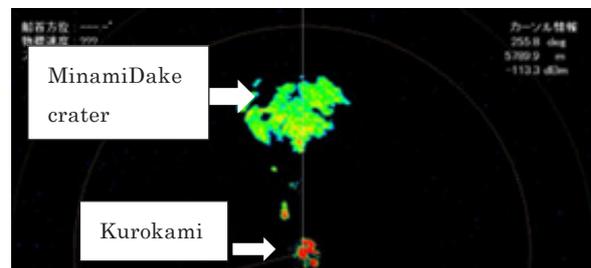


Fig. 5 (a)

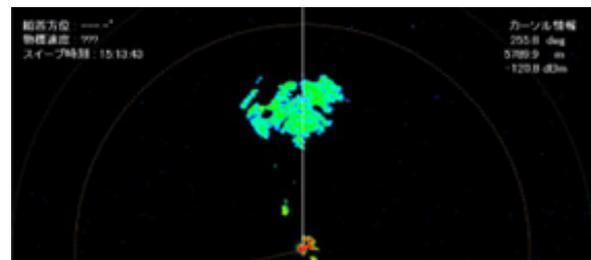
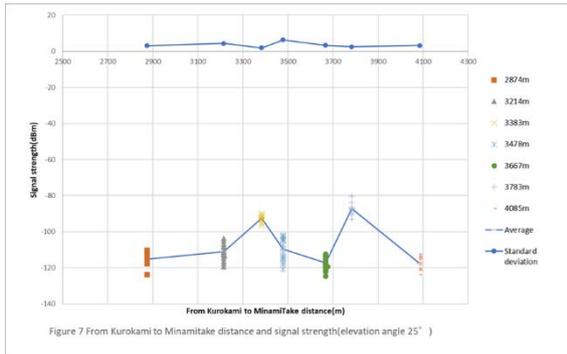
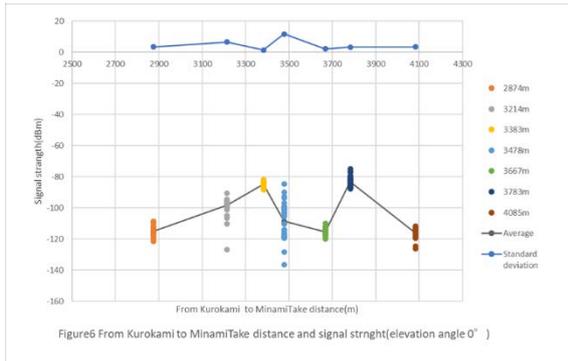


Fig. 5-(b)

Figure 5 Observed image from Kurokami to MinamiDake, elevation angle 0°(a) and 25°(b)

仰角0°と25°では山体の映像面積が仰角25°のほうが小さくなっているように見える．また映像の色も暖色が少なくなり強度が弱くなっているように

見える。



黒神から南岳噴火口までの経路で2874m, 3214m, 3383m, 3478m, 3667m, 3783m, 4085mの20分間の信号強度を読み取り、平均と標準偏差を求めたのがFigure 6とFigure 7である。信号強度の強い部分を読むと平均で25°は0°より7.7dBm~3.9dBm(標準偏差2.0~3.4)くらい低いので噴煙を良く観測できることが期待される。距離3478mでは標準偏差が6.4~11.8と比較的高いのはground clutterの切れ目であることを示している。

黒神で仰角25°にするとPPI上下ビームが南岳山頂から高度3000mまで到達することと、ground clutterが低減するので、RHI観測と同時に噴煙をPPI観測することとした。観測期間は2024年5月14日から7月23日であった。この期間で2000m以上の噴火があったのはTable 2のとおりであった。

Table 2 Sakurajima eruption more than 2,000m of the observation period (Kagoshima region meteorological observatory)

Time and date Yyyy/mm/dd/ hh:mm	Altitude (m)	Current direction
2024/5/15 14:42	2000	SE
2024/7/14 18:19	4500	NE
2024/7/20 13:58	3700	N

2024年5月15日のRHI噴火記録は、黒神側とSVO側で影像が観測できるが噴煙の流れる方向は東西方向しか分からない。

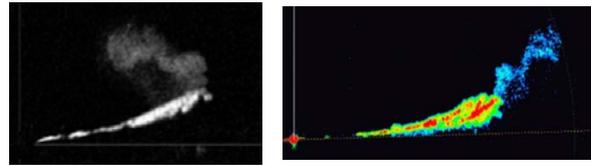


Figure 8 Sakurajima eruption cloud RHI observation result of 2024/05/15 14:47

Observation from Kurokami facing west (left), Observation from SVO facing east(right)

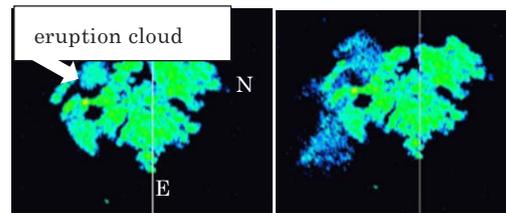


Figure 9 Sakurajima eruption cloud PPI observation result of 2024/05/15 14:42(left), 14:47(right)

