

京都大学大学院 学生員 ○中川勝広 京都大学防災研究所 正員 中北英一
 京都大学防災研究所 正員 池淵周一 京都大学工学部 佐藤 亨

1 はじめに レーダー雨量計で観測されたレーダーエコー強度を降雨に変換した降雨強度と AMeDAS 等の地上の降雨強度とは必ずしも一致しないなど精度の面でまだ完全であるといえず、実際の河川管理において、定量的に用いられるには至っていない。その原因としてレーダー雨量計で観測されたレーダーエコーから変換された降雨強度（以下レーダー雨量）は上空における降雨を捉えており地上で観測されている降雨とは異なっていることが挙げられる。そこで本研究では、レーダー雨量推定の際に雨滴粒径分布の鉛直プロファイルを考慮した推定手法を構築し、我が国の MU レーダー、建設省深山レーダー雨量計、およびアメリカ合衆国の NEXRAD レーダーに適用し、本手法の検証を行った。

2 NEXRAD について NEXRAD (Next Generation Weather Radar) は、アメリカ全土を WSR-88D (Weather Surveillance Radar - 1988 Doppler) 網で覆い、時・空間的に密な降水、および風を観測するためのシステムである。このドップラーレーダーは、S バンドのために減衰の問題がほとんどなく、一方では、レーダーの出力が大きいため -30 [dBZ] 程度までの観測が可能な感度を有する。このレーダーの特徴は、ドップラー速度の幅の情報がドップラースペクトルと同時に得られることである。

3 MU レーダーについて MU レーダーは、VHF 帯のドップラーレーダーであるため、マイクロ波帯の気象ドップラーレーダーと異なり、降雨時にも大気乱流からのエコーと雨滴からのエコーが同時に観測可能である。したがって受信されるエコーパワースペクトルを解析することにより風速や大気乱流強度と同時に背景風の影響を除去した正確な雨滴粒径分布を測定することができる。雨滴粒径分布 $N(D)$ は、

$$N(D) = N_0 \left(\frac{D}{D_0}\right)^\mu \exp(-\Lambda D) \quad (1)$$

によって近似され、 N_0, μ, Λ より各高度での降雨強度 R_r は、

$$\begin{aligned} R_r &= 36 \times \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 N(D) V(D) dD \\ &= \frac{6\pi N_0}{D_0^\mu} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.4} \Gamma(4+\mu) \left\{ \frac{9.65}{\Lambda^{4+\mu}} - \frac{10.3}{(6+\Lambda)^{4+\mu}} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

で算定できる。ここで、 Γ はガンマ関数を表す。

4 推定手法 本研究で提案するレーダー雨量計による雨量推定手法を以下に述べる。雨滴粒径分布 $N(D)$ を次式で近似する。

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda \cdot D) \quad (3)$$

ここで、 D は雨滴を球形としたときの直径 (mm) である。一方、 Λ を Marshall and Palmer 分布をより一般的に、

$$\Lambda = a \cdot R_r^{-b} \quad (4)$$

で表す。ここで、 R_r はレーダー雨量 (mm/h) で、上空の降雨強度を表し、 a, b は係数である。

レーダーで観測されるレーダー反射因子 Z は、

$$Z = \int_0^\infty D^6 \cdot N(D) dN \quad (5)$$

で表され、単位は $[\text{mm}^6/\text{m}^3]$ である。

次に、上空における降雨強度 R_r は地上の降雨強度 R_g に比べて上空になるにつれて一般的に小さくなるので、 R_r と R_g の関係を

$$R_r = R_g \exp(-d_h \cdot h) \quad (6)$$

のように仮定する。ここで、 $d_h = d/b$ の d は係数で、 b は式 (4) の係数である。 h は地上からの高度を表す。これらの式を整理すると、観測式として次式を得る。

$$\ln Z = \ln 6! + \ln N_0 - 7 \ln a + 7b \ln R_g - 7d \cdot h \quad (7)$$

一方、アメリカの NEXRAD に適用する場合には、雨滴粒径分布の広がり情報としてドップラースペクトルの幅 σ_v が得られる。そこでドップラースペクトル幅の情報もレーダー雨量推定に利用できるよう、

$$\Lambda = [f(h) \cdot \sigma_v]^c \quad (8)$$

を導入する。ここで、 c は定数である。ドップラーレーダーはある仰角で観測を行っているので得られるドップラーレーダー情報には鉛直方向と水平方向の両成分の情報を含んでいる。雨滴粒径分布の情報は、鉛直方向成分より得られるので水平方向成分の情報を低減する関数 $f(h)$ を σ_v に乗じている。式(4)～(6)と式(8)を整理すると、式(7)とは別の新たな観測式；

