

Cバンド偏波レーダーによる 降雨量推定アルゴリズムの構築に関する研究

STUDY ON THE CONSTRUCTION OF THE OPERATIONAL RAINFALL ESTIMATE ALGORITHM WITH THE LATEST C-BAND POLARIMETRIC RADAR

中北 英一¹・竹畑 栄伸²・中川 勝広³

Eiichi NAKAKITA, Hidenobu TAKEHATA and Katsuhiko NAKAGAWA

¹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)

²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)

³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) .

Improvement of quantitative precipitation estimation (QPE) is one of the primary benefits provided by polarization radars. Ministry of Land, Infrastructure and Transportation Japan (MLIT) put Shikadake 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, first, this paper compares the performance of the conventional $R(Z_{HH})$ relation and three polarimetric relations, which are $R(Z_{HH}, Z_{DR})$, $R(K_{DP})$, $R(K_{DP}, Z_{DR})$. At lower rain rates, the combination of K_{DP} and Z_{DR} is less efficient because K_{DP} becomes noisy. Next in order to improve QPE, a few combinations of estimation equations for operational purpose is proposed, considering the characteristic of those relations. Also validations with some other algorithms are conducted. As a result, the proposed algorithms improve the estimation of hourly rainfall and accumulated total rainfall.

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¹⁾、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²⁾。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なかった。その後海外ではアメリカ³⁾、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、現在世界で数が少なく、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 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。

偏波レーダーを用いた降雨量推定式は様々に提案されている。それらは利点と欠点があるために、状況に応じて使い分ける必要がある。そこで本研究では、降雨量推定精度を向上させるために、複数ある推定式を有効に選択するための最適な方法に関して検証する。

さらに既存のレーダー観測の運用方法による降水量推定精度に対する優位性についても検証する。

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 $D[\text{mm}]$ 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⁴⁾。このとき粒径 D は、 $0 \leq D \leq 9[\text{mm}]$ とされている。また、より厳密な多項式近似としてBeardら⁵⁾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、 $0 \leq D \leq 7[\text{mm}]$ 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} 、 $Z_{\text{VV}}[\text{mm}^6 \text{m}^{-3}]$ とすると、レーダ反射因子差 Z_{DR} は、

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

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⁶⁾等を参考に述べる。ここで $\xi_{\text{DR}} = Z_{\text{HH}}/Z_{\text{VV}}$ とすると、

$$\xi_{\text{DR}}^{-1} = \int r^{7/3} D^6 N(D) dD / \int D^6 N(D) dD \quad (4)$$

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

$$\xi_{\text{DR}}^{-1} \approx \bar{r}_z^{3/7} \quad (6)$$

と表現できる。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。また、式

(6)は、狭い領域の軸比 r において $\bar{r}_z^{7/3} = \bar{r}_z^{7/3}$ と近似できることをJamson⁷⁾によって導かれている。

(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ビーム視線方向の散乱体積間の往復による位相変化を ϕ_{HH} 、 ϕ_{VV} とすると、標的が等方性散乱体であれば位相差は生じないが、非等方性散乱体であれば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 $\phi_{\text{HH}} > \phi_{\text{VV}}$ となる。両者の差を ϕ_{DP} とすると、

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

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、

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

で与えられる。また、 K_{DP} は、

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

で与えられる。 D [mm]は粒径、 r_1 [km]はレーダーからの距離、 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 [mm]は粒径を質量で重み付けした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 、 μ 、 Λ で決定される。 Z_{DR} と D_m は μ 、 Λ で決まる。したがって、定義より粒径分布の中心値 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⁹⁾。

表-1 COBRA諸元

中心周波数	5340MHz
尖頭出力	250kW以上 クライストロン2台
パルス幅	0.5,1.0,2.0 μ s
パルス繰り返し周波数	250-3000Hz
アンテナ直径	4.5m
ビーム幅	0.9度
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
サイドロープレベル	-25dB以下 (片道)
アンテナ回転速度	水平 : 0.5-10rpm 鉛直 : 0.1-3.6rpm

