

最新型二偏波ドップラーレーダーを用いた降水量推定精度の向上

中北英一・竹畑栄伸*・中川勝広**

*京都大学大学院工学研究科

** (独) 情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センター

要旨

降雨量推定精度向上を目指した偏波レーダーの研究は 20 年前から国内外で始められ、わが国では国土交通省釈迦岳レーダ雨量計として 1992 年に現業化されている。しかし、技術開発黎明期であったため、大幅な精度向上に至らず、現業化への研究は終了した。この様な中、本研究は、国土交通省の現業レーダーの今後の偏波化を視野に入れ、最先端の C バンド偏波レーダーの観測精度を、ディストロメータによる雨滴粒径分布の観測情報を利用して検証し、偏波パラメータと雨滴粒径分布の関係、さらに偏波パラメータと降水強度の関係を通じてその有意性について検証した後、降水強度推定精度向上の可能性を示す。

キーワード： 偏波レーダー、マルチパラメータレーダー、降雨量推定、レーダ反射因子差、伝搬位相差変化率、雨滴粒径分布

1. はじめに

1. 1 研究の背景

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 (吉野文雄等, 1988)、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 (松浦直等, 1999)。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 (Alexander, 2005)、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 の略) 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 ρ_{HV} 、偏波間位相差 ϕ_{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。

1. 2 研究の方針

本研究では、まず、C バンド偏波レーダーである 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 $R(Z_{HH})$ をはじめとして、偏波パラメータを用いた $R(Z_{HH}, \xi_{DR})$, $R(K_{DP})$, $R(K_{DP}, \xi_{DR})$ といった降雨強度推定式を用いて降水量の推定精度向上に対する基礎的研究を行う。

2. 偏波レーダによる降雨観測に関する諸因子

一般に、レーダーで観測される偏波パラメータには、後方散乱に関するものと位相に関するものがある。降水量推定を目的とする場合は、通常低仰角での観測がなされ、そのような状況の中で偏波レーダによって得られる重要なパラメータは、後方散乱によって得られるレーダー反射因子差 Z_{DR} と位相によるパラメータである伝搬位相差変化率 K_{DP} である。本研究でも重要なこれら二つのパラメータを中心に述べる。

2. 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することが重要になる。

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 を用いて、

$$r = 1.03 - 62D \quad (1)$$

となることを風洞実験をもとに示されている (Pruppacher and Beard, 1970)。このとき粒径 D は、 $0 \leq D \leq 5 \times 10^{-3} [\text{m}]$ とされている。また、より厳密な多項式近似としてBeard and Chuang (1987) が数値モデルにより、

$$r = 1.0048 + 5.7 \times 10^{-1} D - 2.628 \times 10^4 D^2 + 3.682 \times 10^6 D^3 - 1.677 \times 10^8 D^4 \quad (2)$$

を提示している。このとき、粒径 D は、 $0 \leq D \leq 7 \times 10^{-3} [\text{m}]$ の範囲である。

2. 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} , $Z_{VV} [\text{dB}]$ としたとき、レーダ反射因子差 Z_{DR} は、

$$Z_{DR} = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}} \right) \quad (3)$$

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。また、最大粒径は 6~8 [mm]程度で、この大きさを越えると粒子は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 and Chandrasekar (2001) 等を参考に述べる。ここで $\xi_{DR} = Z_{HH}/Z_{DR}$ とすると、

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

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

$$\overline{r_z} = \frac{\int r D^6 N(D) dD}{\int D^6 N(D) dD} \quad (5)$$

と定義すると、式 (4) は

$$\xi_{DR}^{-1} = \overline{r_z^{\frac{2}{3}}} \quad (6)$$

と表現できる。また、式 (6) は、

$$\overline{r_z^{\frac{2}{3}}} = \overline{r_z}^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

