水位を境界条件とした洪水氾濫解析による 洪水流量と浸水域の推定 ~平成29年7月九州北 部豪雨時の花月川下流域を対象にして~

ESTIMATIONS OF DISCHARGE HYDROGRAPH AND INUMDATION AREA IN THE KAGETSU RIVER BASIN DURING KYUSHU-HOKUBU HEAVY RAIN IN 2017 BY NUMERICAL SIMULATIONS OF FLOOD AND INUNDATION FLOWS USING WATER LEVEL HYDROGRAPHS AS BOUNDARY CONDITIONS

> 重枝未玲1・秋山壽一郎2・中島晴紀3・桂 佑樹3・勝原亮介3 Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Haruki NAKASHIMA, Yuuki KATSURA and Ryosuke KATSUHARA

 ¹正会員 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)
²フェロー会員 九州工業大学名誉教授(同上)
³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士前期課程(同上)

A discharge hydrograph and an inundation area were estimated during Kyushu-hokubu heavy rain in 2017 by numerical simulations with water level hydrographs as boundary conditions. The simulations were performed by a two-dimensional flood and inundation flow model. The model parameters were optimized with Experimental Design, Response Surface Methodology, and Particle Swarm Optimization. The simulated results were compared with the observed discharge, flood marker, and maximum inundation area. It showed that the model could reproduce flooding maker, discharge hydrograph and inundation area with reasonable accuracy.

Key Words: The Kagetsu river, Kyushu-hokubu heavy rain in 2017, flood and inundation analysis, boundary condition, water level hydrograph

1. はじめに

近年,毎年のように想定を超えた豪雨による水災害が 生じている.平成29年7月には九州北部豪雨災害⁰が,平 成30年7月には西日本豪雨災害²が発生し,甚大な被害が 生じた.

洪水時にリアルタイムで得られる情報は、降雨量と水 位である.降雨量についてはXRAINのようなXバンド MPレーダによる雨量観測³⁰の高度化が、水位については 危機管理型水位計の設置⁴⁰による水位観測の高密化が進 められており、今後、空間解像度と精度の高いデータが 利用可能となる.そのため、防災・減災対策を講じる上 で、降雨量や洪水時の水位情報に基づく洪水氾濫リスク の把握が重要になると考えられる.

これまで、洪水氾濫解析は、降雨量を入力条件として 実施されている⁵. この解析では、解析対象領域を流域、 河道・氾濫原に分け,流出解析で流域からの流出流量を 算定した後に,この流量を河道・氾濫原の境界条件とし て与えることで,降雨量から洪水・氾濫流の予測を行う. 同解析は、リアルタイムで取得できる降雨量から,洪水 流や氾濫流の予測ができる解析ではあるが,対象流域に 先行降雨がある場合や氾濫が生じた場合には,状況に応 じて流量を算出する流出解析のモデルパラメータを最適 化する必要がある.そのため,その最適化法の開発が試 みられている^{0,7,8}.さらに,近年では,降雨量を解析条 件として必要とせず,水位観測結果を境界条件にした洪 水流解析法が構築されており^{9,10},リアルタイムの洪水 解析への適用も試みられている⁹.

本研究で対象とする花月川は、平成24年7月3日,14日 の豪雨¹,平成29年7月豪雨で,花月水位観測所の既往最 高水位を更新¹するなど,数年に一回の間隔で内水また は外水による家屋浸水被害が生じた河川である.著者ら は、同流域を対象に、降雨量を外力に流域流出・洪水氾



図-1 花月川流域の概要および観測所位 濫解析^{11),12)}を実施し、そこでの洪水・氾濫プロセス¹¹⁾, 平成24年7月豪雨災害後の激甚災害対策特別緊急事業の 治水効果¹¹⁾を明らかにするとともに、今次豪雨災害の浸 水の主要因が内水氾濫であったこと¹¹⁾,河道線形や中規 模河床形態などの河道特性が、花月川の河川構造物の被 災に影響を及ぼしたこと¹²⁾,などを示した.しかしなが ら、花月観測所でのピーク推定流量は、1,350~1,400m³/s 程度であり、今次豪雨では平成24年7月豪雨時の1.6倍の 降雨量にもかかわらず、ピーク流量は同程度であった¹²⁾ こと、また、寺内ダムの実績流量に基づく比流量から推 定されたピーク流量¹³に比べ、過小に評価されたことな ど、その再現性には課題が残った.

