

流速場に基づく水深の平面的な推定

新潟大学 工学部工学科 学生会員 ○鈴木 朱音
新潟大学大学院 自然科学研究科 学生会員 大泉 尚紀
新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保

1 はじめに

洪水時は、濁水により水中の現象は把握できず、洪水発生中の河床の挙動は明らかになっていない。洪水前後の断片的な情報により、洪水ピーク時の河床高は経験的な最深河床より数 m の規模で低下していることが推測される。このため、流量や堤防高、構造物の基礎深度の設定の観点から、洪水ピーク時の最深河床の把握は必須である。現行の観測手法では、時間変化や面的な分布を把握できない。

洪水時の濁水下で把握可能な水理量として、画像解析等を用いて算出される流速がある。この流速から水深を算定することができれば、水深を介して河床を把握することが望める。流速と水深の理論的な関係として、連続式

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

がある。これは流速と水深は理論的に従属関係にあり、一方の水理量がわかれば、もう一方の水理量が推定できることを意味する。連続式を介して水理量を算出する研究として、大泉ら¹⁾の、水深の空間分布を入力値として、マスコンモデルを適用し、流速を推定する手法がある。この手法を応用し、水深の代わりに流速を入力値として同様の演算を行うと、流速から水深を算出できることが示唆される。また、上記の手法とは別に、Lin ら²⁾は連続式を用いて流速から水深を推定する手法を提案し、特定の条件下において手法の適用性を調べている。

本研究では、開水路流れにおいて、流速の平面分布から上記の流体力学の関係を満たす平面二次元の水深を推定する。1) マスコンモデルを用いた方法、2) 連続式に基づく Lin ら²⁾の方法で、水深を推定し、真値と比較し適用性を調べる。

2 流速に基づく水深の推定法

2.1 マスコンモデルを用いた方法

大泉ら¹⁾により提案されたマスコンモデルを参考にして手法の構築を行った。マスコンモデルは、式(2)で表される連続式を付帯条件として式(3)を最小とするように、流量フラックス M, N を決定するものである。本研究では流速を入力値として、マスコンモデルを用いて流量フラク

スを算出し、流速で除することで水深を求める。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\alpha_1^2 (M - M_0)^2 + \alpha_2^2 (N - N_0)^2 \quad (3)$$

ここで、 u は縦断流速、 v は横断流速、 h は水深、 M_0, N_0 は初期流量フラックス、 α_1, α_2 は重み係数である。初期値は、上流端と下流端、右岸と左岸に水深の計測値を与え、それ以外は等流水深とした。初期流量フラックスは既知の流速と水深の初期値の積で与えた。

2.2 連続式に基づく Lin らの方法

Lin ら²⁾は連続式を用いて、平面二次元の流速分布から水深分布を算出している。本研究では、この手法の適用範囲を調べる。スタッガード格子の計算点配置を用いて、式(1)で表される連続式を離散化した。

$$(uh)_{i+1,j} + (uh)_{i-1,j} = -\frac{\Delta x}{\Delta y} [(vh)_{i,j+1} + (vh)_{i,j-1}] \quad (4)$$

式(4)を $h_{i,j}$ について解くことにより、水深が求まる。境界条件として、上流端と下流端に等流水深を与え、右岸と左岸は $\partial h / \partial y = 0$ とした。空間格子と流速の間に CFL 条件として、式(5)を与える。

$$\Delta x \leq \frac{u}{v} \Delta y \quad (5)$$

3 流速に基づく水深の推定法の検証

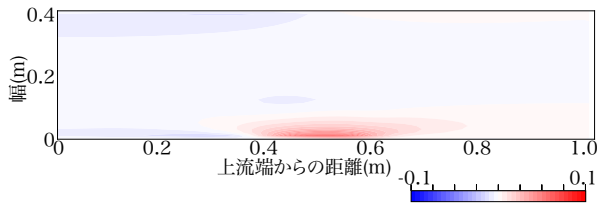
3.1 数理解析条件

手法の適用性を調べるために、数理解析を実施する。右岸中央部分に半球のバンプを設置した底面形状を与える。浅水流解析を用いて、底面形状から流速と水面位を算出し、その流速を入力値として水深を推定する。浅水流解析で算出した水深を真値とし、推定結果と比較する。

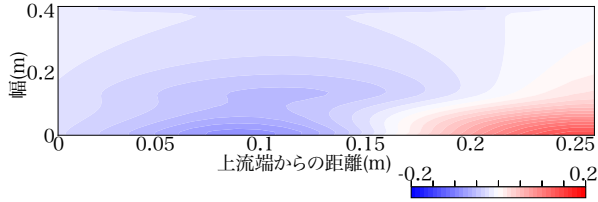
3.2 手法の検証

両者の手法を用いて解析を行った結果、両者ともバンプ上において水深が小さくなる傾向は再現できた。解析対象領域の水深の空間分布の再現性はマスコンモデルを用いた方法の方が高かった。

