

Z-R関係のグローバルな推定に向けた 二周波降水リトリバル手法の改良

IMPROVEMENT OF THE DUAL-FREQUENCY PRECIPITATION RETRIEVAL METHOD FOR A GLOBAL ESTIMATION OF THE Z-R RELATIONSHIP

瀬戸心太¹・井口俊夫²
Shinta SETO and Toshio IGUCHI

¹正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

²非会員 Ph.D (独)情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

The Z-R relationship ($Z=aR^b$) between radar reflectivity factor Z and precipitation rate R has been used for operational radar measurements, but its coefficients (a, b) are known to be highly variable in time and space and also dependent on precipitation types. The Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) is expected to instantaneously estimate the 2-moment drop size distribution (DSD) function and to finally derive global maps of (a, b). For this big goal, it is necessary to improve the accuracy of the instantaneous dual-frequency retrieval method. In this study, Mardiana's method (MA04) is tested with a simulated DPR measurement dataset, and it is found that MA04 has negative bias which corresponds to 40% of the true precipitation rate. While the true equivalent radar reflectivity factor Z_e does not change largely along the range, the estimates of Z_e by MA04 tend to be smaller at lower range bins. MA04 is modified into three new methods. In the best method, the bias is limited to 18% of the truth.

Key Words : dual-frequency precipitation radar(DPR), drop size distribution, Z-R relationship

1. はじめに

降水レーダの観測により得られるレーダ反射因子 Z と、降水強度 R の間には $Z=aR^b$ といったべき乗則が仮定される¹⁾。ここに a および b は、粒径分布に依存するパラメータであり、降水タイプ、海陸などにより異なり、地理的・季節的に大きく変動することが指摘されている²⁾。

世界で初めて人工衛星に搭載された降水レーダ(PR)から、13.8GHzにおける観測レーダ反射因子 Z_m が得られる。 Z_m は、Mie散乱効果および降水による減衰を含んでいる。PRに適用される標準アルゴリズム³⁾は、 Z_m を減衰補正して等価レーダ反射因子 Z_e を得る、 Z_e を R に変換するという2段階からなる。前者には k - Z_e 関係($k=aZ_e^b$)、後者には R - Z_e 関係($R=a'Z_e^{b'}$)が用いられる。基準となるパラメータ(α, β, a', b')は熱帯域における雨滴計の観測から抽出した代表的なZ-R関係をもとに、周波数の違い等を考慮して作成されている⁴⁾。降水タイプ(層状・対流分類)により値が異なるが、その他の変動は考慮されていない。

PRの後継センサと予定される二周波降水レーダ(DPR)は、13.6GHz(Ku帯)と35.5GHz(Ka帯)の二周波で観測する。スキャン(幅約250km)の中央部(幅約120km)においては、

二周波のビームを一致させて観測を行う。この二周波観測の利点として、「粒径分布を推定できること」が期待されている⁵⁾。しかし、これは正確な表現ではない。粒径分布は、無限の自由度を持つ関数であるから、2つの観測量からこれを推定することは不可能である。粒径分布関数 $N(D)$ を、例えば式(1)のガンマ分布関数のように、2パラメータ(N_0, D_0)の関数で表現されると仮定すると、粒径分布の推定が可能となる。 D は粒径(mm)である。

$$N(D) = N_0 D^3 \exp[-(3.67 + 3)D / D_0]. \quad (1)$$

PRにおいても、式(1)を仮定しているが、観測量が1つしかないため、 k - Z_e 関係が拘束条件として必要となる。一方、DPRでは原則としてこの拘束条件はなくとも2パラメータを同時に推定できる。したがって、推定結果から、 k - Z_e 関係、さらにZ-R関係を構築することも可能となり、Z-R関係の時空間変動や降水特性による違いを全球において表現することも期待できる。

ただし、一周波観測のPRにおいても、表面参照法を用いることができる場合には、パラメータ ϵ により、 k - Z_e 関係を $k=\epsilon a Z_e^b$ と修正することが可能である。Kozu et al.⁶⁾は、10年分のPRのプロダクトをもとに、 ϵ およびZ-R関係の季節変化・地域分布を示している。しかし、一周波

では ϵ が鉛直一定であるという制約があり、表面参照法の精度の限界もある。二周波観測では、 ϵ をレンジビンごとに推定できるため、より高精度な結果が期待できる。

そのためには、DPRの観測から如何に粒径分布パラメータを精度よく推定するかが重要である。本論文では、既存の推定手法の精度検証およびその改良を目的とする。推定の原理を2節に示す。次に、既往の推定手法⁷⁾をDPR模擬観測データに適用して精度評価を行う(3節)。さらに、改良法を提案し(4節)、精度評価を行う(5節)。

