

X-band MPレーダー情報を用いたC-bandレーダー降水強度の改善手法の開発

IMPROVEMENT OF C-BAND RADAR RAINFALL RETRIEVAL USING X-BAND MP RADAR PARAMETER

牛山朋来¹・萬矢敦啓²・菅野裕也³・深見和彦⁴

Tomoki USHIYAMA, Atsuhiko YOROZUYA, Yuya KANNO, and Kazuhiko FUKAMI

¹正会員 博士(地球環境科学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原1-6)

²正会員 Ph.D. 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原1-6)

³正会員 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原1-6)

⁴正会員 修士(工学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター(〒305-8516 つくば市南原1-6)

To detect torrential rainfall that often brought inner drainage flood and flash flood, X-band multi parameter (MP) radar network was deployed in urban area of Japan by the Ministry of land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) on July 2010. The X-band MP radar can retrieve more accurate rainfall distribution than conventional C-band radar through the use of polarization parameters, such as specific propagation phase. However, the X-band MP radars are limited in their observation range. In this study, we develop an algorithm to improve accuracy of rainfall retrieval by conventional C-band radars through the use of X-band MP radars. Specifically, it is an algorithm to retrieve optimum coefficients of Z-R relationship for specific location and time from raindrop size distribution estimated from X-band MP radars. The newly developed algorithm retrieves rainfall distribution fairly well from radar reflectivity provided by conventional radars.

Key Words : X-band MP radar, C-band radar, rainfall retrieval, raindrop size distribution.

1. はじめに

水文データの基本となる雨量分布は、現在国土交通省河川局によって運用される全国26基のレーダー雨量計(C-bandレーダー)によって監視されている。このレーダーシステムによる雨量推定は、経験的に求めた係数によりレーダー反射因子を雨量に変換する方式(Z-R関係)が用いられている。しかしZ-R関係の係数は、一定の雨滴粒径分布(DSD)を仮定しているため、降水タイプによって雨滴粒径分布が変動すると、Z-R関係の係数も変わってしまう。これが係数を固定したZ-R関係による雨量推定の大きな誤差となる。現業ではこの誤差を回避するため、平均70km²に1個置かれた地上雨量計の値を用いて補正した合成雨量が配信されている。

従来型のレーダーに対して、より精度の高い雨量推定が可能となるマルチパラメータレーダー(MPレーダー)の利用が平成22年から開始された。これは、従来型のC-bandレーダーに比べて波長が短く安価なX-bandレーダーを都市圏に配備することにより、局地的豪雨の予測等に

役立てようとするものである。これらX-band MPレーダーから得られる偏波情報の一つである位相差変化率(K_{DP})を用いて、精度の高い雨量分布が求められる¹⁾。

X-band MPレーダーは従来型C-bandレーダーに比べて安価かつ高精度であるものの、探知範囲が狭く降雨減衰の影響を受けやすいため、広範囲の雨量測定には向いていない。さらに、河川管理にとって重要な山岳域が観測範囲に含まれていない。従って、水文データの把握にはこれまで通りC-bandレーダーの情報が不可欠である。

本研究は、X-band MPレーダーの情報を用いてC-bandレーダーの推定雨量精度を改善する手法を開発する。X-band MPレーダーの情報から各観測体積のZ-R関係の係数の分布を知ることによってC-bandレーダーによる推定降水強度の精度向上につながる情報を得ることができる。理論的にはこれらを用いて各観測体積の雨量を高精度で算出することができるが、実際のデータに対するこの手法の有効性について調査を行う。さらに、X-bandレーダーの観測範囲外でC-bandレーダーの情報しか得られない領域について、推定降水強度の精度を向上させる手法について議論を行う。

2. 理論と方法

(1) 雨滴粒径分布パラメータの導出

レーダー観測データを降水強度に変換するZ-R関係式は、レーダー反射因子Z(mm⁶m⁻³)と降水強度R(mm h⁻¹)の関係である。レーダー反射因子Zは式(1)で定義され、雨滴直径の6乗に比例する。一方降水強度Rは式(2)で表現され、雨滴直径の3.67乗に比例する。

