

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

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・田口 英司³・武久 晋太郎³

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)

E-mail:mirei@civil.kyutech.ac.jp

²フェロー会員 九州工業大学教授 (同上)

E-mail:akiyama@civil.kyutech.ac.jp

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)

E-mail: q345312e@mail.kyutech.jp

E-mail: takehisa.shintaro634@mail.kyutech.jp

本研究は、水深方向に粗度係数が変化する複断面河道を対象に水面形の経時変化に基づく流量と粗度係数の時空間推定法を構築するとともに、不等流および不定流の実験結果に基づき、その予測精度について検討したものである。まず、対象とする流れを常流として、水路の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合成粗度係数を与条件として、計算格子点での流量と計算格子点での合成粗度係数を求める推定法を開発した。次に、複断面直線水路での定常・非定常実験を実施し、水位・流量ハイドログラフと粗度係数を求め、これらの結果に基づき本推定法を検証した。その結果、水面形の経時変化を用いた本推定法は、複断面水路での不等流および不定流について流量や干渉効果を含む粗度係数を推定可能であることが確認された。

Key Words: estimation method, discharge, roughness coefficient, water surface profile, boundary condition, steady and unsteady flow, compound channel

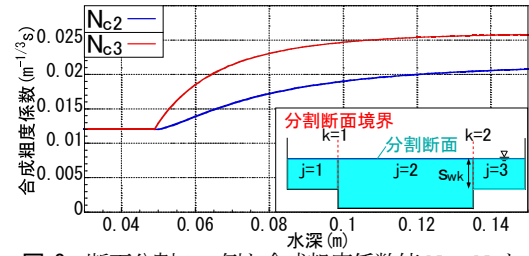
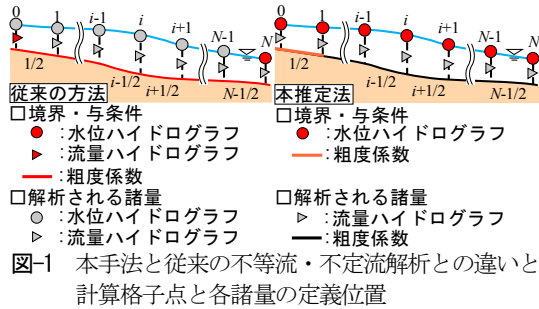
1. はじめに

近年、河道や治水施設の治水機能の現状を把握し、その機能の維持や改善を行うための計画型管理、いわゆるストックマネジメントが求められている¹⁾。洪水時の水位、流量、抵抗特性の時空間変化の総合的な把握²⁾は、このようなマネジメントの基礎となるデータであり、その蓄積が不可欠である。

洪水時の水位・流量・抵抗特性などの時空間変化の把握は、水位の多点連続観測³⁾、ADCPを用いた新たな流量観測⁴⁾に加え、水位観測データとのデータ同化手法に基づく数値解析⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾により試みられている。観測水面形の経時変化をデータ同化させた洪水流・河床変動解析法は、任意の地点での流量ハイドログラフ、粗度係数、河床位の推定⁹⁾に、粒子フィルタ⁵⁾、アジョイント法⁶⁾、力学的内外挿法の考え方⁸⁾に基づく観測水位ハイドログラフをデータ同化させた解析法は、洪水時の流量ハイドログラフや抵抗特性の変化の推定に有効な手法であることが明らかになっている。著者ら⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾は、前述のデー

タ同化手法のように複数の解析結果に基づき最適解を求める手法とは異なり、水面形の経時変化を直接入力条件とした流量・粗度係数の推定法を開発し、直線水路や漸拡・漸縮水路での非定常流れの流量ハイドログラフや粗度係数分布を十分な精度で予測できることを示している。このような水位の観測データに基づく流量や粗度係数の推定法は、洪水期間中の抵抗特性の変化を合理的に求める手法と考えられ、これらの結果と河道特性などの物理的な条件と結びつけることができれば、河道特性に基づく抵抗特性の変化の推定への第一歩になると考えられる。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、水面形の実測データから、実河道の流量と抵抗特性の変化を求めることが可能な推定法の開発を最終的な目的としたものである。ここでは、(1)著者ら¹¹⁾の水面形の経時変化に基づく流量と粗度係数の時空間推定法をさらに発展させ、複断面水路への適用を可能にするとともに、(2)入力条件である水位の経時変化のデータ処理法の検討を加え、さらに、(3)複断面直線水路での不等流および不定流の実験結果に適用し、その予測精度について検討した。



