

雨滴粒径分布の鉛直構造解析とレーダーによる 降雨量推定手法の構築

中川勝広*・中北英一・佐藤 亨**・池淵周一

*郵政省通信総合研究所

**京都大学工学研究科

要 旨

レーダー雨量計の地上雨量推定精度向上を根本的に解決するために、降雨成因に依存した形で雨滴粒径分布の鉛直構造解析を基礎にしたレーダーによる地上雨量推定手法の構築を行った。構築した推定手法を実際の深山レーダー雨量計へ適用し、現行の推定手法である B - β 法および降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法と比較することにより、推定精度の検証を実施した。

キーワード：雨滴粒径分布，鉛直構造，降雨成因，レーダー雨量計，地上雨量推定手法

1. 序論

建設省レーダー雨量計は、ほぼ日本を覆って観測網が展開されており、レーダー雨量計の有効性については様々なところで議論されている(中北, 1992)。しかし、レーダー雨量計を用いて地上における降雨強度や総降雨量の推定を行う際の様々な問題があり、十分な精度が得られていないのが現状である(Doviak et al., 1984; Krajewski, 1993)。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(Hardy, 1963; Srivastava, 1971)、指数分布で雨滴粒径分布を表現し(Marshall et al., 1948)、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(Hodson, 1986)。しかし、それらの結果とレーダーによる降雨量推定精度の向上とは必ずしも結びついていない。

著者らはこれらの問題を根本的に解決するために降雨成因に依存した形で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を目指し、実際に地上と鉛直方向の雨滴粒径分布を観測・解析す

ることにより降雨成因ごとの雨滴粒径分布そのものの鉛直構造の特徴を明らかにし(中川ら, 1996)、雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布を定式化することを試みてきた(Nakagawa et al., 1996; 中川ら, 1997)。

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成因ごとの雨滴粒径分布の鉛直構造を定式化およびそれを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. 降雨成因の分類

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

- **Type S** : レーダー反射因子 Z の値が非常に大きい。
- **Type V** : レーダー反射因子 Z の値がそれほど大きくない。
- **Type VW** : レーダー反射因子 Z の値が非常に小さい。

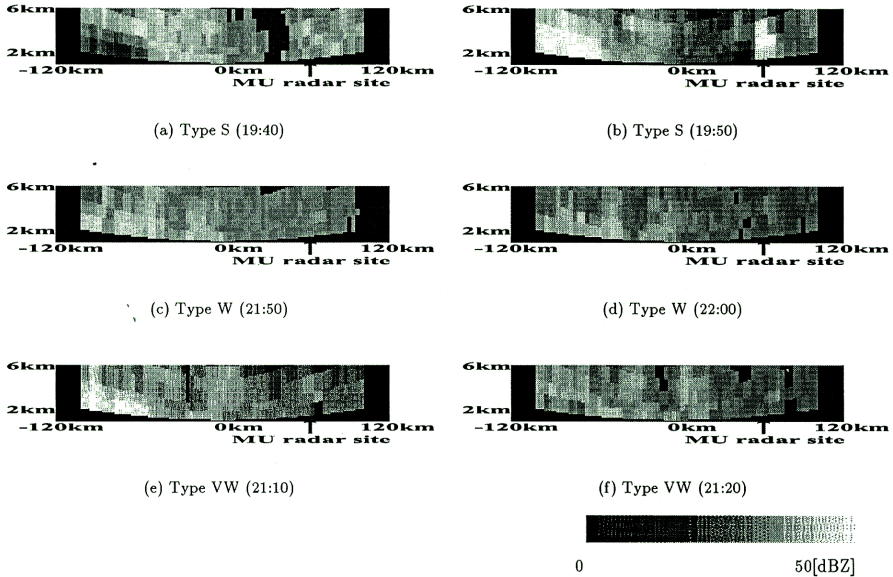


Fig. 1 Vertical profile of radar reflectivity factor Z .

