

偏波レーダー立体観測情報の活用による地形性降雨算定手法の改良

Improvement of Orographic Rainfall Calculation Method Using MP Radar Volume Scanning Observation

中北英一・佐藤克哉⁽¹⁾

Eiichi NAKAKITA, Katsuya SATO⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.

Synopsis

Japan has many steep terrains and mountains increase rainfall, resulting in higher total rainfall. As a result, there is sometimes a discrepancy between radar-observed rainfall and ground-observed rainfall. Accurate estimation of ground rainfall is very important for disaster management. In this study, values of the capture rate calculated from polarization parameters observed by radar at multiple altitudes were used in a topographic rainfall model to improve the accuracy of ground-based rainfall estimation. As a result, the accuracy was improved compared to using radar information from only a single altitude. The reduction of the capture rate due to wind in ground rain gauges was also checked, and it was confirmed that there is a sufficient possibility of errors in the rain gauge values that have been assumed to be positive so far. Furthermore, a detailed check of the values of cloud water content in the calculation process of the topographic rainfall model revealed that an accurate representation of water vapor content has a significant influence on rainfall.

キーワード: Seeder-Feeder, 粒径分布, 地形性降雨, 地上雨量推定, 雨量計

Keywords: seeder-Feeder, drop size distribution, orographic rainfall, ground rainfall estimation, rain gauge

1. 研究背景と目的

日本には急峻な地形が多く存在しており、そこでは山岳の影響により降雨が強化され、多量の雨をもたらす地形性降雨という現象が発生する。この地形性降雨はSeeder-Feeder効果によって発生すると考えられており、岩波(2020)やSmith et al. (2019)によっても示されている。Seeder-Feeder効果とは上層からの降雨が下層の雲の中を通過する際に、雲粒を捕捉することで雨が強まる効果である。しかし、レーダーのビームはある程度の高さを通過しているため

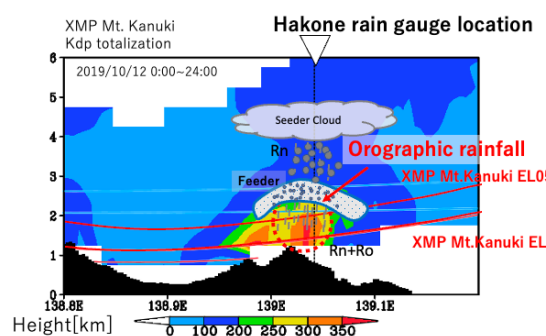


Fig. 1 Conceptual diagram of the seeder-feeder mechanism.

に地形性降雨を観測できず、地上雨量計などで観測された雨量との間にずれが生じている場合がある。

この典型的な事例としてあげられるのが、大きな被害をもたらした気象災害として記憶に新しい2019年の台風19号である。この台風は、10月12日に大型で強い勢力で伊豆半島に上陸し、関東地方を通過した。そして、関東地方を中心に広範囲にわたって多くの雨をもたらした、河川の堤防決壊や越水・氾濫、土砂災害、浸水被害が発生した。特に、千曲川の氾濫によって北陸新幹線の車両が水没し、その後の都市間移動に大きな影響を与えた。

台風19号の際にも、地上観測雨量と比較して、レーダー観測雨量は過少な値となっていた場所があった。そして、その原因が地形性降雨であると推測されている。以上より、防災上の観点から、地形性降雨を正確に推定することは非常に重要であり、地形性降雨はSeeder-Feeder効果によって発生していることから、Seeder-Feeder効果をモデルの中で正確に表現することが重要である。

2. 地形性降雨算定手法

本研究で用いている地形性降雨算定手法について述べる。2章で述べる内容は既往研究に基づくものである。

2.1 地形性降雨算定手法

本研究では立平（1976）によって提案された計算手法を用いて地形性降雨算定を行う。この計算手法は、気塊が岳の斜面をよけることなく斜面に沿って上昇することによる水蒸気の凝結や雲粒自身による成長、Seeder-Feeder効果による降水への転換を考慮したものである。

