

遠赤外線サーモグラフィーを用いた開水路表面流速計測 および流量の逆解析

Inverse analysis of discharge of rivers by measuring surface velocity with infrared thermography

北海道大学 工学部環境社会工学科 ○学生員 妹川陽介(Yousuke Imokawa)
北海道大学 大学院工学研究院 正員 木村一郎(Ichiro Kimura)
北海道大学 大学院工学研究院 フェロー 清水康行(Yasuyuki Shimizu)

1. 研究背景

洪水などの水災害において流量、流速の変化を知ることとは被害規模の推定、対策をたてる上で重要なことである。そのため流量が計測しにくい場合でも、流速特に表面流速と河床高の計測は比較的可能であり、これらのデータを用いて流量を推定できれば災害調査はより正確で容易になる。

表面流速を計測する方法として、温度による計測が研究されている。温度で流速を計測することのメリットとして、画像的に流速を処理することにより、1点で計測する電磁流速計に比べて広範囲に計測することが可能であり、温度をトレーサーとしているので計測の際に温度差さえあれば計測できる簡易性が挙げられる。しかし温度による表面流速の計測は未だ手法が確立されていない。その理由として、計測する際にはっきりとした温度差をカメラが認知できなければ計測ができないが挙げられる。

そこで本研究の目的は、温度をトレーサーとした表面流速計測の妥当性に関する評価および河床高と表面流速から流量を求める逆解析とする。

2. 表面流速計測実験概要

今回の実験では温度による表面流速の計測と並行して、粒子をトレーサーとしたPIV解析による計測、電磁流速計を用いた計測を行い比較する。単純矩形の実験水路を用いた実験であることから、比較する流速は縦断方向の流速とする。

使用した水路は幅20cm、長さ10m、勾配1/1000の実験用水路で行い、流量は2.07ℓ/s、水深7.63cmとし、堰上げを行うことで等流状態にした。計測場所は上流から5mの地点であり、流量は流量メータにより計測し、水深はポイントゲージにより計測した。温度による表面流速の計測およびトレーサーを用いたPIV解析による計測には、PIV解析ソフトとして株式会社ディテクトのFlowNizer 2Dを用いた。

2.1 遠赤外線サーモグラフィーによる計測

温度による表面流速の計測として、遠赤外線サーモグラフィーを用いた計測を行う。サーモグラフィーカメラはフリーアシスト株式会社のE4型を用いた。

じょうろを用いて、流れに影響をおよぼさないように十分上流から熱湯を流す。この際じょうろから流れる熱湯の量は水路を流れる水の量に対して十分小さいとする。

流れてくる流体には温度差が生じ、その様子をサーモグラフィーカメラによって撮影した動画を元にPIV解析することで表面流速を算出する。

2.2 トレーサー粒子による計測

トレーサー粒子を用いたPIV解析によって表面流速計測について説明する。トレーサー粒子として粒径が0.12mmの非常に小さな塩化ビニル粒子を用いた。この粒子を流れに影響が出ないように十分に上流から水路に撒く。

その様子を撮影した動画を元にPIV解析を行い、表面流速を算出する。

2.3 電磁流速計による計測

電磁流速計を用いた流速計測では、横断方向に右岸の壁面から1cm, 5cm, 10cm, 15cm, 19cmの5箇所による測定を行った。なお、電磁流速計は測定の際に水面から出ると故障の危険性があるため測定は水面から3cm下の地点で行った。

0.2秒間隔で測定し、それを1分間行う。2セット計測し各ポイントで計600個のデータの平均値を用いる。電磁流速計は株式会社ケネックのVMT2-200-04P型を用いた。

3. 表面流速計測実験結果および考察

3.1 遠赤外線サーモグラフィーによる計測結果

サーモグラフィーカメラで撮影した様子を図1に示す。オレンジ色の部分では水温が高いところであり紫色の部分は水温が低いところである。この温度差による濃淡の違いをトレーサーとしてPIV解析を行った。

PIV解析の計算条件として、格子間隔は1つあたりの格子サイズが流れ方向に1cmとなるよう縦断方向の格子の数を22個、横断方向に2cmとなるよう横断方向の格子の数を11個とした。1フレームを1/30秒とし、解析フレーム数は1311である。また、計算結果出力の際に速度が5cm/s以下および28cm/s以上のベクトルは過誤ベクトルとみなし除外した。

