

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

REAL-TIME PREDICTIVE METHOD OF WATER SURFACE PROFILES AND
DISCHARGES USING MULTIPOINT WATER LEVEL OBSERVATION SYSTEM

後藤岳久¹・柴田 亮²・山本浩之³・廣野太志⁴・福岡捷二⁵

Takahisa GOTOH, Ryo SHIBATA, Hiroyuki YAMAMOTO, Futoshi HIRONO
and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 国土交通省 中国地方整備局 出雲河川事務所所長 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原町5-1)

³国土交通省 中国地方整備局 企画部 企画課 課長補佐 (〒730-8530 広島市中区八丁堀6-30)

⁴国土交通省 中国地方整備局 河川部 河川計画課 計画第二係長 (同上)

⁵フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The Hii River floodway has important role to reduce flood damages in the downstream reach of the Hii River. The flood discharges diverted to the Hii River floodway are controlled by the movable weirs installed at the bifurcation section. The movable weirs are operated based on the rating curve in the observation station. Therefore, estimating flood water surface profiles and discharge distributions at the real-time during a flood are needed for proper operations of the movable weirs. Recently, the multipoint water level observation system which was able to obtain multipoint water levels at real-time was developed. In this study, the 2D flow and bed variation calculation method which was able to estimate water surface profiles and discharge distributions at real-time is presented by using multipoint observed water levels in the Hii River.

Key Words : time series of water surface profile, multipoint observation system, real-time flood simulation

1. まえがきと研究のねらい

斐伊川放水路は、斐伊川下流域の浸水被害軽減策の一つとして建設され、14.5km付近で斐伊川本川の洪水流を神戸川に分流している。斐伊川放水路の分流堰には、起伏ゲートと制水ゲートが設置されており、起伏ゲートは倒伏・起立操作により分流の開始・終了を行う。制水ゲートは、放水路に計画高水流量 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量が流入しないように制御する設備である。放水路への分流開始は、上島地点(18.6km)から放水路分流区間までの洪水到達時間を40分と仮定し、上島地点でのH-Q換算流量が $500\text{m}^3/\text{s}$ を超過してから40分後に起伏ゲートを倒伏することにより実施している。このような地点流量に基づいたゲート操作では、その地点の流量観測誤差に依存することや、その地点で洪水時に何らかの障害で観測不能となった場合の危機管理体制に不安がある。

近年の水位計測機器の発達により、洪水時の水位は比較的安価で精度良く測れるようになり、様々な河川において、洪水時の水位を多点で計測した観測水面形時系列

が得られるようになってきた。福岡は、観測水面形の時間変化には洪水の非定常性や河道の縦横断形状、河床変動の影響が現れていることから、我が国の多くの河川で洪水時の観測水面形の時間変化を用いた洪水流・河床変動解析を行い、洪水時の水位・流量の時空間分布、流れ場の構造や河床変動の機構を明らかにしてきた¹⁾。さらに、この手法を平成27年9月鬼怒川洪水に適用し、洪水時における流域全体の治水施設による水量の分担を明らかにすることにより、流域全体の洪水水理現象の見える化している²⁾。このように、観測水面形時系列データを用いた洪水流・河床変動解析は、リアルタイムで洪水流量・水位の伝播や変形、河床変動、治水施設による水量の分担状況を広い範囲で把握し、洪水時にこれらの水理情報に基づいてダムや可動堰等の運用する可能性を高めて来た。

一般に、リアルタイム洪水予測計算では流出計算結果の流量を上流端境界条件として与え、河道内の洪水流解析が行っている。しかし、雨量の観測・予測誤差や流出計算による雨量から流量への変換誤差等があるため、流

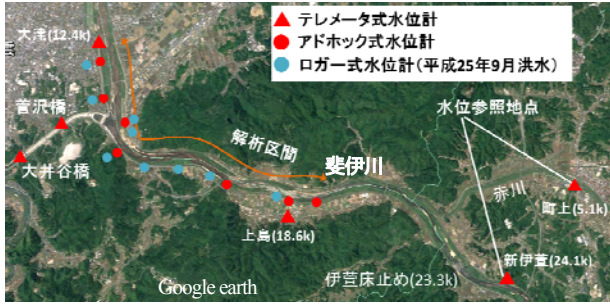


図-1 解析検討範囲とアドホック式水位計設置状況

量を境界条件としたリアルタイム洪水流計算では、精度の高い洪水時の水位・流量の時空間分布の算定が困難である。また、流量予測値をカルマンフィルタや粒子フィルタにより、観測値と同化する洪水予測計算技術が提案されているが³⁾、これらの多くには、単純な河道縦横断形を仮定した1次元洪水流解析が用いられており、河道内の流量・水位の縦断分布が精度良く求まらない場合が多かった。河道内の水位予測値を粒子フィルタで同化する方法では⁴⁾、河道断面データの確認不足や上流端の流量誤差が粗度係数等のパラメータに押し込められ、洪水伝播の物理機構の説明力が乏しい結果も見られる⁵⁾。これに対して、観測水面形時系列を用いた洪水流・河床変動解析法は、任意地点の流量時系列を算定出来るため、流出計算を伴うことなく水面形・流量縦断分布、洪水流の挙動等を求めることが出来る。