表-2 降雨強度の精度評価

NE	$R(Z_{HH})$	$R(Z_{HH}, Z_{DR})$	$R(K_{DP})$	$R(K_{DP}, Z_{DR})$
(全範囲)	-0.168	-0.563	0.644	0.492
$(0 \leq R_g \leq 5)$	0.337	-0.446	4.769	4.351
$(0 \leq R_g \leq 10)$	0.056	-0.535	1.752	1.515
$(5 \leq R_g)$	-0.265	-0.586	-0.147	-0.247
$(10 \leq R_g)$	-0.342	-0.586	-0.220	-0.304
RMSE	$R(Z_{HH})$	$R(Z_{HH}, Z_{DR})$	$R(K_{DP})$	$R(K_{DP}, Z_{DR})$
(全範囲)	6.601	7.278	15.752	15.276
$(0 \leq R_g \leq 5)$	2.826	2.179	18.298	17.702
$(0 \leq R_g \leq 10)$	3.492	3.324	16.053	15.505
$(5 \leq R_g)$	10.178	11.587	10.094	9.922
$(10 \leq R_g)$	14.805	16.949	13.950	13.924

3. 降雨量推定精度

(1) データセット

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、 ± 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。

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] $\times$ 100[m]メッシュでメッシュの値を求め、その上で、1000[m] $\times$ 1000[m]メッシュ内で空間平均をとることにした。

観測期間は2004年6月8日11:00-18:30(UTC)、2004年9月5日0:00-8:00と13:00-19:50(UTC)である。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、低仰角である0.9度仰角のデータを使用した。地上雨量計は、図-1に示した15地点のアメダス観測値と、恩納村の沖縄亜熱帯計測技術センターと大宜味大気観測所に設置している光学式雨量計のデータも使用する。アメダスの雨量値は10分雨量値を用い、光学式雨量計は1分毎のデータがあるので、必要に応じて、10分値などに積算して使用する。

(2) 降雨量推定精度

それぞれ4つの推定式の特徴を捉えるために、レーダーで観測された瞬間のアメダスの10分雨量値から求めた10分平均降雨強度と、レーダーで観測された瞬間のパラメーターを用いて4つの推定式からの推定値を比較した(図-2)。 $R(Z_{HH})$ で用いた B 、 β は大宜味大気観

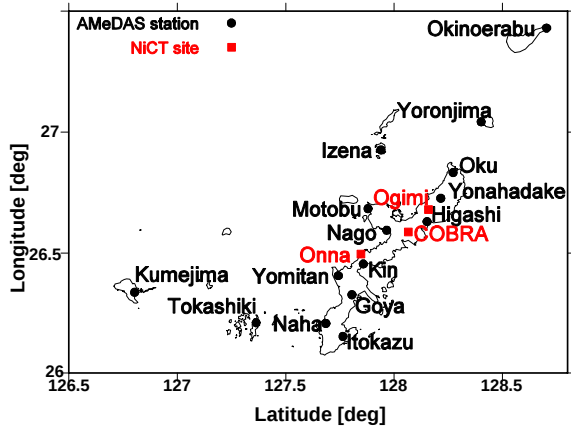


図-1 COBRAと観測所の位置関係

(4) 降雨強度推定式

レーダー反射因子 Z_{HH} を用いた推定式は、一般にB- β 法が用いられ、降雨強度 $R[\text{mm/h}]$ と $Z_{HH}[\text{mm}^6\text{m}^{-3}]$ とすると、

$$Z_{HH} = BR^\beta \quad (12)$$

と、表される。このとき、 B と β は粒径分布によって変化し、雨の種類でも変化するため時々刻々変化する。

$Z_{HH}[\text{mm}^6\text{m}^{-3}]$ と $Z_{DR}[\text{dB}]$ を用いた最も一般的な式は、Bringi ら⁹⁾によると、

$$R(Z_{HH}, Z_{DR}) = c_1 Z_{HH}^{a_1} 10^{0.1b_1 Z_{DR}} \quad (13)$$

である。Cバンドレーダーでは、 $a_1=0.91$ 、 $b_1=-3.43$ 、 $c_1=5.8 \times 10^{-3}$ が提案されている。 K_{DP} を用いた式は、

$$R(K_{DP}) = 129(K_{DP}/f)^{b_2} \quad (14)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = c_3 K_{DP}^{a_3} 10^{0.1b_3 Z_{DR}} \quad (15)$$

の2つ推定式が提案されている。ここで、 K_{DP} の単位は $[\text{km}^{-1}]$ 、 $f[\text{GHz}]$ はレーダーの周波数であり、 Z_{DR} の単位は $[\text{dB}]$ である。 b_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 はいずれも定数であり、それぞれ、0.85、0.89、-0.72、37.9が提案されている。

