

有珠山における土砂流を考慮した可搬型気象ドップラーレーダによる降雨観測の研究

株式会社 北海道気象技術センター ○鶴巻 亮一、松岡 直基

1. はじめに

有珠山は洞爺湖南方数 km に位置する標高 737m の活火山である。近年では 1977 年, 2000 年に噴火し, 20-30 年の周期で噴火を繰り返すといわれている。火山噴火により噴出された火山灰や火山岩塊などの土砂が堆積したところに強雨があると, 火山泥流が発生し, ふもとで大きな人的・物的被害をもたらす。1978 年噴火では, 西山川および小有珠川下流で強雨による大規模な泥流によって犠牲者を出した (Kadomura et al., 1979)。降灰後の土石流や泥流などによる二次被害を軽減するため, 山体部の雨量監視が重要となる。

有珠山には山頂や山腹, その周辺に地上雨量計が設置されている (図 1)。しかし, 火山が噴火すると, 山体に設置されている雨量計は, (1) 火山灰が堆積すること, (2) 地殻変動で雨量計の水平を維持できなくなるにより使用不能となる。2000 年噴火では, 山頂周辺の雨量計が機能しなくなり, 比較的 안전한山麓に臨時的雨量計を緊急配備した。しかし, 山体部は地形性降雨によって平地よりも雨量は増加する。そこで, 山体部の正確な雨量把握に有効的なのがレーダ雨量観測である。危険な火山噴火の影響の小さな離れた場所から山体部に降る雨の量を知ることができる。



図 1. 有珠山頂およびその周辺に設置されている地上雨量計の位置 (三豊, 南外輪山, 北外輪山, 有珠中学校)。

気象庁では, 現業運用しているレーダ雨量計や地上及び高層観測の結果, さらに国土交通省によって管理されるレーダ雨量計データを用いて解析された高解像度降水ナウキャスト (NOWC) がレーダ雨量計データとしてほぼリアルタイムに提供される。2000 年噴火当時のレーダ解析雨量 (5km メッシュ, 1 時間分解能) と比較すると, 現在では NOWC は非常に高精度 (250m メッシュ, 5 分間分解能) にはなったが, 二次泥流発生監視目的としてそれが十分であるかは不明である。

本研究では, 設置が容易な可搬型レーダ雨量計であるマイクロレインレーダ (MRR) を用いて有珠山頂の降雨観測をおこない, 噴火に備えた新たな雨量観測体制の検討をおこなうことを目的とする。

2. マイクロレインレーダ (MRR)

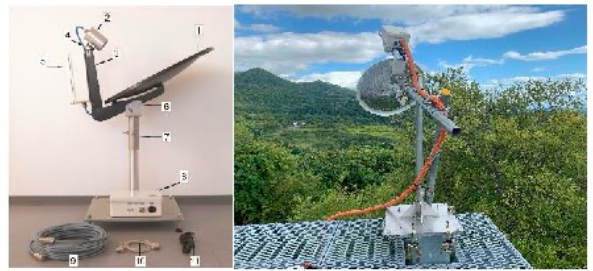


図 2. 左図は MRR のシステム構成要素。右図は三豊中継局にて, アンテナを有珠山頂に向けて観測しているときの様子。

図 2 は MRR (METEK GmbH Germany) の全体図 (左) と有珠での観測風景 (右) である。MRR 全体は重量 17.5kg, 幅 80cm, 奥行 60cm, 高さ 85cm で, 送信系と受信系が同一のパラボラアンテナに代表される様々な観測部品から構成される。MRR は中心波長 $\lambda_0 = 12.4\text{mm}$ (中心振動数 24.230GHz) のマイクロ波を変調 (FM) しながら連続的 (CW) に照射し, 大気に浮遊する雨滴や氷粒子, ガス粒子から散乱してきた電磁波の反射強度や波長のずれ (Doppler-shift) を観測し, 単位時間あたりに降る雨の量 (雨量強度) を推定する。