近年、多点水位計測システム（アドホック式水位計）が開発されたことにより⁶⁾、オンラインで観測水面形情報が得られるようになり、これに加えて計算機能力の向上により、リアルタイムで観測水面形時系列データを用いた洪水流・河床変動解析が出来る環境が整いつつある。

斐伊川放水路分流区間には、多点水位計測システムが導入され、リアルタイムの観測水面形情報を用いたゲート操作が検討されている。本研究では、斐伊川放水路分流区間を対象とし、計算範囲と上流域の観測水位情報を用い、洪水時の水理諸量をリアルタイムで算定する手法を提示する。

2. リアルタイム水位・流量縦断分布推算手法

(1) 対象範囲と対象洪水、アドホック式水位計

検討範囲は上島地点（18.6km）～大津地点（12.4km）までの区間とし、斐伊川放水路については菅沢橋までの区間とした。図-1は、解析対象区間と各種水位計の設置位置を示す。アドホック式水位計は、放水路分流区間に縦断的に密な間隔で設置され、これらは水位計に設置された無線局同士で適切な回路を組み、オンラインで水位データが河川事務所等に転送される⁶⁾。ここで、斐伊川では、アドホック式水位計設置以降、出水を経験していないため、本研究では詳細に水面形が観測された平成25年9月洪水、平成23年5月洪水の観測データを用いてリアルタイム水位・流量・河床変動の予測可能性について検討する。

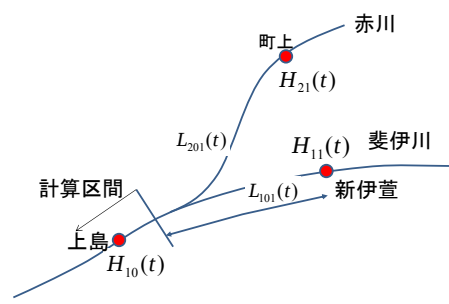


図-2 計算範囲より上流域の観測データ参照点の定義

(2) 解析方法と境界条件

流れの解析には平面二次元洪水流解析法を用い、河床変動解析法には掃流砂と浮遊砂を考慮する。浮遊砂は鉛直濃度分布を平衡状態と仮定したLane-Kalinskeの濃度分布式を用い、水深積分移流拡散方程式により計算する。

観測水位時系列データを用いた洪水流・河床変動解析では、計算範囲の上下流端に池を設け、それぞれ最上流の観測地点（上島地点と大津地点）の観測水位を満足するように上下流端池の水位を調整して計算している。この方法をリアルタイムで計算するためには、最初に計算範囲の最上流の観測地点（上島地点と大津地点）の水位予測値を設定する必要がある。上島地点における水位予測値 $H_{10}(t+\Delta t)$ は、テーラー展開において二次精度以降の項を無視すると次のようになる。

$$H_{10}(t+\Delta t) = H_{10}(t) + \frac{\partial H_{10}(t)}{\partial t} \Delta t \quad (1)$$

ここで、添え字 i, j は、 i :河川番号、 j :計算範囲より上流の観測地点番号である。本研究では、(1)式の右辺第二項の境界地点の水位上昇（下降）率の項を、計算範囲より上流地点（新伊萱観測所(24.1km)と町上観測所(赤川, 5.1km)）における観測水位の上昇（下降）率を用いて評価する（図-1、図-2）。

