高水敷水深の大きい複断面開水路流れの組織構造の特徴

CHARACTERISTICS OF COHERENT STRUCTURE IN COMPOUND OPEN CHANNEL FLOWS WITH DEEP FLOOD PLAIN DEPTH

渡辺勝利[1]・徳光洋輔[2]・吉永晴香[3]
Katsutoshi WATANABE, Yousuke TOKUMITSU, Haruka YOSHINAGA

[1]正会員　博士（工学）徳山工業高等専門学校　土木建築工学科
（〒745-8585　山口県周南市学園大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]非会員　広島市南区役所　建設部土木課（〒733-0812　広島県広島市西区己斐本町1丁目3-7-502号）

In this study, characteristics of coherent structure in one-sided compound open channel flows with deep flood plain depth are investigated using PTV (Particle Trucking Velocimetry) and fluorescent dye injection method. The velocity measurement results show that the relative high speed region is formed over the flood plain and large negative and positive value of Reynolds stress ($-\overline{uw}$) are generated in the vicinity of junction edge. The results of flow visualization indicate that large-scale streamwise vortices are formed over the junction edge and side wall surface for a long time period. The streamwise vortices formed over junction edge tend to develop toward water surface intermittently, and decreasing tendency of their mean inclination angle in the opposite side wall is observed. Furthermore, it is inferred that interaction between streamwise vortices formed over the junction edge and the one formed over the side wall play important role in generating characteristic velocity profiles.

Key Words: *compound open channel flow, coherent structure, streamwise vortex, secondary current, flow visualization techniques*

1．緒　論

複断面開水路流れには，斜昇流[1)]，水平渦[2)]という，この流れ固有の組織構造が形成されることが知られている．これらの構造の形成には低水路水深（H）と高水敷高さ(D)の比が重要な形成条件となることが，福岡ら[3)]らによって明らかにされている．その結果によれば，高水敷と低水路の粗度が同一の場合，H/Dが1.5程度より大きい流れ場では斜昇流，小さい流れ場では水平渦がそれぞれ卓越することが示されている．このような，H/Dによる流れの構造の変化は，禰津ら[4)]によっても明らかにされている．彼らはH/Dを系統的に変化させた流れ場の特徴をLDVとPIVを用いて検討し，H/Dが1.5程度を境界として流れの構造が異なることを明らかにしている．その流れ構造に関する概念図には，H/D <1.5の流れ場では，低水路と高水敷との間に発生するせん断層の不安定性によって水平渦が発生し，それによって高水敷境界部に高いレイノルズ応力が生ずること，また，H/D>1.5の流れ場では，高水敷と低水路の境界に水平方向に軸を持つ渦が形成されることにより，高水敷と低水路との流れが分離され，それぞれの領域に水平渦が発生することが示されている．

これらの研究成果から，H/D=1.5程度の値は複断面開水路流れの構造変化のしきい値あるいは高水敷水深の大小を判断する基準と捉えられる．これを踏まえると，水平渦に関する研究[5),6)]は高水敷水深の小さいH/D<1.5の条件で検討されている．また，斜昇流についてはその多くがH/D=2の条件で検討されており[7),8),9)]，それより大きなH/Dの研究は，実験的には上述の福岡ら[3)]，禰津ら[4)]，数値計算ではNaotら[10)]によって行われている．しかし，詳細な内部構造の解明には至っていないように思われる．

著者らは，これまでに開水路流れの片側岸に高水敷を有する片複断面開水路流れの内部構造の特徴について流れの可視化法を用いて検討を進めてきた．高水敷水深が大きいH/D=2の流れ場の斜昇流の内部構造について検討

