

平成 22 年 6 月 14 日現在

研究種目：基盤研究 C

研究期間：2007～2009

課題番号：19560523

研究課題名（和文） 複断面開水路流れの内部構造の解明と河岸防災手法の検討

研究課題名（英文）

CLARIFICATION OF INNER STRUCTURE IN COMPOUND OPEN CHANNEL FLOWS AND CONSIDERATION OF DISASTER MEASURES FOR RIVER BANK

研究代表者

渡辺 勝利 (Watanabe Katsutoshi)

徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・教授

研究者番号：0019 1750

研究成果の概要（和文）：

複断面開水路流れ固有の流れ構造である「斜昇流」、「大規模水平渦」の内部構造の特徴を実験的に検討した。その結果、「斜昇流」は、高水敷先端部における縦渦構造の時空間的集中がその生成因となっていること、「水平渦」は高水敷上に形成される縦渦構造群が実体であり、それがせん断不安定の生成因であることを明らかにした。また、河岸防災手法として「ブランチブロック」の護岸模型実験を行った。その結果、本護岸は、護岸表面に発生する渦構造によって顕著な流速低減効果を有することが認められた。

研究成果の概要（英文）：

Characteristics of inner structure of oblique upward flow and large-scale horizontal vortex that are characteristic coherent structure of compound open channel flow were investigated experimentally. It was clarified that concentration of streamwise vortex in the vicinity of the edge of flood plain results in the oblique upward flow. And it was found that a group of streamwise vortex over the flood plain is the substance of large-scale horizontal vortex and plays important role of generation of shear instability. The results of experimental approaches of the Branch Brock bank protection (BBbp) show that the BBbp has a function of velocity reduction with coherent structure formed on the surface of the BBbp.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：水工水理学

科研費の分科・細目：基盤研究（C）

キーワード：複断面開水路流れ、斜昇流、大規模水平渦、縦渦構造、二次流れ、ブランチブロック

1. 研究開始当初の背景

複断面開水路流れは高水敷と低水路の速度の異なる2つの流れから構成される。これまでに、斜昇流と大規模水平渦というこの

流れ固有の組織構造が存在とそれらに関する様々な知見が得られてきた。しかしながら、両構造の詳細な内部構造やスケール等については十分な解明に至っていない。また、両

者の相互関係やその組織構造が平均流速分布や乱れの分布に及ぼす影響、さらには低水河岸に発生する洗掘や土砂の吸出し現象などの相互関係については未解明であり、重要な課題として残されている。

筆者はこれまでに乱流現象における組織構造に関する系統的な研究を進めてきた。中でも、開水路乱流の普遍的構造とされる並列らせん流の内部には大規模な縦渦構造が存在し、それらの時空間的な集中が並列らせん流の特徴を形成させていることを明らかにした。また、縦渦構造の集中する条件として2つのせん断 ($\partial U/\partial y, \partial U/\partial z$) の存在が不可欠であることを見出した。複断面開水路流れの高水敷と低水路の境界付近は2つのせん断が存在する領域であり、この流れ固有の斜昇流と水平渦が存在する領域でもある。筆者は複断面開水路流れ固有の構造はそこに形成される縦渦構造が重要な役割を果たしていると推測し、本研究を構想するに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、複断面開水路流れに形成された組織構造の特徴を明らかにし、その知見を踏まえて複断面河道の低水河岸における災害を防ぐ手法を見出すことである。

本研究の目的のために遂行する課題は以下のとおりである。

第1の課題は、複断面開水路流れの組織構造の時空間特性を明らかにすることである。第2の課題は、複断面開水路流れの組織構造の流体力学的特性を明らかにすることである。第3の課題は、第1、第2の課題の遂行により得られた知見をもとに、低水河岸付近における流れの制御手法を見出すことである。第4の課題は、第3の課題より見出された手法を実河川に適用し、低水河岸の防災効果を実証することである。科学研究費の交付を受ける期間内には、本研究の全体構想の中の第1～3の課題を遂行する。

