

# 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

新潟大学大学院自然科学研究科 ○学生員 茂木 大知  
新潟大学災害・復興科学研究 正会員 安田 浩保  
新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 石原 道秀  
新潟大学理学部理学科 非会員 早坂 圭司  
新潟大学工学部工学科 非会員 村松 正吾

## 1 はじめに

実河川における移動床における水理の把握には、モデルを用いた数値計算による解析が一般に行われている。しかし、数値計算の結果やモデル自体の検証が十分でないため、数値解析で現象を理解しきることは困難なのが現状である。移動床における数値計算の妥当性の検証には、計算結果と比較するための空間的に高密度な水深と流速の測定値が必要であるが、その測定値を用意するための技術がない。現状、実河川の測定には、水位には水位計、流速、水深および流量には浮子や aDcp<sup>1)</sup> を用いて測定することが一般的である。これらの手法により測定されたデータは移動床水理の解明に大きな成果を挙げているものの、測定上の制約のため、水深と流速の空間的に高密度な一対の測定は実現されていない。一方で、実河川と支配無次元量を合わせて行う模型実験においてはその限りでない。本研究室では、模型水路における光切断法を測定原理とした水面と底面の形状の同時かつ高密度な測定手法である Stream Tomography<sup>2)</sup> (以下、ST) を開発している。この装置は、通水中の水路において水面と水底形状を 1×1 cm の空間密度で測定でき、その測定は 0.5 sec/m で行う事ができるため、時々刻々と流れが変化する移動床を模した実験においても時空間的に高密度な測定を可能としており、水面と底面の差分を取ることによって水深も測定することが可能である。つまり、模型水路において ST の時空間的な測定密度に対応する密度で流速を測定することができれば、測定値から数値計算の妥当性の検証を行うことができる。

著者らは、画像計測の考え方に基づいた非接触式で時空間に高分解能の表面流速測定手法として、トレーサー撮影動画を分解して重ね合わせることで作成した多重露光画像から表面流速を測定している<sup>3)</sup>。しかしこの手法は、手動で処理を行う必要があるため、測定結果を得るために膨大な時間が費やされる事や、手動で位置座標を取得する精度が個人によって差があり、同じ人間でも一定の精度で行うことが出来ないという問題がある。

そこで本研究では、プログラムによる一定基準の自動処理によって、トレーサーを撮影した動画からフレーム毎のトレーサーの位置座標を取得し、表面流速を測定する手法を開発した。模型実験は、本手法の 1) 表面流速測定への適用性の確認と、2) 砂水路床における適用性の確認のため、二つの目的の基に実施して検証を行った。

## 2 表面流速の測定実験

### 2.1 Optical-Flow に基づく粒子追跡手法

本研究では、水表面を移動するトレーサーの座標取得手法として、Optical-Flow に基づくトレーサー追跡を行った。以下にその手順を示す。まず 1) 水表面を移動しているトレーサーを動画で撮影し、グレースケールに変換する。次に、2) トレーサーの輪郭周辺の輝度情報の変化 (以後、輝度勾配) から物体追跡に向けた特徴点<sup>4)</sup> を定め、動画フレーム間で Lucas-Kanade 法<sup>5)</sup> の制約のもとで特徴点を追跡することによって、トレーサーの移動前後の座標を取得する。そして、3) 得られた移動距離を動画フレーム間隔であるトレーサーの移動時間で除すことで表面流速を算出する。プログラムの実装に際しては、画像処理系オープンソースライブラリである OpenCV<sup>6)</sup> を用いた。なお、本手法はその測定手法の性質上、トレーサーの通過した地点のみでしか表面流速の値を得られないため、実際の測定では散布を複数回行い、結果を重ね合わせることで面的な測定を可能としている。

### 2.2 模型実験の概要

表面流速測定のための模型実験は全長 12 m、全幅 0.45 m の直線矩形断面水路を使用した。表面流速の測定範囲は水路上流端から 3 m 地点より縦断方向に 1.0 m 区間とし、水路上流端から 3.5 m 地点直上から RaspberryPi<sup>3)</sup> によるトレーサーの動体の撮影を行った。横断方向の測定範囲は、撮影原動画から測定範囲を切り出す際に左右壁面から 2.5 cm の範囲は切り捨てられてしまうので、0.40 m となる。原動画の解像度は FullHD で撮影し、切り出し後の測

