

PIV計測による植生開水路流れの 乱流構造に関する研究

STUDY ON TURBULENCE STRUCTURES IN PARTLY VEGETATED
OPEN- CHANNEL FLOWS WITH A PARTICLE-IMAGE VELOCIMETRY(PIV)

瀬津家久¹・鬼束幸樹²・定免英樹³・相良幸輝³

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA, Hideki JOHMEN and Yuki SAGARA

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教室 (〒606 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教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

³学生員 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

The importance of vegetated zone in rivers has recently been recognized not only for river management but also for water flow environment. From this point of view, some researchers have investigated vegetated open-channel flows to clarify turbulent structures such as mean velocity profiles and turbulence intensity distributions.

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 slit illumination. 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 effects on structures such as instantaneous vectors and vorticities.

Key Words : vegetated open-channel flows, particles, laser slit illumination, Particle-Image Velocimetry

1. はじめに.

「河川環境のあり方」¹⁾という河川環境審議会答申以降、河川整備や保全といった観点において従来の治水、利水機能のみならず河川環境にも配慮した親水機能が積極的に求められるようになった。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全て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、実験条件を表-1に示す。実験に用いた植生水路は、全長10m、幅 $B=40\text{cm}$ の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

表-1 実験条件

Case	Bed Slope S	Spacing of Vegetation $S_v(\text{cm})$	Height of laser slit plane $H_l(\text{cm})$	Depth $h(\text{cm})$	Discharge $Q(\ell/\text{s})$	Froude Number Fr	Reynolds Number $Re(\times 10^3)$	Density of Vegetation λH_v
D7T	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
S7T	1/4500	4.0				0.24	12.9	0.06

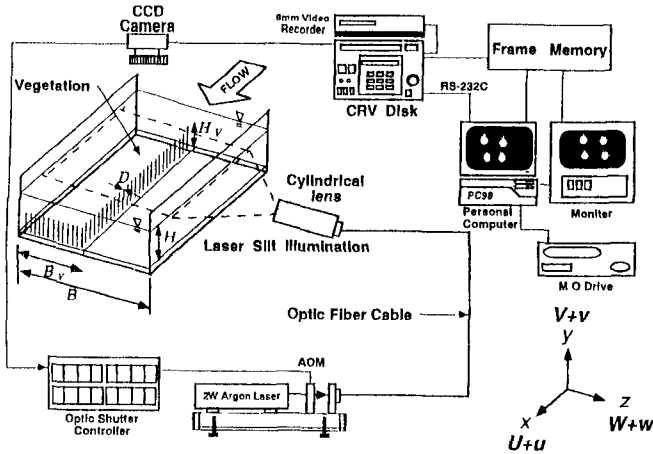


図-1 実験装置

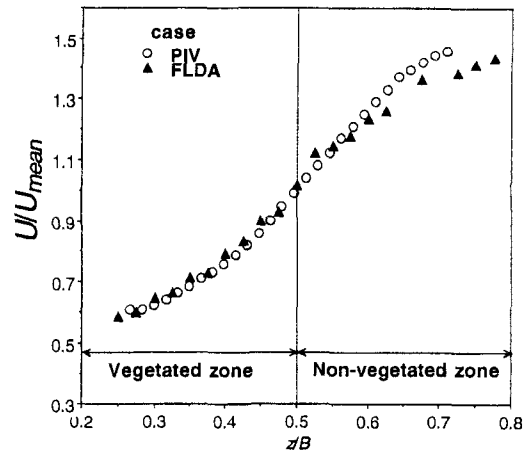


図-2 PIVとFLDAの比較

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ケースを考えた。いずれのケースにおいても流量 $Q=5.5\ell/\text{sec}$ 、水深 $H=7\text{cm}$ に設定した。なお、実験条件表において S_v は植生間隔で、 λH_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。

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 $75\mu\text{m}$ 、比重1.02のナイロン12粒子を用いた。また、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)とした。

