

京都大学	学生員	○柴山優人
京都大学	正会員	岡本隆明
首都高速道路	正会員	青木成太
京都大学	正会員	戸田圭一

表-1 水理条件

Case	a(1/m)	H(cm)	H/h	Um(cm/s)	Re	Fr
1	7.6	7.5	1.1	20	15000	0.23
2	7.6	9	1.3	20	18000	0.21
3	7.6	10.5	1.5	20	21000	0.20
4	7.6	21	3.0	20	42000	0.14

1. はじめに

水生植生は、河川中の汚濁物質を拡散し水質を浄化する機能を有する。これは、開水路植生流れにおいて植生内部と外部の流速差に起因する K-H (ケルビン-ヘルムホルツ) 不安定性により、組織乱流構造が発達し、植生内部と外部で運動量及び物質交換が行われているためである。したがって、水生植生の水質浄化機能を定量的に把握するためには、植生を有する流れ場の構造を深く理解する必要がある。そこで、本研究ではかぶり水深比(全水深と植生高さの比)を変化させて水路実験を行い、乱流構造がどのように変化するかを調べた。

2. 実験手法および水理条件

本研究の実験装置および座標系を図-1 に示す。実験水路は、全長 10m, 幅 0.4m, 高さ 0.5m の可変勾配水路であり、 x, y および z はそれぞれ、流下方向、鉛直方向、横断方向である。ただし、植生域上流端の植生要素の流下方向位置を $x=0$, 水路床を $y=0$ とした。また、それぞれの方向における時間平均流速を U, V および W とし、瞬間流速を \tilde{u}, \tilde{v} および \tilde{w} とする。さらに、乱れ成分を u, v および w とする。すなわち、 $\tilde{u} = U + u, \tilde{v} = V + v, \tilde{w} = W + w$ である。また、 H は全水深、 h は柔軟植生の直立高さ、 h_d は柔軟植生の折れ曲がり高さである。

柔軟植生モデルは沈水生の有茎植物をモデルとし、OHP シートを長さ $h=70\text{mm}$, 幅 8mm , 厚さ 0.1mm の短冊状に切ったものを用い、これを水路底面に 6m の区間にわたって正方格子状に配置した。流下方向および横断方向の植生配置間隔は、それぞれ $L_v = B_v = 32\text{mm}$ である。

瞬間流速ベクトルの計測には PIV(Particle Image Velocimetry)法を用いた。PIV 法とは、得られた画像内に格子を取り、その格子領域内の粒子分布画像の平均速度を求める手法である。実験の撮影には、3W のアルゴンイオンレーザーを光源として厚さ 2mm のレーザーライトシート(LLS)を水路上方から x 軸に平行に照射し、水路側方に設置した 1 台の高速度 CCD カメラ (1024×1024 pixel) でデジタル撮影した。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。カメラには 30Hz 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 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 $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ である。

植生先端変位の計測には柔軟植生の先端に蛍光粒子を取り付けて LLS を照射、蛍光粒子を PTV(Particle

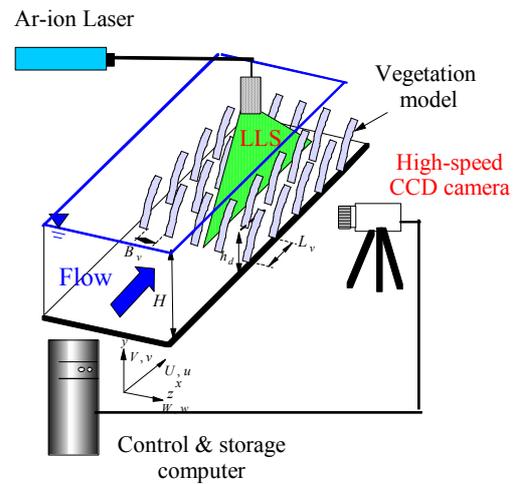


図-1 実験装置図

Tracking Velocimetry)追跡して植生変位を求めた。

表-1 に水理条件を示す。断面平均流速 $U_m = 20(\text{cm/s})$, 植生密度 $\Phi = 0.061$ は全ケースで同じである。本研究ではかぶり水深比(H/h)のみを変化させた。ただし、植生密度 $\Phi = ab = anA/V_0$ で n は体積 V_0 における植生の数、 A は流れに垂直な方向の植生の投影面積である。また $a(1/m)$ は、植生の遮蔽面積の総和を植生の存在する高さ h までの全体積 V_0 で割ったもので、多くの植生流れの研究者 (Neph & Vivoni (2000)¹⁾ によって植生密度として用いられている。

3. 実験結果および考察

図-2 に全ケースの時間平均流速の鉛直分布 $U(y)$ を比較した。値は断面平均流速 U_m で無次元化している。また、図を見やすくするために 2 ずつづらしている。図中の \bar{h}_d は柔軟植生の時間平均折れ曲がり高さを示している。各ケースにおいて、植生層内部では植生抵抗により主流速が低減し、植生層外部では流速が大きくなっている。また、 \bar{h}_d のやや下に流速分布変曲点を確認できる。各ケースの比較では、かぶり水深比が大きくなると、 \bar{h}_d の値も大きく、流速の変曲点も上方に移動

