

植生群落間の相互作用が大規模水平渦の発生に与える影響

Effects of interaction between submerged longitudinal vegetation zones on generation of large scale organized horizontal vortices

田中貴幸*・大本照憲**
Takayuki Tanaka, Terunori Ohmoto

*工修 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

**工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (同上)

Aquatic vegetation frequently determines the mean and turbulent flow structure in natural river and impacts the transport of sediment and nutrients. These vegetation communities are often observed to grow in stripe pattern or patches within main stream channel. In this paper, the influence that interaction of longitudinal vegetation zones gave the momentum transport and coherent vortex generation in an open-channel was examined experimentally. Laboratory experiments were conducted using a two-component electromagnetic current-meter and a particle-image-velocimetry (PIV). Results showed that horizontal large scale vortex generation significantly depended on the lateral distance between longitudinal vegetation zones and these vortices controls the momentum transport through the interaction.

Key Words: vegetation, coherent vortex structure, flow structure, momentum transport, PIV

キーワード: 植生, 組織渦, 流動機構, 運動量輸送, PIV

1. はじめに

河川水際に繁茂する植生は河川の環境機能を向上させる一方、流水抵抗増大といった水防災上の問題点も有している。このため、植生群落を有する流れの構造を十分に把握した上で、環境保全や洪水対策といった河川管理を行う必要がある。

植生を伴う流れの流動機構に関する研究は、開水路における基礎実験や数値解析により数多く行われ、様々な知見が得られている。清水ら¹⁾は乱流クロジャーマデルとして $k-\varepsilon$ モデルを用いて、空間平均された開水路基礎式から、植生粗度を伴う流れの2次元数値計算を行った。その結果、水理実験で得られた流速場を良好に再現し、さらに異なる植生密度を有する流れ場の乱流構造を予測した。山上・瀬津²⁾らは植生密度を粗・密の2通りに変化させた条件下における開水路植生流れを対象に不等間隔格子を用いた3次元 LES 解析を行い、平均流や組織乱流渦の挙動、時空間相関特性について水理実験の結果と比較・検討を交えた考察を行った。

また、池田ら³⁾は直線開水路の両岸に模擬植生帯を配置し、水深を系統的に変えることにより、2列渦列の安定性と運動量交換を実験的に検討した。さらに、SDS&2DH 乱流モデルを用いて数値計算を行い、渦の波長、渦列の安定性、運動量交換などについて検討を行った。その結果、植生帯境界では変曲点不安定により水平組織渦が発生し、非植生帯幅がある値になると2列の渦列の相互干渉が顕

著となり、千鳥状に配置された渦列が形成されるのを確認した。このように、植生帯が2列に配置された条件下では、両植生帯境界付近で発生する大規模渦が相互に作用し合い、その影響により流れの抵抗特性や流動機構が大きく変化することが予想される。そのため、著者ら^{4,5)}は非越流および越流状態において、植生帯を横断方向に対称性を有するように2列に配置し、その植生帯間の距離を変化させることで、植生帯間の距離の違いによる流れの抵抗特性および流動機構の検討を行った。その結果、非越流および越流状態のどちらに関しても、植生帯間の距離と水深の比が約1.5~1.8で粗度係数 n が最大となること、および水路中央で対をなす最も安定したローラー状の循環流となる二次流が形成される状態において、流れの抵抗が最も大きくなることを明らかにした。さらに、植生帯境界における運動量輸送量が活発となる条件下において、流れの抵抗が大きくなることを確認した。

このように、植生帯の間隔の違いによる流れの抵抗特性や二次流構造、および運動量輸送特性は明らかにされたものの、植生帯を横断する流れの相互作用効果が水面・流速変動特性や大規模水平渦の挙動に与える影響については未だ議論がなされていない。

そこで、本研究では流れが非越流状態に比べより3次的となる越流状態において、これまでに明らかにされた植生帯の間隔の違いによる流れの抵抗特性や運動量輸送特性の知見を基に、植生帯の間隔の違いによる水面・流速変動特性および大規模水平渦の挙動について検討を行った。

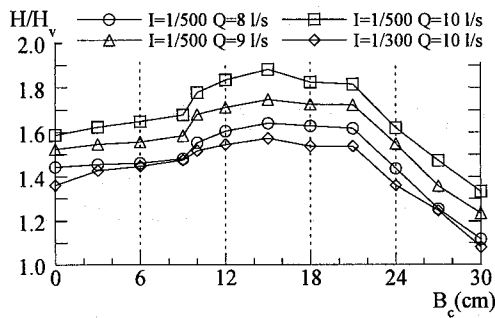


図-1 越流状態における植生帯間の距離の変化に伴う水深変化

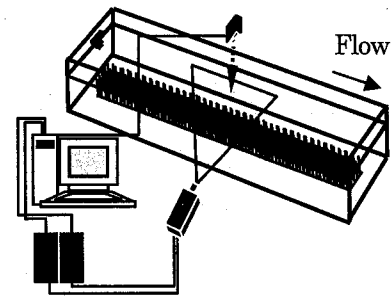


図-3 PIV システム概要

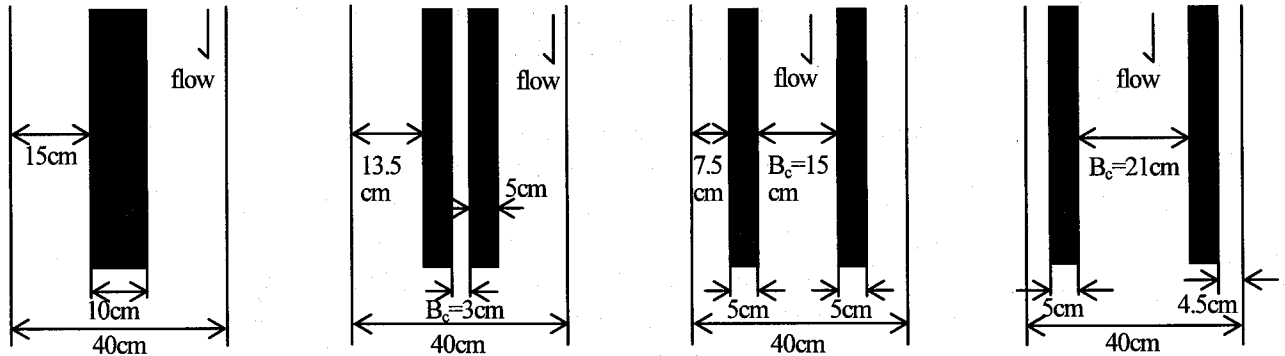


図-2 実験水路概要

表-1 実験条件

Case	流量 Q(l/s)	水路勾配 I	水深 H(cm)	断面平均流速 Um(cm/s)	フルード数 Fr	植生高さ Hv(cm)	植生幅 Bv(cm)	植生直径 d(mm)
B _c =0cm	8	1/500	7.94	25.19	0.29	5.5	10	0.242
B _c =3cm			8.01	24.98	0.27			
B _c =15cm			9.02	22.18	0.24			
B _c =21cm			8.89	22.50	0.24			