3. 実験結果とその考察

(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・画像解析等による誤差を持つ可能性がある。

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。

(2) 平均流速の分布特性

a) 平均主流速の分布特性

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。すべてのケースにおいて、非植生領域から植生領域に遷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⁾は植生帯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。

b) 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 $-\rho u'w'$ (ρ :流体密度)を各ケースの ρU_{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、境界部付近で極大値が現われている。これより、境界部で運動量輸送が活発に行われていることがわかる。また、植生密度が大きくなるに従いReynolds応力は大きくなっている。これは植生密度が増大するにつれて植生領域外の流体塊の速度が増加し、これが植生領域内に取り込まれることによってReynolds応力が誘起され、横断方向の運動量・物質輸送が盛んになるからである。

(3) 水平渦の瞬間構造

a) 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 U と横断方向流速 W の瞬間流速変動 u' および w' を全ケースについて示した。全ケースにおいて主流速 u' および横断方向流速 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。そして、主流速 u' の振動は、横断方向流速 w' とは逆位相で、この傾向は植生密度が大きくなるにつれて明確に見られる。また、横断方向流速 w' は振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、流体は常に植生領域の方向へ流れ、高速流体塊が周期的に非植生領域から植生領域に進入してくることがわかる。また、これらの時系列より水平渦の後部において、横断方向流速 w' が極大値を、また瞬間のReynolds応力が極大値をとることが明らかになった。この結果は、Nezu, I. & Nakayama, T.⁵⁾の複断面開水路流れの結果と類似している。

b) 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 u' が極小値を、また横断方向流速 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。同図から、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観える。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。この図では流れは複雑で、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。

同図では渦の移流の様子が明確に確認できる。これから、水平渦は境界部より少し非植生領域に入った位置に中心をもち、そ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

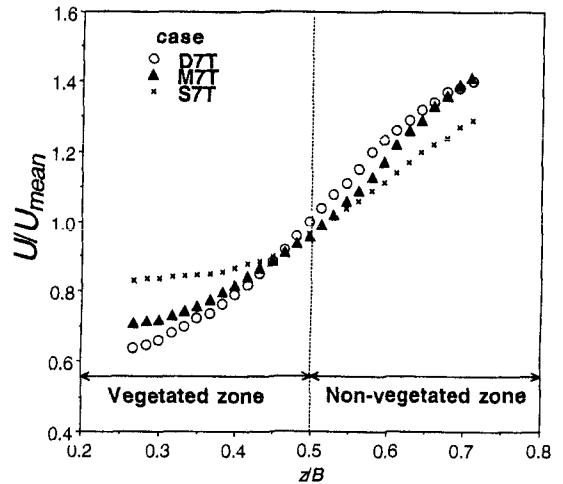


図-3(a) 主流速 U の分布

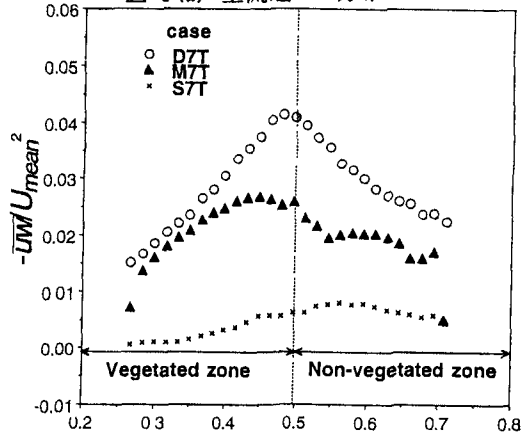


図-3(b) Reynolds応力 $-\rho u'w'$ の分布

いる。これが強いReynolds応力を生み出すと思われる⁶⁾。また、長軸の傾きは、目視ではあるが植生密度が大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において渦が画面上中央を通過するときの渦度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。非植生領域の高速流体と植生領域中の低速流体との相互作用で水平渦が発生するが、渦度より流体の回転の様子が観える。同図より、渦度は渦の中心付近が特に高く、また植生領域中にも高くなる領域が存在することがわかる。その傾向は植生密度が増大するにつれ顕著に現われ、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持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。

