

二重偏波フェーズドアレイ気象レーダの観測情報を用いた 洪水予測精度向上に関する研究 Improving of Flood Prediction Method Using Multi-Parameter Phased Array Weather Radar

20N3100014C 小島 彩織 (河川・水文研究室)
Saori KOJIMA/ River Engineering and Hydrology Lab.

Key Words : localized heave rain, MP-PAWR, vertical integrated liquid water content, flood predict

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨による被害が頻発している。特に都市部で発生するゲリラ豪雨は、洪水到達時間が短く、避難や被害抑止のためのリードタイム確保が困難である。このような被害を軽減する対策としては降雨を観測するだけでなく、その発生を予測し、1秒でも早くその規模や雨域の情報を対象地域に提供する枠組みが必要である。近年開発された二重偏波フェーズドアレイレーダ (Multi-Parameter Phased Array Weather Radar ; 以下、MP-PAWR) は、現業のXバンドMPレーダが5分で仰角方向の観測を機械駆動で行うのに対し、仰角方向の観測を電子走査で実施することで、高度方向に抜けのない観測を30秒で行うことが可能となった。図-1はMP-PAWRで観測された3次元降水分布を時系列に示した1例である。同図左上では複数の降水セルが点在しているが、それらが時間の進行とともに発達して50mm/hを超える強い降水セルを形成する様子が確認できる。このような高い時空間分解能を有するMP-PAWRの観測特性を活かし、著者はゲリラ豪雨に起因する洪水災害に対する避難や被害抑止のためのリードタイム確保に資する洪水予測への適用可能性について検証を行ってきた。しかし、その適用事例の少なさ、予測精度、予測傾向の解明において課題が残っている。そこで本研究では、MP-PAWRの観測値を用いた高精度な洪水予測の実現を目指し、予測傾向とその要因を分析することで、洪水予測精度の向上を図る手法を構築し、その適用性を検証した。

2. 解析データの概要

2018/8/13の13時～17時にかけて都内で発生したゲリラ豪雨事例において、MP-PAWRの観測精度が十分であった白子川流域 (流域面積: 25km²) を対象流域とした。降雨強度は、MP-PAWRが観測する反射強度Zから前坂ら²⁾の降雨強度推定手法を参考に推定し、水平及び鉛直方向の格子間隔250m, 高度1kmにCressman内挿を行った。さらに、MP-PAWRの観測データから得た反射強度Zと偏波間位相差変化率K_{DP}より鉛直積算雨量 (Vertically

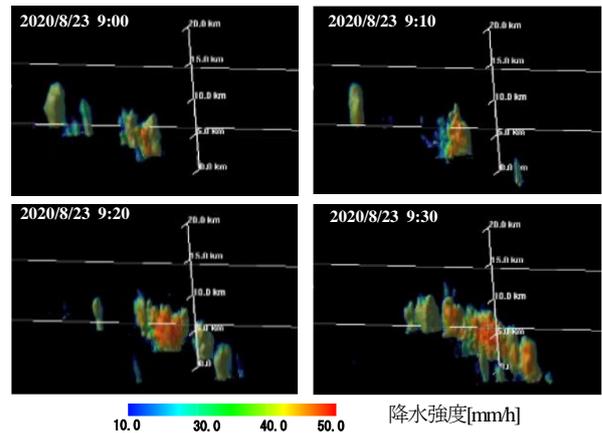


図-1 MP-PAWRで観測された3次元降水分布の1例

Integrated Liquid water content ; 以下、VIL) を推定し、降雨予測を行う。

3. 降雨予測手法

本研究ではMP-PAWRの観測特性を活かすことができる降雨予測手法として、平野ら³⁾が提案するVILナウキャストを用いた。本手法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雨滴の生成率と、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。

仮定1)よりVILの時間変化は式(1)のように表される。

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

ここに、VIL: 鉛直積算雨量[kg m⁻²], S(t): 雨滴生成率[kg m⁻² s⁻¹], P(t): 地表面に落下した雨量[kg m⁻² s⁻¹]である。S(t)は時刻t及びt-Δtにおける連続したVILから取得することができ、式(2)のように得られる。

$$S(t) = \frac{VIL(t) - VIL^*(t - \Delta t)}{\Delta t} + P(t) \quad (2)$$

ここで、VIL*(t)は、移流ベクトル推定後の移動したVIL(t)を表している。移流ベクトルとは、雨域が将来どの方向に移動するかを予測する速度成分であり、精度の高い予測を行うためには重要な要素である。本解析では