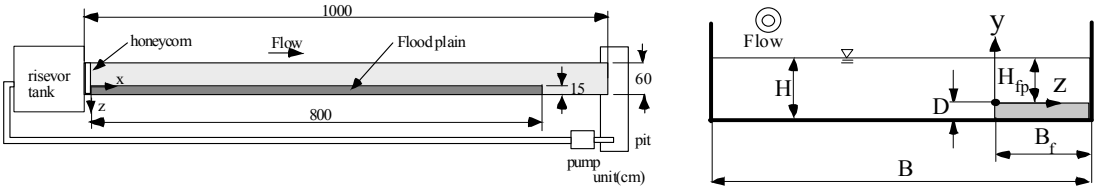
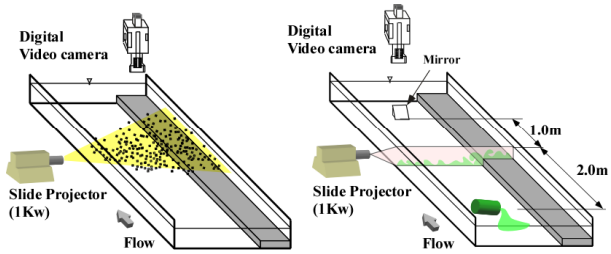


図-1　実験水路概要および座標系



(a)水平断面PTV概略　　(b)横断面視法概略

図-2　PTVおよび染料注入法概略

表-1　実験条件

Case	H (cm)	B_f (cm)	D (cm)	H/D	Um (cm/s)	Re (Um*H/v)	Fr (Um/ √gH)
A	12	15	4	3	10.2	8887	0.094
B	12			3	5.7	6819	0.053
C	12			3	3.3	6211	0.03
D	8			2	5.7	5202	0.064
E	8			2	4.7	4390	0.053

した．その結果，高水敷先端部周辺に縦渦構造が安定して形成され，それらが瞬時の旋回状の二次流を生成していることから，高水敷先端部周辺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が明らかとなった[11]．また，高水敷水深が小さい*H/D*=1.25の流れ場における水平渦の内部構造について検討した．その結果，水平渦の形成には，速度差によるせん断不安定とそれに伴う高水敷方向への高速流輸送によって高水敷上に形成される縦渦構造群が重要な役割を果たしていることが，明らかとなった[12]．このように縦渦構造は複断面開水路流れにおける極めて重要な組織構造であり，*H/D*がより大きな流れ場でのそれらの時空間特性や側壁上に形成される組織構造との相互関係の検討は，複断面開水路流れの総合的理解のために不可欠と考えられる．

以上を踏まえて，本研究では高水敷水深がより大きい場合の複断面開水路流れに注目し，その組織構造の特徴を流速計測および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

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．本水路右岸側に,高水敷として長さ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100μm，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，流れの各断面におけるトレーサー粒子の流動状況をハイビジョンデジタルビデオカメラ（SONY HDR-FX1000）で撮影した．**図-2**(a)には，水平断面PTVの概略を示している．PTVの解析においては，可視化画像（1440×1080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，それらを統計処理して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．**図-3**には，本実験(a)および前報(b)のPTV計測断面位置を示した．