の3つのタイプに分類した。分類した3つの降雨成因のMUレーダーサイトを含む南北方向の直線上空のレーダー反射因子 Z の鉛直構造を Fig. 1 に示す。図中の水平距離は240kmで、真中を中心にとると左端が真南の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、水平方向の広がりは小さいことから対流性の降雨と、Type V はレーダー反射因子 Z の値が Type S より小さく、水平・鉛直方向に一様であることから層状性の降雨と考えられる。Type VW も Type VW と同様に層状性の降雨と考えられる。

3. 降雨成因を考慮した雨滴粒径分布の鉛直構造の定式化

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を構築するために、まず、降雨成因を考慮した雨滴粒径分布の鉛直構造の定式化を試みる。

3.1 高度依存性の表現方法

雨滴粒径分布の鉛直構造すなわち、雨滴粒径分布の高度依存性を降雨成因を考慮した形で定式化する

ために、雨滴粒径分布の分布を決定する雨滴粒径分布パラメータに着目する。すなわち、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で雨滴粒径分布の高度依存性を表現する。

雨滴粒径分布 $N(D)$ を指数分布；

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

で近似すると、降雨強度 R は、

$$\begin{aligned} R &= \int_0^{D^{\max}} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 N(D) v(D) dD \\ &= \frac{\pi}{6} \int_0^{D^{\max}} \underbrace{D^3 N_0 \exp(-\Lambda D) v(D)}_{f(D)} dD \quad (2) \end{aligned}$$

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。）を表現した雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布を適切に表現するために、Eq.(2)の $f(D)$ ；

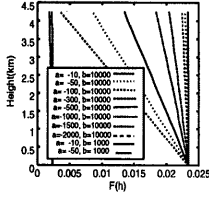
$$f(D) = D^3 N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (3)$$

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、Table 1 に示す関数形で表した時の $f(D)$ の積分値 $F(D, h)$ ；

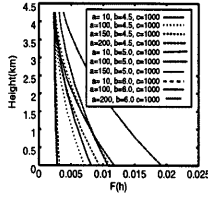
$$F(D, h) = \int_0^{D^{\max}} f(D) dD$$

Table 1 Functions used the simulation; N_0, Λ

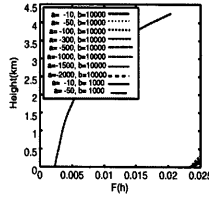
	$N_0(h; C)$	$\Lambda(h; C)$		$N_0(h; C)$	$\Lambda(h; C)$
(a)	$ah + b$	const.	(e)	$ah + b$	$ch + d$
(b)	$a/(h + 1)^b$	const.	(f)	$a/(h + 1)^b$	$ch + d$
(c)	$a(h - b)^2 + c$	const.	(g)	$a(h - b)^2 + c$	$dh + e$
(d)	$a \exp(-bh)$	const.	(h)	$a \exp(-bh)$	$ch + d$



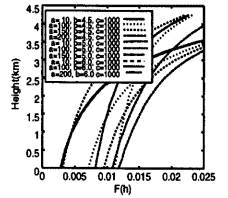
(a) $N_0(h; C) = ah + d$



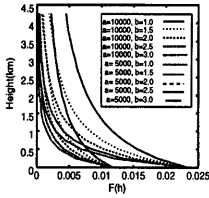
(b) $N_0(h; C) = a/(h + 1)^b$



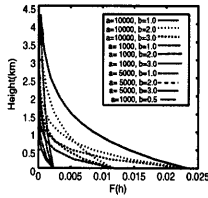
(a) $N_0(h; C) = ah + d$



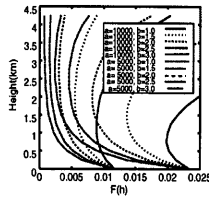
(b) $N_0(h; C) = a/(h + 1)^b$



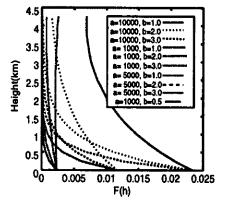
(c) $N_0(h; C) = a(h - b)^2 + c$



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



(c) $N_0(h; C) = a(h - b)^2 + c$



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

Fig. 2 Comparison among the simulated function $F(D)$, when the vertical variation of Λ is constant.

$$= \int_0^{D_{max}} D^3 N_0(h; C) \exp\{-\Lambda(h; C)D\} dD \quad (4)$$

を数値計算することにより決定した。ここで、 C は各関係式のパラメータ群の総称として用いている。雨滴粒径分布パラメータ Λ に関しては、降雨成因別の雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布より、鉛直方向の変化はそれほど大きくないことが指摘されているので(中川ら, 1997), Λ の値が一定の場合 (Table 1 の (a), (b), (c), (d)), 鉛直方向に線形で変化する場合 (Table 1 の (e), (f), (g), (h)) のそれぞれに対して数値計算を実施した。

Λ の値が一定の場合 (Table 1 の (a), (b), (c), (d)),

Fig. 3 Comparison among the simulated function $F(D)$, when the vertical variation of Λ is linear.

