

二層PIVを用いた複断面開水路流れにおける 乱流渦の三次元組織構造に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON 3-D STRUCTURE OF COHERENT HORIZONTAL VORTICES IN COMPOUND OPEN-CHANNEL FLOWS BY USING DUAL-LAYER PIV SYSTEM

禰津家久¹・山上路生²・後藤健³
Iehisa NEZU, Michio SANJOU and Ken GOTO

¹フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 京都大学大学院助手 社会基盤工学専攻 (同上)

³学生員 京都大学大学院修士課程 社会基盤工学専攻 (同上)

In compound open-channel flows, there are some large-scale horizontal vortices with a vertical axis. Such coherent vortices influence significantly the transverse transport of scalar variables like suspended sediment between the main-channel and floodplains. So, it is very important in hydraulic engineering and river environment to investigate hydrodynamic characteristics of coherent horizontal vortices in compound open-channel flows and thus there are a lot of experimental and numerical studies on these topics. From recent measurements, it is inferred that the horizontal eddies have a 3-D structure of vortex tubes.

However, 3-D structure of horizontal vortices has not yet been revealed in detail. Therefore, in the present study, a new PIV system using dual-layer laser light sheets was developed and instantaneous velocity fields on two laser sheets were measured simultaneously. As a result, 3-D coherent properties of horizontal vortices and their convection mechanism have been investigated experimentally.

Key Words : Compound open-channel flows, Horizontal vortex, 3-D structure, Dual-layer PIV

1. はじめに

複断面開水路流れで発生する大規模水平組織渦の構造やその影響を解明することは、水工学、河川工学および水域環境工学においてきわめて重要な課題であり、これまで数多くの研究が行われてきた。たとえば数値計算の分野では、灘岡・八木¹⁾は浅水方程式を基礎として開発した SDS-2DH モデルを複断面開水路流れに適用し、水平渦の数値的再現に成功した。また、木村ら²⁾は高水敷高さを境に流れを上下二層に分割した平面二層モデルを開発して、水平渦と鉛直流速成分の関係を計算した。Hosoda et al³⁾ は非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いて複断面境界部の斜昇流と横断面 2 次流の関係性を再現した。最近では武内ら⁴⁾が浅水流モデルによって流下方向における水平渦の発生および発達特性を数値予測している。一方で水理実験による研究も従来から精力的に行われている。例えば、福岡ら⁵⁾は低水路と高水敷の運動量交換によって発生する見かけのせん断応力を低水路と高水敷の主流速差の 2 乗に比例することを実験的に示した。池田ら⁶⁾は、レーザー流速計の実験データに変曲点不安定性理論を適用して水平渦の発生が主流速のせん断不安定によることを明

らかにした。最近では計測技術の進展に伴い、水平渦の可視化計測が注目されている。石垣・今本⁷⁾はポリエチレン粒子とレーザーライトシートによって複断面流れにおける組織構造を可視化し、運動量交換と水平渦の関係を明らかにした。禰津ら⁸⁾は PIV を用いて低水路水深と高水敷高さの比が 1.5 以上のケースでは水平渦が複列構造になることを実験的に解明した。また昨年、著者ら⁹⁾は PIV によって、水深が時間変化する非定常な複断面開水路流れにおける水平渦構造の解明を試み、底面からの鉛直距離によって水平渦の組織構造が異なることを明らかにし、水平組織渦が 3 次元構造をもつことが予想された。これまで池田ら¹⁰⁾をはじめ多くの研究者が水平渦と 2 次流の関係から複断面開水路流れの 3 次元内部構造を議論しているが、既往研究のほとんどが点計測あるいは平面 2 次元の面計測であり、水平渦の 3 次元構造に関する詳細な実験データは少ない。

そこで本研究では、鉛直位置の異なる 2 面のレーザーライトシートを作成しそれらを同時刻、同一画像で撮影する二層 PIV 計測を行い、水平渦の 3 次元形状やその移流メカニズムを考察する。