まず、上島地点における流量 Q_{10} の増加（減少）率が、新伊萱観測所の流量 Q_{11} と町上観測所の流量 Q_{21} のそれぞれの増加（減少）率の線形和で表せるものと仮定する。

$$\frac{\partial Q_{10}(t)}{\partial t} = \varepsilon_{101}(t) \frac{\partial Q_{11}(t-\Delta t_{101})}{\partial t} + \varepsilon_{201}(t) \frac{\partial Q_{21}(t-\Delta t_{201})}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_{101}(t)$ 、 $\varepsilon_{201}(t)$:本川・支川の01区間における流量逓減に関する係数であり、 $\varepsilon_{101}(t)=\varepsilon_{201}(t) \approx 1.0$ とする。また、 Δt_{101} 、 Δt_{201} は本川・支川の01区間における洪水到達時間である。式(2)に平均水深 h_{ij} 、平均流速 U_{ij} 、水面幅 B_{ij} を代入し、簡単のため $\frac{\partial h(t)}{\partial t} \gg \frac{\partial B U(t)}{\partial t}$ と $\frac{\partial H(t)}{\partial t} \approx \frac{\partial h(t)}{\partial t}$ であることを仮定して展開すると次のようになる。

$$H_{10}(t+\Delta t) = H_{10}(t) + \left(\beta_{11}(t-\Delta t_{101}) \frac{\partial H_{11}(t-\Delta t_{101})}{\partial t} + \beta_{21}(t-\Delta t_{201}) \frac{\partial H_{21}(t-\Delta t_{201})}{\partial t} \right) \Delta t \quad (3)$$

$$\beta_{11}(t-\Delta t_{101}) = \frac{(BU)_{11}(t-\Delta t_{101})}{(BU)_{10}(t)}, \quad \beta_{12}(t-\Delta t_{201}) = \frac{(BU)_{21}(t-\Delta t_{201})}{(BU)_{10}(t)}$$

ここで、計算範囲より上流域の観測地点と境界地点での

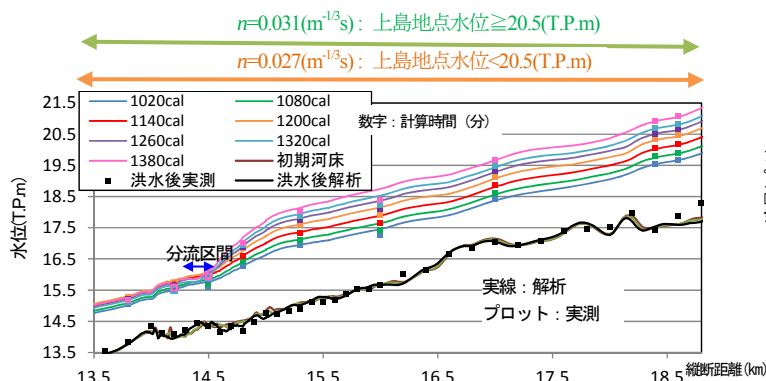


図-3 水面形の観測結果と解析結果の比較 (H25.9洪水再現計算)

表-1 既往洪水の観測水面形時系列を再現するように決定した粗度係数・樹木群透過係数分布

	洪水	縦断距離(km)	粗度係数 ($m^{-1/3}s$)		樹木群透過係数(m/s)
			高水敷未冠水	高水敷冠水	
Case1	H25.9	12~19	0.027	0.031	40
Case2	H23.5	12~15	0.035	0.038	
		15~19	0.027	0.031	
		高水敷 (12~19)		0.1	

断面平均流速の比を、簡単のため $U_{11}(t)/U_{10}(t) = U_{21}(t)/U_{10}(t) \approx 1.0$ とおくと以下のように、 $\beta_j(t)$ は上島地点とその上流観測所との水面幅比の時間変化で表せる。

$$\beta_{11}(t - \Delta t_{101}) = \frac{B_{11}(t - \Delta t_{101})}{B_{10}(t)}, \quad \beta_{12}(t - \Delta t_{201}) = \frac{B_{21}(t - \Delta t_{201})}{B_{10}(t)} \quad (4)$$

既往洪水の新伊萱地点から上島地点までの洪水ピークの到達時間は、概ね1時間であることから $\Delta t_{101} \approx 1.0(\text{hour})$ とし、上島地点から町上地点の距離は上島地点から新伊萱地点の距離と大差がないことから、 $\Delta t_{201} \approx 1.0(\text{hour})$ とした。今後、様々な洪水に対して洪水流・河床変動計算を行い、洪水の遅れ時間や水面幅比の時間変化の評価方法について検討する必要がある。また、下流端境界地点の水位予測値には、境界地点の過去の水位上昇率を用いた。

(3) 既往洪水の再現計算による粗度係数分布の決定と上島地点から放水路分流区間までの洪水到達時間

リアルタイムで観測水面形時系列を再現するように洪水流・河床変動解析を行うためには、水位-粗度係数の関係を把握し、適切な粗度係数を設定する必要がある。本研究では、放水路分流区間において、詳細に洪水時の水位観測が行われた平成23年5月洪水と平成25年9月洪水について、観測水面形時系列データを用いた平面二次元洪水流・河床変動解析を行い、観測水面形時系列を再現する粗度係数分布を決定する。

