

Xバンド偏波レーダーを用いた雨滴粒径分布と その時空間構造及び降水量の推定手法の開発

DEVELOPING SPACE-TIME STRUCTURE OF RAINDROP SIZE DISTRIBUTION
AND QPE METHOD FROM NEW DSD RETRIEVING METHOD USING X-BAND
POLARIMETRIC RADAR

山口弘誠¹・金原知穂²・中北英一³

Kosei YAMAGUCHI, Chiho KIMPARA and Eiichi NAKAKITA

¹正会員 工博 京都大学生存基盤科学研究ユニット (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²学生員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

In Japan, test operating of X-band polarimetric radar network started in July, 2010 by Ministry of Land, Infrastructure, Transportation and Tourism. Polarimetric radar has an advantage over conventional non-polarimetric systems because they measure some parameters related to raindrop shape. In this research, a retrieval method of raindrop size distribution (DSD) is developed to improve accuracy of rainfall estimation. The new developed DSD retrieving method was superior to previous method when heavy rainfall occurs. Then, the method was used to figure out the characteristics of DSD in a convective storm. After retrieving DSD parameters, rainfall estimation for non-polarimetric radar is directly estimated from the retrieved DSD parameters. Two methods are used, and both are evaluated using disdrometer, and it is shown that both are well estimated when compared with previous studies.

Key Words : *polarimetric radar, raindrop size distribution, specific differential phase, QPE*

1. 雨滴粒径分布推定の背景と本研究の目的

日本では毎年各地で洪水被害を伴う豪雨が発生している。近年では、都市化によるヒートアイランド現象や気候変動による集中豪雨の増加が懸念されている。洪水被害の軽減を目的とした河川管理のためには流域全体の正確な降水量の把握が重要となり、気象レーダーは面的に、かつ瞬時に降水量が推定できるという点で優れている。

本来、レーダー反射強度から降水強度を推定する理論式には雨滴粒径分布 (Raindrop size distribution; DSD) の情報が含まれているが、多くの現業用レーダーでは反射強度のみを観測しており、DSD 情報には統計的に与えられた定数が用いられているのが現状である。DSD は一雨中でも変化するため、リアルタイムで DSD を把握することは降水量推定精度の向上のために必要不可欠である。そこで、DSD 情報を得ることを一つの目的として偏波レーダーの開発が進められており、偏波レーダーによる観測パラメータ (偏波パラメータ) を用いた DSD 推定は重要な研究テーマの一つとなっている。

ところで、都市域の局地的な豪雨に対する観測を強化するため、国土交通省は 2010 年より X バンド MP レーダーネットワークを主な都市域に整備し、試験運用を開始している。この X バンド (3cm 波長帯) の偏波レーダーは空間解像度 250 m, 時間解像度 1 分 (地表付近のみ) という非常に高い時間・空間分解能を持ち、従来から用いられている C バンド (5 cm) レーダーでは捉えることのできなかった降水現象も詳細に観測できるようになっている。ここでの MP (マルチパラメータ) とは偏波機能のことであり、DSD 情報も同様の高い時間・空間分解能で推定できると期待されている。また、X バンド MP レーダーでは 5 分毎に 3 次元観測をしているため、まだ未解明なことが多い雨雲内の DSD の 3 次元構造を知ることができる。例えば、ゲリラ豪雨をもたらす雲の特徴を捉えたり、または大気モデルの雲物理過程にフィードバックすることができ、豪雨の予知・予測といった観点からも DSD 推定は意義深い。

そこで本研究は、豪雨災害の軽減に向けた降水量推定や予知・予測に資するために、X バンド偏波レーダーを用いた高空間・時間分解能の DSD 推定を目的とする。

2. 偏波レーダーによるDSD推定に関する既往研究

偏波レーダーで DSD を推定する原理は、簡単には次のように説明できる。大気中に落下する雨滴は粒径が大きいほど空気抵抗を受けて水平方向に扁平するため、偏波レーダーによって水平・垂直の2つの偏波を送受信することで得られるその両者の反射強度差を粒径分布と関連づけようとするものである。この反射強度差のことをレーダー反射因子差 Z_{DR} と言い、DSD 推定に関する既往研究（例えば、^{1),2),3),4),5)}）では Z_{DR} が用いられている。

