

# 植生密度が柔軟植生流れ場の組織乱流構造 に及ぼす影響に関する研究

EFFECTS OF VEGETATION DENSITY ON COHERENT TURBULENCE STRUCTURE  
IN OPEN-CHANNEL FLOW WITH FLEXIBLE VEGETATION

岡本隆明<sup>1</sup>, 禰津家久<sup>2</sup>  
Takaaki Okamoto and Iehisa Nezu

<sup>1</sup>学生員, 京都大学大学院博士課程, 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キャンパス)

<sup>2</sup>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)

Most of aquatic plants in actual rivers have great flexibility and thus the waving motion of plants, which is called the “Monami” phenomena, is often observed. These Monami motions have an important relation with the organized vortices which govern the turbulent transport of mass, momentum and suspended sediment. However, any important relation between the Monami phenomena and the instantaneous turbulence structure is not yet available. Therefore, in the present study, we highlighted these important topics and measured the instantaneous velocity structure and coherent motions in open-channel flows with flexible vegetation by using both of PIV and PTV techniques. As the results, we revealed the relation between the vegetation density and the Monami phenomena.

**Key Words** : : flexible vegetation, Monami phenomena, instantaneous turbulence structure, PIV

## 1. はじめに

実河川における植生群落は流れ場に大きな影響を与えるとともに河川生態系を構成する要素の一つであるから, 開水路植生流れの水理特性を解明することは河川管理上重要である. 特に柔軟性を有する植生流れ場において, 大気植生では「穂波」や, 一方, 河川植生では「藻波」と呼ばれる植生が組織的に変形する現象がみられる. 井上(1955)<sup>1)</sup>は大気植生の代表例である稲穂について研究し, 「穂波」は植生先端部で大規模渦が発生し, 流下方向に伝播していく現象であることをはじめて解明した. このような大規模組織渦は植生層内外の運動量, 物質輸送を支配しているため, 植生流れの研究は微気象学と河川工学の両分野において多くの研究者によって進められてきた.

室田・福原(1983)<sup>2)</sup>は柔軟植生流れ場をホットフィルム流速計で計測し, 揺動状態の変化による乱流構造の変化を調べた. Raupachら(1996)<sup>3)</sup>は2台の熱線流速計を用いて計測することで, 植生流れ場の大規模組織構造について調べた. またスキューネス分布や乱れエネルギー収支から植生流れと混合層の類似性について検討した. Nepf(1999)<sup>4)</sup>は植生密度の影響を考慮し, 円筒にかかる抗力に基づいて植生の抗力

をモデル化した. 植生の拡散現象についても考察し, 植生流れには乱れによる拡散と植生配置による構造的拡散の2つが存在することを明らかにした. 田村・灘岡(2002)<sup>5)</sup>は藻場を有する流れ場をレーザー流速計(LDA)で計測し, 藻場とその周辺で大局的な鉛直循環流が形成されることを明らかにした. 辻本ら(2003)<sup>6)</sup>は模型海草を用いてPTV計測を行い, 波の位相ごとの流れ構造や乱れ構造の変化について調べた. Velascoら(2003)<sup>7)</sup>は柔軟植生流れ場を対象に超音波流速計(ADV)を用いて実験を行い, 流れ場と柔軟植生の変形量の関係を調べた. Poggiら(2004)<sup>8)</sup>はLDAによって植生開水路流れを乱流計測し, 植生流れを3層に分類し, 植生密度によるキャノピー内部のエネルギーカスケードの変化特性を明らかにした. またNezu & Sanjou(2008)<sup>9)</sup>はPIV法を用いて剛性の高い植生モデルを対象に, かぶり水深が植生流れ場に与える影響について実験的研究を行った.

