

## 多重露光画像を用いた 平面二次元流れにおける表面流速の測定方法の開発

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 五十嵐 拓実  
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

流れのエネルギー勾配は一般に摩擦損失として記述される量であり、その支配変数は水深、流速、粗度係数の3つと考えられている。損失係数は、時空間で流量、水深、流速などが変化しない等流における底面の材質がもたらす摩擦損失を記述し、最も一般的な損失係数はManningの粗度係数である。現状では、水深、流速などが空間的に分布を持つ不等流の水利計算においても等流における摩擦損失の記述がそのまま流用され、一定の粗度係数を与えた計算をしている。しかし、不等流の水利計算に等流の粗度係数を流用することの妥当性は十分に検証されていない。その上、交互砂州上の平面二次元的な流れの摩擦損失についてはさらに不明なことが多い。

流れの摩擦損失の計算の妥当性を検証するためには、水深と流速の同時かつ空間的にある程度の密度での測定が必要である。実河川における推移と流速の測定技術の現状は以下の通りである。水位については水位計による点計測、流速については浮子またはaDcp<sup>1)</sup>が用いられることが一般的である。しかし、実河川における水位と流速の空間的に高密度かつ一対の測定は実現されていない。また、模型水路における水深と流速の同時かつ空間的に高密度な測定も未確立である。模型水路における平面二次元的な流速の測定例として、プロペラ式流速計を用いて模型水路内に形成された砂州上の流速を測定した例<sup>2)</sup>がある。彼らの手法は一度排水を行い、形成された底面起伏を速乾性ボン드로固定した後に再通水を行い、プロペラ式流速計を用いて数平方cm毎の流速を測定した。彼らの測定法は、固定床における水深と流速の同時かつ平面2次元的な測定を実現しているものの、移動床における測定に対応できない。著者の一人は、模型水路における水面と底面を同時かつ空間的に高密度に測定できるStreamTomography<sup>3)</sup>(以下:ST)を開発し、移動床における水深の測定を可能にした。つまり、水深と一対となる流速測定ができれば、摩擦損失の計算が可能となる。本研究では、移動床における水深と流速の同時かつ平面2次元的な測定の実現に向け、多重露光画像(図-1)を用いた平面二次元の流れの表面流速の測定法を開発した。本文では、等流に近い条件とその比較のために一次元的な不等流の条件を設定し、本測定方法の検証を行った。

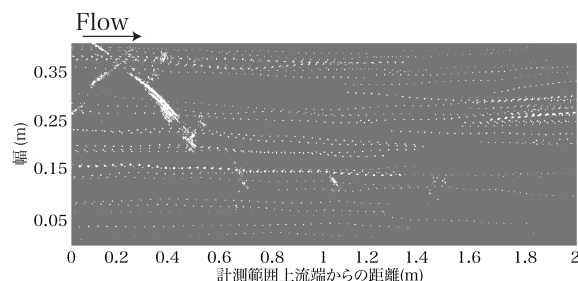


図-1 多重露光画像(白点はトレーサー)

### 2. 表面流速計測のための模型実験

#### (1) 模型実験の概要

模型実験では全長12 m、水路幅0.45 m、水路床勾配は1/100の矩形断面の直線水路を使用した。水路床全体には平均粒径0.76 mmの4号硅砂を3 cmの厚さで平坦に敷き詰めた。実験条件は、堰なしの平坦床で等流に近い条件(Case1)と、水深の変化に伴って表面流速が変化する様な堰を設置した一次元的な不等流条件(Case2)の二つを設定した。底面は通水の継続による底面形状の変化を防ぐため、セメントで固定した。Case2は、底面形状はCase1と同一とするものの、水路上流端から6 m地点に高さ2 cmの堰を設け、徐々に水深が増大する一次元的な不等流を設定した。流量はどちらの条件ともに1.6 L/secを定常で与えた。測定範囲は上流端より3.5 m地点から2 m区間とした。水深の計測装置は前述のSTを用いた。STでの計測解像度は走行架台の移動速度とカメラの動画撮影のfpsで規定される。移動速度は50 cm/s、カメラ動画のfpsは60で設定し、水表面と水底面を1平方cmの密度で測定した。

#### (2) 表面流速の測定方法

本研究では、流れに対して影響が小さくかつ平面二次元の流速を短時間のうちに測定する手法として、多重露光画像を用いた表面流速の測定手法を開発した。流速の測定は、先述したSTによる水深の測定値と一対の関係性を構築できることが望ましい。これらの条件を満たす測定手順について以下に示す：1) トレーサーを散布してその動態を水路を直上から2台の小型カメラで撮影する。2) 撮影された画像を二値化した後に多重露光画像を作成し、3) 多重露光画像から各トレーサーの位置を手動で取得して、その移動距離と撮影間隔から表面流速を算出した。本研究では流れに影響を及ぼしにくいトレーサーとして平均直径2 mmの発泡スチロール球を用いた。水路直上からのトレーサーの動態の撮影には、安