表-1 水理条件

case	H (cm)	H_{L1} (cm)	H_{L2} (cm)	B_f/B	H/D	Q (l/s)	U_m (cm/s)	Fr
case-a	7.2	5.5		0.5	1.44	1.8	10.4	0.12
case-b		6.0						
case-c		6.5						
case-d		7.0						
case-ab	7.2	5.5	6.0	0.5	1.44	1.8	10.4	0.12
case-bc		6.0	6.5					
case-cd		6.5	7.0					

H_{L1} :上流側のレーザーシート 高さ

H_{L2} :下流側のレーザーシート 高さ

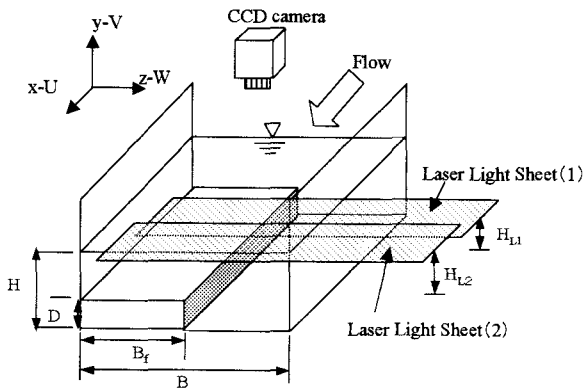


図-1 計測システム

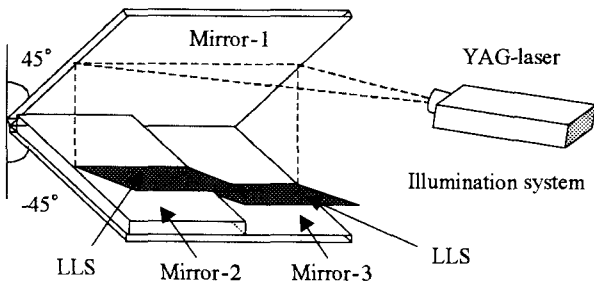


図-2 LLSの高低差作成法

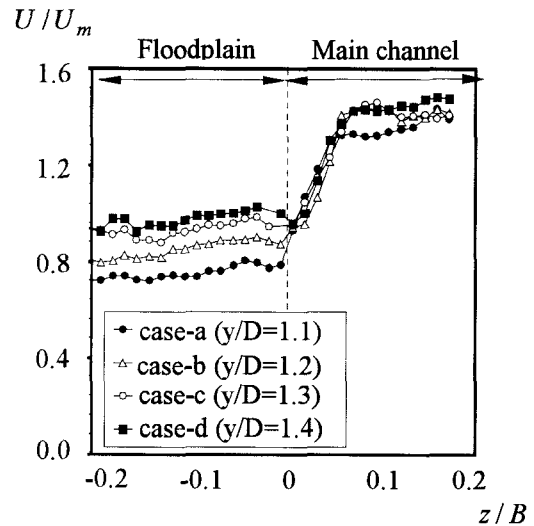


図-3 主流速の横断方向分布

をつけ、水路側壁より水面と水平に照射した。照射領域の一部をCCDカメラ(1008pixel×1008pixel)によって撮影し、3Hzごとに相関法で画像解析し、瞬間流速分布(200mm×200mm領域)の時系列を得た。なおCCDカメラは水路上方に設置した。図-2はLLSの高低差作成の仕組みを示すものである。ここでは3枚の鏡による光の反射特性を利用した。まず水面と平行に照射されたLLSは45°傾いたミラー1で反射され、鉛直方向へと進路を変える。次に、-45°傾いたミラー2とミラー3で再び反射され、水路側壁から水平に照射される。ミラー2とミラー3の間には約3.5mmの段差を設けて、反射後のシートの高低差を5mmとした。

