

CバンドMPレーダ雨量計とXRAINによる 高精度広域雨量観測

山地秀幸・土屋修一・川崎将生

1. はじめに

国土交通省では2015年7月までに、26基のCバンドレーダ雨量計と、39基のXバンドMPレーダ雨量計で構成されるXRAINを整備している。Cバンドレーダ雨量計は全国をカバーする1kmメッシュでの雨量情報を5分間隔で配信し、XRAINは都市域等を対象に250mメッシュの雨量情報を1分間隔で配信している。

XバンドMPレーダ雨量計は、使用する波長帯の特性から降雨による電波の減衰（降雨減衰）が大きい。そのため強雨域では電波が大きく減衰し、観測不能領域（電波消散域）が発生する場合がある。この課題を克服するために、国土技術政策総合研究所では、XバンドMPレーダ雨量計と、降雨減衰が小さく電波消散域が発生し難いCバンドレーダ雨量計の連携技術について検討した。その結果、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成により、250mメッシュの雨量情報の1分間隔配信の広域化と電波消散域が発生しにくい観測の安定化を可能とする成果を得た。本稿では、XバンドMPレーダ雨量計とCバンドレーダ雨量計の連携を可能とするための技術の概要を述べるとともに、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成によるレーダ雨量情報の高度化について報告する。

2. レーダ雨量計

2.1 Cバンドレーダ雨量計

Cバンドレーダ雨量計の最大観測範囲は半径300kmであり、XバンドMPレーダ雨量計は半径80kmである。Cバンドレーダ雨量計の解像度は、波長が約5cmの電波を用いているため、約3cmの電波を用いるXバンドMPレーダ雨量計より解像度が粗くなるが、アンテナサイズを大きくすることで（直径4m）、半径80km範囲に限定すれば、XバンドMPレーダ雨量計（直径2m）と同等の解像度で観測できる。しかし、Cバンドレーダ雨量計が整備さ

れた当時（1976～2000年）のデータ伝送能力、計算処理能力の関係や300km先までの解像度を均一にすることなどから、1kmメッシュで雨量情報を配信している。また、Cバンドレーダ雨量計は、単偏波の電波を送受信することで、レーダ反射因子（Z）のみを用いて雨量を算定する方式（Z-R方式）をとっており、その観測の原理から定量的な雨量の算定は難しい。このため、地上雨量計で得られた雨量とのキャリブレーションを即時的に行い、レーダ雨量として面的な定量性を確保している。Cバンドレーダ雨量計の観測が5分間隔となるのは、このキャリブレーションに要する時間によるところが大きい。

2.2 レーダ雨量計の二重偏波化

単偏波のCバンドレーダ雨量計に代わるレーダ雨量計として、二重偏波レーダの研究開発が1980年代に旧建設省土木研究所¹⁾を中心に開始され、1994年に釈迦岳レーダが二重偏波化された²⁾。このレーダ雨量計は、水平と垂直偏波の強度差（Zdr）から雨量を算定する方式を採用したものであるが、Zdrの測定精度を満たすためには、処理精度の高いハードウェアシステム、正確な減衰補正が要求され、当時はこれを克服することは難しく、十分な精度改善効果が得られなかった。

一方、水平と垂直偏波の位相差の距離変化（Kdp）からレーダ雨量を算定する手法（Kdp方式）の研究開発が2000年前後に開始され、地上雨量によるキャリブレーションを必要としない定量的なレーダ雨量観測が可能であることが報告された^{3),4)}。国土交通省では、Cバンドレーダ雨量計により5分間隔で更新する1kmメッシュのレーダ雨量情報を配信しているが、この高精度化を図るため、釈迦岳レーダを、Kdp方式を採用するCバンド二重偏波レーダに更新することが2008年に検討され、2009年にこの方式が試験的に採用された⁵⁾。