鉛直方向に線形で変化する場合 (Table 1 の (e), (f), (g), (h)) のシミュレーション結果を、それぞれ Fig. 2, Fig. 3 に示す。

これらの結果から、 Λ の値が一定の場合 (Fig. 2) は、雨滴粒径分布パラメータ N_0 を

$$N_0(h; C) = a(h - b)^2 + c$$

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

の2つの関数形が鉛直分布を適確に表現していると考えられる。一方、 Λ の値が鉛直方向に線形で変化する場合 (Fig. 3) は、雨滴粒径分布パラメータ N_0 の関数形が

$$N_0(h; C) = a(h - b)^2 + c$$

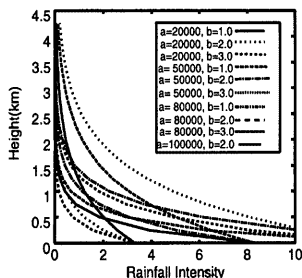


Fig. 4 Simulated rainfall intensity using the functions; $N_0(h;C) = a \exp(-bh)$, $\Lambda(h;C) = ch + d$.

の場合、上空の方が $N_0(h;C)$ の値が大きくなることがある。以上のことから、雨滴粒径分布パラメータの高度依存性を表現する最適関数形は、

$$N_0(h;C) = a \exp(-bh) \quad (5)$$

$$\Lambda(h;C) = ch + d \quad (6)$$

と判断される。しかし、この数値計算は、降雨強度 R でなく、 $F(D, h)$ で実施しており、最終的な結論に結び付けるためには降雨強度 R の鉛直分布で議論する必要がある。そこで、Eq.(5)、Eq.(6)を用いて降雨強度 R の鉛直分布を算定した結果をFig. 4に示す。この図より、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という降雨強度の高度依存性を適格に表現しているものとする。したがって、雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布 $N_0(h;C)$ 、 $\Lambda(h;C)$ は、Eq.(5)、Eq.(6)を用いる。

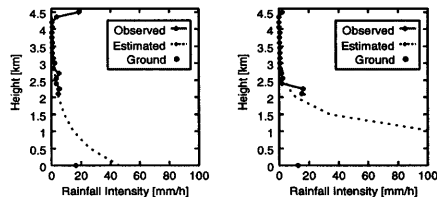
3.2 モデル化

次に雨滴粒径分布パラメータの鉛直分布 $N_0(h;C)$ 、 $\Lambda(h;C)$ をEq.(5)、Eq.(6)で表した時の実際の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、Eq.(5)、Eq.(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 $R_e(0)$ と観測地上雨量 R_g を比較することにより評価する。なお、パラメータ a 、 b 、 c 、 d を同定する際、高度 2.1km 以上 4.5km 以下 150m 間隔の高度 17 地点の各パラメータ $N_{0,obs}(h)$ 、 $\Lambda_{obs}(h)$ の 10 分平均値を用いた。

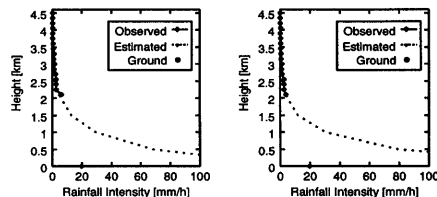
降雨成因が Type S の推定雨量 $R_e(h)$ と観測雨量



(a) Applied into the observed data at 19:30

(b) Applied into the observed data at 19:40

Fig. 5 Comparison between $R_e(h)$ and $R_{obs}(h)$. $R_e(h)$ is estimated from the observed parameters $N_{0,obs}(h)$ and $\Lambda_{obs}(h)$. Rainfall type is Type S.



(a) Applied into the observed data at 21:50

(b) Applied into the observed data at 22:00

Fig. 6 Comparison between $R_e(h)$ and $R_{obs}(h)$. $R_e(h)$ is estimated from the observed parameters $N_{0,obs}(h)$ and $\Lambda_{obs}(h)$. Rainfall type is Type W.

