

XRAIN雨量データの現状と品質向上への取り組み

水田 奈緒美¹・武中 英好²・佐野 哲也¹・深見 和彦³

¹(一財)河川情報センター 河川情報研究所 研究第1部研究員

²(一財)河川情報センター 河川情報研究所 研究第1部主任研究員

³(一財)河川情報センター 河川情報研究所 研究第1部長

水災害をもたらす雨を監視するために、国土交通省はXRAIN(eXtended RAdar Information Network)と呼ばれるXバンド及びCバンドマルチパラメータ(MP)レーダ雨量計ネットワークを構築し、降雨観測とCX合成雨量の作成と提供を行っている。本報文では、XRAINの雨量データの品質向上の取り組みとして、雨の構造に関する科学的知見とレーダの技術的知見に基づく、MPレーダ雨量計の観測データの品質管理、CX合成雨量の合成手法の改良を提案し、水位予測への活用に着目し、精度維持及び品質向上の重要性について、報告する。

Key Words: XRAIN, 雨, MPレーダ雨量計, データ品質管理, CX合成雨量, データ活用.

1. はじめに

近年、頻発する大雨により河川の氾濫や内水氾濫、土石流災害等が引き起こされている。その中で河川の氾濫は、流域にもたらされる雨による水位の上昇に伴い発生する。河川上流域に広範囲に継続した多量の降雨があれば、中・下流域で河川の水位が増加し、やがて越水・決壊が発生することがある¹⁾。一方、局地的な短時間大雨に伴って水位が急激に増加し、雨の降り始めからごくわずかな時間で越水・浸水が発生した事例も報告されている²⁾。これらは、地上にもたらされる雨の降り方と分布、すなわち、雨の特性の違いによる河川水位の応答の違いを示す。よって、河川管理や流域治水において、出水時の河川水位の現況監視やその変動の特性把握において、雨の特性に着目することが重要である。

雨の特性を捉える観測機器に、レーダ雨量計がある³⁾。レーダ雨量計はアンテナからの電磁波の送受信によって雨の位置とその強度を観測するリモートセンシング機器である。アンテナの設定により、上空から地上付近まで、広い範囲の雨を対象とした観測が行える。現在、国土交通省水管理・国土保全局(以下、水局)では、全国の地上付近の雨の状況把握を主目的として、一般的な単偏波レーダ雨量計よりも進化した、二重偏波機能を有するマルチパラメータ(MP)レーダ雨量計のネットワーク「eXtended RAdar Information Network (XRAIN)」を構築し、高密度かつ高精度な降雨観測を実施しており、その雨量データの河川管理への活用が期待されている。

本報文では、XRAINの雨量データの河川管理への活用促進を目的とした、MPレーダ雨量計の観測データの品質管理、合成雨量の作成に関する技術開発、及び水位予測等へのデータ活用について報告する。本報告にあたり、雨の特性に係る雨の構造と、それを観測するレーダの概要について紹介する。

2. 雨の構造とレーダ雨量計

雨のレーダ観測やそれから得る降雨強度の評価と関連する技術開発は、雨の構造に関する科学的知見と、レーダに関する技術的知見に基づいている。

(1) 雨の構造の概要

雨には大きく分けて2つのタイプがある⁴⁾。1つは、乱層雲からもたらされる層状性降雨である(図-1a)。層状性降雨は、数十から数百kmの水平スケールを持ち、高層から落下する氷晶または雪片が0℃高度を超える際に融解して雨滴となって地表に落下する特徴を持つ。数多くのやや粒径の小さい雨滴が一樣に広がる特徴により、概ね一樣の降雨強度となるが、雨滴の粒径と数の変動により強雨域と弱雨域が形成される。

もう1つは、積乱雲によってもたらされる対流性降雨である(図-1b)。局所的に数kmから十数kmの水平スケールで下層から持ち上げられた水蒸気が凝結して雨滴が形成する。水蒸気の凝結に伴って強化された上昇気流により、雨滴が0℃高度より上層に運ばれて霰(あられ)そして雹(ひょう)へと成長する。成長した霰や雹は自由落下をはじめ、0℃高度を通過後に融解して雨滴となり、地表へ向かって落下する。大小様々な粒径の雨滴が局所に集中することと、この過程が十数分の短時間に生じることで、局地的短時間大雨が発生する。

以上の2つのタイプの雨に共通することは、上空で雨滴が形成されることと、落下する雨滴の粒径の変動とその数の変動により、降雨強度とその鉛直分布が変化することである。これらは、降雨の出現や発達、及び降雨構造の形成と維持に寄与し、地上での雨の降り始めと降り方、及び量の決定につながる。

