

複断面開水路流れの斜昇流と高水敷上に 形成された組織構造の相互関係

CORRELATION BETWEEN OBLIQUE UPWARD FLOW AND COHERENT STRUCTURE FORMED OVER FLOOD PLAIN IN COMPOUND OPEN CHANNEL FLOWS

渡辺勝利¹・森山拓士²・佐賀孝徳³

Katsutoshi WATANABE, Takuji MORIYAMA and Takanori SAGA

¹正会員 工博 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒745-8585 山口県周南市学園台3538)

²学生会員 徳山工業高等専門学校専攻科 環境建設工学専攻 (同上)

³正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (同上)

Correlation between the oblique upward flow and coherent structure formed over flood plain in compound open channel flows was investigated by using flow visualization techniques. The results of velocity measurements using PTV show that the oblique upward flow and a pair of cellular secondary current are generated over the edge of the flood plain. This flow field is characterised by two velocity shear structures ($\partial U / \partial y, \partial U / \partial z$). Further, it becomes clear that longitudinal vortical structures exist over the edge of the flood plain for a long period. The vortical structure directly contributes to form instantaneous oblique upward flow and cellular secondary current.

Key Words : compound open channel flow, oblique upward flow, secondary current, streamwise vortical structure, flow visualization

1. はじめに

複断面開水路流れは、低水路と高水敷の2つの流れから構成される。その境界領域は、両者の流れ構造が相互に影響を及ぼし合うことから、流れ場の構造は複雑になることが推察される。この流れの内部構造の解明は複断面を有する実河川における防災管理、河川環境の保全等に有用な知見を与えることから、これまでも多くの研究がなされてきた。その結果、複断面流れ固有の流れ構造として、水平渦、斜昇流の存在が明らかにされた。水平渦は、鉛直方向に軸を持つ大規模な渦構造であり、Sellinら¹⁾によってその存在が初めて示された。その後、この構造に関する詳細な検討が進められ、その3次元構造、形成条件、形成機構が明らかにされている^{2,3,4,5,6)}。

一方、斜昇流は、高水敷の先端部から低水路側の水表面に斜め方向に形成される二次流れであり、今本ら⁷⁾によって見出された流れ構造である。この流れ構造については、流れの可視化⁷⁾、詳細な流速計測⁸⁾や数値計算^{9,10)}がなされ、斜昇流の空間特性や形成機構について重要な

知見が得られている。その形成機構においては縦渦構造の存在が指摘されているが、その実体、時空間的な特性については十分な解明には至っていないように思われる。

一方、筆者らは、斜昇流と同様に大規模な二次流れを伴う、並列らせん流の内部構造を詳察した¹¹⁾。その結果、並列らせん流の特徴である水表面の遅速分布、水深規模の並列した旋回流は、大規模な縦渦構造の時空間的な集中によって生成されること、また、その集中領域は、主流速の鉛直方向せん断 ($\partial U / \partial y$) と横断方向せん断 ($\partial U / \partial z$) の2つの速度せん断の共存する領域に対応していることを明らかにした。この2つのせん断の共存は、複断面流れの低水路と高水敷の境界付近においても認められることから、本流れ場に形成された組織構造の時空間的な特性や流体力学的特性の解明は、共通した特徴を有する流れの構造の理解に有用と考えられる。