2.3 XバンドMPレーダ雨量計の導入

2008年7月、兵庫県の都賀川において集中豪雨による河川水位の急激な上昇により、河川にいた5名が流され亡くなるという水難事故が発生した。また、

High-Precision Wide-Area Rainfall Observation by C-Band Polarimetric Radars and XRAIN

*土木用語解説：単偏波レーダ/Z-R法、MP（マルチパラメータ）レーダ/Kdp法

石川県の浅野川で2008年7月に集中豪雨による氾濫で浸水被害が生じた。相次ぐ水難事故及び水災害を契機に、ゲリラ豪雨に対応した豪雨の監視体制の強化が求められ、当時のレーダ雨量情報（5分間隔更新、1kmメッシュ）の高度化（高頻度更新化、高解像度化）が求められた。

レーダ雨量情報の高度化を図る上で、技術的には、高頻度更新化のために高速スキャンを行う必要がある。Cバンド二重偏波レーダは観測範囲が300kmであるため、発射された電波を受信するまでに時間がかかる。そのため、高速スキャンを行う際にパルスヒット数を十分に確保することができず、定量的な観測を行うことが難しい。XバンドMPレーダ雨量計では、観測可能な範囲が80kmとCバンド二重偏波レーダと比較して小さいことから、高速スキャン時においても十分なパルスヒット数を確保することが可能である。また、XバンドMPレーダ雨量計、Cバンド二重偏波レーダは、共に同等の観測解像度を有しているが、Cバンド二重偏波レーダは解像度を確保するためにアンテナサイズが大型である。一方、XバンドMPレーダ雨量計は、アンテナサイズが小型でも解像度を確保することができるため設置場所の自由度も高く、レーダ雨量計システムの製作に時間を要さない。レーダ雨量計の技術的特性、レーダ雨量情報の高度化の早期実現などが総合的に検討され、XバンドMPレーダ雨量計によるレーダ雨量情報の高度化が進められた。

2.4 XRAINとCバンドMPレーダ雨量計の連携

XバンドMPレーダ雨量計は降雨減衰による電波消散域が発生するという課題があったため、国土技術政策総合研究所では、2012年よりXバンドMPレーダ雨量計とCバンドレーダ雨量計の連携技術の検討に着手した。Cバンドレーダ雨量計によりXバンドMPレーダ雨量計の電波消散域を補間するため

には、Cバンドレーダ雨量計の観測頻度をXバンドMPレーダ雨量計と同じ1分間隔とすること、Cバンドレーダ雨量計の観測精度を地上雨量によるキャリブレーションを行わずにXバンドMPレーダ雨量計と同等に引き上げることが課題となった。

Cバンドレーダ雨量計の観測頻度を1分間隔とする場合、前述のとおり高速スキャンを行う必要があるが、十分なパルスヒット数の確保が難しくなり観測データの品質が低下する。国土技術政策総合研究所では、XバンドMPレーダ雨量計の導入初期において、一部で採用された電子管タイプではない固体素子タイプの電波送信機を持つレーダに着目し、精度検証等を通じて、実用に耐えうる精度の観測が可能であること、さらに、送信電波の波形がパルス毎に安定していることから、パルスヒット数が少なくとも、従来と同等程度の品質の観測データが得られることを見出した。また、レーダ技術の革新により、高出力の固体素子デバイスがレーダ製造メカにより開発され、Cバンド二重偏波レーダに対しても固体素子型送信機を採用することが可能となった。国土技術政策総合研究所では、2014年に固体素子型送信機のCバンドMPレーダ雨量計に更新された羅漢山レーダの観測データを分析し、高速スキャンによる少ないパルスヒット数でも観測データの品質が従来と同等程度であることを確認した。

また、CバンドMPレーダ雨量計に最適な雨量算定アルゴリズムについては、情報通信研究機構の研究成果、釈迦岳レーダにおける九州地方整備局の検討成果、XRAINの実用化において確立した観測技術等を踏まえ検討を行った。