このように植生開水路流れについては多くの研究者によって様々な知見が得られている. しかしながら, 植生流れの組織乱流構造や大規模渦の瞬間挙動については十分な知見が得られていない. また室田・福原<sup>2)</sup>によれば植生密度が小さいと藻波現象は発生しないとされているが, 植生密度と柔軟植生の

表-1 実験条件

Case		$H$ (cm)	$Re$	$Fr$	$h$ (cm)	$U_m$ (cm/s)	$U^*$ (cm/s)	classification of plant motion
F1	0.015	21.0	42000	0.14	7.0	20.0	0.022	Swaying(S)
F2	0.022						0.032	Swaying(S)
F3	0.034						0.036	Monami(M)
F4	0.061						0.040	Monami(M)
F5	0.137						0.041	Monami(M)
F6	0.243						0.048	Monami(M)
R1	0.015	15.0	30000	0.17	5.0	20.0	0.025	Rigid(R)
R2	0.022						0.028	Rigid(R)
R3	0.034						0.030	Rigid(R)
R4	0.061						0.038	Rigid(R)
R5	0.137						0.039	Rigid(R)
R6	0.243						0.043	Rigid(R)

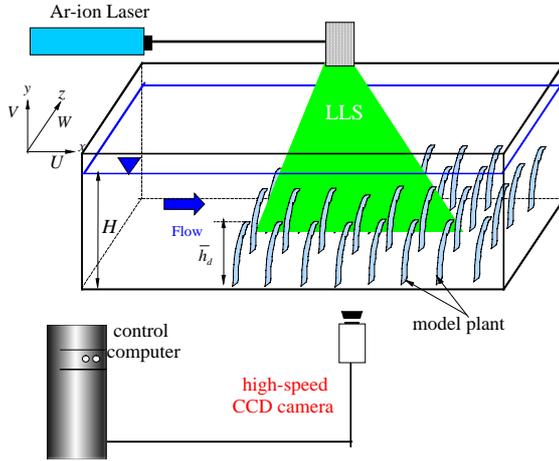


図-1 実験装置図

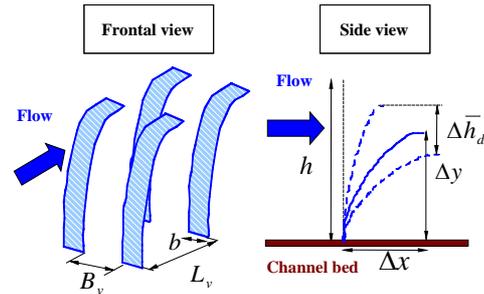


図-2 植生模型図

揺動の関係性についても未解明点が多い．そこで本研究では，植生密度を系統変化させて柔軟植生を対象に高速カメラによるPIV解析を行い，植生密度と組織渦構造の関係を解明する．

## 2. 実験装置と計測方法

本実験の装置図を図-1に示す．水路は全長10m，幅40cm，高さ50cmの可変勾配型水路である． $x, y$  および  $z$  はそれぞれ，流下方向，鉛直方向および横断方向である． $U, V$  および  $W$  は各方向における時間平均流速， $u, v$  および  $w$  はそれぞれ瞬間流速  $\tilde{u}, \tilde{v}$  および  $\tilde{w}$  の時間平均流速からの偏差すなわち乱れ変動成分を示す(レイノルズ分解法)． $H$  は全水深， $h$  は植生の直立高さ， $\bar{h}_d$  は植生がたわんだときの時間平均高さである．水路底面には，計測部を含めて8mの区間にわたって図-1で示すように植生模型を正方格子状に配置した．

剛体植生<sup>9)</sup>は高さ50mm，幅8mm，厚さ1mmのアクリル板で作成した．図-2に本研究の柔軟植生のモデル図を示す．柔軟植生は高さ70mm，幅8mm，厚さ0.1mmのOHPシートを短冊状に切ったもので，沈水植物であるセキショウモ属をモデル化している．図のように植生先端の流下方向変位を  $\Delta x$ ，鉛直方向変位を  $\Delta y$ ，揺動の振幅を  $\Delta \bar{h}_d$  とする．

