

植生開水路流れの組織乱流構造に及ぼす かぶり水深の影響に関する研究

EFFECTS OF RELATIVE SUBMERGENCE ON COHERENT TURBULENCE STRUCTURE IN VEGETATED OPEN-CHANNEL FLOW

岡本隆明¹, 禰津家久², 山上路生³

Takaaki Okamoto and Iehisa Nezu and Michio Sanjou

¹学生員, 京都大学大学院修士課程, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²フェロー, 工博, 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³正会員, 博(工), 京都大学大学院助教, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

It is necessary in river environment and hydraulic engineering to investigate the hydrodynamic properties in vegetated canopy rivers, in which velocity distributions are largely changed in the vertical direction. In particular, the relative submergence, i.e., the ratio of the water depth H to the vegetation height h , influences velocity profiles significantly. For example, in high submergence, we can see an outer layer in which a logarithmic layer is formed. Whereas, in low submergence, the flow is directly influenced by the vegetation elements. So, in this study, turbulence measurements were conducted intensively in vegetated open-channel flows by changing the relative submergence, and consequently, mean-flow properties, turbulence structure and coherent motions were revealed and discussed in detail.

Key Words : : *vegetation canopy, open-channel flow, coherent turbulence motion, PIV*

1. はじめに

近年, 水域環境への関心が高まるとともに, 河川植生帯を有する浄化機能や侵食防止機能が注目されるようになり, 河川の管理を行っていく上で植生群落を積極的に保持, 利用していくことが求められるようになった. 植生流れ場では植生層内部と外部との境界部においてせん断不安定性によりsweepやejectionのような大規模な組織乱流構造が発生し, 溶存物質などのスカラー輸送に大きな影響を及ぼすことが示唆される. これまでに植生流れの研究は微気象学と河川工学の分野において多くの研究者によって進められてきた.

清水ら¹⁾はホットフィルム流速計を用いた室内実験からsweepのレイノルズ応力への寄与が大きく, 植生層内部への高速流体の輸送が顕著であることを示した. Raupachら²⁾は風洞実験を行って乱れエネルギー収支や組織乱流構造について考察した. Nepfら³⁾はかぶり水深を系統変化させて, 非水没植生と全水没植生の乱流構造や運動量収支について調べ, 全水没植生流れでは植生層下部の水平輸送が卓越する領域と植生層上部の鉛直輸送が卓越する領域の2つに区分されることを明らかにした. 池田ら⁴⁾は

条件付抽出法を用いて, 植生境界部に生じる周期渦の3次元構造を定量的に把握した. Nepfら⁵⁾は柔軟な植生場と純混合層の類似性に着目し, 穂波現象が乱れの輸送構造に与える影響について調べた. 最近では植生要素の配置や形状と水理特性の関係についての研究も行われている. Wilsonら⁶⁾は植生の形状を2通りに変化させ, 葉のついた植生では葉によって運動量が吸収されることを示した. Carolloら⁷⁾は植生密度を系統的に変化させて柔軟な植生の抵抗と植生密度の関係を解明した. また禰津ら⁸⁾はレーザー流速計(LDA)を用いて剛性の高い植生場を対象に植生の分散効果(dispersive効果)について実験的研究を行った.

しかしながら, これらの既往研究は点計測による統計解析が中心で, 植生流れ場の組織構造や渦の挙動などの瞬間的空間特性については十分な知見が得られていない. また植生流れの特性を決める重要なパラメーター³⁾の一つであるかぶり水深と組織乱流構造の関係性についても不明な点が多い. これらのことは洪水時の流れの制御や河床形成などに影響し, 適切な河川管理を行ううえで解明することが必要となる. そこで本研究では, かぶり水深を系統

