

京都大学	学生員	○青木成太
京都大学	正会員	戸田圭一
京都大学	正会員	岡本隆明
京都大学	学生員	前川卓耶

1. はじめに

近年、植生は浄化機能や河岸侵食防止機能を有するということが注目されており、防災上で河川内の植生群落がどのような挙動をするかを把握することが重要である。本研究では PIV 法を用いて計測し、植生の基本特性および組織構造の流下方向の発達過程について調べ、考察した。

表-1 水理条件表

	vegetation density ϕ	$H(\text{cm})$	$h(\text{cm})$	H/h	$U_m(\text{cm})$	$L_v(\text{cm})$	Re	Fr
Case 1	0.137	15.0	5.0	3.0	12.0	2.4	18000	0.10
Case 2	0.061	15.0	5.0	3.0	12.0	3.2	18000	0.10
Case 3	0.015	15.0	5.0	3.0	12.0	6.4	18000	0.10

2. 実験手法および水理条件

本実験で用いた水路は、全長 10m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型直線水路である。全ケースで流量は一定とし、水深 H も 15cm と一定にした。植生モデルは剛体植生モデルを使用し、厚さ 1mm のアクリル板を高さ $h=50\text{mm}$ 、幅 $w=8\text{mm}$ の短冊状に切ったもので、剛体植生モデルは水流によって変形しない。計測部を含めて 8m の区間にわたって水路底面に正方格子状に配置した。PIV のトレーサーとして、直径 0.025mm、比重 1.02 のナイロン 12 粒子を用い、厚さ 2.0mm のレーザーライトシート(LLS)を照射し、高速度 CCD カメラ(1024×1024 pixel)でデジタル撮影した。高速カメラに外部トリガー信号を与えて、2 枚の連続画像のペアを 500Hz のフレームレートで 60 秒間撮影した。PIV のサンプリング周波数は 30Hz である。本研究では水平面計測と縦断面計測の 2 種類を行い、図-1 に水平面計測の装置図を示す。また、表-1 に水理条件を示す。表にあるように植生密度 ϕ を 0.015, 0.061, 0.137 の 3 種類変化させ、縦断面計測に関しては ϕ が 0.061 のケースのみ計測した。

3. 発達距離の評価

十分に発達した状態の植生流れ場は 3 つの領域に区分される^{1),2)}。以下に各層の基本特性を示す。

第 I 領域 : Diverging flow zone ($x_{SB} \leq x \leq x_T$) は、滑面開水路流れの特性と植生流れの特性が混在する領域で、この領域は植生抗力の影響が大きく、植生内部 $y/h < 1.0$ に流体が流れ込み(鉛直方向の Diverging flow)、流速が低減し、植生外部 $y/h > 1.0$ で流速が増加する区間である。ここで、Diverging flow とは流れ込みのことである。この領域では河床付近および水面付近のレイノルズ応力はほぼゼロ ($-uv \approx 0$) へと近づく。

この領域には植生域上流端である $x=0(\text{cm})$ が含まれ、植生背後領域(wake-zone)で上流端の植生要素を避けた流体が植生間領域(nonwake-zone)に流れ込み、流れの

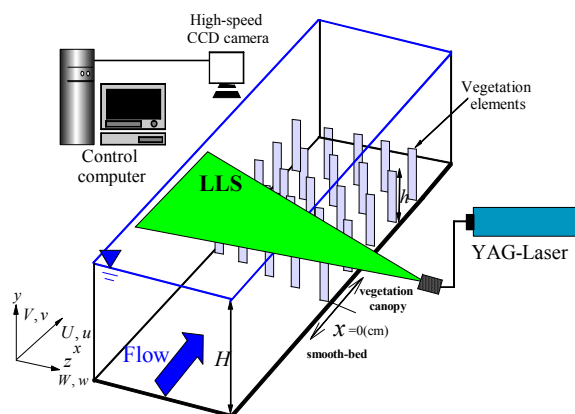


図-1 計測システム

横断方向変化(横断方向の Diverging flow)が大きい。また、 $x=0(\text{cm})$ 付近では植生内外の流速差を生じさせる強い上昇流が植生先端 $y/h=1.0$ 付近で発生しており、植生外への流れ込み現象が発生している。

第 II 領域 : Developing zone ($x_T \leq x \leq x_G$) は、滑面流れの特性はなくなり、純粋な植生流れの発達過程となる。時間平均流速分布には植生先端で変曲点が生じ、レイノルズ応力分布には植生先端付近で明確なピークが観察されるようになる。第 I 領域と第 II 領域の境は、鉛直上昇流がおさまる流下方向位置で評価した。この領域では、植生内外の流速差 ΔU やレイノルズ応力のピーク値および鉛直方向の広がり流下方向に進むにしたがって大きくなり、それに伴ってせん断層厚さ δ_s は増加する。また、植生流れに特徴的な組織構造も発生し、植生内部で Sweep が、外部で Ejection が卓越する。組織渦も発生し、流下方向に進むにつれて渦の規模は大きくなる。

第 III 領域 : Fully-Developed zone ($x \geq x_G$) は、植生流れが十分に発達しきっており、流れ特性の流下方向変化はほとんど見られない。大規模組織渦も十分に発達しており、植生内部で Sweep が、外部で Ejection が定期的に発生し、運動量輸送や土砂輸送、スカラー輸送が活発に行われている。

