

# 観測水面形の同化解析データを利用した 洪水流伝播とタンクモデルの流出量修正に 基づく水面形予測

見上 哲章<sup>1</sup>・福岡 捷二<sup>2</sup>・渡邊 明英<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: a19.trp8@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>フェロー 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)  
E-mail: watanabe-ak@tokencon.co.jp

豪雨の頻発化や水害の激甚化が生じる現在、進行中の洪水の縦断水面形時系列を活用し、高精度に解析できる洪水予測手法が求められる。本研究では観測水面形時系列に基づいた同化解析を行い、得られた縦断水面形と流量時系列情報を基に、洪水流伝播を利用した水位予測手法とタンクモデルの流出量を修正した水位予測手法の適用性を検討した。この結果、H25.9 洪水の水位伝播時間が明らかとなり、それをリードタイムとした予測水位は観測水位に概ね合致した。また、同解析流量に基づきタンクモデルの状態量を適切に修正した予測流量から水面形を予測することで、長いリードタイムにおいても観測水位への適合度が高いことが示された。このため、本予測手法の防災情報への利用性は高いことが示された。

**Key Words:** flood flow, water surface profiles, water level prediction, propagation characteristics, assimilation analysis, lead time

## 1. 序論

豪雨の頻発化や水害の激甚化が生じる現在、全国の河川で設置が進む水位計データや、ALB 測量等による詳細な河道地形データを活用し、流域河川の水位縦断分布を精度良く解析できる洪水予測手法が求められる。また、洪水時の住民避難は時間を要するため、水位予測時間であるリードタイムは十分長いことが求められる。

従来の水位予測では、降雨量に対して流出解析を実施し既往のH-Q換算流量を基に流量を補正し、河道区間の上流端境界条件に与え、洪水流解析により水位を予測している。しかし、堰やダムなどを除けばリアルタイムに流量を知ることは難しいこと、H-Q換算流量値は水位観測値の精度に比べて低いことから、流出解析流量に基づいて算定される予測水位の信頼性に課題が残されている。

この課題に対して福岡<sup>1)</sup>は、洪水時の観測水面形の時間変化を洪水流解析水位の解として用いることにより、水理現象を的確に説明すると共に、解析結果の河川管理に生かす具体的な方策を提示し、活用されている。後藤、福岡<sup>2)</sup>らは、観測水面形から求めた本支川の流量ハイド

ログラフを基に流出解析モデルの定数同定を行い、他洪水へ適用し解析法の妥当性を示している。立川ら<sup>3)</sup>は、粒子フィルター法を用いて水位の時系列情報を基にした粗度係数や上流端流量等をフィルタリングする予測手法や、河川水位同化手法<sup>4)</sup>などを検討している。

筆者ら<sup>5)</sup>は、利根川河道(152km-133km)を対象に、多地点の観測水位と平面二次元浅水流解析に対してアジョイント法<sup>6)</sup>を適用することにより、流量ハイドログラフ、粗度係数、樹木群透過係数と縦断水面形が自動的に同定・同化できる解析モデルを開発している。

対象とする河道の下流区間の水位は、一般的に上流からの洪水流伝播で定まる。このため、伝播時間以内であれば流出解析を用いなくとも、高精度な縦断水面形が得られれば当該時刻までの河道の洪水流解析だけで下流区間の水位は精度よく予測できる<sup>1)</sup>。しかし、洪水予測に必要なリードタイムが洪水伝播時間よりも長い場合は、解析区間の上流端で適切な境界条件が必要となる。

