

洪水痕跡によるピーク水位時の 流量と粗度係数の推定

ESTIMATIONS OF DISCHARGE AND ROUGHNESS COEFFICIENT AT THE
TIME OF PEAK WATER LEVEL BY FLOODMARKS

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・阿部琢哉³・田口英司⁴・武久晋太郎⁴・西山晋平⁴
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Takuya ABE, Eiji TAGUCHI,
Shintaro TAKEHISA and Shinpei NISHIYAMA

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 九州工業大学教授 (同上)

³正会員 大成建設株式会社 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25-1 新宿センタービル)

⁴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
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

A method for estimations of discharge and roughness coefficient at the time of peak water level by floodmarks was examined. The method uses temporal change of water surface profile as input conditions for the estimations. The method also uses 1D shallow water equations applicable to channels of arbitrary cross section as governing equations and flux-difference splitting scheme as a numerical technique. The estimation method was verified against experimental data of unsteady flow in straight channel, gradually contracted channel and expanded channel. The estimation method was also verified against observed data of the flood flows in the Onga River. These verifications show that proposed method can reproduce the discharge as well as roughness coefficient at the time of peak water level by floodmarks with reasonable accuracy.

Key Words : Discharge, roughness coefficient, water surface profile, flood remark,
straight/contracted/expanded channel, the Onga river

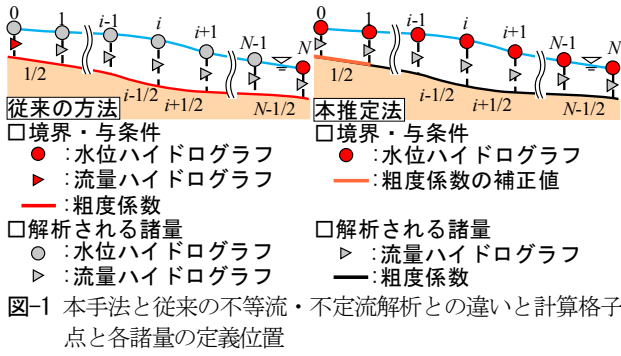
1. はじめに

近年、安全・安心が確保される適切な河川管理が求められている¹⁾。これからの河川管理には、個別の治水施設に加え、これらの群としての治水機能を適切に評価し、その機能の維持や改善を行う、いわゆるストックマネジメントがますます重要となる。このようなマネジメントを行う上で、洪水時の水位、流量、抵抗特性の時空間変化等を総合的に把握²⁾し、そのデータを蓄積し、河道や治水施設の治水機能を把握することが不可欠である。

洪水時の水位については、多点での連続観測が行われるようになっており、水面形の経時変化が観測されるようになってきている³⁾。水面形の経時変化には、河床材料や小規模河床波による摩擦抵抗、河道内樹木や堰による抵抗、断面内の流速差の干渉効果、河床変動の影響が含まれるため、近年では、水位の観測結果と数値解析結

果を同化させることで、洪水時の流量ハイドログラフ、抵抗特性の変化、河床変動を推定する方法の開発が試みられている³⁾⁴⁾⁵⁾。これらの研究から、粒子フィルタ³⁾やAdjoint法⁴⁾をデータ同化手法として用いた解析は、洪水時の流量ハイドログラフや抵抗特性の変化を推定可能であること、観測水面形の時間変化を既知量とした洪水流・河床変動解析は、任意の地点での流量ハイドログラフ、粗度変化のみならず河床位を推定可能なこと⁵⁾が明らかとなっている。著者らは、上記のように、解析水位と実測水位との同化とは異なるアプローチで、水面形の経時変化を与条件とした流量・粗度係数の時空間変化の同時推定法を開発し、実験結果に基づき、その予測精度を明らかにしている⁶⁾⁷⁾。このように、実測水面形の観測結果から、流況、抵抗特性の変化、河道の変化を推定可能となれば、洪水時に河道で生じる現象を明らかにできると考えられる。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、水面形の時空



間変化を与条件として、実河川の流量ハイドログラフ、抵抗の時空間変化、河床変動の予測を最終的な目的としたものである。ここでは、その第一歩として、著者らの推定法により、痕跡水位の縦断変化から実河川のピーク水位時の流量と粗度係数の推定を試みた。

