Kdp-R関係式の適用範囲拡張によるXバンドMPレーダの観測精度の向上

Improvement of the observation accuracy of X-band dual polarimetric radar
by expansion of the condition to use KDP-R relationship

五道仁実¹・内藤正彦²・土屋修一³

Hitomi GODO, Masahiko NAITO, Shuichi TSUCHIYA

¹正会員 修(工) 国土交通省 水管理・国土保全局 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

²正会員 学(工) 国土交通省 水管理・国土保全局 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

³正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) built the rainfall observation network composed of 35 X-band dual polarimetric radars called XRAIN. The purpose of this paper is to improve observation accuracy of the radars rainfall of XRAIN. The method of radar rainfall estimation of XRAIN uses Z-R and Kdp-R relationships. The results of sensitive analysis about the thresholds of condition to use Kdp-R relationship expanded the use condition of Kdp-R relationship. The expansion of the use conditions of Kdp-R relationship, the frequency of use of Kdp-R relationship is increased, observation accuracy of radar rainfall is improved.

Key Words : XRAIN, X-band dual polarimetric radar, radar rainfall, Kdp-R relationship

1. はじめに

近年、日本の各地でいわゆるゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な大雨や集中豪雨が多発し、それらに起因する浸水被害や水難事故が発生している。こうした豪雨による災害対策のために豪雨の状況を的確に把握することは重要であり、面的な雨量情報をリアルタイムに得ることができるレーダの有効性は高い。国土交通省水管理・国土保全局では、豪雨による災害対策として、豪雨の監視体制を強化するためにXRAINと呼ばれるレーダネットワークの構築を進めているところであり、2013年9月現在、35台のレーダで構成されている。(図-1)

国土交通省水管理・国土保全局が所有する26台のCバンドレーダの内、22台は単偏波のみの送受信である単偏波レーダであり、主に電波の反射強度のみ計測するが、XRAINが採用する二重偏波レーダ(XバンドMPレーダ)では、水平と垂直の2種類の偏波を送受信することが可能であり、電波の反射強度に加え、位相情報を計測することが可能である。また、単偏波レーダでの雨量算定は雨滴群からの受信電力(P_r)から計算されるレーダ反射因子(Z)を用いて降雨強度を推定する手法(Z-R関係式)のみであるが、XバンドMPレーダは、これに加え2種類の偏波

間の位相差(ϕ_{dp})のレンジ方向の変化率(K_{dp})から降雨量を推定する手法(Kdp-R関係式)が可能である。 K_{dp} を用いた雨量算定は、1990年代に米国でSバンドのレーダで研究開発が行われている¹⁾。2000年代には日本^{2),3)}、ドイツ、オーストラリアでCバンドレーダの研究開発が進められている。Xバンドについては、防災科学技術研究所が1990年台後半に技術調査、基本設計、詳細設計を行い、2000年にレーダを製作している^{4),5)}。その後、降雨量推定^{6),7),8)}、降雨減衰補正^{9),10),11)}に関するアルゴリズムの研究開発が行われ、地上雨量計によりレーダ雨量を補正しなくとも、精度の高い降雨観測を実現している。防災科学技術研究所のこれらの研究成果を基にXRAINの雨量算定等のデータ処理システムは構築されている。

実際の降雨強度は、雨滴粒径分布の約3.6次モーメント、 K_{dp} は約4次モーメント、 Z は6次モーメントで表される。実際の降雨強度における雨滴粒径分布と K_{dp} が示す雨滴粒径分布が比較的良く対応しているため、 K_{dp} を用いることで精度の高い降雨観測が可能となる。また、 K_{dp} は雨滴の扁平度に関するパラメータであり、Kdp-R関係式は雨滴の扁平度が降雨強度と関係していることを利用した雨量算定手法である。そのため、雨滴の扁平度が小さい弱雨の場合は、 K_{dp} が検出できなくなることか

