

高仰角観測時の X バンド偏波レーダ降雨強度推定式

真木雅之*・朴相郡**

Rain Rate Estimators of X-Band Polarimetric Radar Scanning at High Elevation Angles

Masayuki MAKI* and Sang-Goon PARK**

*Storm, Flood and Landslide Research Department
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
maki@bosai.go.jp

**Pukyong National University, Korea

Abstract

This paper examines the sensitivity of four types of X-band polarimetric radar rainfall estimators to elevation angle and temperature by performing scattering simulations with observed DSD samples. The simulation results reveal that $R(K_{DP})$, $R(Z_H, Z_{DR})$, and $R(K_{DP}, Z_{DR})$ are sensitive to elevation angle. $R(Z_H)$ is independent on elevation angle. Estimation error of $R(K_{DP})$, $R(K_{DP}, Z_{DR})$, and $R(Z_H, Z_{DR})$ caused by ignoring the elevation angle dependence are -10%, -7%, and +20%, respectively when the elevation angle is 20 degree, and -60%, -55%, and +160%, respectively when the elevation angle is 40 degree. The dependence of estimators of $R(K_{DP})$ and $R(K_{DP}, Z_{DR})$ on elevation angle is small and can be negligible when the elevation angle is smaller than 10 degree. $R(Z_H)$ and $R(Z_H, Z_{DR})$ are slightly sensitive to temperature. $R(K_{DP})$ and $R(K_{DP}, Z_{DR})$ are not sensitive to temperature. Estimation error of $R(Z_H)$ and $R(Z_H, Z_{DR})$ caused by ignoring the temperature dependence are at a maximum -10% and +9%, respectively.

Key words : Polarimetric radar, QPE, Specific differential phase, Differential reflectivity, Scattering simulation

1. はじめに

降雨強度の3次元分布情報は、降水システムの構造や発生・発達過程を理解する上で、また、水資源管理、豪雨災害の監視や予測をおこなう上で必要不可欠である。気象庁では在来型レーダやドップラーレーダを用いて降雨の3次元分布の観測をおこなっている。このタイプのレーダでは、 Z - R 関係式に基づく方法により降雨強度が推定されるが、この関係式は様々な誤差要因の影響を受けることが知られている。

近年、直交二偏波レーダ（以降、偏波レーダ）が実用化され、精度良い降雨量推定が可能になってきた（例えば Bringi and Chandrasekar, 2001）。在来型レーダが単一

偏波の電波を送信するのに対して、偏波レーダは水平偏波と垂直偏波の二種類の電波を送信し、降水に関する様々な偏波パラメータを測定する。降雨量の推定に用いられる偏波パラメータは、レーダ反射因子、反射因子差、偏波間位相差あるいは単位距離あたりの偏波間位相差（本論文では比偏波間位相差と呼ぶ）である。このうち、偏波間位相差は精度良い降雨強度推定の鍵となるパラメータである。

偏波パラメータを用いた降雨強度推定式は、通常、 $R = aX^b$ あるいは $R = aX^bY^c$ のべき乗式で表される。ここで、 R は降雨強度、 X と Y は偏波パラメータである。関係式中の係数 a とべき指数 b, c は散乱計算から決定され

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 水 土砂防災研究部

** 釜慶国立大学

る定数である。これまでの研究では、低仰角の PPI スキャンモードを想定して係数とべき指数を求めている。しかしながら、降雨強度の3次元分布の観測に用いられるボリュームスキャンや鉛直断面スキャンでは、高仰角での観測がおこなわれる。この場合、降雨強度推定式はアンテナ仰角を考慮した式でなければならない。また、高仰角の観測ではビーム方向の温度の変化についても考慮する必要がある。本研究では3cm波長の偏波レーダ観測を想定して、観測仰角と温度を考慮した降雨強度推定式を求める。

2. 方法

2.1 降雨強度推定式

本報告は以下の4種類の降雨強度推定式を対象とする。第1は在来型レーダで用いられる Z-R 関係式で、

$$R(Z_H) = a_1(t, \theta) Z_H^{c_2(t, \theta)} \quad (1)$$

で表される。ここで、 R は降雨強度、 Z_H は水平偏波のレーダ反射因子、 t は温度、 θ は仰角である。偏波パラメータを用いた降雨強度推定式として次の3種類の式を考える。

$$R(K_{DP}) = b_1(t, \theta) K_{DP}^{b_2(t, \theta)} \quad (2)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = c_1(t, \theta) K_{DP}^{c_2(t, \theta)} 10^{0.1c_3(t, \theta) Z_{DR}} \quad (3)$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = d_1(t, \theta) Z_H^{d_2(t, \theta)} 10^{0.1d_3(t, \theta) Z_{DR}} \quad (4)$$

ここで、 K_{DP} 、 Z_{DR} はそれぞれ比偏波間位相差、反射因子差である。(1)式と同様に各推定式の係数とべき指数は温度とアンテナ仰角の関数とする。

2.2 散乱計算条件

(1)~(4)式の係数とべき指数を求めるために、Tマトリックス法 (Waterman, 1971) による散乱シミュレーションをおこなった。シミュレーションには、雨滴粒径分布、形状、姿勢、温度、雨滴に対する電波の入射角 (すなわちアンテナ仰角) の情報を必要とする。雨滴粒径分布に関しては、インパクトタイプのディストロメータ (Joss and Waldvogel, 1967) による実測データ (2001年つくばで観測) を用いた。雨滴の形状 (軸比) は Andsager *et al.* (1999) に従って、次の平均軸比の式を用いる。

$$\alpha = b/a = 1.012 - 0.01445 D_e - 0.01028 (D_e^2); \quad 1 \leq D_e \leq 4.0 \text{ mm} \quad (5)$$

$$\alpha = b/a = 1.0048 + 5.7 \times 10^{-4} (D_e) - 2.628 \times 10^{-2} (D_e^2) + 3.682 \times 10^{-3} (D_e^3) - 1.677 \times 10^{-4} (D_e^4);$$

$$D_e < 1 \text{ mm} \text{ または } D_e > 4 \text{ mm} \quad (6)$$

(5)式は航空機搭載画像センサーによる雨の測定データ (Chandrasekar *et al.*, 1988) やこれまで様々な研究者によってなされた室内実験の結果から導き出された式で

ある。(6)式は Beard and Chuang (1987)が提案した式である。雨滴の落下姿勢を与えるキャンティング角度は平均 0° 、標準偏差 10° のガウス分布とした。温度は3通り ($0, 15, 30^\circ\text{C}$)、アンテナ仰角は5通り ($0, 10, 20, 30, 40^\circ$) とした。