2. 実験装置と水理条件

(1) 計測方法

計測システムを図-1に示す。実験水路は、全長10m、全幅 $B=40$ cmの可変勾配型総ガラス製の直線水路である。水路の右岸側にアクリルボックスを用いて高さ $D=5$ cmの高水敷を全長にわたって設置し、複断面水路を作った。図中の B 、 B_f 、 D および H はそれぞれ水路幅、高水敷幅、高水敷高さおよび低水路水深を表す。流体計測はPIVシステム(DANTEC社製)を用いた。光源のYAGレーザー(15mJ)より生成された厚さ2mmのレーザーライトシート(LLS)を後述するように平面鏡を用いて上流側と下流側に高低差

(2) 計測位置

表-1に水理条件と計測ケースを示す。本実験では流れ場を1種類とし、計測ケースはLLSの鉛直高さによって分類した。case-aからcase-dまでは高低差のない通常のLLSで計測を行ったものであり、case-abからcase-cdは5ミリの高低差を持ったLLSを用いたものである。ケース名のa, b, c, dは計測断面の水深方向距離 $y/D=1.1, 1.2, 1.3, 1.4$ に対応している。例えばcase-abでは $y/D=1.1$ と1.2の面を同時計測している。case-abからcase-cdにおいて、分離されたLLS

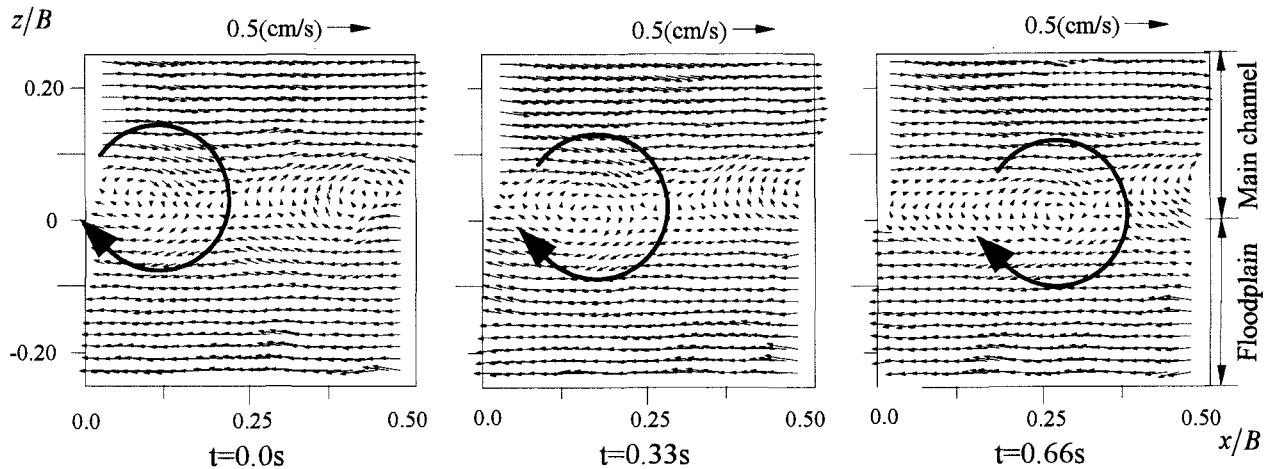


図-4 case-a($y/D=1.1$)における瞬間流速ベクトル図 (図上方の矢印が流速の単位を示す)

