

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

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²・阿部 琢哉³・田口 英司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:p345301t@mail.kyutech.jp, q345312e@mail.kyutech.jp

本研究は、任意の断面形状の河道に適用可能な水位を境界条件とした 1 次元不定流解析法、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新たに構築するとともに、漸拡水路での不等流計算結果、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ものである。本研究から、水位を境界条件とした不定流解析法は、漸拡水路における不等流および不定流の水位・流量を十分な精度で再現できること、水面形の経時変化を用いた推定法は、不等流および不定流の流量・粗度係数を推定可能であること、粗度係数の逆算が可能であることが確認された。

Key Words: *discharge, roughness coefficient, water surface profile, boundary condition, steady and unsteady flow, expanded channel*

1. はじめに

安全・安心が持続可能な河川管理にとって、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し、そのデータを蓄積することは重要である¹⁾。

洪水時の水位、流量、抵抗特性の時空間変化等の総合的な把握は、一般に観測や数値解析結果に基づき行われる。水位観測については、多点での連続的に行われ、水面形の経時変化のデータが得られるようになってきており²⁾、流量観測については技術発展³⁾は目覚ましいが、多点での連続観測には至っていない。

近年では、水位の観測データと数値解析結果を同化させることで、流量や抵抗特性に関する予測を行う数値モデルが開発されている^{3,4,5)}。著者ら^{6,7)}は、水面形を直接入力条件として、流量・粗度の推定法を構築し、その予測精度を示した。これらの研究から、水位の観測データに基づく流量および粗度係数の推定手法は、洪水期間中の抵抗特性の変化を合理的に決定できる可能性を示している。

これまで、実務では、観測水位に基づく逆算粗度や河

道状況から粗度を推定する方法¹⁾により、抵抗特性が把握され水位解析に用いられてきた。このような解析手法は過去の洪水の再現には用いることができるが、経験のない洪水に対してモデルパラメータを設定することは難しい。実測水面形から、流況や河道特性と抵抗特性との関係を求めることが可能となれば、これまでの実績に基づくパラメータ推定から物理的なパラメータ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ている。ここでは、河道の平面特性の変化は、そこでの流量や抵抗特性に影響を及ぼすことを踏まえ、著者ら^{6,7)}が開発した矩形一様断面を対象にした解法をさらに発展させ、(1)任意の断面形状の河道に適用可能な水位を境界条件とした 1 次元不定流解析法、(2)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新たに構築するとともに、(3)漸拡水路での不等流計算結果、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ものである。

2. 数値モデルの概要

本研究では、対象とする流れを常流とし、以下に示す任意の横断面水路に適用可能な①上下流端の水位ハイドログラフを境界条件とした1次元不定流解析法、②水面形の経時変化を入力条件とした流量と粗度の推定法を構築した。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。

(1) 基礎方程式

不定流解析法と推定法の基礎方程式は、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⁸⁾である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{dE}{dx} &= S \\ U &= (A \quad Q)^T; E = (Q \quad Q^2/A + gI_1)^T; \\ S &= (0 \quad gI_2 + gA(S_0 - S_f))^T \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 x は流下方向、 U は保存量ベクトル、 E は流束ベクトル、 S は発生項・消滅項ベクトル、 A は流積、 Q は流量、 g は重力加速度、 S_0 は河床勾配、 S_f は摩擦勾配、 I_1 は静水圧項、 I_2 は河道幅の変化による静水圧項である。流束ベクトル E は、独立変数 x 、 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。静水圧項 I_1 、河道幅の変化による静水圧項 I_2 、水路床勾配 S_0 と摩擦勾配 S_f は、式(2)で計算される。

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^h (h(x, A) - \eta) \sigma(x, \eta) d\eta; I_2 = \int_0^h (h(x, A) - \eta) \frac{\partial \sigma(x, \eta)}{\partial x} d\eta \\ S_0 &= -\partial z_b / \partial x; S_f = n^2 u |u| / R^{4/3} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 h は水深、 z_b は河床高、 η は底面からの位置、 $\sigma(x, \eta)$ は η での河道幅である。 n はマンニングの粗度係数、 u は流速(= Q/A)、 R は径深である。

