

徳山工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○安部一輝  
徳山工業高等専門学校 正会員 渡辺勝利  
徳山工業高等専門学校 正会員 佐賀孝徳

## 1. はじめに

河川法が改正されて以降、河川環境への関心が高まり、河川内の樹木や水草、その周辺に生息する生物への配慮を行った、多自然川づくりが推進されている。柔軟な植生は流れ場の水深、流速に大きく影響を与えており、それらには密度、スケールなどの条件が大きく関わっていることが知られている。実河川における植生は流速を減少させることで河床の洗掘や侵食を防止する機能も有している<sup>1)</sup>。しかし、洪水時においては、流水の抵抗としても働くことから、植生を伴う開水路流れの研究は、河川防災および、良好な河川環境の保全を進める上で重要と考えられる。

植生を伴う流れに関する研究はこれまでも数多くなされてきた。全水没植生流れでは、植生上層部の鉛直運動が顕著な領域と下層部の水平運動が顕著な領域に区分されることが明らかにされている<sup>2)</sup>。また、柔軟な植生を伴う開水路流れには、剛な植生を伴う開水路と異なった性質が存在することが明らかにされ、植生の揺動と流れ場の組織構造の間に相互作用があることが注目されている<sup>3)</sup>。その関係には流れ場に形成される縦渦構造が密接に関係していることも指摘されているが、既往の研究ではその実体や詳細な時空間特性、力学特性、柔軟植生の揺動が流れ場に与える詳細な影響については十分な知見に至っていない。

本研究では流れによって変形を起こす柔軟な植生模型を水路の底壁面に設置した開水路流れにおいて、流速計測、流れの可視化を用いて、流速分布特性および組織構造の特徴の検討を行った。

## 2. 実験装置および方法

本実験には、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(OHPシート:縦 60mm,横 10mm)を流れ方向に 20mm,横断方向に 10mm 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法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 $\mu$ 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流れの縦断面、横断面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。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 流速計測結果

図-4は、本実験のPTVから求めた流速結果である。これらの図においてはCaseA(H=12cm)における植生模型上、植生模型間のそれぞれの値を示している。(a)は、主流速分布( $U(y)$ )である。植生模型上の主流速分布の特徴としては、植生模型界面よりも底面側の領域で流速分布がほぼ一定で0に近い値を示した。しかし、これは長時間平均によって得られた結果であり、瞬時の速度場には(b)に示すように複雑な速度場の形成が認められた。植生模型間の主流速分布においては、界面より底面側の領域で2ヶ所の変曲点を有する特徴がみられた。植生模型上および植生模型間の両流速分布における重要な特徴として、植生模型先端の6cm付近で、顕著なせん断層の形成が認められる。