本研究は、以上のような背景を踏まえ、平成29年7月 九州北部豪雨時の花月川下流域を対象に、著者らの開発 した水位を境界条件とした平面2次元洪水氾濫モデル ^{14,15)}を用い、流量を解析条件とせず、水位を境界条件と した洪水氾濫解析とそのモデルパラメータの最適化を実 施し、洪水流量の推定、同解析法の痕跡水位、浸水域の 再現性について検討したものである.

2. 花月川流域と豪雨災害の概要

(1) 花月川流域の概要

花月川は筑後川の支川であり、その流域面積は 130.2km²,流路延長は59.6kmである¹⁾. 図-1に、花月川 流域の概要および観測所位置を示す.なお、同図の背景 には、国土地理院の全国最新写真(シームレス)¹⁶⁾を用 いた.筑後川本川との合流点から距離標8.7kmまでが大 臣管理区間であり、花月川支川の有田川と小野川とは、 それぞれ距離標5.2km、8.8km地点で合流する.距離標 3.38km左岸には、花月水位観測所が設置されている.直 轄区間には、5つの堰と18つの橋が存在する.

(2) 豪雨災害の概要

平成29年7月豪雨では、7月5日19:50に花月水位観測所

図-2 平成29年7月九州北部豪雨による実測浸水域 (3.38km)において,既往最大水位4.53mを記録した¹⁾.図 -2に,平成29年7月九州北部豪雨時の浸水域を示す.図 中の番号①~⑦は,主要な浸水域を示しており,図中の 表には浸水の原因を示している.なお,同図の背景には, 国土地理院の陰影起伏図¹⁶を用いた.平成29年九州北部 豪雨の浸水面積は8.56haであり,浸水域は,平成24年に 比べ,3割程度減少したことが報告されている¹⁾.

3.水位を境界条件とした洪水氾濫解析モデルと モデルパラメータの最適化法の概要

(1) 水位を境界条件とした洪水氾濫解析モデルの概要

解析には、水位ハイドログラフを上・下流端境界条件 に与え、水位・流量を求める平面2次元洪水氾濫モデル ^(4),15)を用いた.同モデルの特徴は、一般の洪水流解析と は異なり、上流端境界条件に流量を与える必要がない点 にある.水位を境界条件とした洪水流解析は、福岡らの 一連の研究^{17,18)}で、実河川の洪水流解析に有用な手法で あることが示されている.本解析法では、福岡らの手法 のように上・下流端に仮想的な池を設ける¹⁷⁾方法とは 異なり、実測ハイドログラフを境界条件として直接与え た.

同モデルの基礎方程式は,式(1)の2次元浅水流方程式 である.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = S_1 + S_2 \tag{1}$$

 $\boldsymbol{U} = (h, uh, vh)^{T}; \boldsymbol{E} = \left(uh, u^{2}h + 1/2 gh^{2}, uvh\right)^{T};$

 $F = (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T; S_2 = (q_r, 0, 0);$

 $S_1 = (0, gh(S_{ox} - S_{Lx} - S_{fx}) - F_x, gh(S_{oy} - S_{Ly} - S_{fy}) - F_y)$ ここに、U: 保存量ベクトル、E, F: x, y方向の流束ベ クトル、 S_1 : 河床・エネルギー損失・摩擦勾配ベクトル、 S_2 : 発生項ベクトル、h: 水深, u, v: x, y方向の流 遠, g: 重力加速度, q_r : 単位面積当りの流入流量(+:流 入, -:流出), S_{ax} , S_{oy} : x, y方向の河床勾配(=- $\partial z_b/\partial x$, - $\partial z_b/\partial y$), S_{Lx} , S_{Ly} : x, y方向のエネルギー損失勾配, S_{fx} , S_f : x, y方向の摩擦勾配, F_x , F_y : 計算メッシュ内に



