

第II部門

植生流れ場における組織構造と物質輸送メカニズムに関する研究

京都大学 学生員 ○辻井翔太
 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 片山愛来

1. はじめに

乱流中で物質が混合・拡散される現象は、自然界や工業分野において数多くみられる。乱流拡散と呼ばれるこのような現象を理解し、予測することは水工学および河川環境上において重要である。本研究では、開水路植生流れにおいて植生の剛性・植生密度により、流れ場の物質輸送にどのような影響があるかを調べるため、LIF法を用いて濃度統計量の基本的な特性について考察した。さらに、LIF-PIV同時計測により、流速-濃度の相関特性を調べた。

2. 実験手法および水理条件

本実験の計測システムおよび座標系を図-1に示す。本研究で用いた実験水路は、全長10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型水路である。植生モデルは沈水性の有茎植物をモデル化し、葉状部として、高さ $h=50\text{mm}$ 、幅 $b=8\text{mm}$ 、厚さ 1mm の亚克力板を短冊状に切ったものと、高さ $h=70\text{mm}$ 、幅 $b=8\text{mm}$ 、厚さ 0.01mm のOHPフィルムを短冊状に切ったものの2種類を用意し、前者を剛体植生モデル、後者を柔軟植生モデルとし、それらを8mの区間に渡り正方形格子状に配置した。植生密度 $\Phi=0.061$ の時の植生間隔を L_0 とする。ノズルは内径3mmのステンレス製のもので、ローダミンBを染料として水中に注入した。注入の横断方向位置はレーザーライトシート(LLS)位置に一致させ、ノズルは x 軸に平行、 z 軸に垂直になるように設置し、注入位置は植生高さ h と一致させた。染料の注入速度は、同一高さにおける時間平均局所流速 $U(h)$ に一致するように調整した。2台の高速CMOSカメラ(1024×1024 pixel)を用い、それぞれLIF用、PIV用とした。LIF用のカメラにはシャープカットフィルタを装着しており、レーザー光で誘起されたローダミンの発光のみを撮影できる。

表-1に、実験ケースを示す。水理条件は、植生の剛性、植生密度 Φ を変化させた。また本研究において、植生密度 Φ 以下の式を用いて算出した。

$$\Phi = nbA/V_0 \quad (1)$$

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。

3. 実験結果および考察

表-1 水理条件

type	Φ	$H[\text{cm}]$	$h[\text{cm}]$	$Um[\text{cm/s}]$	Fr	Re
Fc-1	0.061	21.0	7.0	10.0	0.12	35000
Ff-1	0.015	21.0	7.0	10.0	0.12	35000
Rc-1	0.061	15.0	5.0	10.0	0.14	25000
Rf-1	0.015	15.0	5.0	10.0 </tr		

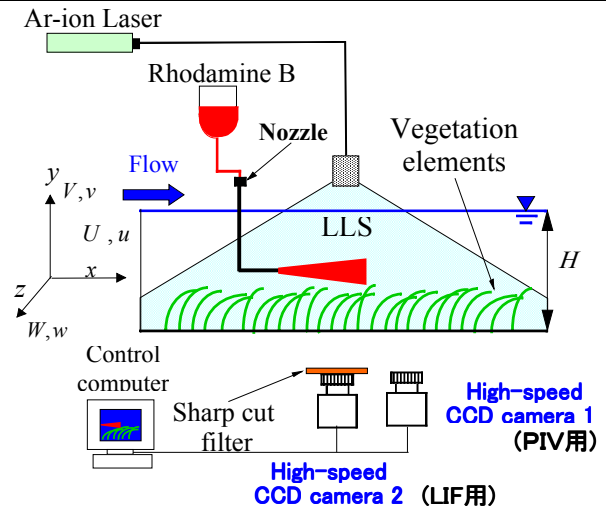


図-1 実験装置

図-2は濃度変動強度分布 c' の、Rigid $\Phi=0.061$ とRigid $\Phi=0.015$ のコンター図である。図中にはその等高線のうち外側2本にその値を併示している。Rigid $\Phi=0.061$ のケースでは、濃度変動分布が早く減衰し、鉛直方向に大きく広がっている。対してRigid $\Phi=0.015$ のケースでは濃度変動分布の低減が緩やかになり、流下方向にコンターが広がっていることがわかる。これは、後者の方が植生密度が小さいために、大規模組織渦が発達が抑えられ、濃度が鉛直方向に拡散されずに水平方向に輸送されやすいためと推測される。これは、Ghisalberti & Nepf (2005)¹⁾のLIF計測結果と一致する。

図-3は流下方向位置 $x/L_0=1.0$ における濃度変動強度鉛直分布 c' を示す。左図はRigidケースの植生密度比較、右図は $\Phi=0.015$ におけるFlexible・Rigid比較、をプロットしたものである。全ケースにおいて注入高さで c' はピークを持つ。左図から植生密

度の大きなケースで c' のピークが小さく、分布形は緩やかになっている。これは植生密度が大きくなるほどカルマン渦や大規模組織渦が発達し、鉛直方向の広がりが大きくなっているためである。また右図から剛体植生のケースの鉛直方向の広がり大きく、剛体植生のケースの方が鉛直拡散が大きいことが分かる。