式(2)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、この項を消去するように、式(1)中の I_1 を含む項を、式(3)のように変形する。

$$dI_1/dx = \partial I_1/\partial x + \partial I_1/\partial A \cdot \partial A/\partial x \quad (3)$$

Leipniz'sルールより、式(3)中の $\partial I_1/\partial x$ は式(4)となる。

$$\frac{\partial I_1}{\partial x} = \int_0^h \left\{ (h - \eta) \frac{\partial \sigma(x, \eta)}{\partial x} + \sigma(x, \eta) \frac{\partial (h - \eta)}{\partial x} \right\} d\eta = I_2 + A \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4)$$

同様に、 $\partial I_1/\partial A$ は式(5)で表される。

$$\frac{\partial I_1}{\partial A} = A \frac{\partial h}{\partial A} = A/B \quad (5)$$

ここに B は水面幅である。また、 dh/dx は式(6)で表されることから、 dI_1/dx は最終的に式(7)で表される。

$$dh/dx = \partial h/\partial x + \partial h/\partial A \cdot \partial A/\partial x = \partial h/\partial x + 1/B \cdot \partial A/\partial x \quad (6)$$

$$dI_1/dx = I_2 + A \cdot \partial h/\partial x + A/B \cdot \partial A/\partial x = I_2 + A \cdot dh/dx \quad (7)$$

式(7)から、式(1)の運動方程式は式(8)のように表される。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + c^2 \frac{dA}{dx} = gA \left(S_0 - S_f - \frac{dh}{dx} + \frac{1}{B} \frac{dA}{dx} \right) \quad (8)$$

ここに、 c は波速(= gA/B)⁰⁵⁾である。

以上から、式(1)の基礎方程式は、式(9)のように表すことができ、以下ではこの方程式を離散化する。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + J \frac{dU}{dx} = H \quad (9)$$

$$U = (A \quad Q)^T; H = (0 \quad gA(S_0 - S_f - dh/dx + 1/B \cdot dA/dx))^T$$

ここに、 J は式(10)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(10)で表される固有値 Λ 、右固有行列 R 、左固有行列 R^{-1} を得ることができる。

$$J = \frac{\partial E}{\partial U} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ c^2 - u^2 & 2u \end{pmatrix} = R \Lambda R^{-1}; \quad (10)$$

$$A = \begin{pmatrix} u + c & 0 \\ 0 & u - c \end{pmatrix};$$

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

境界条件には、式(11)の特性曲線式を用いる。

$$\begin{aligned} \partial(u + 2c)/\partial t + (u + c) \partial(u + 2c)/\partial x &= g(S_0 - S_f) \\ \partial(u - 2c)/\partial t + (u - c) \partial(u - 2c)/\partial x &= g(S_0 - S_f) \end{aligned} \quad (11)$$

(2) 離散化の概要

1次元不定流解析および流量・粗度の推定法のいずれも離散化には流束差分法⁹⁾を用いた。各諸量は図-1に示す計算格子点で定義した。離散化された連続の式と運動方程式を式(12)に示す。数値流束と同様に、発生・消滅ベクトルについても特性速度で風上化を行った¹⁰⁾。

$$U_i^{t+\Delta t} = U_i^t - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\delta E_{i+1/2}^- + \delta E_{i-1/2}^+ \right] \quad (12)$$

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

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

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

$$\beta^1 = -\tilde{S}_2 / 2\tilde{c}; \beta^2 = -\beta^1; \Delta A_{i+1/2} = A_{i+1} - A_i; \Delta Q_{i+1/2} = Q_{i+1} - Q_i;$$