気塊中の雲水量 L の流れに沿った時間変化は式(1)で表される。

$$\frac{dL}{dt} = -cL - a(L - L_c) + wG - wL \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial z} \right). \quad (1)$$

ここで、捕捉率 c はSeeder-Feeder機構による上空からの雲粒捕捉の割合、 a は雲粒自身による降水への成長の割合、 $L_c[\text{g/m}^3]$ は降水へと転換する限界の雲水量、 $w[\text{m/s}]$ は斜面による気塊の鉛直方向の上昇速度、 $G[\text{g/m}^4]$ は気塊が単位距離上昇する間の水蒸気凝結による L の増加量、 $\rho[\text{g/m}^3]$ は水蒸気量を表す。右辺第一項と第二項は、降水への転換による雲水量の減少を表し、右辺第三項は気塊の上昇による水蒸気の凝結を、第四項は大気の圧縮性による見かけ上の L の変化を表す。第四項は第三項と比較して1オーダー小さいため無視する。式(1)の流れに沿ってラグランジュ積分すると、

$$L_{\text{out}} = \frac{wG + aL_c}{c + a} + \left(L_{\text{in}} - \frac{wG + aL_c}{c + a} \right) e^{-(c+a)\Delta t}, \quad (2)$$

となる。ここで、 $L_{\text{in}}[\text{g/m}^3]$ はメッシュへ流入する雲水量、 $L_{\text{out}}[\text{g/m}^3]$ はメッシュから流出する雲水量である。 Δt は気塊が1メッシュを通過するのにかかる時間である。

また、地形性降雨強度 $R_0[\text{mm/h}]$ は、メッシュへ流入・流出する雲水量 $L_{\text{in}}, L_{\text{out}}$ 、メッシュ内を気塊が通過する間に凝結して増加した雲水量 $WG\Delta t$ の収支を考えて、

$$R_0 = \frac{L_{\text{in}} + WG\Delta t - L_{\text{out}}}{\Delta t} \times 3.6 \times H, \quad (3)$$

と表される。ここで、 H は上下方向に物理量を一様と考える層厚 $[\text{m}]$ である。

本研究で用いている風速 (u, v, w) 、水蒸気量 ρ の3次元分布については、メソ数値予報モデルGPV(MSM)の情報から中北・寺園（2008）の手法を用いて推定している。

2.2 レーダー情報を用いた地形性降雨算定手法

レーダー情報から得られた降雨強度を非地形降雨強度と地形性降雨強度に分離する計算方法については、中北・寺園（2008）の手法をMendoza（2021）が発展させた手法を元に、中北・佐藤ら（2023）がレーダーで観測された偏波パラメータから算出された捕捉率の値を用いるように発展させた手法を用いた。レーダー情報による降雨強度 R_{radar} を非地形性降雨強度 R_n と地形性降雨強度 R_0 の和であると仮定し、

$$R_{\text{radar}} = R_n + R_0, \quad (4)$$

と表す。中北・佐藤ら（2023）は、実時間レーダー情報によって推定される粒径分布から捕捉率の推定を行う手法を開発した。

$$N(D) = N_0 \exp(-\lambda D), \quad (5)$$

$$D_m = \frac{\int_0^\infty D^4 N(D) dD}{\int_0^\infty D^3 N(D) dD}, \quad (6)$$

$$c = 355\pi EN_0 \Gamma(3.5 + \mu) \left(\frac{D_m}{4 + \mu} \right)^{3.5 + \mu}. \quad (7)$$

その手法は、 Z_{DR} や K_{DP} といったレーダー情報から得られる偏波パラメータから、式(5)で表される粒径分布の切片パラメータである N_0 と、式(6)で与えられる粒径分布の質量によって重みづけされた中心値である D_m を山口ら（2012）手法を用いて推定し、式(7)を用いて捕捉率 c を算出するものである。

この式(7)を式(2)に代入し、得られた L_{out} の値を式(3)に代入することにより、 R_0 が R_n の関数として表

されるため、式(4)と連立することでレーダー情報の分離が可能となる。入力するレーダー情報について、中北・寺園(2008)は観測高度を仮定していた。そこで、Mendoza(2021)は位置ごとに異なる観測高度の降雨強度から算定を行う手法を開発した。本研究ではこの手法を、鉛直7層の物理量一定の大気層に適用し、各層ごとにGPV情報から算定した水蒸気量を用いて R_0 を算出した。