2. 推定法の概要

本推定法の特徴は、従来の水理解析とは異なり、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、計算格子点での流量と粗度係数を求める点にある。図-1 に従来の水理解析と本推定法の違いを示す。なお、本推定法では常流のみを対象とする。

(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次元浅水流方程式¹²⁾である。

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

$$\mathbf{U} = (A \quad Q)^T; \mathbf{E} = (Q \quad Q^2 / A + gI_1)^T; \mathbf{S} = (0 \quad gI_2 + gA(S_0 - S_f))^T$$

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(= $-\partial z_b / \partial x$)、 I_1 : 静水圧項、 I_2 : 河道幅の変化による静水圧項、 S_f : 摩擦勾配であり、この取り扱いについては後述する。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 I_1 や I_2 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、参考文献¹⁰⁾と同様に、式(2)のように dh/dx を変形し、これらの項を消去した。

$$dI_1 / dx = I_2 + A \cdot \partial h / \partial x + A / B \cdot \partial A / \partial x = I_2 + A \cdot dh / dx \quad (2)$$

式(1)の運動方程式は、式(2)を用いて式(3)のように変形した。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + c^2 \frac{dA}{dx} = gA \left(S_0 - S_f - \frac{dh}{dx} + \frac{1}{B} \frac{dA}{dx} \right) \quad (3)$$

ここに、 B : 水面幅、 c : 波速(= $\sqrt{gA/B}$)である。

以上から、式(1)の基礎方程式は、式(4)のように表すことができ、この方程式を離散化する。

$$\partial \mathbf{U} / \partial t + \mathbf{J} \cdot d\mathbf{U} / dx = \mathbf{H}; \mathbf{U} = (A \quad Q)^T; \quad (4)$$

$$\mathbf{H} = \left(0 \quad gA \left(S_0 - S_f - \frac{dh}{dx} + \frac{1}{B} \frac{dA}{dx} \right) \right)^T$$

ここに、 \mathbf{J} は流束ヤコビアンであり、 $\mathbf{J} = \mathbf{R}\mathbf{R}^1$ のように対角化可能である。ここに、 \mathbf{A} : 固有値ベクトル、 \mathbf{R} : 右固有ベクトル、 \mathbf{R}^1 : 左固有ベクトルである。

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、

式(5)で示すように、ベクトル \mathbf{H} に対しても特性速度を用いて式変形を行う。

$$\partial \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{U} / \partial t + \tilde{\mathbf{A}} \cdot d\tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{U} / dx = \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{A}}^{-1} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{H} \quad (5)$$

式(5)の左辺は、スカラーの波動方程式であり、 $\tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{U}$ 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。なお、近似ヤコビアン $\tilde{\mathbf{J}}$ は、各時刻において空間で一定と仮定する。

(2) 摩擦勾配の取り扱い

複断面直線水路では、入力条件となる水位の測定結果に摩擦抵抗の影響に加え断面内の流速による干渉効果の影響が含まれる。粗度係数の推定結果は、当然のことながら、これらの影響が含まれる合成粗度係数値となる。本推定法では、摩擦勾配 S_f を、式(6)に示す井田¹³⁾による合成径深 R_c を用いた断面分割法で算定した。図-2 に断面分割の一例を示す。

$$S_f = N_c^2 Q^2 / (A^2 R_c^{4/3}); R_c = \left(\sum A_j R_j^{2/3} / A \right)^{3/2} \quad (6)$$

ここに、 N_c : 合成粗度係数、 j : 分割断面番号である。

断面分割法による摩擦勾配は、式(6)以外にも、低水路と高水敷の粗度分布のみを考慮した場合²⁾は式(7)で、低水路と高水敷の粗度分布と低水路と高水敷の流速の干渉効果を考慮した場合²⁾は式(8)で表される。

$$S_f = Q^2 / \left\{ \sum A_j R_j^{2/3} / n_j \right\}^2 \quad (7); \quad S_f = \left(Q / \sum \hat{u}_j A_j \right)^2 \quad (8)$$

