# 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

# Development of Ground Rainfall Estimation Method Using Seeder-Feeder Model and Radar Volume Scanning Observation

中北英一·佐藤克哉<sup>(1)</sup>·中渕遥平<sup>(2)</sup>

Eiichi NAKAKITA, Katsuya SATO<sup>(1)</sup> and Yohei NAKABUCHI<sup>(2)</sup>

(1)京都大学大学院工学研究科(2)東日本旅客鉄道株式会社

Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.
 (2) East Japan Railway Company, Japan

#### **Synopsis**

In Japan, there are many steep terrains, and the mountains enhance the rainfall resulting in much of total rainfall amount. Because of orographic rainfall, there is sometimes a discrepancy between radar-observed rainfall and ground-observed rainfall. Accurate estimation of ground rainfall is very important from the viewpoint of disaster prevention. In this study, to improve the accuracy of the ground rainfall estimation, We have developed a method to estimate the capture rate in real time from the radar information, and the values of the capture rate obtained by the method are used for the ground rainfall estimation. As a result, the capture rate was calculated reliably. It is also shown that the method can estimate the ground rainfall with the same or better accuracy than the conventional prediction method, even when using the capture rate obtained from the realtime information. In the future, the results of the same method will be checked in other cases to clarify the effectiveness of this method nationally.

キーワード: Seeder-Feeder, 粒径分布, 地形性降雨, 地上雨量推定 Keywords: Seeder-Feeder, drop size distribution, orographic rainfall, ground rainfall estimation

## 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 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、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.

次章で述べるように、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効果に 大きな影響を与える上空からの降水による雲粒の捕 捉率が重要となる.

本研究では、降雨の粒径分布と上空からの降水に よる雲粒の捕捉率に着目した. 中北・寺園(2008) が用いていた従来の地形性降雨算定手法では Marshall and Palmer粒径分布を仮定して捕捉率の算 定が行われていた. この粒径分布は層状の雨の際に は実際の分布とよく合致することが知られている. 一方で、それ以外の降雨タイプの場合には実際の分 布と異なっている. したがって、粒径分布から推定 を行っている捕捉率の値についても実際の値と異な っていると考えられる. そのため、本研究ではより 正確な粒径分布を用いて捕捉率の値を推定する手法 として、偏波レーダーから推定された粒径分布パラ メータを用いて捕捉率の値を推定し、その値を用い て地上雨量推定を行う手法を開発することで、地上 雨量の推定精度の向上を目指した.



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

## 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.

$$\frac{dL}{dt} = -cL - a(L - L_c) + wG - wL\left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial z}\right).$$
(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,  $L_c[g/m^3]$ は降水へと転換する限界の雲水 量, w[m/s]は斜面による気塊の鉛直方向の上昇速 度,  $G[g/m^4]$ 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,  $\rho[g/m^3]$ 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)を流れに沿ってラグランジュ積分すると、

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

となる. ここで,  $L_{in}[g/m^3]$ はメッシュへ流入する雲 水量,  $L_{out}[g/m^3]$ はメッシュから流出する雲水量で ある.  $\Delta t$ 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*<sub>0</sub>[mm/h]は, メッシュへ 流入・流出する雲水量*L*<sub>in</sub>, *L*<sub>out</sub>, 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*Δ*t*の収 支を考えて,

$$R_0 = \frac{L_{\rm in} + WG\Delta t - L_{\rm out}}{\Delta t} \times 3.6 \times H, \tag{3}$$

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[m]である.

本研究で用いている風速(*u*,*v*,*w*), 水蒸気量*p*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  $R_o$ の和であると仮定し、

$$R_{radar} = R_n + R_o, \tag{4}$$

と表す. ここで中北・寺園 (2008) は, 立平 (1976) によって示されている捕捉率  $c \ge R_N$ の値をフィッテ ィングすることで式 (5) の非線形関係を求めた.