移流ベクトル推定手法として、計算負荷の少ない直接相互相関法を用いる。直接相互相関法は、予測開始時刻とその5分前における二値化したVIL(以下、二値化VILとする)の相互相関関数が最大となるシフト量を観測移流ベクトルとしている。式(2)の右辺第一項は、移流ベクトル推定前後のVILを移動時間で差分することで、移流の効果とVILの発達・減衰の影響を考慮している。また、仮定2より式(3)が成立する。

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

ここに、 $w(t)$: 気柱の上空に残存する雨水量[kg/m^2]である。次に、式(1)と式(3)から式(4)が導出される。

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

ここに、 τ : VILから地上の降雨への変換時間[s]である。VILナウキャストにおけるパラメータは S , τ , w であり、計算初期時刻において定常であると仮定し、式(4)においてVILについて解き、さらに $VIL(t+\Delta t)$ についてTaylor展開することで式(5)が得られる。

$$VIL(t+\Delta t) = VIL^*(t) \cdot \exp\left[-\frac{dt}{\tau(t_0)}\right] + \tau_0(t_0) \left(S(t_0) + \frac{w(t_0)}{\tau(t_0)} \right) \left(1 - \exp\left[-\frac{dt}{\tau(t_0)}\right] \right) \quad (5)$$

ここに、 t_0 : 解析開始時刻[s]である。式(5)を降雨強度に変換すると、次時刻における降雨強度が予測できる。

4. 降雨予測結果と考察

降雨予測結果を図-2に示す。同図において、灰色の棒グラフはMP-PAWRの観測降雨強度であり、青線、赤線、緑線はそれぞれ10分先、20分先、30分先予測降雨強度である。例えば10分先予測降雨強度とは、予測開始時刻において、その10分先時点を予測した降雨強度である。10分先予測降雨強度の立ち上がりは、実測値を概ね再現できているものの、予測時間が長くなるにつれ降雨の立ち上がり及びピーク時刻が遅れ、予測精度が低下することが分かる。一方で、ピーク降雨強度に着目すると、10分先予測降雨強度のピーク値が過大に予測されている。ここで、図-3(a), (b)に、ある時刻における二値化VILより推定した移流ベクトルと、VIL値の大きさを加味したVIL(以下、全VILとする)より推定した移流ベクトルの一例を示す。移流ベクトルは、粒子画像速度計測法(Particle Imaging Velocimetry ; PIV)により算定した。本手法は、図-3(a), (b)の上部に示すように、連続する5分間隔のVIL画像データより、検査領域内における輝度値分布の相互相関関数を求め、その最大値となる変位を検査領域内の移流ベクトルとして推定する手法で

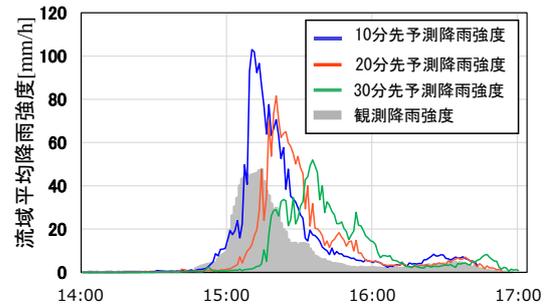


図-2 VILナウキャストによる降雨予測結果

観測降雨強度と10分先予測降雨強度の立ち上がりが合っているが、予測時間が長くなるにつれて立ち上がり、ピーク時刻が遅れている。

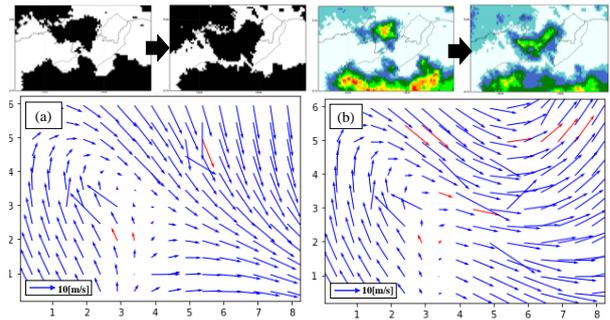


図-3(a) 二値化VILより推定した移流ベクトル
(b) 全VILより推定した移流ベクトル

PIVにより二時刻間のVILの移動方向とそのベクトルの大きさを推定した結果、同時刻における二値化VIL及び全VILを用いて推定した場合にはVILの移動方向が異なっていることが分かった。