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

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

式(12)中の発生消滅項 \tilde{S}_i は、河道形状に関する項 \tilde{S}_g と底面摩擦項 \tilde{S}_τ とに分け、式(13)のように取り扱う。

$$\tilde{S}_2 = \tilde{S}_g - \tilde{S}_\tau; \tilde{S}_\tau = g \tilde{A} \cdot n^2 \tilde{Q} |\tilde{Q}| / \tilde{A}^2 \tilde{R}^{4/3}; \quad (13)$$

$$\tilde{S}_g = -g \tilde{A} \Delta z_b - g \tilde{A} \Delta h + \tilde{c}^2 \Delta A$$

上下流端の境界条件には、それぞれ式(11)の特性曲線式から得られる式(14)と(15)を用いた。

上下流端の格子番号をそれぞれ $i-1$ 、 $i+1$ とすると、上下流端境界条件はそれぞれ式(14)、(15)で与えられる。

$$\frac{Q_{i-1}^{t+\Delta t}}{A_{i-1}} = \frac{R_{i-1}^{t+\Delta t/3}}{g \Delta t m_{i-1}^2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2g \Delta t m_{i-1}^2}{R_{i-1}^{t+\Delta t/3}} \left\{ \frac{Q_d^t}{A_d} + 2c_{i-1}^{t+\Delta t} - 2c_d^t + g \Delta S_{0i-1/2} - \frac{g \Delta t}{2} \frac{n_d^2}{R_d^{4/3}} \left(\frac{Q_d^t}{A_d} \right)^2 \right\}} \right] \quad (14)$$

$$x_u = \left(\frac{Q_{i-1}^{t+\Delta t}}{A_{i-1}} - c_{i-1}^{t+\Delta t} + \frac{Q_u^t}{A_u} - c_u^{t-1} \right) \frac{\Delta t}{2}$$

$$\frac{Q_{i+1}^{t+\Delta t}}{A_{i+1}} = \frac{R_{i+1}^{t+\Delta t/3}}{g \Delta m_{i+1}^2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2g \Delta m_{i+1}^2}{R_{i+1}^{t+\Delta t/3}} \left[\frac{Q_u^t}{A_u} + 2c_u^t \sqrt{g h_u^t} - 2c_{i+1}^{t+\Delta t} + \frac{g \Delta t S_{0i-1/2}}{2} - \frac{g \Delta t n_u^2}{R_{i+1}^{t+\Delta t/3}} \left(\frac{Q_u^t}{A_u} \right)^2 \right]} \right] \quad (15)$$

$$x_u = \left(\frac{Q_{i+1}^{t+\Delta t}}{A_{i+1}} + c_{i+1}^t + \frac{Q_u^t}{A_u} + c_u^{t-1} \right) \frac{\Delta t}{2}$$

ここに、 Q_b , A_b , c_b は上流端より x_b 下流側での、 Q_u , A_u , c_u は下流端より x_u 上流側での流量，流積，波速であり，それぞれ格子点 i と $i-1$, $i+1$ の諸量を線形補間した。

上下流境界条件のいずれも， $|x_u^{k+1} - x_u^k| \leq EPS$, $|x_b^{k+1} - x_b^k| \leq EPS$ を満たすまで，式(14)と(15)で q_{i+1}^k と x_i^k と x_b^k を更新する．ここに， k は繰り返し回数である。

(3) 不定流解析法の概要

不定流解析法では，上下流端の水位ハイドログラフを境界条件として，初期の流積・流量，粗度係数，河床位を与条件として，式(12)，(14)，(15)により，流量 Q と流積 A の予測を行う。

(4) 流量・粗度の推定法の概要

流量・粗度の推定法は，矩形断面で開発した手法 η と同様に，水位より算定した流積の経時変化，初期流量，河床位，一区間の粗度係数を与条件として，式(12)，(14)，(15)により，粗度係数 n と流量 Q の推定を行う。

