条件付抽出法による全水没植生流れの組織渦の乱流拡散への寄与に関する研究

Experimental study on contribution of coherent motion to turbulent diffusion
in vegetated open-channel flows by conditional-sampling analysis

岡本隆明*, 禰津家久**, 池田裕一***
Takaaki Okamoto, Iehisa Nezu and Hirokazu Ikeda

*正会員 工博 宇都宮大学助教 工学部建設学科 (〒321-8585 宇都宮市陽東区 7-1-2)

**フェロー, 工博, 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

***正会員 工博 宇都宮大学大学院准教授 工学研究科学際先端システム専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東区 7-1-2)

Aquatic plants reduce suspended sediment transport because of the local reduction in bed shear stress. Therefore, it is very important for river environment to reveal the mass and momentum exchange near the vegetation zone. Turbulent diffusion mechanisms in emergent vegetated flows have recently been investigated by many researchers. However, the effect of the submerged vegetation on the turbulent mixing process has not been fully investigated. So, in the present study, the combination of PIV and planar laser-induced fluorescence (LIF) technique is applied to the vegetated open-channel flows. Two-dimensional data allow the identification of coherent structures and quantification of the vertical mass transport.

Key Words: open-channel flow, vegetation, coherent motion, turbulent diffusion, LIF

キーワード: 植生開水路流れ, 組織乱流, 乱流拡散, レーザー蛍光誘起法

1. はじめに

近年河川の水域環境に対する意識が高まってきており、河川の水質浄化を図るため工場排水の規制の強化、合併処理浄化槽の高度化などが進められている。しかしながら、道路面から流入する都市排水や家庭排水からの汚濁負荷については対策が進んでいないのが現状である¹⁾。このような背景のもとで、最近、水生植物による水質浄化能力の活用が注目されている。具体的には、(1) 水生植物が繁茂することで、植生内部で流速が低減し汚染物質が沈殿する、(2) 富栄養化の原因物質である窒素・リンを吸収除去するなどの浄化作用を利用するものである。このような植生の浄化能力を評価する上で、植生群落による物質輸送メカニズムを解明することはきわめて重要である。

国内外において、植生流れを対象とした流体力学的研究が数多く行われてきた。流速場についてはまず、Nepf & Vivoni (2000)²⁾はADV(超音波流速計)を用いて非水没と全水没状態の植生流れの運動量輸送構造や乱れエネルギー収支特性について調べた。全水没植生流れでは植生層下部の水平方向輸送が卓越する領域(Wake region)と植生層上部の鉛直方向拡散が卓越する領域(Mixing-layer region)の2つに区分されることを明らかにした。Nezu & Sanjou (2008)³⁾は開水路植生流れをLDA (Laser-Doppler Anemometer)計

測し、植生流れは横断方向に非一様性を有するため空間平均操作を導入する必要があることを明らかにした。またPIVによる画像計測を導入し、植生先端部においてsweepやejectionが大規模組織渦を形成し、植生内部と外部の運動量交換を支配することを示した。

一方、対象とする流動場に温度分布や濃度分布がある場合には、スカラー量を計測することが、スカラー量の輸送現象を理解する上で必要となる。このようなスカラー輸送現象に関する研究は主に機械工学分野において発展してきた。Crimaldi & Koseff(2001)⁴⁾は、底面から染料を注入し、LIF法(Laser-Induced Fluorescence Measurements: レーザー蛍光誘起法)による画像計測に加えてLIFプローブを用いた点計測を行うことによって、滑面開水路流れの濃度場の空間特性と時系列特性を詳細に研究した。Jacksonら(2007)⁵⁾はLIF法を用いて滑面と粗面開水路流れにおいて濃度計測し、時間平均・乱流統計量を比較した。

Ghisalberti & Nepf (2005)⁶⁾は全水没植生流れを対象にLIF計測を行い、植生密度が増加するとせん断層が形成され、鉛直方向の乱流拡散が促進されることを示した。著者ら(2009)⁷⁾は、植生密度と染料の注入位置を系統的に変化させて、LIF法により、瞬間濃度の多点計測を行い、植生先端付近の大規模組織渦だけでなく植生素のwakeによるカルマン渦が濃度拡散に影響を持つことを示した。

