

# 降雨の3次元構造を考慮したレーダー雨量推定手法の構築

Utilization of Vertical Profile of DSD into Building up  
an Algorithm for Estimating Ground Rainfall Using Radar

中川 勝広\*, 中北 英一\*\*, 池淵 周一\*\*\*,  
佐藤 亨\*\*\*\*, Baxter E. VIEUX\*\*\*\*\*, 高棹 琢馬\*\*\*\*\*

By Katsuhiko NAKAGAWA, Eiichi NAKAKITA, Shuichi IKEBUCHI,  
Toru SATO, Baxter E. VIEUX, and Takuma TAKASAO

Purposes of this research are to observe the vertical profile of the rain drop size distribution, 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 were carried out by the MU 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 with 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 Doppler spectrum were completed. Finally, the formulation was applied into two case studies using Miyama Radar and NEXRAD.

*Keywords : vertical profile of DSD, MU radar, NEXRAD*

## 1 序論

レーダー雨量計は、広範囲の降雨を瞬時にとらえることが可能で降雨予測や洪水流出など水文予測を行う上では非常に有効である。しかし、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（以下レーダー雨量）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。これらの不確定要素をクローズアップさせる大きな原因として、レーダービームの走行高度と雨量観測を行なっている地上との大きな高度差の存在が挙げられる。その原因として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、レーダー反射因子の鉛直分布の多様性、降雨による電波の減衰などの問題がある。そこで本論文では、鉛直方向の雨滴粒径分布の観測を行い、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 [1] と日本のレーダー雨量計に適用する。

## 2 MU レーダーによる雨滴粒径分布の鉛直観測

### 2.1 MU レーダー

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

*	学生会員	工修 京都大学大学院工学研究科博士課程	****	工博 京都大学助教授 工学部
**	正会員	工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒 611 京都府宇治市五ヶ庄)	*****	(〒 601-01 京都市左京区吉田本町) 工博 オクラホマ大学助教授
***	正会員	工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611 京都府宇治市五ヶ庄)	*****	正会員 工博 京都大学教授 工学部 (〒 601-01 京都市左京区吉田本町)

アジアで最初の気象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 図 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、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)。

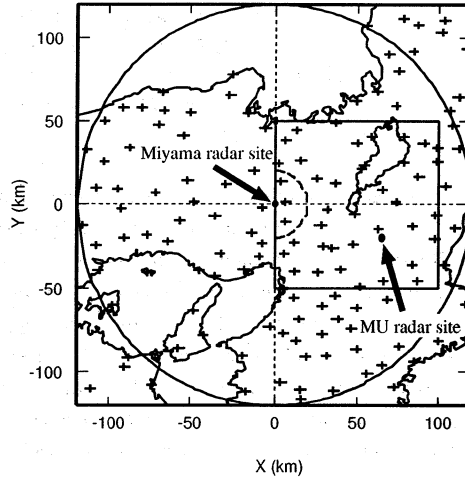


図 1: MU レーダーサイト、深山レーダー雨量計の観測範囲および AMeDAS ポイント

## 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を Sato et al.[2] を参考に簡単に以下に示す。

晴天時に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シフト (下向き速度成分) を持つ雨滴からのエコーによるシフトが加わった双峰性のスペクトルが観測される。双峰性のスペクトルから雨滴エコーのドップラー・スペクトルを抽出できる。このスペクトルは、鉛直上向きを正とした雨滴のドップラー速度のスペクトルであり、Gunn and Kinzer (1949) [3] による雨滴落下速度の経験式を通して、雨滴粒径分布が推定できる。すなわち、雨滴粒径分布  $N(D)$  をガンマ分布

$$N(D) = \begin{cases} N_0 \left(\frac{D}{D_0}\right)^\mu \exp(-\Lambda D) & : (v_{max} \leq v_p(D) \leq 0), \\ 0 & : (v_p(D) < v_{max}, 0 < v_p(D)), \end{cases} \quad (1)$$

