

水路片断面に水没した植生を有する開水路流の 組織渦と乱流特性に関する研究

禰津家久¹・鬼束幸樹²・定免英樹³・相良幸輝⁴

¹正会員 工博 京都大学大学院教授 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 環境地球工学専攻 (同上)

³正会員 工修 石川県 (〒920-0962 金沢市広坂2-1-1)

⁴学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

水路片断面に剛な植生を有する開水路流において、植生密度および Froude 数を変化させ、PIV を用いた水平面の瞬間構造計測と、LDA を用いた鉛直断面内の 2 次流を含めた乱流計測が行われた。その結果、植生領域と非植生領域の境界部の水面付近で発生するシアーが植生密度および Froude 数の増加に伴い顕著となること、そのシアーの増加によって水面付近の横断方向 2 次流成分が増加することが分かった。また、4 象限区分解析法を用いて、植生の上部から植生に向かって sweep 的な挙動により運動量が輸送されていることが示された。さらに、植生を有しない開水路流と異なり、2 次流が断面内で一つの大きなセル状となることが明らかにされた。

Key Words : vegetated open-channel flows, turbulence, laser light sheet(LLS),
Particle-Image Velocimetry(PIV)

1. 序 論

高度経済成長期以降の河川改修工法として、三面張工法や河川のトンネル化など、生態系を無視した工法が数多く採用された。当然のことながら、三面張工法では植生が繁茂できないために、昆虫や魚類などの生活環境が保全されない。また、それだけでなく、水生生物に必要な不可欠な酸素の供給を減少させてしまう。その結果として、河川内部およびその近辺では、生物の個体数が減少したり、逆に特定種だけの個体数が増加するなどの弊害が生じた。一方、河川には主にプランクトンによって行われる自浄作用があるが、地下河川ではプランクトンの繁殖に必要な太陽光が差し込まないために、河川の自浄作用が低下した。このように、従来型河川工法によって生態系のバランスの崩壊をまねいただけでなく、流域全体の環境破壊をも引き起こした。

上述のようなことに反省し、近年では「多自然型川づくり」に代表されるような生態環境保全を重視した河川工法を極力採用する方向にある。具体的には、低水護岸、根固工、水制工などによって河川改修工事を行い、さらに自然の力によって植生を繁茂させ、それに伴い魚介類、昆虫などの水生生物の再生をはかるものである。現在までに数多くの事例¹⁾があるが、そのほとんどは過去の事例に従って計画されており、いわば経験の上に成り立っている。こ

の背景には、1)複雑な河道断面が流況をどの様に変化させるのか、2)植生が流体の挙動にどのような作用を及ぼすのか、3)複雑化した流況によって酸素などの供給がどれほど活発化されるのか、などの多くの不明な現象が残されていることが挙げられる。

まず、1)に関しては、断面急変流、複断面流れ、蛇行流などがその対象として挙げられる。断面急変流に関しては、芦田²⁾、石原・志方³⁾によって急拡流の形状損失係数および流速分布特性などが解明され、今本⁴⁾によって急拡流および急縮流の 2 次流が計測され、さらに Nezu & Nakagawa⁵⁾によって段落ち流れの再付着点特性が明らかにされた。複断面流れに関しても、数多くの研究者によって理論的および実験的な検討がなされた。今本・久本⁶⁾は低水路と高水敷との境界部において、やや低水路方向へ強く上昇する流れを発見し、斜昇流と名付けた。木下⁷⁾、池田⁸⁾および Shiono & Knight⁹⁾は低水路水深に比べ高水敷水深が比較的浅い場合に大規模水平渦が発生することを明らかにし、池田⁸⁾は水平渦が変曲点不安定によって発生することを理論的に説明した。さらに、Tominaga *et al.*¹⁰⁾および Tominaga & Nezu¹¹⁾は断面内 2 次流を計測し、その後このデータベースを基に、Naot *et al.*¹²⁾に Pezzing¹³⁾、Cokljat & Younis¹⁴⁾、Thomas & Williams¹⁵⁾等によって 2 次流を含めた流況が良好に数値計算された。

次に、2)に関しては、時間平均された水理特性の

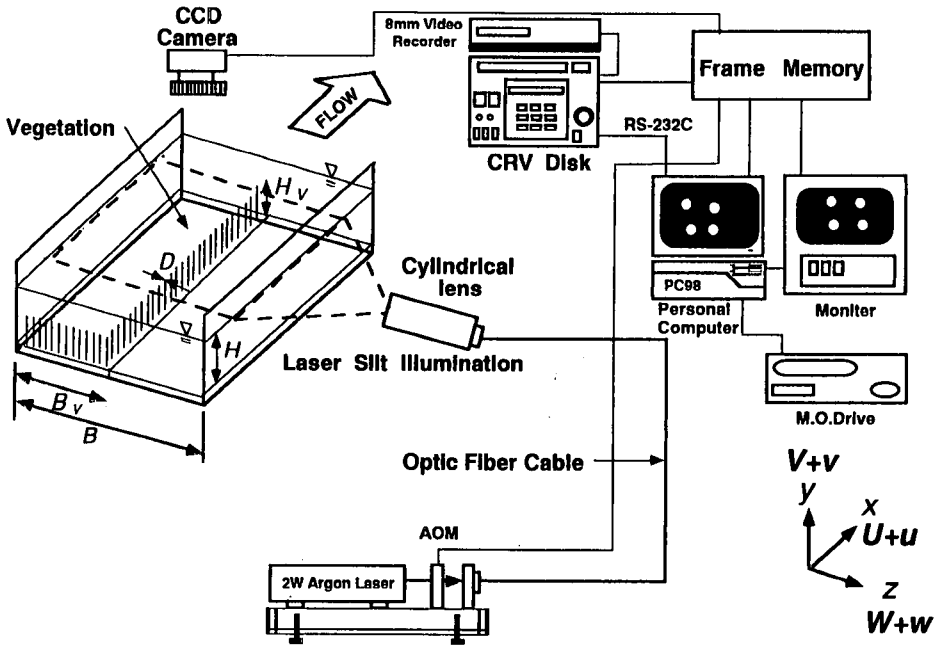


図-1 実験装置

横断方向変化が微小である2次元流れ場がまず研究された。日野・歌原¹⁶⁾は柔軟な植生の抵抗を考慮した混合距離理論より、流速分布およびせん断応力の予測を試みた。室田・福原¹⁷⁾、清水ら¹⁸⁾、湯城・岡部¹⁹⁾も同様なアプローチによって流速分布およびせん断応力分布を再現した。近年では、清水ら²⁰⁾、辻本ら²¹⁾が $k-\epsilon$ 法を用いて流れ場の予測を行い、神田ら²²⁾によって植生開水路流れでないが、LES (Large Eddy Simulation) を用いて植生と大気との間のインターアクションを調べ、ローラーとリップで特徴づけられる構造であることを示した。さらに、池田ら²³⁾は可視化手法の一種である PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて鉛直平面および水平平面内の瞬間流速場をとらえ、流れに極めて組織的な構造が存在し、それが Reynolds 応力の維持に寄与していることを示した。このように、横断方向に2次元的な植生開水路流れの構造はかなり解明されている。

