

雨滴粒径分布の鉛直構造解析と レーダー雨量推定手法の構築

Analysis on Vertical Profile of DSD and Building up an Algorithm
for Estimating Ground Rainfall Using Radar

中川勝広¹・中北英一²・佐藤亨³・池淵周一⁴

Katsuhiko NAKAGAWA, Eiichi NAKAKITA, Toru SATO and Shuichi IKEBUCHI

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒 611 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所水資源研究センター (〒 611 宇治市五ヶ庄)

³工博 京都大学助教授 工学研究科電子通信工学専攻 (〒 606 京都市左京区吉田本町)

⁴フェロー 工博 京都大学助教授 防災研究所水資源研究センター (〒 611 宇治市五ヶ庄)

To improve the accuracy of the radar-estimated rainfall, we observe and analyze the vertical profile of the rain drop size distribution (DSD), then create a new formulation of vertical profile of DSD related to rainfall type and build up an algorithm for estimating ground rainfall using radar. Observation of the vertical profile of DSD is carried out by a vertical pointing VHF Doppler radar named the MU (Middle and Upper) Radar, which can detect vertical profiles of Doppler spectrum that composed of both rain drop itself and air movements.

Key Words : Rain drop size distribution, Vertical profile, Rainfall type, Radar-estimated rainfall

1. はじめに

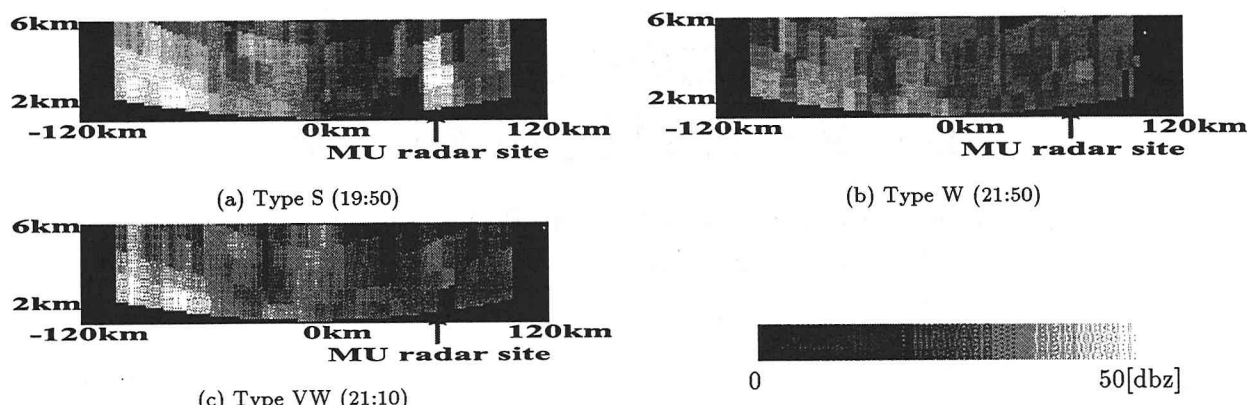
レーダー雨量計を用いた地上雨量推定に関する研究は数多くなされており, レーダー雨量計による観測誤差および推定誤差に係わる原因も指摘されている^{1), 2)}. その原因の一つとして, 雨滴粒径分布が降雨の種類によって変化し, その鉛直分布も変化することがあげられる. 落下する雨滴粒径分布の変化を雨滴の分裂・併合・蒸発などの微物理過程を考慮したモデルで表現したり³⁾, 指数分布で雨滴粒径分布を表現し⁴⁾, その分布の傾きを降雨強度によって分類するなどの試みは行われている⁵⁾. しかし, それらの結果とレーダー雨量推定精度向上とは必ずしも結びついていない

筆者らは, 原因の一つとしてあげた雨滴粒径分布が降雨の種類によって変化し, その鉛直分布も変化することに着目し, 大気の鉛直風速と雨滴の落下速度の両者のドップラースペクトル分布が得られる京都大学超高層電波研究センター所有の滋賀県信楽町の MU レーダー⁶⁾観測所において雨滴粒径分布の鉛直分布と地上同期観測を実施し^{7), 8)}, 地上観測した雨滴粒径分布の解析および前線性や台風性といった降雨タイプを考慮した雨滴粒径分布の鉛直構造の解析を行ってきた^{9), 11)}.

