

【研究成果報告時/研究成果の概要】様式-1-ウ

フェーズドアレイ気象レーダで観測された上空情報の活用に関する研究

富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科
講師 吉見 和紘

近年、日本では令和元年の台風 19 号などの記録的な大雨が毎年頻発し、都道府県管理河川の堤防決壊による被害が増加している。これに対処するためには、大河川だけでなく中小河川の洪水対策が必要であり、降水現象の予測が重要であるが、現行技術では難しい。特に短時間降雨予測の研究が喫緊の課題であり、フェーズドアレイ気象レーダ (PAWR) の三次元観測が期待されている。PAWR は高速かつ高密度に観測が可能で、局地的な豪雨検知に活用されている。先行研究により提案されている VIL ナウキャストと呼ばれる手法は、上空の雨雲の水分量を用いて降雨予測を行っているが、課題も指摘されている。本研究では、MP-PAWR を用いて三次元観測データを活用し、Dual ドップラー解析により鉛直風場を推定、推定した鉛直風場を VIL ナウキャストに導入することで雨量予測の改善を試み、改善したデータを用いて流出予測を行い、予測精度を検証した。

Key Words: 二重偏波フェーズドアレイ気象レーダ, VIL ナウキャスト, 局地的大雨, Dual ドップラー解析,

1. はじめに

(1) 背景

近年、令和元年台風 19 号のような記録的大雨が毎年のように発生しており、豪雨災害・洪水災害に関連する物的・人的被害が数多く報告されている。特に注目すべきは、都道府県管理河川(中小河川)の堤防決壊に起因する被害が多いという点である。今後、日本における洪水被害を軽減・抑制するためには、大河川のみならず中小河川の洪水対策が必要不可欠である。洪水被害をもたらす降水現象の観測と予測手法の確立は、これらの被害を軽減・抑制するために非常に重要である。しかしながら、このような災害の原因となる大雨の予兆を検知し、発生位置、移動方向や継続時間などを的確に予測することは、現在の技術をもってしても難しい。降雨予測に関する研究、とりわけナウキャストと呼ばれるような短時間降雨予測に関する研究開発は喫緊の課題であると言える。

局地的大雨に起因する被害の対策の一助として期待されている降水観測技術に、フェーズドアレイ気象レーダ (PAWR: Phased Array Weather Radar, 以下 PAWR) による降水の三次元観測がある。PAWR は、従来のパラボラ型の気象レーダと比べて、高速三次元観測が可能である点に特長を有する気象レーダであり、従来のパラボラ型レーダで 5 分から 10

分程度要していた三次元立体観測(約 10 仰角程度)をおよそ 30 秒で完了することができる¹⁾。観測モードにもよるが、その観測仰角数は 100 仰角を越え、単位時間あたりの観測データ容量は 30 倍を越える²⁾とされており、従来レーダと同等以上の観測精度であることが Kikuchi et al. の研究²⁾により確認されている。すなわち、観測精度は維持しつつ、三次元的に高密度に観測できることが示されている。

また、気象レーダで観測可能な三次元観測データを用いた局地的豪雨検知に関する研究^{3), 4), 5)}も精力的に行われており、豪雨検知や豪雨予測の観点において三次元観測データの活用が注目されている。

局地的豪雨予測に関して、Hirano and Maki⁶⁾は、VIL ナウキャストと呼ばれる降雨予測手法を提案している。このナウキャスト手法は、レーダで観測される地上雨量分布の代わりに、上空の雨雲に内在する水分量(鉛直積算水分量: VIL)を用いて、より早く降雨の予兆を検知することで、降雨の開始タイミングや雨雲の急発達時の予測の遅れといった従来の予測手法の課題解決を図った降雨予測手法であり、気象レーダによって観測される三次元観測データとの親和性が高い。一方で、この予測手法の課題として、移流ベクトルの推定量によって、雨域の位置が大きく変わり、予測精度が担保できない点や、雨水量の上空での滞留時間の推定結果によっては、予測される降雨強度の急激な変動が確認されてお