雨滴の直径を D [mm] としたときの雨滴粒径分布 $N(D)$ は、式 (1) に示す修正ガンマ分布で近似できる。

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

さらに、単位体積中の含水量を示す雲水量 W [g/m³] と粒径分布の中央値 D_0 [mm] を取り入れて変形すると ¹⁾,

$$N(D) = N_w \frac{6}{3.67^4} \frac{(3.67 + \mu)^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)} \left(\frac{D}{D_0}\right)^\mu \exp\left(- (3.67 + \mu) \frac{D}{D_0}\right) \quad (2)$$

$$N_w = \frac{3.67^4}{\pi \rho_w} \left(\frac{W}{D_0}\right) \quad (3)$$

となる。ここで、 ρ_w は降水粒子の密度 [g/m³]、 Γ はガンマ関数である。多くの既往研究において、 N_w 、 μ 、 Λ 、 D_0 の4つの DSD パラメータのいずれか、または全てを推定しているが、 μ 、 Λ 、 D_0 は理論式 (4) で結ばれているため、実質的に未知のパラメータは3つである。

$$D_0 = \frac{\mu + 3.67}{\Lambda} \quad (4)$$

さて、偏波パラメータから DSD パラメータを推定する既往研究における DSD 推定の流れを簡単にまとめると、理論的もしくは経験的に得られた偏波パラメータと DSD パラメータの関係式を用いて、まず推定が比較的容易な DSD パラメータを推定し、さらに DSD パラメータ同士の関係式から他の DSD パラメータを推定していくことになる。ただし、これらの多くは主に D_0 と N_w のどちらか、あるいは両方のみの推定を主な目的としており、DSD パラメータ全てを推定する手法は少ない。

現在広く用いられている推定手法として、3つの DSD パラメータ全てを推定する以下の2手法、Constrained gamma method ⁴⁾（以後 CG 法とする）と β method ⁵⁾ が挙げられる。始めに、CG 法の概略を説明する。降雨減衰していないと仮定されている Z_{DR} と Z_{HH} から、以下の2式を用いて、 D_0 と W をそれぞれ求める。

$$D_0 = 0.5 + 1.5Z_{DR} - 0.4Z_{DR}^2 + 0.03Z_{DR}^3 \quad (5)$$

$$W = 10^{-2.9} Z_{HH} 10^{(-2.48Z_{DR} + 1.72Z_{DR}^2 - 0.5Z_{DR}^3 + 0.06Z_{DR}^4)} \quad (6)$$

また式 (3) より N_w が求まる。 μ と Λ は相関が高いこと

が判明しており ⁶⁾、式 (4) と次の経験式で Λ を推定する。

$$\Lambda = \gamma + \beta\mu + \alpha\mu^2 \quad (7)$$

ここで、 α 、 β 、 γ は D_0 のみに依存する定数である。この経験式を用いることで、本来3つの DSD パラメータを用いる修正ガンマ分布が2パラメータのモデルとなることが最大の特徴である。さらに、この手法について強調すべきことは、全ての DSD パラメータの推定に D_0 を用い、 D_0 の推定には降雨減衰していないと仮定された Z_{DR} のみが用いられていることである。

一方、 β method は Z_{HH} 、 Z_{DR} 、 K_{DP} と名前の由来となる雨滴の縦横比に対する変化率 β を用いて推定を行っている。CG 法と比較して、 β まで推定することで、より理論的に詳細な DSD 推定手法となっている。ただし、これらは S バンド (10 cm 波長帯) レーダー用に開発された手法である。両手法を X バンドレーダー用に修正して DSD 推定を行い、双方の推定精度を比較した結果、CG 法の精度が高いと報告されている ⁷⁾。そこで本研究では、修正 CG 法を DSD 推定の従来手法として扱う。

3. 位相差変化率 K_{DP} を用いた DSD 推定手法の開発

本章では従来手法の問題を整理し、従来手法では使われていない偏波パラメータの位相差変化率 K_{DP} に着目して、地上雨滴計を用いて K_{DP} と DSD パラメータとの関係性を導き、雨滴粒径分布の新しい推定手法を開発する。