しかし、実河川における植生の繁茂状況を着目すると、中小河川のように横断方向に水草が一様に繁茂する場合だけでなく、比較的規模の大きな河川では高水敷上に植生が存在する状況も観察される。このような場合は、洪水時において水位が高水敷高さより高くなることで植生が水流と接触し、植生と流水との間に相互作用が生まれる。こうした状況を想定した研究も行われた。福岡・藤田²⁴⁾、藤田・福岡²⁵⁾、福岡ら²⁶⁾は植生領域と非植生領域との間の水平混合率を明らかにし、池田ら^{27), 28)}は変曲点不安定によって水平渦が発生することや線形安定理論による水平渦の波長と実測の波長とがほぼ一致することを示した。このように、植生を有する開水路流れの平

表-1 実験条件

Case	S	S_v (cm)	H (cm)	Q (ℓ/s)	Fr	Re ($\times 10^3$)	$\alpha = \lambda H_v$
X4T	1/2600	1.0	7.0	8.93	0.40	23.5	1.00
X1T	1/3100			2.23	0.10	5.80	
D7T	1/2700	2.0		5.5	0.24	13.3	0.25
M7T	1/3600					13.1	
S7T	1/4500	4.0				12.9	0.06

S : Bed Slope, S_v : Spacing of Vegetation, H : Depth, Q : Discharge, Fr : Froude Number, Re : Reynolds Number, α : Density of Vegetation

面的な流況についてはかなり明らかにされたといえる。しかし、横断面内の特性としては富永ら²⁹⁾、長谷川ら³⁰⁾によって主流速分布、乱れ強度および Reynolds 応力が計測されているものの、2次元流を含めた詳細な流況をとらえたものはほとんどなく、また、横断面内構造と水平渦との相互作用など不明な点が多く残されている。

本研究では、PIV を用いて植生域と非植生域との境界付近に発生する水平渦の瞬間構造をとらえると共に、LDA (Laser Doppler Anemometer) を用いて2次元流を含めた横断面内の流況を詳細に測定し、植生を有する開水路流れの三次元構造の解明を試みた。

2. PIV を用いた大規模水平渦の解析

本節では、可視化手法の一種である PIV³¹⁾ (Particle Image Velocimetry) を用いて任意の水平面の瞬間流速場を連続的に計測することによって、水面付近に発生する水平渦の構造およびそれが乱流構造に及ぼす影響について考察する。