表-1 実験条件

	U_m (cm/s)	H (cm)	h (cm)	Re	Fr	a (1/m)
Case1		4.5		4500	0.15	7.6
Case2		6.25		6250	0.13	
Case3		7.5		7500	0.12	
Case4	10.0	10.0	5.0	10000	0.10	
Case5		12.5		12500	0.09	
Case6		15.0		15000	0.08	
Case7		20.0		20000	0.07	

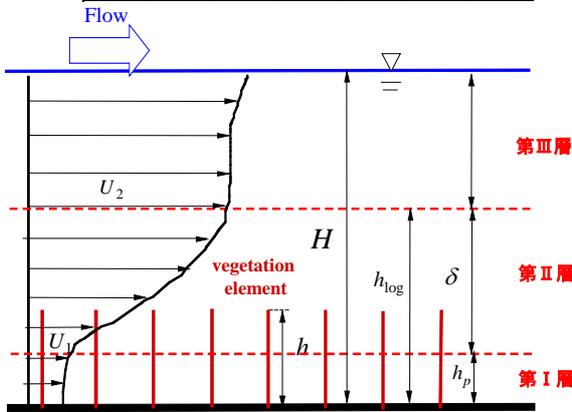


図-1 植生流れの模式図

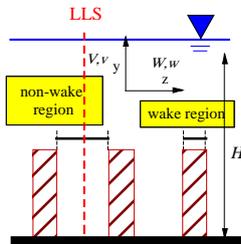


図-2 レーザーの照射位置

変化させて植生開水路流れを対象に高速度カメラによるPIV解析を行い、かぶり水深と乱流特性や組織構造の関係について考察する。

2. 流れ場の領域区分

これまでに得られた多くの研究成果を参考にすると、全水没の植生流れは3つの領域に区分され、

模式図を図-1に示す。第I層は非水没植生流れに類似した特性をもつ底面側の領域で、この領域の上端をレイノルズ応力の浸透高さ h_p ³⁾とする。第II層は主流速の鉛直方向変化が大きい混合層に似た領域である。図中の δ は第II層の厚さで、この領域ではせん断不安定による組織乱流構造が発生・発達する。 U_1 と U_2 は第II層を混合層と考えたときの低速側流速および高速側流速の代表値である。第III層は植生の影響が小さく粗面對数則³⁾が成立する水面側の領域と定義する。第III層の下端高さを h_{log} とする。本研究の前半ではこのような3層の領域区分が有効であるかをまず検討した。