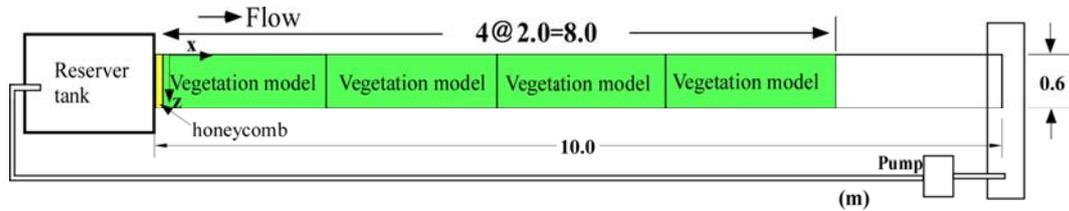


図-1 実験水路図

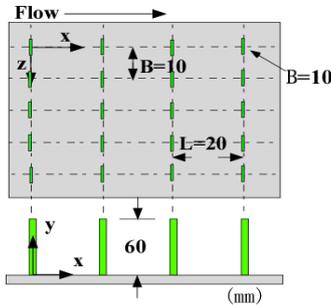


図-2 植生模型配置図

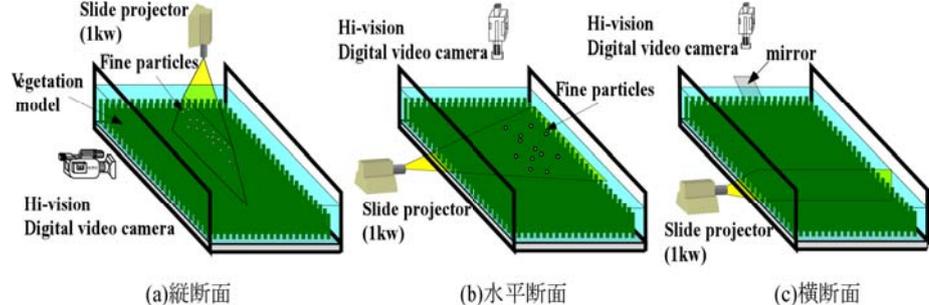


図-3 実験方法概略

Case	H(cm)	h(cm)	Um(cm/s)	Q(cm <sup>3</sup> /s)	Re	Fr
A	12.0	6	7.2	5192.0	6965.5	0.066
B	9.0		9.6	5192.0	9287.3	0.089
C	12.0		3.0	2162.0	3065.9	0.028
D	12.0		4.6	3288.0	4510.5	0.042

表-1 実験条件

(c)は、鉛直方向の平均流速分布 ( $V(y)$ ) を示している。本図中には、(a)と同様に植生模型上、植生模型間における計測値を比較している。両者の特徴として、植生界面以下の領域において上昇、界面以上の領域においては下降、水表面付近においては上昇が顕著となっていることが認められる。また、鉛直方向流速の値は植生模型上の方が上昇、下降とも大きくなっていることが認められる。それに加え植生模型間では、界面以下の領域において壁面側の $y < 3\text{cm}$ の範囲で、下降流が形成されていることが確認された。

(d)には、流れ方向、鉛直方向の乱れ強度分布 ( $u'(y), v'(y)$ ) を表示している。いずれの乱れ強度も、植生界面付近で最大値が生じている。また、植生模型上では流れの方向の乱れ強度が大きい傾向が認められた。

(e)は、鉛直方向のレイノルズ応力分布 ( $-uv(y)$ ) を示している。レイノルズ応力分布の特徴としては、植生模型先端の6cm付近で最大値を示している。これは、(a)の主流速分布における速度勾配 ( $dU/dy$ ) が大きい領域に相当している。また、その最大値は粗度間の方が大きいことが認められた。

(f)には乱れエネルギー生成項 ( $-uv \cdot du/dy$ ) の分布を

示す。本図より植生先端付近において、乱れエネルギーの生成が顕著に認められる。

## (2) 流れの可視化結果

流れの可視化の結果から、本流れ場における様々な渦構造の形成が認められた。図-5には横断面視の経時変化の一例を示している。 $T=0/30\text{sec}$ において破線で囲んだ領域には、植生上の水深6cm以上のスケールを有する $VS_A$ ,  $VS_B$ ,  $VS_C$ の大規模な縦渦構造が観察された。 $VS_B$ ,  $VS_C$ は $T=8/30\text{sec}$ において合体し、そのスケールは水深H程度を有する $VS_D$ に変化している。 $VS_A$ は時間の経過とともにスケールが減少している。また、 $T=8/30\text{sec} \sim T=16/30\text{sec}$ においては、 $VS_A$ と $VS_D$ の境界に蛍光塗料の存在しない領域が認められた。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。これらの流況観察から縦渦構造は強い上昇流を誘起し、逆に縦渦構造の間では強い下降流の形成が認められた。また、通常の開水路流れでは、壁面上に小規模な縦渦構造が形成されるが、植生境界では明瞭に認められなかった。