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。

2. 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 ϕ_{HH} , ϕ_{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、単位距離あたりでは $\phi_{HH} > \phi_{VV}$ となる。両者の差を ϕ_{DP} とすると、

$$\phi_{DP} = \phi_{HH} - \phi_{VV} \quad (8)$$

となり、これを偏波間位相差と呼ぶ。

ϕ_{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 ϕ_{DP} の単位距離当たりの差として、

$$K_{DP} = \frac{\phi_{DP}(r_2) - \phi_{DP}(r_1)}{2(r_2 - r_1)} \quad (9)$$

で与えられる。また、 K_{DP} は、

$$K_{DP} = 62 D_m \left(\frac{180}{\lambda} \right) 10^{-3} C_k W \quad (10)$$

で与えられ、 D [mm]は粒径、 r_1 [km]はレーダーからの距離、 λ [m]はレーダー波長、 C_k は周波数による定数、 W [g/m³]は雲水量である。また D_m [m]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。ここで、粒径分布 $N(D)$ がガンマ分布に従うとき、

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp[-\Lambda D] \quad (11)$$

と表され、 N_0 、 μ 、 Λ で決定される。このとき、 Z_{DR} と D_m は μ 、 Λ で決まる。定義より D_m は、

$$D_m = \frac{\int D^4 N(D) dD}{\int D^3 N(D) dD} = \frac{4 + \mu}{\Lambda} \quad (12)$$

と表される。

3. 地上観測機器を用いた偏波パラメータのデータ解析

3. 1 COBRA の概略

本研究では、独立行政法人情報通信研究機構 (NiCT) 沖縄亜熱帯計測技術センターが試験運用しているバイスタティック偏波ドップラーレーダー、通称 COBRA で得られたレーダ情報を利用する。COBRA の主レーダーは、水平・垂直、 ± 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。

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。すなわち強度情報のみを利用する従来の気象レーダーではコヒーレントな位相情報を得る必要がなかったため、安価で容易に高出力を得やすいマグネトロンを送信管として一般に用いている。それに対し、COBRA ではクライストロンならびに TWTA (進行波管) を送信管を搭載している。これらの送信管の特性として、コヒーレントな位相情報を得ることができる

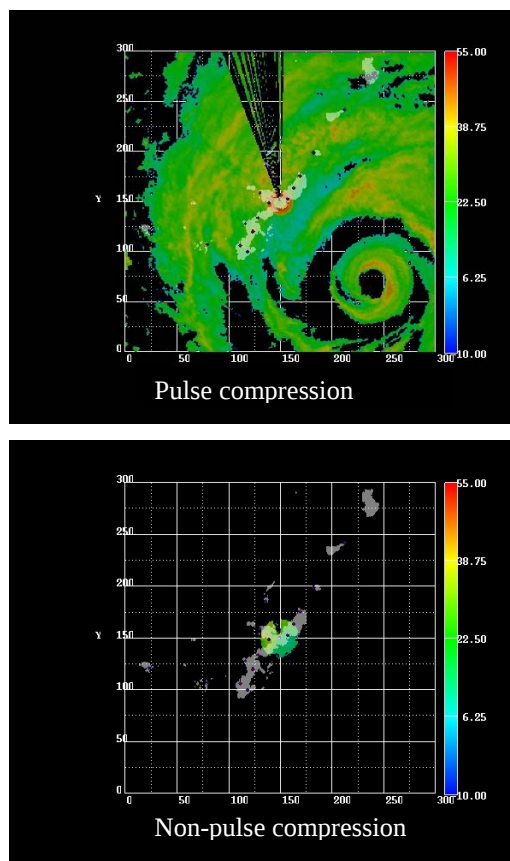


Fig. 1 Observed radar reflective factors [dBZ] using TWTA.

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。これは近年世界的な無線 LAN 需要に対処するため、特に気象レーダーの周波数帯では周波数の割り当ての縮小や他の無線局との干渉を抑圧する技術の開発の実用化が求められているためである。そして、低い送信電力でも広いパルス幅でパルス圧縮技術を用いて従来のレーダーと同等以上の分解能や観測範囲が実現されている。

