

柔軟植生の揺動が流れ抵抗および乱流構造 に与える影響に関する研究

EFFECTS OF WAVING MOTION OF FLEXIBLE VEGETATION ON FLOW RESISTANCE AND TURBULENCE STRUCTURE IN OPEN-CHANNEL FLOW

岡本隆明¹, 瀬津家久², 片山愛来³
Takaaki Okamoto, Iehisa Nezu and Aki Katayama

¹学生員, 日本学術振興会 特別研究員

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)

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 (同上)

Aquatic plants are fundamental components of a natural water environment and the current environmental river management prefers to preserve natural wetland and floodplain vegetation, although a lot of aquatic plants have been removed to prevent water disaster in actual rivers. In such vegetated open-channel flows, both the geometry of the vegetation elements (shape, size, flexibility and vegetation density) and the turbulence characteristics of the flow affect the hydrodynamic resistance significantly. So, turbulence measurements were conducted for rigid and flexible vegetated open-channel flows by using PIV/PTV techniques. As the results, the flow resistance due to vegetation was compared for rigid and flexible vegetations. Furthermore, the hydro-mechanic interaction between flow and flexible plant motion was analyzed and discussed.

Key Words : *flexible vegetations, flow resistance, waving motion, PIV*

1. はじめに

近年, 河床低下や低水護岸の設置に伴い氾濫原の乾燥化が進み, そこに生育する植生種が減少している¹⁾. これらを保全していくためには水辺環境に合った植生種の選定, 外来種の駆除など人為による適切な管理が欠かせないため, 開水路植生流れの流れ構造を解明することは河川工学上重要である. 特に実河川植生は柔軟性を有し, 流水に対して変形することで植生粗度の抵抗則や乱流構造がどのように変化するのかが興味深いテーマである.

植生流れの研究はこれまで多くの研究者によって行われている. Finnigan (1979)²⁾は小麦畑をホットフィルム風速計を用いて現地計測し, 穂波現象と呼ばれる大気植生の組織的揺動について考察した. また植生先端部で発生する組織渦構造が植生内部への物質・運動量輸送を支配していることを明らかにした. 辻本・北村(1998)³⁾は剛な植生と柔軟植生を対象に模型実験, 数値解析を行い, 植生の変形効果によって流れの抵抗が減少することを示した. さらに実植生の抵抗則, 河床に作用するせん断応力の評価

法を提案している.

Carolloら(2005)⁴⁾は柔軟植生場を超音波流速計(ADV)を用いて流速計測し, 植生密度が流れ抵抗に与える影響を調べた. また彼らは植生が倒伏状態(*Prone*)になるときの摩擦速度を限界摩擦速度と定義し, 植生密度, 剛性との関係式を求めた.

Peraltaら(2008)⁵⁾は種々の剛性, 植え付け密度の植生を用いた水路実験においてADVによる乱流計測を行い, 柔軟植生流れでは植生内部のレイノルズ応力が大きく低減されるという結果を得ている. なお最近までの河川植生の研究についてはNepf & Ghisalberti (2008)⁶⁾, Nezu & Sanjou (2008)⁷⁾が詳細なレビューを行っている.

このように植生開水路流れについての研究は国内外で数多く行われているが, 植生の揺動状態の判定条件などについては十分な知見が得られていない. また柔軟植生の先端変位の瞬間値を計測した例は少なく, 植生の揺動と組織渦構造の相互作用についても未解明点が多く存在する. そこで本研究では植生長さを変化させた5種類の柔軟植生モデルを用いて水路実験を行い, 柔軟植生と剛体植生の特性を