(1) 従来手法による DSD 推定の問題点

従来手法として修正 CG 法を国土交通省 X バンド MP レーダーの一つである鷺峰山レーダーに適用し、地上雨滴計 (2DVD) によって直接雨滴を観測したデータと比較することで、従来手法の推定精度を調べる。2DVD を設置している京都大学防災研究所で強雨が観測された2010年7月14日00:26~00:59で検証した。ここで、X バンドレーダーでは、降雨が起因となる電磁波の吸収と散乱によって発生する降雨減衰が大きな問題であるため、本研究では Self-consistent 法 ¹⁾ と呼ばれる減衰補正手法を改良し、補正係数が同一方位角内でも可変となるように施した手法を用いて Z_{HH} と Z_{DR} を補正している。推定の結果、弱雨時には概ね精度が高い一方で、強雨時には極めて推定精度が低く、 Z_{DR} が負値のために推定値を求めることすらできない場合があることも分かった。さらに、2DVD のデータから偏波パラメータを逆推定して Z_{DR} の観測精度を検証したところ、2DVD から算出した Z_{DR} の変動幅が 0.2~1.4 [dB] であるのに対して RMSE が 0.38 [dB] と大きく、これは Z_{DR} が水平反射因子と垂直反射因子の比に関するパラメータであり、降雨減衰に起因するわずかな誤差が Z_{DR} に大きく影響するからである。一方で、位相差変化率 K_{DP} に関しては、 Z_{DR} が降雨減衰

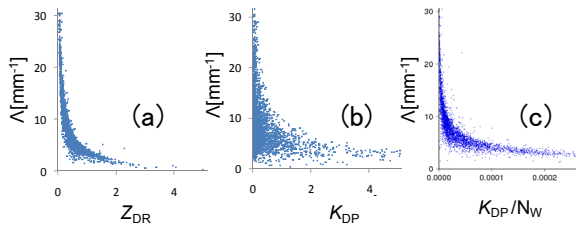


図-1 偏波パラメータとDSDパラメータの関係。
横軸はそれぞれ、(a) Z_{DR} , (b) K_{DP} , (c) K_{DP}/N_w , である。

により観測精度が低下していた強雨時にも高い観測精度であることがわかった。そこで、従来手法では主として使われたことのない K_{DP} を用いて DSD を推定していく。

(2) 位相差変化率 K_{DP} と DSD パラメータの関係性の構築

ここでは偏波パラメータと DSD パラメータの関係を経験的に導くことで、 K_{DP} を用いて DSD を推定できるかどうかの可能性を探る。ただし、偏波レーダーの観測値を用いず、2DVD のデータから逆推定した偏波パラメータを用いることでより精度の高い関係性を導く。

K_{DP} とそれぞれの DSD パラメータを散布図にして確認したところ (Λ については図-1 (b) に示す)、どの DSD パラメータも K_{DP} に対してばらつきが大きい。一方、 Z_{DR} と DSD パラメータを同様に調べたところ (図-1 (a))、どの DSD パラメータも K_{DP} の場合と比較してばらつきが小さく、 K_{DP} が今まで DSD 推定の中核に使われてこなかったことを理解できる。

Z_{DR} と K_{DP} はいずれも雨滴の軸比に関係するパラメータであるにも関わらず、 Z_{DR} が DSD パラメータとのばらつきが小さく、 K_{DP} でばらついている理由を物理的に解釈する。 Z_{DR} は雨滴の軸比に関するパラメータであり、数密度に依存しない。一方 K_{DP} は水平偏波と垂直偏波の位相の差を距離で微分したものであり、位相差は軸比の積算であるため、数密度に依存する。そこで、粒子の数密度が大きいほど高値をとる K_{DP} を、DSD パラメータの中で粒子の数密度と関連する N_w で除することにより Z_{DR} と同様に比を表すパラメータとなるよう工夫した結果が図-1 (c) である。 K_{DP}/N_w と DSD パラメータは、図-1 (a) の Z_{DR} と同程度のまとまりであることを明らかにした。すなわち、 K_{DP}/N_w という新たな変数を創出することで、 K_{DP} を中核にした DSD 推定の可能性を示した。

(3) 位相差変化率 K_{DP} を用いた DSD 推定手法の開発

上記までの考え方を基に開発した新手法を説明する。

a) D_0 の推定

K_{DP}/N_w が DSD 推定において非常に有効なパラメータであることを示したが、 N_w は DSD パラメータであり、推定開始時点では未定である。そのため、 D_0 の推定に限り偏波パラメータの中で数密度に最も関連の高い Z_{HH} を N_w の代わりに利用する。図-2 (a) に、2DVD のデータから逆推定した K_{DP} と Z_{HH} の散布図を D_0 ごとに分類

