

二重偏波フェーズドアレイ気象レーダに基づく 降雨予測手法を導入した洪水予測 Flood prediction using a rainfall forecasting method based on Multi-Parameter Phased-Array Weather Radar

18N3100001C 青木 啓祐 (河川・水文研究室)
Keisuke AOKI/ River Engineering and Hydrology Lab.

Key Words : localized heavy rain, MP-PAWR, VIL, VIL Nowcast, Flood prediction

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的かつ短時間に降る集中豪雨によって、都市部における洪水被害が頻発している。都市部の中小河川では、短時間の集中豪雨や都市化の影響により、都市型水害が発生し、当該水害に伴う浸水被害が甚大となっている¹⁾。ゲリラ豪雨のような短時間集中豪雨は、大規模な人的・経済的損失をもたらす。例えば、2008年8月5日に東京都豊島区雑司が谷で発生した下水道事故では、現場近くにある豊島出張所の地上雨量計において、午前11時45分に降雨が観測され始めたが、その5分後には約60mm/hの非常に激しい雨が観測された。この豪雨により、5名の作業員が流され、亡くなった²⁾。

このような水難事故を契機として、数分先、数十分先の雨量を少しでも早く正確に予測することの重要性が再認識された。一方、水難事故・災害をもたらす豪雨は、ごく狭い範囲において突然発生し、急激に発達する。こうした局地的に降る短時間集中豪雨は豪雨の時空間スケールは小さいため、現在の短時間降雨予測技術では、数分から数十分先の局地的大雨の発生や発達を予測することは未だ困難である。

本研究で扱う二重偏波フェーズドアレイ気象レーダ (Multi-Parameter Phased-Array Weather Radar, 以下MP-PAWRと表記する。) は、局地的大雨や竜巻を、わずか30秒で立体的に観測することができる。現在、一般的に用いられているXバンドMPレーダ (パラボラ型アンテナ) は、アンテナの仰角を段階的に上げていくため、3次元空間データを観測する際に5分間を要する。このような従来のレーダに対して、MP-PAWRは、30秒で3次元空間データの観測が可能であるため、時間的に密に降雨の立体観測が可能である。ここで、図-1にMP-PAWRで観測された3次元降雨分布の一例を示す。同図より、降雨が立体的に観測されていることがわかる。

本研究では、MP-PAWRによる高速、かつ高精度な降雨の立体観測によって、上空の雨をより早く検知できる強みを活かした洪水予測システムを構築することを

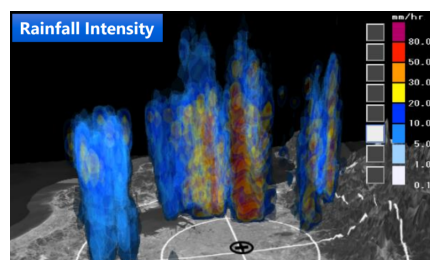


図-1 二重偏波フェーズドアレイ気象レーダ (MP-PAWR) で観測された3次元降雨分布の一例³⁾

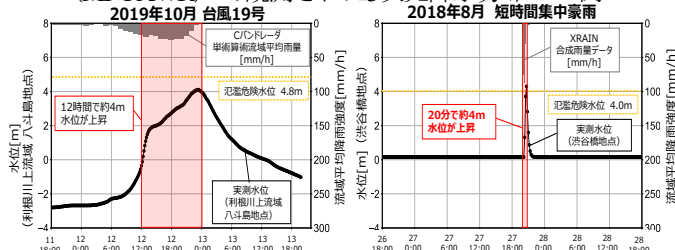


図-2 山地流域と都市流域における水位上昇の比較

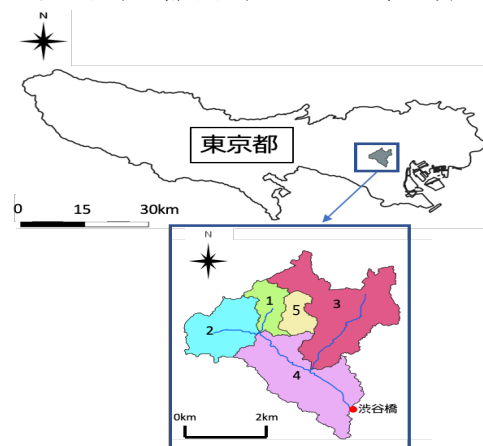


図-3 渋谷川流域の位置図と渋谷川流域におけるサブ流域分割図
目的としている。

本論では、MP-PAWRによる観測値から得た鉛直積算雨量 (Vertically Integrated Liquid water content, 以下VILと表記する。) を用いて、VILから算出した予測雨量を予測降雨データとして降雨流出予測を行い、河川水位の予測精度の向上を目的として、予測雨量が河川水位に与える影響について検討した。