$R_{obs}(h)$ を比較した結果を Fig. 5 に、降雨成因が Type W の時の結果を Fig. 6 に示す。どちらの降雨成因の場合も、推定地上雨量 $R_e(0)$ 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 は、高度 2.1km 以上の $N_{0,obs}(h)$ 、 $\Lambda_{obs}(h)$ で同定されており、外挿値となる地上の値が上空の関係に引きずられた形で推定される。その結果、推定地上雨量 $R_e(0)$ が過大に推定されると思われる。

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 $R_e(0)$ 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。

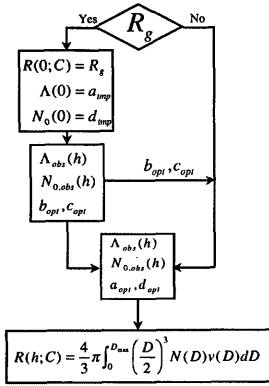


Fig. 7 Flow chart of the height dependency model of the DSD parameters.

(2) 観測地上雨量を用いる場合

前述したように推定地上雨量 $R_e(0)$ が観測地上雨量 R_g に比べて過大に推定されるという問題がある。そこで、降雨成因が同じ期間内と考えられる2時刻 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 $R_{e,t_2}(0)$ を推定する手法を導いた。以下に推定手順について述べる。また、推定手順をフローチャートに示したものを Fig. 7 に示す。

降雨成因が同じ期間のある時刻 t_1 における観測地上雨量が R_{g,t_1} の時、Eq.(5)、Eq.(6)は、

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

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

となり、地上雨量は、

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

で得られる。この時点でEq.(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 を任意に変化させた時の $R(0;C)$ 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。得られたパラメータ a_{opt}, d_{opt} をEq.(5)、Eq.(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Eq.(5)、Eq.(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、雨滴粒径分布の高度依存性の関係も一定であると仮定し、時刻 t_1

のパラメータ b_{opt}, c_{opt} と次の時刻 t_2 ($t_2 > t_1$) 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 a_{opt}, d_{opt} を同定する。同定されたパラメータ a_{opt}, d_{opt} をEq.(9)に代入することにより、推定地上雨量 $R_{e,t_2}(0)$ および上空の推定雨量 $R_{e,t_2}(h)$ が求まる。

推定地上雨量 $R_e(0)$ および上空の推定雨量 $R_e(h)$ 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 Fig. 8, Fig. 9 に示す。Fig. 8 は、降雨成因が Type S に適用したもので図中の (a) の時刻 $t_1 = 19:30$ の観測地上雨量 R_{g,t_1} を用いてパラメータ b_{opt}, c_{opt} を同定し、それ以降の時刻 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_{opt}, d_{best} を同定したものである。Fig. 9 は、降雨成因が Type W に適用したもので図中の (a) の時刻 $t_1 = 21:50$ の観測地上雨量 R_{g,t_1} を用いてパラメータ b_{opt}, c_{opt} を同定し、それ以降の時刻 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_{opt}, d_{opt} を同定したものである。

推定地上雨量 $R_e(0)$ と観測地上雨量 R_g を比較すると (図中の (b), (c), (d) 参照)、観測地上雨量を用いない場合に指摘された推定地上雨量 $R_e(0)$ 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、観測地上雨量を用いない場合に比べてかなり改善されている。上空の推定雨量 $R_e(h)$ 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。

4. レーダーによる地上雨量推定手法の構築

3.2 (2) を基に、降雨成因に依存した雨滴粒径分布の高度依存性を考慮したレーダーによる降雨量推定手法を構築し、深山レーダー雨量計に適用することによって現行の $B-B$ 法さらには降雨強度の高度依存性を考慮したアルゴリズム (Nakakita et al., 1995; 中北ら, 1995; 中川ら, 1996) による推定結果と比較することにより、その検証を行った。

4.1 推定手法

推定手法のフローチャートを Fig. 10 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、Eq.(5)、Eq.(6)の $h=0$ のときのパラメータ a, d を用いてEq.(9)の $R(0;C)$ と観測地上雨量 R_g との差が最小となるとなるパラメータ a_{opt}, d_{opt} を同定し、地上観

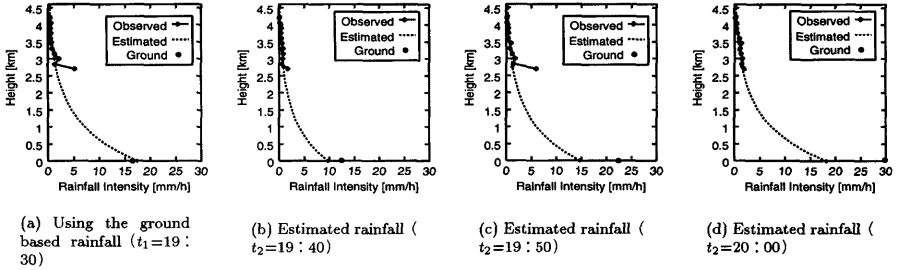


Fig. 8 Comparison between $R_c(h)$ and $R_{obs}(h)$. $R_c(h)$ is estimated using the ground based rainfall. Rainfall type is Type S.