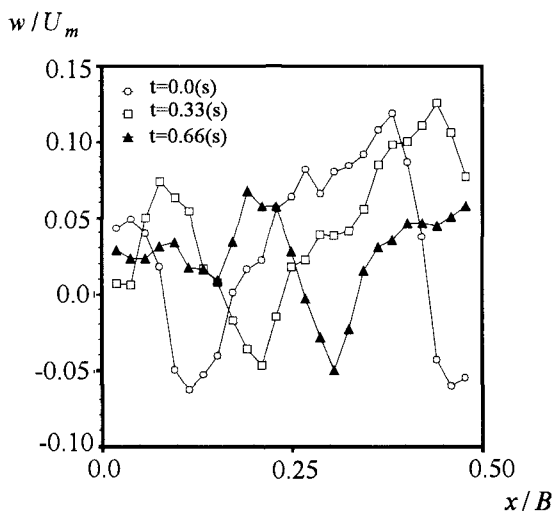


図-5 境界部における横断方向流速 w 分布の時系列変化

の上流側をLLS-1,下流側をLLS-2と名付ける。なお、ここで H_{L1} は上流側のLLS(LLS-1)の設定高さ、 H_{L2} は下流側のLLS(LLS-2)の設定高さ、 U_m は断面平均主流速である。

3. 実験結果および考察

(1) 主流速の横断方向分布

図-3はcase-a～dにおける主流速の横断方向分布を示すものである。主流速の値は断面平均流速 U_m で無次元化してある。すべての計測ケースにおいて、低水路・高水敷間に大きな主流速差が存在する。主流速分布曲線は境界部に1つの変曲点を持ち、せん断不安定となる⁶⁾。水面側に近づくにつれて高水敷上の流速が増加するが、本実験の水理条件ではかぶり水深が比較的小さいため($y/D < 1.5$)、棚津ら⁸⁾が報告した凹型の主流速分布にはならない。

(2) 瞬間流速ベクトルと横断方向流速分布

表-2 移流速度と通過周期

case	y/D	U_c (cm/s)	U_H (cm/s)	U_{ma} (cm/s)	T (s)
case-a	1.1	8.17	7.67	14.64	1.07
case-b	1.2	12.32	8.85	15.15	0.87
case-c	1.3	12.35	10.58	15.52	0.8
case-d	1.4	12.64	10.15	15.58	0.79

U_c : 移流速度 U_H : 高水敷中央平均流速 U_{ma} : 低水路中央平均流速

図-4はcase-a($y/D=1.1$)における、瞬間流速ベクトルを示す。ただし、流速ベクトルは平面平均流速を差し引いた移動座標ベクトルで表示してある。境界部付近に時計回りの単列水平渦が観察される。この渦は構造を保ちながら時間とともに下流に移流されており組織性をもつことが確認される。図-5は低水路・高水敷の境界ライン($z/B=0.0$)における横断方向流速 $w(t)$ の流下方向分布を時系列に示したものである。断面平均流速 U_m で無次元化された波型の流速分布が時間の経過に伴い形状を保ったまま一定速度で下流側に移動している。図-4と図-5の結果から、組織渦構造は短時間的には凍結状態で移流されていることがわかる。

(3) 水平渦の移流速度と通過周期

表-2はcase-aからcase-dまで($y/D=1.1, 1.2, 1.3, 1.4$)の移流速度 U_c と通過周期 T を示す。移流速度は0.33秒間隔の連続撮影画像で観察された渦中心の移動距離を求めることにより算定し、通過周期は渦中心の空間間隔を移流速度で除して求めた。なお、ここで示した値は60秒間の計測データの平均値である。また渦中心位置は、瞬間流速ベクトルが $w=0$ かつ $\partial w / \partial x < 0$ の条件が満たされる点と定義した。この結果から、河床から離れるにしたがって水平渦の移流速度は増大し底面摩擦の影響を大きく受けることがわかる。通過周期に関しては、移流速度の小さいcase-aで若干大きくなるものの全ケースでおおよそ一致している。