Table 1 Timing and observation mode of used radar data

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

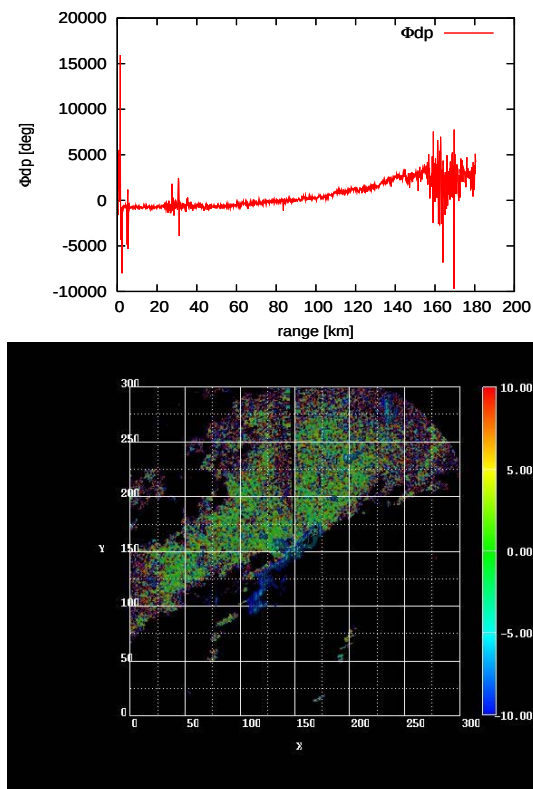


Fig. 2 Observed differential phase ϕ_{DP} .

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ずに、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。

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。すなわち、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 Fig 1 に示す。

3. 2 データの処理方法

本研究で使ったデータセットを Table 1 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向上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。

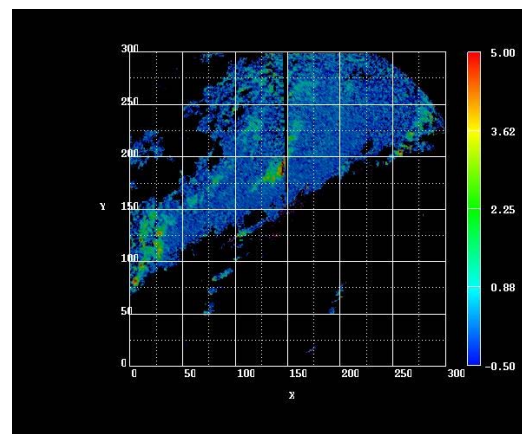


Fig. 3 Estimated specific differential phase K_{DP} using differential phase ϕ_{DP} moving averaged over 3000 [m] $\times$ 3000 [m].

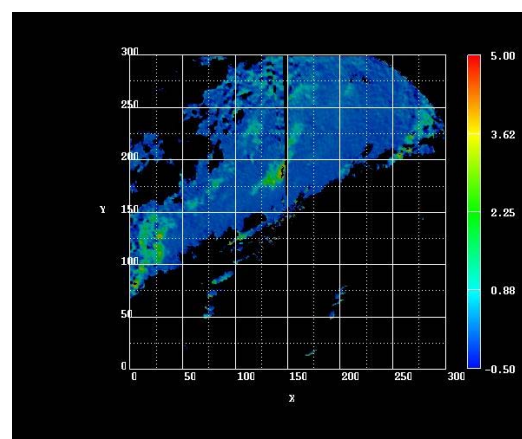


Fig. 4 Estimated specific differential phase as moving averaged K_{DP} shown in fig. 3 over 3000 [m] $\times$ 3000 [m].

まず、偏波間位相差 ϕ_{DP} から伝搬位相差変化率 K_{DP} の値を算定する前に、 ϕ_{DP} をビーム方向に移動平均をとり、平滑化を行った。これは Fig 2 が示すようにレーダーで受信される信号は激しい変動をしている。そのため平均化処理を行う必要がある。したがって、パルス幅 150 [m] ごとにサンプリングしたデータを一つの単位としてビーム方向に、単純移動平均をとった。これにより ϕ_{DP} の短い距離での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られている。このビーム方向に 21 レンジで移動平均した ϕ_{DP} から K_{DP} を求めた結果が Fig 3 である。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 21 レンジで移動平均を取ると Fig 4 となった。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、メッシュの大きさは100 [m]メッシュの大きさにした。その上で、3000 [m]×3000 [m]メッシュの空間平均をとることとした。

ここで、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。Fig 3, Fig 4を見ると、まるで極座標系で図を描いたかのように、北側に伸びる無データ域 (shadow 域) がモザイク状にならずに細い放射状に広がっている。すなわち、直交座標系における100 [m]というメッシュサイズはレーダー画像がモザイク状にならない十分な空間分解能である。