## $c = 0.6778 R_{\rm N}^{0.731} \times 10^{-3}, \tag{5}$

この式 (5)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、 $R_{radar}$ を下の層にとっての $R_n$ (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 $R_n \ge R_0$  (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 の影響をうけていない純粋な $R_n$  (Fig. 2における $R_{n4}$ ) が求められる.





#### 地上雨量推定における捕捉率cの感度分析

本章では捕捉率cの値を変化させることによる地 上推定雨量への影響を確認するため,地形性降雨モ デルを用いた地上雨量推定値の捕捉率cによる感度 分析を行った.

従来の地形性降雨モデルにおいて捕捉率の算出に 深い関係のある Marshall and Palmer 粒径分布は1章 でも述べたように層状の雨の際にはよく合致するこ とが知られている.一方で対流性など,層状以外の 降雨タイプの場合には実際の粒径分布とは異なる可 能性が考えられ, Marshall and Palmer 粒径分布をもと に算出されている捕捉率の値についても実際の値と は異なると考えられる.

そのため、粒径分布から算出を行っている捕捉率 の値を適切な値に変化させて地上雨量推定を行うこ とで雨量推定の精度が向上するのではないかと考え、 感度分析を行った.

対象事例は 2019 年台風 19 号通過時の箱根付近とした.

#### 3.1 感度分析の手法

まず,感度分析の手法について述べる.

中北・寺園 (2008) が用いていた地形性降雨算定手 法では、立平によって示された捕捉率cと非地形性 降雨強度R<sub>N</sub>のいくつかの具体的な値をフィッティン グすることで得られた式(5)から捕捉率cを算出して いる.

$$c = 0.6778 R_{\rm N}^{0.731} \times 10^{-3}.$$
 (5)

この式(5)に係数bを追加し(式(6)), 係数 b の値 を 0.5, 1.0, 1.5 の 3 種類に変更して地形性降雨の 算定を行った.

 $c = b \times 0.6778 R_{\rm N}^{0.731} \times 10^{-3}.$  (6)

係数を変化させた場合のそれぞれの計算結果と, 同時刻のXRAINでの観測雨量を比較し,捕捉率の値 を変えると地形性降雨算定結果がどう変化するのか, どの係数がXRAINでの観測結果に近づくのかを確 認した.

本研究では、CAPPIに変換されたXRAIN観測雨 量(推定雨量)の内、1750m高度のレーダー推定雨量 をスタートに上下方向に非地形性降雨強度 $R_N$ 、地 形性降雨強度 $R_0$ を算定し、そこから算定される  $R_N + R_0$ と、CAPPI変換されたXRAIN観測雨量の鉛 直分布とを比較した.

XRAIN 観測雨量はレーダー通過高度における雨 量を正確に表していると期待されるため、本研究 では地上雨量ではなくレーダー通過高度での地形 性降雨算定手法による推定雨量と XRAIN での観測 雨量とで比較を行った.

#### 3.2 感度分析の結果

2019 年 10 月 12 日 12:15 において, XRAIN の観 測結果と,地形性降雨算定手法において係数bを 0.5, 1.0(変化なし), 1.5 に変更した場合の結果を Fig. 3 に示す. それぞれの図について, 左上は XRAIN で の観測結果,右上が地形性降雨算定手法において係 数を b=0.5 とした場合,左下が同じく地形性降雨算 定手法において係数を b=1.0 とした場合,右下が同 じく地形性降雨算定手法において係数を b=1.5 とし た場合を示している. 断面位置については Fig. 4 に おける,線分 AA', BB'の位置で取っている.

12:15におけるAA'断面の上層やBB'断面の右上



Fig. 3 Results of XRAIN observations and rainfall





Fig. 4 AA', BB' Cross-sectional position.

層では、 *b*-1.5の場合の結果が最もXRAINの観測結 果に近い. すなわち、 *b*の値を大きく、 捕捉率の値 を大きくするとXRAINの観測結果に近づく結果とな った. これらの箇所ではXRAINによる観測雨量は 20mm以上の大きい値となっている. 一般的には, 対 流性の降雨では雨滴の粒径は大きい傾向にあり, 雨 滴が大きいと捕捉率も大きくなる. 以上から, これ らの箇所では, 対流性の降雨が発生しており, 実際 にはMarshall and Palmer粒径分布とは異なる粒径分 布となっていたために, 捕捉率の値が過小な値で推 定されており, 大きな値へ変えることでXRAINによ る観測雨量に近づいた可能性が示唆された.

