

## 高知大学 MP レーダーネットワークによる降雨量推定の検証

### Verification of Quantitative Precipitation Estimation by MP radar network of Kochi University

西井章<sup>(1)</sup>・佐々浩司<sup>(2)</sup>

Akira NISHII, Koji SASSA

(1)高知大学大学院総合人間自然科学研究科理学専攻

(2)高知大学教育研究部自然科学系理工学部門

(1) Graduate School of Kochi University, Kochi, Japan

(2) Kochi University, Science cluster, Kochi, Japan

#### Synopsis

Heavy rainfall events frequently occur in Kochi Prefecture where is not covered by XRAIN network. Then, we are working to construct our own X-MP radar network in Kochi prefecture and to develop quasi-real time Quantitative Precipitation Estimation (QPE) algorithm. The present study aims to verify the accuracy of QPE derived from 3 X-band MP radars (Asakura, Monobe, and Aki radars) by comparing with the data of rain gauge. We employed  $R$ - $Kdp$  relationship for heavy rain which has  $Zh \geq 30$  and  $Kdp \geq 0.3$  as a QPE method and  $R$ - $Z$  relationship for weak rain. Results showed that our radars underestimated slightly except for Monobe radar which estimates almost same with the data obtained from rain gauge and the correlation between radar data and rain gauge data was about 0.8.

**キーワード:** XバンドMPレーダー, レーダーネットワーク, 降雨量推定

**Keywords:** X-band polarimetric radar, Radar network, QPE

#### 1. はじめに

高知県は年間降水量が約2500 mmであり, 50mm以上の短時間強雨も頻繁に経験する日本でも有数の多雨地帯である. しかしながら, 県内全域は国土交通省XRAINによるXバンドMPレーダーネットワークの観測範囲外となっており四国山地の高所に設置したCバンドMPレーダーによって気象庁室戸ドップラーレーダーを補っているに過ぎない. そこで, 高知大学ではXRAINを補完するような1分毎の高頻度かつ高解像度による降雨情報の提供を目指して, 高知県内に6台の小型XバンドMPレーダーを配置したレーダーネットワークを構築し, ネットワーク降雨情報の提供アルゴリズムの開発を進めている.

本論文では高知大学MPレーダーネットワークの概要を紹介するとともに, このうち2014年, 2015年に設置された3基(朝倉, 物部, 安芸)のレーダーについて, 個別の降雨量推定精度を評価することを目的としてレーダーデータの品質管理を行ったことや, 地上雨量計と比較した結果などについて述べる.

#### 2. レーダーネットワークについて

高知大学MPレーダーネットワークは, 最終的に県内を6基のレーダーによって構築する予定であるが, 2018年6月現在5基のレーダーが常時観測を行っている (Fig.1). このうち, 今回雨量評価を行った朝倉, 物部, 安芸の3基の仕様をTable 1に示す. いずれも

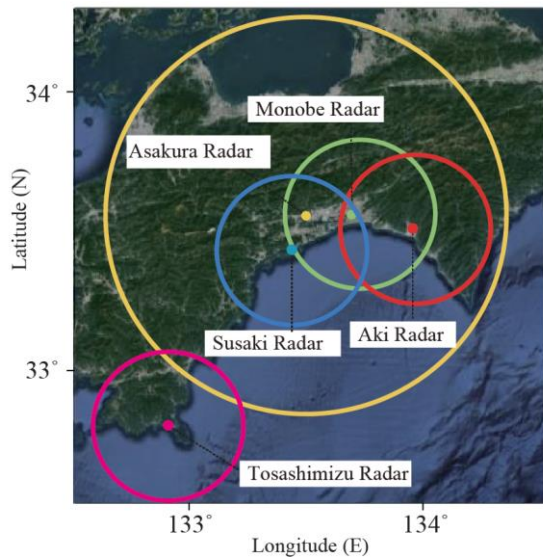


Fig. 1 Map of Kochi University radar network. Circles represent observation range of each radar.