また、レーダー降雨強度として同一の高度の平面における降雨強度分布であるCAPPIデータを用いた。CAPPIデータは、複数のXバンドMPレーダーによる複数仰角の立体観測データを鉛直方向に線形補間した上で、一定高度のデータを抽出して作成した。なお、同じメッシュ内に複数のレーダーの降雨強度データが存在する場合は、最大値をそのメッシュの降雨強度とした。本研究の地形性降雨算定手法をFig. 2に模式的に示す。

各メッシュについて、レーダー降雨強度 R_{radar} の観測高度が該当する層を計算の起点とし、上層に向かっては前述した分離の計算手法により上の層から降ってくる R_n が算出される。下層に向かっては、 R_{radar} を下の層にとつての R_n (Fig. 2における R_{n2})とし、これを入力値とすることで下の層で発生する R_0 (Fig. 2における R_{o2})が算出される。これらの計算を最上層、最下層まで繰り返すことで各層の R_n 、 R_0 が算出される。これにより、地形性降雨を考慮した地表付近の総降雨強度 R_T が、最下層の R_n と R_0 (Fig. 2における R_{n1} と R_{o1})の和として求められる。また最上層では、地形の影響を受けていない純粋な R_n (Fig. 2における R_{n4})が求められる。

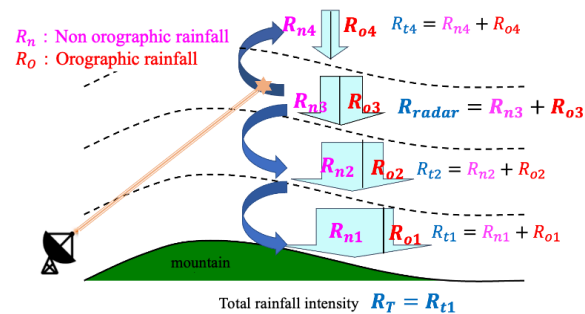


Fig. 2 Orographic rainfall calculation method diagram.

3. 複数高度のレーダー情報を用いた捕捉率算定

3.1 複数高度のレーダー情報を用いた捕捉率算定手法

本研究では第2章で述べた手法によって算出された捕捉率の値を用いて地上雨量推定を行った。中

北・佐藤ら(2003)らは単一高度のみのレーダーによる観測結果から算出された捕捉率の値を用いて地上雨量推定を行っていた。本手法では複数高度のレーダーによる観測結果から算出された捕捉率を用いて地上雨量推定を行った。本手法では、いずれかのレーダーが通過しているメッシュではそのレーダー情報から算定された捕捉率の値を使用し、レーダーが通過していないメッシュについては上下のメッシュのうちレーダーが通過しているメッシュの捕捉率の値から線形補間した値を用いている。

3.2 複数高度のレーダー情報による捕捉率を用いた地上雨量推定結果

3-1節で述べた手法によって算出した捕捉率の値を用いて地上雨量推定を行った結果をFig. 3に示す。

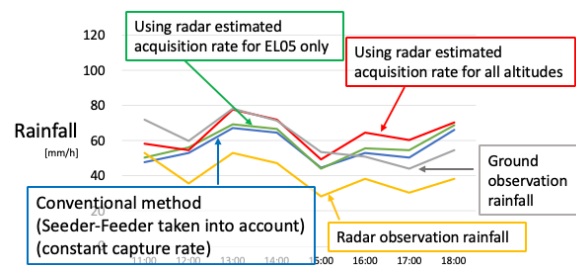


Fig. 3 Observed and estimated rainfall at Hakone rain

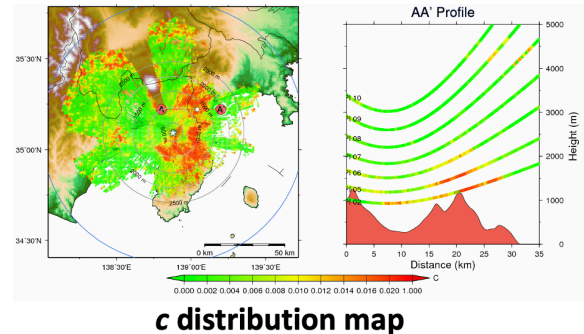


Fig. 4 Distribution map of estimated capture rates at 12:00.