ここに、 $\hat{u} = u / S_f^{1/2}$ であり、式(9)の分割断面 j に関する運動方程式から求める。

$$n_j^2 S_f / (A_j R_j^{1/3}) \cdot \hat{u}_j^2 + \sum_{k_j} f \cdot \text{sgn}(\Delta u_{k_j}) / (g A_j) \cdot \Delta \hat{u}_{k_j}^2 S_{w k_j} = 1 \quad (9)$$

ここに、 f : 境界混合係数、 k : 分割断面境界についての添字、 k_j : 分割断面境界 k で分割断面 j にかかわる量についての添字、 s_w : 分割断面境界の潤辺長、 Δu_{k_j} : 分割断面境界 k での流速差、 $\text{sgn}(\bullet)$: \bullet が正の場合1を、負の場合-1を返す関数である。なお、境界混合係数 f は水面幅と低水路幅との関係により設定される¹⁴⁾。

式(6)と式(7)、(8)の摩擦勾配を等値とすると、式(7)、(8)は式(6)の形で表すことができる。式(7)、(8)に対応する合成粗度係数 N_{c2} , N_{c3} は、それぞれ式(10)、(11)となる。

$$N_{c2} = A R_c^{2/3} / \left(\sum \frac{A_j R_j^{2/3}}{n_j} \right) \quad (10); \quad N_{c3} = A R_c^{2/3} / \left(\sum \hat{u}_j A_j \right)^2 \quad (11)$$

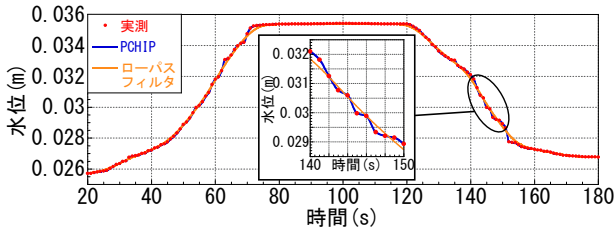


図-3 PCHIP補間とローパスフィルタ後の水位ハイドログラフ

図-2 に合成粗度係数値 N_2 , N_3 と水深 h との関係の一例を示す。これより、水深が高水数よりも高くなると、 N_3 は、 N_2 よりも大きくなり、境界での流れの干渉効果を含む値になることが確認できる。

(3) 離散化の概要

本推定法の離散化には、参考文献と同様¹¹⁾に、流束差分法¹⁵⁾を用いた。また、式(4)のベクトル \mathbf{H} についても、同様に、特性速度により風上化を行った¹⁶⁾。離散化された連続の式と運動方程式は、紙面の都合上、参考文献¹¹⁾を参考されたい。本推定法では、連続の式から粗度係数を推定した後、運動方程式から流量を推定する。ベクトル \mathbf{H} を特性速度で風上化した場合に、流れが常流の場合にのみベクトル \mathbf{H} に起因する数値粘性が付加され、連続の式の離散式に水路床勾配、水路形状の変化、摩擦勾配の項が含まれることとなる。この項を考慮することで非物理的な流れの発生を防ぐことが可能となる¹⁷⁾。ここでは、このような物理的な法則を再現できる数値解析手法に基づき、連続の式から粗度係数の推定を行った。粗度係数 n を式(12)のように、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 $\Delta n'^2_{t+1/2}$ の和で表し、粗度係数の 2 乗の補正量 $\Delta n'^2_{t+1/2}$ を求めた。なお、粗度係数の算定には、一区間の粗度係数を与える必要があり¹¹⁾、本研究では図-1 の最上流の区間 1/2 の粗度係数を既知とし、補正量に 0 を与え、 $\Delta n'^2$ を求めた。

$$n'^2_{t+1/2} = n'^2_{t+1/2} + \Delta n'^2_{t+1/2} \quad (12)$$

(4) 境界条件

境界条件には式(5)から得られる境界条件式を用いた。ここでは、紙面の都合上、上流側の境界条件についてのみ述べる。

式(13)に、上流端境界条件式を示す。同式は $Q/2\bar{c} - (1 + \bar{u}/\bar{c})A/2$ が速度 $\bar{u} - \bar{c}$ で上流側へ伝播することを表す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ Q/2\bar{c} - (1 + \bar{u}/\bar{c})A/2 \right\} + (\bar{u} - \bar{c}) \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Q/2\bar{c} - (1 + \bar{u}/\bar{c})A/2 \right\} = (13) \\ g\bar{A} \left(S_0 - S_f - dh/dx + 1/\bar{B} \cdot dA/dx \right) / 2\bar{c}$$

