

片複断面開水路流れに形成された 水平渦の内部構造

INNER STRUCTURE OF HORIZONTAL VORTEX IN COMPOUND OPEN CHANNEL FLOWS WITH ONE-SIDED FLOODPLAIN

渡辺勝利¹・徳光洋輔²・佐賀孝徳³

Katsutoshi WATANABE, Yousuke TOKUMITSU and Takanori SAGA

¹正会員 工博 徳山工業高等専門学校准教授 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)

Characteristics of inner structure of horizontal vortex in compound open channel flows with one-sided floodplain were investigated by using velocity measurements and flow visualization. The results of velocity measurements using PTV show that large-scale low speed region with horizontal circulation is formed near the side wall on the floodplain, which contributes to form the characteristics of secondary flow profile and Reynolds stress ($-\overline{uw}$) profile. The results of flow visualization show that a group of longitudinal vortical structure occurs on the floodplain by inflow of high speed fluid transported from main channel to floodplain. It is observed that the grope of longitudinal vortical structure plays an important role in generating the large-scale horizontal circulation and inflow of high speed fluid through the interaction between the large-scale low speed region and main channel flow. On the basis of these results, the substance of horizontal vortex is considered to be the grope of longitudinal vortical structure formed over the floodplain..

Key Words: compound open channel flow, horizontal vortex, secondary flow, longitudinal vortical structure, flow visualization

1. はじめに

複断面開水路流れに形成される水平渦は、斜昇流と共に本流れ場を特徴付ける組織構造であり、その特徴として鉛直方向を軸とする大規模な回転運動と周期性を有している。この構造の存在は、Sellin¹⁾によるアルミ粉を用いた水表面流況の可視化によって明らかにされ、これまでも、その諸特性について実験や数値計算による究明が進められている。

Tamai²⁾は、水素気泡法を用いて流れ場の特徴を観察し、高水敷先端部における縦渦構造と水平渦の存在とそれらの特徴を明らかにした。また、水平渦の発生周期特性について二次元安定解析を用いて検討した。池田、太田³⁾は、側岸部植生境界に発生する周期渦の発生機構を線形不安定解析を用いて検討し、それが変曲点不安定によって生成されることを明らかにした。また、池田、空閑⁴⁾は、LDVと波高計を併用して得られた計測結果に、条件付き抽出アンサンブル平均法を適用し、水平渦の三次元構造を示した。さらに、池田、村山⁵⁾は、低水路幅と水深の比を変化させて詳細な流速計測を行い、その

比が水平渦の安定性に大きな影響を与えることを明らかにした。禰津⁶⁾は、低水路水深を変化させた流れ場において、LDVを用いた詳細な流速計測を行い、低水路水深と高水敷高さの比が1.5以下では、高水敷と低水路の境界に発生するせん断不安定によって水平渦が発生することを示し、それが横断方向レイノルズ応力の発生や輸送に寄与することを推察している。灘岡⁷⁾は、植生領域を有する開水路流れにSDS&2DHモデルを適用し、水平大規模渦の発生過程を再現した。また、水平渦がレイノルズ応力生成へ支配的な役割を果たしていることを明らかにした。

以上のように、水平渦の存在様式や発生周期、形成機構や安定性等に関する重要な知見が明らかされている。しかし、その実体や詳細な内部構造、レイノルズ応力の生成への寄与については、十分な解明には至っていないように思われる。

筆者らは⁸⁾、すでに高水敷水深が大きい片複断面開水路流れに形成された斜昇流の内部構造の特徴を検討し、高水敷先端部における縦渦構造の時空間的集中が、斜昇流の形成因であることを明らかにした。高水敷水深が小さい場合における、高水敷上の縦渦構造の特徴や水平渦

