

## 雨滴粒径分布の鉛直プロファイルを利用した レーダー雨量推定手法の構築

中北 英一・中川 勝広・池淵 周一・佐藤 亨・  
Baxter Vieux・高棹 琢馬

### UTILIZATION OF VERTICAL PROFILE OF DSD INTO BUILDING UP AN ALGORITHM FOR ESTIMATING GROUND RAINFALL AMOUNT USING RADAR

By Eiichi NAKAKITA, Katsuhiro NAKAGAWA, Shuichi IKEBUCHI,  
Toru SATO, Baxter VIEUX and Takuma TAKASAO

#### Synopsis

Purposes of this research are to observe and analyze the vertical profile of the rain drop size distribution (DSD), and to utilize the results into formulating a new method of estimating rainfall intensity and/or amount by making use of information detected by operational radar observations. Firstly, observations of DSD were carried out both by the Disdrometer in conjunction with an optical instrument on ground surface, and also by a vertical pointing VHF Doppler radar in Japan named the MU (Middle and Upper) Radar, which can detect vertical profiles of the Doppler spectrum that are composed of both the rain drop itself and air movements. Secondly, formulations to correlate the ground surface-based rainfall intensity to the radar reflectivity by taking into account both i) the difference in rainfall intensities between radar beam and rain gage height as well as ii) the width of the Doppler spectrum were completed. Finally, the formulation was applied into two case studies. One was to a operational volume scanning radar, in which we can directly use information from the vertical profiles of DSD observed by the MU Radar, thereby checking the feasibility of the formulation, (although we can not currently use the information on the spectrum width in the operational sense). The other was to the Blue River Basin in Oklahoma, U. S. A. covered by a NEXRAD radar observation domain, which can also operationally provide information on the Doppler spectrum width although the radar is not a vertical pointing radar.

#### 1. 序 論

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ておらず観測精度上十分であるとは言えない。よって洪水予測モデルへの定量的な入力情報やダム操作、避難勧告の発令などの判断基準としてレーダーを用いるまでには至っていない。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。レーダー雨量の推定には、様々な不確定要素が含まれている。例えば、ブライトバンドの存在、雨滴粒径分布の多様性、レーダー反射因子の鉛直分布、降雨による電波の減衰、観測精度などの問題がある。

そこで本論文では、はじめに、鉛直方向の雨滴粒径分布の観測を行い、次に、観測された雨滴粒径分布を用いて、降雨強度の高さ依存性を定式化する。そして、レーダー反射因子の3次元分布を用いて地上雨量を推定するための観測式を新たに構築する。次に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を用いた観測式を構築する。最後に、最初に定式化した観測式をアメリカのNEXRADネットワークのドップラーレーダーと日本のレーダー雨量計に適用した。

## 2. MU レーダーによる観測および解析

### 2.1 観測の概要

雨滴粒径分布の観測は、MU レーダーの鉛直方向の観測と同時に地上においてディストロメータとそれに併設して光学式雨量計による観測を実施した。地上同期観測は、MU レーダーサイトで行った。MU レーダーで観測されるドップラースペクトルの時・空間分解能は、3分、150mで、地上観測のディストロメータと光学式雨量計の時間分解能は、1分である。

MU レーダーの観測領域は、Cバンドのレーダーである建設省深山レーダー雨量計でも降雨強度の観測が実施されている (Fig. 1)<sup>1)</sup>。観測の概略図を Fig. 2 に示す。

#### (1) MU レーダーについて

MU (Middle and Upper atmosphere) レーダーは直径 103 m の円形敷地内に直交 3 素子八木アンテナを 475 本配列した大口径アレイアンテナを用いた VHF 帯のモノスタティック・パルスレーダー (monostatic pulse radar) であり、1984 年アジアで最初の大気観測用大型レーダーとして京都大学超高層電波研究センターにより滋賀県甲賀郡信楽町に建設された (Fig. 1)。MU レーダーは各アンテナ素子毎に固体送受信機を配置し電子的に位相制御を行うアクティブ・フェイズド・アレイ・システム (active phased array system) を採用しており、高速のビーム走査が可能である。さらに、MU レーダーは、VHF 帯のドップラーレーダーであるため、UHF 帯および SHF 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

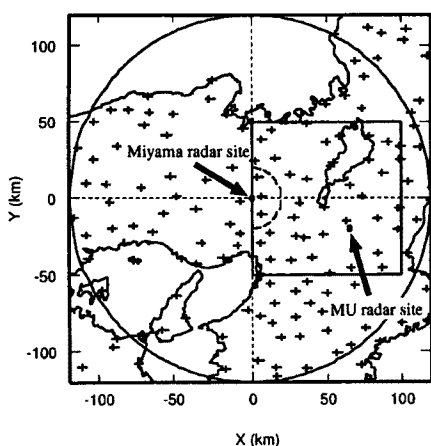


Fig. 1. Locations of the MU radar, the Miyama radar and the AMeDAS rain gauge station.

