

二重偏波フェーズドアレイ気象レーダの有効性とその洪水予測への適用に関する研究

A Study on the Effectiveness of Multi-parameter Phased Array Weather Radar and its Application to Flood Prediction

19N3100035J 干場 希乃 (河川・水文研究室)

Kino HOSHIBA/ River Engineering and Hydrology Lab.

Key Words : localized heavy rainfall, weather radar, MP-PAWR, VIL, flood prediction

1. はじめに

近年、都市部を中心に局地的大雨による被害が頻発している。その事例として、2008年7月28日、兵庫県神戸市に位置する都賀川では、局地的大雨により10分間で1.3m水位が上昇した。また、当時河川で遊んでいた児童を含めた5名が逃げ遅れて亡くなったことが報告されている¹⁾。

都市部における局地的大雨は、降雨のピークから河川の水位上昇までの時間が短いという特徴を有し、避難や被害抑止に使うためのリードタイムの確保が困難である場合が多く、甚大な被害の発生要因となり得る。

このような背景から、国土交通省は河川管理の一環として、従来運用していたCバンドレーダに加えて、全国の主要な都市部にXバンドマルチパラメータ・レーダ(以下、XバンドMPレーダと記す)の運用を開始し、降雨の監視を行なっている。XバンドMPレーダは情報配信までにかかる時間が1分、空間分解能が250mメッシュであり、Cバンドレーダに対して、高精度な降雨観測を可能とした²⁾。

気象庁によると全国(アメダス)の1時間降水量50mm以上の年間発生回数は増加傾向にあり³⁾、気候変動に伴う極端気象の増加も考慮すると、今後も局地的大雨の激甚化を踏まえた対策は喫緊の課題と言える。

局地的大雨による被害を軽減するためには、一般的に、その規模や雨域の情報を対象地域にいち早く提供する必要がある。このため、局地的大雨の発生を高精度に監視・予測する技術の導入検討は洪水対策上重要と言える。近年開発された、マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダは、局地的大雨をもたらす急速に発達する積乱雲をより早く探知する。表-1にマルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダおよび現行の気象レーダであるXバンドMPレーダの性能を示す^{2) 4)}。表-1から、マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダは3次元観測を30秒で行うことに対し、XバンドMPレーダは3次元観測に5分かかると分かる。マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダを用いた降雨予測や、降雨流出解析事例は少なく、水文分野においての有効

表-1. XバンドMPレーダとMP-PAWRの性能

	XバンドMPレーダ	MP-PAWR
3次元空間データ更新周期	5分	30秒
観測仰角	12仰角 (XRAIN関東レーダでは約0°~20°)	114仰角 (約0°~90°)
空間分解能	250m	250m
観測範囲	半径60km	半径60km

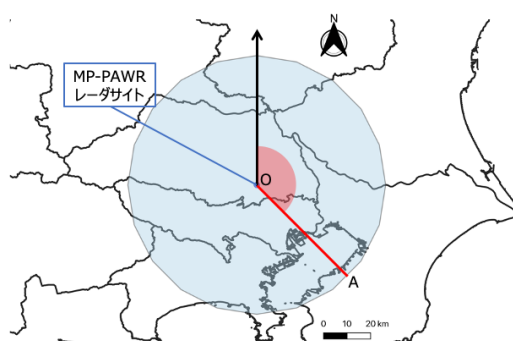


図-1. 図-2, 図-3における断面位置図
(断面OA, 方位角135度)

性については十分に検証されていない。

本研究では、マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダ(以下、MP-PAWRと記す)の有効性を明らかにした上で、局地的大雨の避難や被害抑止のリードタイムを確保することを目的とした洪水予測手法の構築を行う。

2. 鉛直降雨分布によるMP-PAWRの有効性検証

局地的大雨をもたらす積乱雲は鉛直方向に発達した後、地上に激しい雨を発生させるため、降雨予測の観点から、鉛直降雨観測は重要となる。降雨の鉛直構造を把握可能かをMP-PAWRおよび現行の気象レーダの任意の鉛直断面における降雨分布を目視により比較することで検証する。ここで、現行の気象レーダとはXバンドMPレーダのことを指す。