**Key Words:** 表面流速, 多重露光画像

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

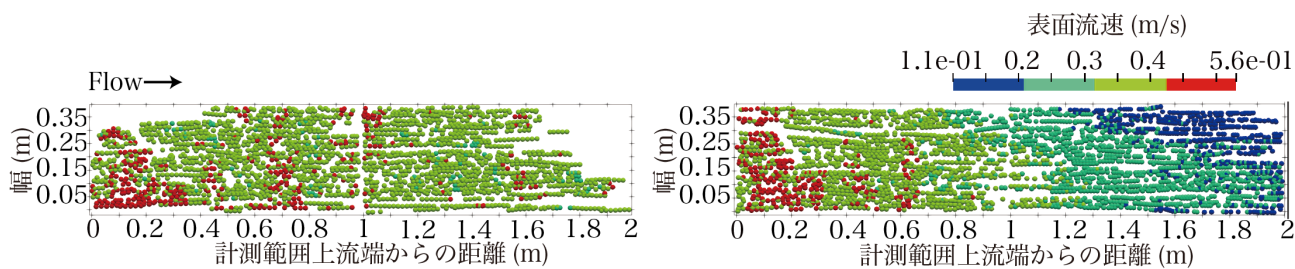


図-2 表面流速の測定結果 (左図: Case1, 右図: Case2)

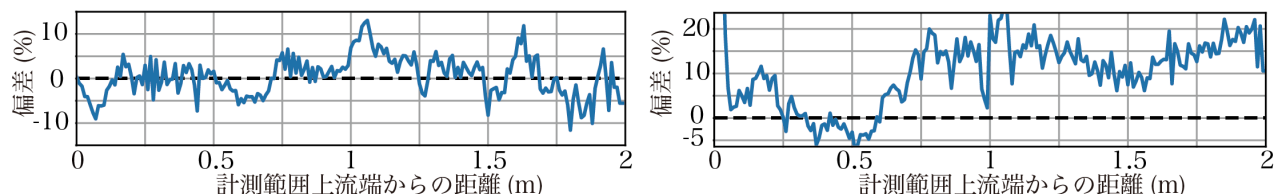


図-3 測定流速の計算流速からの偏差 (左図: Case1, 右図: Case2)

価かつ安易に複数台で同時撮影が可能な撮影装置として RaspberryPi<sup>4)</sup>を使用した。撮影地点は上流端より 4 m 地点及び 5 m 地点の水路直上とした。撮影の際のシャッタースピードは、トレーサー動態を鮮明に撮影するために 3/1000 sec に設定した。なお、空間分解能が高い測定方法として PIV(Particle Image Velocimetry) があるが、流水の水面上に均一かつ高密度なトレーサーの散布が困難であったため、PIV の代わりに多重露光画像を用いることにした。

### 3. 表面流速の測定結果と妥当性

#### (1) 測定結果

図-2 に計測した表面流速の平面図を示す。図中の点は表面流速の測定点を表している。測定点数は等流条件を狙った Case1 で 4775 点、不等流条件を狙った Case2 で 6424 点である。

Case1 の条件における理論的な等流流速は 0.42 m/sec である。これに対し、図に示したとおり全域で等流流速に近い測定値が得られた。Case1 では、平坦床としたものの測定結果にばらつきが見られた。その要因としては、この実験条件では水面波が生じ、水面のトレーサーが水面波の影響を受けたためと推測される。また、測定範囲の上流端および下流端の左岸側において空白が目立つのは、水面の反射によってトレーサーの位置が画像から判別できず、その位置座標を取得できなかったためである。

Case2 では、想定した不等流が形成され、縦断方向に表面流速が徐々に減少していく様子が測定できている。Case1 と同様に水面波の影響と思われる値のバラツキはあるものの、計測範囲の下流側では水深の増大に伴いその影響は小さくなっている。

#### (2) 測定結果の妥当性

多重露光画像を用いて測定した表面流速の妥当性について、連続式から求めた流速との比較を行なった。連続式を用いた流速の算定には、模型水路の上流端に供給している流量及び ST で測定した水深から得られる流積を用いた。図-3 は、横断面平均した流速の測定値と連続式から求めた流速の差分値を連続式から求めた流速

で無次元化し、その偏差を求めたものである。

Case1 では、表面流速の測定値の偏差は測定範囲の全域でおよそ 5 % 以内で、平均値は 3.59 % であった。Case2 では、下流へ行くにつれてその偏差が広がっており、上流から 0.75 m 地点より下流では 10 % 以上の偏差が持続的に生じている。表面流速の測定結果と見比べてみると、表面流速が概ね 3.5 m/sec 以上であれば計測精度は 5 % 未満に収まり、それ以下であると偏差が大きくなる傾向がある。この偏差の生じる要因の一つとして、トレーサー位置の取得時の誤差が原因と推測される。本研究におけるトレーサー位置の取得は手動で行っているため、一定の誤差を内包する。つまり流速が早い場所と比較して、流速が遅い場所ではその誤差の影響が相対的に大きくなると推察され、画像の解像度などの撮影条件を変更することによる解決が見込まれる。

### 4. おわりに

本研究では、多重露光画像の画像解析によって平面二次元の流れ場の表面流速の測定を行った。流速が遅い場所における精度に課題が残るものの、それ以外の場所では概ね良好に測定できることが示された。今後は交互砂州などが形成された時の不等流における流速の測定を行い、ST により取得された水深と一対として摩擦損失の空間的な分布を算定し、二次元的な不等流における摩擦損失の特性について調べる予定である。

#### 参考文献

- 岡田将治, 萬矢敦啓, 橘田隆史, 菅野裕也, 菅野裕也: ADCP を用いた洪水流観測の計測精度評価に関する総合的検討, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.67, No.4, I1183-I1188, 2011.
- 長谷川和義, 山岡 勲: 発達した交互砂州の性状に関する実験と解析, 第 26 回水理講演会論文集, pp.32-38, 1982.
- 星野剛, 安田浩保, 倉橋将幸: 交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発, 土木学会論文集 A2, 74 巻, 1 号 pp.63-74, 2018.
- Raspberry Pi3: <https://www.raspberrypi.org/>