以上のように、植生流れに関する研究は国内外を問わず、

表-1 水理条件

	ϕ	H (cm)	h (cm)	H/h	U_m (cm/s)	Re	Fr
R1	0.015	15.0	5.0	3.0	12.0	30000	0.17
R2	0.061

図-1 計測システム

図-2 染料の注入位置

非常に興味深いトピックスである。しかしながら、これらの研究は濃度場と流速場を同時計測していないため、植生流れで発達する大規模渦のスカラー輸送への寄与を直接評価することはできない。そこで本研究では、植生密度と染料の注入位置を系統的に変化させて、LIF法とPIV法を併用し、染料濃度と瞬間流速の同時計測を行い、全水没植生流れにおける物質輸送メカニズムを明らかにする。

2. 実験装置と計測方法

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⁷⁾である。図-1に本研究のLIF計測システムを示す。 x , y および z はそれぞれ、流下方向、鉛直方向および横断方向の座標軸である。それぞれの方向における瞬間流速を $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ および $\tilde{w}$ 、時間平均流速を U , V および W とする。同様に、染料の瞬間濃度を $\tilde{c}$ 、時間平均濃度を C 、乱れ成分を c とする。全水深は H 、植生高さは h である。植生模型の幅は b 、植生模型の厚さは t_h である。実験には剛体植生 ($h=50\text{mm}$, $b=8\text{mm}$ and $t_h=1\text{mm}$: アクリル板) を用いた。植生模型はレゴブロックを使用して河床に垂直に固定させた。

画像計測に用いる光源として、2Wの連続アルゴンイオンレーザー(波長537nm)による厚さ2mmのレーザー

ライトシートを水路上方から x 軸と平行に照射した。主流方向座標 x の原点 $x=0$ は染料注入ノズル先端とした(図-1)。横断方向照射位置は、植生間領域(non-wake region)に設定した⁷⁾。この $x-y$ 平面を2台の高速度CCDカメラで撮影し、流速-濃度を同時計測した。カメラの解像度は 1024×1024 pixel、撮影領域サイズは $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ である。2台のうち1台はPIV(流速計測)用、残りの1台はLIF(濃度計測)用である。2台のカメラ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って連続撮影を行った。PIVのトレーサには粒径 $100\mu\text{m}$ 、比重1.02のポリスチレン粒子を用い、画像の輝度値から濃度相関法によって瞬間流速ベクトル($\tilde{u}, \tilde{v}$)を算出した。高速カメラに外部トリガー信号を与えて、500Hzのフレームレートで2枚の連続画像のペアを60秒間撮影した。PIVのサンプリング周波数は40Hzである。

濃度計測にはLIF法を用いた。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た。なお染料の注入速度はあらかじめLDAによって計測した⁷⁾同一高さにおける時間平均局所流速に一致させるように染料のヘッドタンク位置を調節した。誘起蛍光化されたローダミンBの反射光の波長は580nmで、高速カメラにシャープカットフィルタ(550nm以下をカットする)を装着

図-3 4象限区分解析

することで PIV トレーサの発光(波長 537nm)を除去し、レーザー光で誘起されたローダミン B の発光のみを撮影することができる⁸⁾。

本研究では一定濃度のローダミン B 溶液にレーザーライトシートを照射して発光強度を計測する予備実験を行い、1 ピクセルごとに次式のような濃度 $\tilde{c}(i, j)$ とローダミン B による発光強度 $\tilde{I}(i, j)$ の線形関係式を確認した⁷⁾。

$$\tilde{c}(i, j) = a(i, j)\tilde{I}(i, j) + b(i, j) \quad (1)$$

添え字 i, j は画像内の pixel 位置を表す。

表-1 に水理条件を示す。植生密度 ϕ と染料の注入位置 y_0 を系統変化させている。ここで U_m は断面平均流速、レイノルズ数は $Re \equiv U_m h / \nu$ (ν は動粘性係数)、フルード数は $Fr \equiv U_m / \sqrt{gh}$ である (g は重力加速度)。植生密度 ϕ は以下の式を用いて算出した。

$$\phi = ab = nbA/V_0 \quad (2)$$

ここで、 n は植生域の体積 $V_0 (=S \times h)$: S は底面積、 h は植生高さ)における植生モデルの個数、 b は植生モデルの幅、 A は主流方向の植生の投影面積である。 a は単位体積あたりの植生の遮蔽面積に相当する³⁾。