以上のことを踏まえて、本研究では、片複断面開水路流れの高水敷上に形成された組織構造の特徴および斜昇流との相互関係を流れの可視化法を用いて検討した。

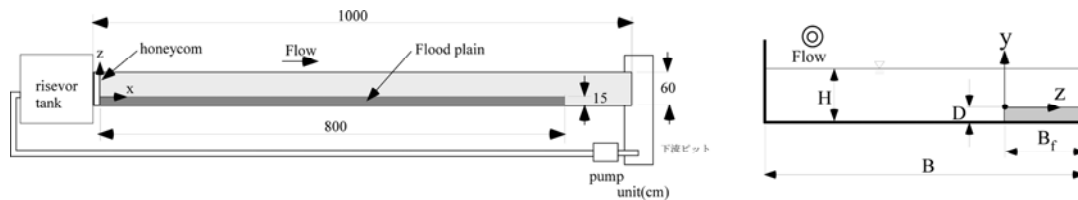


図-1 実験水路平面概観および座標系

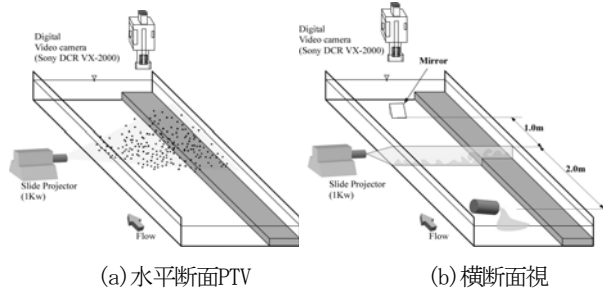


図-2 流れの可視化法概略

表-1 実験条件

Case	H(cm)	B(cm)	D(cm)	Um(cm/sec)	Re($Um \cdot H / \nu$)	Fr($Um / (gH)^{0.5}$)
A	8.0	15.0	4.0	5.7	5202	0.064
B	8.0			4.7	4391	0.053
C	8.0			3.3	2979	0.037
D	6.0			4.8	3323	0.062
E	5.0			4.3	2490	0.061
F	3.7			6.5	2806	0.108
G	12.0			3.4	4690	0.031

2. 実験装置および方法

実験には、図-1のような水路勾配を1/1000に設定した、幅60cm、高さ15cmの透明アクリル樹脂板製の滑面開水路を使用した。本水路において複断面流れを形成させるために、右岸側の底壁面上に、長さ1m、幅15cm、高さ4cmの塩ビ樹脂板を上流から8mの区間に設置した。水路上流端には整流装置としてハニカム（径4mm、長さ3.2cm、幅25cm）、下流端には水路調整用の堰を設置した。

実験では、上流から5m付近の地点において、流速計測、内部流況の可視化を行った。流速計測にはPTV(Particle Tracking Velocimetry)法を採用した。トレーサーには微細粒子（平均粒径 $150\mu\text{m}$ 、比重1.04）を、照明としてスライドプロジェクター(1KW)のスリット光膜（厚さ3mm）を用いた。この微細粒子を混入した水溶液を上流端から流れに連続的に注入した後、流れの3断面（縦断、水平、横断）におけるトレーサー粒子の流動状況をデジタルビデオカメラ（SONY DVX-2000）で撮影した。図-2(a)には、水平断面PTVの概略を示している。なお、横断面内の二次流ベクトルを計測する際には、スリット光膜の厚さを約1cm程度に調整し、後述のように下流に設置した鏡を通して粒子の流動状況を撮影した。PTVの解析においては、可視化画像（ 640×480 ピクセル）を連続的にコンピュータに取り込んだ後、「Flow PTV」（株）ライブラリを用いて瞬時流速成分を求め、それらの統計処理を行い平均流速分布等を求めた。取り込み時間、画像数はそれぞれ60秒間、1800枚とした。

組織構造の可視化では、トレーサーに蛍光染料水溶液（比重1.005）、照明に前出のスリット光を用いて流れの縦断、横断面視を行った。本トレーサーを上流から一定量（約200cc）を注入した後、注入に伴う初期の攪乱部分が流下した後、可視化断面における流況を同ビデオカメラで撮影した。横断面視では、図-2(b)に示すよう

に、可視化断面に影響を及ぼさない下流位置に設置した鏡（ $5 \times 5\text{cm}$ ）を用いて撮影した。

組織構造と速度情報を同時注出するためにDPTV（Dye-streak-pattern Particle Velocimetry）¹²⁾を流れの横断面に適用した。本手法では、前出の微細粒子と蛍光染料水溶液を流れに同時に注入し、1cm程度に厚さを調整したスリット光内に可視化される流脈形象と粒子流動画像をビデオカメラで撮影した。

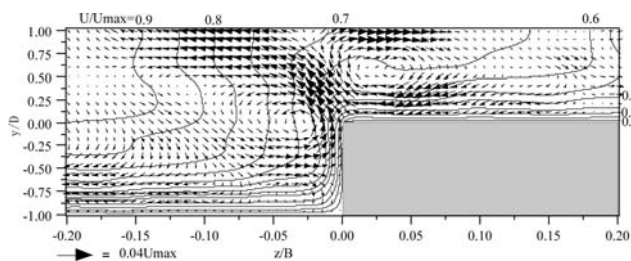
実験条件の詳細は表-1に示すとおりである。本実験では、できるだけ明瞭な可視化画像を得るために低レイノルズ数の条件を設定し、水深を変化させ、それに伴う高水敷と低水路の境界付近の流れの特徴に注目した。