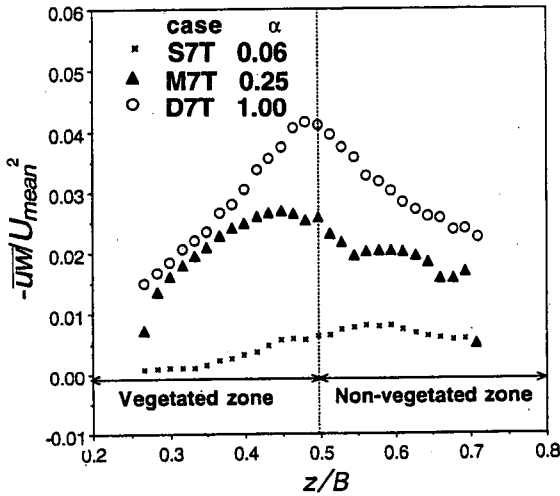


図-2(a) Reynolds 応力分布に及ぼす植生密度の影響

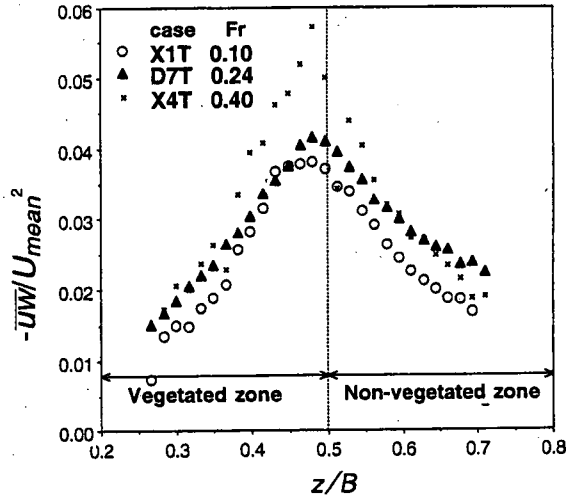


図-2(b) Reynolds 応力分布に及ぼす Froude 数の影響

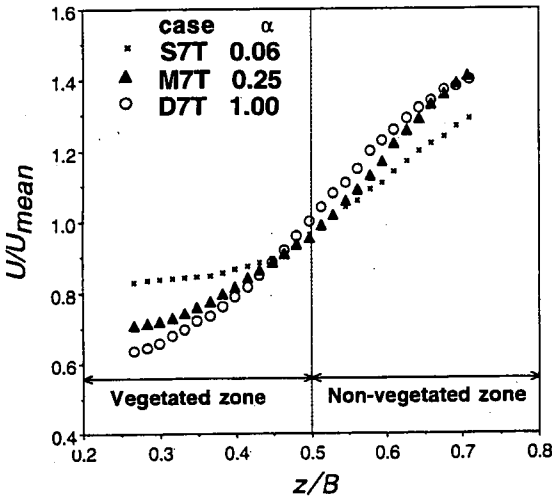


図-3(a) 横断方向主流速分布に及ぼす植生密度の影響

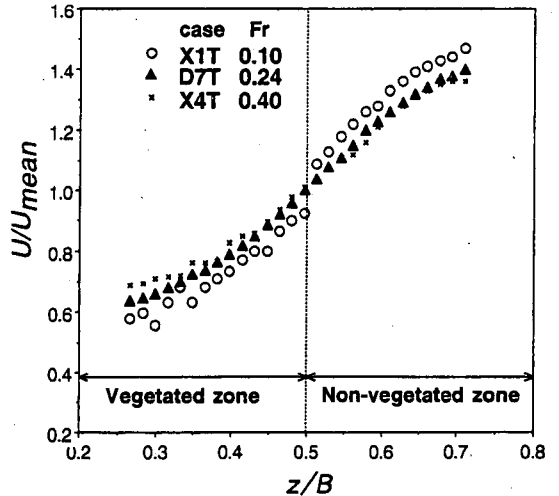


図-3(b) 横断方向主流速分布に及ぼす Froude 数の影響

(1) 実験装置

本実験で用いた水路は、長さ10m、幅 $B=40\text{cm}$ の可変勾配型水路循環式直線水路である。この水路の左岸側には図-1に示すように、長さ1m、幅 $B_v=20\text{cm}$ の植生ユニットが10個設置されている。各植生ユニットには直径 $D=2\text{mm}$ 、高さ $H_v=50\text{mm}$ の円筒形の真ちゅう棒が一辺の長さが S_v の正方形格子状の間隔で固定されている。実河川における植生は、流水に対して形状を変化させるものが多い。本研究において流水に対して変形しない真ちゅう棒を選んだ理由は、辻本ら²²⁾によって植生の剛性に関わらず水面付近で組織渦が発生することが示されていることから、組織渦に着目する限り植生の剛性はそれほど重要ではないと判断されるからである。

座標系としては、流下方向に x 軸を、 x 軸と垂直

向上きに y 軸を、横断方向に z 軸をとり、時間平均流速をそれぞれ U 、 V 、 W とし、変動成分の RMS 値を u' 、 v' 、 w' とした。

(2) PIV を用いた可視化手法

PIV は流体そのものではなく、流体中に含まれる超微細な粒子分布を2枚の濃度画像として取り込み、相関法によって粒子群の速度を検出するものである。

計測システムとしては以下のようなものである(図-1参照)。2W のアルゴン-イオンレーザーよりレーザー光線が発信され、ファイバーおよびシリンドリカルレンズを通過し、厚さ2mm のレーザーライトシート (LLS) に変化され、水路側壁方向より照射される。この時、水路上方に設置された CCD カメラによって約 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ の領域が撮影され、CRV ディスクに画像データが保存される。微小時間間隔の2枚の画像を得るために、本実験では CCD カメ

ラのシャッターは常時開放し、コンピュータ制御による AOM によって、レーザー光線をパルス状に発射させた。なお、トレーサ粒子として、スチレン・ジビニルベンゼン系のハイポーラスポリマー³²⁾を用いた。この粒子は比重が1.01と非常に水に近く、また、粒径が75~150 μm であるため乱流運動への追従性がよい。瀬津ら^{33),34)}はこの粒子を用いた PIV および PTV (Particle Tracking Velocimetry) による計測結果と、LDA (Laser Doppler Anemometer) による計測結果とを比較して、PIV の計測精度が十分に高いことを明らかにした。なお、トレーサ粒子が多い場合は、PIV の方が PTV よりも優れている。

(3) 実験条件

本研究では植生開水路流れに及ぼす Froude 数および植生密度の影響に主眼を置いているため、実験条件としては、 B_v/B 、 B_v/H_v を固定した状態で、Froude 数および植生密度を系統的に変化させた。実験条件を表-1に示す。ただし、 S は水路勾配、 Q は流量、 $Fr = U_m/\sqrt{gH}$ は Froude 数、 H は水深、 g は重力加速度、 $Re = U_m H/\nu$ は Reynolds 数、 U_m は断面平均流速、 ν は動粘性係数、 $\lambda = D/S_v^2$ は植生の密度を示すパラメータである。

計測断面は、水平渦が十分に発達していることを染料注入法によって確認した上で、水路上流端より約7mの地点とし、水面から5mm下方の位置($y=65\text{mm}$)を計測面とした。つまり、PIVで得られる諸量は全て $y/H=0.93$ ($y/B=0.16$)におけるものである。なお、測定時間は全て60sである。

(4) 実験結果および考察

a) Reynolds 応力分布

図-2(a)は植生密度の異なるケース D7T, M7T および S7T の横断方向の Reynolds 応力 $-\overline{uw}$ の分布を示したものである。ただし、 $-\overline{uw}$ の値は各ケースの可視化平面内で得られた主流速の平面平均流速 U_{mean} で無次元化されている。同図より、ケース S7T では $-\overline{uw}$ のピークが若干境界部よりも非植生領域に存在するが、その他のケースにおいては植生領域と非植生領域との境界部付近で 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。これは、植生密度が増加することで植生領域における抵抗および相互作用が増加することに起因する。

図-2(b)はそれぞれ Froude 数の異なるケース X1T, D7T および X4T の $-\overline{uw}$ の横断分布を示すものである。図-2(a)と同様な無次元化が施されている。図-2(b)より、植生領域と非植生領域との境界部に最大値が存在することおよびその最大値が Froude 数の増加に伴い顕著となることがわかる。

図-2(a)および(b)より、植生密度および Froude 数

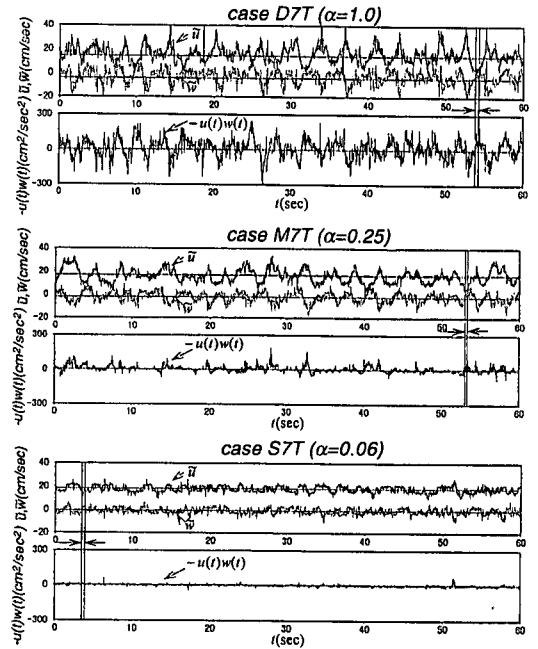


図-4 瞬間流速変動

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り、両者間で相互作用が強くなることが分かった。

b) 時間平均主流速分布

図-3(a)はそれぞれ植生密度の異なるケース D7T, M7T および S7T の時間平均流速分布を示したものである。なお、時間平均主流速は各ケースの平面平均流速 U_{mean} で無次元化されている。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かけて流速が低減することが観察される。また、この傾向は、植生密度が高いほど顕著となることが確認できる。これは、図-2(a)で示した Reynolds 応力分布の結果と対応している。

