

令和元年6月14日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06515

研究課題名(和文) 水面形の経時変化に基づく流量・粗度係数・河床高の時空間変化の推定法の開発

研究課題名(英文) Development of numerical methods for estimating spatiotemporal changes of discharge, roughness coefficient, bed level using observed water levels

研究代表者

重枝 未玲 (SHIGE-EDA, MIREI)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70380730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、河道管理に資する情報の取得を目的に、観測水面形の経時変化に基づき、河道での流量、粗度係数、河床高の時空間変化の推定法を開発するものである。本研究では、(1)観測水位ハイドログラフを境界条件として流量・水位・河床高の時空間変化を推定する推定法Ⅰ、(2)水面形の経時変化から流量・粗度係数・河床高を直接推定する推定法Ⅱを開発した。同推定法を実験結果や実河道の洪水データに基づき検証し、推定法ⅠのⅡのいずれも実験結果を再現できること、推定法Ⅰは実河道の洪水時における流量・水位ハイドログラフや痕跡水位を、推定法Ⅱはピーク流量や低水路粗度係数を十分な精度で再現できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、高い精度で測定できる水面形の経時変化から、洪水時の流量、粗度係数、河床高の時空間変化を精度良くかつ効率よく求めることができる推定法を、世界に先駆けて開発した点にある。この推定法の開発は、洪水時の水位、流量、粗度係数の時空間変化を総合的に把握し、これらの変化と河道の平面形状や縦・横断変化、樹木繁茂状況などの河道特性とを結びつけることで、変化の原因を特定することにつながる。つまり、本研究の社会的意義は、今後本格的に始まる計画的な河道管理の具体を検討する上で有用な情報を提供できる点にある。

研究成果の概要(英文)：In this study, to acquire information that contributes to river management, estimation methods of spatiotemporal change of flow discharge, roughness coefficient and bed level in river channel using a temporal change of observed water level were developed. Two estimation methods, estimation methods I and II, were developed. Estimation method I could estimate spatiotemporal changes of flow discharge, water level and bed level using the water level hydrograph as boundary conditions. Estimation method II could estimate spatiotemporal changes of flow discharge, roughness coefficient and bed level using the temporal change of water surface profile. The estimation methods were verified against the experimental results and flood data in the river. It showed that the estimation method I and II could reproduce the experimental results and flood data in the river such as the flow discharge hydrograph, peak discharge and low channel roughness coefficient with reasonable accuracy.

研究分野：数値流体力学

キーワード：水面形 時空間変化 流量 粗度係数 河床位 推定法 流束差分法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、安全・安心が持続可能な河道管理が求められている。河道管理の具体を検討する上で、従来の流下能力の把握に加え、河道特性による洪水伝播の変化や遊水地への分流、治水施設による流量の変化など、現況河道の洪水に対するレスポンスを把握することは重要である。そのためには、洪水時の水位、流量、粗度係数などの抵抗特性の時空間変化を総合的に把握し、これらの変化と河道の平面形状や縦・横断変化、樹木繁茂状況などの河道特性とを結びつけ、変化の原因を特定することが不可欠となる。

洪水時の流量や抵抗特性の縦断・時間変化については、その観測の困難さから、観測値に基づき十分な解像度で把握することは難しい。その一方で、水位については、多点での連続観測が行われるようになってきており、観測結果から縦断・時間変化が把握できるようになっている。この水面形の経時変化は、流量や河道の抵抗の影響を含んだ結果であり、これから、流量や抵抗特性の縦断・時間変化を推定することが可能となれば、河道管理のための貴重な情報を提供できると考えられる。そのため、洪水流と河床変動を同時に考慮し、水面形の観測結果と数値モデルによる解析結果を同化させることで、流量、河床位、抵抗特性の縦断変化の情報を得ることを目的とした数値モデルの開発が行われているものの、確立された手法は存在しないのが実状である。

2. 研究の目的

本研究は、以上のような背景を踏まえ、洪水流と河床変動を一体として取り扱い、観測した水面形の経時変化に基づき、実河道での流量、粗度係数、河床高の時空間推定法の開発を目的としたものである。