図-3は平成25年9月洪水における水面形の解析結果と観測結果の比較、粗度係数分布を示し、図-4は流量ハイドログラフの解析結果を示す。計算は1洪水分行っているが、本論文ではゲート倒伏操作を行う水位上昇期に着目して議論する。表-1は、決定した粗度係数の時空間分布を平成23年5月洪水の検討結果も含めて示す。平成23年5月洪水の水面形の再現計算結果については、紙面の関係上省略する。平成25年9月洪水において観測水面形

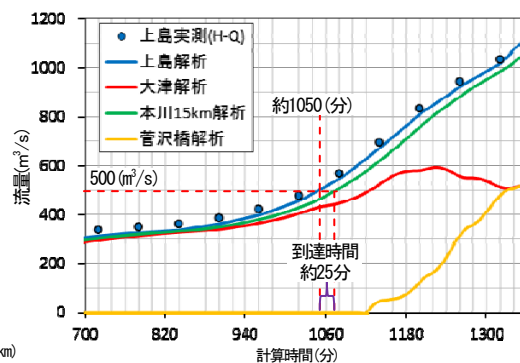


図-4 水面形の観測結果と解析結果の比較

時系列を再現するように設定した低水路粗度係数は、高水敷が冠水している時間帯で $n=0.031(m^{-1/3}s)$ と比較的大きく、高水敷が冠水していない時間帯では $n=0.027(m^{-1/3}s)$ であった。平成23年5月洪水は、放水路竣工前河道の洪水であり、分派点上流では平成25年9月洪水の値と同様であるが、分派点下流では粗度係数の値が分派点上流河道と比べて大きい。今後、観測水面形時系列を用いた洪水流・河床変動解析により、粗度係数の値とその変化の大きさ等の情報を蓄積する必要がある。高水敷の粗度係数は、ヨシ等の影響により、両洪水で $n=0.10(m^{-1/3}s)$ 、樹木群透過係数は $K=40m/s$ である。

図-4より、洪水流量 $500m^3/s$ (=分流堰の起伏ゲートを倒伏する基準の流量) が、上島地点(18.6km)から分派点直上流(15km)までに到達する時間は約25分である。また、上島地点の解析流量は、H-Q換算流量と比較的良好に対応しており、上島地点のH-Q換算流量は中規模洪水に対しては、比較的精度の良いものと考えられる。

(4) 使用計算機とリアルタイム計算手順

使用計算機のCPUはXeon E5-2690 v3 (動作周波数: 2.6GHz)であり、これを12core使用した。図-5は、実時間と計算時間、データ更新間隔の関係を示す。ここで、観測・計算のデータ更新間隔は1時間としているが、今後、本手法を実装し、本手法と多点水位観測システム間のデータ転送・入出力状況を改善することにより、データ更新間隔は短縮される。

計算開始前の準備: 2. (3)で示した実洪水を再現した解析モデル(支配方程式、粗度係数等のパラメータ、地形条件)一式を用意する。これらを計算機に実装し、次の手順により、毎正時で観測データを計算機に入力し、2時間先の予測を行いながら、1洪水を計算する。

- ①: 1時間前から現在までの観測水位データを用い、洪水流・河床変動の現況計算を行う。
- ②: 本洪水の過去～現在の観測データを用い、式(3), (4)より現在から2時間先までの上下流端境界地点の水位予測値を設定する。
- ③: ②で設定した上下流端水位予測値を基に、現在から2時間先までの流れと河床変動の予測計算を行う。2時間先・1時間先までの予測に要する計算時間は、それぞれ約30分、約20分である。

- ④：現在から1時間後のデータ更新時刻で得られた観測水面形と1時間予測水面形を比較する。そして、必要に応じて水位・粗度係数の関係に基づき粗度係数の修正を行う。本研究では、水位・粗度係数の関係の蓄積が十分でないことから、表-1の2ケースの粗度係数について計算を行い、粗度係数の設定が水位・流量分布の算定精度に及ぼす影響を議論する。
- ⑤：新たな観測水位データを入力した後、①に戻る。これを毎正時で繰返して1洪水分を計算する。

3. 既往洪水を用いた本推算手法の検証

本章では、放水路分流区間において詳細に水面形観測が行われた平成25年9月洪水と平成23年5月洪水を対象とし、本手法の有効性を検証する。前述の通り、洪水中には粗度係数の修正は行わず、表-1の2ケースの粗度係数分布のそれぞれについて計算し、粗度係数の設定と解析結果の持つ意味について議論する。また、起伏ゲートの倒伏・起立操作は、2章の実洪水時と同じ時間帯に行っている。