対象降雨は2018年に発生した局地的大雨の2事例(2018/08/13 13:00~17:00, 2018/08/27 19:35~22:00)である。

同等の比較を行うために、現行の気象レーダのデータは用いずに、MP-PAWRの観測降雨強度を用いて、鉛直断面図を作成し、比較を行なった。

なお、本研究では、MP-PAWRの観測仰角からXバン

ドMPレーダ相当の仰角を抽出し、抽出したこれらの観測仰角が有する観測値を用いて、XバンドMPレーダのデータを擬似的に作成した。両データより、MP-PAWRレーダサイトから60km、方位角135度の断面(図-1)において、降雨の鉛直断面図を描画し、これらの比較を行った。

図-3, 4は対象降雨における断面OAの鉛直断面図を時系列順に示している。上段はMP-PAWR全仰角の観測値を用いて描画した降雨分布であり、下段はXバンドMPレーダ相当の仰角のみ抽出した観測値を用いて描画した降雨分布である。

図-3に示す通り、全仰角の観測値を用いることで高度6km付近に存在する雨雲を早期に発見することが可能であることが示された。さらに、降雨の発達する様子や地上に降雨が発生する様子も確認できる。図-4の上段より、雨域が高度15km付近まで存在することがわかる。特に、レーダサイト近傍にある強い降雨強度を示す雨域をXバンドMPレーダ相当の仰角のみでは把握できないことに対して、全仰角の観測値を用いることで雨域全体を把握できることがわかった。

このようにMP-PAWRは、上空15km付近の強い降雨も捉えることから雨域全体を把握でき、上空の降雨情報を用いた降雨予測手法において有効であることが示された。

3. 対象流域の選定

気象レーダは波長が10cm以下の場合、降雨減衰する特徴を持っている⁹⁾。降雨減衰が発生すると、観測降雨強度が過小となったり、欠測となる。XバンドMPレーダやMP-PAWRの波長は約3cmであり、降雨時の降雨減衰は課題となっている。国土交通省では、複数の気象レーダ観測値を合成することで、降雨減衰した観測値の補正を行っている。一方、MP-PAWRは単基のレーダであるため、MP-PAWRの観測値を用いて降雨流出解析をする際には、対象流域の選定に注意を払わなければならない。

本研究では対象降雨に対して、MP-PAWR観測雨量とXRAIN合成雨量および地上雨量計の値を目視で比較し、対象流域を選定した。その結果が図-5である。MP-PAWR観測雨量・XRAIN合成雨量・地上雨量計の値が合っている箇所を◎、MP-PAWRおよびXRAIN合成雨量の値があっている箇所を△、MP-PAWR・XRAIN合成雨量・地上雨量計の値が一致していない箇所を□としている。

この結果から、対象流域は白子川流域とした。流域面積が25km²・流域内人口が27.7万人と、都市河川であり、局地的大雨による被害が発生する可能性のある流域である。

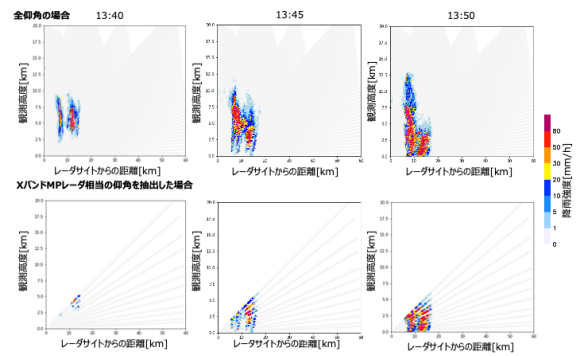


図-3. 断面 OA の鉛直断面図

(2018年8月13日13時40分から13時50分)

