

不等流における表面流速分布と鉛直方向流速分布の対応関係

新潟大学 農学部農学科 非会員 ○塩谷 翼
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

洪水時の河川を安全に流下させるためには、洪水ピーク時の流量を把握する必要がある、河川整備計画の立案、更新において流量は重要な水理量である。現状では、流量は一般的に河川の断面積と断面平均流速の積によって求められている。しかし、洪水時の河川の流速と断面積を測定する技術はどちらも未確立である。この代替えとして、断面平均流速の算定では高水流量観測において浮子法を用いて水面付近の流速が測定される。

開水路の鉛直方向の流速分布のモデルとして対数分布則が用いられる。対数分布則は滑面の場合、

$$\frac{\bar{u}(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* y}{\nu} + 5.5 \quad (1)$$

粗面の場合、

$$\frac{\bar{u}(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + 8.5 \quad (2)$$

で表され、壁面では壁面との摩擦により流速が0となり、壁面から離れていくにつれ、流速が急増することを記述するモデルである。また、水面付近の流速や表面流速は流速が小さくなり、流速が最も速くなる水深は水面の少し下になることが知られている。しかし、対数分布則は等流を前提としたものであり、不等流条件下でも成り立つかどうかはまだ十分に調べられていない。また、表面流速が水中の流速とどのような対応関係があるかも十分に議論されていない。つまり、断面平均流速の算定にあたり、表面流速を代表値として用いることの妥当性は不明である。本研究では、自発的に形成される砂州形状を模した固定床模型における実験を行い、不等流条件下における流速の鉛直方向分布（鉛直流速分布）と表面流速と鉛直方向流速分布の対応関係の検証を行う。

2 模型実験

2.1 模型実験の概要

本研究では、不等流条件下における同一平面座標での鉛直方向流速分布と表面流速が対応する測定を行うために模型実験を行った。交互砂州が自発的に形成される既往の模型実験の結果に基づいてFRPで製作した固定床模型を用いて実験を行った。固定床模型の底面形状は図-1の通り

である。図から模型は縦断方向に洗掘と堆積を繰り返す典型的な交互砂州の形状を再現していることが確認できる。また、通水条件は、水路勾配を1/200、流量を1.17 L/sに設定した。

2.2 測定方法

本研究では、鉛直方向の流速分布と表面流速のそれぞれを測定する必要があるため、2つの方法を用いてそれぞれの流速の測定を行なった。水深ごとの流速の測定にはレーザードップラー流速計（以後、LDV）を用い、表面流速の測定には茂木ら^{?)}が開発したOptical-Flowに基づく粒子追跡法（以後:PTV）を用いた。

LDVは2本のレーザーが交差する点で発生する干涉縞に流体中に混入している粒子が通過する際に発生する周波数特性から通過した粒子の移動速度を算定するものである。本研究の実験で用いる流体中には、十分に微細粒子が存在し流速の測定が可能であった。LDVでの測定は、測定点の底面から水面付近まで1mmずつ水深を変化させることで鉛直方向流速分布の測定を実施した。各測定点の測定につき1万点以上の測定を行った。

PTVの手順は、流れに影響を及ぼしにくい平均粒径2mmの発泡スチロール球をトレーサーとして流水に投下し、トレーサーが流下していく様子を撮影し、動画をグレースケールに変換する。トレーサーの輪郭周辺での輝度勾配から物体追跡に適した特徴点^{?)}を定め、動画フレーム間（1/25秒間）でLucas-Kanade法^{?)}の制約のもと特徴点を追跡する。得られたトレーサーの移動前後の座標からトレーサーの移動距離を算出し、動画フレーム間の時間で除することで表面流速を測定した。この手法は表面流速を面的に測定することができるため、表面流速の平面分布が得られる。測定は、測定範囲において各場所の流速の測定数が200を上回るように測定を行なった。

2.3 表面流速の測定結果

PTVによる測定を複数回実施し、表面流速の平面分布が得た。図-2の通り、底面の砂州形状の影響を受けて砂州前縁部付近の水深が浅い箇所では表面流速が小さくなっているのが確認できた。表面流速の平面分布は砂州スケールの凹凸を持つ底面形状の影響を受けることが確認できた。

