

不等流における表面流速と鉛直方向流速分布の対応関係

新潟大学農学部農学科 学生会員 ○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

流量は、多くの場合、流速断面積法と呼ばれる河川の断面積と断面平均流速の積によって求められる。断面積は測量によって得られるが、断面平均流速は河道の状態や測定の方法によって測定手法が異なる。洪水時の河川の流速が大きく既存の流速計による測定が困難であるため、浮子法と流速分布モデルにより流速が算定される。ただし、実河川の大半は不等流と推測されるものの、不等流における浮子法により得られる表面流速を流速算定の代替値として用いることの妥当性は不明である。

流速分布モデルには対数分布則が用いられている。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、

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

で表される。ここに $\bar{u}$ は平均流速、 y は長さ、 U_* は摩擦速度、 κ は Karman 定数、 ν は動粘性係数、 k_s は相当粗度である。対数分布則は、開水路の鉛直方向の流速分布について、壁面において壁面との摩擦によって流速が 0 となることを仮定し、壁面から離れていくにつれて流速が大きくなる様子を対数関数を用いて記述する流速分布のモデルの一つである。このモデルは等流を前提として理論的に導出されたものである。そのため、河川のような不等流においてはその適応性は不明である。特に不等流における表面流速と流速の鉛直方向分布にどのような対応関係があるのかは十分に議論されていない。

本研究では実測に基づいて不等流における表面流速と流速の鉛直方向流速分布の対応関係を明らかにすることと、流速の鉛直方向分布を検証することを目的として、等流と不等流の表面流速を茂木ら¹⁾が開発した Optical-Flow に基づく粒子追跡法（以後：PTV）で、水深ごとの流速の測定にはレーザー Doppler 流速計（以後：LDV）を用いて計測した。

2. 模型実験

(1) 実験概要

本研究では、不等流条件下における表面流速と流速の鉛直方向分布を測定する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ような既往の模型実験の結果に基づいた FRP 製の固定床模型を用いて実験を行った。固定床模型の形状は図-1 の通りである。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であ

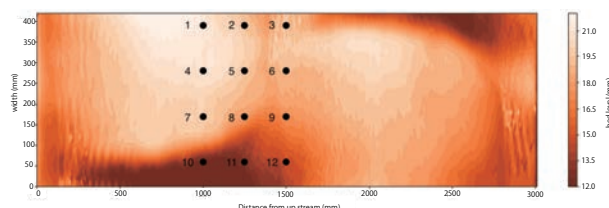


図-1 砂州模型のコンター図

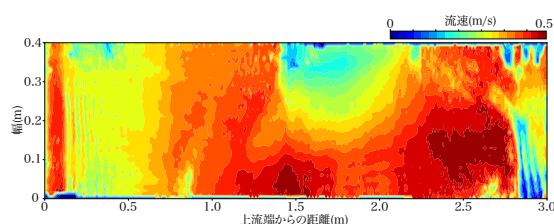


図-2 表面流速の平面分布

る。通水条件は、水路勾配を 1/150、流量を 1.8L/s に設定した。また、比較のために同様の通水条件の等流でも実験を行った。等流実験の結果は紙面の都合上割愛する。

(2) 測定方法

本研究では、表面流速と水深ごとの流速を測定する必要があるため、2つの方法を用いて流速の測定を行った。表面流速の測定には、PTV を用い、水深ごとの流速の測定には LDV を用いた。LDV の測定は底面から水面までを水深を 1mm ずつ変化させながら行った。PTV の各測定点での流速の測定数が 200 を超えるように測定を行った。また LDV は各側転での流速の測定が 50000 を超えるように測定を行った。

3. 実験結果

(1) 表面流速の平面分布

PTV による測定を複数回行うことにより表面流速の平面分布を得た。結果を図-2 に示す。砂州前縁部の水深が浅い箇所では表面流速が小さくなっていることが確認できる。このことから、砂州の凹凸程度の底面形状によって、トレーサーを用いた表面流速の分布に影響が与えられることが示唆された。

(2) 表面流速と水面の流速の比較

次に、トレーサーによる表面流速が流速算定の代替値として用いることの妥当性を確認するために表面流速と水面付近の流速について考察する。また、不等流における表面流速と流速の鉛直方向分布の対応関係を確認することを目的に、各測定点での PTV による表面流速と LDV による水面付近の流速を比較するために、図-1 の黒点で示した 12 箇所での測定を行った。このうち、不等流成分が大きいと考えられる堰上げが起こっている測定