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (1)$$

$$R = \int_0^{\infty} \frac{\pi}{6} D^3 386.6 D^{0.67} N(D) dD \quad (2)$$

ここで、N(D)は雨滴の直径Dの関数である粒径分布を表す。これらの関係を用いてある粒径分布N(D)を仮定すると、

$$Z = BR^\beta \quad (3)$$

のようなZ-R関係が成り立つ。ここで、B,βは係数である。ここでは、粒径分布N(D)として、ガンマ型の雨滴粒径分布を考える。

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (4)$$

ここで、N₀, μ, λはガンマ分布の形を決めるパラメータで、それぞれ切片、形状、傾きパラメータと呼ばれる。これら3つのパラメータは互いに独立ではなく、一般的な降水強度の範囲内ではμとλの間には次のような従属関係があることが報告されている²⁾。

$$\lambda(\mu) = 0.0365\mu^2 + 0.735\mu + 1.935 \quad (5)$$

このμ-λ関係を用いるガンマ分布をconstrained ガンマ分布と呼ぶ。

Z-R関係の係数B,βを求めるには、これまではレーダーと地上雨量計による観測結果を統計処理する必要があった。しかし、この方法では多くの降雨観測データを必要とした。しかしながら、MPレーダーを用いることにより、各観測体積について瞬時に求めることが可能になった。

計算手法としては、最初にMPレーダー情報から雨滴粒径分布を求め、次にB,βを算出する。まず、MPレーダー情報の一つであるレーダー反射因子差Z_{DR}から、median volume diameter D₀を推定する²⁾。

$$D_0 = 1.017 + (0.448 - 0.064\sigma_\phi + 1.278\sigma_\phi^2)Z_{DR} \quad (6)$$

ここで、σ_φは雨滴の傾き分布の標準偏差、この式の有効範囲はZ_{DR} ≥ 0.2(dB)である。今のところσ_φを求める方法が確立されていないため、今回はσ_φ=0とする。次に、D₀とμ,λの関係が、理論的に次のように導かれる。

$$D_0 = \frac{\mu + 3.67}{\lambda(\mu)} \quad (7)$$

式(5)、(6)、(7)からμ, λが導かれる。ここでは、μに関する2次方程式を解くことになり、解が二つ現れる。そこで、物理的に意味のある-2 ≤ μ ≤ 12を満たすμを採用する³⁾。最後にN₀が次の式(8)から導かれる。

$$N_0 = \frac{Z\lambda^{\mu+7}}{P(7+\mu, 1.5D_0)} \quad (8)$$

P(a,x)はガンマ関数Γ(a)と第1種不完全ガンマ関数γ(a,x)から定義される次の関数である。

$$P(a, x) = \frac{\gamma(a, x)}{\Gamma(a)}, \gamma(a, x) = \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt$$

以上で求められたN₀, μ, λを用いて、式(1)、(2)の関係から、次のようにB,βが求められる⁴⁾。

$$B = \frac{10^6 P(7+\mu, 1.5D_0) N_0^{-\frac{2.33}{4.67-\mu}}}{[33.31 P(4.67+\mu, 1.5D_0)]^{\frac{7+\mu}{4.67+\mu}}} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{7+\mu}{4.67+\mu} \quad (10)$$

(2) X-band MPレーダーデータ

平成22年7月から、全国都市域に配備された国交省X-band MPレーダーの運用が開始された。本研究では、この中で埼玉新都心に設置された関東レーダーのデータを用いた。

X-band MPレーダーは、低仰角のPPI(円錐走査)を1分毎に行うほか、5分間に1回Volume scan(立体走査)を行っている。配信データは、水平偏波、鉛直偏波の受信電力値(それぞれnormal, MTI)、補正レーダー反射因子の水平偏波成分(Z_H)、レーダー反射因子差(Z_{DR})、偏波間相関係数(ρ_{HV})、偏波間位相差(φ_{DP})、位相差変化率(K_{DP})、ドップラー速度、ドップラー速度分散、降水強度(R)の12種類である。この中で、今回の解析で必要となるのはZ_{DR}、Z_H、Rの3種類である。