横断方向の格子列ごとの平均表面流速を表1に示す。また、表内のLは右岸からの距離、Vは断面平均流速を示す。この表の結果から壁面に近いほど流速が遅くなっていることが分かる。

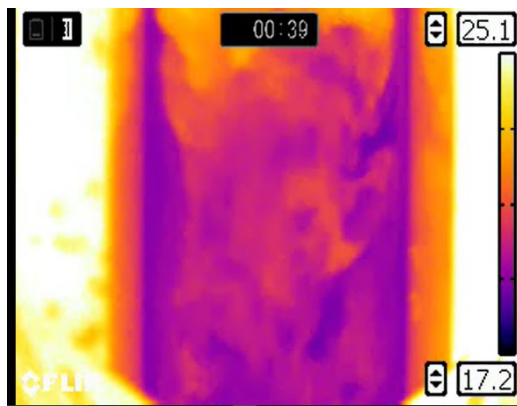


図1 サーモグラフィーカメラによる水路の撮影

表1 サーモグラフィーカメラを用いた表面平均流速

L(cm)	V(cm/s)	L(cm)	V(cm/s)
2	14.30	12	14.97
4	14.62	14	14.91
6	15.12	16	14.80
8	15.08	18	14.52
10	15.05	20	14.33

3.2 トレーサー粒子による計測結果

図2はトレーサー粒子を水路に流し、PIV解析している様子である。ベクトルは流れている方向を示し、ベクトルの色は速度を表している。この図から流速分布や流速ベクトルが分かる。

格子数はサーモグラフィーを用いた実験と同様の格子サイズとなるように、縦格子数28の横格子数11とした。フレームレートも同様に1/30秒であり、フレーム数は2743フレームとなった。

横断方向の格子列ごとの平均表面流速を表2に示す。温度による計測結果と同様に壁面に近いほど流速が遅くなっていることが分かる。



図2 粒子を用いた撮影をPIV解析している様子

表2 トレーサー粒子を用いた表面平均流速

L(cm)	V(cm/s)	L(cm)	V(cm/s)
2	11.86	12	14.39
4	12.38	14	14.07

6	13.07	16	13.34
8	13.80	18	12.59
10	14.40	20	11.87

3.3 電磁流速計による計測結果

電磁流速計による結果は表3のような結果となった。前2つの計測結果同様に、壁面付近で流速が低下していることが確認された。

表3 電磁流速計による測定結果

L(cm)	1	5	10	15	19
V(cm/s)	14.33	15.41	15.55	15.30	14.00

3.4 考察

図3は3種類の計算結果に加えて計算により求まる断面平均流速をまとめた図である。断面平均流速は $Q=AV$ より計算した値を用いる。

各計測結果の中で最も大きな値は電磁流速計による計測である。本来ならば電磁流速計による計測は水面より数cmほど下で計測しているため、他の計測方法より小さくなると考えられるが、最も流速が大きくなっている。理由としては測定器具が異なることによる誤差が考えられる。

トレーサー粒子を用いた計測が最も流速が小さくしており、特に壁面付近での流速の減少が他の計測方法に比べて顕著である。これは壁面における粒子の摩擦が水に比べて大きく、水と粒子間でも摩擦が生じるためだと考えられる。

温度を用いた計測は水温差による密度差が表面に対して垂直方向への流れを発生させており、実際の縦断方向への表面流速より小さく評価されていると考えられる。

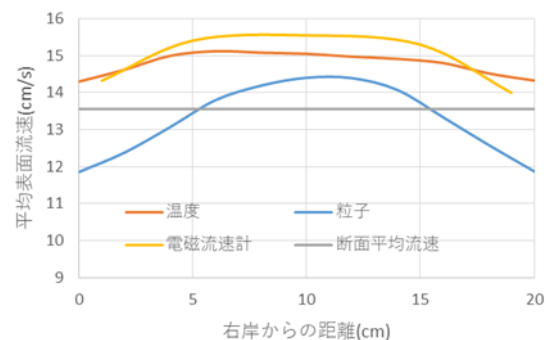


図3 各計測方法の計測結果

4. 河床に障害物を設置した実験

4.1 実験概要

水路に障害物を置き河床高を変化させ、その状態から表面流速を計測し、河床高の曲余滴変化を考慮した対数則を用いて流量を逆解析する。表面流速を計測する手段は計測結果としては温度による表面流速計測の結果は妥当であったと言えるが、逆解析では流量の差が非常に重要だと考え、熱湯による流量の変動を防ぐため粒子によるPIV解析を用いる。水深の計測はポイントゲージを用