で近似すると、降雨タイプによって決まる定数  $N_0, \Lambda, \mu, v_{max}$  がスペクトルから推定される。推定された  $N_0, \Lambda, \mu$  を用いて各高度におけるレーダー反射因子  $Z$  [ $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ] と降雨強度  $R_r$  [ $\text{mm}/\text{h}$ ] が算定できる。すなわち、 $D$  [ $\text{cm}$ ],  $V(D)$  [ $\text{m}/\text{sec}$ ],  $N_0$  [ $\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$ ],  $\Lambda$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] とすれば、

$$Z = 10^7 \times \int_0^\infty D^6 N(D) dD = 10^7 \times \frac{N_0}{D_0^\mu} \frac{\Gamma(7+\mu)}{\Lambda^{7+\mu}} \quad (2)$$

を用いて  $Z$  を算定することができ、降雨強度  $R_r$  は、

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

によって算定できる。ここで、 $\Gamma$  はガンマ関数を表す。

## 2.3 解析結果

式(2)で算定したレーダー反射因子  $Z$  の鉛直分布の時系列を 図 2 に示す。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矢印で示した 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 3 (a),(b) に式(3)から推定した降雨強度  $R_r$  と光学式雨量計で直接観測された同一時刻の地上降雨強度  $R_g$  の比 ( $R_r/R_g$ ) を高さ方向に依存させてプロットしたものを示す。ただし、(a) は 15 分平均量、(b) は 30 分平均量を用いた場合である。これらの図より、降雨の高さ方向の関係は、第一近似として、

$$R_r = \alpha_{bias} R_g \exp(\beta_h h) \quad (4)$$

と表現できることがわかる。ここで、 $h$  は、レーダービームと地上との高度差である。一方、 $\alpha_{bias}$  は、レーダーと雨量計の観測機器のバイアスと理解することができる。

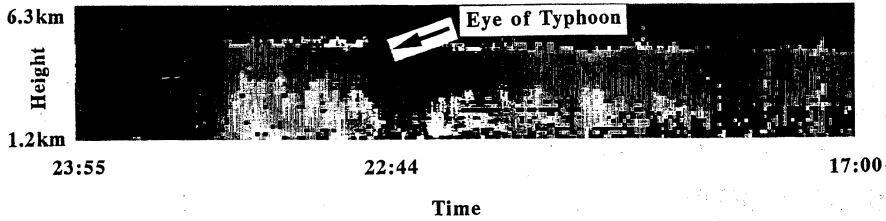


図 2: レーダー反射因子の鉛直分布の時系列変化 (雨滴粒径分布をガンマ分布で推定した場合)

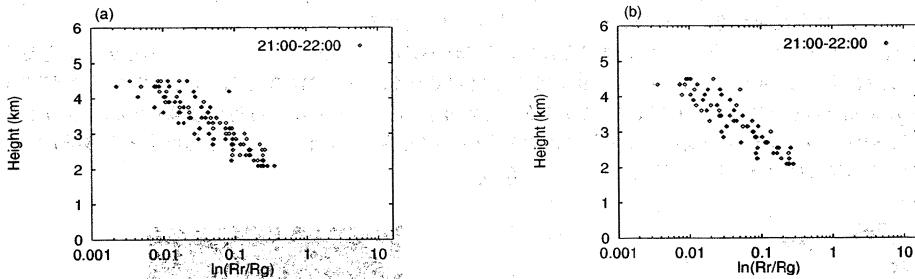


図 3: 式 (3) から推定した降雨強度  $R_r$  と光学式雨量計で直接観測された降雨強度  $R_g$  の比  $R_r/R_g$

### 3 降雨の 3 次元構造を考慮したレーダー雨量推定手法

雨滴の粒径分布  $N(D)$  を式 (5) に示す Marshall and Palmer 型分布 [4] と呼ばれる分布で近似する。雨滴粒径分布をガンマ分布で推定したレーダー反射因子 図 2 と  $\mu = 0$  場合とは差はほとんど確認できなかったため、Marshall and Palmer 型分布

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda \cdot D), \quad \Lambda = a \cdot R_r^{-b}, \quad (5)$$

を用いた。ただし、 $R_r$  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。レーダー反射因子  $Z$  を式 (6) で表すと、