流速計測にはPIV法を用いた．2Wのアルゴンイオンレーザーを光源として，水路上方からシリンド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)を植生要素間(non-wake面)<sup>9)</sup>に照射した．このシート面を水路側方から高速度CCDカメラ(1024×1024pixel)でデジタル撮影した．トレーサーには粒径100 $\mu\text{m}$ のポリスチレン粒子を用いた．カメラに40Hz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を55秒間計測した．撮影領域のサイズ( $x, y$ )は全水深領域を含むように30(cm)×30cm領域である．また本研究では柔軟植生の先端に蛍光球を付け，LLSを照射することで頂部変位( $\Delta x, \Delta y$ )をPTV法で同時計測した．

水理条件は表-1に示すように柔軟植生と剛体植生について植生密度 $\phi$ を系統変化させ，計12ケース設定した．断面平均流速 $U_m$ ，かぶり水深比 $H/h$ は全ケースで一定とした．本研究の植生密度 $\phi$ は次式で算出した．

$$\phi = nAb/V_o \quad (1)$$

$n$ は体積 $V_o$ における植生の数で， $A$ は流れに垂直方向の植生要素の投影面積， $b$ は植生要素の幅である．表中の右端の欄は植生の揺動状態を表しており，

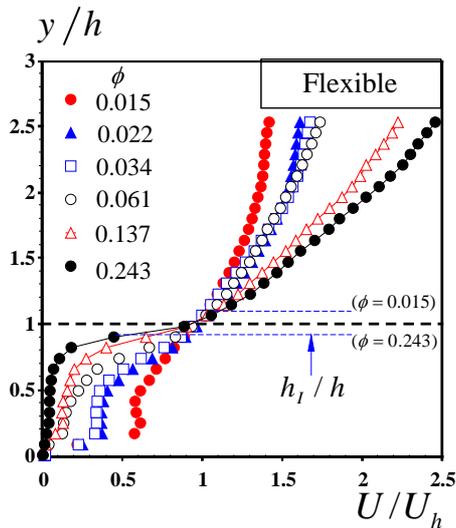


図-3 主流速分布の比較

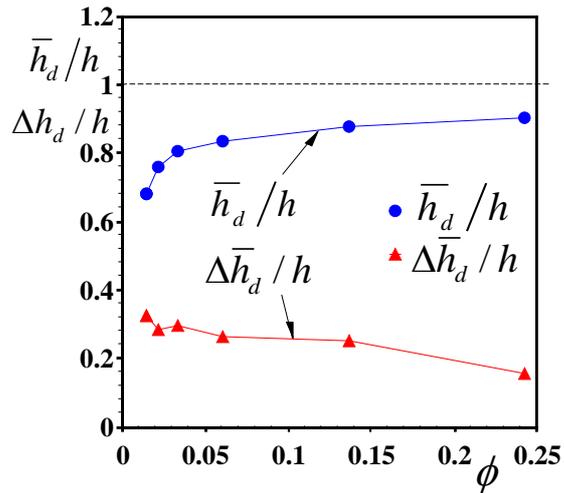


図-5 柔軟植生の時間平均たわみ高さ  $\bar{h}_d$  と揺動の振幅  $\Delta \bar{h}_d$

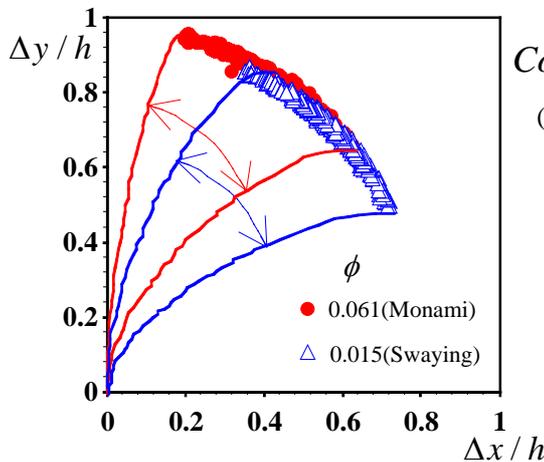


図-4 植生密度による柔軟植生の揺動状態の変化

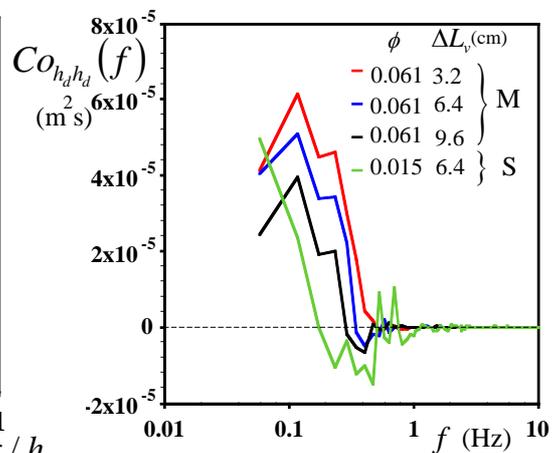


図-6 柔軟植生の揺動コスペクトルの比較

Swaying(S)とは植生が個々に揺動する状態，  
Monami(M)とは植生が組織的に揺動する状態で，こ  