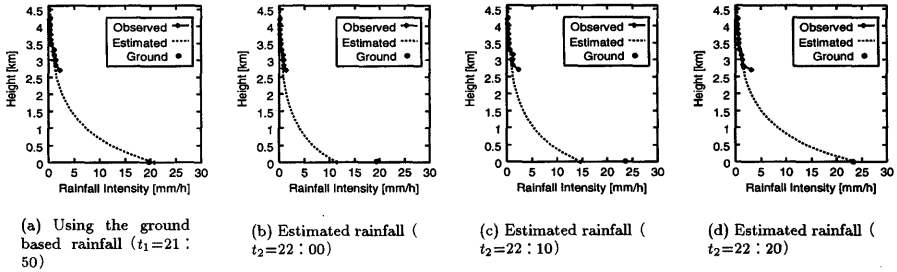


Fig. 9 Comparison between $R_c(h)$ and $R_{obs}(h)$. $R_c(h)$ is estimated using the ground based rainfall. Rainfall type is Type W.

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、Eq.(5), Eq.(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 Eq.(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、Eq.(11)のパラメータ a_{opt}, d_{opt} を同定する。同定されたパラメータ $a_{opt}, b_{opt,Type}, c_{opt,Type}, d_{opt}$ から推定雨量 $R_{est}(h)$ が導かれる。

4.2 適用結果

降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法および現行のB-β法による推定結果との比較を

- 1 観測地上雨量を参照した場合
- 2 観測地上雨量を参照しない場合
- 3 降雨成因を考慮した上での観測地上雨量を参照した場合

の3つの条件で実施した。

(1) 観測地上雨量を参照した場合

まず、1の観測地上雨量を参照した場合において述べる。推定手法を適用する際には、解析対象領域内で降雨成因が一樣として、Eq.(10)のパラメータ

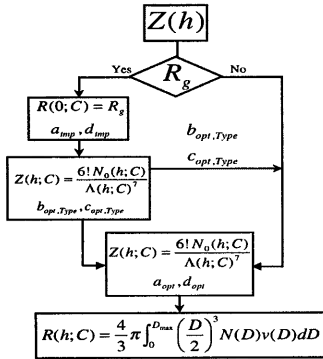


Fig. 10 Flow chart of radar estimation procedure. Here, Z is observed radar reflectivity, R is observed rainfall intensity on the ground.

$b_{opt, Type}$, $C_{opt, Type}$ を同定した。パラメータ $b_{opt, Type}$, $C_{opt, Type}$ と各地点上空の複数高度のレーダー反射因子 $Z(h)$ を用いて各地点の a_{opt} , d_{opt} を同定する。各地点の a_{opt} , d_{opt} から推定地上雨量 $R_e(0)$ を算定し、観測地上雨量 R_g との比較を行った。

なお、AMeDAS から得られる地上観測時間雨量を用いる際に、降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法では同定したパラメータから推定地上雨量 $R_e(0)$ に変換する時に、蓄積時間が60分のレーダー反射因子 $Z(h)$ を用いなければ推定地上雨量 $R_e(0)$ を導くことができなかった。しかし、本推定手法では、パラメータ a_{opt} , d_{opt} を同定する時に60分より短い蓄積時間のレーダー反射因子 $Z(h)$ を用いることができる。そこで、(蓄積時間, 同定時間) は、Table 2 に示すような各条件で適用した。ただし、観測地上時間雨量 R_g と比較をするために、同定時間はすべて60分とする。

各(蓄積時間, 同定時間)に対する推定地上雨量 $R_e(0)$ と観測地上雨量 R_g の相関係数を Fig. 11 に、推定地上雨量 $R_e(0)$ と観測地上雨量 R_g の比較散布図を Fig. 12 に示す。なお、図中には深山レーダー雨量計で観測された当時に実運用に用いられていた $B = 40$, $\beta = 1.7$ の値を用いて $B - \beta$ 法において算定した推定結果(以降、現行の $B - \beta$ 法による推定結果と呼ぶ)、および降雨強度の高度依存性を考慮した地上雨量推定手法による推定結果も示している。

