

徳山工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○木山和俊  
徳山工業高等専門学校 正会員 渡辺勝利  
正会員 佐賀孝徳

## 1. はじめに

近年、環境問題への関心が高まる中で河川についても1997年の河川法改正以降、良好な河川環境をつくるための整備、保全が推進されている。河川に生息する多くの生物は河道内の水草、樹木といった植生を拠り所としており、植生は河川環境において重要な役割を果たしている。その一方で、植生は自然災害である洪水時の水の流れに大きく影響しており、平水時においても実河川では植生の有無によって流れの流速や水深が大きく変わることが知られている。たとえば、河川堤内における植生帯は流速を低減することにより堤防等の洗掘や侵食被害を防止する機能を有している。また、同時に洪水時には植生の繁茂によって水位が上昇し、洪水の流下を阻害していることから、植生を伴う水の流れ構造の解明は河川防災、環境保全の双方において重要であると考えられる。

これまでも多くの研究者によって植生を伴う流れ場に関する様々な研究がなされ、重要な知見が得られている。植生を伴う開水路流れには固有の流れが存在することが明らかにされ、植生が流れ場の乱れを増大あるいは減衰させる機能を有していることが注目されている<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。その機能には流れ場に形成される組織構造が密接に関わっていることが指摘されているが、既往の研究ではその実体や詳細な時空間特性、力学特性、植生の挙動との相互関係については十分な解明に至っていないと思われる。

以上を踏まえて、本研究では流れによって変形しない直立性の植生模型を水路床全体に設置した開水路流れの流速計測、流れの可視化実験を行い、流速分布および組織構造の特徴および両者の相互関係について検討を行った。

## 2. 実験装置および方法

実験には、透明アクリル樹脂板製の滑面直線開水路

(長さ10m、幅60cm、高さ15cm、水路勾配1/1000)を用いた。図-1に示す通り、開水路床に塩化ビニル板(長さ2.0m、幅60cm、厚さ1.5cm)を4区間計8.0m設置し、その壁面上に、図-2に示すような植生模型(塩化ビニル溶接棒：直径3mm、長さ40mm)を流れ方向、横断方向ともに24mm間隔で設置した。

実験では、図-3に示すようにPTV(Particle Tracking Velocimetry)による流速計測、蛍光染料水溶液注入による流れの内部流況の可視化を行った。

PTVでは、トレーサーに平均粒径100 $\mu\text{m}$ 、比重1.04のリルサン粒子を使用し、照明にはスライドプロジェクター(1kw)の厚さ2mmのスリット光膜を用い、撮影にはハイビジョンデジタルビデオカメラ(Sony HDR-FX1000)を使用した。PTVの解析には解析ソフト「Flow PTV」((株)ライブラリ)を用いた。撮影した映像を1/30秒ごとに1枚の画像として取り込み上記の解析ソフトで瞬時流速成分を求め統計処理することで平均流速、乱れの分布を求めた。

流れの内部流況の可視化では蛍光染料水溶液を注入し、同プロジェクターの照明を用いて縦断、横断面視を同カメラで撮影した。

実験条件は表-1に示すとおりである。本研究では、植生を伴う乱流特性に及ぼす水深変化に注目した。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 流速分布特性および乱れ特性

図-4には、植生模型中央 $z=12\text{mm}$ における水深変化に伴う流速分布を示している。(a)の平均主流速分布においては、植生の高さ( $h$ )および植生位置での流速( $U_h$ )で無次元表示している。大局的な特徴としては、植生模型先端の4cm付近で顕著なせん断層( $dU/dy$ )が形成される混合層型の流速分布に類似している。これに加えて底壁面付近で局所的な高速域が形成されており、本流速分布は、複数の変曲点を有するという特徴がある。これより、上述の混合層型の流速分布特性は、水