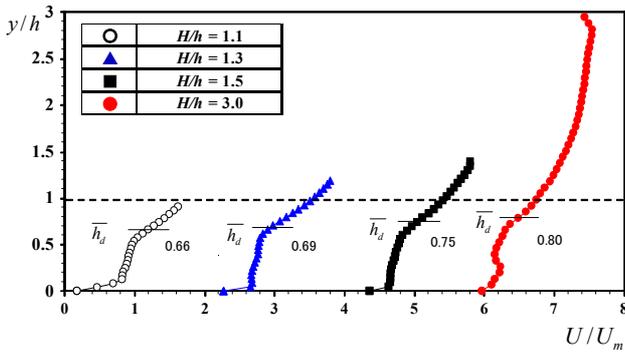


図-2 時間平均主流速の鉛直分布

していることがわかる。

図-3 に全ケースのレイノルズ応力の鉛直分布 $-\overline{uv}(y)$ を比較した。値は断面平均流速 U_m の 2 乗で無次元化している。各ケースにおいて、植生先端付近 ($y/h = 1.0$) でピークをとっていることがわかる。これは、植生先端付近で組織乱流構造が発達しているからである。各ケースを比較すると、かぶり水深比が大きくなるにつれてレイノルズ応力のピーク値も大きくなっている。これにより、かぶり水深比が大きくなるとせん断層が発達し、運動量の鉛直方向輸送が活発になると考えられる。

図-4 に全ケースの混合層厚さ $\delta = h_{p2} - h_{p1}$ を示す。ただし、混合層の下端および上端を h_{p1} , h_{p2} とし、それぞれレイノルズ応力がピーク値の10%となる高さで定義した(Neph & Vivoni (2000)¹⁾)。各ケースを比較すると、かぶり水深比が大きいケースでは混合層厚さ δ が大きくなっていることがわかる。混合層は組織乱流構造が発達する領域であるため、混合層厚さが大きいと大スケールの組織渦の存在を推測できる。これに対して、かぶり水深比の小さなケースでは混合層厚さが小さく、組織渦は発達が抑制されていると考えられる。

図-5 は $H/h = 1.1, 3.0$ のケースの瞬間レイノルズ応力カウンター $-uv(t)$ と瞬間流速ベクトル (\tilde{u}, \tilde{v}) を示す。図中には PTV 計測から得られた植生先端の位置を示してある。 $H/h = 3.0$ のケースにおいて赤線で囲った領域で、 $u > 0, v < 0, -uv > 0$ となっているので sweep が発生していると考えられる。この sweep が発生している領域において、植生長さ程度のスケール ($L_x \approx h$) の組織渦が観察され、柔軟植生は組織的にたわんでいる。 $H/h = 1.1$ のケースでは瞬間レイノルズ応力カウンターの広がり小さく、sweep, ejection のスケールは小さいと考えられる。

4. まとめ

本研究では、開水路植生流れにおいて PIV 法による流速計測および PTV 法による柔軟植生の先端変位の計測を行い、柔軟植生流れの乱流構造におけるかぶり水深比変化の影響について考察した。計測結果より、かぶり水深比が大きいと、sweep や ejection を伴う大規模組織渦が発達し、植生層内外での運動量交換が活発になることがわかった。また、sweep の直下領域では植生が組織的に揺動していることが示

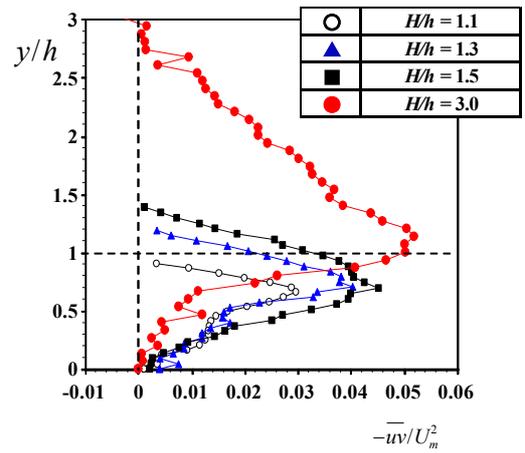


図-3 レイノルズ応力の鉛直分布

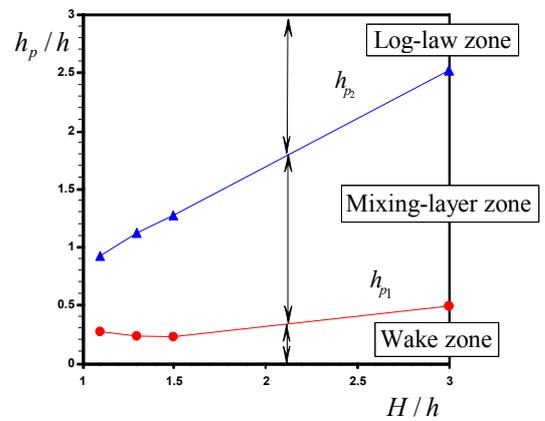


図-4 混合層厚さ

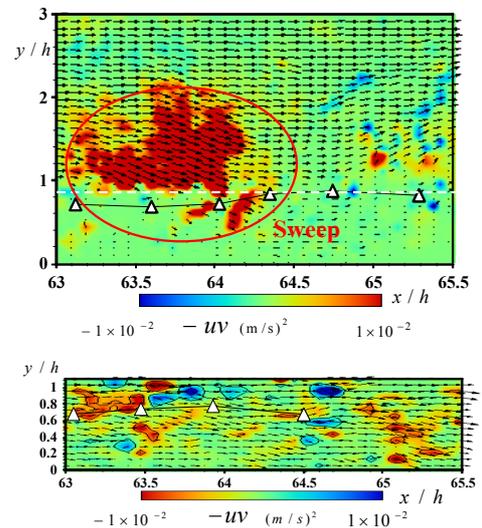


図-5 瞬間レイノルズ応力カウンター

された。

参考文献

- 1) H. M. Nepf, E. R. Vivoni (2000) : Flow structure in depth-limited, vegetated flow, *Journal of Geophysical Research*, Vol.105/No.C12, pp.28,547-28,557.