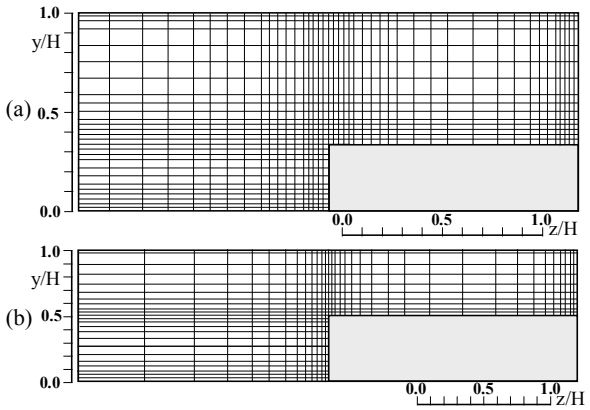
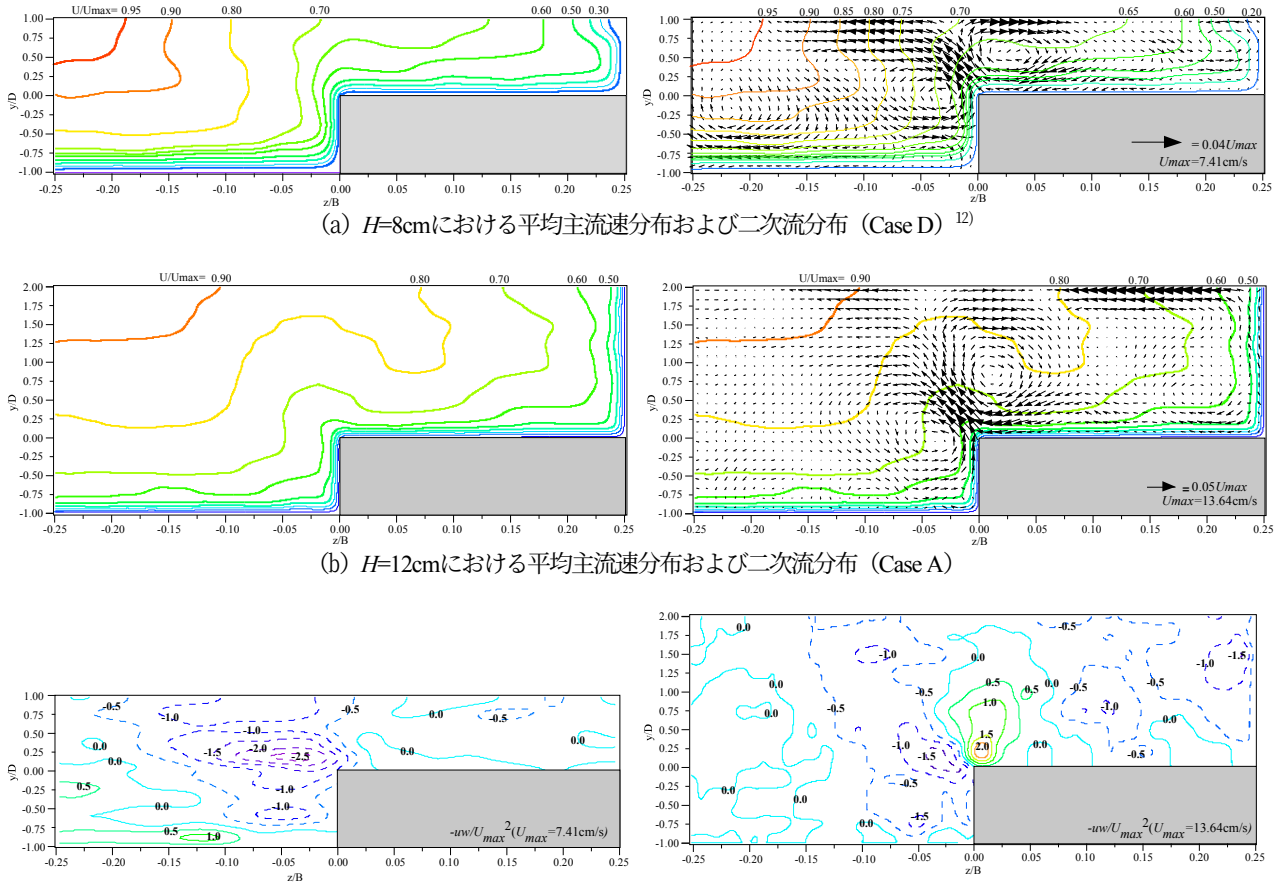


図-3　PTV計測断面位置

内部流況の可視化では，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，注入に伴う初期の撹乱部分が流下した後，**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（5×5cm）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)[13]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



(a) H=8cmにおける平均主流速分布および二次流分布（Case D）[12]