れらは目視によって判定した。

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 時間平均構造と植生の揺動特性

図-3に柔軟植生について時間平均主流速  $U$  の分  
布の鉛直分布を比較した。結果は植生先端 ( $y = h$ ) に  
おける主流速の値  $U_h \equiv U(y = h)$  で無次元化してい  
る。植生密度が大きくなると、植生内部で流速が低  
減するために植生先端部での流速シアがが大きくな  
っている。また流速分布の変曲点位置  $h_l$  は植生密  
度が小さいケースほど下方にみられた。これは植生  
の時間平均たわみ高さ  $\bar{h}_d$  が植生密度によって異な  
るためだと思われる。

植生密度による柔軟植生の揺動状態の変化を調

べるために図-4に  $\phi = 0.015$ (Swaying), 0.061  
(Monami)のケースについて流下方向と鉛直方向の  
植生先端変位  $\Delta x$  と  $\Delta y$  を比較した。 $\phi = 0.015$ のケ  
ースの方が植生が大きくたわんでおり、大きく揺動  
しているのがわかる。図-5には柔軟植生の全ケー  
スの植生の時間平均たわみ高さ  $\bar{h}_d$  と揺動の振幅  $\Delta \bar{h}_d$   
をまとめた。植生密度が大きくなると時間平均たわ  
み高さ  $\bar{h}_d$  が大きく、揺動の振幅  $\Delta \bar{h}_d$  が小さくなる  
傾向がみられた。これは図-3からもわかるように植  
生密度の大きなケースでは植生内部で流速が大き  
く低減されて、柔軟植生にかかる流体力が小さくな  
るためだと考えられる。

藻波現象を定量的に評価するためにコスペクトル  
を比較した。図-6には  $\phi = 0.015$ (Swaying),  
0.061(Monami)のケースについて2本の柔軟植生の先  
端変位鉛直方向変動  $h_d(t)$  間のコスペクトル  
 $Co_{h_d h_d}$  を図示した。図中の  $\Delta L_v$  はコスペクトルをと