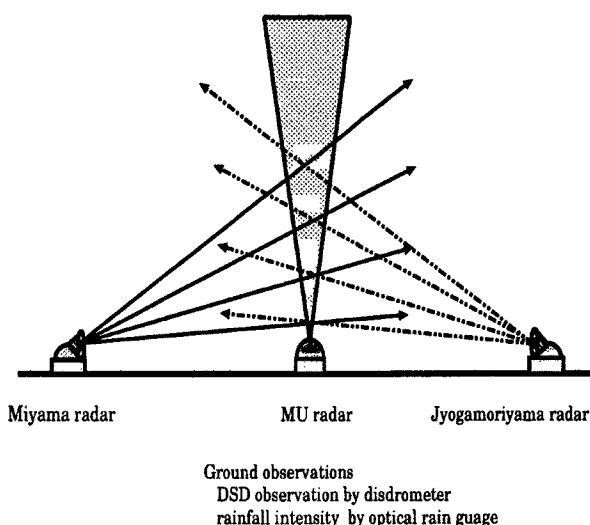


Fig. 2. Outline of the observation

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の粒径分布を測定することができる (2.2 参照)。

## 2.2 鉛直方向の雨滴粒径分布の推定方法

MU レーダーで観測されるドップラースペクトル分布から鉛直方向の雨滴粒径分布を推定する方法は Sato et al.<sup>4)</sup> により提案されており、ここではその原理のみを以下に示す。

晴天時には MU レーダーは上空の大気乱流からのエコーによる単峰性のスペクトルが観測されるが、降雨時にはそれらに正のドップラースhift (下向きの速度成分) を持つ雨滴からのエコーが加わった双峰性のスペクトルが観測される。雨滴エコーのドップラースペクトル  $S_p(v_p)$  は、

$$S_p(v_p) = C \cdot N(D) \cdot D^6 / \left| \frac{d(v_p(D))}{dD} \right| \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ここで、 $C$  は MU レーダーシステムの諸定数から決まる定数、 $D$  は雨滴の直径である。 $v_p(D)$  は鉛直上向きを正とした雨滴のドップラー速度であり、Gunn and Kinzer (1949)<sup>3)</sup> により測定データから得られた経験式；

$$v_p(D) = -[9.65 - 10.3 \exp(-6D)] \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{0.4} \dots\dots\dots (2)$$

で表される。ただし、 $\rho_0, \rho$  はそれぞれ地上および観測高度における大気密度である。地上および観測高度における大気密度は U. S. 標準大気を利用する。U. S. 標準大気とは地上から数百 km におよぶ大気についての気温・気圧・密度などを気球・ロケット・人工衛星などで観測された観測値を基にしてアメリカで決定されたものである。大気密度データは、高度分解能 1 km で、これらをスプライン関数で補間することによって各高度の大気密度を求める。

一方、雨滴粒径分布  $N(D)$  は、ガンマ分布

$$N(D) = \begin{cases} N_0 \left( \frac{D}{D_0} \right)^\mu \exp(-\Lambda D) & : (v_{max} \leq v_p(D) \leq 0), \\ 0 & : (v_p(D) < v_{max}, 0 < v_p(D)), \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

によって近似される。 $N_0, \Lambda, \mu$  は降雨の種類によって決まる定数である。ここで、雨滴の直径はその直径が約 6 mm になると分裂してしまい、それより大きいものは存在しないため、雨滴の最大直径が 6 mm 以下である。これより求まる雨滴の最大落下速度  $v_{max}$  をパラメータとして加えている。

一方、大気乱流からのエコーのドップラースペクトルはガウス関数で近似でき、

$$S_0(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ -\frac{(v-w)^2}{2\sigma^2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

と表される。ただし、式(4)は正規化を行ってある。ここで  $v$  はドップラー速度であり、 $w$  は視線方向平均風速、 $\sigma$  はスペクトル幅を表す。

雨滴が大気の動きに完全に追従するものと仮定すると MU レーダーで観測されるドップラースペクトル  $S(v)$  は、

$$S(v) = P_0 S_0(v) + S_p(v) * S_0(v) + P_n \dots\dots\dots (5)$$

と表される。ただし、 $v$  は視線方向ドップラー速度、 $P_0$  はパワースペクトルのピーク値、 $P_n$  はノイズレベル

ルである。\*はたたみこみ積分を表す。実際にはFFTを行うときにデータ長が有限であることによりスペクトルが歪み、実際は、式(5)の $S(v)$ とFFTの窓関数 $W(v)$ とのたたみこみ積分；

$$S'(v) = S(v) * W(v) \quad \text{..... (6)}$$

が観測されることになる。以上より、式(5)に含まれるパラメータは $P_0, w, \alpha, P_n, N_0, \Lambda, v_{max}, \mu$ の8個である。 $S_0$ は大気乱流の情報とともに雨滴粒径分布 $N(D)$ の情報も含んでいるので、式(6)から $N(D)$ を推定することができる。それには、まず $\mu$ の値を固定し、残りの7個のパラメータを非線形最小自乗法を用いて、 $\log(S_{obs}(v))$ と $\log(S_0(v))$ の残差二乗和が最小となるパラメータを求める。次に $\mu$ の値を変化させてそれぞれの $\mu$ の値に対し残差二乗和が最小となるパラメータを求め、それらの残差二乗和が最も小さい組み合わせを雨滴粒径分布のパラメータとする。推定された $P_0, w, \alpha, P_n, N_0, \Lambda, v_{max}, \mu$ 計8つのパラメータを用いて各高度におけるレーダ反射因子 $Z$  [ $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ]と降雨強度 $R_r$  [ $\text{mm}/\text{h}$ ]を算定する。すなわち、 $D$  [ $\text{cm}$ ],  $V(D)$  [ $\text{m}/\text{sec}$ ],  $N_0$  [ $\text{mm}^{-1}\text{m}^{-3}$ ],  $\Lambda$  [ $\text{cm}^{-1}$ ]のとき、

$$Z = 10^7 \int_0^\infty D^6 N(D) dD = 10^7 \times \frac{N_0 \Gamma(7+\mu)}{D_0^6 \Lambda^{7+\mu}} \quad \text{..... (7)}$$