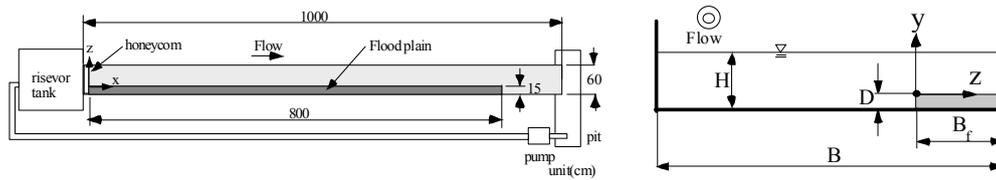


図-1 実験水路平面概観および座標系

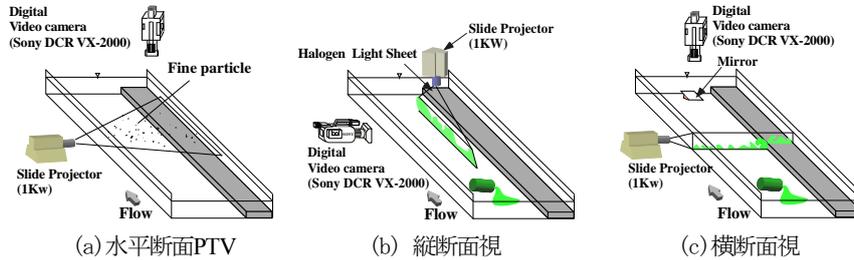


図-2 流れの可視化法概略

表-1 実験条件

Case	H(cm)	D(cm)	U _m (cm/s)	Re(U _m H/ν)	Fr(U _m /(gH) ^{0.5})	H/D
A	5.0	4.0	12.5	7153	0.19	1.25
B	5.0		15.8	8826	0.22	
C	5.0		13.7	7787	0.20	
D	5.0		4.3	2490	0.06	
E	6.0		4.8	3320	0.06	
F	8.0	5.7	5200	0.06	2.0	

の諸特性およびそれらの相互関係の解明は、本流れ場の総合的な理解に不可欠と考えられる。

以上のことを踏まえて、本研究では、片複断面開水路流れに形成された水平渦の内部構造の特徴を流速計測と流れの可視化法を用いて検討した。

2. 実験装置および方法

本実験には、長さ10m、幅(B)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。図-1に水路概観および座標系を示す。本水路の右岸側に、長さ1m、幅(B_p)15cm、高さ(D)4cmの塩ビ樹脂板を上流から8mの区間に亘って設置した。水路勾配は1/1000に設定した。

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)を採用した。トレーサーには微細粒子(平均粒径150μm、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(厚さ約2mm)を用いた。図-2(a)には、水平断面PTVの概略を示している。また、図-3には、PTVの可視化断面位置を示した。PTVの解析においては、「Flow PTV」(株)ライブラリを用いて60秒間の画像データ(1800枚)から平均流速分布、乱れの分布を求めた。

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(同図(b), (c))。トレーサーは、可視化断面より1.5m程度上流において、水路中央から右岸へ一様に注入した、横断面視では、同図(b)

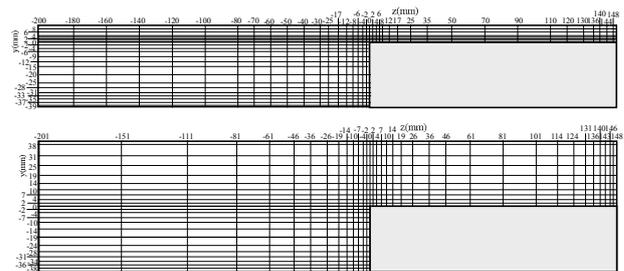


図-3 PTV可視化断面位置 (H=5.0cm, H=8.0cm)

に示すように、下流に設置した鏡(5×5cm)を用いて撮影した。また、組織構造と瞬時の流速分布との相互関係を考察するために、蛍光染料注入法とPTVを同時併用するDPTV⁹⁾を水平断面視に適用した。

実験条件の詳細は表-1に示すとおりである。表中のHは上流から5m地点の水深、U_mはこの水深と流量から求めた断面平均流速をそれぞれ示している。水深については、既往研究を参考に水平渦が形成されやすい条件として、H=5cm(高水敷水深1cm)、6cm(高水敷水深2cm)とした。また、高水水深が大きい場合の流れ場との比較として、H=8cmの条件を付加した。

3. 実験結果および考察

(1) 平均流速分布特性

図-4には、Case A(H=5.0cm)とCase F(H=8.0cm)における主流速(U)分布および二次流ベクトル(V, W)の計測結果を示している。Case Aの流れでは、Case Fと比