3. 研究の方法

本研究では、上記の研究目的を達成するために、以下の(1)~(3)を実施した。

(1)推定法の開発

従来の不定流解析では、与条件として、水路の縦横断形状、粗度係数、上流端の流量ハイドログラフ、下流端の水位ハイドログラフを与え、計算格子点の流量・水位ハイドログラフが解析される。本研究では、解析条件として流量を必要とせず、水位情報のみで解析の実行が可能で、以下の推定法 I と II の二つの推定法の構築に取り組んだ。図-1 に従来の不定流解析、推定法 I、推定法 II の概要を示す。

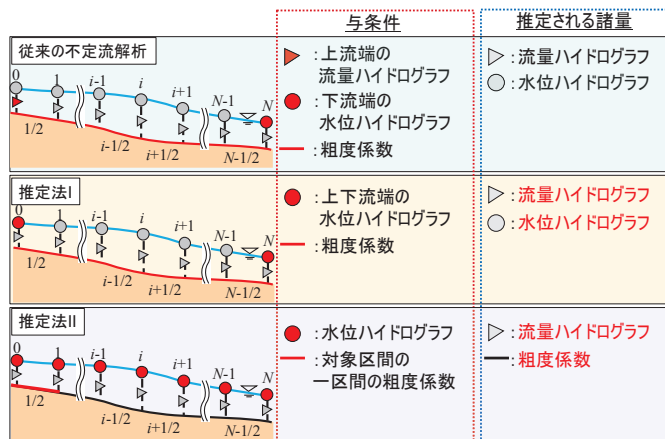


図-1 従来の不定流解析、推定法 I、推定法 II の概要

- ・推定法 I：観測水位ハイドログラフを境界条件として、水位・流量あるいは河床位と河床材料の粒度の時空間変化を推定する手法。
- ・推定法 II：水面形の経時変化と一区間の粗度係数を与条件として、流量・粗度係数あるいは河床位の時空間変化を推定する手法。

(2)直線水路、漸拡・漸縮水路、複断面水路の実験結果に基づく各推定法の検証

推定法の検証を目的に、直線水路、平面形状を変化させた漸縮・漸拡水路、河川を横断する構造物を設置した水路、水深方向に底面粗度を変化させた複断面水路、樹木群を有する複断面水路、河川分・合流点を有する水路での固定床実験を行い、定常・非定常流に対して、水位、流量の時系列データを収集した。さらに、直線水路、漸縮・漸拡水路での一様砂、混合砂礫移動床実験を行い、定常・非定常流に対して、水位、流量、河床位、流砂量、粒度分布の時系列データを収集した。これらのデータに基づき、推定法の推定精度の検証を行った。

(3)現地データに基づく推定法の検証

遠賀川、彦山川、花月川を対象に、実洪水時の洪水ハイドログラフや痕跡水位、流量等のデータを収集した。これに基づき、推定法の推定精度の総合的な検証を行った。

4. 研究成果

上記の(1)~(3)に帯する研究成果は次の通りである。

(1) 推定法の開発

推定法 I については、固定床を対象にした推定法 I-1、混合砂礫床を対象にした推定法 I-2 を、推定法 II については、固定床を対象にした推定法 II-1、これを準 2 次元化し、複断面水路や樹木群の取り扱いを組み込んだ推定法 II-2、一様砂床を対象にした推定法 II-3 を開発した。いずれの推定法も、流れの基礎方程式には 1 次元あるいは 2 次元浅水流方程式を、流砂の基礎方程式に

は流砂の連続の式を、数値解析手法には流束差分法を用いた。また、境界条件には水位ハイドログラフを与え、浅水流方程式から求まる特性速度 $u \pm c$ の波動方程式を境界条件として、時刻 $t + \Delta t$ の上下流端流量を推定した。ここに、 u は流速、 c は波速である。さらに、境界条件あるいは与条件とする水位ハイドログラフには、区分的 3 次エルミート内挿多項式補間(PCHIP 補間)によるデータ補間と、長波を対象とする浅水流方程式では再現できない高周波成分の波を除去するローパスフィルタを施した。構築した各推定法の概要は以下の通りである。

①推定法 I-1

基礎方程式には 1 次元あるいは 2 次元浅水方程式を用いる。上・下流端の水位と粗度係数を与条件とし、河道内の堰、橋脚や橋桁をエネルギー損失として簡易的に取り扱いを組み込み、連続の式と運動方程式からそれぞれ水位と流量を推定する手法を新たに開発した。