2012年7月に発生した九州北部豪雨の事例を対象に、Cバンドレーダ雨量計、XバンドMPレーダ雨量計及びCバンドMPレーダ雨量計のレーダ雨量画像を図-1に示す。CバンドMPレーダ雨量計はXバン

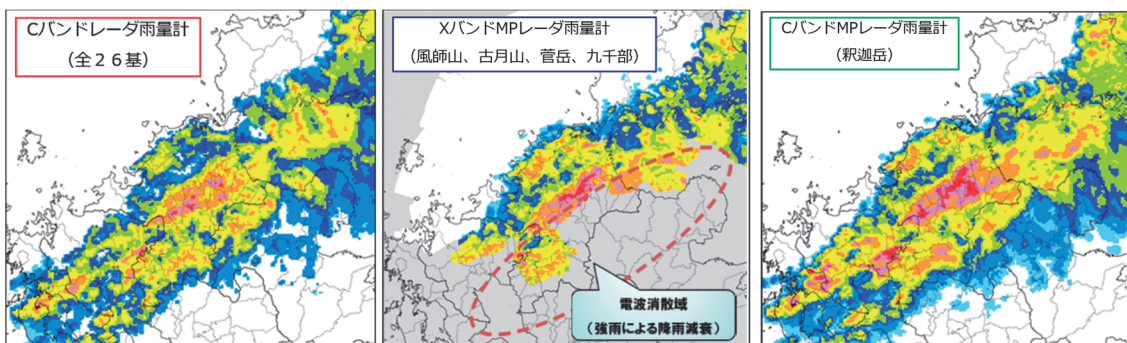


図-1 九州北部周辺地域におけるレーダ雨量画像（2012年7月 九州北部豪雨）

ドMPレーダ雨量計に見られる強雨域での電波消散による観測不能領域が見られず、XバンドMPレーダ雨量計と雨域形状、雨量分布が概ね一致していることが確認された。また、地上雨量計（下関地点）、XバンドMPレーダ雨量計（古月山）、CバンドMPレーダ雨量計（釈迦岳）の雨量時系列を比較したところ、図-2に示すように、降雨減衰による電波消散により古月山レーダでは観測されていない時間帯があるが、釈迦岳レーダでは全ての時間帯で雨量が観測されており、また、観測精度も古月山レーダと同等程度であることが確認された。

3. MPレーダ雨量計による雨量観測

3.1 Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成

XバンドMPレーダ雨量計とCバンドMPレーダ雨量計（以下「MPレーダ雨量計」という。）が連携することによって、降雨減衰による電波消散域の補間の他に、観測条件等からCバンドMPレーダ雨量計によってXバンドMPレーダ雨量計より高精度な観測が可能な範囲はCバンドMPレーダ雨量を反映することで、より高精度な雨量情報の提供が可能となると考えられる。そこで国土技術政策総合研究所ではXバンドMPレーダ雨量とCバンドMPレーダ雨量の合成技術についても検討している。

XバンドMPレーダ雨量計とCバンドMPレーダ雨量計ではKdp方式の適用範囲や観測範囲が異なることから、両レーダ雨量を精度良く合成するためには、レーダからの距離や雨量算定方式、両レーダの観測原理等を踏まえ、観測精度に応じた適切な重み付けをして合成する方法を検討する必要がある。このため、XバンドMPレーダ雨量計及びCバンドMPレーダ雨量計からの距離別に観測精度を検証し、レーダからの距離と観測精度の関係を明らかにした上で、XバンドMPレーダ雨量とCバンドMPレーダ雨量を精度よく合成するための重み付けの方法を開発した。

2014年8月に発生した台風12号におけるXバンドMPレーダ雨量計のレーダ雨量画像とMPレーダ雨量計の合成雨量画像（図-3）を見ると、合成によりXバンドMPレーダ雨量計の電波消散域がカバーされていることが確認できる。また、地上雨量、XバンドMPレーダ雨量、MPレーダ雨量の時系列を比較した結果（図-4）、電波消散の影響でXバンドMPレーダ雨量計による観測では過小となっていた強雨