第1の課題である「組織構造の時空間特性」とは、複断面流れに形成された組織構造の①存在形（形状特性、形成領域）、②3次元スケール（流れ方向、横断方向、鉛直方向のスケール）③挙動特性、④相互関係を明らかにすることである。第2の課題である「組織構造の流体力学特性」とは、組織構造と瞬時流速、変動速度との相互関係および渦度やレイノルズ応力などの重要な乱流統計量との対応関係を明らかにすることである。さらに、水理条件および幾何条件の変化に伴う流れ構造の特徴について考察をする。以上の2つの課題を遂行することによって得られた知見と流速計測によって得られた平均流特性、乱流特性との相互関係を明確にし、複断面流れの全体像を捉えるモデルを構築する。それらを踏まえ

て、第3の課題である、低水河岸に発生する浸食、崩壊を軽減する手法を検討する。

3. 研究の方法

本実験には、図1のような長さ10m幅60cm、高さ15cmの直線開水路を使用した。本水路の右岸側に幅15cm、高さ4cm、長さ1mの塩化ビニル板を8mに亘って設置し、片側複断面流れを再現した。実験では、PTV (Particle Tracking Velocimety) による流速計測と流れ場形成された組織構造の可視化を行った。

PTVのトレーサーには平均粒径 $100\mu\text{m}$ 、比重1.04のリルサン粒子を、照明にはスライドプロジェクター(1kW)による厚さ2mmのスリット光源を採用した。流れの可視化では、蛍光染料水溶液とスリット光源を用いた蛍光染料注入法を用いた。また、組織構造の断面形象と瞬時の流速情報の相互関係については、筆者が開発したPTVと蛍光染料を併用するDPTV (Dye streak pattern Particle Tracking Velocimety) を用いた。図2に実験装置および方法の概略を示す。

実験条件は、組織構造の鮮明な可視化画像を取得するために比較的低レイノルズ数の条件を採用した。

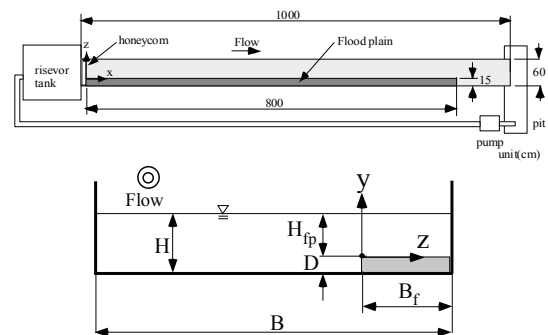


図1 実験水路概略

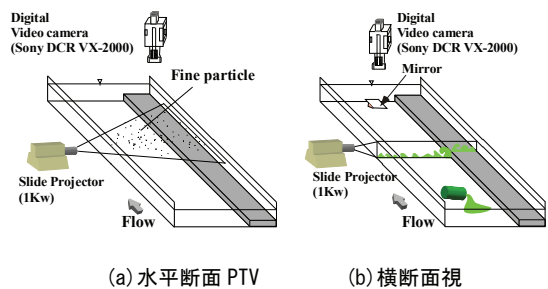


図2 実験方法概要

4. 研究成果

(1) 組織構造の時空間特性

流れの可視化観察から、高水敷上には縦渦構造の形成が認められ、とくにその先端部には、それが集中して形成されることが特徴として見出された。図3には、各条件における流れ場に形成された組織構造の横断面視の