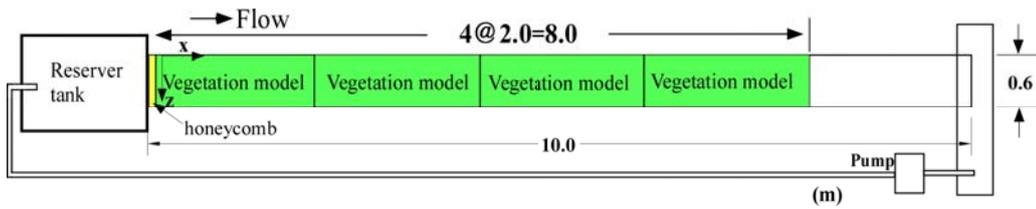


図-1 実験水路図

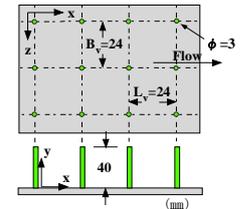


図-2 植生模型配置図

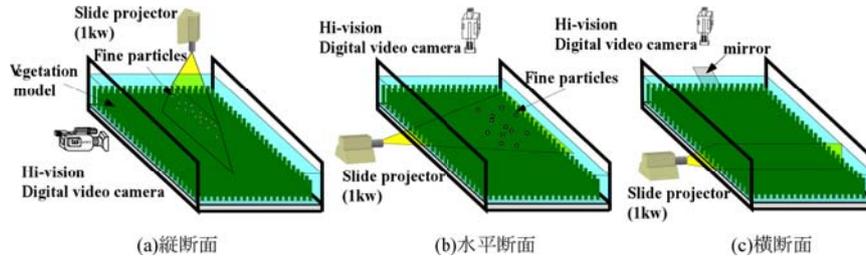


図-3 実験方法概略

表-1 実験条件

Case	H(cm)	h(cm)	H <sub>up</sub> (cm)	H/h	U <sub>m</sub> (cm/s)	Q(cm <sup>3</sup> /s)	Re	Fr
A	12.0	4.0	8.0	3.0	7.01	5044	6445	0.06
B	8.0		4.0	2.0	7.03	3376	4463	0.08
C	5.0		1.0	1.25	7.12	2136	2660	0.10

深が小さくなるとその傾向が弱くなるが、壁面付近の局所的な加速域の特徴は逆に強まるように思われる。(b)の鉛直方向流速分布では水深が大きいCase A(H=12cm)、Case B(H=8cm)においては、植生以下で上昇、植生以上では下降の傾向が窺える。一方、水深が小さいCase C(H=5cm)では、植生以下の領域において壁面側の $y/h < 0.7$ の範囲では下降、それ以上では上昇の傾向を示している。(c)、(d)の流れ方向、鉛直方向の乱れ強度分布では、乱れ強度を摩擦速度 $U_*$ で無次元表示している。いずれのケースにおいても植生境界で乱れ強度の最大値が生じている。また、水深が小さいCase Cでは、植生内での乱れ強度が大きい傾向が認められる。(e)には摩擦速度で無次元表示したレイノルズ応力分布を示している。本図より、いずれのケースにおいても顕著なせん断層が生成される植生境界においてレイノルズ応力の最大値が生じていることが明瞭である。(f)はこの最大レイノルズ応力が生ずる位置での変動流速の4象限からのレイノルズ応力への寄与率を示している。これより、4象限( $u > 0, v < 0$ )の寄与が最も大きく、次いで2象限( $u < 0, v > 0$ )の寄与が大きいことが明らかである。一般的に開水路乱流では2象限の寄与