流れが常流の場合，本分散化手法では，式(5)のように，連続の式の分散式に水路床勾配，水路形状の変化，摩擦勾配の項が含まれる．これは，数値粘性によって非物理的な流れが発生することを防ぐための処理である $^{11)}$ ．粗度係数の推定は式(16)に基づき行った。

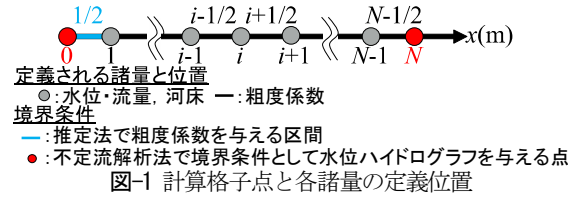
式(12)中の粗度係数を $n_{i+1/2}^t$ とし，式(12)の連続の式を $n_{i+1/2}^t$ を含む項で整理すると，式(16)が得られる。

$$\tilde{C}_{i-1/2} n_{i-1/2}^t - \tilde{C}_{i+1/2} n_{i+1/2}^t = \tilde{D}_i \quad (16)$$

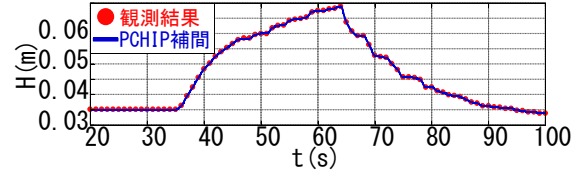
$$\tilde{C}_{i+1/2} = -\frac{g \tilde{A}_{i+1/2}^3}{2 \tilde{c}_{i+1/2}} \tilde{u}_{i+1/2}^t / \tilde{R}_{i+1/2}^{4/3}$$

$$\tilde{D}_i = \frac{A_{i+1}^t - A_i^t}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ \frac{g \tilde{A}_{i+1/2}^3}{2 \tilde{c}_{i+1/2}} \left[(z_{bi+1} - z_{bi}) + (h_{i+1} - h_i) \right] - \frac{g \tilde{A}_{i-1/2}^3}{2 \tilde{c}_{i-1/2}} \left[(z_{bi} - z_{bi-1}) + (h_i - h_{i-1}) \right] \right\}$$

式(16)は， $\square-1$ に示す粗度係数の定義区間で一区間の粗度係数を与えれば，解くことができる．本研究では，上流端の粗度を与え，連立1次元方程式の式(17)を解くことで粗度を推定する．なお，測定の誤差によっては，粗度係数の2乗が負となる場合があるため，この場合には非常に小さな値(ここでは 1.0×10^{-12})を与えた。



$\square-1$ 計算格子点と各諸量の定義位置



$\square-2$ 水位ハイドログラフとその補間

$$\begin{pmatrix} -\tilde{C}_{3/2} & & & & & & & & & \\ \tilde{C}_{3/2} & -\tilde{C}_{5/2} & & & & & & & & \\ & \vdots & & & & & & & & \\ & & \tilde{C}_{i-1/2} & -\tilde{C}_{i+1/2} & & & & & & \\ & & & \vdots & & & & & & \\ & & & & \tilde{C}_{N-5/2} & -\tilde{C}_{N-3/2} & & & & \\ & & & & & \tilde{C}_{N-3/2} & -\tilde{C}_{N-1/2} & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{3/2}^t \\ n_{5/2}^t \\ \vdots \\ n_{i-1/2}^t \\ \vdots \\ n_{N-3/2}^t \\ n_{N-1/2}^t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{D}_1 - \tilde{C}_{1/2} n_{1/2}^t \\ \vdots \\ \tilde{D}_i \\ \vdots \\ \tilde{D}_{N-2} \\ \tilde{D}_{N-1} \end{pmatrix} \quad (17)$$

(5) 入力条件

入力条件は， $\square-1$ の各格子点での水位ハイドログラフと境界での粗度係数である．不定流解析の境界条件や推定法の与条件は， $\square-2$ に示すような補間を施した断面平均の水位ハイドログラフである．補間には，区分的3次エルミート内挿多項式補間(PCHIP補間) $^{12)}$ を用いた。