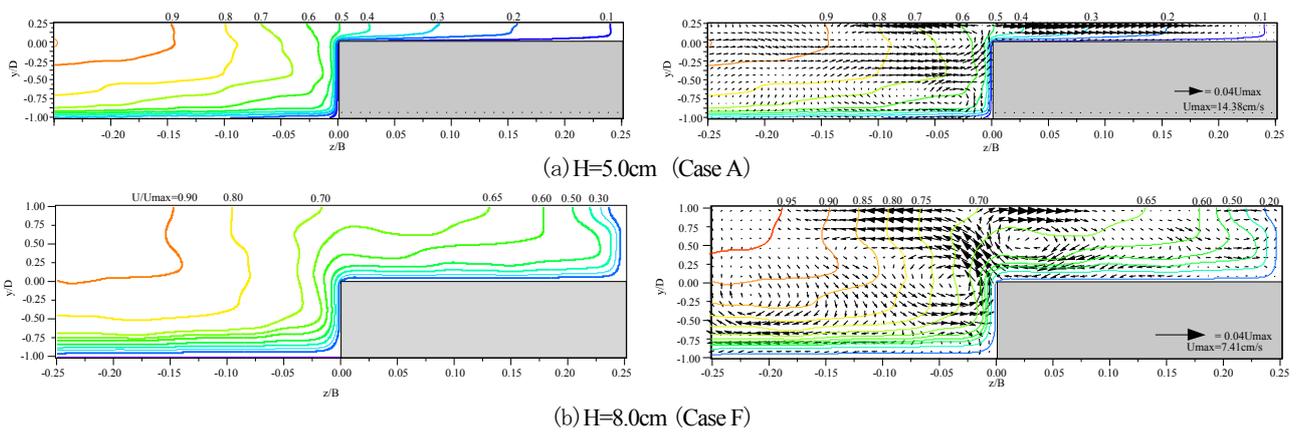


図-4 平均主流速および二次流分布との重合図

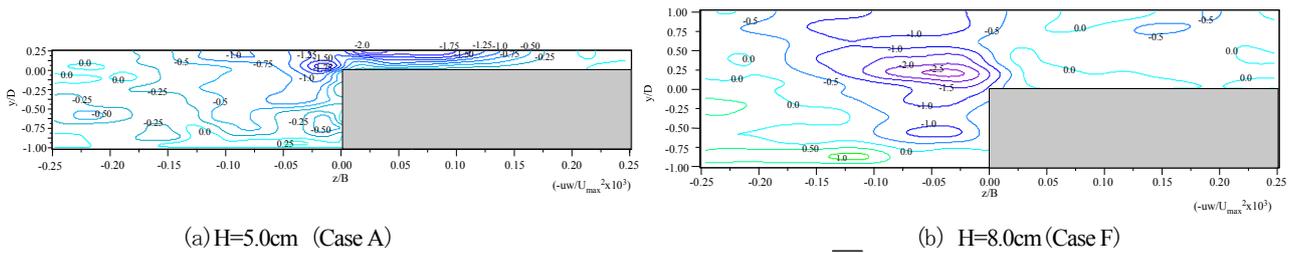


図-5 水平方向レイノルズ応力分布 ($-\overline{uw}$)

較して、斜昇流の存在を示す高水敷先端部の主流速の突出が消失し、横断方向の二次流れが顕著となっていることが明瞭である。図-5には、水平方向のレイノルズ応力分布 ($-\overline{uw}$) を示している。 $-\overline{uw}$ の比較的大きい値の領域は、両ケースとも高水敷先端周辺に形成されているが、高水敷水深が小さい場合は、それが高水敷上にも及んでいることが明らかである。