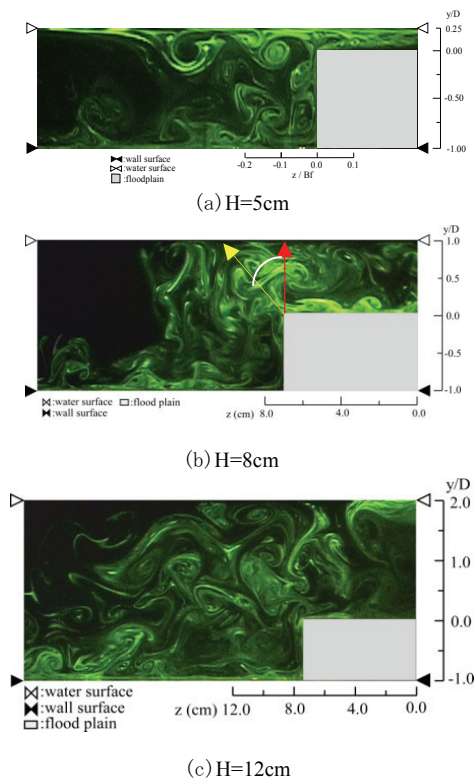


図3 組織構造の横断面画像

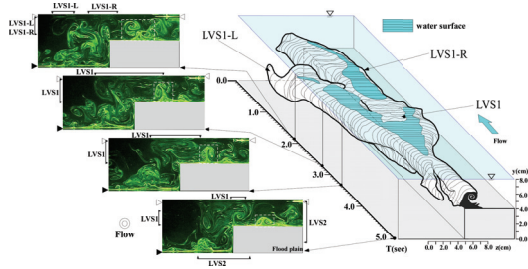


図4 高水敷先端部に形成された縦渦構造の時空間構造図

一例を示している。この縦渦構造は、(a)H=5cm のような水深が小さい場合には、水平方向へ伸長し、(b)H=8cm , (c)H=12cm のような水深が大きい場合には、左右方向への顕著な傾斜運動が認められた。

図4には、H=8cmにおける高水敷先端部に形成された縦渦構造の時空間構造図を示した。この縦渦構造は2つの縦渦構造から構成されており、その先端部は2つに分れる特徴が見出された。図5には、高水敷先端部の縦渦構造の横断面画像を高水敷面からの各高さにおいて数mmの厚さで切断し、その画像を60秒間(1800枚)に亘って繋ぎ合せた画像である。この画像の緑色の領域が縦渦構造の形成領域に相当する。これより、高水敷先端部における縦渦構造の形成が時空間的に安定していることが明瞭である。

高水敷水深が大きい流れにおいては、高水敷先端部の縦渦構造には左右方向への顕著な傾斜運動が観察された。図6には H=8cm

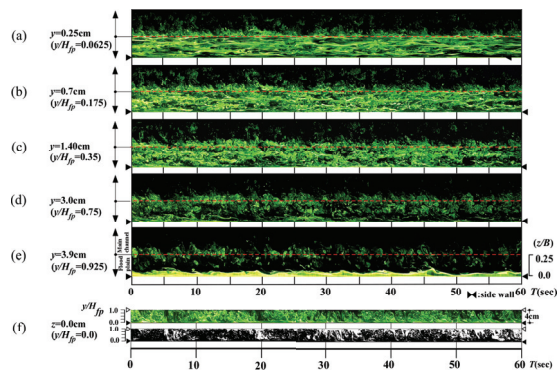
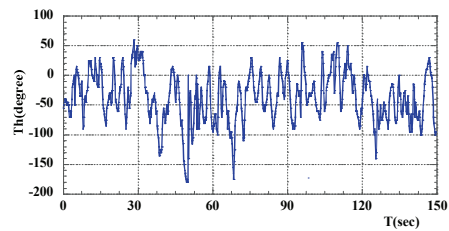
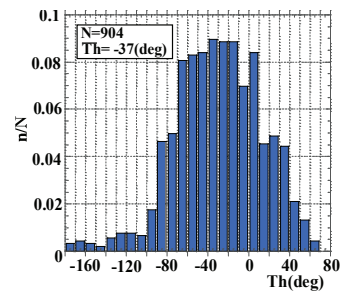


図5 高水敷上に時変化における縦渦構造の形成領域の経時変化



(a) 傾斜角度の経時変化



(b) 傾斜角度頻度分布

図6 高水敷先端部に形成された縦渦構造の傾斜角度特性

における縦渦構造の傾斜角度の経時変化を示している。傾斜角度は図3(b)のように鉛直軸と縦渦構造の中心軸の成す角度とし、右岸向きを正值として目測を行った。計測結果から、縦渦構造は左岸方向へ37°程度傾斜し、±40°程度の振幅角度で傾斜運動していることが認められる。