配信データの中のZ_{DR}、Z_Hは、K_{DP}を用いて降雨減衰の効果を補正した値である。また、Rはレーダー反射強度が30dBZより大きく、K_{DP}が0.5°/kmより大きい場合はK_{DP}を用いて計算され、それ以外はZ-R関係によって計算されている。K_{DP}は降雨減衰の影響を受けない性質を持つため、上記のように降水量推定やZ_{DR}、Z_Hの補正に有効である。

今回用いた手法では、Z_{DR}の精度がDSDパラメータの推定精度に大きく関わるため、精度の高いZ_{DR}を用いる必要がある。配信データのZ_{DR}は、上記のように降雨減衰に対して補正されており、現在得られる最も高い精度と考えられるため、本研究ではこれを使用した。

3. 結果

今回の解析では、2010年7月25日18時55分に茨城県で強い降水系が観測された事例を用いた。図1にX-band MPレーダーとC-bandレーダーによる降水強度分布を示す。図1aはX-band、図1bはC-bandレーダーによる降水強度分布である。ともに茨城県北部に強い降水系が捉えられているが、X-bandの方は降水系自身による降雨減衰に

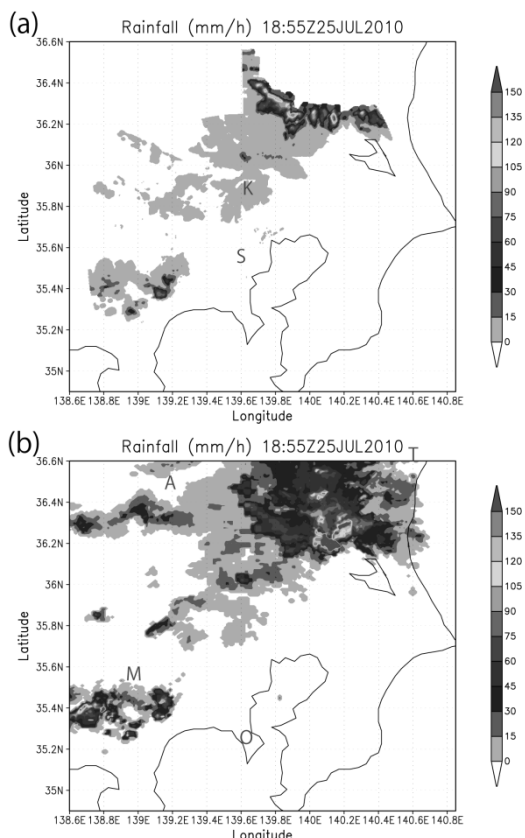


図1. X-band (a) およびC-bandレーダー (b) による降水量分布。図中のアルファベットは各レーダーの位置を表す。K: 関東、S: 新横浜、A: 赤城山、T: 高鈴山、M: ミツ峠、O: 大楠山

よりレーダー（図中のK）から見て後方の降雨が捉えられていない。それに対して、C-bandでは降水系全体が捉えられている。しかしながら、C-bandの降水強度は降水系の中心でX-bandに比べて大きく、135mm/h以上の領域が広がっている。X-bandレーダーの降水強度は、偏波情報の K_{DP} を用いて求められており、精度が高いことが知られている¹⁾。従って、X-bandの降水強度を真値と考えると、降水系中心付近の強い降水は、C-bandが過大評価していると考えられる。このように、X-bandでは精度は高いものの探知範囲に限界があり、C-bandでは精度に限界があるといった長所短所がある。

(1) $B\beta$ の空間分布と雨量推定

図2に降水系の部分を切り出したPPIスキャンの拡大図を示す。図2aはレーダー反射因子 Z_H であり、図2bはレーダー反射因子差 Z_{DR} である。 Z_H と Z_{DR} の大きさは必ずしも対応しておらず、 Z_{DR} の値は対流の中心付近で Z_H が大きい領域の他、レーダーに近い場所でも大きな値を示した。

続いて図3に、今回示した手法によって Z_{DR} 、 Z_H から求められた $B\beta$ の分布を示す。 B と β の値は Z_{DR} の値と対応しているように見える。ここで注目すべき点は、 B の値は200~300、 β の値は1.2~1.7の広い範囲に分布しており、空間変動も大きいことである。これまでのZ-R関係