2. 推定法の概要

本研究で対象とする流れは常流とする。通常、常流を対象とする不定流解析では、図-1に示すように、計算格子点の流量・水位ハイドログラフが解析で求められ、水路の縦横断面形状、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が与条件となる²⁾。本研究の手法は、図-1に示すように、従来の解析法とは異なり、計算格子点での流量と粗度係数を解析で求める諸量とし、与条件として水路の縦横断面形状、計算格子点での水位ハイドログラフ、対象の一区間の粗度係数の補正值を与条件とする。以下ではその概要について述べる。

(1) 基礎方程式

基礎方程式は、式(1)の任意の水路形状に適用可能な1次元浅水方程式⁸⁾である。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{d\mathbf{E}}{dx} = \mathbf{S} \quad (1)$$

ここに、 t : 時間、 x : 流下方向、 $\mathbf{U}$: 保存量ベクトル、 $\mathbf{E}$: 流束ベクトル、 $\mathbf{S}$: 発生項・消滅項ベクトル、 A : 流積、 Q : 流量、 g : 重力加速度、 S_0 : 河床勾配、 S_f : 摩擦勾配、 I_1 : 静水圧項、 I_2 : 河道幅の変化による静水圧項である。流束ベクトル $\mathbf{E}$ は、独立変数 x 、 $\mathbf{U}$ の関数であることから、式(1)の空間微分は、全微分 d/dx で表している。式(1)中の静水圧項 I_1 、河道幅の変化による静水圧項 I_2 には、水深方向への積分が必要となり、解析手法が複雑となるため、この項を消去した式(2)を用いた⁸⁾。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{J} \frac{d\mathbf{U}}{dx} = \mathbf{H}; \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} A & Q \end{pmatrix}^T; \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 & gA(S_0 - S_f - dh/dx + 1/B \cdot dA/dx) \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

ここに、 S_0 : 水路床勾配、 S_f : 摩擦勾配であり、それぞれ式(3)で計算される。

$$S_0 = -\partial z_b / \partial x; \quad S_f = n^2 u |u| / R^{4/3} \quad (3)$$

ここに、 h : 水深、 z_b : 河床高、 η : 底面からの位置、 $\alpha(x, \eta)$: η での河道幅、 n : マニングの粗度係数、 u : 流速($=Q/A$)、 R : 径深である。また、式(2)中の $\mathbf{J}$ は式(4)で表される流束ヤコビアンであり、対角化可能であることから、式(4)で表される固有値 Λ 、右固有行列 $\mathbf{R}$ 、左固有行列 $\mathbf{R}^{-1}$ を得ることができる。

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{U}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ c^2 - u^2 & 2u \end{pmatrix} = \mathbf{R} \Lambda \mathbf{R}^{-1} \quad (4)$$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} u+c & 0 \\ 0 & u-c \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ u+c & u-c \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R}^{-1} = \frac{1}{2c} \begin{pmatrix} -(u-c) & 1 \\ u+c & -1 \end{pmatrix}$$

ここに、 c : 波速($=gA/B$)^{0.5})である。

式(4)のヤコビアン $\mathbf{J}$ を近似ヤコビアン $\tilde{\mathbf{J}}$ と置き換えると、式(5)となる。なお、近似ヤコビアン $\tilde{\mathbf{J}}$ は、 Δt 、 Δx 間で一定と仮定する。式(5)の左辺は、スカラーの波動方程式であり、 $\mathbf{R}^{-1}\mathbf{U}$ が洪水波の伝播速度である特性速度 $u+c$ と $u-c$ で伝播することを表している。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{J}} \frac{d\mathbf{U}}{dx} = \mathbf{H}; \quad \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\Lambda} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \frac{d\mathbf{U}}{dx} = \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{H}; \quad \frac{\partial \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{U}}{\partial t} + \tilde{\Lambda} \frac{d\tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{U}}{dx} = \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{H} \quad (5)$$

(2) 離散化

本推定法の離散化には流束差分離法⁹⁾を用いた。同手法は、式(5)のスカラーの波動方程式に対して風上差分の数値流束を適用し、左側から右固有行列 $\mathbf{R}$ を掛けることで1次元浅水方程式の数値流束とする数値解析手法である。ベクトル $\mathbf{H}$ に対しても、式(6)で示すような式変形を行い、特性速度で数値流束と同様に風上化を行った¹⁰⁾。

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{U}}{\partial t} + \tilde{\Lambda} \frac{d\tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{U}}{dx} = \tilde{\Lambda} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{H} \quad (6)$$