ら、XRAINでは弱雨においてはZ-R関係式、強雨においてはKdp-R関係式を使用する方式となっている。

XRAINは、2010年に11台のレーダネットワークとして試験運用を開始し、試験運用開始時までに、観測データや精度が一定の品質を確保されていることは確認しているが、XRAINにおけるKdp-R関係式の適用可能範囲の検討は十分にされていなかったことから、当初のKdp-R関係式の適用範囲は、安全側を考えた比較的強い降雨に使用される限定的な設定であった。そこで本論文は、XRAINの雨量算定方式におけるKdp-R関係式の適用範囲を拡張し、XバンドMPレーダの降雨観測精度の向上を図ることを目的としている。

図-1 XRAINの整備状況 (2013年9月現在)

2. レーダの機器仕様

XRAINが採用するXバンドMPレーダの機器仕様を表-1に示す。レーダの観測範囲は半径80kmとなっている。観測データはPrH-NOR(水平偏波の受信電力, MTI(Moving Target Indicator)処理無し), PrV-NOR(垂直偏波の受信電力, MTI処理無し), PrH-MTI(水平偏波の受信電力, MTI処理有り), PrV-MTI(垂直偏波の受信電力, MTI処理有り), ϕdp (偏波間位相差), phv (偏波間相関係数), V (ドップラー速度), W (速度幅)の8種類である。データは、1スキャン毎にレンジ方向150m, セクタ方向1.2°の分解能でレーダを中心とする極座標形式で収録される。

本論文で対象とするレーダは、2010年より試験運用を開始している関東(関東局, 新横浜局), 北陸(能美局, 水橋局), 中部(安城局, 尾西局, 鈴鹿局), 近畿(田口局, 葛城局, 六甲局, 鷺峰山局)の4地域の11台のレーダであり、この内、近畿の鷺峰山局のみ送信機が固体素子であり、他はクライストロンが使用されている。

表-1 XバンドMPレーダの機器仕様

送信機	クライストロン、固体素子
送信周波数	9.7~9.8GHz
送信出力	50,100 kW(クライストロン)、200W(固体素子)
パルス幅	1.0 μ sec(クライストロン)、1.28~32 μ sec(固体素子)
観測半径	80 km (60km:定量観測範囲)
アンテナタイプ	パラボラ(2.2 m ϕ)
偏波	水平・垂直同時送受信
クラッタ除去	コヒーレントMTI

3. XRAIN雨量

XRAINにおける観測、データ処理、雨量情報の配信の流れについて概要を述べる。XRAINでは、低仰角と高仰角による観測(スキャン)をそれぞれ1分毎に交互に行う。観測によって得られたデータは、レーダ毎に品質管理が行われ、マスクエリア内、レーダ近傍、ノイズレベル付近、グランドクラッタの影響を受けているメッシュ、ノイズ的な変動を示すメッシュ、異常値を示すメッシュ、遮蔽領域、ポイントエコーのメッシュのデータを無効化するとともに、データの折り返し補正、遮蔽補正が行われる。次に、一次処理が行われ、品質管理処理が施されたデータから、 Z_h (水平偏波のレーダ反射因子)の算出、 Kdp (偏波間位相差変化率)の算出、 Z_h の減衰補正が行われ、降雨強度(レーダ雨量)が算出される。各レーダ雨量は、合成処理により250mメッシュの直交格子に内挿距離に関する重み付き平均で内挿され、レーダが属する地域毎に合成雨量が作成される。合成雨量は図化され、レーダ画像としてWeb経由で配信される。

4. レーダ雨量の算出

XRAINのレーダ雨量算出の流れについて概要を図-2に示す。まず、 ϕdp から Kdp 、 $Prh-MTI$ から $Z_{h(non-corr)}$ を算出し、 Kdp を用いて $Z_{h(non-corr)}$ を減衰補正し $Z_{h(corr-ini)}$ を算出する。次に、 $Z_{h(corr-ini)}$ が30dBZ以上である Kdp_{corr} を用いて、再度、 $Z_{h(non-corr)}$ を減衰補正し $Z_{h(corr)}$ を算出する。 $Prh-MTI$ 、 $Z_{h(corr-ini)}$ 、 Kdp が後述の条件を満たす場合はKdp-R関係式によりレーダ雨量が算出され、それ以外では $Z_{h(corr)}$ を用いたZ-R関係式によりレーダ雨量が算出される。