(2) レーダ観測の概要

レーダは、前述の雨の特性を捉えるのに適したり

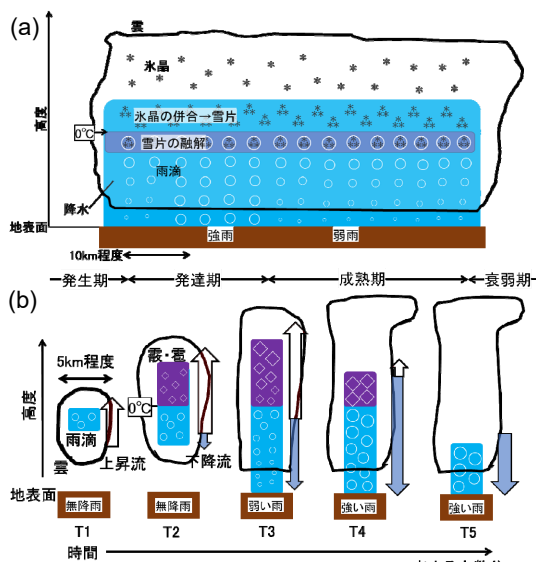


図-1 (a)層状性降雨, (b)対流性降雨の模式図。

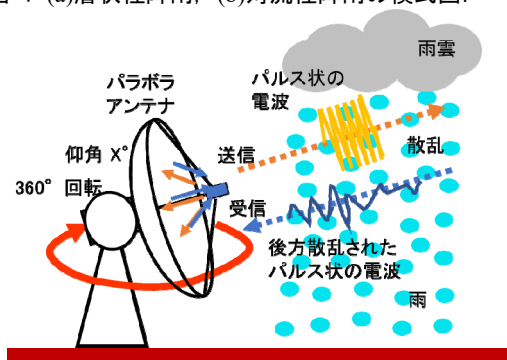


図-2 レーダ観測の模式図。

モートセンシング機器である。

一般的な地上型単偏波レーダでは、パラボラアンテナから雨域に向かって、水平方向に電界の振動するパルス状の電波(水平偏波、パルス波)を送信し、雨域で後方散乱されたパルス波を受信する(図-2)。パルス波の送受信の時刻差から雨域の位置を得る。パラボラアンテナを水平方向に回転すること、そして仰角を上げることで、雨域の3次元的な分布を観測することができる。そして受信したパルス波より反射強度(エコー強度、 Z)を得る。 Z は、雨域の雨滴粒径分布、すなわち雨滴の粒径とその個数の分布の情報を含む⁵⁾。これにより、降雨強度とその分布を推定することができる。図-3は、レーダ雨量計の複数仰角の3次元観測から得た Z の鉛直分布図である。図-1aに特徴を示した層状性降雨の構造(図-3a)と、図-1bに示した対流性降雨の発達期と成熟期の降雨構造の変化(図-3b)を捉えている。

雨域のレーダ観測において、雨滴で強く散乱する周波数帯の電波の選択が重要である。粒径が0.5～5mm程度の雨滴は、Xバンド帯(波長約3cm)、Cバンド帯(波長約5cm)及びSバンド帯(波長約10cm)の電波を強く散乱し、その強さは粒径と比例関係にある⁵⁾。このため、これら周波数帯が選択される(図-4)。なお、短波長ほど散乱が強く、長波長ほど気象による電波減衰の影響に強い。

最近では、水平偏波と垂直方向に電界の振動する

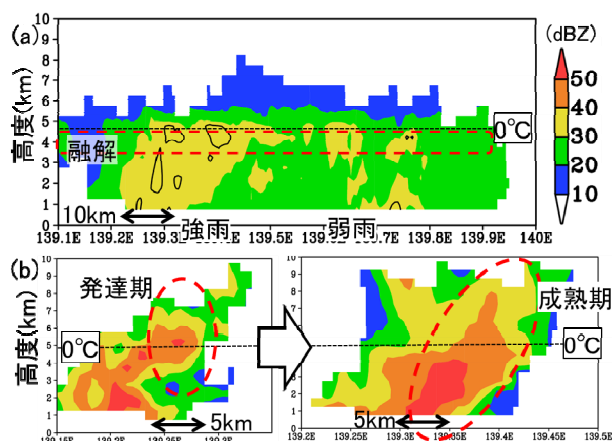


図-3 新横浜 XMP で観測された反射強度の鉛直分布図。

(a)層状性降雨(2021/07/03 06:00～05)

(b)対流性降雨(2021/07/10 20:00～05, 20:10～16)

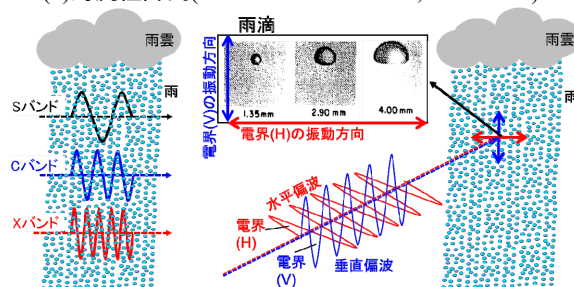


図-4 各周波数帯の電波の模式図。

図-5 水平偏波と垂直偏波の雨域への送信の模式図。

垂直偏波の送受信による二重偏波レーダが雨の観測に採用されている。二重偏波レーダは、主に降水粒子の軸比に関する情報を得ることができる(図-5)⁵⁾。例えば雨域にて、本来球形の雨滴は、大気中を落下するとき空気抵抗を受けて、饅頭のような形状となり、大きい粒径ほど顕著になる(図-5)。その度合いを、二重偏波レーダは軸比の傾向として観測し、それより平均的な雨滴の粒径を推定できる。このことから、より実際の雨滴粒径分布の状況を含む観測値を用いた降雨強度推定の精度向上が期待される⁶⁾。なお、二重偏波レーダは降水に関する様々なパラメータを取得することから、「マルチパラメータレーダ(MPレーダ)」とも呼ばれる⁵⁾。

雨の分布は時空間的に常に変化する。したがって、河川管理目的に必要な雨の情報を得るには、それに見合う雨の着眼点(時空間分解能・精度、観測高度等)を見定めた上で、前述した雨の構造と発達やレーダ観測技術に関する知見に基づいた観測・解析項目とその手法及び観測体制の整備が必要である。

3. レーダ雨量プロダクト

水局は、河川・道路管理のために必要な全国の地上付近の降雨の定量的な把握のため、全国にレーダ雨量計を配備し、各レーダ雨量計で降雨観測により得られるパラメータから降雨強度を推定している。また、各レーダ雨量計の降雨強度を合成することで、Cバンド帯のレーダ雨量計によるCバンドレーダオンライン合成雨量データとCバンドレーダ同時刻合

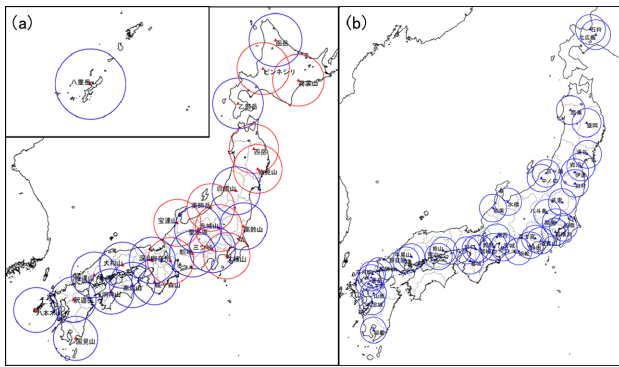


図-6 レーダ雨量計の設置位置と定量観測範囲。(a) Cバンド(赤円)とCMP(青円)。定量観測範囲は半径120km以内。(b) XMP(青円)。定量観測範囲は半径60km以内。