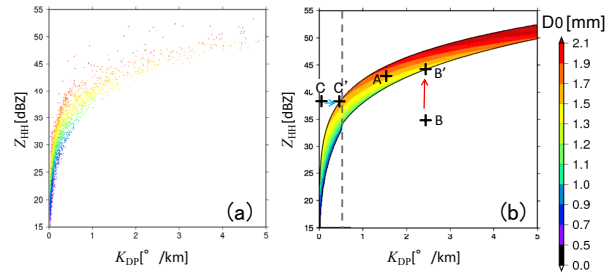


図-2 (a) K_{DP} , Z_{HH} , D_0 の関係。
(b) (K_{DP}, Z_{HH}) の組み合わせの補正手法。

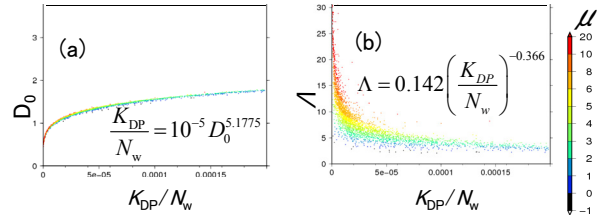


図-3 K_{DP}/N_w と DSD パラメータの関係。(a) D_0 , (b) Λ

したものを示す。 K_{DP} のみで D_0 を表現することは難しいが、 Z_{HH} を N_w の代わりとして付加することで、 D_0 が明瞭に分布していることが理解できる。ゆえに、偏波レーダー観測で得られる K_{DP} と Z_{HH} の組み合わせによって D_0 を推定する。まず、図-2 (a) の関係から、 K_{DP} と Z_{HH} の 3 次方程式を仮定して最小二乗法で近似して内挿すると同時に、 K_{DP} と Z_{HH} の値域の範囲を定め外挿はしないラインを定める (図-2 (b))。内挿された K_{DP} , Z_{HH} と D_0 の関係に、レーダーで観測された後に K_{DP} と Z_{HH} を代入することで D_0 の推定値を決定する (図-2 (b) の点 A)。しかしながら、現実に観測される K_{DP} と Z_{HH} の組み合わせは、ときおり値域の範囲外で観測されてしまう。一つ目のケースとして、降雨減衰が大きく起こるような強雨時 ($K_{DP} > 0.5$) において、図-2 (b) の点 B のように、 Z_{HH} を減衰補正しきれず過小評価してしまう場合である。この場合は、強雨時における K_{DP} の観測精度が正しいと仮定して、その K_{DP} に対して現実に取り得る Z_{HH} の下限値 (点 B') まで Z_{HH} を引き上げて補正する。二つ目のケースとして、弱雨時 ($K_{DP} \leq 0.5$) の場合である。 K_{DP} は弱雨時に観測誤差が大きいことが知られており、この場合は降雨減衰がほとんど起きていないと考え、 Z_{HH} の観測精度が正しいと仮定し、 K_{DP} がその Z_{HH} に対して取り得る範囲よりも小さいとき (点 C) は現実的に取り得る K_{DP} の下限値 (点 C') と置き換えて、反対に K_{DP} がその Z_{HH} に対して取り得る範囲より大きいときは上限値の K_{DP} と置き換える。これは、 K_{DP} の観測誤差特性を活かした巧妙な 2 次補正手法である。

b) N_w と Λ の推定

D_0 が推定できると、 K_{DP}/N_w と DSD パラメータの高い相関関係を、 Z_{HH} で代用することなく用いることができる。図-3 に K_{DP}/N_w と D_0 , K_{DP}/N_w と Λ それぞれの散布

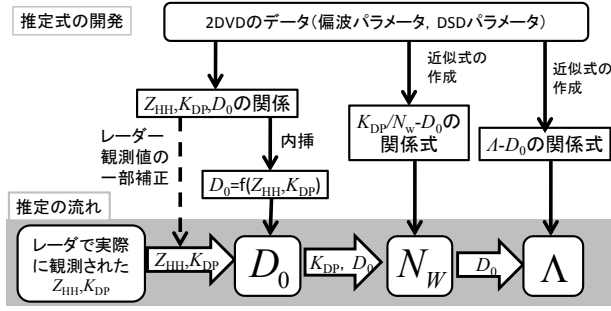


図-4 開発したDSD推定手法の流れ.