レーダー推定雨量(CX合成雨量)と比較して、Seeder-Feeder機構を考慮した地形性降雨モデルを用いて地上雨量推定を行った場合(赤、緑、青線)には大きな値で推定する結果となっており、過小推定を防ぐ効果があることがわかる。また、全高度のレーダー情報を用いた場合(赤線)は単一高度のみの場合(緑線)と比較して推定精度が高くなる結果となった。これは、捕捉率の算出結果の分布を示したFig. 4からわかるように、捕捉率の値が上層から下層に向かって大きな値となっており、全高度のレーダー情報を用いた場合にはより低高度の捕捉率の高い値をモデルの中で用いていたことによるものだ

と考えられる。

全高度のレーダー情報を用いた場合の観測雨量は推定雨量に近い値となる時間帯がある一方で、ずれが生じている時間帯も多い。

Table 1 RMSE in ground rainfall estimation results

RMSE for observed rainfall	Using single-altitude radar information	Using radar information at all altitudes	CX Synthesis
	11.22	10.85	20.73

4. 雨量計の捕捉率分析

地上の雨量計において降水量を観測する際には、観測誤差が発生する。その原因として鈴木（1996）は蒸発による誤差、濡れによる誤差、風とその乱れによる誤差の3つを挙げている。特に風とその乱れによる誤差が降水量の観測に大きな影響を与えると考えられる。本研究では風の影響による雨量計の捕捉率低下の可能性について確認を行った。

4.1 対象事例と分析地点

分析を行う対象事例は2019年の台風19号通過時（2019年10月12日）とした。分析地点はこれまでの研究と同様の箱根地点に加え、風向・風速の観測を行っているAMeDAS観測地点として、御殿場、三島、小田原の3地点を加えた計4地点を対象とした。

4.2 捕捉率の分析方法

本研究では、吉田（1959）の式(8)を用いて雨量計の捕捉率を算出した。液体降水、固体降水のそれぞれに対して降水量計の型式ごとに係数 m を求めた（Table 2）。

$$CR = \frac{1}{1 + mU}, \quad (8)$$

Table 2 Precipitation type, m value obtained for each type of precipitation gauge

Precipitation pattern	Rain gauge type		
	RT-1	RT-3	RT-4
Solid	0.213	0.346	0.128
Liquid	0.0454	0.0856	0.0192

RT-1は転倒ます式を、RT-3は温水式を、RT-4は溢水式を表すが、今回対象とした4地点ではRT-1が使用されており、対象事例も10月の台風であるため、 m の値として0.0454を使用した。

また、箱根地点ではAMeDASによる風向・風速の観測が行われていないため、箱根地点での風速は御殿場、三島、小田原の3地点の風向・風速データを用い

て式(9)で推定する。 V_H, V_G, V_O, V_M は箱根、御殿場、小田原、三島の風速であり、 l_G, l_O, l_M は箱根からの御殿場、小田原、三島の距離を表す。

$$V_H = \frac{\frac{1}{l_G} V_G + \frac{1}{l_O} V_O + \frac{1}{l_M} V_M}{\frac{1}{l_G} + \frac{1}{l_O} + \frac{1}{l_M}}, \quad (9)$$

4.3 捕捉率の分析結果

風速データを用いて雨量計による観測雨量を補正した結果をFig. 5に示す。また、前節で述べた手法を用いて推定した箱根地点での風速の時系列変化をFig. 6に示す。

16時以降において、地形性降雨モデルによる地上雨量推定結果と雨量計の捕捉率を考慮した補正後の雨量に近い値となった。また、この時間帯において風速がそれまでの時間帯と比較して大きい値となっていた。実際の現象を確認すると、時間が経過するに従って台風が南から関東地方へ近づいており、風速が大きくなる状況となっていた。以上から、台風の接近に伴って風が強くなる状況となっており、このために雨量計が雨粒を正確に捕捉できていなかったことから実際よりも雨量計の値が過小となっていたことが考えられる。一方で、16時以前は補正を行ったことによって、地形性降雨モデルの計算結果から離れる結果となってしまう。

