

PIVを用いた植生開水路流れの組織渦構造解析

Investigation of Coherent Vortices in Partly Vegetated
Open-channel Flows with a Particle-Image Velocimetry榑津家久¹・鬼束幸樹²・定免英樹³・相良幸輝⁴・池谷和哉⁴

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA, Hideki JOHMEN, Yuki SAGARA and Kazuya IKETANI

¹正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)²正会員 博(工) 京都大学大学院助手 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)³正会員 工修 石川県庁 (〒920-0962 金沢市広坂2-1-1)⁴学生員 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

In this study, images of very small $75\mu\text{m}$ diameter particles uniformly scattered in vegetated open-channel flows were taken using a CCD camera and 2W Argon-Ion laser light sheet. Instantaneous velocities at many points in the laser slit plane were obtained from these continuous two images of particles. This new method is called the "Particle-Image Velocimetry (PIV)", and seems to be very powerful to investigate coherent vortices in space and time, because simultaneous velocities at every point can be obtained easily. It was found that the density of vegetation affects on turbulent structures such as instantaneous vectors and vorticities.

Key Words : vegetated open-channel flows, particles, laser light sheet, Particle-Image Velocimetry

1. はじめに.

国民の意識は、近年単なる量的な豊かさの追求から、質的な豊かさ、すなわち、うるおいやゆとりを求める方向に大きく変化しつつある。このような意識の変化は、河川整備事業にも反映し、1981年12月に「河川環境のあり方」¹⁾についての河川審議会答申が出され、河川の治水・利水機能に加えて環境機能にも配慮すべきであるとの考え方が一般化してきた。さらに、昨年(1997年)河川法が改正され、従来の治水・利水を中心とした方針に、多様な生物の生育・生息の場を保全・整備するといった環境を考慮した方針が付け加えられた。河川に存在する植生は洪水時の流水抵抗を増大させるために今までは排除される傾向にあったが、こうした現状にあって河川敷に繁茂する植生は河川環境を配慮した設計論を展開する上で重要な要素となっている。

こうした河道内における植生の重要性から、その分布形態や流れのパターンに関する実験および研究が多く進められている。辻本・北村²⁾は植生群が河道内に存在する場合の流れの横断混合機構を水面変動、各流速変動成分の時空間相関、これらの量の相互相関を調べ、その結果、水面変動・流速変動が周期性をもって移流されること、また横断方向の運動量混合が流下方向および横断方向の流速変動に拠っていることを指摘している。また、富永ら³⁾は樹木群の配置が重要な設計項目になるとし、樹木群の幅と配列を変化させた実験を行い流れの抵抗や局所流動に及ぼす影響を検討している。そこでは樹木群密度が同じでもその設置場所の違いにより抵抗および平均流速分布構造が変化する

ことを指摘している。

従来の植生開水路流れの研究ではホットフィルム流速計や電磁流速計による点計測法が一般的で、瞬間的な現象を取り扱った研究は数少ない。しかし、組織乱流構造の瞬間的な特性を検証するには、瞬間的な広域流れ場の情報が得られる可視化手法を用いることが非常に重要かつ必要になってくる。

PIV(Particle-Image-Velocimetry)は近年の画像解析機器の進歩により登場した最新の可視化手法である。この計測方法の特徴としては瞬時に平面内の流速に関する多点の情報が得られること、植生開水路流れのような複雑な流れ場にも対応できることなどが挙げられる。本研究では、このPIV法のこのような利点を生かして、複雑な植生開水路流れの瞬間的な組織乱流構造を解析する。

2. 実験装置及び実験方法

植生水路の実験装置を図-1に示す。実験に用いた植生水路は、全長10m、幅 $B=40\text{cm}$ の可変勾配型循環式直線水路である。この水路の全域にわたって水路半断面に、植生として真ちゅう棒を設置した。真ちゅう棒は直径 $D=2.0\text{mm}$ 、植生高さ $H_v=5\text{cm}$ である。本研究では、植生密度として真ちゅう棒の配置を流下方向・水路横断方向ともに均等な正方形格子状で、1辺が1cm、2cmおよび4cmの3ケースを設定した。いずれのケースにおいても流量 $Q=5.5\text{l/sec}$ 、水深 $H=7\text{cm}$ に設定した。表-1に実験条件を示す。ここに、 S_v は植生間隔で、 $\alpha=\lambda H_v$ ($\lambda=D/S_v^2$)は植生密度を示す無次元量である。本実験では、図-1に示すように流下方向に x 軸を、 x 軸に垂直上向きに y 軸を、また植生領域から非植生領域

表-1 実験条件

Case	Bed Slope S	Spacing of Vegetation $S_v(cm)$	Height of laser slit plane $H_l(cm)$	Depth $H(cm)$	Discharge $Q(l/s)$	Froude Number Fr	Reynolds Number $Re(\times 10^3)$	Density of Vegetation $\alpha \square \lambda H_v$
DTT	1/2700	1.0	6.5	7.0	5.5	0.25	13.3	1.00
M7T	1/3600	2.0				0.24	13.1	0.25
STT	1/4500	4.0				0.24	12.9	0.06

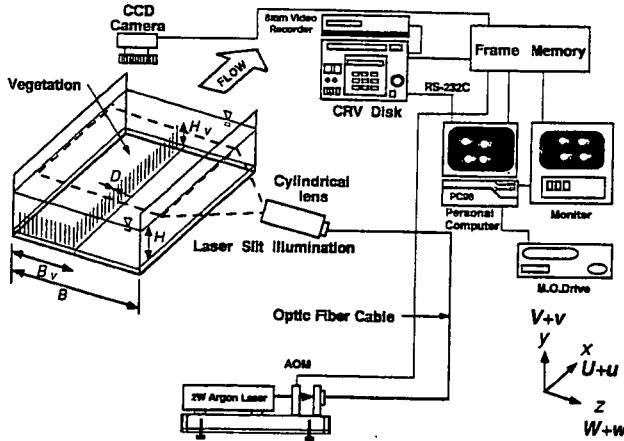


図-1 実験装置

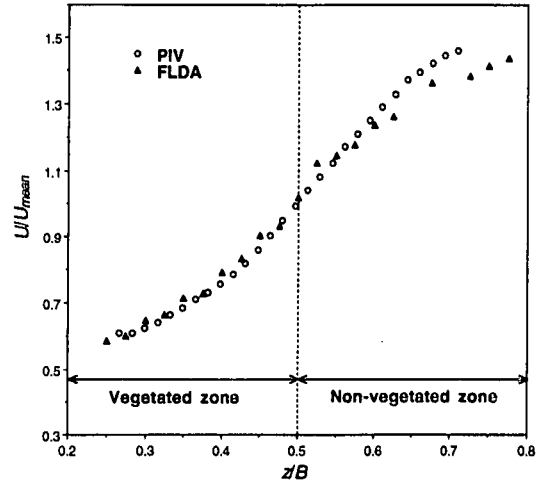


図-2 PIVとFLDAの比較

に向かう水路横断方向に z 軸をとり、原点は計測部上流端の植生領域側壁の植生基盤高さとした。なお、計測断面は植生領域・非植生領域の境界部付近の水面近傍(水面下5mm: $y/H=0.93$)とした。