本論文では, 時々刻々変化するより小スケールの時・空間スケールでの降雨タイプでの雨滴粒径分布の鉛直構造を定式化し, それを用いたレーダー雨量計による地上雨量推定手法を構築し, 観測地上雨量と比較することにより推定手法の検証を行った.

2. レーダー反射因子の鉛直構造

まず, 時々刻々変化するより小さな時・空間スケールでの降雨成因の分類を行った. 建設省深山レーダー雨量計で観測されたレーダー反射因子 Z の MU レーダーサイト周辺での鉛直構造に明らかに特徴のある時間帯に着目し, 降雨成因の分類をレーダー反射因子 Z の値が非常に大きく, 水平方向の広がり小さい **TypeS**, レーダー反射因子 Z の値がそれほど小さくなく, 水平・鉛直方向に一樣な **TypeW**, レーダー反射因子 Z の値が非常に小さく, 水平・鉛直方向に一樣な **TypeVW** の 3 つのタイプに分類した. なお, 分類には, 1994 年 9 月 29 日の T9426 に伴う降雨データを用いた. 分類した 3 つの降雨成因の MU レーダーサイトを通る南北鉛直断面内のレーダー反射因子 Z の鉛直構造を図 1 に



図：1 レーダー雨量計で観測されたレーダー反射因子 Z の鉛直構造

示す。図中の水平距離は 240km で、真中を中心にする
と左端が真南の 120km、右端が真北の 120km の地点
になる。垂直方向は高度 2km から 6km までを表して
いる。Type S はレーダー反射因子 Z の値が非常に大
きく、水平方向の広がり小さいことから対流性の降
雨と、Type W はレーダー反射因子 Z の値が Type S
より小さく、水平・鉛直方向に一樣であることから層
状性の降雨と考えられる。Type VW も Type W と同様
に層状性の降雨と考えられるが、レーダー反射因子 Z
の値が非常に小さいために、MU レーダーで推定され
たパラメータが良好に推定されない危険性がある。こ
れについては、3. で再び議論する。

3. 雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布

降雨成因ごとに追跡できる程有意なパラメータ値を
MU レーダーによって得るためには、雨滴粒径分布
 $N(D)$ を指数分布；

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (1)$$

で近似したときのパラメータ推定値 N_0 、 Λ の 10 分平
均値を用いる必要がある^{10), 11)}。

それぞれの降雨成因における雨滴粒径分布パラメ
ータ Λ および N_0 の鉛直分布を図 2 に示す。なお、地上
の雨滴粒径分布は Disdrometer で観測したものを用い
ている。地上の雨滴粒径分布も指数分布で近似した分
布を示している。ただし、Type VW については、各
パラメータの値がある高度で他の高度に比べて大きな
値や小さな値を示す高度が存在し、値がばらついてい
ることがわかった。そこで、10 分平均した雨滴粒径分
布パラメータを用いた雨滴粒径分布と 10 分間に推定
された雨滴粒径分布の比較を行い、雨滴粒径分布パラ
メータの平均値を用いることによる雨滴粒径分布その
ものへ与える影響を調べた。すると、10 分間に推定さ
れた雨滴粒径分パラメータが他の雨滴粒径分布とかけ