ある。同図群より、二値化VIL及び全VILによって推定された移流ベクトルの移動方向とそのベクトルの大きさが異なっていることが分かる。つまり、予測値が過大となる要因の一つとして、二値化VILによる移流ベクトルの推定誤差によって、雨域の予測方向が必ずしも正確に予測されないことが考えられる。

5. 新たな洪水予測手法の構築

(1) FFT相互相関法の導入による移流ベクトルの推定

前章で、VILナウキャストによる降雨予測において、移流ベクトルの推定に課題があることが明らかとなった。そこで本章では、全VILの値を考慮したFFT相互相関法を用いた移流ベクトルの推定を行うことで、降雨予測精度にどの程度影響があるかを分析する。FFT相互相関法は、従来の直接相互相関法においてVILを二値化することで失われているVILの大きさ情報を活用することにより、移流ベクトルの推定精度が向上することを狙いとしている。本手法は、VILの大きさ情報を加味した連続する二時刻の全VILより、相互相関関数が最大となるシフト量を観測移流ベクトルとする手法である。

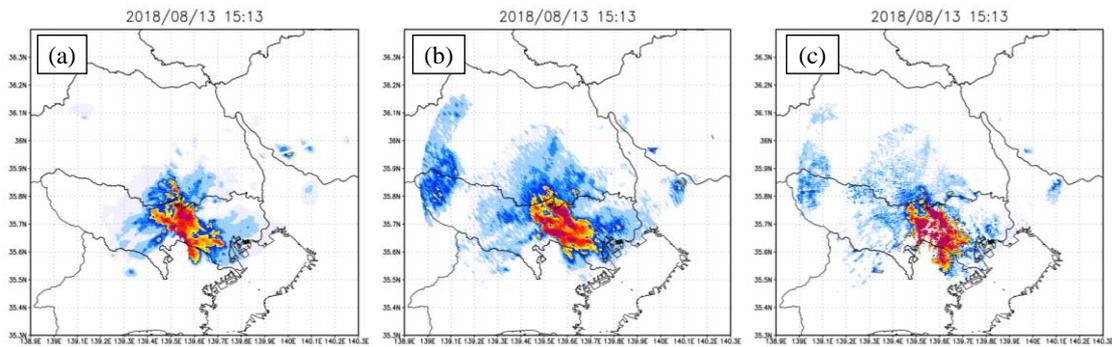


図-4(a) ある時刻におけるMP-PAWRの観測降雨分布

(b) 直接相互相関法を用いたVILナウキャストによる10分先予測降雨分布

(c) FFT相互相関法を用いたVILナウキャストによる10分先予測降雨分布

図-4(a), (b), (c)はある時刻における観測降雨分布, 直接相互相関法及びFFT相互相関法を用いたVILナウキャストによる10分先予測降雨分布である. 直接相互相関法によって推定された雨域が, 観測降雨分布の雨域の位置に対して大きくずれているが, その雨域のずれがFFT相互相関法を用いることで改善されていることが分かる. 図-5にFFT相互相関法を導入したVILナウキャストによる降雨予測結果を示す. 同図青線で示す10分先予測降雨強度のピーク値は, 従来手法において103mm/h (図-2), 本手法では61mm/hとなっており, 実測値の再現性が高まっている. つまり, 移流ベクトルの推定精度が向上したことで, 雨域の位置ずれが改善し, 予測精度が向上したと考えられる. 以上より, VILナウキャストのような, 雨域の位置を時間外挿する予測手法においては, 高精度な移流ベクトルの推定が重要であると言える. 一方, 予測時間の長期化に伴う予測値の立ち上がりの遅れについては改善の余地があり, 移流を高精度に推定するのみならず, 降水セルが合体・分裂する現象も考慮することが望まれる.