本研究では、リアルタイムに得られた観測水面形に基づく新しい洪水予測解析に対して、まず手法の全体像を示し、その適用性と妥当性について検討する。

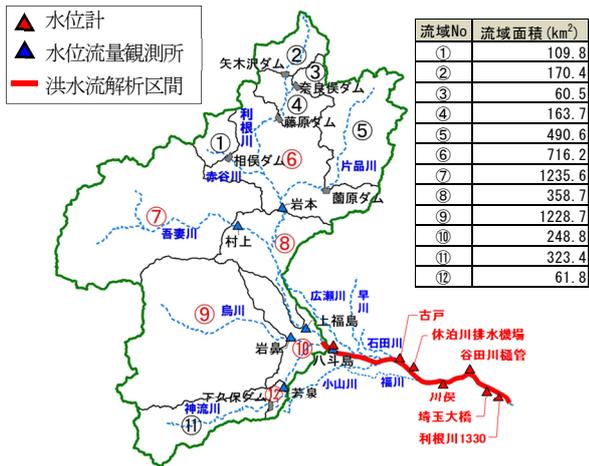


図-1 洪水流解析区間と八斗島地点上流域の流域分割

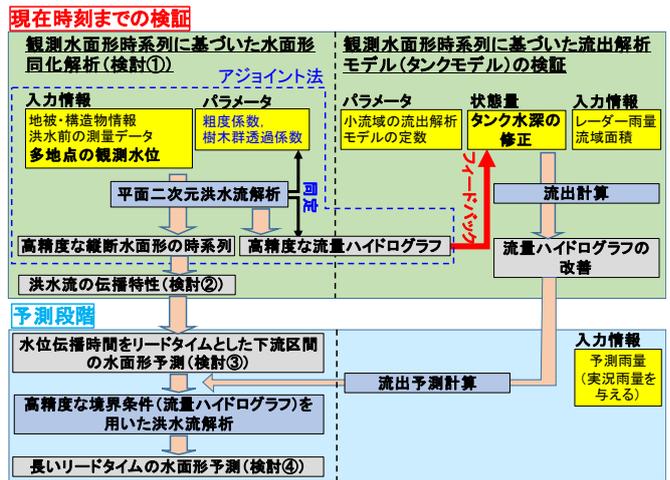


図-3 本研究の洪水予測手法の説明



図-2 洪水流解析の水面形同化区間、予測区間、地被分布

表-1 粗度、樹木群透過係数の初期設定値、範囲等の設定と同定値

区分	初期値	最小値	最大値	標準偏差	同定値
低水路(182km-169.5 km)	0.032	0.030	0.035	0.0032	0.034
低水路(169.5 km - 162 km)	0.030	0.025	0.032	0.0030	0.028
低水路(162 km - 154 km)	0.027	0.020	0.030	0.0027	0.025
低水路(154 km - 143 km)	0.027	0.020	0.030	0.0027	0.028
低水路(143 km - 133 km)	0.025	0.018	0.030	0.0025	0.025
草本(低)	0.035	0.025	0.050	0.0035	0.036
草本(高)	0.050	0.030	0.080	0.0050	0.051
グラウンド・芝地	0.025			固定	
樹木群の地表面	0.025			固定	
樹木群透過係数(m/s)	40	20	80	8	27

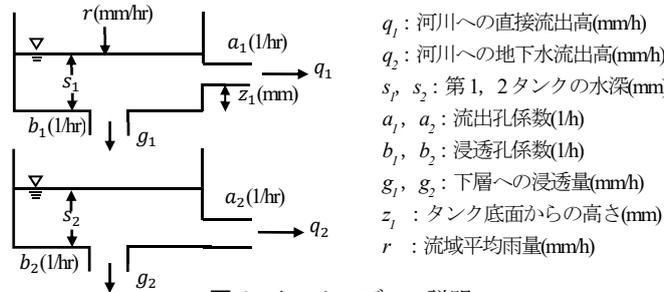


図-4 タンクモデルの説明

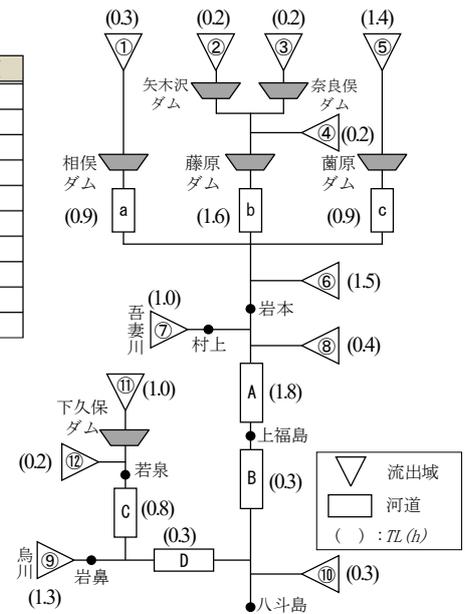


図-5 タンクモデルによる八斗島地点の流量算定法

## 2. 本手法の全体像と解析法及び条件

### (1) 本手法の全体像

対象河川は利根川上流区間とし、洪水流が高水敷に2~3m程度乗り上げたH25.9台風18号出水を検討対象とする。図-1に検討対象の洪水流解析区間と水位観測位置、八斗島地点より上流の流域と流出解析の分割流域、その定数同定に利用した水位流量観測所を示す。図-2は河道区間の拡大図であり、平面二次元洪水流解析の水面形を7カ所の観測水位に同化させる約50kmの全体区間(182km~133km)と、洪水流伝播に基づき水面形を予測する約17kmの予測区間(150km~133km)を示している。