2. 二周波リトリバルの原理

(1) 設定

図-1のように、二周波レーダが鉛直下向きに観測している状況を考える。レーダからの距離を $r(\text{km})$ で表わす。厚さ $L(\text{km})$ の N 個のレンジビンに、粒径分布が式(1)に従う液体降水が存在すると設定する。上からレンジビン1,..., N と呼び、レンジビン i の上端は $r=r_{i-1}$ 、下端は $r=r_i$ とする。レンジビン N の下端($r=r_N$)は地表面と一致する。

粒径分布が式(1)で表わされる場合、 Z_e および減衰係数 k は、 N_0 および D_0 の関数として以下のように表現される。

$$\text{dBZ}_e(N_0, D_0) \equiv 10 \log_{10} Z_e(N_0, D_0) = 10 \log_{10} N_0 + F(D_0), \quad (2)$$

$$k(N_0, D_0) = N_0 \times G(D_0), \quad (3)$$

ただし、 F および G は D_0 の関数でありMie散乱理論に従う。

レンジビン i において、観測される Z_m は、次のように表現される。ただし、 $[Y]_i$ は Y のレンジビン i における値であることを意味する。

$$[\text{dBZ}_m]_i \equiv [10 \log_{10} Z_m]_i = [\text{dBZ}_e]_i - \text{dBA}(r_{i-1}) - c \times 2 \times [k]_i \times L, \quad (4)$$

 $\text{dBA}(r)$ は、レーダと距離 r の間で生じる減衰量を表わす。 $\text{dBA}(r_{i-1})$ はレンジビン1から $(i-1)$ による減衰である。右辺第3項は、レンジビン i の降水粒子により生じる減衰を表わす。パラメータ c は、理論的には $0 < c < 1$ であるが、簡便のため $c=1$ とされることが多い⁷⁾。本研究でもそれに従う。

(2) リトリバル

二周波で観測された $[\text{dBZ}_m]_i (i=1, \dots, N)$ から、各レンジビンにおける (N_0, D_0) をリトリバルする。表面参照法を用いることができない場合、上(レンジビン1)から順に解く。これを前進法と呼ぶ。表面参照法により積算減衰量PIA($\equiv \text{dBA}(r_N)$)の推定値が得られる場合には、下(レンジビン N)から順に解くことが可能である⁸⁾。これを後退法と呼ぶ。前進法と後退法の解は一般に異なる。

Mardiana et al⁷⁾が開発した繰り返し後退法は、PIAを任意に仮定して後退法でリトリバルを行い、 $\text{dBA}(r_0)=0$ の条件をみたままで、PIAの仮定を修正する手法である。この方法は、 dBA を降水上端($r=r_0$)で拘束することから、本質的に前進法と同等である。

前進法でレンジビン i を対象とするとき、レンジビン $(i-1)$ までの粒径分布が既知であるから、 $\text{dBA}(r_{i-1})$ も既知である。式(4)の両辺に $\text{dBA}(r_{i-1})$ を加えた式(5)において、左