図-2 に植生流れの領域区分の模式図と LIF 実験の染料注入位置を併示した。Nepf & Vivoni (2000)¹⁾や Nezu & Sanjou(2008)³⁾の PIV 実験結果から全水没植生流れは乱流特性によって3つの領域に区分される。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、表-1 の全ケースについて3つの領域内に染料の注入位置 y_0 を6つ設定した ($y_0/h=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 2.0, 2.4$ 。図-2 に×で位置

図-4 仮想粒子濃度分布

を示す)。

3. 実験結果と考察

3.1 植生流れの基本統計量

植生流れでは sweep, ejection が発達し、植生層外部の高速流と内部の低速流の運動量が交換されることが知られている³⁾。これを定量評価するために次式で定義されるレイノルズ応力の4象限区分解析¹⁾を行った。

$$RS_i = \left(\overline{uv}\right)^{-1} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t)v(t)I_i(t)dt \quad (i=1,2,3,4) \quad (3)$$

$I_i(t)$ は判別関数で、 (u, v) が i 象限に存在するとき1、それ以外は0である。図-3 は $\phi = 0.061$ のケースの条件付レイノルズ応力 RS_i の鉛直分布を示したものである。本結果より植生層外(over canopy)の上部領域 ($y/h > 1.5$) では $RS_4 < RS_2$ で ejection が卓越し、境界層流れと同様の特性をもつ。一方、植生層内(in canopy)では $RS_4 > RS_2$ で sweep が卓越している。この傾向は既往研究³⁾の結果と一致しており開水路植生流れに特有の乱流構造であるといえる。

3.2 仮想粒子法

仮想粒子法とは、既に計測された瞬間流速場に仮想的な粒子を放出し、その粒子が流速に沿って輸送されるという

図-5 濃度変動強度コンター

仮定のもとに粒子の追跡を行う近似計算手法であり、粒子の鉛直分布情報を得ることができる。本研究では、PIVを用いて瞬間流速場を計測している長所から、この手法を物質輸送メカニズムの予測に使用した。

近似的な仮想粒子の追跡は以下のように算出できる。

$$x_n^{t+1} = x_n^t + \Delta t \cdot u(x_n^t, y_n^t, t) \quad (4)$$

$$y_n^{t+1} = y_n^t + \Delta t \cdot v(x_n^t, y_n^t, t) \quad (5)$$

ここで、 x_n^t および y_n^t は任意粒子 n における任意時刻 t での x 、 y 方向位置である。任意粒子 n の瞬間流速 $u(x_n^t, y_n^t, t)$ $v(x_n^t, y_n^t, t)$ はPIVから得られたデータから求めている。

図-4は $\phi = 0.015, 0.061$ のケースにおいて植生先端部($x/L_0 = 0.3-0.6$, $y/h = 1.0-1.4$ の領域)から仮想粒子を放出した場合の時間平均粒子濃度コンター C_p を示したものである。仮想粒子濃度は計測領域をメッシュに区切り、検査領域内の粒子数をカウントして算出した。植生密度の小さなケース $\phi = 0.015$ では植生要素の数が少なく植生内部への

粒子輸送が妨げられないために植生層内部の粒子濃度がより増加すると予測されるが、結果は、図-4から、植生密度の大きなケース $\phi = 0.061$ の方が植生内部に多くの粒子が輸送されており、興味深い。これは、Nezu & Sanjou(2008)³⁾やPoggi(2003)⁹⁾によって示されているように植生密度が増加するとsweepの寄与が大きくなるため、sweepの粒子輸送への寄与が植生要素の遮蔽効果よりも大きいことを示している。植生外部についても $\phi = 0.061$ の方がejectionへの寄与が大きく、高濃度の粒子分布が水面側で確認できる。池田ら(1992)¹⁰⁾は片側植生流れにおいて植生群落境界の運動量交換は植生密度がある値をとるときにピーク値をもつことを明らかにしているため、今後実験ケースを増やし植生層内外の物質交換がピークをとる植生密度のケースを検討する必要がある。