り、実際の地上雨量の発生位置、移動方向などを含め、的確に予測することの難しさがなお指摘されている^{7,8)}。

本研究では、これらの社会的背景、技術的發展を加味し、河川管理における上空気象観測データの有用性について基礎的な検討を実施した。具体的には、短時間降雨予測における移流ベクトル推定や水分量の滞留時間の適切なモデル化に向けて、X帯二重偏波型のPAWR (Multi-Parameter PAWR, 以下MP-PAWR) で観測可能な三次元観測データを用いて、Dualドップラー解析を行い、鉛直風場を推定した。さらに、推定した鉛直風場をVILナウキャスト (以下、VILNC) に導入することで、雨量予測精度の改善を行った。加えて、改善した雨量予測データを用いて、流出予測を行うことで、雨量予測改善前後での予測精度を比較検証した。

2. 研究手法

三次元風速場の推定と推定結果の検証は、以下の手順で進めた。解析手法は二台のレーダデータから風速場推定を行う Dual ドップラー解析を用いた。Dual ドップラー解析では、水平風 u, v を推定可能である。鉛直風 w は後述する推定式を用いて求めた。対象領域である関東地方に設置されている MP-PAWR は一基のみであるため、近接する新横浜局の XMP の観測データと MP-PAWR の観測データによる Dual ドップラー解析を実施した。この手順を、MP-PAWR の観測仰角密度 (114 仰角) と XMP 相当の観測仰角密度 (関東局の観測シーケンスを参考とした 12 仰角, 以下疑似 XMP) で実施し、両者を比較することで、観測仰角密度の違いによる三次元風速場推定結果の差異について確認した。

(1) 三次元風速場の推定法

a) Dual ドップラー解析法⁹⁾

Dualドップラー解析の支配方程式は、

$$v_{r_i} = \frac{1}{r_i} \{ (x - x_i)u + (y - y_i)v + (z - z_i)(w - w_T) \} \quad (1)$$

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2$$

で与えられる。ここに、 i : レーダサイトの番号 (本研究では、1 及び 2)、 v_{r_i} : ドップラー速度[m/s]、 u, v, w : 水平・鉛直風速[m/s]、 w_T : 終端速度[m/s]である。観測値(v_{r_1}, v_{r_2})に対して、3つの未知数(u, v, w)があるため、次項に示す緩和法により解を導出する。なお、終端速度の算定にあたっては、MSMの気温に基づいて融解層高度を算出し、降雨層・雪層・融解層を分別、降雨層は(2)式を、雪層は(3)式を用いて算出した。融解層は「0度高度から1km下の高度ま

1カ年研究用 (R5 提出)

で¹¹⁾と定義し、降雨層と雪層の推定式から算出した終端速度の平均値を用いた。

$$w_T = 2.65Z_h^{0.1114} \left(\frac{\rho_0}{\rho_h} \right)^{0.4} \quad (2)$$

$$w_T = 0.817Z_h^{0.063} \left(\frac{\rho_0}{\rho_h} \right)^{0.4} \quad (3)$$

ここに、 Z_h : レーダ反射強度 [mm^6/m^3]、 ρ_0 : 積算開始高度における大気密度、 ρ_h : 高度 h における大気密度 [kg/m^3] である。

b) 鉛直風の推定法^{12), 13)}

ある高度 h における鉛直風の推定式は、

$$w(h) = \frac{\rho_0}{\rho_h} w_0 - \frac{1}{\rho_h} \int_{h_0}^h \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz \quad (4)$$

として与えられる。ここに、 h_0 : 積算開始高度[m]、 w_0 : 積算開始高度 h_0 における鉛直風[m/s]である。(4)式を鉛直積算し、 u, v, w を求める。この手法により、Dual ドップラー解析により得られた u, v を用いて w を算出した。

c) 検証方法

Dual ドップラー解析により推定した三次元風速場 (鉛直風) において、MP-PAWR の観測仰角密度 (114 仰角) と疑似 XMP の観測仰角密度 (12 仰角) のデータを入力データとしてそれぞれの解析を実施した。これらの結果について、両者を比較することで、観測仰角密度の違いによる三次元風速場推定結果の差異について確認した。