これにより、本研究では植生が2列に配置された場合の大規模水平渦の挙動が流れの抵抗特性に与える影響について明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

実験は全長10m、幅B=40cm、高さ20cmの亚克力樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った。植生帯の模型にはプラスチック板に水流の流れに追従して撓む6.10 ナイロンブリュウスル（直径0.242mm、曲げ剛性EI=1.45×10⁴g・cm²）を5.5cmの高さに揃え、0.5cm間隔で貼り付けたものを使用した。模擬植生帯は水路上流端より100cmの位置から840cmに渡って配置した。図-1に、これまでの著者らの研究⁹⁾によって得られた越流状態における植生帯間の距離の変化に伴う水深変化を示す。ここで、水路中央側における植生帯両境界の距離をB_cと定義する。図-1の結果を受け、水路勾配I=1/500、流量Q=8 l/sの条件下、植生帯中央1列配置のB_c=0cm、水深が最大値をとるB_c=15cm、2列配置で間隔の狭いB_c=3cm、間隔が広く水深が急激に減少する前のB_c=21cmの4つのケースについて流動機構の検討を行う。それぞれの配置を図-2に示す。いずれの条件下においても植生幅はB_v=10cmとする。

実験条件は表-1のように設定した。座標系は植生帯先端の水路中央を原点とし、流下方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直方向にz軸をとり右手系とする。また、それぞれの流速成分をu, v, w、平均値をU, V, W、変動成分をu', v', w'と表す。本実験では水路に対して植生帯の流下方向長さを長めにとり、さらに水路下流端のせきを用い下流端の影響を極力小さくすることで擬似等流場を形成して水深を計測した。水深の計測にはポイントゲージを用いた。

流動機構の検討においては水面変動の計測、流速の点計測、流速の多点同時計測を行った。水面変動の計測は超音波水位計を、流速の点計測は電磁流速計を用いて行い、また、流速の多点同時計測は面的な範囲で測定が可能であるPIV (Particle Image Velocimetry)法により行った。超音波水位計の出力信号は100Hzで、AD変換した後1測点4096個のデータに関して統計処理が施された。電磁流速計は主流速u及び横断方向流速vを計測するI型電磁流速計を用い、それぞれの出力信号は100Hzで、超音波水位計と同様の統計処理を行った。いずれも流下方向の計測位置をx=300cmに設定した。

PIV (図-3参照)は光源に空冷式ダブルパルスYAGレーザー（出力25mj）を用い、シート光の厚さを1mm、パルス間隔を500μsに設定し、水路右岸から左岸に向