図-6は平成25年9月洪水を対象とした検証について、Case1、Case2における計算範囲の最上下流の観測地点（上島地点と大津地点）の解析・観測の水位ハイドログラフの比較を示す。上島地点の水位は、高水敷が冠水し始め水位上昇率が変化する500分頃の再現性がやや低いものの、前章に示したように計算範囲より上流地点（新伊萱・町上）の観測水位を用いることにより、それ以外の時間帯の観測水位をほぼ再現している。高水敷が冠水し始める時間帯の上流端境界予測水位の推定精度が低い理由は、式(4)の遅れ時間や水面幅比の時間変化の見積りに課題があるためである。

図-7は、各地点の水位ハイドログラフの解析結果と観測結果および2時間・1時間先の予測水位と観測水位の差を示す。図-8は、2時間先の予測値の水面形時系列を示す。表-1に示すように分派点より上流の粗度係数は、Case1、Case2において同じ値であるため、両ケースにおける上島(18.6km)から17km付近までの解析水面形および17km地点の解析水位ハイドログラフはほぼ一致している。17km地点の2時間先の予測水位と観測値との差はほぼ20cm以内であり、1時間先の予測水位と観測値との差はほぼ10cm以内である。分派点下流については、平成23年5月洪水を対象に同定したCase2の粗度係数の値が平成25年9月洪水で同定したCase1の粗度係数の値に比べて大きいため、Case2の15.3km、14.2kmにおける解析水位ハイドログラフおよび16km付近より下流の解析水面形は、実測値より高めに計算されている。15.3km、14.2kmにおけるCase1の2時間先・1時間先の予測水位と観測値との差は、20cm以内であり、Case2では15.3kmで最大40cm、14.2kmで最大20cmの予測水位と観測値との差が生じている。

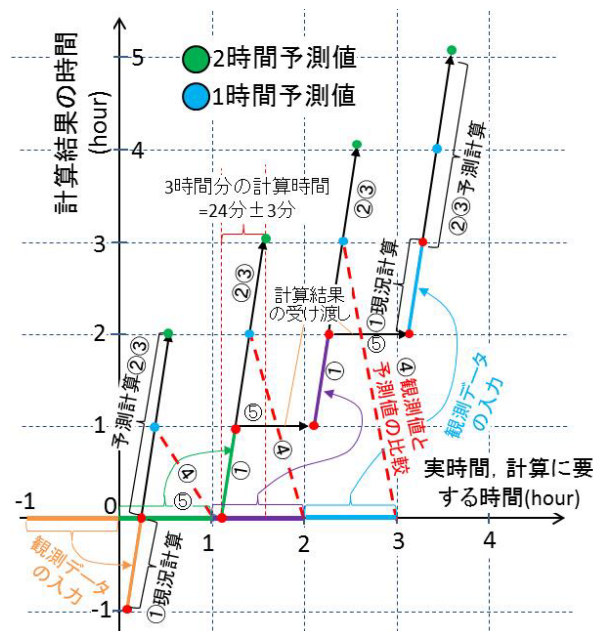


図-5 実時間と計算時間、データ更新時間の関係

図-9は、流量ハイドログラフの解析結果と観測結果および前章の再現計算から得られた各時間の流量と2時間先・1時間先の流量予測値との差を示す。表-1のように分派点上流の粗度係数の値がCase1とCase2で同じであるため、Case1とCase2の上島地点の水位・水面形の予測値はほぼ一致し、2時間先・1時間先の予測流量値もCase1とCase2でほぼ一致している。高水敷が冠水し始める時間帯では、上流端境界付近の水位が高めに予測されているため、流量誤差が比較的大きい。それ以外の時間帯では流量予測値と再現計算流量との差は10%程度である。また、分派点直上流(15km)においてCase1とCase2の解析流量はほぼ重なり、Case1とCase2程度の粗度係数の違いでは、分派点直上流の流量算定精度に殆ど影響していないことが分かる。一方、Case2の大津地点の解析流量ハイドログラフは、Case1の結果に比べてやや遅れており、粗度係数の違いが現れている。