(2) VILNC の概要

本研究では、VILNCを用いて降雨予測を行った。VILNCは、上空の雨雲中に存在する水分量を入力として用いることで、降雨の開始タイミングの予測遅れや雨雲の急発達時の予測遅れといったナウキャストならではの課題解決を図ったものである。したがって、上空の降雨量を時空間的に高分解能で観測可能なMP-PAWRと相性が良く、降雨予測精度の改善が期待できる。ここで、VILNCのVIL (Vertically Integrated Liquid water content) とは、鉛直積算雨水量のことで、単位面積あたりの雨水量を鉛直方向に積算した物理量である。VILは、気象レーダで観測される反射強度と偏波間位相差変化率から推定することが可能で、(5)式で与えられる。

$$VIL = \begin{cases} 0.00393 \int_0^h Z^{0.55} dh \\ (K_{DP} < 0.3^\circ \text{km}^{-1} \text{ or } 10 \log_{10} Z < 35 \text{ dBZ}) \\ 0.991 \int_0^h K_{DP}^{0.713} dh \text{ (otherwise)} \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 VIL : 鉛直積算雨水量 [kg/m^2]、 Z : 反射強度 [dBZ]、 K_{DP} : 偏波間位相差変化率 [$^\circ \text{km}^{-1}$]である。

VILNCは、VILの時間変化が雨滴生成量と地上に落下する雨水量が等しいという仮定のもと、(6)式

で逐次計算される。

$$\frac{dVIL}{dt} = S(t) - P(t) \quad (6)$$

ここに、 $P(t)$: 降雨強度 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$], $S(t)$: 雨滴生成率 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]である。 $S(t)$ は、時刻 t 及び $t-\Delta t$ におけるボリュームスキャンのペアの VIL から取得することができ、(7)式で与えられる。

$$S(t) = \frac{VIL(t) - VIL^*(t - \Delta t)}{\Delta t} + P(t) \quad (7)$$

ここに、 $VIL^*(t)$ は移動ベクトル推定後の移動した $VIL(t)$ を表しており、移動ベクトル推定後の VIL と移動前の VIL に関して移動時間で差分することにより、 VIL の発達・減衰の影響を反映している。また、上空から地上に落ちる降雨量の時間変化は、降雨強度に等しいと仮定することで、(8)式が成立する。

$$P(t) = \frac{d(VIL(t) - w_c(t))}{dt} \quad (8)$$

ここに、 $w_c(t)$: 気柱の上空に残存する雨水量 [kg m^{-2}]である。次に、(6)式及び(8)式から(9)式が導かれる。

$$\frac{dVIL(t)}{dt} + \frac{VIL(t)}{\tau(t)} = S(t) + \frac{w_c(t)}{\tau(t_0)} \quad (9)$$

ここに、 τ : VIL から地上の降雨への変換時間[s]である。計算初期時刻においては、定常であると仮定し、(9)式を VIL について解き、 $VIL(t + \Delta t)$ について Taylor 展開することで(10)式を得る。

$$VIL(t + \Delta t) = VIL^*(t) e^{-\frac{dt}{\tau(t_0)}} + \tau(t_0) \left(S(t) + \frac{w_c(t)}{\tau(t_0)} \right) \left(1 - e^{-\frac{dt}{\tau(t_0)}} \right) \quad (10)$$

予測して求めた VIL を(8)式に代入し、降雨強度 $P(t)$ を求めることで、予測降雨強度を得ることができる。

なお、Hirano and Maki⁶⁾が提案する VILNC は、移動ベクトルの推定方法として相互相関法を用いており、計算初期時刻の VIL とその 5 分前時刻の VIL から移動ベクトルを算出している。

(3) 洪水解析の概要

本研究では、分布型流出モデルを用いて解析を行っている。河道計算は、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{n^2 Q |Q|}{R^{4/3} A} \quad (12)$$

で行われる。ここに、 A : 河道断面積 [m^2], Q : 流量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], H : 水位 [m], g : 重力加速度 [m s^{-2}], n : マニングの粗度係数, R : 径深 [m], q : 単位幅あたりの流入量 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]である。

また、流出モデルには、立川らの飽和・不飽和流れを考慮した流出モデルを用いている。

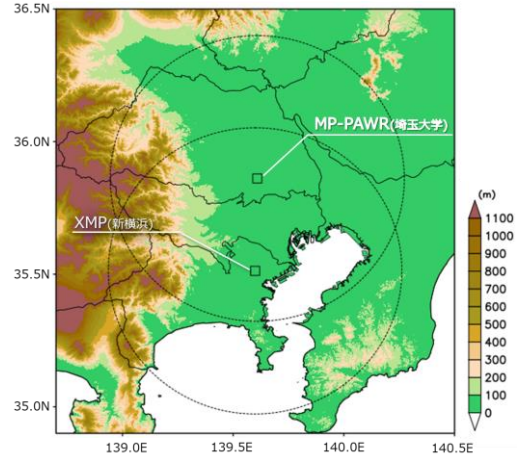


図-1 三次元風速場推定に用いたレーダサイト (MP-PAWR と新横浜局 XMP の位置関係)