3. 実験結果および考察

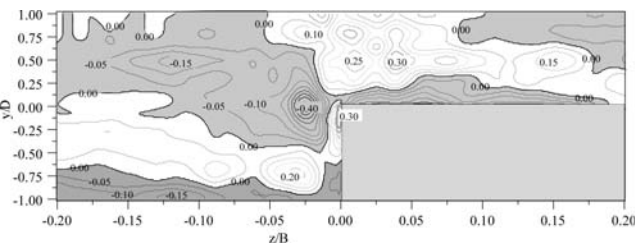
(1) 流速計測結果

図-3には、高水敷の低水路側の端部（以下、高水敷先端部と呼称）周辺における、PTVによる流速計測結果を示している。(a)には、主流速（ U ）の等値線と水平断面および縦断面PTVの結果から得られた二次流ベクトル（ V, W ）を重ねて示している。本二次流ベクトル分布と棚津ら⁶⁾のLDVによる計測結果を比較すると、分布形状は同様であるが、本結果の敷水敷先端部周辺における対岸方向の二次流ベクトルの値が大きいことが認められた。この差異は、対岸側壁の二次流れの影響に起因すると考えられ、本実験ではその影響が小さいと推察される。

この図より、高水敷先端部の等値線が水表面方向に突出し、それが水表面まで到達後は対岸方向に同様に張り出していることが明瞭である。また、前述のように高水敷先端部周辺では2つのせん断（ $\partial U / \partial y$ 、 $\partial U / \partial z$ ）が共存していることが認められる。このような主流速等値線の特徴は、重ねて示した二次流ベクトル（ V, W ）と対応しており、高水敷先端部の主流速等値線の突出は、水



(a) 主流速等値線，二次流ベクトル (V,W) 重合図



(b) 流れ方向渦度 (ω_x) 分布

図-3 平均主流速分布 (Case A)