を用いて $Z$ を算定することができ、特に $\mu=0$ のときは、

$$Z = 10^7 \times \frac{N_0 6!}{\Lambda^7} \quad \text{..... (8)}$$

となる。一方、降雨強度 $R_r$ は、

$$R_r = 36 \times \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 N(D) v_p(D) dD = \frac{6\pi N_0}{D_0^6} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.4} \Gamma(4+\mu) \left\{ \frac{9.65}{\Lambda^{4+\mu}} - \frac{10.3}{(6+\Lambda)^{4+\mu}} \right\} \quad \text{..... (9)}$$

によって算定でき、特に $\mu=0$ のとき、

$$R_r = 6\pi N_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.4} 3! \left\{ \frac{9.65}{\Lambda^4} - \frac{10.3}{(6+\Lambda)^4} \right\} \quad \text{..... (10)}$$

となる。ここで、 $\Gamma$ はガンマ関数を表す。ただし、 $v_p(D)$ は式(2)を用いた。

### 2.3 解析結果

式(7)および式(8)で算定したレーダー反射因子 $Z$ の鉛直分布の時系列をそれぞれFig. 3(a), (b)に、式(9)および式(10)で算定した降雨強度の鉛直方向の分布をそれぞれFig. 4(a), (b)に示す。これらの図より、高度2 km未満と、4.5 km～5.5 kmの2つの領域での降雨強度のばらつきが大きいことがわかる。高度2 km未満においては、雨滴粒径分布の推定精度が悪いためであると考えられる。これは、MUレーダーの観測モードが対流圏モードと成層圏モードの2種類あり、観測はこれらを交互に観測しているためにモードが切り替わり、電力が安定しないため観測されたドップラースペクトル分布から雨滴の落下速度のドップラースペクトルを抽出することが困難であるためである。一方、高度4.5 km以上5.5 km以下に関しては、この領域にブライトバンドが存在し、レーダーの反射特性が異なるために推定精度が低くなる。

解析対象とする時間帯は1994年9月29日18:00～23:00の5時間である。なお、台風がMUレーダーサイト直上を通過した時刻は22:44頃でレーダー反射因子 $Z$ の値が著しく小さくなっていることがわかる(図中に示す)。

Fig. 5(a), (b)にMUレーダーで観測されたドップラースペクトルから推定した積分時間が15分、30分の降雨量 $R_r$ と光学式雨量計で観測された同一時間の地上雨量 $R_g$ の比( $R_r/R_g$ )の高さ方向の関係をプ

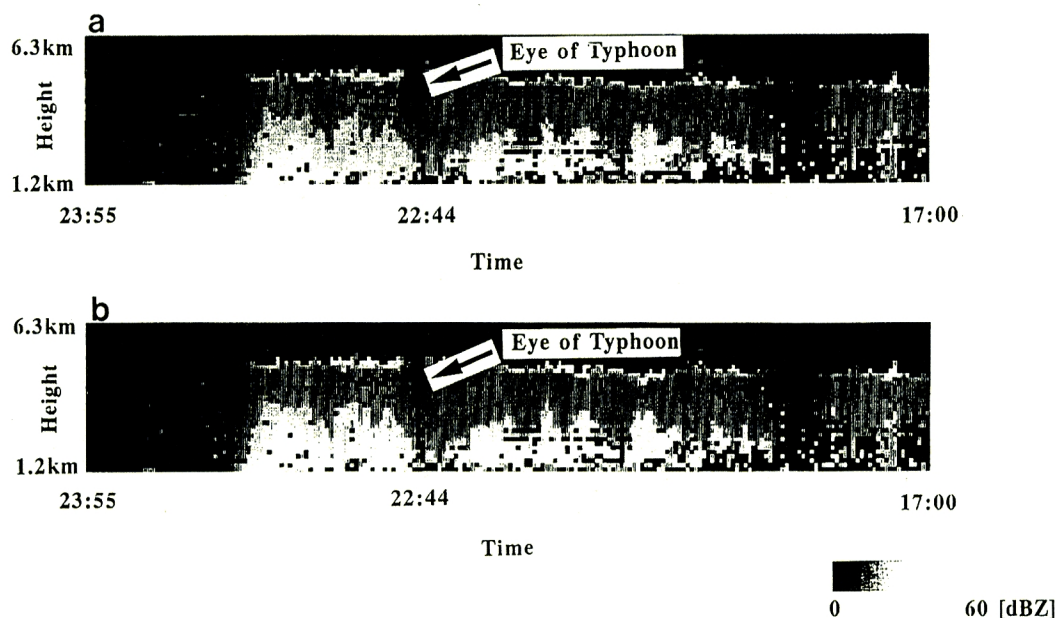


Fig. 3. Time series of vertical profile of the radar reflective factor computed using DSDs of (a) Gamma type and (b) Marshall Palmar type.

