

第 II 部門

大型開水路を用いた複断面河道における組織渦の計測

京都大学 学生員 ○鈴木壮平
 京都大学 フェロー 棚津家久
 京都大学 正会員 山上路生

1. はじめに

複断面河道流れは洪水流に代表されるように社会的に身近な流れの一つであり、これまでも多くの研究者・技術者に注目されてきた。特に低水路と高水敷の境界付近に発生する水平渦は付加抵抗特性や運動量輸送を大きく支配するため、水防災だけでなく河川環境面でも、そのメカニズムの解明が急がれる。水平渦に関する既往研究のほとんどが可視化計測によるものであるが、水路幅 50cm 程度の小型水路における PIV 計測が大半であり、アスペクト比が小さく限定的な研究であった。そこで本研究では、幅 150cm の大型水路を設置し、低水路・高水敷の相互作用を解明しようとした。さらに高速カメラを搭載した移動台車を駆使して水平渦の追跡計測を行い、流下方向の渦の変化についても考察を行った。

2. 実験手法および水理条件

図-1 に本研究で用いた実験装置図を示す。水路は、全長 9m、全幅 $B=150\text{cm}$ の可変勾配式大型直線水路であり、水路の左岸側にアクリル製のボックスをセットし、これを高水敷とし複断面流れを再現した。水路上方に可変速度の自走式移動台車が設置された。移動台車の上には高速度 CMOS カメラを搭載し、フレームレート 100Hz で自由水面を撮影した。可視化用のトレーサーには、「くん炭」を用いた。得られた画像から PIV アルゴリズムによって主流方向の瞬間流速 $\tilde{u}$ と、横断方向の瞬間流速 $\tilde{w}$ の平面分布を時系列に求めた。ここで座標系は、直交座標の x 軸を流下方向、 y 軸を鉛直上向、 z 軸を横断方向とする(図-1)。水路流入部を $x=0$ 、底面を $y=0$ 、高水敷と低水路の境界部を $z=0$ とした。実験は台車位置を固定する従来型の PIV と渦の移流速度で移動する台車を用いた追跡 PIV の二種類を行った。固定計測については $x=6\text{m}$ の地点の境界部で行った。1 撮影あたりの撮影時間は 30 秒でコマ数は 6000 コマであった。移動計測は予備観測より、特に低水路側で渦が存在する割合が高いと判断し、 $4\text{cm}<z<42\text{cm}$ の領域において、 $x=3\sim 8\text{m}$ 区間について計 29 回移動カメラ計測を行った。なお、詳細な実験条件については、表-1 に示す。

表-1 実験条件

H (cm)	D (cm)	B_m (cm)	B_f (cm)	Q (l/s)
22	20	60	90	22.5

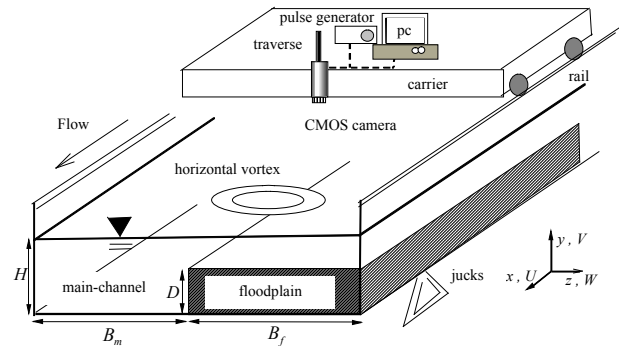


図-1 実験装置図と座標系

3. 実験結果と考察

図-2 に定点計測における流速ベクトル図の時系列を示す。1/6 秒ごとの瞬間流速ベクトルで下図ほど時間が経過している。渦を可視化するために空間平均した主流速を差し引いた移動座標で示している。これらの結果から渦構造が時間とともに下流に輸送される様子が認められる。また渦の中心は境界から低水路側に約 2cm 程度ずれた位置に存在していることがわかった。水平渦の中心点が境界よりも低水路側にシフトすることは、Bousmar & Zech (2003)¹⁾の数値解析結果と一致する。

また渦径についても定量評価した。 $\tilde{w}$ の分布は、水平渦中心の上下流に極値を持つ。本研究ではこれらの距離を渦径 l と定義した。渦径の全サンプルの平均値は 11.1cm であった。渦中心位置と渦径を考慮すると渦領域は高水敷上にも及ぶことがわかった。

図-3 に固定計測点における主流方向および横断方向の乱れ強度 $u' \equiv \sqrt{u'^2}$ および $w' \equiv \sqrt{w'^2}$ の分布を示す。結果は断面平均流速値 U_m で無次元化した。両者とも高水敷では比較的小さな値で一定となり、境界部から低水路へ向かって増加し $z/D=0.4$ 付近で最大値を取る。特にピーク値は主流方向の乱れ強度が横断方向の値の 2 倍以上である。