3. 3 偏波パラメータの観測精度解析

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。Fig 5に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を示す。また、Table 2に恩納村にある沖縄亜熱帯計測技術センターと大宜味大気観測施設で観測されたデータの有無を示す。

本来ならば、レーダーで観測された瞬間での粒径分布を知ることができればよいが、ディストロメータで $N(D_i)$ を求めるにあたり、中川(1997)によると粒径分布を同定するには5分程度の蓄積時間が必要とされているため、レーダにより観測された時点の前後から合計5分間蓄積された雨滴個数を用いる。

ディストロメータの観測は0.3[mm]~5.0 [mm]までの19の階級と5.0 [mm]以上の階級の計20の各階級で計測された雨滴の個数が得られる。2DVDは0.1[mm]毎の粒径分布が得られる。したがって観測された雨滴の個数から雨滴粒径分布 $N(D)[m^{-3}mm^{-1}]$ に変換するには、

$$N(D_i) = \frac{n(i)}{ST_{obs}v_r(D_i)\Delta D} \quad (13)$$

を用いる。ここで、 D_i は各階級の中央値[mm]、 ΔD_i は階級*i*における粒径の階級幅、 $n(i)$ は T_{obs} 時間内に観測された階級*i*の雨滴の個数、 T_{obs} は観測時間(60[sec])、 S はディストロメータの感知部の表面積(5000[mm²])、 $v_r(D_i)$ は雨滴の落下速度である。したがって、ディストロメータから算定できるレーダー反射因子 Z_g とレーダー反射因子差 Z_{DRg} は、

$$Z_g = \sum_i D_i^6 N(D_i) \Delta D \quad (14)$$

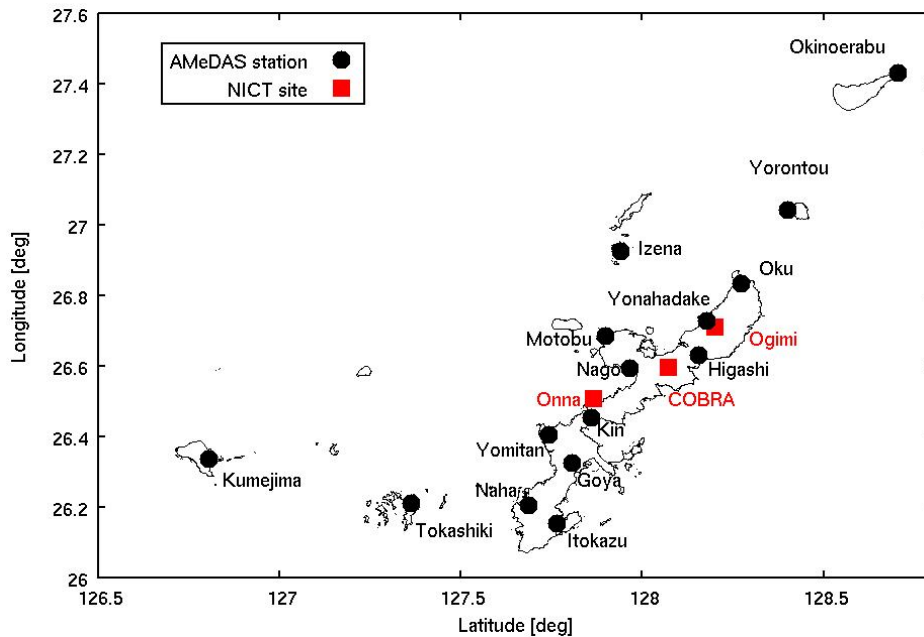


Fig. 5 Locations of COBRA and ground observation sites. Black colored names indicate AMeDAS observation sites.

Table 2 Site names and timing of observations done by optical rain gage, disdrometer and two-dimensional video distrometer

		6/8	9/5
Onna	Disdrometer	×	×
	Optical rain gage	○	○
Ogimi	Disdrometer	×	○
	2DVD	○	×
	Optical rain gage	○	×

$$Z_{DRg} = 10 \log_{10} \frac{\sum_i D_i^6 N(D_i) \{1 + \lambda_z (\varepsilon_r - 1)\}^2 \Delta D_i}{\sum_i D_i^6 N(D_i) \{1 + \frac{1}{2} (1 - \lambda_z) (\varepsilon_r - 1)\}^2 \Delta D_i} \quad (15)$$