(2) 瞬時流速分布特性

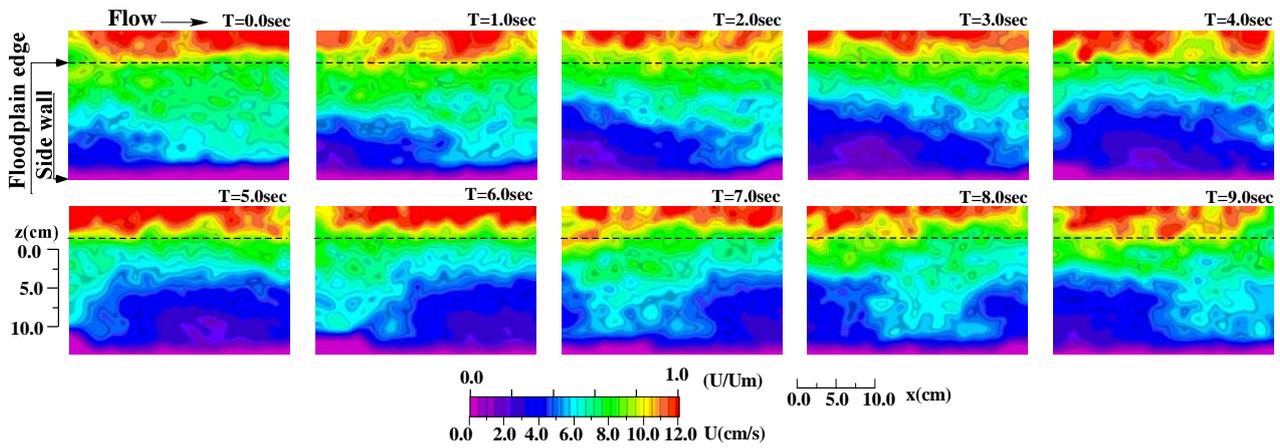
水平断面PTVでは、水平渦の特徴である鉛直方向を軸とする旋回運動が顕著に観察された。ここでは、水平断面の瞬時流速分布の経時変化から水平渦の特徴、それらと平均流速分布の特性との相互関係を検討する。

図-6は、Case B, $y=0.8\text{cm}$ における瞬時主流速分布、横断方向流速分布、瞬時レイノルズ応力分布の1秒毎の経時変化をそれぞれ示している。(a)の主流速分布においては、2つの特徴が指摘される。その1つは、高水敷の側壁側に大規模な低速領域が形成され、それが短時間で消失せず流下していることである。2つめは、この低速領域の流下に伴って、その下流側には高水敷上に高速流が形成されることである。これは $T=0.0\sim 2.0\text{sec}$ 、および $T=7.0, 8.0\text{sec}$ に認められる。(b)の横断方向流速分布においては、横断方向流速の正值(暖色)は高水敷方向、負値(寒色)は低水路方向に相当している。上記の大規模な低速領域の通過に伴って強い横断方向の流れが生じ、その方向は上流側では低水路方向、下流側では高水敷方向であることが明らかである。上述の高水敷上の高速域は、低水路から高水敷方向へ流入していることが明らかである。(c)には、瞬時レイノルズ応力分布