### 図-3 に本手法の全体像を示す。手法と検討は大きく4

つにわかれている。まず、H25.9 出水に対して、全体区間を対象にアジョイント法を用いた観測縦断水面形の同化解析を行い、縦断水面形時間変化と八斗島地点の流量ハイドログラフを精度良く求める(検討①)。同時に出水期間一定とした粗度係数や樹木群透過係数も同定する。

次に、同化解析から得られた水位、水面幅、水面勾配等の断面平均量を用いて流量との関係を調べ、連続式を特性曲線法で解くことにより水位伝播時間を検討する(検討②)。そして、進行中の洪水に対する水位予測を実施し検証する。具体的には、得られる観測水位情報の時刻(現時刻)を逐次変え、その時刻までの水面形同化解析

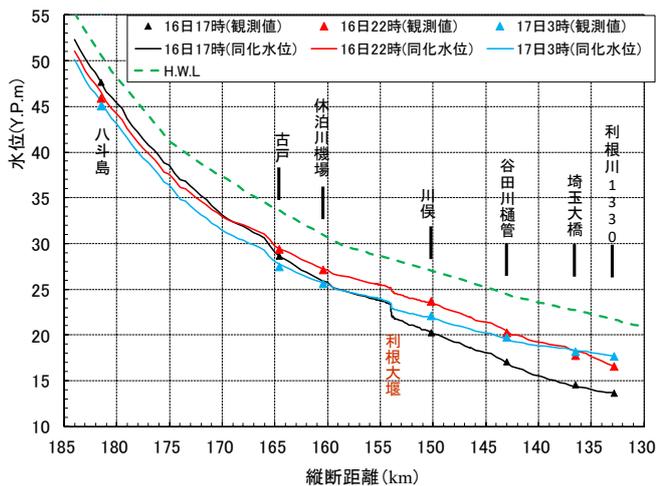


図-6 観測水面形と同化解析水面形の時間変化の比較

を実施し、水位伝播時間をリードタイムとした洪水流予測解析を行い、実測水位との適合度を検証する(検討③)。

最後に、タンクモデルに予測雨量を与えて流量を推定し、それを河道上流端の境界条件として洪水流解析により水位を予測する。このとき、水面形同化から得られた八斗島地点の同化解析流量に、タンクモデルの状態量である水深を調整し流出量を整合させておく。

## (2) 同化解析モデル

既報<sup>7)</sup>の非定常平面二次元流解析に対する同化モデルを H25.9 出水に適用し、水面形同化を行う。評価関数に対する制御変数<sup>7)</sup>は、上流端からの流量ハイドログラフと粗度係数及び樹木群透過係数とした。粗度係数区分や樹木群透過係数の初期設定値や範囲<sup>10),11)</sup>等は表-1に、植生の平面分布は図-2に示すとおりである。上流端流量の初期設定値には、八斗島地点の HQ 換算流量を与えた。154km には利根大堰が設置されており、解析にはゲートの実際の開閉操作を反映した。観測水位の誤差標準偏差は 10cm、川俣地点と古戸地点等の HQ 換算流量の誤差標準偏差は時系列の流量値に対してそれぞれ 20%と仮定した。

## (3) タンク流出モデル

流出解析法には、永井<sup>12)</sup>のべき乗タンクモデルを採用した。このモデルは図-4に示すように、第1タンクが洪水流出の直接流出成分を担い、第2タンクが地下水流出(基底流出)成分を受け持つ。タンク定数は、図-1に示した小流域毎に設定している。具体的には、H10~H24の6洪水に対して、降雨流出解析を実施してダム流入量もしくは水位流量観測所の H-Q 流量に平均的に合致するように設定した。図-5は、上流域から順に計算されるタンクモデルによる八斗島地点流量の算定方法を示している。流出域の番号は図-1の番号に対応している。また、図-5に示す河道区間の流量は一般的な貯留関数法により