# 4. 粒径分布パラメータを用いた捕捉率の算 定

#### 4.1 捕捉率の算定手法

前述のように従来の地形性降雨算定手法では,一 様な粒径分布を仮定して捕捉率cの推定を行ってい たため,実際の捕捉率の値とは異なった値を用いて 地形性降雨を算定している可能性があった.そこで 実時間レーダー情報によって推定される粒径分布パ ラメータから捕捉率の算定を行う手法を開発し,実 時間レーダー情報を用いてより正確な捕捉率の値を 算定することを目指した.

粒径分布N(D)はガンマ分布を用いて,

$$N(D) = N_0 D^{\mu} exp(-\Lambda D),$$

(7)

と表され、 今回の手法では簡単のため $\mu = 0$ とした. 粒径分布の中央値である $D_0$ は、

$$\frac{\pi\rho_w}{6} \int_0^{D_0} D^3 N(D) dD = \frac{W}{2},$$
 (8)

で定義される. ρ<sub>w</sub>は降水粒子の密度, Wは単位体積 に含まれる降水粒子の量[g/m<sup>3</sup>]を表す. 金原(2021) によって式(7),式(8)から式(9),(10)が示されてい る. *Λ*は分布直線の傾斜を表すパラメータである.

$$\int_{0}^{D_{0}} D^{3} \exp(-\Lambda D) dD = \frac{3}{\Lambda^{4}},$$
(9)

$$D_0 = \frac{3.67}{\Lambda},\tag{10}$$

捕捉率cは式(11)で定義され, Eは捕捉効率を表す. 雨滴の落下速度V(D)は立平(1976)による式(12)を 用いており, ガンマ関数を用いて捕捉率は式(13)で 与えられる.

$$c = E \int_0^\infty \frac{\pi}{4} D^2 N(D) V(D) dD , \qquad (11)$$

$$V(D) = 1420D^{\frac{1}{2}},\tag{12}$$

$$c = 355\pi E N_0 \frac{\Gamma(3.5)}{\Lambda^{3.5}}.$$
 (13)

粒径分布パラメータD<sub>0</sub>, N<sub>0</sub>から捕捉率cを導く式と して, 式(10), 式(13)より式(14)を得る.ただし本 研究では*E* = 1とした.

$$c = 355\pi E N_0 \Gamma(3.5) \left(\frac{D_0}{3.67}\right)^{3.5}.$$
 (14)

この手法では、金原(2021)によって開発された 手法を用いてレーダー情報から粒径分布パラメータ を算定している.金原(2021)の手法では、 $Z_{DR}$ 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、粒径分布パラメータである $N_w \ge D_0$ を推定し ている.ここで、 $N_w$ は粒径分布 $N(D) \ge N_0$  との関係 から式(15)で表される.

$$N_0 D^{\mu} = N_w \frac{6}{3.67^4} \frac{(3.67 + \mu)^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{\mu}.$$
 (15)

金原(2021)の手法では $\mu = 0$ とはしていない中, 本研究では簡単のために $\mu = 0$ , すなわち $N_w = N_0$ と する.なぜならば、 $N_0$ の値は捕捉率の算定結果に大 きな影響を及ぼさないためである.すなわち、本研 究では、式(14)で示すように、捕捉率cの値は  $D_0$ の 3.5 乗に比例しており、 $N_0$ の影響は比較的小さいも のであると考えられるためである.

### 4.2 捕捉率の算定結果

本項では、レーダー情報から推定した粒径分布パラメータ(D<sub>0</sub>, N<sub>w</sub>)の推定結果と、粒径分布パラメータから算定した捕捉率の算定結果について述べる.

2019 年 10 月 12 日 12:00 における結果を Fig. 5 に 示す.