図7には、高水敷先端部の縦渦構造の流れ方向および横方向スケール(Lx, Lz)を示している。Lxは、高水敷水深 hfp の3.5~4倍程度に最頻値があり、Lzは2.5~3Hfpであることが分かる。筆者は、直線開水路乱流に形成された縦渦構造の同スケールを計測しているが、Lxについては同程度であるが、Lzは水深の1.5程度が最頻値となり、高水敷先端部の縦渦構造の方が大きい。この相違は流れ場における横断方向の速度せん断(∂U/∂z)が組織構造のスケールに影響していることを示している。

図8には、H=5cm(高水敷水深1cm)における水平断面視の経時変化を示している。

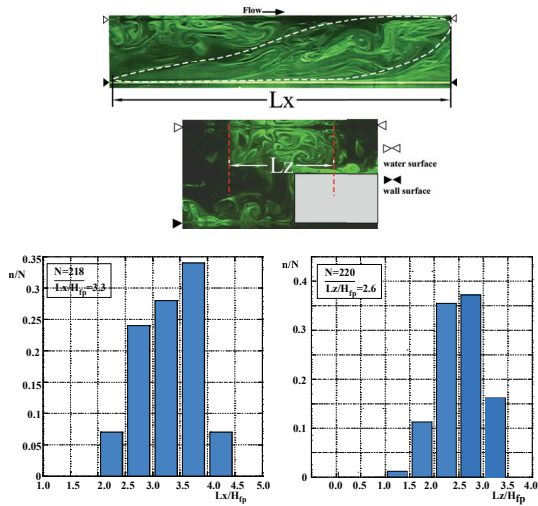


図 7 高水敷先端部に形成された縦渦構造のスケール特性

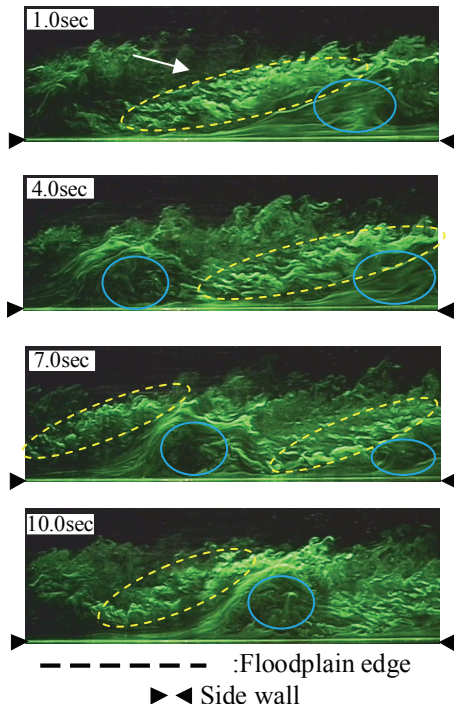


図 8 水平断面視の経時変化

スリット光膜の位置は高水敷面から 0.8cm である。流況観察では、矢印で示したように低水路から高水敷上に高速流が侵入し、それに伴って高水敷上には前縁剥離によって縦渦構造群が発生する。この縦渦構造は黄色破線で示すように縦縞模様として現れる。この縦渦構造群は下流に形成された低速域（青色枠）に乗り上げ、その先端部は低水路へ発達する。縦渦構造群は相対的に低速であり、高速な低水路流れとの境界部にはせん断不安定が発生する。これにより、低水路から高水敷方向へ高速流が輸送される。

