

京都大学 学生員 ○片山愛来  
 京都大学 フェロー 榎津家久  
 京都大学 学生員 岡本隆明  
 京都大学 学生員 辻井翔太

1. はじめに

近年、河川の緑化への意識の高まりとともに、植生流れ場における汚染物質や栄養分の乱流輸送の重要性が注目され、物質輸送や乱流拡散特性に関する研究が活発に行われている<sup>1)</sup>。本研究ではLIF法を用いた濃度計測を行い、開水路柔軟植生流れにおける濃度の拡散特性や減衰特性について考察した。

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。柔軟植生モデルは厚さ 0.1mm の OHP シートを高さ  $h=70\text{mm}$ 、幅  $b=8\text{mm}$  の短冊状に切ったものを使用し、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 (図-1)。染料注入ノズルは内径 3mm のステンレス製のものを用い、ローダミン B を染料として計測面と同一の横断位置から主流方向に注入し、LIF 計測を行った。500Hz のフレームレートで 60 秒間撮影した。サンプリング周波数は 40Hz である。

表-1 に水理条件を示す。全ケースで水深  $H$ 、平均流速  $U_m$  は一定にした。表にあるように植生密度  $\Phi$  ( $=a \cdot b$ :  $a$  は単位体積あたりの植生の遮蔽面積) を 0.015, 0.034, 0.061 の 3 種類変化させ、さらに各植生密度において染料注入の位置を 7 段階に変化させた。

3. 流れ場の領域区分と染料注入位置

全水没植生流れは三つの領域に区分される<sup>2)</sup>。図-2 にその領域区分の模式図と拡散実験の染料注入位置を併示した。以下に各層の基本特性を示す。

第I層: Wake zone ( $0 \leq y \leq h_p$ ) は非水没植生流れに類似した特性を持ち、上端は植生内部でレイノルズ応力がピークの 10% となる浸透高さ  $h_p$  である。流速分布はほぼ一定で、水平方向の輸送が卓越する。

第II層: Mixing-layer zone ( $h_p \leq y \leq h_{log}$ ) は主流速の鉛直方向変化が大きく、流速シアアが大きい領域であり、混合層に似た性質を持つ。また、K-H 不安定性によって sweep や ejection といった大規模組織渦が発生し、鉛直方向の輸送が大きい。

第III層: Log-law zone ( $h_{log} \leq y \leq H$ ) では植生の影響が小さく粗面対数則が成立し、その下端高さ

表-1 水理条件表

type	$\Phi$	$H$ [cm]	$h$ [cm]	$U_m$ [cm/s]	$Fr$	$Re$
Fc	0.061	21.0	7.0	10.0	0.12	35000
Fd	0.034	21.0	7.0	10.0	0.12	35000
Ff	0.015	21.0	7.0	10.0	0.12	35000

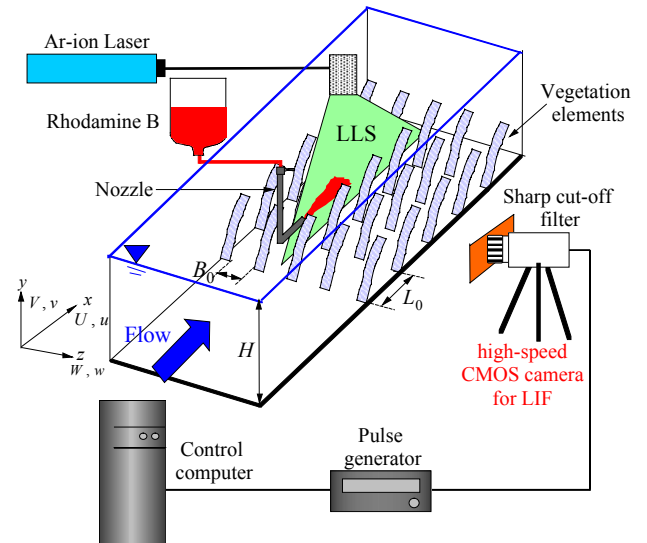


図-1 計測システム

を  $h_{og}$  (粗面対数則が成立する下端高さ) とする。この領域は流速シアアの影響が小さいために鉛直方向に比べて水平方向の輸送が卓越する。

本研究ではこのような領域ごとの濃度輸送特性を調べるために3つの領域内に染料の注入位置を設定した ( $y_0/h=0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 1.4, 2.0, 2.4$ )。なお染料の注入速度は同一高さにおける時間平均局所流速に一致させた。

