

開水路乱流の水表面流速分布特性

徳山高専 正会員 ○渡辺 勝利
 徳山高専 正会員 ○宇根 拓孝
 山口大学 正会員 ○朝位 孝二

1. はじめに

流量観測は、河川を管理する上で必要不可欠なものであり、とくに、大規模洪水における流量観測は治水対策において極めて重要である。しかし、低水観測と比べて観測頻度が少なく、安全、确实、高精度に観測を行うことが強く望まれている。我が国の河川のように出水時に大量のごみや浮遊物が流下する状況下でも簡便で確実に流量を観測できる方法の一つとして浮子観測がある。浮子観測は、水路幅に応じて複数の側線において浮子を投入し、それが所定の距離を流れる時間を計測することにより、水表面の平均流速を計測する方法である。この平均流速に校正係数を乗じて断面平均流速が求められる。この校正係数は、我が国では国土交通省によって表-1のように定められている。最近では、河川流量をより高精度に計測する観測方法として ADCP が採用されている。これは、河川流の速度の三成分を直接計測することができ、より精度の高い流量を計測することができる。ADCP によって計測された流量は浮子による観測結果と比較して 10 数%程度小さくなることが示唆されている^{1),2)}。浮子法における観測精度を向上させるには、水表面流速と断面平均流速の比である校正係数を精度よく見積もることが必要とされている。洪水表面を流下する浮子は、水表面の乱流構造の影響を受けることが推測され、それが速度に反映されることから、その特性を明らかにすることが重要である。洪水時の河川における水表面の乱流構造については、木下³⁾によって並列らせん流の存在が明らかにされている。木下は、実河川の洪水時における観測を行い、水深の2倍の間隔で、流れの低は上昇流と下降流を生成する大規模な縦渦構造の存在が推測されている。しかし、大規模渦構造の実体やそれが水表面の流速分布に及ぼす影響については、未解明のままである。以上のことを踏まえて本研究では、PTV や染料注入法を用いて、開水路流れの水表面流速分布特性を検討し、水表面平均流速から断面平均流速を算出するための校正係数および水表面流速分布と内部構造の相互関係を明らかにすることを目的とした。

表-1 建設省(国土交通省)設定の浮子の校正係数

h [m]	l [m]	λ_f
~0.7	Surface	0.85
0.7~1.3	0.5	0.88
1.3~2.6	1.0	0.91
2.6~5.2	2.0	0.94
5.2~	4.0	0.96

(h : 水深, λ_f : 校正係数)

2. 実験装置および方法

実験では、勾配 1/1000、長さ 10m、幅 60cm、高さ 15cm のアクリル樹脂板製滑面開水路を用いる。水路の上流端には、整粒装置としてハニカム(径 4mm、長さ 3.2cm、幅 25cm)を、その直下流には乱流促進用のスプリングワイヤを設置した。また下流端には水位調整用の堰を設けた。

実験では、上流から 5m 付近において、水表面 PTV、水表面における PTV と斜め横断面視の同時可視化を行った。水表面 PTV では、水表面 PTV では、水深 (H) を 6.5cm 一定として、流量 Q を 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000cm³/sec に設定した。PTV では、水路上方から粒子を水表面に均一に散布し、その流下する様子を、水路上方に据え付けられたデジタルビデオカメラ(SonyHDR-FX1000)で撮影をした。トレーサーには、平均粒径 0.25mm、比重 1.01 の DAIAION の HP20 を使用した。水表面における PTV のデータ解析では、PTV 解析ソフト FlowPTV を用いて、1 分間 3600 枚の画像を解析し、瞬時の流速分布を求め、それらの統計処理によって平均流速分布、乱れの分布