②推定法 I-2

推定法 I-1 に、全粒径と交換層の概念に基づく粒径別の流砂の連続の式を基礎方程式に加え、上・下流端の水位・河床位と粗度係数を与条件とし、水位、流量、河床位と河床材料の粒度分布を推定する新たな手法を開発した。粒径別流砂量には、底面勾配の影響を考慮した Kovacs and Parker 式を用い、大きな粒径による遮蔽効果については修正エギアザロフ式で考慮した。無次元限界掃流力には、底面勾配の影響を考慮した岩垣の式を、交換層と貯留層との境界での粒度比率には、河床位上昇時に掃流砂の粒度比率の影響を考慮した Hoey and Ferguson の式を用いた。貯留層での粒度比率については、貯留槽と基岩層との間を M 個のソロバン格子で分割し、貯留槽の最上面の貯留槽の最上面の座標と粒度比率を時間更新させた後、各格子点での粒度比率を線形補間で更新させた。

③推定法 II-1

水路の縦横断形状、計算格子点での水位ハイドログラフ、対象区間の一区間の粗度係数を与条件として、流量と粗度係数を推定する手法を新たに開発した。なお、対象とする流れは常流とする。本推定法では、時刻 t での粗度係数 n' を一つ前の時刻の粗度係数 n' の 2 乗と粗度係数の 2 乗の補正量 $\Delta n'^2_{i+1/2}$ の和で表し、基礎方程式の 1 次元浅水方程式の連続の式から求まる $\Delta n'^2_{i+1/2}$ に関する連立 1 次方程式を解くことで、時刻 t の粗度係数が算定される。解析対象領域を N 個の計算格子で分割すると、計算格子間で定義される粗度係数は $N-1$ 区間であり、 $\Delta n'^2_{i+1/2}$ に関する連立 1 次方程式は $N-2$ 式であるため、解析対象区間のいずれか一区間の粗度係数を与えることで、同方程式は解くことが可能となる。時刻 t の粗度係数を求めた後、基礎方程式の 1 次元浅水方程式の運動方程式から時刻 $t + \Delta t$ の流量を推定する。

④推定法 II-2

推定法 II-1 に、準 2 次元解析の連続の式と分割断面での運動方程式を組み込み、複断面直線水路での流量ハイドログラフ、低水路と高水敷の流速差による干渉効果を含む粗度係数や水深の増減に伴う粗度係数の変化を考慮できる推定法を新たに開発した。同推定法では、流量に加え、低水路の粗度係数と各横断面での流速分布が求まる。

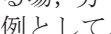
⑤推定法 II-3

推定法 II-1 に、流砂の連続の式を基礎方程式に加え、水路の初期縦横断形状、計算格子点での水位ハイドログラフ、一区間の粗度係数の補正量を与条件として、粗度係数と河床位の収束計算を行いながら、流量・粗度係数・河床位の時空間分布を推定する手法を新たに開発した。推定法 II-1 での粗度係数の 1 次元連立方程式の中には、時刻 $t + \Delta t$ の流積が含まれるため、時刻 $t + \Delta t$ の河床位を仮定した上で、時刻 t の粗度係数、掃流力、流砂量を算出し、時刻 $t + \Delta t$ の河床位を流砂の連続の式より求め、仮定した河床位と一致するまで、粗度係数と河床位の繰り返し計算を行う。

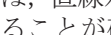
(2)直線水路、漸拡・漸縮水路、複断面水路の実験結果に基づく各推定法の検証

実験結果に基づき、推定法 I と II の検証を行った。以下にその結果の概要を示す。

①推定法 I-1

直線水路、漸縮・漸拡水路および河川を横断する構造物を設置した水路、河川分・合流点を有する水路での実験に基づき、同推定法の検証を行った。その結果、推定法 I は、直線、漸拡水路および堰がある場合、分・合流部を含む水路での水位、流量を十分な精度で再現できることを示した。結果の一例として、-2 に堰を超える流れの実験値と解析結果との比較を示す。

②推定法 I-2

直線水路、漸縮・漸拡水路での混合砂礫床での実験結果に基づき、同推定法の検証を行った。その結果、推定法 I-2 は、流量を与条件とした従来の方法と同程度の精度で、形状損失が生じる区間を除いては、直線水路や漸縮・漸拡水路での水面形、河床位、流量、河床材料の粒度分布を概ね再現できることが確認された。結果の一例として、-3 に漸縮・漸拡水路での混合砂礫床