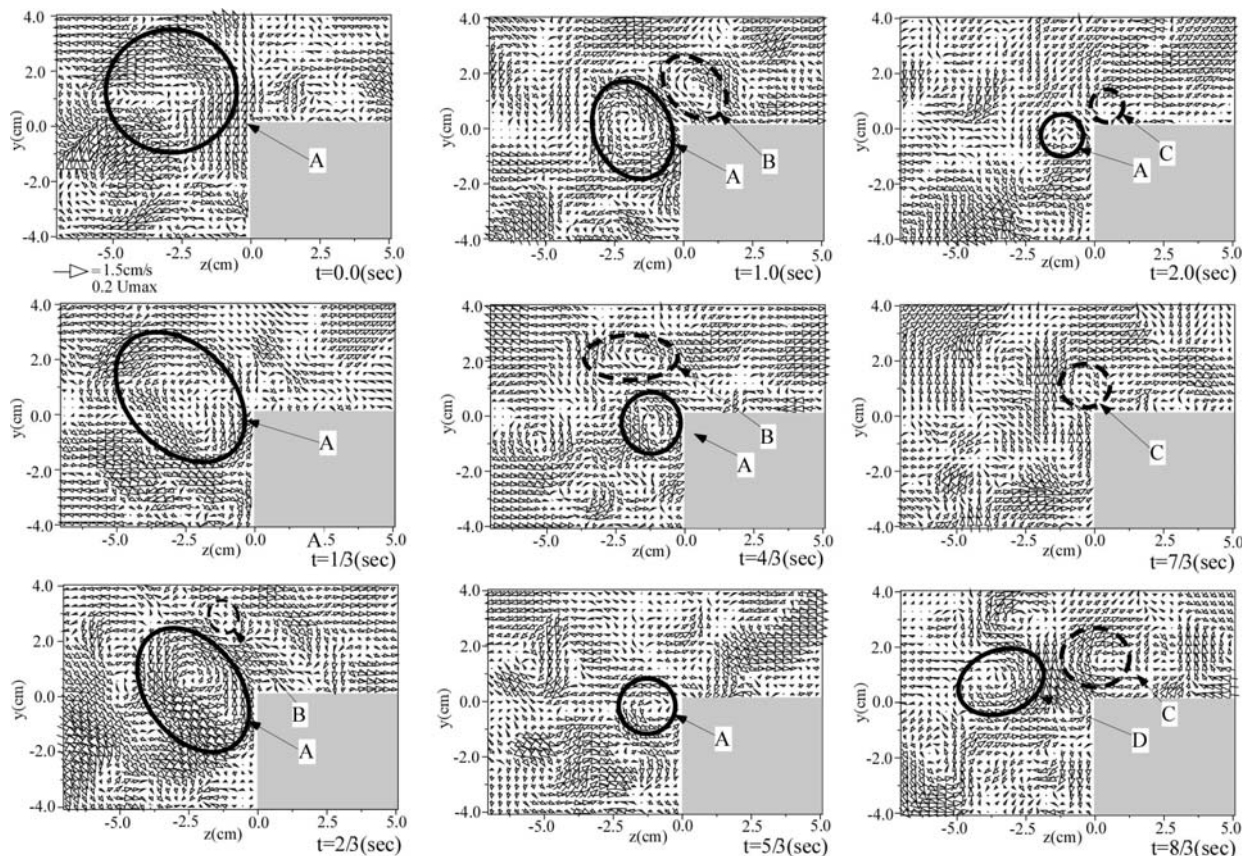


図-4 高水敷と低水路の境界付近における瞬時二次流れの経時変化 (Case C)

表面方向の斜昇流によるものであることが明瞭である。また、この斜昇流の低水路側には、傾斜した楕円状の大規模な反時計方向の旋回流、右岸側壁側には時計方向の旋回流の形成が認められ、それが高水敷先端部周辺の主流速分布に強い影響を与えていることがわかる。(b)はこの二次流ベクトル分布から求められた流れ方向の渦度 $\omega_x = (\partial W / \partial y - \partial V / \partial z)$ の等値線分布を示している。図中の正値は時計方向、負値は反時計方向の渦度に相当し、負値の領域には影を付けて示した。この図より、高水敷先端部の渦度の絶対値の大きな値は二次流ベクトル分布の旋回流の中心部分とほぼ対応しており、その絶対値は低水路側の値の方が大きいことが明らかである。

図-4は、高水敷先端部周辺に形成された瞬時二次流れの経時変化である。各図の時間間隔は1/3秒で、3秒間の変化を示している。本図に示された瞬時二次流ベクトルの最大値 (1.12cm/s) は、平均流速の34%程度であり、既

往の研究結果¹⁰⁾とほぼ同程度と考えられる。

これらの図より、高水敷先端部周辺に形成される瞬時の旋回流の特徴が見られる。 $t=0\text{sec}$ では高水敷先端部に比較的強い斜昇流が形成されている。その一部は、丸で囲んで示した反時計方向の歪んだ旋回流Aの上昇成分に相当している。 $t=1/3\text{sec}$ では、旋回流Aは縦長の傾斜した楕円状を呈し、 $t=2/3\text{sec}$ では楕円状の旋回流がより明瞭となっている。また、同時刻では小規模であるが時計方向の旋回流Bが水表面付近に出現している。 $t=1.0\text{sec}$ では反時計方向の旋回流Aと時計方向の旋回流Bが並列した形態となり、その境界部は強い斜昇流となっている。 $t=4/3\text{sec}$ では旋回流BがAに乗り上がり、 $t=5/3\text{sec}$ でBは消失している。またこれ以降、Aは規模が縮小、減衰しているように思われ、 $t=7/3\text{sec}$ では消失している。 $t=2.0\text{sec}$ では新たに時計方向の旋回流Cが出現し、 $t=8/3\text{sec}$ では低水路側に新たな反時計方向の旋回流Dが出現し並列した

形態をとり、その中心部に比較的強い斜昇流が形成されていることが認められる。

以上のように、高水敷先端部周辺においては大小スケールの時計、反時計方向の旋回流が、対あるいは単独の形態で形成され、斜昇流は旋回流の上昇部に相当していることが明らかである。また、 $H=8.0\text{cm}$ のケースでは旋回流の時空間スケールは、低水路側に形成されたものが、比較的大きいことが推察される。