2.3 降雨強度推定式の決定

2.2の散乱計算結果から、(1)、(2)、(3)、(4)式の降雨強度推定式の係数および指数を決定することができる。(3)式の降雨推定式を例としてその手順を述べるが、その手順は大きく変更することなく他の推定式についても適用できる。

(3)式の c_1 、 c_2 、 c_3 の温度依存性と仰角依存性は次の多項式で表されるとする。

$$\begin{aligned} c_1(t, \theta) &= \alpha_0 + \alpha_1 \theta + \alpha_2 \theta^2 + \alpha_3 \theta^3 + f(t) \\ c_2(t, \theta) &= \beta_0 + \beta_1 \theta + \beta_2 \theta^2 + \beta_3 \theta^3 + g(t) \\ c_3(t, \theta) &= \gamma_0 + \gamma_1 \theta + \gamma_2 \theta^2 + \gamma_3 \theta^3 + h(t) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 t 、 θ はそれぞれ温度、観測仰角である。(7)式の右辺の最後の項、 $f(t)$ 、 $g(t)$ 、 $h(t)$ はそれぞれ c_1 、 c_2 、 c_3 の温度依存性を記述する項で、温度 t の2次多項式で表されるとする。但し、 $f(0)=0$ 、 $g(0)=0$ 、 $h(0)=0$ とする。(7)式の α_i ($i=0, 1, 2, 3$)、 β_i ($i=0, 1, 2, 3$)、 γ_i ($i=0, 1, 2, 3$) の値および $f(t)$ 、 $g(t)$ 、 $h(t)$ の各係数は最小2乗法により決定する。

2.4 誤差解析のための降雨モデル

(1)~(4)式の降雨強度推定式について、観測仰角と温度の影響を考慮しなかった場合に生じる誤差を調べるために単純な降雨モデルを考える。即ち、雨は水平方向と鉛直方向に強さ R_0 で一様に分布し、気温 t も一様に分布すると仮定する。この降雨モデルをアンテナ仰角 θ で観測したときの偏波レーダパラメータ (K_{DP} 、 Z_{DR} 、 Z_H) は以下のように計算することができる。(2)式より、 K_{DP} は

$$K_{DP}(R_0, t, \theta) = (R_0 / b_1(t, \theta))^{1/b_2(t, \theta)} \quad (8)$$

から求められる。この K_{DP} を(3)式に代入すれば、

$$Z_{DR}(R_0, t, \theta) = \frac{10}{c_3(t, \theta)} \log \frac{R_0}{c_1(t, \theta) K_{DP}^{c_2(t, \theta)}} \quad (9)$$

が得られる。(9)式の Z_{DR} を(4)式に代入すれば、

$$10 \log Z_H(R_0, t, \theta) = (10 \log \frac{R_0}{d_1(t, \theta)} - d_3(t, \theta) Z_{DR}) / d_2(t, \theta) \quad (10)$$

が得られる。(8)、(9)、(10)式は、降雨強度 R_0 、温度 t の降水現象を仰角 θ で観測した時の偏波レーダパラメータの値を与える式である。

3. 計算結果

3.1 温度と観測仰角を考慮した降雨強度推定式

2.4 に述べた方法で得られた温度と観測仰角を考慮した降雨強度推定式の係数と指数の値を表 1 にまとめた。なお、最小 2 乗法による回帰曲線の当てはめの結果、重要ではない次数の項は省略した。

各推定式の係数と指数の温度依存性および仰角依存性の特徴は下記のとおりである。

$$(a) R(Z_H) = a_1(t, \theta) Z_H^{a_2(t, \theta)}$$

図 1 に、降雨強度推定式 $R(Z_H)$ の係数 a_1 、べき指数 a_2 とアンテナ仰角 (θ) 、温度 (t) の関係を示す。図から明らかのように、 a_1 と a_2 は仰角 θ には関係なく温度 t のみに依存する。

$$(b) R(K_{DP}) = b_1(t, \theta) K_{DP}^{b_2(t, \theta)}$$

図 2 に、降雨強度推定式 $R(K_{DP})$ の係数 b_1 、べき指数 b_2 とアンテナ仰角 (θ) 、温度 (t) との関係を示す。図から明らかのように、 b_1 の温度依存性は無視でき仰角 θ のみに依存する。一方、 b_2 はわずかであるが温度に依存する。 b_2 の仰角依存性は無視できる。

$$(c) R(K_{DP}, Z_{DR}) = c_1(t, \theta) K_{DP}^{c_2(t, \theta)} 10^{0.1c_3(t, \theta)Z_{DR}}$$

図 3 に、降雨強度推定式 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の係数 c_1 、べき指数 c_2 、 c_3 とアンテナ仰角 (θ) 、温度 (t) との関係を示す。 c_1 と c_3 には明瞭な仰角依存性が見られる。特に、仰角がおおよそ 20° を越すとその傾向がより顕著である。また、温度依存性についても $0 \sim 30^\circ\text{C}$ で約 8% 程度の値の違いが生じる。これに対して c_2 は仰角にも温度にもほとんど依存しない。

表 1 アンテナ仰角と温度を考慮した降雨強度推定式。

Table 1 Four types of rainfall estimators which consider temperature and antenna elevation angle.

降雨強度推定式	係数と指数
$R(Z_H) = a_1(t, \theta) Z_H^{a_2(t, \theta)}$	$a_1(t, \theta) = 3.35 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-4} t$ $a_2(t, \theta) = 0.639 - 9.00 \times 10^{-4} t$
$R(K_{DP}) = b_1(t, \theta) K_{DP}^{b_2(t, \theta)}$	$b_1(t, \theta) = 19.8 + 2.64 \times 10^{-2} \theta + 1.73 \times 10^{-3} \theta^2 + 1.09 \times 10^{-4} \theta^3 - 0.012 t$ $b_2(t, \theta) = 0.814 + 5.00 \times 10^{-4} t$
$R(K_{DP}, Z_{DR}) = c_1(t, \theta) K_{DP}^{c_2(t, \theta)} 10^{0.1c_3(t, \theta)Z_{DR}}$	$c_1(t, \theta) = 27.3 + 4.33 \times 10^{-2} \theta + 2.28 \times 10^{-3} \theta^2 + 1.77 \times 10^{-4} \theta^3 - 6.92 \times 10^{-2} t$ $c_2(t, \theta) = 0.882$ $c_3(t, \theta) = -1.17 - 2.64 \times 10^{-3} \theta - 7.50 \times 10^{-5} \theta^2 - 1.06 \times 10^{-5} \theta^3 + 9.07 \times 10^{-3} t$
$R(Z_H, Z_{DR}) = d_1(t, \theta) Z_H^{d_2(t, \theta)} 10^{0.1d_3(t, \theta)Z_{DR}}$	$d_1(t, \theta) = 1.20 \times 10^{-2} - 5.69 \times 10^{-8} \theta + 5.04 \times 10^{-7} \theta^2 - 3.18 \times 10^{-9} \theta^3 - 1.36 \times 10^{-5} t + 3.09 \times 10^{-6} t^2$ $d_2(t, \theta) = 0.857 - 1.10 \times 10^{-4} \theta + 1.57 \times 10^{-3} t - 3.78 \times 10^{-5} t^2$ $d_3(t, \theta) = -3.67 - 7.95 \times 10^{-3} \theta - 2.25 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.20 \times 10^{-5} \theta^3 - 3.95 \times 10^{-2} t + 4.31 \times 10^{-4} t^2$