図, および, μ の変化を考慮しない場合の近似式を示す. 図-3 (a) の関係から N_w を決定し, 図-3 (b) の関係から Λ を決定する. 最後に, μ と Λ の経験的關係である式 (4) から μ を決定し, 以上により全ての DSD パラメータを推定することができる.

ところで, K_{DP}/N_w と D_0 , K_{DP}/N_w と Λ の関係は理論的にそれぞれ式 (8), 式 (9) の形で示すことができる.

$$\frac{K_{DP}}{N_w} = 0.062 \frac{180}{\lambda} \frac{10^{-6}}{3.67^4} C \left(\frac{4 + \mu}{3.67 + \mu} \right) D_0^5 \quad (8)$$

$$\frac{K_{DP}}{N_w} = 0.062 \frac{\lambda}{180} \pi \frac{10^{-6}}{3.67^4} C \left(\frac{(4 + \mu)(3.67 + \mu)^4}{\Lambda^5} \right) \quad (9)$$

ここで, λ [m] はレーダー波長, C はほぼ定常な定数である. 図-3 (a) の近似式と式 (8) を比較すると D_0 の次数がほぼ等しく, このことから 2DVD から経験的に導いた K_{DP}/N_w と D_0 の関係式が理論的見知からも妥当であると言える. 次数がわずかに合わないのは, μ の変動がわずかに影響するからである. 一方で, K_{DP}/N_w と Λ の関係式は, D_0 の場合よりも μ の変動が大きく影響するため, 今後は μ の変動を考慮に入れることで, さらなる推定精度向上が期待できる. 以上までに開発した DSD 推定手法の流れを図-4 に示し, 新手法をまとめる.

(4) 新手法の精度検証, および従来手法との併用アルゴリズムの構築

開発した DSD 推定の新手法を (1) 節で用いた事例に適用した推定結果を図-5 に示す. 00:41~00:47 の強雨時において, 従来手法では推定値を算出できない時間帯があったが, 新手法ではほとんどの時間帯で推定値を算出できていることが革新的である.

次に, 図-6 に 2010 年の 3 つの強雨イベントにおいて, 従来手法と新手法をそれぞれ精度評価したものを示す. ここでは両手法ともに推定値が存在する場合で, さらに, 強雨の時間帯に着目して精度評価するためレーダーの観測値が $K_{DP} > 0.5$ を抽出している. 相関係数で比較すると, 従来手法ではほぼ無相関であり強雨時の推定が困難であることがわかる. 一方, 新手法ではある程度の相関があることを見てとれる. 加えて, 降水強度別に見ると,

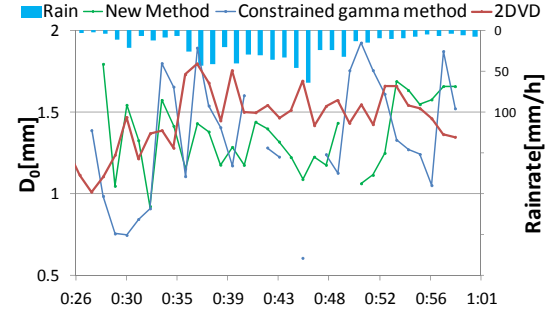


図-5 D_0 推定における新手法の精度評価.

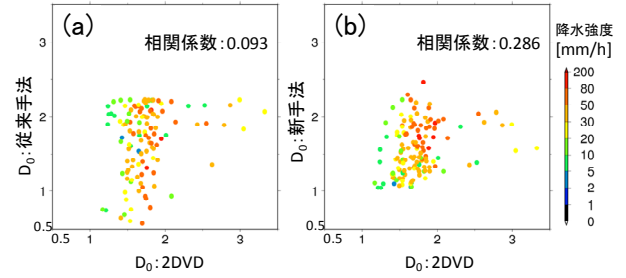


図-6 D_0 に関する推定精度評価. (a) 従来手法 (b) 新手法

新手法では降水強度が大きいほど推定精度が高いことがわかる. 一方, 従来手法では新手法と比べて過小評価している場合が多く, それらは降雨減衰に起因する Z_{DR} の観測誤差によるものである. したがって, 強雨時では新手法の推定精度が高いといえる.