y/h

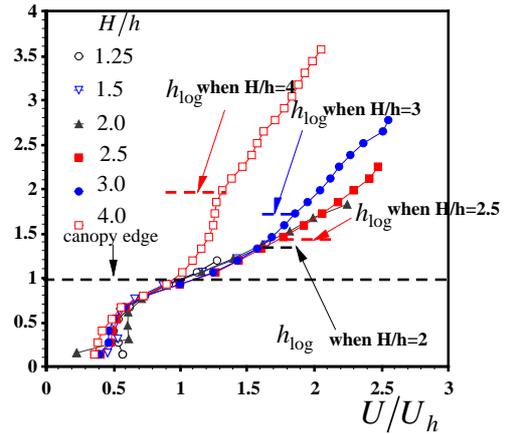


図-3 主流速分布の比較

y/h

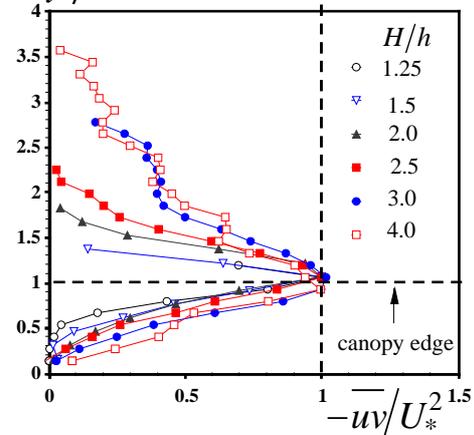


図-4 レイノルズ応力分布の比較

3. 実験装置と計測装置

実験に用いた水路は全長10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型直線水路であり、前報⁸⁾を参照願いたい。 x, y および z はそれぞれ、流下方向、鉛直方向および横断方向の座標軸である。 U, V および W は各方向における時間平均流速成分、 u, v および w は乱れ変動成分を示す。 H は全水深、 h は植生の高さである。水路底面には、図-1のように計測部を含めて8mの区間にわたって高さ50mm、幅8mm、厚さ1mmの短冊状の植生模型を正方格子状に配置した。流下方向の植生の配置間隔 L_v 、横断方向の間隔 B_v は一定で $L_v = B_v = 2.4$ cmである。本研究の植生模型はアクリル製で、沈水性の有茎植物をモデル化したもので流水による変形や振動はなかった。

乱流計測にはPIV法を用いた。2Wの連続アルゴンイオンレーザーをシリンダリカルレンズを通して厚さ2mmのレーザーライトシート(LLS)を水路上方から照射し、水路側方に設置した高速度CMOSカメラでデジタル撮影した。撮影領域のサイズ (x, y) は全水深領域を含むように20cm×30cm領域で、流下方向

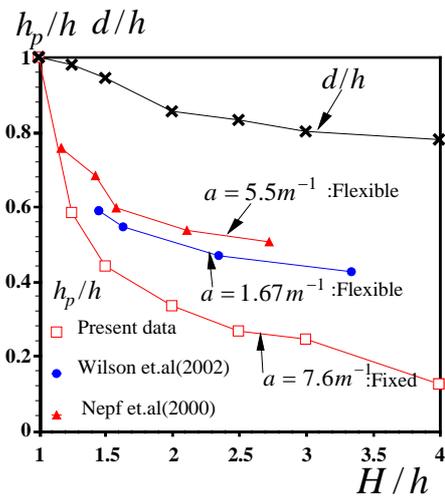


図-5 レイノルズ応力の浸透高さと原点移動量の比較

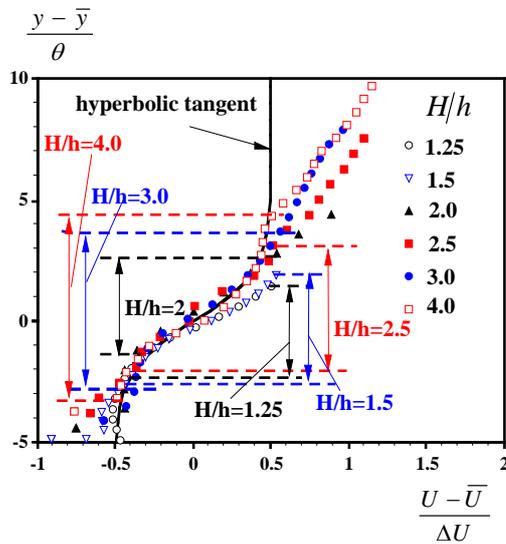


図-6 tanh型流速分布との比較

座標 x の原点 $x=0$ は撮影範囲内にある上流端の植生要素の位置とした。トレーサーには粒径 $100\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のポリスチレン粒子を用いた。カメラに 100Hz の外部トリガーを与えて、 500Hz のフレームレートで2枚の連続画像のペアーを45秒間計測した。すなわちPIV解析に用いる2枚の画像の時刻差は $1/500\text{s}$ 、瞬間流速ベクトル (\tilde{u}, \tilde{v}) のサンプリング間隔は $1/100\text{s}$ である。図-2にLLSの横断方向の入射位置 (non-wake面) を示す。

表-1に実験条件を示す。水理条件は水深 H を非水没植生のケースから全水没植生のケースまで系統変化させ、計7ケースの乱流計測を行った。断面平均流速 $U_m=10(\text{cm/s})$ 、植生密度 $a=nA/V_o$ は単位体積当たりの植生の前面遮蔽面積 (frontal area) で $a=7.6(\text{m}^{-1})$ であり、全ケースで一定である。本研究は大規模な組織乱流構造が発達する植生密度が比較的小さい状況を想定している。