が7割、4象限の寄与が3割となっていることから、本流れ場の特徴と考えられ、辻本ら<sup>2)</sup>もこの特徴について指摘している。

## (2) 組織構造の特徴

流速計測の鉛直方向レイノルズ応力分布特性から、植生境界では、鉛直方向の流体輸送が著しいことが推察される。流れの横断面視では、本流れ場では縦渦構造が形成され、それがejectionやsweepに寄与していることが推察された。図-5には、横断面視の経時変化を示している。 $T=0\text{sec}$ の破線で囲んで示した領域は、蛍光染料水溶液によって可視化された縦渦構造( $VS_A$ 、 $VS_B$ 、 $VS_C$ )である。縦渦構造の形成領域には矢印で示したような上昇流の形成が観察された。縦渦構造 $VS_A$ 、 $VS_B$ は $T=12/30\text{sec}$ において合体し、その横幅が水深H程度を有する構造 $VS_D$ に変化している。 $VS_C$ は時間経過とともにスケールが増大している。また、 $T=12/30\text{sec} \sim T=24/30$ においては、 $VS_D$ と $VS_C$ の境界に蛍光染料の存在しない領域が形成されている。この領域には破線矢印で示したような下降流が形成されることが観察された。縦渦構造によって生成される上昇流は、植生内