樹木などの物体群が含まれる場合に付加されるx, y方向 の流体力項, z_b :河床位である.摩擦勾配については Manning の式で,河道内の橋脚や堰などによるエネル ギー損失については参考文献^{14,15)}と同様な方法で算定す る.なお、この取り扱いは、漸変流では運動量補正係数 やエネルギー補正係数を1.0とした場合、運動方程式と エネルギー方程式が同一の式となることから可能な取り 扱いであり、実用上問題はない精度を維持できることか ら可能な取り扱いである¹⁹⁾.また、単位面積当りの流入 流量 q_r は、 $q_r = f \cdot R/3.6 \times 10^{-6}$ で求めた.ここに、f: 流出係数, R:降雨強度(mm/h)である.

図-3に示すセル境界線の法線方向をxn軸として,同軸 に式(1)を回転させることで,式(2)のxn軸方向の1次元浅 水流方程式が得られる.

$$\partial \hat{\boldsymbol{U}} / \partial t + \hat{\boldsymbol{J}} \cdot \partial \boldsymbol{U} / \partial x_n = \hat{\boldsymbol{S}}_1 + \hat{\boldsymbol{S}}_2 \qquad (2)$$
$$\hat{\boldsymbol{J}} = \partial \hat{\boldsymbol{E}} / \partial \boldsymbol{U} = \hat{\boldsymbol{R}} \widehat{\boldsymbol{\Lambda}} \hat{\boldsymbol{R}}^{-1}$$
$$\hat{\boldsymbol{U}} = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{U} = (h, u_n h, u_t h)^T; \quad \hat{\boldsymbol{E}} = \boldsymbol{T} \cdot (\boldsymbol{E} \cdot n_x + \boldsymbol{F} \cdot n_y);$$
$$\hat{\boldsymbol{S}}_1 = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{S}_1; \quad \hat{\boldsymbol{S}}_2 = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{S}_2$$
$$\hat{\boldsymbol{R}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ u_n - c & 0 & u_n + c \\ u_t & 1 & u_t \end{pmatrix}; \quad \hat{\boldsymbol{A}} = \begin{pmatrix} u_n - c & 0 & 0 \\ 0 & u_n & 0 \\ 0 & 0 & u_n + c \end{pmatrix}$$

ここに, \hat{J} : 流束ヤコビアン, $\hat{\Lambda}$: \hat{J} の固有値, \hat{R} : \hat{J} の 右固有ベクトル, \hat{R}^{-1} : \hat{J} の左固有ベクトル, $n=(n_x, n_y)$: 単位法線ベクトル, $u_n: x_n$ 方向の流速(= un_x+vn_y), $u_t: x_n$ に垂直な方向の流速(= $-un_y+vn_x$), $T: x_n$ 軸への回転 行列, $T^1: T$ の逆行列である.

上・下流端の境界条件には、式(2)の \hat{J} を近似ヤコビア ン \tilde{J} で置き換え、左から左固有ベクトルを乗じることで 得られる式(3)の固有値 \hat{A} を伝播速度とするスカラーの波 動方程式群を用いた.なお、近似ヤコビアン \tilde{J} は、 Δt と Δx_n で一定とする.

 $\partial \tilde{R}^{-1} \hat{U} / \partial t + \hat{A} \cdot \partial \tilde{R}^{-1} U / \partial x_n = \tilde{R}^{-1} (\hat{S}_1 + \hat{S}_2)$ (3) 境界での流れは常流とし、境界条件として水位を与える と、式(3)より単位幅流量を算定することが可能となる. なお、離散化の詳細については、参考文献^{14,15)}を参照さ れたい.