(2) 流れの内部流況

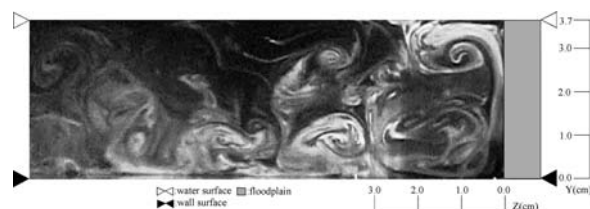
図-5には、各水深条件における高水敷先端部周辺の横断面視を示している。(a)は、高水敷よりも水深が小さい $H=3.7\text{cm}$ の条件における横断面流況を示している。これは通常の開水路流れの隅角部の流れ構造¹³⁾と同様であり、水表面隅角に縦渦構造が長時間に亘って形成されていることが観察された。(b)は高水敷水深が 1cm となる $H=5.0\text{cm}$ の横断面視を示している。この条件においては、高水敷先端部に、本図に示すような縦渦構造が長時間に亘って存在し、対岸方向へ伸縮あるいは底壁面方向へ揺動していることが注目された。(c)は $H=8\text{cm}$ の条件での横断面流況である。本条件でも複数の渦構造が合体した縦渦構造が高水敷先端部に集中し、対岸方向への発達や低水路側への傾斜運動が顕著に観察された。また、低水路壁面上の大規模な縦渦構造との相互作用により、低水路隅角方向への二次流を誘起しているように思われた。(d)に示した $H=12\text{cm}$ の条件では、高水敷先端部に形成された縦渦構造が大規模化し、傾斜運動が右岸側壁方向へも大きくなっていることが観察された。

図-6は、高水敷先端部 ($z=0.0\text{cm}$) における縦断面視の一例を示す。本図には、複数の渦構造が合体し、底壁面から水表面に向かって緩やかな傾斜角度で発達する縦渦の縦断面形象が明らかである。

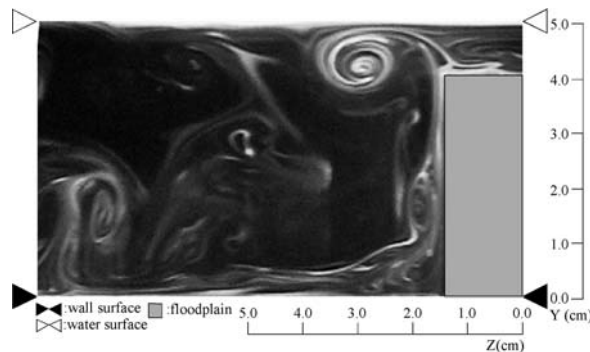
以上のように、流れの内部流況の検討から、高水敷先端部には、水深の変化によらず縦渦構造が形成され、それが、時間的に安定していること、傾斜運動していることが明らかとなった。

(3) 縦渦構造の時空間特性

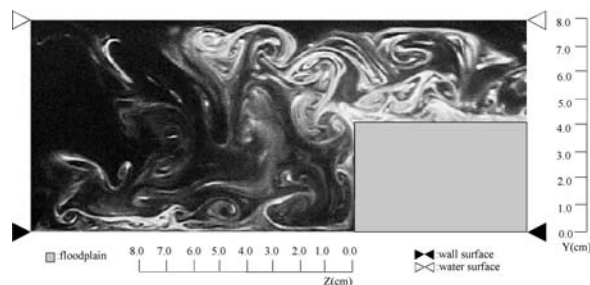
高水敷先端部周辺に形成された縦渦構造の形成領域の変化を検討するために図-7を作成した。本図は、 $H=8.0\text{cm}$ (Case B) の横断面画像において、各高さ ($y=4.1\text{cm}$, 4.3cm , 5.0cm , 7.6cm) における厚さ約 0.4mm の水平切断画像を60秒間(1800枚)に亘って繋げたものである。この図において縦渦構造の形成領域は、蛍光染料の存在する白い部分に相当する。(a)に示した $y=4.1\text{cm}$ では高水敷先端部と水深程度はなれた位置に、長時間に亘って縞状の染料の滞留域が形成されている。高水敷先端部の滞留域は(b)~(c)の各断面位置においても認められることから、そこで縦渦構造が安定して形成されていることが裏付けられた。