Tale1 Specifications of radars

	Asakura	Monobe, Aki
Frequency	9.39GHz	9.47GHz
Beam width	2.0deg.	2.7deg.
Range resolution	150m	50m
Observation range	80km	30km

XバンドMPドップラーレーダーであり、反射因子だけでなくドップラー速度や偏波パラメータの観測も可能である。観測モードは現在は朝倉レーダーが3~5度の低仰角を1分毎、5分で高仰角までボリュームスキャンを行っているが、雨量評価時のデータは2.2度から40度までの10仰角を2.5分毎にボリュームスキャンを行っていた。物部、安芸レーダーは3度~16度の5仰角を1分毎にボリュームスキャンしている。これらの観測データをサーバーに蓄積後、すぐに降水強度  $R$ [mm/h]のCAPPIデータ(高度1km)を作成している。現時点では観測後1分程度の準リアルタイムでFig.2に示すようなネットワーク降雨強度合成データを提供することが可能となっている。CAPPIデータ作成にあたっては、各PPIスキャンにおけるデータを水平方向 $0.01r+0.1$  km( $r$ はレーダーからの距離[km])、鉛直方向 $0.75$  km(朝倉レーダーのみ水平方向 $0.02r+0.2$  km、鉛直方向 $2.5$  km)の影響円を考慮したクレスマン補間により内挿し、 $150$  mメッシュの格子点データを作成した。気象庁レーダーネットワークによる高度2kmの降雨情報と異なり1kmとしたのは、より下層で直接降雨に関係する情報を得ることと、暖かい雨などあまり上層まで発達しない雨雲の様子を捉えることを想定したものである。各レーダー共

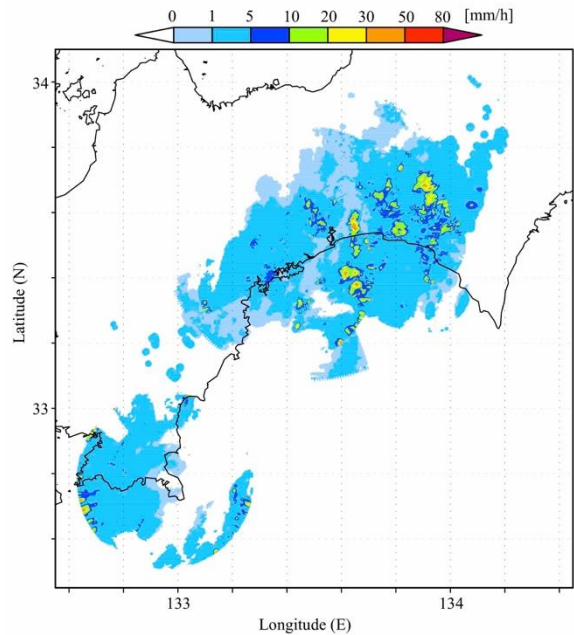


Fig.2 A CAPPI data of rainfall intensity at 1km AGL derived from the radar network. (At 18:06 JST, May 13, 2018)

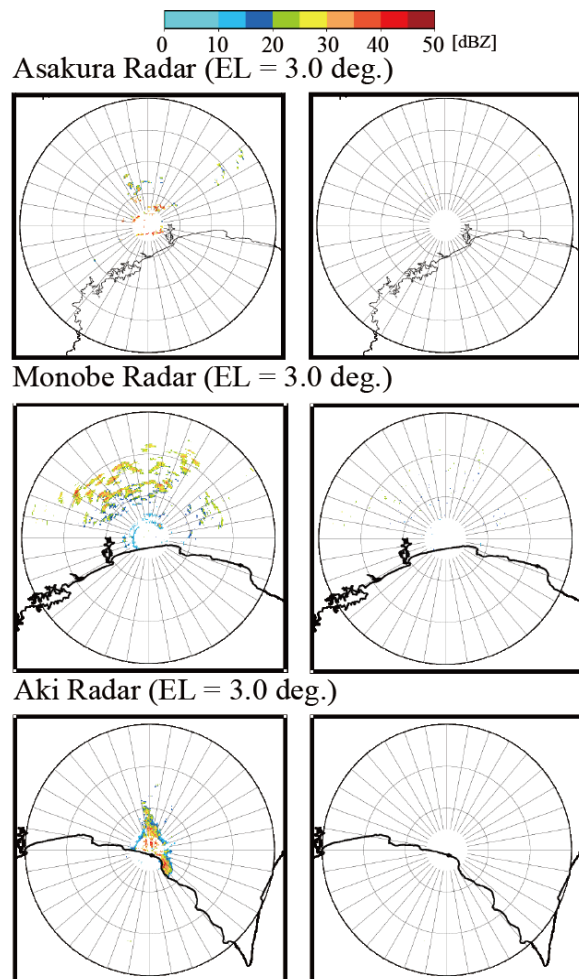


Fig. 3 PPI images of reflectivity before (left) and after (right) removing clutter.