(b) H=12cmにおける平均主流速分布および二次流分布（Case A）

(c) H=8cmにおけるレイノルズせん断応力分布（Case D）[12]　(d) H=12cmにおけるレイノルズせん断応力分布（Case A）

図-4　流速計測結果

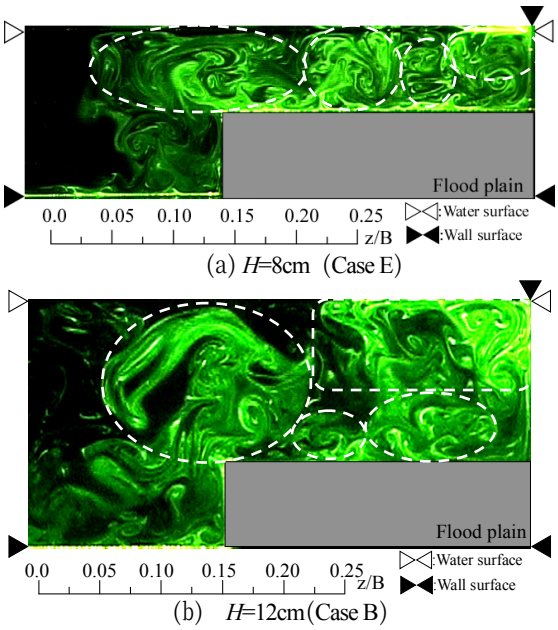
ビデオカメラで撮影した．

実験条件の詳細は**表-1**に示すとおりである．H/Dは実験水路の制約から３に設定し，それを２の結果[11),12)]と比較検討した．

３．実験結果および考察

(1)平均流速分布特性

図-4には,H=8cm（以下，H8と呼称）およびH=12cm（以下，H12と呼称）における流速計測結果を示している．(a)にはH8の平均主流速（U）分布と平均二次流ベクトル（V,W）との重合図を示している．主流速分布においては高水敷先端部周辺の等値線の水表面方向への膨らみが見られ，これは同先端部に形成された斜昇流に対応している．この斜昇流は，時針，反時針方向に対を成す大規模な旋回流の境界に位置している．(b)に示したH12の平均主流速分布においては，H8同様に斜昇流による高水敷先端部周辺の等値線の膨らみが認められる．また，低水路側の水表面から高水敷の中央付近にかけて，比較的高速な領域（U/U_{max}=0.8）の形成が認められる．この特徴は，高水敷先端部に形成された時針方向に回転する旋回状の二次流れによって，低水路側の相対的に高速な流体が側壁方向へ輸送されるために生ずるものと推

