応用力学論文集 Vol.12, pp.813-822 （2009 年 8 月） 土木学会

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

Experimental study on Mass transport in vegetated open-channel flows by LIF measurements

片山愛来*，禰津家久**，岡本隆明***
Aki Katayama, Iehisa Nezu and Takaaki Okamoto

*学生員，京都大学大学院修士課程，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）
**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（同上）
***学生員，京都大学大学院博士課程，工学研究科社会基盤工学専攻（同上）

Aquatic plants in natural rivers are the essentially important components of many ecosystems and the submerged vegetation has the potential to improve water quality. Submerged canopies generate coherent vortices at the top of the canopy, which control the mass exchange between the within-canopy layer and the over-canopy layer. While the turbulent diffusion in emergent vegetated flows has been studied by some researchers, the effect of the submerged vegetation on mass transport has not been fully investigated. So, continuous dye-injection experiments were conducted to evaluate the vertical mass transport in open-channel flow with rigid vegetation models by changing the vegetation density. In the present study, laser-induced fluorescence (LIF) measurements were developed to measure the turbulent diffusion property.

Key Words: vegetation, coherent motion, mass transport, LIF, open channel flow

１．はじめに

近年河川環境に対する意識が高まってきており，コンクリートに替わって樹木や植生による河川整備が注目を集めている．河川には産業排水や汚水などが流れ込むが，植生による水質浄化作用も期待できる．また植生流れでは植生先端部で大規模組織渦が発達し，浮遊土砂や栄養塩の輸送に影響すると考えられる．このため植生流れの物質輸送メカニズムを解明することは水工学および河川環境上においてきわめて重要である．

物質輸送に関する研究は，主にジェット流を対象に発展してきた．Chen & Jirka (1999)[1]は，LIF 法（Laser-Induced Fluorescence Measurements：レーザー蛍光誘起法）を用いた濃度計測法について研究し，LIF 法におけるローダミン染料の発光特性や吸光特性について詳細に報告している．Webster ら(2003)[2]は，LIF 法を用いて滑面開水路流れにおける乱流拡散特性について研究し，底面付近においては濃度分布がガウス分布に一致しないことを明らかにした．酒井ら(2007)[3]は高シュミット物質拡散場を対象にホットフィルム流速計と光ファイバープローブを用いて速度 2 成分―濃度の同時計測を行い，物質フラックスの統計的特性及び速度―濃度スペクトルのスケーリング則について報告している．

最近では植生流れにおける物質輸送や乱流拡散特性についての研究も行われている．Gao ら(1989)[4]は大気植生流れにおいて３成分超音波流速計・温度計を用いて流速ー気温の同時計測を行い，組織運動や両者の相関を調べることで sweep や ejection によって熱輸送が支配されることを示した．Ghisalberti & Nepf (2005)[5] は全水没植生流れを対象に LIF 計測を行い，植生密度と乱流拡散の関係特性について報告している．Rahman & Webster(2005)[6]は粗度底面を有する流れについて LIF 法を用いて濃度場を計測し，粗度効果によって滑面開水路流れより濃度拡散が促進されることを解明した．Matthew ら(2007)[7] はサンゴ植生流れについて LIF 計測を行い，植生密度の大小，水面波の有無によって植生層内外の物質輸送効率が変化することを解明した．Nepf & Ghisalberti (2008)[8]は，全水没植生開水路流れにおける流速分布や乱れ構造，濃度輸送に関して詳細なレビューを行っており，全水没植生流れにおける輸送では，植生先端付近で大きくなる流速シアーによる乱れと植生内部で起こる wake による乱れの影響が支配的になることを示している．

このように物質輸送については多くの研究者によって様々な知見が得られている．しかしながら，滑面開水路流れを含め濃度の多点計測を行った例は少なく，また，植生開水路流れにおいて大規模組織乱流構造が乱流拡散特性に及ぼす影響についても未解明点が多い．そこで本研究で

表-1　水理条件

Case	Φ	H(cm)	h(cm)	H/h	U_m(cm/s)	Re	Fr
R1	0.0	15.0	-	-	12.0	30000	0.17
R2	0.015		5.0	1.0			
R3	0.061						