成雨量データ(それぞれ、Cオンライン雨量とC同時刻雨量、まとめてCバンド合成雨量)、CバンドMPレーダ雨量計(CMP)とXバンドMPレーダ雨量計(XMP)によるCバンドMPレーダ・XバンドMPレーダ合成雨量データ(CX合成雨量)を作成している⁷⁾。

(1) 国交省水管理・国土保全局のレーダ雨量計

水局は、9基の単偏波(水平偏波)観測のCバンドレーダ雨量計(CR)、17基のCMP、そして39基のXMPのレーダ雨量計を全国に配備して運用している(図-6)。それぞれのビーム方向の探知距離より、所定の雨量観測精度を確保すべき定量観測範囲と、観測精度は劣るが雨域移動監視等に活用できる定性観測範囲を定めている。Cバンドレーダ雨量計(CR、CMP)とXMPの定量観測範囲はそれぞれ120kmと60km、定性観測範囲は300kmと80kmである。観測仰角は、レーダ毎に定量観測域で可能な範囲で地表付近の雨を観測できるようにCRで5分毎3~4仰角、CMPは2分毎2仰角としている。XMPは、図-1bのような対流性降雨の検知も目的として、2分毎2仰角の地表付近の雨観測に加えて、5分毎12仰角の立体的な3次元観測を両立させて実施している。

(2) レーダ雨量計の観測データによる降雨強度推定

従来レーダ観測で得る降雨強度 R は、反射強度 Z を用いたZR法($Z = BR^6$)により推定される。 B と β は雨滴粒径分布に関する独立でないパラメータである⁵⁾。しかし Z と R の関係は、雨毎(雨滴粒径分布の特徴毎)に変化するため、 B と β の組み合わせが多数存在する⁵⁾。そして実観測において、 Z は強雨による電波減衰に伴う電力損失の影響を受ける。以上がレーダ観測による降雨強度推定の大きな問題となっている。

上記の問題の解決にあたり、MPレーダ雨量計観測による偏波間位相差変化率 K_{DP} を活用した降雨強度推定が注目されている。 K_{DP} は、水平偏波と垂直偏波それぞれが降雨を通過した時に生じる伝搬速度の低下による位相遅れの差(偏波間位相差 Φ_{DP} 、図-7)のビーム方向の変化率であり、落下する雨滴の粒径と相関の高い雨滴の軸比とその個数により支配され

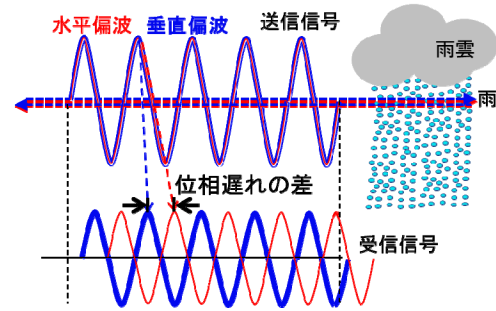


図-7 偏波間位相差の観測の模式図。

表-1 Cバンド合成雨量とCX合成雨量の諸元。

	Cバンド合成雨量	CX合成雨量
レーダ雨量計	CR(9基) CMP(17基)	XMP(39基) CMP(17基)
降雨強度推定パラメータ	$Z(C)$ $Z, K_{DP}(CMP)$	$K_{DP} Z$
空間解像度	1km	250m
データ出力時間間隔	5分	1分
合成方法	合成テーブルに基づくデータの割り当て ⁹⁾	複数データの距離・高度重みづけ平均 ^{10),11)}
地上雨量による補正	あり ⁹⁾	なし

る⁸⁾。例えば、両偏波が大粒径の雨滴が多数存在する雨域を通過する場合、水平偏波の位相遅れが垂直偏波と比べて大きくなることで Φ_{DP} は大きくなり、 K_{DP} は増加する。また、 Φ_{DP} は短波長ほど高い感度で測定できるため、 K_{DP} の感度はXMPの方がCMPと比べて高いとされる(図-4)。

K_{DP} を用いた降水強度 R の推定方法を、 $R-K_{DP}$ 法($R=aK_{DP}^b$)と呼ぶ。 a と b は雨滴粒径分布毎に得られる独立でないパラメータである⁵⁾。しかし $R-K_{DP}$ 法の a と b の組み合わせは、ZR法の B と β に比べて雨毎のばらつきは小さく、 K_{DP} で推定した降雨強度は、 Z で推定したものとは比べて精度が高い⁶⁾。また、 K_{DP} は位相情報なので電力減衰の影響はないため、電力減衰による過小評価も生じない⁸⁾。

水局の各レーダ雨量計において、ZR法による降雨強度推定は、定量観測範囲内の地上雨量とレーダ雨量計の降雨強度を時間積分した雨量との比較により算出した B と β の組み合わせを設定して行う。加えて、水局のMPレーダ雨量計では、 $R-K_{DP}$ 法による降雨強度推定を、雨滴の散乱計算より得られた、XMP、CMPそれぞれ統一の a と b の組み合わせを設定し、系統的誤差も考慮して行う。なお、いずれの降雨強度推定において、観測時の降雨状況に対応したパラメータの逐次変更は行わない。

(3) Cバンド合成雨量(従来のレーダ合成雨量)

Cバンド合成雨量は、全国の定量的な地上付近の降雨情報の提供を目的とした合成レーダ雨量プロダクトである。CR及びCMP計26基の降雨強度(1仰角データに編集)を、あらかじめ割り当てられたCバンド合成雨量の座標系の格子点(空間解像度1km)に当てはめて合成する。合成した降雨強度は、雨量換算された降雨強度と国交省各局や気象庁、自治体等が

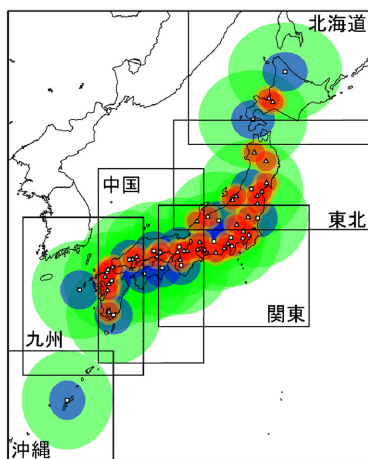


図-8 MP レーダ雨量計の観測範囲。赤色/橙色は XMP の定量/定性観測域。青色/緑色は CMP の定量/定性観測域。△は XMP、□は CMP の設置位置。四角は CX 合成雨量の分割域。