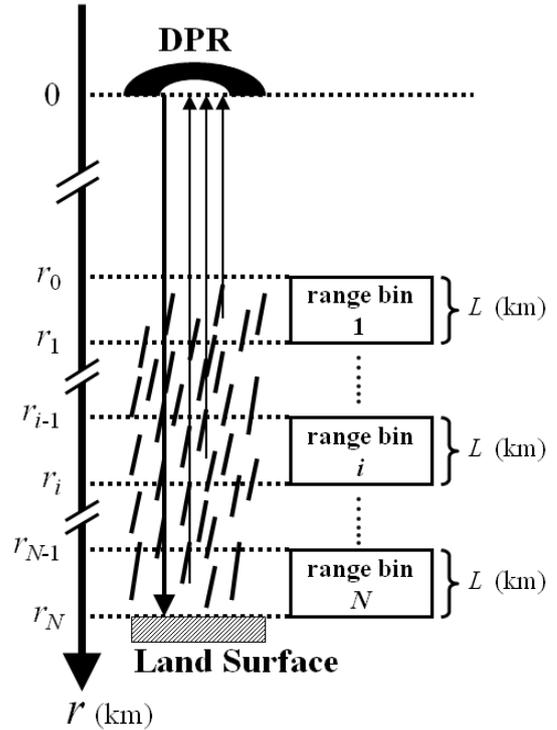


図-1 レーダ観測のレンジビンの設定。

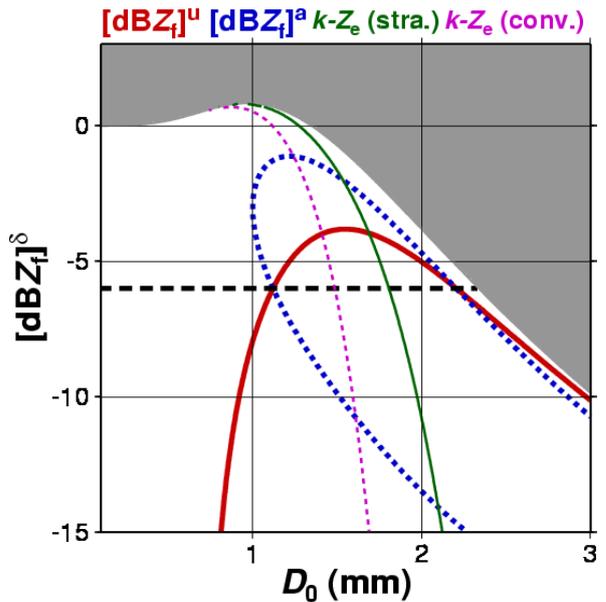


図-2 二周波および一周波リトリバルの説明。

辺は既知となる。その値を、 $[\text{dBZ}_i]_i$ とする。

$$([\text{dBZ}_i]_i \equiv [\text{dBZ}_m]_i + \text{dBA}(r_{i-1}) = [\text{dBZ}_e]_i - c \times 2 \times [k]_i \times L. \quad (5)$$

(N_0, D_0) 平面において、既知である $[\text{dBZ}_i]_i^u$ 、 $[\text{dBZ}_i]_i^a$ (肩付きのuはKu帯の値、aはKa帯の値を示す)のコンターを書けば、その交点から解のパラメータの値が得られる。

図-2は、横軸に D_0 、縦軸に $[\text{dBZ}_i]_i^\delta (\equiv [\text{dBZ}_i]_i^a - [\text{dBZ}_i]_i^u)$ を取っている。 $(D_0, [\text{dBZ}_i]_i^\delta)$ に対して式(2),(3),(5)から N_0 が求まるから、この図は (N_0, D_0) 平面と対応する(ただし、グレーの部分は N_0 が負となるので除く)。例えば、

$[dBZ]_i^a=42dB$, $[dBZ]_i^a=36dB$ であるとき、2本のコンター(太実線と太点線)の交点が解となるが、交点(解)が2個存在している。なお、太点線の代わりに、 $[dBZ]_i^a=6dB$ の横線(太破線)で考えてもよい。一般に、二周波リトリバルの前進法には、レンジビンごとに2つの解が存在する(詳細は別の論文^{9),10)}に示す)。

(3) 一周波法との対比・誤差要因

PRで層状性(対流性)に対して使われる $k-Z_e$ 関係を図-2に細実線(細点線)で示す。一周波法では、降水タイプに応じて、太実線と細実線(細点線)の交点が解となる。少なくともこの例では、交点は各1個である。一般にも、Hitschfeld-Bordan¹¹⁾の解析解から、解は1個とみられる。

一周波法における $k-Z_e$ 関係と、二周波法における $[dBZ]_i^a$ は同じ役割を果たしていることが分かる。序論で述べたように $Z-R$ 関係は大きく変動するから、 $k-Z_e$ 関係も大きく変動し、その誤差は無視できないと考えられる。

図-2の例でも、対流・層状判別が違えば解は異なる。一方、二周波法における $[dBZ]_i^a$ には、 $[dBZ_m]^a$ の観測誤差と、Ka帯の $dBA(r_{0i})$ の誤差すなわち上方のレンジビンによる推定誤差を含むため、その信頼度は検証の余地がある。さらに、二周波法では解が2個存在する。以下では、 $[dBZ_m]^a$ の観測誤差については無視して、残りの誤差要因のリトリバルに与える影響を考察する。

3. 繰り返し後退法の精度

前述のMardiana et al.⁷⁾による繰り返し後退法(以下、MA04とする)を既往の手法の代表として、その精度を検証する。MA04は本質的には前進法と同じ解を持つが、以下の手順により、前進法における複数解のうち1つの解を自動的に選択する。前進法を直接適用するのに比べて、複数解に対応した分岐が必要ないことが利点である。既往研究^{12),13)}は、MA04を単純な降水について適用し、強い雨に対して過小評価することを指摘している。