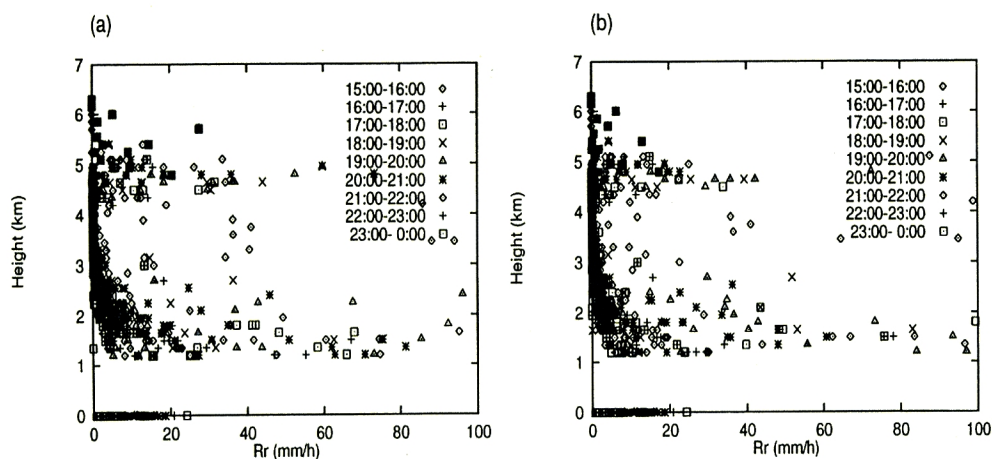


Fig. 4. Time series of vertical profile of rainfall intensity estimated using DSDs of (a) Gamma type and (b) Marshall Palmar type.

ロットしたものを示す。これらの図より、降雨の高さ方向の関係は、

$$R_r = \alpha_{bias} R_g \exp(\beta_h h) \quad \dots\dots\dots (11)$$

で近似できる。ここで、 $h$  は、レーダービーム高度と地上間の距離である。一方、 $\alpha_{bias}$  は、レーダーと雨量計の観測機器のバイアスと解析することができる。

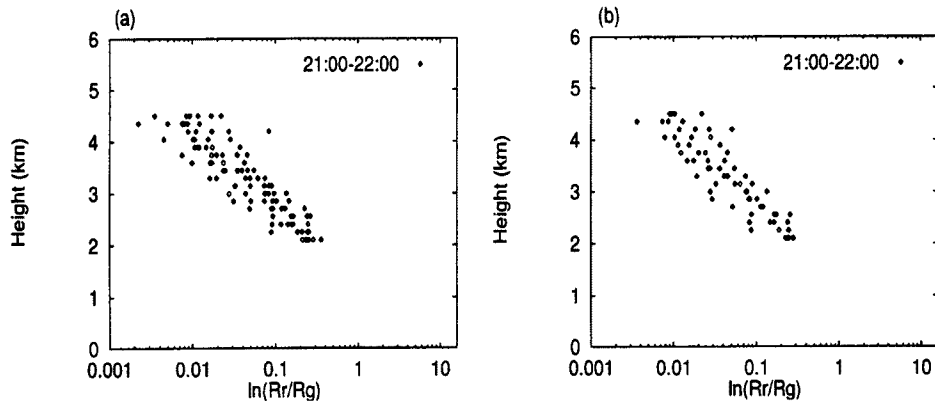


Fig. 5. Height dependencies of  $\ln R_r/R_g$  where  $R_r$  is rainfall intensity above ground and  $R_g$  is on the ground surface. 30 minute averaged values are used in (a) and 60 minute averaged values are used in (b), as  $R_r$  and  $R_g$ .

### 3. 降雨の鉛直分布を考慮した地上雨量の推定手法

雨滴の粒径分布  $N(D)$  を式(12) のような指数関数で近似する；

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda \cdot D) \dots\dots\dots (12)$$

レーダー反射因子  $Z$  を式(12) で表すと、

$$Z = \int_0^\infty D^6 \cdot N(D) dD = \int_0^\infty D^6 \cdot N_0 \exp(-\Lambda \cdot D) dD = \frac{6! N_0}{\Lambda^7} \dots\dots\dots (13)$$

となる。さらに、式(12) の  $\Lambda$  を Marshall and Palmer 分布型<sup>6)</sup>と呼ばれる式形；

$$\Lambda = a \cdot R_r^{-b} \dots\dots\dots (14)$$

で表す。ここで、 $R_r$  はレーダー雨量計のレーダービームが走査する高度における降雨強度である。

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、 $R_r$  を地上における降雨強度  $R_g$  を用い、2. より得られた結果から

$$R_r = \alpha_{bias} R_g \exp(-\beta_h \cdot h) \dots\dots\dots (15)$$

とする。この式を導入することにより降雨の高さ方向の変化を反映することができると考える。そして、3次元レーダー情報を用いることにより降雨の3次元構造を考慮したレーダー雨量の推定が行えることになる。

以上の式を整理すると、

$$\ln Z = \ln 6! + A_1 + 7b \ln R_g - 7c \cdot h \dots\dots\dots (16)$$

に帰着する。ここで、 $c = \beta_h h$  である。レーダー情報から得られる  $\ln Z$ 、地上観測の降水情報から得られる  $\ln R_g$ 、およびレーダービームの走査高度  $h$  を既知として、線形最小自乗法により、 $A_1$ 、 $b$ 、 $c$  を同定する。