所管する約1万地点の地上雨量との雨量比を用いて、地上の雨の状況に合わせるように補正される⁹⁾。Cオンライン雨量は5分毎のリアルタイム配信データであり、対象時刻前の地上雨量を用いて補正を実施する。一方、C同時刻雨量は5分毎の非配信データであり、対象時刻前後の地上雨量を用いた補正を事後処理で実施する。Cバンド合成雨量の精度は、地上雨量の補正により維持される。

(4) CX合成雨量（XRAINのレーダ合成雨量）

CX合成雨量は、人口密集域での短時間大雨の出現の監視を主目的に配備された39基のXMPに、CRから更新されるCMPを加えたMPレーダ雨量計ネットワーク「XRAIN」（図-8）において作成される、高時空間分解能かつ高精度の地上付近の降雨情報の提供を目指した合成レーダ雨量プロダクトである。このプロダクトを「XRAIN」と呼ぶことがあるが、正確には「XRAIN」で作成された「CX合成雨量」である。合成方法について、CX合成雨量の座標系の格子点(空間解像度 0.25km)の降雨強度は、その格子点を中心とする指定された水平方向の範囲内の上空での、各MPレーダ雨量計観測からZR法及びR-K_{DP}法で得る降雨強度の距離・高度重みづけ平均により、推定される^{10),11)}。以上を1分毎にリアルタイムで処理し、配信される(表-1)。CX合成雨量は、MPレーダ雨量計の高精度な降雨強度推定により、地上雨量の補正なしでの精度の維持が期待される。

(5) CX合成雨量の精度検証

CX合成雨量の精度を、日本全国を分割した5地域(図-8、沖縄を除く)毎に、Cオンライン雨量との相対比較により検証した。精度検証にあたっては、分割地域毎に選定した2020年の3つの主要降雨事例を対象として、定量観測域内の地上雨量との比較による精度指標値(総雨量比と相関係数)を用いた(図-9)¹²⁾。CX合成雨量の総雨量比は、北海道を除いて、Cオン

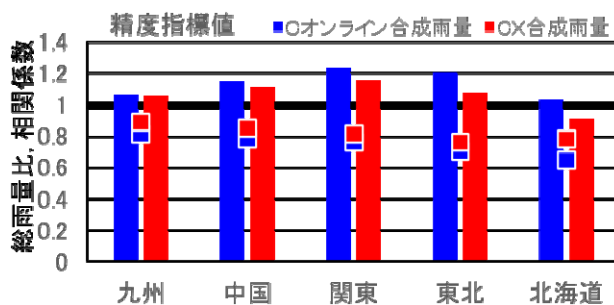


図-9 CX 合成雨量の分割域毎（沖縄除く）の総雨量比と(棒グラフ) 相関係数(□)。分割域毎に選定した2020年の3降雨事例での評価。

(a) C オンライン雨量

(b) CX 合成

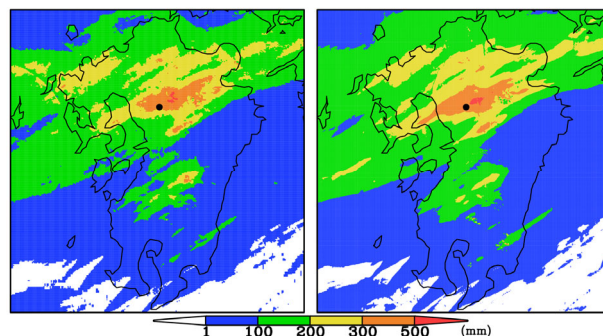


図-10 九州域の2020年7月7日24時間積算雨量図。
●は菊鹿地上雨量観測点。

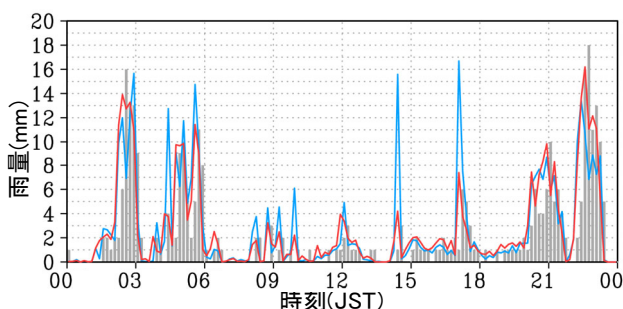


図-11 菊鹿地上雨量観測点の10分値雨量の時間変化。灰色棒は地上雨量、水色線と赤線はそれぞれ観測点直上の格子点の10分値換算Cオンライン雨量とCX合成雨量。期間は2020年7月7日0時から8日0時まで。

ライン雨量と同等以上であることを示した。相関係数は、すべての地域でCX合成雨量の方が良好であることを示した。以上より、CX合成雨量は地上雨量を用いた補正がなくても、Cオンライン雨量と同等以上の精度を確保していることを確認した。東北域、北海道域ではCMP、XMPによる地上付近の降雨観測が進展すれば、精度の向上が期待できる。

大雨に着目した事例として、MPレーダ雨量計の整備が完了している九州域での2020年7月7日24時間積算のCオンライン雨量とCX合成雨量図を図-10に示す。両者を見ると分布、量ともに大差はなく、実際に総雨量比で見ても全体として差はなかった。強雨を観測した菊鹿地点の10分値地上雨量とその直上の格子点の両合成雨量の降雨強度の10分値積算雨量の時間変化を図-11に示す。Cオンライン雨量では極端に大きい雨量の過大評価が見られたが、CX合成雨量は概ね地上雨量と同等の変動を示した。これは、個別の大雨において、CX合成雨量が良好な精度を確保できている例の1つである。