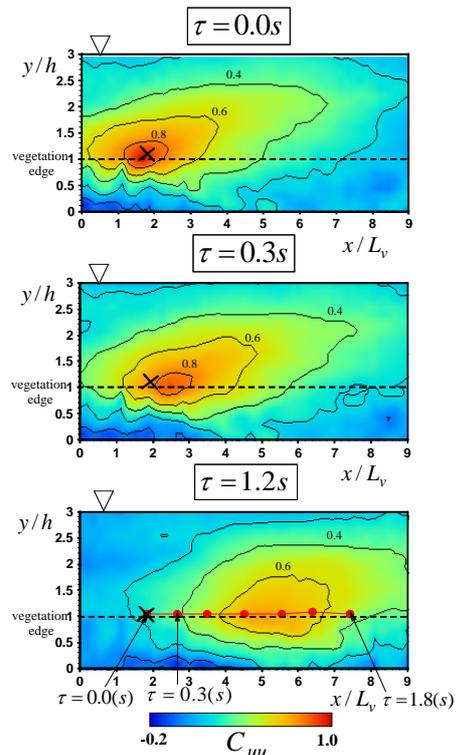


図-7 時空間相関解析

4. 実験結果と考察

(1) 平均流特性と乱れ特性

図-3に全ケースについて時間平均した主流速 U の分布を比較した。 U の値は植生先端 ($y=h$) における主流速の値 $U_h \equiv U(y=h)$ で無次元化している。全ケースで植生先端付近の第II層で流速シアー $\partial U/\partial y$ が大きくなり、植生内部 ($y/h < 1$) で流速が一定流速 U_1 に近い値をとる領域 (第I層) が存在している。図中にはかぶり水深領域 ($y/h > 1$) の主流速 U と粗面対数則分布を比較して評価した第III層の下端高さ h_{log} を図示した。水深が大きくなると h_{log} は増加し、第III層の厚さが大きくなるのがわかる。

図-4に全ケースのレイノルズ応力 $-\overline{uv}/U_*^2$ の分布を示す。摩擦速度 U_* は植生先端でのレイノルズ応力のピーク値とした⁸⁾。水深が増加するとレイノルズ応力が植生内部に浸透して大きくなる特性がみられる。この特性を定量評価するためにNepfら³⁾はレイノルズ応力の浸透高さ h_p を植生内部でレイノルズ応力のピーク値の10%となる高さで定義した。図-5に本実験値の h_p を同様の手法で算出した既往研究³⁾⁶⁾の結果と比較して示す。なお、既往研究はいずれも可動変形する植生モデルを用いた室内実験である。 h_p はかぶり水深が増加すると減少しており既往研究の傾向と定性的に一致する。本研究の結果は既往研究と比較して植生密度が大きいにも関わらず、全体的にこれらの結果よりも小さい値をとり、