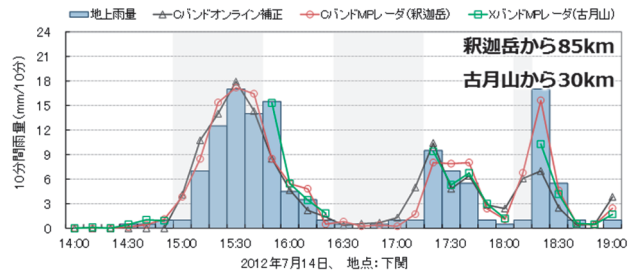


図-2 雨量時系列（2012年7月 九州北部豪雨）

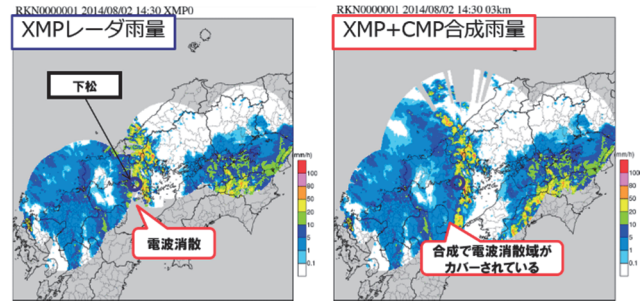


図-3 レーダ雨量画像（2014年8月）

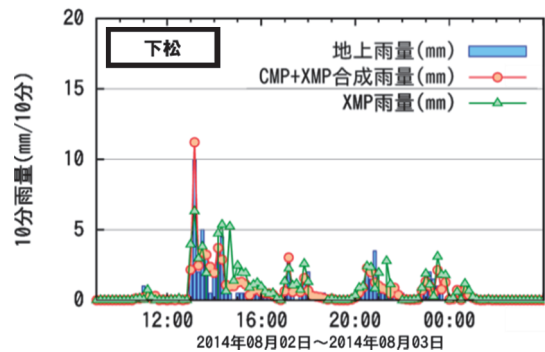


図-4 雨量時系列（2014年8月）

を捉えることができ、雨の降り始めから降り終わりに至るまでMPレーダ雨量計による観測結果が地上雨量計による観測結果とほぼ一致していることが確認された。さらに、図-5に2012年7月に発生した九州北部豪雨におけるXバンドMPレーダ雨量計及びCバンドMPレーダ雨量計の電波消散域の位置を示す。XバンドMPレーダ雨量計の電波消散域については、CバンドMPレーダ雨量計が補間しており、XRAINによる雨量観測の安定性が向上していることが分かる。また、CバンドMPレーダ雨量計の電波消散域についてはXバンドMPレーダ雨量計が補間しており、相互に電波消散域を補間しあっていることが確認された。

3.2 MPレーダ雨量計による雨量情報

Cバンドレーダ雨量計、XRAIN及びMPレーダ雨量計による雨量情報の主な諸元を表-1に示す。XRAINによる雨量情報は最小観測面積が250mメッ

シュ、配信間隔が1分、観測から配信まで1~2分程度で提供されている。Cバンドレーダ雨量計による雨量情報（最小観測面積が1kmメッシュ、配信間隔が5分、観測から配信に要する時間が5~10分程度）と比べ、空間解像度が16倍、時間分解能が5倍、観測から配信に要する時間が概ね1/5となっている。MPレーダ雨量計による雨量情報はXRAINと同様、最小観測面積が250mメッシュ、配信間隔が1分、観測から配信に要する時間が1~2分程度であり、XRAINと比べて広域の雨量情報を配信することが可能になった。