式(13)は、スカラーの波動方程式であることから、上流端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、与条件として与えた水位から流積 $A^{t+\Delta t}$ を求め、流量 $Q^{t+\Delta t}$ を算出した。

(5) 入力条件

入力条件は、図-1 の各格子点での水位ハイドログラフと一区間の粗度係数である。観測結果の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)¹⁸⁾を適用し、測定時間間隔間のデータ補間を行った。PCHIP 補間された水位ハイドログラフを与えた場合、粗度係数の振動が発生する⁹⁾¹⁰⁾。これを防ぐために、補間された水位ハイドログラフにローパスフィルタ¹⁹⁾を適用し、高周波成分の波を除去した。ローパスフィルタにはベッセル関数¹⁹⁾を用いた。これは浅水流方程式の適用の前提となる長波よりも周期の短い波が、観測データに混在する可能性があるためであり、風波の周期が 10 秒以下であり、長周期波が 30 秒程度であることを踏まえ、ローパスフィルタの阻止端域周波数を風波の周期に対応する 0.1Hz とした。図-3 に PCHIP 補間とローパスフィルタを適用した水位ハイドログラフの一例を示す。これより、フィルタを適用後の結果は、概ね観測値を再現していることが確認できる。

(6) 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) 離散化された連続の式から粗度係数の 2 乗の補正量 $\Delta n'^2$ を求め、式(12)から時刻 t の粗度係数 n を求める。
- 5) 手順 4) で求めた粗度係数 n' を用いて、運動方程式から、流量 $Q^{t+\Delta t}$ を求める。
- 6) 境界式(式(13))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。

3. 実験の概要

実験装置は、図-4 に示す長さ 9m, 低水路幅 0.4m, 高水数幅 0.6m, 低水路高さ 0.049m の複断面水路である。水路床勾配は約 1/500 に設定されている。上流端には流量計が設置され、バルブにより流入流量が、下流端には堰が設置され、堰高により水位が調節される。同水路の粗度係数は等流実験より、低水路で $n=0.012\text{m}^{1/3}\text{s}$, 高水数で $n=0.033\text{m}^{1/3}\text{s}$ であることが確認されている。

流れは定常流 (Case C-R-S) および非定常流 (Case C-R-U) と

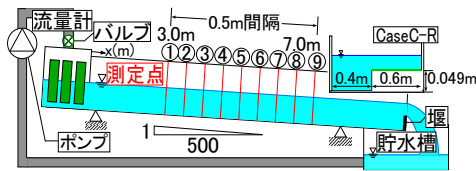


図-4 実験装置の概要

し、CaseC-R-S については、上流から一定流量 $Q=0.0242\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、水面形が堰上げ背水(CaseC-R-S-M1)と低下背水(CaseC-R-S-M2)となるように、下流端の堰高を設定した。CaseC-R-U では上流から一定流量 $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ を供給し定常状態とした後、計測開始時刻から、流量計が70秒後に $Q=0.0298\text{m}^3/\text{s}$ 、140秒後に $Q=0.0041\text{m}^3/\text{s}$ となるように、バルブを調整した。流量の再現性については、同一実験を3回実施し、その誤差が3.2%以内であることを確認している。下流端の堰高は、初期の水面形が堰上げ背水(CaseC-R-U-M1)となるように、低水路で低下背水(CaseC-R-U-M2)となるように設定した。

測定項目は、水位 $H(\text{m})$ 、流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ である。水位については、定常実験ではポイントゲージで、非定常実験ではビデオカメラで撮影した画像を画像解析することで、図-4の測定点①～⑨で観測を行った。流量については、CaseC-R-S では流量計で、CaseC-R-U では直径約5mmの発砲スチロール球を流し、その動きをビデオカメラで撮影し PIV 解析を行うことで水表面流速を測定した後、低水路と高水敷の断面平均の水表面流速に、対数則から得られる水表面流速と水深平均流速の比から断面平均流速を求め、この断面平均流速と水位から求めた流積の積により算定した。測定点①、⑤、⑨で観測を行った。