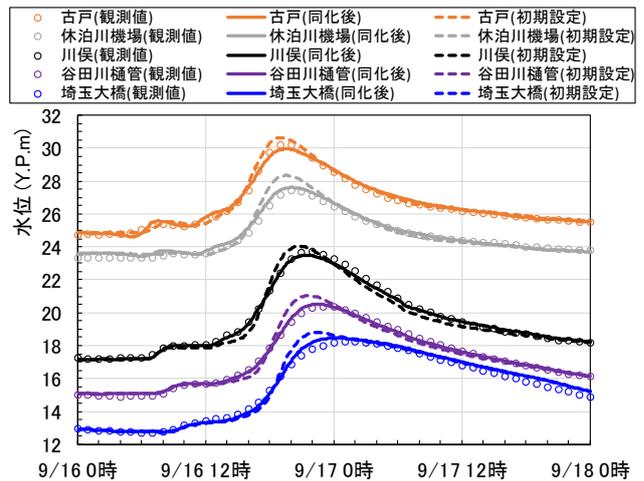


図-7 観測水位と同化解析水位のハイドログラフ

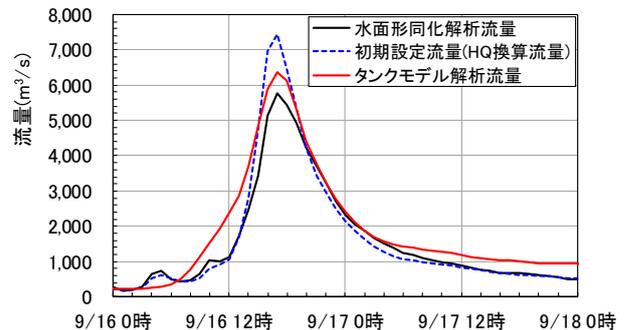


図-8 八斗島地点の流量ハイドログラフ

算定される。全ての定数結果は紙面の関係上省略するが、図中には流出遅れ時間 TL を示している。後述の H25.9 出水にタンクモデルを適用する際の降雨データは国土交通省オンライン合成レーダ雨量を用いた。

## 3. H25.9 出水の水面形時間変化の同化解析結果

河道区間全体での観測縦断水面形の同化解析結果を示す。図-6は、洪水上昇期、ピーク時、低減期の観測水面形と同化解析水面形を示している。また、図-7は観測地点の実測水位と同化前後の解析水位のハイドログラフを比較して示している。図-6より、同化解析水面形は観測水面形の時系列をほぼ再現していることが確認できる。図-7の同化後の水位ハイドログラフは同化前(初期設定)に比べて観測値に合致している。同化解析から得られた制御変数である抵抗係数を表-1の右欄に示す。これより、低水路粗度係数は初期設定値に対して±0.002程変化している。一方、樹木群透過係数は 40m/s→27m/s となり流水への樹木群抵抗はやや大きい同定結果であるが、福岡ら<sup>11)</sup>の栗橋(130.4km)~江戸川分派点(121.5km)で検討された樹木群の抵抗 20m/s ~80m/s の範囲内であり問題ない。

図-8は、上述の抵抗係数と観測水面形を説明した八斗島地点の同化解析流量と初期設定流量を示す。また、降雨ハイドログラフから求めたタンクモデルによる計算流

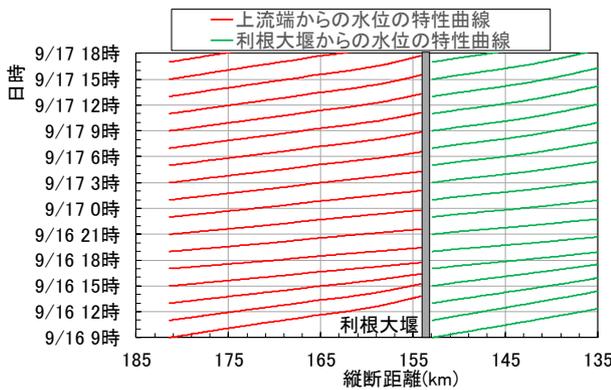


図-9 H25.9洪水の水位伝播の特性曲線

量を示す。これより、タンクモデルによる計算流量は観測水面形を説明する同化解析流量に比べて、洪水立ち上がりからピーク時刻にかけて  $500\text{m}^3/\text{s} \sim 1400\text{m}^3/\text{s}$  大きい。