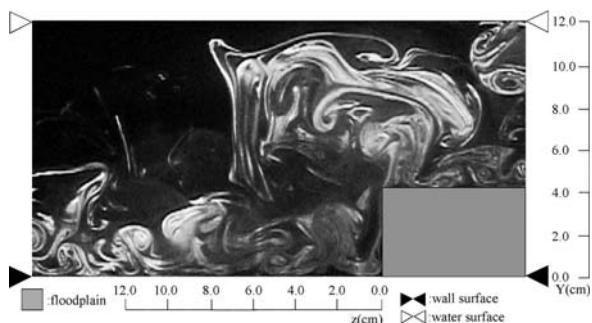
(a) $H=3.7\text{cm}$ (Case F)



(b) $H=5\text{cm}$ (Case E)



(c) $H=8\text{cm}$ (Case B)



(d) $H=12\text{cm}$ (Case G)

図-5 高水敷先端部付近の横断面流況

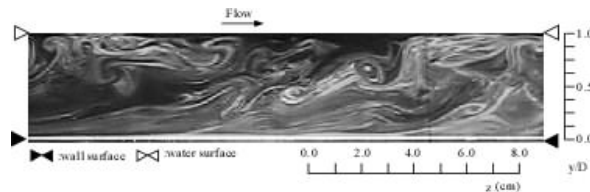


図-6 縦断面視 ($z=0.0\text{cm}$, Case B)

図-8は、高水敷先端部に形成された縦渦構造の傾斜角度の経時変化を示している。傾斜角度の計測は、横断面ビデオ画像において高水敷先端部に形成された縦渦構造の付け根と高水敷面の成す角度を同上図のように低水路側を正、その逆を負とした。これより、縦渦構造の傾斜角度は、低水路方向への傾斜が長時間に亘って卓越していることが明らかである。傾斜角度の平均値は 42° で

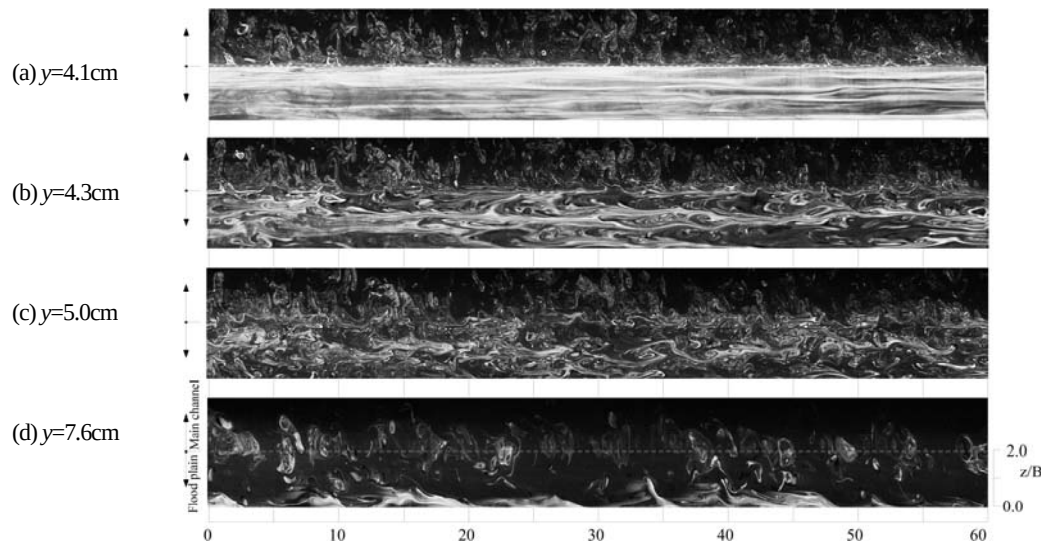


図-7 縦渦構造の形成領域の経時変化 (Case B)

あり、傾斜運動には長周期の運動（周期80秒程度、振幅 20° 程度）と、4～10秒程度の周期で $\pm 50^\circ$ 程度程度の傾斜運動が共存していることが推察される。

図-9は、この縦渦構造の横断方向スケールと流れ方向スケールの計測結果である。横断方向スケールの計測では、横断面視ビデオ画像において高水敷先端部に形成された縦渦構造の中で水面まで到達した構造について図-8の上図のように横幅を計測した。また、流れ方向スケールの計測では、 $z=0.0\text{cm}$ での縦断面視ビデオ画像において、可視化断面を通過する縦渦構造の中で、水面まで到達した構造について、図-9の上図のように構造の先端から高水敷上の後端部までの長さを計測した。尚、それぞれの計測総個数 N をグラフ内に示した。

