

# 最新型Cバンド偏波レーダを用いた 降雨量推定精度の検証

VALIDATION OF RAINFALL INTENSITY ESTIMATED  
USING THE LATEST C-BAND POLARIMETRIC RADAR

中北 英一<sup>1</sup>・竹畑 栄伸<sup>2</sup>・中川 勝広<sup>3</sup>

Eiichi NAKAKITA, Hidenobu TAKEHATA and Katsuhiko NAKAGAWA

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>2</sup>学生会員 工学士 京都大学修士課程 工学研究科 (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)

<sup>3</sup>正会員 工博 主任研究員 情報通信研究機構 (〒904-0411 沖縄県国頭郡恩納村字恩納4484)

Dual polarimetric radar has been developed and partly utilized in meteorology and hydrology in these twenty years because of its potential ability in estimating drop size distribution (DSD) and in discriminating precipitation type. Ministry of Infrastructure, Land and Transportation (MILT) in Japan put Shakadake operational C band Radar to practical use in 1992. However, large improvement had not been realized because of its initial technical stage. Under these circumstances, this study investigates observation precision of the latest C band polarimetric radar for promoting replacement of Japanese operational radars into operational polarimetric radars. As results, this study shows  $Z_{HH}$ ,  $Z_{DR}$  and  $K_{DP}$  observed by the polarization radar well fit to non-parametrically computed  $Z_{HH}$ ,  $Z_{DR}$  and  $K_{DP}$  using observed DSD, respectively. Also, this study shows “Radar observed  $Z_{DR} \sim D_m$  of observed DSD” relation is consistent with observed DSD. Especially,  $K_{DP}$ , which is free from attenuation problem, is suitable to estimate the strong rainfall. Parameter from the polarimetric radar has high possibility to improve real-time rainfall estimation.

**Key Words :** C-band polarimetric radar, rainfall estimation, differential reflectivity, specific differential phase

## 1. はじめに

二偏波レーダーは、降水粒子の粒径分布や、雨や雪といった降水の種類が推定できる可能性のあるレーダーであり、約20年前から気象学や水文学の分野で、コンベンショナルレーダーの次世代機とするべく利用方法が開発されてきた。わが国でも、Xバンド（3cm波）を中心に20年前に研究が開始され<sup>1)</sup>、現在では国土交通省釈迦岳レーダ雨量計で大型業務用Cバンド（5cm波）レーダーとして実用化されている<sup>2)</sup>。しかし、開発黎明期であったので、期待したほどの精度の向上が見られず、業務用大型レーダーとしてこれ以上は広がっていない。その後海外ではアメリカ<sup>3)</sup>、ヨーロッパを中心にSバンド（10cm波）レーダーの改善・革新が進み、降雨量推定精度向上の見込みが立ち、2007年からの現業配備を予定している。翻ってわが国の現業用と見込まれるCバンドについては取り組みが遅れている。

Cバンド偏波レーダーは、現在世界で4機しかなく、その一つが情報通信研究機構（NiCT）沖縄亜熱帯計測

技術センターで開発されここ数年実験運用されているCOBRA(CRL Okinawa Bistatic Polarimetric RADar)で、本研究ではそのレーダー情報を用いる。水平、垂直偏波面によるレーダ反射因子 $Z_{HH}$ 、 $Z_{VV}$ ならびにその反射因子差 $Z_{DR}$ は旧来の二偏波レーダーでも取得されるが、COBRAは他の最新型偏波レーダー同様、それ以外に、直線偏波抑圧比 $L_{DR}$ 、偏波間相関係数 $\rho_{HV}$ 、偏波間位相差 $\phi_{DP}$ とその伝搬方向の距離微分である伝搬位相差変化率 $K_{DP}$ といった新たなパラメータが得られる。また2つの発信機を用いて取得される $Z_{DR}$ の優位性も旧来より増している。