〔全仰角の観測値を用いることで、13:40時点で雨雲を探知することができ、雨雲が発達する様子を把握できている。〕

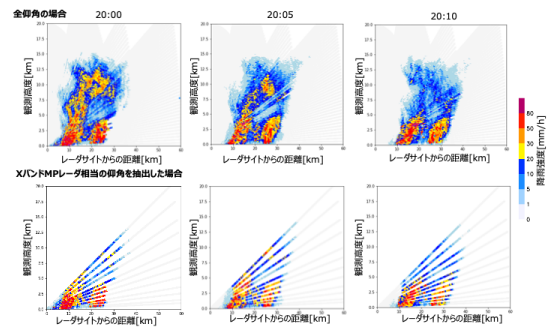


図-4. 断面 OA の鉛直断面図

(2018年8月27日20時00分から20時10分)

〔全仰角の観測値を用いることで、雨域全体を把握することが可能。〕

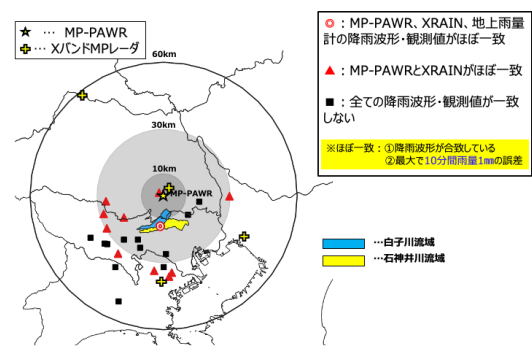


図-5. 地上雨量計各地点における観測雨量比較結果および対象流域の位置図

〔練馬地点においてMP-PAWRの観測雨量がXRAIN合成雨量・地上雨量と合っている。〕

4. 降雨予測手法および降雨予測結果

降雨予測手法は平野ら⁹⁾が提案しているVILナウキャストを用いた。VILとは、鉛直積算雨量(Vertically integrated liquid water content, 単位: kg/m²)である。VILの推定式を式(1)に示す。式(1)に示すように、VILは気象レーダが観測する反射強度Zおよび偏波間位相差変化率K_{DP}か

ら推定される。雨水量の時間変化が雨滴生成の量と地上に落下する雨の量の差に等しいとする式(2)が成り立ち、かつ、上空から地上に落ちる降雨の時間変化は降雨強度に等しいとして式(3)が成り立つ。式(2)・(3)から式(4)が導かれ、VILについて解き、 $VIL(t+\Delta t)$ をTaylor展開することでVILの予測値が計算できる。VILナウキャストでは、予測したVILから式(3)より予測降雨強度を求める手法となっている。また、移動ベクトルの推定方法は計算負荷のかからない相互相関法を用いている。

$$VIL = \begin{cases} 0.00393 \int_0^h Z^{0.55} dh \\ (K_{DP} < 0.3^\circ/km \text{ or } 10 \log_{10} Z < 35dBZ) \\ 0.991 \int_0^h K_{DP}^{0.713} dh \text{ (otherwise)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{d(VIL)}{dt} = S(t) - P(t) \quad (2)$$

$$P(t) = \frac{d(VIL(t) - w(t))}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{dVIL}{dt} + \frac{VIL(t)}{\tau(t)} = S(t) + \frac{w(t)}{\tau(t)} \quad (4)$$

ここで、 P ：降雨強度 [$kg/(m^2 \cdot s)$]、 S ：雨滴生成率 [$kg/(m^2 \cdot s)$]、 τ ：VILから地上の降雨への変換時間[s]、 w ：気柱の上空に残っている雨水量 [kg/m^2]である。

図-6に白子川流域における降雨予測結果を示す。灰色の棒グラフは、MP-PAWRの観測降雨強度である。青線が10分先予測降雨強度・赤線が20分先降雨強度・緑線が30分先予測降雨強度である。図-6の観測降雨強度の立ち上がり部分に着目すると、10～30分先予測降雨強度でも同様の立ち上がりが見られる。これは、最大30分前から立ち上がりが予測されていることを示している。観測降雨強度のピーク時刻に着目すると、10分先予測降雨強度が観測降雨強度よりも過大な値となっている。

図-7は同時刻のVILの時系列グラフである。赤い破線はVILが $5kg/m^2$ であることを示す。VILは $5kg/m^2$ 以上の値では非常に激しい降雨が発生する可能性が高いとされている⁷⁾。15:00~15:20付近においてVILは、 $5kg/m^2$ を超える値となっているが、同時刻の観測降雨強度は減少傾向にある。これは、MP-PAWRの観測する上空の降雨が上昇風によって地上に落ちなかったことを示唆するものである。