MRR による雨量推定は, アンテナを真上に向けて観測するときのみ高い精度が保証される (Peters et al., 2010)。しかし, 本研究ではアンテナを斜めに傾けて, 噴火の影響の小さい遠方から噴火口上空に向けて観測を行うことを想定するため, この斜め観測が目的達成に耐えうる十分な精度を確保できるか検証する必要がある。

3. 輻射輸送方程式

MRR から照射された電磁波は光路途中の雨滴・氷粒子やその他の固体微粒子, ガス分子による吸収と散乱をうけて減光する。平行平板近似を仮定するとき, 波長 λ_0 について MRR からの距離 s における単位時間・単位面積あたりの上向き放射フラックスを $F_{\lambda_0}^{\uparrow}(s)$, 下向き放射フラックスを $F_{\lambda_0}^{\downarrow}(s)$ で表すと, 輻射輸送方程式は

$$\frac{dF_{\lambda_0}^{\uparrow}}{ds} = -\kappa(s) F_{\lambda_0}^{\uparrow}(s) + \kappa_{\text{back}}(s) F_{\lambda_0}^{\downarrow}(s),$$

$$\frac{dF_{\lambda_0}^{\downarrow}}{ds} = \kappa(s) F_{\lambda_0}^{\downarrow}(s) - \kappa_{\text{back}}(s) F_{\lambda_0}^{\uparrow}(s)$$

であるとする。ここに, κ と κ_{back} はそれぞれ, 波長 λ_0 における減光係数と後方散乱係数である。熱放射 B_{λ_0} は無視できるほど小さいと仮定した。 $\therefore \pi B_{\lambda_0}(300\text{K}) / F_{\lambda_0} \ll 1$ 。

4. 雨滴の光学特性

大気中にはさまざまなサイズの雨滴が存在し, その数密度はおのおののサイズごとまたは位置によって異なる

る。そのような場合、減光係数 κ は、雨滴の数密度分布関数 $N(a, s)$ を粒子半径 a と距離 s の関数として、
$$\kappa(s) = \int_0^{\infty} da \sigma_{\text{ext}}(a) N(a, s) = \int_0^{\infty} da Q_{\text{ext}}(a) \pi a^2 N(a, s)$$
 で与えられる。ここに、 σ_{ext} と Q_{ext} はそれぞれ、減光断面積と減光効率 (= $\sigma_{\text{ext}} / \pi a^2$) である。これより、雨滴の光学特性が MRR の受ける反射スペクトルに重要な役割を果たす。図 3 に Mie 理論 (Bohren and Huffman, 1998) に基づいて計算された波長 12.4mm における H_2O 球状圧密粒子の吸収・散乱効率 Q を粒子半径 a の関数で示した。半径 $a_0 = \lambda_0 / 2\pi \sim 2\text{mm}$ 付近で吸収・散乱が顕著であることがみてとれる。

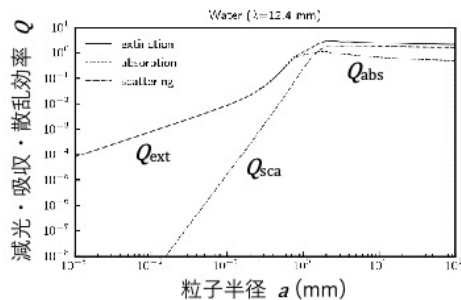


図 3. Mie 理論によって計算された波長 12.4mm における水の光学特性 (減光 Q_{ext} : 実線, 吸収 Q_{abs} : 破線, 散乱 Q_{sca} : 鎖線)。

5. 雨量強度

観測された Doppler-shift から、雨滴の落下速度 v_z が半径 a の関数として推定できれば (e.g., Atlas et al., 1973), 下式から各領域 s の雨量強度 R が求められる。

$$R(s) = \int_0^{\infty} da \frac{4}{3} \pi a^3 N(s, a) v_z(s, a).$$

6. 観測

本研究では 2022 年 6 月 30 日から 11 月 2 日まで、有珠山の北西麓に位置する三豊中継局に MRR を設置し雨量観測をおこなった。主な観測諸元を表 1 に示した。斜め観測の精度検証のため、アンテナ仰角の異なる 2 種類の観測をおこなった。レーダ (MRR, NOWC) の高高度観測に対し、両観測とも真下に地上雨量計があり比較が可能である。