(1) MA04の手順

MA04の手順は、以下のようになる。

- PIAを仮定する。最初は、第一推定値として、二周波ともに0dBとする。
- 後退法により、リトリバルする。
- リトリバルした粒径分布からPIAを計算する。
- 仮定したPIAと計算したPIAが一致すれば、そのとき得られた粒径分布を解として終了する。一致しなければ、c)で計算したPIAを仮定して、b)以降を繰り返す。ただし、本研究では、繰り返し回数の上限を100回とする。

(2) DPRの模擬観測データ

MA04の精度を検証するために、PRによる推定結果(標準プロダクト2A25, Version6)を真値とみなして、DPRの模擬観測データを作成した。以下に手順を示す。

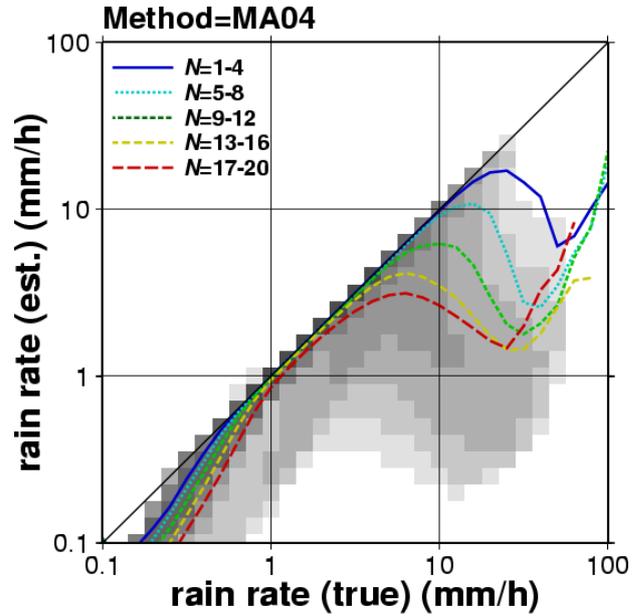


図-3 MA04をDPR模擬観測データに適用した結果。

- 降水のあるピクセルの、液体降水を含むレンジビンを抽出する。ただし、ノイズと判別できないレンジビンがある場合、それより下のレンジビンとあわせて除外する。図-1に習ってレンジビンを名づける。
- プロダクトから13.8GHzの Z_e および k を読み取り、式(2),(3)より導かれる式(6)により、 k/Z_e から D_0 を求める。なお、式(6)の右辺は単調減少であるため、 D_0 は一意に求まる。さらに、式(2)から N_0 を求める。

$$k/Z_e = G(D_0)/10^{F(D_0)/10} \quad (6)$$

- (N_0, D_0)から、DPRの2周波の $[dBZ_e]$, $[k]$ を計算する。
 - 降水強度を計算する。ただし、落下速度 $v(D)$ (m/s)を以下の式で与える。
- $$v(D)=4.854 \times D \times \exp(-0.195D) \quad (7)$$
- 式(4)により、 $[dBZ_m]$ を計算する。レンジビン1より上($r < r_0$)の固体降水等による減衰は無視する。
 - $[dBZ_m]$ が12dBより低くなる場合、実観測ではノイズと判別が困難なため、それより下のレンジビンを含めて除外する。残ったピクセルの数を N とする。

(3) 結果

2001年7月の1カ月分のPR(全490軌道)による推定結果をもとにしたDPRの模擬観測データに対して、MA04を適用した。その結果得られたレンジビン N の降水強度の推定値を、模擬観測データから直接計算されたレンジビン N の降水強度を真値として評価した結果を図-3に示す。

図-3の横軸に真値、縦軸に推定値を、それぞれ対数軸でとる。背景の濃淡は、2次元ヒストグラムであり、1dB \times 1dBグリッドに該当する数が多いほど濃い色で示す。また、各線は真値1dB \times 1dBグリッド毎の推定値の平均値を示す。ただし、レンジビンの数 N により分類している。2次元ヒストグラムから、推定値は真値とほぼ一致す

るか、低くなるかであり、推定値が真値より高くなることはほとんどないことが確認できる。MA04は、PIA=0dBから探索を始めるため、一番降水強度の弱い解を選択しやすいからである。また、 $N=1\sim 4$ の場合には、真値が $1\sim 10\text{mm/h}$ の範囲で、推定値の平均値はほぼ真値と一致している。しかし、 N が大きい場合は、同じ真値の範囲でも、推定値に過小評価がみられる。全体で見ると、真値の平均が 2.95mm/h であるのに対して、推定値の平均は 1.78mm/h であり、バイアスは -1.17mm/h (真値の平均の約40%に相当)と深刻である。