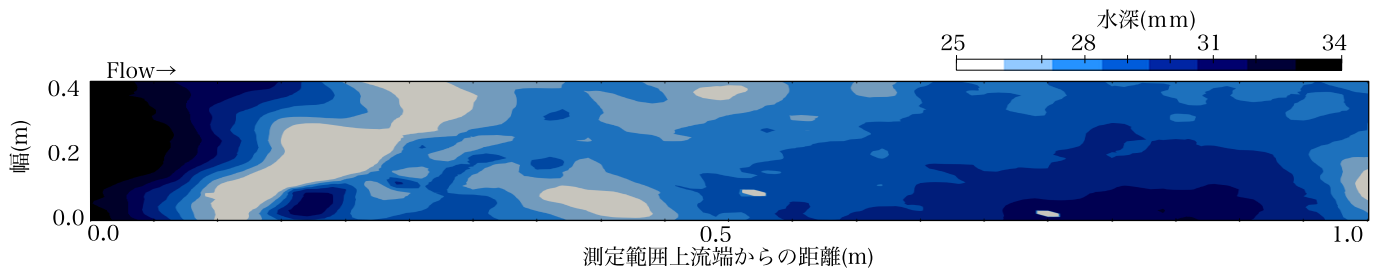


図-1 人工芝水路床での水深

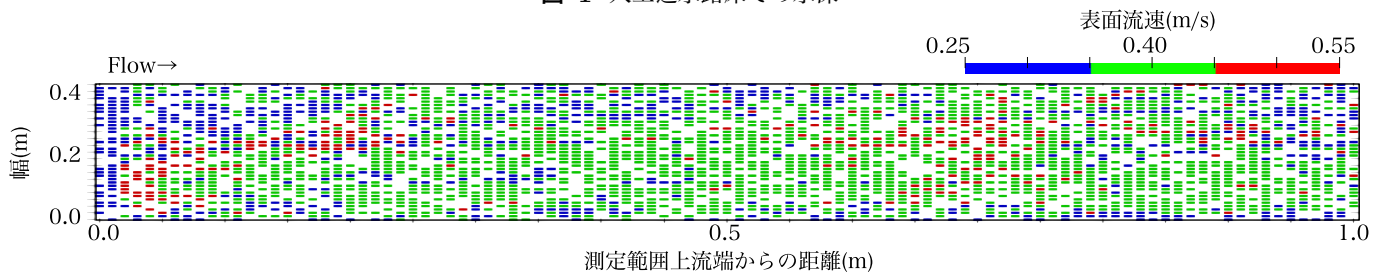


図-2 人工芝水路床での測定結果

定範囲の解像度は  $1558 \times 622$  であるので、1画素あたりおよそ  $0.6 \text{ mm}$  の大きさとなる。また、撮影の fps は、機器の設定上限の 25fps としている。トレーサーは流れに対して影響を及ぼし辛い素材で、かつ前節で示した粒子追跡手法で追跡可能な特徴点を有する条件として、1画素より十分に大きい物が好ましい。そこで、本手法では条件に合うトレーサーとして平均直径  $2 \text{ mm}$  の発泡スチロール球を採用した。また、実験を通して水路勾配は  $1/120$ 、流量は  $2.8 \text{ L/sec}$  を上流端から定常で与えた。

実験は、次の二つの目的に対してそれぞれで固定床の不等流条件を設定して行った。まず一つ目は、Optical-Flowを用いた粒子追跡手法の表面流速測定への適用性を確認する目的で行なった。また、表面流速の測定とほぼ同時に、表面流速の測定値の検証に用いるデータ収集のための水深を ST により面的に測定した。ST は測定する際にある程度の水深を必要とするため、水底面の粗度調整を行い、水深を稼ぐために  $2 \text{ mm}$  の毛足が一様かつ密に配置された人工芝を底面に敷設した。表面流速の測定と ST の測定には時間差が存在しているが、実験では底面形状が時間的に変化を持たない定常条件であるため、考慮の必要性はないと考えた。なお、人工芝は水底面の粗度を十分に稼ぐことができ、かつ直上から撮影した際に毛足の直径が十分に小さく特徴点として認識されづらいものを選定している。