で計算できる。ここで λ_z は扁平率に依存する因子で、

$$\lambda_z = \frac{1 + f_r}{f_r} \left(1 - \frac{1}{f_r} \tan^{-1} f_r\right) \quad (16)$$

で表され、 f_r は軸比 r を用いて、

$$f_r^2 \equiv \frac{1}{r^2} - 1 \quad (17)$$

で定義する。また、 ε_r は比誘電率である。さらに、雲水量 W_g と粒径分布の中心 D_{mg} も求めることができ、式(10)より、伝搬位相差変化率 K_{DPg} は、

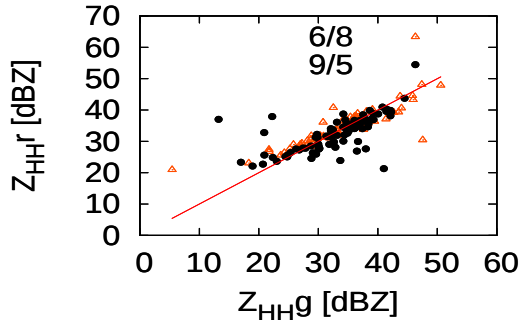


Fig. 5 Comparison between radar reflective factor estimated through observed DSD (Z_{HHg}) and observed by radar (Z_{HHr}). (0 : 00 ~ 8 : 00 on Sept 5, 2004)

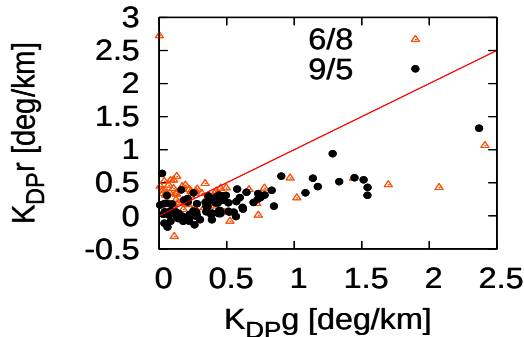


Fig. 7 Comparison between specific differential phase estimated through observed DSD (K_{DPg}) and observed by radar (K_{DPr}). (0 : 00 ~ 8 : 00 on Sept 5, 2004)

$$K_{DPg} = 62 D_{mg} \left(\frac{180}{\lambda}\right) 10^{-6} C_k W_g \quad (18)$$

となる。このとき、 $C_k = 3.75$ 、 $\lambda = 5.34 \times 10^9$ とした。以上の計算式を用いて推定される偏波パラメータとレーダから得られる偏波パラメータと比較した。また、以後水平偏波によるレーダー反射因子 Z は Z_{HH} と記述する。

3. 4 各偏波パラメータの観測精度

全期間のデータを用いて、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。Fig 5 より Z_{HH} が精度よく観測されていることがわかる。次に、Fig 6 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、オフセットが確認されている。本研究においても1.1[dB]のオフセットが確認された。Fig 6 ではその値を考慮した。また、Fig 7 で K_{DP} の様子を示す。 K_{DP} は少しバイアスがあるが、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), (11), (12)式を通して、粒径分布の μ と A によって決まる。そこで、9月5日の0 :

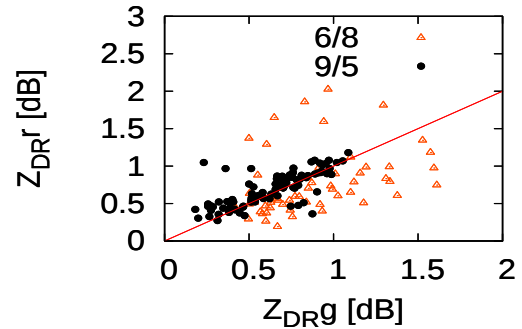


Fig. 6 Comparison between differential reflectivity estimated through observed DSD (Z_{DRg}) and observed by radar (Z_{DPr}). (0 : 00 ~ 8 : 00 on Sept 5, 2004)

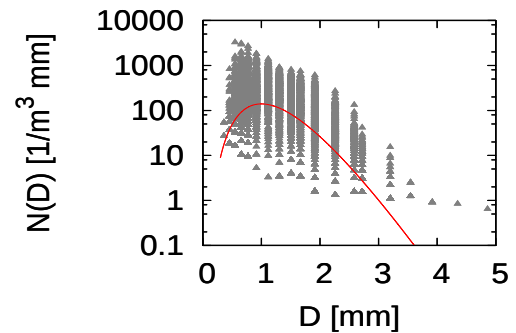


Fig. 8 Observed DSD by Disdrometer during 0 : 00 ~ 8 : 00 on Sept 5, 2004. Red colored line indicates identified optimal gamma type DSD with $\mu = 5.5$.