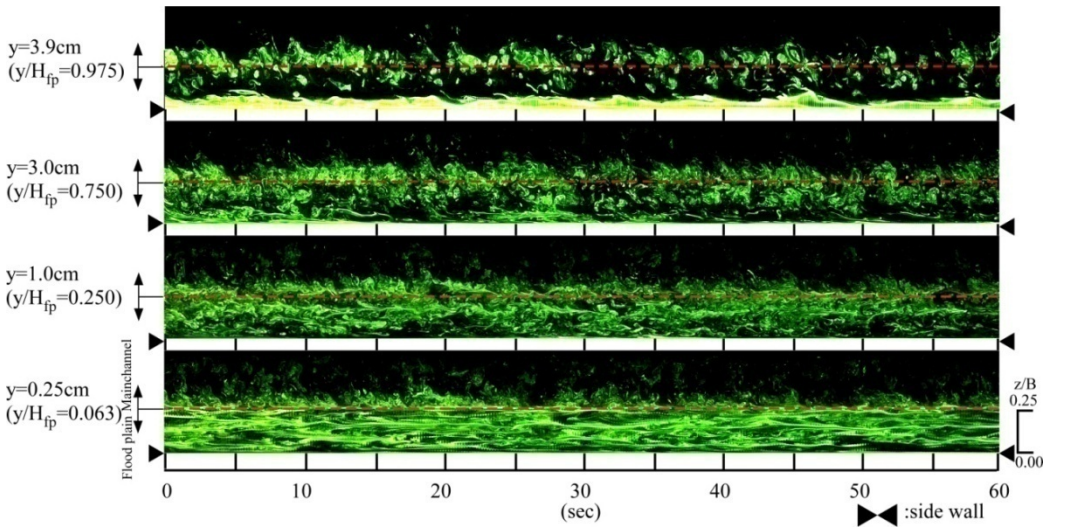


(a) H=8cm（Case E）

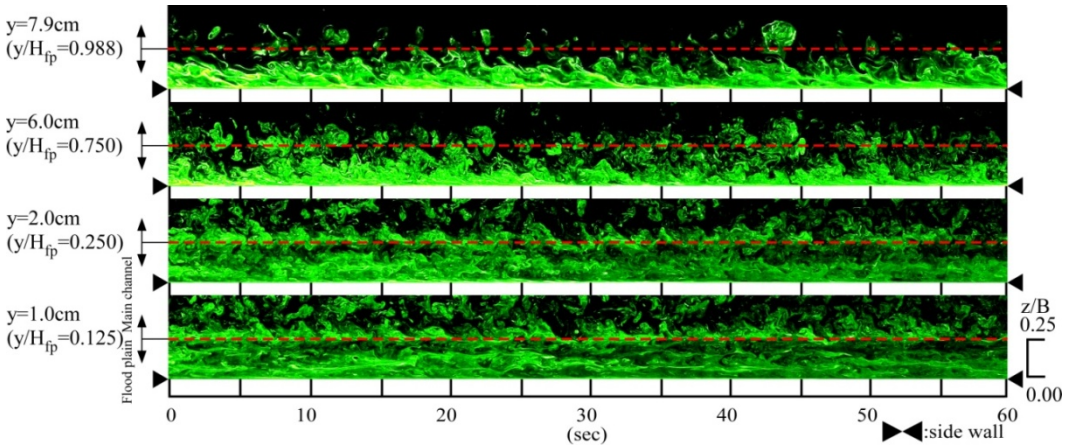
(b) H=12cm(Case B)

図-5　内部流況可視化

察される．このような高水敷上の高速域の形成については，禰津らによっても指摘されており[4)]，彼らの実験では最大流速点が高水敷上に生ずることが報告されている．(c)にはH8での横断方向レイノルズ応力（$-\overline{uw}$）分布を示している．本分布では，負の比較的大きな値の領域が高水敷先端部から低水路水表面方向に形成されており，



(a) H=8cm（Case E）



(b) H=12cm　(Case B)

図-6　高水敷上に形成された縦渦構造の形成領域の経時変化

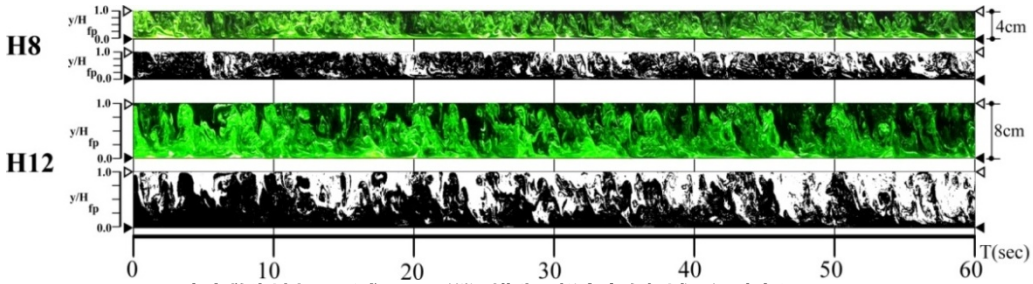


図-7　高水敷先端部に形成された縦渦構造の鉛直方向領域の経時変化(z=0)

その最大値は反時針方向の旋回流の形成領域内に分布している．(d)に示したH12での同分布においては，高水敷先端部に正負の最大値を含む絶対値の高い値を示す領域が分布しており，その形成領域は対を成す旋回状の二次流の形成領域に対応している．また，側壁付近においては負の比較的大きな値の分布領域が認められる．