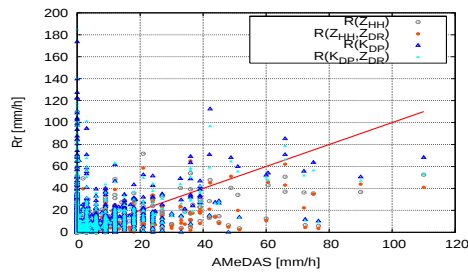


図-2 アメダス観測地点における 10 分降雨強度による散布
図. $R(Z_{HH})$, $R(Z_{HH}, Z_{DR})$, $R(K_{DP})$, $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の比較

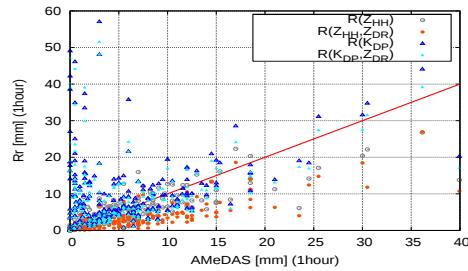


図-3 1時間雨量値の散布図. $R(Z_{HH})$, $R(Z_{HH}, Z_{DR})$,
 $R(K_{DP})$, $R(K_{DP}, Z_{DR})$ の比較

表-3 アルゴリズム

case1	$R_{\text{case1}} = \begin{cases} R(Z_{HH}) & \text{if } R(Z_{HH}) \leq 5 \\ \max[R(Z_{HH}), R(Z_{HH}, Z_{DR}), R(K_{DP}), R(K_{DP}, Z_{DR})] & \text{if } R(Z_{HH}) > 5 \end{cases}$
case2	$R_{\text{case2}} = \begin{cases} R(Z_{HH}) & \text{if } R(Z_{HH}) \leq 5 \\ \max[R(Z_{HH}, Z_{DR}), R(K_{DP}), R(K_{DP}, Z_{DR})] & \text{if } R(Z_{HH}) > 5 \end{cases}$
case3	$R_{\text{case3}} = \begin{cases} R(Z_{HH}) & \text{if } R(Z_{HH}) \leq 5 \\ R(Z_{HH}, Z_{DR}) & \text{if } 5 < R(Z_{HH}) \leq 10 \\ \max[R(Z_{HH}), R(Z_{HH}, Z_{DR}), R(K_{DP}), R(K_{DP}, Z_{DR})] & \text{if } R(Z_{HH}) > 10 \end{cases}$
case4	$R_{\text{case4}} = \begin{cases} R(Z_{HH}) & \text{if } R(Z_{HH}) \leq 10 \\ \max[R(Z_{HH}), R(Z_{HH}, Z_{DR}), R(K_{DP}), R(K_{DP}, Z_{DR})] & \text{if } R(Z_{HH}) > 10 \end{cases}$

測所における雨滴計より最適化された定数を用いている。また、このときの正規化誤差（NE）と平均2乗誤差平方根（RMSE）で評価した結果を表-2に示す。

次に、時間雨量による比較を行った。アメダスの10分雨量値を積算し1時間雨量値としたものを横軸にとり、レーダーで観測された瞬間値から算定した降雨強度を10分平均降雨強度とみなし積算した値を縦軸にとった散布図を図-3に示す。

一般的に言われているように、 K_{DP} を用いた推定値は弱い降雨ではノイズが混じりやすいが、一方で強い降雨においては精度よく推定できている。この期間の $R(Z_{HH}, Z_{DR})$ では、強い降雨の際に弱めに算定される結果となった。したがって、弱い降雨では $R(Z_{HH})$ もしくは $R(Z_{HH}, Z_{DR})$ 、そして高精度が期待できる強い降雨では $R(K_{DP})$ もしくは $R(K_{DP}, Z_{DR})$ を中心に用いるといったように、それぞれの推定式の特徴を活かしたアルゴリズムを構築することで、より高精度に降雨量予測が行える