表-2に予測先行時間ごとの対象降雨における総雨量および最大降雨強度を示す。表-2より、予測先行時間が長くなるとともに観測降雨強度における総雨量および最大降雨強度と値が合っていることがわかる。

以上の結果から、10分先・20分先・30分先予測降雨強

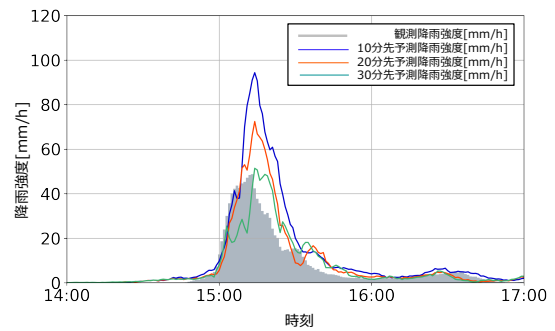


図-6. 白子川流域における降雨予測結果
(2018年8月13日14時00分から17時00分)

観測降雨強度と予測降雨強度の立ち上がりが合っている。予測先行時間が長くなるとともにピーク降雨強度が小さくなっていることがわかる。

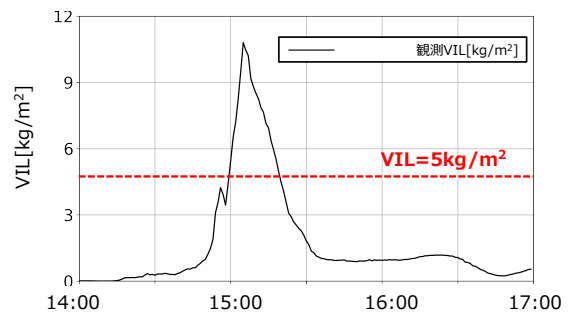


図-7. 白子川流域平均 VIL の時系列グラフ

※ VIL は $5kg/m^2$ 以上の値では非常に激しい降雨が発生する可能性が高い。
15:00~15:20において VIL が大きな値をとっていることがわかる。

表-2. 予測先行時間ごとの総雨量および最大降雨強度

予測先行時間が長くなるとともに、総雨量および最大降雨強度は観測降雨強度と合っていることがわかる。

予測先行時間	総雨量	最大降雨強度
(観測)	21mm	49mm/h
10分	32mm	84mm/h
20分	25mm	61mm/h
30分	21mm	43mm/h

度を入力降雨として降雨流出計算を行なう。

5. 降雨流出計算による洪水予測への適用

流出計算手法は、流量ハイドログラフを作成するために笹田・山田ら⁸⁾によって解析解が導出された合成合理式を用いた

合理式は降雨強度を入力情報とし、一般的に都市流域のような小流域に対しては高い精度を有しており、計算負荷も他の流出解析手法に対して少ない。

このため、本研究は、合成合理式の解析解を水位予

測手法として採用した。基本式を式(5)に示す。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + v \frac{\partial q}{\partial x} = vr(t) \quad (5)$$

ここで、 q ：単位幅流量[m²/s]、 v ：断面平均流速[m/h]、 r ：降雨強度[m/h]である。式(5)の解析解から式(6)を得る。

$$r_n^{ave} v \left[\begin{array}{l} q_n(t) = \\ \left\{ \begin{array}{l} (t - t_n)H[t - t_n] - \\ (t - (t_n + t_r))H[t - (t_n + t_r)] \end{array} \right\} \\ - \left\{ \begin{array}{l} (t - t_n - \frac{x}{v})H[t - t_n - \frac{x}{v}] - \\ (t - (t_n + t_r) - \frac{x}{v})H[t - (t_n + t_r) - \frac{x}{v}] \end{array} \right\} \end{array} \right] \quad (6)$$