図-4 は乱れエネルギー k の分布である。乱れ強度と同様に境界部に近い低水路側でピークがみられる。

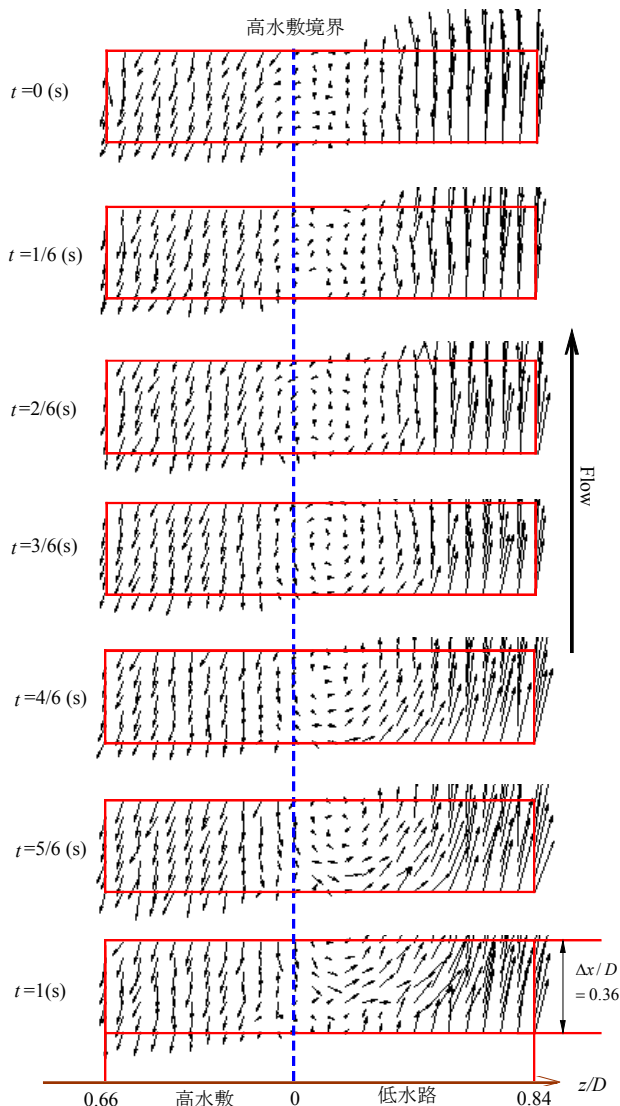


図-2 定点計測による渦通過の様子

ピークの位置は図-2 で考察した渦中心位置に対応しており、興味深い。このことから水平渦によって局所的に大きな乱れが発生することが確認できる。

最後に移動計測の結果について考察する。移動計測は計 29 回繰り返し計測を行い、そのうち計測区間内において一つの渦について追跡できたものは 5 サンプルであった。これらを S1~S5 とする。これらについて固定計測と同様に算出した渦径の平均値は 12.3cm であった。

図-5 に渦中心の流下方向の位置変化を示す。サンプル 4 については $x=7\text{m}$ 付近で他の渦との合体が起こるとともに渦中心の判別が困難であったため凡例を S4-1 と S4-2 の二つに分けた。各サンプルについて同色の近似直線も表示してある。 $4\text{cm} < z < 35\text{cm}$ では集合平均した横断流速は $W > 0$ となり境界から低水路に向かう流れが発生する。比較のため $(x, z) = (3\text{m}, 20\text{cm})$ を初期値とする仮想粒子が $21\text{cm} < z < 29\text{cm}$ での U と W の計測値の平均で移流した場合の

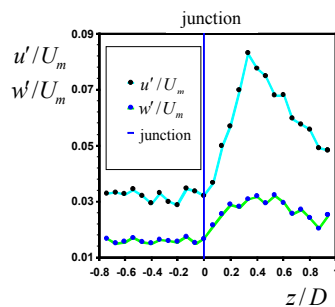


図-3 乱れ強度分布

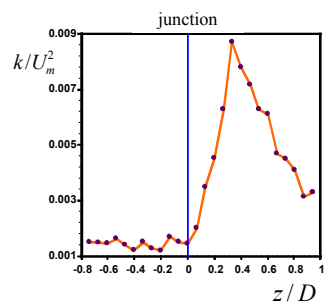


図-4 乱れエネルギー分布

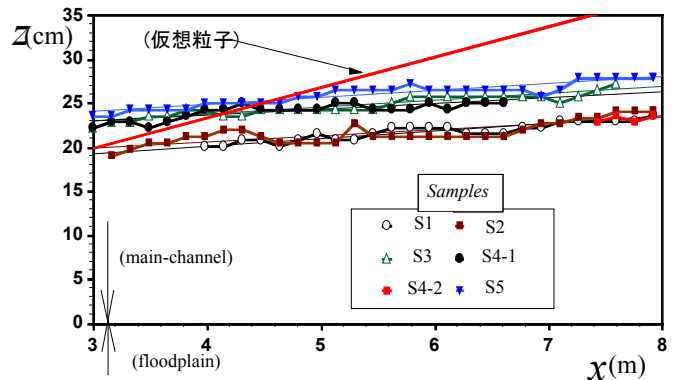


図-5 渦中心位置の変化

追跡線も示した。この図から、全サンプルの渦中心がほぼ等速で横断方向に移流することがわかる。横断方向への移流速度は仮想粒子ほど大きくないが流下とともに境界部から低水路の方向に向かって、水平渦は輸送されることから、横断流速の影響を大きく受ける。多くの既往研究から低水路の境界付近では斜昇流が発生することがわかっている²⁾。本実験で計測した境界から低水路に向かう流れはまさにこの斜昇流によるものと考えられ、2次流と水平渦の相互作用の存在が示唆される。

4. おわりに

本研究の結果を以下に結果をまとめる。

- 1) 低水路と境界部付近には乱れが局所的に大きくなる。この領域は水平渦の中心位置に対応する。
- 2) 渦の追跡計測から、水平渦は境界部から低水路へ輸送されるが、これは2次流との関係が大きいと考えられる。

参考文献

- 1) Bousmar, D., Zech, Y. (2003). Large-scale coherent structures in compound channels. *Proc. Int. Sym. on Shallow Flows 2003*, 1, 173-180.
- 2) Tominaga, A., Nezu, I. (1991). Turbulent structures in compound open-channel flow, *J. of Hydraulic Eng., ASCE*, 117, 21-41.