#### 4. 水面形同化解析結果を利用した洪水予測

##### (1) 洪水流の伝播特性

3章で得られた H25.9 出水の洪水現象を説明した水面形同化解析データを用いて、全体区間の上流端(182km)から予測区間の上流端(150km)に要する水位伝播時間を明らかにする。縦断距離と時間に対して水位伝播特性を検討する。利根川のように水深に比して川幅が大きく、洪水の非定常性が小さいことを考慮し、予測区間上流端までの同化解析から得られた断面平均水量、すなわち水位、水面勾配、流量に着目し、以下の関係を仮定する。

$$Q = F(A(H), B(H), I_w(H), \alpha) = \alpha AR^{2/3} I_w^{1/2} = \alpha C_H \quad (1)$$

ここに、 $H$ :同化解析水位、 $A$ :流水面積、 $B$ :水面幅、 $R$ :径深( $\cong A/B$ )、 $I_w$ :水面勾配、 $C_H$ :水位から求まる通水能、 $\alpha$ :総粗度である。 $\alpha$ は、2次元の運動や粗度係数を式(1)の1次元方向に集約化したことによる定数で総粗度と定義する。また、通水能は  $AR^{2/3}/n$  と定義されるが、本検討では水位から求まる量  $AR^{2/3} I_w^{1/2}$  で定義している。

利根川の広域区間では、同化解析より得られた流量と通水能の関係は直線的であることがわかっている。このため、広域区間の縦断水面形の時間変化が精度良く解析もしくは観測できれば、流量はほぼ推定可能である。

次に水位の伝播時間を同化データを基に調べる。式(1)に示した流量の縦断変化は、水位、水面幅、水面勾配、総粗度の縦断変化として仮定すると、連続式は以下のように表現される。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + C \frac{\partial A}{\partial x} = -D \quad (2a)$$

$$C = \frac{5}{3} V, \quad D = \left(-\frac{2}{3} \frac{Q}{B}\right) \frac{\partial B}{\partial x} + \left(\frac{1}{2} \frac{Q}{I_w}\right) \frac{\partial I_w}{\partial x} + \left(\frac{Q}{\alpha}\right) \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad (2b)$$