図-3(b)は Froude 数の異なるケース X1T, D7T および X4T の時間平均主流速分布を示したものである。同図より、非植生領域から植生領域にかけての主流速が低減していることが分かる。この低減傾向は、Froude 数の増加に伴い緩やかになる。つまり、Froude 数の増加に伴いシアアが減少しているように見える。一見、この結果は、図-2(b)で示したように Reynolds 応力の値が Froude 数の増加に伴い大きくなるといった結果に反する。しかし、この特徴は後述する2次流によって説明できる。

c) 瞬間流速の時間変化

図-4 はそれぞれ植生密度の異なるケース D7T, M7T および S7T における植生領域中の任意点($x/B=0.24$, $z/B=0.28$)の瞬間主流速 \tilde{u} 、瞬間横断方向流速 \tilde{w} および瞬間 Reynolds 応力 $-\tilde{u}\tilde{w}$ を示したものである。ここに、得られた PIV 画像の最上流部を $x=0$ とした。全ケースにおいて主流速 α および横

case D7T ($\alpha=1.0$)

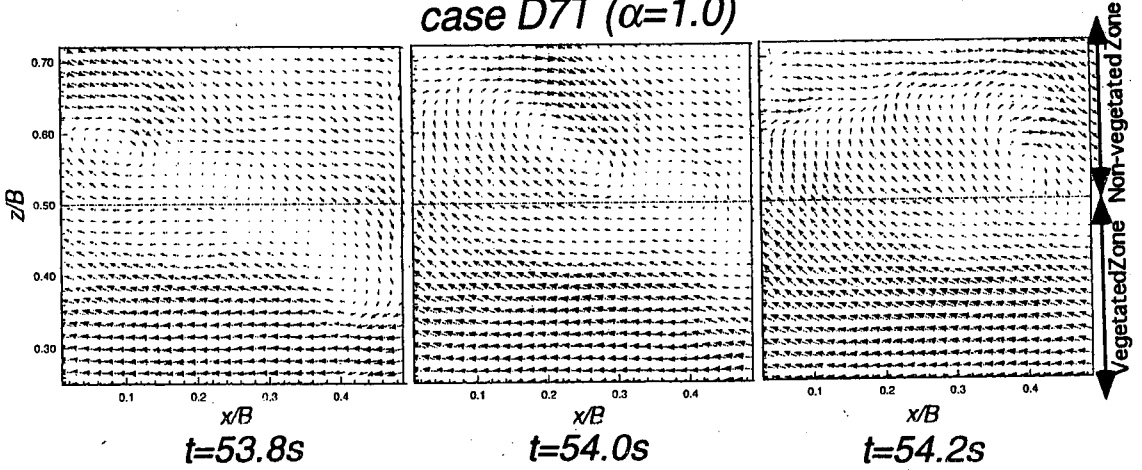


図-5 瞬間平面流速ベクトル

case D7T ($\alpha=1.0$)

case M7T ($\alpha=0.25$)

case S7T ($\alpha=0.06$)

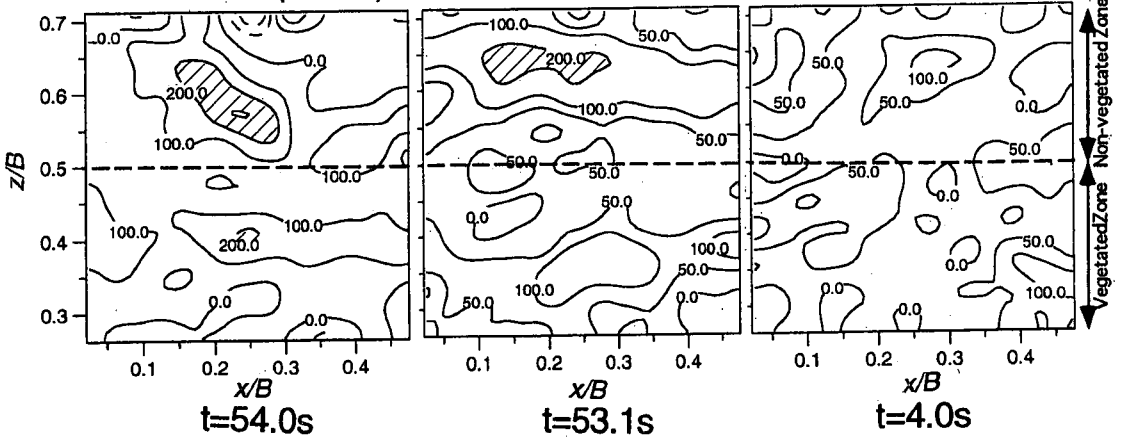


図-6(a) 瞬間渦度に及ぼす植生密度 α の影響

case X1T ($Fr=0.10$)

case D7T ($Fr=0.24$)

case X4T ($Fr=0.40$)