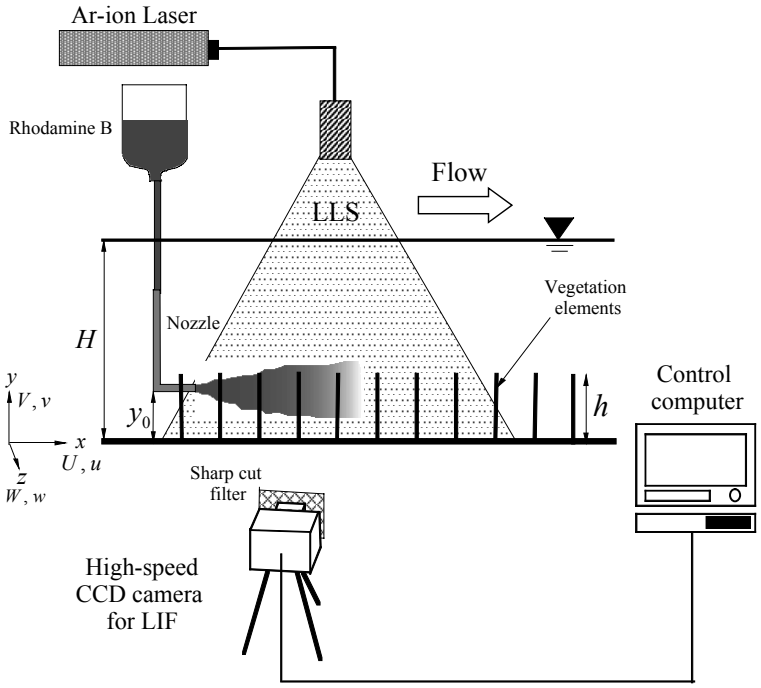

図-1　計測システム

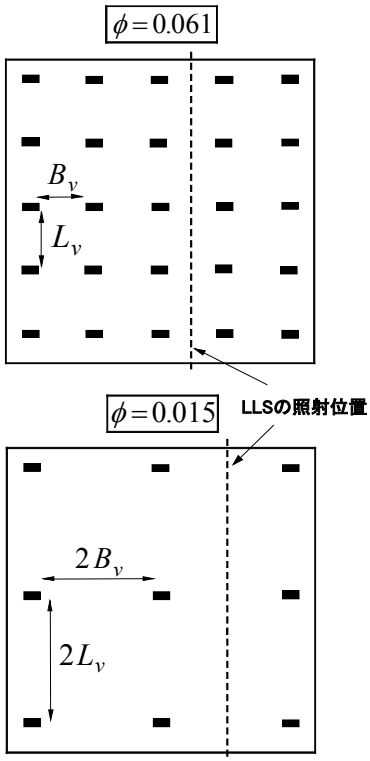

図-2　植生配置パターン

は，植生密度と染料の注入位置を系統的に変化させて，LIF 法を用いて染料濃度の多点計測を行い，全水没植生流れにおける物質輸送構造を明らかにする．

2．実験装置と計測方法

図-1 に本研究の LIF 計測システムを示す．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[9]である．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．全水深は H，植生高さは h である．植生模型は厚さ 1mm のアクリル板を高さ h=50mm，幅 b=8mm の短冊状に切ったものを使用している．本研究は植生流れの拡散現象の研究の基礎ステップであり，水流による変形がないモデルを用いた（剛体植生（Rigid vegetation）モデル）[9]．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．図-2 のように計測部を含めて 8m の区間にわたって水路底面に正方格子状に配置した．図中の B_v，L_v はそれぞれ植生密度の大きなケース（後述の式(1)で定義した植生密度が ϕ=0.061））流下方向と横断方向の植生の配置間隔であり，$B_v = L_v$=24mm であった．

濃度計測には LIF 法を用いた．光源として３W の連続アルゴンイオンレーザー（波長 537nm）を用いて厚さ 2mm のレーザーライトシート（LLS）を水路上方から植生間領域（図-2）に照射し，側方に設置した高速度 CMOS カメラ（1024×1024 pixel）でデジタル撮影した．撮影領域サイズは全水深領域を含むように 15cm× 20cm で，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）．カメラには 40Hz の外部トリガーを与えて， 500Hz のフレームレートで 60 秒間撮影した．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．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）を装着することで，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[10]．

表-1 に水理条件を示す．かぶり水深比 H/h，平均流速 U_m は一定として，表のように植生密度 ϕ のみを 0.0，0.015，0.061 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 y_0 を６段階に変化させた．ϕ=0.0 のケースは

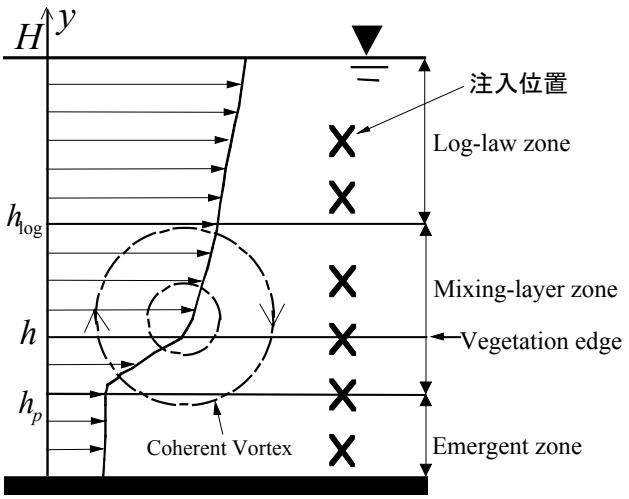

図-3 領域区分と染料注入位置

滑面状態を表している. 植生密度ϕは以下の式を用いて算出した.

$$\phi = ab = nbA/V_0 \tag{1}$$

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[11].

Nepf & Vivoni (2000)[11]やNezu & Sanjou(2008)[9]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．**図-3** 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．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[9), 11)]として定義される．流速分布はほぼ一定で，この領域では水平方向の輸送が卓越する.

第Ⅱ層 : Mixing-layer zone（$h_p \le y \le h_{log}$）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．植生流れで最も重要な領域である.

第Ⅲ層 : Log-law zone（$h_{log} \le y \le H$）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）と定義する．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と考えられる.

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-3** に×で位置を示す）．なお染料の注入速度はあらかじめ LDA によって計測した[9]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.

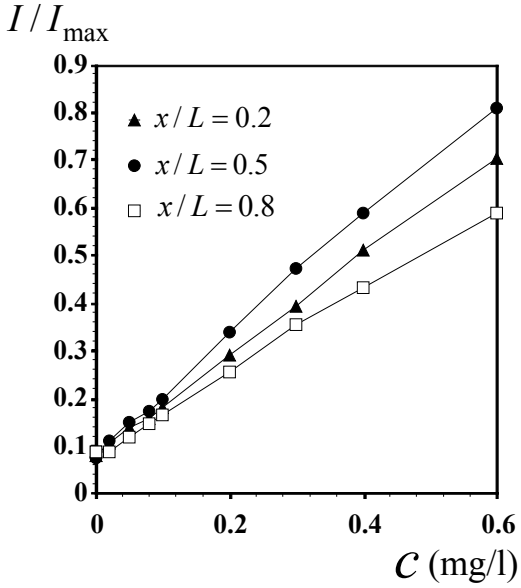

図-4 濃度のキャリブレーション

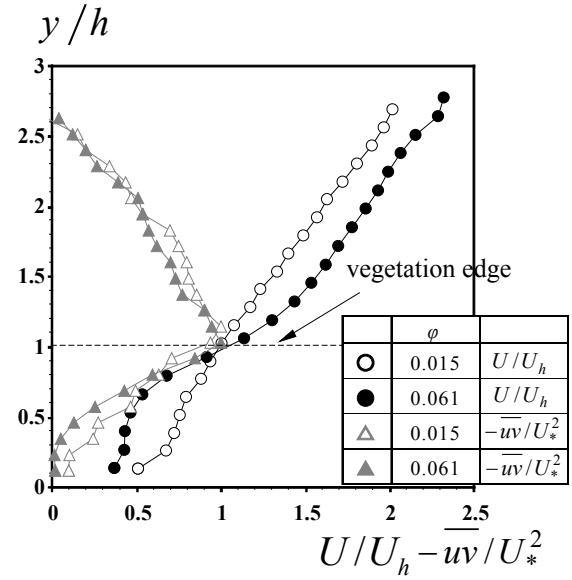

図-5 流速分布・レイノルズ応力分布の比較

3．LIF 法におけるキャリブレーションについて

LIF 法による計測を行う際に検討すべき項目[10]として，計測領域全体を同輝度・同光感度に設定することが必要である．これは，レーザー光強度が端部で低下することや，CMOS カメラの光差誤差の可能性があるためである. これを補正する一例として，Chen & Jirka (1999)[1]はピクセルごとにレーザー光強度に関する補正係数を算出してキャリ