3. 解析条件

(1) 解析対象領域

本研究で対象とする解析領域を図-1 に示す。Dual ドップラー解析の解析領域は、図-1 に示す MP-PAWR (埼玉大学) と XMP 新横浜局に挟まれた領域のうち、水平風が定量的に推定される範囲 (詳細は後述) で、東京都の大部分が含まれる領域である。各解析とも風速場の推定は、水平方向 1 km、鉛直方向 0.25 km の空間解像度で解析している。

(2) 利用データ

本研究で利用したデータは以下のとおりである。

a) MP-PAWR の観測データ

MP-PAWR の観測データ (114 仰角) と、疑似 XMP として関東局の観測シーケンスを参考に、MP-PAWR の 114 仰角から 12 仰角を抽出したデータセットを生成し、それぞれのデータを用いて解析を行った。ただし、疑似 XMP は、30 秒で観測された 114 仰角から関東局の観測シーケンスを参考に 12 仰角を抽出している。

b) XMP の観測データ

Dual ドップラー解析に際して、二基のレーダデータが必要となるが、MP-PAWR は一基しか設置されていないため、対になるレーダデータとして近接する新横浜局及び船橋局の XMP レーダのデータを用いた。

4. 三次元風速場の推定結果

図-2 は、予測初期時刻の実測の雨量強度分布(左図)と Dual ドップラー解析によって推定した高度 2,000 m における鉛直風の水平分布(右図)である。対象事例では、左図に見られる強い雨域は、北東から

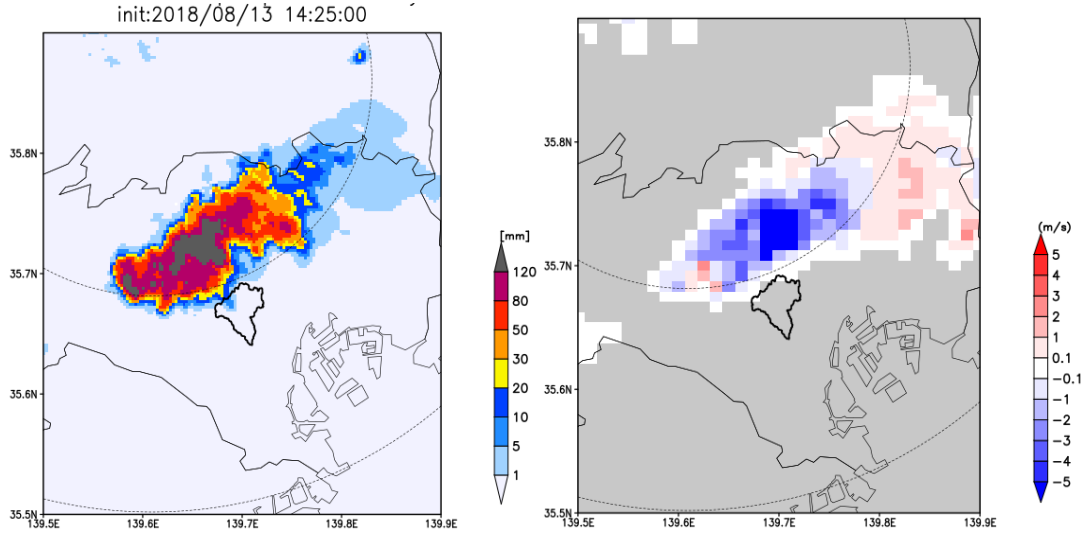


図-2 予測初期時刻の雨量分布図(右図)と鉛直風の推定結果(左図:MP-PAWRと新横浜XMP、MP-PAWRと船橋XMPで推定したDualドップラー解析結果を合成した鉛直風場)

南西方向に移動しており、同図中に黒枠で示した流域(渋谷川流域)に向かって南下している。このときの風速場推定により得られた鉛直風場が右図である。暖色系は上昇流、寒色系は下降流場を表す。右図と左図を比較すると、強い雨域の領域で明瞭な下降流場が推定されていることがわかる。

5. VILNC の課題と改良

(1) VILNC の課題と改良

本事例においても、従来の VILNC は予測リードタイムによらず過大評価傾向にあることが先行研究で示されている^{7),8)}。本章では、この事例を対象として、VILNC の過大評価改善に向けた検討内容とその結果を示す。VILNC の内部パラメータを紐解くと、(6)式で表される雨滴生成率が過大評価されている可能性があることがわかった。雨滴生成率は、