いる。

使用した水路の条件は表面流速測定実験と同様の、勾配 1/1000、長さ 10m、幅 0.2m とする。流量は 2.070/s である。実験条件は構造物(以下 bump とする)のサイズを変えた 3 ケースで行い、発泡スチロールを用いる。計測は上流から 5m の地点で行い以降、上流から 5m 地点を 0m 地点とする。bump の位置は上流からの距離 0.16m のところに設置するものとする。各ケースは bump の縦断方向幅のサイズのみ変更しており、Case1 では 30cm、Case2 では 60cm、Case3 では 90cm としている。

4.2 逆解析手法

今回の実験においては、流速および河床高から流量を逆解析することが目的であり、その具体的な手法について説明する。

式(1)は一般的な粗面の対数則の形であり、この式から U を消去し流量 $Q(m^3/s)$ を求めるために(2)、(3)を用いる¹⁾²⁾。

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} * \ln \frac{z}{k_s} + A_R \quad (\text{粗面の対数則}) \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{h} * \int_{z_0}^h u(z) du \quad (2)$$

$$Q = AV \quad (3)$$

$u(z)$ は流速(m/s)、 u_* は摩擦速度(m/s)、 κ はカルマン定数 0.4、 z は河床高のパラメーター(m)、 k_s は相対粗度(m)、 h は河床高(m)、 A_R は定数 8.5、 z_0 は粗度(m)、 A は断面積(m^2)、 V は断面平均流速(m/s)とする。 z_0 は h に対して十分に小さいとする。

(2)に(1)と(3)を代入し

$$Q = A * u_h * \left(\frac{1}{\kappa} * \ln \left(\frac{h}{k_s} - 1 \right) + A_R \right) / \left(\frac{1}{\kappa} * \ln \frac{h}{k_s} + A_R \right) \quad (4)$$

この式を用いて流量を逆解析していく。

また、水路はアクリル板のためマンニングの粗度係数 $n=0.01$ とし、重力加速度 9.8 とすると、相対粗度はマンニングストリクラーの式(5)より 1.9×10^{-4} となった。

$$k_s = (n * \sqrt{g} * 7.66)^6 \quad (5)$$

5. 逆解析実験結果および考察

図4は各ケースの上流からの距離と表面流速の関係を表した図である。図内の縦黒線は bump の始点を示し、各色の縦直線はそれぞれのケースの bump 終点を表す。図からは bump が発生した付近で速度のピークが来ていることが分かる。ピーク前は流速が指数関数的増加しており、ピーク後からは流速が直線的に減少していることが分かる。bump の幅が大きくなる程最大流速が大きくなっている。また、Case1 のみ bump の直上流部の流速が bump の直下流部の流速ピークよりも小さいことが分かる。

以上の結果をもとに、まずは一般的な粗面での対数則を用いて流量を逆解析した。結果を図5に示す。図5では各ケースにおいて、実験で用いた流量である 2.070/s の直線に対して上流側で交点が2つ、下流側でも交点が2ある。これでは推定流量値の変動に対して1直線の実験値が交わったとしか言えないので、まずは傾きの小さ