(2) 組織構造と瞬時流速情報との相互関係

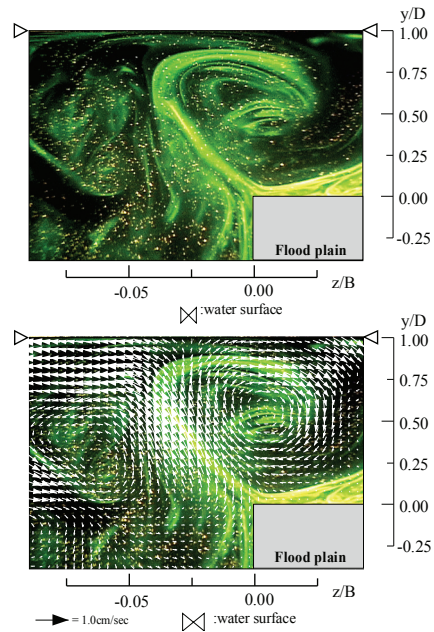


図 9 縦渦構造の横断面 DPTV

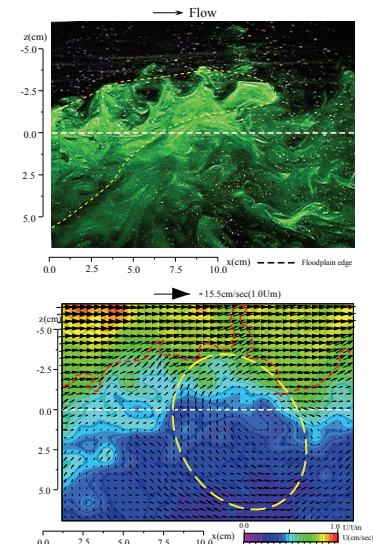
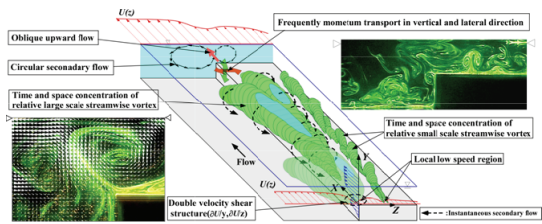


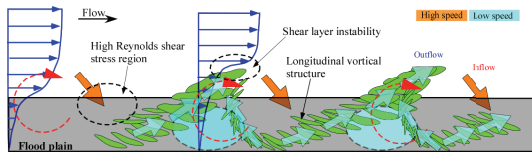
図 10 大規模水平渦の水平断面 DPTV

図 9 には、高水敷先端部付近での横断面視 DPTV の解析結果の一例を示している。上図の横断面画像には、高水敷先端部に形成された対を成す縦渦構造が可視化されている。図中の微細な黄色の点が PTV のトレーサー粒子に相当する。下図にはこのトレーサーから求められた瞬時の二次流ベクトルを重ねて示している。これより、縦渦構造の断面形象に対応する時計、反時計の回転運動が縦渦構造によって引き起こされていることが明瞭である。

大規模水平渦と瞬時主流速および変動速度ベクトルの相互関係が水平断面 DPTV の解析結果から得られ、その一例が図 10 に示されている。大規模水平渦の形成領域は相対的な低速領域であり、黄色破線で示されるような大規模な旋回流が生じていることも明らかである。