(2)内部流況および組織構造の時空間特性

図-5には，蛍光染料注入法によって可視化された高水敷周辺の内部流況の一例を示している．(a)に示したH8の流れ場においては，破線で示すように高水敷上に複数の縦渦構造および側壁上に縦渦構造の形成が認められた．これらの構造のうち高水敷先端部の縦渦構造は時間的に安定して形成され，左右方向への顕著な傾斜運動がその特徴として明らかとなっている[11]．(b)に示したH12の流れ場においても，破線で示すように高水敷上と側壁上において縦渦構造の形成が認められた．また，高水敷先端部と側壁上の縦渦構造は大規模であり，その中間に形成される縦渦構造は比較的小規模であることが観察された．これらの構造は，H8同様に形成領域が時間的に安定していること，高水敷先端部の縦渦構造は左右方向へ傾斜運動することが認められた．

a)縦渦構造の形成領域の経時変化

以下では，H8およびH12における高水敷上および側壁上の縦渦構造の形成領域の経時変化，高水敷先端部の縦渦構造の傾斜運動について検討する．

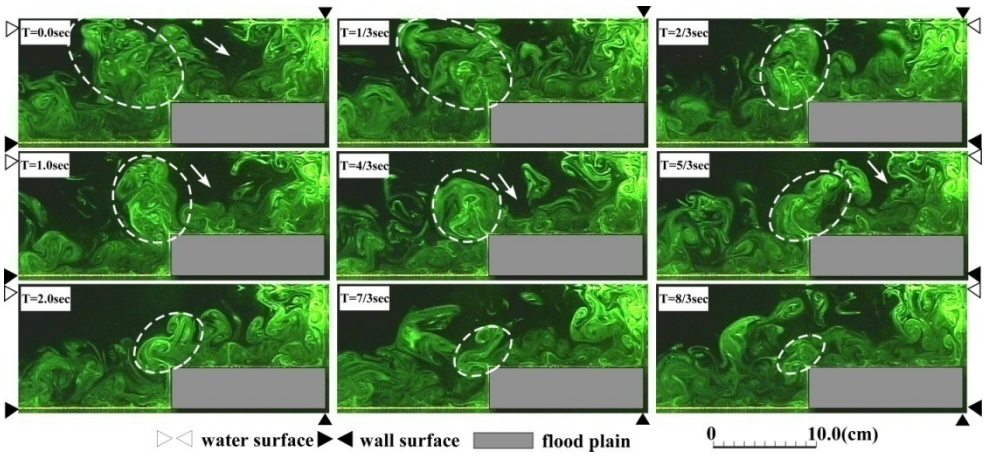
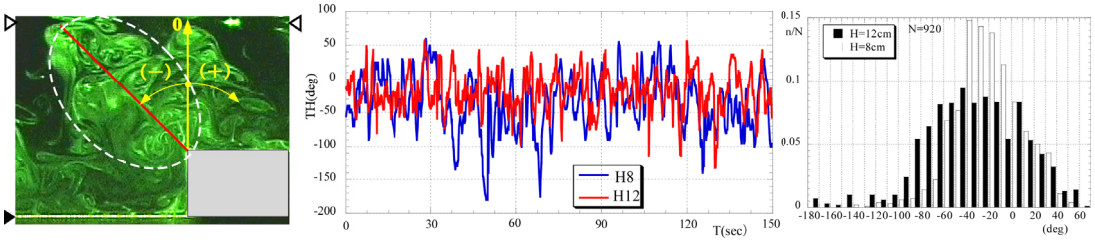


図-8　高水敷および側壁周辺の縦渦構造の経時変化(Case B)



(a)縦渦構造の傾斜角度（TH）　(b)傾斜角度の経時変化　(c)傾斜角度頻度分布

図-9　高水敷先端部の縦渦構造の傾斜角度特性(Case B)