い十分上流側と bump 付近で実験値に近づける補正をすることを考える。以降の図の下部の図形はそれぞれの折れ線の色に対応する bump の形状を示すものとする。

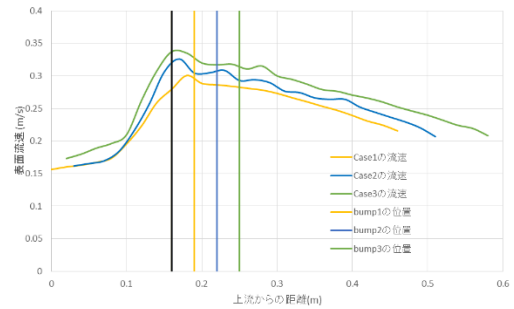


図4 各ケースの上流からの距離と表面流速

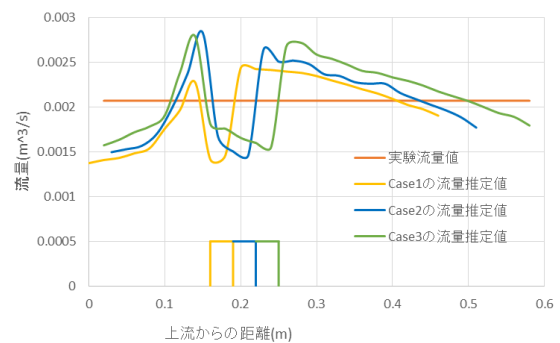


図5 各ケースの対数則による流量の推定値

6. 逆解析補正計算

一般的な対数則では流量の推定値と実験値では大きな差があることが示された。そこで、Nelson らが提案した Best fit profile 対数則を用い、補正する³⁾。この式は経験的に推定値が実験値に近づくことされたため使用された。Best fit profile 対数則は(6)式とする。

$$Q = A * u_h * \ln \frac{0.2+h}{z_0} + 1.625 + \frac{z_0}{h} / 2.945 + \ln \frac{0.2+h}{z_0} \quad (6)$$

(6)式では z_0 のみ不明なので粗度 z_0 を求める。¹⁾粗度 z_0 を用いた対数則は(7)式で示す。

$$\frac{u(h)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} * \ln \frac{z}{z_0} \quad (7)$$

e を自然対数とし、(1)、(7)式に $z=h$ を代入し z_0 を k_s の式で表す。

$$\frac{1}{\kappa} * \ln \frac{h}{z_0} = \frac{1}{\kappa} * \ln \frac{h}{k_s} + A_R \quad \text{より}$$

$$z_0 = \frac{k_s}{e^{\kappa A_R}} \quad (8)$$

$$z_0 = 6.3 * 10^{-6}$$

図6は Best fit profile 対数則を使用した時の流量推定値を示している。この図より Best fit profile 対数則では一般的な対数則に比べて上流からの距離が 0m から 0.1m 付近および 0.16m から 0.25m の傾きが小さいところでは実際の流量値に近づいたが bump の上流下流といった勾配が大きく変動する地点での値が実際の値と大きく異なることが確認された。

そこで、Nelson らはこの問題点に対してさらに補正する計算として、図7のように底面を疑似的に設定し河床高を変化させる方法を提案している³⁾。以下その方法を示す。上流と下流では流速の変化の仕方が異なるため、異なった補正方法を用いる。

(1) 上流の補正

bump の高さを $d(0.03\text{m})$ 、bump まで距離を $L_u(\text{m})$ とし、補正係数を γ_u とする。 $L_u = \gamma_u \cdot d$ とし、上流では補正する位置を上流から 8cm とした場合に最も実験値に近づいたため、 γ_u を $8/3$ とした。 $L_u = 0.08\text{m}$ とし、新たな底面を設定することで河床高を変化させた。

(2) 下流の補正

上流と同様に L_d 、 γ_d を設定する。同様の理由で下流では $\gamma_d = 12$ 、 $L_d = 0.36\text{m}$ とし、新たな底面を設定することで河床高を変化させる。さらに下流側ではこのままだと推定値が実験値に対して大きく見積もられてしまうので³⁾Best fit profile 対数則に $1 + \beta \times (-d/L_d)$ をかけることで補正を行う。この際 Mr.Nelson らの実験では $\beta = 6$ が最も実験値に近づく値となったが、今回の実験では実験値により近づくように $\beta = 3$ とした。以上を元に補正した結果が図8である。

3 ケース共に bump が終了した直後の流量が実際の流量よりもかなり少なく、直前では流量が実際の流量よりも多く見積もられている。これは bump による流れの乱れが局所的に三次元的な流れ構造を生じ、bump の直前直後で対数則からのずれが大きくなっているためと考えられる。