(2) 観測地上雨量を参照しない場合

次に、観測地上雨量を参照しない場合について述べる。観測地上雨量を参照しない地上雨量推定を行

Table 2 Calculated conditions of the accumulation time; T_{ac} and the identified time; T_{id}

	$T_{ac}(\text{min.})$	$T_{id}(\text{min.})$
1	10	60
2	15	60
3	30	60

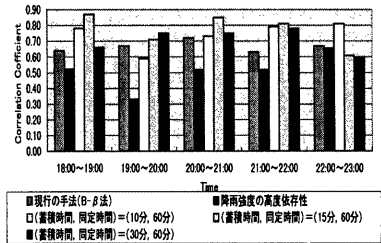


Fig. 11 Correlation coefficient above the points where the surface rainfall is observed.

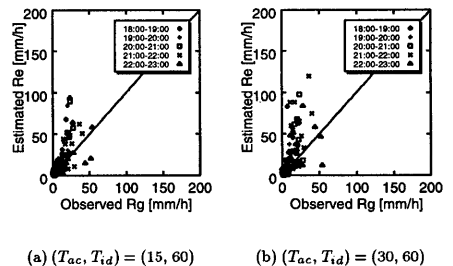


Fig. 12 Comparison between R_e and R_g above the points where the surface rainfall is observed. R_e : estimated rainfall intensity, R_g : observed rainfall intensity

うために、Fig. 13 に示す解析対象領域内の45地点の地上観測雨量の内、ランダムに選んだ22地点の観測地上雨量を参照し、残りの23地点に対して地上雨量が未知であると見なし地上雨量を推定する。すなわち、解析対象領域内で降雨成因は一樣とし、まず、22地点の観測地上雨量を用いて Eq.(10) のパラメータ $b_{opt, Type}$, $C_{opt, Type}$ を同定する。次に、同定されたパラメータ $b_{opt, Type}$, $C_{opt, Type}$ と地上観測雨量を参照しない残りの23地点上空のレーダー反射

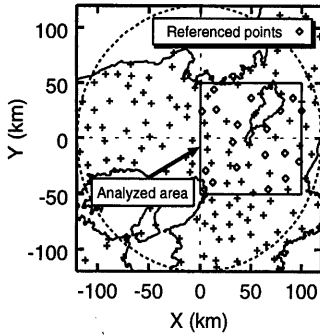


Fig. 13 Location of the AMeDAS rain gage station.
 + : points where there is no surface observation,
 ◇ : points where the surface rainfall is observed

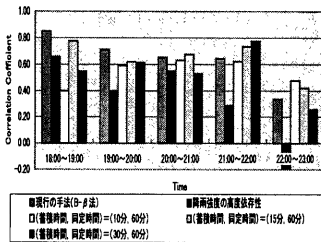


Fig. 14 Correlation coefficient above the points where there is no surface observation.

因子 $Z(h)$ を用いて、23 地点の a_{opt} , d_{opt} を同定する。最後に、同定された a_{opt} , d_{opt} から推定地上雨量 $R_e(0)$ を算定し、地上観測雨量を参照しない 23 地点の推定地上雨量 $R_e(0)$ と観測地上雨量 R_g を比較する。降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法に対しても同様に、ランダムに選んだ 22 地点を用いて、パラメータを同定し、残りの 23 地点上空のレーダー反射因子 $Z(h)$ を用いて地上雨量を算定する。

各（蓄積時間，同定時間）に対する推定地上雨量 $R_e(0)$ と観測地上雨量 R_g の相関係数，現行の $B-\beta$ 法による推定結果の相関係数および降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法の推定結果の相関係数を Fig. 14 に，本推定手法の推定地上雨量 $R_e(0)$ と観測地上雨量 R_g の比較散佈図を Fig. 15 に示す。

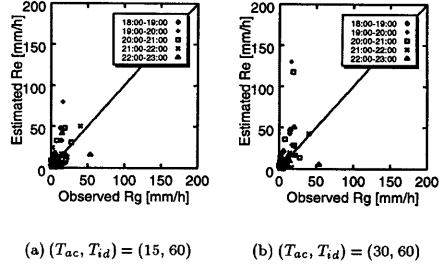


Fig. 15 Comparison between R_e and R_g above the points where there is no surface observation.

