

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

九州工業大学工学部 学生会員 ○木村 有花
九州工業大学名誉教授 フェロー会員 秋山 壽一郎

九州工業大学大学院 正会員 重枝 未玲
九州工業大学大学院 学生会員 武久 晋太郎

1. はじめに

近年、安全・安心が持続可能な河川管理を行う上で、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することが重要となる¹⁾。小規模河床形態の発生は、洪水時の抵抗を変化させることから、その変化の把握は極めて重要である。本研究は、以上のような背景を踏まえ、水面形の経時変化に基づく流量・粗度係数・河床位の時空間推定法を新たに提案するとともに、砂堆発生時の抵抗変化の予測精度について検討したものである。

2. 水面形の経時変化に基づく流量・粗度係数・河床位の推定法の概要

本推定法は、常流を対象とし、水面形と上流端での河床位の経時変化を与条件として、1次元浅水流方程式と流砂の連続の式に基づき、流量・粗度係数・河床位の時空間分布を推定する手法である。基礎方程式は、式(1)の1次元浅水流方程式と式(2)の流砂の連続の式²⁾である。式(1)の離散化には流束差分法を用い、発生・

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + S &= 0; 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 \dots (1) \\ \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_B}{\partial x} + (1 - \lambda_b) \frac{\partial x}{\partial t} &= 0 \dots (2) \quad U_i^{t+\Delta t} = U_i^t - \left[\delta E_{i+1/2} + \delta E_{i-1/2} \right] \Delta t / \Delta x \dots (3) \\ \delta E_{i+1/2} &= \sum_{j=1}^2 \left[\frac{1 \pm \text{sgn}(\tilde{\lambda}^j)}{2} \left(\tilde{\lambda}^j \tilde{a} - \tilde{B}^j \right) \right] \tilde{e}^j; \text{sgn}(a) = \begin{cases} 1 & a > 0 \\ -1 & a \leq 0 \end{cases} \quad \tilde{a}^1 = (\tilde{\lambda}^1 \Delta A - \Delta Q) / 2\tilde{c}; \tilde{a}^2 = (\Delta Q - \tilde{\lambda}^2 \Delta A) / 2\tilde{c}; \tilde{B}^1 = -\tilde{S}_2 / 2\tilde{c}; \tilde{B}^2 = -\tilde{B}^1 \\ C_{i-1/2} \Delta n_{i-1/2}^2 - C_{i+1/2} \Delta n_{i+1/2}^2 &= D_i; C_{i+1/2} = - \left(g A_{i+1/2} / 2 C_{i+1/2} \right) u_{i+1/2} \left| u_{i+1/2} \right| / R_{i+1/2}^{4/3} \dots (4) \quad n_{i+1/2}^2 = n_{i+1/2}^{t2} + \Delta n_{i+1/2}^2 \dots (5) \\ D_i &= \frac{A_{i+1/2}^{t+\Delta t} - A_{i+1/2}^t}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ \tilde{\lambda}_{i+1/2}^1 \tilde{a}_{i+1/2}^1 + \tilde{\lambda}_{i+1/2}^2 \tilde{a}_{i+1/2}^2 - \frac{g \tilde{A}_{i+1/2}}{2\tilde{c}_{i+1/2}} \left\{ (Z_{bi+1} - Z_{bi}) + (h_{i+1} - h_i) - (A_{i+1} - A_i) / \tilde{B}_{i+1/2} \right\} + \frac{g \tilde{A}_{i+1/2}}{2\tilde{c}_{i+1/2}} \left\{ (Z_{bi} - Z_{bi-1}) + (h_i - h_{i-1}) - (A_i - A_{i-1}) / \tilde{B}_{i-1/2} \right\} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + n_{i+1/2}^2 \tilde{Q}_{i+1/2} \left| \tilde{Q}_{i+1/2} \right| / \tilde{A}_{i+1/2}^3 \tilde{R}_{i+1/2}^{4/3} \right\} + \frac{g \tilde{A}_{i+1/2}}{2\tilde{c}_{i+1/2}} \left\{ (Z_{bi} - Z_{bi-1}) + (h_i - h_{i-1}) - (A_i - A_{i-1}) / \tilde{B}_{i-1/2} \right\} \right\} \\ q_B / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3} &= 8(\tau_{*e} - \tau_{*c})^{3/2} \dots (6) \quad \tau_{*e} = u_{*e}^2 / (\sigma/\rho - 1)gd \\ U &= \text{保存量ベクトル}, E = \text{流束ベクトル}, S = \text{発生項・消滅項ベクトル}, h = \text{水深}, q = \text{単位幅流量}, g = \text{重力加速度}, S_0 = \text{水路床勾配}, z_b = \text{水路床高}, S_f = \text{摩擦勾配}, n = \text{マンニングの粗度係数}, u = \text{流速}, R = \text{径深}, c = \text{波速}, \Delta x = \text{時間}, \text{空間の刻み幅}, i = \text{空間に対する添字}, \tilde{S}_g = \text{河川形状に関する項}, s = \text{水中比重}, \tilde{S}_\tau = \text{底面摩擦項}, \lambda_b = \text{空隙率}, q_B = \text{単位幅流砂量}, D = \text{河床材料粒径}, \rho = \text{水の密度}, \sigma = \text{砂の密度} \end{aligned}$$