の実験値と解析結果との比較を示す。

③ 推定法 II-1

直線水路、漸縮・漸拡水路および河川を横断する構造物を設置水路での実験結果に基づき、同推定法の検証を行った。その結果、推定法 II-1 は、直線、漸縮・漸拡水路での流量、粗度係数を十分な精度で再現できること、漸拡水路においては形状損失が発生する区間では水路の粗度係数より大きな値を示し、同推定法で算出される粗度係数には、形状損失を陰的に含む値となること、などが確認された。図-4に直線水路、漸拡水路における実験値と解析結果との比較の一例を示す。

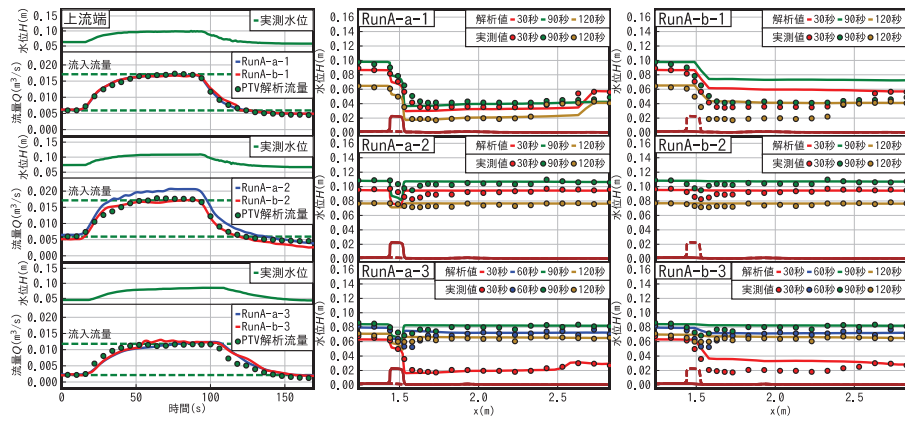


図-2 堰を超える流れの実験結果に基づく検証

④ 推定法 II-2

水深方向に底面粗度を変化させた複断面水路、樹木群を有する複断面水路の実験結果に基づき、同推定法の検証を行った。その結果、推定法 II-2 は、複断面直線水路での流量ハイドログラフと粗度係数を推定可能であること、低水路と高水敷の流速差あるいは樹木群による干渉効果を含む粗度係数が推定可能であること、などが確認された。図-5に複断面水路での実験値と解析結果との比較の一例と合成粗度係数と水深との比較を示す。

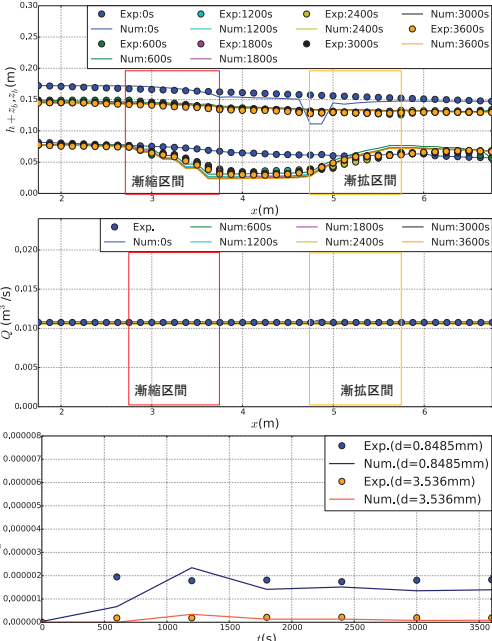


図-3 漸縮・漸拡水路での混合砂礫床の実験結果に基づく検証

⑤ 推定法 II-3

直線水路での小規模河床形態発生時の移動床実験結果に対して、同推定法の検証を行った。その結果、推定法 II-2 は、砂堆 I の発生時の流量、平均河床位を概ね再現できること、解析結果より求めた流速係数と掃流力との関係、掃流力と有効掃流力との関係が、岸・黒木の式に従うこと、などが確認された。図-6に砂堆 I 発生時の水位と河床位、流量、流砂量、掃流力と有効掃流力との関係、流速係数と掃流力との関係を示す。