表-1 実験条件

Type	ϕ	H (cm)	h (cm)	h_d (cm)	H/h	U_m (cm/s)	U_r (cm/s)	λ_f	R_D	P_r	Classification of plant motion
R				-		10.0	2.4	-	15000	0.08	Rigid(R)
				-		12.0	2.9	-	18000	0.10	
				-		15.0	3.5	-	22500	0.12	
				-		17.0	3.9	-	25500	0.14	
				-		20.0	4.5	-	30000	0.16	
				-		25.0	5.4	-	37500	0.21	
F5		15.0	5.0	4.9	3.0	10.0	2.4	91.2	15000	0.08	Swaying(S)
				4.6		12.0	2.8	63.3	18000	0.10	
				4.4		15.0	3.4	40.5	22500	0.12	
				4.2		17.0	3.9	31.6	25500	0.14	Monami(M)
				4.0		20.0	4.4	22.8	30000	0.16	
				3.6		25.0	5.3	14.6	37500	0.21	
F7	0.061	21.0	7.0	6.8	3.0	30.0	5.9	10.1	45000	0.25	Monami(M)
				6.3		35.0	6.3	7.4	52500	0.29	
				6.0		10.0	2.3	33.2	21000	0.07	Swaying(S)
				5.8		12.0	2.7	23.1	25200	0.08	
				5.6		15.0	3.3	14.8	31500	0.10	
				5.1		17.0	3.6	11.5	35700	0.12	Monami(M)
F9		27.0	9.0	8.3	3.0	20.0	4.0	8.3	42000	0.14	
				8.0		25.0	4.5	5.3	52500	0.17	
				7.5		30.0	4.7	3.7	63000	0.21	
				7.1		35.0	5.0	2.7	73500	0.24	Swaying(S)
				6.5		10.0	2.1	15.6	27000	0.06	
				6.0		12.0	2.5	10.9	32400	0.07	
F10.5		31.5	10.5	5.4	3.0	15.0	2.9	7.0	40500	0.09	Monami(M)
				5.0		17.0	3.1	5.4	45900	0.10	
				4.6		20.0	3.3	3.9	54000	0.12	
				9.6		25.0	3.6	2.5	67500	0.15	Prone(P)
				8.5		10.0	2.0	9.8	31500	0.06	
				8.1		12.0	2.3	6.8	37800	0.07	

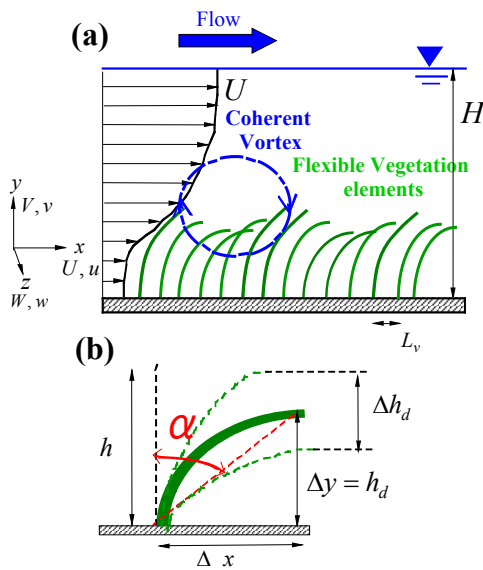


図-1 柔軟植生流れの模式図

比較した。さらに、PIVとPTV法を併用することで柔軟植生の変位と瞬間流速を同時計測し、植生の揺動が抵抗則や運動量メカニズムに与える影響を明らかにする。

2. 柔軟植生の揺動の支配パラメーター

図-1に柔軟植生流れの模式図を示す。 H は全水深、 h は植生の直立高さ、 h_d は植生の折れ曲がり高さである。Ghisalberti & Nepf(2002)⁸⁾は柔軟植生の揺動を支配するパラメーターとして無次元パラメーター $\lambda_f = F_R / F_D$ を提案した。柔軟植生の折れ曲がりに対する反発力 F_R は次式で計算される。

$$F_R \sim \frac{M_I}{h} \sim \frac{J}{h} \left(\frac{\Delta x}{h_d^2} \right) \sim \frac{J}{h} \left(\frac{h \sin \alpha}{h^2 \cos^2 \alpha} \right) = \frac{J}{h^2} f_1(\alpha) \quad (1)$$