これより横方向のスケール (L_z) は $1.5 \sim 2.0H_{fp}$ (H_{fp} : 高水敷水深)、流れ方向のスケール (L_x) は $3.0 \sim 4.0H_{fp}$ で最頻値を示している。直線開水路乱流における縦渦構造のスケールは $L_y=1.0 \sim 1.5H$, $L_x=2.5 \sim 3.5 (H$: 水深) であることから¹⁴⁾、高水敷先端部に形成された縦渦構造は開水路流れの構造よりもやや大きいスケールを有していると考えられる。

(4) 縦渦構造と瞬時二次流れの相互関係

高水敷先端部周辺に形成された縦渦構造と瞬時に形成される二次流れの相互関係を横断面DPTVの解析結果から考察する。図-10は、高水敷先端部周辺に形成された縦渦構造とそこに形成された瞬時二次流れの重合図を示している。(a)では、時計方向の渦巻き形象を呈する縦渦構造が明瞭に可視化され、その形象に沿う時計方向の旋回流を呈する二次流分布が対応している。縦渦構造の左側および付け根部分では瞬時の斜昇流と対応している。この旋回流の左には反時計方向の旋回流が形成されているが、これは上流から計測断面に反時計方向の回転成分を有する縦渦構造の先端部が侵入していることに対応している。(b)においても、低水路側に形成された反時計

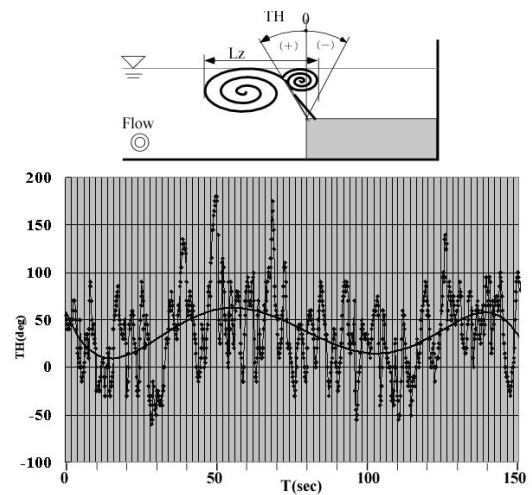
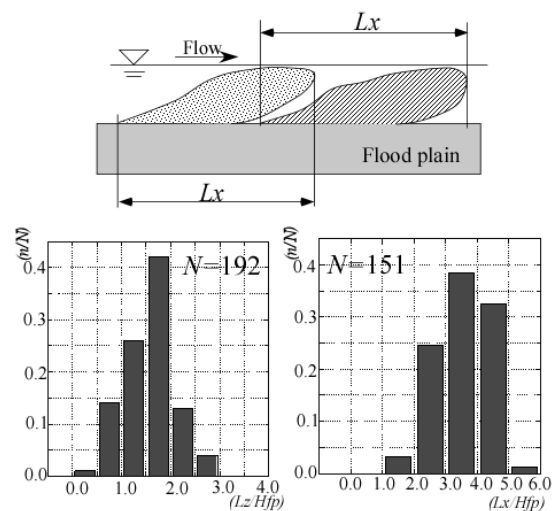
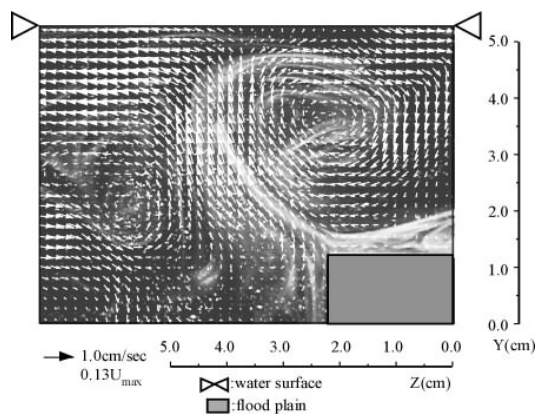


図-8 縦渦構造の傾斜角度経時変化 (Case B)