粒径分布パラメータ $D_0$ , $N_w$ の推定結果を確認する と、ばらつきはあるものの、箱根付近において上層 から下層に向かって $D_0$ , $N_w$ それぞれの値が大きくな るように推定されている.また、平面図について XRAIN での雨量観測結果と比較を行うと、XRAIN で大きな雨量が観測されている箇所では粒径分布パ ラメータも同様に大きな値を示している.

次に捕捉率の推定結果を確認する.捕捉率につい ても粒径分布パラメータの推定結果と同様に, 箱根 付近において上層から下層に向かって大きな値へと 推定結果が変化しており, XRAIN での雨量観測結果 と比較すると, XRAIN で大きな雨量が観測されてい る箇所, すなわちより大きな雨滴粒径が存在すると 考えられる場合に捕捉率についても大きな値が推定 されている.特に, 前章で行った感度分析の中で, 雨量や降雨タイプと捕捉率には関係があるのではな いかと考えていた. レーダー情報による推定結果に おいても, XRAIN による雨量観測結果と捕捉率の推 定結果の分布には同じ傾向がみられており, 雨量や 降雨タイプによって捕捉率の値が変化している可能 性がより明らかとなった. また,これまではレーダー情報には誤差が多く含 まれていると考えられてきた.しかし,推定された 捕捉率の値が XRAIN による雨量観測結果と同じ傾 向を持っていることから,レーダー情報から得られ た粒径分布パラメータや捕捉率の信頼性の高さにつ いても明らかとなった.

また, 雨粒は落下する中で雲粒を捕捉して粒径が 大きくなっていくため,  $D_0$ が下層に向かって大きく なることは物理的な意味を考えても明らかである. 一方で, 切片 $N_w$ の値が高度が下がるにしたがって 大きな値となっている原因については判明していな い. しかし, 式(14)が示す通り, 捕捉率cの算定に おいては  $D_0$ が $N_w$ と比較してより大きな影響を及ぼ すため,  $D_0$ と同じように下層に向かって大きな値と なっている捕捉率cについて一定程度の信頼性があ ると言えるだろう.

切片Nwの値が高度が下がるにしたがって大きな



Fig. 5 Distribution map of XRAIN observations and estimated capture rates at 12:00.

値となっている原因は、前節で述べたように、 $N_0$ と $N_w$ が一致しないことなどを手がかりとして今後分析を行いたい.

# 5. 粒径分布パラメータを用いた地上雨量推 定

## 5.1 レーダー情報による捕捉率の推定結果

まず,4.1節で述べた手法を用いて捕捉率の推定 を行った結果を述べる.XRAINによって箱根雨量計 地点の上空の Elevation 5<sup>th</sup> (EL05)高度において観測 されたレーダー情報から,2.2節に述べた従来の地 形性降雨算定手法の中で算定された捕捉率の値と, 今回開発した手法によってレーダー情報から推定し た捕捉率の値の時系列変化を Fig.6に示す. "EL05\_Radar"は今回開発した手法によってレーダ 一情報から推定された捕捉率,"EL05\_model"は従来







レーダー情報から推定された捕捉率の値は、従来 の地形性降雨算定手法で算定されている捕捉率の値 よりも多くの時刻で大きな値となっている.これは、 Marshall and Palmer 粒径分布を仮定していた従来の 地形性降雨算定手法の中で算定される捕捉率の値は、 レーダー情報から推定される実際の降雨現象の中で の捕捉率の値よりも多くの時刻で過少な値となって いたことを示している.

また、対象としている時刻の箱根雨量計地点では 40mm 以上の雨量が観測されており、 3-2節の感度分 析の結果でも述べたように、 雨量の大きい箇所では、 Marshall and Palmer 粒径分布より相対的に粒径が大 きく ( $D_0$ が大きく), したがって Marshall and Palmer 粒径分布から推定される捕捉率よりも実際の降雨現 象の中での捕捉率は大きい値となっていると推察さ れる.