PIV法などの可視化手法において最も重要なことは明瞭な画像を得ることである。このためトレーサ粒子の選定は重要である。トレーサ粒子は、周囲の流体に対し完全に追従して、その点の粒子速度で流体の速度を代表できることが理想である。このことから本実験においては直径 $100\mu m$ 、比重1.02のナイロン12粒子を用いた。またPIV解析における画像時間間隔は $1/60$ 秒、CCD画像は 512×468 ピクセルであり、この領域が撮影領域 $20cm \times 20cm$ に相当する。なお、相関窓(テンプレート)のサイズは 16×16 ピクセルとした。

3. 実験結果とその考察

3. 1 PIV法の精度の検証

PIV法は流体そのものではなく、流体中のトレーサ粒子の運動を計測し、それを流体運動と同一とみなすことから、トレーサ粒子の流れへの追従性や画像解析等による誤差をもつ可能性がある。

本研究では、組織渦構造を研究するにあたってまずPIV計測の精度や有効性を調べるため、高精度な計測が可能なファイバーレーザ流速計(FLDA)を用いた計測結果との比較を行った。図-2は、同一水理条件下でのPIV計測とFLDAでの計測の平均主流速 U の横断方向分布である。なお平均主流速 U は計測区間の平面平均流速 U_{mean} で無次元化してある。同図では、非植生領域で両者の分布に多少のずれが認められる。このずれは、画像解析範囲の端部

であるため追跡ベクトルが少なくなるためであると考えられる。しかし、PIV法の計測誤差は比較的少なく、全体的に高い精度をもつことが分かる。

3. 2 平均流速の分布特性

(1) 平均主流速の分布特性

$y/H=0.93$ の位置におけるPIV計測で得られたデータを基に、時間平均された主流速 U の横断方向分布を示したのが図-3(a)である。なお平均主流速 U は各ケースの平面平均流速 U_{mean} で無次元化してある。同図より、すべてのケースにおいて、非植生領域から植生領域に移移するにつれて流速は低減し、この傾向は植生が密なほど顕著であることが確認できる。このことから植生密度が大きくなるにつれて、植生領域と非植生領域の流速差が著しくなることがわかる。

また、各ケースとも境界部で変曲点が現われている。池田ら⁴⁾は植生開水路流れを対象として、植生帯境界で発生する周期渦について実験的・理論的考察を行っているが、境界では主流速の横断方向分布の変曲点不安定によって流れが不安定となり水平組織渦が発生することを解明している。本実験を行うに際し可視化予備実験を行った結果、大規模ではなかったが水平渦が発生していた。このことから、池田らが指摘したように、主流速の横断方向分布における境界部での変曲点不安定によって、水平組織渦が発生することが再確認された。

(2) Reynolds応力の分布特性

主流速の横断方向のシアであるReynolds応力 $-\overline{uw}$ を各ケースの U_{mean}^2 を用いて無次元化し、その横断方向分布を示したのが図-3(b)である。全ケー

スにおいてその分布は、主流速 U の横断方向分布の勾配にほぼ比例しており、境界部付近でReynolds応力が最大値をとる傾向が観察される。また、植生密度の増加に伴い最大値が増加していることが確認できる。

同図より、植生密度の増加に伴い植生領域と非植生領域との間のシアアが増加することが明らかとなった。このシアアの増加により横断方向の速度勾配が増加し、さらにReynolds応力が増加することが示された。植生密度の増加に伴うシアアの増加の原因は、植生密度が増加することで植生領域における抵抗が増加することにあると考えられる。

3. 3 水平渦の瞬間構造

(1) 瞬間流速の時間変化

図-4に植生領域中の任意点($x/B=0.24, z/B=0.28$)の主流速及び横断方向流速の瞬間流速変動 $\tilde{u}$ および $\tilde{w}$ を全ケースについて示した。全ケースにおいて主流速 $\tilde{u}$ および横断方向流速 $\tilde{w}$ にほぼ周期的な変動が見られ、その振幅は植生密度が大きくなるに従い増加する傾向にある。また、主流速 $\tilde{u}$ の変動と横断方向流速 $\tilde{w}$ の変動とは逆位相²⁾で、この傾向は植生密度が大きくなるにつれて明確となる。横断方向流速 $\tilde{w}$ は変動しているものの、負の流速が圧倒的に多い。このことから、水平渦によって流体は植生領域と非植生領域との間を往復するが、平均的には植生領域方向へ流れ、高運動量塊が非植生領域から植生領域へ移流しているといえる。

(2) 瞬間流速ベクトルの変化過程

図-5は図-4において水平渦が存在している時、つまり主流速 $\tilde{u}$ が極小値を、また横断方向流速 $\tilde{w}$ が極大値をとるとき（図-4で示した区間）の瞬間流速ベクトルである。画面は19cm×19cmの範囲を示している。なお、図において横断方向流速 $\tilde{w}$ は主流速 $\tilde{u}$ に比べて値が小さいので、横断方向流速 $\tilde{w}$ は元の値の5倍で表示してある。同図より、非植生領域から発生した高速流体塊が植生領域に入り込み、その直後には植生領域から低速流体塊が非植生領域に出ている様子が覗える。また植生密度が増大するにつれてこの傾向は顕著に現われている。しかし、図-5では複雑で、渦を確認しづらい。そこで、図-5に対応して平面平均流速 U_{mean} と平面平均横断方向流速 W_{mean} の移動座標上から眺めた瞬間ベクトル場を示したのが図-6である。

図-6より、渦の移流の様子が明確に確認できる。境界部ではこのような一連の渦の通過が周期的に発生しており、Reynolds応力の発生に寄与しているものと考えられる。また、水平渦は植生密度が大きいほど明確に確認できる。水平渦の中心は境界部付近のやや非植生領域側に位置しており、辻本・北村³⁾の結果と一致する。水平渦の形状は長軸が流下方向から植生領域側に少し傾いた楕円形を有している。これが強いReynolds応力を生み出すと思われる⁹⁾。また、長軸の傾きは、目視ではあるが植生密度が大