消滅ベクトル S については特性速度で風上化を行った。式(2)の離散化には風上差分を、流砂量式には式(6)のM.P.M.式²⁾を用いた。

粗度係数の推定には式(5)の連立1次方程式を、流量の推定には式(3)の運動方程式を、河床位の推定には式(2)の流砂の連続の式を用いた。なお、式(5)の連立1次方程式を解くためには、一区間の粗度係数が既知である必要があるが、本研究では最上流区間の粗度係数を既知とした。推定手順は、図-1に示す通りである。また本推定法で得られる粗度係数は、摩擦抵抗と形状抵抗に加え、水路側壁による抵抗が含まれる合成粗度係数であるが、河床変動解析では摩擦抵抗のみを考慮している。入力条件の水位、初期河床位には測定結果を、上流端の粗度係数には実験値の水深と粗度係数の関係から得られた近似曲線より求めたものを与えた。上流、下流端の流量については、与条件の水位と式(3)の運動方程式を特性速度で風上化した式から算定した³⁾。

3. 実験結果に基づく推定法の検証

(1) 実験の概要

実験装置は、図-2に示すような水路長9m、幅0.35mの水路である。河床材料には、砂漣が発生しないように⁴⁾、水中比重1.65、粒径0.6375mmの一樣砂を用いた。実験は、一定流量 $Q=0.025\text{m}^3/\text{s}$ を供給し、小規模河床形態が砂堆となる条件下⁵⁾(Case S-D)で実施した。なお、流量については、浮遊砂が顕著とならず、また、中規模河床形態が発生しない条件下⁶⁾で、小規模河床形態が砂堆となるように設定している。測定項目は水位 $H(\text{m})$ 、河床位 $z_b(\text{m})$ 、流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 、流砂量 $q_B(\text{m}^3)$ である。水位及び河床位は、ビデオカメラで撮影した図-2の測定点の画像を画像解析することで計測した。流量に関しては、定常流は流量計で計測した。下流端の流砂量は、ふるいで回収した砂を乾燥させ重量を計測し、土砂の単位重量で除すること求めた。