Δt 間における VIL の一次差分形式で表現されており、 Δt 間の雨域の変化が大きい場合、実現象との差が大きく評価される可能性がある。そこで、この雨滴生成率の算出アルゴリズムに(13)式の条件分岐式を導入し、雨滴生成率の過大評価傾向の改善を試みた。具体的には、(6)式の右辺第1項を推定した鉛直風 w に従って条件分岐させる。(6)式における右辺第1項の分子を ΔVIL^* として、

$$\Delta VIL^* = \begin{cases} 0 & (w < 0.1 \text{ m/s}) \\ VIL(t) - VIL^*(t - \Delta t) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (13)$$

で与える。すなわち、鉛直風の推定結果 0.1 m/s より小さな値であり、明瞭な発達傾向がない領域(大半が下降流場と推定されている領域)に関しては、雨雲は発達していないものとして、雨滴生成率を抑制するアルゴリズムを導入することとした。

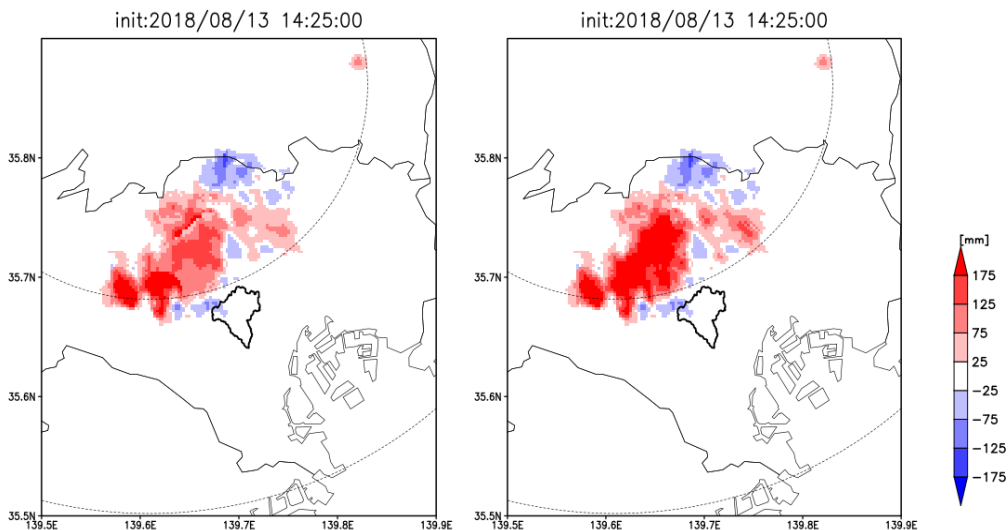


図-3 VILNC の雨滴生成率抑制効果 ((a) 改良後 (b) 改良前)

