

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定数同定と洪水予測計算

後藤 岳久¹・福岡 捷二²・大作 和弘³

¹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: goto510@tamacc.chuo-u.ac.jp

²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

³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)

豪雨時の適切な避難情報の提供や水防活動のためには、精度の高い洪水予測計算が必要である。しかし、洪水予測計算の流出解析モデルは、小流域からの流出量を十分検証出来ていないことや、一般に検証データに用いられる H-Q 換算流量が、河道貯留や河床変動の大きい区間で十分な検証精度を有していない等の課題を有する。本研究では斐伊川を対象とし、観測水面形時系列を用いた洪水流河床変動解析により、平成 25 年洪水の本川上流域と支川の流量ハイドログラフを精度良く算定し、これを検証材料として各流域の流量ハイドログラフを推定するタンクモデルの定数を同定した。検証したタンクモデルを用いて、平成 23 年洪水の降雨情報から洪水予測計算を行い、水面形や流量の時系列を精度良く予測し、下流河道で高精度な洪水予測計算が可能となることを示した。

Key Words: time series of observed water surface profiles, flood flow and bed variation analysis, tank model, parameter identification, flood forecasting technique

1. 序論

豪雨時の適切な避難情報の提供や水防活動等のためには、河道の水位縦断分布を精度良く計算できる洪水予測手法が求められる。

福岡は、洪水時の水理現象や河床変動等の影響が現れた観測水面形時系列を用いて洪水流河床変動解析を行うことで、広範囲で高精度な水位・流量分布が算定可能なことを示した。さらに、この方法により本川上流域や支川からの流入流量、河道での貯留量を算定し、流域全体の洪水時の水量の収支関係をも明らかにしている¹⁾。近年では、フィルタリング手法を用いて多点観測水位と同化し、リアルタイムで洪水時の水位を計算する手法が検討されている²⁾。

一方、降雨条件から流出解析を介して洪水予測計算を行う際には、流出解析の精度を高める必要があり、立川らは粒子フィルタにより、ダム流入量を用いて貯留関数法のパラメータや貯留量を逐次修正する方法を提案している³⁾。しかし、流量の観測地点は限られており、小流域からの流出を検証出来ないことや、一般的に検証に用

いる H-Q 換算流量は、河道での洪水貯留の影響で H-Q 曲線のループが大きい区間や河床変動の大きい区間、未経験な規模の洪水に対して精度を十分有していない等の課題がある。このため、観測水面形時系列を用いた洪水流河床変動解析から本川や支川の流量ハイドログラフを精度良く求め、これらを用いて流出解析モデルを検証し、下流河道の洪水予測計算の精度を高めることが求められる。このように観測水面形時系列を用いた洪水流河床変動解析を介して、流出解析モデルと河道の水理計算の精度を同時に高めることは、河道計画等を検討する上でも極めて重要になる。

本研究では、詳細に水面形時系列が観測された斐伊川の平成 25 年 9 月、平成 23 年 5 月洪水を対象とし、観測水面形時系列を用いた洪水流河床変動解析を行い、本川及び主要支川の流量ハイドログラフを精度良く算定する。算定した本・支川の流量ハイドログラフを検証データとしてタンクモデル⁴⁾のパラメータを同定し、求めたタンクモデルと観測水面形を再現した洪水流河床変動解析法による洪水予測計算を行い、本手法の有効性を示す。



図-1 平成 23 年 5 月，平成 25 年 9 月洪水時における観測体制



図-2 洪水流・河床変動解析区間と上流域の流域分割

2. 洪水観測体制と本手法の全体像

図-1 は平成 23 年 5 月洪水，平成 25 年 9 月洪水の観測体制を示し，図-2 は上流域の流域分割，洪水流河床変動解析と流出解析で扱う範囲を示す。斐伊川には，斐伊川放水路が設置され，15km 付近で本川から分流している。水位は上島地点（18.6 km）より下流では本川および放水路で詳細に観測され，上島地点より上流では，流域面積の大きい赤川（町上観測所，4.9km）と三刀屋川（新三刀屋観測所，2.5km），本川では主要支川との合流点上下流で観測されている。主要支川の集水面積は，図-2 に示す通りである。