さらに NEXRAD (後述) のように、時々刻々ドップラースペクトル分布の幅  $\sigma_v$  が得られる場合には、 $\sigma_v$  に雨滴粒径分布の幅  $\Lambda$  に関する情報がある程度含まれているとして、以下のように定式化する。すなわ

ち、式(16)に加えて $\Lambda$ が高さ $h$ のある関数 $f(h)$ とドップラースペクトル分布の幅 $\sigma_v$ を用いて、

$$\Lambda = d[f(h) \cdot \sigma_v]^e \quad \dots\dots\dots (17)$$

のように表せると仮定する。すなわち、ドップラーレーダーはある仰角で観測を行っているため、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者のドップラー情報を含んでいる。その内鉛直方向のドップラー情報は雨滴粒径分布の幅に関する情報を含んでいる。しかし、得られるドップラースペクトルの幅が鉛直方向に見たドップラースペクトルの幅に依存する度合いはレーダービームが走査する地点でのビーム仰角に依存する。すなわち、ビーム仰角が $90^\circ$ であれば、得られるドップラースペクトルの幅は、完全に鉛直方向に見たドップラースペクトルの幅となるし、ビーム仰角が $0^\circ$ であれば、鉛直方向の情報は含まれない。一方、地球の表面の曲率の存在を考慮すると、1つのビーム走行線に着目した場合、走行線上でのビーム仰角は、レーダーサイトからの距離、あるいは別の表現をすれば走行線上の高度に依存することになる。そこで、この鉛直情報の含まれる度合いの高度への依存性を表現するために、 $\sigma_v$ に $f(h)$ を乗じている。式(13)と式(17)より観測式として、

$$e \ln[f(h) \cdot \sigma_v] = A_2 - b \ln R_g + c \cdot h \quad \dots\dots\dots (18)$$

が得られる。さらに、式(16)と式(18)より、

$$\begin{pmatrix} \ln Z - \ln 6! \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 7 \ln R_g & -7h & 0 \\ 0 & 1 & -\ln R_g & h & -\ln[f(h) \cdot \sigma_v] \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ b \\ c \\ e \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (19)$$

が得られる。したがって、ドップラースペクトルの幅に関する情報が得られる場合には、式(19)を観測式として、パラメータ $A_1$ ,  $A_2$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$ の計5個をHouseholder変換を用いた線形最小自乗法により同定する。

ただし、式(19)は、降雨の鉛直プロファイルを考慮した地上雨量推定手法として定式化したもので、本推定手法の適用には、式(16)のみを用いてパラメータの同定を行う。

## 4. NEXRAD への適用

### 4.1 NEXRAD について

NEXRAD (Next Generation Weather Radar) は、アメリカ合衆国の商務省、国防省、運輸省の3省が共同でアメリカ全土を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に行っているプロジェクトのことである。

このドップラーレーダーは、Sバンド<sup>1</sup>のため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ので-30 [dBZ] 程度まで観測が可能な感度を有する。ビーム幅は、半径230 kmで4 km, 345 kmで6 km, 460 kmで9 kmである。空間分解能は、半径230 kmまでは、 $1^\circ \times 1$  km, 半径230 kmから460 kmまでは、 $1^\circ \times 2$  kmまたは $1^\circ \times 4$  kmである。

このレーダーの特徴としては、ドップラースペクトルの幅( $1\sigma$ )の情報がレーダーエコー、ドップラー速度と同時に得られることである<sup>7)</sup>。

<sup>1</sup> 波長：7.5～15 cm, 周波数：2～4 GHz

## 4.2 解析方法

使用したデータは、ビーム仰角の一番小さい ( $\theta = 0.5$  (deg)) モードで観測されたものを用い、推定の際に降雨の高さ依存性を考慮した場合と考慮しない場合での推定結果に与える影響について調査した。すなわち、高さ依存性を考慮する場合は、式(16)のパラメータ  $c$  が推定され、高さ依存性を考慮しない場合はパラメータ  $c = 0$  となる。

地上雨量としてはアメリカのオクラホマ州を中心に展開されている MESONET の 9 ポイントのデータを使用した。使用したデータの期間は、1994 年 5 月 29 日 12:00 から 15:00 までの 3 時間である。解析対象領域は、117 km × 127 km であり、アメリカ合衆国オクラホマ州の南東部に位置する Blue River の流域を含む (Fig. 6 レーダーサイトは対象領域の中心から約 126 km 北西の領域外にある)。

解析に用いるデータは MESONET による 5 分降雨量、および約 5 分間で観測された NEXRAD のデータである。しかし、MESONET データは 5 分間隔で観測されているが NEXRAD は均等な時間間隔で観測されておらず、ある 5 分間には、NEXRAD で観測されていないという問題が生じる。そこで、解析上 5 分間に NEXRAD で観測されていない場合はその前後の観測データで補完する形をとった。補完方法は、式(20)に示すように前後のデータの平均値を用いた。

$$Z_{dbz}(t) = \frac{Z_{dbz}(t_{bef}) + Z_{dbz}(t_{aft})}{2} \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 $Z_{dbz}(t_{bef})$ ,  $Z_{dbz}(t_{aft})$  は、補間する前後の dBZ 値を示しており、 $Z_{dbz}(t)$  は時刻  $t$  の NEXRAD で観測された dBZ 値を表している。領域内の NEXRAD で観測されたレーダー反射因子の分布の一例を Fig. 7 に示す。