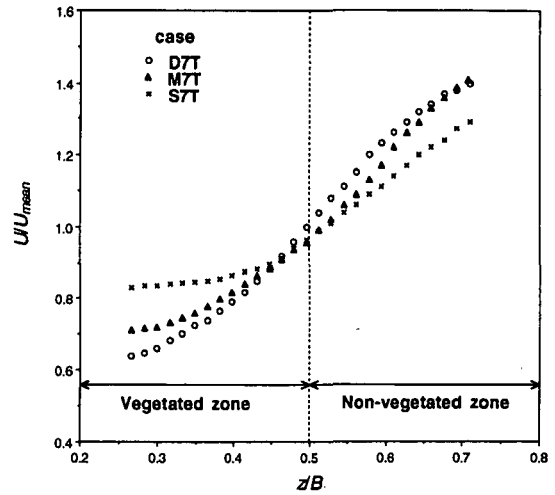


図-3(a) 主流速 U の分布

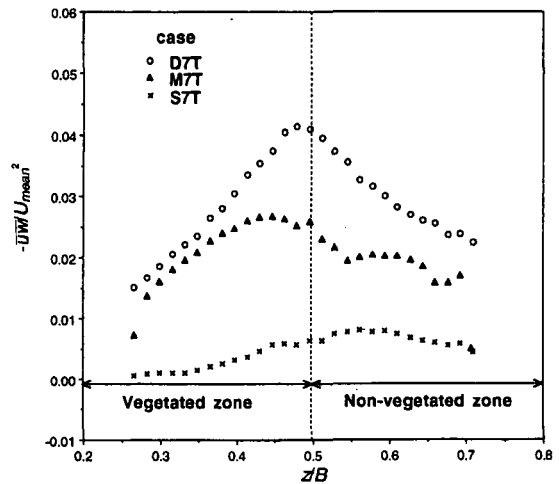


図-3(b) Reynolds応力 $-\overline{uw}$ の分布

きくなるに従い急角度になっており、密度による傾きの違いは高速流体塊が植生領域に入り込む角度の違いによって誘起されると考えられる。

図-7は図-6において水平渦が画面上中央を通過するときの瞬間の渦度 ω_y を各ケースにおいて示したものであり、右回りを正とした。ただし、渦度 ω_y は以下の式(1)のように移動座標系を用いて定義した。

$$\omega_y = \frac{\partial(\tilde{u} - U_{mean})}{\partial z} - \frac{\partial(\tilde{w} - W_{mean})}{\partial x} \quad (1)$$

図-6と図-7とを照らし合わせると、水平渦の中心付近で渦度が特に大きく、植生領域中にも値の大きな領域が存在することがわかる。渦度の最大値は植生密度の増加に伴い増加しており、図-6において瞬間ベクトルによる水平渦が明確に認識できたことを裏付けている。植生領域と非植生領域との境界部よりやや非植生側に中心をもつ水平渦の影響が非植生領域のみならず、植生領域にまで及ぶことがわかる。

図-8は全ケースにおける瞬間の発散 ψ_y である。同図は図-7の瞬間と同一のものである。ここに発散 ψ_y は以下のように移動座標系を用いて定義した。

$$\psi_y = -\left(\frac{\partial(\tilde{u} - U_{mean})}{\partial x} + \frac{\partial(\tilde{w} - W_{mean})}{\partial z} \right) \quad (2)$$