M_I は慣性モーメント、 $J(=EI=Ewt^3/12)$ は曲げ剛性、 Δx は植生の流下方向変位である。反発力 F_R と流体

の植生抗力 F_D との比 λ_f は次式のように表される。

$$\frac{F_R}{F_D} \sim \frac{(J/h^2)f_1(\alpha)}{\rho_w A C_D \bar{U}^2} \sim \frac{Et^3 f_1(\alpha)}{h^3 \bar{U}^2 \rho_w \cos \alpha C_D} \quad (2)$$

$$\lambda_f \equiv \frac{Et^3}{h^3 \bar{U}^2} \quad (3)$$

$\bar{U}$ は植生内部の平均流速、 b は植生モデルの幅、 t は植生モデルの厚さ、 $A(=bh \cos \alpha)$ は植生の断面積。式(3)から植生モデルの長さ h と平均流速 $\bar{U}$ が植生の揺動における重要なパラメーターであると考えられる。そこで本研究では柔軟植生モデルの長さおよび断面平均流速 $\bar{U}$ を変化させることで、植生の揺動振幅、振動数が流れ場に与える影響を調べる。

3. 実験装置と計測方法

実験に用いた水路は全長10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型水路である。等流状態になるように水路勾配を変化させている。詳細は前報⁹⁾を参照したい。 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 $\tilde{w}$ の乱れ変動成分を示す(レイノルズ分解法)。柔軟植生モデルはOHPシートを幅 $b=8\text{mm}$ 、厚さ $t=0.1\text{mm}$ の短冊状に切ったもので、植生長さを $h=50, 70, 90, 105\text{mm}$ の4通りに変化させている。剛体植生⁹⁾は高さ50mm、幅8mm、厚さ1mmの亚克力板で作成した。水路底面に計測部を含めて8mの区間にわたって植生模型を正方格子状に配置した。

本研究ではPIVとPTV法を併用して瞬間流速 $(\tilde{u}, \tilde{v})$ と柔軟植生の先端変位 $(\Delta x, \Delta y)$ を同時計測した。瞬間流速ベクトルの算出にはPIV法を用いた。3WのAr-ionレーザーを光源として水路上方から厚さ2mmのレーザーライトシート(LLS)を照射し、側方に設置した高速度CMOSカメラ(1024×1024