に地形クラッタはMTI (Moving Target Indicator, Aoyagi 1982)による除去を行っているが, Fig.3の左図に示すように高知県のような複雑地形では地形クラッタは取りきれない. これについてはネットワーク合成に先立って後述するような品質管理を行った. また, 複雑地形によりレーダービームが遮蔽されることやXバンドレーダーでは降雨減衰も大きくなるため, 複数のレーダーによる観測結果がある格子点に関しては最大値を採用することによって降雨減衰や地形遮蔽に伴う過小評価を防いでいる.

### 3. レーダーデータの品質管理

降雨量推定に先立って, 各レーダーの観測データについて品質管理を行う必要がある. 例えば, 先述のようにMTI処理だけではFig.3の左に示すような多数の地形クラッタが残ってしまう. そこで, このような残存したノイズを取り除くためレーダーごとに品質管理を行った. 朝倉レーダーについてはMTI前後における受信電力の比較ができることから, MTI前後の受信電力の差が5 dBZ以上のメッシュはクラッタの影響が大きいとみなし欠測とした. 物部, 安芸レーダーに関してはMTI処理後のデータのみ提供されているため, 晴天時観測により恒常的に強いエコーが出ている個所をマッピングすることで地形クラッタの除去を図った. また, 地形クラッタの影響がないレーダーデータについても偏波間関係係数 $\rho_{hv}$ が0.6未満のメッシュについては昆虫や煤煙など非降水由来のエコーであるとみなし除去を行った. その結果, Fig.3の右に示すようにいずれのレーダーも晴天時エコーをすべて除去することができた. また, 地形などによって遮蔽されている箇所より遠方の領域は仮にエコーが観測されても大きく減衰した不正確なデータとなっているため, Fig.4の一例に示すように各仰角毎にマスクをかけることで, 電波の遮蔽に伴い観測精度が悪化する領域を除外した.

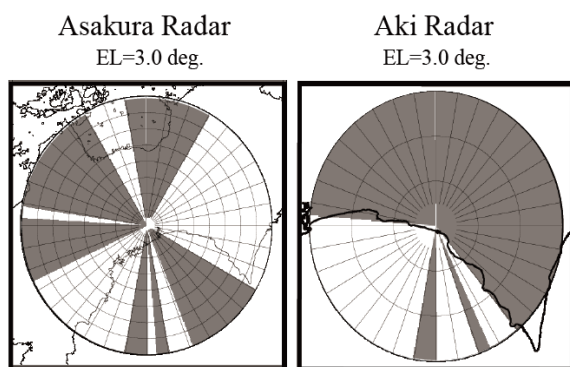


Fig. 4 Examples of beam blocked area (gray).

### 4. MPレーダーによる降雨量推定の手法

XバンドMPレーダーによる降雨量推定に関しては様々な手法が提案されている(例えばMaki et al., 2005). 本レーダーネットワークにおける降雨量推定は,  $Kdp$  [deg/km]および水平反射因子 $Z$  [mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>]を以下の式で降雨強度 $R$  (mm/h)に換算することにより行った.

・  $Kdp$ - $R$ 関係式( $Z > 30$  dBかつ $Kdp > 0.3$  deg./kmの場合適用)

$$R = \alpha \times 19.6 \times Kdp^{0.825} \quad (1)$$

・  $Z$ - $R$ 関係式(上記の場合以外に適用)

$$Z = BR^\beta \quad (2)$$

$Kdp$ - $R$ 関係式に関してはMaki et al. (2005)の式を基にしているが, 本レーダーにおいて $Kdp$ - $R$ 関係式の過小評価が確認されていることからXRAINを参考に補正係数 $\alpha=1.3$ を導入している(Maesaka et al., 2011).  $Kdp$ は降雨減衰の影響を受けない一方で, 弱雨においてはノイズの影響が大きくなることから, 強雨(約9.4 mm/h以上)と弱雨で関係式を切り替えている.  $Z$ - $R$ 関係式に関しては降水の特性以外にもレーダーの較正や個体差によって関係式が異なることから, Fig.5に示すようなそれぞれの反射強度 $Z$ と雨量データ $R$ の散布図により回帰線を求めてレーダー毎に係数 $B$ ,  $\beta$ を決定した. 係数の決定にあたっては $Z=20 \sim 30$  dBZにおける1 dBZ毎の層別平均値を用いた.