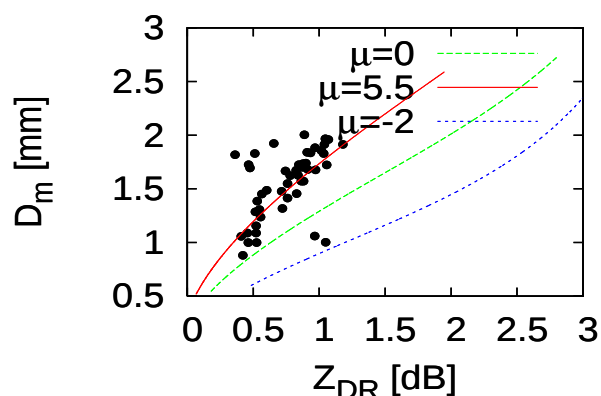


Fig. 9 Comparison between radar-observed Z_{DR} and D_m non-parametrically estimated from observed DSD. Colored lines indicate theoretical relation in the cases of parameter $\mu = 0, 2, 5.5$ of gamma type DSD.

00～8:00における観測粒径分布では μ の値は5.5であり、その様子をFig 8に示す。このときの $Z_{DR} \sim D_m$ 関係をFig 9に示す。プロットは横軸にレーダー観測値 Z_{DR} 、縦軸に雨滴計で観測された粒径分布から算定された D_m を示しており、図中の線は粒径分布の μ をそれぞれ0, 5.5, -2とした時の $Z_{DR} \sim D_m$ 関係を示している。ここでは Z_{DR} のオフセットを考慮しており、 Z_{DR} は μ が5.5の時の $Z_{DR} \sim D_m$ 関係に一致している様子が確認できる。すなわち、 Z_{DR} が粒径分布の特徴を捉えられていると考えられる。

4. 降雨量推定精度に関する解析

4. 1 降雨強度推定式

降雨強度を推定するにあたり、本研究ではBringi and Chandrasekarで提案されているCバンドにおける推定式を用いて解析を行った。それらの推定式をTable 3に示す。ここで f [GHz]はレーダ周波数を表す。

4. 2 偏波パラメータと降雨の関係

解析に使用したデータは6月8日のレーダーのデー

Table 3 Formulas used for estimating rainfall intensity

$R(Z_{HH}) = (Z_{HH}/B)^{1/\beta}$ ($B=200, \beta=1.6$)
$R(Z_{HH}, \zeta_{DR}) = c Z_{HH}^a \zeta_{DR}^b$ ($a=0.91, b=-2.09, c=0.0058$)
$R(K_{DP}) = 129(K_{DP}/f)^b$ ($b=0.85, f=5.34$)
$R(K_{DP}, \zeta_{DR}) = c K_{DP}^a \zeta_{DR}^b$ ($a=0.89, b=-0.72, c=37.9$)

タを用いて、沖縄垂熱帯計測技術センター（恩納）と大宜味大気観測施設における光学式雨量の計測値を地上雨量値として比較した。光学式雨量計は1分ごとの積算雨量を計測できることからレーダーで観測された瞬間の降雨強度と比較した。Fig 10ではレーダ反射因子 Z_{HH} と雨量値、Fig 11では伝搬位相変化率 K_{DP} と雨量値との比較を示す。ともに横軸が地上における観測値、縦軸がレーダーにおける観測値を示している。

K_{DP} は降雨強度が強くなるにしたがって大きくなるが、しかし降雨強度が小さいときには値がばらつく結果となった。これは K_{DP} の特性として弱い降雨においてはノイズが混じりやすいことをよく表している。

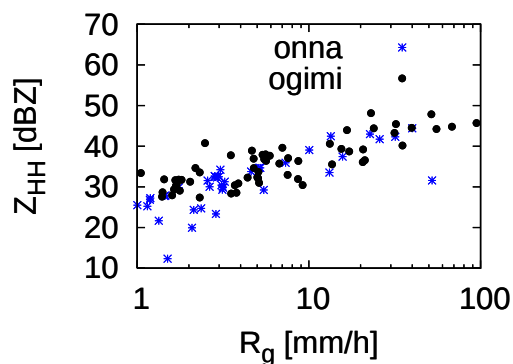


Fig. 10 Comparison between 1-minute rainfall intensity observed by optical raingage and radar-observed Z_{HH} .