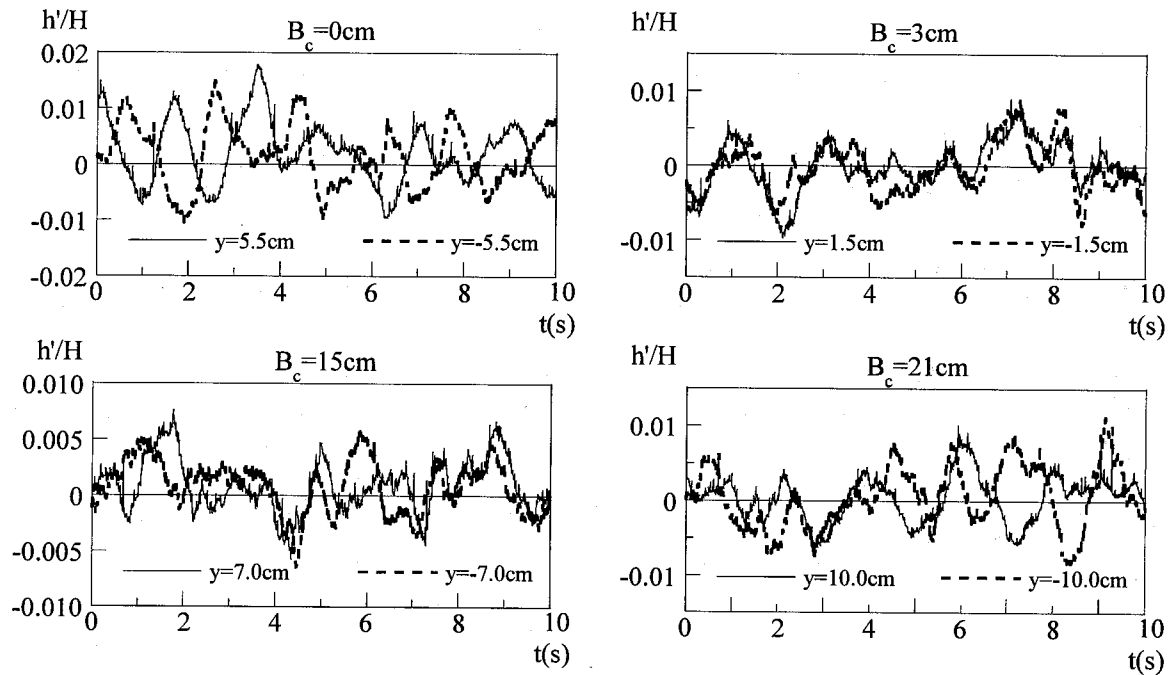


図-4 水面変動の時系列

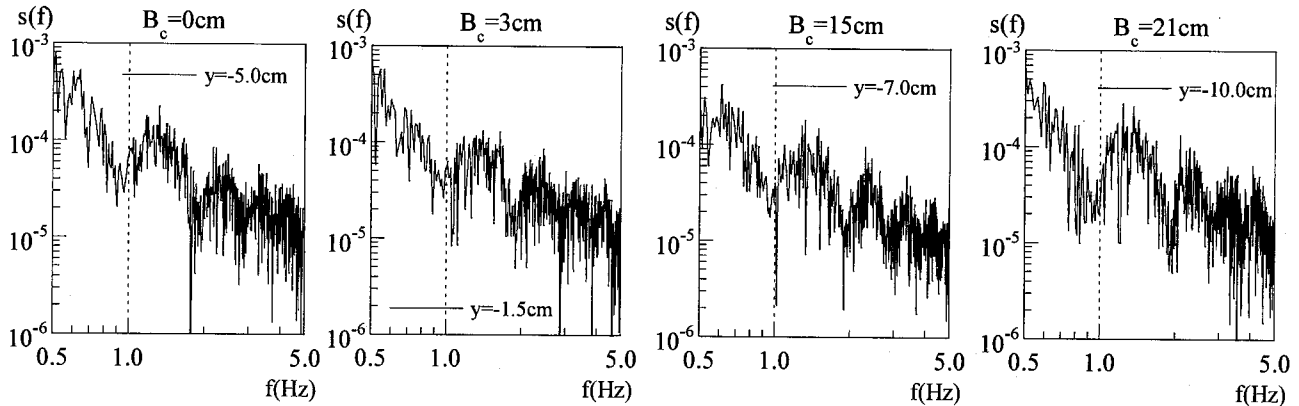


図-5 水面変動スペクトル

かってレーザーを照射した。レーザー光と CCD カメラを同期させて読み込まれた可視化画像は 15fps (frame per second), 960×1018 (pixel) のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録され、PIV 法によって処理された。流速のサンプリング周波数は 15Hz, トレーサーとして粒径 30 μ m, 比重 1.02 のナイロン粒子を使用し、アルコール液で十分に攪拌して水中に一様に混入した。PIV の計測対象領域は水平面において $x=300cm \sim x=330cm$, $y=20m \sim y=20cm$ の 30cm×40cm とし、 $z=6.5cm$ にて計測を行った。1 計測面での画像データは 1000 枚、計測時間は 66.7s であった。

ここで、本論では水路中央からみて内側の植生帯境界を植生帯内側境界、外側の植生帯境界を植生帯外側境界と呼び、さらに著者らの研究結果⁹⁾により、植生帯内およびその上層を減速域と呼ぶことにする。

3. 実験結果

3.1 水面変動特性

図-4は各ケースにおける水面変動の時系列変化を示す。水面変動の計測位置は図に示すように、 $B_c=0cm$ では植生帯両境界付近、その他のケースでは両植生帯内側境界付近に設定した。水面変動の変動成分 h' は水深 H で無次元化している。 $B_c=0cm$ では両植生帯境界において水面変動が逆位相を示し、その他のケースに比べ高い周期性を有している。 $B_c=3cm$ では植生帯の間隔が狭いことから、両植生帯内側境界においてほぼ同様の挙動をとる様子が伺える。 $B_c=15cm$ においても周期性はみられるものの、両植生帯を横断する流れが相互に作用し合うことから $B_c=0,3cm$ と比較すると水面変動の挙動が複雑となっている。 $B_c=21cm$ では両計測位置ともに規則性が高く、相互干渉が弱まっている様子がみてとれる。

図-5 に各ケースにおける水面変動のスペクトル解析結果を示す。今回実験に使用した超音波水位計の時間分解能および計測時間を考慮し、解析結果の信頼性が高いとみなされる周波数帯域に注目して検討を行う。各ケースとも植生帯境界付近におけるデータを用いていることから、スペクトルは周波数に対して広い分布を示しており、卓越周波