図-3 漸縮・漸拡水路での混合砂礫床の実験結果に基づく検証

(3) 現地データに基づく推定法の検証

以上の実験結果に基づき検証された推定法 I-1 と II-1 と 2 を、それぞれ花月川・彦山川と遠賀川の実洪水に対して適用し、同推定法の検証を行った。その結果、推定法 I-1 では、実測水位ハイドログラフを境界条件として、痕跡水位に基づき粗度係数の最適化を行うことで、実出水の水位、流量ハイドログラフを推定可能であること、推定法 II-1 と 2 では、痕跡水位に基づき、流量と合成あるいは低水路粗度係数を推定可能であることを示した。図-7に推定法 I-1 の花月川の適用結果を、図-8に推定法 I-2 の遠賀川への適用結果を示す。

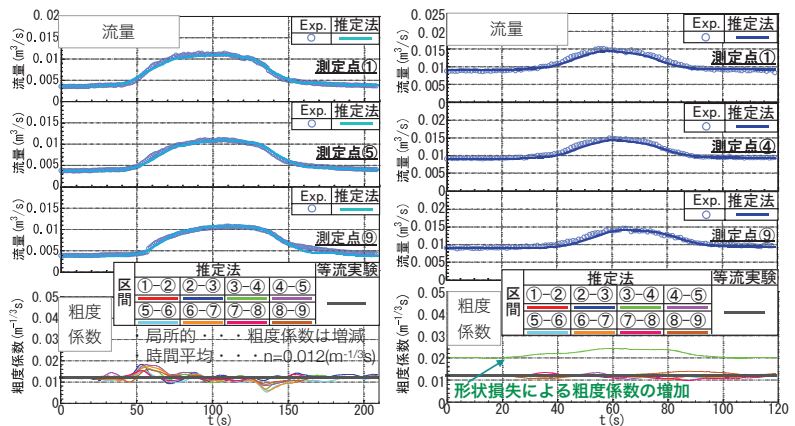


図-4 直線水路、漸拡水路における実験値と解析結果との比較

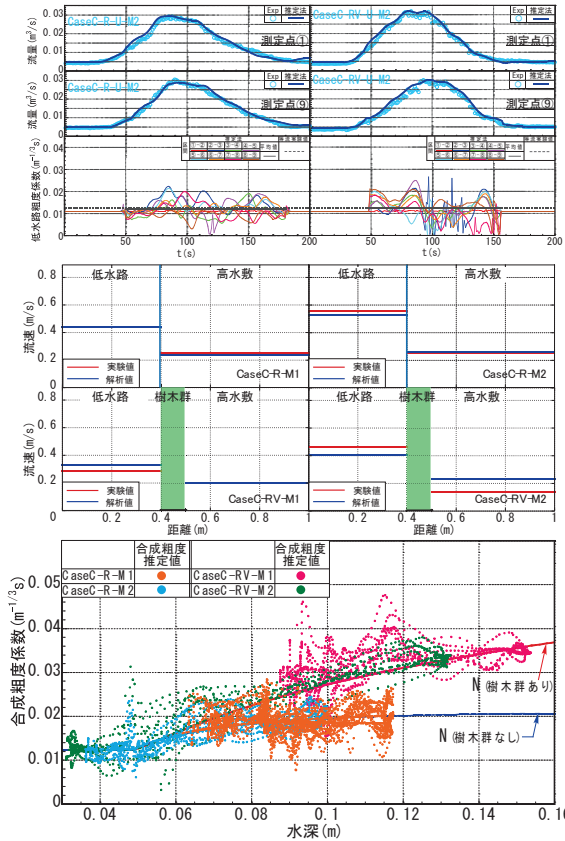


図-5 複断面水路での実験値と解析結果との比較，合成粗度係数と水深との比較

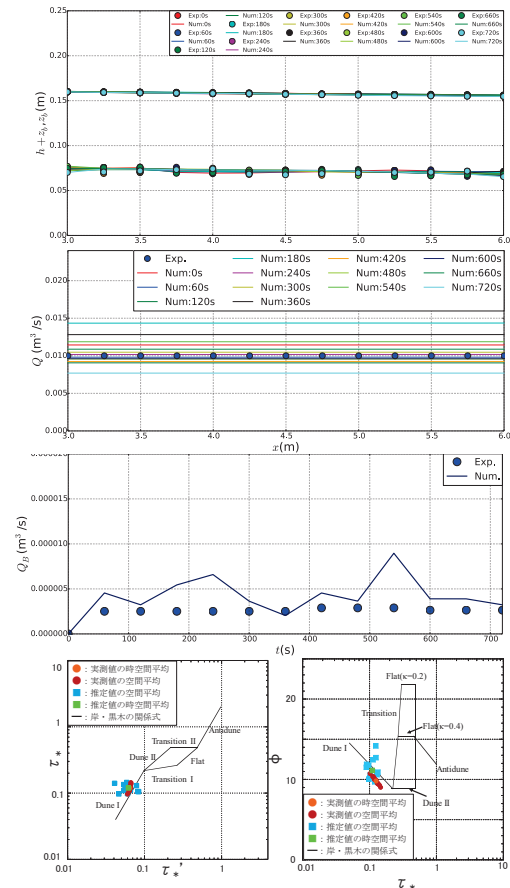


図-6 砂堆 I 発生時の流量，河床位，流砂量，掃流力と有効掃流力，流速係数と掃流力

(4) 成果のまとめと今後の課題

以上から，本研究で開発した推定法は，流量の情報を必要とせず，水位情報のみで，実河川での流量・粗度係数の推定が可能であることを明らかにした。しかし，現状，複数の推定法が存在しており，統一した推定法の開発には至っていない。今後，これらの推定法を統合し，観測水位を用いた流量・粗度係数・河床位・河床材料の統一的な推定法へと発展させたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 24 件)

- ① 重枝未玲，秋山壽一郎，鬼東幸樹，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)，査読有，Vol.74, No.5, pp.I_1045-I_1050, 2018.
- ② 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，査読有，第 24 巻，pp.451-456, 2018.
- ③ 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，査読有，第 24 巻，pp.445-450, 2018.
- ④ 重枝未玲，秋山壽一郎，田口英司，武久晋太郎：水面形の経時変化に基づく複断面直線水路での流量・合成粗度係数の推定，土木学会論文集 B1(水工学)，査読有，Vol.74, No.4, I_649-I_654, 2018. DOI : https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.I_649