3.3 濃度変動強度特性

これまでの植生流れの物質輸送に関する研究は非水没植生流れがメインであったため、濃度場の時間平均構造を

図-6 (a) 瞬間流速—濃度コヒーレンス, (b) 瞬間流速—濃度のフェイズ

中心に研究されてきた。しかし、本研究のような全水没植生流れでは植生先端部で大規模渦が発生し、濃度変動強度 c' (濃度変動 $c(t)$ の r.m.s 値) に与える影響は大きいことが推測されるため、濃度変動強度特性を調べることも重要である。

図-5 は $\phi=0.015, 0.061$ における濃度変動強度 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 ($y_0/h=0.2, 1.0, 1.4, 2.4$) とした。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。Wake zone ($y_0/h=0.2$) に注入すると c' コンターは注入点付近でピークを持ち、染料注入点から離れた領域では値が減衰している。この特性は植生密度が大きくなるほど顕著にみられ、植生要素の wake によって染料が拡散されている。また、 c' コンターは植生外部 ($y/h > 1.0$) ではほぼゼロとなるため、Wake zone で発生した濃度変動が植生外部には伝わらない。これは、Wake zone のスカラー量は植生層外部には浮上しないことを示唆しており、Nepf & Vivoni (2000)²⁾ の知見と一致する。

これに対して、植生先端から注入したケース ($y_0/h=1.0$) では、濃度変動 c' コンターが植生内部と外部に大きく広がっているのが観察される。また植生密度の大きなケース $\phi=0.061$ では小さなケース $\phi=0.015$ に比べ、 c' コンターの流下方向の減衰が大きい。これらの結果は $\phi=0.061$ のケースでは植生先端部で大規模渦が発達し、植生内部と外部の物質交換が活発に行われていることを示しており、図-4 の仮想粒子の計算結果と一致する。

Log-law zone に注入したケース ($y_0/h=2.0$) では、 c' コンターの上下方向の広がりが小さく、流下方向への濃度変動輸送が増加し、鉛直方向への輸送が小さくなっていることが図から確認することができる。 $y_0/h=2.0$ のケースでは植生密度による変化はみられないため、大規模渦は

Log-law zone のスカラー輸送には寄与しないことが推測される。

3.4 濃度—流速スペクトル解析

濃度と流速のスケールごとの相関特性を明らかにするために、図-6 に $\phi=0.061$ のケースの植生先端における濃度 $\tilde{c}$ と鉛直流速 $\tilde{v}$ のコヒーレンス $Coh(f)$ およびフェイズ $\theta(f)$ を示す。

$$Coh^2_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (6)$$

$S_{xy}(f)$ は変動量 $x(t)$ と $y(t)$ のクロススペクトル。低周波側 ($f < 1\text{Hz}$) ではコヒーレンスは大きな値をもち、フェイズ (位相差) はほぼゼロになる。このスケールの濃度と鉛直流速は遅れ時間ゼロで強い相関をもっている。これに対して、高周波側 ($f > 1\text{Hz}$) ではコヒーレンスは小さな値となり、フェイズはほとんどランダムな値をもつ。このスケールの濃度と流速の相関はほとんどない。

すなわち、濃度と鉛直流速の相関は、その大部分が大きい長さスケールの低周波渦によるものであり、小さな長さスケール以下の高周波変動では、濃度と流速はほとんど相関をもたない。これらの結果は岡田ら(2001)¹¹⁾ の熱線プローブの実験結果と一致する。

3.5 瞬間流速—濃度場

本研究では PIV と LIF 法を併用した瞬間流速—濃度同時計測を行っているために組織渦構造の濃度輸送への寄与を直接計算し、評価することができる。特に Nezu &

図-7 瞬間流速ベクトル分布 (PIV 計測結果)

図-8 瞬間濃度分布 (LIF 計測結果)

図-9 瞬間レイノルズ応力分布 (PIV 計測結果)