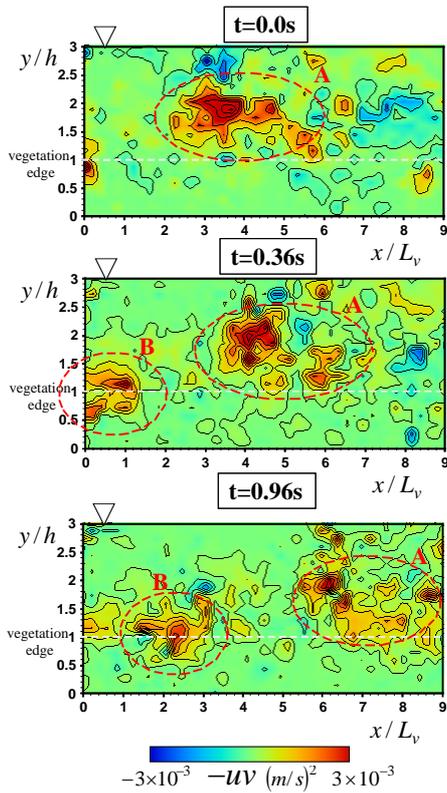


図-8 瞬間レイノルズ分布

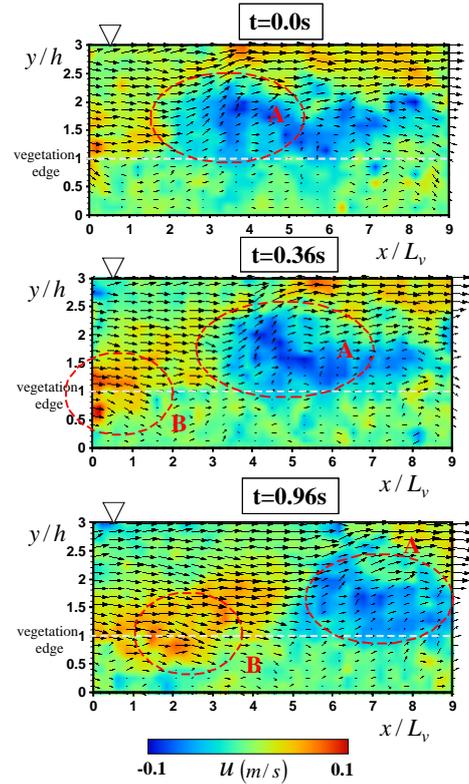


図-9 瞬間ベクトル分布

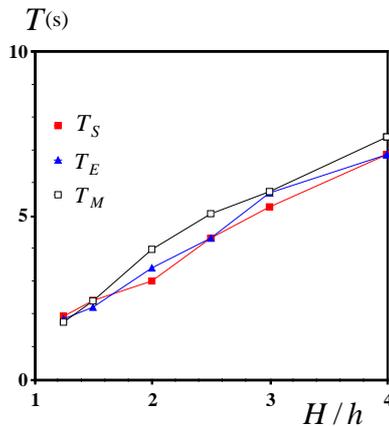


図-10 sweep, ejectionの周期比較

より多くの運動量が植生内部に輸送されることがわかる。これは既往研究では植生が振動するために輸送エネルギーが植生の変形にも消費されるためと思われ興味深い。第III層で成立する粗面対数則の原点移動量 d も図-5に併記したが、 h_p と同様に水深が増大すると減少する。これはかぶり水深の増加とともに植生の粗面としての効果が小さくなることを意味している。

次に植生先端付近の第II層(図-1)と混合層の類似性について検討するために、図-6に混合層で成立するhyperbolic tangent型の流速分布と比較した。混合層型の流速分布は次式で近似される³⁾。

$$\frac{U - \bar{U}}{\Delta U} = \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{y - \bar{y}}{2\theta}\right) \quad (1)$$

ここで $\bar{U} = 1/2(U_1 + U_2)$ 、 $\Delta U = U_2 - U_1$ 、 θ は運動量厚さで流れ場から決定される。高速側主流速 U_1 は第II層と第III層の境界高さ $y = h_{\log}$ での流速値、低速側主流速 U_2 は運動量の浸透高さ $y = h_p$ での流速値、混合層の中心 \bar{y} は $\bar{y} = (h_{\log} + h_p)/2$ とした。

図中には各ケースの h_{\log} 、 h_p を破線で併示した。いずれのケースも第II層では式(1)の曲線に近い分布をもつ。またかぶり水深が大きいほど混合層厚 δ は大きくなる。一方で $H/h = 1.25$ および 1.5 のケースでは植生による粗面効果が大きくなり、混合層型分布との類似性は弱くなることがわかる。