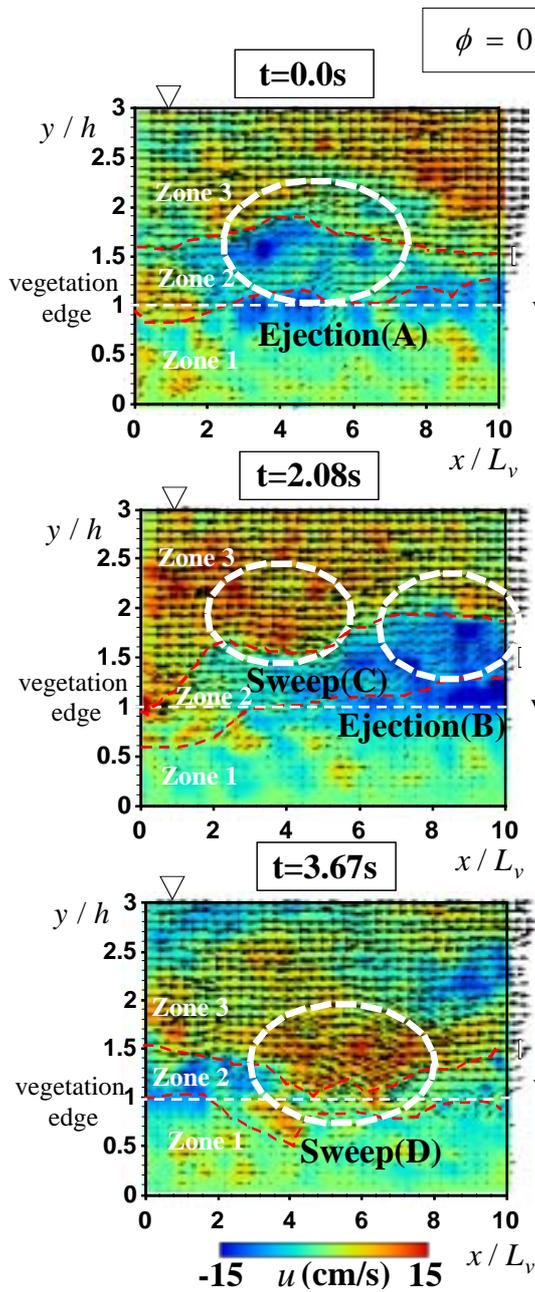


図-7 瞬間ベクトル分布

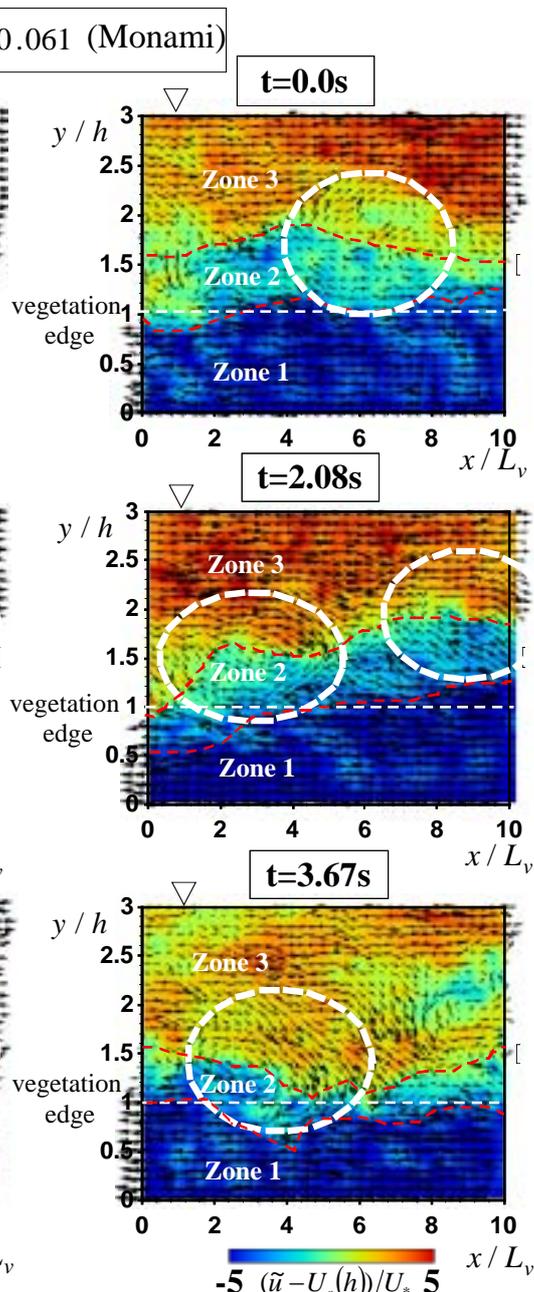


図-8 Zone分けと渦状ベクトルの抽出

る2本の植生間の流下方向距離を表す．Monamiケースでは低周波帯で正の大きな相関がみられ， $\Delta L_v$ が増加するにつれて正の相関が小さくなっている．これよりMonamiケースでは2本の植生間の揺動の位相が合っているため，柔軟植生が組織的に揺動していることが評価でき，注目される．対してSwayingケースでは同一の流下方向距離 $\Delta L_v = 6.4(\text{cm})$ と比較してMonamiケースより相関が小さいため，植生が個々に揺動していることが定量的に確認できた．