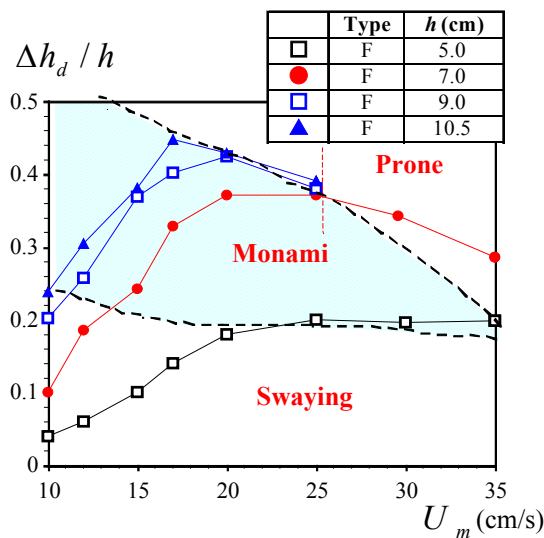


図-2 植生の揺動状態区分

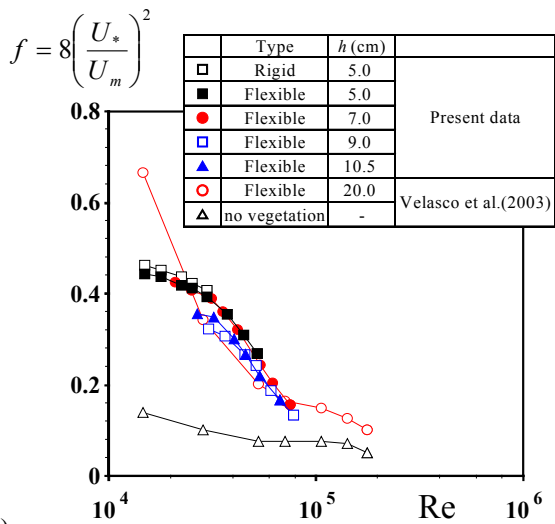


図-4 柔軟・剛体植生モデルの摩擦抵抗係数

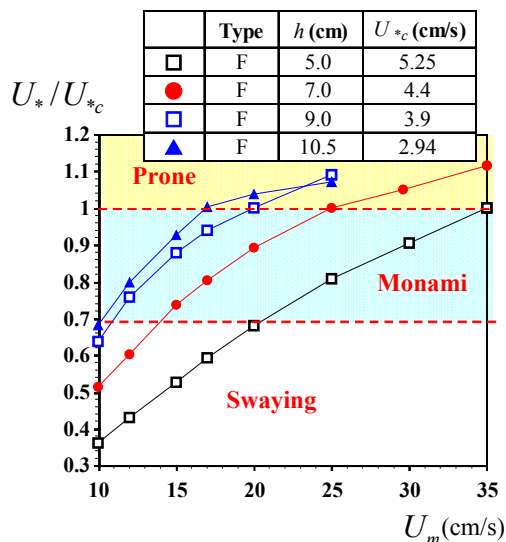


図-3 限界摩擦速度による植生の揺動の判定条件

pixel) でデジタル撮影した。LLSの照射位置は植生要素間⁹⁾である。トレーサーには粒径100 μ m、比重1.02のポリスチレン粒子を用いた。カメラに40Hzの外周トリガーを与えて、500Hzのフレームレートで2枚の連続画像のペアを60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30cm $\times$ 30cm領域である。また柔軟植生の先端に蛍光球(直径1mm)を接着し、LLSを照射することで先端変位をPTV法で同時計測した。

水理条件は表-1に示すように植生モデルの長さhを系統変化させ、5種類の植生モデルを用いて計27ケース設定した。植生密度 ϕ 、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 ϕ (= $ab:a$ は単位体積あたりの植生の遮蔽面積⁶⁾、 b は植生モデルの横幅)で算出した。表中の右端の欄は植生の揺動状態を表しており、Swaying(S)は植生が個々に揺動

する状態、Monami(M)は植生が組織的に揺動する状態で、Prone(P)は植生が倒伏した状態を示す。また表中には式(3)の揺動パラメーター λ_f を示しており、 $\lambda_f < 10-15$ で藻波が発生することがわかった。

4. 実験結果と考察

(1) 柔軟植生の揺動状態の判定

上述のように柔軟植生は水理条件によって揺動状態が変化することが知られている。Carroloら(2005)⁴⁾は限界摩擦速度 U_c を目視から求め、この U_c を超えたケースでは植生が倒伏状態(Prone)になるとした。彼らの実験では植生の揺動状態は目視によって判定しているため、定量的な判定条件は得られていない。そこで本研究では揺動状態の領域区分をまず行う。図-2に各植生モデルの揺動の振幅 $\Delta\bar{h}_d$ をプロットした。断面平均流速 U_m の増加とともに植生に作用する抗力 F_D が大きくなるため、 $\Delta\bar{h}_d$ が増加している。しかし $\Delta\bar{h}_d$ はある平均流速 U_m でピークに達したのち減少に転じる傾向がみられ、興味深い。これは植生が大きく折れ曲がり柔軟植生の反発力 F_R が大きくなることで植生の揺動が抑制されたためであり、そこで植生の揺動状態が変化している。本研究では $\Delta\bar{h}_d$ がピークをもつケースの摩擦速度 U_* を限界摩擦速度 U_c とした。

図-3には各植生モデルの摩擦速度 U_*/U_c をプロットした。摩擦速度 U_* はレイノルズ応力のピーク値から評価した⁹⁾。図-2で考察したように U_c を超えたケースでは植生の揺動 $\Delta\bar{h}_d$ が抑制されるため、植生は倒伏状態(Prone)と判定される。また個別にたわむ状態(Swaying)と組織的に揺動する状態(Monami)を目