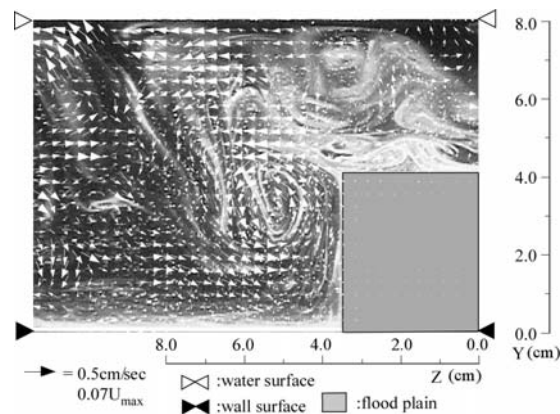


(a) 横方向スケール (L_z) (b) 流れ方向スケール (L_x)

図-9 縦渦構造のスケール (Case B)



(a) 縦渦構造と時計方向の瞬時二次流れ



(b) 縦渦構造と反時計方向の瞬時二次流れ

図-10 縦渦構造と瞬時二次流れの相互関係 (Case C)

方向の旋回流とそこに形成された縦渦構造の横断面形象との対応関係が明瞭に認められる。

4. 結 論

本研究では、流れの可視化法を用いて、片複断面開水路流れの高水敷先端部に形成された組織構造の時空間的特性およびそれらと斜昇流との相互関係を検討した。以下に本研究により得られた結論を示す。

- (1) 高水敷先端部周辺の瞬時の流れ場には、大小の時空間スケールをもつ時計、反時計方向の旋回流が対あるいは単独で形成され、斜昇流はその上昇部に相当する。
- (2) 流れの内部流況の可視化から、高水敷先端部周辺に、水深規模の横方向スケール、流れ方向スケールを有する縦渦構造が形成され、その形成領域は水深変化によらず時間的に安定していることが明らかとなった。
- (3) 高水敷先端部周辺に形成された縦渦構造は、左右方向へ傾斜運動していることが観察され、高水敷水深が比較的小さい流れでは、低水路方向への傾斜運動が卓越すると考えられる。また、縦渦構造は、瞬時の二次流れの生成しており、時間平均量の特徴として出現する斜昇流や旋回流の生成に寄与していると推測される。

以上の知見は、低レイノルズ数下の実験から得られたものであることから、今後より大きなレイノルズ数下での検討を行い、諸特性の変化を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) Sellin, R.H.J.: A laboratory investigation into the flow in the channel of a river and over flood plain, a Houille Blanche, No.7, pp.22-26, 1964.
- 2) 福岡捷二, 藤田光一: 複断面河道の抵抗特性と河道計画への応用, 土木学会論文集, 第411号/II-12, pp63-72, 1989.
- 3) 池田駿介, 村山宣義, 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.
- 4) 池田駿介, 空閑健: 直線複断面開水路流れに発生する大規模水平渦列の安定性と運動量輸送に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.565/II-39, pp. 73-83, 1997.
- 5) 棚津家久, 安部崇, 志村拓也, 中山忠暢: PTV法による複断面開水路流れの時空間相関解析, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp.89-98, 1996.
- 6) 棚津家久, 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.
- 7) 今本博健, 久下俊夫: 複断面流れの水理特性に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, pp.665-679, 1974.
- 8) 石垣泰輔, 今本博健: 可視化法による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.
- 9) 杉山均, 秋山光庸, 松原珠: 複断面開水路内の乱流構造解析と縦渦生成に関する研究, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.55-65, 1995.
- 10) 佐藤弘行, 河原能久, 玉井信行: Smagorinskyモデルによる複断面開水路乱流の解析, 土木学会論文集, No.628/II-48, pp.115-130, 1999.
- 11) 大成博文, 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 齊藤隆, 波多野慎: 壁乱流の縦断面せん断構造, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.31-40, 1998.
- 12) 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 國弘 栄司: 底壁面に縦向き粗度を設置した開水路乱流に形成された並列せん断流の内部構造, 土木学会論文集B, Vol. 62, No. 2, pp.186-200, 2006.
- 13) 佐賀孝徳, 大成博文, 渡辺勝利, 杉本博幸: 開水路乱流側壁領域の組織構造と二次流れの形成機構, 土木学論文集, No.677/II-55, pp.33-41, 2001.
- 14) Katsutoshi Watanabe, Takanori Saga, Eiji Kunihiro: Large-scale coherent structure in turbulent open channel flow, 5th International symposium on Particle Image Velocimetry, CDROM Proceedings PIV03, 2003.

(2006. 9. 30受付)