離散化された連続の式と運動方程式を式(7)に示す。各諸量は図-1に示す計算格子点で定義した。

$$\mathbf{U}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{U}_i^t - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\delta \mathbf{E}_{i+1/2}^- + \delta \mathbf{E}_{i-1/2}^+ \right] \quad (7)$$

$$\delta \mathbf{E}_{i+1/2}^+ = \sum_{j=1}^2 \left[\left\{ 1 \pm \text{sgn}(\tilde{\lambda}^j) \right\} / 2 \cdot \left(\tilde{\lambda}^j \tilde{\alpha}^j - \tilde{\beta}^j \right) \right] \tilde{\mathbf{e}}^j$$

$$\tilde{\lambda}^1 = \tilde{u} - \tilde{c}; \quad \tilde{\lambda}^2 = \tilde{u} + \tilde{c}; \quad \tilde{\mathbf{e}}^1 = (1, \tilde{\lambda}^1)^T; \quad \tilde{\mathbf{e}}^2 = (1, \tilde{\lambda}^2)^T$$

$$\tilde{\alpha}^1 = (\tilde{\lambda}^2 \Delta A - \Delta Q) / 2\tilde{c}; \quad \tilde{\alpha}^2 = -(\tilde{\lambda}^1 \Delta A - \Delta Q) / 2\tilde{c};$$

$$\tilde{\beta}^1 = -\tilde{S}_2 / 2\tilde{c}; \quad \tilde{\beta}^2 = -\beta^1;$$

$$\Delta A_{i+1/2} = A_{i+1} - A_i; \quad \Delta Q_{i+1/2} = Q_{i+1} - Q_i;$$

$$\tilde{u} = (u_{i+1} \sqrt{A_{i+1}} + u_i \sqrt{A_i}) / (\sqrt{A_{i+1}} + \sqrt{A_i});$$

$$\tilde{c} = \sqrt{g(A_{i+1} + A_i) / (B_{i+1} + B_i)}$$

ここに、 Δt 、 Δx は時間、空間の刻み幅、 i は空間に対する添字である。

式(7)中の発生消滅項 $\tilde{S}_2$ は、河道形状に関する項 $\tilde{S}_g$ と底面摩擦項 $\tilde{S}_f$ とに分け、式(8)のように取り扱う。

$$\begin{aligned}\bar{S}_2 &= \bar{S}_g - \bar{S}_r; \\ \bar{S}_r &= g\tilde{A} \cdot n'^2 \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \tilde{z}} \Big/ \tilde{A}^2 \tilde{R}^{4/3}; \bar{S}_g = -g\tilde{A}\Delta z_b - g\tilde{A}\Delta h + \tilde{c}^2 \Delta A\end{aligned}\quad (8)$$

流れが常流の場合、式(7)の連続の式の離散式には、水路床勾配、水路形状の変化、摩擦勾配の項が含まれるようになる。この項は、特性速度による風上化に伴う数値粘性によるものである¹¹⁾。式(8)中の n'^2 は、補正された粗度係数 n' (以下、補正粗度係数)の2乗であり、式(9)の水路の材質や河床材料によって推定される粗度係数 n' の2乗と補正值 $\Delta n'^2_{i+1/2}$ (正負の符号を持つ)の和で定義される。なお、補正粗度係数 n' は、 $n'=(n^2)^{0.5}$ で求められる。式(7)の連続の式を $\Delta n'^2_{i+1/2}$ で整理すると、式(10)が得られる。

$$\begin{aligned}n'^2_{i+1/2} &= n'^2_{i+1/2} + \Delta n'^2_{i+1/2} \\ \tilde{C}_{i-1/2} \Delta n'^2_{i-1/2} - \tilde{C}_{i+1/2} \Delta n'^2_{i+1/2} &= \tilde{D}_i; \tilde{C}_{i+1/2} = -\frac{g\tilde{A}_{i+1/2}}{2\tilde{c}_{i+1/2}} \tilde{u}_{i+1/2} \Big| \tilde{u}_{i+1/2} \Big| \tilde{R}^{4/3}_{i+1/2}\end{aligned}\quad (10)$$

粗度係数の補正值は、 N 区間が未知量である。式(10)からは、 $N-1$ 式が求まるため、この方程式を解くには、解析対象の一区間について粗度係数の補正值の2乗に0を、すなわち補正粗度係数値の2乗を与える必要がある。