分流堰の起伏ゲートの操作規則では、上島地点の流量が500m³/sを超過した40分後に倒伏操作を開始し、起立操作は大津地点の流量が550m³/sを下回った時点で開始することになっている。以下では、ゲート倒伏操作を実施する時刻に対して、本手法がどの程度早く予測できるかを確認する。図-10は、上島地点の500m³/s時頃の流量ハイドログラフの拡大図を示す。予測計算では、実時間で約925分頃において、約60分後の約990分頃に上島地点流量が500m³/sを超過することが予測されている。上島地点から分流区間までの洪水到達時間は約25分であるため、本洪水では予測結果を得られてからゲート倒伏操作開始までの余裕が約1時間30分ある。500m³/sを超過することが予測された時刻(990分)は、実際に500m³/sを超過した時刻(1050分、図-4参照)より約1時間早く計算されている。

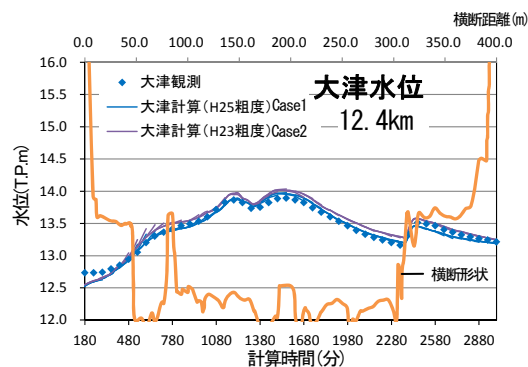
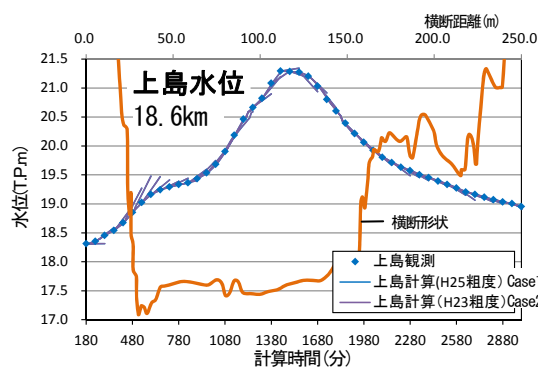


図-6 計算範囲の最上下流観測地点の水位ハイドログラフの解析結果と観測値の比較 (H25洪水)

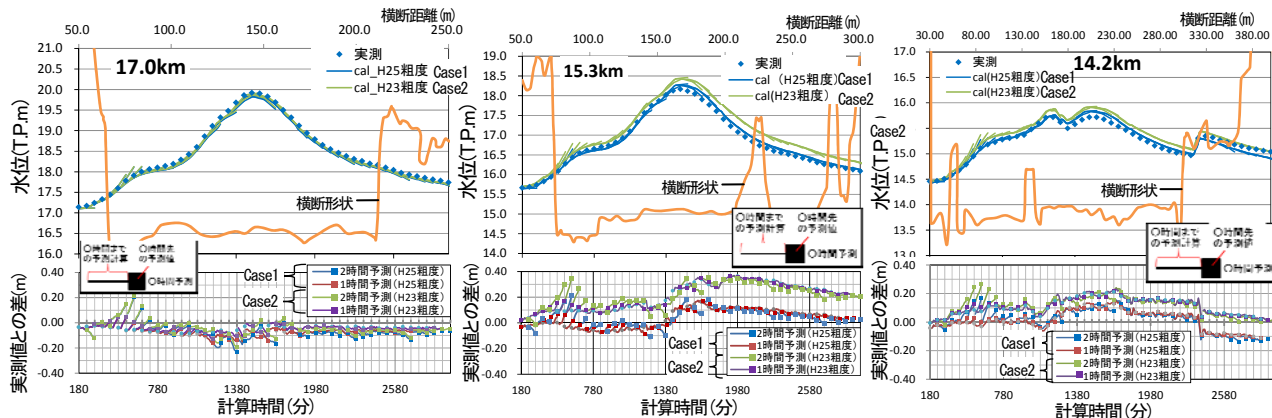


図-7 水位ハイドログラフの予測値と実測値の比較 (H25洪水)

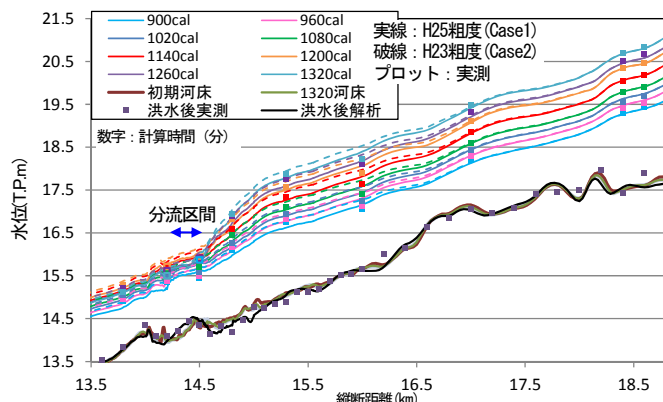


図-8 水面形の2時間予測値と観測水面形の比較 (H25洪水)