次に二つ目は、今後移動床に本手法を適用することを考慮すると、河床波を対象とした移動床実験によく用いられる平均粒径  $0.76 \text{ mm}$  の 4号珪砂上の流れにおいて本手法の適用性を検証する目的で行なった。その際、砂粒子が1画素より大きいため特徴点として検出されうるので、フィ

ルター処理によって排除しなければならない。しかし、水路床に砂粒子を敷き詰めた移動床上の実験では、底面形状とともに流況が時々刻々と変化するため、本研究の主旨に沿った検証とはならない。そのため、砂水路床におけるフィルターの適用性確認のため、砂粒子を一様に貼り付けた長さ  $6 \text{ m}$ 、幅  $30 \text{ cm}$  の FRP 板を水底面に設置して、一つ目と同様に定常条件において実験を行った。

表面流速の測定に際して、トレーサーの散布は  $5 \sim 8$  秒に一回程度、縦横断に満遍なく広がるように行っており、測定時間は  $75$  秒間である。

### 3 人工芝水路床における表面流速の測定

#### 3.1 表面流速の測定結果

実験水路における水深分布を図-1に示す。水深が場所によって変化を持っているのは、水路床に敷設した人工芝の下に水が入り込み、所々人工芝を押し上げて凹凸を持つような底面形状となったことが原因である。

表面流速の測定結果を図-2に示す。測定結果は、STの測定密度に対応するような  $1 \times 1 \text{ cm}$  のメッシュに落とし込んでおり、着色されているセル1つ1つが測定値を表している。トレーサーが通過しなかった場所では、測定手法の制約上表面流速が測定不可能なため、所々欠測点が散見されるものの、面的に測定できていると言える。

#### 3.2 表面流速の測定結果の検証

表面流速の測定値の精度検証は、上流端から供給した流量を真値とし、水深と表面流速の測定値を用いて算出した流量を比較することで行なった。理論上、本実験における流れは定常のため、各横断面において流量は一定となる。

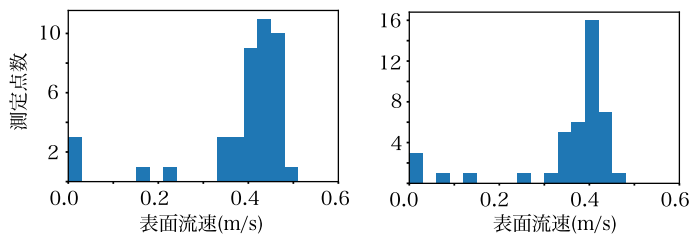


図-3 左：0.3m 地点，右：0.6m 地点における表面流速測定値ヒストグラム

水深と表面流速の測定値の解像度は同一であるため、同座標において対となる値で積を取り、横断面ごとに足し合わせることで流量を算出する。測定値を用いた断面ごとの流量の算出式は、式(1)に示す連続式を用いた。

$$q = Av = b \times \sum_{k=1}^{40} (h_k \times (v_{\eta k} \times 0.7)) \quad (1)$$

流量を計算する際の単位ごとの幅  $b$  を定数として 0.01 m で与え、水深  $h$  と表面流速  $v_{\eta}$  には測定値を用いた。表面流速の測定値には、対数則に基づく平均流速への補正係数として 0.7 を乗じた。図-3 に示す測定範囲上流端から 0.3 m 地点、0.6 m 地点における表面流速測定値のヒストグラムには、各断面において欠測点である表面流速 0.0 m/sec の点が確認される。このような点では、流れが急変しない仮定のもとで横断的な近傍の点から値を補間して計算している。また、図-3 には、0.0 m/sec ではないが平均値から離れている流速が確認されたが、これは外れ値とは言い切れないため、そのまま検証に用いることとする。