(2) モデルパラメータの最適化法の概要

水位を境界条件とした洪水氾濫解析では,底面粗度や 堰や橋などの河川構造物によるエネルギー損失の変化に より,上流端からの流入流量も変化する.つまり,河道



ズー モリルハノメータの設定範囲						
	α	С	C_{DP}	C_{DG}		
設定範囲	0.6-1.0	0.8-0.92	0.49-1.62	0.81-1.62		

表-2 モデルパラメータの最適値						
/	α	С	C_{DP}	C_{DG}		
適解	0.81	0.81	0.94	1.10		

の抵抗評価を適切に行わなければ、流量を適切に推定す ることはできない、本研究では、抵抗評価を行う以下の パラメータについて最適化を行った.①粗度係数n、② 水位が橋桁以下の場合に橋脚による堰上げを考慮するた めの縮流係数C、③水位が橋桁以上の場合に橋梁による 堰上げを考慮するための橋脚、橋桁の抵抗係数CDP, CDG. なお、粗度係数nについては低水路粗度のみを対象にし、 計画粗度係数に補正係数αを乗じ、この補正係数を最適 化した.

モデルパラメータの最適化に用いた手法は,実験計画 法²⁰⁾,応答曲面法²⁰⁾,粒子群最適化法²¹⁾である.実験計 画法では,応答曲面モデルを作成する上で効率的な解析 条件を設定し,同条件下の解析結果に基づき,独立変数 と目的関数との関係を表す応答曲面モデルを作成し,粒 子群最適化法により,目的関数が最小となる独立変数の 組み合わせを求めた.

4. 平成29年7月九州北部豪雨時の花月川の流量と 浸水域の推定

(1)解析の概要

解析は、平成29年7月九州北部豪雨時の花月川の流量の把握とモデルパラメータの最適化を目的とした解析① と浸水域の把握を目的とした解析②を実施した.

いずれの解析も,解析対象領域を図-1の花月川で唯一 水位観測が行われている花月観測所(距離標3.38km)から, 花月川と筑後川との合流点までの3.38km区間と,同区間



図-5 解析最大水位と痕跡水位との比較の氾濫原とし、河道と氾濫原を一体として解析を実施した.解析対象時刻は、平成29年7月5日14時から6日3時とした.

河道の横断面形状は、平成29年の測量データを用いた. 上流端境界条件には、花月観測所の実測水位ハイドログ ラフを、下流端境界条件には実測水位がないため筑後川 を対象にした分布型流出・1次元河道網洪水流解析によ る水位ハイドログラフ²⁰を与えた. 図-4に、解析に用い た水位ハイドログラフを示す.本解析の上・下流端水位 は、横断面毎に一つしか計測あるいは解析結果が存在し ないので、いずれも横断方向に一様として与えた.なお、 本モデルでは、横断方向の水位分布を与えることも可能 である.

解析①では、同解析のモデルパラメータである粗度係 数の補正係数α、橋脚による堰上げを考慮するための縮 流係数C,橋脚、橋桁の抵抗係数C_{DP}, C_{DG}を,**表**-1に示 す範囲で変化させ、実験計画法により28通りの解析条件 を設定した.なお、補正係数αについては、予備解析か らαと痕跡水位との関係を把握した上で1.0よりも小さ い範囲で、縮流係数C,橋脚、橋桁の抵抗係数C_{DP}, C_{DG} については形状に基づく値の範囲で設定した²³⁾.目的関 数には、観測水位ハイドログラフがないため、痕析水位 と解析水位の最大値との差の絶対値を用い、応答曲面と 粒子群最適化法より最適パラメータを定めた.

解析②では、解析①により求められた最適パラメータ を用いるとともに、氾濫原には、実測降雨を与えること で洪水氾濫解析を実施し、花月川の痕跡水位、浸水域の 実測結果に基づき再現性を検討した.なお、降雨外力に は、国土交通省が運用・管理するXRAIN³⁾を、流域内の 雨量観測所の実績降雨に基づきダイナミックウィンドウ 法²⁴⁾で補正したレーダ雨量を用いた.氾濫原の標高デー タには、氾濫原の標高データとして航空レーザー測量 1mメッシュDEMデータを計算格子で平均化したものを、 土地利用データにはALOS2²⁵⁾を用いた.氾濫原には支川 の渡里川が含まれるが、観測データが無いため、上流端 からの流入流量は考慮していない.