Sanjou(2008)³⁾によって植生流れでは 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-7はPIV計測によって得られた $\phi=0.061$ 、植生先端に注入したケース ($y_0/h=1.0$) の瞬間流速ベクトル分布 ($\tilde{u}, \tilde{v}$) を時系列表示したものである。図中のカラーコンターは瞬間主流速の変動成分 u を示している。図-8はLIF計測によって得られた同時刻の瞬間濃度分布 $\tilde{C}$ を示している。 $t=0.0[s]$ で高速流の下降ベクトル sweep 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。 $t=4.8[s]$ では sweep 自体が流下方向に移流され、上流側で低速流の上昇ベクトル ejection によってノズルから注入

された染料が植生外部に輸送されている。 $t=7.5[s]$ では再び植生先端部で sweep が発生し、高濃度分布が植生内部へ入り込んでいる。これらのことから sweep, ejection が染料輸送に寄与することがわかった。

図-9にはPIV計測によって得られた図-7と同時刻の瞬間レイノルズ応力分布である。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。これらの結果から植生流れの組織構造は運動量輸送と鉛直方向のスカラー輸送を支配していることが示唆され、注目される。

図-10 条件付きサンプリング濃度分布

図-11 (a) 鉛直方向スカラーフラックスの流下方向変化, (b)スカラーフラックスの4象限区分解析

3.6 条件付きサンプリング解析

Raupach ら(1996)¹²⁾やGhisalberti & Nepf(2006)¹³⁾は植生流れではsweep, ejection の物質輸送への寄与が大きいことを示唆しているが、実験データは得られていない。そこで本研究では瞬間流速を用いて条件付解析を行う。図-10 に $\phi=0.061$, $y_0/h=1.0$ のケースについて ejection 発生時と sweep 発生時のみ条件付サンプリングした時間平均濃度 $C_{Ejection}$ と C_{Sweep} を示す。本研究では小スケールの組織構造の寄与を除くためにホール値は $H=1$ を用いた。すなわち、瞬間レイノルズ応力がある閾値($|\overline{uv}| > Hu'v': H=1$)を超えた場合のみを sweep, ejection として検出している。図中には平均濃度分布の上下方向の半値幅それぞれ $b_{1/2}^+$, $b_{1/2}^-$ と平均濃度のピーク位置の軌跡を併示している。また比較のため全時間平均濃度コンター(Non-conditional)も併示している。 C_{Sweep} ではピーク濃度が植生内部でみられ、sweep 発生時には植生内部に染料が入り込んでいることがわかる。これに対して、ejection 発生時には $C_{Ejection}$ の最大濃度が植生先端より上でみられ、植生層の外部に染料が輸送されているのが観察される。また植生内部と植生外部

領域内平均濃度を比較すると sweep 発生時には Non-conditional に比べ植生内部領域($y/h=0.1-1.0$)の平均濃度が 109%増加し、ejection 発生時には Non-conditional に比べ植生外部領域の平均濃度が 79%増加した。

3.7 濃度—流速結合統計量

乱流スカラーフラックスは乱流物質輸送を評価する上で非常に重要な統計量である。本研究では流速—濃度を同時計測しているため、スカラーフラックスを直接計算することが可能である。図-11 (a)は $\phi=0.061$, $y_0/h=1.0$ のケースの全時間平均したスカラーフラックス $\overline{vc}$ (Non-conditional)の流下方向変化を示す。 $\overline{vc}$ (Non-conditional)は植生外部で正値をもち、植生内部で負値をもつのが観察される。これは図-10 で考察したように、ejection によって染料が植生外部に輸送され ($\overline{vc} > 0 : v > 0, c > 0$)、sweep によって植生内部に染料が輸送されるためである ($\overline{vc} < 0 : v < 0, c > 0$)。スカラーフラックスの値は注入点から離れるに従って減少している。

次に大スケールの ejection, sweep のスカラー輸送への寄

与を調べるために、ホール値 H を設けて ejection 発生時と sweep 発生時のみ条件付サンプリングしたスカラーフラックス $\overline{vc}$ (ejection: $H=1$), $\overline{vc}$ (sweep: $H=1$) の鉛直プロット図を図-11 (b) に示す。図から特に sweep 発生時において $\overline{vc}$ (sweep: $H=1$) は植生内部で Non-conditional に比べて大きな負値 ($v < 0$, $c > 0$) をとり、植生層内部へのスカラーフラックスの浸透が大きくなっており、注目される。一方、植生先端部で $\overline{vc}$ (sweep: $H=1$) が正值をとるのは、sweep 発生領域に濃度分布が存在するとは限らないため sweep によって低濃度分布 ($v < 0$, $c < 0$) が輸送されるためであると推測される。これに対して、ejection 発生時には植生外部でスカラーフラックスが大きくなっている。