レーダー情報から推定された捕捉率の値が 15:00 において0となっている. これはレーダーが正しく 観測を行えず, 捕捉率の算定が行えなかったためで ある. これによる雨量推定結果への影響については 次節で確認する.

10:00~18:00 の各時刻における, レーダー情報に よる捕捉率の推定値と Marshall and Palmer 粒径分布 から推定される捕捉率の値の比率を Fig. 7 に示す.



Fig. 7 Ratio of radar-informed capture rate estimates

多くの時刻において、レーダー情報から推定された 捕捉率の値は、Marshall and Palmer粒径分布から推定 される捕捉率、すなわち従来の地形性降雨算定手法 の中で算定される捕捉率の値の約1.5倍となってい ることが示されている. 第5章では、最大1.5倍まで の感度分析を行った. 実際それに相当する捕捉率の 違いが生じ得ることを本解析事例は示している.

# 5.2 レーダー情報から推定された捕捉率を用 いた地上雨量推定の結果

まず、レーダー情報から推定した捕捉率の値を用 いて、地上雨量推定を行う方法を述べる.

今回の手法における地上雨量推定においては、従 来の地形性降雨算定手法から捕捉率の算定手法を変 更している.従来の地形性降雨算定手法では、捕捉 率の値を求める際に式(5)(再掲)を用いて非地形性 降雨強度*R<sub>N</sub>*から捕捉率の値を算定していた.

$$c = 0.6778 R_{\rm N}^{0.731} \times 10^{-3}.$$
 (5)

一方、今回の手法では、非地形性降雨強度*R<sub>N</sub>*から捕 提率を算定するのではなく、レーダー情報から推定 された粒径分布に関するパラメータ(*D<sub>o</sub>*,*N<sub>w</sub>*)を用い て、式(14)から推定した捕捉率の値を使用する.ま た、EL05の高度(約1500m)でレーダー情報から推 定された捕捉率の値を、それより下層の全高度にお いてそのメッシュでの捕捉率の値として使用してい る.EL05高度よりも上層のメッシュでは、従来の 地形性降雨算定手法と同様の方法によって非地形性 降雨強度から捕捉率を推定した値を用いている.

また, 地形性降雨算定においては, 今回の手法, 従来手法ともに EL05 の高度を計算開始高度として 計算を行った.

レーダー情報から推定した捕捉率の値を用いた地 上雨量推定の結果を Fig. 8 に示す.

Fig. 8 は箱根雨量計地点における, 10:00~18:00 の10 分ごとのデータであり, Marshall and Palmer 粒 径分布から推定される捕捉率を用いた場合, すなわ ち従来の地形性降雨算定手法による地上推定雨量 ("Conventional"), レーダー情報から推定された捕 捉率の値を用いた地上推定雨量("Radar estimation"), 箱根雨量計での観測雨量("Observation"), CX 合成雨 量("CX synthesis")を示している. また,これらの10 分間隔のデータを前1時間ごとに平均を取った場合 の雨量を Fig. 9 に示す.



Fig. 8 Observed and estimated rainfall at Hakone rain gauge site from 10:00 to 18:00.





それぞれの手法による雨量推定結果を比較する.

観測情報と、レーダー情報から推定された捕捉率 を用いた手法、従来の地形性降雨算定手法、CX 合成 それぞれについて RMSE(二乗平均平方根誤差)を算 出した結果を表-1 に示す. Fig. 8, Fig. 9, Table 1 は中 北ら(2023)によって示されたものである.

現在一般に配信されている CX 合成雨量は地形性 降雨算定手法を用いず, XRAIN を構成するレーダー 観測情報のみを用いる合成レーダー雨量である. 従 来の地形性降雨算定手法やレーダー情報から推定し た捕捉率を用いる手法による地上雨量推定結果は, CX 合成雨量に比較して, 地上観測雨量に近い値と

Table 1 RMSE values in hourly averages of observed and estimated rainfall at Hakone rain gauge site from 10:00 to 18:00.