(2) 時空間相関特性

図-7に $H/h = 3.0$ のケースの時空間相関コンターを示す。ここで時空間相関係数 C_{uu} は次式で定義される。

$$C_{uu} = \frac{\overline{u(x_0, y_0, t_0)u(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, t_0 + \tau)}}{u'(x_0, y_0)u'(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y)} \quad (2)$$

ここで (x_0, y_0, t_0) は時間 t_0 における固定点の座標で、 $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, t_0 + \tau)$ は遅れ時間 τ における移動点の座標、 $u'(x_0, y_0)$ は乱れ強度である。

図-7は植生先端の点を基準点とした時空間相関 C_{uu} でそれぞれ遅れ時間 $\tau = 0.0, 0.3, 1.2$ (s) を表してい

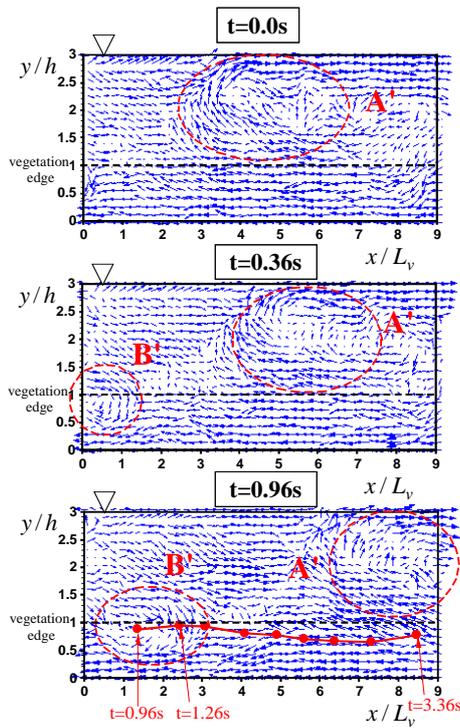


図-11 組織渦の抽出

る。 $\tau=0.0(s)$ の図より植生先端付近に組織構造が存在することがわかる。 $\tau=0.3(s)$ において関連のピーク値が流下方向に移動しており、組織構造が流下方向に移流されていることが確認できる。 $0.3(s)$ ごとに関連のピーク位置を追跡したものを $\tau=1.2(s)$ の図中に示した。これより組織構造が植生先端付近をほぼ一定の流速で移流されているのが観察された。

(3) 組織乱流構造について

図-8および図-9はそれぞれ $H/h=3.0$ のケースにおける瞬間レイノルズ応力 $-uv$ の分布と瞬間ベクトル (\tilde{u}, \tilde{v}) の分布を時系列的に示したもので、同時刻のものを対応させている。図-9中には乱れ変動成分 u のコンターをカラー表示した。 $t=0(s)$ では図-8で植生層外部(破線部A)において $-uv$ の局所的に大きな正值分布がみられる。図-9では破線部Aの領域で $u < 0$ となり、低速流の上昇ベクトルである ejection ($u < 0, v > 0$) が発生しているのがわかる。 $t=0.36(s)$ では ejection が流下方向に移流されている。またその上流側において植生層内部(破線部B)で $-uv$ の大きな正值分布がみられる。Bでは $u > 0$ となり、高速流の下降ベクトルである sweep ($u > 0, v < 0$) が発生している。 $t=0.36(s)$ では ejection, sweep はともに流下方向に移流されている。このことから瞬間レイノルズ応力が大きな正值をとる領域は大規模な組織乱流構造の発生と対応している。また図-7で考察した組織構造は ejection, sweep が交互に発生す