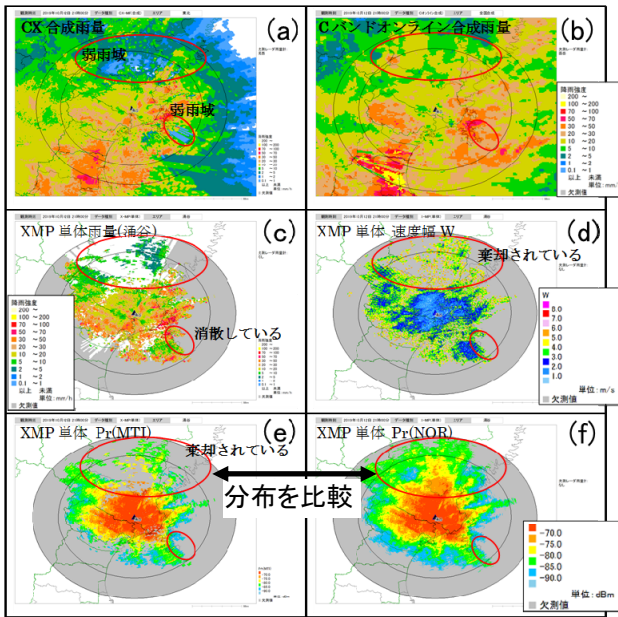


図-12 東北地域の(a)CX 合成雨量と(b)C オンライン合成雨量の降雨強度分布図。涌谷 XMP の(c) 降雨強度、(d)速度幅、(e)水平偏波受信電力(MTI 処理有)、(f) 水平偏波受信電力(MTI 処理無)。日時は 2019 年 10 月 12 日 21 時。

4. XRAIN雨量データの品質向上への取り組み

(1) MPレーダ雨量計の観測データの品質管理

CX合成雨量の高い精度の維持において、合成前の各MPレーダ雨量計の機器状況(点検、障害の有無等)と観測状況(観測値の状況等)、及び降雨強度の精度の確認は必須である。MPレーダ雨量計から得る降雨強度の精度は、地上雨量との精度指標値の比較検証等により評価¹²⁾、低精度であった場合、各観測値の確認や気象状況の調査、降雨強度推定の手法の確認を通じて精度向上に向けた改善策を提案する。さらに、CX合成雨量の画像分析により、精度指標値では捉えられない、精度の低下を引き起こす異常の抽出とその対応策の提案も行っている。ここでは、その一例を紹介する。

2019年10月12日の東北地域のCX合成雨量の画像より、不自然に降雨強度の小さい降雨分布が確認された(図-12aと12b)。合成前の涌谷XMPレーダ雨量計の降雨強度の分析より、大きい降雨強度の中に0mm/hの領域が存在することが分かった(図-12c)。また、その領域に対応して、ビーム方向の風速を観測するドップラー速度 V の品質に係る観測パラメータ、ドップラー速度幅 W が、異常値としてデータ棄却されていたことが分かった(図-12d)。

レーダ雨量計のエコーの処理機能に、受信強度と位相情報から障害物のエコーを除去する機能「Moving Target Indicator(MTI)」がある。水平偏波の受信強度について、MTI処理の有無それぞれの分布図を見ると(図-12eと12f)、MTI処理有では、MTI処理無で降雨が観測されている範囲で不自然な除去が見られ、それは W の棄却の範囲と概ね一致した(図

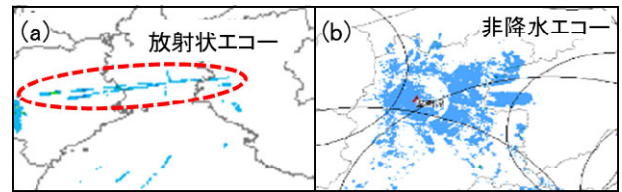


図-13 (a)放射状エコー、(b)非降水エコーの例。

-12d)。MTI処理において、 W の異常値と同じ範囲で、障害物エコーの存在と判別したものと考えられる。

この不自然な降雨域の除去が、後のデータ解析の過程で異常として認められず、降雨として有効なデータ、すなわち0mm/hの降雨として処理されていた。このことがCX合成雨量の降雨強度の過少要因と考えられた。対策として、MTI処理有無それぞれの水平偏波の受信強度を比較し(図-12eと12f)、MTI処理無にデータが存在する領域で、MTI処理有では欠測の場合は異常が生じているものとして、その領域にフラグを立てる処理を提案した。それにより、CX合成雨量作成時にその異常域は無効値として扱われ、他のレーダの降雨強度との合成に用いられず、過小評価は回避されると考える。

また、CX合成雨量の画像にて、放射状エコーや降雨強度の極めて小さい非降水エコー等の異常エコーが確認されることがある(図-13)。これらは主に、MPレーダ雨量計にて観測時の気象状況や機器状態、及び周囲状況により突発的に出現するノイズデータである。それらは、信号処理にて除去処理を行うが十分に除去しきれない場合がある。この場合については、CX合成雨量の使用における留意事項としてデータ配布及び配信時に周知を実施する。

(2) CX合成雨量の合成手法の改良

CX合成雨量は、地上付近の雨についての高精度な雨量情報の提供が期待される。その一方で、現在の合成手法において、対象とする雨の降雨構造によって、CX合成雨量が過小評価となる場合があることが分かってきた。

a) 下層での多量の降雨と地形性降雨

2019年10月12日に、関東地域は台風19号の通過に伴い大雨がもたらされた。24時間積算地上雨量では、平野域の府中で289mm、山岳域の御岳山で605mm、箱根で922.5mmであった。Cオンライン雨量とCX合成雨量の24時間積算雨量分布図を見ると、CX合成雨量の積算雨量は、Cオンライン雨量と比べて過少傾向で、特に山岳域で大幅な過少であった(図-14)。前述の3点の地上雨量との比較でも同様であった。

CX合成雨量の過少の要因について、ビーム(電波の最も強い照射方向)高度と雨の鉛直分布に着目する。平野域の過小評価について、府中付近の降雨を例に、新横浜XMPレーダ雨量計の3次元観測で得られた K_{DP} の24時間積算分布図を図-15に示す。 K_{DP} の大小は降雨強度の大小と対応し、図-15は府中付近を通過した台風19号に伴う降雨の24時間積算値の水