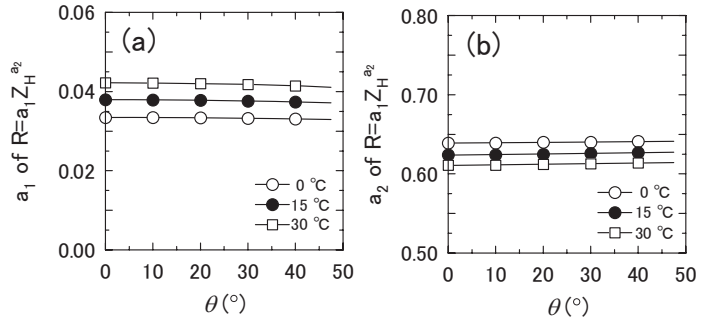


図 1 $R(Z_H)$ の係数 a_1 、 a_2 のアンテナ仰角 (θ) と温度に対する依存性。
Fig. 1 Dependence of a_1 and a_2 of $R(Z_H)$ on elevation angle (θ) and temperature.

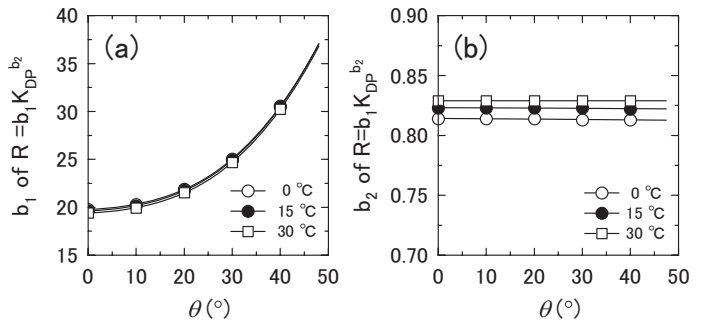


図 2 $R(K_{DP})$ の係数 b_1 、 b_2 のアンテナ仰角 (θ) と温度に対する依存性。
Fig. 2 Dependence of b_1 and b_2 of $R(K_{DP})$ on elevation angle (θ) and temperature.

$$(d) R(Z_H, Z_{DR}) = d_1(t, \theta) Z_H^{d_2(t, \theta)} 10^{0.1 d_3(t, \theta) Z_{DR}}$$

図4に、降雨強度推定式 $R(Z_H, Z_{DR})$ の係数 d_1 、べき指数 d_2 、 d_3 と温度 t 、アンテナ仰角 θ との関係を示す。 d_1 と d_3 はともに温度依存性と仰角依存性がある。 d_1 については仰角よりも温度依存性が大きい。一方、 d_3 は仰角による変化がより顕著である。特に、仰角がおおよそ 20° を越すとその傾向はより顕著になる。 d_2 については、仰角依存性は無視できる大きさであるが、温度依存性は無視できない。

3.2 推定降雨強度の相対誤差

(1)~(4)式の降雨強度推定式について、仰角依存性と温度依存性を考慮しなかった場合に生じる誤差について調べる。仰角依存性については、 $\theta=0^\circ$ の時の係数とべき指数を他の仰角にも用いた場合に生じる相対誤差 ($\Delta R_\theta/R_0$) を計算する。ここで、 R_0 は真の降雨強度、 ΔR_θ は仰角依存性を考慮しないで計算した降雨強度と R_0 の差である。温度依存性については、 $t_0=20^\circ\text{C}$ の時の係数とべき指数を他の温度に用いた場合に生じる相対誤差 ($\Delta R_t/R_0$) を計算する。ここで、 ΔR_θ は温度依存性を考慮しないで計算した降雨強度と R_0 の差である。 ΔR_θ と ΔR_t の計算に必要な偏波パラメータは(8)、(9)、(10)式を用いて計算する。その時の降雨強度 R_0 は 10, 20, 40, 80, 160 mmh^{-1} の4通り、仰角は $0^\circ \sim 60^\circ$ 、温度は $0^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ である。それぞれの推定式について求めた結果は以下の通りである。

$$(a) R(Z_H) = a_1(t, \theta) Z_H^{a_2(t, \theta)}$$

求める相対誤差はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{\Delta R_\theta}{R_0} = \frac{a_1(t, 0) Z_H^{a_2(t, 0)} (R_0, t, \theta) - R_0}{R_0} \quad (11a)$$

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{a_1(20, \theta) Z_H^{a_2(20, \theta)} (R_0, t, \theta) - R_0}{R_0} \quad (11b)$$