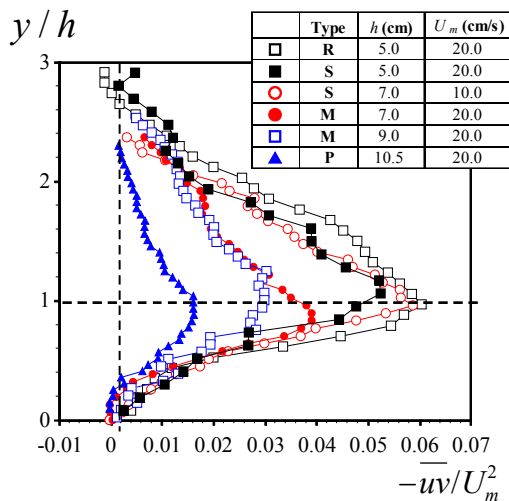


図-5 レイノルズ応力分布

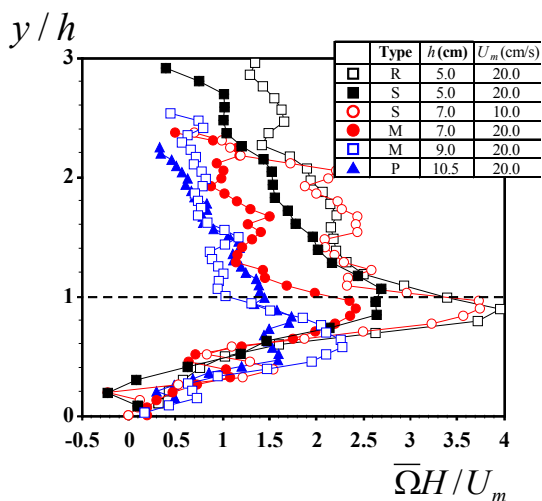


図-7 時間渦度鉛直分布

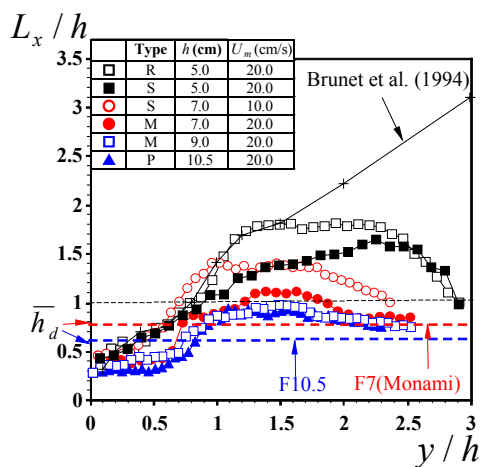


図-6 長さスケールの比較

視と後述するスペクトル解析によって判定し、判定基準値を $U_* / U_{*c} = 0.7$ とした。また図-3には各植生モデルの限界摩擦速度 U_{*c} の値を別枠に示した。限界摩擦速度 U_{*c} は植生長さ h が長くなると小さくなる傾向が得られ、注目される。これは植生が長くなると植生が大きく折れ曲がり、MonamiやProne状態になりやすいためである。

(2) 柔軟植生の揺動が流れ場に与える影響

図-2から植生長さによって大きく揺動状態が異なることがわかる。次のステップとして、これら揺動特性が流れ抵抗則や運動量輸送メカニズムにどのような影響を与えているのかを検証する。図-4には摩擦抵抗係数 $f = 8(U_* / U_m)^2$ とレイノルズ数 Re の関係を示した。比較のため図中にはVelascoら(2003)¹⁰⁾の柔軟植生のデータを併示している。全体の傾向として Re の増加に伴い、摩擦抵抗係数 f が減少する右下りの傾向がみられる。本実験データはVelascoら(2003)¹⁰⁾と同オーダーで、レイノルズ数の小

なケースで剛体植生と柔軟植生の抵抗係数 f の値の差があまりみられないのは、流速が小さく柔軟植生が折れ曲がらないためである。これに対してレイノルズ数が増加すると、剛体植生と柔軟植生の差が大きくなり、また植生長さ h が増加すると f が減少する傾向がみられる。特に図-3で定義したProneケースでは抵抗係数 f が小さく、滑面の値と同程度であり、注目される。この結果は辻本・北村(1998)³⁾やNepf & Ghisalberti (2008)⁶⁾と一致しており、柔軟植生が折れ曲がると流速抵抗は減少することがわかった。