$Z$ - $R$ 関係の係数はそれぞれの降水の状況によって幅広い値を取りうる(Fujiwara, 1965)ため, 本来は降水イベント毎に調整する必要があるが, これは困難であるため本ネットワークでは各レーダーに1組ずつの係数のみを使用した.

### 5. 降雨量推定の検証

本ネットワークの3つのレーダーによる降雨量推定の精度を検証するために, 地上雨量計との比較を行った.

降雨量推定の検証に用いた降雨事例は, 2017年に観測された下記の4つの降水イベントである. (時刻はすべてJST)

5月12日 18:00~5月13日 9:00

6月20日 17:00~6月21日 8:00

8月6日 10:00 JST~8月7日 16:00

9月16日 23:00 JST~9月17日 23:00

いずれも1時間に20 mm以上の強い降水が観測された事例を評価に用いている.

雨量推定に用いたレーダーデータは, 先述のボリュームスキャンのうち, 1分毎のCAPPI作成データの基礎となるよう, 朝倉レーダーが3,4,5°の3仰角,

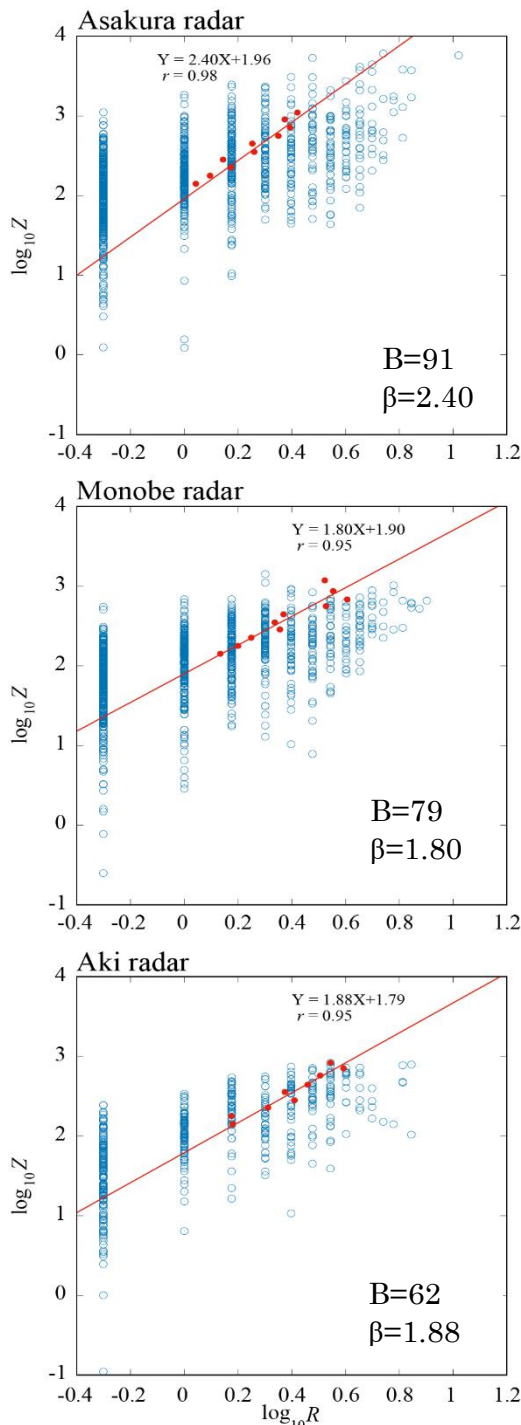


Fig 5 Logarithmic plot of Z-R relationship. Red points show layer averages to calculate Z-R relationships and red lines shows regression line.