図-6には，高水敷上および側壁上に形成された縦渦構造の形成領域の経時変化を示している．本図は，横断面視画像を各高さにおいて，1mm程度の厚さで水平方向に切り取り，その画像を1分間（1800枚）に亘って繋ぎ合わせたものである．図中の赤色の破線は，高水敷先端部の位置であり，図中の緑色の部分が縦渦構造の形成領域に相当する．**図-5**に示したように，縦渦構造の断面形状は高水敷壁面付近で比較的細く，水表面方向に横幅が広くなっている．このため，縦渦構造が長時間にわたって形成されると，(a)に示したH8の結果に見られるように，その形成領域は，高水敷壁面極近く(y=0.25cm)では，細いstreak状の形象となるが，切断面が水表面に近づくにつれてより太いstreak状から帯状の太い連続した形象となる．これらの特徴から，高水敷先端部には水表面まで到達する大規模な縦渦構造が形成されていることが明らかである．また，側壁上においても縦渦構造が安定して形成されていることが認められる．(b)に示したH12の流れでは，H8と同様に切断面の高さが高くなるに従ってstreak状から帯状の形象への変化が認められ，高水敷上および側壁上に形成される縦渦構造の時空間的な安定性が認められる．しかし，H8の結果と以下の２つの点が異なっている．その１つは，高水敷先端部に形成された縦渦構造の水表面への到達が，H8では間断なく連続的であるの対し，H12では間欠的となっていることである．これについては，**図-6**と同方法で高水敷先端部での鉛直切取り画像を繋ぎ合わせた画像とその二値化画像を示した**図-7**により明瞭に認められる．２つめは，側壁上に形成された縦渦構造の横方向スケールがH8と比較して大きくなることである．**図-6**において，H8（y=3.9cm）とH12（y=7.9cm）における染料の平均存在幅を縦渦構造の横方向スケールL_zとして求めると，H8では3.7cm（L_z/B_f=0.25），H12では11.4cm（L_z/B_f=0.76）となり，H/Dの増加によって側壁上の縦渦構造が高水敷上に占める割合が大きくなることが明らかである．

b)縦渦構造の傾斜運動特性

図-8には，H12の高水敷上における横断面視の1/3秒毎の経時変化を示している．本図において破線で囲んで示した横断形象が，高水敷先端部を流下する縦渦構造に相当する．これより，縦渦構造は流下しながら低水路方向あるいは側壁方向に傾斜運動していることが認められる．図中の白い矢印は，流況観察において推測された二次流れを示している．この二次流れの生成には，高水敷先端部の縦渦構造と側壁上に形成されている縦渦構造の相互作用によって水表面から高水敷壁面への下降流を誘起していることが推察された．この縦渦構造の傾斜角度の測定結果を**図-9**に示している．傾斜角度は(a)のように，縦渦構造の先端部と高水敷先端部とを結んだ線と垂直軸との成す角とし，側壁方向への傾斜角度を正とした．(b)はこの角度を目視によって1/6秒毎150秒間にわたって計測した結果であり，(c)には傾斜角度の頻度分布を示している．H8における平均傾斜角は-39°(標準偏差±42°)，H12では平均傾斜角はH8の約1/2の-19°（標準偏差±29°）となっている．H12,H8の両条件とも平均的には対岸方向へ傾斜していることが認められるが，H/Dの増加伴い縦渦構造の対岸方向への傾斜角は減少し，傾斜運動の振幅角度も小さくなることが明らかである．