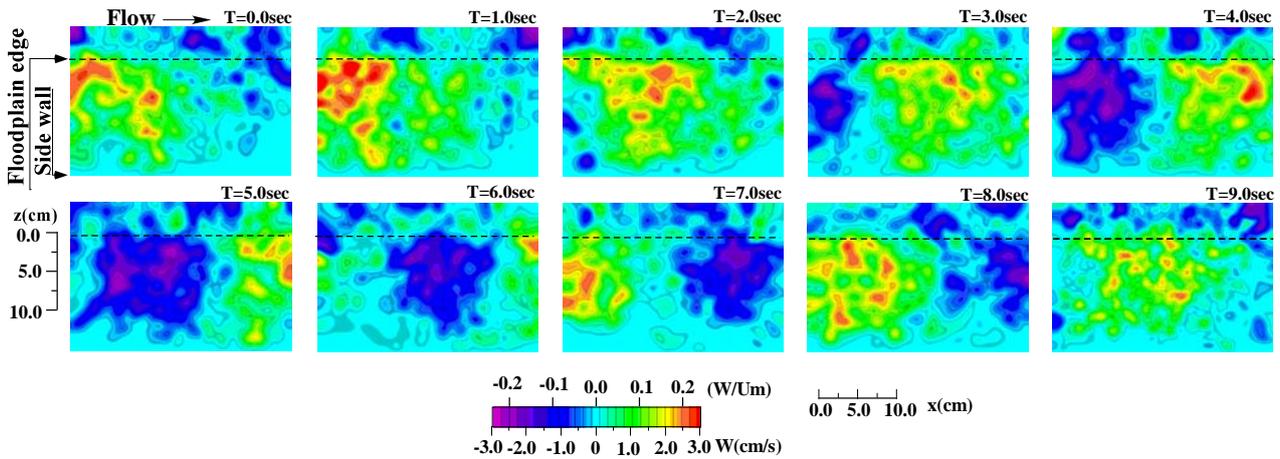
($-\overline{uw}$)および変動速度ベクトル (u, w) を重ねて示している。変動速度は、瞬時流速から平均流速の横断方向分布値を差し引いて求めた。また、この変動速度の積を瞬時レイノルズ応力として求めた。変動速度分布からは、高水敷先端部付近が回転の中心(赤色破線で明示)とする時計方向に回転する大規模な水平渦の存在が $T=3.0\sim 6.0\text{sec}$ において認められる。また、高水敷上の大きな瞬時レイノルズ応力の形成領域には、これら旋回状の変動速度ベクトルが分布している。すなわち、正の領域は $u < 0, w > 0$ の変動速度ベクトル、負の値は $u < 0, w < 0$ の変動速度ベクトルにそれぞれ対応している。 $T=0.0\sim 3.0\text{sec}$ 、 $7.0\sim 9.0\text{sec}$ に見られる高水敷先端部付近における負の大きな値の分布は、図-5(b)に示した長時間平均量と傾向が一致している。これは、高水敷方向への高速流の流入($u > 0, w > 0$)に対応しており、上記の高速流の流入が寄与していると考えられる。以上の水平断面PTV解析から、水平渦は高水敷方向への高速流の流入、横断方向流速、水平方向のレイノルズ応力の生成に密接に関係していると考えられる。

(3) 流れの内部流況

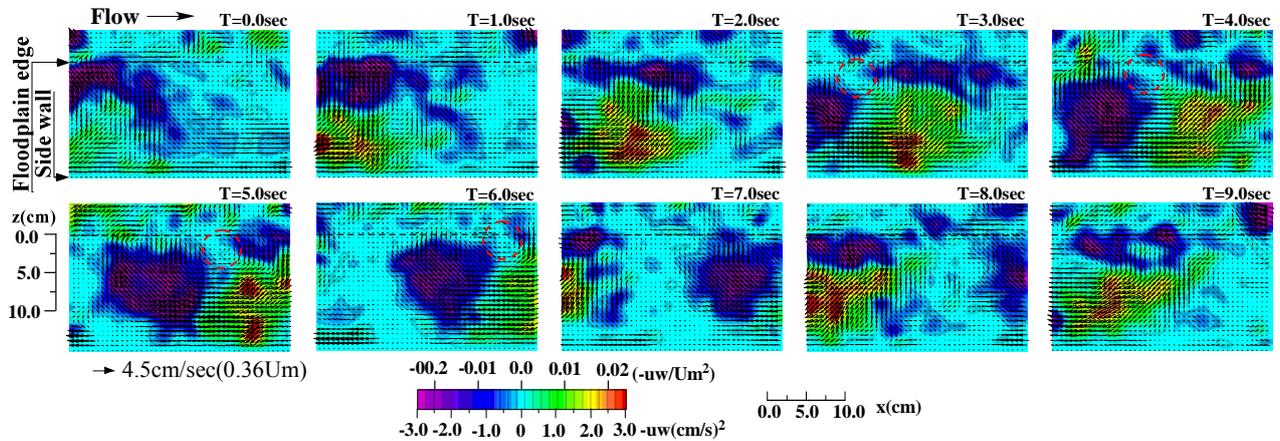
水平渦の実体を詳しく調べるために水平断面視と横断面視の特徴を考察する。図-7は、Case Bにおける水平断面視($y=0.8\text{cm}$)の1秒毎の経時変化を示している。流れ方向は左から右であり、緑色の領域が蛍光染料水溶液によって可視化された組織構造の水平断面形象に相当する。図中の破線は高水敷先端部を示している。水平断面視の流況観察においては、次の3つの特徴が見出された。その1つは、上述の高水敷方向への高速流の侵入