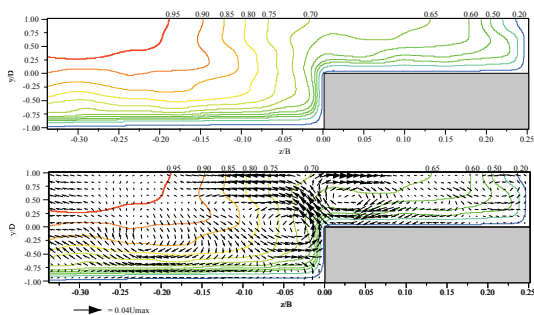


(a) 斜昇流

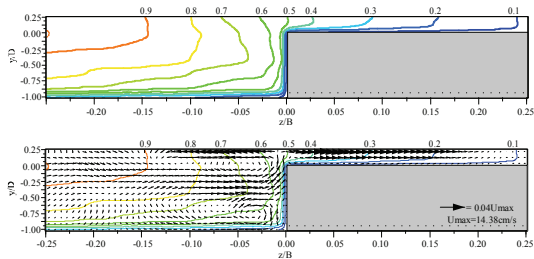


(b) 大規模水平渦

図 11 複断面流れ固有の流れ構造の内部構造の概念図



(a) H=8cm



(b) H=5cm

図 12 平均主流速分布と二次流ベクトル分布

かである。これにより横断方向の大きなレイノルズ応力が生成されることも明らかとなった。

(3) 流れの内部構造の概念図

図 11 には、斜昇流と大規模水平渦の内部構造に関する概念図を示している。斜昇流は高水敷先端部における縦渦構造の時空間的集中によって生成される。大規模水平渦は、高水敷上に形成された縦渦構造群が低速領域に乗り上げ、低水敷側への発達に伴いせん断不安定が引き起こされ、高水敷方向への高速流の輸送がなされる。これらの複断面固有の組織構造の運動によって図 12 (a) に示すような高水敷先端部の斜昇流と対を成す時計、反時計の大規模な旋回流や (b) に見られる水平方向の強い横流れが時間平均量として出現すると推察される。

(4) ブランチブロック護岸模型周辺の内部流況の特徴

ブランチブロック (株吉工園) とは、図 13 のような幹材の前後に前後 3 本の枝材を有するブロックである。これを蜂の巣状に組み、その間に石材を充填することによって図 14 のような法面が造成できる。また、その表面は鉛直および斜めの枝材から構成される栈型粗面となる。この粗面は流れ方向によって粗度が水表面方向あるいは河床方向に傾斜する配列となり、本研究では、水表面方向への配列を昇配列、その逆を降配列と定義した。