図-2 XRAINの雨量算定の流れ

レーダ雨量算出における各種処理内容について述べる。

(1) ϕdp から Kdp の算出方法

降雨域内の ϕdp はレンジ方向に連続的に漸増するように変化するが、観測データから得られる ϕdp にはノイズ的な成分(大きな降水粒子の後方散乱から生じる位相差)が含まれている。品質管理において異常な ϕdp を無効化しているもののこのまま Kdp を算出した場合、負の Kdp や極端に大きい Kdp が算出されてしまうため、FIR(Finite Impulse Response)フィルタを使った繰り返し

フィルタリング¹²⁾により ϕdp の平滑化を行う。

Kdp は(式-1)で定義される単位距離あたりの ϕdp の変化率である。

$$Kdp = \frac{\phi dp(r_2) - \phi dp(r_1)}{r_2 - r_1} \quad (式-1)$$

ただし、 Kdp :偏波間位相差変化率[°/km]、 ϕdp :偏波間位相差[°]、 r :レーダからの距離[km]

弱雨域では ϕdp の変化は微増であるため、 Kdp の算定区間($r_2 - r_1$)が短い場合、小さい傾きの Kdp が適切に算出されない可能性がある。また、強雨域では ϕdp が急激に増大するため、 Kdp の算定区間が長い場合、 Kdp を過小に算出してしまふ可能性がある。そのため、 ϕdp の変化率を算定する区間は、弱雨域では算定区間を長く、強雨域では算定区間を短くして ϕdp の変化率に応じて変化させている。そして、算定区間の ϕdp データから最小二乗法により回帰直線を求め、その傾きを Kdp としている。具体的には、当該メッシュ及び当該メッシュからレンジ方向に前後($n_{kdp_ini}/2$)個の ϕdp データから回帰直線を求めその傾きを kdp_ini とする。図-3に示す関係から kdp_ini に対応する n_{kdp} を四捨五入した整数値を求め、前後($n_{kdp}/2$)個の ϕdp データから回帰直線を求めその傾きを Kdp としている。XRAINでは $n_{kdp_ini}=30$ (4.5km相当)としている。

図-3 kdp_ini と n_{kdp} の関係

(2) $Prh-MTI$ から Zh の算出方法

$Prh-MTI$ が距離補正、距離 $r0$ に正規化されている場合、 Zh は正規化を考慮したレーダ方程式より導かれる(式-2)で表される。なお、本節の Zh は減衰補正前のレーダ反射因子 $Zh_{(non-corr)}$ を示している。

$$Zh = Prh-MTI - Ch - 20 \log(r) + 20 \log(r0) - 2 kg(r-r0) \quad (式-2)$$

ただし、 Zh :レーダ反射因子[dBZ]、 Ch :水平偏波のレーダ定数[dB]、 $Prh-MTI$:水平偏波の受信電力[dBm]、 $r0$:正規化距離[m]、 kg :大気減衰率[dB/m]

XRAINでは、距離補正、正規化済みの受信電力データが収録されるレーダと、距離補正、正規化が未補正で収録されるレーダがある。距離補正、正規化済みの場合は、(式-2)の右辺第3項、第5項が考慮されて収録されているため(式-3)で Zh が算出され、距離補正、正規化が未補正の場合は、正規化を考慮しないレーダ方程式より導かれる(式-4)で Zh が算出される。

$$Zh = Prh-MTI - Ch + 20 \log(r0) \quad (式-3)$$

$$Zh = Prh-MTI - Ch + 20 \log(r) + 2kg r \quad (式-4)$$

(3) 減衰補正手法

水平偏波の単位距離当たりの降雨減衰量 Ah は下記(式-5)の Kdp に関するべき乗則で表現される¹³⁾。

$$Ah = ah1 \times Kdp^{ah2} \quad (式-5)$$

ただし、 Ah :降雨減衰量[dB/km]、 Kdp :偏波間位相差変化率[°/km]、 $ah1=0.2925+7 \times 10^{-4} \times EL+1 \times 10^{-5} \times EL^2+3 \times 10^{-6} \times EL^3$ 、 $ah2=1.1009 \times 10^{-3} \times EL^4+10^{-6} \times EL^2$ 、 EL =仰角[°]