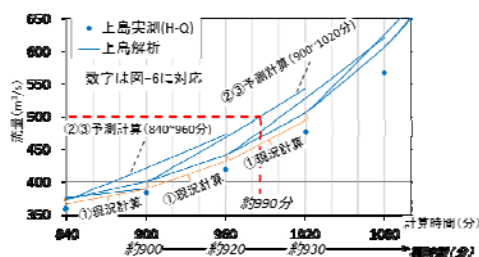


図-10 流量ハイドログラフ (500m³/s時頃の拡大図)

図-11から図-13は、観測平成23年5月洪水に対して本手法を適用した結果を示す。平成25年9月洪水を対象とした検証結果と同様に、Case1とCase2で粗度係数の値が同じである17km~上島付近では、両ケース共に水面形・水位ハイドログラフの予測値はCase1とCase2でほぼ一致している。17km地点における水位予測値と実測水位との差は、20cmの幅の中に収まっている。16km付近より下流では平成25年9月洪水で同定した粗度係数(Case1)を

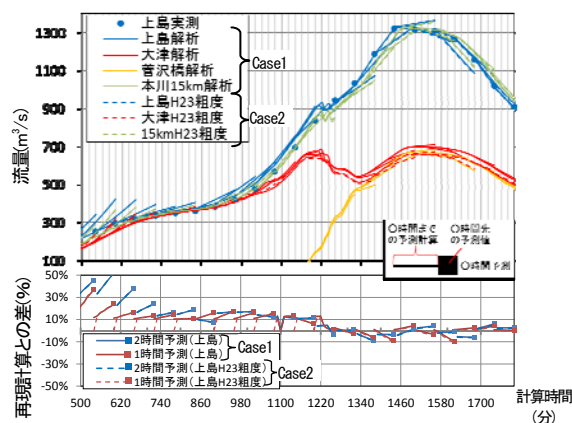


図-9 流量ハイドログラフの解析結果と再現計算との差

用いた場合の水位予測値は、実測値より低く計算されている。平成23年5月洪水を対象とした検証では、Case1とCase2の上島・大津・15km地点における解析流量ハイドログラフはほぼ重なっており、Case1とCase2程度の粗度係数の違いは、これらの地点の流量算定精度にあまり影響していないことが分かる。

4. まとめと今後の検討課題

本研究では、斐伊川放水路分流域間を対象として計算範囲とその上流の水位情報を活用し、リアルタイムで洪水水面形・流量分布の算定を可能とする手法を検討した。

1) 既往洪水において、観測水面形時系列を用いた平面二次元洪水流・河床変動解析により同定した粗度係数は、15km付近より下流では洪水毎に粗度係数の値が

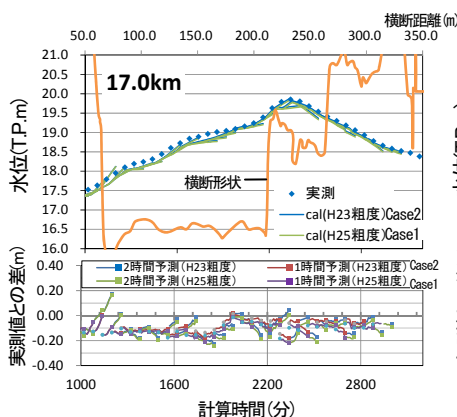


図-11 水位ハイドログラフの予測値と実測値の比較 (H23洪水)

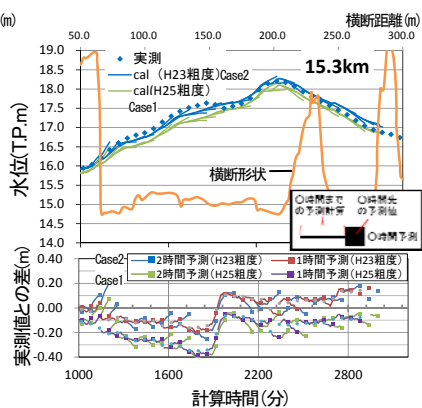


図-12 流量ハイドログラフの解析結果と再現計算の差

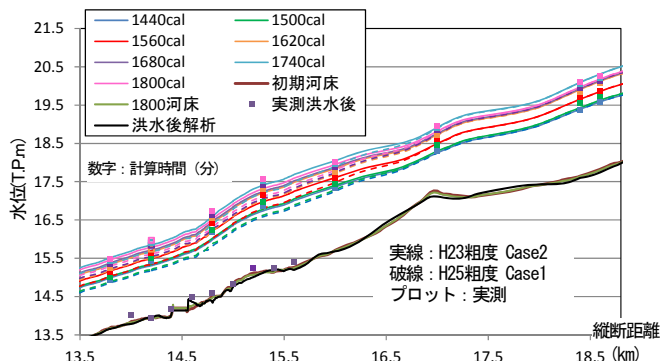


図-13 水面形の2時間予測値と観測水面形の比較 (H23洪水)