キーワード 流量観測, 開水路乱流, 校正係数, 縦渦構造, PTV

連絡先 〒745-8585 山口県周南市学園台 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科

T E L 0834-29-6326

表-2 実験条件

Case	Q(cm ³ /s)	H(cm)	Um(cm/s)	Re	$\nu(\times 10^{-2})$	Fr
1	2160.2	6.5	5.54	4224	0.8523	0.069
2	3002.6	6.5	7.7	6082	0.8228	0.096
3	3942.3	6.5	10.11	7761	0.8466	0.127
4	5096	6.5	13.07	10189	0.8336	0.164
5	6033.8	6.5	15.47	11905	0.8447	0.194
6	7012.6	6.5	17.98	13899	0.8409	0.225

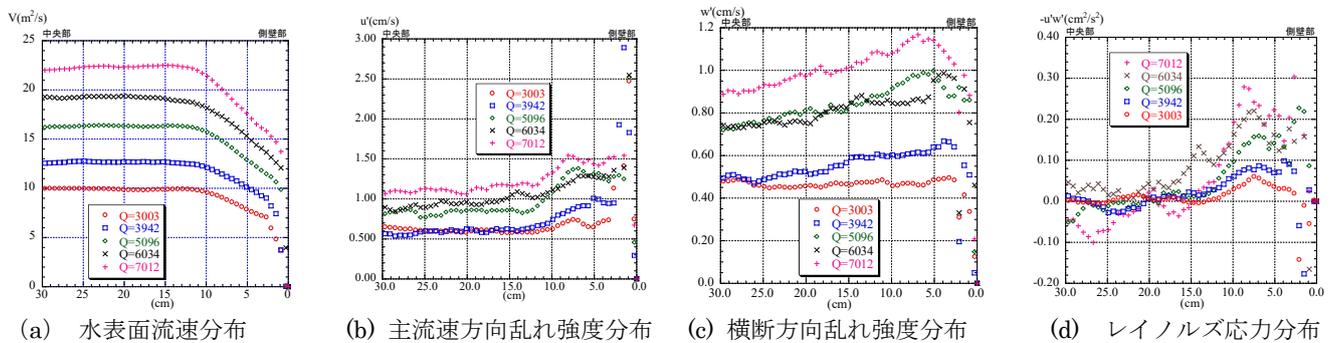


図-3 水表面平均流速分布

を求めた。内部流況の可視化では、同粒子を水路上方から散布すると同時に、蛍光染料（フルオレセインナトリウム）水溶液を水中に注入した。撮影位置の水路側方から水表面と斜め横断面にスライドプロジェクターのスリット光膜を挿入し、水路上方のデジタルビデオカメラで撮影をした。同時可視化の結果からは、瞬時流速分布と内部流況との相関関係の検討が可能となる。詳細な実験条件は表-2 に示したとおりである。