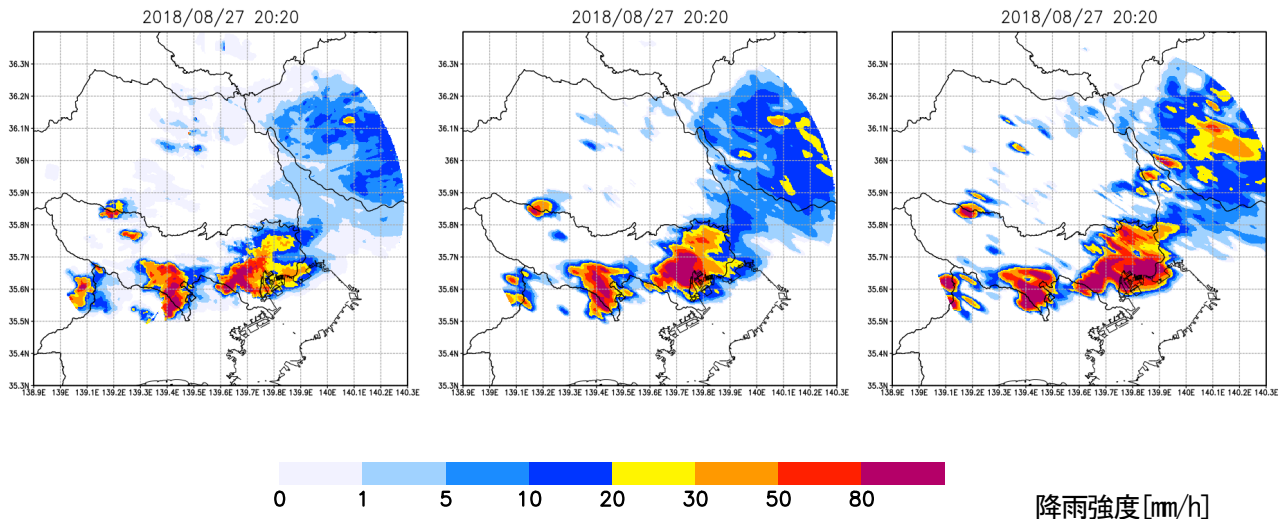


図-4 2018年8月27日の実測雨量分布(左図)と10分先予測雨量分布(中央図)と20分先予測雨量分布(右図)の比較

実測雨量分布(左図)と10分先予測雨量分布(中央図)、20分先予測雨量分布(右図)を比較したものである。10分先、20分先予測雨量分布は実測値の雨量分布と比べて形が似ており概ね予測できているが、予測時間が長くなると共に、微妙な雨域の位置ずれと降雨強度の値の違いが顕著に生じると推測できる。

2. 山地流域と都市流域の洪水時の水位上昇の比較

図-2は山地流域(利根川上流域八斗島地点)と都市流域(渋谷川流域)の洪水時における水位上昇の比較図である。図-2の左図は、2019年に甚大な被害をもたらした、令和元年台風第19号のハイエトグラフおよびハイドログラフである。図-2の右図は短時間集中豪雨の一例である。図-2に示すように右図は、短時間集中豪雨により急激に水位が上昇していることがわかる。これは、山地流域と都市流域の流域面積と河床材料の違いが大きな要因として考えられ、都市流域においてこのような短時間集中豪雨を予測することが必要である。

3. 解析対象流域と対象降雨イベント及び使用データの概要

本研究では、都市河川である渋谷川流域(図-3、幹線および渋谷川の流路延長 2.6km、流域面積 14.0km²)を対象流域とする。幹線毎にサブ流域を5つに分割して予測雨量の精度評価及び流出計算を行った。対象降雨イベントは2018年8月13日の13:00~17:00と2018年8月27日の19:30~22:00である。特に2018年8月27日の19時30分から22時00分までの降雨に伴う洪水により、渋谷橋地点において、20分間で約4mの水位が上昇していた。