$$c \ln[f(h) \cdot \sigma_v] = \ln a - b \ln R_g + d \cdot h \quad (9)$$

を得る。式(7)、(9)をレーダー反射因子 Z と地上の降雨量 R_g からパラメーター (N_0, a, b, c, d) を同定する。そして、推定結果に与えるデータの時間スケールの効果についても調査するために、これらの関係を満たす最適な蓄積時間とパラメータを一定とみなす同定時間を明らかにする。蓄積時間とは、その時間内で平均した Z と R_g を式(7)の Z, R_g としている、という意味で用いている。

5 解析結果および考察 解析結果の一例として本研究の推定手法を用いて 1994/5/29 の 12:00～15:00 の 3 時間の NEXRAD データに適用した結果を示す。地上雨量は、MESONET の 9 ポイントの 5 分雨量を用い、今回は、ドップラースペクトルの幅 σ_v の情報が入手できなかったために、パラメータ同定には式(7)のみを用いた。最適な蓄積時間と同定時間を明らかにするために蓄積時間は 10, 15, 30, 60 分、同定時間は 10, 15, 30, 60 分のそれぞれの場合について調べ、式(6)の高さ h の依存性についても調べた。以降、蓄積時間、同定時間は、(蓄積時間、同定時間)で表す。

最適な(蓄積時間、同定時間)は(30, 60)となり、高さ h を考慮した場合の方が推定結果は良くなった。MESONET の地上雨量と本研究の推定手法により推定した雨量との相関係数、MESONET の地上雨量と現行の B, β 法 ($B=300, \beta=1.4$) により推定した雨量との相関係数を表-1 に示す。本研究の推定手法により、現行の推定手法で推定精度が悪いときの推定精度が改善されたことがわかる。レーダー反射因子 Z (図-1) から推定した地上雨量分布を図-2 に、現行の B, β 法 ($B=300, \beta=1.4$) で推定された雨量分布を図-3 に示す。図中の・は地上の MESONET の位置を表している。

次に、本手法で降雨の高さ方向の関係を定式化している式(6)を検証するために、MU レーダーによる雨滴粒径分布の観測および地上の同期観測を実施した。MU レーダーで観測された雨滴の落下速度のドップラースペクトルから推定された雨滴粒径分布のパラメータを用いて算定した各高度の R_r と、地上降雨量 R_g を用いて式(6)のパラメータ d_h の同定を行った。式(2)より算定された各高度での降雨量 R_r と地上降雨量 R_g の比 (R_r/R_g) の高さ方向 h の関係を図-4 に示す。図中の直線は、パラメータ同定された d_h を用いて式(6)の関係を示したものである。直線の傾きと (R_r/R_g) 分布の傾きが異なっていることがわかる。これは、MU レーダと地上降雨量を観測した光学式雨量計のバイアスのためと考える。 (R_r/R_g) の高さ方向の関係は、

$$R_r = \alpha R_g \exp(-d_h h) \quad (10)$$

とした方が、より降雨量の高さ方向の変化を反映できると考える。しかし、式(10)は、式(6)の関係だけを満たすものとして定式化したもので、式(7)を用いて同定されるパラメータ (N_0, a, b) に因子として α は含まれており、 d_h はうまく表現されている。ただし、パラメータの物理的意味を重視するならば、独立のパラメータとして α を算定した方がよい。

表-1 相関係数 (積分時間30分、同定時間60分)

	12:00～13:00	13:00～14:00	14:00～15:00	Total
本研究での推定手法	0.6604	0.3645	0.5959	0.7521
現行の推定手法	0.5894	0.3657	0.5808	0.709



図-1 NEXRADで観測された $Z(\text{dB})$ の分布

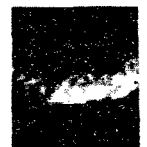


図-2 推定された雨量 $R_g(\text{mm/h})$ の分布



図-3 現行の B, β 法による $R_g(\text{mm/h})$ の分布

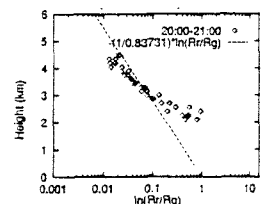


図-4 降雨量の高さ方向変化

6 おわりに 今回は、我が国の MU レーダー、アメリカ合衆国の NEXRAD レーダーに適用した結果、高さ方向の降雨強度の変化を考慮した提案手法の有効性が示されたと考える。