- ⑤ 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)，査読有，Vol.74, No.4, I_1453-I_1458, 2018. DOI : [10.2208/jscejhe.74.I_1453](https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.I_1453)
- ⑥ 重枝未玲，秋山壽一郎，Adelaida Castillo DURAN，中木翔也，西山晋平，勝原亮介：1 次元河道ネットワークモデルを用いた分布型流出・洪水流解析と彦山川流域への適用，土木学会論文集 B1(水工学)，査読有，Vol.74, No.4, I_1495-I_1500, 2018. DOI : [10.2208/jscejhe.74.I_1495](https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.I_1495)
- ⑦ 重枝未玲，秋山壽一郎，阿部琢哉，田口英司，武久晋太郎，西山晋平：洪水痕跡によるピーク水位時の流量と粗度係数の推定，河川技術論文集，査読有，第 23 巻，pp.73-78, 2017.
- ⑧ 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，査読有，第 23 巻，pp.13-18, 2017.
- ⑨ 重枝未玲，秋山壽一郎，Adelaida Castillo DURAN，中木翔也，藤田輝：レーダ雨量を外力とした本・支川複数流域の分布型流出・洪水追跡と各流域パラメータの推定，河川技術論文集，査読有，第 23 巻，pp.19-24, 2017.
- ⑩ 重枝未玲，秋山壽一郎，Adelaida Castillo DURAN，中木翔也，大久保剛貴，荒木佑仁：遺伝

的アルゴリズムと粒子群最適化法を用いた実測水位に基づく分布型流出・洪水追跡のパラメータ最適化法, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.73, No.4, pp.I_337-I_342, 2017. DOI: 10.2208/jscejhe.73.I_337

- ⑪ 重枝未玲, 秋山壽一郎, 阿部琢哉, 田口英司: 漸拡長方形断面水路での上下流端水位に基づく水位・流量の予測と水面形に基づく流量・粗度係数の推定, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.73, No.4, pp.I_643-I_648, 2017. DOI: 10.2208/jscejhe.73.I_643

- ⑫ 重枝未玲, 秋山壽一郎, 阿部琢哉, 田口英司: 水位を境界条件とした1次元不定流解析法と水面形を与条件とした流量・粗度係数の推定法～矩形一様断面水路を対象として～, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.73, No.4, pp.I_655-I_660, 2017. DOI: 10.2208/jscejhe.73.I_655