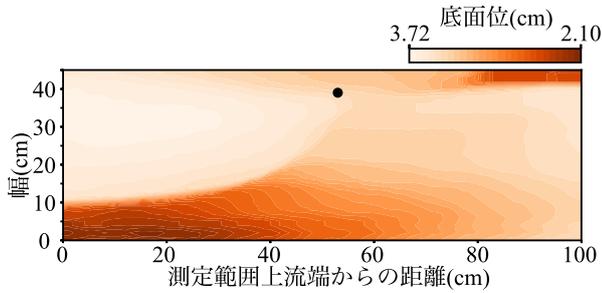


図-1: 砂州模型のコンター図

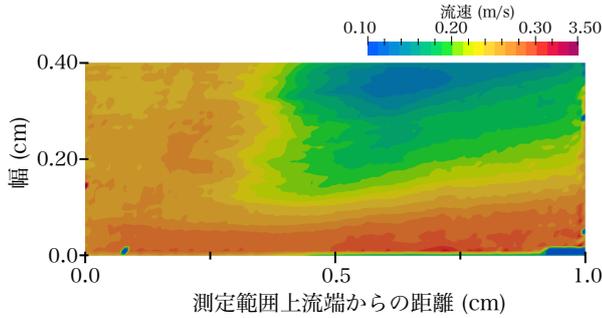


図-2: 表面流速の平面分布

2.4 表面流速と水深ごとの流速の比較

表面流速と鉛直方向流速分布を比較するために、図-??の黒点で示した固定床模型の上流から 53cm, 右岸側から 39cm の位置にある測定点で得られた表面流速と、LDV で計測した水深ごとの流速を図-??に示す。表面流速と水深ごとの流速で測定数が大きく異なる。このため、表面流速はヒストグラムとして、水深ごとの流速は確率密度関数で示している。LDV の凡例は、底面から測定点までの距離を表している。破線は各測定点における平均流速を表している。破線を見ると、水深が深い測定点の流速は平均流速が遅く、流速の取りうる範囲が狭い傾向があり、水深が浅い測定点では、平均流速が速く流速の取りうる範囲が広い傾向が見られる。一方、水面付近の測定点では流速の取りうる範囲の傾向は他の測定点での傾向と変わらず広い傾向があるが、平均流速は遅くなっていることが確認できる。

以上から、LDV と PTV の二つの測定手法による結果の相違は小さく、最も水面に近い測定点における流速と表面流速の値が近くことが確認された。今回の測定で得られた不等流における鉛直方向の流速分布は、対数分布則と同様の分布となることが分かった。つまり、対数分布則は不等流においてもある程度の適用性が見込める。仮に、対数分布則により厳密な記述ができないとしても、対数分布速と近い記述となることが推測される。

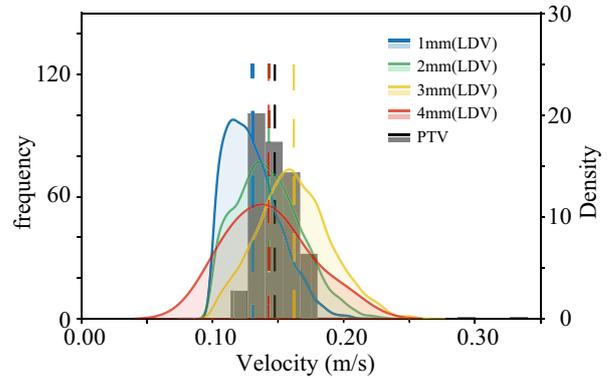


図-3: 表面流速と鉛直流速分布の比較

3 おわりに

本研究では、交互砂州上の流れを再現した模型実験において、不等流における表面流速は PTV を、水深ごとの流速は LDV を実測し、表面流速と鉛直流速分布の対応関係について検証した。

PTV の測定結果から、表面流速の平面分布は、砂州の形状による影響が確認された。また、LDV の測定結果から、不等流における水深ごとの流速は、水深が深いほど流速にばらつきが小さく平均流速が遅い傾向があり、水深が浅いほど流速のばらつきが大きく平均流速が速い傾向があった。これらの特徴は対数分布則の特徴と同様であるため、不等流でも対数分布則と類似のモデルの存在が示唆された。

本研究では、表面流速を流速の代表値として用いることを許容する結果を得た。ただし、PTV による表面流速と LDV による水面付近での流速の差異が認められ、今後、これが水理に及ぼす影響の検証が必要である。この他に、模型実験において、水路幅が変化する条件などでのさらに強度の強い不等流における測定を行い、実河川に近い条件における表面流速と鉛直方向の流速分布との対応関係を明らかにする。

参考文献

- 1) 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, 2019.
- 2) Shi, Jianbo and Carlo Tomasi. "Good Features to Track," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994, pp. 593-600.
- 3) Lucas, Bruce D. and Takeo Kanade. "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision," Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, April, 1981, pp. 674-679.