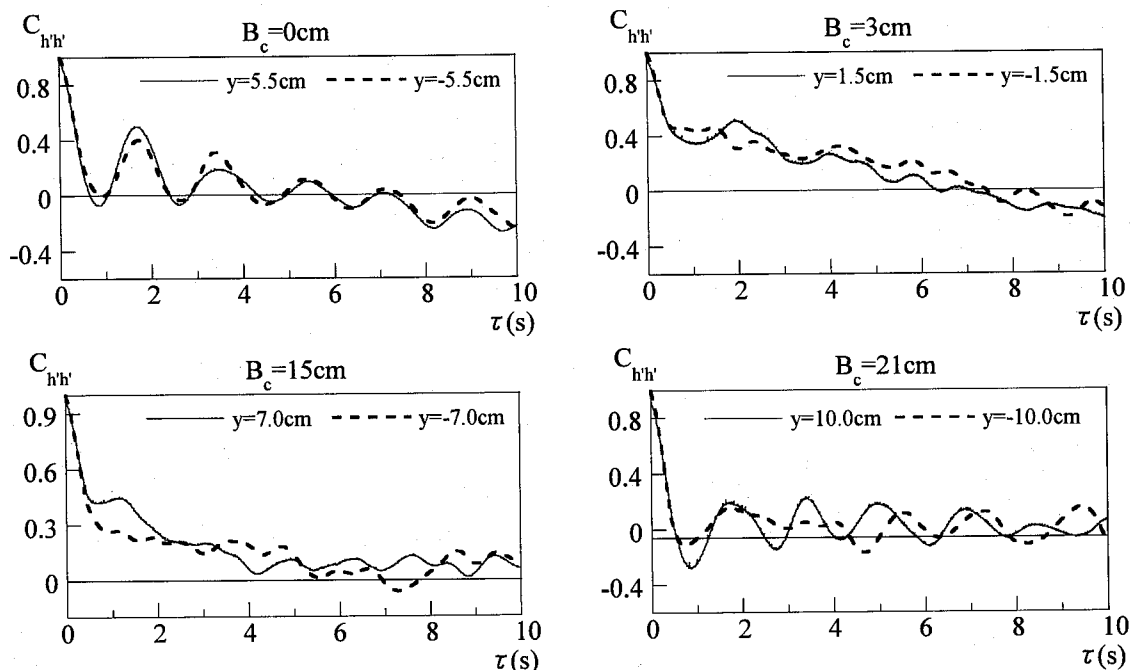


図-6 水面変動の自己相関係数

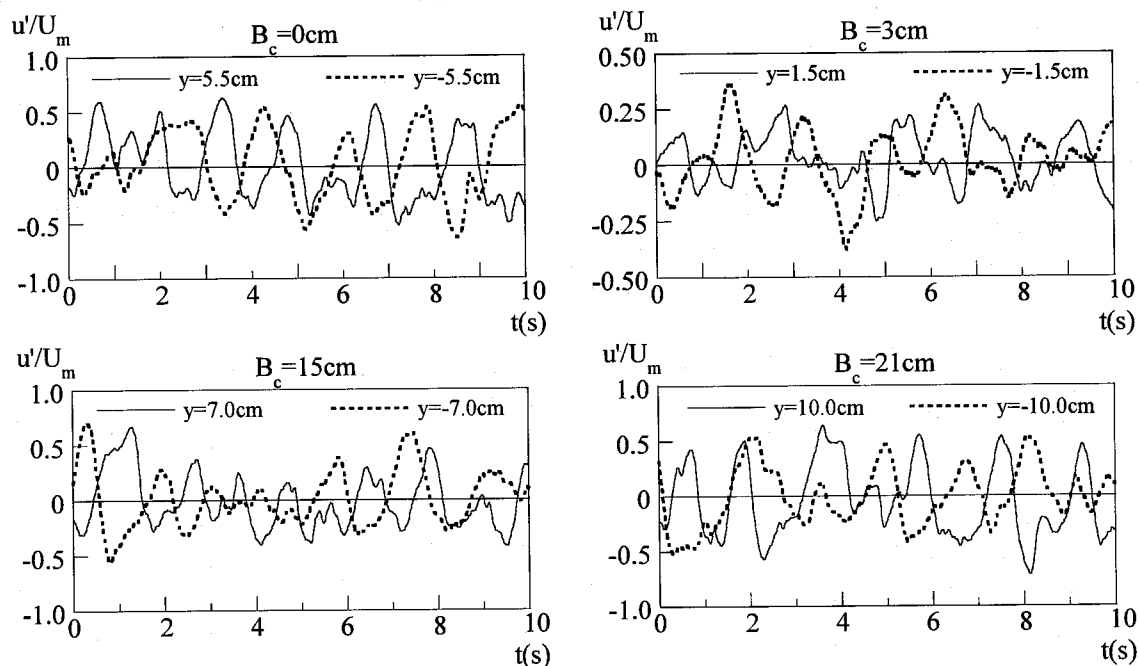


図-7 主流速変動の時系列

数が顕著には現れていない⁹⁾。その中で、各ケースともに0.6Hz付近で高いピーク値をとる様子が認められる。また、1.5Hz、2.2 Hz付近においてもピークがみられ、植生帯を横断する流れが相互に作用し合う等の要因から、様々な周波数帯を含んだ流れが形成されている様子が伺える。

図-6に各ケースにおける水面変動の自己相関係数を示す。自己相関係数は式(1)で求める⁷⁾。

$$C_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt \quad (1)$$

$B_c=0\text{cm}$ および $B_c=21\text{cm}$ では周期性、相関性とも高い様子がみてとれ、いずれもセカンドピークが約1.8sとスペクトル解析における卓越周波数とほぼ同程度の値を示すこ

とが認められる。これにより、 $B_c=21\text{cm}$ まで植生帯の間隔を広げると、植生帯を横断する流れの相互干渉が弱まることが読みとれる。 $B_c=15\text{cm}$ ではセカンドピークが明瞭に現れず、周期の把握が困難となっている。しかし、スペクトル解析と自己相関で得られた周波数特性はほぼ同様の挙動を示すことが確認された。また、水面変動の時系列データやその自己相関によりいずれのケースも長周期の変動の存在がみられるため、今後計測時間を長くすることで、その特性についても明らかにする必要がある。