3. 結果と考察

(1) 不等流解析結果に基づく検討

はじめに，測定誤差が含まれない漸拡水路の不等流解析結果を観測水位として，両手法の再現性を検討した。

$\square-3$ に示す仮想的な漸拡水路を対象に不等流解析を行った．上流端から流量 $Q=0.01(\text{m}^3/\text{s})$ を与え，水路の粗度係数は， $n=0.01(\text{m}^{1/3}/\text{s})$ とした．漸拡水路の漸拡角度を2通り(RunE-1: 9.46 度，RunE-2: 2.86 度)に変化させた．下流端水位は， 0.07m を与えた。

$\square-4$ は，不定流解析法から得られた水位・流量，推定法から得られた流量・粗度係数の空間分布を示したものである．これより，(1)不定流解析法と推定法のいずれも不等流解析条件を再現していること，(2)不定流解析法は，水路形状および漸拡角度の違いによる水位の変化を的確に取らえていること，(3)水路幅が変化する区間の取り扱いが十分でない場合には流量や粗度係数に振動が生じる η が，本推定法には，そのような振動は生じておらず，流量や粗度係数は不等流解析の解析条件を再現していることが確認できる．このように，本不定流解析法と推定法は，流れ方向に幅が変化する水路での流量や粗度係数を再現できることがわかった。

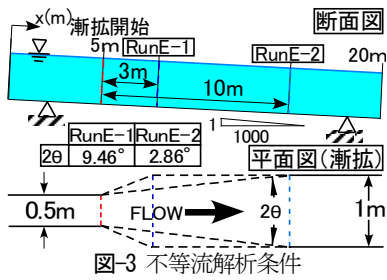


図-3 不等流解析条件

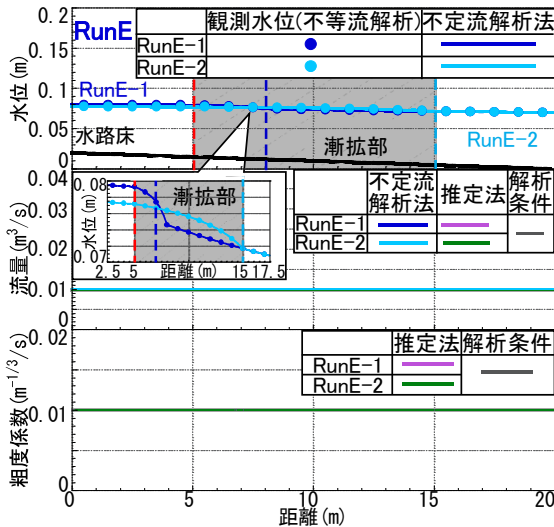


図-4 不等流解析に基づく検証

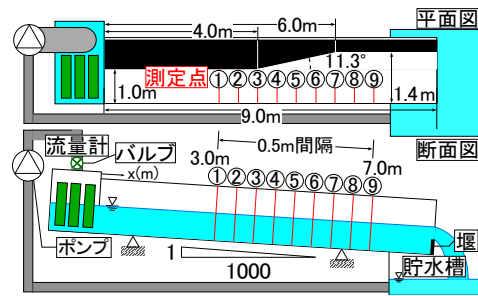


図-5 実験水路の概要

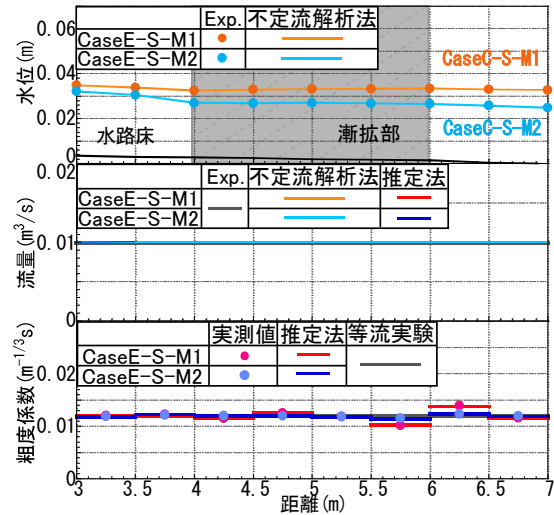


図-6 定常実験結果に基づく検証(CaseE-S)