仰角依存性について、(11a)式から得られた結果を図5に示す。図から明らかなように仰角依存性はない。温度依存性について、(11b)式から得られた計算結果を図6に示す。温度が 20°C の係数を他の温度にも用いた場合、推定降雨強度は過小評価される。その度合いは R_0 が大きくなるほど大である。例えば、 $R_0=40\text{mmh}^{-1}$ の場合は約5%の過小評価であるが、 $R_0=160\text{mmh}^{-1}$ の場合は約10%の過小評価となる(温度が 0°C の場合)。

$$(b) R(K_{DP}) = b_1(t, \theta) K_{DP}^{b_2(t, \theta)}$$

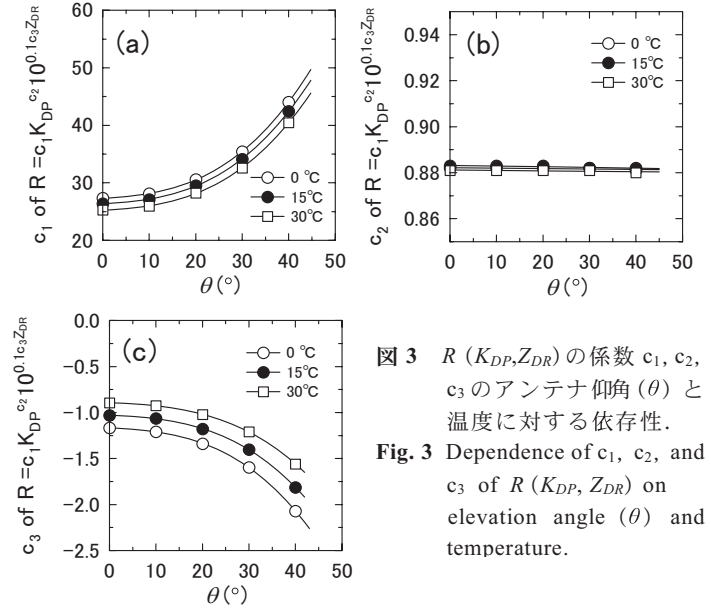


図3 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の係数 c_1 、 c_2 、 c_3 のアンテナ仰角 (θ) と温度に対する依存性。
Fig. 3 Dependence of c_1 , c_2 , and c_3 of $R(K_{DP}, Z_{DR})$ on elevation angle (θ) and temperature.

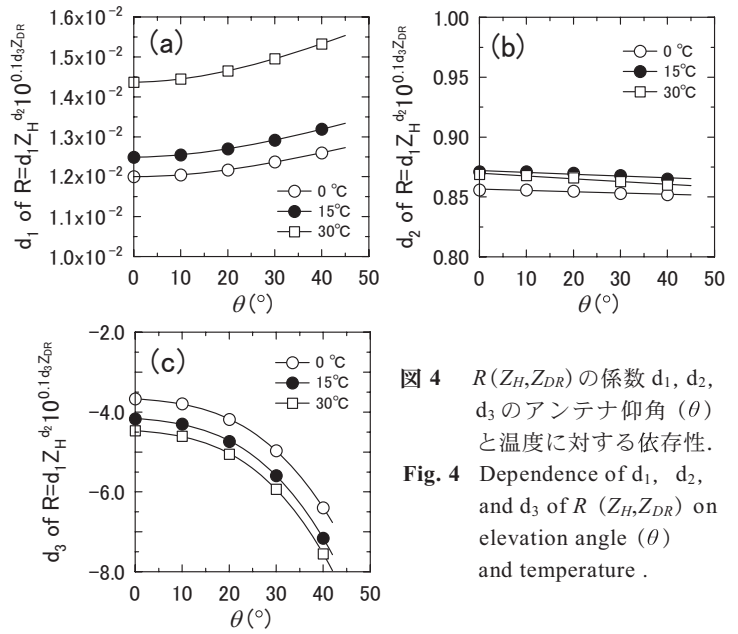


図4 $R(Z_H, Z_{DR})$ の係数 d_1 、 d_2 、 d_3 のアンテナ仰角 (θ) と温度に対する依存性。
Fig. 4 Dependence of d_1 , d_2 , and d_3 of $R(Z_H, Z_{DR})$ on elevation angle (θ) and temperature.

求める相対誤差はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{\Delta R_\theta}{R_0} = \frac{b_1(t, 0) K_{DP}^{b_2(t, 0)} (R_0, t, \theta) - R_0}{R_0} \quad (12a)$$

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{b_1(20, \theta) K_{DP}^{b_2(20, \theta)} (R_0, t, \theta) - R_0}{R_0} \quad (12b)$$

仰角依存性について、(12a)式から得られた結果を図7に示す。温度は20℃である。図7からわかるように、仰角0°の場合の係数を他の仰角に用いたときに生じる相対誤差の絶対値は仰角とともに大きくなる。例えば、 $\theta=20^\circ$ では約10%の過小評価、 $\theta=60^\circ$ では約60%の過小評価をもたらす。 $\theta=5^\circ$ 以下では相対誤差の絶対値は約1%以下であり、仰角依存性は無視できる。この仰角依存性は図2から明らかのように係数 b_1 の仰角依存性によるものである。

温度依存性について、(12b)式から得られた結果を図8に示す。仰角は $\theta=5^\circ$ である。図8からわかるように、温度が20℃の場合の係数を他の温度に用いたときに生じ

る相対誤算は±2%程度であり実用上は無視できる。なお、図の横軸の温度20℃は地上付近の温度、0℃は融解層の温度であるので、図は地上から融解層高度までの誤差の分布と見なせる。

$$(c) R(K_{DP}, Z_{DR}) = c_1(t, \theta) K_{DP}^{c_2(t, \theta)} 10^{0.1c_3(t, \theta) Z_{DR}}$$

求める相対誤差はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{\Delta R_\theta}{R_0} = \frac{c_1(t, \theta) K_{DP}^{c_2(t, \theta)} (R_0, t, \theta) 10^{0.1c_3(t, \theta) Z_{DR}(R_0, t, \theta)} - R_0}{R_0} \quad (13a)$$

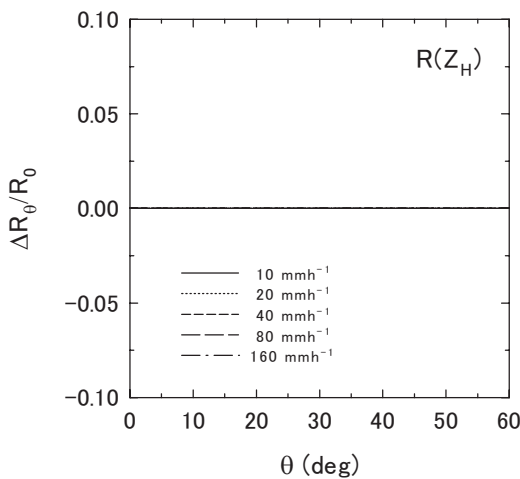


図5 アンテナ仰角0°の場合の係数を他の仰角に用いた場合に生じる $R(Z_H)$ の相対誤差($t=20^\circ\text{C}$)。

Fig.5 Relative error of $R(Z_H)$ when dependence of c_1 and c_2 of $R(Z_H)$ on elevation angle (θ) is not considered ($t=20^\circ\text{C}$).