沸き出しが正で吸い込みが負である。水平渦の中

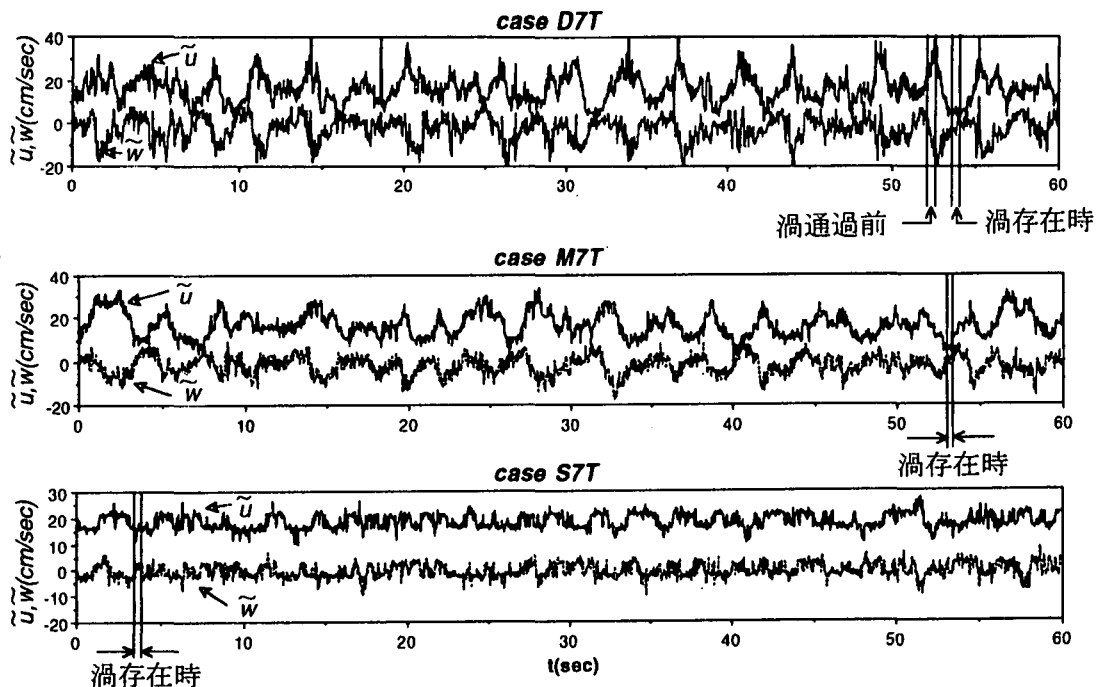


図-4 植生領域中の任意点 ($x/B=0.24$, $z/B=0.28$) の瞬間流速 $\tilde{u}$ と $\tilde{w}$ の時間変化

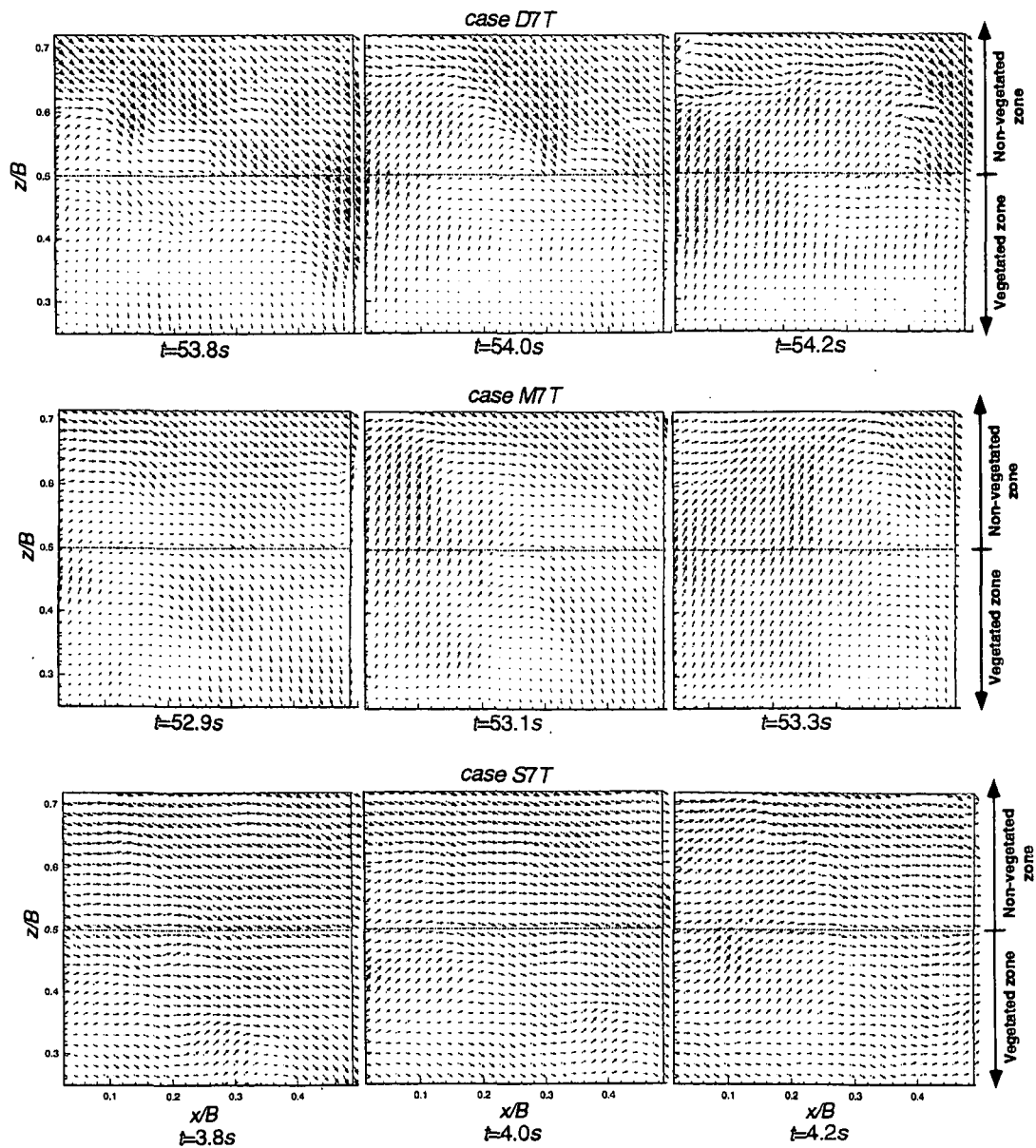


図-5 瞬間ベクトル

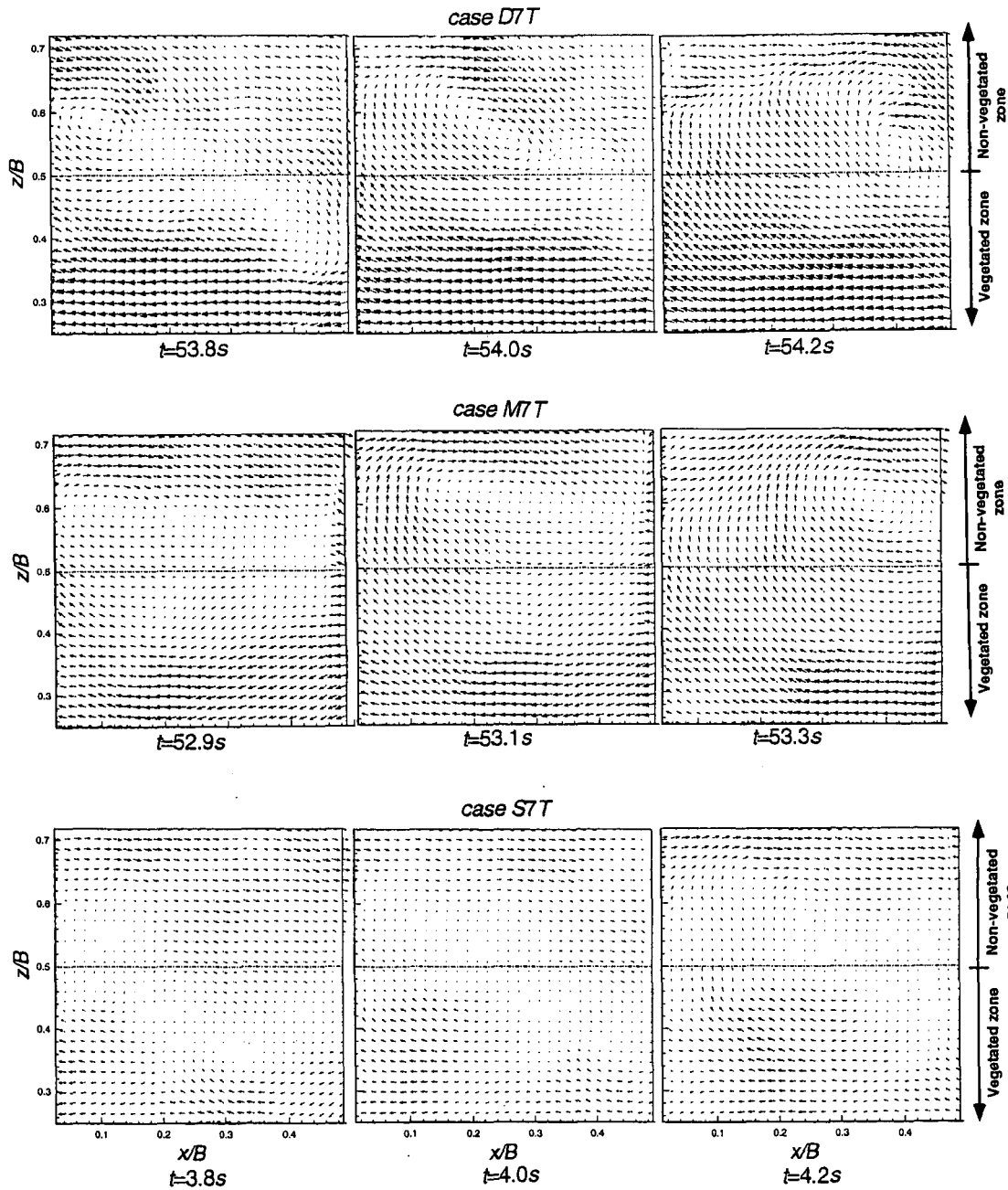


図-6 移動座標系から見た瞬間ベクトル

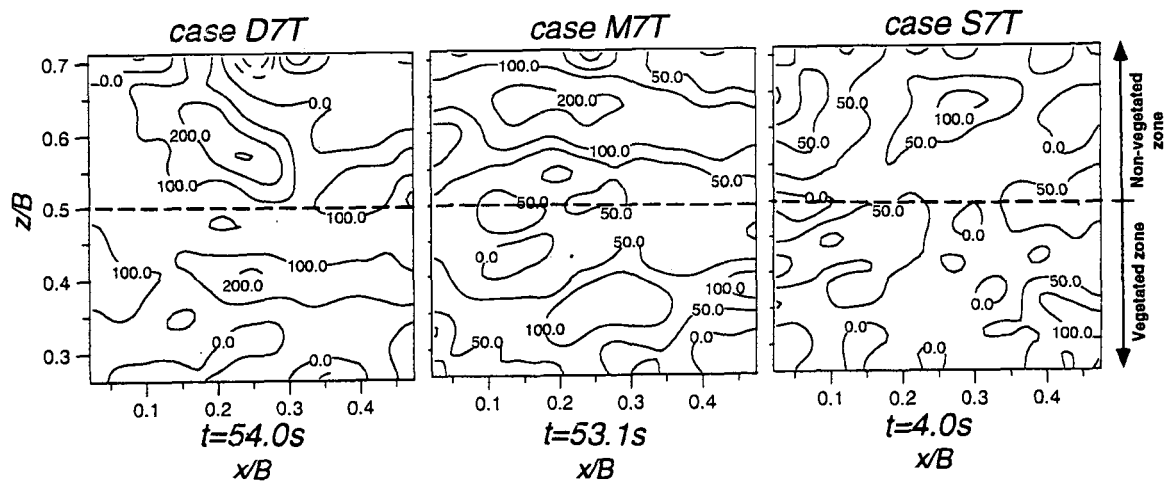


図-7 各ケースの渦度

心から前方部にかけて負の値が多く、特に中心部においてその絶対値が大きいことがわかる。渦の後方

部では発散の値は小さいが、正の値が多く見られる。このことから、水平渦の中心部や前方部では流体は