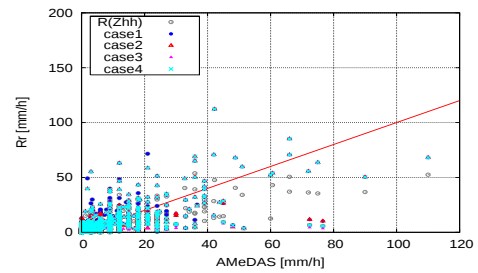


図-4 アメダス観測地点における 10 分降雨強度による散布
図. アルゴリズムの精度評価

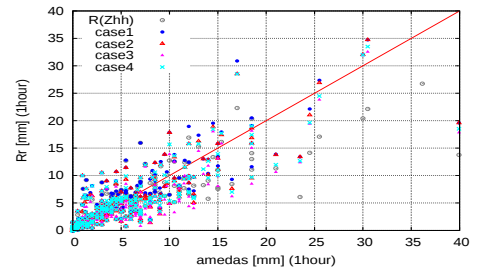


図-5 1時間雨量値の散布図. アルゴリズムの精度評価

ことが期待できる。

(3) アルゴリズム構築に関する検証

表-2より、本研究では弱い降雨として、5mm/hもしくは10mm/hを閾値として与える。次に、NEの値から、5mm/h以上になると過小評価する傾向にあることがわかる。そのため、推定式の中で最も大きく推定できる式を選択する。以上のことを考慮し、表-3の4つのケースについて比較検証する。

4つのケースについて、横軸にアメダス10分雨量値から算定した10分平均降雨強度、縦軸にレーダー観測値より表-3のアルゴリズムを通じて算定した降雨強度を表す散布図を図-4に示す。さらに、横軸にアメダス10分雨量値から積算した1時間雨量値、縦軸にレーダー観測値から10分平均降雨強度として算定した1時間雨量値を表す散布図を図-5に示す。このとき、case1~4に対して、10分平均降雨強度に対するNEは、-0.018, -0.112, -0.250, -0.129であり、そのRMSEはそれぞれ、6.697, 6.487, 6.859, 6.540[mm/h]であった。

次に、梅雨性降雨イベントと台風性降雨イベントにおける総降雨量について検証する。図-6に与那覇岳観測所、図-7に奥観測所の結果を示す。それぞれの降雨イベントにおいてアメダス観測値の積算雨量と、レーダー観測値から算定した降雨強度を10分平均降雨強度とみなした積算雨量を比較している。梅雨性降雨イベントで、奥観測所上空を11:00-12:00[UTC]に発達した対流性降雨域が通過しており、また、与那覇岳上空には13:00, 16:00そして18:00[UTC]頃に対流性降雨が通過している。その際に $R(Z_{HH})$ では過小評価したが、case1-4で

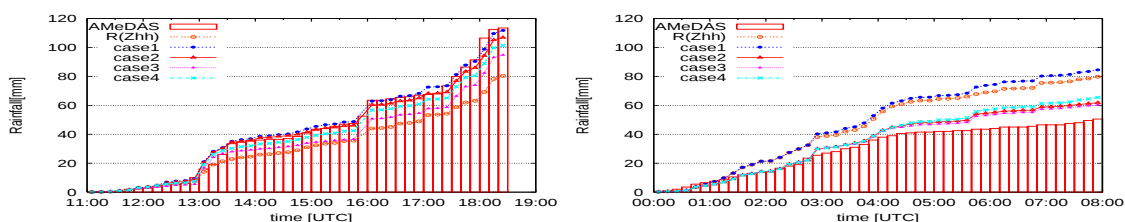


図-6 与那覇岳観測所における梅雨性降雨と台風性降雨の総降雨量の比較. 左図が2004年6月8日11:00-18:30(UTC)における梅雨性降雨の積算雨量, 右図が2004年9月5日0:00-8:00(UTC)における台風性降雨の積算雨量.

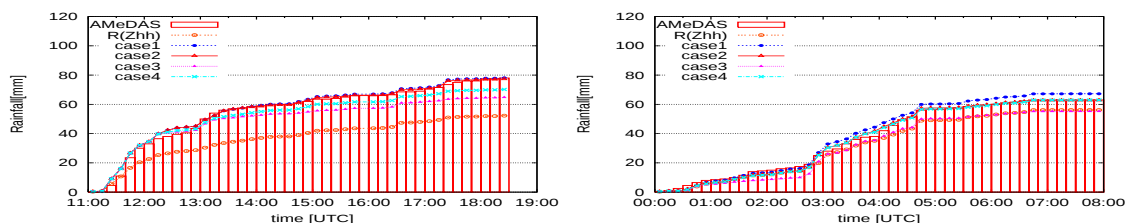


図-7 奥観測所における梅雨性降雨と台風性降雨の総降雨量の比較. 左図が2004年6月8日11:00-18:30(UTC)における梅雨性降雨の積算雨量. 右図が2004年9月5日0:00-8:00(UTC)における台風性降雨の積算雨量.