- ⑬ 重枝未玲, 秋山壽一郎, 大久保剛貴, 中木翔也: 河川横断構造物の簡易的な取り扱いを組み込んだ平面2次元洪水流モデルの構築, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol.73, No.4, pp.I_1423-I_1428, 2017. DOI: 10.2208/jscejhe.73.I_1423

- ⑭ 重枝未玲, 秋山壽一郎, Adelaida Castillo DURAN, 中木翔也, 大久保剛貴: 河道特性を考慮した高計算効率な洪水流数値モデルの構築と彦山川への適用, 河川技術論文集, 査読有, 第22巻, pp.127-132, 2016.

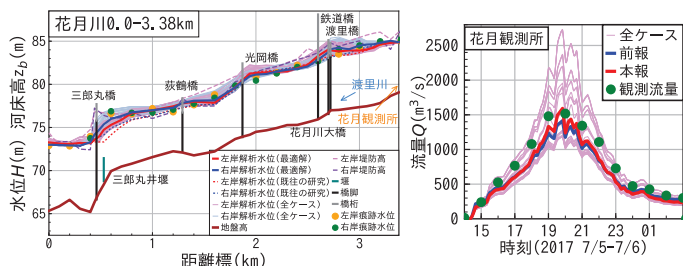


図-7 推定法 I-1 による花月川の水位・流量の推定例

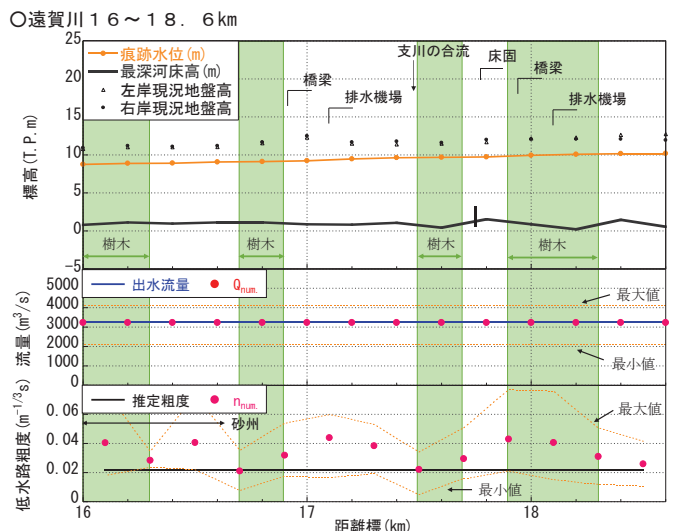


図-8 推定法 II-2 による遠賀川の流量, 粗度係数の推定

[学会発表] (計 24 件)

- ① 桂佑樹, 重枝未玲 他, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨時の花月川を対象にした洪水流量の推定, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- ② 武久晋太郎, 重枝未玲 他, 観測水位に基づく流量・粗度係数の準二次元推定法の構築, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- ③ 木村有花, 重枝未玲 他, 観測水位に基づく小規模河床形態発生時の流量・粗度係数・河床位の推定, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- ④ 川上航平, 重枝未玲 他, 観測水位を用いた河川分流域における流量の推定, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019.
- ⑤ 古川英明, 重枝未玲 他, 水面形を与条件とした流量・粗度係数・河床位の推定, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018.
- ⑥ 木原寛満, 重枝未玲 他, 複断面流れを対象にした水面形を与条件とした流量・合成粗度係数の推定, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018.
- ⑦ 西山晋平, 重枝未玲 他, 水位を与条件とした漸縮・漸拡矩形断面水路での流量・粗度係数の時空間推定, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017.
- ⑧ 西山晋平, 重枝未玲 他, 漸拡矩形断面水路での上下流端水位を境界条件とした不定流解析と水面形の経時変化を用いた流量・粗度係数の時空間推定, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017.
- ⑨ 武久晋太郎, 重枝未玲 他, 境界・与条件に観測水位を用いた 1 次元不定流解析法と流量・粗度係数の推定法, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017.
- ⑩ 荒木佑仁, 重枝未玲 他, 堰を簡易的に考慮した平面 2 次元洪水流解析, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017.

[その他]

ホームページ等

- ① 九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系 水環境工学研究室ホームページ <https://www.civil.kyutech.ac.jp/pub/mirei/index.html>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。