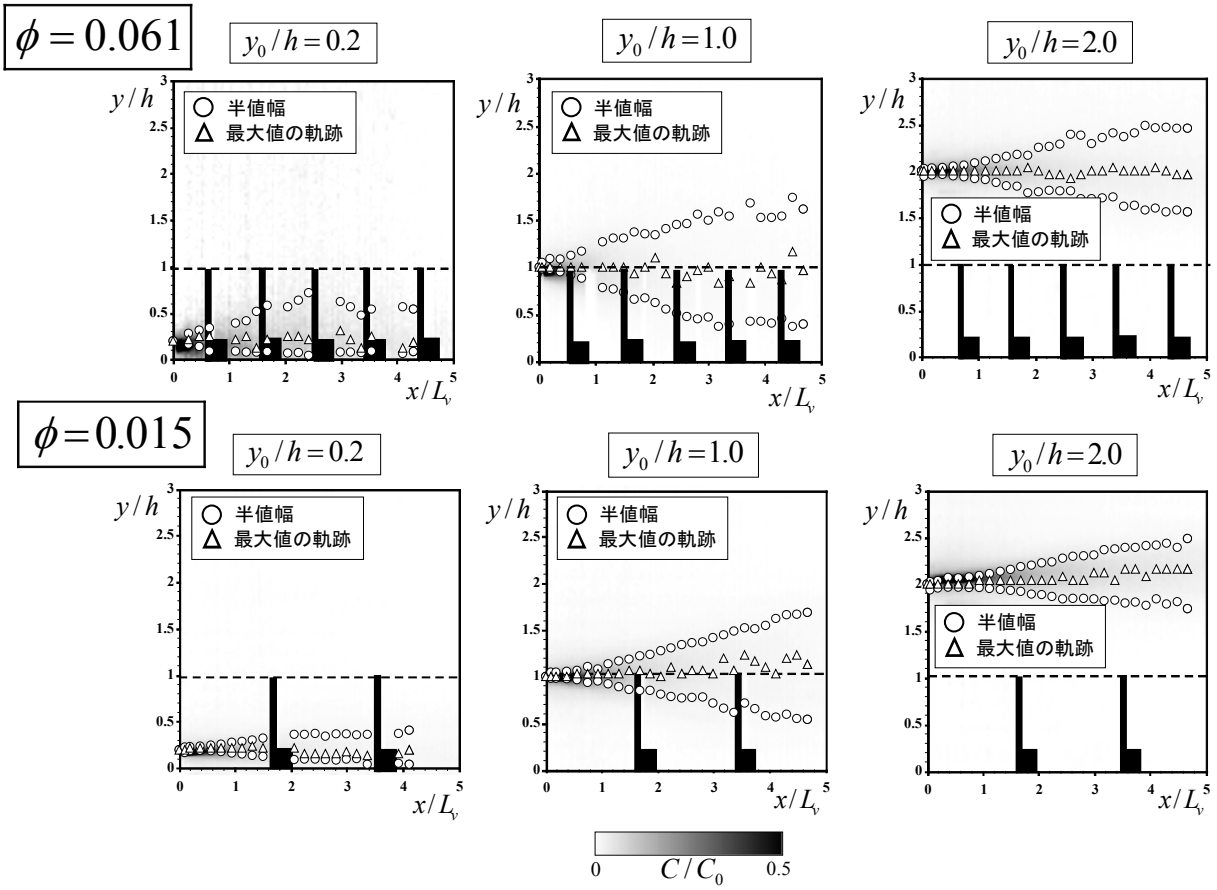

図-6 時間平均濃度コンター

ブレーションを行っている．本研究では，計測領域全体にかかる大きさのガラス製の容器に種々の一定濃度のローダミンB溶液を満たして撮影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．

$$\tilde{c}(i,j) = a(i,j)\tilde{I}(i,j) + b(i,j) \tag{2}$$

添え字 i, j は画像内の pixel 位置を表す．**図-4** は画像内の pixel 位置ごとに染料濃度と輝度の線形関係を確認した一例である．図中のLは撮影領域のx方向の長さを表す．本研究の画像解析では，画像情報をコンピューターで読み込み，撮影画像中の各ピクセルの輝度から濃度を数値的に判断するため，高精度な解析を行うには外界の光をできる限り遮断するように工夫しなければならない．そのため，周囲の照明等にも注意を払い，さらに暗幕を利用した．

4．実験結果と考察

4.1 時間平均特性

図-5 にϕ=0.061, 0.015 のケースについてPIV計測[9]によって得られた時間平均主流速鉛直分布Uとレイノルズ応力分布$-\overline{uv}/U_*^2$を比較した結果である．Nezu & Sanjou (2008) [9]が示したように，植生密度が増加すると植生内部（y/h<1.0）で流速の低減効果が増すために，先端部での流速シアーが大きくなっている．また両ケースともレイノルズ応力分布は植生先端でピーク値をもっている．

図-6 は植生密度の大きなケース（ϕ=0.061）と小さなケース（ϕ=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-3** 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$b_{1/2}^+$，$b_{1/2}^-$と平均濃度分布のピーク位置$C_{\max}(x)$の軌跡を併示している．鉛直方向の半値幅$b_{1/2}^+$，$b_{1/2}^-$は注入点から流下方向に離れるにつれて増加しており，ジェット流の既往研究[1), 2)]で観察された傾向と定性的に一致している．また植生先端に注入したケース（y_0/h=1.0）で比較するとϕ=0.061 でϕ=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-6 の結果から染料注入位置や植生密度によって物質輸送メカニズムは大きく異なることが推測される．そこで本研究では鉛直方向の濃度輸送を定量的に評価するために，**図-7** には全ケースの流下方向位置x/L_v=0.5，1.0，2.0