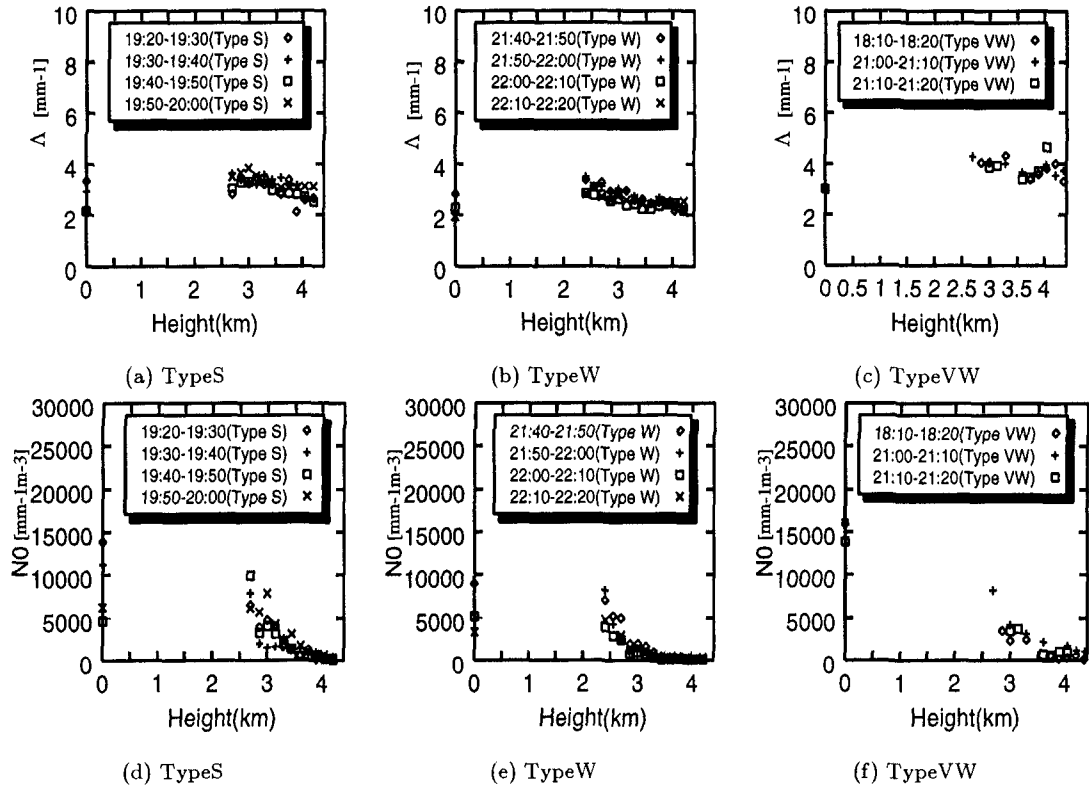
離れた分布になっていることがわかった。この原因は、
2. の最後でも述べたように、レーダー反射因子 Z の値
が非常に小さい時で、上空の雨粒も少ない状態である
と考えられ、そのためにパラメータが良好に推定され
ていないと考える。そこで、Type VW に関しては雨
滴粒径分布パラメータが良好に推定されていないと判
断される高度の雨滴粒径分布パラメータは除去して解
析を行った。

雨滴粒径分布パラメータ Λ の鉛直分布に着目すると、
どの降雨成因においても Λ の高度依存性（すなわち、
鉛直分布方向の変化）が小さいことがわかる。一方、雨
滴粒径分布 N_0 の鉛直分布に着目すると、Type S に
おける N_0 は、上空（高度 2.5km 以上高度 4.5km 以
下）で変動しながら高度が低くなるほど値が大きい。
Type W, Type VW ではその変動が小さく、高度が低
くなるほどなめらかに値が大きくなり、地上とも結び
付いている。これは、2. で述べたように降雨成因の違
いすなわち、Type S は対流性の降雨、Type W, Type
VW は層状性の降雨の鉛直構造の違いが現れているも
のとする。特に、Type W, Type VW の層状性の降
雨においてレーダー雨量計で観測されたレーダー反射
因子 Z の分布（図 1）を見ても水平・鉛直方向に一樣
で高度が低くなるにつれてレーダー反射因子 Z の値も
大きくなっていることが確認できる。