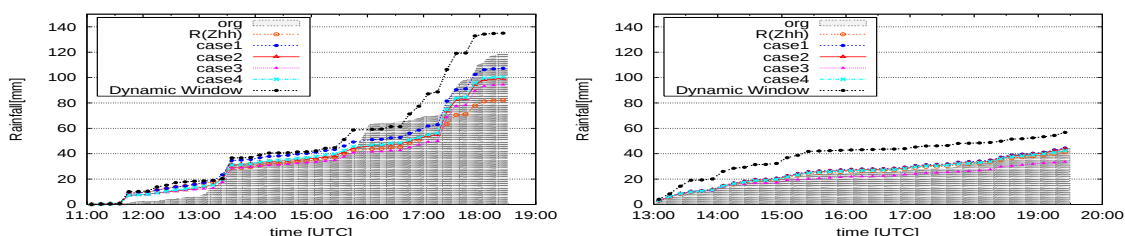


図-8 大宜味大気観測所における、梅雨性降雨と台風性降雨の総降雨量の比較. 左図が2004年6月8日11:00-18:30(UTC)における梅雨性降雨の積算雨量. 右図が2004年9月5日13:00-19:30(UTC)における台風性降雨の積算雨量.

は $R(Z_{HH})$ の閾値の差が出ている. 例えば, case3とcase4では $R(Z_{HH})$ が10mm/h以上となって K_{DP} を用いた推定式を選択することになる. そのため, 閾値を低く設定したcaseだと強い降雨に対応することができる. その結果, 最終的な積算雨量値に差が出たと考えられる. 一方で, 台風性降雨では一時間に10mm前後の雨が降り続いていた. 与那覇岳観測所において, case1とcase2では K_{DP} のノイズの影響で精度が低くなった. したがって, さらなる精度向上を図るために, $R(Z_{HH})$ のみの閾値の設定だけでなく, 偏波パラメータを用いた気象現象による分類(例えば, 対流性や層状性の降雨の分類)から推定式を選択するなどの方法が考えられ, 今後の課題である. 本研究では偏波パラメータを用いた推定式を最適化せずに一般的な定数を用いていること, 加えて $R(Z_{HH})$ はそれぞれの降雨イベントに対する $B\beta$ を与えているので, 相対的に実運用で得られる精度よりも高いものと考えられる. それらを考慮すると, 本研究で提案したアルゴリズムを用いると最適化された $R(Z_{HH})$ と同程度に精度で降雨量推定が可能である. また, この期間においてCOBRAは10分間隔のデータを用いている. そのため, 実運用程度の観測間隔であればさらなる精度向上になることが期待できる.

(4) 実運用を想定した比較検証

レーダ雨量計を用いる上での大きな利点の一つに面的に雨量推定が可能であることが挙げられる. 加えて, 実運用をするにあたり, 河川の流出予測などリアルタイムの面積雨量の精度向上と評価が非常に重要である. 国土交通省のレーダ雨量計では, オンラインのリアルタイムでメッシュ補正が行われており, その方法にダイナミックウインドウ法がある⁸⁾. そこでアメダス10分雨量値を用いて, ダイナミックウインドウ法でメッシュ補正を $R(Z_{HH})$ に対して行い, アルゴリズムを用いた偏波レーダによる降雨量推定の面的な検証をする. 沖縄では多くの雨量観測所が外挿する形になるため, 内挿されることになる内陸部の大宜味大気観測所における光学式雨量計の積算雨量値と比較することで評価する.

ダイナミックウインドウ法は原則として半径30km以内にある複数の地上雨量計を用いて補正を行った. 比較の結果を図-8に示す. 図-8より偏波レーダを用いればさらなる高精度が出せる可能性があることがわかる. また, case1-4においては, 梅雨性降雨に関しては途中で若干の誤差があるが, 精度は良好であった. さらに水平分布に関しては, 図-9に示すように, 本研究のアルゴリズムを用いれば, アメダスの観測点の近くではダイナミックウインドウ法より強い降雨においても高精度に雨量推定が可能であることがわかる. 強い降雨の際に有用な K_{DP} を活かして, 海上等の外挿になってしまう地点においても,