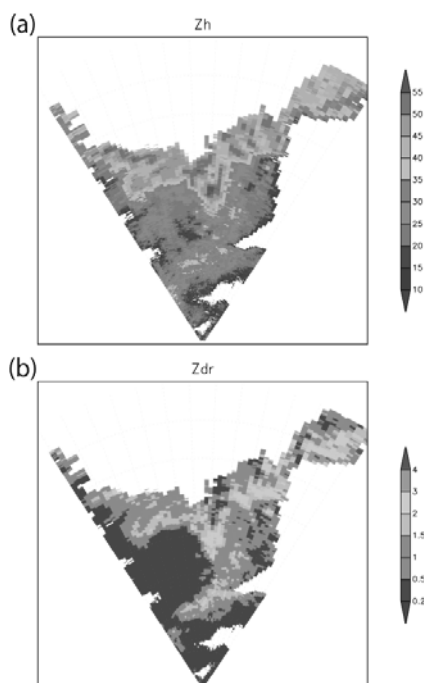


図2. X-band MPレーダーによる(a) Z_H と(b) Z_{DR} 。この図では方位角 $0 \sim 65^\circ$ 、レンジ $0 \sim 80$ kmまで表示している。レーダーの位置は扇の要の位置。

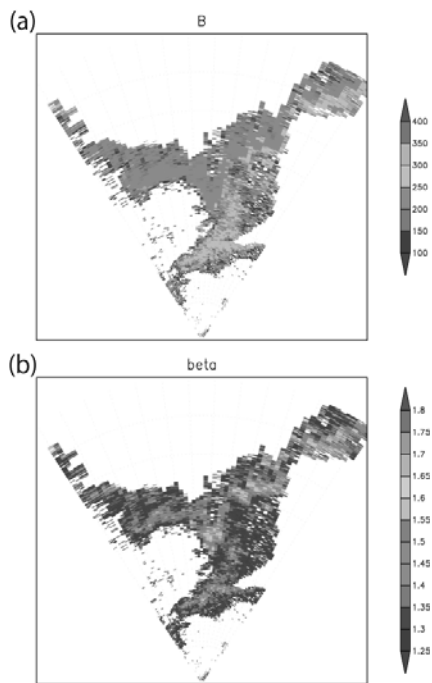


図3. Z_H と Z_{DR} から求められた(a) B 、(b) β の分布。領域は図2と同じ。

式を用いた雨量変換手法では、 B と β の値を固定しているため、その場の雨滴粒径分布が持つ本来の $B\beta$ の値とのずれが雨量推定値の誤差となる。

そこで、今回求められた $B\beta$ を用いて変換した雨量と、固定 $B\beta$ によって変換された雨量について、 K_{DP} から求められた雨量との対応関係を調べた。解析期間は7月25日18時50分~20時00分で、対象は関東レーダー観測範囲の、仰角3度未満のすべての極座標観測体積である。固

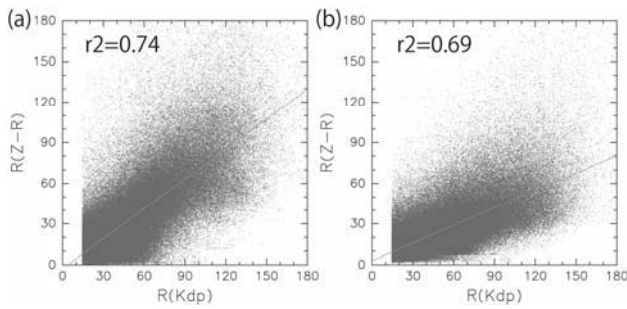


図4. 推定 B, β (a)と固定 B, β から求められた雨量(b)の、 K_{DP} から求められた雨量に対する関係。図内左上は、 r^2 値。回帰直線は、それぞれ $y=0.74x-3.0$ 、 $y=0.43x+3.0$ であった。