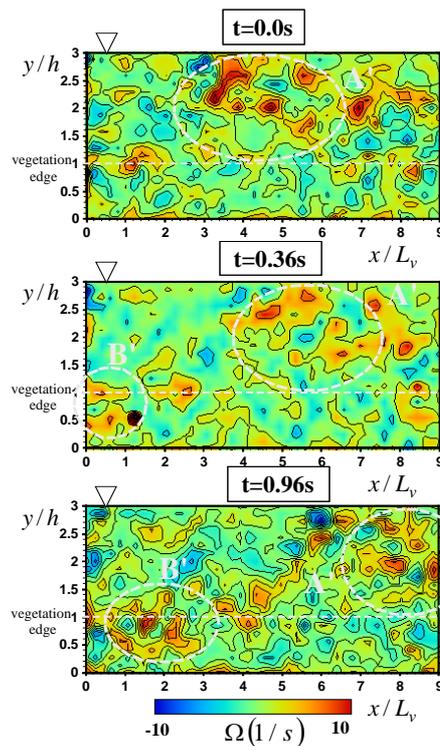


図-12 瞬間渦度分布

ような組織変動サイクルをもつことがわかった。

図-10に全ケースについて植生先端部における sweep, ejection の発生周期 T_S, T_E と混合層の渦周期 T_M を比較したものである。 sweep, ejection の発生周期は瞬間レイノルズ応力と瞬間ベクトル分布から発生した sweep および ejection の数をカウントして算出した。混合層の渦周期 T_M は次式で与えられる最大発達率 $f=1/T_M$ から計算される³⁾。

$$\frac{f\theta}{U} = 0.032 \quad (3)$$

図より sweep, ejection の発生周期 T_S, T_E は全ケースでほぼ等しく、水深が大きくなると周期が長くなる傾向がみられた。これらの周期は混合層の周期 T_M に近い値をもち、このことから植生流れと混合層のアナロジーがうかがえる。

(4) 植生流れ場の組織渦構造について

Adrian⁹⁾ の手法に従って組織渦構造の抽出を試みる。図-11は図-9と同時刻の局所主流速 \tilde{u} から植生先端 ($y=h$) の移流速度 $U_c(h)$ を引いた移動座標系の瞬間ベクトル分布を時系列的に示したものである。ここで移流速度 $U_c(h)$ は時空間相関解析から計算している。また図-12には図-11と同時刻の瞬間渦度分布を示した。 $t=0(s)$ で ejection の発生域(破線部A')において瞬間ベクトルが渦状になっており、図-12の渦度分布でもこの領域で大きな正值をとることから、植生先端の移流速度 $U_c(h)$ を引くことで植生

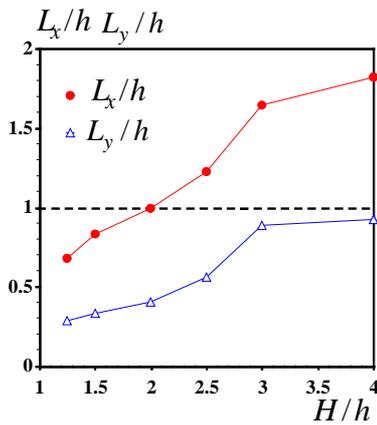


図-13 植生先端部の渦の長さスケールの比較

層外部で閉じた渦状の組織渦を抽出できたといえる。 $t = 0.36$ (s)では破線部A'の渦が流下方向に移流されている。また上流側のsweep発生域(破線部B')において瞬間ベクトルが渦状になっていて、渦度分布でもこの領域で局所的に大きな正值をとることから植生先端付近で植生内部に入りこむ渦といえる。このことから瞬間レイノルズ応力の極値分布から判定されたsweep, ejectionが組織渦を形成していることが確認される。なおAとA', BとB'の概略範囲はほぼ一致している。図-11の $t = 0.96$ (s)では破線部A',B'の渦がともに流下方向に移流されている。 $t = 0.96$ (s)の図には渦中心を渦度のピーク位置と仮定して破線部B'の渦の挙動を0.3(s)ごとに追跡したものを示した。植生先端にあった渦が植生内部に入り込む様子が観察される。また図-11で抽出した渦構造は図-8の $-uv$ の正值分布にも対応することから、組織渦が植生流れの運動量輸送に寄与していると考えられる。