3.2 流速変動特性

図-7は各ケースにおける主流速変動の時系列変化を示

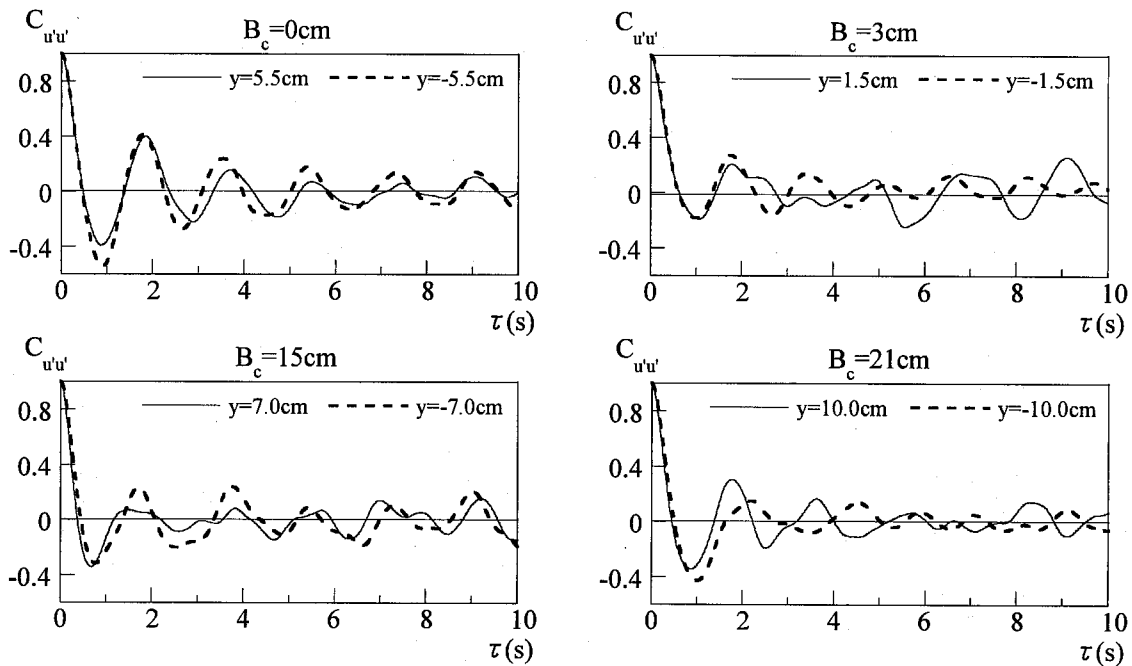


図-8 主流速変動の自己相関係数

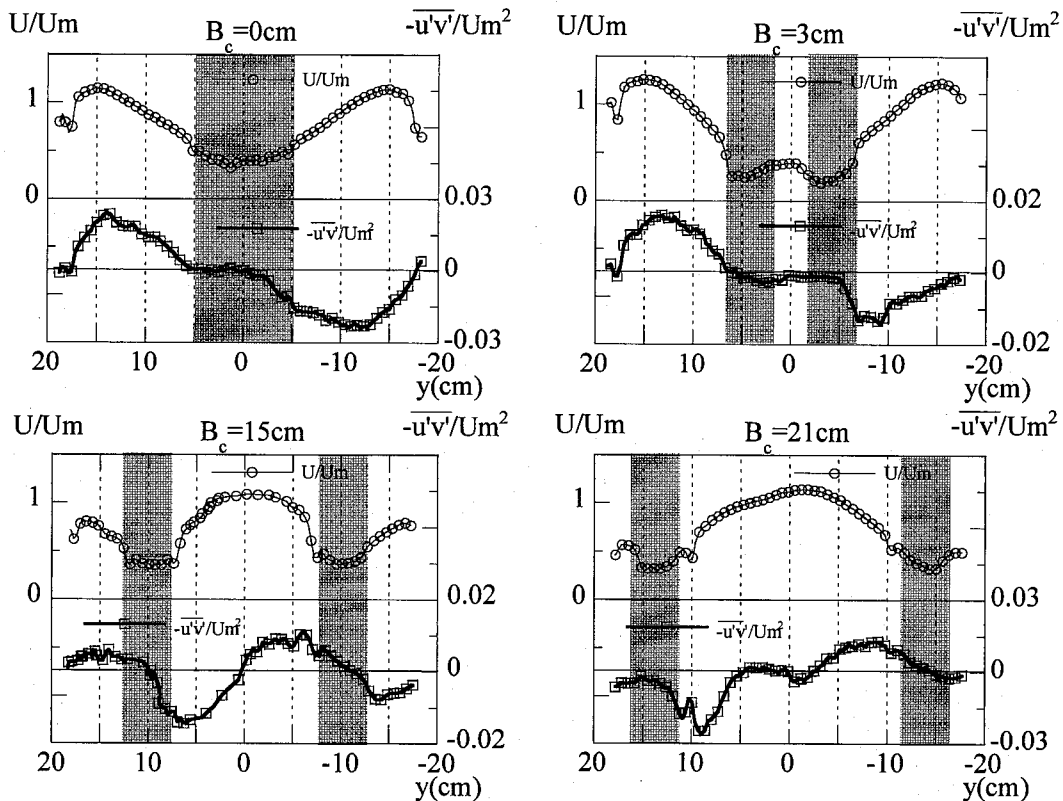


図-9 主流速とレイノルズ応力の横断方向分布

：減速域

す。主流速変動の計測位置は水面変動と同様であり、鉛直位置 $z=3.0\text{cm}$ にて計測を行った。いずれのケースも周期性が高く、また両植生帯内側境界において主流速変動は逆位相を示している。これは、両植生帯を横断する流れに加え、振幅が水路幅スケール相当の大きな流れが両植生帯間を横断しながら蛇行して流下するためと考えられる。この流れについては目視によっても確認された。

図-8は各ケースにおける主流速変動の自己相関係数を示す。各ケースともセカンドピークが明瞭に現れ、いずれ

も約 1.8s と水面変動のそれと一致し、水面変動と流速変動との間に相関があることが伺える。 $B_c=0\text{cm}$ および $B_c=21\text{cm}$ では相関係数が高い値を示し、 $B_c=3\text{cm}$ 、 $B_c=15\text{cm}$ に関しても水面変動に比べ周期が安定していることが認められる。