4. 繰り返し後退法の改良

MA04が降水強度を過小評価する場合の例として、あるピクセル(軌道番号20700, スキャン番号6443, アングルビン番号6)におけるKa帯の $\text{dBA}(r)$ および $[\text{dBZ}_e]$ の鉛直プロファイルを推定値と真値について比較する(図-4)。

図-4(a)に示すように、真値(点線)では $\text{dBA}(r)$ がほぼ直線であり、すなわち k が鉛直方向にほぼ一定であることを示している。推定値(実線)は、上方の4レンジビン程度までは、真値とよく一致するが、下方に行くほど k が弱くなっている。同様のことは図-4(b)から $[\text{dBZ}_e]$ についても確認できる。真値は鉛直一定に近いと言えるが、推定値は下方に行くほど弱くなっており明らかに不自然である。

- I) 真値の k , $[\text{dBZ}_e]$ が鉛直方向に一定に近い傾向を示すのに対して、推定値の k , $[\text{dBZ}_e]$ は下方に行くほど不自然に弱くなる傾向がみられる。
- II) ただし、上端から数レンジビンでは、真値と推定値はよく一致する。

この傾向は、過小評価を起こしている他のピクセルについても確認できる(図略)。そこで、この2つの特徴をふまえて、MA04の改良法を以下に3種類提案する。

(1) SK法

特徴のII)からレンジビンの数が少なければ、正しい解を得られることが期待できるから、以下の手順をとる。

- a) 一番上のレンジビンのみを対象として、MA04の方法を実行する。つまり、レンジビン1のすぐ下に地表面があると想定する。 $\text{dBA}(r_1)$ がPIAに相当する。
- b) 次に、レンジビンを1つ増やして、MA04の方法を実行する。PIAに相当するものは $\text{dBA}(r_2)$ である。その際に、a)で得られた $\text{dBA}(r_1)$ を2倍した値を $\text{dBA}(r_2)$ の第一推定値として使う。特徴のI)から、 k がレンジビン1と2の間で一定であることを仮定している。ただし、MA04による推定結果がそれに従うとは限らない。
- c) 以下、レンジビンの数を1つずつ増やしながらか、MA04を実行する。レンジビン i までを対象とする場合、 $\text{dBA}(r_i)$ の第一推定値は、 $\text{dBA}(r_{i-1}) \times i/(i-1)$ と与えられる。(図-5を参照)

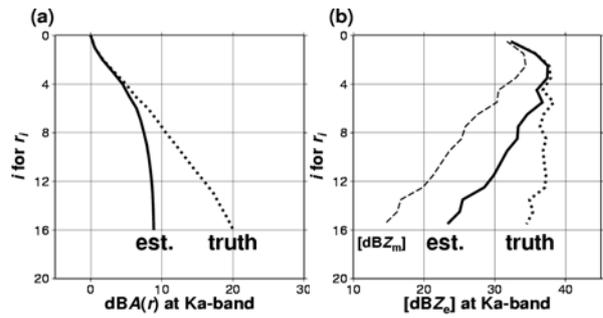


図-4 Ka帯の(a) $\text{dBA}(r)$ および(b) $[\text{dBZ}_e]$ の鉛直プロファイル。参考までに、(b)には $[\text{dBZ}_m]$ も示す。