3. 実験結果および考察

(1) 流速計測

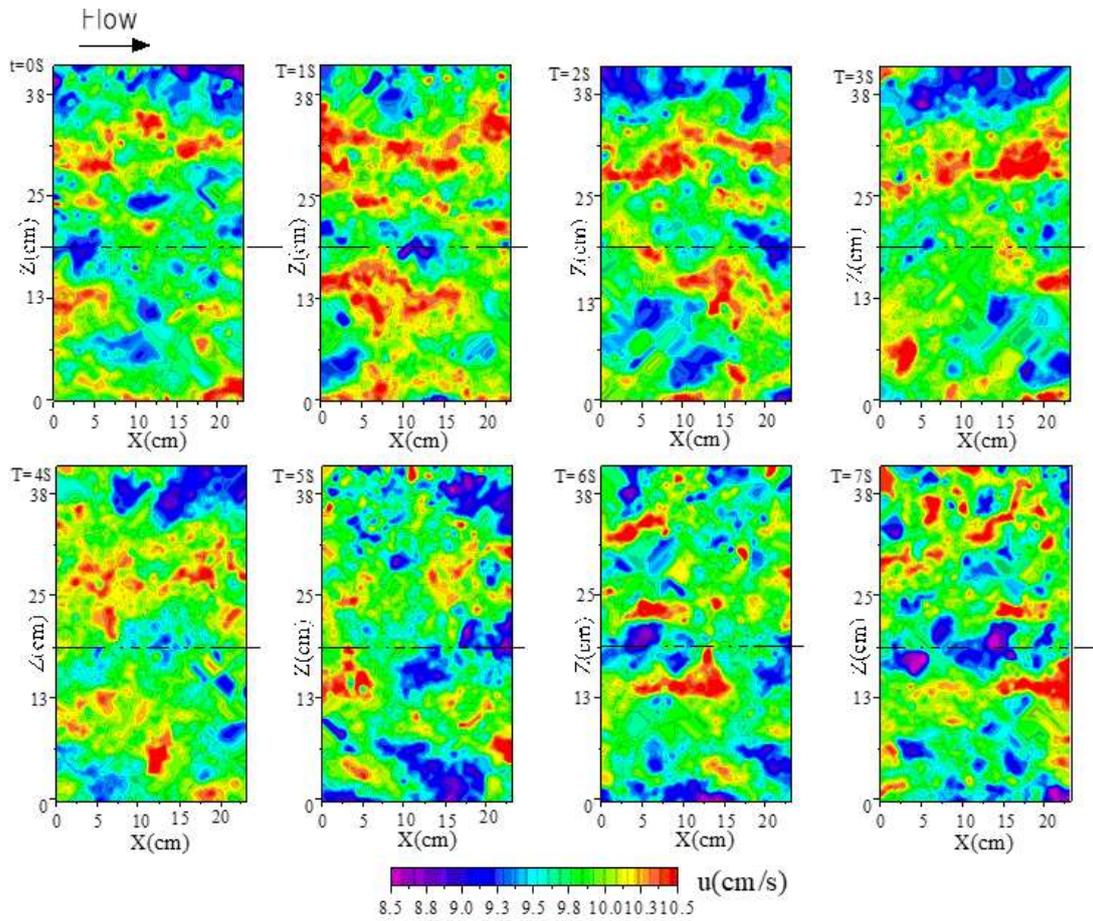
水表面流速分布の平均流および乱れの特徴を考察するために、図-3 には Case2~Case6 の条件で行われた PTV による流速分布の解析結果を示している。図は右端 $z=0\text{cm}$ が水路右岸側側面部であり、左端が水路中央を表している。同図(a)は主流速($U(z)$)分布である。これより、主流速の大きさは流量の増加に比例しており、 $z=10\text{cm}$ 以降ではほぼ一様な流速となっていることが認められる。同図(b), (c)は主流速方向流速乱れ強度分布($u'(z)$)および横断方向流速乱れ強度分布($w'(z)$)を示している。両乱れ強度は壁面に付近で大きな値が発生することが明らかである。同図(d)は横断方向レイノルズ応力分布($-u'w'(z)$)示している。本分布も乱れ強度と同様に側壁付近で大きな値の生成が認められる。