(2) 定常・非定常実験結果に基づく検討

次に、測定誤差が含まれる可能性がある実験結果を用いて、不定流解析法と推定法の再現性について検討した。

a) 実験の概要

実験装置は、図-5 に示す長さ 9m、水路幅を $x=4.0\sim 6.0\text{m}$ で 1m から 1.4m に漸拡させた水路である。水路床勾配は約 1/1,000 に設定されている。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。上流端に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。等流実験より、同水路の粗度係数 $n=0.012(\text{m}^{-1/3}\text{s})$ であることが確認されている。

流れは定常流(CaseE-S)および非定常流(CaseE-U)とし、CaseE-Sについては、上流から一定流量 $Q=0.01(\text{m}^3/\text{s})$ (単位幅流量 $q=0.01(\text{m}^2/\text{s})$)を供給し、水面形が堰上げ背水(CaseE-S-M1)と低下背水(CaseE-S-M2)となるように、下流端の堰高を設定した。CaseE-U では上流から一定流量 $Q=0.0037(\text{m}^3/\text{s})$ 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 $Q=0.0108(\text{m}^3/\text{s})$ 、140 秒後に $Q=0.0037(\text{m}^3/\text{s})$ となるように、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。下流端の堰高は、初期の水面形が堰上げ背水(CaseE-U-M1)と低下背水(CaseE-U-M2)となるように設定した。なお、漸拡部で渦が発生しない条件で実験を実施した。

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-5 の測定点①～⑨で観測を行った。流量については、CaseE-S では流量計で、CaseE-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 PTV 解析を行うことで水表面流速を測定し、断面平均の水表面流速に水表面流速と水深平均流速の比をかけることで、断面平均流速を求め、この断面平均流速と水位観測より得られる流積により流量を求めた。測定点①、⑤、⑨で観測を行った。

b) 定常実験結果に基づく検証

不定流解析法・推定法のいずれも、測定位置と同様な位置に格子点を設け、観測水位を境界・与条件とした。

図-6 は、CaseE-S について、不定流解析結果、推定結果と実験値との比較したものである。粗度係数の実測値には、等流実験より求めたものと実測値より算定したエネルギー勾配より求めたものを示している。なお、本解析にはいずれも粗度係数の実測値を用いた。図-6 より、(1)不定流解析法は、いずれの Case についても、水位および流量を再現しており、その誤差は最大で 0.61% であること、(2)推定法は、いずれの Case についても流量とエネルギー勾配より求めた粗度係数を再現しており、その誤差は最大で 0.94% であることがわかる。