(3) 降雨成因を考慮した上での観測地上雨量を参照した場合

最後に、降雨成因を考慮した上での観測地上雨量を参照した場合について述べる。降雨成因の判別は、レーダー反射因子 Z の値に閾値を設定することにより降雨成因を分類する手法を用いた。Table 3 に降雨成因の判別に用いたレーダー反射因子の閾値 Z_{crit} を示す。

適用する際には、Table 3 の条件で分類された降雨成因が共通の地点に対してのみ、観測地上雨量を参照し、共通のパラメータ $b_{opt,Type}$, $c_{opt,Type}$ を同定する。パラメータ $b_{opt,Type}$, $c_{opt,Type}$ と各地上観測雨量が得られる地点上空の複数高度のレーダー反射因子 $Z(h)$ を用いて各地点の a_{opt} , d_{opt} を同定する。各地点の a_{opt} , d_{opt} から推定地上雨量 $R_e(0)$ を算出する。よって、各降雨成因ごと（Type S, TypeW, Type VW の計 3 種類）に 3 種類のパラメータ $b_{opt,Type}$, $c_{opt,Type}$ が同定される。なお、降雨成因はある時間帯には Type S に分類されたものが次の時間帯には異なる降雨成因に分類されることがある。なぜなら、Table 3 は、降雨成因の時間変化を表現できるように分類しているからである。適用した（蓄積時間，同定時間）は、Table 2 と同様である。

降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法に対しても同様に、各降雨成因ごと（Type S, TypeW, Type VW の計 3 種類）にパラメータ A_1 , b , d を同定し、レーダー反射因子 $Z(h)$ を用いて地上雨量を算出する。

各（蓄積時間，同定時間）に対する推定結果，現行の $B-\beta$ 法による推定結果および降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法による推定結果の降雨成因別に分けない各時間帯の各推定手法の相関係数を比較したものを Fig. 16 に，Type S における各時

Table 3 The threshold of radar reflectivity Z_{ctr} for classifying the rainfall type

Rainfall type	Z_{ctr} (dBZ)
Type S	$Z_{ctr} \geq 40$
Type W	$30 < Z_{ctr} < 40$
Type VW	$30 \geq Z_{ctr}$

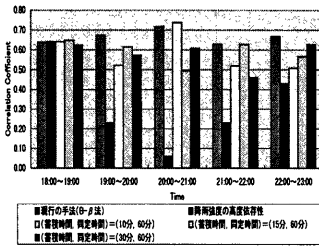


Fig. 16 Correlation coefficient above the points where the surface rainfall, depending on the rainfall type, is observed.

間帯の各推定手法の相関係数を比較したものを Fig. 17 示す。

降雨成因が Type S と Type VW の場合、全ての (蓄積時間、同定時間) において推定精度が向上している。特に、現行の手法での推定精度に大きな問題がある降雨強度が強い場合 (本手法では Type S に対応する)、現行の B- β 法より推定精度が向上していることが明らかである。さらに、Type W の場合でも、18:00~19:00 の時間帯以外で推定精度が向上している。ただし、両推定手法とも降雨成因を考慮した場合、降雨成因を考慮しない場合より推定精度が向上すると予想されたが、両者の推定手法とも降雨成因を考慮した場合の推定精度が悪くなっている。この原因については、それぞれの降雨成因における推定結果に着目すると降雨成因が Type W の推定精度が他の降雨成因の推定精度より悪くなっていることによる。これに関しては、今後検討の余地を残すことになるが、特に、今回用いた降雨成因の判別に用いたレーダー反射因子の閾値 Z_{ctr} の設定が Type S, Type W, Type VW を適格に分類するかたちで行えていないためと考えられる。

以上、1, 2 の場合、本推定手法が他の推定手法より推定精度が向上することが明らかとなった。さらに、3 の場合は降雨成因の判別方法について今後の検討の余地を残すものの、現行の手法での推定

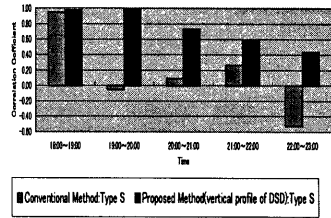


Fig. 17 Correlation coefficient. Rainfall type is Type S

精度に大きな問題がある降雨強度が強い場合、現行の B- β 法より推定精度が向上し、その成果が得られた。

降雨成因の判別に関しては、ブライツバンドの有無や降雨分布の広がりを考慮する方法が考えられ、レーダー反射因子の閾値の決定には、本研究で用いた期間以外に観測されたレーダー情報も用いて、ある程度統計的に決定する必要があると考えられる。今後、降雨事例を増やし降雨成因の分類および判別方法を確立することにより、本推定手法の推定精度向上が行えるものと考えられる。