本研究では、まず、COBRAによって観測される偏波パラメータ $Z_{HH}$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ がどの程度良好に観測されているのかを、ディストロメータと2次元ビデオディストロメータ（以後、2DVDとよぶ）による地上での雨滴粒径分布の観測結果を用いて検証を行う。一方、雨滴粒径分布を正確に捉えることが降雨量推定する上で重要である。そのため、それら偏波パラメータがどれほど有意に雨滴粒径分布 $N(D)$ を推定できるのかについて、 $Z_{DR} \sim D_m$ 関係に着目し、その精度について検証する。

また、 $Z_{HH}$ のみを用いた降水強度推定式 $R(Z_{HH})$ をはじめ

めとして、偏波パラメータを用いた $R(Z_{HH}, \zeta_{DR})$ ,  $R(K_{DP})$ ,  $R(K_{DP}, \zeta_{DR})$ といった降雨強度推定式を用いて降水量の推定精度に対する検証を行う。

## 2. 偏波パラメータ

### (1) 雨滴の形状

電波の偏波特性は個々の標的粒子の集合体としての後方散乱断面積に依存する。そのため、降水におけるパラメータを推定するためには個々の雨滴の粒径と扁平度の関係、そして、扁平度と偏波パラメータの関係を知らなければならない。

雨滴は大気中を落下するとき、空気の抵抗を受け扁平する。粒径が大きくなるに従い抵抗の度合いが増して扁平度が増してくることが知られている。

ここで、雨滴は楕円形状であると仮定し、その長軸を $a$ 、短軸を $b$ とすると、等価軸比 $r = b/a$ は粒径 $D$ [mm]を用いて、

$$r = 1.03 - 0.062D \quad (1)$$

となることを風洞実験をもとに示されている<sup>4)</sup>。このとき粒径 $D$ は、 $0 \leq D \leq 9$ [mm]とされている。また、より厳密な多項式近似としてBeardら<sup>5)</sup>が数値モデルにより、

$$r = 1.0048 + 5.7 \times 10^{-4} D - 2.628 \times 10^{-2} D^2 + 3.682 \times 10^{-3} D^3 - 1.677 \times 10^{-4} D^4 \quad (2)$$

を提示している。このとき粒径 $D$ は、 $0 \leq D \leq 7$ [mm]の範囲である。

### (2) レーダー反射因子差 $Z_{DR}$

水平偏波と垂直偏波によるレーダ反射因子をそれぞれ $Z_{HH}$ ,  $Z_{VV}$ [ $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ]とすると、レーダ反射因子差 $Z_{DR}$ は、

$$Z_{DR} = 10 \log_{10}(Z_{HH} / Z_{VV}) \quad (3)$$

と定義される。一般に降水粒子は横長の扁平な形状になるため、 $Z_{DR}$ は正の値を取るようになる。そして粒径が大きくなれば扁平度が増すため、 $Z_{DR}$ も大きな値を取るようになる。 $Z_{DR}$ の値は気象レーダーで使用される程度の周波数(2.8~9.5 [GHz]程度)であれば最大で4[dB]程度である。粒子は、最大粒径が6~8 [mm]程度であり、この大きさを越えると複数のより小さい径の粒子に分裂する。先ほど述べたように、雪やあられの場合は、径の大小で扁平度は大きく変化することはない。これらの点から、レーダー反射因子差は降水粒子の形態判別や粒径分布の情報を得ることに有効とされ、降水強度推定精度の向上に効果がある。

次に軸比 $r$ と $Z_{DR}$ の関係について、Bringiら<sup>9)</sup>等を参考に述べる。ここで $\zeta_{DR} = Z_{HH}/Z_{VV}$ とすると、

$$\zeta_{DR}^{-1} = \int r^{\frac{2}{3}} D^6 N(D) dD / \int D^6 N(D) dD \quad (4)$$

と表すことができる。一方、軸比 $r$ をレーダー反射因子で重み付けした平均値を

$$\bar{r}_z = \int r D^6 N(D) dD / \int D^6 N(D) dD \quad (5)$$

と定義すると、式(4)は

$$\zeta_{DR}^{-1} \approx \bar{r}_z^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