物部・安芸レーダーが3~16°の5仰角における観測データである。また、比較に用いた地上雨量計は、探査範囲内に分布しているアメダス12地点及びPOTEKA NET 17地点の地上雨量計である。Fig.6に各観測地点の分布を示す。地上雨量計はいずれも1転倒雨量0.5 mmの転倒ます型雨量計であり、比較には10分間降水量のデータを使用した。比較において、過

度な電波の減衰に伴う電波消散による欠測や無降水時のノイズの影響などを避けるために、次の条件に該当するデータは検証に用いなかった。

- $R_g$ または $R_r$ が0 mmとなる。
- $R_g$ と比較する $R_r$ に1スキャン以上欠測がある。
- 地上雨量計がレーダーの探査範囲外にある。
- 地形遮蔽により地上雨量計に電波が到達しない。

$R_r$ を算出する仰角は、可能な場合は比較する雨量計において高度1 km付近を通過するものを採用することを考慮した結果である。なお、地形遮蔽などの影響により該当する仰角が存在しない場合は、最も1 kmに近い高度を通過する仰角を採用した。

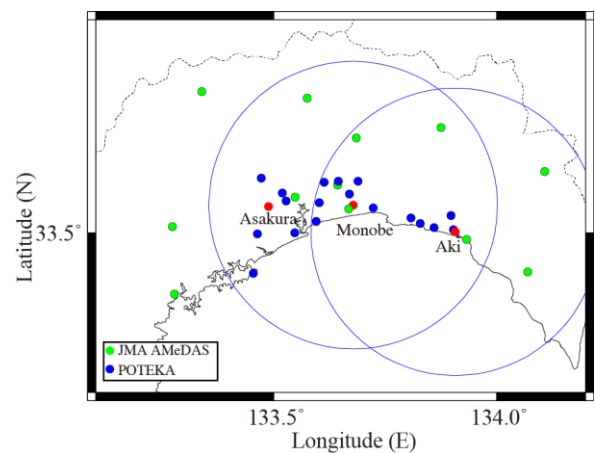


Fig. 6 Map of rain gauges. Red points and blue circles represent radars and their observation range (except Asakura radar), respectively.

## 6. 検証結果

レーダーデータに異常が見られた雨量計観測地点(後述)を除いた雨量比較結果をFig.7に示す。朝倉、安芸レーダーに若干の過小評価の傾向があるものの、相関はいずれも0.8程度であり、おおむね正確にレーダーが地上の降水量を的確に評価していることがわかった。強雨においてはほとんどの場合図中の緑プロットに示すように $Kdp-R$ 関係による算出が5割以上となっており、 $Kdp-R$ 関係が正確な降雨量推定に寄与していることが示された。

一方で、朝倉レーダーにおいてはFig.8に示すように、特定の雨量計設置地点で顕著な異常が見られる場合があった。地上観測計POTEKAを設置した高知市市役所総合あんしんセンター(朝倉レーダーから方位角方向に72°、視線方向に3.8 km)では $a=1.58$ となり、レーダーが降水量を大幅に過大評価する傾向に