(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。

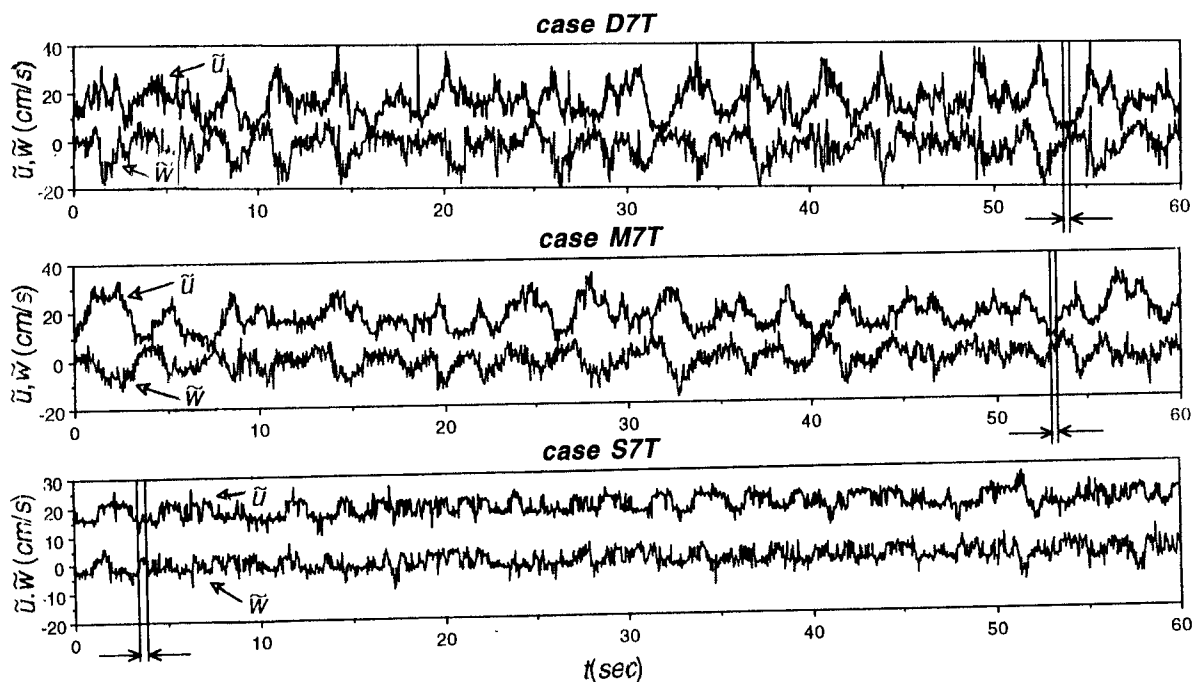


図-4 植生領域中の任意点($x/B=0.24, z/B=0.28$)の瞬間流速 $\tilde{u}$ と $\tilde{w}$ の時間変化

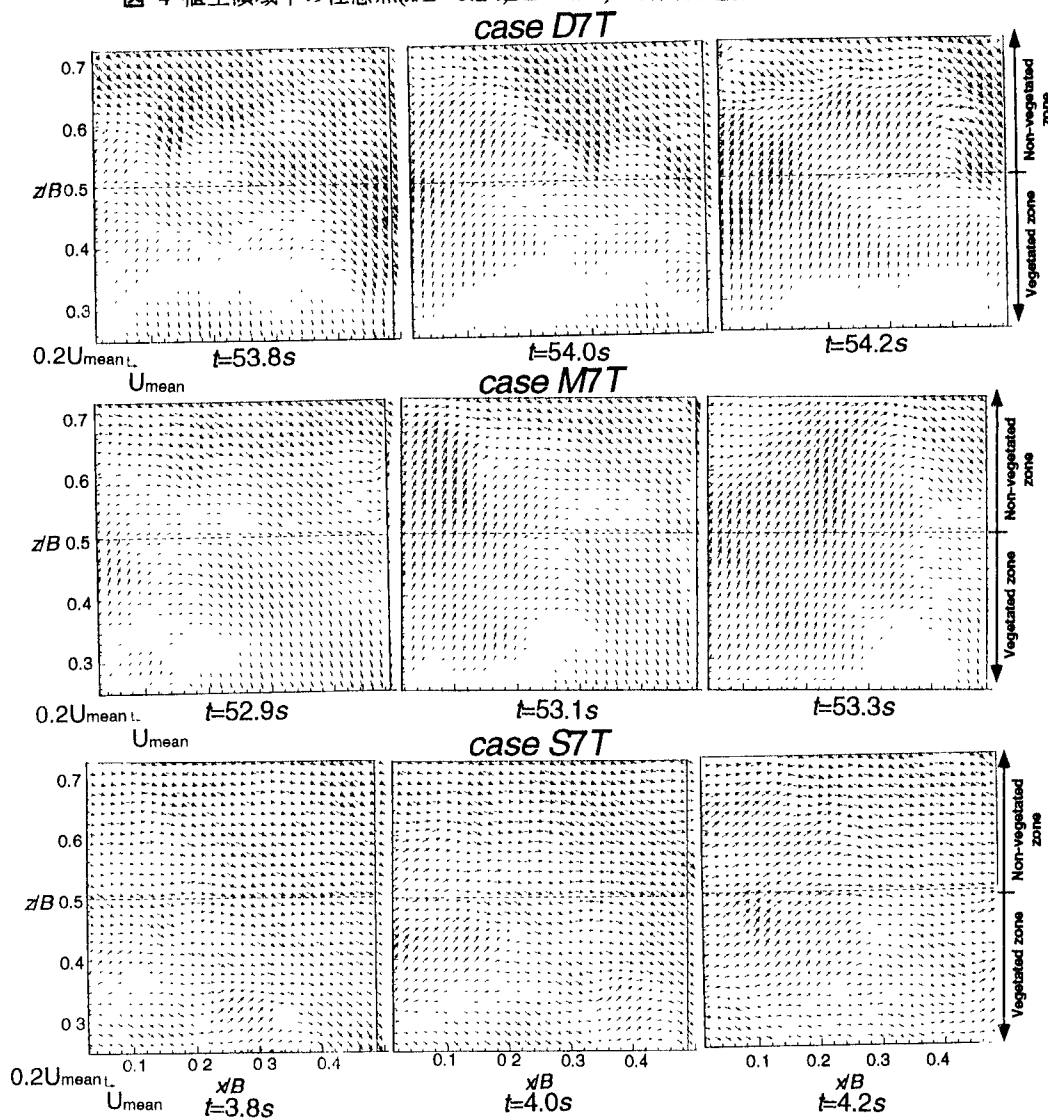


図-5 瞬間ベクトル

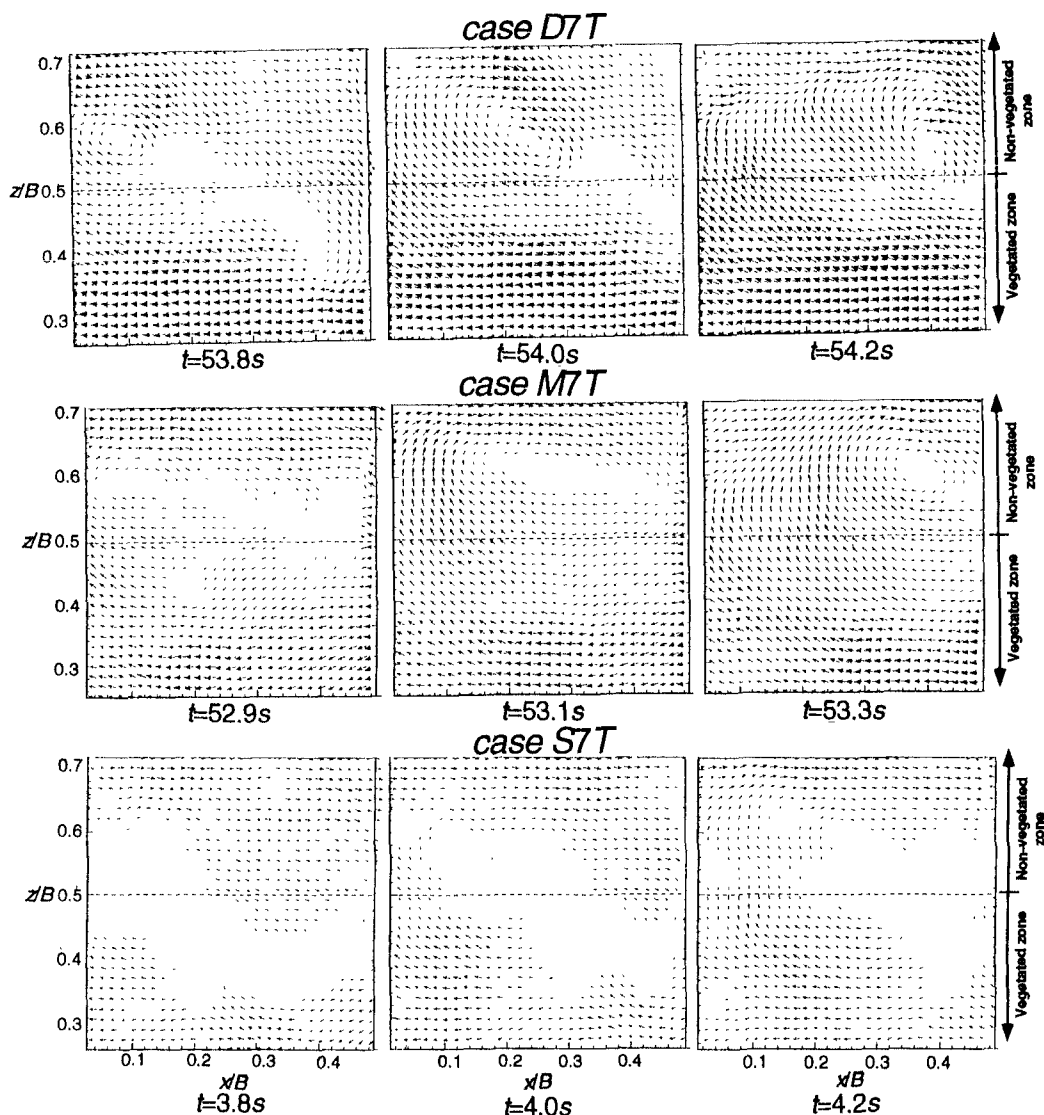


図-6 移動座標系から見た瞬間ベクトル

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 $C_{u_i u_j}$ は、遅れ距離を Δx 、 Δz 、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。

$$C_{u_i u_j}(x, \Delta x, y, \Delta y, z, \Delta z, t, \tau) = \frac{u'_i(x, y, z, t) u'_j(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \tau)}{u'_i(x, y, z, t) u'_j(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \tau)} \quad (1)$$

図-8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 $C_{u_i u_j}(\tau)$ 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。図-9は図-8の各ケースにおいて同一横断面内で相関が最大となる