定 B, β の値は平成22年度のX-band関東レーダーで用いられていた $B=99.5$ 、 $\beta=1.767$ ($Z_H \geq 35\text{dBZ}$)、 $B=140$ 、 $\beta=1.077$ ($Z_H < 35\text{dBZ}$)を用いた。図4aは今回推定された B, β による変換雨量であり、固定 B, β による変換雨量である図4bに対して、バイアスが小さく、 r^2 値に示された統計的ばらつきも小さかった。このように、今回の手法で求めた雨量は、従来の固定 B, β による手法に対して一定の改善がみられた。

(2) Z-B関係による雨量推定

ここまで、 Z_H と Z_{DR} から B, β の空間分布を求め、Z-R関係式にあてはめることで、一定の精度で雨量が推定できることを示した。次に、本研究の本来の目的である、MPレーダーによる偏波情報の観測がない領域において、従来型レーダーの観測情報を用いた雨量推定精度を改善する手法について考える。それには、降水が観測された場所における最適な B, β の値を、何らかの方法で推定することである。

図5は、図4と同じデータを用いて、Z-B関係およびZ- β 関係を図示したものである。図5aのZ-B関係は、Z(以下 Z_H と同じ)の値によってBの数密度の極大が増加したり減少したりする複雑な関係であった。それに対して図5bではZに対して β の数密度の極大が単調増加する関係であった。いずれもZの値に対してBと β の値は広い範囲に分布しているが、数密度の大きい赤色部分のデータ数2000~20000に対し、緑色や青色部分はデータ数500以下であり、一部に集中していることがわかった。そこで、この図から得られたZ-B関係およびZ- β 関係の変換式を用いることにより、各Zの値に対応する代表的な B, β の値が得られると考えられる。

このようにして作成されたZ-B関係およびZ- β 関係の式を用いて各観測体積のZから B, β の値を求め、Z-R関係により雨量を計算した。求められた雨量を K_{DP} から求められた雨量と比較したものを図6に示す。その結果は、バイアス、 r^2 値ともに、図4aの B, β を Z_{DR} から直接推定した雨量と同等の精度であった。

次に、各手法によって求められた雨量分布を図7に示す。図7aの K_{DP} から求められた雨量は、理論上最も精度

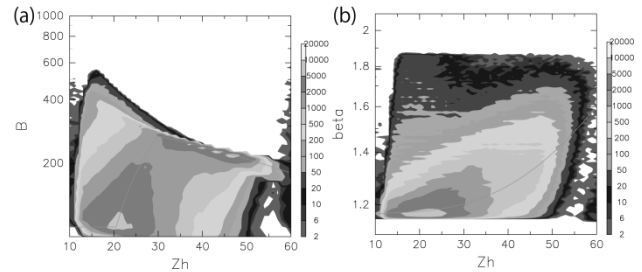


図5. Z-B関係(a)とZ- β 関係(b)。色はデータの数密度を表わす。数密度の頂点を結んだ図中の曲線は、Zに対応した B, β を与える変換式となり、 $B = 100(Z < 20)$ 、 $B = 18Z - 270(20 \leq Z < 30)$ 、 $B = -3Z + 360(Z \geq 30)$ 、 $\beta = 3.47 \times 10^{-6}Z^3 - 1.15 \times 10^{-4}Z^2 + 1.78 \times 10^{-3}Z + 1.16$ である。

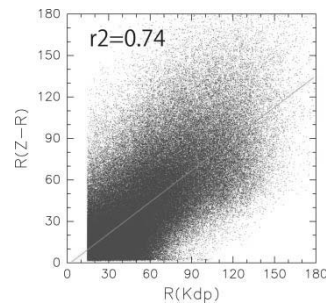


図6. Z-B関係、Z- β 関係から求めた B, β による雨量と、 K_{DP} から求められた雨量に対する関係。回帰直線は $y=0.76x-1.75$ であった。

が高いと考えられるため、これを真値として議論する。なお、 K_{DP} から求められた雨量は $K_{DP} \geq 0.5^\circ/\text{km}$ などの条件を満たさない領域は算出されないため、雨量の小さいレーダーに近い領域では雨量データが算出されていない。