4. まとめ

本稿では、XバンドMPレーダ雨量計とCバンドレーダ雨量計の連携を可能とするための技術の概要を述べるとともに、Xバンド及びCバンドMPレーダ雨量の合成によるレーダ雨量情報の高度化について報告した。この技術により、より広いエリアを対象に、高解像度かつリアルタイムな雨量情報の配信が可能になるとともに、レーダ雨量計による雨量観測の安定性が向上した。

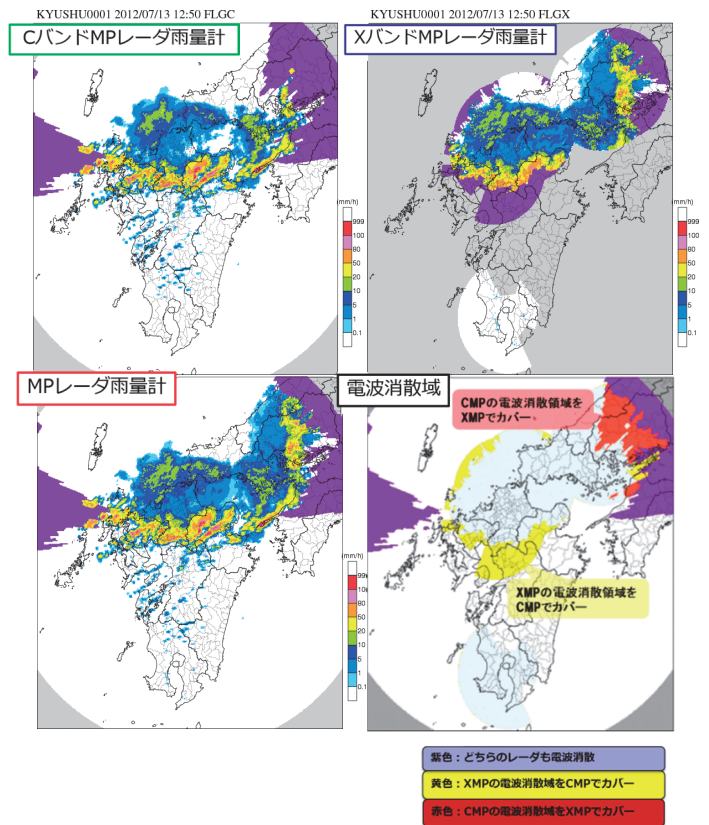


図-5 レーダ雨量画像及び電波消散域 (2012年7月 九州北部豪雨)

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・ドップラーレーダによる降水観測について、水理講演会論文集、Vol.32、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.(in Japanese)
- 3) Maki M., Iwanami K., Misumi R., Park S-G., Moriwaki H., Maruyama K., Watabe I., Lee D-I, Jang, M. Kim H-K., Bringi V.N. and Uyeda H. : Semi-operational Rainfall Observations with X-band Multi-parameter Radar, Atmospheric Science Letters, Vol.6, pp.12-18, 2005
- 4) 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

表-1 レーダ雨量情報の主な諸元

| | Cバンドレーダ雨量計 | XRAIN | MPレーダ雨量計 |
|--------------|------------|----------|----------|
| 観測対象範囲 | 日本全国 | 主要都市等 | 日本全国 |
| 最小観測面積 | 1kmメッシュ | 250mメッシュ | 250mメッシュ |
| 配信間隔 | 5分 | 1分 | 1分 |
| 観測から配信に要する時間 | 5~10分 | 1~2分 | 1~2分 |

- 5) 越田智喜、武中英好、中北英一、真木雅之、中川勝広、深見和彦：現業CバンドMPレーダにおける降雨推定精度、水工学論文集、Vol.68、No.4、I_361~I_366、2012

山地秀幸



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部水循環研究室研究官
Hideyuki YAMAJI

土屋修一



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部水循環研究室研究官、工博
Dr. Shuichi TSUCHIYA

川崎将生



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部水循環研究室長
Masaki KAWASAKI