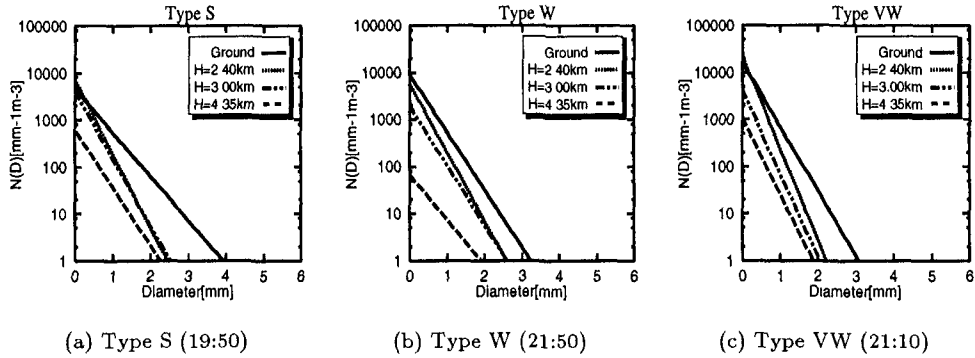
4. 雨滴粒径分布の鉛直構造

3. では雨滴粒径分布パラメータ N_0 、 Λ の鉛直分布
に着目し、その解析を行ったが、ここでは雨滴粒径分布
そのものの鉛直構造を明らかにするために解析を行っ
た。Type S (19:30~19:40)、Type V (21:40~21:50)、
Type VW (21:10~21:20) の雨滴粒径分布の鉛直分布
を図 3 に示す。

全ての降雨成因において、高度が低くなるにつれて



図：2 降雨成因別の雨滴粒径分布パラメータ Δ , N_0 の鉛直分布 (0 km の値は, Disdrometer による観測結果)



図：3 降雨成因別の雨滴粒径分布の鉛直分布

小さい雨滴 (直径 1mm 前後) の数が増加しており, 上空では最大粒径はほとんど変化していない。したがって, 雨滴の総個数も高度が低くなるにつれて増加していることがわかる。このことより, 雨滴の落下とともに雨滴の蒸発現象より雨滴の分裂・併合・凝結現象が卓越しているものと考えられる。降雨成因による雨滴粒径分布の鉛直構造としては, 厳密に区別することはできないが, Type S は小さい粒径の雨滴から大きい粒径の雨滴まで存在し, Type W から Type VW になる程大きい粒径の雨滴が減少し, 小さい粒径の雨滴が増大しており, 図 1 のレーダー雨量計で観測されたレーダー反射因子 Z の鉛直構造と定性的に一致している。よって, MU レーダーで観測・推定された雨滴粒径分布は定性的には実現象を捉えているものと考えら

れ, 雨滴粒径分布の鉛直構造が変化しており, 降雨成因によっても異なることがわかる。この雨滴粒径分布の鉛直構造の変化を適格に表現し, 新たなレーダー雨量推定手法を構築する。

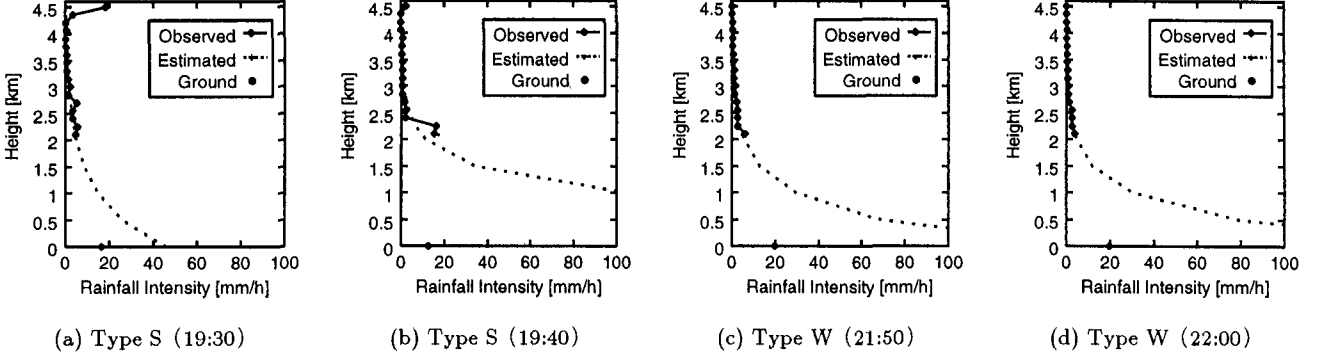
5. 雨滴粒径分布の鉛直構造の定式化

3, 4 の結果より, 雨滴粒径分布の鉛直構造を考慮したレーダーによる地上雨量推定手法を構築するためにまず, 雨滴粒径分布パラメータの高度依存性に着目し, 雨滴粒径分布パラメータの高度依存性を定式化することにより雨滴粒径分布の鉛直構造を定式化する。雨滴粒径分布を式 (1) で表すと, 降雨強度 R は,

$$R = \int_0^{D_{max}} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 N(D) v(D) dD \quad (2)$$