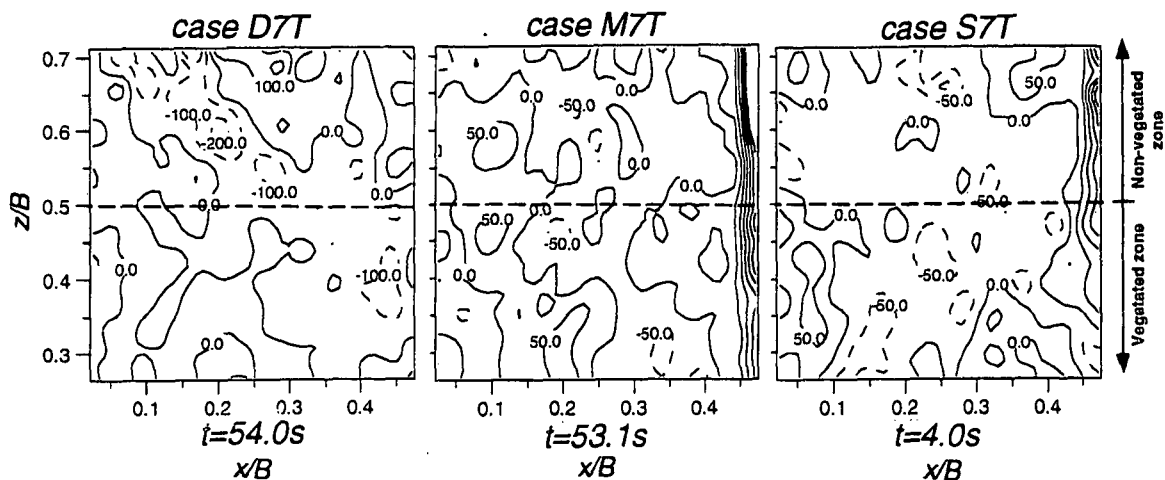


図-8 各ケースの発散

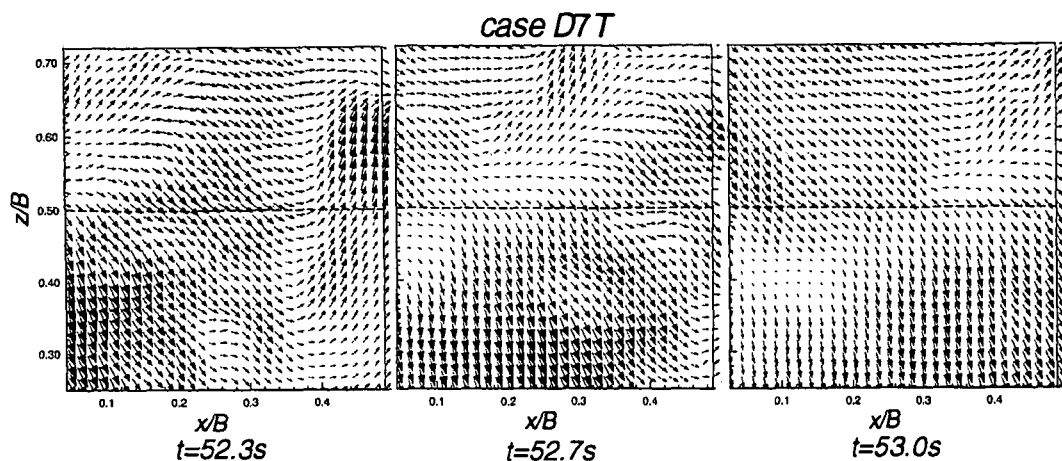


図-9 瞬間ベクトル (渦通過前)

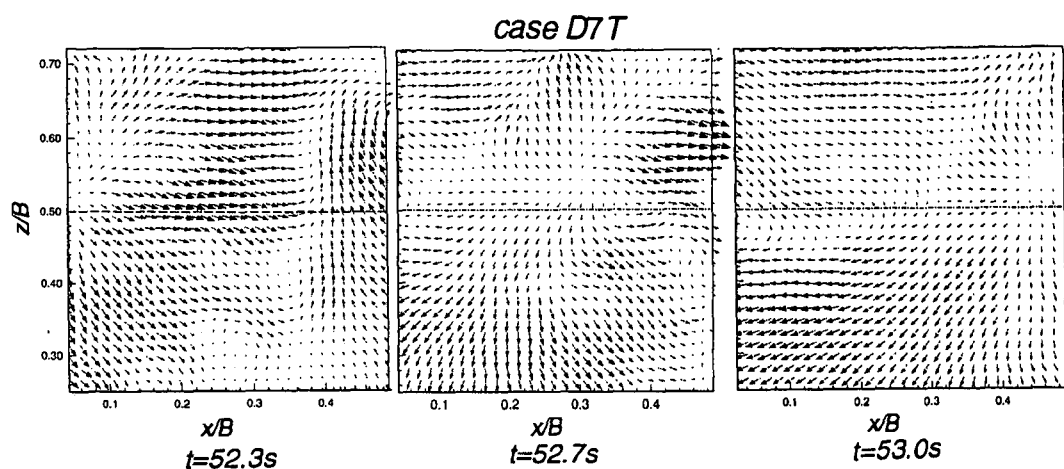


図-10 移動座標系から見た瞬間ベクトル (渦通過前)

沈み込み、後方部では沸き上がっていることがわかる。図-4を参照すると、非植生領域から植生領域へ流入する高速流体塊は沈み込み、植生領域から非植生領域へ流入する低速流体塊は沸き上がっていることを示すことが分かる。また、植生密度の増加に伴い発散の最大値が増加し、最小値が減少していることから、植生密度が増加することで流体の沸き出しおよび吸い込みが顕著となることが確認できた。