と表現できる。また、式(6)は、 $\bar{r}_z^{\frac{2}{3}} \approx \bar{r}_z^{-\frac{2}{3}}$ と近似できる。したがって $Z_{DR}$ は軸比 $r$ をレーダー反射因子で重み付けしたもので表すことができる。

### (3) 伝搬位相差変化率 $K_{DP}$

電波が散乱体積内を伝搬するとき、一般には位相変化が生じる。水平偏波、垂直偏波のそれぞれについてレーダーとの対象標的期間の往復の位相変化を $\phi_{HH}$ ,  $\phi_{VV}$ とすると、等方散乱標的であれば位相差は生じないが、非等方性散乱標的では両者は異なる値をとる。粒径の大きい雨滴のような扁平粒子では、水平偏波による位相遅れが垂直偏波の場合に比べて大きくなるため、単位距離当たりでは $\phi_{HH} > \phi_{VV}$ となる。両者の差を $\phi_{DP}$ とすると、

$$\phi_{DP} = \phi_{HH} - \phi_{VV} \quad (7)$$

となり、これを偏波間位相差と呼ぶ。

$\phi_{DP}$ の距離に対する変化率が伝搬位相差変化率 $K_{DP}$ である。大気のような均質媒質体中でレーダ電波が伝搬する場合、 $K_{DP}$ は伝搬系路上の2点間を往復する間に生じる偏波間位相差 $\phi_{DP}$ の単位距離当たりの差として、

$$K_{DP} = \{\phi_{DP}(r_2) - \phi_{DP}(r_1)\} / 2(r_2 - r_1) \quad (8)$$

で与えられる。また、 $K_{DP}$ は、

$$K_{DP} \approx 0.062 D_m (180 / \lambda) 10^{-3} C_k W \quad (9)$$

で与えられる。 $D$  [mm]は粒径、 $r_1$  [km]はレーダーからの距離、 $\lambda$  [m]はレーダー波長、 $C_k$ は周波数による定数、 $W$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]は雲水量である。また $D_m$  [mm]は粒径を質量で重み付けした平均粒径を粒径分布の中心値を表す。粒径分布 $N(D)$ は、

$$N(D) = N_0 D^{-\mu} \exp[-\Lambda D] \quad (10)$$

と、ガンマ分布で表され、パラメータ $N_0$ ,  $\mu$ ,  $\Lambda$ で決定される。 $Z_{DR}$ と $D_m$ は $\mu$ ,  $\Lambda$ で決まる。定義より $D_m$ は、

$$D_m = \int D^4 N(D) dD / \int D^3 N(D) dD = (4 + \mu) / \Lambda \quad (11)$$

と表される。

$K_{DP}$ は位相変化に起因するパラメータであり、降雨による減衰と距離によるビーム充填率低下に伴う減衰の影響を受けないことが知られている<sup>9)</sup>。

表-1 COBRA主レーダの諸元

レーダ形式	モノスタティックパルス ドップラレーダ
中心周波数	5340MHz (C帯)
尖頭出力	250kW以上(クライストロン, TWTA: 2台)
パルス幅	0.5, 1.0, 2.0 $\mu$ s
パルス繰返し周波数	250~3000Hz
アンテナ直径	4.5m
レドーム直径	8m
交差偏波比	36dB以上
アンテナゲイン	42dB以上
サイドローブレベル	-25dB以下
アンテナ回転速度	水平方向: 0.5~10rpm 鉛直方向: 0.1~3.6rpm

### 3. COBRAの概略

#### (1) COBRAの諸元

COBRAの主レーダーは図-1に示すように沖縄本島北部名護市に設置されている。COBRAの諸元は表-1に示す。また、COBRAの主レーダーは、水平・垂直、 $\pm 45$ 度直線、右旋・左旋円偏波の計6種類の偏波をパルスごとに切り替えて送信することにより、降水粒子の詳細な偏波特性の観測を行うことが可能である。本研究では水平・垂直偏波を用いた。また、大気と降雨による標準的な減衰補正がシステムとして行われている。