図7bの Z_{DR} から直接推定した B, β による雨量は、図7aに見られる降水セルの構造をよく再現しており、その最大雨量の分布も比較的良く一致している。しかし、降水帯の中ほどで図7aには見られない異常に大きな雨量を示したり、図7aに見られる右側降水セルの160mm/h以上の雨量が再現されないなどの不一致も見られる。また、降水帯のレーダーからみて遠方端では降雨減衰で雨域が見えないため、遠方端では図7aのように雨量が大きいまま消えるべきであるのに対し、図7bでは降水帯の遠方端に向かって雨量が減少している。これは、降雨減衰が起こるような場所では Z_{DR} の精度が悪いためである。

図7cの固定 B, β による雨量は、降水セルの構造は同じであるが、ほとんどの部分で雨量を過小評価している。これは、固定 B, β の値が適切でないことも理由の一つと考えられるが、いずれにせよ固定 B, β を用いた方法の限界を示唆している。

図7dのZ-B関係およびZ- β 関係を用いた雨量は、図7cで見られた過小評価が改善され、図7bの Z_{DR} から直接推定した B, β による雨量と同等の分布となっている。しかし図7c,7dに共通して、降水帯よりもレーダーに近い側

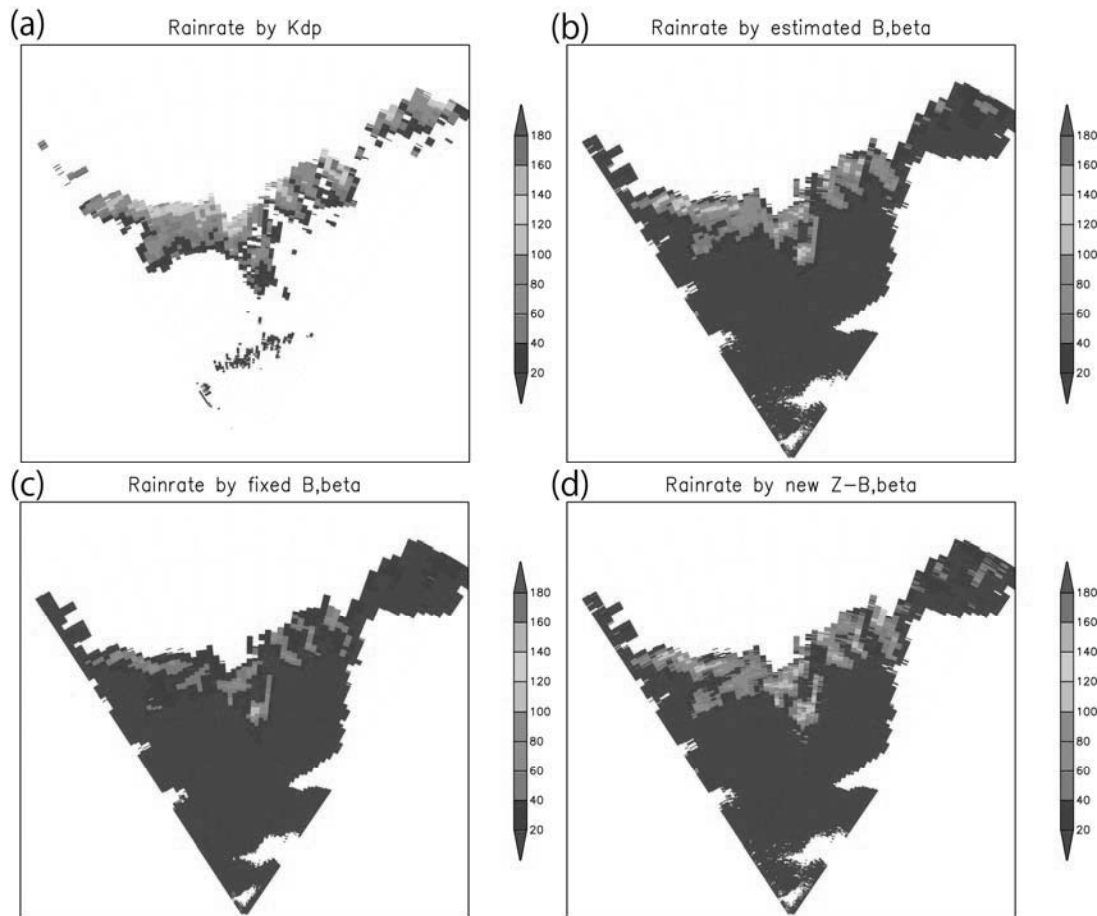


図7. 各手法による推定降水量分布。(a) K_{DP} から求められた雨量。(b) 推定された B, β の空間分布による雨量、(c) 固定 B, β による雨量、(d) $Z-B, Z-\beta$ 関係式によって変換された B, β による雨量。