図-9は、ケースD7Tをもとに、水平渦の通過前(後)、つまり主流速 U が極大値を、また横断方向流速 W が極小値をとるときの瞬間ベクトルであ

る。抽出した瞬間は図-4に示した。なお、この図においても図-5と同様に横断方向流速 W は元の値の5倍で表示してある。同図より、非植生領域で発生した高速流体塊が猛烈な勢いで植生領域へと流れ込む様子が伺える。また若干ではあるが高速流体塊の前後では植生領域から非植生領域へと流れる低速流体塊の存在も認められる。図-9に対応して平面平均流速 U_{mean} と平面平均横断方向流速 W_{mean} の移動座標系から捉えた瞬間ベクトルを示したのが図-10である。

図-10から、植生領域へと流れ込む高速流体塊や

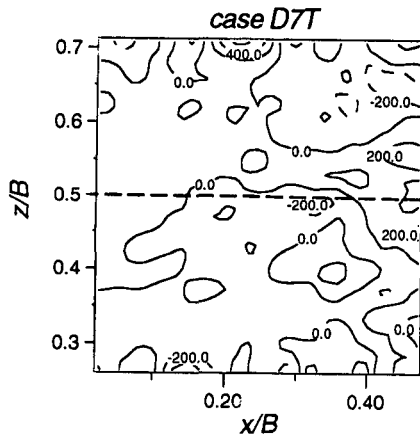


図-11 $t=52.7\text{sec}$ での渦度

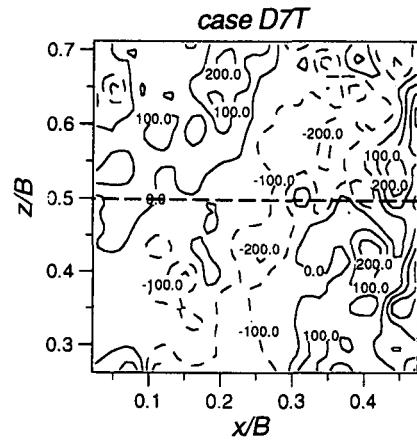


図-12 $t=52.7\text{sec}$ での発散

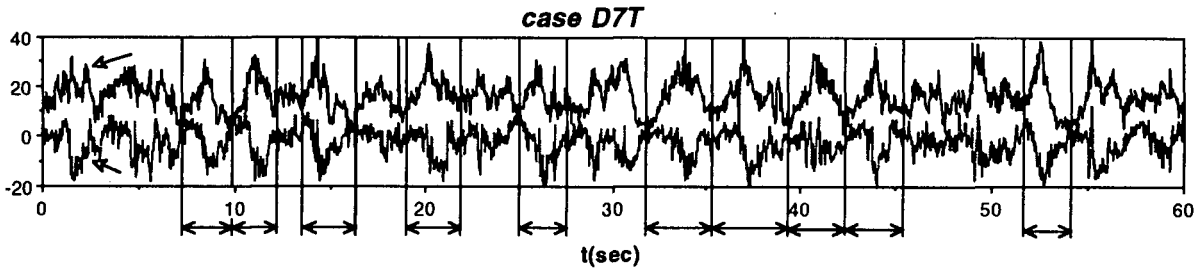


図-13 ケース D7T における植生領域の瞬間流速 u および w の時間変化と抽出区間

高速流体塊の前後から発生する低速流体塊の存在が明確に確認できる。図-3 (b) で示したように、Reynolds応力が境界部において大きくなっているのは、水平渦のみによるものではなく、これらの高速流体塊や境界部から発生する低速流体塊の影響も大きく寄与していると考えられる。

続いて図-9において、水平渦の通過前、すなわち $t=52.7(\text{sec})$ のベクトルに対応して渦度と発散を示したのが図-11と図-12である。なお、図-7、図-8と同様に式(1)、式(2)を用いて渦度、発散を求めた。図-11において渦度の分布は水平渦が発生している図-7と比べて、それほど特徴的ではなく、渦度の値も全体的に小さく、高速流体塊は回転せず一様な方向に流れる様子が観える。図-12の発散の分布形を見ると、図の中央に植生領域から非植生領域にかけて帯状に負の値が、そして負の領域の左右に正の領域が確認できる。この分布形と図-9のベクトルとを照らし合わせると、負の領域は高速流体塊が、正の

領域には低速流体塊が存在している。このことから、高速流体塊は沈み込み、高速流体塊の前後に存在する低速流体塊は湧き出しており、低速流体塊を含む一連の高速流体の流れは複雑な3次元性を有していると考えられる。

次にケースD7Tをもとにして、石川ら⁷⁾の解析に基づき、植生開水路流れの一般的な一周期を表す試みを行った。植生領域の瞬間流速 u および w の時間変化を示した図-4において、先述したように変動は周期的であり、 u の振動は w とは逆位相である。これらの周期的な振動について図-13に示す任意の10波を取り出して平均し、流れの一周期を表した。図-14は流速変動の一周期のモデルである。図-13と図-14を使って時間変化図における波の抽出方法を説明する。まず、図-13において、主流速 u が極大値および横断方向流速 w が極小値をとるときを図-14の $t=T/2$ とする。次に図-13で u が極大値および w が極小値をとるとき時刻の前後において u が極小値および w が極大値をとるとき時刻を図-14における一周期の始点 ($t=0$)、および終点 ($t=T$, T : 周期) とした。そして $t=0$ から $t=T/2$ および $t=T/2$ から $t=T$ の間において等間隔に分割し、 $t=0$ から $t=T$ までに $t=T/8$ 間隔で計9時刻に対して抽出を行った。このように抽出を行った結果、図-15に示すようなベクトルを得た。なお、この図においても、横断方向流速は元の値の5倍で表示してある。これより、流体塊が非植生領域と植生領域の間を交互に行き来しているものの、非植生領域から植生領域へ向かう傾向が強く総じて複雑な様相を呈していることがわかる。各領域に着目すると、非植生領域ではそれほど流れに変化がないのに対し、植生領域では高速流体塊の