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 \cdot N(D) dD = \frac{6! N_0}{\Lambda^7}. \quad (6)$$

一方、上空における降雨強度  $R_r$  と地上の降雨強度  $R_g$  との関係は式 (4) を用いて、

$$R_r = \alpha_{bias} R_g \exp(-\beta_h \cdot h) \quad (7)$$

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できるとともに、さらに、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、

$$\ln Z = \ln 6! + A_1 + 7b \ln R_g - 7c \cdot h \quad (8)$$

に帰着する。ここで、 $c = \beta_h b$ ,  $A_1 = \ln N_0 - 7 \ln a + 7b \ln \alpha_{bias}$  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 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 (8) 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、

$$\Lambda = d[f(h) \cdot \sigma_v]^e \quad (9)$$

のように表せると仮定する。なぜならば、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、得られる情報には鉛直方向と水平方向の両方のドップラー情報を含んでおり、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からである。ただし、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。さらに、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、この鉛直情報が含まれる度合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(6)と式(9)より観測式として、

$$e \ln[f(h) \cdot \sigma_v] = A_2 - b \ln R_g + c \cdot h \quad (10)$$

が得られる。ここで、 $A_2 = \ln a - b \ln \alpha_{bias} - \ln d$  である。

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(8)と式(10)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、本論文では、定式化にとどめ、本推定手法の適用に際しては、式(8)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 適用方法

ビーム仰角の一番小さい ( $\theta = 0.5$  (deg)) モードで観測されたデータを用い、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(8)のパラメータ  $c$  を推定し、高さ依存性を考慮しない場合はパラメータ  $c = 0$  とする。

地上雨量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5分雨量データを使用した。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、オクラホマ州の南東部に位置するBlue Riverの流域を含む117km × 127kmの領域である(図4)。レーダーサイトは対象領域の中心から約126km北西の領域外にある。観測されたレーダー反射因子の領域内の分布の一例を図5に示す。この雨域は南方に移動しており、先端部は対流性降雨、その後方には層状性降雨が形成されている[5]。

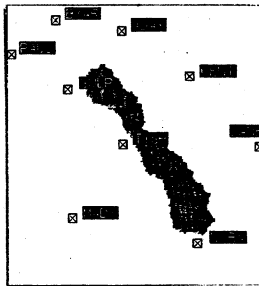


図4: MESONET 観測ポイントおよび Blue River 流域

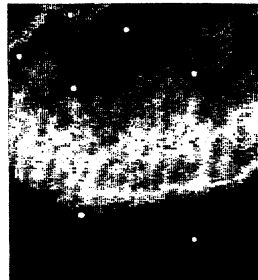


図5: NEXRAD で観測されたレーダー反射因子の分布 (5月29日13:00)

### 4.2 適用結果

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。パラメータ同定には式(8)のみを用い、レーダーから5分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、同定時間は、それぞれ10, 15, 30, 60分について調べ、式(7)の高さ方向の依存性についても調査した。ただし、蓄積時間とは、パラメータ同定の際に、その期間内で平均したレーダー反射因子  $Z$ 、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を意味している。以降、蓄積時間、同定時間は、( $T_{ac}, T_{id}$ ) で表す。

適用の結果、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。図6(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。図6(a)は、高さ方向の依存性を考慮した場合の比較図であり、図6(b)は、高さ方向の依存性を考慮しない場合、すなわち、パラメータ  $c$  を0として他の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依存性を考慮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、高さ方向の依存性を考慮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ている。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、対数表現の観測式を用いているためであると考えられる。すなわち、対数表現の場合10 mm/hの誤差と100 mm/hの誤差が同じ重みでパラメータが同定されてしまうことに大きな原因がある。

次に、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表1に示す。現行の推定手法の推定精度が悪いときに降雨分布の鉛直分布を考慮した推定手法により推定精度が改善されていることがわかる。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。