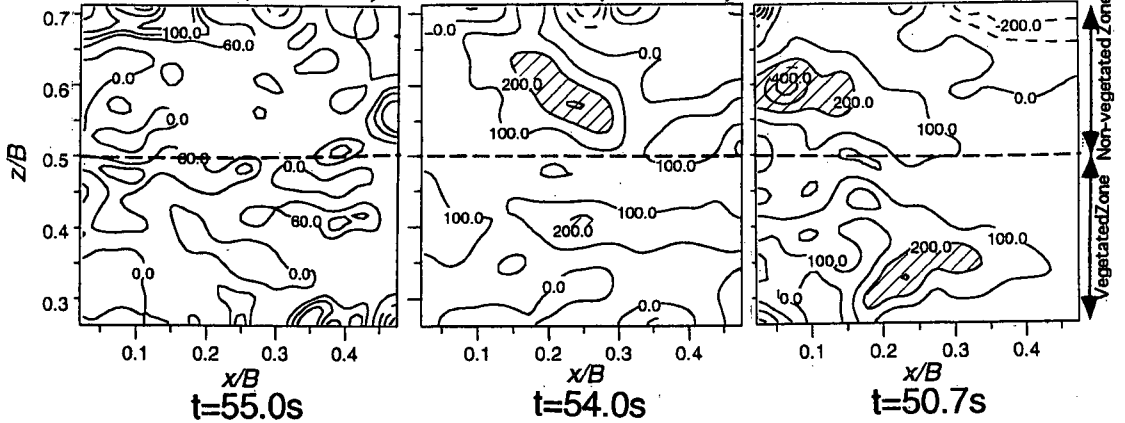


図-6(b) 瞬間渦度に及ぼす Froude 数 Fr の影響

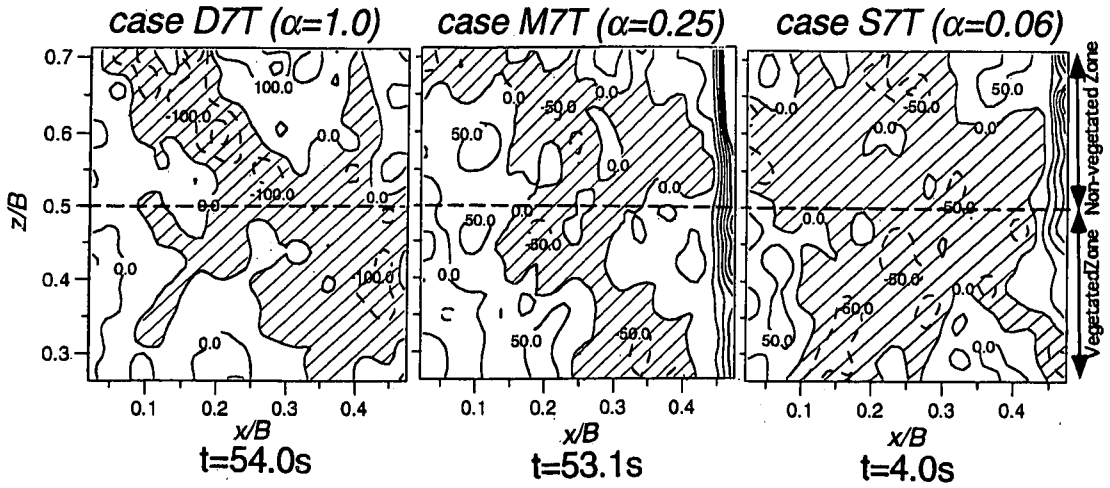


図-7(a) 瞬間の発散に及ぼす植生密度 α の影響

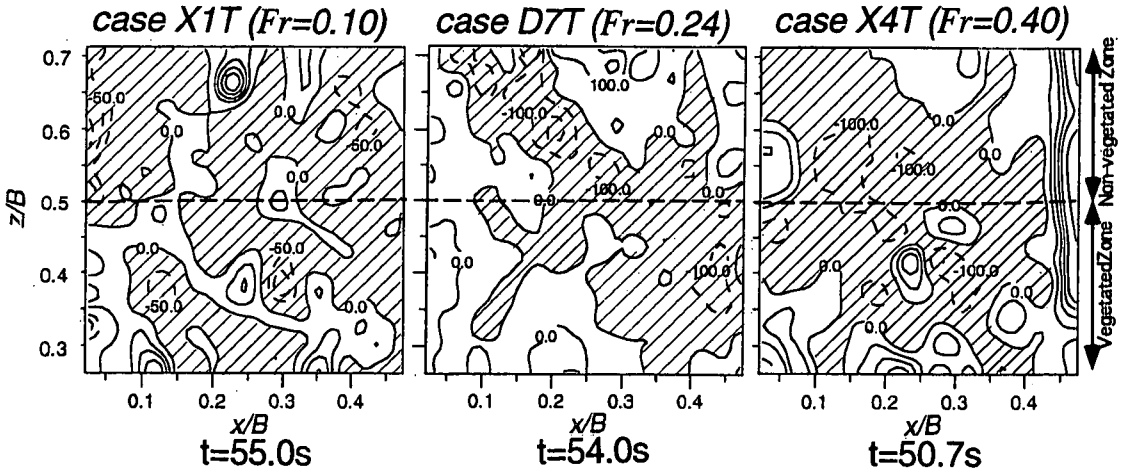


図-7(b) 瞬間の発散に及ぼす Froude 数 Fr の影響

断方向流速 w にかなり周期的な変動が見られ、その振幅が植生密度の増加に従い顕著となることわかる。また、主流速 u の変動と横断方向流速 w の変動とは逆位相で、この傾向は植生密度が大きくなるにつれて明確となる。横断方向流速 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。さらに、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 が極大値をとり、瞬間 Reynolds 応力が極大値をとることがわかる。このとき目視によっても大規模な水平渦が発生していることが確認された。この結果は Nezu & Nakayama³⁵⁾ による複断面開水路流れの結果と類似している。

d) 瞬間流速ベクトルの変化過程

図-5 は図-4 のラインで示したような水平渦が存在している時の DT7 における瞬間流速ベクトルである。ただし、同図は $19\text{cm} \times 19\text{cm}$ の空間範囲を示しており、平面平均主流速 U_{mean} および平面平均横断方向流速 w_{mean} (可視化平面内で得られた横断方向流速の平面平均値) を主流速 u および横断方向流速 w からそれぞれ差し引いた移動座標で示している。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。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 $-\overline{uw}$ の発生に寄与している。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ではなく、境界部よりもやや非植生領域に位置しており、辻本・北村³⁶⁾の結果と一致する。水平渦