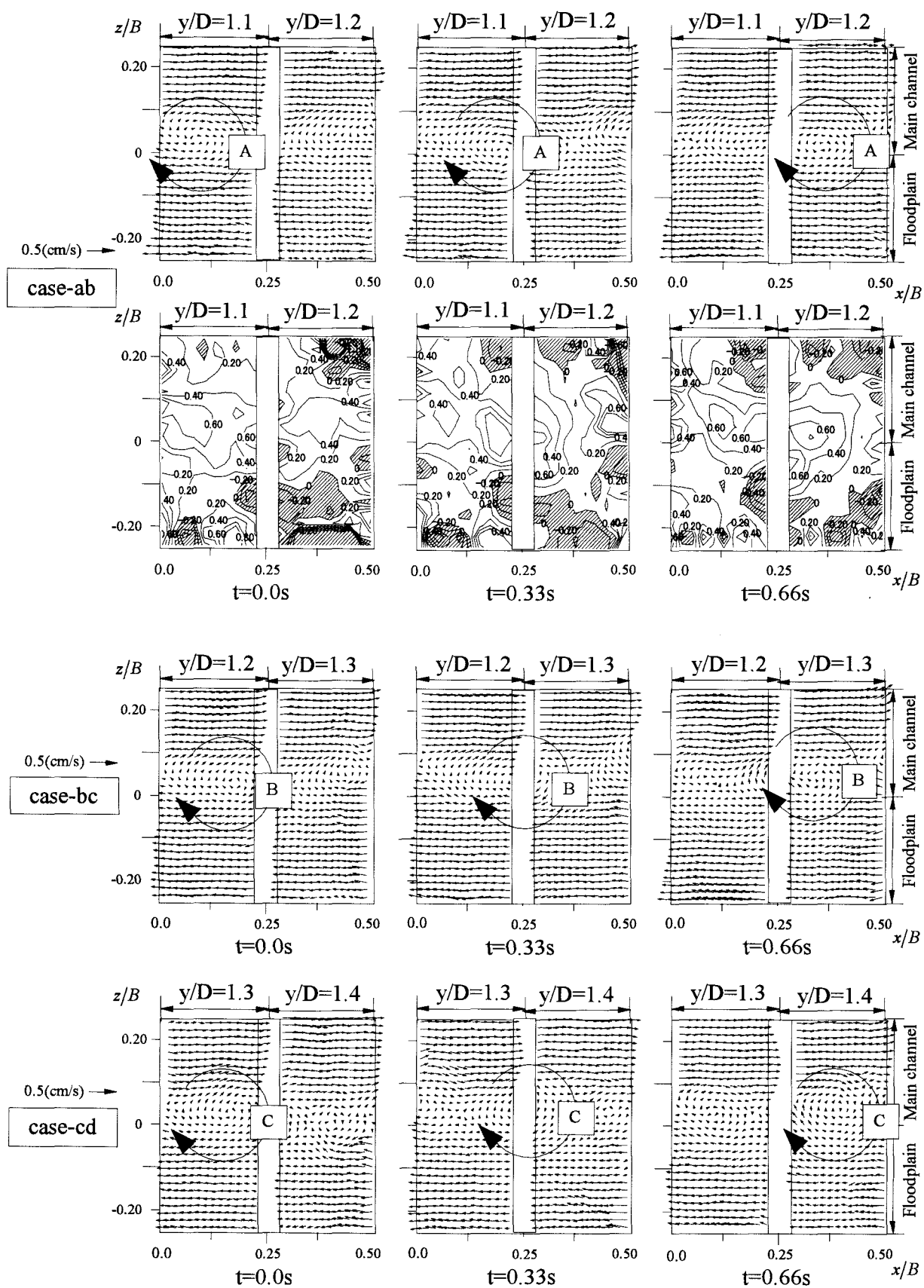


図-6 二層流速ベクトル

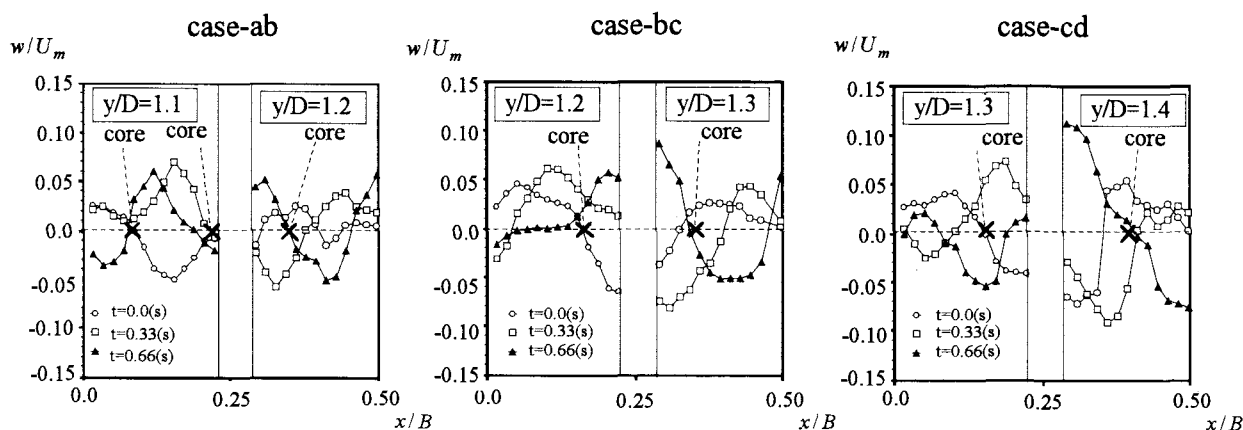


図-7 二層流速ベクトルに対応した境界部における横断方向瞬間流速 w (×印は渦コアを示す)

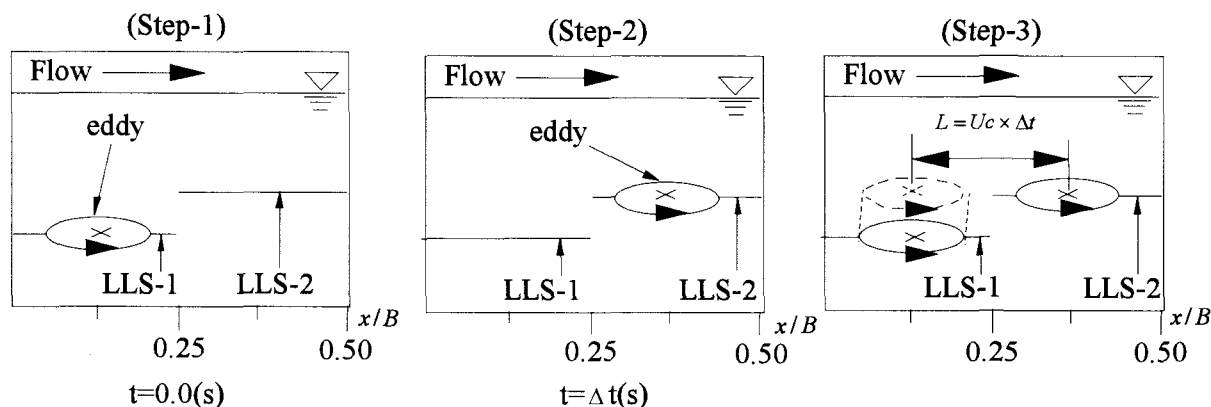


図-8 3次元形状の推定手順

(4) 二層流速ベクトル

case-aからcase-dは単一平面のLLSを用いた標準的なPIV計測である。しかしながら、この方法では各平面間の同時刻解析は不可能である。そこで本研究では、鉛直位置の異なる2つのLLSを用いることで、各断面間の相互関係を解明する。図-6はcase-abからcase-cdのある瞬間の二層流速ベクトル及び渦度分布を示すものである。ただし、各断面内での平均流速を差し引いた移動座標系でベクトル表示してある。なお、2つのLLSの境界部付近のデータは信頼性が薄いため破棄し、図中では空白として示した。case-ab (上流側 $y/D=1.1$, 下流側 $y/D=1.2$) において、上流側のLLS-1で可視化された渦(A)とそれに対応する渦度極大領域は時間経過に伴い流下方向に輸送され、下流側のLLS-2上で観察されている。時刻 $t=0.0(s)$ のLLS-1上の渦と $t=0.33(s)$ のLLS-2上の渦は、同一のものと判断することが自然であり、 $y/D=1.1$ と $y/D=1.2$ の間では相関性の強い水平渦が流下方向に輸送されていることがわかる。case-bc (上流側 $y/D=1.2$, 下流側 $y/D=1.3$) において観察された渦(B)や、case-bc (上流側 $y/D=1.3$, 下流側 $y/D=1.4$) において観察された渦(C)についても同様の特性がいえる。また渦中心の横断方向位置は全ケースでほぼ低水路と高水敷の境界部に存在し、横断方向の組織渦構造の変化は小さいと考えられる。図-7は図-6の結果に対応した、境界部