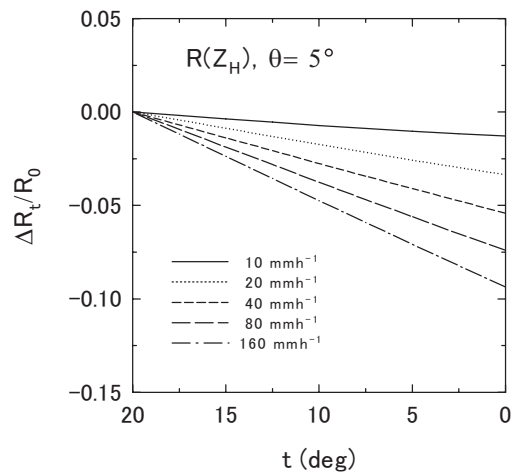


図6 温度20℃の場合の係数を他の温度に用いた場合に生じる $R(Z_H)$ の相対誤差($\theta=5^\circ$)。

Fig.6 Relative error of $R(Z_H)$ when dependence of c_1 and c_2 of $R(Z_H)$ on temperature (t) is not considered ($\theta=5^\circ$).

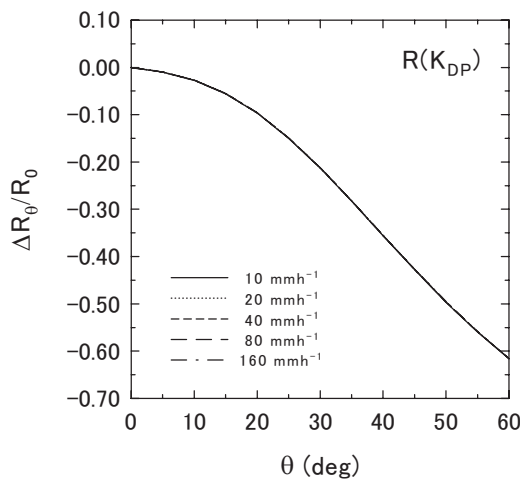


図7 図5と同じ。但し、 $R(K_{DP})$ の場合。

Fig.7 Same as in Fig. 5, but for $R(K_{DP})$.

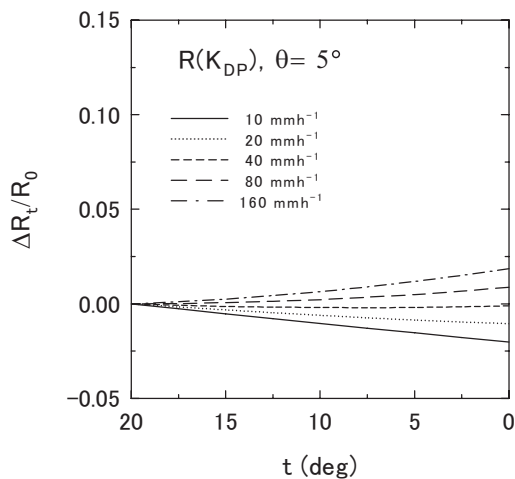


図8 図6と同じ。但し、 $R(K_{DP})$ の場合。

Fig.8 Same as in Fig. 6, but for $R(K_{DP})$.

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{c_1(20, \theta) K_{DP}^{c_2(20, \theta)} (R_0, t, \theta) 10^{0.1c_3(20, \theta) Z_{DR}(R_0, t, \theta)} - R_0}{R_0} \quad (13b)$$

$R_0 = c_1(t, \theta) K_{DP}^{c_2(t, \theta)} 10^{0.1c_3(t, \theta) Z_{DR}}$ を(13a)式へ代入し、 c_2 の仰角による変動は1%以下であり(図3参照)無視すると、 $K_{DP}^{c_2(20, \theta)} \approx K_{DP}^{c_2(t, \theta)}$ なので、

$$\frac{\Delta R_\theta}{R_0} = \frac{c_1(t, 0)}{c_1(t, \theta)} 10^{0.1(c_3(t, 0) - c_3(t, \theta)) Z_{DR}(R_0, t, \theta)} - 1 \quad (14a)$$

が得られる。一方、 c_2 の温度による変動は1%以下で無視できる(図3参照)ので、(13b)式は

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{c_1(20, \theta)}{c_1(t, \theta)} 10^{0.1(c_3(20, \theta) - c_3(t, \theta)) Z_{DR}(R_0, t, \theta)} - 1 \quad (14b)$$

と表される。

(14a)式によれば、 $\Delta R_\theta / R_0$ は係数 c_1 と c_3 の仰角依存性と Z_{DR} の値の大きさによる。 c_1 の仰角依存性を無視した場合、推定降雨強度を過小評価する。これに対して、 c_3 の仰角依存性を無視した場合、逆に推定降雨強度を過大評価する。例えば、 0° の場合の c_1 を他の仰角に用いたときに生じる相対誤差は、 $\theta=20^\circ$ では10%の過小評価、 $\theta=60^\circ$ では64%の過小評価をもたらす(ただし、 $R_0=40\text{mmh}^{-1}$ の時)。一方、仰角 0° の場合の c_3 を他の仰角に用いた場合、 $\theta=20^\circ$ では4%の過大評価、 $\theta=60^\circ$ では26%の過大評価をもたらす。 Z_{DR} が大きいほど、過大評価の度合いは大きくなる。このように最終的には c_1, c_3, Z_{DR} の効果が足し合わさって図9の結果となる。すなわち、仰角依存性を考慮しなかった場合の推定値は過小評価され、その度合いは仰角とともに大きくなる、例えば、 $R_0=40\text{mmh}^{-1}$ の時、 $\theta=20^\circ$ では約7%の過小評価、 $\theta=60^\circ$ では約55%の過小評価をもたらす。最終的な結果が過小評価されることから、 c_1 の影響が最も大きいことがわかる。

(14b)式からは、温度依存性を無視した場合の影響を議論することができる。(14b)式の右辺の $c_1(20, \theta) / c_1(t, \theta)$ は降雨強度を過小評価する。一方、 $10^{0.1(c_3(20, \theta) - c_3(t, \theta)) Z_{DR}}$ は降雨強度を過大評価する。例えば、 $t=0^\circ\text{C}$ 、 $R_0=40\text{mmh}^{-1}$ で、 $c_1(20, \theta) / c_1(t, \theta) = 0.95$ 、 $10^{0.1(c_3(20, \theta) - c_3(t, \theta)) Z_{DR}} = 1.06$ である。(14b)式からわかるように、 $\Delta R_t / R_0$ は Z_{DR} にも関係する。 Z_{DR} が大きい時には c_3 の影響を増幅し、過大評価の度合いを強める。最終的にはこれらの効果が重なり合って図10の結果となる。すなわち、結果は $R(K_{DP})$ の場合と似ており、温度が 20°C の場合の係数を他の温度に用いたときに生じる相対誤差は-1%から+3%程度であり、実用上は無視できる。