ここまで強雨時の精度評価について述べたが, 弱雨時には従来手法の精度が高い結果が得られた. そこで, 強雨時 ($K_{DP} > 0.5$) では新手法を, 弱雨時 ($K_{DP} \leq 0.5$) では従来手法を切り替えて用いることで, 両手法の長所を生かしたアルゴリズムを本研究における最終的な DSD 推定アルゴリズムとし, 4 章と 5 章で応用研究を行う.

4. 積乱雲におけるDSD時空間構造の特徴

DSD 推定アルゴリズムを用いて, 豪雨災害を引き起こすような激しい対流を伴う積乱雲における DSD の時空間構造の特徴を調べる. 2010 年 7 月 7 日 12:31~12:59 にかけて京都府宇治田原町で発生・発達した積乱雲について, 南東方向に約 4km に位置している鷲峰山レーダーを用いて解析した. 対流性雲の発達に伴う DSD パラメータの時間変化を降水強度の変化や対流性雲の発達段階と対応させる. この事例では, 地上で観測され始めた時点から D_0 と N_w が高い値であった. また, その時の降水量も高かったため, 降り始めから大粒の強い雨が降っていたことがわかる. その後積乱雲の発達段階では雨域が風で北東方向へ流されており (図-7 の矢印), DSD の傾向を見ると風下側が小さい雨滴が多く観測されたのち D_0 , N_w ともに大きくなり, 同時に非常に強い雨が観測された. この時おそらく, 小さい雨滴が多数

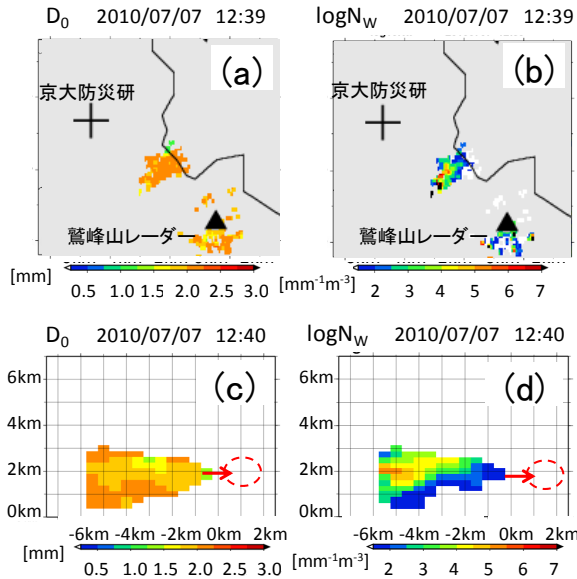


図-7 (a), (b) 積乱雲発達期での DSD パラメータの水平分布。
(c), (d) 積乱雲発達期での DSD パラメータの鉛直分布。

風に流されたのち、風に流されにくい大きな粒子や、落下しながら併合した粒子が観測されたものと思われる。

今後統計サンプルの数を増やしていくことで、対流性雲における詳細な DSD パラメータの特徴を捉えていきたい。ゲリラ豪雨災害をもたらすような積乱雲の特徴を大気上空でいち早く捉えることでゲリラ豪雨に対する危険度の察知へとつなげることも可能だと考える。

5. 非偏波レーダーによる降水量推定精度の向上

次世代レーダーの一つとして近い将来に日本で導入が予定されている 3 次元観測用フェーズドアレイレーダーでは、現状のレーダーと比較して数十分の一という時間間隔での超高速スキャンが可能で、加えて鉛直方向には従来よりも高い解像度のスキャンが可能である。ただし、偏波観測機能を備えていないためレーダー反射強度のみの観測となり、降水強度へ変換して利用するために、同じ観測領域を持つ偏波レーダーを用いて DSD 情報を補うことができれば、高精度かつ高頻度な降水強度の 3 次元分布が明らかになると期待できる。そこで、フェーズドアレイレーダーによる高速スキャンにより Z_{HH} が得られたと想定して、偏波レーダーから推定される DSD 情報を直接的に降水量推定へ利用する方法を提案する。

(1) DSD情報を直接的に利用した降水量推定手法の開発

非偏波レーダーによる降水量推定において、一般的には後述する式 (10) を基とし、 $Z_{HH} = BR^\beta$ で示される Z_{HH} - R 関係を用いて、 B と β を気候学的な定数として扱い、非偏波レーダーで観測されるレーダー反射因子 Z_{HH} を与えて R を推定する。偏波レーダーによる降水量推定

