

流速場に基づく水深の平面的な分布の推定

新潟大学工学部工学科

新潟大学大学院自然科学研究科

新潟大学災害・復興科学研究所

学生会員○鈴木 朱音

学生会員 大泉 尚紀

正会員 安田 浩保

1. はじめに

洪水前後の断片的な情報により、洪水ピーク前後に洪水前の河床高から数 m の規模で低下して最深となることが推定されている。この最深河床高は護岸や橋脚等の構造物の基礎深度に匹敵しており、洪水時の河床高の低下に起因して、護岸の損壊や落橋が生じていると考えられる。洪水時の河床高を平面的かつ時間的に連続して把握した上で、構造物の基礎深度の設計に洪水ピーク時の最深河床を反映できれば、構造物の損壊の大幅な軽減が期待できる。しかし、洪水時の流水中の現象の定量化手法は未確立である。このために河床の真の挙動は不明で、構造物の基礎深度は経験的に設定せざるを得ない。

洪水時の濁水下でさえ把握できる水理量の一つとして、画像解析等を用いて算出される表面流速がある。この流速から水深の算定ができれば、水深を介した河床の把握が望める。流速と水深の理論的な関係として、連続式は

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

と書ける。この式は流速と水深のどちらか一方が既知ならば、もう一方を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⁾は、水深の空間分布を入力値として、マスコン法を適用し、流速を推定できることを示した。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推測される。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ている。しかし、彼らの手法は横断流速が正のみであることを仮定する。このため、砂州上の流れなどの横断流速が正負に変動する平面二次元の流れにおける水深の推定はできない。

本研究では、開水路流れにおいて、まず、マスコン法を用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手法を構築する。次に、数値実験を用いた同手法の検証、模型実験における水深の実測値と推定値の比較による適用性を確認する。

2. 流速に基づく水深の推定法

大泉ら¹⁾により提案されたマスコン法を用いた手法を参考にして、水深の推定手法を構築した。マスコン法は、流速の事前情報が存在する時に、その近傍の連続式を満たす解を変分計算により探索するものである³⁾⁴⁾⁵⁾。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。本研究では流速を入力値として、マスコン法を用いて流量フ

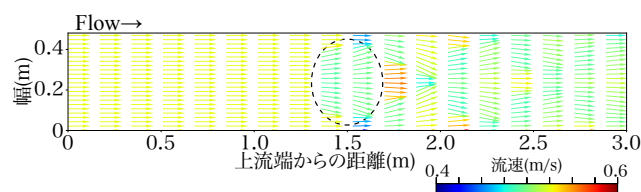


図-1 流速の平面分布

ラックスを算出し、流量フラックスを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 は事前情報として与える初期流量フラックス、 α_1, α_2 は重み係数である。

3. 数値実験による手法の検証

(1) 数値実験条件

本手法の適用性を調べるために、数値実験を実施した。与条件は、水路中央部分に半球状のバンプを設置した底面形状とし、浅水流解析を用い、入力値となる流速と真値として用いる水深を算定した。勾配 1/150、流量 $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。入力値となる流速の平面分布を図-1に示し、バンプの設置位置を破線で加えた。水深推定のための初期値は、上流端と下流端、右岸と左岸に水深の真値を与え、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) 検証結果

水深の浅深の対応関係を示すため、場所ごとの水深と水深の平均値の差で表される水深偏差を用いて、真値と本手法による推定結果を比較した。真値における水深偏差を図-2-a、推定結果における水深偏差を図-2-bに示す。図-2-aと図-2-bを比較すると、真値に見られるバンプ下流における菱形形状の水深の空間分布が推定結果において良好に再現され、本手法の妥当性が確認された。

4. 模型実験における適用性確認

(1) 模型実験条件

前章までに妥当性を確認した水深の推定法に対し、実測の流速の平面分布を事前情報として与えた場合の適用性を調べるため、交互砂州を模した固定床の模型実験で表面流速と水深を計測した。実験条件は、勾配 1/200、流量 $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。表面流速の計測には PTV⁶⁾、

Key Words: 水深、流速、連続式、マスコン法

〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050 TEL 025-262-7053

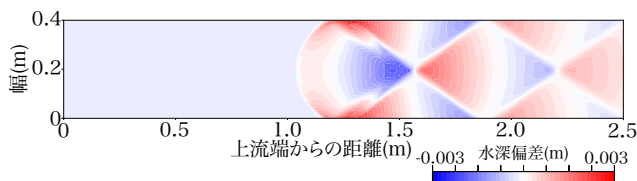


図-2-a 真値における水深偏差

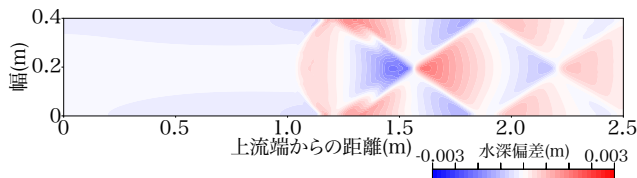


図-2-b 推定値における水深偏差
図-2 数値実験による検証結果

水深の計測には Stream Tomography⁷⁾ (以下, ST) を用いた。計測した流速の平面分布を図-3 に示す。水深推定のための初期値は, 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) ST の実測値との比較