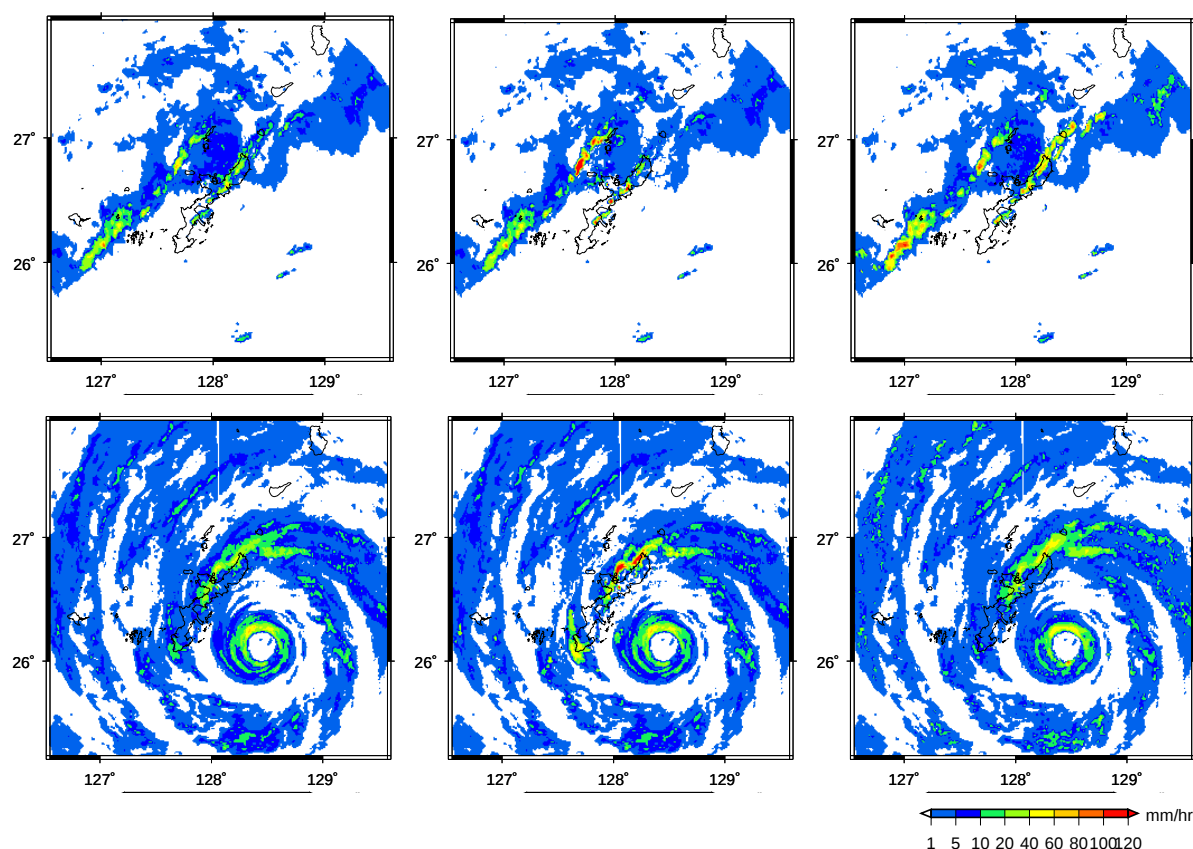


図-9 降雨強度の水平分布. 左から, $R(Z_H)$, ダイナミックウィンドウ法で補正した $R(Z_H)$, アルゴリズムcase1で表した降雨強度の水平分布. 上段は2004/6/8 1300 [UTC]. 下段は2004/9/5/0300 [UTC]

より高精度に雨量推定が可能である。

4. 結論

Cバンド偏波レーダーであるCOBRAにより得られた偏波パラメータを用いて降雨量推定アルゴリズムの構築に関する研究を行った。

地上雨量計のデータと偏波パラメータを用いた推定値を検証することで、4つの推定式による精度検証を行った。その結果、それぞれの推定式による特徴を考慮し、推定式選択のアルゴリズムを構築した。その結果、最適化した $R(Z_H)$ と同等以上の精度で雨量推定することが可能となった。特に、1時間雨量推定の精度と降雨イベント毎の総雨量に関して改善することが可能となった。現時点では、偏波推定式に一般性を考慮して代表的な定数を与えていること、まだ事例が少ないこと、さらに観測間隔の調整など、考慮すべき点が多く残されている。したがって、現段階では最適なアルゴリズムではなく、今後更なる精度向上が見込める。

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. Roy. 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) Jamson, A.R.: Microphysical interpretation of multi-parameter radar and measurements in radar. Part I: Interpretation and measurement of polarization measurements and estimation of raindrop shapes., J. Atmos. Sci., 40, 1792-1802, 1983.
- 8) 深見親雄ほか: 全国合成レーダ雨量の精度検証, 水文水資源学会研究発表要旨集, pp.130-131, 2004.

(2007. 9. 30受付)