表面流速の流量の再現性による検証結果を図-4 に示す。図の赤い線は真値とする上流端からの供給流量を示しており、その上下にある赤い点線は真値の  $\pm 5\%$  の範囲を示している。結果からは、測定範囲中央付近で精度良く測定できていることが確認でき、 $\pm 5\%$  程度の精度で真値とする供給流量を再現できていることがわかる。その一方で、0.2 m 地点より上流側と 0.8 m 地点より下流側の端部において、流量の再現精度の低下が確認された。測定範囲上流端における精度低下は、トレーサー特徴点の検出間隔によるものだと推測される。本手法はシステム上の制約により、15 フレーム (0.6 秒) 間隔毎に特徴点の検出を行なっている。そのため、測定範囲上流端から流入したトレーサーの特徴点の検出に最大 0.6 秒のタイムラグが生じる。本実験での等流流速は 0.4 m/sec 程度であるので、上流端から 24 cm 程度の範囲ではタイムラグの影響により測定数が少なくなり、それに伴うように大数の法則に従って精度が低下

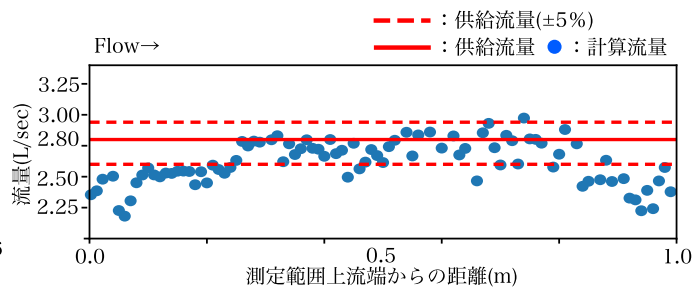


図-4 流量の再現性による測定値検証

したと考えられる。測定範囲下流端では、トレーサーが測定範囲から流れ出ることによって特徴点が消滅する。その際、似たような特徴点が存在してしまうと、ある程度の範囲まで上流側に遡って補足してしまう。本手法で用いている特徴点に関する処理では、一つのトレーサー粒子に複数の特徴点を検出できない。そのためか、測定範囲後半では良好な粒子追跡が難しかったと推察される。つまり、この検証から本手法における 1 台のカメラの有効撮影範囲は、中心から  $\pm 30$  cm 程度の範囲であると示された。

## 4 砂水路床における適用性の検証

### 4.1 トレーサーの切り出し

人工芝水路床に比べて砂水路床では、その構成要素である砂粒子 (平均粒径 0.74 mm) が撮影動画の 1 画素 (0.4 mm) に対して大きく、特徴点探索の際に特徴として検出される。つまり、トレーサーの輝度勾配だけではなく、背景の砂の輝度勾配も特徴点として検出してしまうという問題が発生し、正確にトレーサーのみを追跡することが難しくなる。それゆえ、砂水路床上の測定においては注目したいトレーサーの輝度情報のみを抜き出すようなフィルター処理を施す必要がある。本手法では、原画像におけるトレーサーの色・彩度・明度の範囲を指定し、範囲以外の場所では輝度を 0 とするようなフィルターを用いた。フィルター処理の後に画像をグレースケールに変換すると、着目したいトレーサーの輝度情報を保ちつつそれ以外の場所の輝度が 0 である状態となり、背景の砂によるトレーサー追跡への影響を排除できる。

### 4.2 表面流速の測定結果

前節で述べた、砂による粒子追跡への影響を排除するフィルター処理を施した、砂水路床における表面流速の測定結果を図-5 に示す。図は測定範囲全体を表示しているが、今回の測定では範囲全域で測定することができず、図中の矢印の範囲に示す、敷設した FRP 板上のみの表面流速測定値を得た。これは、フィルター処理によるトレーサーの切