($z/B=0.0$) における横断方向瞬間流速 w の流下方向分布を0.33sごとに示したものである。図-6に示した渦(A)~(C)の中心位置に対応する点も示した。ここでの水平渦は時計回りであるから、 $w=0$ かつ $\partial w / \partial x < 0$ の条件が満たされる点を渦中心とした。全ケースにおいて、時間とともに渦中心が流下して下層から上層のLLSに現われることがわかる。

以上の結果から、各断面で観察された水平渦にはそれぞれ連動性があり、水平渦は3次元的な管状構造をもった組織渦であることが示された。

(5) 3次元渦の中心軸

水平渦は管状の立体構造をもって移流されることを明らかにしたが、次にこれまでに本論文で示した移流速度と二層流速ベクトルのデータを基に水平渦の3次元形状を推定する。図-8にその推定法を示す。時刻 $t=0.0(s)$ において、ある水平渦が上流側のLLS-1に存在し(Step-1)、一方で Δt 秒後に同一の渦が下流側のLLS-2で可視化されたとする(Step-2)。LLS-2上で観察された渦は $t=0.0(s)$ のとき、現在位置に比べ、 $L = U_c \times \Delta t$ だけ上流側に存在していたと考えることができ、Step-3に示すように L を差し引くことで前時間における渦の通過地点、並びに立体形状の推定が可能となる。なお、本研究は定常で安定な流れ場を対象としており、組織渦構造も短時間的に凍結乱流状態で移流されていたので、移流速度 U_c