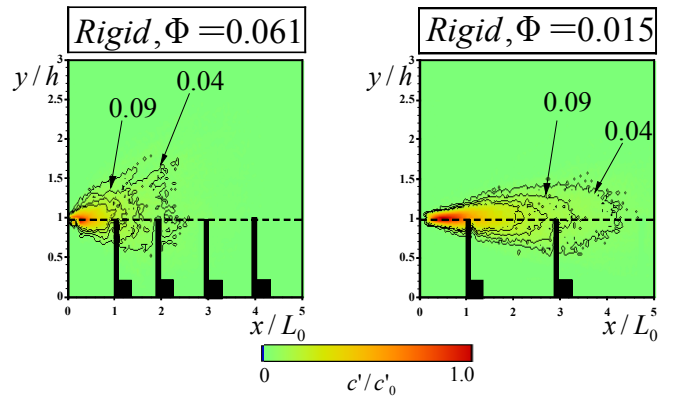


図-2 濃度変動強度コンター

Nezu & Sanjou(2008)²⁾によると、植生流れでは Sweep, Ejection が交互に発生するような組織変動サイクルが存在し、大規模組織渦を形成することが知られている。図-4(a)は Rigid, $\Phi=0.061$ のケースの瞬間流速ベクトル (\tilde{u}, \tilde{v}) を瞬間濃度場 $\tilde{c}(t)$ と合わせ、 $t=0.0$ (s) から $t=15.0$ (s) までの時系列に示したものである。また図-4(b)は同時刻の瞬間レイノルズ応力分布 $-uv(t)$ のコンター図である。

$t=0.0$ s では植生先端(破線部A)で高速流の下降ベクトル Sweep(A)が発生し、高濃度分布が植生内部に輸送されているのが観察される。 $t=6.0-7.0$ s に植生外部で低速流の上昇ベクトル Ejection(B)が観察され、注入された染料が植生外部に輸送されている。 $t=12.0-13.0$ s では再び Sweep(C)が発生し、染料が植生内部へ入り込んでいる。これより、植生開水路流れには Ejection から Sweep に移行する組織的な変動サイクルが存在することが確認できる。また図-4(b)から Sweep, Ejection 発生時にそれぞれ植生内部と植生外部で瞬間レイノルズ応力分布の局所的に大きな正值ピークがみられ、瞬間レイノルズ応力の正值分布は大規模組織乱流構造の発生領域と対応している。

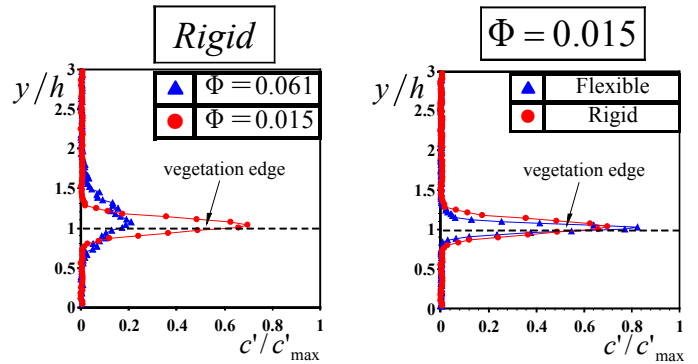


図-3 濃度変動強度鉛直分布

4. おわりに

本研究は、LIF法を用いて濃度変動強度について考察し、植生密度では大きい方が、剛性では剛体植生の方が鉛直方向の拡散が大きいことが分かった。

また LIF-PIV 同時計測により、流速-濃度の相関特性を調べることで、瞬間レイノルズ応力の正值分布は大規模組織乱流構造の発生領域と対応していることが明らかになった。

参考文献

1) Ghisalberti & Nepf : Mass Transport in Vegetated Shear Flows, *Environmental Fluid Mechanics.*, Vol. 5,

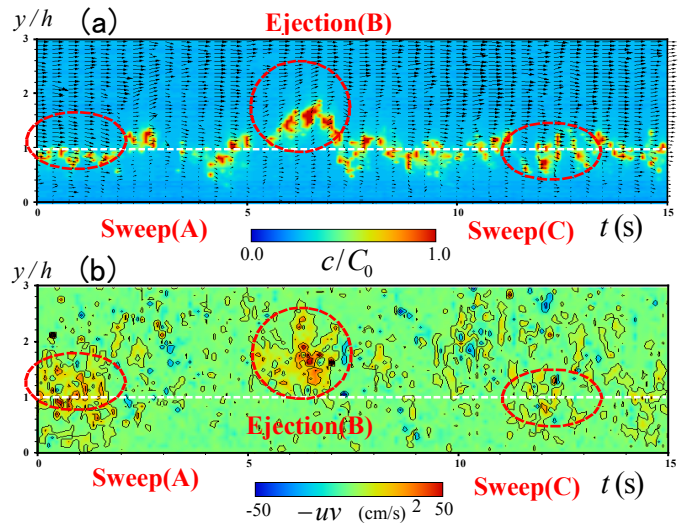


図-4 (a)瞬間流速ベクトル・瞬間濃度の時系列
(b)瞬間レイノルズ応力の時系列

pp.527-551, 2005.

2) Nezu & Sanjou : Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows, *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 2, Issue2, pp.62-90, 2008.