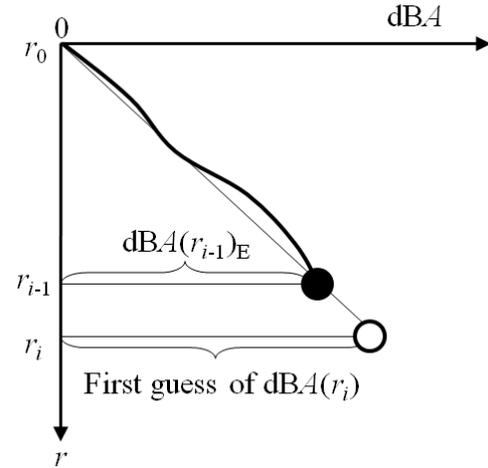


図-5 SK法による第一推定値の作成方法。

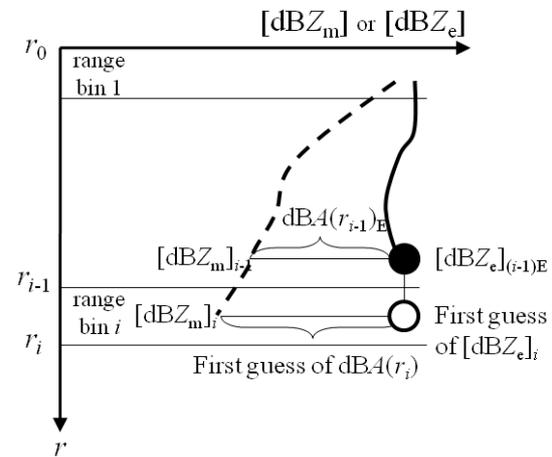


図-6 SZ法による第一推定値の作成方法。

- d) 最終的に、 N 個のレンジビンを対象としてMA04の方法を実行して解を得る。

この方法は、段階的な繰り返し後退法であり、 k が鉛直一定であることを仮定するから、a stepwise method with constant- k assumption, 略してSK法と呼ぶ。

(2) SZ法

次に、別の改良法として、a stepwise method with constant- Z_e assumption, 略してSZ法を紹介する。SK法と同様に段階的にレンジビンの数を増やしながらかMA04を実行するが、 $\text{dBA}(r_i)$ の第一推定値の与え方が異なる。レ

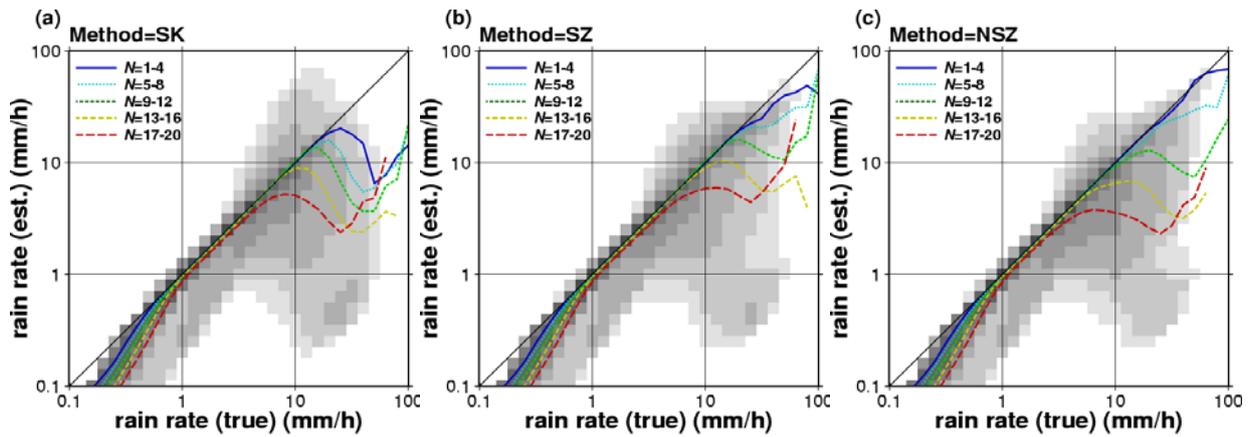


図-7 改良法をDPR模擬観測データに適用した結果. (a)SK法, (b)SZ法, (c)NSZ法.

レンジビン*i*までを対象とする場合、 Z_e がレンジビン*i*と(*i*-1)の間である、すなわち、 $[dBZ_e]_i = [dBZ_e]_{i-1}$ と仮定する。このとき、次式が導かれる。

$$\begin{aligned} dBA(r_i) &= [dBZ_e]_i - [dBZ_m]_i = [dBZ_e]_{i-1} - [dBZ_m]_i \\ &= [dBZ_m]_{i-1} - [dBZ_m]_i + dBA(r_{i-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

この右辺は既知であるから、 $dBA(r_i)$ の第一推定値として用いることができる。(図-6を参照)

(3) NSZ法

最後に3つ目の改良法として、a non-stepwise method with constant- Z_e assumption, 略してNSZ法を紹介する。前述の2つの改良法は、段階的に行うため、MA04に比べて計算量が多くなることが予想される。そこで、NSZ法は、最初から*N*個のレンジビンを対象とするが、 $[dBZ_e]$ の鉛直分布についての仮定も盛り込む。レンジビン1とレンジビン*N*の間で、 $[dBZ_e]$ が等しいとすると、以下のような導出ができる。

$$\begin{aligned} dBA(r_N) &= [dBZ_e]_N - [dBZ_m]_N = [dBZ_e]_1 - [dBZ_m]_N \\ &= [dBZ_m]_1 - [dBZ_m]_N + dBA(r_1) \end{aligned} \quad (9)$$