(2) 瞬時水表面流速分布

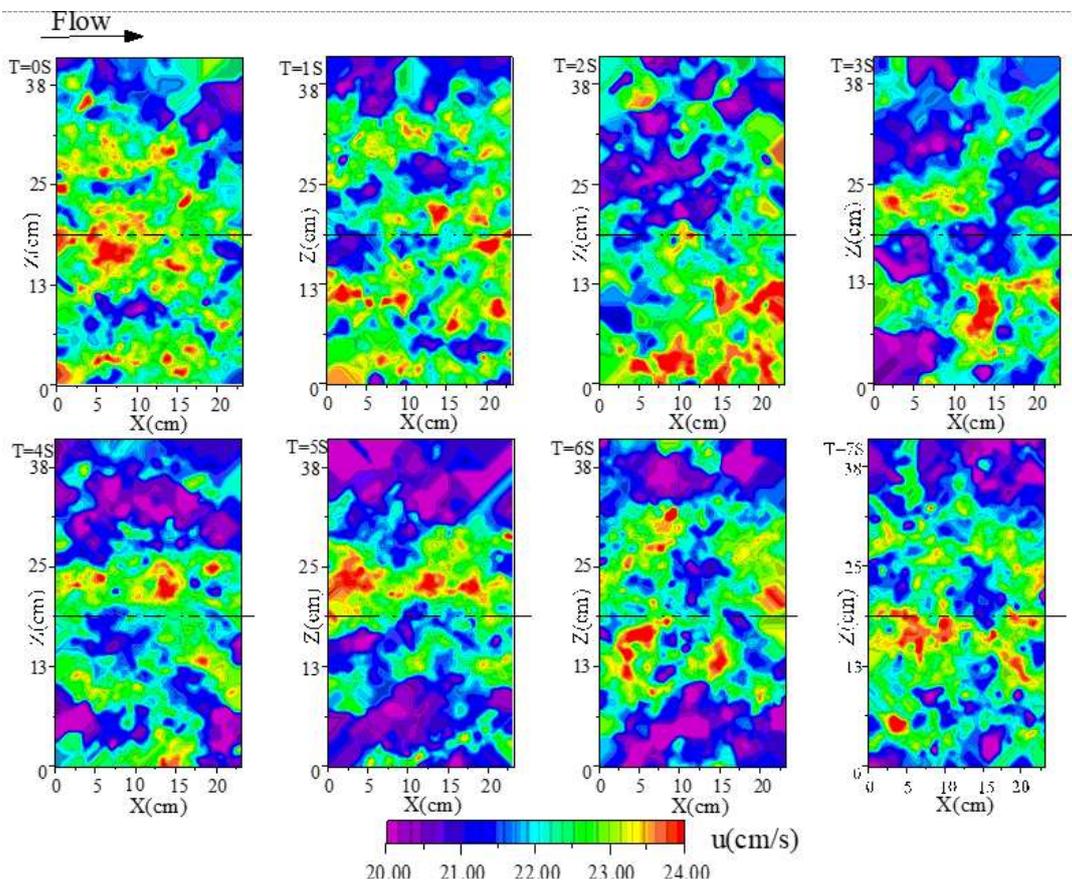
瞬時の水表面主流速分布の特徴を考察するために、Case1, Case5 における 1 秒毎の主流速等値線図を図-4 に示した。図における流れ方向は全て左から右である。また、破線は本水路の中心線に相当している。本図より、実河川において見出された並列らせん流の存在が認められる。これは同図(a)Case1 ($Q=3000\text{cm}^3/\text{s}$) の流速分布においては赤色の領域に相当している。これは主流速が 10.3cm/s 以上の相対的な高速域となっている。この高速域は、 $T=1\text{sec}$ や 6sec において典型的に認められるように、流下方向に対してやや傾斜しながら連なっており、ほぼ水深の 2 倍間隔(約 13cm)で並列した分布を呈している。同図(b)Case5 ($Q=7000\text{cm}^3/\text{s}$) の流速分布においても相対的な低速域と高速域 (22.8cm/s 以上の領域)が横断方向に交互に現れていることが認められる。

(3) 水表面平均流速と断面平均流速の流速比

瞬時の水表面流速分布特性と流れの内部構造の相互関係の考察から、浮子は高速域を流下することが推察される。これを踏まえると、浮子によって得られる流速は相対的な高速域の流速であるため、先述のような ADCP による流量計測との差異が生じたと考えられる。このため本研究では水表面における相対的な高速域の平均流速と断面平均流速の流速比を評価することにした。その手順を図-5 に示す。まず、各条件において流量および水深から断面平