表：1 雨滴粒径分布パラメータ N_0, Λ の高度依存性を表現する関数形

	$N_0(h; C)$	$\Lambda(h; C)$		$N_0(h; C)$	$\Lambda(h; C)$
(a)	$ah + b$	const	(e)	$ah + b$	$ch + d$
(b)	$a/(h + 1)^b$	const	(f)	$a/(h + 1)^b$	$ch + d$
(c)	$a(h - b)^2 + c$	const	(g)	$a(h - b)^2 + c$	$dh + e$
(d)	$a \exp(-bh)$	const	(h)	$a \exp(-bh)$	$ch + d$



図：4 地上降雨を用いないで推定した推定地上雨量と観測地上雨量との比較

$$= 6\pi \int_0^{D_{max}} \underbrace{D^3 N_0 \exp(-\Lambda D)}_{f(D)} v(D) dD \quad (3)$$

から得られる．ここで、降雨強度の高度依存性（上空ほど降雨強度は小さく、地上ほど降雨強度は大きくなる．）^{7), 8)}を適格に表現できるような雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布の式形を定めるために、式(3)の $f(D)$ に着目し、雨滴粒径分布パラメータ N_0, Λ の高度依存性を表現する関数形； $N_0(h; C)$ 、 $\Lambda(h; C)$ を、表 1 に示す関数形で表したときの $f(D)$ の積分値 $F(D, h)$ ；

$$F(D, h) = \int_0^{D_{max}} f(D) dD \quad (4)$$

を数値計算により求めた．その結果から高度依存性を表現する最適な関数形；

$$\Lambda(h; C) = ch + d \quad (5)$$

$$N_0(h; C) = a \exp(-bh) \quad (6)$$

を決定した．ここで、 C は、パラメータ a, b, c, d の総称として用いている．

次に、雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布：式(5)、式(6)を実際の MU レーダー観測から得られた雨滴粒径分布パラメータデータに適用し、その検証を行う．

(1) 観測地上雨量を用いない場合

MU レーダー観測から得られた各高度における雨滴粒径分布パラメータ $N_{0, obs}(h), \Lambda_{obs}(h)$ を用いて、式(5)、式(6)のパラメータ a, b, c, d を同定し、各式の $h = 0$ の値（パラメータ a, d ）を用いて推定地上雨量 $R_{est}(0)$ と観測地上雨量 R_g を比較する．なお、パラメータ a, b, c, d を同定する際に用いる雨滴粒径分布パ