c) 非定常実験結果に基づく検証

図-7 は、CaseE-U について、不定流解析結果、推定結果と実験値を比較したものである。各区間の粗度係数は、

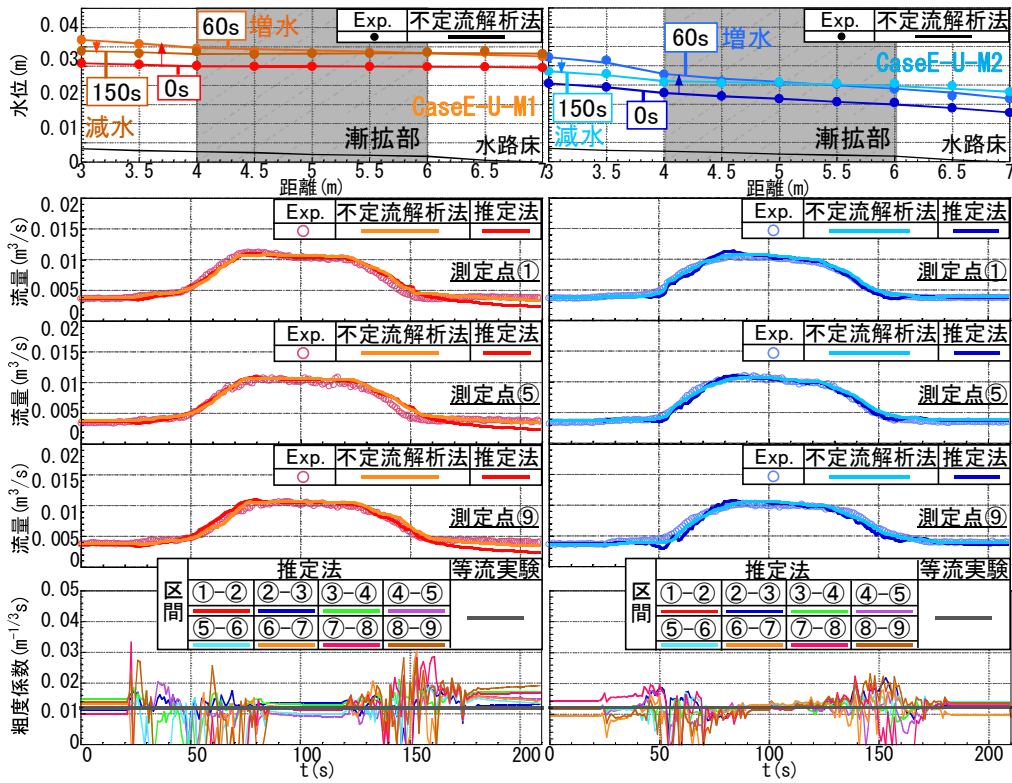


図-7 非定常実験結果に基づく検証(CaseE-U)

その経時変化は不明なため、等流実験の値とした。

図-7の水面形の変化より、水位の不定流解析結果と実験値との相対誤差は、最大で5.4%程度であり、概ね再現されていること、流量ハイドログラフより、(1)推定結果は、CaseE-U-M1の減水時に、CaseE-U-M2では測定点⑤で実測値との間にずれが生じていること、(2)他の時間帯では、不定流解析法および推定法のいずれも実測値を再現していること、粗度係数の経時変化から、推定結果は、(1)いずれのCaseについても、等流実験の粗度係数周辺で振動していること、(2)その幅はCaseE-U-M1が大きいことが確認できる。この振動は、不定流解析結果を水位の測定値とした推定結果では発生しなかったことから、水位の測定結果に含まれる誤差のために生じるものと考えられる。不等流解析に基づく検証においても、水位に水深の0.2%程度の誤差をランダムに与えたところ、粗度係数について最大で204%の差が生じた。

図-8は、水位と流量との関係について、不定流解析結果、推定結果と実測値との比較を行ったものである。これより、(1)実測値ではループを描き、(2)ループの度合いはCaseE-U-M1に比べ、CaseE-U-M2が小さくなるが、不定流解析結果と推定結果のいずれも、これらを捉えていることがわかる。

図-9は、0~10秒の定常状態の時刻の粗度係数、痕跡水位より求めた粗度係数の空間分布の推定結果と、図-6の粗度係数について増水時(10~80秒)、減水時(80~140秒)における時間平均値の空間分布との比較を行ったものである。なお、時間平均を行うにあたっては、粗度係

数の2乗が負となった場合の非物理的な粗度係数は省いた。これより、増水・減水時の粗度係数には大きな変動が生じておらず、等流実験結果の $n=0.012(\text{m}^{1/3}\text{s})$ 周辺を増減しており、最大で1.38倍、最小で0.76倍になることがわかる。なお、定常実験で得られた図-6に比べて、粗度係数の変動が大きい理由は、前述の水位の測定結果に含まれる誤差のためと考えられる。