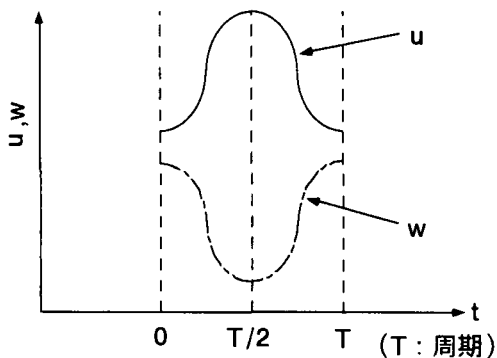


図-14 流速変動の一周期

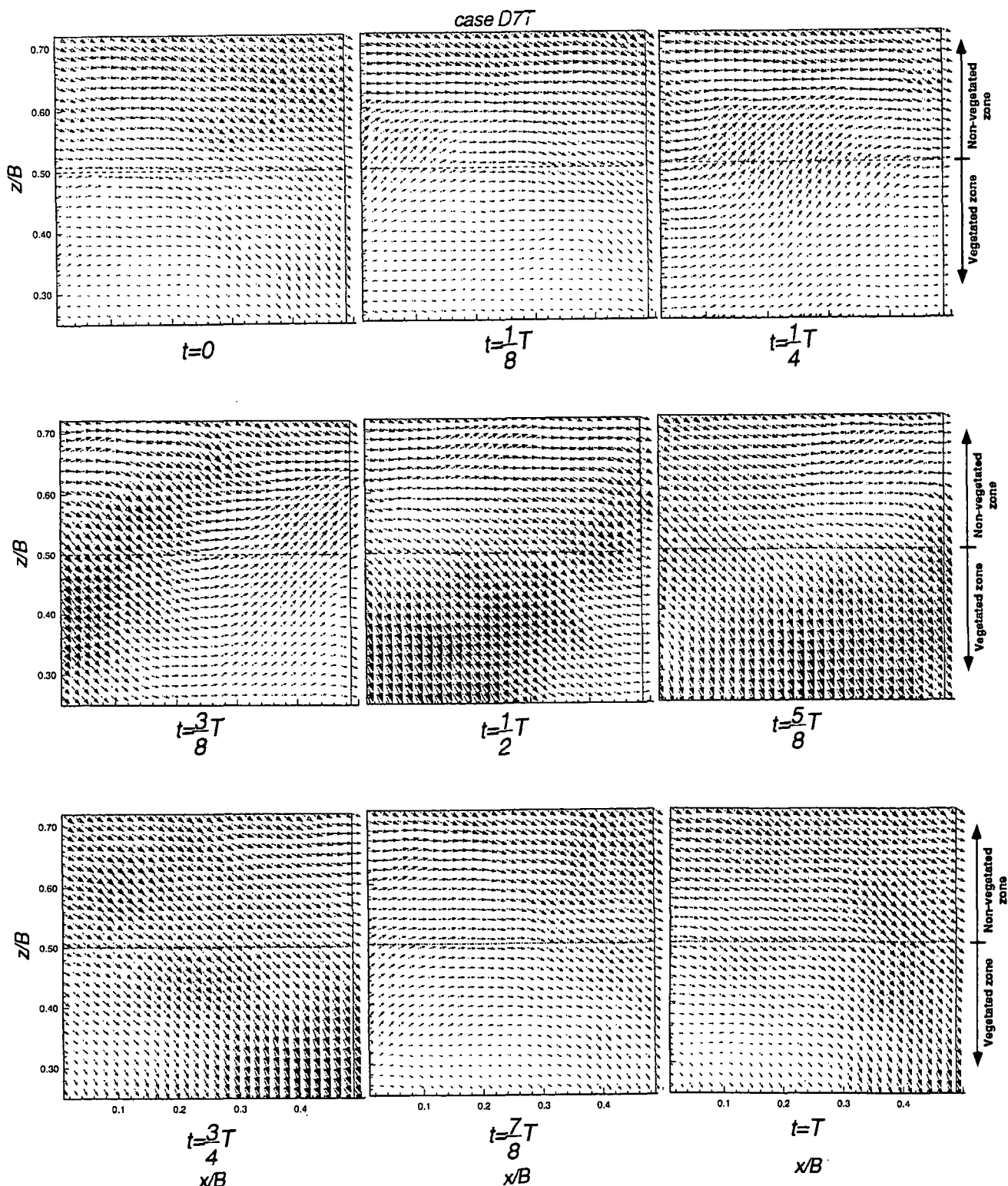


図-15 ケース D7T における平均したベクトル場

通過に伴い複雑な流れ場が形成されている。図-16は図-15に対応して平面平均流速 U_{mean} と平面平均横断方向流速 W_{mean} の移動座標上から捉えたベクトルである。同図では水平渦および高速流体塊の移流の様子が明確に確認できる。水平渦と高速流体塊は交互に通過しており、その影響が境界部および植生領域での流速場に急激な変化を及ぼし、Reynolds応力に大きく寄与していると思われる。

図-15、図-16より、側岸に植生を伴う開水路流れでは、空間的に複雑な流れの様相を呈するだけで

なく、時間的にも様々な流れ場を形成していることがわかる。

3. 4 水平渦による時空間相関構造

PIV法では平面内の多点同時計測が可能であり、従来のようにTaylorの凍結乱流の仮説を用いて時間相関から空間相関を求めずに時空間相関特性を直接求めることが可能である。それゆえに、瞬間の乱流構造のさらなる検討が可能となる。