現在日本で用いられている気象レーダーでは、レーダ送信管としてマグネトロンが広く用いられている。それに対し、COBRAではクライストロンならびにTWTA（進行波管）を搭載している。これらの送信管の特性として、マグネトロンよりもコヒーレントな位相情報を得ることができる点が挙げられる。したがって、より精度よく偏波パラメータを観測することができる。特にTWTAの利点として、低出力の送信電力で観測が可能という点がある。

TWTAのパルス圧縮技術の基本手法は、特殊な変調をした広いパルス幅の送信信号を用い、受信信号を処理する際に復調を施して狭いパルス幅と観測距離分解能がほぼ等価となる受信信号を得ることである。これにより、距離分解能とピーク電力を変えることなく、等価的にパルス内に含まれる全電力を短い時間に集中させることができる。また、ピーク送信電力を抑えることが可能なため、隣接するレーダーとの相互干渉を避ける手法としても注目されている。しかし、パルス圧縮方式には、パルス幅が広いためにレーダー近傍が不可視領域になる問題がある。そこで、COBRAではTWTAによる短パルス（パルス圧縮なし）方式とパルス圧縮方式を切り替えて観測するDual Cycle観測を用いている。この方式をCOBRA+と呼び、レーダー近傍の領域では短パルス方式により観測されたデータを、遠

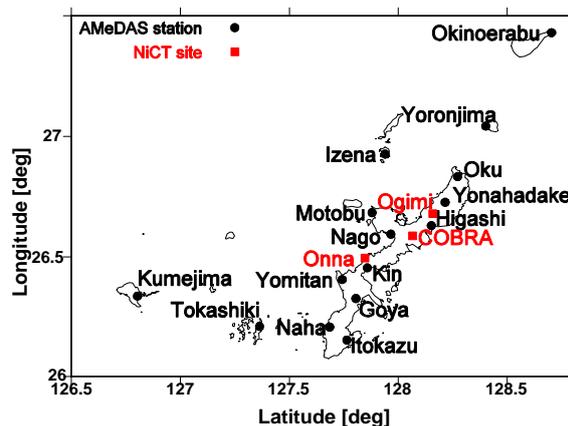
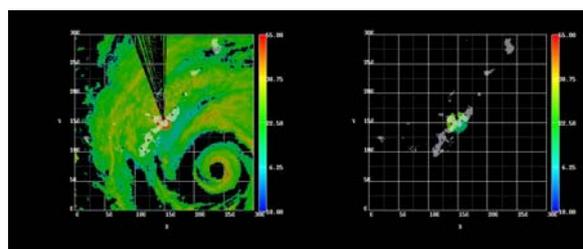


図-1 COBRAと観測所の位置関係



パルス圧縮

パルス圧縮なし

図-2 TWTAを用いた観測

方の観測領域ではパルス圧縮方式で得られたデータを用いて、両者を補間することにより不可視領域のない観測を行う手法である。その様子を図-2に示す。

#### (2) データの処理方法

本研究で使用したデータセットを表-2に示す。2004年6月8日は梅雨前線による雨で、層状性降雨の中に、線状の対流性降雨が観測されている。一方、2004年9月5日は台風18号が沖縄本島を通過したため台風性降雨が観測されている。利用する全期間において10分毎にボリュームスキャンが実施されているが、地上雨量の推定精度の検証が本論文の目的であるため、最低仰角である0.5度仰角のデータを使用した。

まず、偏波間位相差 $\phi_p$ から伝搬位相差変化率 $K_{DP}$ の値を算定する前に、 $\phi_p$ をビーム方向に移動平均をとり、平滑化を行った。レーダーで受信される信号が激しい変動をしているため平均化処理を行う必要がある。平滑化により $\phi_p$ の短い距離における異常な変化が抑えられながらも、その地点で観測されている特長を捉えることができる。このビーム方向に約3kmで移動平均した $\phi_p$ から $K_{DP}$ を求めた。しかし、所々ノイズが強く残っていたため、 $K_{DP}$ もビームに沿って約3kmで移動平均を取った。本研究ではこの状態のデータを元にメッシュデータに置き換える処理を施した。