構築した水深の推定法の適用性の確認のため, ST で計測した水深の実測値と比較した。実測値における水深偏差を図-4-a, 推定結果における水深偏差を図-4-b に示す。図-4-a と図-4-b を比較すると, 水深偏差の正負が対応するなど, 水深の空間分布は全体としては概ね一致することがわかる。しかし, 右岸, 左岸の境界周辺に着目すると, 推定結果と実測値の乖離が大きい結果となった。また, 図-4-b において, 実測値には見られないまだら模様が確認できる。

(3) 本推定法の適用限界と今後の課題

本手法の推定結果が実測値と乖離した原因として以下の三つが考えられる。一つ目は, 入力値の流速の影響である。前述のように, 数値実験において水深の推定は非常に良好であった。一方, 模型実験における水深の推定は十分とは言えず, その要因として, 流速の計測精度の不十分が考えられる。推定結果におけるまだら模様は, 本手法は入力値の流速に鋭敏に応答し, 本手法による水深の正確な推定には, 流体力学的な条件を満たす流速を入力値とする必要があることを示唆する。二つ目は境界値の影響である。本手法は水理量の空間の連続性に依拠するものであるため, 水深の推定精度は, 境界値として与える水深次第で向上を期待できる。三つ目は初期値の影響である。マスコン法は事前情報として与えた初期値の近傍の連続式を満たす最適解を探索する手法であるため, 水深の推定結果は初期値に依拠する。初期値の与え方次第で水深の推定精度の向上が期待できる。

上記の他に, 波動理論から得られる分散関係を用いるなどし, 本推定法のそもそもの適用限界も明らかにする必要がある。底面の起伏高に対して水深が一定以上の時には, 流速を入力値とした水深の推定は難しくなることが推測できるためである。

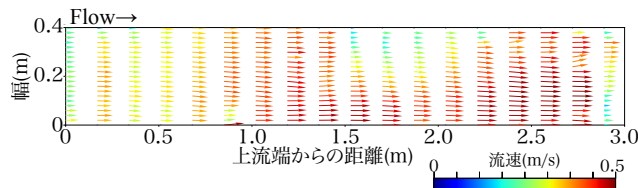


図-3 実測流速の平面分布

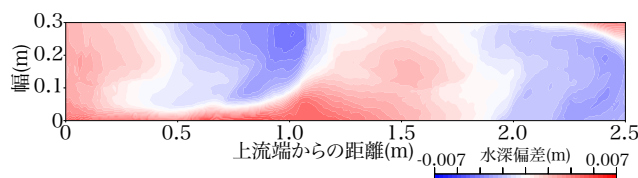


図-4-a 実測値における水深偏差

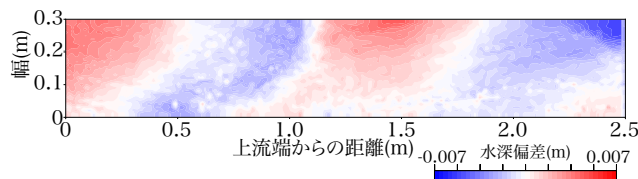


図-4-b 推定値における水深偏差
図-4 模型実験における推定結果

5. 終わりに

本研究では, まず, 流速を入力値として, 連続式に基づき水深を推定する手法を構築した。次に, 数値実験においてマスコン法を用いて流速から水深を推定できることを明らかにした。また, 模型実験において実測した流速の平面分布から水深を推定し, 水深の空間分布を再現できることが分かった。今後は, 流速の計測データの事前処理の手法と, 本手法において要求される入力値の精度の把握を行う。また, 境界値, 初期値の設定の見直しを行い, 流速が既知の場合の水深の推定精度の向上を試みる他, 本手法の適用限界についても研究する。

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) Sasaki Y.: An Objective Analysis Based on the Variational method, *J. Meteor. Soc. Japan.*, Vol.36, pp.77–88, 1958.
- 4) Marvin H. Dickerson.: Mascon—A Mass Consistent Atmospheric Flux Model for Regions with Complex Terrain, *J. Appl Meteorol.*, Vol.17, pp.241–253, 1978.
- 5) Christine A. Sherman.: A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, *J. Appl Meteorol.*, Vol.17, pp.312–319, 1977.
- 6) 茂木大知, 安田浩保, 石原道秀, 早坂圭司, 村松正吾: Optical-Flow を用いた表面流速測定手法の開発と砂水路床における適用性の検証, 第 37 回土木学会関東支部新潟会研究発表講演会論文集
- 7) 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.
- 8) 小関 博司, 安田 浩保, 水深波長比を用いた河床波の統一的な区分, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 2020, 76 巻, 2 号, p. I.489-I.498, 2020.