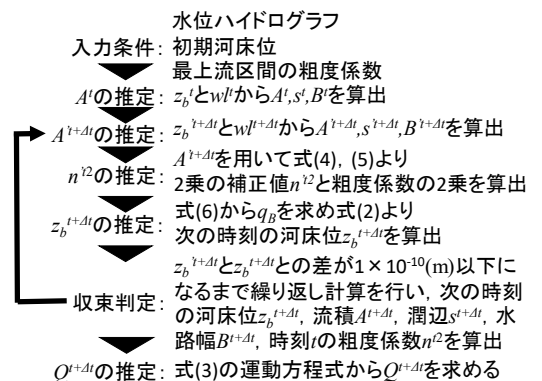


図-1 推定手順の概要

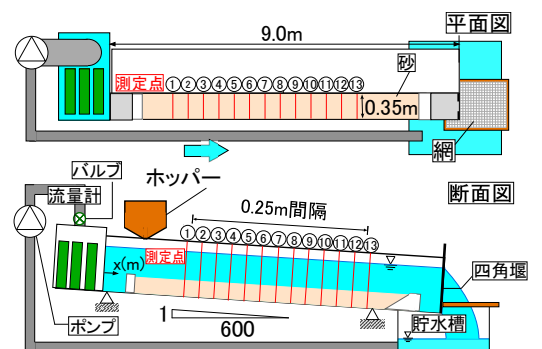


図-2 実験装置の概要

(2) 結果と考察

図-3に、入力条件である水面形の実測値の経時変化と河床形状の推定結果と実測値との比較を示す。これより、推定結果は、堆砂形状を正確には再現できないものの、平均的な河床形状を再現していることが確認できる。これは、本推定法は、水深平均モデルに基づくものであり、底面付近の鉛直方向流速を再現できないためと考えられる。図-4に、流量と合成粗度係数の実測値と推定結果の比較を示す。図中には、河床変動を考慮せずに河床形状の測定値を固定床として求めた流量の推定結果に加え、岸・黒木の式⁷⁾から求まる砂堆ⅠとⅡの粗度係数(砂堆Ⅰ： $n=(RI)^{1/3}2.4g^{0.5}s^{1/3}d^{1/6}$ 、砂堆Ⅱ： $n=R^{1/6}/8.9g^{0.5}$)を併せて示している。また、実測値および推定結果については、空間平均値もあわせて示している。なお、粗度係数の実測値は、観測水位より求めたエネルギー損失より逆算したものである。また、固定床の粗度係数の推定結果は、実測値と概ね一致したので、ここでは割愛している。図-4の流量の結果に着目すると、(1)推定された流量は、 $0.0262\sim0.0272\text{m}^3/\text{s}$ の範囲にあり、実測値を最大誤差8.9%で再現していること、(2)固定床として推定された流量は、 $0.0248\sim0.025\text{m}^3/\text{s}$ の範囲にあり、実測値を最大誤差0.67%で再現していること、(3)河床変動を考慮した推定結果は、固定床の推定結果に比べ、流量のばらつきが大きく、改善の余地があること、などが確認できる。粗度係数の推定結果に着目すると、(1)実測値は、岸・黒木の式より求めた砂堆Ⅰの粗度係数値に近く、本研究の小規模河床形態は砂堆Ⅰに近いこと、(2)推定された粗度係数は、局所的には粗度係数の実測値を再現できていないものの、空間平均した粗度係数の実測値を概ね再現していることが確認できる。これは、本推定法では、上述のように、正確な砂堆形状を推定できず局所的な粗度係数の変化は再現できないものの、平均的な河床形状を推定するために空間平均された粗度係数を再現できたと考えられる。図-5に、流砂量の実測値と推定結果との比較を示す。なお、流砂量の推定結果は、空間平均した値を示している。これより、推定された流砂量は、ばらつきはあるものの最大誤差20.8%で実測の流砂量を再現していることが確認できる。

4. おわりに

本研究から、河床変動を考慮した推定法は、局所的な河床位や粗度係数の再現性には課題が残るものの、小規模河床形態発生時の平均的な河床位と流量、粗度係数、流砂量を再現できることが確認された。今後は推定精度の向上を図るとともに、小規模河床形態が遷移する非定常流下や平坦床発生時の流量、粗度係数の推定への適用性について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)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献：1)国土交通省：河川砂防技術基準調査編，2012.，2) Meyer-Peter, E. and Muller, R.: Formulas for Bed Load Transport. I.A.H.R., Stockholm, 1948.，3)重枝ら：河川技術論文集，第23巻，pp.73-78，2017.，4)水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文報告集，第210号，p65-91，1973.，5)黒木ら：水理講演会論文集，第29巻，pp461-466，1985.，6)黒木・岸：土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96，1984.7)岸・黒木：北海道大学工学部研究報告，第67号，pp.1-23，1973.

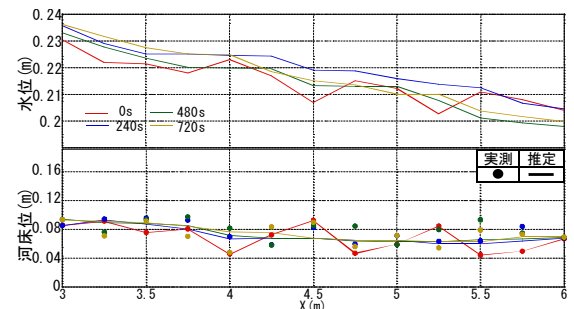


図-3 河床位の実測値と推定結果との比較

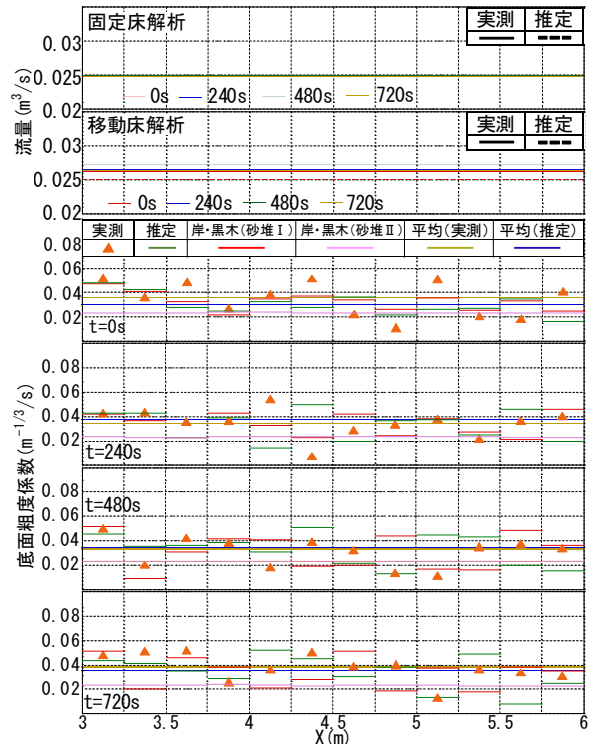


図-4 流量、粗度係数の実測値と推定結果との比較

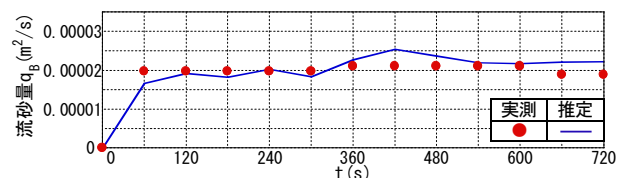


図-5 流砂量の実測値と推定結果との比較