図-3 は本手法の全体像を示す。本手法は検証段階と予測段階の二段階に分かれており，検証段階では平成 25 年洪水，平成 23 年洪水に対して，図-2 の赤線の区間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¹⁰⁾を行い，本・支川の流量ハイドログラフを精度良く求める(手順①)。次に，平成 25 年洪水の観測水面形時系列から求めた精度の高い本・支川の流量ハイドログラフを検証データとし，タンクモデル(図-11 参照)のパラメータ同定を行う(手順②)。予測段階では，平成 23 年洪水を対象として，検証したタンクモデルに平成 23 年洪水の降雨分布を与え，本・支川の予測流量を求める(手順③)。求めた予測流量の妥当性は，手順①で求めた平成 23 年洪水の各河川の流量ハイドログラフと比較して確認した。そして，求めた予測流量を上流端境界条件として下流河道の洪水流河床変動解析を行い，水位縦断分布を予測し，その結果と平成 23 年洪水の観測水面形と比較し，本手法の妥当性を確認する(手順④)。

ここで，洪水流河床変動解析には準三次元解析を用い⁷⁾，降雨データは解析雨量（気象庁，1km 四方メッシュ，30 分間隔）を用いた。また，流出解析モデルにタンクモデルを用いた理由は，流域面積が約 200km² 以下であ

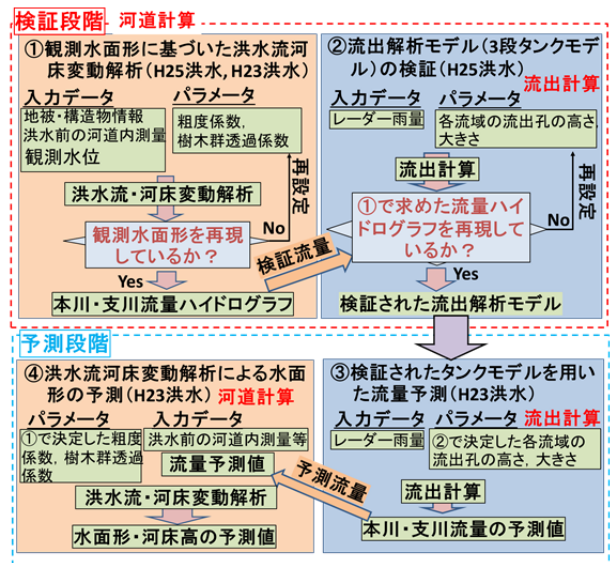


図-3 本手法の全体像

れば流域分割を行わずとも降雨-流出関係が説明出来ること⁸⁾，パラメータの同定が容易でパラメータを一旦同定出来れば再現性の高い流量ハイドログラフが得られるためである。

3. 観測水面形時系列を用いた洪水流河床変動解析による本・支川の流量ハイドログラフの算定

本章では，観測水面形時系列を用いた洪水流河床変動解析により，対象洪水における各河川の流量ハイドログラフを精度良く求める(手順①)。

(1) 解析条件

平成 25 年洪水では放水路への分流が生じたため，分流堰に設置された起伏ゲートの実際の操作状況を解析に考慮している。解析の上流端境界条件は，本川では木次観測所，三刀屋川は新三刀屋観測所，赤川は町上観測所の観測水位データを用い，本川の下流端境界条件は宍道湖の観測水位データを用い，下流端境界条件は菅沢橋観