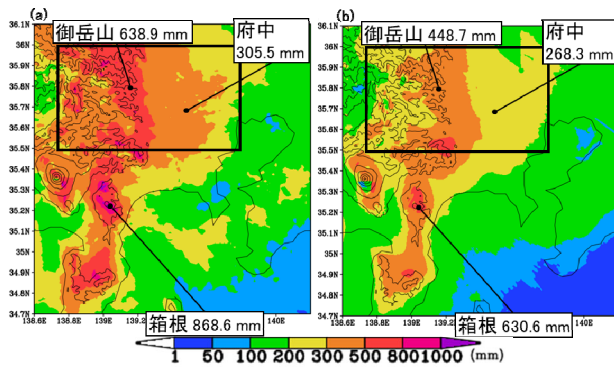


図-14 関東地域の2019年10月12日24時間積算雨量図。
(a) C オンライン合成雨量, (b) CX 合成雨量. 四角はCX改良合成雨量の作成範囲.

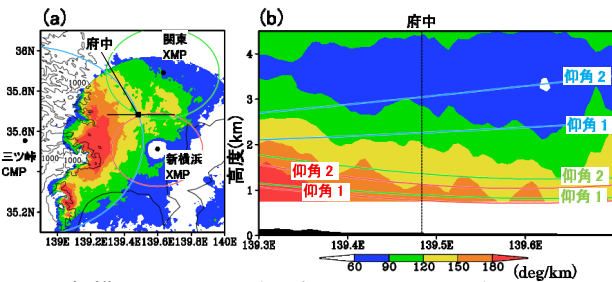


図-15 新横浜 XMP の3次元観測による2019年10月12日 K_{DP} の24時間積算分布。(a) 高度1.5kmの水平分布。黒線は500m毎の等高線。(b) (a)中の黒線に沿う鉛直分布。黒の陰影は地形。赤線、緑線、水色線はそれぞれ新横浜 XMP、関東 XMP、三ツ峠 CMP より照射されたビーム高度。

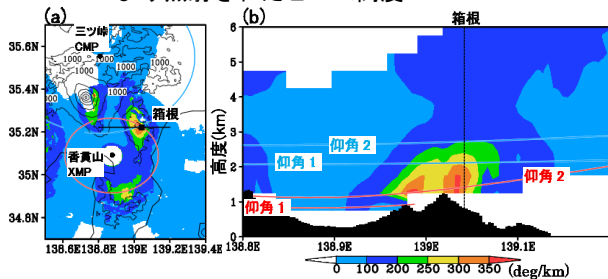


図-16 香貫山 XMP の3次元観測による K_{DP} の時間積算分布。時間は2019年10月12日0時から21時まで。(a) 高度1.5kmの水平分布。黒線は500m毎の等高線。(b) (a)中の黒線に沿う鉛直分布。黒の陰影は地形。赤線と水色線はそれぞれ香貫山 XMP と三ツ峠 CMP より照射されたビーム高度。

平、鉛直分布の特徴を示す。高度2km以下に多量の雨が存在する分布であり、この台風の雨の特徴とされる下層ほど雨が多い特徴を示した¹³⁾。このような雨に対して、新横浜XMPと関東XMPからの定量観測域のビームは高度2km以下の雨の集中している箇所を通過した。その一方で、三ツ峠CMPからの定量観測域のビームは、高度2kmより上空の雨の少ない箇所を通過した。

山岳域の過少評価について、箱根付近の降雨を例に、香貫山XMPの3次元観測で得られた K_{DP} の時間積算分布図を図-16に示す。箱根が位置する山岳の上空で、高度2km以下に多量の雨が存在する分布であることが分かる。これは、台風に伴う上空の雨雲から落下する雨滴が山岳で発生した低層雲の雲粒を捉えて成長することによる降雨の増幅と考えられる⁴⁾。このような雨について、香貫山XMPからの1本の定

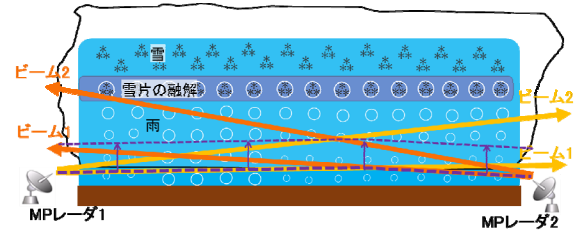


図-17 CX 合成雨量の改良合成手法の模式図。太い紫破線は最低ビーム高度、細い紫破線は最低ビーム高度より0.5 km上の高度。

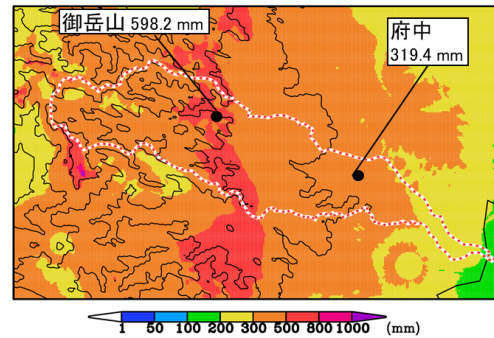


図-18 多摩川水系における改良 CX 合成雨量の2019年10月12日24時間積算雨量図。範囲は図-14中の四角と同じ。赤破線は多摩川水系境界。

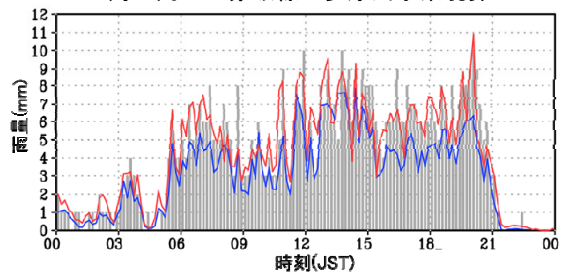


図-19 御岳山地上雨量観測点の10分値雨量の時間変化。灰色の棒は地上雨量、青線と赤線はそれぞれ10分値に換算した観測点直上のグリッドのCX合成雨量と改良CX合成雨量。期間は2020年7月7日0時から8日0時まで。