(3) 境界条件

本推定法では、式(5)から得られる式(11)を境界条件に用いた。

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \left\{ Q/2\tilde{c} - (1+\tilde{u}/\tilde{c}) A/2 \right\} + (\tilde{u}-\tilde{c}) \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Q/2\tilde{c} - (1+\tilde{u}/\tilde{c}) A/2 \right\} &= \\ g\tilde{A} \left(S_0 - S_f - dh/dx + 1/\tilde{B} \cdot dA/dx \right) / 2\tilde{c} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left\{ Q/2\tilde{c} + (1-\tilde{u}/\tilde{c}) A/2 \right\} + (\tilde{u}+\tilde{c}) \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Q/2\tilde{c} + (1-\tilde{u}/\tilde{c}) A/2 \right\} &= \\ g\tilde{A} \left(S_0 - S_f - dh/dx + 1/\tilde{B} \cdot dA/dx \right) / 2\tilde{c}\end{aligned}\quad (11)$$

この方程式は波動方程式であることから、上・下流端の一つ後あるいは前の格子点での諸量が一つでもわかれば、他の諸量も求めることができる。ここでは、格子番号をそれぞれ0, N とし、与条件として与えた水位から流積 $A^{t+\Delta t}$ を求め、上流、下流端の流量 $Q^{t+\Delta t}$ を算出した。

(4) 推定手順

流量・粗度の推定手順は次の通りである。

- 1) 各格子点の横断面形状から、水位と流積 A 、水面幅 B 、潤辺 s との関係を求める。
- 2) 各格子点に水位ハイドログラフ、初期流量 Q' 、河床位 z_b を図-1に示す計算格子間の一区間の粗度係数、つまり粗度係数の補正值に0を与える。なお、本手法では、横断方向に水面勾配が生じた場合には、水位の値は断面平均値を用いる。
- 3) 時刻 t の水位 W_t より、各計算格子点の流積 A' 、水面幅 B' 、潤辺 s' を、時刻 $t+\Delta t$ の水位から流積 $A^{t+\Delta t}$ を求める。
- 4) 式(10)から粗度係数の2乗の補正量 $\Delta n'^2$ を求め、式(9)から時刻 t の粗度係数の2乗の補正值 n'^2 を求める。
- 5) 手順4)の n'^2 を用いて、式(6)の運動方程式から、流量

$Q^{t+\Delta t}$ を求める。

6) 式(11)から、境界での流量 $Q^{t+\Delta t}$ を求める。

7) 計算終了時刻まで手順3)~6)を繰り返す。

(5) 洪水痕跡による流量と粗度係数の推定手順

本推定法では、非定常流を対象に流量や粗度係数を推定できるが、実河川での多点水位観測のデータの解像度は未だ十分でないことから、ここでは痕跡水位の縦断変化に基づき、流れを定常流として流量と粗度係数を推定した。ここで求める補正粗度係数値は、河床材料や小規模河床波による摩擦抵抗、河道内樹木や堰による抵抗、断面内の流速差の干渉効果などの影響が含まれた粗度係数となる。本推定法では、上述したように、推定対象の中で一区間の補正粗度係数を既知量として与える必要がある。実験であれば水路の素材により粗度係数値を与えることができるが、河川の場合には、上述した要因によって粗度係数値が変化する。このことを踏まえ、次のような手順で補正粗度係数を推定した。

- 1) 対象区間の河床材料の粒径や想定される水理状況により得られる推定粗度係数を既知の粗度係数とする。
- 2) 粗度係数の補正值0とする区間を変化させた推定を実施し、流量と補正粗度係数の組み合わせを求める。
- 3) 粗度係数の補正值0を与える区間によっては、本推定法の適用限界を超える射流が生じる場合、粗度係数の2乗が負となり底面摩擦によりエネルギーが供給される非物理的な現象が生じる場合がある。これらの推定結果を除き、推定結果から対象区間の最上流端の補正粗度係数の平均値を求める。
- 4) 最上流区間の補正粗度係数を与えた推定を実施し、流量と補正粗度係数の組み合わせを求める。

3. 実験結果に基づく推定手順の検証

(1) 実験の概要

実験装置は、図-2に示す長さ9mの水路である。水路床勾配は約1/1,000に設定されている。水路の横断面形状は矩形(CaseR)とし、水路形状を図-2に示すように、水路幅一定のCaseR-R、水路幅を漸縮させたCaseR-C、漸拡させたCaseR-E1と2の4通りに変化した。CaseR-E2についてのみ、水路幅の変化により形状損失が発生する設定とした。下流端には堰が設置されており、堰高によって水位を調節できるようになっている。また、上流端では流量計が設置されており、バルブにより流入流量が調整される。なお、等流実験より、同水路の粗度係数 $n=0.012\text{m}^{-1/3}$ であることが確認されている。