水位の伝播距離と時間は、式(2a)の特性曲線を追跡することで得られる。その場合の  $C(tx)$  と  $D(tx)$  は、同化解

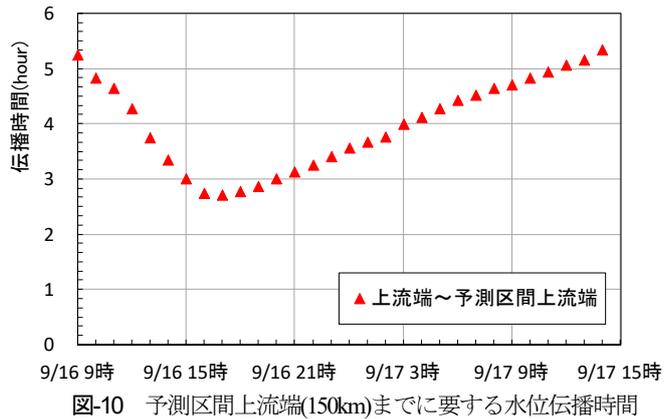


図-10 予測区間上流端(150km)までに要する水位伝播時間

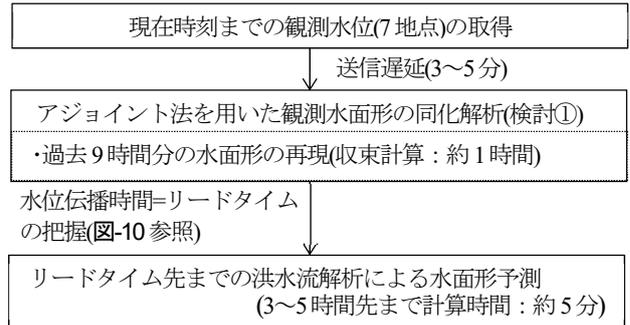


図-11 リアルタイム性を考慮した洪水予測の解析フロー

析結果の断面平均値から式(2b)により与えられる。この計算に用いた  $\Delta x$  は  $100\text{m}$ 、 $\Delta t$  は1分の出力データを用いた。利根大堰は式(2a)の適用外であるため、その上下流で分離して解析した。図-9に解析結果の特性曲線の経路図を、図-10に解析上流端(182km)から予測区間上流端(150km)までに要する水位伝播時間を示している。この結果から、洪水上昇期(16日15時まで)は伝播速度が大きく伝播時間は5時間~3時間であるが、下降期では徐々に伝播速度は小さくなり、伝播時間も長くなるのがわかる。ピーク時の伝播時間は約2.5時間である。150km下流の水位予測区間に対する水位伝播時間は、未来の情報を必要とせず、それより上流からの洪水流解析を時間延長するだけで水面形の予測が可能なりードタイムの長さであることを示している。

##### (2) 洪水流伝播に基づく下流区間の水位予測

上記(1)により明らかとなった予測区間のリードタイムを基にした下流区間の水位予測手法とその妥当性を検証する。図-11に解析フローを示す。リアルタイムの洪水予測では、現在時刻を基準として、7地点の観測水位を取得した後、伝播時間よりも十分長い時間(本検討では過去9時間と設定)に対して、水面形同化解析を実施する。次に、その時刻でのリードタイム(水位伝播時間)まで時間延長した平面2次元洪水流解析を全体区間で実施し、縦断水面形の時間的変化を求める。予測区間は  $150\text{km} \sim 133\text{km}$  である。予測期間中の上流端境界条件には、

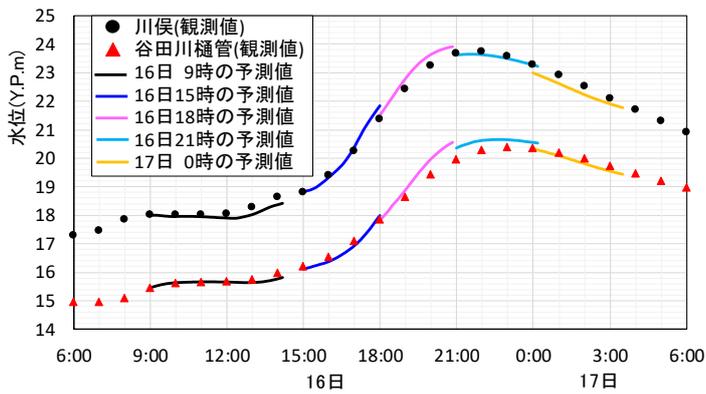


図-12 観測水位と水位予測値の比較(洪水流伝播)

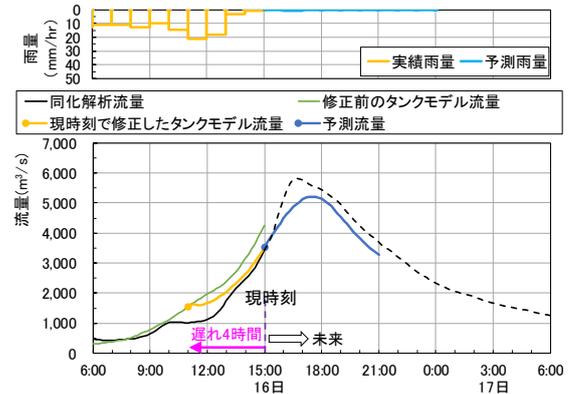


図-13 八斗島地点の同化解析流量とタンクモデル流量の比較

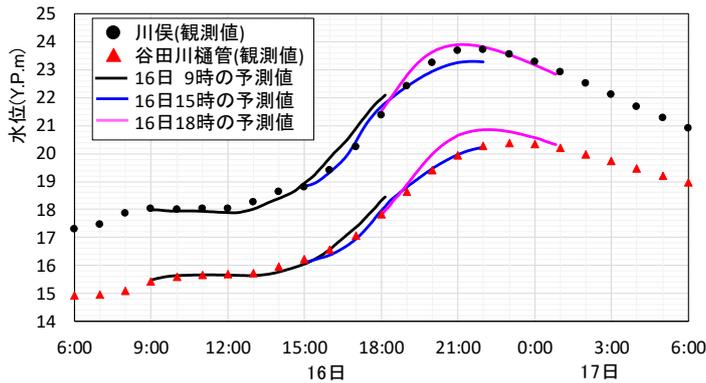


図-14 観測水位と予測水位の比較(洪水流伝播+流出予測流量)