(2) カルマンフィルタの洪水予測への適用

避難や被害抑止のためには, 降雨を予測し, 水位の立ち上がりやピーク時刻, 水位の高さを数十分前からの確に把握する, 一体的な洪水予測の確立が重要である. 本研究では, 従来の移流ベクトル推定手法の見直しに加え, 水位予測までを一体に行う手法を構築する. 図-6(a)にFFT相互相関法を導入したVILナウキャストによる予測降雨強度を入力値とした水位予測結果を示す. 流出解析手法は, 山田ら⁴⁾によって解析解が導出された合成合理式を用いた. 黒点を実測水位, 青・赤・緑線がそれぞれ10分先, 20分先, 30分先予測降雨強度を入力値とした予測水位である. 10分先予測水位の立ち上がりは実測を概ね再現できているものの, ピーク水位はやや高めに予測しており, 予測時間の長期化に伴い, 水

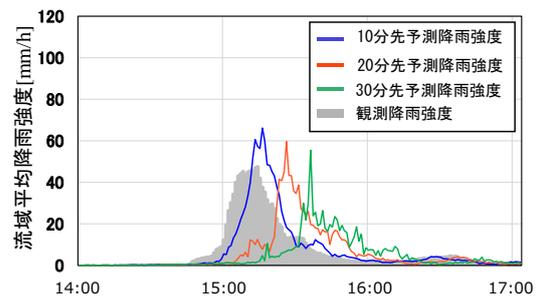


図-5 FFT相互相関法を用いた降雨予測結果

10~30分先予測降雨強度は観測降雨強度のピーク値と概ね一致しているが, その立ち上がり時刻は予測時間が長くなるほど遅れている.

位の立ち上がりが遅れている. そこで本研究では, 高精度な洪水予測を実現するために, データ同化手法の一つであるカルマンフィルタを降雨予測及び水位予測に適用し, その精度改善効果を検証した. 本研究で用いるカルマンフィルタは, VILナウキャストによって得られた予測降雨ないし予測水位の精度を改善することに主眼を置いており, 時々刻々に得られる予測結果に対して, 観測値を用いて逐次的に最適な補正係数を得る. 図-7にカルマンフィルタの計算フロー及び各変数の定義を示す. なおシステム状態量 \hat{x} は, VILナウキャストによって出力された予測降雨ないし予測水位を一次式で補正するための係数として設定しており, カルマンフィルタ適用後の予測降雨ないし予測水位は, システム状態量 \hat{x} とVILナウキャストによる予測降雨ないし予測水位の積で表現される. 図-6(b), (c), (d)にカルマンフィルタによって補正された洪水予測結果を示す. 図-6(b)は, VILナウキャストによる予測降雨にカルマンフィルタを適用した流出解析結果, 図-6(c)は, 図-6(a)の予測水位に対してカルマンフィルタを適用した結果, 図-6(d)は, 図-6(b)の予測水位に対してカルマンフィル