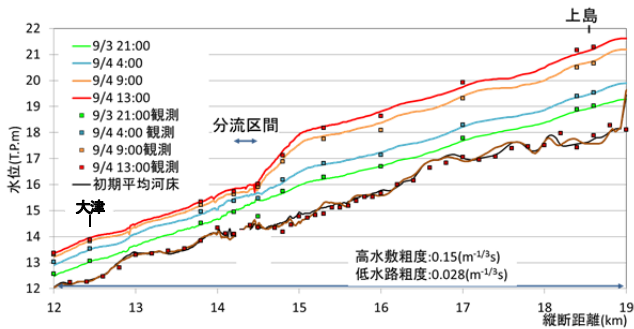


図-4 観測水面形と解析水面形の比較(12-19km)

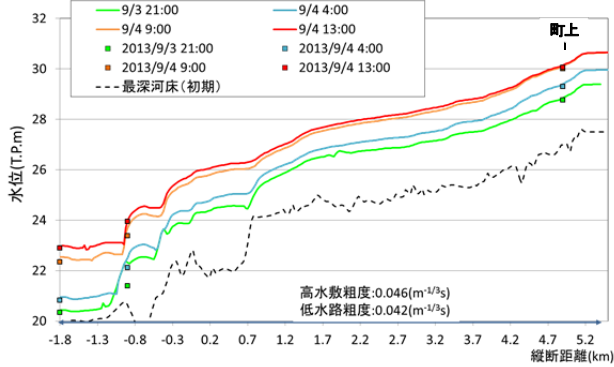


図-6 観測水面形と解析水面形の比較(赤川)

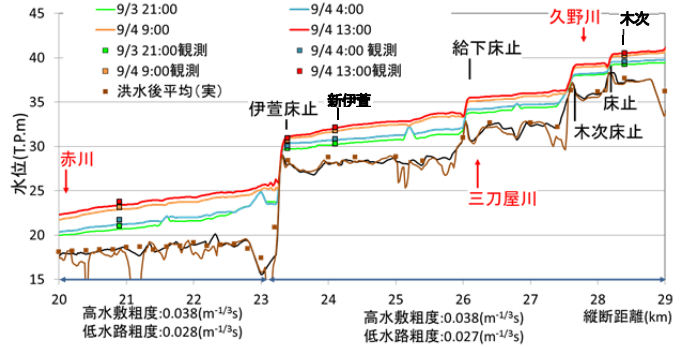


図-5 観測水面形と解析水面形の比較(20-29km)

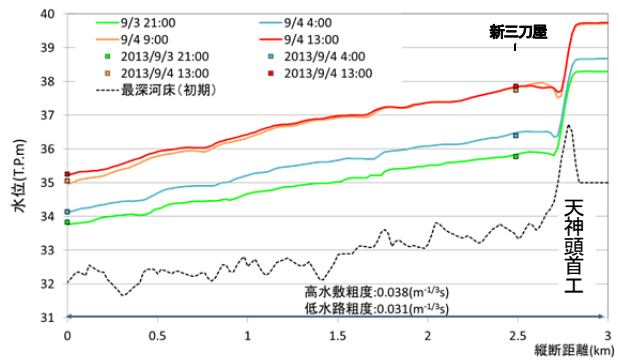


図-7 観測水面形と解析水面形の比較(三刀屋川)

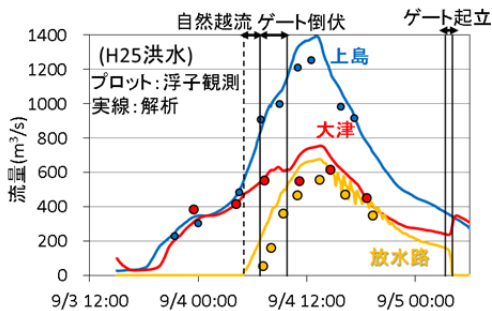


図-8 放水路上下流の流量ハイドログラフ(H25洪水)