式(20)によってレーダーデータと地上の雨量データが 5 分間隔で対応する連続的なデータセットとなる。

ただし、本手法に適用する際にはすべて dBZ 値を

$$Z[\text{mm}^6/\text{m}^3] = 10^{Z[\text{dBZ}]/10} \dots\dots\dots (21)$$

によって変換したものをを用いている。

## 4.3 解析結果

1994 年 5 月 29 日の 12:00 ~ 15:00 の 3 時間の NEXRAD データに適用した結果を示す。パラメータ同

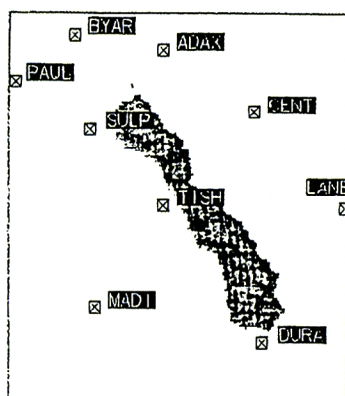


Fig. 6. Location of the MESONET stations and Blue River Basin.

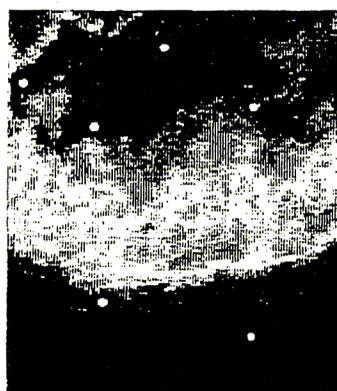


Fig. 7. Horizontal distribution of radar reflectivity observed by the NEXRAD radar

定には式(16)のみを用い、5分間のレーダー雨量の推定を行った。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分のそれぞれについて調べ、式(15)の高さ $h$ の依存性についても調べた。蓄積時間とは、パラメータ同定の際に、その時間内で平均したレーダー反射因子 $Z$ 、観測された地上雨量 $R_g$ を用いることを意味し、同定時間とは、その期間内ではパラメータは一定として同定するという意味している。以降、蓄積時間、同定時間は、 $(T_{ac}, T_{id})$ で表す。

解析の結果、最適な $(T_{ac}, T_{id})$ は(30分, 60分)となったので、以下、この場合についてのみ議論する。しかも高さ $h$ を考慮した場合の方が推定結果は良くなった。Fig. 8 (a), (b)に地上雨量 $R_g$ と推定雨量 $R_e$ を比較したものを示す。ただし、推定雨量が非現実的な値をとる場合があるので、推定雨量が250 mm/h以上に関しては、図には示していない。推定雨量が非現実的な雨量を推定する原因として、観測式を対数表現しているためであると考えられる。なぜなら、観測式を対数表現しているために、推定値は同定されたパラメータに対して非常に敏感であるからである。

Fig. 8 (a)は、推定の際に高さ方向の情報を導入した場合の比較図であり、Fig. 8 (b)は、推定の際に高さ方向の情報を導入しない場合、すなわち、パラメータ $c$ を0としてパラメータ推定をした結果の比較図である。これらの図より、パラメータ推定の際に高さ方向の情報を導入した場合推定精度が向上していることが明らかである。特に、高さ方向の情報を導入しなかった場合の推定精度が悪い時間帯(12:00～13:00)の推定精度が向上した。

MESONETの5分雨量と本手法により推定した5分雨量との相関係数、MESONETの5分雨量と現行の $B, \beta$ 法( $B=300, \beta=1.4$ )により推定した5分雨量との相関係数をTable 1に示す。降雨分布の鉛直分布を考慮した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。このことは、ここでは示していないが、全ての蓄積時間、同定時間の場合について言うことができる。

次に、それぞれの3時間総降雨量について調べた(Table 2)。本推定手法の推定結果と現行の $B, \beta$ 法の推定結果はそれほど変わらず、総降雨量に関して精度向上を確認することはできなかった。

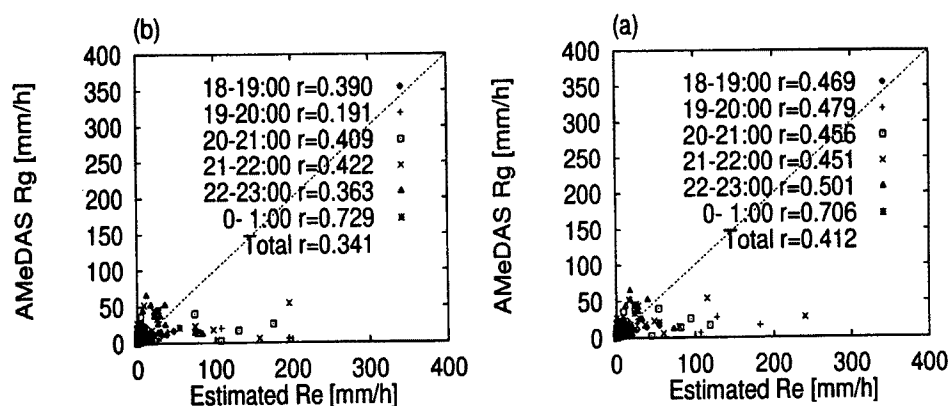


Fig. 8. Comparisons between  $R_g$  and  $R_e$ , (a) when the parameter  $c$  of the last term in the right hand side of Eq. (18) is identified and (b) is the result when the parameter  $c$  is assumed to be 0. Only the Lowest Beam scan is used here.