このように、本解析法および推定法は、不等流・不定流の実験結果に対して、流量を十分な精度で推定できることが確認された。また、粗度係数の推定についても、痕跡水位に基づく粗度係数や時間平均による粗度係数には差が生じるものの水路の粗度係数付近の値となり、概ね妥当な値を推定できることが確認された。

4. おわりに

本研究では、(1)任意の断面形状の河道に適用可能な水位を境界条件とした1次元不定流解析法と(2)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新たに構築するとともに、(3)漸拡水路での不等流計算結果、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結果、(4)本不定流解析法および推定法は流量ハイドログラフの推定に有用なツールであることが確認された。ただし、粗度係数の推定には、振動が発生するなど課題が残るため、不定流の水位測定に含まれる誤差を除くフィルター処理を含め補間方法について

検討し、今後、複雑な縦横断面形状を有する流れや実河道への適用性についても検討したいと考えている。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：16K06515、研究代表者：重枝未玲)の助成を受けたものである。また、本研究を遂行するにあたり、本学学部生の西山晋平君、武久晋太郎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

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 重枝未玲，秋山壽一郎，平松裕樹，阿部琢哉：矩形一様断面水路での水面形の経時変化による流量ハイドログラフの推定法，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.72, No.4, I_607-I_612, 2016.
- 7) 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)（登載決定），2017.
- 8) Burguette, J. and Garcia-Navarro, P.: Efficient construction of high-

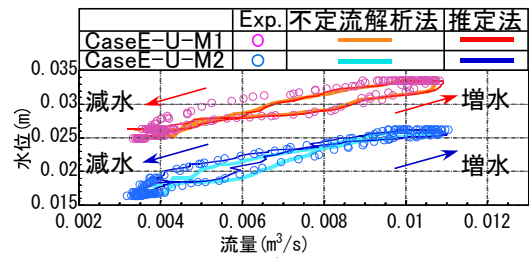


図-8 水位と流量との関係

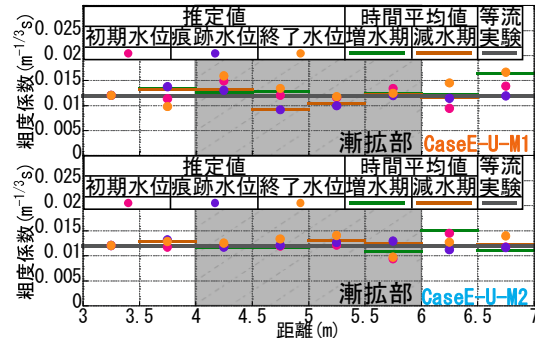


図-9 痕跡水位に基づく粗度係数と時間平均粗度係数

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.
- 12) Fritsch, F. N. and Carlson, R. E.: Monotone Piecewise Cubic Interpolation, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol.17, No.2, pp.238-246, 1980.

(2016.9.30 受付)

A 1D UNSTEADY FLOW ANALYSIS AND DISCHARGE AND ROUGHNESS COEFFICIENT ESTIMATIONS USING TIME VARIATION OF WATER LEVEL IN EXPANDED CHANNEL

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Takuya ABE and Eiji TAGUCHI

Numerical methods for 1D unsteady flow analysis and discharge and roughness coefficient estimations using time variation of water level in channel with arbitrary shape were constructed. These methods used 1D shallow water equations as governing equations, method of characteristics curves and flux-difference splitting scheme as a numerical technique. The stage hydrographs were used as boundary conditions at up- and down-stream for 1D unsteady flow analysis. The time variations of water surface profile were used as input conditions for the estimations. These methods were validated against numerical results of non-uniform flow and experimental data of non-uniform and unsteady flows in expanded channel. It shows that proposed methods can predict the discharge hydrograph and the estimation method can predict the roughness coefficient with reasonable accuracy.