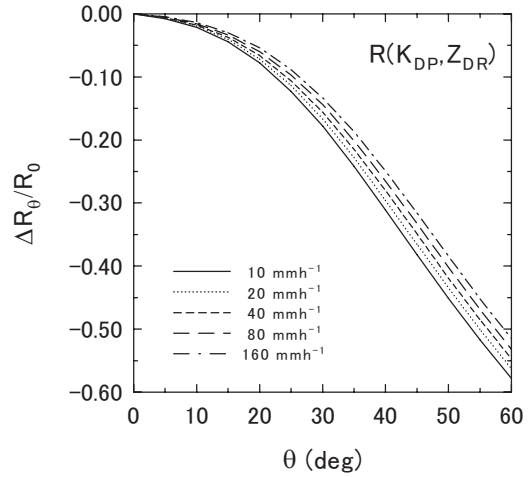


図9 図5と同じ、但し、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の場合。
Fig.9 Same as in Fig. 5, but for $R(K_{DP}, Z_{DR})$.

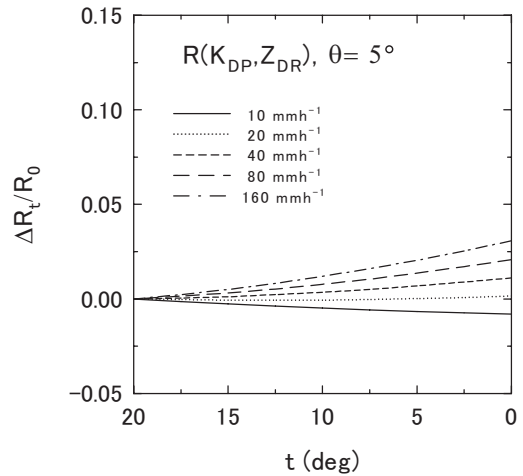


図10 図6と同じ。但し、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の場合。
Fig.10 Same as in Fig. 6, but for $R(K_{DP}, Z_{DR})$.

$$(d) R(Z_H, Z_{DR}) = d_1(t, \theta) Z_H^{d_2(t, \theta)} 10^{0.1d_3(t, \theta) Z_{DR}}$$

求める相対誤差はそれぞれ次式で表される。

$$\frac{\Delta R_\theta}{R_0} = \frac{d_1(t, 0) Z_H^{d_2(t, 0)} (R_0, t, \theta) 10^{0.1d_3(t, 0) Z_{DR}(R_0, t, \theta)} - R_0}{R_0} \quad (15a)$$

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{d_1(20, \theta) Z_H^{d_2(20, \theta)} (R_0, t, \theta) 10^{0.1d_3(20, \theta) Z_{DR}(R_0, t, \theta)} - R_0}{R_0} \quad (15b)$$

仰角依存性についての計算結果を図 11 に示す。 $\Delta R_\theta / R_0$ は仰角とともに大きくなる。例えば、 $R_0=40\text{mmh}^{-1}$ の時、 $\theta=20^\circ$ では約 20% の過大評価、 $\theta=60^\circ$ では約 160% の過大評価をもたらす。

この結果は次のように解釈することができる。図 4 からわかるように、 d_2 の仰角による変動は 1% 以下で無視できるので、(15a) 式は次式で近似できる。

$$\frac{\Delta R_\theta}{R_0} = \frac{d_1(t, 0)}{d_1(t, \theta)} 10^{0.1(d_3(t, 0) - d_3(t, \theta))Z_{DR}(R_0, t, \theta)} - 1 \quad (16a)$$

(16a) 式は $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の場合と全く同じ形式である。すなわち、 $\Delta R_\theta / R_0$ は係数 d_1 と d_3 の仰角依存性によるもので、 Z_H の大きさにはよらない。 d_1 と d_3 の仰角依存性の影響は $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の場合と定性的には同じで、 d_1 の仰角依存性を無視した場合、推定降雨強度を過小評価し、 d_3 の仰角依存性を無視した場合、逆に推定降雨強度を過大評価する。量的には d_3 の影響が支配的である。例えば、 0° の場合の d_1 だけを他の仰角に用いたときに生じる相対誤差は、 $R_0=40\text{mmh}^{-1}$ の時、 $\theta=20^\circ$ では 2% の過小評価、 $\theta=60^\circ$ でも 10% の過小評価でしかないが、仰角 0° の場合の d_3 だけを他の仰角に用いた場合、 $\theta=20^\circ$ では約 20% の過大評価、 $\theta=60^\circ$ では 160% の過大評価をもたらす。 R_0 が大きいときには Z_{DR} が大きくなるので、 d_3 の影響が大きくなり、より過大評価することになる。このため、 $R_0=160\text{mmh}^{-1}$ の時、 $\theta=20^\circ$ では約 30% の過大評価、 $\theta=60^\circ$ では約 250% の過大評価となる。

温度依存性についての計算結果を図 12 に示す。温度が 20°C の場合の係数を他の温度に用いたときに生じる相対誤算は 3% から 9% で、過大評価される。過大評価の度合いは降雨強度 R_0 が大きくなると小さくなる。

この結果は下記のように解釈することができる。(15b) 式は次のように変形できる。

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{d_1(20, \theta)}{d_1(t, \theta)} \frac{Z_H^{(d_2(20, \theta) - d_2(t, \theta))}}{Z_H^{(d_2(20, \theta) - d_2(t, \theta))}} (R_0, t, \theta) \times 10^{0.1(d_3(20, \theta) - d_3(t, \theta))Z_{DR}(R_0, t, \theta)} - 1 \quad (16b)$$

上式の右辺の $d_1(20, \theta)/d_1(t, \theta)$ は、例えば $\theta=5^\circ$ のとき、 $t=20^\circ\text{C}$ から $t=0^\circ\text{C}$ の範囲で 1.00 から 1.08 の値をとり、降雨強度を過大評価する。 $Z_H^{(d_2(20, \theta) - d_2(t, \theta))}$ はこの温度範囲で 1.00 から 1.20 の値をとり、同じく降雨強度を過大評価する。これに対して、 $10^{0.1(d_3(20, \theta) - d_3(t, \theta))Z_{DR}}$ は 0 から 0.82 の値をとり、降雨強度を過小評価する。最終的には、これらの効果が相殺し合い、 $\Delta R_\theta / R$ は $R_0=10\text{mmh}^{-1} \sim 160\text{mmh}^{-1}$ で 9% ~ 3% の過大評価となる。この値は θ が 30° まではほぼ同じであるが、 $\theta=60^\circ$ では若干大きくなり、 $R_0=10\text{mmh}^{-1} \sim 160\text{mmh}^{-1}$ で 10% ~ 6% である (図は省略)。