Table 1. Regression coefficients of 5 minute rainfall estimations by proposed method and conventional method using a NEXRAD radar

|                     | 12:00～13:00 | 13:00～14:00 | 14:00～15:00 | Total  |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|--------|
| Proposed Method     | 0.6604      | 0.8645      | 0.5959      | 0.7521 |
| Conventional Method | 0.5894      | 0.8667      | 0.5808      | 0.7090 |

Table 2. Total rainfall amounts observed by MESONET rain gages, estimated by proposed method and by the conventional method.

| MESONET Stations     | ADAX  | BYAR  | CNTR  | DURA  | LANE  | MADI  | PAUL  | SULP  |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MESONET Observations | 19.26 | 14.26 | 30.68 | 26.69 | 34.92 | 32.79 | 46.17 | 33.33 |
| Proposed Method      | 7.81  | 9.63  | 15.65 | 23.71 | 32.5  | 29.32 | 16.10 | 16.77 |
| Conventional Method  | 7.03  | 11.09 | 15.44 | 25.39 | 39.08 | 30.62 | 16.84 | 19.07 |

5 分雨量で精度向上が確認できているにも関わらず総降雨量で精度向上が確認できなかった理由としては、最適な  $(T_{ac}, T_{id})$  が (30 分, 60 分) で同定されたパラメータを用いて 5 分雨量に変換したものをを用いていることが挙げられる。推定手法で述べたように、 $Z, R_g$  は、蓄積時間内の平均を用いており、同定されたパラメータで蓄積時間以下の雨量を表現することは、困難であるためであると考えられる。最適な蓄積時間の雨量に変換した総降雨量について調べる必要があるものと考えられる。

## 5. 建設省深山レーダー雨量計への適用

### 5.1 建設省深山レーダー雨量計について

建設省深山レーダー雨量計は、大阪府、兵庫県と京都府の県境に設置された C バンドのレーダー雨量計である。この深山レーダー雨量計の特徴は、仰角固定観測だけでなく仰角可変観測、つまり 3 次元観測も行えるところにある。

仰角固定の観測範囲は、レーダーサイトを中心とした半径 120 km の円内の定量観測範囲と 120 km から 198 km までの定性観測範囲とに分けられる。仰角可変の観測範囲は、半径 120 km、高さ約 15 km の円筒状をしている。ただし、ビームの最大仰角が  $23.5^\circ$  のためにレーダーサイトを頂点とする逆円錐状の部分はデータがなく、底面部もビームの最低仰角が  $0^\circ$  でないためレーダーサイトを頂点とした逆円錐状になっている。データの平均空間分解能は、約 3 km である。

### 5.2 解析手法

地上雨量は、AMeDAS の 1 時間雨量を用いた。解析領域は、Fig. 1 の斜線部で示した領域で、領域内の AMeDAS の観測点は、43 点である。深山レーダー雨量計の仰角可変モードで得られるレーダー反射因子  $Z$  は 5 分毎に得られ、解析には 1 時間の平均値を用いた。すなわち、 $(T_{ac}, T_{id})$  が (60 分, 60 分) で解析を行った。現行の  $B, \beta$  による推定には、仰角固定モードで得られるレーダー反射因子  $Z$  を用いて行われており、仰角固定モードのレーダー反射因子  $Z$  は、5 スキャンした際に観測されたレーダー反射因子  $Z$  の平均値である。

今回実施した仰角可変モードで得られるレーダー反射因子  $Z$  は、1 スキャンのレーダー反射因子  $Z$  であるために今回の推定結果と現行の  $B, \beta$  による推定結果を比較することは、使用するデータの性質が異なるために厳密な比較が困難であると判断し、行わなかった。本論文では、仰角可変モードで得られるレーダー反射因子  $Z$  を用いて、推定の際に最低仰角のデータを用いて 4. と同様に高さ方向の情報を導入した場合としない場合、そして推定に 3 次元情報を用いた場合の推定結果に与える影響について調査した。

### 5.3 解析結果

Fig. 9 (a), (b) に仰角可変モードでビーム仰角が  $1^\circ$  (最低仰角) で観測されたレーダー反射因子  $Z$  を用いた場合の情報をを用いた場合の地上雨量  $R_g$  と推定雨量  $R_e$  を比較したもの示す。Fig. 9 (a) は、高さ方

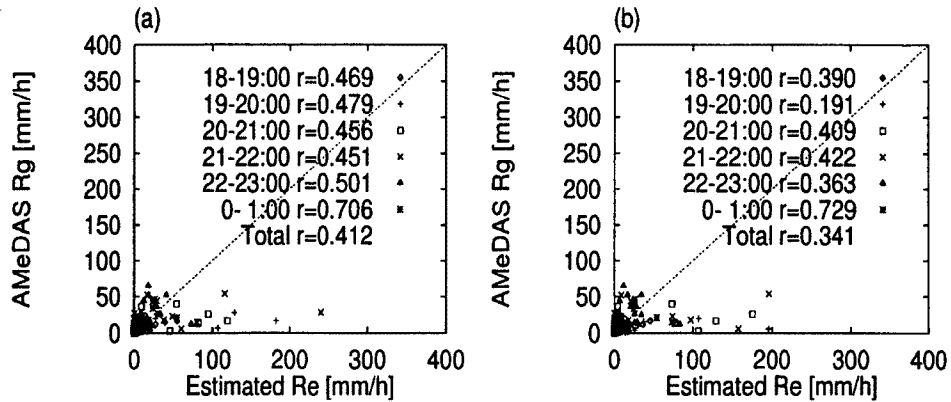


Fig. 9. Comparisons between  $R_g$  and  $R_e$ , (a) when the parameter  $c$  of the last term in the right hand side of Eq. (15) is identified and (b) is the result when the parameter  $c$  is assumed to be 0.  $r$  represents the regression coefficient for each 1 hour time period. Only the Lowest Beam scan is used here.