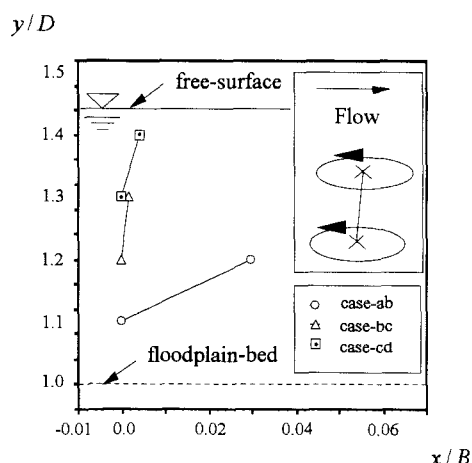


図-9 3次元渦の中心軸分布

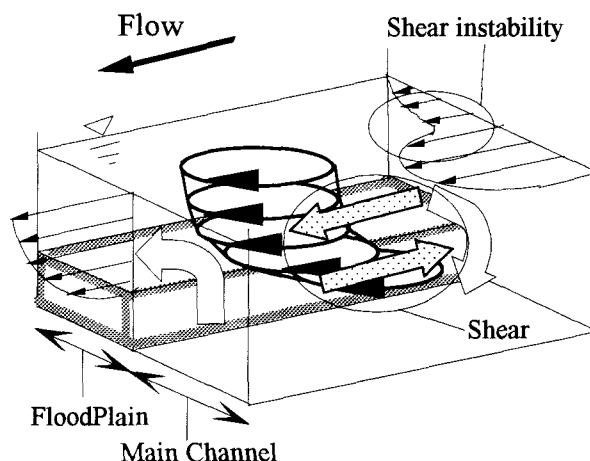


図-10 水平渦構造の模式図

は表-2で求めた値を適用した。

図-6に示したcase-ab, case-bcおよびcase-cdにおける渦(A), 渦(B), 渦(C)に対し上記の調整を行い, それぞれの渦の中心点を結んだ分布曲線を図-9に示す。なお, 各ケースにおいて下方側の面の渦中心を原点 ($x/B=0.0$) として表示した。この結果から, 河床近傍のcase-abでは水平渦の中心軸は流下方向に向かって傾いているが, 一方で河床から離れるとcase-bcおよびcdに示されるように軸の傾きは小さくなる。すなわち, 自由水面に近づく鉛直方向間の水平渦どうしの相関性および追従性は高くなる。

(6) 水平渦構造の模式図

図-10は既往研究の成果と, 本研究で得られた知見をもとに複断面開水路にみられる水平組織渦の3次元構造及び移流メカニズムを模式的に示したものである。本研究の流れ場では, かぶり水深が $H/D < 1.5$ であり, 全計測断面において高水敷と低水路の主流速差は大きく, 境界部のせん断不安定により1列の大規模水平組織渦が発生する^{6),8)}。水平渦は各断面間で連動性を持ち, 管状の3次元組織構造を有している。底面付近では河床抵抗が強いため組織渦の移流速度は遅くなり, 管状渦の中心軸は流下方向に傾きながら輸送される。この流速シアーによって円柱構造の下部では, 水平渦は輸送されながら変形し, 3次元性の強い渦になるものと推測される。しかしながら現在のところ明確な根拠はなく, 今後詳細に検証する必要があると考えている。

4. おわりに

本研究では, 複断面開水路流れを対象にレーザーライトシートに高低差を設けた二層PIV計測法を開発して, 水平組織渦の3次元立体構造を解明した。以下に本研究で得られた知見をまとめて示す。

- 1)各鉛直高さで計測された水平渦は組織構造を保ちながら移流される。
- 2)高水敷上の河床抵抗の影響を受けて, 底面側に存

在する水平渦の移流速度は水面側の水平渦よりも小さい。

- 3)複断面開水路流れの水平組織渦は管状型の3次元構造を有しながら移流する。
- 4)管状型の水平渦構造は, 移流速度のシアーによって時間とともに変形するものと予測される。

参考文献

- 1) 灘岡和夫, 八木宏: SDS&2DHモデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.473/II-24, pp.35-44, 1993.
- 2) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄, 安永良: 平面二層モデルによる複断面開水路流れの水平渦運動解析, 土木学会水工学論文集, 40巻, pp.699-704, 1996.
- 3) Hosoda,T.,Sakurai,T and Muramoto,Y.:3-D computation of unsteady flows in compound open channels with horizontal vortices and secondary currents, JHHE, vol.17, No.2, pp.87-96, 1999.
- 4) 武内慶了, 本永良樹, 海野修司, 山田正: 複断面開水路流れにおける大規模水平渦の発生と発達, 土木学会水工学論文集, 47巻, pp.475-480, 2003.
- 5) 福岡捷二, 浅野富夫, 藤田光一, 坂野章: 複断面河道における洪水流の抵抗特性, 第30回水理講演会論文集, pp.499-504, 1986.
- 6) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋: 側岸部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文集, No.443/II-18, pp.47-54, 1992.
- 7) 石垣泰輔, 今本博健: 可視化法により複断面開水路流れの3次元構造に関する研究, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.45-54, 1995.
- 8) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 相良幸輝, 池谷和哉: かぶり水深の変化が複断面開水路流れの組織渦に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集, No.649/II-51, pp.1-15, 2000.
- 9) 瀬津家久, 山上路生, 後藤健: 水深が時間的に変化する複断面開水路乱流における組織渦の発生・発達現象: 土木学会水工学論文集, 47巻, pp.469-474, 2003.
- 10) 池田駿介, 村山宜義, 空閑健: 複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.131-142, 1995.

(2003.9.30受付)