図-5には各植生モデルのレイノルズ応力分布 $-uv$ を比較した。値は断面平均流速 U_m で無次元化している。剛体植生やSwayingケースでは植生先端部で鋭いピークをもっており、既往研究の剛体植生の結果⁶⁾と一致する。これに対してMonamiやProne状態では緩やかなピークをもち、 $-uv$ のピークの値も小さくなっており、興味深い。この結果から柔軟植生流れで揺動が大きくなると、植生内部と外部との運動量輸送が小さくなることがわかる。このことから柔軟植生が折れ曲がることで植生内部への運動量輸送が遮蔽されることが示唆される。

(3) 柔軟植生流れの組織渦構造

図-5から柔軟植生場は剛体植生とは異なった運動量輸送メカニズムを有しており、大規模組織渦構造も異なると考えられる。以下では未解明点が多く存在する柔軟植生の組織渦構造を調べ、剛体植生と比較する。図-6に各植生モデルにおける渦の流下方向長さスケール L_x の鉛直分布を比較した。図中にはBrunetら(1994)¹¹⁾の大気植生の結果を併示した。PIV計測では渦の長さスケール L_x は凍結乱流仮定を使用しなくても流速成分の相関値を積分して直

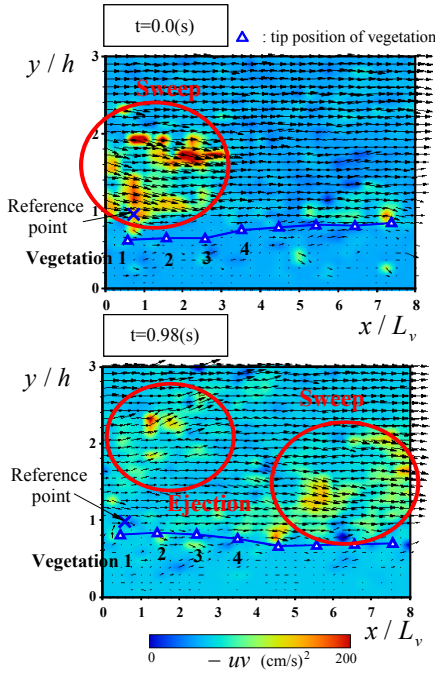


図-8 瞬間ベクトルと柔軟植生($h=7\text{cm}$)の揺動

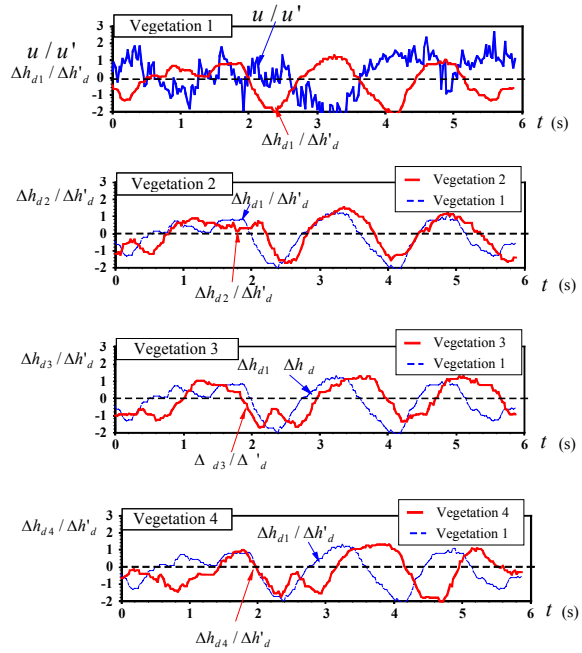


図-9 計測領域内の植生の先端変位の時系列

接計算できる。

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

図から植生内部では組織渦の発達が抑制されるため L_x は小さくなる。植生外部では L_x は増加し、 $L_x/h=1.5$ 程度の大きさをもつ。これは Brunet ら (1994)¹¹⁾ や Nezu & Sanjou (2008)⁷⁾ の結果と一致する。また剛体植生の L_x 値が柔軟植生よりも大きくなるという結果が得られ、注目される。これは柔軟植生が折れ曲がることで $\bar{h}_d$ が小さくなり、渦スケールが減少するためと考えられる。