5. 結論

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を構築するために、降雨成因を考慮した雨滴粒径分布の鉛直構造の定式化を試みた。

まず、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、

$$F(D, h) = \int_0^{D_{max}} D^3 N_0(h; C) \exp\{-\Lambda(h; C)D\} dD$$

数値計算することにより雨滴粒径分布パラメータの高度依存性を表現する最適な関数形を

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

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

と決定した。

次に、雨滴粒径分布パラメータの高度依存性を表現する最適な関数形を実際の 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、検証を行なった。観測地上雨量を用いない場合は、推定地上雨量が非常に大きく推定されることから、観測地上雨量を用いた地上雨量を推定する手法を誘導した。

最後に、雨滴粒径分布パラメータの高度依存性のモデルを基に、レーダーによる地上雨量推定手法を構築し、深山レーダー雨量計に適用することによって現行の $B-\beta$ 法さらには降雨強度の高度依存性を考慮した推定手法との比較を行い、その検証を行った。

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

- 中北英一(1992):3次元レーダーで探る降水現象,地球観測流体力学,日本流体力学編,朝倉書店,pp.27-57.
- 中北英一・中川勝広・池淵周一・佐藤亨・Baxter E. VIEUX・高棹琢馬(1995):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,京都大学防災研究所年報第38号,pp.291-302.
- 中川勝広・中北英一・池淵周一・佐藤亨・Baxter E. VIEUX・高棹琢馬(1996):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.297-303.
- 中川勝広・中北英一・佐藤亨・池淵周一(1996):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.
- 中川勝広・中北英一・佐藤亨・池淵周一(1997):降雨成因を考慮した雨滴粒径分布の鉛直構造解析,京都大学防災研究所年報第40号B-2,pp.263-274.
- Doviak, R. J. and D. S. Zrnic (1984): Doppler Radar and Weather Observations, Academic Press.
- Krajewski, W. F. (1993): Radar Rainfall Estimation, Report of Proc. US-Spain Workshop on Natural Hazards, pp.26-43.
- Hardy, K. R. (1963): The Development of Raindrop-size Distributions and Implications Related to the Physics of Precipitation, *J. Atmos. Sci.*, Vol.20, pp.299-312.
- Srivastava, R. C. (1971): Size Distribution of Raindrops Generated by their Breakup and Coalescence, *J. Atmos. Sci.*, Vol.28, pp.410-415.
- Marshall, J. S. and W. M. Palmer (1948): The Distribution of Raindrops with Size., *J. Meteor.*, 5, pp.165-166.
- Hodson, M. C., : Notes Raindrop Size Distribution (1986): *J. Climate and Appl. Meteorol.*, Vol.25, pp.1070-1074.
- Nakakita, E., Ikebuchi, S., Nakagawa, K., Sato, T., B.E. Vieux and Takasao, T. (1995): 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.
- Nakagawa, K., Nakakita E., Ikebuchi, S., Sato, T., Takasao, T. (1996): Formulation of Vertical Profile of Rain Drop Size Distribution, Proc. of the Conf. on Water Resour. & Environ. Res., pp.651-658(Vol.1).

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

Katsuhiko NAKAGAWA*, Eiichi NAKAKITA, Toru SATO** and Shuichi IKEBUCHI

*Communications Research Laboratory of Ministry of Posts and Telecommunications

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

To improve the accuracy of the radar-estimated rainfall, we observe and analyze the vertical profile of the rain drop size distribution (DSD) that is observed by a vertical pointing VHF Doppler radar in Japan named the MU (Middle and Upper) radar. The MU radar can detect the vertical profile of the Doppler spectrum that consists of the velocities of both the rain drop itself and air movements. One of the points of this paper is utilizing vertical profile of DSD. First, based on the obtained information, a new formulation of vertical profile of DSD related to rainfall type is developed. Secondly, an algorithm for estimating surface rainfall using radar is developed. This algorithm also considers the vertical profile of DSD related to rainfall type. Finally, this algorithm was applied into a conventional volume scanning radar named the Miyama radar operated by the Ministry of Construction of Japan.

Keywords : Rain drop size distribution, Vertical profile, Rainfall type, Radar rain-gage, Algorithm for estimating ground rainfall