(2) モデルパラメータの最適化と流量の推定

表−2に、応答曲面と粒子群最適化法より求められたモ デルパラメータの最適値を示す.表-1の範囲が適切でな い場合、この範囲を超えて最適値が推定される場合があ るが、いずれの値も表-1の範囲内で最適値が得られてい る.低水路粗度係数の補正係数 αの最適値は0.81となり、 この補正係数を用いて低水路粗度係数nを算出すると最 適値は0.029m-1/3sであった. この値は,過去の洪水痕跡 に基づく逆算粗度と河床材料に基づく低水路の推定粗度 係数値の0.035m-13sに比べ、小さい結果となった.実績 の粗度係数に比べ最適化より得られた粗度係数が小さく なった要因は、同区間では河床が低下する傾向にあり、 本解析では河道横断面データに出水後のものを用いてい ることから、ピーク水位時には出水後よりも河床が低下 しており、出水後の河道よりも同区間の流下能力が高く なったことが考えられる.この点については、今後、河 床変動解析を実施し、より詳細な検討が必要である、水 位が橋桁以下の場合,橋脚の縮流係数Cの最適値は0.81 であり、橋脚形状に基づく値0.9223)に比べ小さい結果と なった. この値は、実河道の橋脚形状よりも水位上昇が 大きくなるような値であることから、出水中は橋脚がゴ ミや流木を捕捉したと考えられる.また、水位が橋桁ま で到達した場合の橋脚,橋桁の抵抗係数Cpp, Cpgの最適 値は、それぞれ0.94、1.10であり、楕円や直方体の橋脚 の推奨値0.49~1.6223)の中間程度の結果,水没状態の橋桁 の推奨値1.62²³⁾に比べ小さい結果となった、Copが推奨値 の中間程度で平均的な値となっている一方で、CDGが推 奨値に比べ小さいのは、橋桁が完全に水没しておらず、 橋桁下部のみで流れの剥離が生じたためと考えられる.

図-5に、最適パラメータによる非定常解析結果の最大 水位と痕跡水位との比較を、図-6に、花月観測所の流量 ハイドログラフの解析結果と実測値との比較を示す.な お、図中には全ケースの解析結果、最適化が実施されて いない前報の解析結果^{11),12)}もあわせて示している.また、 図中の流量の実測値は、本解析結果が得られた後に、国 土交通省水文水質データベース²⁶より入手した値である.

これらより、(1)本解析結果は、いずれも最大20%の誤差 はあるものの、十分な精度で花月川の痕跡水位を再現で きること、(2) 増水・減水時に最大で13%程度の誤差はあ るものの、その波形を再現していること、(3)解析のピー ク流量は1,590m³/sであり、実測値のピーク流量の 1,518m³/sに比べ大きく評価していること、などが確認で きる. なお, 実測値のピーク流量は1時間単位のもので あり、10分間隔の観測結果ピーク水位が85.0mに対して、 ピーク流量時の水位は84.73mであることから、実ピーク 流量も、1時間単位のピーク流量に比べ大きかったと考 えられる.また、前報の解析結果と比較すると、本解析 では、最適化により橋脚等の抵抗を適切に評価されたた め、痕跡水位、流量ハイドログラフのいずれも再現性が 高いことが確認できる.このように、河道の水位情報か ら流量を推定することは可能であり、今後、水位情報に 基づく河道の流量と、雨量情報と流出解析に基づく河道 への流入流量の両方から、流域レベルでの雨水の挙動を 把握できるようになると考えられる. 危機管理型水位計 により、時空間的に密な水位情報が得られるようになれ ば、本研究で実施した河道でのモデルパラメータの最適 化に加え、流域でのモデルパラメータの最適化も可能に なると考えられる.この最適化法については、今後、検 討をしたいと考えている.