マスコンモデルを用いて推定した結果と真値の差分を等流水深で無次元化した結果を図-1a に示す。マスコンモデ



(a) マスコンモデルを用いた方法



(b) 連続式に基づく Lin らの方法

図-1: 手法ごとの検証結果

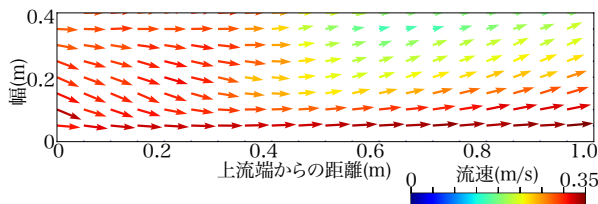


図-2: 実測流速の平面分布 (横断方向角を2倍とした)

ルを用いた方法では、初期に与える等流水深に比べて、バンプ近傍では10%、それ以外では数%の誤差で推定できる。

Lin らの手法は、式 (5) より、この条件においては適用範囲は横断流速が正の場所に限られる。そこで、横断流速が正となる部分を抽出して適用した。推定した結果と真値の差分を等流水深で無次元化した結果を図-1b に示す。概ね等流水深の20%の誤差で推定されている。しかし、Lin らの手法では、横断流速が正負に変動する砂州上の流れにおける水深は推定できなかった。

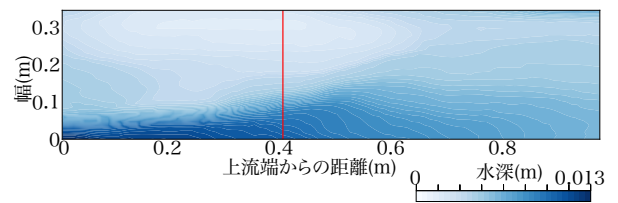
4 流速に基づく水深の推定法の妥当性確認

4.1 模型実験

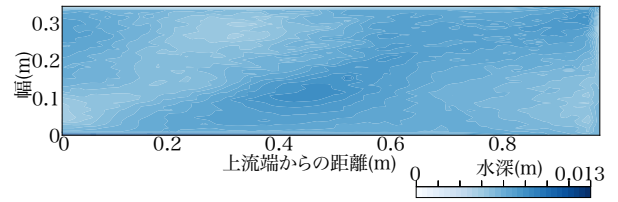
計測した流速の平面分布をマスコンモデルを用いた方法に適用するため、交互砂州を模した固定床の模型実験において流速と水深を計測した。流速の測定には PTV、水深の測定には Stream Tomography³⁾ (以下, ST) を用いた。PTV で計測した流速の平面分布を図-2 に示す。

4.2 ST の実測値との比較

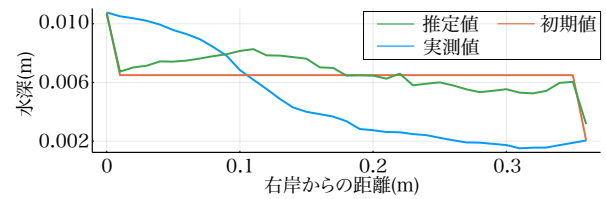
手法の妥当性確認のために、ST を用いて計測した水深の実測値と比較する。水深の実測値を図-3a に、マスコンモデルを用いて推定した結果を図-3b に示す。図-3a 中の赤線における水深の横断分布を図-3c に示す。図-3a と図-3b を比較すると、水深の深浅の傾向が対応し、上流左岸側では砂州上の浅い水深が再現された。また、図-3c から、右岸 0.1 m 地点から左岸までの範囲で、実測値に見ら



(a) 水深の実測値



(b) 水深の推定値



(c) 上流端から 0.4m 地点における水深の横断分布

図-3: 流速の実測値に基づく水深の推定結果

れる水深が減少する傾向が、推定結果において確認できた。右岸、左岸の境界周辺は、推定結果と実測値の乖離が大きい結果となった。境界値として与える水深の与え方次第では改善の余地があり、今後の課題とする。

5 終わりに

本研究では、流速を入力値として、連続式に基づき、水深を推定する二つの手法について検討した。まず、数値実験において、マスコンモデルを用いた方法で流速から水深を推定できることを明らかにした。次に、マスコンモデルを用いた方法で、模型実験において実測した流速の平面分布から水深の推定を行った。実測値と比較し、手法の妥当性を確認したところ、水深の実測値の傾向を再現できることが分かった。今後は、境界値として与える水深の設定を見直し、流速が既知の場合の水深の推定精度の向上を試みる。

参考文献

- 1) 大泉尚紀, 茂木大知, 安田浩保: 流水深に基づく平面二次元流速の推定, 土木学会論文集 B1(水工学), 2022 年 11 月。
- 2) Lin Y.-C., Ho H.-C., Lee T.-A., Chen H.-Y.: Application of Image Technique to Obtain Surface Velocity and Bed Elevation in Open-Channel Flow, Water 2022, 14, 1895, 2022.
- 3) Moteki D., Murai T., Hoshino T., Yasuda H., Muramatsu S. and Hayasaka K.: Capture method for digital twin of formation processes of sand bars, Phys.Fluids, 34, 034117, 2022.