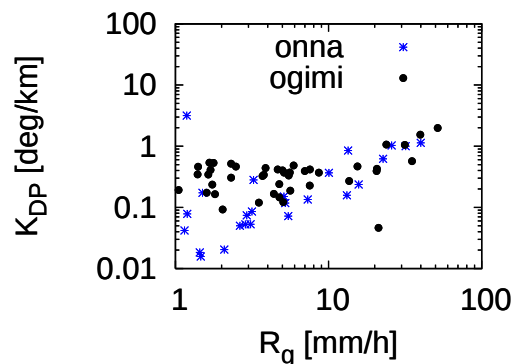


Fig. 11 Comparison between 1-minute rainfall intensity observed by optical raingage and radar-observed K_{DP} .

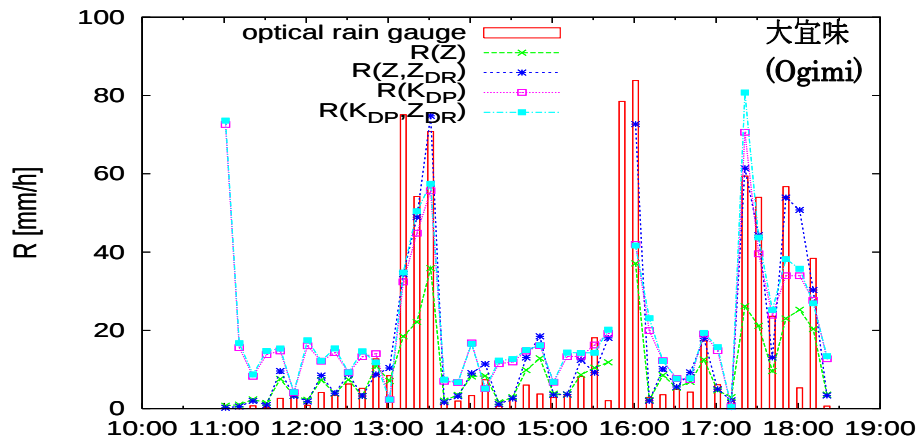


Fig. 12 Time series of 1-minute rainfall intensity observed by optical rain gauge in Ogimi and rainfall intensities estimated from radar observations using formula shown in table 3.

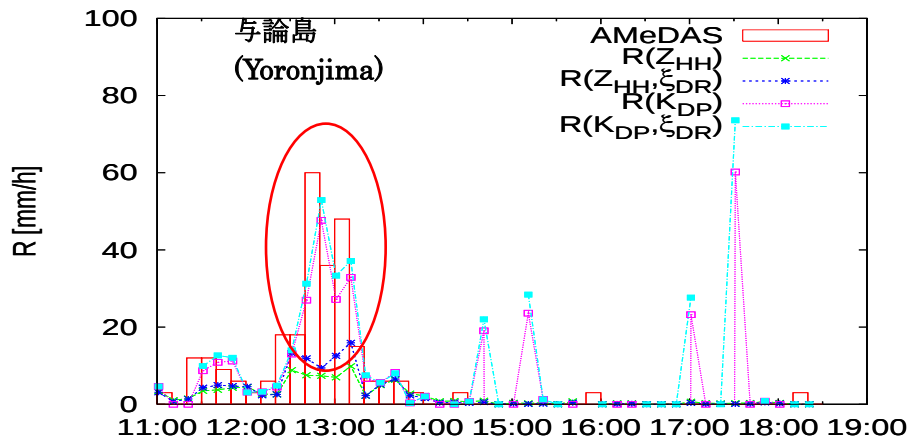


Fig. 13 Time series of 10-minute rainfall intensity observed by AMeDAS in Yoronjima and rainfall intensities estimated from radar observations using formula shown in table 3.

