

実河川の流速場に基づく水深の推定

新潟大学大学院 自然科学研究科 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 大原 由暉
新潟大学大学院 自然科学研究科 学生会員 茂木 大知
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

洪水ピーク前後における河床低下の規模は護岸や橋脚等の構造物の基礎深度をしばしば上回る。この時に護岸や橋脚は大破する。洪水中に構造物の安定を維持できる基礎深度を設定するためには、洪水による河床波の変形や移動を含む河床変動を平面的かつ時間的に連続に把握できることが望ましい。少なくとも最深河床は把握されるべきである。このような河床変動を把握できれば、構造物の設置箇所ごとの河床変動に基づく構造物の基礎深度を設定でき、構造物の損壊の軽減を期待できる。しかし、洪水前後の横断測量と模型実験のデータに基づく流砂関数からの推定にとどまり、実河川の洪水中における河床形状を平面的かつ時間的に連続に把握する手法はない。

流体力学における質量保存則である連続式は、

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

と書ける。同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。各測定点における代表流速から水深を推定できれば、水深を介した河床の把握が望める。代表流速の一つである画像解析等で算出される表面流速は、洪水時の濁水下でさえ取得可能であり、洪水中の河床の把握が可能となる。連続式を介して水量を把握する研究として、著者ら¹⁾はマスコン法を用いて流速場から平面二次元の水深を推定する Flow Velocity Constraint (FVC 法) を提案し、数値実験において妥当性を確認している。FVC 法のノイズに対する応答を調べ、ノイズの混入や部分的な欠測が推測される実測値への適用を検討している。また、著者ら²⁾は UAV から得られる動画に PIV を適用し、実河川の表面流速の推定を可能としている。UAV により取得した実河川の流速場に FVC 法を適用すれば、実河川の水深の平面的な分布の推定が見込める。

本研究では、まず、UAV により取得した実河川の流速場に FVC 法を適用し平面二次元の水深を推定する。次に、ADCP を用いた計測³⁾により取得した水深との比較により本推定法の実河川への適用性を確認する。

2 流速に基づく水深の推定

2.1 FVC 法

FVC 法は、マスコン法を用いて流速の平面分布から連続式を満たす平面二次元の水深を推定する手法である。マスコン法は、三次元ないしは二次元の流速の観測値が存在した場合に、その流速近傍で連続式を満たすような最適解を変分計算により探索するものである。大泉ら⁴⁾により提案されたマスコン法を参考にして手法を以下のように構築した。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。マスコン法によって得られた流量フラックス M, N を既知の流速 u, v で除することで水深 h が求まる。

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

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

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。 M_0, N_0 は、既知の流速と水深の初期値の積で与えられる。

2.2 条件設定

マスコン法は初期値に依拠するため、水深の初期値は式 (4) とし、入力値の流速の平面分布に基づき設定した。

$$h = \frac{u^2}{gFr^2} \quad (4)$$

ここで、 Fr はフルード数で、流速と流量、川幅から概算される。重み係数は場所ごとに横断流速と縦断流速の比で与え、流速の変化の度合いに合わせて設定した。

3 実河川における適用性確認

実河川における FVC 法の適用性を確認するため、UAV により取得した流速に基づき水深を推定した。

3.1 計測条件

計測対象は信濃川中流の小千谷水位観測所周辺とし、UAV による撮影は 2022 年 10 月 1 日 11 時に実施した。小千谷水位観測所で観測された水位は 42.30 m、この地点

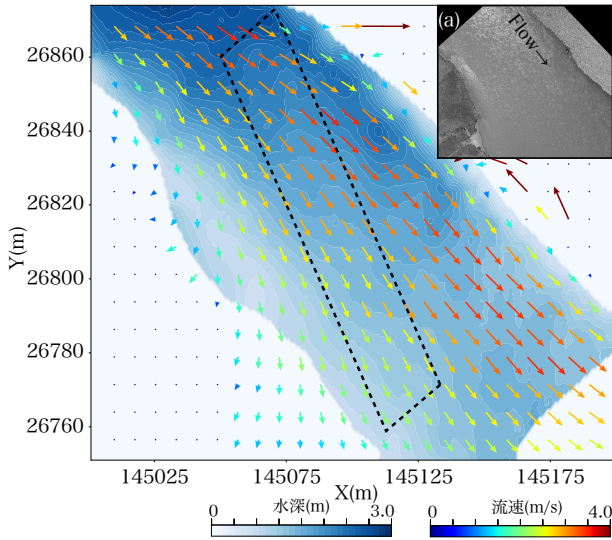


図-1: PIVによる流速分布と ADCP の水深分布 ((a) は UAVにより取得したオルソ画像)