Key Words: 不等流, 対数分布則

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

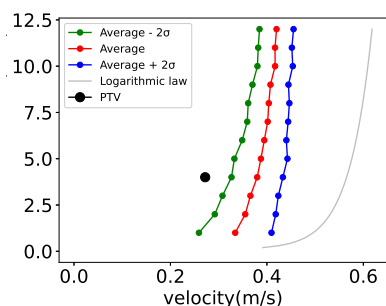


図-3 不等流（堰上げ）

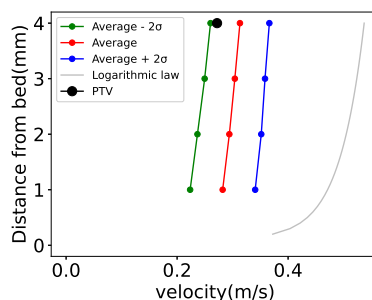


図-4 不等流（低下背水）

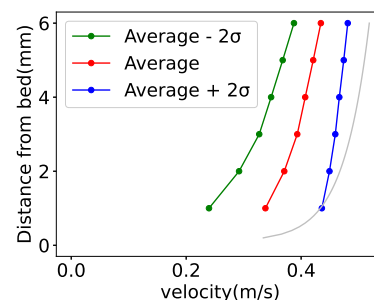


図-5 等流

点10の結果を図-3に、低下背水が起こっている測定点6の結果を図-4に示す。各測定点でのPTVで測定された表面流速の平均値を黒点で示した。また、LDVによる測定結果から各測定点の水深ごとの平均流速の値を結んだものを赤色の線、平均からの2標準偏差(2σ)の区間の値を結んだものを緑色の線と青色の線で示した。

図-3の堰上げが起こっている測定点では、表面流速の平均値と水面付近の流速の平均値がほぼ一致しており、表面流速の測定手法による差異は小さいと考えられる。一方、図-4の低下背水が起こっている測定点では、PTVによる表面流速の平均値がLDVによる水面付近の流速の平均値より小さい値となっており、表面流速の測定手法ごとの差異が大きい結果を得た。以上の結果より、不等流の種別ごとにPTVとLDVの各々で得た結果が異なることがわかった。

(3) 鉛直方向流速分布

次に、流れの状態ごとに流速の鉛直方向分布がどのような違いがあるかを確認するために、前節と同じ測定点における鉛直流速分布曲線について考察する。また、比較のために等流での鉛直流速分布曲線を図-5に示す。また実測値と理論との比較を行うために灰色の線で各通水条件における対数分布則の理論に基づいた線を描図した。堰上げと低下背水については(2)式を、等流については(1)式を用いた。

図-3に示した堰上げにおいては、底面付近で流速の取りうる範囲が大きく水面付近でその幅が小さくなっていることが確認できる。また、流速が底面から水面にかけて対数的に大きくなっていることが確認できる。しかし、実測値と対数分布則の理論値と比較すると、鉛直流速分布曲線は似た形状になっていることが確認できるが、流速の実測値が理論値よりも2割ほど小さくなっていることが確認でき実測値と理論値の差異が大きいことが確認された。

図-4に示した低下背水においては、堰上げの場合とは異なり流速の取りうる範囲が底面付近でも水面付近でもほとんど変化しない結果が得られた。また、底面から水面にかけて流速が大きくなることは、堰上げと共通しているが、鉛直流速分布曲線が直線的になることが確認できる。実測値と理論値の比較においても実測値が理論値と比べて5割程度の小さい値となることが確認できる。このことから、低下背水は、対数分布則とは異なる流速

測定点	PTV*0.85	LDV_{ave}	誤差
低下背水	0.2312(m/s)	0.29837(m/s)	-22%
堰上げ	0.35445(m/s)	0.39037(m/s)	-9%

表-1 表面流速の更正後とLDVから得た平均流速の比較

分布を持つことが推察される。

図-5に示した等流においては、底面付近で流速の取りうる範囲が広く、水面付近では、その幅が小さいことが確認できる。また、流速が底面から水面にかけて対数的に大きくなることが確認でき、対数分布の特徴と一致する。実測値と対数分布則の理論値を比較すると、実測値が理論値に比べて小さくなる傾向が見られるが、その差異は不等流条件と比べて小さいことが確認できる。

流量算定に用いる平均流速には浮子法で得られた表面流速に更正係数を掛けることで得られる。PTVから得た表面流速に更正係数を掛けて得られる流速とLDVから得られた平均流速を比較する。更正係数は水位及び流量調査作業規程準則に基づき0.85に設定した。表-1は堰上げと低下背水の測定点における表面流速に更正係数をかけた流速とLDVから得られた平均流速の誤差をまとめたものである。砂州上の不等流では、表面流速を更正した流速がLDVの平均流速より小さくなる傾向が確認できる。低下背水では、表面流速が水面付近の流速と比べて小さいため、堰上げと比べて表面流速を更正した流速が平均流速よりもより小さくなることが確認できる。不等流の種別によって流量算定の結果が変化することが示唆された。

4. おわりに

本研究では、不等流における表面流速と流速分布モデルの対応関係を実測に基づき検証した。不等流における表面流速は、底面形状から無視できない規模の影響を受けることが確認された。また、表面流速と水面の流速の対応と、流速の鉛直方向分布は不等流の種別によって異なることが確認された。これらのことから、浮子法と対数分布則に基づいた流量算定を不等流に用いるにあたっては慎重な扱いが必要であると言える。

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