4. 3 降雨強度推定

次に先ほど述べた降雨量推定式を用いて推定する。解析期間は6月8日の11:00から18:30までとし、大宜味観測所における光学式雨量計を用いる。このときも1分雨量値から降水強度を求め、レーダーで得られた値を用いて推定値と比較した。また、レーダーで観測された Z_{DR} は先ほど述べたオフセットを考慮した。その結果をFig 12に示す。この結果、 $R(Z_{HH})$ と $R(Z_{HH}, \xi_{DR})$ を比較すると、最適化された定数ではないが、 Z_{HH} のみを用いるときに比べ ξ_{DR} を用いることで強い降雨をより正確に推定できている。さらに K_{DP} による推定においては20mm/h以上の強い降雨において Z_{HH} を用いたときよりもよりよい精度で降雨強度を推定が可能であることを示している。もちろん、20mm/hより弱い降雨においてはあまり精度よく推定ができていない結果ではあるが、4.2においても確認されたが、弱い降雨

においてノイズが混じりやすいことに起因すると考えられる。

次に、Fig13 に与論島のAMeDASで観測された降雨強度との比較を示す。この時の降雨強度は10分の平均降雨強度で表示されている。13時付近において Z_{HH} を用いた推定値では推定強度が小さく観測されている。一方で K_{DP} においては雨が強く降った様子を正確に捉えられている。この原因として、 Z_{HH} は強い降雨によって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。

5. おわりに

以上、本研究では、Cバンドの偏波レーダで観測された 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向上に対する基礎的研究を行った。そして、以下の結論を得た。

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は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。その結果、 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} においてはバイアスがかかって過小評価されていたが降雨の特徴を捉えることができていた。

次に、レーダー観測 Z_{DR} が地上で観測された粒径分布の中心値 D_m を捉えられるかの妥当性を検証した。結果は雨滴粒径分布の特徴を捉え両者の関係を示せた。

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 ζ_{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

- 吉野文雄, 水野雅光, 水野秀幸, 五十嵐久敬 (1988) : 二重偏波・ドップラレーダによる降水観測について, 第32回水理講演論文集, pp.383-388.
- 松浦直, 佐藤武司, 深見和彦, 金木誠 (1999) : 直交二偏波レーダ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.
- 中川勝広 (1997) : 雨滴粒径分布の鉛直構造解析を基礎にしたレーダーによる降雨量推定手法の構築に関する研究, 京都大学博士論文.
- Alexander V. Ryzhkov, Terry J. Schuur, Donald W. Burgess, Pamela L. Heinemann, and Scott E. Giangrande (2005) : The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification, Bulletin of the American Meteorological Society: Vol.86, No.6, pp.809-824.
- Pruppacher, H. R. and K. V. Beard (1970) : A Wind Tunnel Investigation of The Internal Circulation and Shape of Water Drops Falling at Terminal Velocity in Air, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96, pp. 247-256.
- Beard, K. V. and C. Chuang (1987) : A New Model for the Equilibrium Shape of Raindrops, J. Atmos.Sci., 44, pp.1509-1524.
- Bringi, V. N. and V. Chandraseker (2001) : Polarimetric Doppler Weather Radar, Cambridge Univ.Press, New York, 636 pp.

Improvement of Precipitation using the Latest Dual Polarimetric Radar

Eiichi NAKAKITA, Hidenobu TAKEHATA*, Katsuhiro NAKAGAWA**

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

** National Institute of Information and Communications Technology

Synopsis

Dual polarimetric radar has been developed and partly utilized in meteorology and hydrology in these twenty years because its potential ability in estimating drop size distribution (DSD) and in discriminating precipitation type. Meantime, Ministry of Infrastructure, Land and Transportation (MILT) in Japan put Shakadake operational C band Radar 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 Doppler 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_D using observed DSD, respectively. However, K_{DP} has a little bias. Also, this study shows “Radar observed $Z_{DR} \sim D_m$ of observed DSD” relation is consistent with observed DSD. Parameter from the polarization radar has high possibility to improve real-time rainfall estimation.

Keywords: polarimetric radar, multi-parameter radar, QPE, differential radar reflectivity, specific differential phase, drop size distribution