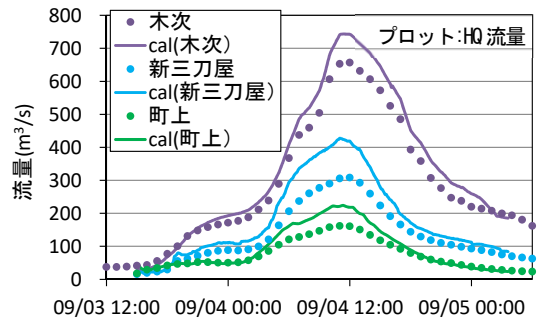


図-9 本・支川の流量ハイドログラフ(H25洪水)

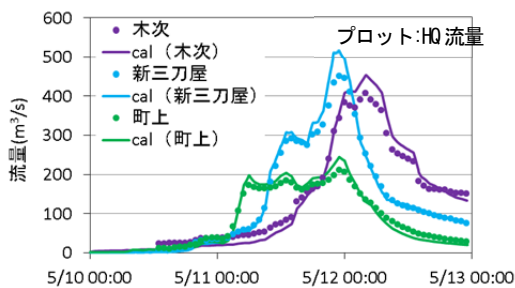


図-10 本・支川の流量ハイドログラフ(H23洪水)

測所の観測水位データを用いる。解析初期地形は洪水前測量を用い、河床材料粒度分布は著者らの既往研究と同様に与えた。赤川と三刀屋川については固定床とした。

(2) 平成 25 年 9 月洪水の解析結果

図-4 と図-5 は本川の観測水面形と解析水面形の比較と観測水面形を再現した粗度係数の値を示す。図-6、図-7 は赤川と三刀屋川の観測水面形と解析水面形の比較を示す。赤川と三刀屋川の水位観測地点は 2-3 地点と少ないものの、本川と支川の解析水面形は、観測水面形の時系列をほぼ再現していると考えられる。

図-8 は放水路分流地点の上流・下流の流量ハイドログラフおよび放水路の流量ハイドログラフの観測値と解析値の比較を示す。解析結果は、分流地点の上流と下流および放水路の浮子観測流量とほぼ対応している。図-9 は本川上流(木次地点)、三刀屋川(新三刀屋地点)、赤川(町上地点)の H-Q 換算流量と流量ハイドログラフの解析結果を示す。本川上流(木次地点)や三刀屋川(新三刀屋地点)、赤川(町上地点)の解析流量は、H-Q 換算流量よりも全体的にやや大きくなっているものの、解析結果は、観測水面形時系列や洪水後の実測河床高縦断分布を再現し、上島地点の浮子観測流量もほぼ説明していることから精度の高いものと考えられる。

(3) 平成 23 年 5 月洪水の解析結果

平成 23 年 5 月洪水に対しても同様に観測水面形を用いた洪水流河床変動解析を行い、本・支川の流量ハイドログラフを算定した。観測水面形と解析水面形の比較結果については、紙面の関係上省略する。図-10 は本川上流(木次地点)、三刀屋川(新三刀屋地点)、赤川(町