表-1に実験条件を示す。流れは非定常流(CaseR-R, C, E1, 2-U)とし、いずれのCaseについても、上流から表-1に示す時刻0秒での一定流量 Q を供給し、定常状態とした後、計測開始時刻から、各時刻の流量計の値が表-1と

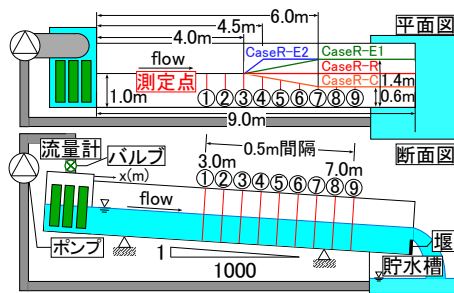


図-2 実験装置の概要

表-1 実験条件

Case名	勾配	流量 (m³/s)
CaseR-R-U	M1	0~100s: 0.01~0.03
M2		100~200s: 0.03~0.01
CaseR-C-U-M2		0~70s: 0.0037~0.0108
CaseR-E1-U	M1	70~140s: 0.0108~0.0037
M2	1/1,000	
CaseR-E2-U-M2		0~40s: 0.0089~0.0145
		40~80s: 0.0145~0.0089

なるようにバルブを調整した。再現性については、同一実験を3回実施し、その誤差が2.5%以内であることを確認している。

測定項目は、水位 $H(m)$ 、流量 $Q(m^3/s)$ である。水位の測定については、図-2の測定点①~⑨で、ビデオカメラの画像を画像解析することで行った。流量については、図-2の測定点①、⑤、⑨で直径約5mmの発砲スチロール球の動きをビデオカメラで撮影しPTV解析を行うことで水表面流速を測定し、これに定常実験より求めた水深と水表面流速と水深平均流速の比との関係を用いて、水深平均流速を求め、この水深平均流速と水位観測より得られる流積との積により算定した。

(2) 結果と考察

図-3は、CaseR-R-U-M2について、痕跡水位に基づく流量と補正粗度係数の推定結果と実測値との比較を示したものである。実測値には、ピーク水位時の流量、ピーク流量および等流実験に基づく粗度係数値を用いた。なお、図中には、粗度係数を与える区間を変えた場合の流量と補正粗度係数の解析結果の全てを示している。本推定では、粗度係数を与えた全ての区間で推定の実行が可能であり、流量と粗度係数の組み合わせは8通りであった。図-3より、(1)流量の推定結果は、最小と最大値の間には13%程度の差があり、ピーク流量を12%程度の誤差で、ピーク水位時の流量を9%程度の誤差で再現していること、(2)ピーク流量に比べ、ピーク水位時の流量を高い精度で再現していること、(3)粗度係数の推定結果は、最大で等流の粗度係数値の17%程度ばらついているものの、その平均値は $0.012m^{-1/3}s$ であり、補正粗度係数値 n は等流時の値と概ね一致すること、などが確認できる。

図-4は、全てのCaseについて、流量の推定結果とピーク水位時の流量およびピーク流量との比較、補正粗度係数の推定結果と等流実験に基づく粗度係数値との比較を行ったものである。これより、(1)いずれのCaseもピーク水位時の流量を最大で10%程度の誤差で再現できること、