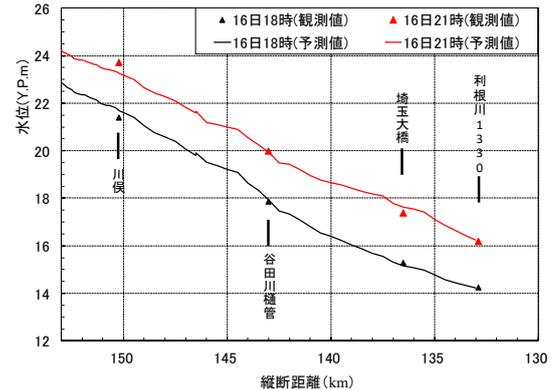


図-15 9/16 15時実施の予測水面形と観測水面形の比較

現在時刻の流量を継続して与えた。また、下流端境界水位には実測値を与えた。予測期間中の利根大堰のゲート操作は、実際の開閉状況を反映した。

図-12は、川俣地点(150km)と谷田川樋管地点(143km)の予測水位を観測水位と共に示している。これより、予測水位は、洪水立ち上がり、ピーク時刻、低減期にかけて観測水位に概ね合致している。実用的にはピーク時刻までの水位の適合度が重要であり、本手法の結果は有効と考えられる。

図-11のフローには、データ取得の遅延時間、同化と予測に要する計算時間を併せて示している。これより、1回の水位予測に要する時間はTotalで1時間10分程度であった。これらの計算は IBM POWER8 (CPU3.45GHz, 18core×2CPU)を用いて MPI 6 プロセスで実行された。本解析法を対象とする区間の洪水予報システムとして適用すれば、1.5時間毎に3~5時間先までの予測水位情報を河川管理者や住民等に提供可能である。

### (3) 同化解析流量に基づくタンクモデル流出量の修正と水面形予測への適用

水面形同化解析より得られた八斗島地点の流量を基に、タンクモデルの状態量である水深を修正し、流出解析モデルを用いた水面形予測への適用性を検討する。

タンクモデルの水深の補正方法は以下のとおりである。図-8に示した観測水面形を説明した現在時刻の八斗島流量(同化解析流量)とタンクモデルによる計算流量を比較

する。両者に違いがある場合は、図-1に示したダム下流小流域(赤字)の上段タンク水深について、八斗島地点への流出遅れ時間を遡って倍率補正することで同化解析流量に整合させる。なお、上段タンク水深を対象とする理由は、洪水の直接流出成分に寄与するためである。また、八斗島地点への流出遅れ時間は、図-5に示したダム下流のTL等を考慮して4時間とした。

図-13は、9/16 15時を現在時刻として上記の方法にしたがい実施した八斗島地点における修正前後のタンクモデルの流量ハイドログラフを示している。同図より、16日15時のタンクモデル流量値(緑線)は同化解析流量値(黒線)に比べて大きいため、15時の同化解析流量値に整合するように4時間前に遡ってタンク水深を補正する(黄色線)。予測流量(青線)は、上述の改善されたタンク水深に基づき、予測雨量に実績雨量を与えて算出した。

上記の改善されたタンクモデルの予測流量ハイドログラフを上流端境界条件(八斗島)に与え水位予測計算を実施した。予測時間であるリードタイムは、各時刻の洪水流伝播時間に流出遅れ時間である4時間を加えたものである。

図-14は、9/16 9時、15時、18時の同化解析データに対して行った川俣地点と谷田川樋管地点の予測水位と観測水位を示している。タンクモデルによる流量を観測水面形に基づく流量で修正することにより、各時刻からの予測水位は概ね観測水位に合致している。図-12に示した洪水流伝播を利用した洪水予測手法は、ピーク付近の水