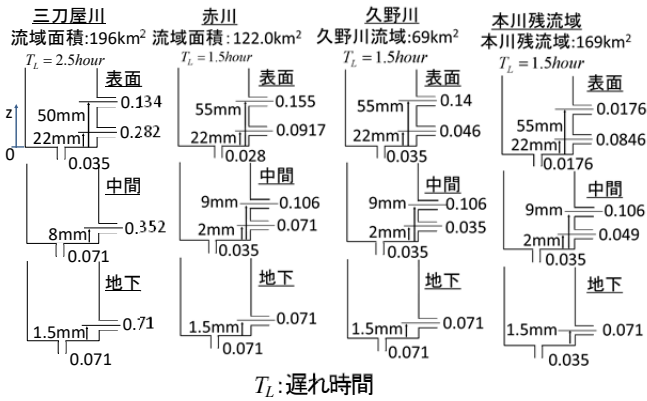


図-11 決定したタンクモデルの諸元

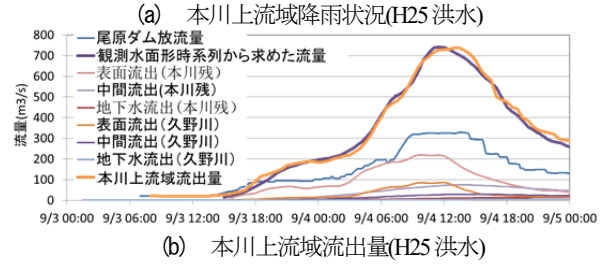
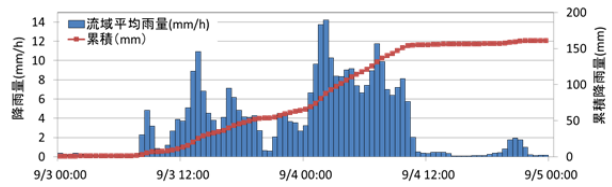


図-12 タンクモデルと解析水面形から計算した流量ハイドログラフの比較 (本川, H25洪水)

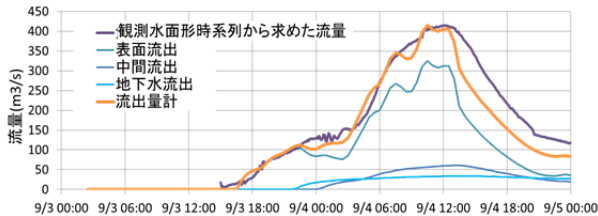
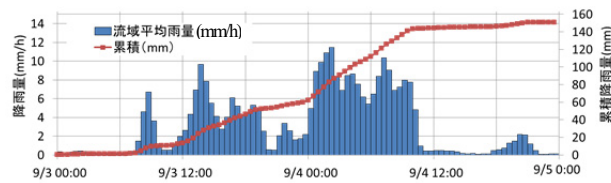


図-13 タンクモデルと解析水面形から計算した流量ハイドログラフの比較 (三刀屋川, H25洪水)

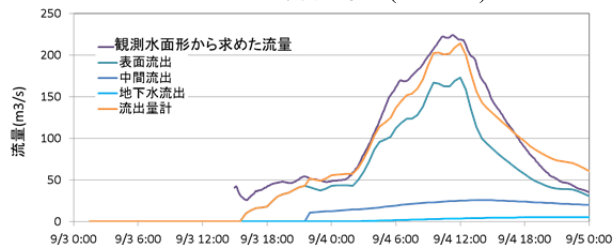
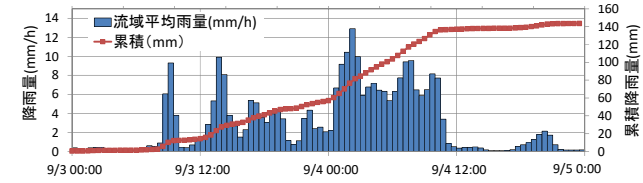


図-14 タンクモデルと解析水面形から計算した流量ハイドログラフの比較 (赤川, H25洪水)

上地点)の解析流量ハイドログラフを示す。観測水面形時系列を用いた洪水河床変動解析から求めた本・支川の流量ハイドログラフは、H-Q換算流量とほぼ対応していることが分かる。平成23年5月洪水では、本川上流(木次地点)の流量よりも三刀屋川の方がピークの発生時刻が早く、ピーク流量も大きい。また、赤川では200m³/s程度の流量が長時間続いている。

4. 観測水面形時系列から求めた流量ハイドログラフを用いたタンクモデルの定数同定

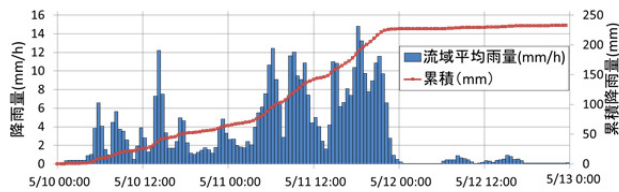
本章では、平成25年洪水の観測水面形時系列を用いた洪水河床変動解析から求めた本・支川の流量ハイドログラフを検証データとし、タンクモデルのパラメータを同定する(手順②)。具体的には、平成25年洪水のレーダー解析雨量を入力し、上記の流量ハイドログラフと一致するように3段タンクモデルのパラメータを同定した。