メッシュデータは、メッシュの中心から最も近いビームを選択した後、重み付けせずにそのメッシュの値とした。まずは、100[m] × 100[m]メッシュでメッ

表-2 観測期間と観測モード

Date	Start time	End time	Obs.mode	Rec.mode
2004/6/8	3 : 00	4 : 30	COBRA (Klystron)	Normal
	4 : 40	5 : 30	COBRA + (TWTA)	Dual Cycle
	11 : 00	15 : 50	COBRA (Klystron)	Normal
	16 : 00	18 : 30	COBRA (Klystron)	Normal
2004/9/5	0 : 00	8 : 00	COBRA + (TWTA)	Dual Cycle
	13 : 00	19 : 50	COBRA (Klystron)	Normal

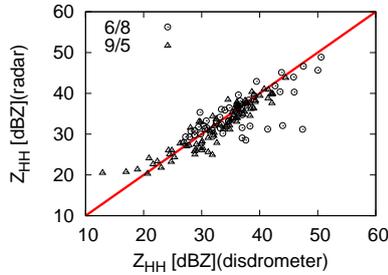


図-3  $Z_{HH}$ の観測結果

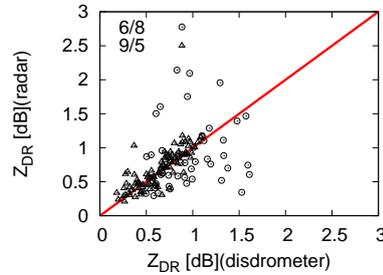


図-4  $Z_{DR}$ の観測結果

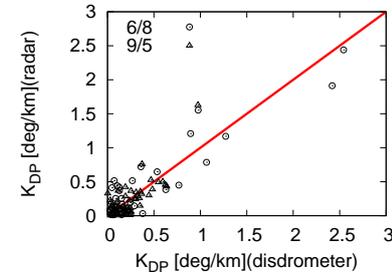


図-5  $K_{DP}$ の観測結果

シュの値を求め、その上で、1000[m]×1000[m]メッシュ内で空間平均をとることとした。ここで、まずメッシュサイズを100[m]としたのは、直交座標系のデータとしてレーダー観測分解能より小さな基本データを用意し、その基本データから、より大きな様々なメッシュサイズのデータに変換するという方針をとったからである。

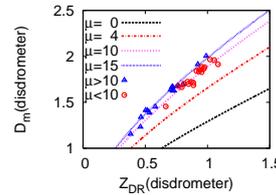


図-6 雨滴計で計測された $Z_{DR}$ と $D_m$ 関係

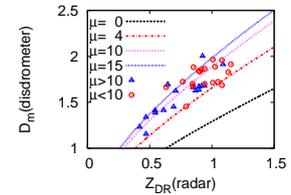


図-7 レーダーで観測された $Z_{DR}$ と雨滴計で計測された $D_m$

#### 4. 観測結果

偏波パラメータの検証にあたりディストロメータと2DVDを用いて、COBRAで観測されている偏波パラメータについて検証する。

ディストロメータと2DVDは雨滴粒径分布を観測することができる雨滴計である。ディストロメータは振動コーンに雨滴が衝突する運動量をパルス電力に変換し、予め同定しておいた雨滴粒径に対応付ける仕組みとなっている。2DVDは異なる高度に設けられた窓からのビデオ撮影を通して、降水粒子のタイプ、粒径、扁平度、落下速度を自動観測する測器である。

計測地点はCOBRAから約15 km地点の大宜味大気観測施設にあるディストロメータと2DVDを用いて解析を行う。データは、6月8日においては2DVDのデータ、9月5日はディストロメータのデータとなる。COBRAと大宜味大気観測施設、またアメダスサイトとの位置関係は図-1に示したとおりである。