では、 Z_{HH} の代わりに K_{DP} や Z_{DR} を用いることで、 B と β に含まれる DSD 情報を間接的に補って R を推定するが、ここでは本章冒頭で述べた背景から、DSD 情報から B と β を算出し B と β を時間・空間的に陽に変化させることで高精度な降水量推定を行う。以下に、理論式による方法と半経験則による手法の 2 方法を構築する。

a) 理論式による方法（以下、R-N(D) 法とする）

理論的に導かれた Z_{HH} と R の関係は次式となる¹⁾。

$$\frac{Z_{HH}}{N_w} = \frac{F_Z(\mu)}{[F_R(\mu)]^{7/4.67}} \left(\frac{R}{N_w} \right)^{7/4.67} \quad (10)$$

ここで、 F_Z 、 F_R は、 μ によって一意的に求まる関数である。すなわち R は、 Z_{HH} 、 μ 、 N_w のみの関数である。偏波レーダーから推定される μ と N_w に、フェーズドアレイレーダーで観測される Z_{HH} を与えて R を推定する。

b) 経験則による方法（以下、R- D_0 法とする）

3 章で開発した DSD 推定アルゴリズムでは、 D_0 を始めに推定し、その他の DSD パラメータ推定には D_0 の推定精度が影響してしまうため、 D_0 を用いた降水量推定手法を開発する。2DVD のデータを用いて事前検討を重ねた結果、 R と Z_{HH} の関係は D_0 の値に応じて分布範囲が完全に異なり、同様に N_w の値に応じて分布範囲が (D_0 による分布とは違う形で) 完全に異なることが分かった。この関係性を利用して、 N_w と R/Z_{HH} の関係を D_0 に応じて分類した結果を図-8 に示す。ここで D_0 を 6 クラスに分け、その範囲毎に N_w と R/Z_{HH} の関係を線形近似し、偏波レーダーから推定される D_0 に応じて 6 つある N_w と R/Z_{HH} の関係式のうちの式を用いるか決定する。その式に D_0 と同様に推定された N_w とフェーズドアレイレーダーで観測される Z_{HH} を与えて R を推定する。この開発した手法では、 R/Z_{HH} を縦軸にとることで、複数の線形式で近似できるように工夫をしている。

(2) 精度検証

偏波レーダーとして鷲峰山レーダーを用いて 3 章で開発した推定アルゴリズムから DSD を推定し、また、3 次元観測用フェーズドアレイレーダーは現在開発中のため、ここでは偏波レーダーで観測される Z_{HH} を非偏波レーダーで観測されたものと想定し、3 章と同事例を対象として精度検証を行う。R-N(D)法、R- D_0 法、現業用の固定された (B, β) を用いて推定された降水強度、および 2DVD で観測された地上降水強度をそれぞれ図-9 に示す。R-N(D)法と R- D_0 法のいずれにおいても良い推定精度を確認でき、特に強雨時において現業用の (B, β) を用いた手法よりも大きく推定精度が高いことが示された。さて、R-N(D)法と R- D_0 法の違いについて言及すると、まず、R-N(D)法は理論式から導いているため R-N(D)法の推定誤差は DSD パラメータ推定の誤差と考えることができる。その R-N(D)法よりも R- D_0 法の方が高い精度を示す時間帯については、R- D_0 法では D_0 の値に応じて

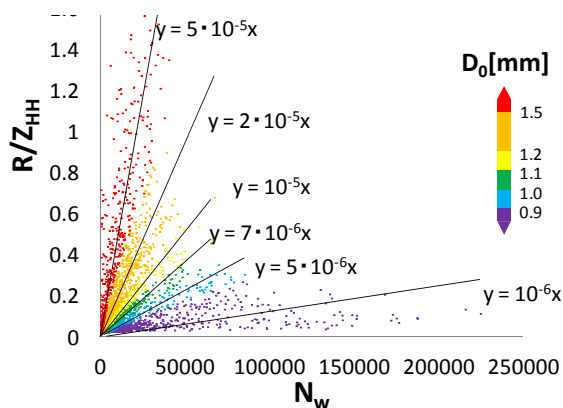


図-8 R/Z_{HH} と N_w の関係と D_0 で分類したときの近似式.