図-11は、決定した各流域のタンクモデルの諸元を示す。本川残流域および久野川流域、赤川流域の流出の遅れ時間 T_L は、約1時間半であるのに対し、三刀屋川流

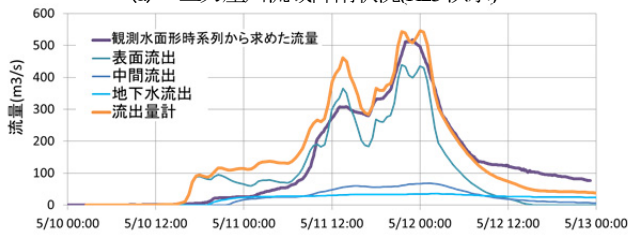
域は約2時間半であった。これは他の流域と比べて三刀屋川流域の面積が大きく、流域の縦断距離が長いこと影響がしていると考えられるが、流出遅れの差について、今後検討する必要がある。

図-12(a)は本川上流域の雨量の状況を示し、図-12(b)は本川流域において、降雨を入力値としてタンクモデルで計算した流量ハイドログラフと、観測水面形時系列から算定された流量ハイドログラフの比較を示す。また、三刀屋川、赤川についても同様の検討結果を図-13、図-14に示す。ここで、本川上流域の流量ハイドログラフは、尾原ダム放流量と本川ダム残流域、久野川流域からの流出量の和で表し、尾原ダムから木次地点までの洪水到達時間は1時間と想定した。これらの妥当性については、久野川および木次地点より上流に新たに水位計を設置し検討することが必要である。

タンクモデルから計算された流量ハイドログラフは、斐伊川本川および赤川流域では、観測水面形時系列から算定された流量ハイドログラフとほぼ一致している。三刀屋川流域については、洪水減水期において、タンクモデルの流量ハイドログラフが観測水面形時系列から算定された流量ハイドログラフよりも少なく計算されている

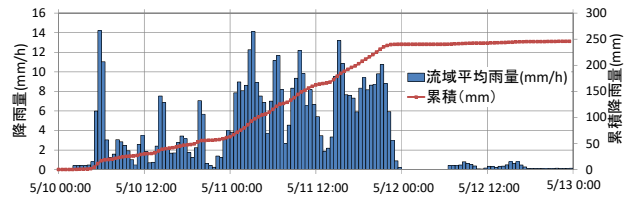


(a) 三刀屋川流域降雨状況(H23洪水)

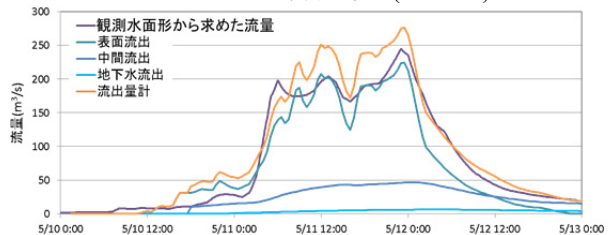


(b) 三刀屋川流域流出量(H23洪水)

図-15 タンクモデルと解析水面形から計算した流量ハイドログラフの比較 (三刀屋川, H23洪水)



(a) 赤川流域降雨状況(H23洪水)



(b) 赤川流域流出量(H23洪水)

図-16 タンクモデルと解析水面形から計算した流量ハイドログラフの比較 (赤川, H23洪水)