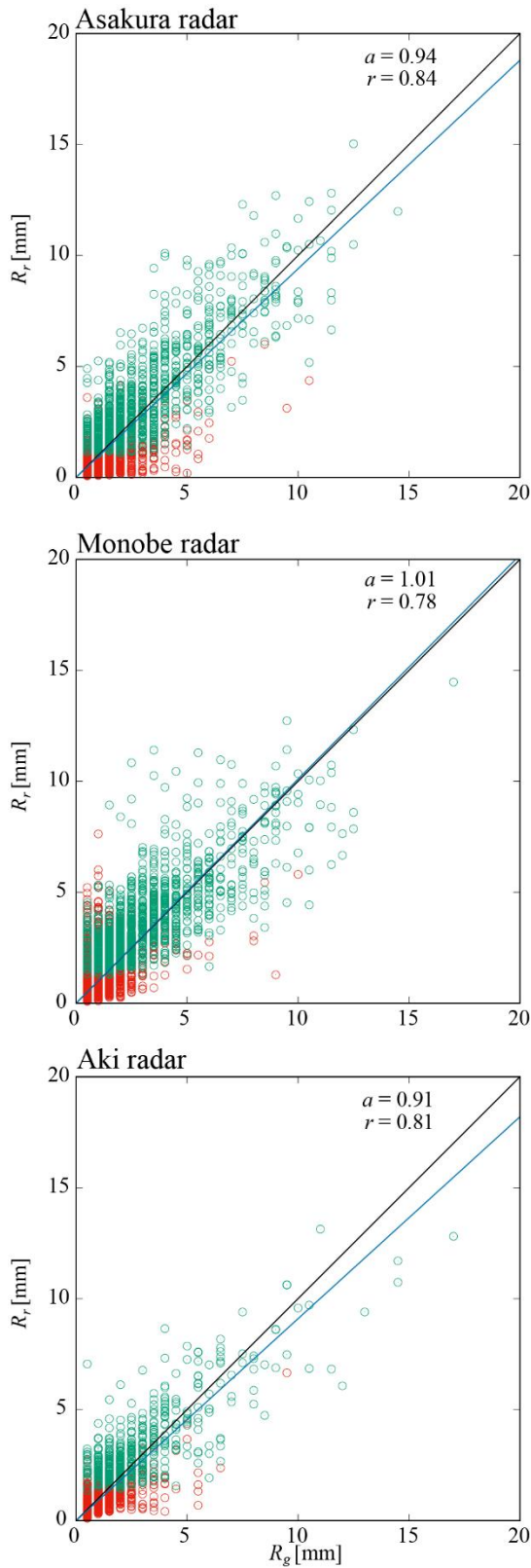


Fig. 7 Scatter plots of  $R_r$  and  $R_g$  for each radar. Blue line and black line represent proportional relationship,  $R_r=R_g$  and Regression line, respectively. Green plots indicate  $R_r$  is estimated with  $Kdp$ - $R$  relationship equal or more than 50 % in estimated time.

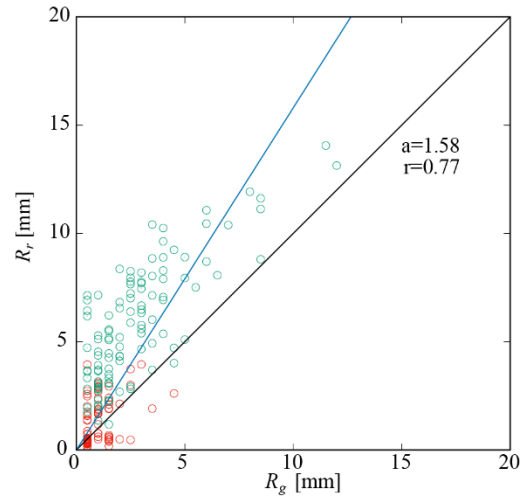


Fig. 8 Scatter plots of  $R_r$  derived from Asakura radar and  $R_g$  at Sohgo-Anshin Center. Blue line and black line represent proportional relationship,  $R_r=R_g$  and Regression line, respectively. Green plots indicate  $R_r$  is estimated with  $Kdp$ - $R$  relationship equal or more than 50 % in estimating time.

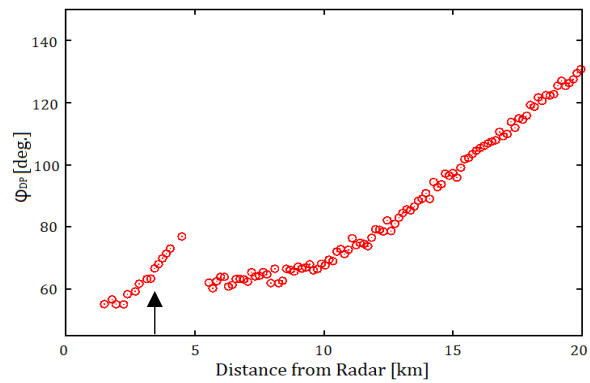


Fig. 9 Profile of  $\phi_{DP}$  at an elevation of 3.0 deg. and azimuth of 72 deg. at 15: 28 JST, Sep. 17, 2017 observed by Asakura radar. Arrow shows the location of Sohgo-Anshin center.