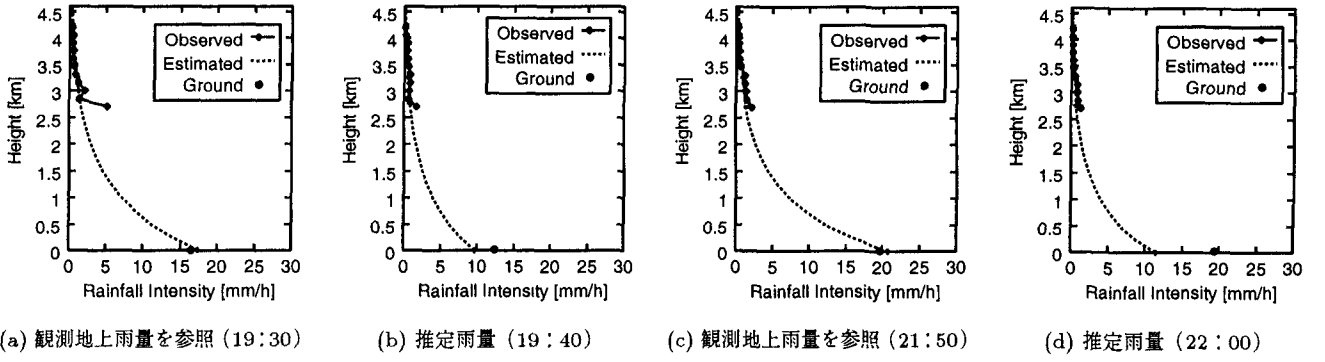
ラメータ $N_{0, obs}(h), \Lambda_{obs}(h)$ は、高度 2.1km 以上 4.5km 以下 150m 間隔の 17 点の 10 分間平均値を用いて行った．降雨成因が Type S の推定地上雨量 $R_{est}(0)$ と観測地上雨量 R_g を比較した結果を図 4 (a), (b) に、降雨成因が Type W の時の結果を図 4 (c), (d) に示す．なお、観測地上雨量 R_g は、1 分間降雨強度を観測できる光学式雨量計の 10 分平均値を用いている．どちらの降雨成因の場合も、推定地上雨量 $R_{est}(0)$ が観測地上雨量 R_g に比べて過大に推定されている．これは、パラメータ a, b, c, d を同定する際に高度 2.1km 以上のデータを用いており、これらのデータだけでパラメータが同定され高度 2.1km 以下の降雨強度が大きく変化すると思われる領域を推定することが困難であることを示している．

本節のはじめにも述べたように、降雨成因に依存した雨滴粒径分布の鉛直構造を考慮したレーダー雨量推定手法の構築のためにも推定地上雨量 $R_{est}(0)$ が観測地上雨量 R_g に比べて過大に推定されることを抑える方法を提案する必要がある．

(2) 観測地上雨量を用いる場合

前に述べたように推定地上雨量 $R_{est}(0)$ が観測地上雨量 R_g に比べて過大に推定される問題を指摘した．そこで、降雨成因が同じ期間内と考えられる 2 時点 t_1, t_2 ($t_1 < t_2$) の内、時刻 t_1 における観測地上雨量 R_{g, t_1} を用いて次の時刻 t_2 の推定地上雨量 $R_{est, t_1}(0)$ を推定する手法を導いた．

まず、降雨成因が同じ期間の時刻 t_1 における観測地



図：5 観測地上雨量を用いた場合の推定雨量と観測地上雨量の比較

上雨量が R_{g,t_1} の時、式 (5)、式 (6) は、

$$N_0(0;C) = a \quad (7)$$

$$\Lambda(0;C) = d \quad (8)$$

となり、地上雨量は

$$R(0;C) = 6\pi \int_0^{D_{max}} D^3 a \exp(-dD) v(D) dD \quad (9)$$

で得られる。この時点で式 (9) の未知なパラメータは、 a, d である。これら 2 つのパラメータ a, d を変化させた時の $R(0;C)$ と観測地上雨量 R_{g,t_1} との差が最小となるパラメータ a_{opt}, d_{opt} を決定する。次に、得られたパラメータ a_{opt}, d_{opt} を式 (5)、式 (6) のそれぞれに代入し、時刻 t_1 の MU レーダー観測から得られた各高度における雨滴粒径分布パラメータ $N_{0,obs}(h), \Lambda_{obs}(h)$ を用いて、パラメータ b_{opt}, c_{opt} を同定する。ここまでの流れで、時刻 t_1 の式 (5)、式 (6) のパラメータ $a_{opt}, b_{opt}, c_{opt}, d_{opt}$ が求まったことになる。

次に、降雨成因が同じ期間中は、パラメータ b_{opt}, c_{opt} が等しいと仮定し、次の時刻 t_2 の MU レーダー観測から得られた各高度における雨滴粒径分布パラメータ $N_{0,obs}(h), \Lambda_{obs}(h)$ を用いて a_{best}, d_{best} を同定する。同定されたパラメータ a_{best}, d_{best} を式 (9) に代入することにより、推定地上雨量 $R_{est,t_2}(0)$ および上空の推定雨量 $R_{est,t_2}(h)$ が求まる。