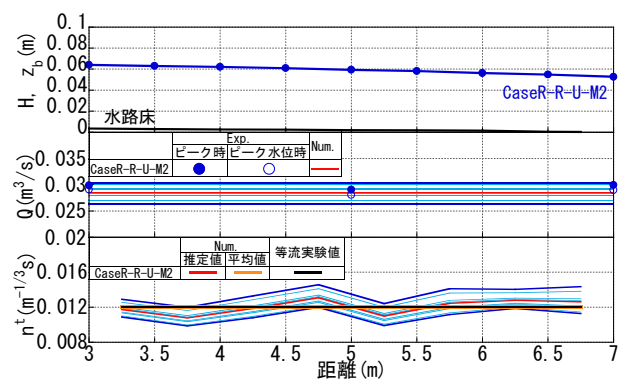


図-3 CaseR-R-U-M2の痕跡水位に基づく流量と粗度

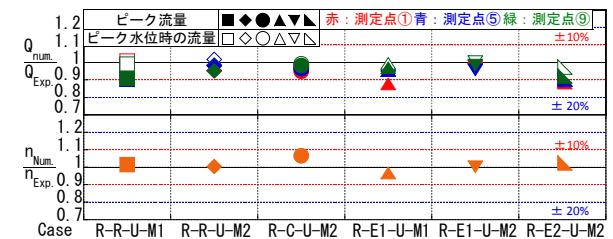


図-4 痕跡水位に基づくピーク水位時の流量と実験値との比較

(2)ピーク流量とは最大で12%程度の差が生じること、(3)等流時の粗度係数を最大8%程度の誤差で再現可能であること、などが確認できる。

以上から、本推定法とその推定手順は、痕跡水位の縦断変化に基づきピーク水位時の流量と粗度係数値を10%程度の誤差で、ピーク流量を12%程度の誤差で再現可能であることがわかった。

4. 遠賀川水系への適用

(1) 遠賀川水系の概要

遠賀川は幹流流路延長61kmの一級河川で、その支川には穂波川、中元寺川、彦山川、金辺川、八木山川、犬鳴川、笹尾川、黒川、西川などがある。遠賀川の基準地点は日の出橋であり、そこでの計画高水位はT.P. 10.46m、計画高水流量は $4,800m^3/s$ 、整備計画目標流量は $3,800m^3/s$ である。図-5に遠賀川流域の航空写真と水位観測所を示す。2012年7月13~14日の豪雨では、遠賀川本川の日の出橋、川島水位観測所、彦山川の伊田水位観測、中元寺川の春日橋水位観測所、穂波川の秋松橋水位観測所の計5観測所で氾濫危険水位を超え、遠賀川本川の日の出橋、勘六橋、大隈水位観測所、彦山川の中島、赤池、添田水位観測所、中元寺川の春日橋水位観測所の計7観測所で観測史上第1位の水位を記録した。

(2) 推定条件の概要

本推定では対象出水を2012年7月13~14日の出水とした。対象河川は遠賀川水系の遠賀川、彦山川、穂波川とし、対象区間は、本推定法が常流を対象としているため、セグメント2より下流とした。さらに、同区間を支川の合流なく流量に大きな変化がないと考えられる区間に分割

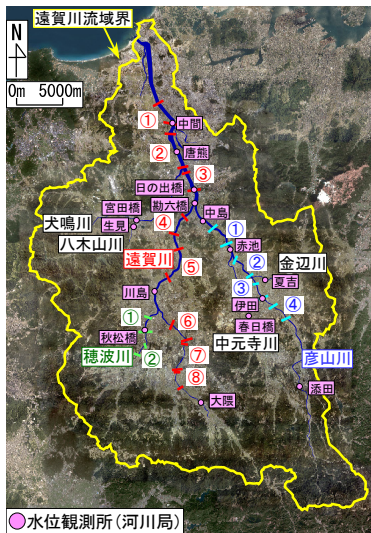


図-5 遠賀川流域の概要と推定対象区間

河川名	解析の 不可	解析対象区間 (k/m～k/m)	河床 勾配	代表粒径 d _R (mm)	セグ メント	対象 断面
遠賀川	×	0/000～6/600	1/2,530	0.407	2-2	H21
	○	①6/800～10/800				
	○	②11/600～15/000	1/1,770	1.111		
	○	③16/000～18/600				
	×	18/800～21/400				
	○	④21/600～23/600	1/1,670	2.016		
	○	⑤24/800～28/800				
	×	29/000～35/200				
	○	⑥35/400～37/400				
○	⑦37/800～41/000	1/550	31.997	2-1		
○	⑧41/200～43/200					
彦山川	×	0/000～3/400	1/1,220	1.365	2-2	H23
	○	①3/600～6/200				
	○	②8/000～10/600	1/420	22.465	2-1	
	○	③12/000～13/400				
	○	④14/600～16/800				
穂波川	×	0/000～1/400	1/870	3.633	2-2	H23
	○	①1/600～3/000				
	×	3/200～4/600	1/340	30.841	2-1	
	○	②4/600～6/000				