4. 計測結果と考察

図-3 は植生密度の大きなケース ( $\Phi=0.061$ ) と小さなケース ( $\Phi=0.015$ ) における時間平均濃度分布  $C$  のコンターである。染料注入位置は図-2 の各領域の代表高さ ( $y_0/h=0.2, 1.0, 2.0$ ) とした。図中には、濃度分布の上下方向の半値幅それぞれ  $b_{1/2}^+$ ,  $b_{1/2}^-$  とピークの軌跡  $C_{max}(x)$  を併示している。ここで、図中の  $L_0$  は植生密度の大きなケース ( $\Phi=0.061$ ) での流下方向における植生の配置間隔である。図-3 の結果から、植生密度の大きなケース ( $\Phi=0.061$ ) では、Mixing-layer zone の中心位置に注入したケース ( $y_0/h=1.0$ ) において半値幅が大きくなる傾向がみら

れた。これは植生流れの既往研究<sup>3)</sup>によって知られているように、Mixing-layer zoneでは植生先端部の流速シアが大きくなるためと考えられ、鉛直方向の濃度拡散とsweepやejectionといった大規模組織渦との関係が示唆される。また、植生密度の大きなケース( $\Phi=0.061$ )と小さなケース( $\Phi=0.015$ )を比較すると、 $\Phi=0.061$ で $\Phi=0.015$ より $b_{1/2}^+$ ,  $b_{1/2}^-$ が大きくなっているため、植生密度が増加すると植生内部と植生外部の物質交換が活発に行われていることが推測される。

図-4に各流下方向位置における最大時間平均濃度 $C_{max}(x)$ が初期濃度 $C_0$ の5%になる、すなわち95%減衰するまでの距離 $D_{95}$ と注入高さの関係を示す。さらに、減衰距離 $D_{95}$ を各ケースの染料注入速度で除した95%減衰時間 $t_{95}$ と注入高さの関係を併示した。減衰距離 $D_{95}$ および減衰時間 $t_{95}$ は局所流速 $U(y=y_0)$ を用いてそれぞれ以下のように計算される。

$$D_{95} = (x|_{C_{max}(x)=0.05C_0})/L_0 \quad (1)$$

$$t_{95} = D_{95}/(U(y=y_0)/L_0) \quad (2)$$

図-4の減衰距離 $D_{95}$ の結果から、植生内部および先端に注入したケースでは減衰距離が小さく、植生外部よりも濃度の減衰が早いことが推測されるが、これに対して減衰時間 $t_{95}$ の結果から、植生外部の方が $t_{95}$ が小さく、最大時間平均濃度の減衰が早いという結果が得られ、興味深い。また、植生密度が大きくなるにつれて植生内外における減衰時間の大きさの差は大きくなっており、植生密度が増加すると、植生内部において濃度の滞留時間が長くなることが確認できる。

#### 4. おわりに

本研究は、開水路流れにおいてLIFによる濃度計測を行い、sweep・ejectionといった組織乱流構造と濃度輸送との関係について考察を行った。また、植生密度による濃度輸送への影響について考察を行った。さらに、濃度の減衰時間という減衰の新しい評価方法を行った。

#### 参考文献

- 1) Ghisalberti & Nepf : Mass Transport in Vegetated Shear Flows (2005), *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 5, pp.527-551.
- 2) 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.
- 3) Nezu, I., and Sanjou, M. (2008) : Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows, *J. of Hydro-environment Research*, Vol.2, pp.62-90.