量観測域のビームのみが高度2km以下の雨の多い箇所を通過し、三ツ峠CMPからのビームが高度2kmより上空の雨の少ない箇所を通過した。

なお、府中と箱根それぞれの上空では、遠方のMPレーダ雨量計から照射された定性観測域のビームが複数本通過する。

以上から、CX合成雨量の過少評価は、対象とした降雨が、平野域、山岳域ともに高度2km以下に多量の雨が存在する降雨構造であったのに対して、合成において、地上付近の雨を反映する高度2km以下の雨量データだけでなく、雨の少ない高度2kmよりも上空をも含めた雨量データを距離・高度重みづけ平均したためと考えられる。

b) XMP及びCMP降雨強度の合成手法の改良の提案

合成雨量が高い精度で地上付近の雨量を示すには、雨の鉛直分布の影響を小さくし、地上付近の雨のXMP及びCMPの降雨強度を優先して合成に用いることが重要である。そこで、可能な限りの地上付近のデータ活用を念頭に、合成する直交座標系の各格

子点について、上空の定量観測域のビームが通過する最低高度を基準とし、そこから0.5km以内の上空を通過するXMPまたはCMPの定量観測域のビームの降雨強度を合成する方法を考案した(図-17)。この方法を用いて、多摩川水系を対象領域として、同期間について改良CX合成雨量を作成した。このデータより作成した同日の24時間積算雨量分布図を見ると、全体的に過小傾向が改善するのが見られた(図-18)。御岳山での10分値雨量の時間変化をみると、改良CX合成雨量は現行のCX合成雨量と比べて、地上雨量により近づくのが分かった(図-19)。

以上より、改良CX合成雨量は、可能な限り地上付近のデータを用いることで、過少評価を抑えることができ、地上雨量との比較において量的に高精度を維持できることを示した。

c) 改良手法の適用における留意点

今回示した改良手法における、地上付近の降雨としての降雨強度の精度の維持と向上において、地上付近の雨を対象としたビーム高度の分布と、電波消散等による観測不能に対する他のXMPやCMPによる重複観測によるフォローが重要である。しかし、図-15と図-16のように、雨の構造により他の観測が地上付近の雨を反映しない降水をフォローする場合がある。そして、CMP観測の降雨強度は、 K_{DP} 等の観測の感度の違いにより、XMP観測のものと比べて精度が低下する。これらの解決には、仰角設定の変更やレーダ雨量計の再配置、そして外部の雨量データによる補正が考えられる。

5. CX合成雨量の精度が水位予測に与える影響

CX合成雨量は、使用に際して留意すべき点が残っているが、今後の河川管理における主要な水文情報としての活用が期待される。ここでは、河川の水位予測への活用に着目し、現況値となるCX合成雨量の精度が水位予測へ与える影響を評価し、CX合成雨量の精度維持及び向上の重要性を確認する。

本検討では、初期値設定に実績(観測)水位の同化を導入し、水位計算にCX合成雨量を入力とした土研分布型流出モデルの流出計算と粒子フィルタ法により得る、推定される真値に近いと考える河道へ流入する水分量を入力とする、1次元不定流モデルによる河川水位の予測計算¹⁴⁾を行い、雨量の精度の違いによる水位予測の違いを調査した。水位予測は10分毎に実施し、その都度実績水位の同化と河道へ流入する水分量の設定を行う。使用モデルと計算方法は国交省リスクラインで用いられているものである¹⁴⁾。なお、予測雨量の入力は実績雨量とし、完全予測として検証した。対象流域は九州の菊池川水系(図-20)で、各モデルの計算にかかるパラメータは、本検討に向けた同定を行わず既存の設定を用いた。

現況値となるCX合成雨量は、2020年7月5日から8日の大雨事例を対象とした。この事例の総雨量比は

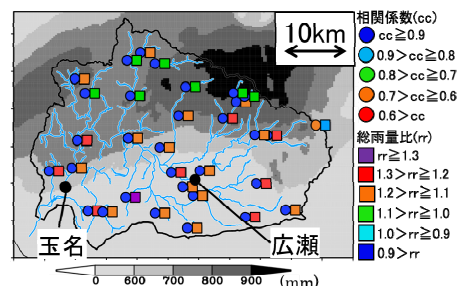


図-20 菊池川水系の河道図とCX合成雨量の時間積算雨量分布図。○□はそれぞれ地上雨量観測点での相関係数と総雨量比。期間は2020年7月5日12時から8日12時まで

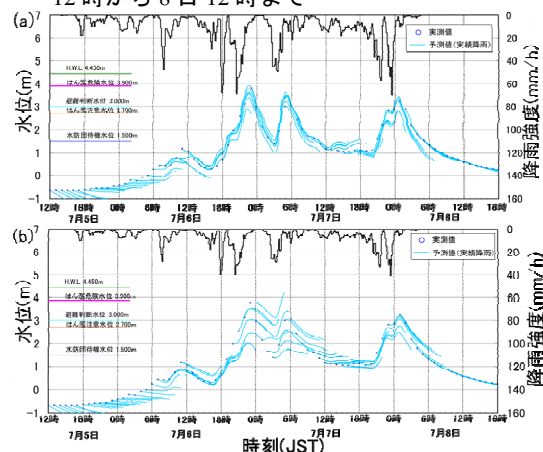


図-21 広瀬の1時間毎の実績水位と予測水位、10分毎の広瀬上流域のCX合成雨量の平均降雨強度。(a)ケース1、(b)ケース2。

1.0~1.4程度、相関係数は0.9以上であった。CX合成雨量は量的にはやや過大であったが、ばらつきが小さいことから時間変化の傾向は地上雨量とほぼ同等と言える(図-20)。この実績雨量を入力とした計算をケース1とする。

CX合成雨量の精度が水位予測に与える影響を示すため、今回は過小なCX合成雨量を入力とした水位計算結果を比較対象とする。雨量については、一様に0.586倍(令和2年度の九州地整管内における一級水系主要降雨検討における最小の総雨量比)を与えた仮想的な実績雨量を入力するケース2を設定した。