(a) 主流速分布



(b) 横断方向流速分布



(c) 水平方向レイノルズ応力分布

図-6 水平断面瞬時流速分布 (Case B, $y=0.8\text{cm}$)

($T=0.0\text{sec}$ の矢印) に伴って、高水敷上に太い縞状の構造が発生し、それらが集団となって帯状の領域を形成することである。2つめは、この縦渦構造群と側壁側の大規模な低速領域および低水路の流れの相互作用によって鉛直方向を軸とする大規模な旋回流が形成されることである。3つめは、上記2つの現象が周期的に発生することである。

1つめの特徴に関して、この縦渦構造群に相等する領域を黄色の点線で囲んで図中に示した。この構造群は、

全体として低水路方向に傾斜した帯状の領域を形成して流下している。図-8にはこの縞状構造の拡大図を示している。これらの縞状の構造は側壁方向へ斜めに移動すること、その断面には破線で囲んで示したような渦形象が観察された。この構造の実体は横断面視から、縦渦構造であることが確かめられた。図-9(a)にその横断面視の一例を示す。これらの縦渦構造は、高水敷方向の強い横断方向の流れの影響で時計方向に回転しながら、側壁方向へ移動していることが観察された。この縦渦構造は、

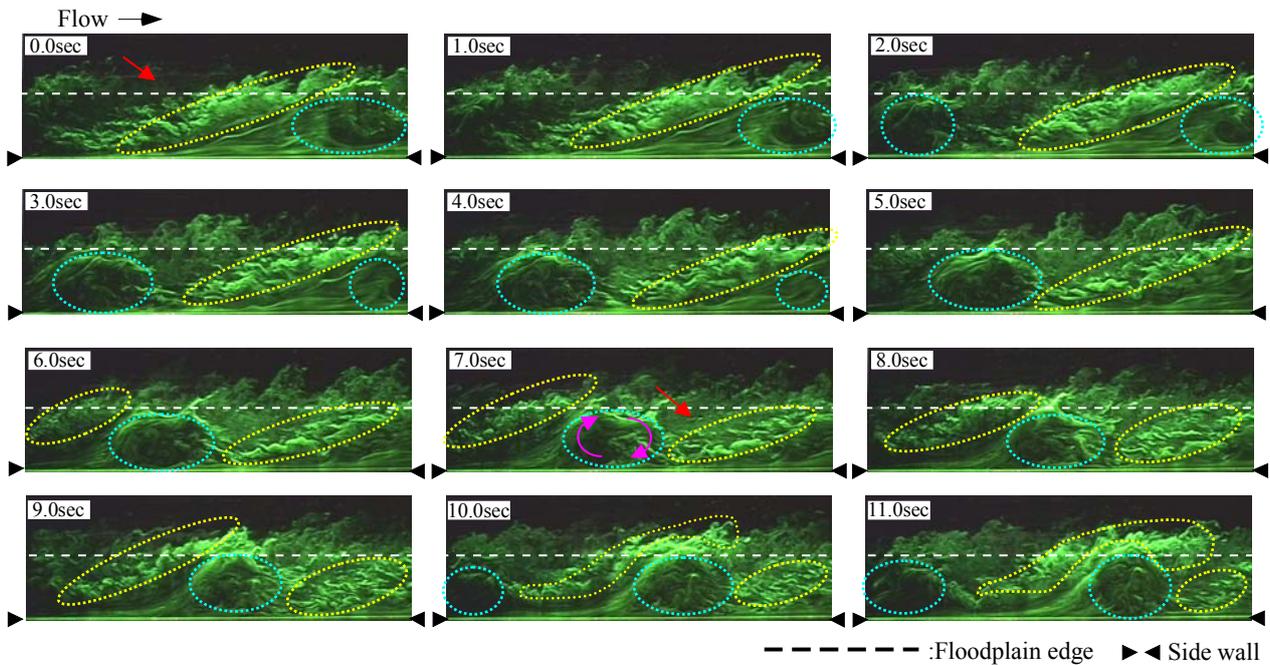


図-7 水平断面形象の経時変化 (Case B, $y=0.8\text{cm}$)

高水敷へ高速流が流入する際に発生する速度せん断 ($\partial w/\partial y, \partial v/\partial z$) に起因していると推察される. 同図 (b) は, この縦渦構造群が低水路に張り出した部分の横断面視に相等し, そこでは扁平な構造の中に複数の縦渦構造が観察された. 高水敷水深が比較的大さい条件と比べて, 水深が小さい条件では, 高水敷先端部における縦渦構造の形成は間欠的であることが観察された.