	RMSE[mm/h]
Radar estimation - Observation	10.5
Conventional - Observation	11.4
CX synthesis - Observation	20.9

なっている.表-1で示すように、観測情報と比較した RMSE についても、CX 合成雨量と比較して小さい値となっている.これは Seeder-Feeder 機構を考慮した地形性降雨算定手法が、地上雨量推定において 過少推定を防ぐ効果の高い手法であることを示している.

また、多くの箇所でレーダーから推定した捕捉率 を使用した地上推定雨量が、従来の手法による推定 結果と比較して雨量計による観測雨量に近くなって いる. 表-1 で示すように、観測情報と比較した RMSE についても、従来手法と比較して小さい値と なっている. この結果は実時間レーダー情報から適 切な捕捉率を推定し、その値を用いて地上雨量を推 定する手法が、これまでの地形性降雨算定手法と同 じかそれ以上の精度で地上雨量を推定することが可 能であることを示しており、これは驚くべき結果で あることを強調したい.

また, Fig. 6 に示すように, レーダー情報から推 定された捕捉率は, 従来の地形性降雨算定手法の中 で算定されていた捕捉率よりも大きな値となってい る. 捕捉率が大きな値であることから, 雨粒が空気 中の雲粒をより多く捕捉し, 地上推定雨量が大きな 値となる結果になり, 多くの箇所で観測雨量に近づ く結果となったと考えられる.

レーダー情報から推定された捕捉率の値が Fig. 6 で示されるように 15:00 において 0 となっているこ とによる雨量推定への影響を確認する. 15:00 にお けるレーダー情報を用いた雨量推定結果は観測情報 と比較して過小な値となっている. 捕捉率が小さな 値となっている場合には, Seeder-Feeder 効果が考慮 されないことによって地上雨量は過小に推定される. よって, 15:00 において, 正しい捕捉率の値が推定 されていた場合には, 観測情報に近づく結果になっ たと予想される.

# 6. まとめ

本研究ではまず, 感度分析を行うことによって, 捕捉率を適切な値に変更することで雨量推定精度を 向上させることができる可能性が明らかとなった. 次に、上空からの雨粒による雲粒の捕捉率を、偏波 レーダー情報から推定された粒径分布パラメータを 用いて算定する手法を開発した. この手法でレーダ ー情報から推定された捕捉率の分布にはノイズが少 なく、推定捕捉率の値の信頼性の高さが明らかとな った. また、雨量が大きくなると捕捉率の値も大き くなるという正の相関関係も見られた.

今回開発した手法で推定された捕捉率の値を用い て地上雨量推定を行った結果,従来手法と同等かそ れ以上の推定精度があり,捕捉率の値についてはレ ーダー情報から推定された値がより大きい値であっ た.

また、本研究では EL05 のレーダー情報を用いて 捕捉率を推定し、その値を用いて地上雨量の推定を 行った結果を確認した. 今後は他の高度のレーダー 情報を用いて捕捉率を推定し、その値を用いて地上 雨量推定を行った結果を確認することで、レーダー 情報から捕捉率を推定することの効果をより明らか にしていきたい. また、レーダーを用いて捕捉率の 値を推定し、その値を用いて地上雨量を推定するこ とで推定精度を向上させるという本研究の手法は他 地域・他事例でも適用可能であると考えており、 今 後他事例でも同様の手法を用いた結果を確認するこ とで本手法の有効性を全国的に明らかにしたい.

#### 謝 辞

本研究究で利用させていただいたXRAINデータは 国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」:データ 統合・解析システムの枠組みの下で 収集・提供され たものである.

# 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.
- 金原 知穂(2021):Xバンド偏波レーダーを用いた 雨滴粒径分布の 時空間構造の解析と地上降水量 推定への応用,京都大学大学院修士論文.
- 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, 水工学論文集.
- 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.
- Smith,S.A, Field,P.R, Vosper, S.B. and Derbyshire,S.H.(2019): Verification of a seeder– feeder orographic precipitation enhancement scheme accounting for low-level blocking. Quarterly Journal of the Royal >Meteorological Society, 145, 2909–2932.
- 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:2023年8月31日)