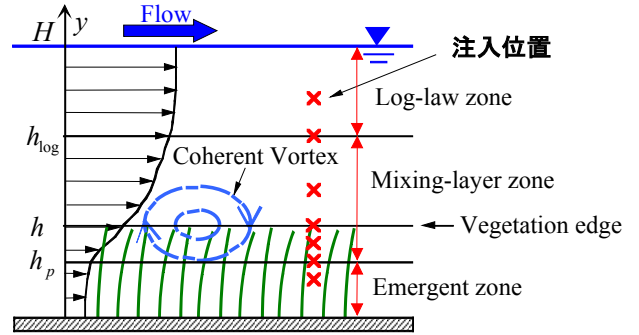


図-2 流れ場の領域区分と染料注入位置

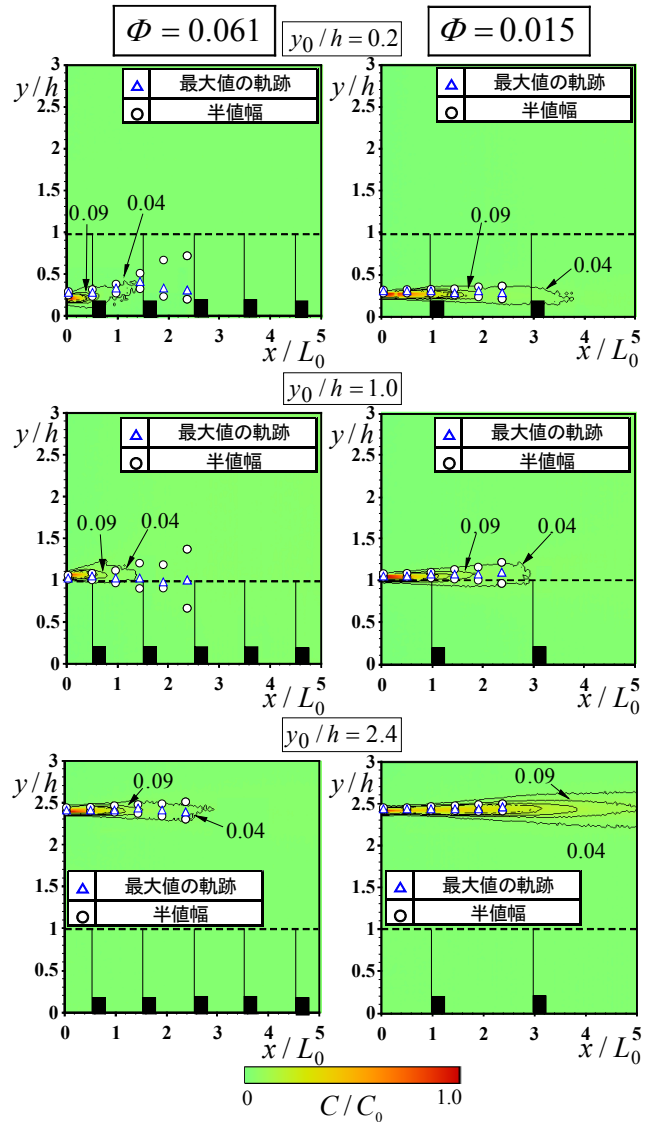


図-3 時間平均濃度コンター ( $\Phi=0.061$ )

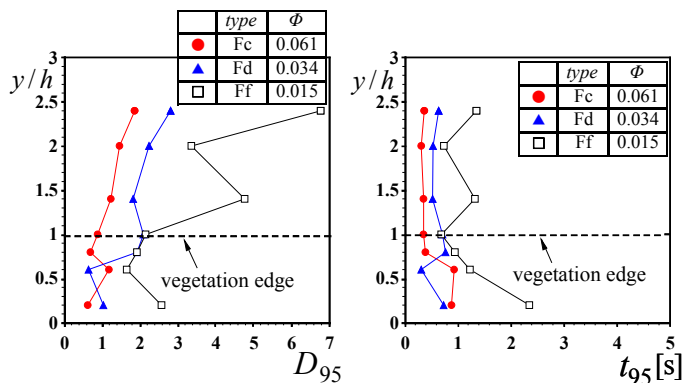


図-4 減衰距離および減衰時間