(図の下側)にある降水セルの雨量が最大であるのに対し、 K_{DP} から求められた図7aではその場所の雨量は周りに比べて小さい。これは、図2に見られるようにこの降水セルの Z や Z_{DR} が大きいため、 $Z-R$ 関係を用いた場合大きな雨量を算出してしまったためと考えられる。実際には強い降水は降っていないのに Z や Z_{DR} が大きかったのは、恐らく降水帯の前面に少数の非常に大きな降水粒子が存在したためであろうと推測される。

4. 議論

これまで、 $Z-B$ 関係および $Z-\beta$ 関係の変換式を用いて各観測体積の Z から B, β の値を求める方法により、 Z や Z_{DR} から直接 B, β の値を求めるのと同程度の精度で雨量を推定できることを示した。ここでは、この新手法の物理的意味を議論する。図8は、これまで用いた手法による推定雨量の $Z-R$ 空間内の分布を示したものである。

黒点で示された K_{DP} による雨量は $K_{DP} \geq 0.5^\circ/\text{km}$ などの条件があるため、約15mm/h以上のみとなっている。また、 B, β の値を固定せず、様々な雨滴粒径分布に対応しているため、ある Z に対して様々な雨量の値を取りう

る。赤点で示した Z や Z_{DR} から直接 B, β の値を求める手法も、同様にある Z に対して幅を持った R が対応している。

続いて緑線で示された固定 B, β の関係では、定義の通り35dBZを境にして2本の直線で表わされる。これらの直線は、赤や黒で示された $Z-R$ 関係の分布の中に含まれるため、少なくとも不適当な関係ではない。しかし、この降水イベントから得られた $Z-R$ 関係、すなわちこの降水イベントの雨滴粒径分布特性を必ずしも代表しているとは限らない。

今回開発した新手法による関係は図8の青い曲線で示されたものである。この曲線は、降水強度2mm/h以上の場合、赤点で示された Z や Z_{DR} から直接 B, β を求める方法の分布のほぼ中央を走り、また黒で示された K_{DP} による方法の分布のより中心に近い部分を通っている。このように、今回開発した手法は、ある Z に対する雨滴粒径分布を固定してしまうため、 Z に対して R を一意に決めてしまうものの、その降水イベントの雨滴粒径分布を代表する $Z-R$ 関係を示していると考えられる。

このように、今回開発した新手法は、X-band MPレーダーの観測結果があれば、短時間で Z から B, β を求める換算式を求めることができる方法である。しかし、これにはいくつかの前提をもとにしている。(1)一つの降水イベ