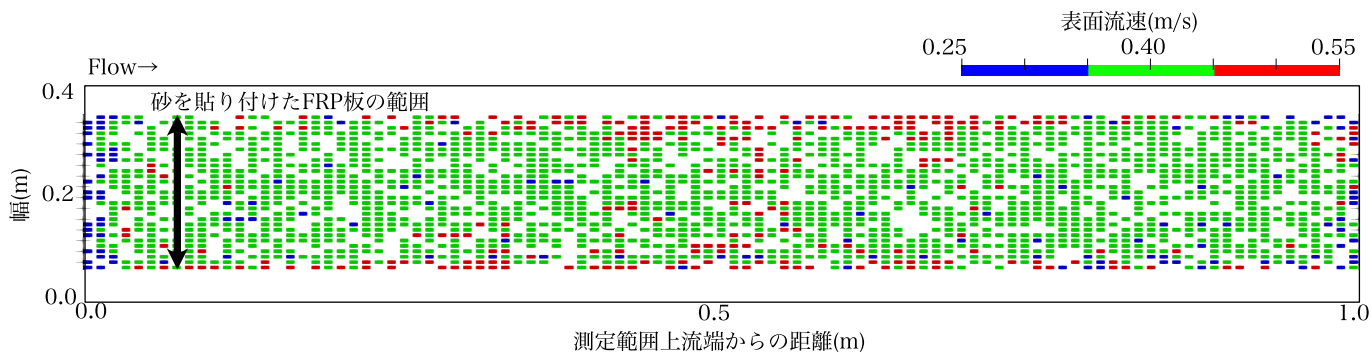


図-5 砂河床における測定結果

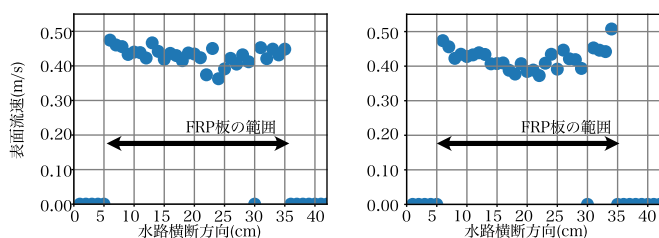


図-6 左図：0.3m地点，右図：0.6m地点における横断方向測定値分布

り出しを行ったところ，最も注目したいFRP板上のトレーサーを優先すると，それ以外の範囲では上手くトレーサーの輝度情報を残すことができなかつたことが要因である．そのため，図-6の横断方向の表面流速分布に示すように，表面流速の測定値が0.0 m/secとなっており，水路左右岸付近において欠測が発生している．水路床とFRP板の境界部分では，中心部分よりも表面流速が上昇している．これは，水路床とFRP板の境界部分の速度差によって生じていると考えられる．FRP板に貼り付けてある砂を用いた過去の実験から，FRP板上の粗度は0.014程度であり，実験に用いている水路自体の粗度は0.010程度と差が生じている．この粗度の差によって，その境界部分において流速の差によるせん断力が発生し，流速の遅いFRP板上の流れが釣られるように大きくなっているのではないかと推測される．人工芝水路床と同様に欠測点は散見されるものの，砂水路床上において面的な表面流速の測定ができていることが確認できた．人工芝水路床における実験と同様に流量による精度検証を行いたいが，水路横断面において粗度が変化を持つため，水路左右岸の欠測部において測定値から値を補間する事ができない．そのため，砂水路床における粗度係数0.014とSTによる水深の測定値，またエネルギー勾配として河床勾配を用いて Manning式から算出した等流流速との比較を行った．計算された等流流速は0.40 m/secであり，今回の測定したFRP板上で等流流速程度の表面流速を測定したことが確認できた．

## 5 おわりに

本研究では，著者らによる従来の表面流速測定手法と比べて大幅な測定時間の短縮と精度向上を目指し，Optical-Flowに基づく画像処理を導入し，人工芝水路床の模型実験結果から算出された流量を用いて表面流速の精度を検証した．その後，砂水路床においてその適用性を確認した．その結果，カメラ直下を中心に±30 cmの範囲内で良好な精度で表面流速が測定できることを確認した．また，砂水路床における測定では，測定範囲全体で等流流速程度の表面流速を測定でき，本手法が砂水路床においても適用できることを確認した．

本手法では，流量の検証による測定の精度自体は上昇こそしなかったものの，プログラムによる一定基準の自動処理により，課題であった位置座標取得を一定の精度で行えるようになった．また，測定結果を得るまでに要する時間は同程度の測定を行なった場合の従来手法に比べて大幅に短縮し，およそ50倍程度の高速化を実現した．

## 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.
- 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.
- 茂木大知，五十嵐拓実，安田浩保，早坂圭司，村松正吾：砂州の発生・発達過程における表面流速の計測法の開発，第36回土木学会関東支部新潟会研究発表講演会論文集, pp.130-131, 2018.
- Shi, Jianbo and Carlo Tomasi. "Good Features to Track," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994, pp. 593-600.
- 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.
- OpenCV : <https://opencv.org/>
- Raspberry Pi : <https://www.raspberrypi.org/>