$ah1, ah2$ は、雨滴粒径分布の観測データを用いた散乱計算により理論的に算出した係数である¹⁴⁾。

減衰補正は(式-6)よりレーダからレンジ方向に当該メッシュまでの降雨減衰量 Ah を積算し、その積算値を当該メッシュの $Zh_{(non-corr)}$ に加算することで行われ、 $Zh_{(corr-ini)}$ 、 $Zh_{(corr)}$ は算出される。

$$Zh_{(corr-ini), (corr)} = Zh_{(non-corr)} + 2 \times \sum_{r=0}^r Ah(r) \delta r \quad (式-6)$$

ただし、 $Zh_{(corr-ini), (corr)}$:減衰補正済みレーダ反射因子[dBZ]、 $Zh_{(non-corr)}$:減衰補正前のレーダ反射因子[dBZ]、 δr :レンジ方向分割距離[km]

(4) 雨量算出

Kdp - R 関係式は、下記の(式-7)の降雨強度 Rr と Kdp に関するべき乗則で表現される¹³⁾。

$$Rr = a1 \times Kdp^{a2} \quad (式-7)$$

ただし、 Rr :降雨強度[mm/h]、 $a1=19.6+2.71 \times 10^{-2} \times EL+1.68 \times 10^{-3} \times EL^2+1.11 \times 10^{-4} \times EL^3$ 、 $a2=0.815$ 、 EL =仰角[°]

$a1, a2$ は、雨滴粒径分布の観測データを用いた散乱計算により理論的に算出した係数である¹³⁾。

(式-6)の Kdp - R 関係式から求められた雨量を地上雨量と比較すると全てのレーダで約20~25 %程度の過小評価が認められた。XRAINでは、過小評価を補正するために補正係数 $\alpha(=1.3)$ を乗じた(式-8)を用いている。

$$Rr = \alpha \times a1 \times Kdp^{a2} \quad (式-8)$$

Z - R 関係式は、(式-9)を用い、 $Zh_{(corr)}=35$ [dBZ]を閾値として、異なる雨滴定数 B, β が用いられる。

$$Zh_{(corr)} = B \times Rr^{\beta} \quad (式-9)$$

ただし、 Rr :降雨強度[mm/h]、 $Zh_{(corr)}$:減衰補正済みレーダ反射因子[mm⁶/m³]、 B, β :雨滴定数

これ以降、 Zh は減衰補正済みレーダ反射因子 $Zh_{(corr-ini)}$ を示すこととする。

Kdp - R 関係式は雨滴の扁平度が降雨強度と関係していることを利用した雨量算定方法であるが、弱雨の場合は、雨滴の扁平度が小さいため Kdp が検出できない場合がある。また、弱雨域や降雨減衰により受信電力が小さい場合、 ϕdp がノイズ的な挙動を示し、 ϕdp の距離微分である Kdp は、極端に大きい値の Kdp が算出され易いと考えられる。これらのことから主に強雨時に Kdp - R 関係式が用いられるように、 Kdp 、 Zh 、 SNR (Signal Noise Ratio)を用いて使用条件を設定している。また、 Kdp - R 関係式が用いられない弱雨時等の条件の場合は、 Z - R 関係式が用い

られる。

なお、Kdp-R関係式の使用条件に用いるSNRは信号と雑音電力の比と定義される下記の(式-10)で計算される。

$$SNR = 10 \log \frac{10^{\frac{Prh-MTI}{10}} - 10^{\frac{N}{10}}}{10^{\frac{N}{10}}} \quad (式-10)$$

ただし、SNR:信号雑音比[dB]、Prh-MTI:水平電波の受信電力[dBm]、N:水平偏波のノイズ電力値[dBm]