あった。この地点の物部レーダーとの比較においてはこのような傾向が見られていない( $a=1.08$ )ことから、この異常は雨量計の過少計測によるものであるとは考えられない。また、この課題評価傾向は $Kdp$ による算出割合が高い場合に多くみられることから、朝倉レーダーの $Kdp$ データの異常が過大評価の原因であると考えている。 $Kdp$ の算出元である偏波間位相差 $\phi_{DP}$ の方位角方向の分布においてはFig.9に示すように山形の $\phi_{DP}$ が見られ、雨域において理論上は単調増加すべき点を考慮すると異常値となっている。 $Kdp$ が高く算出されていることが考えられる。朝倉レーダーについてはフィルター処理を2回適用することによって $\phi_{DP}$ の異常値の除去を図っているが、例えば

Hubbert and Bringi (1995)においては移動平均フィルターを10回適用することで適切にノイズが除去できるとされており、朝倉レーダーについてもフィルター処理の見直しを行う必要があることが示唆された。

レーダーから地上雨量計までの距離別に精度を比較した場合、Table 2に示すようにレーダーからの距離が遠くなるに従い物部レーダーを除いて過小評価の傾向が強くなることがわかった。また、いずれのレーダーも遠方になるに従い地上雨量計測値との相関が低くなることがわかった。過小評価に関しては比較高度の影響が考えられる。すなわち、遠方ほどビーム高さが高くなるため、適切に下層の降水を表現できなくなることが考えられる。特に安芸レーダーにおいては陸側の低仰角が付近の山地で遮蔽されることから遠方の地点との比較にはより高仰角のデータを用いており、その結果、高度約3 kmとの比較になっている箇所もある。また、遠方ほど相関が悪化する原因としては、レーダーから離れるに従いビームの幅が広がっていくため、空間分解能が低下することが考えられる。レーダーから20 km遠方の地点では朝倉レーダーのビーム幅は約670 m、物部、安芸レーダーについては約940 mとなるため、特に方位角方向の分解能が悪くなり精度が悪化する。これらの課題は今後レーダーネットワークとして各レーダーより相互補完することで改善されると考えている。

## 7. まとめ

高知大学レーダーネットワークを構成するXバンドMPレーダーのうち、朝倉、物部、安芸の3台による降雨量推定について、地上雨量計との比較によって精度の検証を行った。その結果、いずれのレーダーも雨量計との相関はほぼ0.8であり、朝倉レーダーと安芸レーダーについては若干過小評価の傾向にあったものの、いずれのレーダーもおおむね正確に地上の降水を表現していたことがわかった。ただし、推定精度はレーダーからの距離が遠くなるにつれて悪くなることがわかった。一方で、特定の雨量計との比較において異常値が多数みられる場合があり、レーダーデータの品質改善を行っていく必要性が示唆された。

今後はさらに詳細なレーダーデータの品質改善を進めていくとともに、今年新たに設置されて検証を行っていないレーダーについても検証を行うとともに、先述した遠方の相関が劣化する領域などについてはネットワークデータとして相互補完することに

Table 2 Regression and correlation coefficient at each distance.

Distance from Radar [km]	Asakura		Monobe		Aki	
	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>r</i>
0-10	1.07	0.88	1.01	0.81	0.95	0.87
10-20	0.88	0.84	1.04	0.79	1.31	0.78
20-30	0.81	0.75	0.99	0.7	0.78	0.56
30-	0.72	0.68	-	-	-	-

より、全体的な降雨量評価の品質向上を図ってきたい。

## 謝辞

本研究は京都大学防災研究所地域災害実践型共同研究(課題番号28R-01)の支援を受けるとともに、総務省SCOPE(165009001)の委託研究を受けて進められました。また、本研究で用いたPOTEKAの雨量計データの一部は鉄道総合技術研究所から提供を受けました。ここに謝意を表します。

## 引用文献

- Aoyagi, J. (1983): A study on the MTI weather radar system for rejecting ground clutter, 気象研究所研究報告, 第33巻, 第4号, pp. 187-243.
- Fujiwara, M. (1965): Raindrop-size distribution from individual storms, *Journal of Atmospheric Sciences*, 22, 5, pp.585-591.
- Hubbert, J. and Bringi, V.N. (1995): An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 12, pp.643-648.
- Maesaka, T., Maki, M., Iwanami, K., Tsuchiya, S., Kieda, K., and Hoshi, A. (2011): Operational rainfall estimation by X-band MP radar network in MLIT, Japan, *Proc. of 35th Conf. on Radar Meteor.*, Pittsburg, PA US., 142. 8pages.
- Maki, M., Part, S.-G., and Bringi, V.N. (2005): Effect of variations in rain drop size distributions on rain rate estimations of 3 cm wavelength polarimetric radar, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 83, No. 5, pp.871-893.

(論文受理日：2018年6月13日)