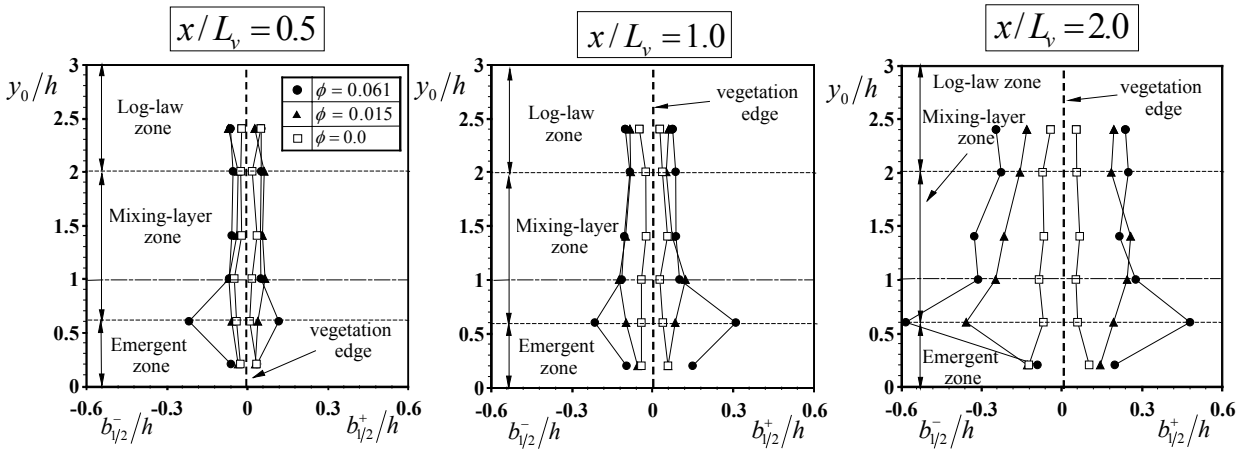

図-7 半値幅の比較

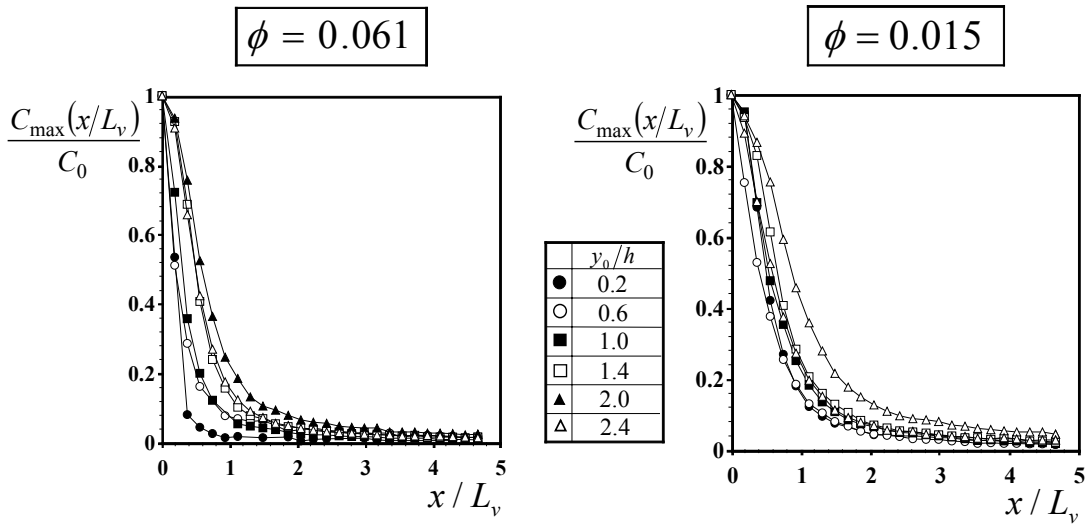

図-8 時間平均濃度 ピーク値の減衰（注入位置比較）

における上下方向の半値幅$b_{1/2}^+$，$b_{1/2}^-$をまとめた．滑面状態のケース（ϕ=0.0）では，植生流れのケース（ϕ=0.061, 0.015）よりも半値幅が小さく，注入位置による違いはほとんどみられない．これに対して，植生密度の大きなケース（ϕ=0.061）では，Mixing-layer zone の下端と中心位置に注入したケース（y_0/h=0.6, 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[8),9)]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ー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． 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い．これは Nepf & Vivoni (2000)[11)]の結果に一致する．植生先端から水面までの領域では半値幅$b_{1/2}^+$，$b_{1/2}^-$は減少しており，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．これらの結果から，植生流れでは，領域によって乱流拡散特性が異なることが評価でき，興味深い．

一方，植生密度の小さいケース（ϕ=0.015）でもϕ=0.061 と同様の傾向がみられるが，全体的にϕ=0.061 よりも半値幅$b_{1/2}^+$，$b_{1/2}^-$は小さくなっている．これは，ϕ=0.015 では植生抵抗が減少し植生層内外の流速差ΔU が小さくなるために大規模組織渦の発達が抑えられるためと考えられる．また，Emergent zone に注入したケース（y_0/h=0.2）においてϕ=0.015 に比べϕ=0.061 のケースの方が半値幅が大きくなっているのは，Poggi ら(2004)[12)]の報告にもあるように，植生密度の増加に伴い植生背後の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であると推測される．

図-8 は時間平均濃度のピーク値$C_{\max}(x)$の流下方向の減衰を植生密度ごとにまとめて示したものである．植生密度によらず植生内部から注入したケース（y_0/h=0.2, 0.6,