Nepf & Ghisalberti (2008)⁶⁾ は組織渦の回転速度に言及しているが、具体的な解析データは得られていない。そこで本研究では図-7にPIVデータから瞬間渦度 Ω の時間平均値 $\bar{\Omega}(y)$ を計算し、剛体植生と柔軟植生の渦の回転強度と見なして比較した。図から剛体植生の時間平均渦度 $\bar{\Omega}(y)$ が柔軟植生の値より大きくなっており、剛体植生の組織渦の回転強度が大きくなることが示唆された。これは図-4で考察したように剛体植生の方が流体抵抗が大きく、植生層内外の流速差 ΔU が大きくなるためである。この結果は図-5の $-uv$ や図-6の L_x とも対応しており、柔軟植生場では剛体植生に比べて組織渦のスケールが小さくなることで植生層内外の運動量交換が抑制されることがわかる。この特性は Nepf & Ghisalberti (2008)⁶⁾ の結果と一致する。

(4) 植生の揺動特性

本研究では植生先端変位と瞬間流速ベクトルを

同時計測しているため、植生の揺動と組織渦の関係を解明することが可能である。図-8は Monami ケース ($h=7\text{cm}$, $U_m=20\text{cm/s}$) の瞬間流速ベクトル場 ($\tilde{u}, \tilde{v}$) を時間を変化させて示したものである。カラーコンターは瞬間レイノルズ応力 $-u(t)v(t)$ の分布を示す。また図中には柔軟植生の先端位置 ($\Delta x, \Delta y$) を Δ 印で併示した。 $t=0$ (s) では高速流の下降ベクトル Sweep ($u>0, v<0$) が発生し、Sweep 発生領域において柔軟植生が組織的にたわんでいるのが観察され、注目される。 $t=0.98$ (s) では Sweep が移流され、植生の揺動が流下方向に伝わっている。また上流側では低速流の上昇ベクトル Ejection ($u<0, v>0$) が観察された。

図-9には図-8の基準点における主流速の乱れ変動成分 $u \equiv \tilde{u} - U$ と図-8の各植生素子 i ($i=1, 2, 3, 4$) の先端変位 Δh_{di} の時系列データを示す。値はそれぞれ変動強度成分で無次元化している。高速流の発生時 ($u>0$) には植生がたわみ ($\Delta h_{d1}<0$)、低速流体の通過時 ($u<0$) には植生が起き上がっている ($\Delta h_{d1}>0$) のがみられる。このように植生先端変位 $\Delta h_d(t)$ と瞬間流速 $u(t)$ には負の相関があることがわかる。また下流側の植生 ($i=2, 3, 4$) の揺動の時系列から流下方向距離の近い植生の揺動どうしの位相はほぼ一致しており、植生は組織的に揺動している。植生どうしが流下方向に離れると位相はずれていくが、植生変位のピークが流下方向に伝わっているのがわかる。図-8と図-9の結果から Sweep や Ejection のような組織乱流構造が移流されることで植生の組織的揺動である藻波 (Monami) 現象が発生することがわかる。

植生の組織的揺動を定量評価し、図-2の Monami

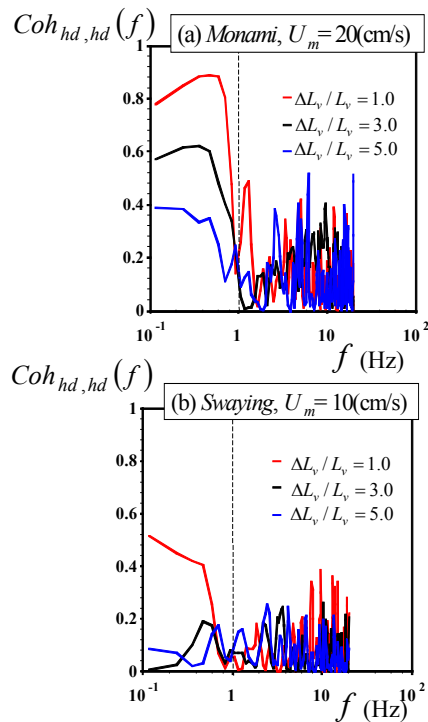


図-10 柔軟植生($h=7\text{cm}$)の先端変位のコヒーレンス

とSwaying状態を判定する. 図-10にはMonamiケース($h=7\text{cm}$, $U_m=20\text{cm/s}$)とSwayingケース($h=7\text{cm}$, $U_m=10\text{cm/s}$)における2つの植生先端変位 h_d のコヒーレンス $Coh_{hd,hd}(f)$ を示す.