4. まとめ

偏波レーダは、反射因子 (Z_H)、反射因子差 (Z_{DR})、

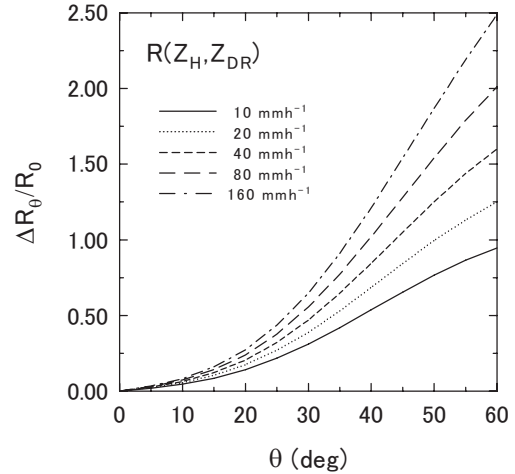


図 11 図 5 と同じ、但し、 $R(Z_H, Z_{DR})$ の場合。
Fig.11 Same as in Fig. 5, but for $R(Z_H, Z_{DR})$.

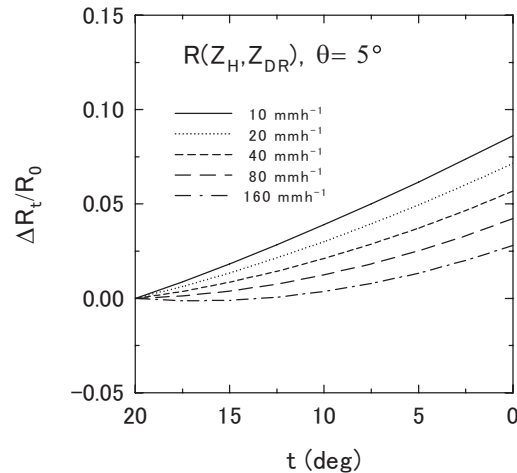


図 12 図 6 と同じ、但し、 $R(Z_H, Z_{DR})$ の場合。
Fig.12 Same as in Fig.6, but for $R(Z_H, Z_{DR})$.

比偏波間位相差 (K_{DP}) を用いて降雨強度を推定する。 Z_{DR} や K_{DP} の値は扁平な形状をした雨滴に対する送信電波の入射角度 (本報ではアンテナ仰角と表現した) によって変わるために、降雨強度推定式はこれを考慮したものでなければならない。一方、受信電力から求められる Z_H や Z_{DR} は温度に関係するため、これらのパラメータを用いた降雨強度推定式は温度を考慮したものでなければならない。そこで、T マトリックス法を用いた散乱計算をおこないその結果を表 1 にまとめた。さらに、温度依存性、アンテナ仰角依存性を無視した場合の誤差を表 2 にまとめた。表 2 によれば、 Z_{DR} や K_{DP} を用いた降雨強度推定式のアンテナ仰角依存性は、仰角が 10° 以下であればその影響は無視できる。また、 Z_H や Z_{DR} を用いた降雨強度推定式の温度依存性は 10% 以下である。水文学的な研究やオペレーショナルな目的のために行われるレーダ観測は低仰角のスキャンが中心である。本研究の結果

表2 4種類の降雨強度推定式の温度依存性と仰角依存性.
Table 2 Dependence of 4 types of rainwater content estimators on temperature and elevation angle.

降雨強度推定式	仰角依存性	温度依存性
$R(Z_H)$	無視できる (3%未満).	通常は無視できる. 但し、猛烈な雨の時には過小評価する. ($R=40\text{mmh}^{-1}$ で約5%, $R=160\text{mmh}^{-1}$ で約10%)
$R(K_{DP})$	過小評価する ($\theta=20^\circ$ で約-10%, $\theta=60^\circ$ で約-60%). $\theta<10^\circ$ では無視できる (-3%程度).	無視できる ($\pm 2\%$ 程度).
$R(K_{DP}, Z_{DR})$	過小評価する ($R=40\text{mmh}^{-1}$ の時, $\theta=20^\circ$ で約-7%, $\theta=60^\circ$ で約-55%). $\theta<10^\circ$ では無視できる (-2%程度).	無視できる (-1%~+3%程度).
$R(Z_H, Z_{DR})$	過大評価する ($R_0=40\text{mmh}^{-1}$ の時, $\theta=20^\circ$ で約20%, $\theta=60^\circ$ で約160%).	弱い雨の時に過大評価する傾向がある ($R=160\text{mmh}^{-1}$ で約3%, $R=10\text{mmh}^{-1}$ で約9%).

はこのような場合には降雨強度推定式の温度依存性と仰角依存性は無視できることを示している。しかしながら、気象学的な研究において、特に対流性の降水現象を研究する場合には、高仰角のスキャンを含む PPI スキャンや RHI 観測をおこなう場合がある。また、近い将来、偏波フェーズドアレイレーダが実用化されれば、電子的なビーム角度の制御が可能になるために、高仰角のスキャンモードも一般的になると考えられる。このような場合は温度とアンテナ仰角の影響を考慮する必要がある。

本研究では降雨強度推定式に加えて雨水量推定式も提案した。アンテナ仰角と温度を考慮した雨水量推定式は、定量的な鉛直積算雨水量 (Vertically Integrated Liquid Water Content : VIL) の計算に利用できる。従来の反射強度を用いた推定方法 (French *et al*, 1995 ; Boudevillain and Andrieu, 2003) が雨滴粒径分布の変動の影響を受けるのに対して、本研究で提案した偏波レーダパラメータを用いた雨水量推定式はその影響は小さく、従って精度良い VIL を推定することが可能である。今後、偏波レーダによる精度良い VIL の情報がシビアストームのナウキャストや降雹の指標として利用できるであろう。