## (2)瞬間流速場のZone分け

Adrianら<sup>10)</sup>は境界層流れにおいて瞬間流速場から時間平均流速 $U$ ではなく時空間相関から求めた移

流速度 $U_c$ を引くことで，一定運動量の“Zone”を決定した．またZone境界とヘアピン渦のheadが一致することを解明した．以下では柔軟植生流れにAdrian<sup>10)</sup>の手法が適用できるかどうかを検討した．

図-7に $\phi = 0.061$ (Monami)のケースにおける瞬間ベクトル分布を示す．図-7中には乱れ変動成分 $u$ のコンターをカラー表示した．図-8は図-7と同時刻の局所主流速から植生先端( $y = h$ )の移流速 $U_c(h)$ 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．図中には瞬間流速 $(\tilde{u} - U_c(h))/U_*$ をカラー表示し，平滑化したZone境界を赤線で表示した．本研究ではAdrianら<sup>10)</sup>の手法に基づいて瞬間流速場を次のように3つのZoneに

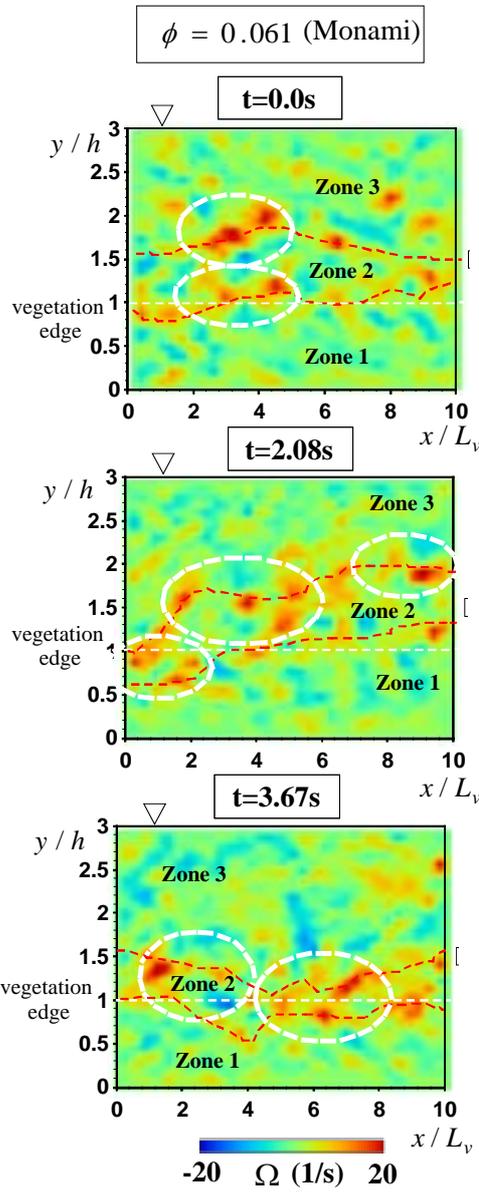


図-9 瞬間渦度分布

分けた。

$$\begin{aligned}
 \text{Zone1: } & -5 < (\tilde{u} - U_c(h))/U_* < -3 \\
 \text{Zone2: } & -3 < (\tilde{u} - U_c(h))/U_* < -1 \\
 \text{Zone3: } & 1 < (\tilde{u} - U_c(h))/U_* < 5
 \end{aligned} \quad (2)$$

全時刻において植生境界部付近でZone境界が現れている。Zone境界部でEjectionやSweepが発生しており、EjectionとSweepの発生領域において大きな閉じた渦状のベクトル分布がみられる。図-9には図-7, 8と同時刻の瞬間渦度分布を表示したが渦度が大きな正值分布をもつ領域がZone境界部に対応しているため、Zone境界部でEjectionやSweepなど組織乱流が発生し、それらが大規模組織渦を形成している。これにより植生流れ場にもAdrian<sup>10)</sup>の手法が適用で