また、下水道管路網に対しては、幹線のみを考慮し、単純化を行う。また、渋谷川の河道は、深さ約6.5m、川幅7m程度のコンクリート水路である。

本研究では入力降雨データについて、MP-PAWRの実測雨量と比較するために、国土交通省が配信している

XRAIN合成雨量データを用いた。

4. VILを用いた降雨予測手法

VILは、雨水量を高さ方向に積分した、ある地点における上空の水分量である。VILは三次元的に分布している降水雲の特徴を二次元的に表現できる豪雨や降雪など激しい気象現象の発生を示唆するパラメータである。本研究の降雨予測手法として用いたVILナウキャストは、平野ら⁴⁾によって開発された短時間集中豪雨の早期予測手法である。VILナウキャストは以下の条件を仮定している。

- ① ある空間の気柱に含まれる雨水量の時間変化が環境から供給される雨(雲粒凝結・併成長、氷粒子の融解などによる雨滴生成)の量と、雨滴が地表面に落下した量との差に等しいこと。
 - ② VILと降雨強度の関係が線形であること。
- VILの時間変化は(1)式により表される。

$$\frac{d(VIL)}{dt} = S(t) - P(t) \quad (1)$$

ここに、VIL:鉛直積算雨水量[kg m⁻²]、S:雨滴生成率[kg m⁻² s⁻¹]、P:降雨強度[kg m⁻² s⁻¹]である。VILと降雨強度の関係が線形であると仮定したものを(2)式に示す。

$$VIL(t) = \tau(t) \cdot P(t) + \beta(t) \quad (2)$$

ここに、 τ : VILから地上の降雨への変換時間[s]、 β : 地上に降雨が到達するまでに単位面積当たりの気柱に許容できる雨水の量[kg m⁻²]である。(2)式を(1)式に代入す