での最低水準の水位であった。流量は $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であった。流速場は、UAVで撮影した動画にPIVを適用して推定した。水深は、同日に実施した ADCP を用いた計測により取得した。本研究では ADCP で得た水深を真値とし、FVC 法との対比に用いる。

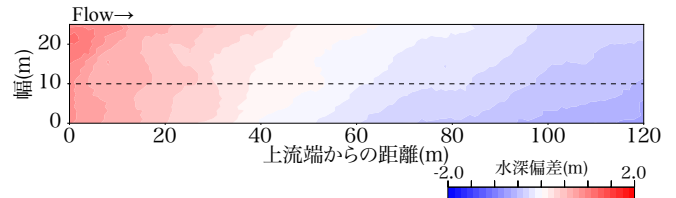
3.2 FVC 法による水深の推定範囲

本研究における FVC 法による水深の推定範囲は、PIVにより得た流速分布と ADCP により得た水深分布が重なる図-1に示した範囲とした。FVC 法の推定精度は流線と計算格子の角度に依拠する性質がある。このため、FVC 法に用いる計算格子は PIV で得た流線と平行となるように設定した。本研究では推定範囲の平均流速を流線の方向として、図-1中の点線枠内を推定の対象とし、この範囲の大きさは幅 25 m、流下方向 120 m で、格子間隔は $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ とした。

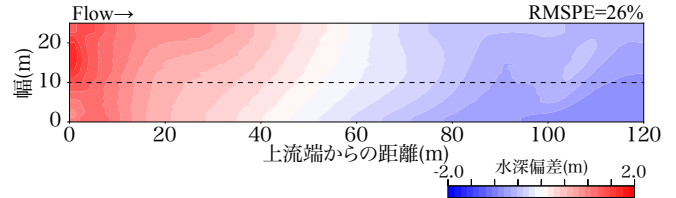
3.3 推定結果

本研究では、水深の浅深は、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比較した。図-2aに真値における水深偏差、図-2bに推定結果における水深偏差を示した。図-2cに図-2aと図-2b中の点線上における水深の縦断分布を示した。

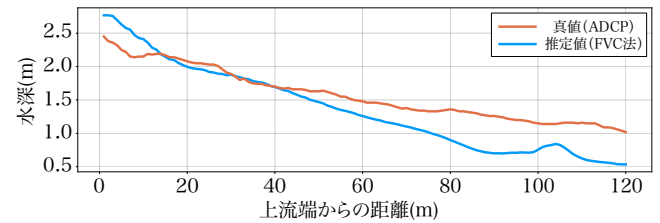
図-2aと図-2bを比較すると、水深偏差の正負が対応し、真値に見られる流下方向に減少する水深の空間分布が良好に推定されていることが分かる。このときの推定範囲全体の水深の平均平方二乗誤差率 (RMSPE) は 26 % である。図-2cの橙色線の真値と青色の推定結果を見ると、流下方向に水深が減少する波形となり、真値と推定値の水深の規模は同等である。特に、図-2c中の 20 から 40 m の範囲では真値と推定値がほぼ一致する結果を得た。



(a) 真値 (ADCP) における水深偏差



(b) 推定値 (FVC 法) における水深偏差



(c) 水深の縦断分布

図-2: 実河川における推定結果

3.4 今後の課題

今回の推定では、上下流端で推定結果と真値との乖離が大きい結果となった。この原因として、上下流端の流線と FVC の推定に用いる計算格子の流下方向軸との平行が保持されなかったことが考えられる。計算負荷を極端に増やさずに流線と FVC の推定に用いる計算格子の流下方向軸を容易に平行とする方法として、一般座標の導入が考えられる。一般座標の導入により直交座標による計算範囲の制約を解消でき、広い範囲の水深の平面的な分布を簡便な数値処理と少ない計算負荷による推定が期待できる。

4 おわりに

本研究では、UAV から取得した流速場から水深の空間分布を推定できることを確認し、FVC 法の実河川への適用性を示した。今後は、一般座標を導入し、推定精度の向上と推定範囲の拡大を試みる。

参考文献

- 1) 鈴木朱音, 茂木大知, 安田浩保: 流速場に基づく流水深の平面分布の推定, 土木学会論文集 B1(水工学), 2023(掲載決定).
- 2) 大原由暉, 早坂圭司, 村松正吾, 安田浩保: UAV から得られた外部標定要素による射影変換と画像解析による流速推定の試行, 第 40 回土木学会関東支部新潟会研究発表講演 会論文集, 2022.
- 3) Gordon, R. L.: Acoustic measurement of river discharge, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.115, No.7, pp.925-936, 1989.
- 4) 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), 78 巻, 2 号, pp.L577-L582, 2022.