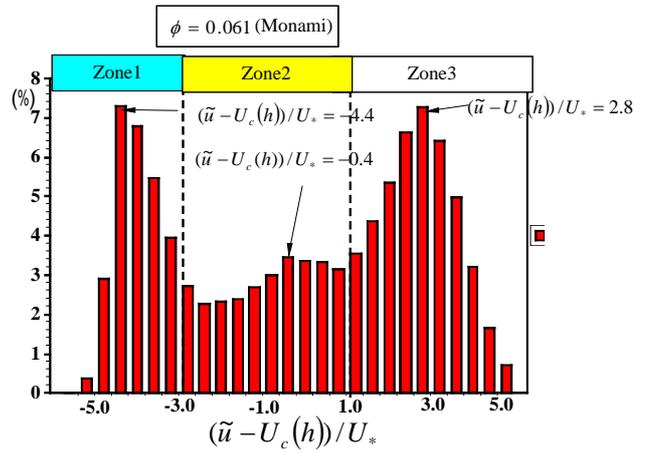


図-10 主流速のPDFのヒストグラム

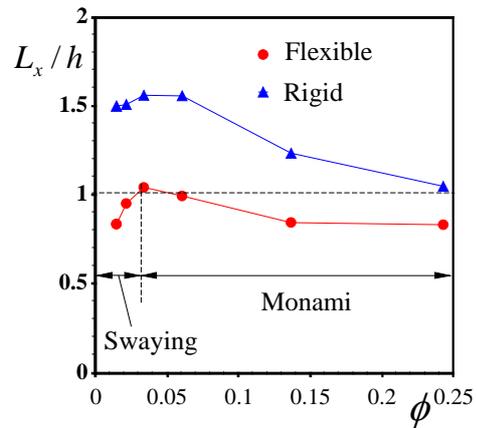


図-11 長さスケールの比較

きることがわかった。Sweep発生時にはZone境界が植生内部に入り込み、Zone境界部でEjection発生時にはZone境界が上方に移動するのが観察される。

Adrianら<sup>10)</sup>は従来の1点の時系列データのPDF解析ではなく、1断面についてPDF解析を行うことで各Zoneには一定の主流速が存在することを示した。本研究でも図-10に $\phi = 0.061$ (Monami)における流下方向位置 $x/L_v = 2.0$ の断面の瞬間主流速 $\tilde{u}$ のPDF分布を示した。Adrian<sup>10)</sup>と同様に全てのZoneで運動量の最大値がみられる。特にZone1とZone3に運動量の明確なピークがみられるが、これらは植生流れの植生内部の低速側主流速 $U_1$ と植生外部の高速側主流速 $U_2$ <sup>9)</sup>に対応していると思われる。

### (3) 組織渦の長さスケール

PIV計測では渦の流下方向の長さスケール $L_x$ は流速成分の相関値を積分して次式で計算できる。

$$L_x = \int_0^\infty \frac{\overline{u(x_0, y_0, t_0)u(x_0 + x, y_0, t_0)}}{u'(x_0, y_0)u'(x_0 + x, y_0)} dx \quad (3)$$

図-11に植生先端部( $y/h = 1.0$ )における渦の長さ

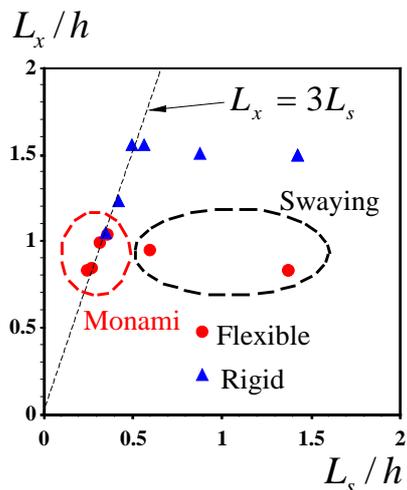


図-12 長さスケールとせん断スケールの関係

スケール  $L_x$  を柔軟植生と剛体植生の全ケースについて比較した。両植生モデルにおいて植生密度が小さくなると植生配置間隔が大きくなり、大規模渦が発達しやすくなって  $L_x$  が増加すると考えられるが、 $\phi < 0.034$  では  $L_x$  が減少傾向に転じている。これは植生密度が  $\phi = 0.034$  より小さくなると、植生層内外の流速差が小さくなって大規模組織渦が発達しなくなるためだと思われる。特に柔軟植生では  $\phi = 0.034$  は揺動状態 Monami と Swaying の遷移領域に対応しており、興味深い。柔軟植生の値が剛体植生よりも小さくなっているのは、柔軟植生が折れ曲がることで渦スケールが小さくなるためだと考えられる。