以上から、地形性降雨モデルによる推定雨量と雨量計による観測結果のずれが風による雨量計の捕捉

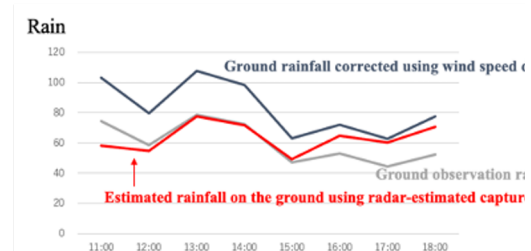


Fig. 5 Comparison of rainfall data corrected for rain gauge capture rate and results of surface rainfall estimation using a orographic rainfall model.



Fig. 6 Wind speeds at Hakone estimated from wind speed data at Gotemba, Mishima, and Odawara.

率低下によるものと断言することはできない。一方で、風による捕捉率の低下が雨量計による観測雨量に大きな影響を与える可能性があることがわかった。

5. 計算過程における雲水量の確認

式(1)の右辺第1項を見てわかるように、Seeder-Feeder効果には捕捉率 c だけではなく、雲水量 L の値も大きく影響する。そこで、本研究では地形性降雨モデルの計算過程での雲水量の値を確認することで、地形性降雨モデルが実際の現象を表現できているのかを確認した。

5.1 対象事例と分析地点

分析を行う対象事例は2019年の台風19号通過時(2019年10月12日)とした。分析地点はこれまでの研究と同様の箱根地点に加え、山中地点を加えた計2地点とした。

5.2 雲水量の確認結果

箱根地点での地形性降雨強度、雲水量変化、気塊上昇による凝結のそれぞれの値の時系列変化をFig.7に示し、流入する雲水量と流出する雲水量、雲水量の収支のそれぞれの値の時系列変化をFig. 8に示す。

Fig. 7からわかるように、対象期間においては気塊上昇による凝結が0に近い値になっており、地形性降雨強度と雲水量変化がほぼ同じ値になっていた。気塊の上昇による凝結が0となるのは、水蒸気量が飽和水蒸気量と比較して小さい値となっている場合である。また、10時ごろのデータを確認すると、気塊の上昇による効果によって15mm/h程度の雨量が算出されている。このように、気塊の上昇による凝結は雨量に大きな影響を及ぼすため、気塊の上昇による凝結をモデルに正確に反映することが重要であることがわかった。また、気塊の上昇による凝結は水蒸気量が飽和水蒸気量を超えるかどうかに関強く依存するため、特に水蒸気量の値を正確にモデルの中で再現することが非常に重要となる。

次に、山中地点でも同様の確認を行った結果をFig. 9, 10に示す。山中地点では雲水量と気塊上昇による凝結の値が正負を逆にしている値となっていた。また、気塊による上昇の値が0と負の値を行き来している。先に述べたように、気塊の上昇による凝結が0となるのは、水蒸気量が飽和水蒸気量と比較して小さい値となっている場合である。しかし、実際の現象を考えると、Fig. 9に示されるように、気塊による上昇の値が0と負の値を行き来することは不自然である。この点について詳しく確認を行うことは今後の課題である。

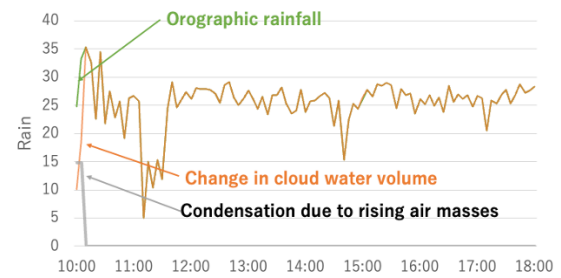


Fig. 7 Time series of topographic rainfall intensity, cloud cover variation, and condensation values due to air mass rise at Hakone site.