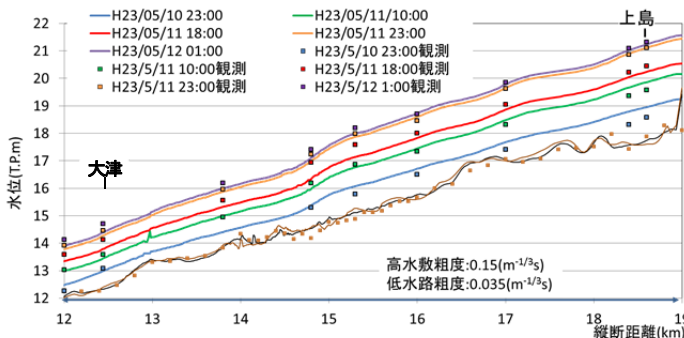


図-17 観測水面形と予測計算の水面形の比較(12-19km,水位上昇期)

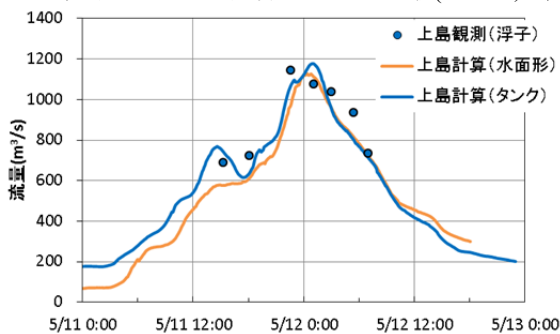


図-19 観測水面形時系列から求めた流量ハイドログラフと予測値の比較 (上島, 18.6km)

が、洪水増水期から洪水ピークにかけてはほぼ一致していることから妥当であると判断される。

5. 定数同定したタンクモデルを用いた洪水流河床変動解析による洪水予測計算

本章では、前章で検証した3段タンクモデルを用い、平成23年洪水を対象とした洪水予測計算を行う。まず、3段タンクモデルに平成23年洪水の降雨分布を与え、各河川の予測流量を求める(手順③)。そして、3章(3)において、観測水面形時系列から求めた平成23年洪水の流量ハイドログラフと比較した。ここで、本川については、尾原ダム竣工前であったため検討から除外した。

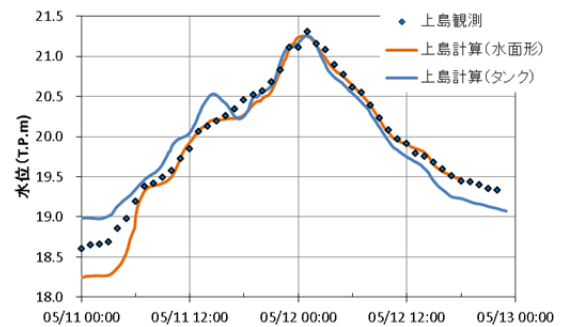


図-18 観測水面形時系列を用いた解析とタンクモデルを用いた解析の水位ハイドログラフの比較 (上島)

図-15は三刀屋川流域における降雨状況、タンクモデルから計算された流出流量ハイドログラフと観測水面形時系列から算定された流量ハイドログラフの比較を示し、赤川についても同様に図-16に示す。タンクモデルにより算定された流量は、三刀屋川では洪水増水期に多めに計算されているが、ピーク付近では観測水面形時系列から求めた流量を説明している。一方、赤川は、タンクモデルの流量がやや多めに計算されている。これらの差は、平成25年洪水に比べて平成23年洪水の先行降雨量が多いことが要因の一つとして考えられる。

次に、上記で求めたタンクモデルの予測流量を上流端境界条件として洪水流河床変動解析を行い、平成23年洪水の水位縦断分布と流量の予測計算を行い、その再現性を検討する(手順④)。ここで、本検討の洪水予測計算の洪水流解析には、計算速度を早めるために平面二次元解析を用いる。また、前述のように尾原ダムは竣工前であり、本川上流域の流出状況は平成25年洪水と異なることから、本川上流端には3章(3)で求めた流量ハイドログラフを与えた。