4. 結果と考察

図-5に、CaseC-R-Sの観測水面形、流量および粗度係数の推定値と実験結果との比較を示す。粗度係数の実験結果には、等流実験の低水路および高水敷の粗度係数、標準的な境界混合係数値 $f=0.17$ とした式(11)の合成粗度係数、実験結果より算定したエネルギー勾配に基づく合成粗度係数を示している。これより、(1)いずれのCaseについても推定法は流量と粗度係数を再現していること、(2)推定された粗度係数の平均値はCaseC-R-S-M1で $N_2=0.020\text{m}^{1/3}\text{s}$ 、CaseC-R-S-M2で $N_2=0.022\text{m}^{1/3}\text{s}$ であり、 N_2 値に比べ高く、干渉効果を考慮した N_3 値付近の値となること、などがわかる。

図-6に、CaseC-R-Uの流量・粗度係数の推定結果と実験値との比較を示す。なお、図中には解析条件として与えた水面形も示している。また、上流端の粗度係数については、境界混合係数 f の経時変化が不明なため、水路断面形状に基づき $f=0.17^{14)}$ とした N_3 を与えた。これらより、本推定法は、(1)流量ハイドログラフの実験結果を

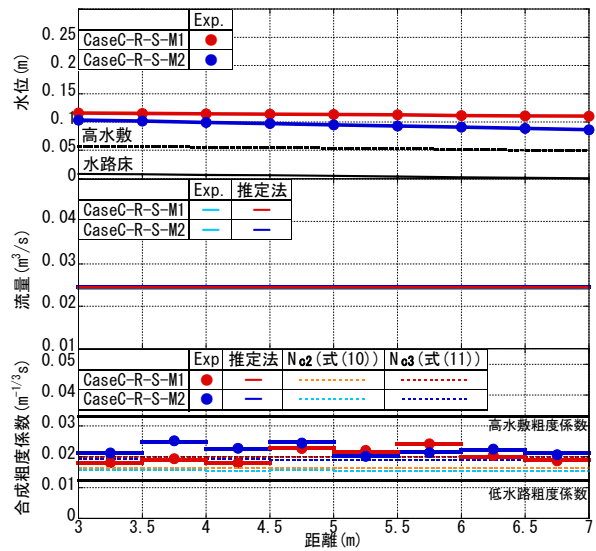


図-5 CaseC-R-Sの定常実験結果に基づく検証

再現していること、(2)CaseC-R-U-M1では合成粗度係数の推定結果は振動はあるものの概ね一定であること、(3)CaseC-R-U-M2では合成粗度係数の推定結果は、流れが低水路から高水敷へ乗り上がった後は高水敷の粗度の影響により、水深の上昇とともに大きく、水深の減少とともに小さくなり、水深による粗度係数の変化を捉えていること、などが確認できる。なお、流れが低水路から高水敷へあるいはその逆の場合に粗度係数が急増する要因は、そこで発生する鉛直方向の渦の影響により、底面粗度以外のエネルギー損失が発生するためと考えられる。

上記の検討では境界混合係数 f を仮定し合成粗度係数を推定したが、実務では洪水痕跡に基づく逆算粗度係数を用いることが多い。ここでは、CaseC-R-Uの痕跡水位に基づき、参考文献¹¹⁾の方法でピーク流量と逆算粗度係数を同時推定し、得られた粗度係数値を上流端の粗度係数として与え解析を実施し、その再現性について検討した。与えた逆算粗度係数値は、CaseC-R-U-M1で $0.0164\text{m}^{1/3}\text{s}$ 、CaseC-R-U-M2で $0.0197\text{m}^{1/3}\text{s}$ である。なお、低水路の粗度係数については等流実験の値を用いた。図-7は、流量と粗度係数の推定結果を示したものである。これより、本推定法は、(1)流量ハイドログラフの実験結果を概ね再現していること、(2)粗度係数の経時変化についても、CaseC-R-U-M1の0~50秒の間で違いが見られるものの、図-6と同様な経時変化を示すことなどがわかる。このように、本推定法は、痕跡水位に基づく粗度係数を用いた場合でも、流量の経時変化の推定が可能であることが確認された。

粗度係数の推定値にばらつきや振動が生じている理由は、推定された粗度係数には水位・河床位の計測誤差や1次元浅水方程式では表せない3次元的な流れの影響が含まれるためと考えられる。実際、不等流・不定流解析の解析結果を入力条件として推定したところ、本推定法は流量・粗度係数の設定値を再現した。