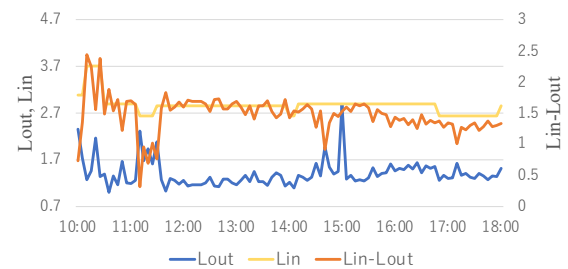


Fig. 8 Time series of cloud water inflow and outflow, cloud water balance at Hakone site.

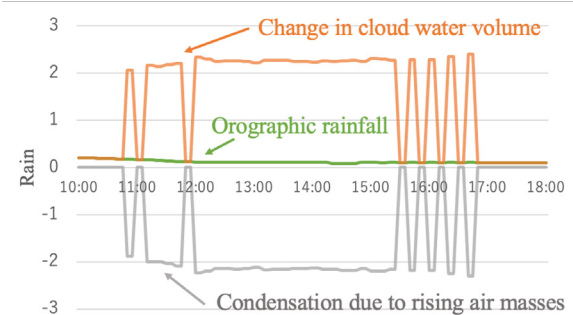


Fig. 9 Time series of topographic rainfall intensity, cloud cover variation, and condensation values due to air mass rise at Yamanaka site.

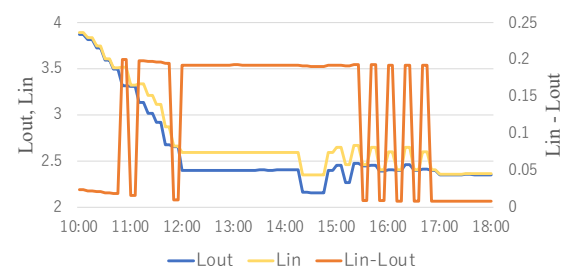


Fig. 10 Time series of cloud water inflow and outflow, cloud water balance at Yamanaka site.

6. まとめ

本研究では、地上雨量の推定精度を向上させるた

めに、複数高度のレーダーで観測された偏波パラメータから算出した捕捉率の値を地形性降雨モデルにおいて用いた。その結果、単一高度のみのレーダー情報を用いる場合比較して精度が向上した。

また、地上雨量計の風による捕捉率低下についても確認を行い、これまで正としてきた雨量計の値にも誤差が生じる可能性が十分にあることを確認した。

さらに、地形性降雨モデルの計算過程における雲水量の値を細かく確認することで、水蒸気量を正確に表現することが雨量に大きく影響を与えることが明らかになった。

参考文献

岩波越 (2020) : レーダーによる降水雲の 3 次元観測, 日本気象学会夏季大学, 第 54 回.
鈴木宣直 (1996) : 気象研究ノート第 185 号.
立平良三 (1976) : 雨滴成長を考慮した地形性降雨の計算, 天気, Vol.23, No.2, pp.27-32.
中北英一・佐藤克哉・中渕遥平 (2023) : Seeder-Feeder

モデル及びレーダー立体観測情報の活用による地上雨量推定手法の開発, 土木学会論文集 特集号 (水工学)論文 80 巻 16 号.

中北英一・寺園正彦 (2008) : 地形性降雨の非地形性降雨に対する非線形効果を考慮した短時間降雨予測手法, 水工学論文集, 第 52 巻, pp. 331-336.

山口 弘誠・金原 知穂・中北 英一 (2012) : X バンド偏波レーダーを用いた雨滴粒径分布とその時空間構造及び降水量の推定手法の開発, 土木学会論文集 B1 (水工学) 68 巻 4 号 p. I_367-I_372.

吉田作松(1959) : 積算雪量計の研究 (第 2 報) 主として型別の積算捕集率決定ならびに積算雪量計実用化のための吟味. 研究時報, 11, pp.507-524.

Mendoza, G.G.(2021): Development of a scheme for estimating the vertical profile of orographic rainfall based on the seeder-feeder mechanism using full volume, scanning radar observation, Master's Thesis, Kyoto University.

(論文受理日 : 2024年8月31日)