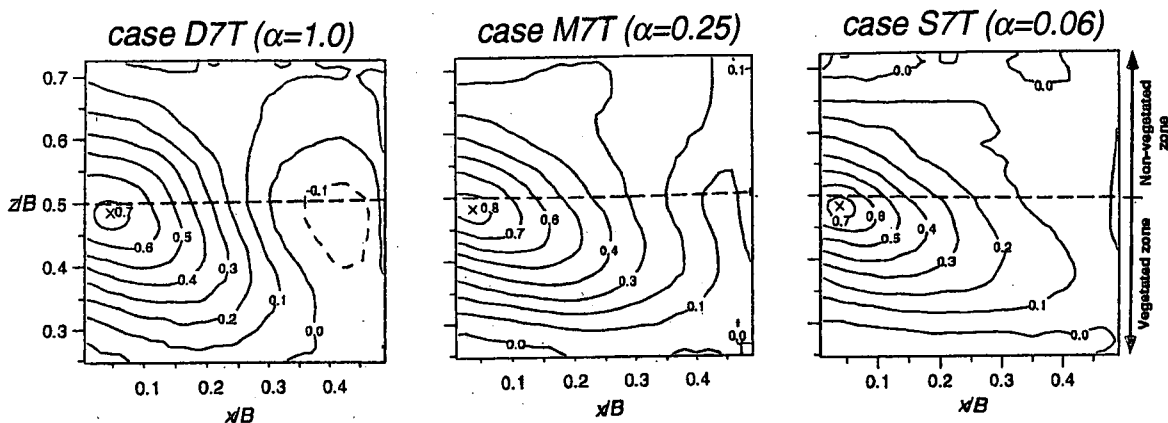


図-8 相関係数に及ぼす植生密度 α の影響

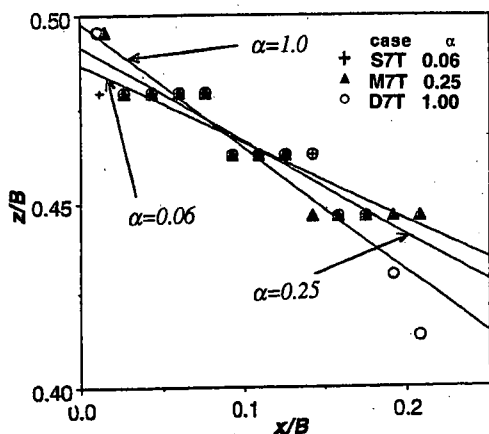


図-9 相関係数が最大値をとる位置の流下方向変化

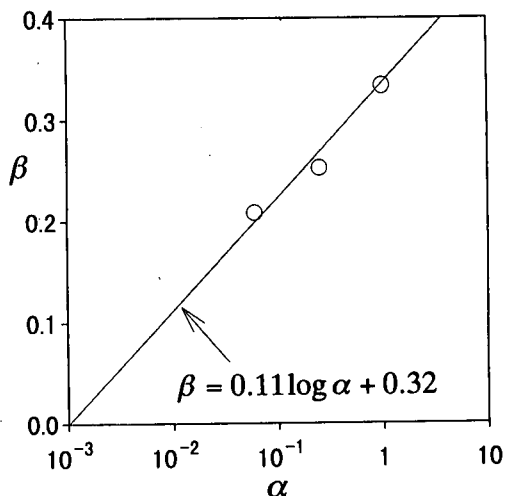


図-10 植生密度 α と相関最大値との関係

の形状は長軸が流下方向から少し植生領域側に傾いた楕円形を有している。この長軸の傾きは、植生密度の増加に伴いその角度が急になることを目視によっても確認された。

e) 渦度

図-6(a)はそれぞれ植生密度の異なるケース D7T, M7T および S7T において、水平渦が顕著に観察された瞬間の渦度 ω_y である。ただし、渦度 ω_y は以下のように定義された。

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

D7T ($\alpha=1.0$) について、図-5と図-6(a)とを照らし合わせると、水平渦の周辺内側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。植生密度の増加に伴い渦度の最大値が増加しており、図-5において瞬間ベクトルによる水平渦が渦度分布の面から明確に認識できたことを裏付けている。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、植生領域の奥にまで及ぶことがわかる。

図-6(b)はそれぞれ Froude 数の異なる X1T, D7T および X4T における瞬間の渦度分布 ω_y の一例である。図-6(a)と同様に、水平渦の周辺内側で渦度が特に大きく、渦度の最大値が Froude 数の増大に伴い増加していることがわかる。これは、先述したように Froude 数の増加に伴うシアの増加によって水平渦が発生したためである。

図-6(a)および(b)より植生密度および Froude 数の増加に伴い、植生領域と非植生領域との間のシアが増加し、偏極点不安定によって発生する水平渦がより組織的となることによって渦度が増加することが示された。

f) 発散

図-7(a)はそれぞれ植生密度の異なるケース D7T, M7T および S7T における瞬間の発散 ψ_y である。同図は図-6(a)の瞬間と同一のものである。ここに、発

散 ψ_y は以下のように定義される。

$$\psi_y = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \quad (2)$$

ψ_y の値は、沸き出しが正で吸い込みが負である。

水平渦の中心部から前方部にかけて負の値が多く、特に中心部で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、正の値が多くみられる。このことから、水平渦の中心部や前方部では流体は沈み込み、後方部では沸き上がっていることがわかる。後述する図-13の2次流を参照すると、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できる。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-7(b)はそれぞれ Froude 数の異なる D7T, X1T および X4T における瞬間的发散 ψ_y である。同図より、植生密度が増加する場合と同様に、Froude 数の増加に伴い発散の最大値および最小値がそれぞれ増加、減少していることが観察される。

図-7(a)および図-7(b)より植生密度および Froude 数の増加により、流体混合が激しくなり、また流れの三次元性が強くなることで、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された。

g) 空間相関係数

PIV では平面内の多点同時計測を行うため、容易に時空間相関を求めることが可能である。任意の i 点および j 点における時空間相関係数は、

$$C_{i,j}(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau) = \frac{u_i(x, y, z, t) u_j(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \tau)}{u_i'(x, y, z, t) u_j'(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \tau)} \quad (3)$$

で表される。ここに、 u_i 、 u_j は i 点および j 点の流速変動成分、 Δx 、 Δy 、 Δz は i 点と j 点との間の距離、 τ はラグタイムである。図-8は $\tau=0$ としたときの境界部での固定点 $x/B=0.04$ 、 $z/B=0.49$ (図中に×印で示してある) に対する主流速の乱れ変動成分の空間相関係数の分布を示したものである。同図より、高相関領域が非植生領域から植生領域へと広がっていることが観察される。また、この相関の等値線の最も張り出した点は、流下方向よりもやや植生領域を向いていることが分かる。