5. 運用開始当初のKdp-R関係式使用条件

2010年の運用開始当初のKdp-R関係式の使用条件はZh=30[dBZ]以上かつKdp=0.5[°/km]以上かつSNR=10[dB]以上を満たす場合で、全てのレーダで同一の条件となっている。Kdp=0.5[°/km]は(式-8)より約14 [mm/h]の降雨強度に相当する。また、Zh=30[dBZ]は概ね3～5[mm/h]の降雨強度に相当することから、2010年の観測では、降雨強度が概ね14[mm/h]以上の時にKdp-R関係式が使用されている。2010年の出水期間中のXRAINのレーダ雨量、合成雨量を評価した結果、現業のCバンドレーダ雨量（地上雨量によりレーダ雨量をリアルタイムで補正した雨量）と比較して同等程度以上の観測精度であることが確認されたが、個々の事例、時間、場所を局所的に見ると以下の精度低下が確認された。

（１）強雨時の雨量算定精度の低下

2010年の観測において、図-4に示すように強雨時にも係わらず雨量算定精度が低下している事例が確認された。基本的に強雨時には、Kdp-R関係式が用いられ、精度の良い雨量算定が行われるが、本事例では強雨時にKdp-R関係式が用いられずにZ-R関係式が用いられており、雨量算定精度の低下が引き起こされていた。これは強雨域の裏側等では、降雨減衰によりSNRが小さくなり易く、Kdp-R関係式を用いる条件のうちSNRに関する条件を満たさないため、強雨時にZ-R関係式が用いられているためである。このため、Kdp-R関係式を用いる条件で使用しているSNR閾値を引き下げて、降雨減衰によりSNRが小さい場合にも強雨域におけるKdp-R関係式の使用頻度を増やし、精度向上を図ることとした。

図-4 豪雨時に過小評価が確認された事例
(地点：京都アメダス)

（２）弱雨時の過小評価傾向

弱雨時にはZ-R関係式が用いられることが原因で雨量算定精度が過小評価傾向であった。Kdp-R関係式を用いる条件を見直し、可能な限り弱雨に対してもKdp-R関係式により降雨強度を算出し、精度向上を図ることとした。

6. Kdp-R関係式の適用範囲の拡張

（１）SNR閾値の引き下げ

強雨域（特に降雨減衰が大きい強雨域裏側）でのKdp-R関係式の使用頻度を増加させ強雨時の観測精度の向上を図るためSNR閾値の引き下げを検討する。Kdp-R関係式の使用条件にSNR閾値を設定しているのは、減衰補正をしたレーダ反射因子が一定以上を示す降雨であっても、降雨減衰の影響を受けて受信電力が低くなった場合は、 ϕ_{dp} はノイズ的で異常に大きな値のKdpが算出されるなど、適切なKdpが算出できない場合があると考えられるためである。Kdp-R関係式の使用条件のSNR閾値を10[dB](2010年観測の値)、-50[dB]としてKdp-R関係式で算出した雨量分布を図-5に示す。なお、Kdp使用条件のZh閾値、Kdp閾値はそれぞれ2010年観測の値である30[dBZ]、0.5[°/km]としている。SNR閾値を引き下げることで強雨域の裏側でKdp-R関係式による雨量算出の領域が増加していることが確認できる。SNR閾値を引き下げることで強雨域において、異常に強い値を示すメッシュが孤立して存在するノイズ的な降雨分布となることが懸念されるが、SNR閾値を引き下げることで拡大されたKdp-R関係式による雨量算出の領域はノイズ的な降雨分布となっていないことが確認できる。これは、降雨減衰の影響を受け受信電力が低い場合であっても、強雨のため雨滴が大きく扁平しており、それに関係する位相情報である ϕ_{dp} は適切な値が検出されているためだと考えられる。以上より、SNR閾値を引き下げることで、ノイズ的な降雨分布が現れることはなく、Kdp-R関係式の使用頻度の増加が図られていることから、SNR閾値は、-50[dB]とすることが可能であり、実質的には使用条件に用いることが不要であることが示された。

図-5 Kdp-R関係式で算出された雨量分布

(左：SNR=10[dB]、右：SNR=-50[dB])

(鷲峰山レーダ(仰角1.4°)、2010年8月12日5時10分)