異なっていたものの、放水路分流域より上流では、洪水毎に低水路の粗度係数の値が同じ値であった。また、ゲート倒伏操作の基準流量(500m³/s)が、上島(18.6km)から分流域直上流(15km)まで到達する時間は約25分であった。今後発生する洪水に対して、観測水面形時系列を用いた平面二次元洪水流・河床変動解析を行い、粗度係数の値や分布、洪水到達時間に関し、情報の蓄積が必要である。

- 2) 本手法は計算範囲より上流域の観測水位データを用いて上流端境界地点の水位予測値を推定し、2時間・1時間先の流れ場と河床変動、水面形の予測値をそれぞれ約30分・約20分で計算した。これにより、計算時間はゲート倒伏操作までに約1時間半の余裕を確保している。予測結果は、粗度係数が両洪水で同じ値であった分流域上流では、高水敷が冠水し始める時間帯を除き、比較的高い精度で水位・水面形を予測している。また、本洪水では15km付近より下流の洪水毎の粗度係数の違いは、分流域上流の流量算定精度に殆ど影響を及ぼさなかった。このことから、洪水毎の粗度係数の変化が比較的小さい河道区間においては、本手法により精度良く水面形・流量分布を推定できる。本検討より、粗度係数が流量縦断分布の算定に及ぼす影響が比較的小さいことが分かったため、今後、様々な規模や非常定性等を想定した洪水外力に対し洪水流・河床変動計算を行い、水面形・流量分布・河床変動の関係を予め把握し、これらの関係を利用できる体制を構築する必要がある。

- 3) 洪水予測計算の洪水解析モデルは、流出計算による予測流量誤差と河道縦横断形の設定誤差、粗度係数等の抵抗分布の設定の影響を、パラメータの逐次変化に押し込めて予測水位・流量を計算している⁴⁵⁾。これらの洪水予測計算はパラメータの逐次変化で水位を再現出来ていても、水位-流量-(河床変動)、河道貯留等の関係を適切に計算出来ている保証はない。本手法は、流出計算を伴わないため流出計算の誤差の議論は必要なく、境界地点の水位予測値の設定の課題はあるものの、予測精度については洪水流・河床変動計算の枠組みで議論すれば良いことになる。また、河道縦横断形の設定誤差、粗度係数等の設定の影響については、まず、実洪水の観測水面形時系列を再現する洪水解析モデルを構築し、構築した解析モデルを予測計算に用いれば、これらの影響をほぼ取り除くことが出来る。河床変動や植生倒伏等により、洪水時に抵抗パラメータが変化する河川においては、様々な洪水に対して観測水面形時系列を用いた洪水流・河床変動解析を行い、抵抗パラメータの時空間分布の情報を蓄積し、これを考慮することで予測精度の向上が図れるものと考えられる。

参考文献

- 1) 福岡捷二：河道設計のための基本は何か～水面形時系列観測値と洪水流・土砂流の解析を組み合わせた河道水理システムとその見える化、河川技術論文集、第17巻、pp.5-10、2011。
- 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る化する -、土木学会論文集B1、Vol.73、No.4、I_355-I_360、2017。
- 3) 工藤亮治、近森秀高、永井明博：粒子フィルタを用いた実時間洪水予測システムの構築と河道任意地点における予測精度の検証、水文・水資源学会誌、Vol.24、No.3、pp.137-148、2011。
- 4) 立川康人、須藤純一、椎葉充晴、萬和明、キム スンミン：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、Vol.67、No.4、pp. I_511-I_516、2011。
- 5) 立川 康人：粒子フィルタを用いた水位流量曲線および洪水追跡モデルの同定とリアルタイム水位予測、国土交通省、河川砂防技術研究開発、成果概要、2015。
- 6) 通信ルートを自動的に組み換える無線通信を用いた水位センシングシステム、新技術情報提供システム、国土交通省、2012。

(2017.4.3受付)