そこで、図-8において同一の等値線内で最も張り出した部分を結んだ点を図-9に示す。なお、同図には近似直線も示している。植生密度の増加に伴い、近似直線の傾きが急になっており、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。これは、非植生領域の高速流体塊が植生領域に入り込むこと、およびその影響が植生領域内部まで及んでいることを表したものと考えられる。

図-10は植生密度と図-9において示した近似直線の

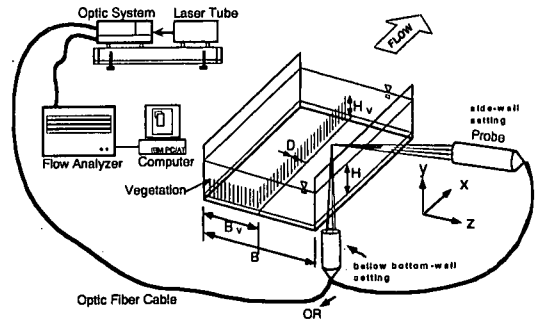


図-11 実験装置

表-2 実験条件

Case	S	S_v (cm)	H (cm)	Q (ℓ/s)	Fr	Re ($\times 10^3$)	$\alpha = \lambda H_v$
FR1	1/3100	1.0	7.0	2.23	0.10	5.80	1.00
FR2	1/2700			5.50	0.24	13.3	
FR4	1/2600			8.93	0.40	23.5	

S : Bed Slope, S_v : Spacing of Vegetation, H : Depth, Q : Discharge, Fr : Froude Number, Re : Reynolds Number, α : Density of Vegetation

傾きとの関係を示している。同図より本実験範囲においては両者の関係がほぼ片対数表示で線形的に表現できる。そこで、植生密度 α と近似直線の傾き β との関係を次式で近似し、図-10中に直線で示した。

$$\beta = 0.11 \log \alpha + 0.32 \quad (4)$$

3. LDA を用いた横断面内構造の解析

Froude 数の増加に伴い、境界部付近での Reynolds 応力は増加し、シアアの増加を示しているが、主流速については、Froude 数の増加に伴い横断方向の速度勾配が減少するといった結果を得た。これは、一見矛盾しているかのように見える。そこで、本節では植生密度を一定として Froude 数のみを系統的に変化させて LDA (Laser Doppler Anemometer) を用いた乱流計測を高精度に行い、Froude 数が乱流構造に及ぼす影響について考察した。

(1) 実験装置および実験条件

実験に用いた水路は前章と同一のものである。計測システムを図-11に示す。2Wのレーザー発信器から発生したレーザー光線は、ビームスプリッターによって周波数分離され、40MHzの周波数シフトをかけられた後にファイバーを通して、ガラス製の水路側壁および水路底面から流体中に照射され、ドップラーバースト信号を発生させる。このバースト信号は受光部で検出され、再びファイバーを通過して処理機 (Flow Analyzer) に送られ、相関法によって流速値が算出される。この2成分 LDA システムは Dantec 社製のものである。

LDA を用いて植生内部の乱流計測を行う場合、レーザー光線が真ちゆう棒に接触するため計測できない場合がある。池田ら²³⁾は模擬植生として 6.10 ナイロンプリッスルを用いた流れ場をピトー管で測

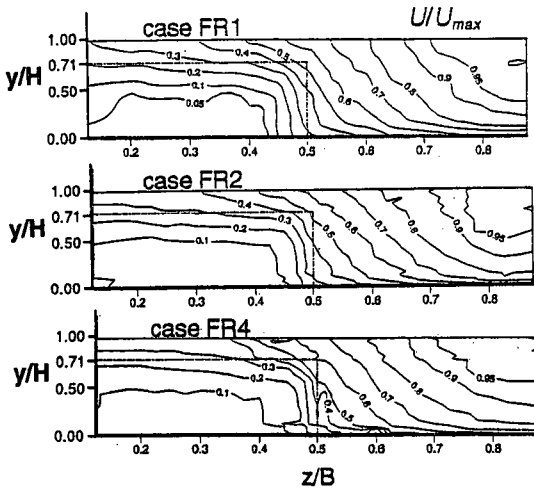


図-12 主流速分布

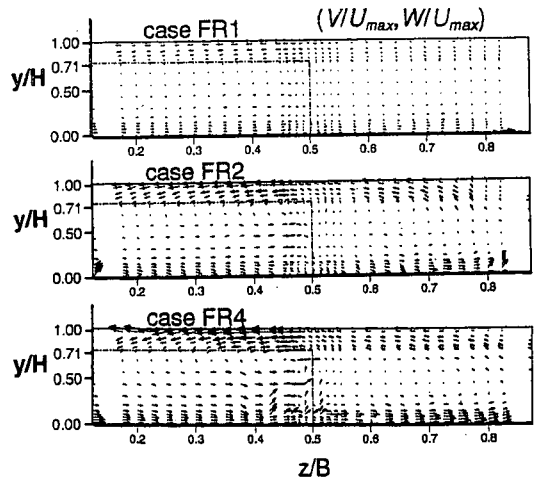


図-13 2次流ベクトル

定すると共に、模擬植生の一部を切り抜き LDA による測定も行った。その結果、模擬植生を一部切り取る事による流れ場への影響はほとんどないことを示した。本実験においても真ちゆう棒のごく一部を抜き取った上で測定を行った。なお、光学プローブの $y-z$ 平面内における移動は 0.01mm の精度を持つトラバース装置によって行われた。

表-2に実験条件を示す。FR1, FR2 および FR4 の各ケース間における実験条件の相違は Froude 数である。全ケースにおいてサンプリング時間を 60s とした。サンプリング周波数は全ケースにおいて 100Hz 以上であった。

(2) 実験結果および考察

a) 主流速分布

図-12は各ケースにおける断面内最大主流速 U_{max} によって無次元化された主流速 U の等値線を示したものである。なお、図中の破線は植生が存在する領域を表している。全てのケースにおいて植生内部の等値線は比較的底面と平行となっており、流れが2次元的であることを示している。しかし、植生上部の領域では、側壁から水路中央に向かうにつれて等値線が徐々に歪んでおり、流れが3次的であることを示唆している。一方、境界部の底面付近では等値線が非植生領域に張り出しているのが特徴的である。また、同一の y/H に着目すると、非植生領域から植生領域にかけての流速の低減傾向が、Froude 数の増加に伴い緩やかになることが観察される。これは、図-3(b)の結果と一致する。

b) 2次流分布

図-13は各ケースにおける断面内最大主流速 U_{max} によって無次元化された2次流 ($\sqrt{V^2 + W^2}$) をベクトル表示したものである。水面付近に着目すると、2次流の向きが非植生領域から植生領域に向かって