着目するのは、実績水位と2ケースの予測水位の時間変化の違いである。水系の上流域に位置する広瀬観測地点における、実績水位と予測水位、及び上流域の平均降雨強度を見る(図-21)。水位は1時間毎、上流域の平均降雨強度は10分毎である。ケース1において(図-21a)、実績水位で見られた7月6日18時以降の3つそれぞれのピークを挟む水位の時間変化を、出現時の3~5時間前の状況初期値とした水位予測は、概ね良い精度で計算できているといえる。一方、ケース2をみると(図-21b)、特に最初の2つのピークに向けての水位の急上昇を予測できていない。また1つ目のピーク後に予測水位が下がりきる前に再び上昇する予測も見られた。これは、過小なCX合成雨量を入力としたケース2では、土研分布型流出モデルにおいて河道へ流入する水分量が推定される真値と大きく異なり、粒子フィルタ法によるフィルタ

リングを用いても河道へ流入する水分量が推定される真値に近づけなかったことを反映している。以上の結果は、現況値となるCX合成雨量の精度低下が予測水位の計算結果に与える影響の一例を示し、的確な洪水予報におけるCX合成雨量の継続した品質管理及びさらなる精度向上の重要性を示す。

6. CX合成雨量の活用促進に向けて

CX合成雨量は、一般向けの情報提供として、Webページ「国土交通省 川の防災情報」の「レーダ雨量(XRAIN)」にて、リアルタイムで画像配信が行われている¹⁵⁾。同ページ掲載の各種河川情報とあわせた、降雨と河川状況の把握、そして出水時の対応決定への活用が期待される。また、CX合成雨量の数値データは、国土交通省が実施する水防災オープンデータ提供サービス¹⁶⁾を通じて配信されており、民間業者等の河川管理事業へのCX合成雨量の活用促進が図られている。

7. まとめ

本報では、国土交通省XRAINのMPレーダ雨量計の観測データの品質管理と、CX合成雨量の合成手法の改良の提案を示した。そして、現在のCX合成雨量を用いた水位予測にて、河道へ流入する水分量の精度が、粒子フィルタ法による推定される真値の探索を用いても、CX合成雨量の精度に強く影響されることを示した。以上より、XRAINの雨量データの河川管理の活用に向けて、その品質管理、及び解釈と活用手法の開発が必要とされる。今後も河川管理への活用促進に向けて、雨の科学的知見とレーダの技術的知見の蓄積を含め、XRAINの雨量データの品質管理と利活用に関する技術開発を推進する。

参考文献

- 1) 横木裕宗ほか, 2020: -Editorial- 特集『令和元年風水害報告特別企画』, 土木学会論文集B1 (水工学), 76, 153-158.
- 2) 関根正人ほか, 2017: 森ヶ崎処理区を対象とした2013年7月23日豪雨時の都市浸水の再現計算とその精度検証, 土木学会論文集B1(水工学), 73, I_1459-I_1464.

- 3) 中尾忠彦, 2017: レーダで洪水を予測する, 成山堂書店, pp.167.
- 4) Houze, R. A. Jr., 1993: Cloud Dynamics, *ACADEMIC PRESS*, pp.570.
- 5) 深尾昌一郎, 浜津享助, 気象と大気のリモートセンシング (改訂 第2版), 京都大学学術出版会, pp.501.
- 6) Maki, M., et al., 2005: Effect of Natural Variations in Rain Drop Size Distributions on Rain Rate Estimators of 3 cm Wavelength Polarimetric Radar, *J. Meteor. Soc. Japan.*, 83, 871-893.
- 7) 水文観測業務規程細則, 国土交通省 水文水質データベース, http://www1.river.go.jp/kitei_saisoku.pdf (2021年10月22日閲覧)
- 8) Park, S. G., et.al., 2005: Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X Band. Part II: Evaluation and Application, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 22, 1633-1655.
- 9) 財団法人 河川情報センター, 2004: レーダ雨量計全国合成システム 運用監理指針 (案), 財団法人 河川情報センター, pp.331.
- 10) 土屋修一ほか, 2015: 降雨減衰補正と合成雨量作成手法の改良による XRAIN 観測雨量の精度向上, 土木学会論文集B1 (水工学), 71, I_457-I_462.
- 11) 若松聡, 佐藤宏明, 2016: XRAIN 拡大試行版 ~公開までの取り組み~, 平成28年度 河川情報シンポジウム 講演集, 5-1 - 5-8.
- 12) 国総研資料, 2016: 第909号「XRAIN 雨量観測の実用化技術に関する検討資料」(<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0909pdf/ks0909.pdf> 2021年10月5日閲覧)
- 13) 竹見哲也, 2019: 台風19号の特徴と豪雨発生の気象状況, 令和元年台風第19号に関する緊急報告会, 日本学術会議, 2019年12月24日. (https://janet-dr.com/050_sai_gaiji/2019/191224/20191224.html 2021年9月21日閲覧)
- 14) 土屋修一, 2019: 新しい洪水予測手法: 水害リスクライン, 令和元年度 第1回 河川研究セミナー河川財団 (<https://www.kasen.or.jp/study/tabid325.html> 2021年9月30日閲覧)
- 15) 国土交通省 川の防災情報(<https://www.river.go.jp/> 2021年9月30日閲覧)
- 16) (一財)河川情報センター 水防災オープンデータ提供サービス (<http://www.river.or.jp/koeki/opendata/index.html> 2021年9月27日閲覧)

Approach to accuracy improvement of rainfall intensity observed by multi-parameter radars in XRAIN of MLIT

Naomi MIZUTA, Hideyoshi TAKENAKA, Tetsuya SANO and Kazuhiko FUKAMI

The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (hereinafter referred to as the “MLIT”) has established a multi-parameter (MP) radar network to monitor rainfall which causes water-related disasters. This network is called XRAIN (eXtended RADar Information Network), which is composed of X-band MP radars (XMPs) and C-band MP radars (CMPs). The MLIT observes the rainfall using CMPs and XMPs and provides the composite radar rainfall information, ‘the C-X composite rainfall’ in XRAIN. In this study, based on the scientific knowledge on rain and the technical knowledge on radars, we propose the quality control of data observed with the MP radars, and the improvement of the methodology to form the C-X composite rainfall. We also report that it was recognized to be important to maintain accuracy and quality of the C-X composite rainfall after utilizing the C-X composite rainfall in the water level prediction.