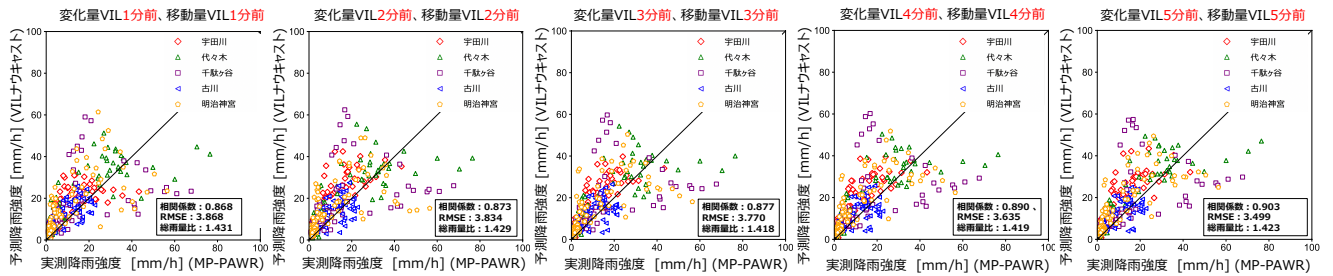


図-5 2018年8月13日 13:00~17:00

インプットデータの変化量VILと移動量VILの時間間隔を変えた予測降雨強度と実測降雨強度の比較結果

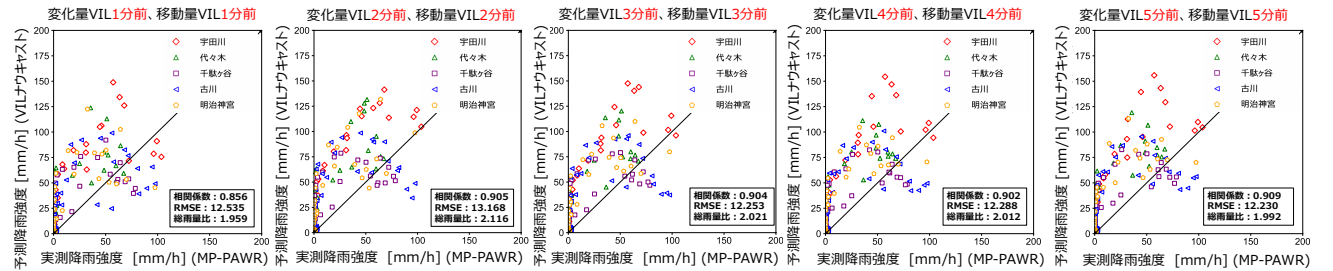


図-6 2018年8月27日 19:30~22:00

インプットデータの変化量VILと移動量VILの時間間隔を変えた予測降雨強度と実測降雨強度の比較結果

2つの降雨イベントでは共に高い値の相関係数が確認され、過去のデータを使用しても予測精度は変わらないことがわかった。つまり、5分前程度から10分先の雨を予測した精度と、より解析時間に近い時間から予測した雨の精度は変わらず、5分前程度のリードタイムを持って同程度の雨を予測することが可能であると推測できる。

ると、(3)式を得る。

$$\frac{d(VIL)}{dt} + \frac{VIL(t)}{\tau(t)} = S(t) + \frac{\beta(t)}{\tau(t)} \quad (3)$$

(3)式の非同次常微分方程式を解くと、(4)式に示すVILの予測式を得る。

$$VIL(t+dt) = VIL(t) \cdot e^{-\frac{dt}{\tau(t_0)}} + \tau(t_0) \left(S(t_0) + \frac{\beta(t_0)}{\tau(t_0)} \right) \left(1 - e^{-\frac{dt}{\tau(t_0)}} \right) \quad (4)$$

ここに、 t_0 : 解析開始時刻[s]である。(4)式を降雨強度に変換すると、次時刻における降雨強度を予測することができる⁴⁾。

5. 地表面計算及び下水道管路計算の概要

地表面の流出計算には、山田ら⁹⁾が導出した合成合理式を用いた。なお、本研究では、降雨イベントについて、図-3に示すように対象流域を4つのサブ流域に分割し、合成合理式を用いて、流出計算を行った。

下水道管路計算において、本研究では、主な4つの下水道幹線（古川幹線、千駄ヶ谷幹線、代々木幹線、宇田川幹線）と渋谷川及び堰をモデル化した。各幹線の

上流端の境界条件に、地表面計算で得られた流量をそれぞれ与えた。管路計算においては、運動量方程式と連続式を用いた。また、水深の穏やかな増大を準定常流と仮定し、kinematic wave法を用いて次元不定流計算を行った。堰の計算には長方形の堰の越流量の公式を用いた。流出計算に用いたパラメータは、XRAIN合成雨量とVILノウキャストから得た予測値およびMP-PAWRの実測値との比較を行うために、XRAINの実測値からパラメータを推定した。

6. 予測雨量と実測雨量の比較結果

図-4は、実測雨量分布(左図)と10分先予測雨量分布(中央図)、20分先予測雨量分布(右図)を比較したものである。10分先、20分先予測雨量分布は実測値の雨量分布と比べて形が似ており概ね予測できていることがわかる。しかし、予測時間が長くなると共に、微妙な雨域の位置ずれと降雨強度の値の違いが顕著に生じると推測できる。

図-5, 6は解析のインプットデータとして用いた変化量VILと移動量VILについて時間間隔を変えた予測値と実測値の精度比較結果である。2つの降雨イベントでは共に高い値の相関係数が確認された。予測値と実測値のRMSE(二乗平均平方根誤差)と総雨量比を図-5, 6に示す。この結果から、5分前程度から10分先の雨を予測した精

度と、より解析時間に近い時間から予測した雨の精度の差は、ほとんどないことがわかる。つまり、予測精度の差は変わらないことから、5分前程度のリードタイムを持って同程度の雨を予測することが可能である。次章の流出解析では、1分前のデータと5分前のデータでは予測精度が変わらないので、5分前のデータを使って解析を行った。

7. 降雨予測及び流出解析結果

図-7, 8に渋谷橋地点における10分先予測雨量データ、MP-PAWRの観測雨量データ、XRAIN合成雨量データをインプットとした流出計算の結果を示す。図-7, 8に示す10分先予測水位は、VILナウキャストによって得られた10分先予測雨量から求めた水位である。図-7, 8に示すMP-PAWRの実測値をインプットとした計算水位は、ピーク水位、立ち上がりともに実測水位を再現できているといえる。