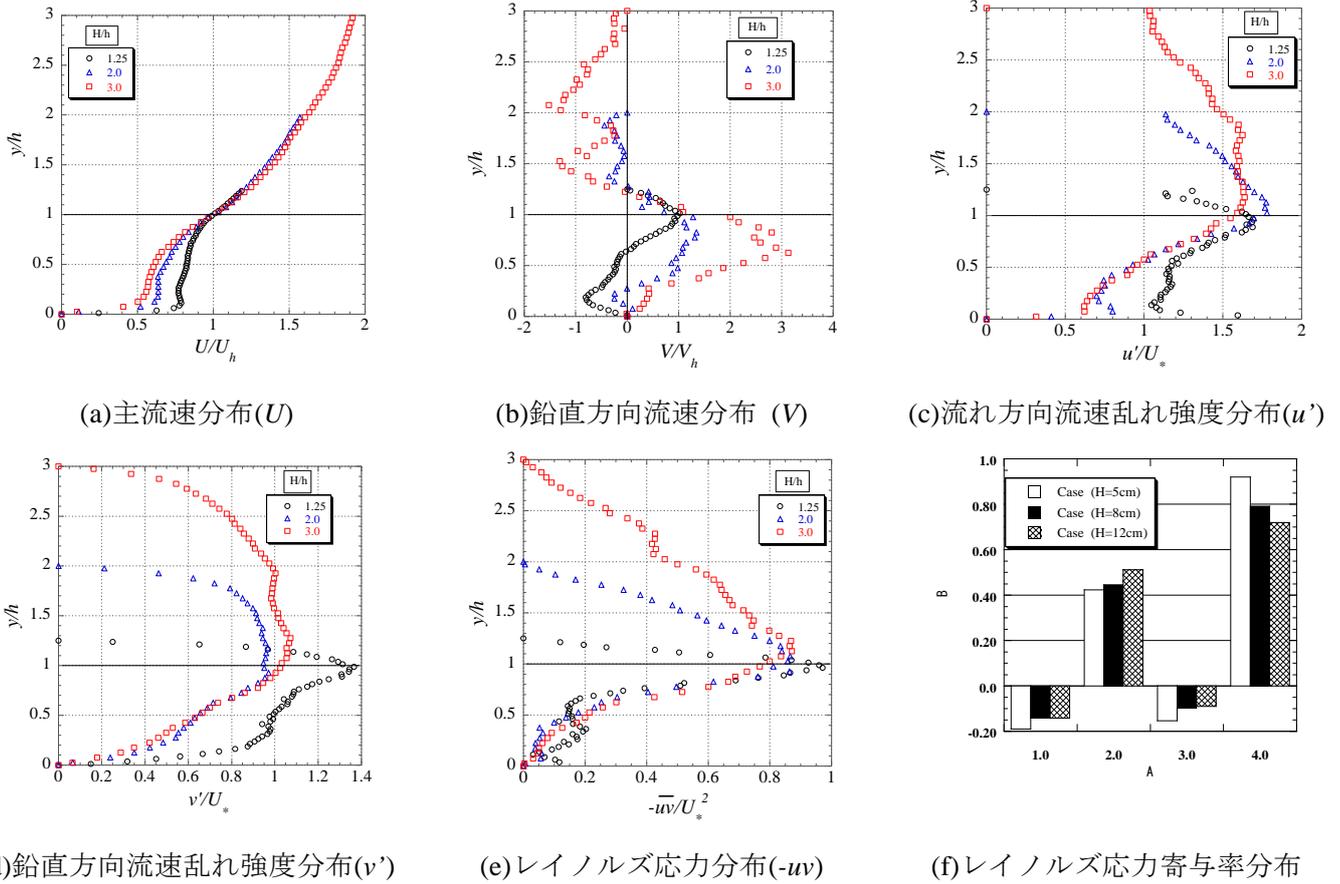


図-4 水深変化による流速分布の変化

の低速流体を水表面へ輸送する2象限の運動に相当し、他方、下降流は4象限の運動に相当すると考えられ、いずれにおいても、これらの縦渦構造が鉛直方向のレイノルズ応力の生成に重要な役割を果たしていることが推察される。

図-6は、植生模型の中央部 ( $z=12\text{mm}$ ) における縦断面視の経時変化を示している。本図では、上流の渦構造SWV1と下流に位置するSWV2が可視化されている。SWV1は流下に伴い、SWV2に乗り上げる様子が観察される。その際、両構造の境界には矢印で示したような強い下降流が形成され、それに伴いSWV2の背面角度が急になっていることが認められる。これは高速流体が下降する4象限の運動に相当しており、縦渦構造がその形成因となっていることが容易に推察されるが、これらの縦渦構造と瞬時速度情報の相互関係については今後の課題である。

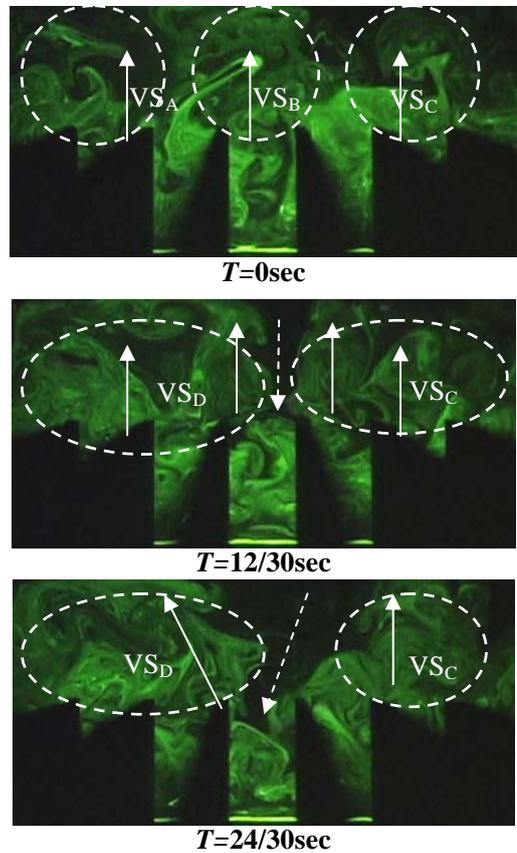


図-5 横断面流況の一例( $H=8\text{cm}$ )