推定精度が悪い時間帯と良い時間帯がなぜ存在するのかの原因を明らかにするために、それぞれの時間帯のレーダー反射因子  $Z$  と地上降雨強度  $R_g$  の関係を調査した。MESONETの観測ポイントのうちADAXとCNTRにおける関係を図7(a), (b)に示す。これらの図より12:00~13:00の時間帯は図5に示した雨域の先端部分に位置する対流性降雨が観測されて

おり、降雨強度の変化は他の時間帯と比較して大きい。それに対してレーダー反射因子の変化は他の時間帯と同様あまり大きくない。このような降雨強度の変化がレーダー反射因子の変化に現われていないことが原因と考えられる。このような場合、パラメータの同定時間をその時間帯とし、他の時間と区別することや複数ビーム仰角すなわち3次元レーダー情報を用いることにより、推定精度が改善できるものと考えられる。

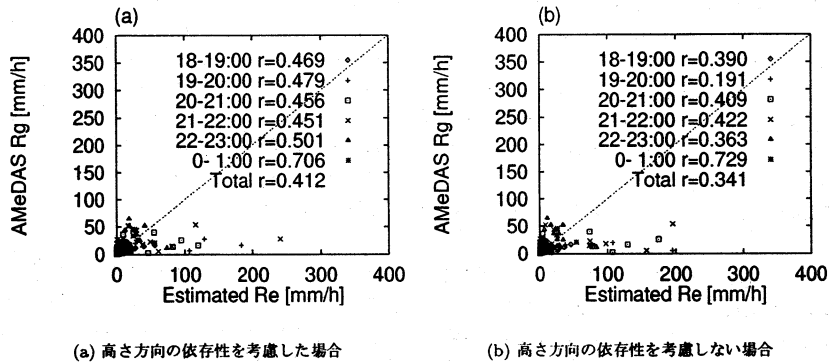


図 6: 地上雨量  $R_g$  と推定雨量  $R_e$  の比較

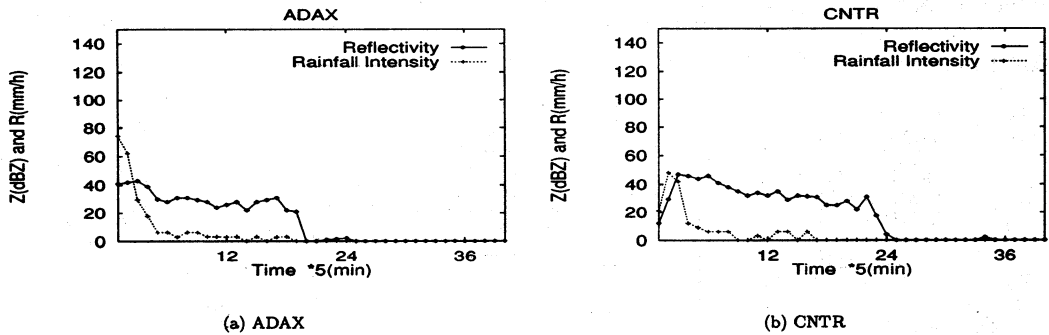


図 7: レーダー反射因子と地上降雨強度の関係

次に、3時間総降雨量の推定精度を比較した結果、相関係数の場合と同様現行の推定手法の推定精度が悪いときに本手法による推定精度が改善されていることがわかる(表2)。

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大きな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  $(30, 60)$  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、蓄積時間内の平均値を用いており、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。総降雨量の推定精度を比較する際には蓄積時間内の平均値、すなわち30分平均値の  $Z$  を同定されたパラメータで30分降雨量に変換したもので行う必要がある。

表 1: 相関係数の比較

	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

表 2: 3時間総雨量の比較

MESONET Stations	ADAX	BYAR	CNTR	DURA	LANE	MADI	PAUL	SULP	TISH
MESONET Observations	19.26	14.26	30.68	26.69	34.92	32.79	46.17	33.33	24.37
Proposed Method	7.81	9.63	15.65	23.71	32.5	29.32	16.10	16.77	27.12
Conventional Method	7.03	11.09	15.44	25.39	39.08	30.62	16.84	19.07	36.27