図-17は斐伊川本川の観測水面形と予測計算の水面形の比較を示し、図-18は観測水面形を用いた洪水流河床変動解析とタンクモデルの流量を与えた洪水流河床変動解析の水位ハイドログラフの比較を示す。水位の予測結

果は、洪水増水期で実測よりも高めに計算されているものの、洪水ピーク付近の再現性は高い。図-19 は同様に流量ハイドログラフの比較を示す。上島地点における予測計算の流量ハイドログラフは、観測水面形時系列を用いて求めた流量ハイドログラフや浮子観測流量とほぼ対応していることが分かる。

以上より、今後、大規模洪水などの様々な降雨特性の洪水に対し、観測水面形時系列を用いた洪水流河床変動解析から本・支川の流量ハイドログラフを精度良く求め、各流域で求めた流量ハイドログラフを再現するタンクモデルのパラメータを同定する。これにより、タンクモデルのパラメータの取り得る範囲を明らかにし、流域の特徴、降雨特性と関連付け、これを河道計画検討の際の有効なツールとして確立することが重要である。

6. まとめ

本研究では、斐伊川を対象として、平成 25 年洪水の観測水面形時系列に基づいた洪水流河床変動解析から本川・支川の流量ハイドログラフを高精度に算定し、これを検証データとしてタンクモデルの定数を同定した。そして、同規模の平成 23 年洪水の降雨を入力条件としてタンクモデルから流量ハイドログラフを求め、これを上流端境界条件として洪水流河床変動解析を行うことで、下流河道の水面形・流量の時間変化を精度良く予測出来ることを示した。本手法を様々な降雨特性の洪水で検討し、パラメータ情報等を蓄積することにより、下流河道の高精度な洪水予測計算が可能となることを示した。

謝辞：本研究は平成 30 年度河川基金助成事業の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて、河川技術論文集, 第 23 巻, pp.251-256, 2017.
- 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利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_637-I_642, 2017.
- 3) キムヨンス, 立川康人, 萬和明, キムスンミン：粒子フィルタと洪水追跡モデルを用いた水位流量曲線の作成および補正手法の開発, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp.361-366, 2014.
- 4) 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 2 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面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.
- 5) 立川康人, 藤田翔子, 田中裕士, 萬和明, 市川温：粒子フィルタを用いた実時間流出予測システムの開発と異なる状態量を持つ流出予測システムの精度比較, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.2, pp.32-43, 2018.
- 6) 菅原正巳：流出解析法, 共立出版, 1972.
- 7) 内田龍彦, 福岡捷二：浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる種々な小規模河床形態の統一的解析法の構築, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1135-I_1140, 2013.
- 8) 立川康人, 永谷言, 寶馨：分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価, 京都大学防災研究所年報, 第 46 号, B-2, 2003.

(Received May 31, 2019)
(Accepted August 7, 2019)

IDENTIFICATION OF THE TANK MODEL PARAMETERS BY DISCHARGE HYDROGRAPHS OF A MAIN RIVER AND TRIBUTARIES OBTAINED FROM TIME SERIES OF OBSERVED WATER SURFACE PROFILES AND FLOOD FORECASTING USING IT

Takahisa GOTOH, Shoji FUKUOKA and Kazuhiro OOSAKU

The accurate flood forecasting technique is required to provide information of flood evacuations for residents in an inundation area. The run-off analysis in the flood forecast technique is usually verified by rating curves of rivers in general. But the rating curves can not accurately estimate discharge hydrograph in rivers where effects of flood storage and bed variations are large on flood flows. And the runoff from the small basins is not sufficiently verified. In the present study, the flood flow and bed variation analysis using observed water surface profiles provides accurate discharge hydrographs of the Hii River and the tributaries of 2013 flood. And parameters of the tank model are identified by using those discharge hydrographs. The flood forecasting technique using the verified tank model accurately predicts the time series of water surface profiles and discharge hydrographs of the 2011 floods in the downstream of the river.