縦断面可視化では、図-6に示すように植生界面付近の植生背後に形成される横渦構造が注目された。こ

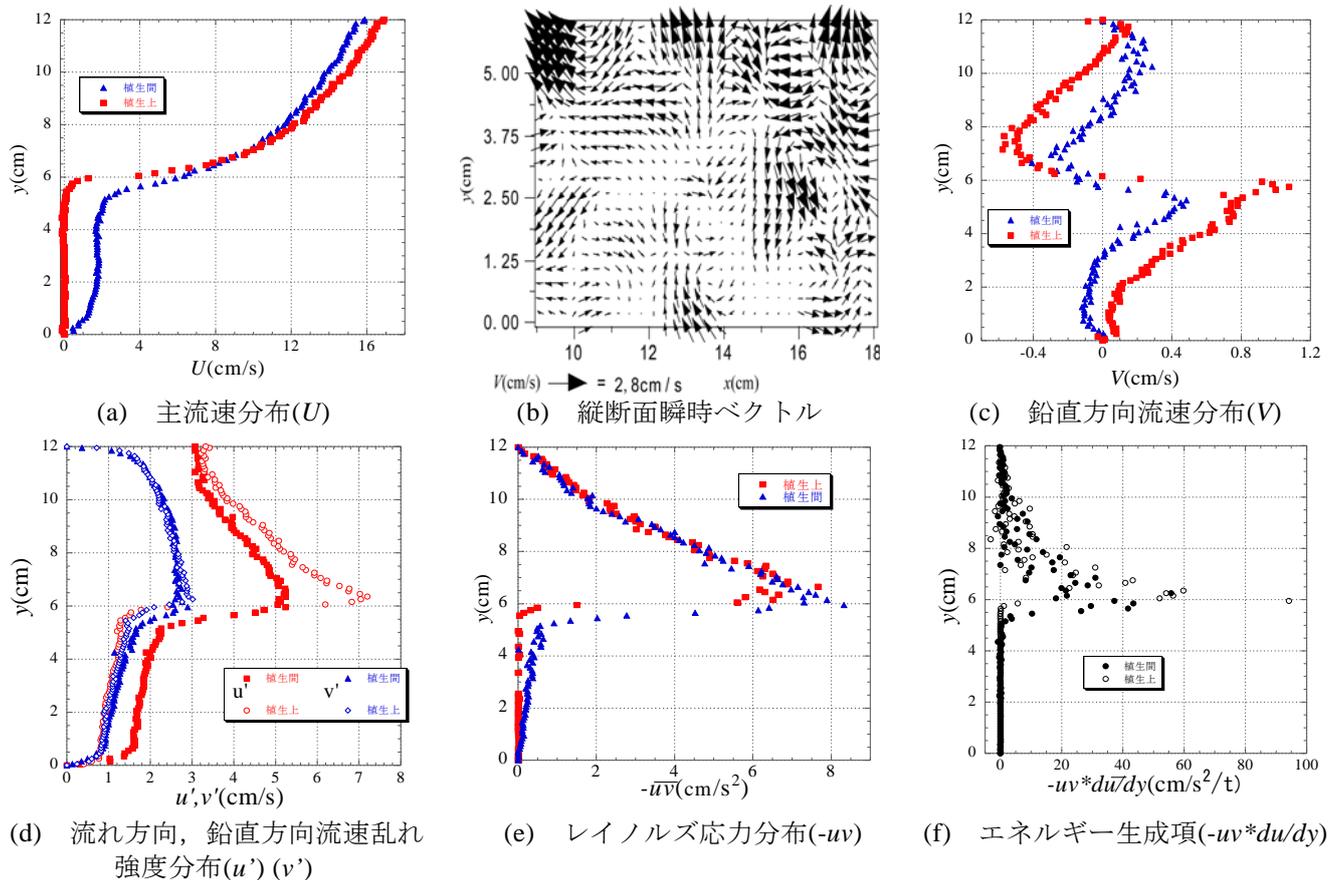


図-4 縦断面PTV (Case A)

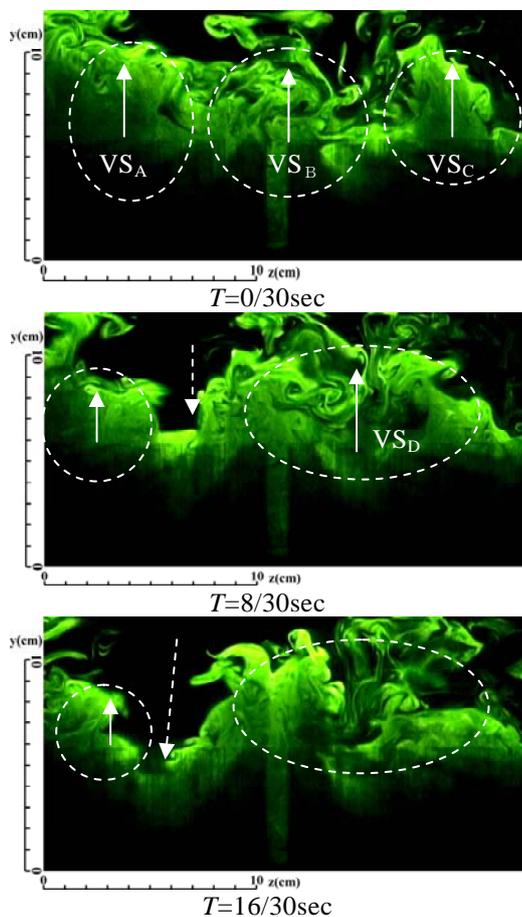


図-5 横断面流況の一例 (Case C)