し、区間毎に本推定法を適用した。推定対象区間を図-5に示す。なお、図-5中の表には、流量が発散するなど推定が実行できなかった区間についても示している。

対象区間は距離標毎で分割し、距離標毎に河道横断面図から、流積 A 、潤辺 s 、径深 R 、水面幅 B と水深 h との関係、最深河床高 h_b を与えた。河道横断面図には、遠賀川については2009年の測量結果を、彦山川と穂波川については2011年の測量結果を用いた。水面形については、2012年7月13~14日の出水時の痕跡水位を与え、距離標間の一区間に与える粗度係数については、河床材料や流れの状態による推定される推定粗度係数を与えた。

(3) 結果と考察

図-6は、流量の推定結果と出水時のピーク流量との比較を、図-7は、補正粗度係数値の推定結果と出水時の流量と痕跡水位から求めたエネルギー勾配より算定した逆算粗度係数値との比較を示したものである。これらより、流量については、(1)いずれの河川についても最大で30%程度の誤差が生じる区間があること、(2)その他の区間については $\pm 10\%$ 程度の精度で再現されていること、粗度係数については、(3)流量を過小に評価されている区間では過大に、過大に評価されている区間は過小に評価されていること、(4)その他の区間については概ね $\pm 10\%$ 程度の誤差で再現されていること、などが確認できる。誤差の大きな遠賀川の区間④や⑤、彦山川の区間①や③、穂波川の区間①では、いずれも推定粗度係数と逆算粗度係数との差が大きな区間であった。本推定法で用いた痕跡水位は、摩擦抵抗に加え、河川構造物や樹木群、断面内の流速による干渉、河道の湾曲や砂州の影響を含んだものであり、その痕跡水位に基づき推定された補正粗度係数は、当然のことながら、これらの影響を含んだ値となっている。特に、樹木群、断面内の流速による干渉、河道の湾曲や砂州の影響がある場合には粗度係数が対象区間で全体的に大きくなるため、河床材料や流れの状態による推定粗度係数とは大きく異なることとなる。その

ため、粗度係数の補正値を0とした区間では粗度係数値が異なるため、流量や他の区間の補正粗度係数の推定結果に大きな差が生じたと考えられる。一方で、そのような区間以外では流量および粗度係数を再現している。

(4) 河道特性による粗度係数の空間分布の検討

図-8は、推定結果の一例として、遠賀川下流の5.0~20.0kmの推定結果を示したものである。図中には、痕跡水位の縦断変化、曲率、樹木繁茂区間、最深河床高の差もあわせて示している。また、本推定法から得られた補正粗度係数値を与え、水位を境界条件とした不定流解析⁷⁾による解析結果もあわせて示している。これより、補正粗度係数は、推定粗度係数に比べ、(1)堰周辺では、堰によるエネルギー損失のために、その区間での補正粗度係数が大きくなるが、その影響は局所的であること、(2)樹木群がある区間、中島や湾曲部、単列の砂州の発生する区間では補正粗度係数が大きくなること、(3)補正粗度係数を用いた不定流解析結果は水位を再現しており、その値は妥当性であること、などが確認できる。

このように本推定結果は、河道特性の変化による粗度変化を捉えていることが確認できる。これは、本推定法では、壁面摩擦と流体内部の乱れによるエネルギー損失を適切に評価しているためである。このエネルギー損失は、流積 A 、潤辺 s 、流量 Q と補正粗度係数 n' の組み合わせで計算されることから、粗度係数の補正値と河道の抵抗変化や河床勾配の変化とを結びつけることのできる可能性がある。この点については今後の検討課題としたい。

5. おわりに

本研究から、(1)実験結果に基づく検討から、痕跡水位から流量と粗度係数を推定する場合、粗度を与条件として与える区間により、流量と粗度係数の組み合わせが複数求まり、この粗度係数の上流区間の平均値を与えた推