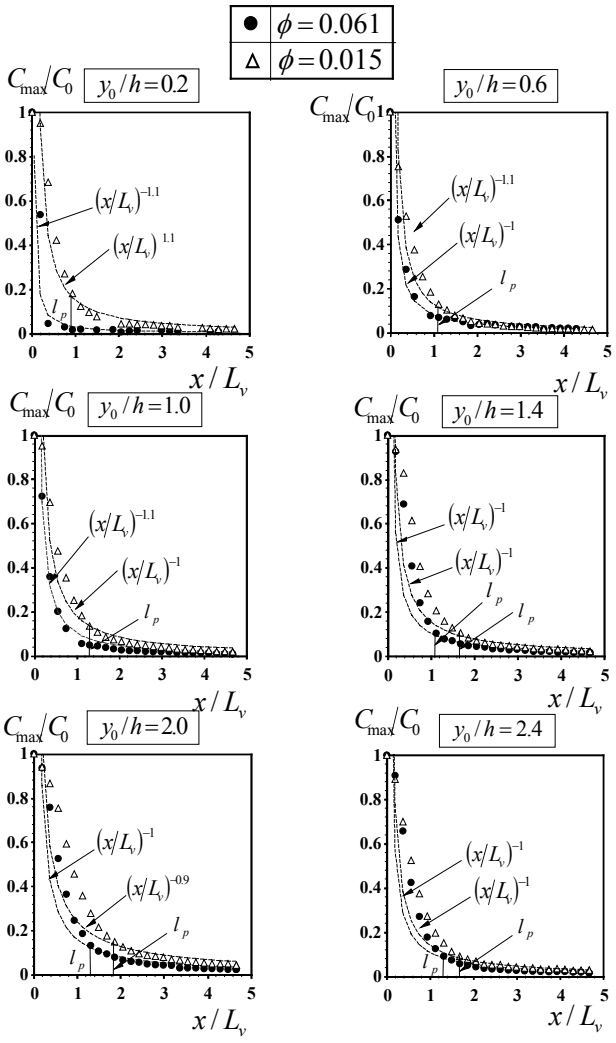

図-9 時間平均濃度 ピーク値の減衰（植生密度比較）

1.0）でピーク値$C_{\max}(x)$の減衰が大きいことがこの図から確認することができ，**図-7** で得られた植生内部で濃度拡散が大きくなるという結果と対応している．また，植生密度の大きなケース（ϕ=0.061）と小さなケース（ϕ=0.015）を比較すると，ϕ=0.015 の方が全体的に濃度ピークの減衰が小さくなっていることがわかる．これは，ϕ=0.015 の方がϕ=0.061 に比べて植生内部における植生の wake や大規模組織渦の影響が小さく濃度が拡散されないためと考えられる．

図-9 はϕ=0.061, 0.015 の時間平均濃度分布のピーク値$C_{\max}(x)$の流下方向の減衰を染料注入位置ごとに示したものである．図より，植生内部（y_0/h<1.0）では植生密度が大きいケースの方がピーク値の減衰が早くなっており，注目される．これは植生内部におけるカルマン渦や先端部で発達する大規模組織渦構造の影響で濃度拡散の大小に差が出たためと考えられる．またこの特性は Ghisalberti & Nepf (2005)[5]の実験結果と一致する．植生の影響の少ない Log-law zone から注入したケース（y_0/h =2.0, 2.4）において植生密度の違いによる減衰の大きさの差が小さくなっている．また，図中には各ケースの結果に対するベキ乗関数による近似曲線を併示した． Webster ら (2003) [2]によって滑面開水路流れにおける時間平均濃度のピーク値の減衰$C_{\max}(x)$はx^{-1}に従うことが示されているが，本研究においてもx^{-1}またはそれに近い関数に従う結果となった．本研究ではさらに，ノズル注入位置からベキ乗関数に従うまでの流下方向距離をl_pと定義し，図中に併示している．

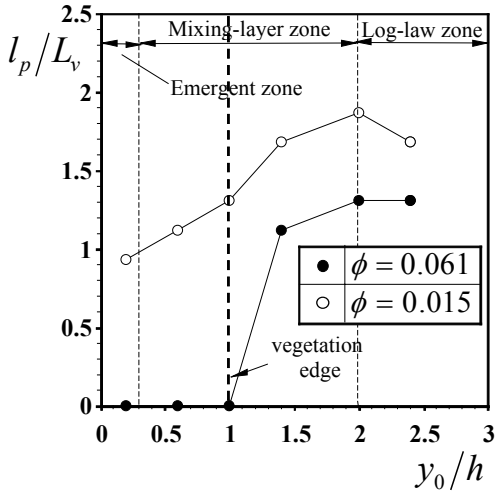

図-10 l_p の比較

図-10 にベキ乗関数に従うまでの流下方向距離l_pをまとめて示す．ジェット流の研究では，ノズル自体の太さのためにポテンシャル領域と呼ばれる領域が現れることが知られている．l_pはポテンシャルコア領域のような特性を示す濃度の減衰が緩やかな領域の長さである．**図-10** より，l_pは植生内部に注入したケース（$y_0/h \le 1.0$）では小さく，植生外部（$y_0/h > 1.0$）では大きくなっているのが観察される．さらに，植生密度の大きいケース（ϕ=0.061）の方でl_pが減少していることから，植生内部では植生要素の wake によるカルマン渦の存在によりポテンシャルコア領域の発達が妨げられることが示唆される．

4.2 滑面開水路流れの濃度統計量との比較

既往の渇面開水路流れの結果[6]と比較し，底面植生帯が物質輸送に与える影響について考察する．ジェット流の時間平均濃度分布はガウス分布とよく一致することが知られている[2, 3]．**図-11** に各領域の代表点y_0/h=0.2, 1.0, 2.0 における時間平均濃度鉛直分布とガウス分布を比較した．ガウス分布$C_G(x,y)$は次式で与えられる．