## 5 深山レーダー雨量計への適用

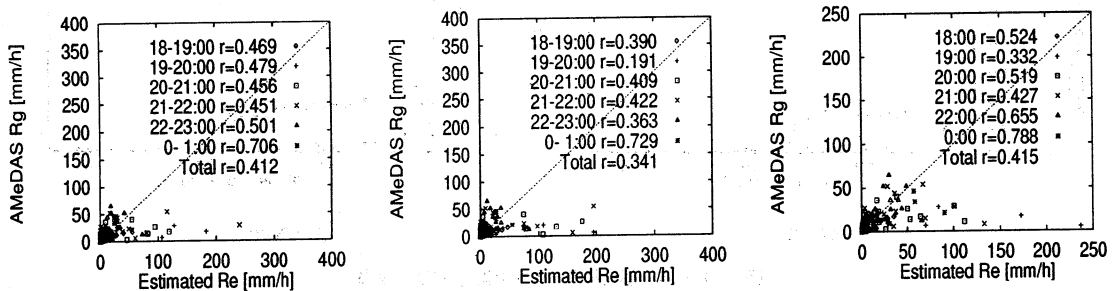
### 5.1 適用方法

深山レーダーへの適用には、NEXRAD への適用時と同様最低仰角への適用を通して距離によるビーム高度の違いを考慮するばかりでなく、あらたに複数ビーム仰角への適用を行った。この両者の精度の比較を厳密に行うために、仰角可変モードの観測データのみを利用した。地上雨量は、AMeDAS の 1 時間雨量を用いた。解析領域は、図 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 分毎に得られるが、地上観測値が 1 時間雨量であるために適用には 1 時間の平均値を用いた。すなわち、 $(T_{ac}, T_{id})$  が (60 分, 60 分) で適用を行った。一方、現行の  $B, \beta$  法による推定結果との比較は行なわなかった。なぜなら、使用するデータの性質が異なり厳密な比較が困難であると判断したからである。すなわち、現行の  $B, \beta$  による推定には、仰角固定モードで得られる 5 スキャン 1 分間平均のレーダー反射因子  $Z$  が用いられているのに対して、本手法に必要な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  $Z$  であるためである。

### 5.2 適用結果

図 8 (a), (b) に仰角可変モードのビーム仰角が  $1^\circ$  (最低仰角) で観測されたレーダー反射因子  $Z$  を用いた場合の地上雨量  $R_g$  と推定雨量  $R_e$  を比較したものを示す。図 8 (a) は、高さ方向の依存性を考慮した場合、図 8 (b) は、高さ方向の依存性を考慮しない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、明らかに高さ方向の依存性を考慮しない場合の推定精度の悪い時間帯について依存性を考慮した推定精度が向上しているとともに、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。図 8 (c) に複数ビーム仰角の情報、すなわち 3 次元情報を用いた場合の図を示す。図 8 (a), (b) と図 8 (c) 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わかる。



(a) 高さ方向の依存性を考慮した場合

(b) 高さ方向の依存性を考慮しない場合

(c) 3次元情報を用いた場合

図 8: 地上雨量  $R_g$  と推定雨量  $R_e$  の比較

## 6 結論

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。次のステップとして必要なものは、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。観測式を対数表現しているのが原因であると考えられる。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。加えて、パラメータ同定を降雨タイプ別に行なえるようにすることが重要であることも示した。これらをもふまえた上でこれから推定手法を改善する必要はあるが、本論文は、レーダー反射因子の 3 次元分布情報の利用が推定精度の改善に大いに期待できることを示した。

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] Ron Alberty : The NEXRAD Program and The WRS-88D Operational Support Facility, Preprinting of 2nd International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Hannover, 1992.
- [2] 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.
- [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] Marshall, J. S. and W. M. Palmer : The Distribution of Raindrops with Size., J.Meteor., 5,pp.165-166, 1948.
- [5] Nakakita, E., Ikebuchi, S., Nakagawa, K., Sato, T., B.E. Vieux and Takasao, T. : Utilization of Vertical of DSD into Building up an Algorithm for Estimating Ground Rainfall Amount Using Radar, Proc. of the III International Symposium of Hydrological Application of Weather Radar, pp. 375-384, 1995.