固定点Pと任意点Qにおける流速変動成分 u_i 、 u_j に関する無条件時空間相関係数 C_{uiuj} は、遅れ距離を

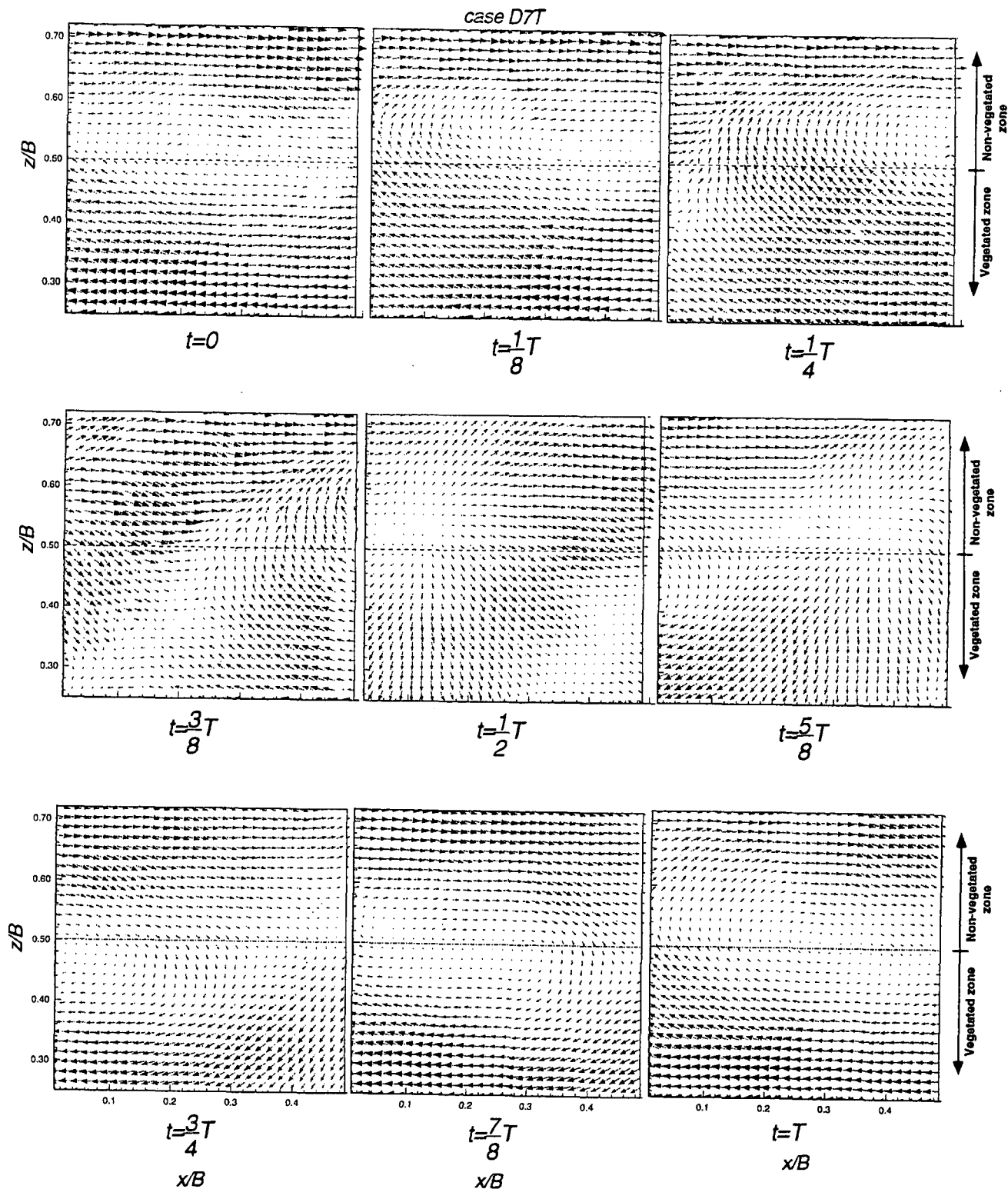


図-16 ケース D7T における移動座標系から見た平均したベクトル場

$\Delta x, \Delta z$,遅れ時間を τ 、乱れ強さを u'_i, u'_j として次式で定義される。

$$C_{u'u_j}(x, \Delta x, y, \Delta y, z, \Delta z, t, \tau) = \frac{u'_i(x, y, z, t)u'_j(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \tau)}{u'_i(x, y, z, t)u'_j(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \tau)} \quad (3)$$

図-17は境界部での固定点(図中に×印で示してある)に対する主流方向の乱れ変動成分の遅れ時間 $\tau=0.0s$ の時空間相関係数 $C_{u'u_j}(\tau)$ の分布を示すものである。それぞれの固定点の位置は境界部近傍($x/B=0.04, z/B=0.49$)にある。

全体的な傾向として、高相関領域は非植生領域か

ら植生領域へと広がっており、低相関領域は非植生領域に広がっている。そして、高相関領域は高速流体を、低相関領域は低速流体を良好に表現している。また、植生密度が大きくなるにつれて高相関領域が急角度で植生領域に入り込むことが確認できる。水平渦は非植生領域の高速流体と植生領域の低速流体から構成されているが、図-17から植生密度が大きくなるにつれて、高速流体塊は急な角度で植生領域深部まで影響を及ぼし、横断方向の運動量輸送をより活発化させることが解明された。

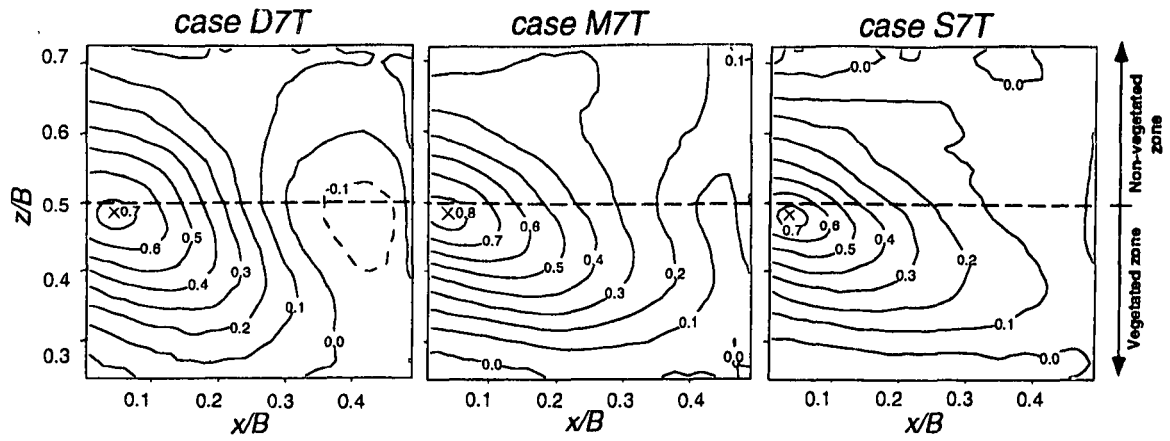


図-17 時空間相関 ($\tau=0.0s$)

4. 結論

本研究は、植生開水路流れの瞬間の乱流構造について、主に植生領域と非植生領域との相互作用に焦点を絞り、PIV法を用いて実験的に解析したものである。PIV法を用いることによって平面内の多点同時ベクトルが得られ、それを基に植生開水路流れの瞬間的また時空間的な現象の解明を行った。以下に本研究に得られた知見を示す。

- (1) PIV法とFLDAによる計測を比較することによって、PIV法の精度の検証を行った。これより非植生領域端部で若干誤差が大きくなる傾向が見られたが、全体的に良好に一致し、PIV法による計測は比較的良い精度をもつことが示された。
- (2) 平均主流速は非植生領域から植生領域に移移するにつれて低減し、植生密度が高いほどその傾向は顕著になる。また、主流速の横断方向分布における変曲点不安定性によって水平組織渦が発生することが再確認された。
- (3) 瞬間流速データから植生密度が大きくなるに従い、組織渦の周期性が明確になる。非植生領域の高速流体と植生領域の低速流体との相互作用で発生した組織渦は、境界部よりやや非植生領域側に中心をもち、流下方向に伸びた楕円形であり、その長軸は流速差により流下方向から少し傾いていることが判明した。また、組織渦は強いReynolds応力を誘起し、植生領域にまで影響を及ぼすことが明らかにされた。
- (4) 無条件時空間相関構造から、組織渦の構成要素である高速流体が、植生密度が大きくなるにつれて、急な角度で植生領域深部まで影響を及ぼし、それにより横断方向の運動量輸送をより活性化させることが解明された。

謝辞：本研究を行うに当たり、PIVについて御助言いただいた新日本製鐵（株）技術開発本部・津田宣久氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 河川環境管理財団編：解説河川環境，山海堂，p.299, 1983.
- 2) 辻本哲郎・北村忠紀：側岸部に植生群落を有する開水路流れの横断混合機構に関する実験的研究，土木学会論文集，No.491/Ⅱ-27, pp.61-70, 1994.
- 3) 富永晃宏・長尾正志・劉健・鈴木徹也：洪水流の抵抗と流れ構造に及ぼす高水敷樹木群配置の影響，水工学論文集，第39巻，pp.477-482, 1995.
- 4) 池田駿介・太田賢一・長谷川洋：側岸部植生境界の周期渦の発生機構，土木学会論文集，No.443/Ⅱ-18, pp.47-54, 1992.
- 5) 辻本哲郎・北村忠紀：側岸に沿って植生群落のある流路での水面変動を伴う横断混合，水工学論文集，第36巻，pp.273-280, 1992.
- 6) Ho, C.M. and Huerre, P. : Perturbed free shear layers, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.16, pp.365-424, 1984.
- 7) 石川忠晴・高橋和明・細井俊一：河岸植生付近の横断混合流れの位相平均解析，水工学論文集，第37巻，pp.837-840, 1993.

(1998. 4. 24 受付)