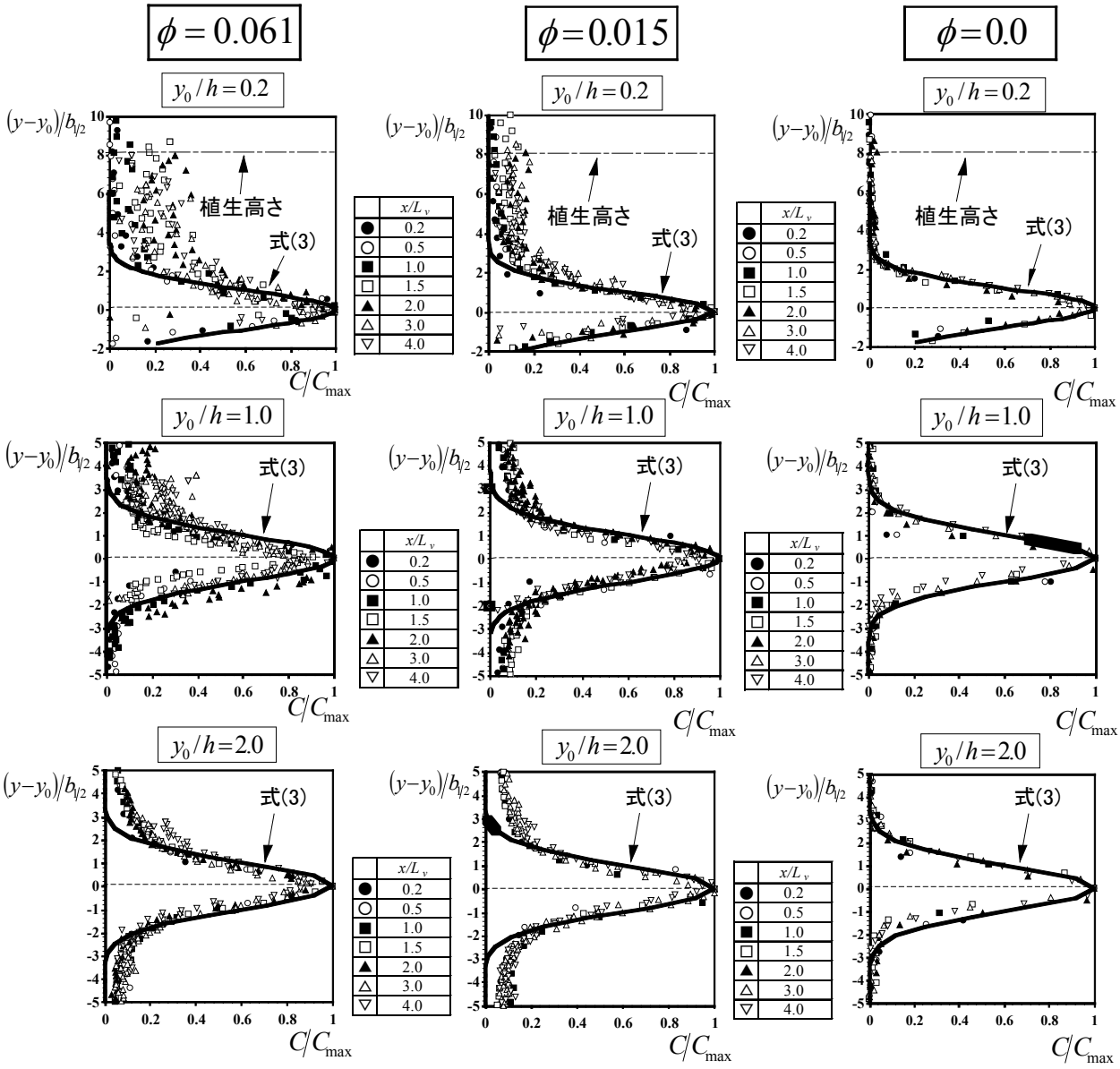

図-11 時間平均濃度分布およびガウス分布

$$C_G(x,y)=C_{\max}(x)\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3}$$

$$\sigma=\frac{1}{2}\left(b_{1/2}^{+}+b_{1/2}^{-}\right) \tag{4}$$

ここで$C_{\max}(x)$は流下方向位置ごとの最大濃度，σ は上下方向の半値幅$b_{1/2}^{+}$，$b_{1/2}^{-}$の平均値である．植生密度の大きなケース（ϕ=0.061）では，Emergent zone（y_0/h=0.2）と植生先端（y_0/h=1.0）に注入したケースにおいて，時間平均濃度分布Cはガウス分布に従っていないのが確認される．一方，滑面開水路流れ（ϕ=0.0）では，C分布のガウス分布からのずれは小さいため，これらは植生流れに固有の乱流物質輸送特性と考えられ，注目される．植生先端に注入したケース（y_0/h=1.0）では，Mixing-layer zone の内部で発達する大規模組織渦によって植生内部と植生外部への濃度輸送が促進されてガウス分布からずれたと考えられる．これに対して，Emergent zone に注入したケース（y_0/h=0.2）のガウス分布からのずれは，植生要素の wake によって植生内部の流れが非一様になるためと考えられる．粗面開水路流れについて研究した Rahman & Webster(2005)[6]の結果でも同様の傾向がみられる．

また**図-11** から植生先端（y_0/h=1.0）に注入したケースより Emergent zone（y_0/h=0.2）に注入したケースの方がずれが大きいため，植生先端部の大規模組織渦よりも植生要素の wake が平均濃度分布に与える影響が大きいという結果が得られ，興味深い．植生密度の小さなケース

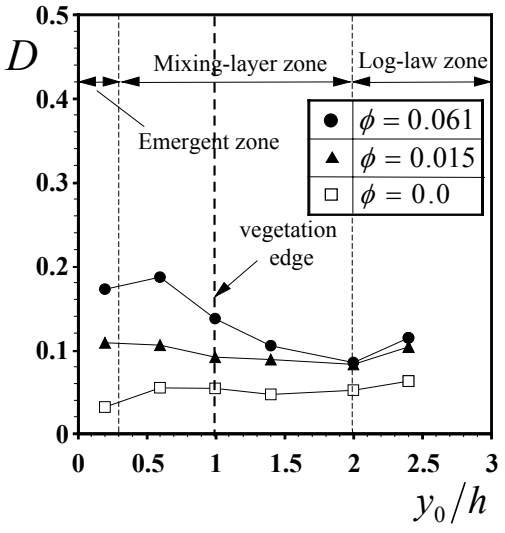

図-12 ガウス分布からのずれの比較

(ϕ=0.015) では, y_0/h=0.2 と 1.0 においてϕ=0.061 よりもガウス分布からのずれが小さく, 植生要素の wake や大規模組織渦の影響は植生密度が減少すると小さくなると考えられる. また, 水面付近に注入したケース (y_0/h=2.0) では, 植生密度によるガウス分布からのずれへの影響はほとんどみられなかった.