$$Coh_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (5)$$

$S_{xy}(f)$ は変動量 $x(t)$ と $y(t)$ のクロススペクトル, 図中の $\Delta L_v / L_v$ は2本の植生間の流下方向距離を表している. Monamiケースでは流下方向位置 $\Delta L_v / L_v$ によらず1Hz以下の低周波帯でコヒーレンスは大きな値($Coh_{hd,hd} > 0.4$)をとり, 植生要素が群体的に揺動していることがわかった. これに対してSwayingケースでは流下方向に離れるにしたがって植生要素間のコヒーレンス $Coh_{hd,hd}(f)$ が大きく減少し, 植生が個々に揺動していることがわかる. これらの結果を用いると柔軟植生の揺動状態のMonamiとSwayingを判定することができ, 注目される結果である.

5. 結論

本研究では植生長さを变化させた柔軟植生モデルを用いてPIV計測を行い, 柔軟植生の揺動状態の判定基準, 柔軟性が流れ抵抗に及ぼす影響について考察した. 以下に得られた知見をまとめて示す.

1) 柔軟植生流れでは植生が大きくたわむため, 剛

体植生と比べて流れ抵抗が小さくなることがわかった.

- 2) 摩擦速度を用いて植生の揺動状態の判定基準を提案した. MonamiとSwayingの判定については植生要素の先端変位間のコヒーレンスを用いて, 植生の組織的揺動を定量評価した.
- 3) 柔軟植生場では組織渦の発達が抑制され, 植生内部, 外部間の運動量交換が小さくなる.
- 4) 柔軟植生変位と瞬間流速ベクトルを同時計測することで, 組織乱流構造が流下方向に移流され藻波現象が発生することがわかった.

参考文献

- 1) 荒木祐二 (2007): 熱帯氾濫原における植生インベントリーと植生資源利用に関する研究, 技術マネジメント研究, Vol.6, pp.35-49.
- 2) Finnigan, J. (1979). Turbulence in waving wheat: Mean statistics and Honami. *Boundary-Layer Meteor.* 16, 181-211.
- 3) 辻本哲郎, 北村忠紀(1998): 柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究, 土木学会論文集, No.607/II-45, pp.29-44.
- 4) Carollo, F.G., Ferro, V. and Termini, D.(2005): Flow Resistance Law in Channel with Flexible Submerged Vegetation, *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, pp.554-564.
- 5) Peralta, G., van Duren, L.A., Morris, E.P., and Bouma, T.J. (2008): Consequences of shoot density and stiffness for ecosystem engineering by benthic macrophytes in flow dominated areas: a hydrodynamic flume study, *Marine Ecology Progress Series*, Vol.368, pp.103-115.
- 6) Nepf, H.M., and Ghisalberti, M. (2008): Flow and transport in channels with submerged vegetation, *Acta Geophysica*, Vol.56, No.3, pp.753-777.
- 7) Nezu, I. and Sanjou, M. (2008): Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows, *Journal of Hydro-Environmen Research*. IAHR, Vol.2, pp.62-90.
- 8) Ghisalberti, M. and Nepf, H. (2002). Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows. *J. Geophys. Res.* Vol.107(3), pp.1-11.
- 9) 岡本隆明, 瀬津家久: 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, 土木学会水工学論文集, Vol.53, pp.919-925, 2009.
- 10) 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.
- 11) Brunet, Y., Finnigan, J.J. and Raupach, M.R. (1994). A wind tunnel study of air flow in waving wheat: Single-point velocity statistics. *Boundary-Layer Meteor.* Vol.70, pp.95-132.

(2009.9.30受付)