洪水規模の大きかった2018年8月27日（図-8）のMP-PAWR（実測値）のハイドログラフの方がXRAINのハイドログラフと比べて、実測水位に近似している。10分先予測ピーク水位（5.9m）は、実測ピーク水位（4.3m）と比べて約4割高い水位となった。予測水位は実測水位に対して、10分前に高めの水位を概ね予測できていることから、防災上この予測手法の有用性が示されたといえる。しかし、10分先予測水位は、20時15分から20時25分の10分間で急上昇することはわかったが、ピーク水位が大きく捉えられている。この原因については、今後説明していく必要があると考えられる。

以上の結果から、MP-PAWRによる予測精度について示したが、最新の気象レーダを用いて数分から数十分先の豪雨の予測を行っても、十分な予測結果が得られないことも考えられ、予測技術の精度向上が課題点として見出された。

8. まとめ

MP-PAWRによる観測値から得たVILを用いて、VILから算出した予測雨量を用いて降雨流出予測を行い、予測水位と計算水位と実測水位の比較を行った。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 5分前程度から10分先の雨を予測した精度と、より解析時間に近い時間から予測した雨の精度はほとんど変わらないことがわかった。
- 2) 10分先予測ピーク水位は実測ピーク水位と比べて2つの降雨イベントで高い値となった。予測ピーク水位が実測水位よりも高めの水位を予測できていることから、当該予測手法が防災上有用であることが示された。

2018年8月13日 13:00～17:00

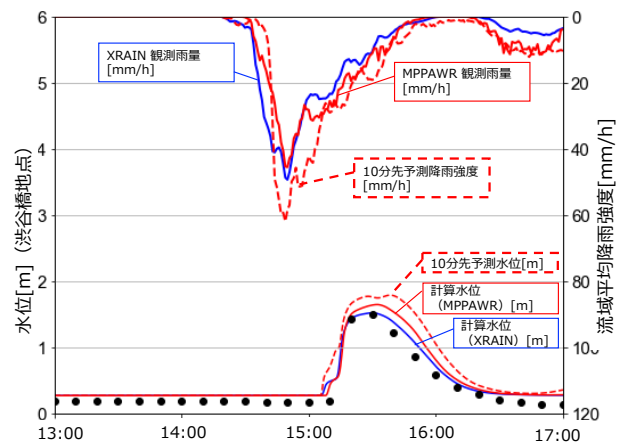


図-7 10分先予測水位(VILナウキャスト)と計算水位(XRAINとMP-PAWR)と実測水位の比較

2018年8月27日 19:30～22:00

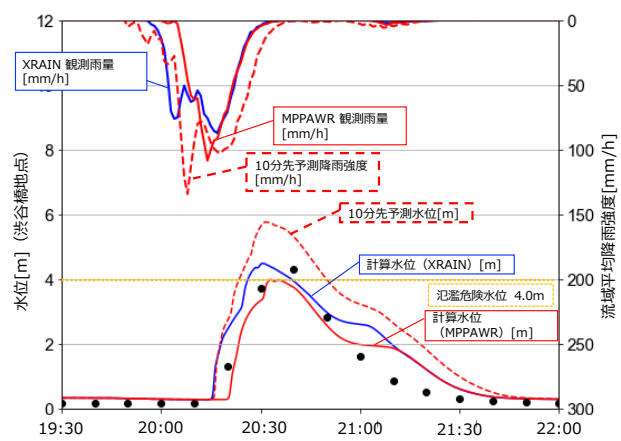


図-8 10分先予測水位(VILナウキャスト)と計算水位(XRAINとMP-PAWR)と実測水位の比較

実測ピーク水位（4.3m）と比べて約4割高い水位となった。予測水位は実測水位に対して、10分前に高めの水位を概ね予測できていることから、防災上、この予測手法の有用性が示されたといえる。

- 3) 2018年8月27日のような豪雨の一例では、予測水位が高めにしているため、当該予測手法の予測技術の精度向上が期待される。

参考文献

- 1) 気象庁：全国（アメダス）の1時間降水量50mm以上の年間発生回数 http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
- 2) 東京都下水道局：雑司ヶ谷幹線再構築工事事故調査報告書 2008.
- 3) Tetsuya Kobayashi et al. : Development of Multi-Parameter Phased-Array Weather Radar, American Meteorological Society, 99th ANNUAL MEETING, Jan, 2019.
- 4) 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.
- 5) 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, pp.499-504, 2012.