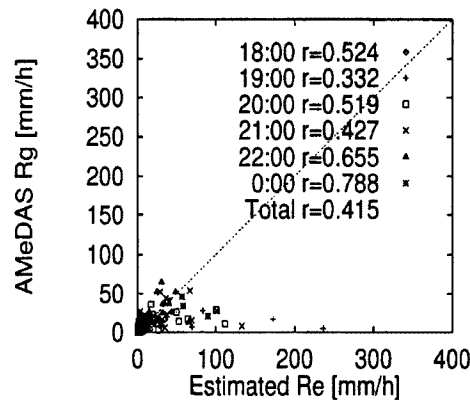


Fig. 10. Comparisons between  $R_g$  and  $R_e$ .  $r$  represents the regression coefficient for each 1 hour time period. Three-dimensional distribution of radar reflectivity below the bright band is used.

向の情報を用いた場合で、Fig. 9 (b) は、高さ方向の情報を用いたなかった場合の比較図である。これら 2 つの図を比較すると、NEXRAD に適用した場合の結果と同様に高さ方向の情報を導入した場合、特に高さ方向の情報を導入しなかった場合の推定精度の悪い時間帯について推定精度が向上していることが明らかである。全ての時間を通しての推定精度も向上していることがわかる。

Fig. 10 に 3 次元情報を用いた場合の図を示す。Fig. 9 (a), (b) と Fig. 10 を比較すると、3 次元情報を用いた場合が推定精度が最も良いことがわかる。

以上のことから、本推定手法を用いて地上雨量を推定する場合、レーダーの 3 次元情報を用いて地上雨量を推定することにより推定精度が向上することができる。

## 6. 結 論

以上、本論文で述べた内容をまとめると以下のようなになる。

- VHF 帯のドップラーレーダーである MU レーダーによる鉛直方向の雨滴粒径分布の観測。
- 観測された雨滴粒径分布から推定した降雨強度の対数の鉛直分布は、第一近似的に高さ方向に線形の関係がある。
- 最初の観測式は、Marshall and Palmer 型の雨滴粒径分布に基づいて定式化され、高さ方向の降雨強度に依存する。
- もう一つの観測式は、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を使うことによって定式化できる。
- 最初の観測式を単一のビーム仰角から得られる NEXRAD に適用した。その結果、高さ依存性を導入することにより推定精度が改善された。
- 最初の観測式を 3 次元レーダー情報が得られる日本のレーダー適用した。その結果、レーダー反射因子の 3 次元分布を用いることでも推定精度が改善された。

本論文では、観測された雨滴粒径分布の鉛直分布は、降雨強度の高さ依存性を調査するためにだけ用いた。理論的な次のステップとして、雨滴粒径分布のパラメータの鉛直分布に関する観測式を再構築することである。一方、現在の推定手法では、非現実的な過剰推定値を推定することがあるが、原因として、観測式を対数表現しているためであると考えられる。なぜなら、観測式を対数表現しているために、推定値は同定されたパラメータに対して非常に敏感であるからである。それゆえに、次のステップとしては、観測式を対数表現ではなく、非線形で定義しなければならない。これらの 2 つのステップをふまえた上でこれから推定手法を改善する必要があるが、推定精度の向上にはレーダー反射因子の 3 次元分布情報を使うことが効果的であるということは、明らかであると言える。

最後になりましたが、建設省深山レーダー雨量計のデータをご提供下さいました建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所の方々に感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤 亨：雨滴粒径分布の鉛直プロファイルを考慮したレーダー雨量推定手法の構築，平成 7 年度関西支部年次学術講演会概要集，1995。
- 2) 寺岡俊浩・佐藤 亨・木村磐根・橋口浩之・深尾昌一郎：MU レーダーと境界層レーダーによる降雨粒径分布の二周波同時観測，信学技報，pp. 73 - 80，1993。
- 3) Gunn, R. and G. D. Kinzer : The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air, *J. Meteorol.*, Vol. 6, pp. 243 - 248, 1949.
- 4) Sato, T., Doji, Iwai and Kimura : Computer processing for deriving drop-size distribution and vertical air velocities from VHF Doppler radar spectra, *Radio Science*, Vol. 25, No. 5, pp. 961 - 973, 1990.
- 5) Fukao, S., K. Wakasugi, T. Sato, T. Tsuda, I. Hirota, I. Kimura and S. Kato : Direct Measurement of Air and Precipitation by Very High Frequency Doppler Radar, *Nature*, Vol. 316, No. 6030, pp. 712 - 714, 1985.
- 6) Marshall, J. S. and W. M. Palmer : The Distribution of Raindrops with Size., *J. Meteor.*, 5, pp. 165 - 166, 1948.
- 7) Ron Alberty : The NEXRAD Program and The WRS-88 D Operational Support Facility, Preprinting of 2nd International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Hannover, 1992.