# 第 II 部門 PIV と LIF 法を併用した植生開水路流れにおける乱流拡散特性に関する研究

京都大学	学生員	〇片山愛来
京都大学	フェロー	禰津家久
京都大学	学生員	岡本隆明

1. はじめに

近年,植生流れ場における汚染物質や栄養分の乱流 輸送の重要性が指摘され,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法と PIV 法を併用した濃度-流速の同時計測を行い,開水路 植生流れにおける大規模組織渦が染料濃度の輸送に及ぼ す影響について考察した.

# 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. 全ケースで流量は 一定とし、水深Hも15cmと一定にした.植生模型は厚 さ 1mm のアクリル板を高さ h=50mm, 幅 w=8mm 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.また, PIV のトレーサーとして、直径 0.025mm, 比重 1.02 の ナイロン 12 粒子を用いた. 2 台の高速度 CMOS カメ ラ (1024×1024 pixel) を用いることで濃度-流速を同 時計測し、これらはパルスジェネレータからのトリガー 信号により同期をとることが可能である. 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.

## 3. 流れ場の領域区分と染料注入位置

**表−1** に水理条件を示す.表にあるように植生密度 を 0.015,0.061 の 2 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 6 段階に変化させた.全水没植 生流れは三つの領域に区分される<sup>2),3)</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: Emergent zone  $(0 \le y \le h_p)$  は非水没植生 流れに類似した特性を持ち、その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,流速シアーが大きい領域であ 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.

Aki KATAYAMA, Iehisa NEZU and Takaaki OKAMOTO

表-1 水理条件表

φ	H[cm]	Re	Fr	h[cm]	$U_m[cm/s]$
0.061 0.015	15.0	30000	0.17	5.0	12.0



図-1 計測システム

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、その下端高さを $h_{log}$ (粗面対数則が成立する下端高さ)とする. この領域は 流速シアー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( $y_0/h=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 2.0, 2.4$ ). 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 に流下方向位置  $x/L_v$ =0.5, 1.0, 2.0 における時間平均濃度分布の上下方向の半値幅を示す. ここで,  $L_v$  は流下方向における植生の配置間隔である. 植生密度の大きな $\phi$ =0.061 では, Mixing-layer zoneの下端と植生先端位置に注入したケース ( $y_0/h$ =0.6, 1.0) では半値幅が大きく, 鉛直方向の濃度拡散が大きくなっている. これは既往研究によって知られているように流速シアーが大きくなるためで, sweep や ejection といった大規模組織渦と濃度拡散の関係が示唆される. Emergent zone に注入したケース ( $y_0/h$ =0.2) では流速シアーが小さく水平方向の輸送が卓越するために上下の半値幅は小さ く Nepf & Vivoni(2000)<sup>2)</sup>の結果に一致する. Log-law zone では Mixing-layer zone に比べ鉛直方向の濃度輸送が 小さいことがわかる. 一方、 $\phi$ =0.015 のケースでも同 様の傾向がみられるが、植生抵抗が少なく植生層内外の 流速差が小さいために大規模組織渦の発達が抑えられ、  $\phi$ =0.061 のケースに比べ鉛直拡散が小さくなっている. また、 Emergent zone に注入した  $y_0/h=0.2$  ケースでは  $\phi$ =0.015 に比べ $\phi$ =0.061 のケースの方が鉛直拡散が大 きくなったのは、Poggi ら(2004)<sup>3)</sup>の報告にもあるように、 植生密度の増加に伴いカルマン渦の影響が大きくなり、 濃度拡散が促進されるためと考えられる.

ジェット流の平均濃度分布はガウス分布によく一 致することが知られている<sup>4)</sup>.図-3 に植生密度が 大きいケースの時間平均濃度分布とガウス分布を比 較した.ガウス分布は次式で与えられる.

$$C(x, y) = C_{\max}(x) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)$$
(1)

$$\sigma = \frac{1}{2} \left( b_{1/2}^+ + b_{1/2}^- \right) \tag{2}$$

ここで $C_{\max}(x)$ は最大濃度, $\sigma$ は上下方向の半値幅 の平均値である.植生内部に染料注入したケース ( $y_0/h=0.2$ , 0.6) ではガウス分布に従わないが, 植生先端から注入したケース ( $y_0/h=1.0$ ) と植生 外層に注入したケース ( $y_0/h=1.4$ , 2.0) ではガウ ス分布からのずれは小さくなっている.これは植生 内部では植生の wake の影響を受けて流れが非一様 になるためと考えられる.

## 4. おわりに

本研究は、植生開水路流れにおける濃度拡散について LIF 法および PIV を併用して計測を行い sweep・ejection といった組織乱流構造や植生の wake によるカルマン渦と濃度輸送との関係について考察を行った.

参考文献

- Ghisalberti & Nepf : Mass Transport in Vegetated Shear Flows (2005), *Environmental Fluid Mechanics*. Vol. 5, pp.527-551.
- H. M. Nepf, E. R. Vivoni : Flow structure in depthlimited, vegetated flow (2000), Journal of Geophysical Research, Vol.105/No.C12, pp.28, 547-557.
- Poggi, D., Porpotato, A. and Ridolfi, L. : The Effect of Vegetation Density on Canopy Sub-layer Turbulence (2004), *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 111, pp.565-587.
- Daoyi Chen, Gerhard H. Jirka : LIF Study of Plane Jet Bounded in Shallow Water Layer (1999), *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, Issue 8, pp.817-826.



図−3 時間平均濃度分布およびガウス分布 ( ϕ =0.061)