図-12 に時間平均濃度分布 C のガウス分布からのずれを積分し平均したものを比較した. ガウス分布からのずれは次式で計算した.

$$D = \frac{1}{H \times L} \iint_{x,y} \sqrt{\{C_G(x,y) - C(x,y)\}^2}\, dxdy \qquad (5)$$

ここで L は撮影領域の流下方向の長さである. **図-11** と同様, 植生密度が増加すると植生内部でのガウス分布からのずれが大きくなっている. 水面付近に注入したケース (y_0/h=2.4) でガウス分布からのずれが増加する傾向がみられるのは水面の存在の影響をうけているためと考えられる.

4.3 濃度変動強度特性

図-13(a), (b) に ϕ=0.061, 植生先端に注入した (y_0/h=1.0) ケースの主流速[9], 濃度のパワースペクトル S_u, S_c を示す. 主流速スペクトル S_u は低周波領域 0.1-0.2Hz で明確ピーク周波数をもち, 植生流れの組織渦の周波数だと考えられる. また濃度スペクトル S_c も同様に 1-0.2Hz でピーク周波数をもっており流速スペクトルのピーク周波数と一致するため, 濃度変動と流速変動に大きな相関があり, 組織渦が濃度輸送に寄与していることが示唆される.

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

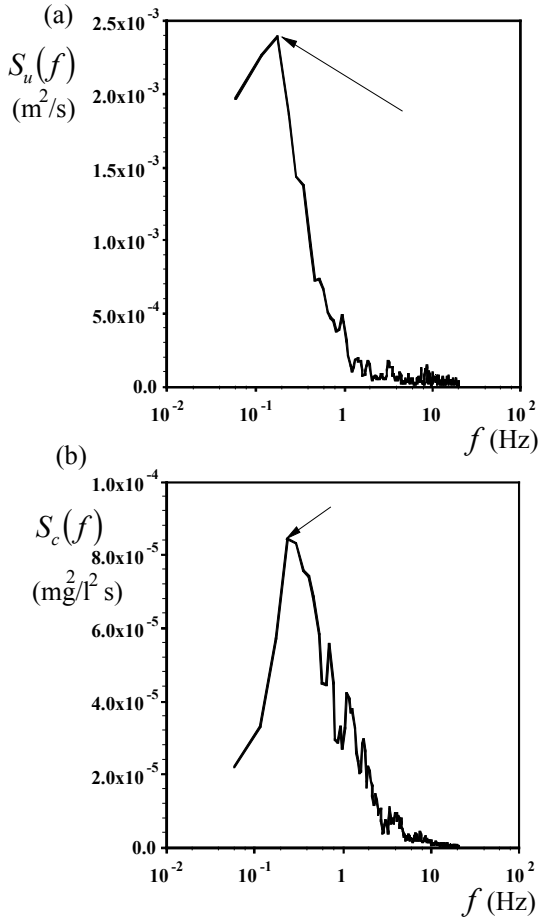

図-13 パワースペクトルの比較
(a) 主流速スペクトル, (b) 濃度スペクトル

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 rms 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-14** はϕ=0.061, 0.015 の各領域の代表点 y_0/h=0.2, 1.0, 2.0 における濃度変動強度 c' の鉛直分布である. 値は濃度変動強度の最大値 c_0' で無次元化している. 植生密度の大きなケース (ϕ=0.061) では, Emergent zone (y_0/h=0.2) に注入すると c' 分布は注入高さでピークを持ち, 流下方向に離れるにつれてピーク値が減衰している. この特性は Webster ら(2003)[2]の結果と一致する. また, c' 分布は植生外部 (y/h>1.0) でほぼゼロとなるため, Emergent zone の濃度変動が植生外部には伝わらない. これは, Emergent zone と植生外部の物質交換がほとんど行われないことを示唆しており, 興味深い.

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, 植生要素の wake によるカルマン渦の影響が小さくなると考えられるが, 同時に, 植生先端付近では大規模組織渦が発達するために濃度変動分布の鉛直方向の広がりが大きくなっている. 植生先端に注入したケース (y_0/h=1.0) で c' 分布が植生先端でピークをもち,