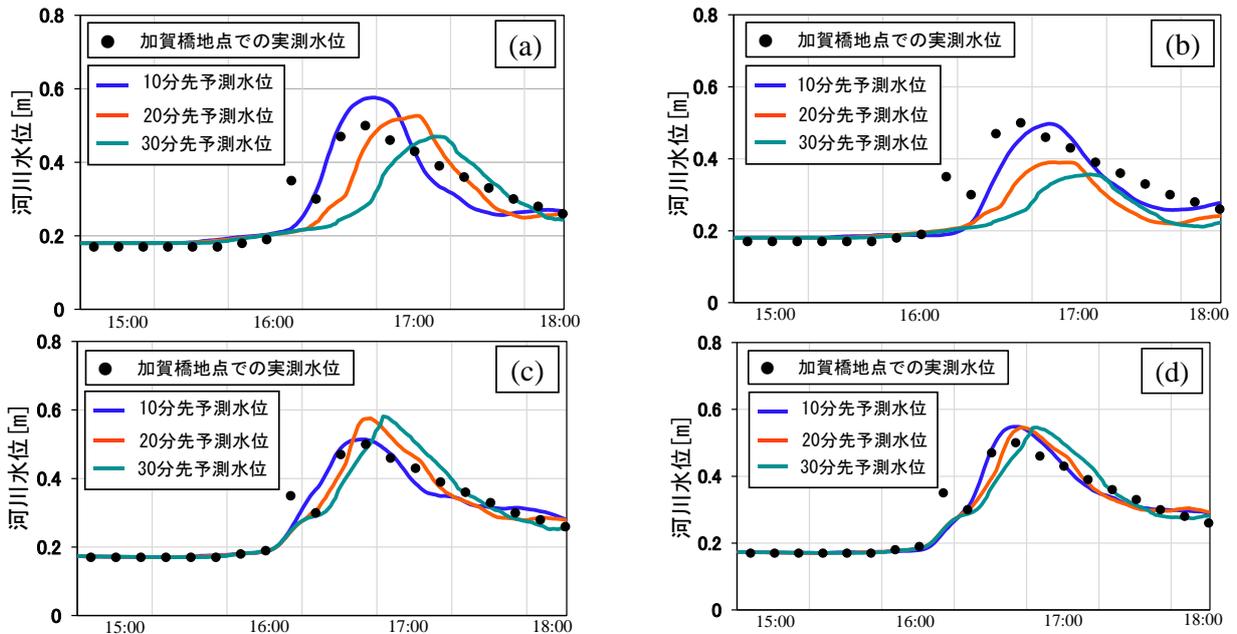


図-6 カルマンフィルタの適用有無による洪水予測結果の比較

- 図-6(a) VIL ナウキャストによる予測降雨の流出解析結果
 (b) VIL ナウキャストによる予測降雨にカルマンフィルタを適用した流出解析結果
 (c) VIL ナウキャストによる予測降雨の流出解析結果にカルマンフィルタを適用した結果
 (d) VIL ナウキャストによる予測降雨にカルマンフィルタを適用した流出解析結果にカルマンフィルタを適用した結果

タを適用した結果である。つまり、図-6は予測降雨及び予測水位に対するカルマンフィルタの適用有無による効果を比較した結果である。図-6(c), (d)より、予測水位に対するカルマンフィルタの補正効果は、水位の高さのみならず、その立ち上がりの遅れを大きく改善する結果となり、30分のリードタイムをもって水位を精度良く予測することが可能となることが示された。

6. まとめ

MP-PAWRの観測情報を用いて洪水予測システムの精度向上に向けた手法を構築し、その適用性を検証した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 従来手法における予測降雨強度の過大傾向に、移流ベクトルの推定誤差が起因していることが明らかになった。
- FFT相互相関法を用いたVILナウキャストによる降雨予測の結果、ピーク予測降雨強度の過大傾向が改善された。
- VILナウキャストによる予測水位に対して、カルマンフィルタを適用することで、30分前から高精度な水位予測が可能となる。

参考文献

- 小島彩織, 干場希乃, 清水啓太, 小山直紀, 寺井しおり, 山田正: 二重偏波フェーズドアレイ気象レー

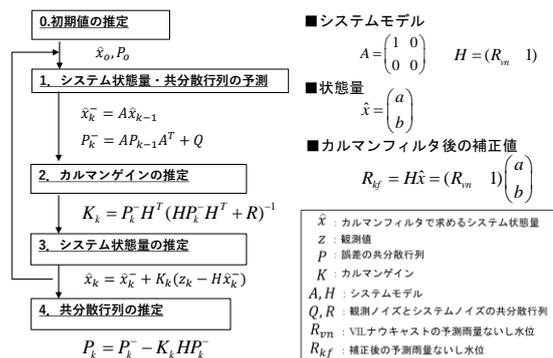


図-7 カルマンフィルタの計算フロー

ダの観測特性とその洪水予測への適用に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.1291-1296, 2019.

- T. Maesaka, M. Maki, K. Iwanami, S. Tsuchiya, K. Kieda, and A. Hoshi : Operational rainfall estimation by X-band MP radar network in MLIT, Japan. Proceedings of 35th Conference on Radar Meteorology, Pittsburgh, P11.142, 2011.
- K. HIRANO, M. MAKI : Imminent Nowcasting for Severe Rainfall Using Vertically Integrated Liquid Water Content Derived from X-Band Polarimetric Radar, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.96, pp.201-220, 2018.
- 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.68, No.4, pp.409-504, 2012.