2つめの特徴に関して, 水平断面視において観察された低速領域を水色の点線で囲んで図中に示した. この低速領域に, 図-7の $T=6.0\sim 11.0\text{sec}$ に見られるように, 上流からの縦渦構造群が乗り上げ, 低水路側に張り出している. この過程で鉛直方向を軸とする大規模な時計方向の旋回流が形成され, 高水敷への高速流の流入が顕著に観察された. また, 縦渦群の先端には既往の研究^{1), 5)} で見られるような水平渦に類似した形象が認められた. この水平渦と瞬時流速の関係を示すために水平断面 DPTV 解析例を図-10に示した. 本図には, 水平断面形象および瞬時主流速分布を示している. 図中の断面形象は縦渦構造群 (黄色の破線) およびその下流の低速領域であり, それらが低水路に張り出している様子を示している. 瞬時流速分布からは, これら形成領域と低水路の流れには顕著な速度差があることが明瞭である. また, 瞬時流速から縦渦構造群と低速領域の存在領域の移動速度を差し引いて得られた変動速度ベクトルを同図中に示しているが, そこには黄色の点線で示すような時計方向の旋回流の形成が認められる. この旋回流は, 相対的に低速となる縦渦構造群と高速な低水路の流れの境界で, 運動量交換に伴うせん断不安定によって発生し, 高水敷と低水路間の流体輸送に寄与すると考えられる. 3つめの特徴に関して, 図-11に水平渦の通過周期の計測例を示

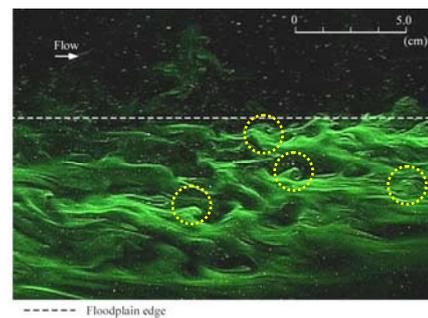
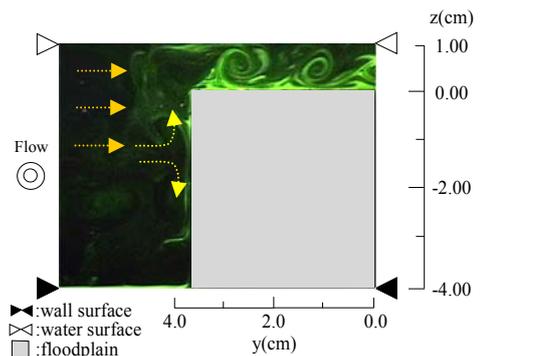
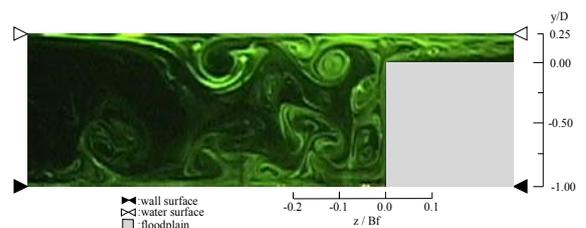


図-8 高水敷上に形成された縞状構造の拡大図 (Case B, $y=0.5\text{cm}$)



(a) 水敷先端部に形成された縦渦構造



(b) 水平渦の横断面形象

図-9 組織構造の横断面視 (Case C)