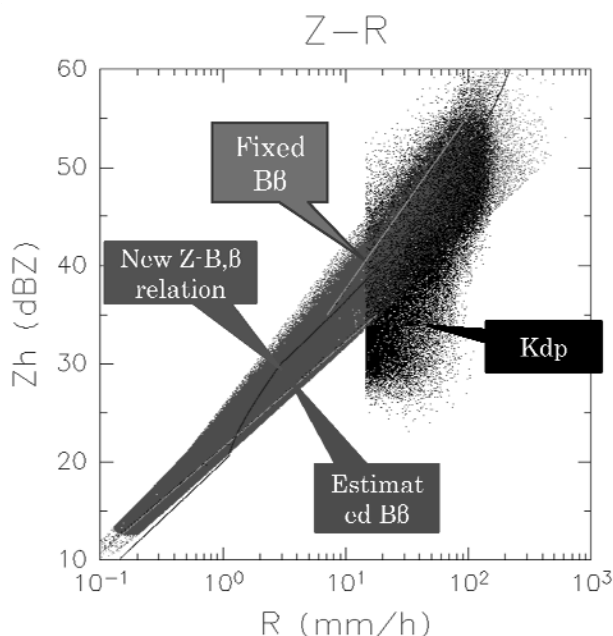


図8. 各手法による推定降水量のZ-R空間内の分布。

ントに対して、適切なZ-R関係曲線が存在し、それを用いることで全体の雨量推定精度が改善する、(2) 適切なZ-R関係曲線は降雨イベントの期間を通してほとんど変化しない、(3) 適切なZ-R関係曲線から外れる雨の総雨量に対する影響は小さい、等である。これらの仮定が成り立つかどうかについては、今後解析事例を増やして検証する必要がある。

さらに、今回の手法では Z_{DR} の値を主に用いて雨滴粒径分布を求めているため、 Z_{DR} の精度に強く依存している。しかし、 Z_{DR} の値は降雨減衰の影響を強く受け、特にX-bandレーダーでは高い精度で求めるのが難しい。今回用いた Z_{DR} は K_{DP} を用いて降雨減衰補正を行ったものであるため、ある程度の精度は確保されていると考えられる。しかしながら、 Z_{DR} の精度による影響については、今後も検証を行っていく必要があり、さらに Z_{DR} の精度を向上させる手法⁸⁾の適用も今後検討すべき課題の一つである。

5. 結論

X-band MPレーダーの雨滴粒径分布情報を用いて、C-bandレーダーの雨量推定精度を向上させる手法を開発した。最初に、X-band MPレーダーのZと Z_{DR} を用いてレー

ダー観測体積の雨滴粒径分布を計算し、Z-R関係の係数 B, β の値を求めることによって雨量を推定する方法を試みた。次に、この手法によって得られたZと B, β の分布から、Z-BおよびZ- β 関係式を求め、Zの情報からより適切な B, β の値を求め、雨量を推定した。それぞれの結果は、従来行われていた固定 B, β を用いて雨量を求める方法に比べて、バイアス・相関ともに改善が見られた。今回適用したデータは、一つの降水イベントに関する1時間10分のみであるため、この手法の有効性について、今後適用事例を増やし、検証を行っていく必要がある。

謝辞：本研究は、国土交通省河川局から「XバンドMPレーダー等の観測情報の活用に関する技術開発」の助成を受けた。図の作成にはGrid Analysis and Display System (GRaDS)と地球流体電脳倶楽部ライブラリ(DCL)を使用した。

参考文献

- 1) Masayuki Maki, Sang-Goon Park, and V.N. Bringi: Effect of natural variations in rain drop size distributions on rain rate estimators of 3 cm wavelength polarimetric radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.83, pp.871-893, 2005.
- 2) Vivekanandan, J., G. Zhang, and E. Brandes.: Polarimetric radar estimators based on a constrained gamma drop size distribution model, *J. Appl. Meteor.*, Vol.43, pp.217-230, 2004.
- 3) Anagnostou, M. N., E. N. Anagnostou, J. Vivekanandan, and F. L. Ogden: Comparison of two raindrop size distribution retrieval algorithms for X-band dual polarization observations, *J. Hydrometeorology*, Vol.9, pp.589-600, 2008.
- 4) Rosenfeld, D., and C. W. Ulbrich: Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities, *Meteor. Monographs*, pp.237-258, 2003.
- 5) Karniadakis, G.E, Orszag S.A. and Yakhot, V.: Re-normalization group theory simulation of transitional and turbulent flow over a backward-facing step, *Large Eddy Simulation of Complex Engineering and Geophysical Flows*, Galperin, B. and Orszag, S.A. eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp.159-177, 1993.
- 6) 土木学会編：土木工学における数値解析，流体解析編，サイエンス社，1974.
- 7) 土田建次，木村 一：版下原稿スタイルフォーマットの作成について，土木学会論文集，No. 333/II-99，pp. 20-33，1994.
- 8) Kim, D.-S., M. Maki, and D.-I. Lee: Retrieval of three-dimensional raindrop size distribution using polarimetric radar data. *J. Atmos. Ocean Tech.* Vol.27, pp.1265-1285, 2010.

(2011. 5. 19受付)