さらに、 $[k]$ が鉛直一定であること、 $dBA(r_N) = N \times dBA(r_1)$ を仮定すると、 $dBA(r_N)$ の第一推定値が得られる。

$$dBA(r_N) = \{[dBZ_m]_1 - [dBZ_m]_N\} \times N / (N-1) \quad (10)$$

以上の3つの手法およびMA04は、いずれも最終的には*N*個のレンジビンに対して繰り返し後退法を行うことで、解を決定する。手法間の違いは、その際のPIAの第一推定値の違いに帰着する。言い換えると、SK法、SZ法による最初の(*N*-1)回のMA04の実行は、PIAの第一推定値を得るための準備である。

ところで、Rose and Chandrasekar¹⁴⁾は、 D_0 などの粒径分布パラメータが、レンジビンに対して線形に変化するという条件を入れた改良法(RC06)を提案している。RC06は鉛直分布に関する条件を用いるという点で本研究の改良法と共通する。ただし、本研究の改良法は鉛直分布に対する仮定は第一推定値のためであり最終推定値を拘束しないが、RC06では最終推定値を直接拘束する点で大きく異なっており、本研究の改良法の方が解の自由度が高い。

5. 改良法の結果

前節に示した改良法を、MA04と同様に、3節(2)で作成したDPR模擬観測データに対して適用した。その結果を、図-7に示す。図の見方は、図-3と同じである。また、バイアスなどの統計量による評価を表-1に示す。この表に示す計算量とは、レンジビンあたりのリトリバルを行った回数の平均である。

改良法ではいずれも、MA04に比べると過小評価が改善されている。 $[k]$ や $[dBZ_e]$ の鉛直分布を仮定した効果が表れている。ただし、2次元ヒストグラムから分かるように、改良法では、推定値の方が真値より大きくなるピクセルがある。

4つの方法のうち、バイアス・RMSEの双方で最も優れているのは、SZ法であった。バイアスの真値に対する割合は18%とMA04の半分以下である。 $N=17\sim 20$ と大きい場合を除き、真値が1~10mm/hの範囲では、推定値の平均と真値がほぼ一致している。これより真値が高くなると、次第に過小評価がみられるようになる。

SK法でも真値が1~10mm/hの範囲では、SZ法に近い結果を示すが、10mm/hを超える雨に対しての過小評価が強い。またSZ法に比べて、ばらつきが大きいことが、2次元ヒストグラムやRMSEの値から読み取れる。

SK法とSZ法の精度の違いの原因として次のことがあげられる。 $dBA(r_i)$ の第一推定値の作成の際に、SK法では $dBA(r_{i-1})$ の情報しか使えないのに対して、SZ法では $[dBZ_m]_{i-1}$ および $[dBZ_m]_i$ も使っている。このように、SZ法

表-1 MA04と改良法の精度比較.

解法	バイアス (mm/h)	バイアス 割合(%)	RMSE (mm/h)	計算量
MA04	-1.17	39.75	4.51	32.00
SK	-0.74	25.04	4.30	59.52
SZ	-0.54	18.27	3.33	87.95
NSZ	-0.73	24.78	3.41	23.89

の方が多くの情報量を使うことが、精度が優る一つの理由と考えられる。

NSZ法は、SZ法に比べるとバイアスが大きい。Nが大きい場合にその傾向がみられる。ただし、 $N=1\sim 4$ の場合にはSZ法よりも良い結果を与えている。レンジビン1とレンジビンNの関係性を直接仮定することが、Nが大きい場合には妥当でないと考えられる。

計算量は、NSZ法が4つの手法の中で最も少ない。第一推定値を妥当な値、より真値に近い値に設定することで収束までの計算量を減らすことができたと言える。

6. おわりに

(1) まとめ

粒径分布が2パラメータの関数で表現できるという前提のもとで、二周波レーダによる観測から粒径分布を推定する手法の精度を検討した。主要な誤差要因として、 Z_m の観測誤差、上のレンジビンのリトリーブの際に生じる誤差、複数解の存在、の3点がある。本研究では、 Z_m の観測誤差を無視して作成したDPR模擬観測データを用いてMA04およびその改良法の精度を検討した。

複数解が存在する以上、正解をつねに得る手法は存在しない。MA04は、解の候補のうち最も降水強度が弱い解を選択する傾向にあるが、降水量の約4割を見逃しており、過小評価が深刻であるということが確認された。改良法では、 $[k]$ または $[dBZ_k]$ の鉛直分布が一定であることを仮定して第一推定値を作成することで、過小評価を改善することに成功した。最も良い結果のSZ法では、バイアスをMA04のほぼ半分に抑えている。繰り返し後退法におけるPIAの第一推定値の重要性、および、鉛直分布を一定と仮定することの妥当性が示されたと言える。