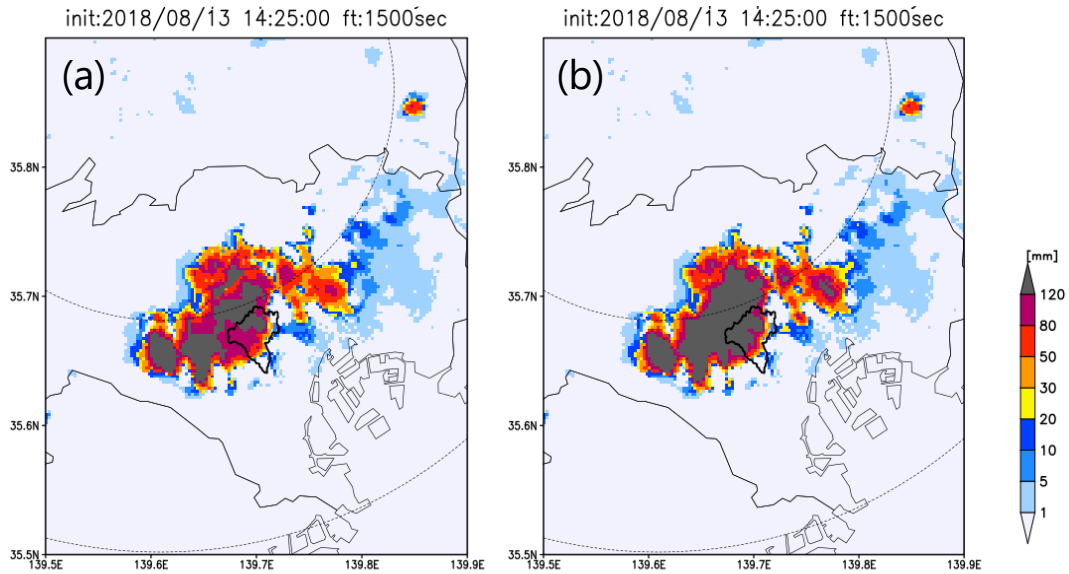


図-4 VILNC の雨滴生成率抑制有無による予測降雨強度の違い ((a) 改良後 (b)改良前)

(2) 改良前後の比較

図-3 に雨滴生成率の算出に(13)式を導入した際の $S(t)$ の二次元的分布の一例を示す。図-3(a)は、改良後の $S(t)$ の分布、図-3(b)は、改良前の $S(t)$ の分布である。暖色系は $S(t)$ が正值、すなわち発達過程であることを示す。一方で寒色系は $S(t)$ が負値、すなわち衰退過程であることを示している。渋谷川流域の北東側の雨域に着目すると、改良前(図-3(b))は濃い暖色系の領域が大部分を占めるが、改良後は、発達過程であるには変わらないものの、その発達の程度が抑制されていることが確認できる。

図-4 は、図-3 で得られた結果を踏まえて、降雨強度を予測した結果の一例である。図-3 同様に、図-4(a)は、改良後の $P(t)$ の分布、図-4(b)は、改良前の $P(t)$ の分布である。改良前は、120 mm/h を超過するような雨量分布が広範囲に予測されていたが、改良後は、鉛直風 w をしきい値とした雨滴生成の抑制効果が効いており、雨量強度が現象していることが確認できる。また、上昇流場の領域に関しては、改良前後でほぼ同等の雨量強度を予測していることから、顕著に強い雨量強度を推定していた領域のみ、(13)式の結果が反映されていることがわかる。

6. 水位予測への影響

5 章で解析した予測雨量データを用いて、渋谷川流域にて、水位予測を実施した。具体的には VILNC の改良前後の予測雨量を入力として、予測初期値の降雨分布を入力として解析した水位データに対する再現性を確認した。解析結果は図-5 に示すとおりである。同図の上段は渋谷川流域の流域平均雨量の

ハイドログラフ、中段のハイドログラフは、黒実線が予測初期時刻の降雨強度を入力として解析した渋谷川渋谷橋地点の水位ハイドログラフ、青実線が改良前 VILNC (10 分先予測) を入力として解析した水位ハイドログラフを示している。また、下段のハイドログラフは、黒実線は中段の水位ハイドログラフと同様に、予測初期時刻の降雨強度を入力として解析した水位ハイドログラフ、緑実線が改良後 VILNC (10 分先予測) を入力として解析した水位ハイドログラフを示している。

同図から、ハイドログラフの概形、ピーク水位などについて改良後 VILNC が改善された傾向にあることがわかる。ピーク水位の整合度を確認するべく、ピーク水位差率を求めると、VILNC 改善前の計算結果では、ピーク水位差率 $\approx 20.7\%$ 、Nash 係数 ≈ 0.87 であるのに対して、VILNC 改善後の計算結果では、ピーク水位差率 $\approx 7.5\%$ 、Nash 係数 ≈ 0.95 まで改善

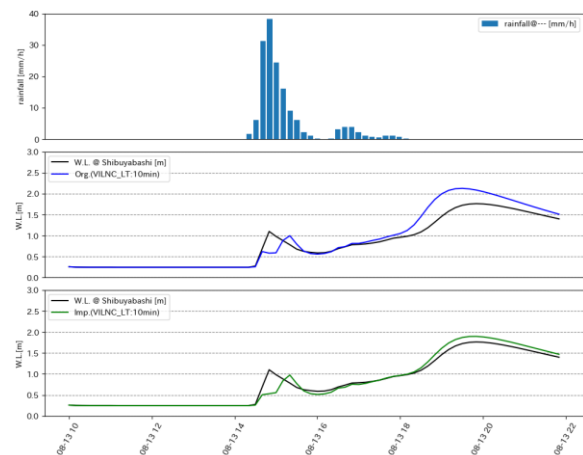


図-5 水位予測精度の改善効果

された。

7. まとめ

本研究では、河川管理における上空気象観測データの有用性について基礎的な検討を実施した。具体的には、短時間降雨予測において、MP-PAWR で観測可能な三次元観測データを用いて、Dual ドップラー解析を行い、鉛直風場を推定した。推定した鉛直風場、特に鉛直風を基準として、雨域の発達・衰退状況を VILNC に導入することで、雨量予測精度の改善を行った。加えて、改善した雨量予測データを用いて、流出予測を行うことで、雨量予測改善前後での予測精度を比較検証した。以下に、得られた結果を示す。