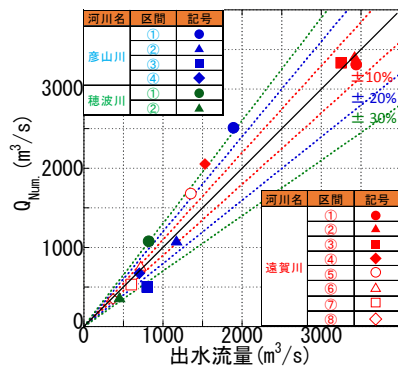


図-6 推定流量とピーク流量との比較

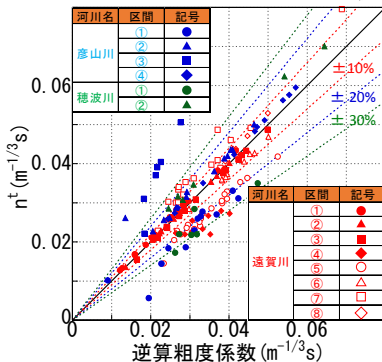


図-7 補正粗度係数と逆算粗度係数の比較

定を再度行うことで、流量、粗度係数ともに $\pm 12\%$ 程度の誤差で推定できること、(2)(1)の手順で、実河川の流量は、樹木や湾曲により推定粗度係数よりも粗度係数が大きくなる区間を除いては、 $\pm 10\%$ 程度の誤差で推定できること、(3)本推定法より得られた補正粗度係数値は、洪水痕跡より求められた逆算粗度係数にある程度推定でき、その値は相対的に堰周辺の区間、樹木群が繁茂する区間、単列砂州が発生する区間、湾曲部などで高くなる傾向があること、(4)補正粗度係数値を用いた不定流解析は、痕跡水位を再現しており、その値は妥当であること、などが確認された。

謝辞：本研究を実施するに当たり、遠賀川河川事務所の関係各位にはデータの提供など多大な協力を得た。また、本研究では、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：16K06515、研究代表者：重枝末玲)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

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準維持管理編，http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri/kasen/pdf/gijutsukijun.pdf, 2011.
- 2) 国土交通省：河川砂防技術基準調査編，http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/00.pdf, 2012.
- 3) 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，水工学論文集，第55巻，pp.S511-S516，2011.
- 4) 吉田圭介，石川忠晴：Adjoint法による流量ハイドログラフ

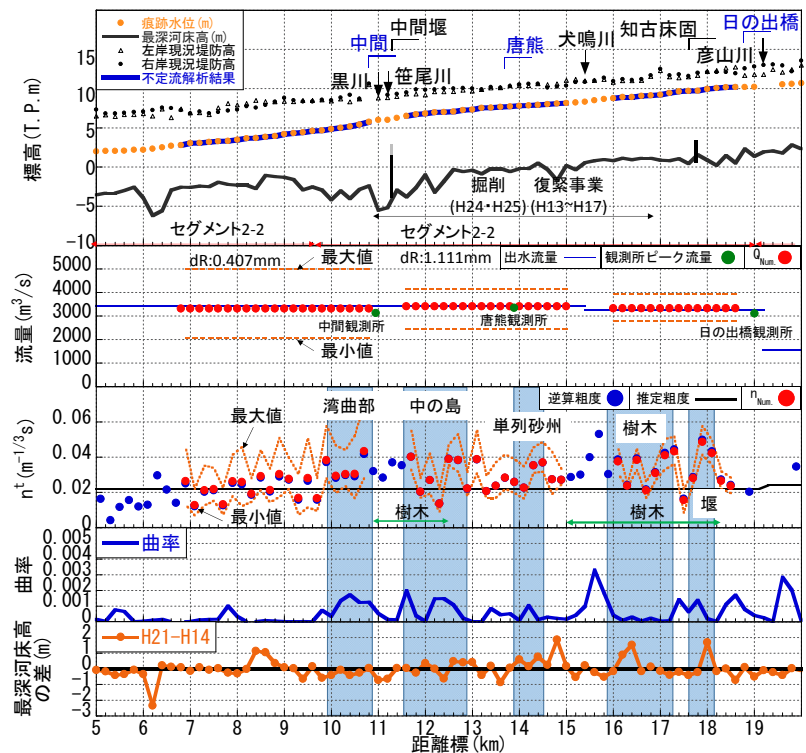


図-8 河道特性と粗度係数の空間分布(遠賀川7～19km)

推定法に関する研究，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.4，pp.I_1261-I_1266，2012.

- 5) 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，pp.I_355-I_360，2017.
- 6) 重枝末玲，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)，pp.I_655-I_660，2017.
- 7) 重枝末玲，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)，pp.I_643-I_648，2017.
- 8) Burguette, J. and Garcia-Navarro, P.: Efficient construction of high-resolution TVD conservative schemes for equations with source terms: application to shallow water flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.37, pp.209-248, 2001.
- 9) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372, 1981.
- 10) Bermudez, A. and Vazquez, M.: Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms, *Computers & Fluids*, Vol.8, No.8, pp.1049-1071, 1994.
- 11) 秋山壽一郎，浦 勝，重枝末玲，アキレス クマール ジャ：1次元浅水流方程式のFDSIに基づく数値解析，水工学論文集，第44巻，pp.473-478，2000.

(2017. 4. 3受付)