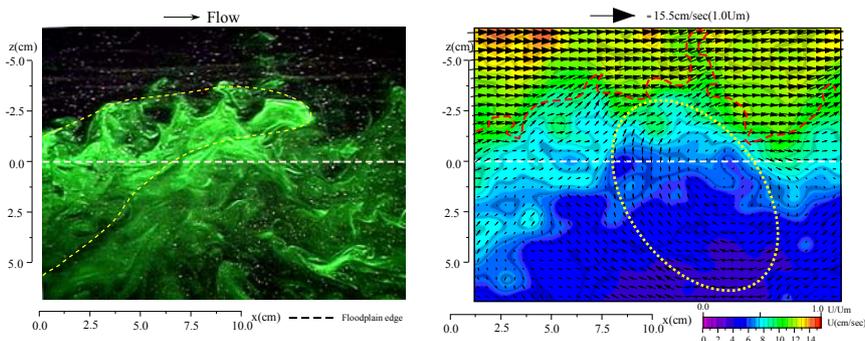


図-10 水平断面DPTV解析の一例 (Case B, $y=0.8\text{cm}$)

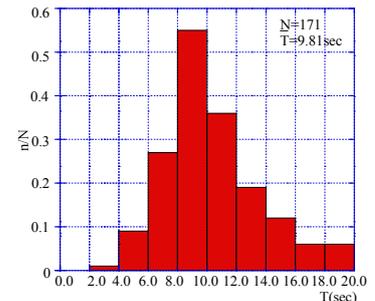


図-11 水平渦の通過周期 (Case C)

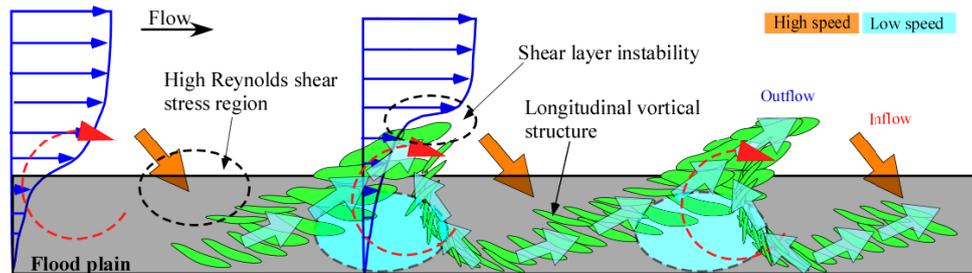


図-12 水平渦の概念図

す。この条件では8秒～10秒にピークを示している。平均通過周期に高水敷上の平均流速を乗ずるとその波長は60cm程度となっている。図-12には、本研究において得られた知見を踏まえ、水平渦の内部構造に関する概念図を示した。水平渦の形成には、高速流の流入によって高水敷上に形成された縦渦構造群が重要な役割を果たしていると考えられる。この縦渦構造群は、高水敷の側壁側に形成された大規模な低速領域および低水路の高速流との相互作用によって鉛直方向を軸とする大規模な旋回流を形成し、低水路方向への低速流体の輸送、高水敷方向への高速流体の輸送の役割を果たしている。流入した高速流によって、側壁付近の低速流体は上下流に輸送され、上流側では低速化が助長されると推察される。

4. 結論

本研究では、片複断面開水路に形成された水平渦の内部構造の特徴を流れの可視化法を用いて検討した。

その結果、水平渦が形成される高水敷上には、高速流の流入によって帯状を呈する縦渦構造群が形成されることが明らかとなった。この構造群は流下に伴って、高水敷の低速領域および低水路の高速流との相互作用によって鉛直方向を軸とする旋回流を生成し、低水路方向への低速流体の輸送、高水敷方向への高速流体の輸送、水平方向のレイノルズ応力の生成に直接寄与している。

謝辞：本研究は、平成19年度科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号：19560523, 研究代表者：渡辺勝利) の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

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) Nobuyuki Tamai, Takashi Asaeda, Hirokazu Ikeda: Study on generation of periodical large surface eddies in a composite channel flows, Water resources research, Vol.22, No.7, pp.1129-1138, 1986.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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宇実験的研究, 土木学会論文集, No.565/II-39, pp. 73-83, 1997.
- 6) 禰津家久, 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) 灘岡和夫, 八木宏: SDS&2DHモデルを用いた開水路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.
- 8) 渡辺勝利, 森山拓士, 佐賀孝徳: 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, 水工学論文集, 第51巻, pp.649-654, 2007.
- 9) 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.

(2008. 9. 30受付)