(3) 浸水域の推定

図-7に、実測浸水域と最適パラメータを用いた最大浸 水深の解析結果との比較を示す。図中には越水発生箇所 の調査結果もあわせて示している. なお、同図の背景に は、国土地理院の全国最新写真(シームレス)10を用い た. また、本解析の解析最大水位および上流端流量ハイ ドログラフは、図-5、6と同様である.これより、解析 結果は、浸水域を参考文献11)の結果と概ね同程度で再 現できること、距離標0.6~0.8km付近を除いては越水発 生箇所も再現できること、などが確認できる.一方で、 ①距離標0.6~0.8km付近の越水を再現できないこと、② 距離標1.6~2.8kmの右岸で過大評価していること、③距 離標3.4km付近の左岸では過小評価していることが確認 できる. ①の距離標0.6~0.8km付近では, 図-5の痕跡水 位からも明らかなように、河道の水位を過小評価し、越 水が再現できなかったためである.本研究では、橋梁の パラメータを同一と考え最適化したが、橋梁毎に設定す ることで再現性の改善が期待できると考えられる. ②の 距離標1.6~2.8kmの浸水域は、花月川3km右岸からの氾濫 水が支川の渡里川への流入したために生じた氾濫が要因 であり、渡里川についてはLPデータで、水面よりも上 の標高のみを考慮しているため、氾濫流量が過大に評価 された可能性がある.これに加え、浸水域を流れる小河 川の標高も渡里川同様に水面よりも上の標高のみを考慮 しているため、氾濫流を排水できず浸水域を過大に評価 したと考えられる. そのため、ここでの浸水状況の再現 性の改善には、渡里川や小河川の河道形状を見直す必要 がある.③の距離標3.4km付近の左岸で浸水域を過小評 価した要因は、解析対象領域外の距離標3.6~3.8km左岸 からの越流が考慮されていないためである.これは、当 然のことながら、境界条件となる水位の測定位置が限定 されているためである.

このように、本解析法は、上記のような改善点は残る ものの、今後、危機管理型水位計の設置が進展すれば、 例えば、浸水域が両岸とも発生していない距離標4.0km 付近で水位観測が行われれば、距離標4km下流での氾濫 状況の再現が可能になると考えられる.このように、本 解析は、水位情報等に基づく浸水域の把握にも有用であ ると考えられる.

5. おわりに

本研究では、平成29年7月九州北部豪雨時の花月川下 流域を対象に、水位を境界条件とした洪水氾濫解析とそ のモデルパラメータの最適化を実施し、洪水流量の推定、 同解析法の痕跡水位、浸水域の再現性について検討した. その結果、(1)最適パラメータを用いた解析結果は、平成 29年7月九州北部豪雨時の花月川流域での痕跡水位、浸 水域などを十分な精度で再現でき、前報¹¹⁾に比べ再現性 が向上すること、(2)推定ピーク流量は1,590m³/sであるこ と、(3)最適パラメータ値は、標準的な値に比べ橋脚によ る抵抗を大きく評価する傾向にあり、出水中のゴミや流 木の捕捉の影響を捉えていること、(4)これらから、本解 析は水位情報から洪水時の流量や浸水域の推定が可能な ツールであること、などが確認された.

謝辞:本研究を実施するに当たり,国土交通省九州地方 整備局河川部,文部科学省の委託事業により開発・運用 されているデータ統合・解析システム(DIAS)からデータ の提供を受けた.科学研究費特別研究促進費(課題番 号:17K20140,研究代表者:秋山壽一郎),基盤研究 (C)(課題番号:16K06515,研究代表者:重枝未玲)の助 成を受けた.ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 国土交通省:梅雨前線に伴う平成29年7月5日出水について (第3報), http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/bousai_kasen03. pdf, 2017(参照 2019/03/19).
- 国土交通省:平成30年7月豪雨における被害等の概要, http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunka kai/shouiinkai/daikibokouikigouu/1/pdf/daikibokouikigouu_01_s2. pdf, 2018(参照 2019/03/19).
- DIAS : http://www.diasjp.net/service/xrain/ , 2017(参照 2019/03/19).
- 4) 国土交通省:水防災意識社会再構築ビジョン,





http://www.mlit.go.jp/river/mizubousaivision/soft.html, 2019(参照 2019/03/19).