なお、著者らが開発したDSDに基づくタイプ分類¹⁰⁾を導入すると、推定結果の評価をより詳細に行うことができるが、その結果は別の論文¹⁵⁾に示す。

(2) 今後の展望

本研究では取り扱わなかったが、さらに精度を向上させるためには、表面参照法との組み合わせが有効である。PRの例¹⁶⁾から、DPRの表面参照法によるPIAの推定精度は必ずしも十分ではないと予想されるが、繰り返し後退法の第一推定値に用いるのならば十分であり、SZ法よりも良い結果を与えることが予想される。

表面参照法を組み合わせることで改良した手法を用いることで、DPR観測から粒径分布パラメータおよび降水強度を高精度に推定できる可能性が期待される。もちろん、どのような手法でも完全ということはないが、少なくとも一周波法と比べて精度が向上したことを示すこと、 $k-Z$ 関係、さらには $Z-R$ 関係を、地理的・季節的変動、降水特性を考慮したより適切なものに修正することが、DPRの実観測における大きな目標となる。

謝辞：本研究は宇宙航空研究開発機構のPMM研究公募委託研究「Development of modules for the GPM/DPR standard algorithm」(PI：瀬戸心太)の成果の一部である。

参考文献：

- 1) (例えば)Marshall, J. S., and W. M. Palmer: The distribution of raindrops with size, *J. Meteorol.*, vol. 5, pp165-166, 1948.
- 2) (例えば)Battan, L. J.: Radar Observation of the Atmosphere, *the University of Chicago Press*, P324, 1973.
- 3) Iguchi, T., T. Kozu, J. Kwiatkowski, R. Meneghini, J. Awaka, and K. Okamoto: Uncertainties in the Rain Profiling Algorithm for the TRMM Precipitation Radar, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 87A, pp1-30, 2009.
- 4) Kozu, T., T. Iguchi, T. Shimomai, N. Kashiwagi: Raindrop size distribution modeling from a statistical rain parameter relation and its application to the TRMM Precipitation Radar rain retrieval algorithm, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, Vol. 48, pp716-724, 2009.
- 5) (例えば)宇宙航空研究開発機構: 宇宙から見た雨2, P109, 2008.
- 6) Kozu, T., T. Iguchi, T. Kubota, N. Yoshida, S. Seto, J. Kwiatkowski, Y. N. Takayabu: Feasibility of raindrop size distribution parameter estimation with TRMM Precipitation Radar, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 87A, pp53-66, 2009.
- 7) Mardiana, R., T. Iguchi, and N. Takahashi: Dual-frequency rain profiling method without the use of surface reference technique, *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 42, pp. 2214-2225, 2004.
- 8) Meneghini, R., H. Kumagai, J.R. Wang, T. Iguchi, and T. Kozu: Microphysical retrievals over stratiform rain using measurement from an airborne dual-wavelength radar-radiometer, *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing.*, Vol. 35, pp487-506, 1997.
- 9) 瀬戸心太, 井口俊夫, 沖大幹: 二周波降水レーダアルゴリズムの基礎方程式とその解法に関する研究, 水工学論文集, 第53巻, pp373-378, 2009.
- 10) Seto, S., T. Iguchi: Applicability of the iterative backward retrieval method for the GPM Dual-frequency Precipitation Radar, *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, submitted.
- 11) Hitschfeld, W., and J. Bordan: Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *J. Meteor.*, Vol. 11, pp58-67, 1954.
- 12) Rose, C. R., and V. Chandrasekar: A systems approach to GPM dual-frequency retrieval, *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 43, pp. 1816-1826, 2005.
- 13) Adhikari, N., T. Iguchi, S. Seto, and N. Takahashi: Rain retrieval performance of a dual-frequency precipitation radar technique with differential-attenuation constraint, *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 45, pp. 2612-2618, 2007.
- 14) Rose, C., R., and V. Chandrasekar: A GPM dual-frequency retrieval algorithm: DSD profile-optimization method, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 23, pp1372-1383, 2006.
- 15) Seto, S., T. Iguchi: Modification of the iterative backward retrieval method for the GPM Dual-frequency Precipitation Radar, *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, in preparation.
- 16) Seto, S., and T. Iguchi: Rainfall-induced changes in actual surface backscattering cross sections and effects on rain rate estimates by spaceborne precipitation radar, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, Vol. 24, pp1693-1709, 2007.