本来ならば、レーダーで観測された瞬間での粒径分布 $N(D)$ のパラメータである $\mu$ と $A$ によって決まる。例えば図-6中の線は $N(D)$ の $\mu$ を0, 4, 10, 15に固定したときに $A$ を順次与えて得られた関係である。そこで実際の降雨を用いて、 $Z_{DR}$ と $D_m$ 関係を通して、 $Z_{DR}$ と $N(D)$ の観測精度について検証する。ここでは比較的 $Z_{DR}$ が精度よく

された雨滴個数を用いる。

表-2に示したすべての観測期間のデータの中で1mm/h以上の降雨が観測されたデータを用いて、図-3に $Z_{HH}$ 、図-4に $Z_{DR}$ 、図-5に $K_{DP}$ の観測結果を示す。縦軸がレーダーで観測された値、横軸にレーダーで観測されたときの地上雨滴計で観測された $N(D)$ を用いて算定した値を示している。図-3より $Z_{HH}$ が精度よく観測されていることがわかる。次に、図-4には、 $Z_{DR}$ についての結果を示している。現在、COBRAでは $Z_{DR}$ の観測の際に校正が完全にできておらず、オフセット値が確認されている。本研究においても1.1dBのオフセット値が確認された。図-4ではその値を考慮した後の状態を示している。また、図-5で $K_{DP}$ の様子を示す。 $K_{DP}$ は降雨が弱いとき、すなわち $K_{DP}$ の値が小さいときにはばらついて観測されているが、 $K_{DP}$ が大きな値を示すにつれてレーダー観測値と $N(D)$ から算定した値が対応している様子が伺える。

$Z_{DR}$ と $D_m$ はともに、(1), (4), (10), (11)式を通して粒径分布 $N(D)$ のパラメータである $\mu$ と $A$ によって決まる。例えば図-6中の線は $N(D)$ の $\mu$ を0, 4, 10, 15に固定したときに $A$ を順次与えて得られた関係である。そこで実際の降雨を用いて、 $Z_{DR}$ と $D_m$ 関係を通して、 $Z_{DR}$ と $N(D)$ の観測精度について検証する。ここでは比較的 $Z_{DR}$ が精度よく



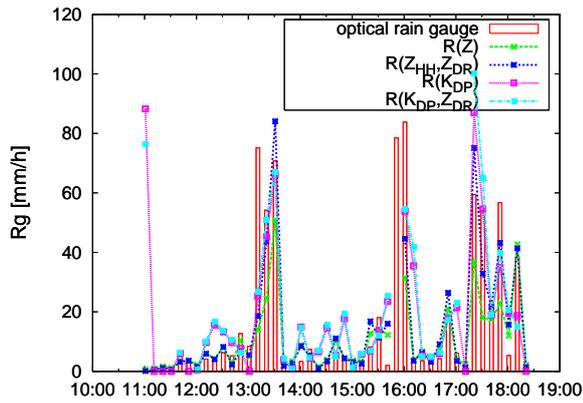


図-9 6/8 11:00~18:30の降雨強度推移の比較  
(大宜味観測所)

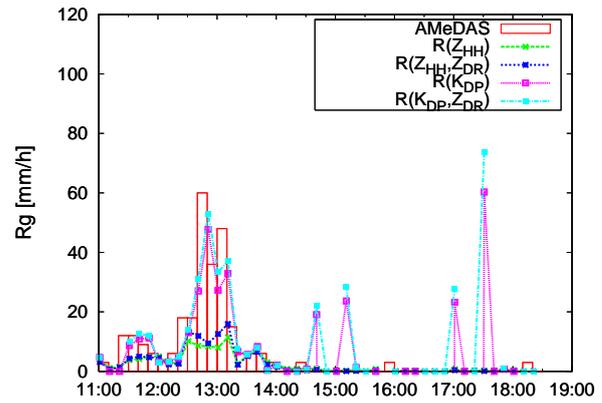


図-10 6/8 11:00~18:30の降雨強度推移の比較  
(与論島)