3.3 平均流特性

図-9はPIV法によって計測し、時空間平均操作した主流速 U とレイノルズ応力 $-u'v'$ の横断方向分布である。主流

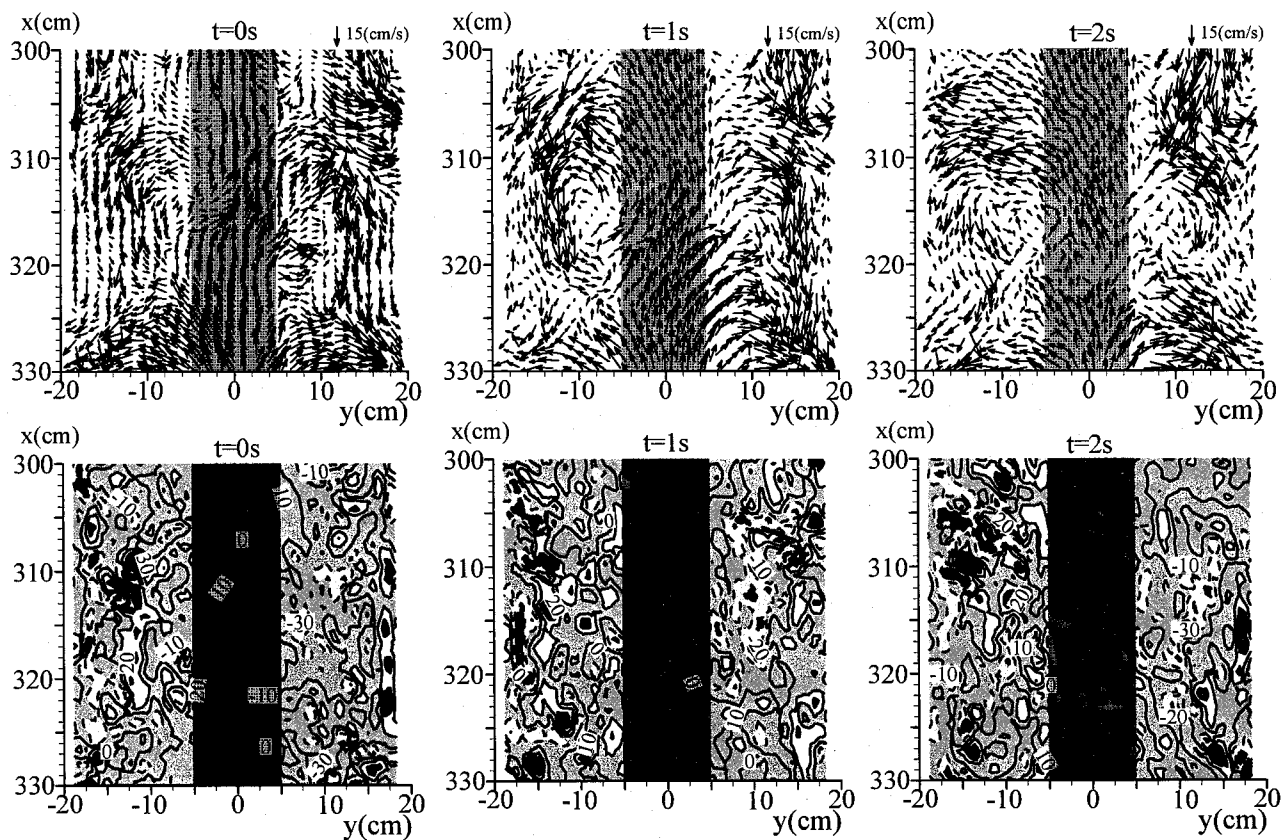


図-10(a) $B_c=0\text{cm}$ における瞬間流速ベクトルと渦度

：減速域

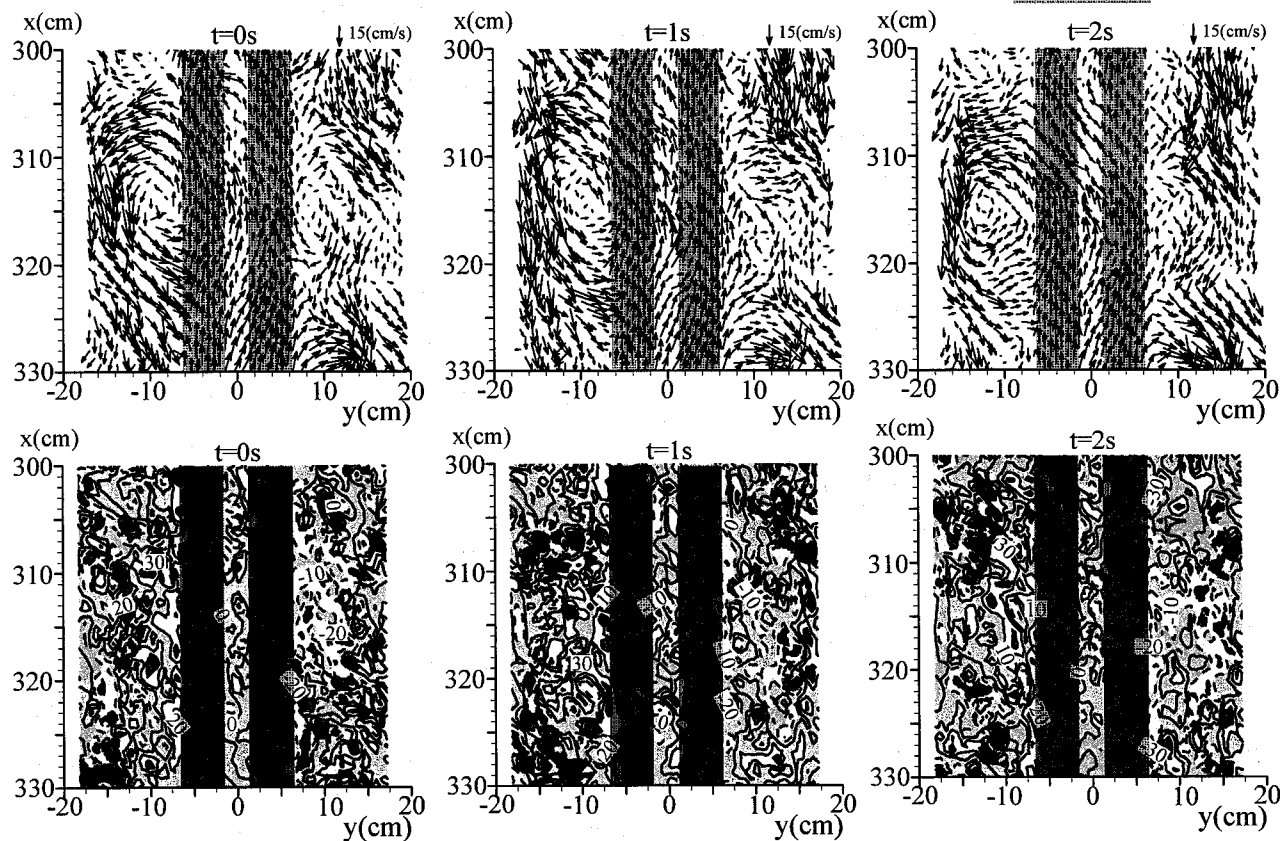


図-10(b) $B_c=3\text{cm}$ における瞬間流速ベクトルと渦度

：減速域

速に注目すると、いずれのケースも鉛直方向に植生帯を有する領域においては主流速が抑えられ、非植生域に向かうにつれ急激に主流速が増大することが確認できる。また、

レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ は植生帯境界付近において極値をとり、水路中央を中心とした点対称の分布をとる。流れの抵抗が最も大きくなった $B_c=15\text{cm}$ では両植生帯内外の境界