実験では、1/40 スケールの護岸模型を作製し、図 15 のような水路において流速計測、流れの内部流況の可視化を行った。

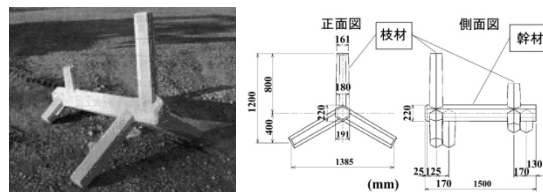


図 13 ブランチブロック外観とスケール



図 14 ブランチブロック法面と表面形状

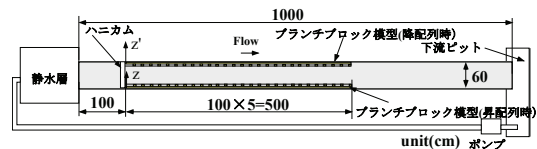


図 15 実験水路概略

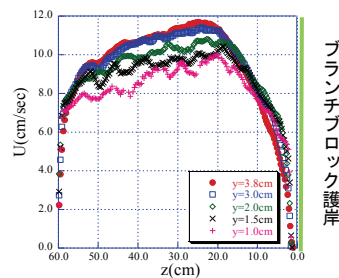


図 16 昇配列における主流速横断方向分布

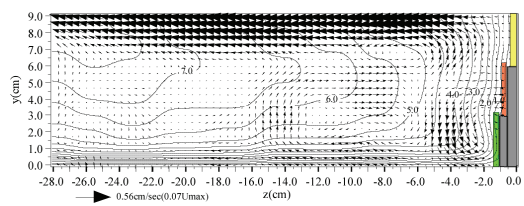


図 17 昇配列における主流速分布と二次流分布

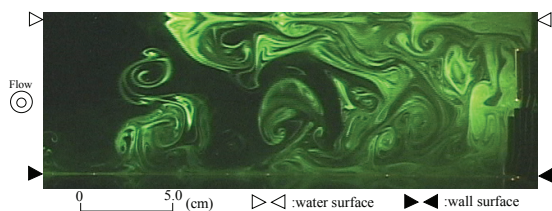


図 18 ブランチブロック護岸模型周辺に形成された組織構造の横断面視

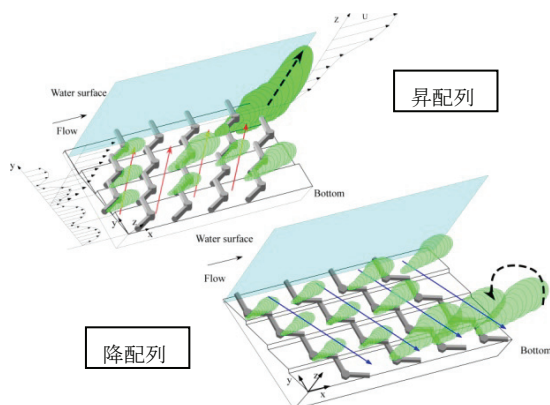


図 19 ブランチブロック護岸周辺の流れ構造の概念図

図 16 は昇配列による主流速横断方向分布を示している。ブロック護岸周辺では顕著な主流速の低減が認められる。図 17 は、主流速および二次流ベクトル分布の重合図である。これより、護岸から水路中に向かう顕著な横流れの生成が認められる。この流れ場には図 18 に示すような大規模な渦構造が形成されており、流況観察ではこの渦構造が対岸方向に発達しており、これにより護岸付近の低速流体を輸送していることが推察された。

ブランチブロック護岸模型の流速計測、流況可視化実験の結果を踏まえて、流れの概念図を図 19 に示した。上図は昇配列の流れであり、そこでは鉛直および傾斜枝材によって縦渦構造が生成され、それが枝材間に沿う水表面方向への流れによって水表面方向に輸送され、大規模な渦構造が生成され、これが護岸付近の低速化に寄与する。下図は、降配列の流れ場であり、昇配列と逆の効果となることを示している。護岸として実河川に適用する際には、昇配列とすることが望ましい。

ブランチブロック護岸は、NETIS（新技術情報提供システム CG-050005-V）に登録されている。その登録申請時の資料として本研究の成果が採用された。現在、ブランチブロック護岸は、実河川における試験施工が行われている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

- ① Takuji Moriyama, Katsutoshi Watanabe, Characteristics of Coherent Structure in Turbulent Compound Open Channel Flows, ASV09,2007,CD-ROM.
- ② 渡辺勝利, 徳光洋輔, 佐賀孝徳, 肩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, 査読有, 第53巻, 2009, pp.931-936.
- ③ Katsutoshi Watanabe, Yousuke Tokumitsu, Study on inner structure of turbulent open channel flows, Proceedings of the 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY PIV09 USB, 査読無, Wall-bounded Shear Flows 3.
- ④ 渡辺勝利, 徳光洋輔, 吉永晴香, 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, 土木学会水工学論文集, 査読有, 第54巻, 2010, pp.955-960.
- ⑤ 渡辺勝利, 吉村隆顕, 原 隆, 福田直三, 河内義文, ブランチブロック護岸模型の枝材配列形状による流れ構造の特徴, 土木学会水工学論文集, 査読有, 第54巻, 2020, pp.1045 -1050.

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 徳光洋輔, 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 高水敷水深の変化に伴う片複断面開水路流れの特徴, 平成20年度土木学会中国部研究発表会, 平成20年5月31日, 広島大学工学部
- ② 渡辺勝利, 徳光洋輔, 永田能啓, 佐賀孝徳, 片複断面開水路流れに形成された組織構造の特徴, 第36回可視化情報シンポジウム, 平成20年7月22日, 工学院大学新宿校舎.
- ③ 渡辺勝利, 徳光洋輔, 複断面開水路の高水敷上に形成された組織構造の特徴, 日本流体力学会 年会2008, 平成20年9月7日, 神戸大学工学部.
- ④ 渡辺勝利, 徳光洋輔, 佐賀孝徳, 高水敷水深が小さい複断面開水路流れの内部構造, 平成20年度土木学会全国大会第36回年次講演会, 平成20年9月10日, 東北大学 川内北キャンパス.
- ⑤ 渡辺勝利, 徳光洋輔, 高水敷水深の大きい複断面開水路流れの組織構造に関する研究, 可視化情報学会全国講演会, 2009年10月24日, 山形大学工学部.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 勝利 (Katsutoshi Watanabe)

徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・教授

研究者番号：00191750