- 5) 例えば, 重枝未玲:降雨を外力とした流域流出・洪水氾濫 解析, ながれ, 第37巻, No.1, pp.33-40, 2018.
- 6) 重枝未玲,秋山壽一郎,野村心平:実測水位に基づく分布 型流出・平面2次元洪水追跡モデルのパラメータ最適化法, 河川技術論文集,第18巻, pp.459-464, 2012.
- 7) 小林健一郎, 寶 馨, 立川康人:最適化手法による分布型 降雨流出モデルのパラメータ推定,水工学論文集,第51巻, pp.409-414, 2007.
- 8) 小槻峻司,田中賢治,小尻利治,浜口俊雄:群知能最適化 手法を用いた分布型流出モデルのパラメーター同定,土木 学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_523-I_528, 2012.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 重枝未玲,秋山壽一郎,大久保剛貴,中島晴紀:平成29年 7月九州北部豪雨時の花月川流域の流域流出・洪水氾濫解 析,河川技術論文集,第24巻, pp.451-456, 2018.
- 12) 重枝未玲,秋山壽一郎,鬼束幸樹,中島晴紀,勝原亮介, 桂佑樹:平成29年九州北部豪雨災害時の花月川の平面2次 元洪水流解析と護岸・河岸の被災要因の検討,土木学会論 文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_1045-I_1050, 2018.
- 13) 矢野真一郎:平成29年7月九州北部豪雨による河川災害の 概要,河川災害に関するシンポジウム,pp.9-25,2018.
- 14) 重枝未玲,秋山壽一郎,大久保剛貴,中島晴紀:水位ハイドログラフを境界条件とした平面2次元洪水流解析,土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_1453-I_1458, 2018.

- 15) 重枝未玲,秋山壽一郎,大久保剛貴,中木翔也:橋梁を簡 易的に考慮した山国川流域の洪水氾濫解析,河川技術論文 集,第23巻, pp.13-18, 2017.
- 16) 国土交通省国土地理院:地理院タイル一覧, https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html, 2019.
- 17) 福岡捷二,渡邊明英,原俊彦,秋山正人:水面形の時間変 化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと 貯留量の高精度推算,土木学会論文集,No.761/II-67, pp.45-56,2004.
- 18) 福岡捷二:実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前 線と今後の調査研究の方向性,河川技術論文集,第20巻, pp.253-258, 2014.
- 19) 椿東一郎:基礎土木工学全書6 水理学I, 森北出版, p.208, 1973.
- 20) 岩崎学:統計的データ解析入門 実験計画法,東京図書株 式会社, p.121, 2006.
- 21) 多田毅: PSOアルゴリズムによる流出モデルパラメータの 最適化,水文・水資源学会誌, Vol.20-5, pp.450-461, 2007.
- 22) 重枝未玲,秋山壽一郎,中木翔也,勝原亮介,大久保剛 貴:平成29年7月九州北部豪雨時の筑後川右岸流域を対象 にした分布型流出・1次元河道網洪水流解析,河川技術論 文集,第24巻, pp.445-450, 2018.
- 23) 国土技術研究センター(編):河道計画検討の手引き, 山海堂, 2002.
- 24) 山口高志,北川明,小野寺直,高水克哉,幸弘美:レーダ 雨量計の精度向上について,河川情報研究, No.1, pp.91-104, 1993.
- 25) JAXA:高解像度土地利用土地被覆図ホームページ, http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/jlulc_jpn.htm, 1997.
- 26) 国土交通省:水文水質データベース, http://www1.river.go.jp, 2019(参照 2019/01/10).

(2019.4.2受付)