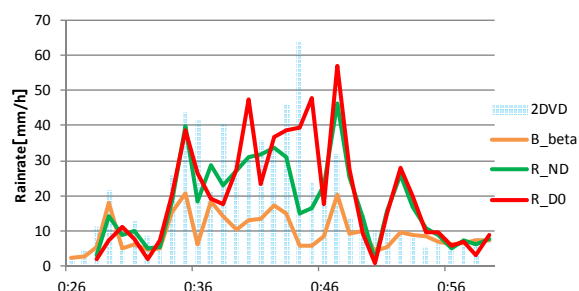


図-9 DSD パラメータを用いた降水量推定精度の検証.

$R/Z_{HH}-N_w$ の関係をクラス分けしたために N_w の推定誤差が適度に相殺されるように隠れて、降水量推定に良い結果に働きかけたと考える。一方、観測値の降水強度のピークが推定できないことと、0:52 頃に過大に推定している問題点については、3 つの DSD パラメータのバランスが良くないことが一つの原因だと考えられる。従来手法と新手法で D_0 から推定し、その後他のパラメータを推定しているが、それぞれの DSD パラメータは相互に依存しているため、 D_0 の誤差が大きく影響すると考えられる。加えて、過小評価している理由には Z_{HH} が降雨減衰によって小さくなっていることも考えられる。

将来の検討事項としてフェーズドアレイレーダーの高速スキャンを想定した場合、降水強度推定のために与える DSD 情報も同じ時間解像度が必要であり、DSD の時間発展モデルを導入して解決する。また、フェーズドアレイレーダーはビームの解像度が異なっているため、DSD パラメータの時間・空間相関を考慮した解析を行う。

6. 結論

雨滴粒径分布推定はレーダー水文学上の大きな目標であり、降水量推定や雲物理過程の理解などその工学的価値は極めて高い。本研究では強雨時における高空間・時間分解能の DSD 推定を目的として、X バンド偏波レーダーおよび地上雨滴計を用いることで以下の成果を得た。

従来の DSD 推定手法の問題点を踏まえた上で、強雨時

でも観測誤差が小さい偏波パラメータである K_{DP} を用いた DSD 推定手法の開発に挑戦的に取り組んだ。 K_{DP}/N_w と DSD パラメータの関係を整理することで、新しい DSD 推定手法を開発し、精度検証を行った結果、従来手法と比較して強雨時には新手法の精度が高いことを明らかにした。また、従来手法と新手法で互いの精度の高い領域を併用した DSD 推定アルゴリズムを構築した。

構築したアルゴリズムを用いて DSD の時空間構造の推定を行ったところ、対流性雲の発達過程において DSD パラメータの特徴の傾向が見えてきた。その結果、ゲリラ豪雨をもたらすような積乱雲の DSD の特徴を早期に探知する可能性を提示した。

超高速スキャンが可能な次世代型レーダーを視野に入れ、DSD 情報を直接利用した降水量推定手法を開発し、高精度に降水強度を推定できることを明らかにした。

謝辞：X バンド MP レーダの観測情報は、国土交通省水管理・国土保全局の研究コンソーシアム活動の一環として提供して頂きました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) V. N. Bringi and V. Chandrasekar.: *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*, Cambridge University Press, 636pp, 2005.
- 2) Testud, J., Bouar, E.L., Oblis, E., and Ali-Mehenni, M.: The Rain Profiling Algorithm Applied to Polarimetric Weather Radar, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 17, pp. 332-356, 2000.
- 3) Park, S.-G., Maki, M., Iwanami, K., Bringi V. N., and Chandrasekar, V.: Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II: evaluation and application, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 22, pp. 1633-1655. 2005.
- 4) Brandes, E. A., Zhang, G., and Vivekanandan, J.: Drop size distribution retrieval with polarimetric radar: Model and application, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 43, No. 3, pp. 461-475, 2004.
- 5) Gorgucci, E., Chandrasekar, V., Bringi, V. N., and Scarchilli, G.: Estimation of Raindrop Size Distribution Parameters from Polarimetric Radar Measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 59, pp. 2373-2384. 2002.
- 6) Zhang, G., Vivekanandan, J., and Brandes, E.: A Method for Estimating Rain Rate and Drop Size Distribution from Polarimetric Radar Measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No.4, pp. 830-841, 2001.
- 7) Anagnostou, M. N., Anagnostou, E. N., Vivekanandan, J., and Ogden, F. : Comparison of Two Raindrop Size Distribution Retrieval Algorithms for X-Band Dual Polarization Observations, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 9, pp. 589-600, 2008.

(2011. 9. 30 受付)