推定地上雨量 $R_{est}(0)$ および上空の推定雨量 $R_{est}(h)$ と観測地上雨量 R_g および上空の観測雨量 $R_{obs}(h)$ を比較したものを図 5 に示す。図中の (a) の時刻 19:30 の観測地上雨量 R_g を用いてパラメータ b_{opt}, c_{opt} を同定し、それ以降の時刻の MU レーダー観測から得られた各高度における雨滴粒径分布パラメータ $N_{0,obs}(h), \Lambda_{obs}(h)$ を用いて図中の (b) の 19:40 の地上雨量を推定したものである。同様に、図中の (c) の時刻 21:50 の観測地上雨量 R_g を用いて図中の (d) の 22:00 の地上雨量を推定したものである。

図 4 と比較すると、推定地上雨量 $R_{est}(0)$ が観測地上雨量 R_g に比べて非常に大きく推定されるというこ

とはなくなっており、推定精度としては特に問題ないと思われる。上空の推定雨量 $R_{est}(h)$ に関しても同様に上空の観測雨量 $R_{obs}(h)$ と比較しても精度としては特に問題ないと思われる。

6. レーダー雨量推定手法の構築

5. の (2) の手順を基にレーダー雨量計による地上雨量推定手法を構築した。フローチャートを図 6 に示す。

推定手法は大きく観測地上雨量を参照する部分と観測地上雨量を参照しない部分の 2 つで構成されている。レーダー観測領域内で地上降雨が観測されている地点において、観測地上雨量 R_g を用いて、式 (5)、式 (6) の $h = 0$ のときのパラメータ a, d を用いて式 (9) の $R(0;C)$ と観測地上雨量 R_g との差が最小となるパラメータ a_{opt}, d_{opt} を同定し、地上観測されている地点の上空のレーダー反射因子 $Z(h)$ ；

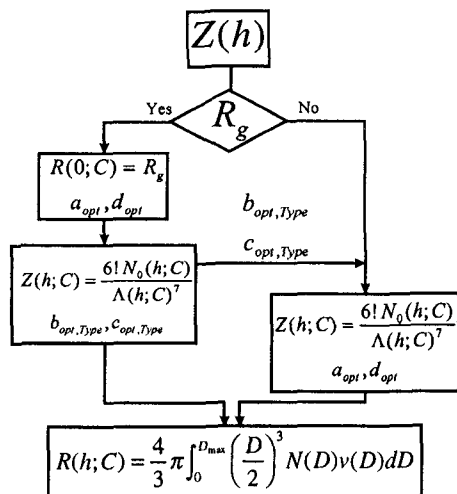
$$\begin{aligned} Z(h) &= \int_0^{D_{max}} D^6 N(D) dD \\ &= 6! \frac{a \exp(-bh)}{(ch + d)^7} \end{aligned} \quad (10)$$

からパラメータ $b_{opt,Type}, c_{opt,Type}$ を同定する。

次に、レーダー観測領域内で地上降雨が観測されていない領域の地上雨量をレーダー情報を用いて推定する。このとき、降雨イベント内の同一時刻において、降雨成因が同じ場合は、式 (5)、式 (6) のパラメータ $b_{opt,Type}, c_{opt,Type}$ は一定とする。すなわち、地上降雨が観測されている地点の降雨成因と同じ降雨成因の地上降雨が観測されていない領域のパラメータ $b_{opt,Type}, c_{opt,Type}$ は等しいとする。降雨成因が等しい領域に対して、 $b_{opt,Type}, c_{opt,Type}$ を式 (10) に代入すると、

$$Z(h) = 6! \frac{a \exp(-b_{opt,Type} h)}{(c_{opt,Type} h + d)^7} \quad (11)$$

となり、観測されるレーダー反射因子 $Z(h)$ を用いて、式 (11) のパラメータ a_{opt}, d_{opt} を同定する。同定され



図：6 レーダー雨量計による地上雨量推定手法のフローチャート

たパラメータ $a_{opt}, b_{opt,Type}, c_{opt,Type}, d_{opt}$ と式 (3) から推定雨量 $R_{est}(h)$ が導かれる。