ここで、 H はヘヴィサイドのステップ関数であり、一般に次の式が成り立つ。

$$H(x - a) = \begin{cases} 1(x > a) \\ 0(x < a) \end{cases}$$

ここに、 t_n ：降雨開始時間、 r^{ave} ：降雨強度、 t_r ：降雨継続時間である。

白子川流域における流出計算結果を図-8に示す。同図において、実測水位は白子川流域越後山橋地点の水位を黒点でプロットしている。黒の実線は観測降雨強度を入力降雨として計算された計算水位を示している。青線が10分先予測水位・赤線が20分先予測水位・緑線が30分先予測水位である。

実測水位と観測降雨強度に基づく計算水位は立ち上がりおよびピーク時刻で合っていることがわかる。合成合理式はピーク流量を得るために使用されることが多いため、その特性より逓減部は実測水位の方が計算水位よりも大きくなっている。

予測降雨強度による流出計算の結果、10分先・20分先・30分先予測水位において、立ち上がりおよびピーク水位は概ね再現されていることがわかる。

6. まとめ

本研究では水文分野において実例の少ない、MP-PAWRの観測値を用いた洪水予測の適用性の検討を行なった。その結果、MP-PAWRの観測値を用いることで早期に局地的大雨を探知でき、対象降雨イベントにおいて、河川水位を実際の30分前から、その水位上昇が確認可能であった。

以下、本研究において得られた知見を述べる。

- 1) MP-PAWRの観測値を用いることで、現行の気象レーダと比較し、上空の降雨情報を高密度に取得できることから、上空の降雨情報を用いる降雨予測手法においては有効であることがわかった。
- 2) 本研究での降雨においては、VILを用いた降雨予測において、予測先行時間が長くなるにつれて

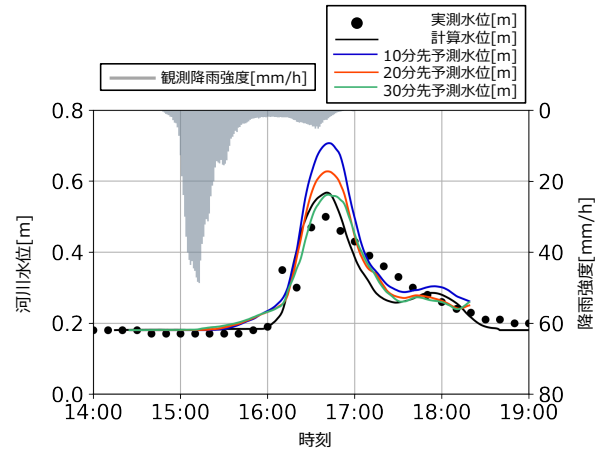


図-8. 流出計算結果

予測水位は実測水位と立ち上がり・ピーク時刻ともに合っている。予測降雨強度を用いることで河川水位の予測が可能であることが確認できた。

立ち上がり時刻が遅くなることと総雨量が小さくなることといった予測傾向が明らかとなった。

- 3) 本研究での対象降雨においては、10分前から30分先予測水位が実測水位と概ね合っていることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 土木学会都賀川水難事故調査団：都賀川水難事故調査について、p. 1, 2008.
- 2) 国土交通省：「XバンドMPレーダについて」<https://www.mlit.go.jp/common/000165825.pdf>
- 3) 気象庁：「大雨や猛暑日など（極端現象）のこれまでの変化」https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
- 4) 吉見和紘・水谷文彦：マルチパラメーター・フェーズドアレイ気象レーダーの3次元観測，東芝レビュー，Vol. 74, No. 6, 2019.
- 5) 深尾昌一郎・浜津亨助：気象と大気のレーダーリモートセンシング，京都大学学術出版会，2009.
- 6) Kohin HIRANO, Masayuki MAKI : Imminent Nowcasting for Severe Rainfall Using Vertically Integrated Liquid Water Content Derived from X-Band Polarimetric Radar, pp. 201-220, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 96, 2018.
- 7) 大阪府：「大阪府におけるフェーズドアレイ気象レーダを活用した豪雨検知システムの実証実験」https://www.jst.go.jp/sip/dl/k08/sympo2017/koen_04.pdf
- 8) 渡邊暁人，笹田拓也，渡辺直樹，山田正：合成合理式の理論的導出，水工学論文集，Vol. 56, 2012.