（２）Zh閾値の引き下げ

弱雨時においても可能な限りKdp-R関係式で雨量算定することで弱雨の観測精度向上を図るためZh閾値の引き下げを検討する。Kdp-R関係式の使用条件におけるZh閾値を設定しているのは、弱雨域では受信電力が低く、雨滴の扁平度も小さいため ϕ_{dp} はノイズ的で異常に大きな値のKdpが算出されるなど、適切なKdpが算出できない場合があると考えられるためである。

Kdp-R関係式の使用条件のZh閾値を30[dBZ]（2010年観測の値）、26[dBZ]、22[dBZ]としてZ-R関係式、Kdp-R関係式で算出した雨量分布を図-6に示す。なお、Kdp使用条件のSNR閾値、Kdp閾値はそれぞれ-50[dB]、0.5[°/km]である。Zh閾値を引き下げること、図中の赤丸点線内に示すように、弱雨域中に孤立的な強雨が生じ、ノイズ的な降雨分布となっていることが確認できることから、Zh閾値は現状値とするべきであることが示された。

図-6 Zh閾値の引き下げ時の雨量分布

(左: Zh=30[dBZ], 中: Zh=26[dBZ], 右: Zh=22[dBZ])
(鷲峰山レーダ (仰角1.4°), 2012年8月12日5時10分)

(3) Kdp閾値の引き下げ

弱い降雨を可能な限りKdp-R関係式で雨量算定することで弱雨時の精度向上を図るため、Kdp閾値の引き下げを検討する。Kdp閾値は、扁平度が小さい雨滴に対してφdpの感度は低いため、Kdpの値が小さい場合、その信頼性は低いと考えられ、信頼性を有していると考えられる一定以上のKdpが得られた場合にKdp-R関係式を用いるために設定されている。Kdp-R関係式の使用条件のKdp閾値を0.5[°/km]（2010年観測の値）、0.1[°/km]としてKdp-R関係式で算出した雨量分布を図-7に示す。なお、Kdp使用条件のSNR閾値、Zh閾値はそれぞれ-50[dB]、30[dBZ]である。Kdp閾値を引き下げること、Kdp-R関係式による雨量算出の領域が増加していることがわかる。

図-7 Kdp-R関係式で算出された雨量分布

(左: Kdp=0.5[°/km], 右: Kdp=0.1[°/km])
(六甲レーダ (仰角1.0°), 2010年9月27日16時00分)

Kdp閾値を0.5から0.1[°/km]へ段階的に引き下げて感度分析し、各指標（相関係数、回帰係数、RMSE、総雨量比）を算出した結果を表-2に示す。表-2の最下段は2010年観測におけるKdp-R関係式の使用条件となっている。これらの指標は、レーダ毎に観測範囲内の地上雨量（アメダス）を対象に、10分雨量について地上雨量とそれに対応するメッシュのレーダ雨量の関係から算出し、11レーダの平均をとったものである。対象とする事例は、2010年7月～12月の6ヶ月間において、レーダから半径

30km以内の地上雨量（アメダス）における時間雨量トップ10を抽出し、抽出した時間雨量が観測された時間の前後6時間を各事例の対象期間としている。Kdp閾値を引き下げること観測精度の低下は生じず、若干の精度向上が確認できる。以上より、Kdp閾値を引き下げること、観測精度の低下は見られず、Kdp-R関係式の使用頻度の増加が図られることから、Kdp閾値は、0.1[°/km]とすることが可能であることが示された。

表-2 Kdp閾値の感度分析結果

閾値			相関係数	回帰係数	RMSE	総雨量比
SNR	Zh	Kdp				
-50	30	0.1	0.88	0.97	1.32	1.02
-50	30	0.2	0.88	0.97	1.33	1.03
-50	30	0.3	0.88	0.97	1.33	1.02
-50	30	0.4	0.88	0.96	1.33	1.01
-50	30	0.5	0.88	0.96	1.33	0.99
10	30	0.5	0.87	0.93	1.34	0.96