表 1. MRR の観測諸元。

パラメータ	観測 1	観測 2
アンテナ仰角	90°	20°
観測期間	2022/9/26 – 11/2	2022/6/30 – 9/26
地上雨量計	三豊雨量計	南外輪山雨量計
観測高度	0 – 3,200 m	1,518 m
空間解像度	100 m	130 m
時間解像度	10 秒	10 秒

7. 結果

図 4 はある降雨イベントにおける観測 1 および観測 2 の結果である。観測 1 では MRR (赤), NOWC (青), 地上雨量計 (灰) とともに類似の傾向を示し、本手法が仕様どおりアンテナを真上に向けた場合は有効的であるこ

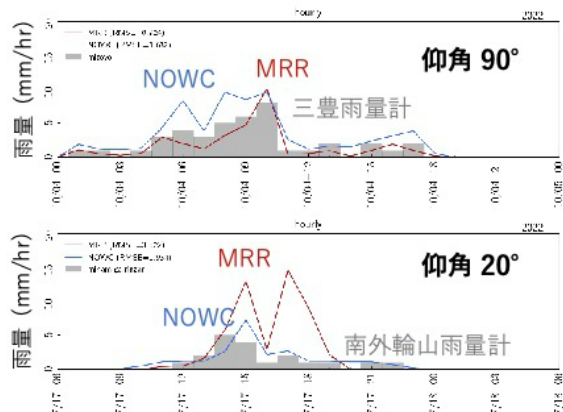


図 4. 観測 1 (上) と観測 2 (下) の雨量観測結果。観測 1 は 10/4 – 10/5, 観測 2 は 7/17 – 7/18 の降雨事例である。

とが確認できた。一方、観測 2 では MRR がほかの雨量計と比較して値の大きく異なることがみてとれる。

図 5 に、観測 2 における MRR (左図) および NOWC (右図) と南外輪山雨量計との比較を示した。NOWC は南外輪山に対して決定係数 0.78 の比較的小さいばらつきで傾き 0.97 (± 0.02) の回帰直線上にのるが、MRR の方は大きくばらつく (決定係数 0.22)。

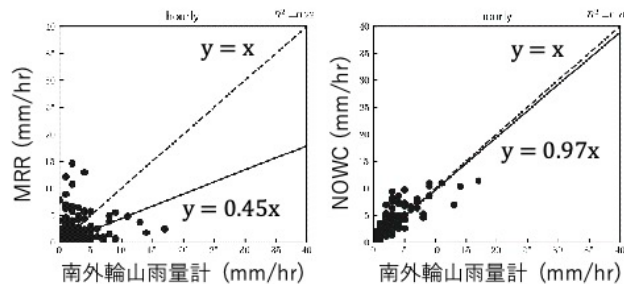


図 5. レーダ雨量 (MRR, NOWC) と南外輪山雨量との比較。

8. まとめ

本研究では、可搬型気象レーダである MRR を用いて有珠山の雨量観測をおこない、地上雨量計および高解像度降水ナウキャスト (NOWC) と比較した。結論として、2022 年の有珠山における NOWC の観測精度は高く、現状では噴火後の土砂流発生監視用としてもっとも有効的であろう。このことは、レーダ雨量データを初期値に利用している気象庁の予測雨量データの利用可能性を示唆する。また、MRR はその特性から雨滴の粒径分布の鉛直構造や反射強度が得られるので、NOWC や臨時雨量計の補正手段としての活用が考えられる。

謝辞

MRR は、藤吉康志氏 (北海道大学名誉教授) から貸与・指導を受けた。ここに記して感謝申し上げます。

Reference

- Kadomura H. et al., 1979, *Investigation of Usu Volcano Mud-Flow Disasters on October 24, 1978*, 41.
- Peters G. et al., 2010, *J. Atmos. Oceanic Technol.* **27**, 829.
- Bohren C. F. and Huffman D. R., 1998, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley-VCH.
- Atlas D. et al., 1973, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **11**, 1.