位を3時間前にしか予測できていないが、図-14に示す流出解析を組み合わせた洪水予測手法では、ピーク付近の水位を6~7時間前に概ね予測できている。

図-15は、9/16 15時に予測した縦断水面形を観測水面形と比較している。予測結果は概ね観測水面形に合致しており、本水面形予測手法の妥当性が確認される。

## 5. まとめ

H25.9洪水に対して、下流区間の水位予測に必要な洪水流のリードタイムである伝播時間が定量的に示された。また、リードタイムまでの予測水位は観測水位に概ね一致し、その計算コストは大きくないため、防災情報への本予測手法の利用性は高いことが示された。観測水位の時系列情報に基づく流量ハイドログラフを山地流域の流出量に適切にフィードバックすることで、リードタイムを長くとっても観測水位への適合性が高いことが示された。長いリードタイムに対して水位予測の精度をより高めるためには、水面形追跡区間を長く採ることが肝要である。

今後は、群馬県、埼玉県区間の支川群における多地点観測水位データも用いて、国、県と共同で、本・支川の水位縦断分布の推定や、本・支川の河道計画・管理について流域治水の視点から検討を行う予定である。

謝辞：本研究で用いたデータは、国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所より提供していただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術(招待論文)，河川技術論文集，第12巻，pp.1-6，2006。

- 2) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する—，土木学会論文集B1(水工学)Vol.73, No.4, I\_355-I\_360, 2017。
- 3) 後藤岳久，福岡捷二，大作和弘：観測水面形時系列から求めた本・支川の流量ハイドログラフを用いたタンクモデルの同定定数と洪水予測計算，土木学会論文集B1(水工学) Vol.75, No.2, I\_1291-I\_1296, 2019。
- 4) 立川康人・須藤純一・椎葉充晴・萬和明・キムスミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発，土木学会論文集B1(水工学) Vol.67, No.4, I\_511-I\_516, 2011。
- 5) 後藤岳久，柴田亮，山本浩之，廣野太志，福岡捷二：多点水位計測システムを用いたリアルタイム水面形・流量推算手法，河川技術論文集，第23巻，pp.257-262, 2017。
- 6) 柏田仁，二瓶泰雄：一次元不定流解析のための新たな水位同化手法の開発，土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4, I\_595-I\_600, 2017。
- 7) 渡邊明英，見上哲章，小島崇，松延和彦，鈴木裕三，富澤慎二郎：平面二次元流解析とアジョイント法に基づいた点観測の水位情報に対する縦断水面形時間変化の同化手法の検討，河川技術論文集，第23巻，pp.197-202, 2017。
- 8) 西口亮太，壇鉄也：随伴変数法による水位縦断分布のリアルタイム予測に関する研究，河川技術論文集，第23巻，pp.275-280, 2017。
- 9) 吉田圭介・石川忠晴：Adjoint法による流量ハイドログラフ推定法に関する研究，土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I\_1264-I\_1266, 2012。
- 10) 建設省河川局治水課，土木研究所河川研究室：河道特性に関する研究，第42回建設省技術研究会報告，1988。
- 11) 福岡捷二，藤澤寛，大沼史佳：利根川河道の樹木群透過係数と高水敷粗度係数，河川技術論文集，第13巻，pp.333-338, 2007。
- 12) 永井 明博：洪水流出タンクモデルの総合化に向けて，農業土木学会論文集，No.176, pp.95-103, 1995。

(Received June 30, 2020)  
(Accepted August 28, 2020)

# WATER LEVEL PREDICTION USING FLOOD FLOW PROPAGATION AND MODIFIED DISCHARGE OF THE TANK MODEL BY HYDRAULIC DATA ASSIMILATED TO OBSERVED WATER SURFACE PROFILES

Tetsuaki MIKAMI, Shoji FUKUOKA and Akihide WATANABE

A flood forecasting method that can analyze the longitudinal water surface profiles time series of ongoing floods with high accuracy is required to ensure the timely evacuation of residents. In this paper, the water level prediction method using flood flow propagation and water level prediction method with modified runoff of tank model is examined based on the hydraulic quantities obtained from the assimilation analysis.

As a result, the water level propagation time of the flood in September 2013 is clarified, and the predicted water level approximately agrees with the observed water level up to 3 to 5 hours ahead. The analysis method based on the assimilation flow rate can predict the water level by flood flow analysis using the flow rate with the modified state quantity of the tank model. This predicted water level approximately agrees with the observed water level over a long lead time. Therefore, it is shown that this prediction method is highly applicable to disaster prevention information.