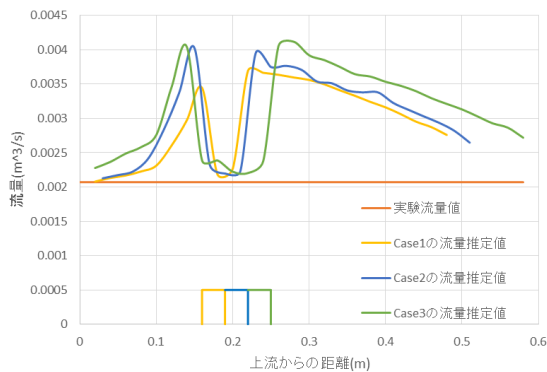


図6 各ケースの best fit profile 対数則による流量の推定値

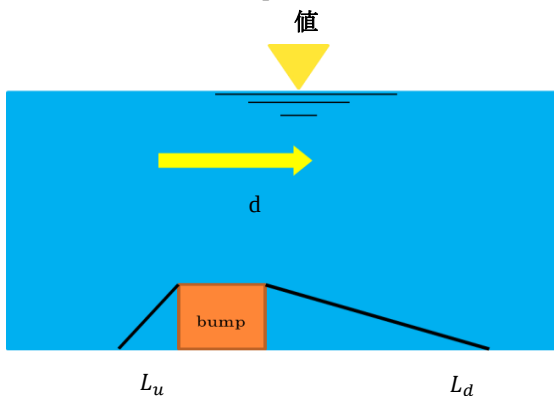


図7 補正モデル

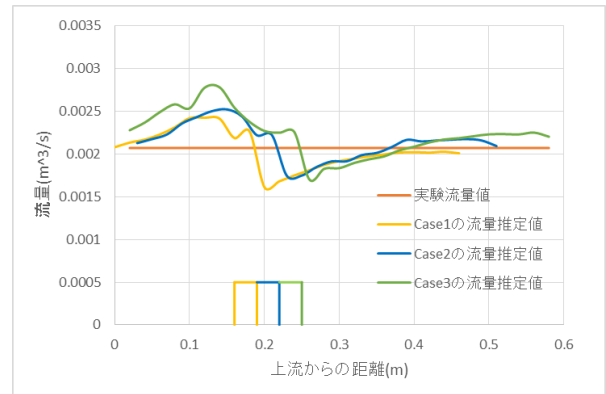


図8 各ケースの best fit profile 対数則による流量の推定値に補正を加えた流量の推定値

7. まとめ

今回、温度をトレーサーとした表面流速計測の妥当性に関する評価および河床高と表面流速から流量を求める逆解析を、様々な流速計測方法を用いて行った。そこで得られた主な結論を以下にまとめる。

- 1) 温度による表面流速計測は電磁流速計の計測と比べて大きな差はなく、断面平均流速からも大きく離れていないことから、計測結果としては信頼できるものである。
- 2) 温度を用いた計測は温度差が非常に重要であり、今回のような実験水路での場合、温度差を出す手間や微量な流量への影響があるため、適していない可能性がある。しかし、現地においては表面温度の変化が実験スケールよりも大きいことが推測されるため、現地スケールの適用性については別途検討する必要がある。
- 3) 一般的な対数則を用いた逆解析は推定値と実際の値で大きく異なった。best fit profile 対数則を用いることで実際の値に近づくものの、流れの剥離を考慮してさらなる補正の必要性が挙げられた。
- 4) 死水域を考慮した疑似的な平滑化底面を設定する補正を行うことで、bump 後の値を近づけることができたが、bump 直前直後の補正にはさらなる検討の余地があることが確認された。

8. 参考文献

- 1) 日野幹雄:明解水理学:p.95~p.99:2016年3月1日発行 丸善出版
- 2) 玉井信行:水理学 1:p.50~p.52:1989年1月10日発行 培風館出版
- 3) Jonathan M. Nelson, Paul J. Kinzel, Mark W. Schmeckle, Richard R. McDonald, and J. Toby Minear: Field and Laboratory Determination of Water-Surface Elevation and Velocity Using Noncontact Measurements
雑誌名: Proceedings of APD-IAHR2016:2016年発行