PIV計測では渦の流下方向と鉛直方向の長さスケール L_x , L_y は次式から求めることができる。

$$L_x = \int_0^{\infty} \frac{u(x_0, y_0, t_0)u(x_0 + x, y_0, t_0)}{u'(x_0, y_0)u'(x_0 + x, y_0)} dx \quad (4)$$

$$L_y = \int_0^{\infty} \frac{u(x_0, y_0, t_0)u(x_0, y_0 + y, t_0)}{u'(x_0, y_0)u'(x_0, y_0 + y)} dy \quad (5)$$

図-13に植生先端部における渦の長さスケール L_x , L_y を全ケースについて比較した。全ケースにおいて $L_x/L_y > 1$ となり植生先端部で長円形の渦が生成されていると考えられる。 L_x, L_y はともに水深が増大すると増加しており、かぶり水深が大きくなるほど大スケールの渦が発達する。また L_y が $L_y/h = 1$ 程度に収束するため、植生先端部での渦の鉛直方向の長さスケールは水深が増加しても植生の長さスケール h 程度で一定値に達すると予測され、森林植生での渦スケール²⁾に一致するものと考えられる。

5. 結論

本研究では水深を系統変化させて開水路植生流れを対象にPIV計測を行い、乱流構造や組織構造の瞬間特性に及ぼすかぶり水深の影響について考察した。以下に得られた知見を示す。

- 1) レイノルズ応力の浸透高さ h_p の比較から、かぶり水深が大きくなると運動量が植生層のより深くまで浸透することが示された。
- 2) 植生先端部での組織構造の瞬間特性や周期特性について調べ、植生先端付近の流れ場は混合層と良く似た性質を示す。
- 3) 渦構造の瞬間特性について考察し、組織渦構造はsweep, ejectionの発生と関係があり運動量輸送に寄与していることがわかった。
- 4) 組織構造の周期特性や渦の長さスケールから水深が増加すると大規模な組織構造が発達する。

参考文献

- 1) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠紀：直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第438号, pp.31-40, 1991.
- 2) Raupach, M. R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y.: Coherent Eddies and Turbulence in Vegetation Canopies: The Mixing-Layer Analogy, *Boundary-Layer Meteorology.*, Vol.78, pp.351-382, 1996.
- 3) Nepf, H. M. and Vivoni, E. R. : Flow Structure in Depth-limited, Vegetated Flow, *J. of Geophysical Res.*, Vol. 105, pp.28547-28557, 2000.
- 4) 池田祐一, 金成修一, 須賀堯三：条件付抽出法による側岸部植生境界における組織乱流構造の3次元構造の基礎的研究, 水工学論文集, 第45巻, 土木学会, pp.853-858, 2001.
- 5) Ghisalberti, M. and Nepf, H. M. : Mixing Layers and Coherent Structures in Vegetated Aquatic Flows, *J. of Geophysical Res.*, Vol. 107, pp.3-1 - 3-11, 2002.
- 6) Wilson, C.A.M.E, Stoesser, T., Bates, P.D. and Batemann Pinzen, A.: Open Channel Flow through Different Forms of Submerged Flexible Vegetation, *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, pp.847-853, 2003.
- 7) Carollo, F.G., Ferro, V. and Termini, D.: Flow Resistance Law in Channel with Flexible Submerged Vegetation, *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, pp.554-564, 2005.
- 8) 瀬津家久・山上路生・岡本隆明：植生キャノピー開水路流れの乱流構造とディスペルシブ効果に関する実験的研究, 水工学論文集第50巻, 土木学会, pp.1135-1140, 2006.
- 9) Adrian, R.J., Meinhart, C.D. and Tomkins, C.D.: Vortex Organization in the Outer Region of the Turbulent Boundary Layer, *J. of Fluid Mech*, Vol. 422, pp.1-54, 2000.

(2007.9.30受付)