(a) $Q=3000\text{m}^3/\text{s}$ 時の毎秒の流速分布経時変化図



(b) $Q=7000\text{m}^3/\text{s}$ 時の毎秒の流速分布経時変化図

図-4 各条件における水表面瞬時流速分布

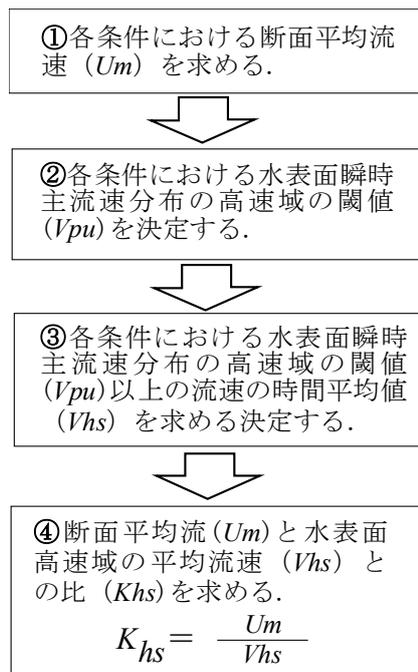


図-5 校正係数の算出過程

表-3 各条件での校正係数

Q (cm^3/s)	Re	U_m (cm/s)	V_{elpc} (cm/s)	V_{hs} (cm/s)	V_{hs}/V_{elpc}	K_{hs} (U_m/V_{hs})
3003	6082	7.7	10	10.46	1.046	0.736
3942	7761	10.11	12.8	13.22	1.033	0.765
5096	10189	13.07	16.5	17.02	1.032	0.768
6034	11905	15.47	19.3	20.03	1.038	0.772
7013	13899	17.98	22.8	23.47	1.032	0.766

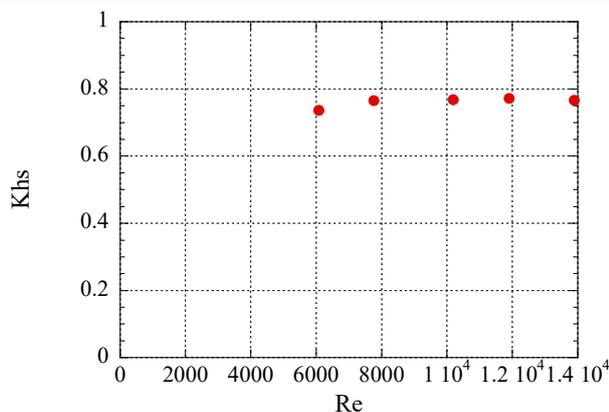


図-6 校正係数の分布図

均流速 (U_m) を算出する。次に、各条件における水表面の瞬時主流速分布において、相対的な高速域の閾値 (U_{pu}) を決定する。その決定の際には、流速等値線が流れ方向に縞状に連続することを指標とした。次に、各条件において高速域の閾値 (U_{pu}) 以上の流速の平均値 (U_{hs}) を求める。最後に、校正係数 (K_{hs}) として断面平均流速と高速域の平均流速との比を求めた。表-3 には、各条件における校正係数の算出に係る流速の値を示している。また、図-6 には校正係数 K_{hs} と Re の関係を示した。これより、本実験で行った $6 \times 10^3 \sim 10^4$ の Re 数の範囲では、校正係数はほぼ一定値を示しており、0.77程度と見積もられる。従来の表-1 に示した浮子の校正係数は0.85であり、本実験で得られた値は0.07小さい値を示した。

4. まとめ

本研究では流れの可視化法を用いて、開水路乱流における水表面流速分布特性と内部構造との相互関係について検討した。本研究において得られた結論を以下に示す。

(1) 並列らせん流によって生成される開水路乱流水表面の高速域の平均流速値と断面平均流速の比 (断面平均流速/水表面高速域の平均流速) は、本研究の実験範囲ではほぼ0.77程度となることが明らかとなった。これは従来の校正係数 (断面平均流速/水表面平均流速) が0.85に較べてやや小さい。

(2) 流れ場に形成された大規模な縦渦構造はその渦運動によって、水表面流速の遅速の生成に直接しており、並列らせん流の形成因となっていることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 木下良作：ADCP(超音波流速)による流量と流れの構造について，第4回河川環境財団研究発表会講演録，(財)河川環境管理財団，2006.
- 2) 二瓶泰雄，酒井雄弘：土木学会論文集 B Vol.66 No.2,104-118,2010.4
- 3) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と課題，土木学会論文集，第345号，pp. 1-19，1984.