7. Kdp-R関係式の適用範囲の拡張の評価

Kdp-R関係式の適用範囲の拡張を検討したところ、Zh=30[dBZ]以上かつKdp=0.1[°/km]以上かつSNR=-50[dB]以上としても降雨分布に問題等は生じず、観測精度においても改善が確認された。Kdp=0.1[°/km]は約4[mm/h]に相当する雨量である。表-3は、Kdp閾値を0.5から0.1[°/km]へ段階的に引き下げた時のKdp-R関係式が使用される割合を示している。表-3の最下段は、2010年観測におけるKdp-R関係式の使用条件となっている。Kdp-R関係式が使用される割合は、表-2で対象とした事例において、地上雨量で10分雨量が観測された回数と、レーダ雨量で10分雨量を算出するために、雨量の9割以上をKdp-R関係式が用いられた回数の割合をレーダ毎に算出して、11レーダの平均をとったものである。Kdp-R関係式の適用範囲の拡張により全てのレーダで使用頻度が増加し、平均して約2.5倍に増加している。

表-3 Kdp-R関係式が使用される割合

閾値			Kdp-R関係式が使用される割合(%)
SNR	Zh	Kdp	
-50	30	0.1	25.5
-50	30	0.2	20.9
-50	30	0.3	16.7
-50	30	0.4	13.9
-50	30	0.5	12.0
10	30	0.5	10.7

図-8は、2010年観測におけるKdp-R関係式の使用条件、適用範囲を拡張したKdp-R関係式の使用条件で計算した近畿地域の合成雨量について、合成範囲内の地上雨量とそれに対応するメッシュの合成雨量の関係を10分雨量について示したものである。図中の緑丸は、レーダ雨量で10分雨量を算出するために、雨量の9割以上をKdp-R関係式により算出していることを示している。一方、黒丸は、10分雨量を全てZ-R関係式、または10分雨量の内、Kdp-R関係式で算出している雨量が1割以下で、残りをZ-R関係式により算出していることを示している。Kdp-R関係式の適用範囲を拡張した結果、黒丸のプロットが減少していることから、弱雨、強雨領域の双方でKdp-R関係式の使用頻度が増加していることが確認できる。

総雨量比より、2010年観測におけるKdp-R関係式の使用条件では、レーダ雨量は15%程度の過小傾向であるが、Kdp-R関係式の適用範囲を拡張することによって過小傾向が1割程度改善されて、3%程度の過小傾向となっており、観測精度が向上されていることが確認できる。

図-8 地上雨量とそれに対応する合成雨量の関係（近畿）
（2010年観測におけるKdp-R関係式の使用条件（左）、適用範囲を拡張したKdp-R関係式の使用条件（右））

2010年観測におけるKdp-R関係式の使用条件、適用範囲を拡張したKdp-R関係式の使用条件で算出した各地域の合成雨量と地上雨量の関係から、10分雨量における相関係数、回帰係数、RMSE、総雨量比を算出した結果を表-4に示す。相関係数に大きな変化は見られず観測のばらつきの改善は見られない。また、回帰係数、総雨量比からいずれの地域も量的に過小評価傾向を示しているが、Kdp-R関係式の適用範囲の拡張により全ての地域で過小評価傾向が改善され最大で10%程度改善されている地域があることを確認できる。

表-4 Kdp-R関係式の使用条件見直し前後の精度評価

	使用条件	相関係数	RMSE	回帰係数	総雨量比
関東	2010年観測	0.84	1.81	0.87	0.95
	適用範囲を拡張	0.86	1.71	0.93	1.02
中部	2010年観測	0.87	1.19	0.80	0.80
	適用範囲を拡張	0.87	1.14	0.87	0.89
近畿	2010年観測	0.87	1.19	0.82	0.86
	適用範囲を拡張	0.89	1.11	0.89	0.97
北陸	2010年観測	0.77	1.81	0.76	0.82
	適用範囲を拡張	0.79	1.73	0.81	0.90

8. まとめ

Kdp-R関係式の適用範囲の拡張を検討した結果、 $Zh=30[\text{dBZ}]$ 以上かつ $Kdp=0.1[^\circ/\text{km}]$ 以上かつ $SNR=-50[\text{dB}]$ 以上の条件としても降雨分布に問題等は生じず、観測精度においても改善することが示された。これは約 $4[\text{mm/h}]$ でZ-R関係式、Kdp-R関係式を切り替えることを意味し、2010年観測におけるKdp-R関係式の使用条件では約 $14[\text{mm/h}]$ であることから、弱雨時においてKdp-R関係式が用いられる頻度が増加することを意味する。