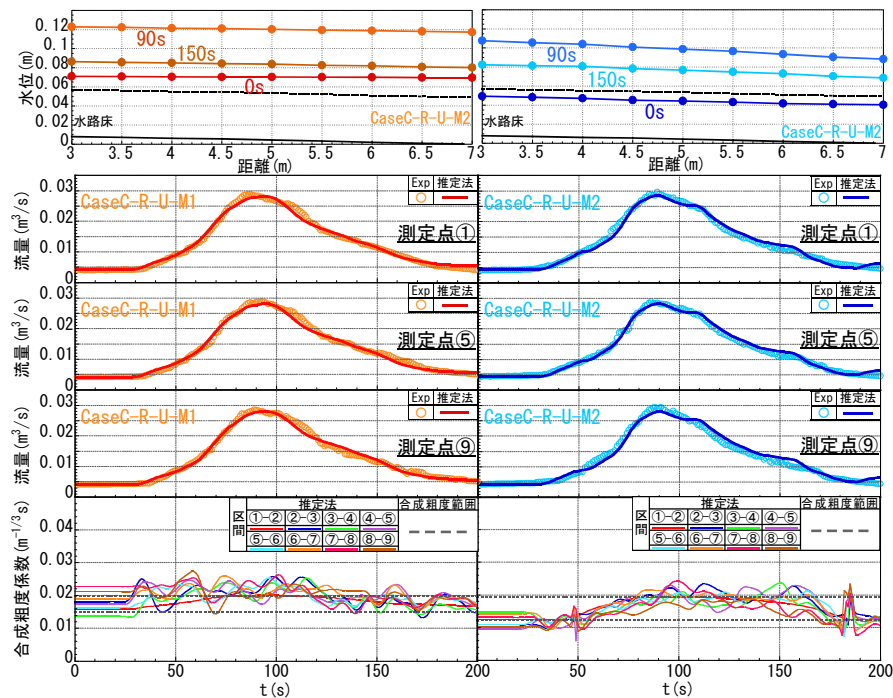


図-6 CaseC-R-Uの非定常実験結果に基づく検証(水深と合成粗度係数を与えた場合)

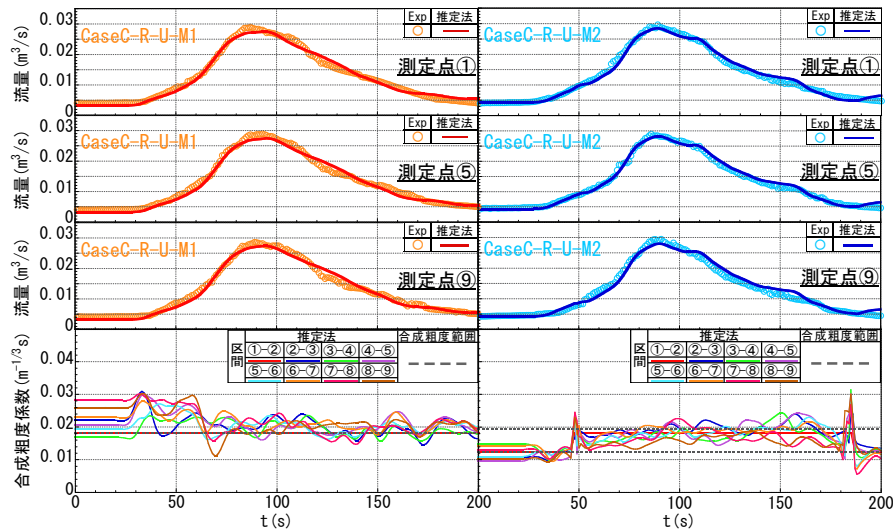


図-7 CaseC-R-Uの非定常実験結果に基づく検証(逆算粗度係数を与えた場合)

図-8に、水深とCaseC-Rの粗度係数、 N_2 、 N_3 値との関係について比較を示す。 N_3 値と水深 h との関係は $f=0.17$ で求めた。これより、本推定法の推定結果は、(1)粗度係数は水深に対して増加傾向にあること、(2)単断面から複断面水路へと遷移する水深 $h=0.049\text{m}$ 付近で鉛直方向の渦によりエネルギー損失が生じるため、粗度係数の値が大きくなること、(3)ばらつきはあるものの、 $f=0.17$ のときの N_3 の水深に応じた合成粗度係数周辺にプロットされていること、などが確認できる。なお、推定結果のプロットから得られた近似式は、 $f=0.2$ 程度であり、 $f=0.17$ の N_3 と概ね一致していた。