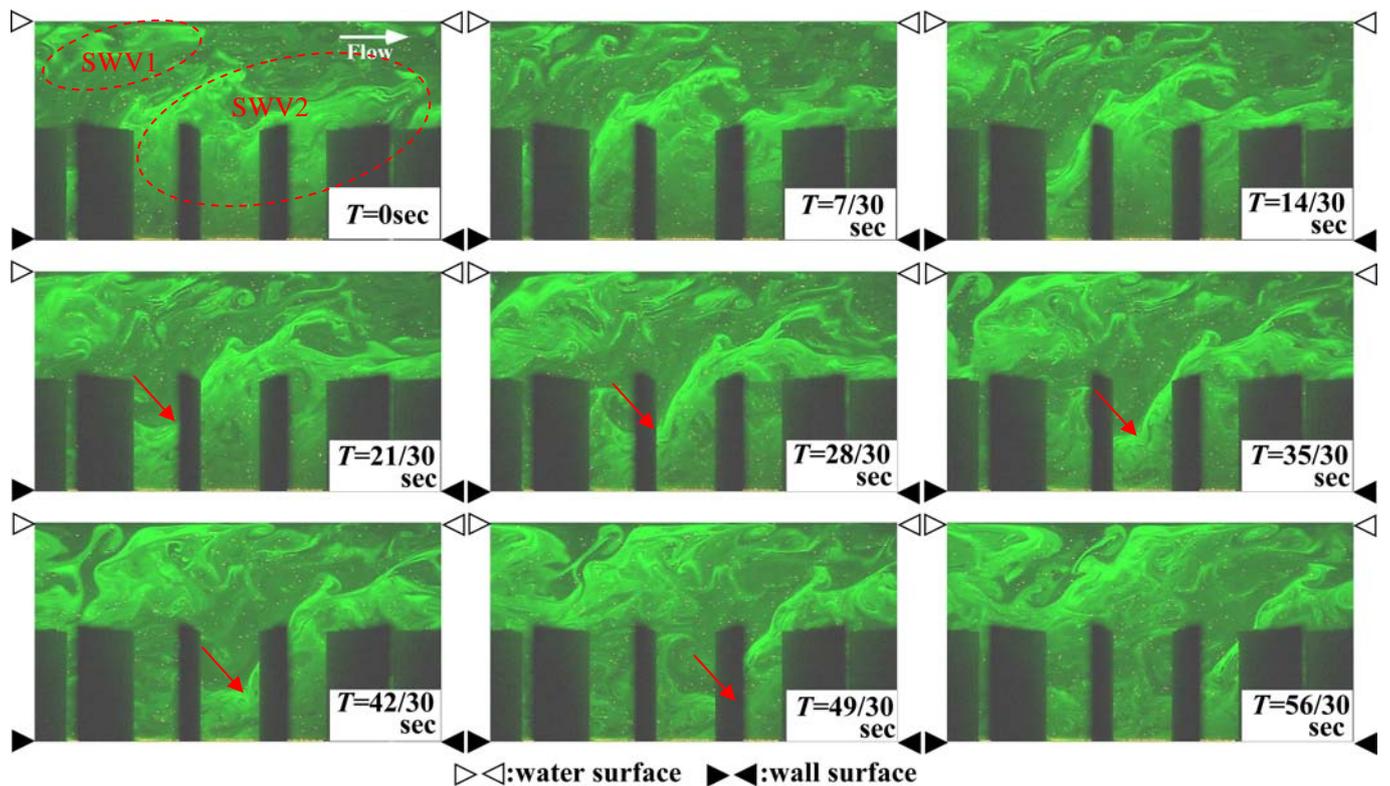


図-6 縦断面視経時変化

#### 4. おわりに

本研究では流れによって変形しない剛な植生模型を底壁面に設置した開水路流れの乱流特性を考察した。以下に本研究によって得られた結論を示す。

- (1) PTVによる流速計測から、植生模型を有する主流速分布は混合層型に類似し、また、植生粗度上および周辺では鉛直方向レイノルズ応力の大きな値が生ずることが明らかとなった。
- (2) 流れの可視化から、植生模型の内外において縦渦構造が形成されること、底壁面付近には固有の組織構造の存在が示唆された。本流れ場の縦渦構造はレイノルズ応力の生成に関する sweep, ejection に直接寄与することが推測された。

#### 参考文献

- 1) 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研究, 土木学会論文報告集, 第338号, pp.97-103, 1983.
- 2) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次, 北村忠紀: 直立性植物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, No.438/II-17, pp.31-40, 1991.

- 3) 岡本隆明, 禰津家久, 山上路生: 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, 水工学論文集, 第52巻, pp.739-744, 2008年2月.
- 4) 禰津家久, 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, pp.1135-1140, 2006年2月.