4. Diverging flow に関する考察

図-2 に nonwake-zone における植生先端高さの時間平均鉛直流速 $V(h)$ の流下方向変化を示す。植生群落より上流側から植生群落上流側にかけて鉛直流速 $V(h)$ が増加し、鉛直上向きの Diverging flow が発生している。これに対して、群落内では $V(h)$ が流下方向に減少しているのが観察される。鉛直流速 $V(h)$ は $x \geq 60$ cm でほぼ 0 になるため、鉛直上向きの Diverging flow は $x = 60$ cm で終了すると思われる。

図-3 に時間平均横断流速 W の流下方向変化を示す。図より植生群落の上流端($x=0$ cm)において植生要素周辺で横断流速 W の正負の値が大きくなっているのがみられ、流下方向に進むにつれて植生要素周辺の横断流速 W の値が小さくなっていくのが見られる。これより植生群落の上流端($x=0$ cm)において nonwake-zone から wake-zone に流れ込んでおり、植生群落の内部($x>20$ cm)に進むにつれて流れ込む量が少なくなっていることが観察できる。さらに図-2 の鉛直上向きの Diverging flow が $x = 60$ cm まで継続するのと比べると、横断方向の Diverging flow は植生群落の上流端($x=0$ cm)でのみ発生し、植生群落の内部($x>20$ cm)では鉛直上向きの Diverging flow が卓越することが確認できる。

次に Diverging flow region での乱流構造の変化について考察する。図-4 には nonwake と wake zone のレイノルズ応力のピーク値の流下方向変化を比較した。値は断面平均流速 U_m で無次元化している。nonwake zone では植生群落上流端付近で $-\overline{uv}$ のピークは小さいが、 $x \geq 60$ cm から流下方向に流れが発達するにつれて $-\overline{uv}$ のピークが増加している。これに対して、wake zone では nonwake zone より $-\overline{uv}$ のピーク値が大きく、流れの発達も速い。これは wake-zone では植生内部で流速が大きく低減し、流速分布のせん断が大きくなっているためである。

4. 結論

- ・平坦河床から植生流れに遷移する過程で鉛直方向と水平方向の2種類のDiverging flowが発生する。
- ・鉛直方向の Diverging flow 現象は $x = 60$ cm 付近まで継続するのに対し、横断方向の Diverging flow は植生群落の上流端 ($x=0$ (cm)) でのみ発生。
- ・組織構造は3次的に成長し、変化する。

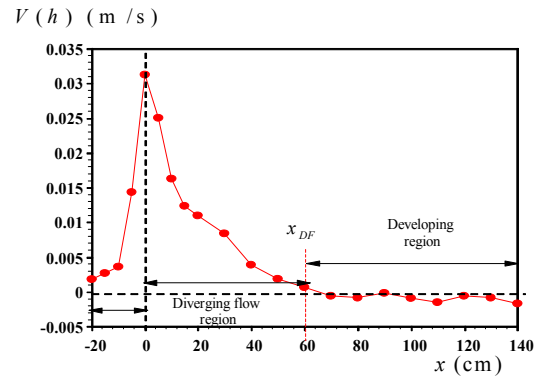


図-2 植生先端部鉛直流速の流下方向変化

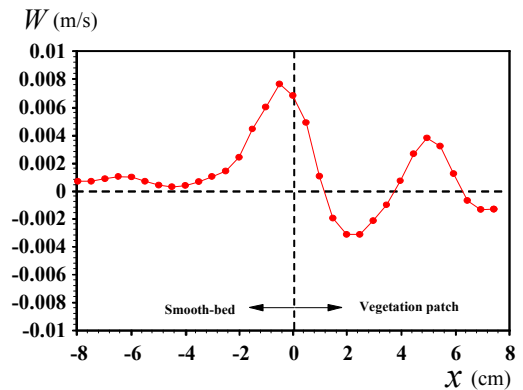


図-3 時間平均横断流速の流下方向変化

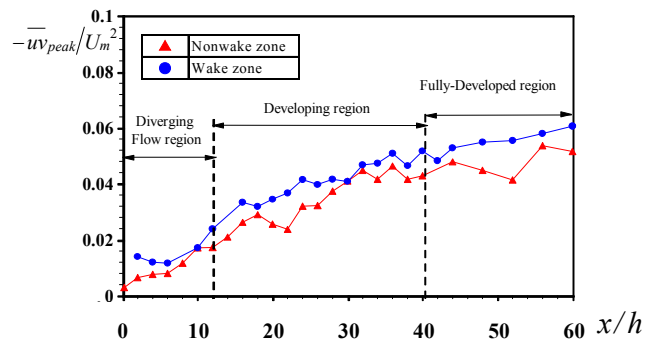


図-4 レイノルズ応力ピーク値流下方向変化

参考文献

- 1) H. M. Nepf, E. R. Vivoni : Flow structure in depth-limited, vegetated flow (2000), *Journal of Geophysical Research*, Vol.105/No.C12, pp.28, 547-557.
- 2) Poggi, D., Porporato, A. and Ridolfi, L. : The Effect of Vegetation Density on Canopy Sub-layer Turbulence (2004), *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 111, pp.565-587.