Kdp-R関係式の適用範囲の拡張による評価の結果、2010年の観測におけるKdp-R関係式の使用条件に対して、Kdp-R関係式が用いられ頻度が平均して約2.5倍増加し、弱雨、強雨時ともにKdp-R関係式が用いられる頻度が増加していることが確認された。また、全ての地域で合成雨量の過小傾向が改善され、最大で10%程度改善されて

いる。以上より、Kdp-R関係式の適用範囲の拡張によりXバンドMPレーダの観測精度の向上が図られた。

参考文献

- 1) Alexander V.R., Terry J. S., Donald W. B., Pamela L. H., Scott E.G.: The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol.86, pp.809-824, 2005.
- 2) 中北英一, 竹畑栄伸, 中川勝広: 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, 水工学論文集, Vol.51, pp.325-330, 2007.
- 3) 中北英一, 竹畑栄伸, 中川勝広: Cバンド偏波レーダによる降雨量推定アルゴリズムの構築に関する研究, 水工学論文集, Vol.52, pp.349-354, 2008.
- 4) Iwanami, K., M. Maki, R. Misumi, S. Watanabe and K. Hata :The NIED Dual-frequency Cloud Radar System under Development. Proc. 1st Int. Workshop on Spaceborne Cloud Profiling Radar, Tsukuba, Japan, CRL, 161-164, 2000.
- 5) Iwanami, K., R. Misumi, M. Maki, T. Wakayama, K. Hata and S. Watanabe : Development of a multiparameter radar system on mobile platform, Preprints, 30th Conf. on Radar Meteorology, 104-106, 2001.
- 6) Maki, M., K. Iwanami, R. Misumi, S.-G. Park, H. Moriwaki, K. Maruyama, I. Watabe, D.-I. Lee, M. Jang, H.-K. Kim, V.N. Bringi, and H. Uyeda : Semi-operational rainfall observations with X-band multi-parameter radar, Atmos. Sci. Letters, 6, 12-18, 2005.
- 7) Maki M., Park S-G., Bringi V.N. : Effect of Natural Variations in Rain Drop Size Distributions on Rain Rate Estimate of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, J. Meteor. Soc. Japan, 83, pp.871-893, 2005.
- 8) Maki, M., K. Maruyama, K. Iwanami, R. Misumi and T. Maesaka, :Comparison of X-band multi-parameter radar rainfall estimates with conventional radar rainfall estimates adjusted with raingauge network data, Proc. 4th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology, 206-209, 2006.
- 9) S.G.Park, V.N.Bringi, V.Chandrasekar, M.Maki, K.Iwanami: Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X Band. PartI: Theoretical and Emprical Basis, PartII: Evaluation and Application, Journal of Atmospheric and Ocean Technology, Vol.22, pp.1621-1655, 2005.
- 10) Kim, D.-S., M. Maki and D.-I. Lee : Correction of X-band radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation using differential phase, Atmos. Res., 90, 1-9, 2008
- 11) Liu, Yuxiang , V.N. Bringi and M. Maki : Improved Rain Attenuation Correction Algorithms for Radar Reflectivity and Differential Reflectivity with Adaptation to Drop Shape Model Variation, Preprints, Intr'l. Geoscience and Remote Sensing Symposium & 27th Canadian Symposium in Remote Sensing (IGARSS 2006), 4pp, 2006
- 12) J.Hubbert and V.N. Bringi : An Iterative Technique for the Analysis of Copolar Differential Phase and Dual Frequency Radar Measurments, J. Atmos. Oceanic Technol., 12, 643-648, 1995.
- 13) V.N.Bringi, V.Chandrasekar: Polarimetric Doppler Weather Radar, Cambridge University Press, pp.636, 2001.
- 14) 真木雅之, 朴相郡: 高仰角観測時のXバンド偏波レーダ降雨強度推定式, 防災科学技術研究所研究報告, Vol.73, pp.49-57, 2009

(2013. 9. 30受付)