いる。この原因として、 $Z_{HH}$ は強い降雨によって除去できない減衰の影響が強く出ているが、 $K_{DP}$ においてはその影響があまり出ていないことが考えられる。また14時以降で $K_{DP}$ による推定では大きなエラーが観測されている。しかし、マルチパラメータレーダーの利点、すなわち、複数のパラメータが観測されていることを利用すれば大きな問題にならないと考えられる。この場合であれば、 $Z_{HH}$ が反応していないことからエラーであることがわかる。つまり、降雨の強弱によって使用するパラメータを使い分けることで $Z_{HH}$ のみを用いたときよりもよい精度で推定が可能であると考えられる。

## 6. 結論

以上、本研究では、Cバンドの偏波レーダーで観測された $Z_{HH}$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ を用いて様々な角度から観測精度の検証について研究をおこなった。まず、ディストロメータと2DVDの地上雨滴計を用いた算定値とレーダー観測値で比較検証を行った。さらに $Z_{DR}$ を用いた粒径分布の推定可能性を探った。そして降雨強度と偏波パラメータの直接的な関係を調べるとともに、 $Z_{HH}$ のみを用いた降水強度推定式 $R(Z_{HH})$ と比較して、偏波パラメータも用いた $R(Z_{HH}, \zeta_{DR})$ 、 $R(K_{DP})$ 、 $R(K_{DP}, \zeta_{DR})$ といった降雨強度推定式を用いて降水量の推定精度に対する基礎的研究を行った。

本研究を通して、2004年6月8日の梅雨による降雨と2004年9月5日の台風性降雨のデータを用いて検証した。地上雨滴計のデータとして、2004年6月8日は2DVD、2004年9月5日はディストロメータのともに大宜味におけるデータを用いた。そして、以下の結論を得た。 $Z_{HH}$ と $Z_{DR}$ はレーダー観測値と地上における観測値とを比較するとよい精度で観測されていた。 $K_{DP}$ においても降雨の特徴を捉えることができていた。

地上で観測された降雨強度とパラメータの関係では、地上で強い降雨が観測されるにつれて $Z_{HH}$ と $K_{DP}$ は値が大きくなっていくことが確認できた。

最後に偏波パラメータを用いて換算した降水強度値と地上観測値を比べた結果次のようなことが確認できた。強い降雨で $R(Z_{HH})$ は過小評価していたが、 $R(Z_{HH}, \zeta_{DR})$ ではその傾向が弱まった。これは $\zeta_{DR}$ によって粒径分布の違いを捉えていたためと考えられる。また $R(K_{DP})$ と $R(K_{DP}, \zeta_{DR})$ は強い降雨が観測されているときに比較的精度よく観測されていた。これらの特徴は時系列データで確認するとより鮮明になった。

以上の結果から、十分にCバンドにおける偏波観測の可能性を示すことができた。

## 参考文献

- 1) 吉野文雄, 水野雅光, 水野秀幸, 五十嵐久敬: 二重偏波・ドップラレーダーによる降水観測について, 第32回水理講演論文集, pp.383-388, 1988.
- 2) 松浦直, 佐藤武司, 深見和彦, 金木誠: 直交二偏波レーダーにより観測された雨滴粒径分布の時空間分布特性, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp.18-19, 1999.
- 3) Alexander V. Ryzhkov, Terry J. Schuur, Donald W. Burgess, Pamela L. Heinemann, and Scott E. Giangrande: The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol.86, No.6, pp.809-824, 2005.
- 4) Pruppacher, H. R. and K. V. Beard: A Wind Tunnel Investigation of The Internal Circulation and Shape of Water Drops Falling at Terminal Velocity in Air, Quart. J. Ray. Meteor. Soc., 96, pp. 247-256, 1970.
- 5) Beard, K. V. and C. Chuang: A New Model for the Equilibrium Shape of Raindrops, J. Atmos. Sci., 44, pp.1509-1524, 1987.
- 6) Bringi, V. N. and V. Chandraseker: Polarimetric Doppler Weather Radar, Cambridge Univ. Press, New York, 636 pp, 2001.
- 7) 中川勝広, 中北英一, 佐藤亨, 池淵周一: 降雨タイプに依存した雨滴粒径分布パラメータとその鉛直分布, 水工学論文集, 第41巻, pp.141-146, 1997.