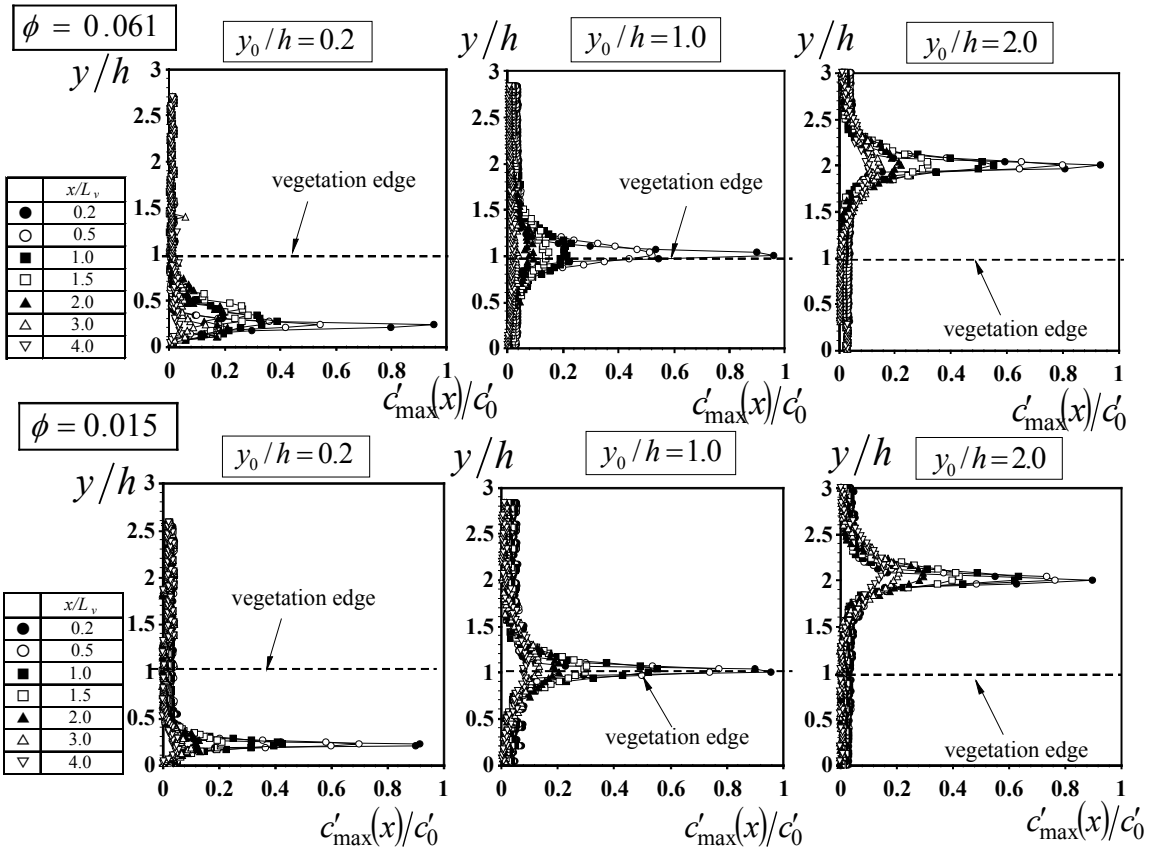

図-14 濃度変動強度鉛直分布

植生内部と外部に広がりを持つことは植生内部と外部の物質交換が行われていることを示しており，注目される．Log-law zone に注入したケース（y_0/h=2.0）では，c' 分布の上下方向の広がりが小さく濃度変動分布の流下方向における低減が緩やかで，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．

植生密度の小さなケース（ϕ=0.015）でも同様の傾向がみられるが，Emergent zone に注入したケース（y_0/h=0.2）と植生先端から注入したケース（y_0/h=1.0）では植生密度が小さく wake によるカルマン渦や大規模組織渦の発達が抑えられるため，ϕ=0.061 のケースに比べて濃度変動強度 c' の減衰が遅くなり，鉛直方向にも広がりが小さくなっている．また，Log-law zone では時間平均値と同様，植生密度 ϕ の影響はみられないという結果になった．

4．おわりに

本研究は開水路植生流れにおいて LIF 法による濃度計測を行い，植生流れにおける濃度場の時間平均特性と濃度変動特性について検討した．また滑面開水路流れの濃度統計値と比較することで，底面植生が物質輸送メカニズムに与える影響を明らかにすることができた．ここで得られた知見を以下にまとめて示す．

1) 時間平均濃度分布と半値幅から，Mixing-layer zone の下端と中心位置から染料を注入したケースにおいて，鉛直方向の濃度拡散が大きくなっているのが観察された．また，植生密度が増加するとこの傾向が顕著となることから，流速シアーそして大規模組織渦が濃度拡散に影響を持つことが示唆された．
2) Mixing-layer zone の下端から染料を注入したケースにおいて時間平均濃度のピーク値が流下方向にもっとも早く減衰する傾向が得られた．これにより，流下方向の移流に対する鉛直方向の濃度拡散が大きく，植生先端付近の大規模組織渦だけでなく植生要素の wake によるカルマン渦が濃度拡散に影響を持つことが推測される．
3) 植生内部から注入したケースにおいて，時間平均濃度分布のガウス分布とのずれが増加した．その原因として，水路底面の影響や植生の wake によるカルマン渦の影響が考えられる．対して Log-law zone に注入したケースでは滑面状態の結果と同様ガウス分布からのずれは小さくなることが確認できた．
4) 植生のないケースと比較することで，上記の特性が植生の存在によるものであることがわかった．さらに，

植生密度が大きいケースの方が上記の特性が顕著となったことから，植生密度が濃度拡散の大小に影響を持つことがわかった.

5) 濃度変動強度分布は時間平均濃度分布とよく似た特性を示す. また植生先端でピークをもつことから植生内部と外部の物質交換が活発に行われていることが示唆された.

参考文献

1) Chen, D. and Jirka, G.H. (1999) : LIF Study of Plane Jet Bounded in Shallow Water Layer , *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, Issue 8, pp.817-826.
2) Webster, D.R., Rahman, S., and Dasi, L.P. (2003) : Laser-Induced Fluorescence Measurements of a Turbulent Plume, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No.10.
3) 酒井康彦，内田健児，久保貴，長田孝二 (2007) ：高シュミット数物質噴流拡散場における物質フラックスの統計的特性，日本機械学会論文集，No.73-727, pp.720-728.
4) Gao, W., Shaw, R.H, and Pawu, K.T., (1989) : Observation of Organized Structure in Turbulent Flow within and above a Forest canopy turbulence in and above Plant Canopies, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 47, pp.349-377.
5) Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2005) : Mass Transport in Vegetated Shear Flows, *Environmental Fluid Mechanics.,* Vol. 5, pp.527-551.
6) Rahman, S., and Webster, D.R. (2005) : The effect of bed roughness on scalar fluctuations in turbulent boundary layers, *Experiments in Fluids*, Vol. 38, pp.372-384.
7) Matthew, A., Reidenbach, Jeffrey, R. Koseff, and Monismith, G.S. (2007) : Laboratory experiments of fine-scale mixing and mass transport within a coral canopy, *Phisics of Fluids*, Vol. 19, 075107.
8) Nepf, H.M., and Ghisalberti, M. (2008) : Flow and transport in channels with submerges vegetation, *Acta Geophysica* Vol. 56, No. 3, pp.753-777.
9) 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.
10) PIV ハンドブック，可視化情報学会編，2002
11) Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000) : Flow structure in depth-limited, vegetated flow，*Journal of Geophysical Research*, Vol.105/No.C12，pp.28, 547-557.
12) Poggi, D., and Porpotato, A., and Ridolfi, L. (2004) : The Effect of Vegetation Density on Canopy Sub-layer Turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 111, pp.565-587.

(2009 年 4 月 9 日 受付)