4. おわりに

本研究は開水路植生流れにおいて PIV-LIF 法による濃度一流速多点同時計測を行い、全水没状態の植生流れにおける乱流拡散現象について検討した。特に、条件付きサンプリング解析を導入することで、植生流れの組織乱流の乱流拡散への寄与を直接評価することができた。ここで得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) 濃度変動強度コンターから植生密度の大きなケースではコンター値の流下方向の減衰が大きいため、植生先端部で大規模組織渦が発達し、鉛直方向のスカラー輸送が大きくなることがわかった。この結果は PIV 計測結果を用いた仮想粒子法の計算結果と一致した。
- 2) 濃度一流速の相関スペクトル解析から濃度と鉛直流速の相関は、その大部分が大きい長さスケールの低周波渦によるものであり、小さな長さスケール以下の高周波変動では、濃度と流速はほとんど相関をもたないことがわかった。
- 3) 瞬間流速場と瞬間濃度場から sweep, ejection がそれぞれ植生内部と植生外部に染料を輸送しているのが観察された。また瞬間レイノルズ応力分布と比較することで植生流れの組織構造は運動量輸送と鉛直方向のスカラー輸送を支配していることが示唆された。
- 4) sweep, ejection の染料輸送への寄与を定量評価するために ejection 発生時と sweep 発生時のみ条件付サンプリングして時間平均濃度を比較した。sweep 発生時には植生内部の領域内平均濃度が 109% 増加するという結果が得られた。
- 5) 植生流れのスカラーフラックスは植生内部では負値、植生外部では正值をとるのが観察された。また sweep 発生時には植生層内部へのスカラーフラックスの浸透が大きくなっており、大スケールの sweep によって植生内部に染料が輸送されていることがわかった。

参考文献

- 1) 玉井信行, 奥田重俊, 中村俊六 (2000) : 河川環境評価法, 東京大学出版会
- 2) Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000) : Flow structure in depth-limited, vegetated flow, *Journal of Geophysical Research*, Vol.105/No.C12, Vol.28, pp.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.
- 4) Crimaldi, J. P. and Koseff, J. R. (2001). High-resolution measurements of the spatial and temporal scalar structure of a turbulent plume, *Experiments in Fluids*, Vol.31, pp.90-102.
- 5) Jackson, J. L., Webster, D. R., Rahman, S., and Weissburg, M. J. (2007): Bed-roughness effects on boundary-layer turbulence and consequences for odor-tracking behavior of blue crabs (*Callinectes sapidus*), *Limnology and Oceanography*, Vol.52(5), pp.1883-1897.
- 6) Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2005) : Mass Transport in Vegetated Shear Flows, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 5, pp.527-551.
- 7) 片山愛来, 棚津家久, 岡本隆明 (2009) : LIF 計測による植生開水路流れの物質輸送構造に関する研究, 応用力学論文集, Vol.12, pp.813-822.
- 8) PIV ハンドブック (2002), 可視化情報学会編
- 9) Poggi, D., Porporato, A., and Ridolfi, L. (2004) : The Effect of Vegetation Density on Canopy Sub-layer Turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 111, pp.565-587.
- 10) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋 (1992): 側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.447/II-19, pp.25-34.
- 11) 岡田吉弘, 酒井康彦, 小林紀久 (2001): 軸対称乱流噴流中の速度・スカラー相関の構造, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 67(664), pp. 173-180.
- 12) Raupach, M.R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y (1996): Coherent Eddies and Turbulence in Vegetation Canopies: The Mixing-Layer Analogy, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.78, pp.351-382.
- 13) Ghisalberti, M., and Nepf, H.M. (2006). The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies, *Environ. Fluid Mech.*, Vol.6, pp.277-301.

(2011 年 3 月 8 日 受付)