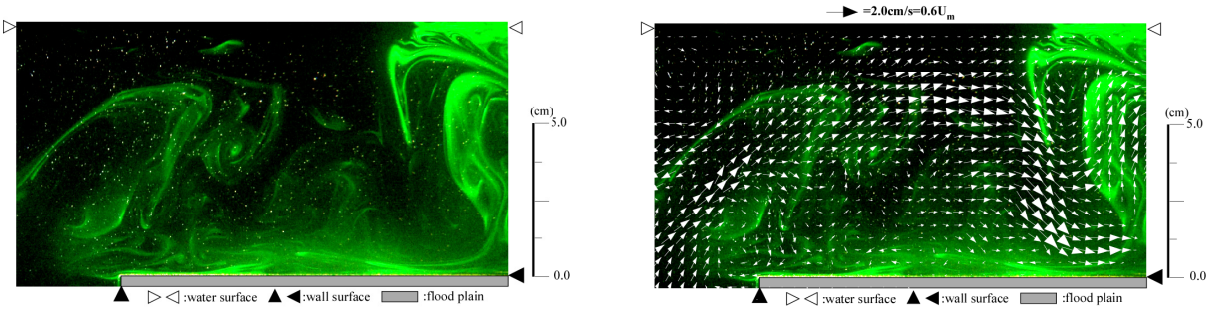


図-10　高水敷上の縦渦構造と瞬時二次流れの相互関係(Case E)

(3) 組織構造と流速分布との相互関係

高水敷上における横断面DPTVの解析結果の一例を**図-10**に示している．左図には高水敷先端部と側壁上の縦渦構造の先端部が可視化されている．右図は瞬時二次流ベクトルとの重合図である．これより，高水敷先端部の縦渦構造に沿う強い上昇流と２つの縦渦構造の間に形成された強い下降流の存在が明らかである．高水敷先端部および側壁上には長時間に亘って縦渦構造が形成されていることから，平均主流速分布において見られた高水敷先端部からの斜昇流および高水敷上における高速領域の形成にこれらの縦渦構造が重要な役割を果たしていることが推察される．

４．結　論

高水敷水深の大きい流れ場を対象として，内部構造の特徴を流れの可視化法を用いて検討した．以下に本研究において得られた結論を述べる．

（１）高水敷水深の大きい流れ場の高水敷先端部には，顕著な傾斜運動をする縦渦構造が集中して形成される．その縦渦構造の水表面への発達は，H/Dの増加に伴って間欠的になり，その対岸方向への平均傾斜角度は減少する．

（２）側壁上に形成される縦渦構造の横方向スケールは，H/Dの増加に伴って大きくなり，高水敷上に占める割合が増加する．

（３）高水敷先端部付近に形成された縦渦構造と側壁上に形成された縦渦構造は高水敷先端部の瞬時の上昇流や高水敷方向へ下降流形成に寄与する．

謝辞：本研究は，平成20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) 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.
2) Sellin,R.H.J:A laboratory investigation into the flow in the channel of a river and over flood plain, La Houille Blanche,No.7,pp.22-26,1964.
3) 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.
4) 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.
5) 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.
6) 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.
7) 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.
8) 禰津家久，山上路生，後藤健：高水敷水深が大きい複断面開水路流れにおける複列水平渦の3次元構造，土木学会論文集，No.789/II-71,pp.27-36,2005.
9) Jong, J., Choi, S.-U: Investigation of twin vortices near the interface in turbulent compound open-channel flows using DNS data, Journal of Hydraulic Enginnerig, vol.134, No.12, pp.1744-1766, 2008.
10) Naot,D. , Nezu,I. , Nakagawa, H.: Calculation of compound open channel flow, J. Hydraulic Engineering.,ASCE,119(12),pp.1418-1426,1993.
11) 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.
12) 渡辺勝利，徳光洋輔，佐賀孝徳：片複断面開水路流れに形成された水平渦の内部構造，土木学会水工学論文集，第53巻，pp. 931-936,2009.
13) 大成博文，渡辺勝利，佐賀孝徳，斉藤隆，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.
14) 渡辺勝利，佐賀孝徳，國弘 栄司： 底壁面に縦桟粗度を設置した開水路乱流に形成された並列らせん流の内部構造，土木学会論文集Ｂ, Vol. 62, No. 2, pp.186-200, 2006.

(2009.9.30受付)