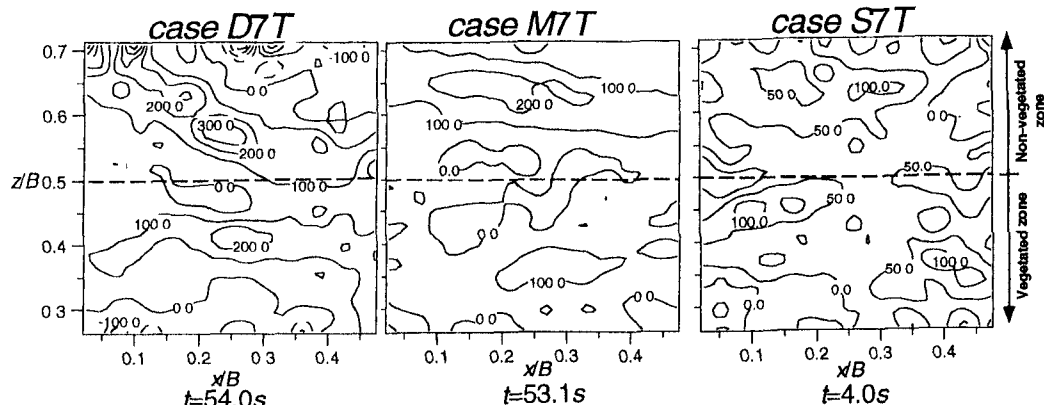


図-7 各ケースの渦度

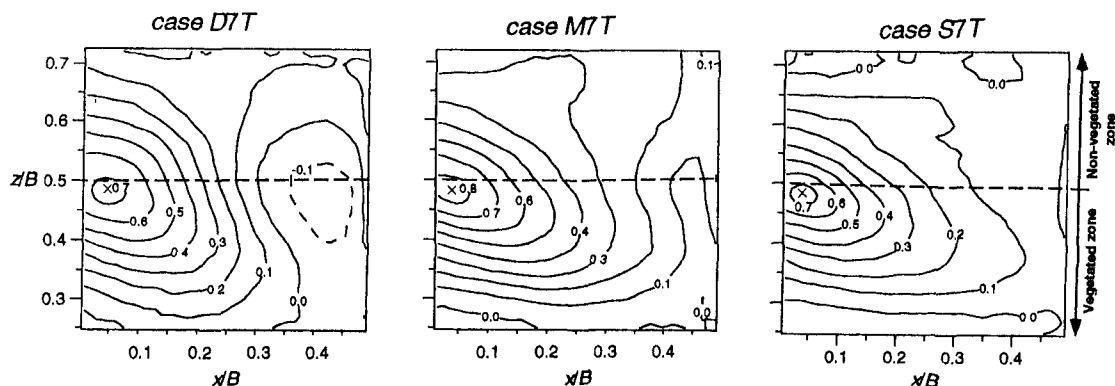


図-8 時空間相関($\tau=0.0s$)

点を抽出し、プロットしたものである。同図には近似直線も示している。植生密度が大きくなるにつれて直線の傾きは急になっており、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-8、図-9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。

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持つことが示された。
- (2) 平均主流速は非植生領域から植生領域に遷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、非植生領域に中心をもち、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

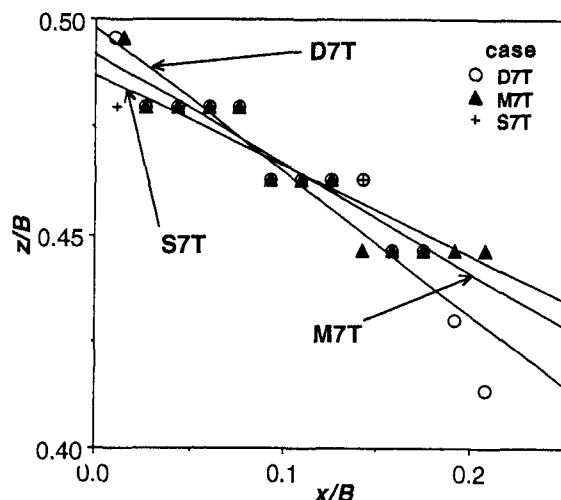


図-9 各横断方向の相関の最大値の流下方向分布

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発化させることが解明された。

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) Nezu, I. & Nakayama, T. : Measurements of horizontal coherent vortices between main-channel and flood-plains by using particle-tracking velocimetry, *Flow Modeling and Turbulence Measurements VI*, Chen, Shih, Lienau & Kung (eds), pp.229-236, 1996.
- 6) Ho, C.M. and Huerre, P. : Perturbed free shear layers, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.16, pp.365-424, 1984.

(1997. 9. 30受付)