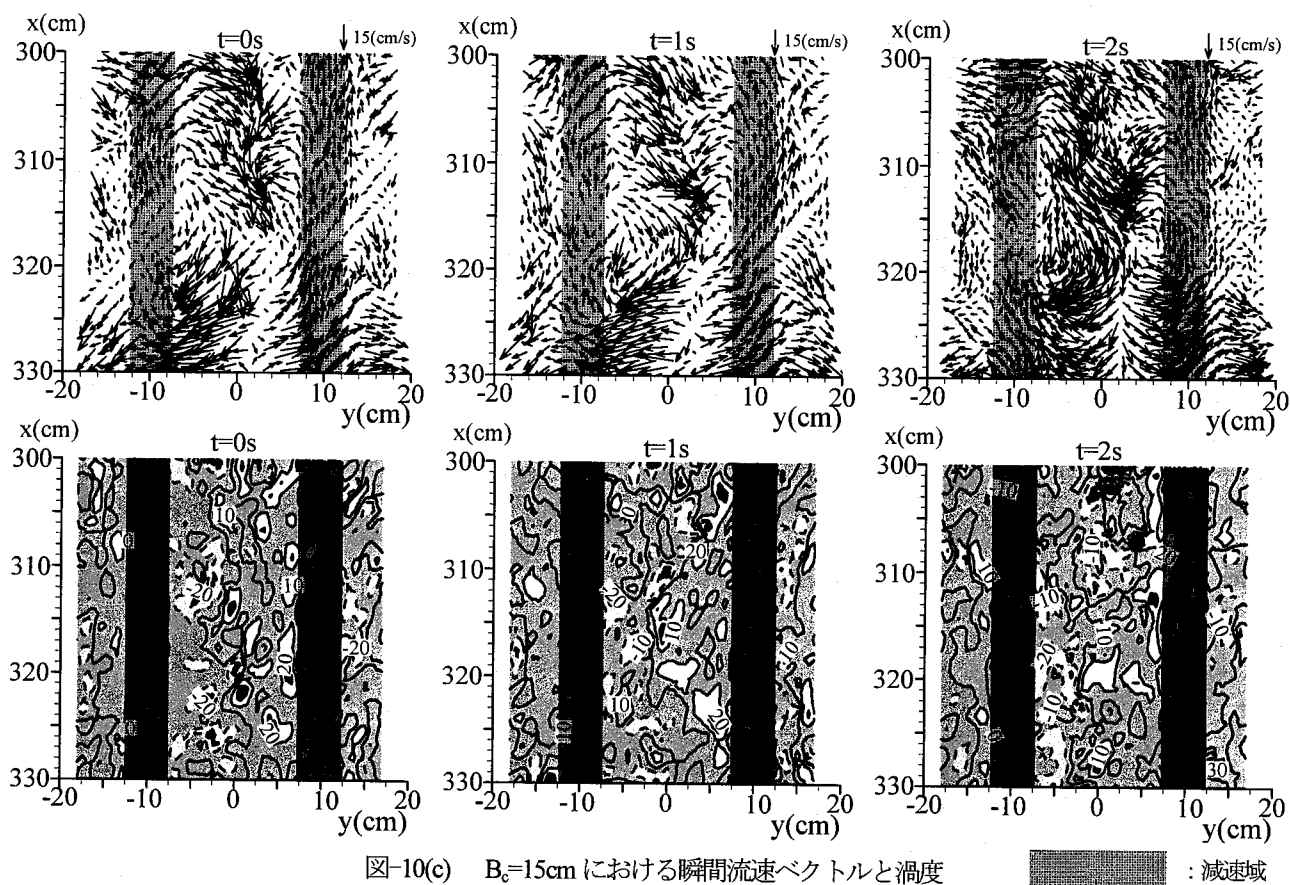


図-10(c) $B_c=15\text{cm}$ における瞬間流速ベクトルと渦度

においてレイノルズ応力 $\overline{u'v'}$ が大きな値を示し、植生帯内外の運動量交換が活発に行われていることが伺える。いずれにおいても著者ら⁹⁾が電磁流速計を用いて計測したデータとはほぼ同様の挙動を示した。

3.4 瞬間流れ場と渦度

図-10(a)～(d)は $z=6.5\text{cm}$ での各ケースにおける瞬間流速ベクトルおよび渦度 ω_z を示す。ただし、流速ベクトルは計測領域内における平面平均流速を差し引いた移動座標ベクトルである⁹⁾。渦度 ω_z は次式より算出した。

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

また、渦度 ω_z の図において $\omega_z > 0$ の領域を破線で、 $\omega_z < 0$ の領域を実線で表している。

$B_c=0\text{cm}$ のベクトル図に注目すると、両植生帯境界付近を中心としたスケールの大きな渦が交互に流下していく様子がみてとれる。このように、大規模水平渦が周期的に発生することにより、レイノルズ応力が大きな値をとると考えられる。また、渦度についてみると、水平渦の中心付近で渦度が最も大きな値を取り、移動座標流速ベクトルと一致した水平渦の挙動を示している。

$B_c=3\text{cm}$ についてみると、植生帯間の距離が狭いことから両植生帯内側境界で渦が発達せず、減速域が広がった状態となっている。これは二次流ベクトルの循環流が植生帯内で発生しなかった著者らの研究結果⁹⁾と一致している。そのため、低速流体が非植生域に移流することで、植

生帯外側境界付近に現れる渦がさらに発達し、流れの抵抗を $B_c=0\text{cm}$ よりも大きくすることが予測される。これは $B_c=3\text{cm}$ における植生帯外側境界付近の渦度が $B_c=0\text{cm}$ のそれと比べ大きな値をとることからも説明できる。

流れの抵抗が最大となった $B_c=15\text{cm}$ では、植生帯内側境界の渦が発達したことで、その他のケースと異なり両植生帯外側および内側境界付近において組織的水平渦が形成されている。このような水平渦構造により、平均二次流ベクトルでは水路中央で最も安定した二次流が水路中央で対を成して形成される⁹⁾。また、水路中央では両植生帯内側境界付近に発生した渦が相互に作用し合いながら流下していく様子が確認された。この相互作用効果により運動量の交換が活発に行われ、流れの抵抗が増大することが明らかになった。

$B_c=21\text{cm}$ に注目すると、両植生帯内側境界付近に現れる渦が発達し、その渦がほぼ交互に流下する様子が伺える。しかし、植生帯の間隔が広いことから、渦の相互干渉が $B_c=15\text{cm}$ に比べ弱まり、両植生帯境界において周期的に水平渦が発生することがみてとれる。

4. おわりに

本研究では、越流状態において、植生帯の間隔の違いによる水面・流速変動特性および大規模水平渦の挙動について検討し、さらに大規模水平渦の挙動が流れの抵抗特性に与える影響について検討を試みた。今後、各ケースにおける水平渦の3次元挙動についてより詳細に検討する次