本推定手法を建設省深山レーダー雨量計に適用した。適用に際して、解析対象領域内 (AMeDAS 観測点 45 地点) で同一のパラメータ $b_{opt,Type}, c_{opt,Type}$ を同定し、各地点ごとの a_{opt}, d_{opt} から推定地上雨量 $R_{est}(0)$ を求めた。単なる降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法^{7),8)} による結果と雨滴粒径分布の高度依存性を考慮した本推定手法による推定結果の相関係数を比較したものを表 2 に、観測地上雨量と推定雨量の比較散布図を図 7 に示す。表 2, 図 7 より、本推定手法を用いることにより、降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法より地上雨量推定精度が向上された。

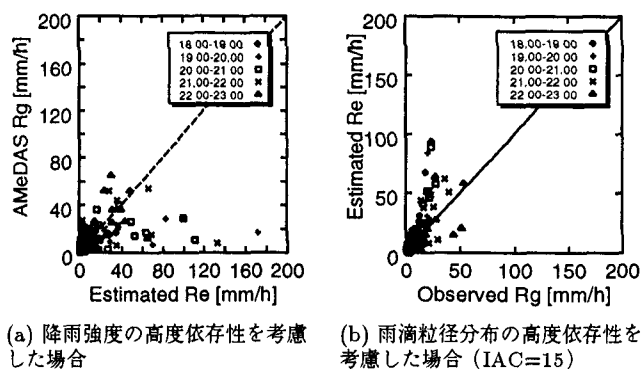
表：2 降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法による結果と雨滴粒径分布の高度依存性を考慮した本推定手法による推定結果の相関係数の比較

(なお、表中の IAC はパラメータを同定する際に用いるレーダー反射因子 $Z(h)$ の積分時間、IAD は、パラメータを同定する時間で、単位は分である^{7),8)}。)

降雨強度の高度依存性を考慮した場合						
IAC	IAD	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00
60	60	0.52	0.33	0.52	0.43	0.66
雨滴粒径分布の高度依存性を考慮した本推定手法の場合						
10	60	0.78	0.59	0.73	0.79	0.81
15	60	0.87	0.71	0.85	0.81	0.61
30	60	0.66	0.75	0.75	0.78	0.60

7. おわりに

雨滴粒径分布の鉛直構造の解析を通して、その定式化を行った。さらに、定式化した鉛直構造を考慮したレーダー雨量推定手法を構築した。構築した推定手法を建設省深山レーダー雨量計に適用し、単なる降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法の結果と比較し、推



図：7 推定地上雨量と観測地上雨量との比較

定手法の有効性を示した。

謝辞：本論文で用いた建設省深山レーダー雨量計データは建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所に提供頂き、MU レーダーのデータは、京都大学超高層電波研究センター信楽 MU 観測所共同利用研究として利用させて頂きました。深く感謝する次第であります。

参考文献

- 1) Krajewski, W. F.: Radar Rainfall Estimation, *Report of Proc. US-Spain Workshop on Natural Hazards*, pp.26-43, 1993.
- 2) Doviak, R. J. and D. S. Zrnic: Doppler Radar and Weather Observations, Academic Press, 1984.
- 3) Srivastave, R. C.: Size Distribution of Raindrops Generated by their Breakup and Coalescence, *J. Atmos. Sci.*, Vol.28, pp.410-415, 1971.
- 4) Marshall, J. S. and W. M. Palmer: The Distribution of Raindrops with Size., *J. Meteor.*, 5, pp.165-166, 1948.
- 5) Hodson, M. C.: Notes Raindrop Size Distribution, *J. Climate and Appl. Meteorol.*, Vol.25, pp.1070-1074, 1986.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤 亨・Baxter E. VIEUX・高棹琢馬: 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, *水工学論文集* 第40巻, pp.297-302, 1996.
- 9) 中川勝広・中北英一・佐藤 亨・池淵周一: 雨滴粒径分布の鉛直構造の定式化, *京都大学防災研究所年報* 第39号 B-2, pp.301-319, 1996.
- 10) 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.
- 11) 中川勝広・中北英一・佐藤 亨・池淵周一: 降雨タイプに依存した雨滴粒径分布パラメータとその鉛直分布, *水工学論文集* 第41巻, pp.141-146, 1997.

(1997.9.30受付)