の渦は、赤い矢印で示すような下降流によって形成されることが観察された。

水平断面視では、柔軟植生の流れ場に鉛直方向に軸をもつ、対を成す渦構造が形成されることが観察された。その一例を図-7に示す。流況観察においては上流側から赤矢印で示すような高速流が植生模型間に侵入することで、植生模型の下流側に白矢印で示すような、鉛直方向に軸を有する渦構造の形成が認められた。この高速流は図-5の横断面視で示した縦渦構造によって生成される下降流であると推察される。

以上の流れの可視化の観察結果を踏まえ、図-8に柔軟植生模型の周辺に形成される流れ場の概念図を示す。流況観察より植生の背後には、植生スケールに対応した横断方向・水平方向を軸とする回転成分を有する渦構造の生成が認められた。

#### 4. おわりに

本研究では流れによって変形を起こす柔軟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。

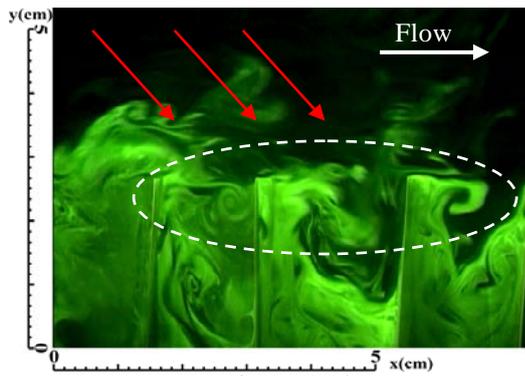


図-6 縦断面流況の拡大 (Case D)

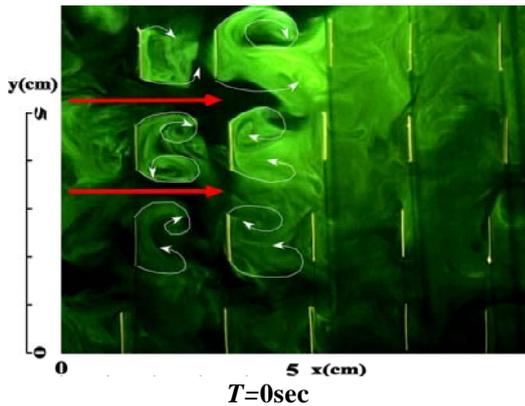


図-7 水平面流況の拡大 ( $y=5.5\text{cm}$ ) (Case D)

- (1) PTVによる流速計測から主流速分布は、それぞれ植生先端部で大きなせん断層の形成が明らかとなった。また、鉛直方向流速分布では界面以上で下降流が、それ以下では上昇流が顕著に形成されている。
- (2) 流れ方向、鉛直方向の乱れ強度と鉛直方向レイノルズ応力、乱れエネルギー生成項の分布はいずれも境界付近で大きな値が認められた。
- (3) 流れの可視化より、本流れ場の植生模型上には水深規模の大規模な縦渦構造の形成が認められ、また、植生模型の背後には、横断方向・水平方向への軸を有する小規模な渦構造の生成が確認された。

#### 参考文献

- 1) 目代邦康, 池田宏, 飯島英夫, 小松陽介, 齋藤健一: 河床形状に及ぼす植生の影響に関する大型水路実験 筑波大学陸域環境研究センター, pp.129-134, 2003.
- 2) Nepf H.M. and Vivoni, E. R. : Flow structure in depth-limited vegetated flow, *Journal of Geophysical*

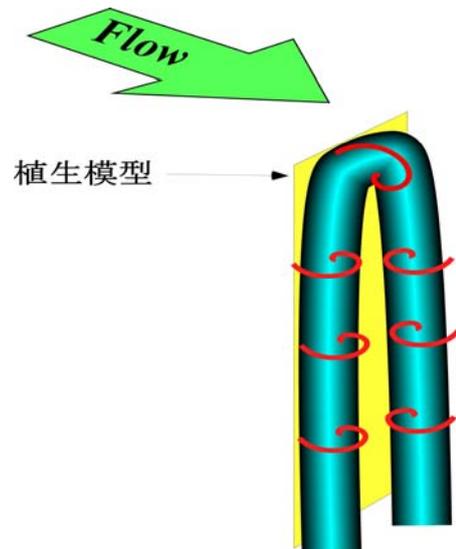


図-8 柔軟植生近傍の渦構造の概念図

*Research*, Vol.105, No.C12, pp.28547-28557, 2000.

- 3) 岡本隆明, 禰津家久, 山上路生: 柔軟性を有する植生開水路流れの組織乱流構造と藻波現象に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.3, pp.190-202, 2009.