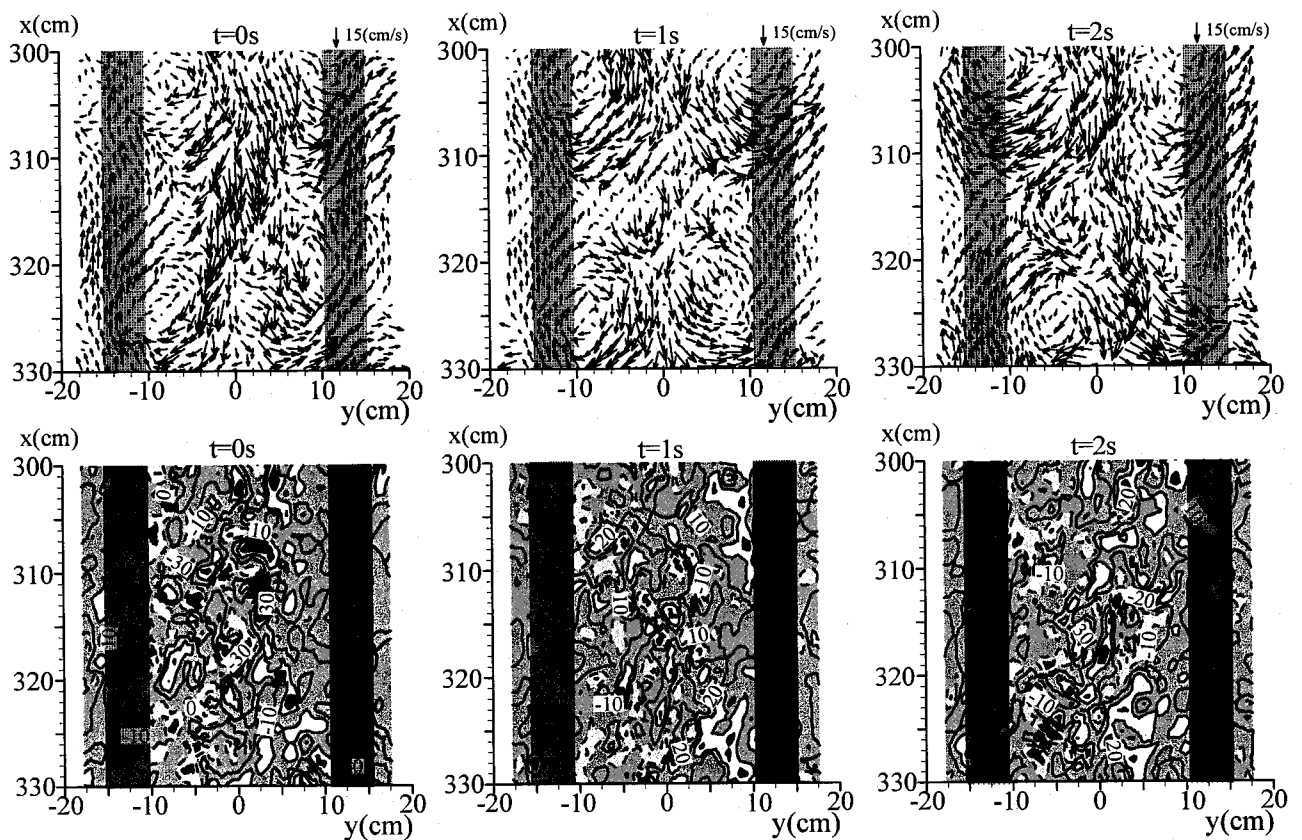


図-10(d) $B_c=21\text{cm}$ における瞬間流速ベクトルと渦度

減速域

第である。本研究によって得られた知見を以下に列挙する。

- (1) 水面変動特性について注目すると、各配置における水面変動の卓越周波数をスペクトル解析や自己相関によって明らかにした。また、水深が最大値をとった配置では、植生帯を横断する流れが相互に作用し合うことで水面変動の周期性が弱まること、また植生帯の間隔が広い配置ではその相互干渉が弱まりそれぞれの植生帯内側境界付近において周期性の高い水面変動が発生することを明らかにした。
- (2) 流速変動の自己相関により、いずれの配置においても明瞭なセカンドピークが現れ、それは水面変動によるものと一致し、水面変動と流速変動との間に相関があることを示した。
- (3) 大規模水平渦の挙動に注目すると、植生帯境界において周期的な水平渦が発生するような植生配置では、その位置においてレイノルズ応力が大きな値をとり、運動量輸送量が大きな値を示すことが明らかになった。また、水深が最大値をとった配置では、両植生帯外側および内側境界付近において組織的水平渦が形成され、これにより平均二次流ベクトルでは水路中央で最も安定した二次流が水路中央で対を成して形成されることが認められた。また、水路中央で両植生帯内側境界付近に発生した渦が相互に作用し合いながら流下していく様子が確認された。この相互作用効果により、運動量交換が促進され、流れの抵抗が増大することが明らかになった。

参考文献

- 1) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次: 直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究, 土木学会論文集, No.447/II-19, pp.35-44, 1992.
- 2) 山上路生, 岡本隆明, 禰津家久: 開水路植生流れにおける組織渦の LES 解析, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.637-642, 2007.
- 3) 池田駿介, 空閑健, 陳飛勇: 両岸に植生帯を有する開水路流れに発生する大規模水平渦の安定性と運動量輸送, 土木学会論文集, No.551/II-37, pp.63-73, 1996.
- 4) 田中貴幸, 大本照憲, 田中寿幸: 植生群落間の相互作用が開水路流れの抵抗に与える影響, 応用力学論文集, Vol.9, pp.941-950, 2006.
- 5) 田中貴幸, 大本照憲, 田中寿幸: 沈水状態の植生群落を伴う開水路流れの抵抗特性と流動機構, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.703-708, 2007.
- 6) 禰津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 乙志和孝: 開水路側壁凹部流れの水面・流速変動特性と開口部形状の効果, 土木学会論文集, No.712/II-60, pp.1-10, 2002.
- 7) 大本照憲, 岡本隆之: 水生植物群落を伴う開水路流れの水面変動と運動量輸送, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.991-996, 2003.
- 8) 禰津家久, 鬼束幸樹, 定免英樹, 相良幸輝, 池谷和哉: PIV を用いた植生開水路流れの組織渦構造解析, 応用力学論文集, Vol.1, pp.719-728, 1998.

(2007 年 4 月 12 日 受付)