Figure 9は黒神で観測したPPI観測結果である。左側は噴火直後で噴火口にエコーがあり、その後SE方向に噴煙が流れていることが右側の映像で分かる。

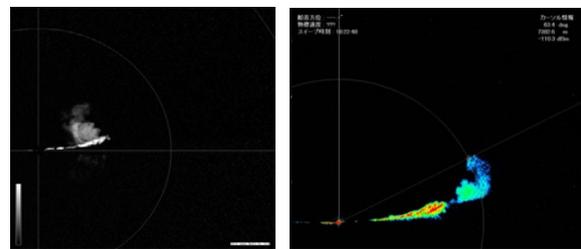


Figure 10 Sakurajima eruption cloud RHI observation result of 2024/07/14 Observation from Kurokami facing west 18:22 (left), Observation from SVO facing east18:23(right)

2024年7月14日の噴煙のRHI観測結果はFigure 10である。噴火した後に東方向に噴煙が流れているが5月15日と同様に方位までは分からない。

Figure 11は黒神で観測したPPI観測結果である。左側は噴火直後で噴火口にエコーがあり、その後NE方向に噴煙が流れており黒神の北を通り噴火口から8km付近まで噴煙が流れていることが分かる。

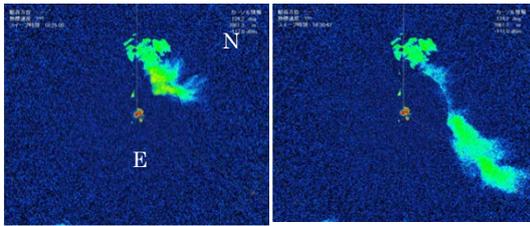


Figure 11 Sakurajima eruption cloud PPI observation result of 2024/07/14 18:25(left), 18:30(right)

2024年7月20日の噴煙のRHI観測結果はFigure 12である。噴火した後にE方向に噴煙が流れているが5月15日と同様に方位までは分からない。

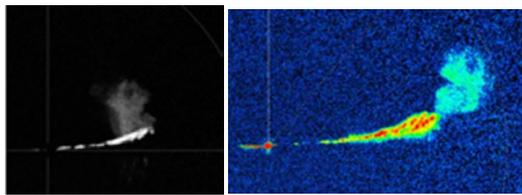


Figure 12 Sakurajima eruption cloud RHI observation result of 2024/07/20 Observation from Kurokami facing west 14:03 (left), Observation from SVO facing east 14:03(right).

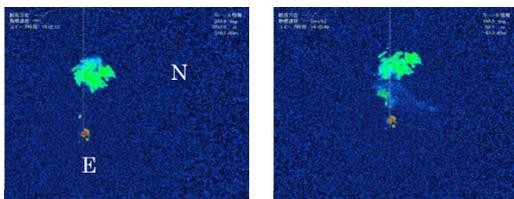


Figure 13 Sakurajima eruption cloud PPI observation result of 2024/07/20 14:02(left), 14:10(right).

Figure 13は黒神で観測したPPI観測結果である。左側は噴火直後で噴火口にエコーがあり、その後E方向に噴煙が流れているが、噴火口からレーダが設置してある黒神方向である。黒神のレーダはSSRであるので、レーダから2km付近は送信方式がQ0Nであるので (Table 1), 映像が弱い。また、流向が気象台発表と異なる。

4. 結論

船舶レーダで噴煙鉛直方向の変化を観察するためにSVOと黒神に船舶レーダを設置してRHI観測してきた。RHI観測では分からない噴煙の流向を求めるためにPPI観測を加えて機動的観測を向上させる事を検討した。PPIの仰角を 0° から 25° にするとgrand

clutterが7.7-3.9dB下がり効果が確認された。

観測期間に3回の2000m以上の噴火があり、PPIで観測された噴煙は噴火直後から8km遠方まで噴煙の方位が観測され、噴煙が流れる方位が加わり動態がよりわかりやすくなった。ただし、弱くなっても桜島のgrand clutterが残っているので、噴煙を確認できない場所があった。噴煙がPPIレーダに向かって流れていくとエコーが弱くなった。これはビームが狭くなり当たらないことと、送信方式がP0Nと単パルス方式になるためであると考えられる。

5. 謝辞

本研究は文科省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト (課題22K03760)」と京大防災研究所一般共同研究「極端現象のレーダマルチセンシング研究」の助成を受けた。

6. 参考文献

- 西 隆昭・真木雅之・牛尾知雄・今井克之・海賀和彦・藤吉康志(2022): 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, Mem. Fac. Fish. Kagoshima Univ., Vol. 71, pp. 1~6.
- 深尾昌一郎・浜津亨助(2005): 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 9章, pp.295-320.
- 吉村義弘・藤森允之(1971): レーダ工学の基礎, 啓学出版, pp.144-146.
- KODEN radar MDC5200-5500 product data.
- Ronald E. Rinehart (1997): Radar for Meteorologists Third Edition, Rinehart Publications, Chapter 2, pp. 15-45.

(論文受理日: 2025年8月29日)