以上のように、本推定法は、低水路と高水敷の流速差による干涉効果の影響を捉えることができ、その結果、複断面水路で定常の流量及び粗度係数及び非定常流の流量の経時変化を十分な精度で再現できることがわかった。

5. おわりに

本研究から、本推定法は、(1)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、(2)低水路と高水敷の流速差による干涉効果を含む粗度係数が推定可能であること、(3)痕跡水位に基づく逆算粗度係数を用いた場合でも、流量・粗度係数の経時変化の推定が可能であることが確認された。

謝辞：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：重枝未玲)の助成を受けた。実験の実施には、本学学部生の木原寛満君、古川英明君には多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

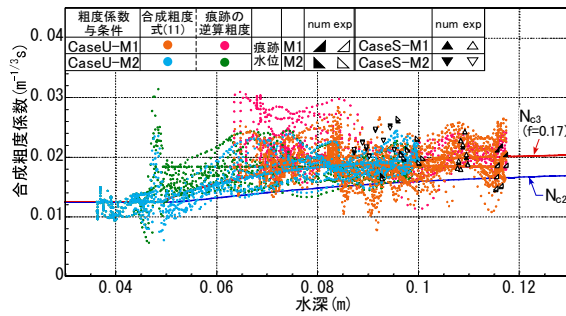


図-8 合成粗度係数と水深との関係

- 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/fjikanri/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/chouusa/pdf/00.pdf, 2012.
- 3) 二瓶泰雄，木水啓：H-ADCP観測と河川流量計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築，土木学会論文集B, Vol.63, No.4, pp.295-310, 2007.
- 4) 福岡捷二：大規模洪水に適用する河道の設計・管理技術，第50回水工学に関する夏期研修会講義集Aコース，pp.A-7-1-A-7-20, 2014.
- 5) 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.
- 6) 吉田圭介，石川忠晴：Adjoint法による流量ハイドログラフ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.
- 7) 渡邊明英，見上哲章，小島崇，松延和彦，鈴木裕三，藤澤慎二郎：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.
- 8) 柏田仁，二瓶泰雄：一次元不定流解析のための新たな水位データ同化手法の開発，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73, No.4, I_595-I_600, 2017.
- 9) 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)，Vol.73, No.4, pp.I_655-I_660, 2017.

- 10) 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)，Vol.73, No.4, pp.I_643-I_648, 2017.
- 11) 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，第23巻，pp.73-78, 2017.
- 12) 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.
- 13) 井田至春：広巾員水路の定常流-断面形の影響について，土木学会論文集，第69号別冊(3-2)，pp.1-18, 1960.
- 14) 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.
- 15) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol.43, pp.357-372, 1981.
- 16) Bermudez, A. and Vazquez, M.: Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms, *Computers & Fluids*, Vol.8, No.8, pp.1049-1071, 1994.
- 17) 秋山壽一郎，浦勝，重枝未玲，アキレス クマール ジヤ：1次元浅水流方程式のFDSに基づく数値解析，水工学論文集，第44巻，pp.473-478, 2000.
- 18) Fritsch, F. N. and Carlson, R. E.: Monotone Piecewise Cubic Interpolation, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol.17(2), pp.238-246, 1980.
- 19) Parks, T. W. and Burnus, C. S.: Digital Filter Design, *John Wiley & Sons*, p.368, 1987.

(2017. 9. 29 受付)

ESTIMATION FOR DISCHARGE AND ROUGHNESS COEFFICIENT BY CONTINUOUS OBSERVING WATER LEVEL IN COMPOUND CHANNEL

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Eiji TAGUCHI and Shintaro TAKEHISA

A numerical method for time-space simultaneous estimation of discharge and roughness coefficient based on temporal change of water surface profile is developed. The method 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 experiments of steady and unsteady flow in compound channel were conducted and temporal change of water level and discharge were observed. The estimation method was verified against these experimental data. These verifications showed that proposed method can reproduce the discharge hydrograph as well as the increasing of the roughness coefficient due to the effects of apparent shear stress acting on a vertical plane along an interface between a main channel and a flood plain reasonably.