Raupach ら (1996)<sup>3)</sup> は純混合層的な特性を示す植生流れではせん断スケール  $L_s = U(y=h) / (dU/dy)_{y=h}$  と組織構造の波長  $L_x$  の間に次の比例関係式が成立することをせん断不安定性理論より導いた。

$$L_x = mL_s \quad (4)$$

図-12 に  $L_s$  と  $L_x$  の比較を示す。植生密度が大きいケース (Monami) では線形関係  $L_x = 3.0L_s$  が成立しており、せん断不安定性メカニズムをもつ。本研究の  $m$  の値が大気植生<sup>3)</sup> に比べて小さくなるのは水面によって大規模渦の発達が抑制されるためだと考えられる<sup>9)</sup>。植生密度が小さいケースでは  $L_x = 3.0L_s$  からずれており、混合層との類似性は弱くなっている。この傾向は図-11 の結果とも一致しており、注目される。

#### 4. 結論

本研究では植生密度を系統変化させて柔軟植生流れを対象に PIV 計測を行い、植生の揺動に及ぼす植生密度の影響や組織渦構造の瞬間特性について考察した。得られた知見をまとめると以下のとおり

である。

- 1) 植生密度が小さくなると柔軟植生が大きくたわみ、主流速分布の変曲点が下方に移動することがわかった。
- 2) スペクトル解析から Monami ケースでは柔軟植生の揺動の位相が一致しており、植生が組織的に揺動することを評価できた。
- 3) Monami ケースについて Adrian ら<sup>10)</sup> の手法による Zone 分けを行った結果、植生境界部付近で Zone 境界が現れた。また Zone 境界部で Ejection や Sweep など組織乱流が発生し、それらが大規模組織渦を形成していることがわかった。
- 4) 組織渦の長さスケールから植生密度が小さくなると大規模な組織渦が発達しなくなる。

#### 参考文献

- 1) 井上栄一、穂波の研究, 1 穂波の機構と特性, 農業気象, 111号, pp.18-22, 1955
- 2) 室田明・福原輝幸: 水生植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第338号, pp.97-103, 1983.
- 3) Raupach, M. R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y (1996): Coherent Eddies and Turbulence in Vegetation Canopies: The Mixing-Layer Analogy, *Boundary-Layer Meteorology.*, Vol.78, pp.351-382.
- 4) Nepf, H.M (1999): Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent, *Water Resources Research*, Vol.35/No.2, pp.479-489
- 5) 田村仁・灘岡和夫: 可撓性に着目した藻場キャノピー周辺の流動・乱流構造に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.341-345, 2002.
- 6) 辻本剛三・山田浩之・柿木哲哉・日下部重幸: 画像計測による海草周辺の水理特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1091-1095, 2003.
- 7) Velasco, D., Bateman, A. Redondo, J. and Demedina, V. (2003): An open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization over flexible vegetated linings, *Flow Turbulence and Combustion*, Vol.70, pp.69-88.
- 8) Poggi, D., Porpotato, A. and Ridolfi, L. (2004): The Effect of Vegetation Density on Canopy Sub-layer Turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 111, pp.565-587, 2004.
- 9) Nezu, I and Sanjou, M. (2008): Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows, *Journal of Hydro-environment Research* (to be published)
- 10) Adrian, R.J., Meinhart, C.D. and Tomkins, C.D. (2000): Vortex Organization in the Outer Region of the Turbulent Boundary Layer, *J. of Fluid Mech*, Vol. 422, pp.1-54.

(2008.9.30受付)