- 1) MP-PAWR を用いた Dual ドップラー解析により得られた鉛直風の下降流の領域は、雨域の強降雨強度の領域と一致しており、定性的であるが推定結果は妥当のものであると思われる。
- 2) 過大予測傾向にあった VILNC の雨滴生成率項に、推定された鉛直風を基準とした発達抑制のアルゴリズムを導入し、雨滴生成率を強制的に低下させることで、雨量強度の過大予測を改善することができた。鉛直風のしきい値は $w=0.1$ m/s 程度が良いと思われる。
- 3) 改善前後の VILNC の予測結果を入力データとした水位予測を実施した結果、改善前後で、ピーク水位差率は約 12%、Nash 係数は 0.12 改善し、0.95 程度まで向上した。

謝辞：MP-PAWR のデータセットは、国立研究開発法人情報通信研究機構により、収集・提供されたものである。なお、本研究では、国土交通省が提供する XRAIN 原データを利用した。また、このデータセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で、収集・提供されたものである。ここに記して謝意を表する。

REFERENCES

- 1) Yoshimi, K., Wada, M. and Hiraoka, Y.: Study on Water Level Prediction Using Observation Data from a Multi-Parameter Phased Array Weather Radar, *Journal of Disaster Research*, Vol.16, No.3, pp.410-414, 2021.
- 2) Kikuchi, H., Suezawa, T., Ushio, T., Takahashi, N., Hanado, H., Nakagawa, K., Osada, M., Maesaka, T., Iwanami, K., Yoshimi, K., Mizutani, F., Wada, M. and Hobara, Y.: Initial Observations for Precipitation Cores with X-Band Dual Polarized Phased Array Weather Radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.58, No.5, pp.3657-3666, 2020.
- 3) 中川勝広, 片山勝之, 増田有俊, 是津耕司, 中北英一: 渦管を用いた局地的豪雨探知手法に関する研究,

1 カ年研究用 (R5 提出)

- 水工学論文集, 74 巻 5 号, pp.I_265-I_270, 2018.
- 4) 中北英一, 西脇隆太, 山邊洋之, 山口弘誠: ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 69 巻 4 号, pp. I_325-I_330, 2013.
 - 5) 中北英一, 西脇隆太, 山口弘誠: ゲリラ豪雨の早期探知・予報システムの開発, 河川技術論文集, 20 巻, pp.335-360, 2014.
 - 6) Hirano, K. and MAKI, M. : 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.
 - 7) 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ダの観測特性とその洪水予測への適用に関する研究, 水工学論文集, 114 巻 2 号, pp. I_1291-I_1296, 2021.
 - 8) 佐々木結加, 小島彩織, 小山直紀, 吉見和紘, 山田正: MP-PAWR を用いた降雨量推定の精度評価及び局地的大雨の早期予測の実用化に向けた研究, 水工学論文集, 78 巻 2 号, pp. I_337-I_342, 2022.
 - 9) 深尾昌一郎, 浜津享助: 気象と大気のレーダーリモートセンシング, pp. 81-88, 京都大学学術出版会, 2005.
 - 10) 杉本聡一郎, 豊田康嗣, 下垣久: 気象レーダーを用いた降雨予測手法 ドップラー情報を用いた水平風速をその収発散量の推定, 電力中央研究所我孫子研究所報告, U00051, 2001.
 - 11) 土屋修一, 山地秀幸, 川崎将生: XRAIN 雨量観測の実用化技術に関する検討資料, 国土技術政策総合技術研究所資料, 第 909 号, 2016.
 - 12) Atlas, D., Srivastava, R. C. and Sekhon, R. S.: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence, *Reviews of Geophys*, Vol. 11, Issue. 1, pp. 1-35, 1973.
 - 13) Sekhon, R. S. and Srivastava, R. C.: Snow size spectra and radar reflectivity, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 27, Issue. 2, pp. 299-307, 1970.