付録 温度と観測仰角を考慮した雨水量推定式

降雨強度の推定式と同様な方法で次の4種類の雨水量の推定式の仰角依存性、温度依存性の議論が可能である。

$$M(Z_H) = a'_1(t, \theta) Z_H^{a'_2(t, \theta)} \quad (A1)$$

$$M(K_{DP}) = b'_1(t, \theta) K_{DP}^{b'_2(t, \theta)} \quad (A2)$$

$$M(K_{DP}, Z_{DR}) = c'_1(t, \theta) K_{DP}^{c'_2(t, \theta)} 10^{0.1c'_3(t, \theta) Z_{DR}} \quad (A3)$$

$$M(Z_H, Z_{DR}) = d'_1(t, \theta) Z_H^{d'_2(t, \theta)} 10^{0.1d'_3(t, \theta) Z_{DR}} \quad (A4)$$

温度と観測仰角を考慮した降水量推定式を表 A1 にまとめた。雨水量推定式の誤差に関して降雨強度の相対誤差と同様な議論が可能である (結果は省略)。

参考文献

- 1) Andsager K., Beard, K.V., and Laird N.F. (1999): Laboratory measurements of axis ratios for large drops. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 2673-2683.
- 2) Beard, K.V. and Chuang C. (1987): A new model for the equilibrium shape of raindrops. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1509-1524.
- 3) Boudevillain, B. and Andrieu H., (2003): Assessment of vertically integrated liquid (VIL) Water content radar measurement. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 807-819.
- 4) Bringi, V.N. and Chandrasekar V. (2001): *Polarimetric Doppler Weather Radar*. Cambridge Univ. Press, pp. 636.
- 5) Chandrasekar, V., Cooper W.A., and Bringi V.N. (1988): Axis ratios and oscillations of raindrops. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1323-1333.
- 6) French, M. Andrieu, N. H. and Krajewski., W.F. (1995): Uncertainty in vertically integrated liquid water content due to radar reflectivity observation error. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 404-409.
- 7) Joss, J. and Waldvogel A. (1967): Ein spektrograph für niederschlagstropfen mit automatischer auswertung. *Pure Appl. Geophys.*, **68**, 240-246. (in Germany)
- 8) Waterman, P.C. (1971): Symmetry, unitary, and geometry in electromagnetic scattering. *Phys. Rev. D*, **3**, 825-839.

(原稿受理 : 2009年1月19日)

表 A1 アンテナ仰角と温度を考慮した雨水量推定式.

Table A1 Four types of rainwater content estimators which consider temperature and antenna elevation angle.

雨水量推定式	係数と指数
$M(Z_H) = a'_1(t, \theta) Z_H^{a'_2(t, \theta)}$	$a'_1(t, \theta) = 3.49 \times 10^{-3} + 2.15 \times 10^{-5} t$ $a'_2(t, \theta) = 0.565 - 7.00 \times 10^{-4} t$
$M(K_{DP}) = b'_1(t, \theta) K_{DP}^{b'_2(t, \theta)}$	$b'_1(t, \theta) = 1.00 + 1.14 \times 10^{-3} \theta + 8.57 \times 10^{-5} \theta^2 + 4.33 \times 10^{-6} \theta^3 - 5.00 \times 10^{-4} t$ $b'_2(t, \theta) = 0.705 + 3.33 \times 10^{-4} t$
$M(K_{DP}, Z_{DR})$ $= c'_1(t, \theta) K_{DP}^{c'_2(t, \theta)} 10^{0.1c'_3(t, \theta) Z_{DR}}$	$c'_1(t, \theta) = 1.62 + 1.84 \times 10^{-3} \theta + 1.60 \times 10^{-4} \theta^2 + 8.08 \times 10^{-6} \theta^3 - 3.73 \times 10^{-3} t$ $c'_2(t, \theta) = 0.782$ $c'_3(t, \theta) = -1.73 - 3.91 \times 10^{-3} \theta - 9.86 \times 10^{-5} \theta^2 - 1.55 \times 10^{-5} \theta^3 + 9.83 \times 10^{-3} t$
$M(Z_H, Z_{DR})$ $= d'_1(t, \theta) Z_H^{d'_2(t, \theta)} 10^{0.1d'_3(t, \theta) Z_{DR}}$	$d'_1(t, \theta) = 1.75 \times 10^{-3} - 4.01 \times 10^{-7} \theta + 9.60 \times 10^{-8} \theta^2 - 7.37 \times 10^{-10} \theta^3 + 1.47 \times 10^{-7} t + 1.30 \times 10^{-7} t^2$ $d'_2(t, \theta) = 0.755 - 1.30 \times 10^{-4} \theta + 1.03 \times 10^{-3} t - 1.55 \times 10^{-5} t^2$ $d'_3(t, \theta) = -3.88 - 9.78 \times 10^{-3} \theta - 6.57 \times 10^{-5} \theta^2 - 3.74 \times 10^{-5} \theta^3 - 1.72 \times 10^{-2} t$

要旨

X バンド波長の偏波レーダについて、レーダアンテナ観測仰角と雨滴温度を考慮した降雨強度推定式を求めた。推定式は $R(Z_H)$ 、 $R(K_{DP})$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の 4 種類である。ここで、 R は降雨強度、 Z_H はレーダ反射因子、 K_{DP} は比偏波間位相差、 Z_{DR} は反射因子差である。誤差解析の結果によれば、推定式 $R(K_{DP})$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ は仰角依存性がある。 $R(Z_H)$ は仰角に依存しない。例えば、 40mmh^{-1} の降雨について、仰角 0° の場合の推定式を仰角 20° にも用いたとき、 $R(K_{DP})$ 、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ はそれぞれ 10%、7% の過小評価、 $R(Z_H, Z_{DR})$ は 20% の過大評価をもたらす。仰角 40° の場合には、 $R(K_{DP})$ 、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ はそれぞれ、60%、55% の過小評価、 $R(Z_H, Z_{DR})$ は 160% の過大評価となる。 $R(K_{DP})$ 、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の仰角依存性は仰角が 10° 程度までは無視できる。一方、温度依存性を考慮する必要がある推定式は $R(Z_H)$ と $R(Z_H, Z_{DR})$ である。 $R(K_{DP})$ 、 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ については明瞭な温度依存性はない。温度 15°C の推定式を他の温度に用いたとき、降雨強度にもよるが、 $R(Z_H)$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ はそれぞれ、最大で、約 10% の過小評価、約 9% の過大評価となる場合がある。降水強度と同様に雨水量についても、レーダアンテナ観測仰角と雨滴温度を考慮した推定式を求めた。

キーワード：偏波レーダ，QPE，偏波間位相差，反射因子差，散乱シミュレーション