いることが観察される。本実験で得られた2次流のパターンは大本ら³⁷⁾の結果と異なる。ただし、大本らの使用した模擬植生は流れに対し柔軟な材質を有し、かつ、流れ場が発達段階にあるので、端的に比較することはできない。ともあれ、本実験で得られた2次流を用いて底面せん断応力を評価したところ、log 則によって得られた値とほぼ一致することを瀬津ら³⁸⁾は示したことから、本実験で得られた2次流は妥当なものと思われる。

図-13より Froude 数の増加に伴い2次流強度が増加していることが観察される。これは、2次流の構造が Froude 数に依存しないという瀬津・中川³⁹⁾の結果と異なる。そこで、2次流の発生原因について考察する。植生を有しない矩形断面開水路においては、側壁・底面および水面が存在することで乱れの非等方性が生じ、この乱れの非等方性によって2次流が発生することを Nezu & Nakagawa⁴⁰⁾は明らかにした。本研究で対象とした植生開水路の水面付近における2次流の発生原因は、以下のように考えられる。まず、Froude 数の増加に伴い、水面付近においては植生領域と非植生領域との間のシアアが増加し、変極点不安定に起因する水平渦の運動が活発となる。この水平渦によって、ある瞬間においては非植生領域の高運動量塊が植生領域に移流され、それに続いて植生領域の低運動量塊が非植生領域に移流される。2次流は両者の残差として生じるため水面付近の2次流の水平方向成分は Froude 数の増加に伴い大きくなる。このような水平渦と2次流との関連性については、複断面流れについては池田ら⁴¹⁾によっても指摘されており、本研究結果は彼らの結果と一致する。また、2次流は平均的に非植生領域の流体を植生領域に移流させるため、2次流強度が強くなる高 Froude 数では主流の横断方向速度勾配が低減する。よって、Froude 数の増加に伴い境界部付近の Reynolds 応力は増加するが、横断方向速度勾配は

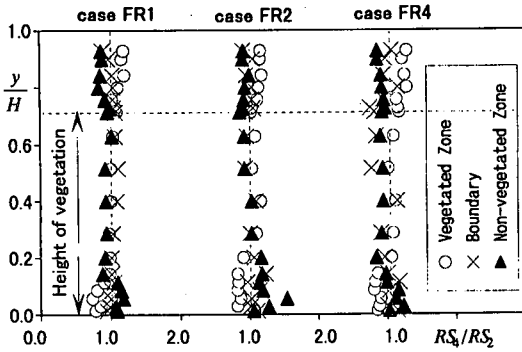


図-14 ejection と sweep の強度比

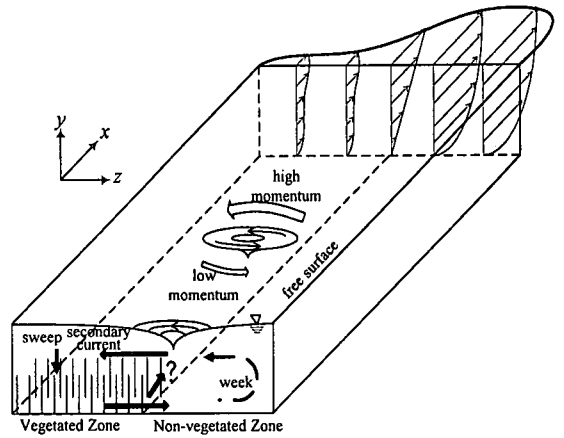


図-15 植生流れの模式図

緩やかになると考えられる。

また、上述のようなプロセスで発生した2次流は境界部から水路側壁方向へほぼ水平に流れた後、植生内へ下降する。これは、第3章で示した発散の結果と対応する。さらに2次流は底面付近で非植生領域方向へ流れ、非植生側の側壁付近で再び上昇する。2次流はこのような一つの大きな循環を示しており、植生上部の2次流と植生内部の2次流によって質量収支がバランスしている。本実験で得られた2次流のパターンは、高水敷水深の浅い複断面流れの2次流のパターンとは異なる。これは、複断面流れでは高水敷の底面と側壁といった固定された壁を有するのに対し、植生流れでは植生部分と非植生部分との間に壁を有さないために、複断面流れとは異なる乱れの非等方状態となり、2次流のパターンに相違が生じたものと思われる。

c) 運動量交換特性

植生領域の上部において、2次流は植生上部から植生内へと沈み込んでいることが明らかにされた。そこで、植生内部と植生上部との間で行われる運動量交換特性について考察する。

まず、瞬間 Reynolds 応力 $-uv$ を4象限区分し、それぞれの成分について $hole$ 値を変化させて Reynolds 応力の寄与率を求める。なお、本解析法は Nezu & Nakagawa の文献⁴¹⁾に示されているので、詳細についてはそちらを参照されたい。

図-14は植生領域、境界部および非植生領域における RS_4/RS_2 を示したものである。ただし、 RS_2 および RS_4 はそれぞれ瞬間 Reynolds 応力を4象限区分した際の $hole$ 値ゼロの時の寄与率であり、 RS_2 が ejection ($u < 0, v > 0$)、 RS_4 が sweep ($u > 0, v < 0$) を表している。全てのケースについて、非植生領域においては RS_4/RS_2 の値が底面付近では大きく、水面付近では小さくなっている。一方、逆に植生領域においては RS_4/RS_2 の値が底面付近で小さく、水面付近では大きくなっており、非植生領域とは全く逆の傾向を示している。つまり、植生領域上部に

おいては、sweep が卓越しており、植生上部の領域から植生内部に運動量が輸送されていることが示された。この結果は、キャノピー流れの結果²³⁾と類似している。また、福原⁴²⁾は絹糸を模擬植生として使用した2次元開水路流れにおいて、植生上部の高運動量流体が sweep によって植生内部に入り込み、逆に ejection によって植生内部の低運動量流体が植生上部に浮上することを指摘しており、本実験結果は福原の結果と一致する。

4. 結 言

本研究では、PIV を用いて植生域と非植生域との境界付近に発生する水平渦の瞬間構造をとらえると共に、LDA を用いて2次流を含めた横断面内の流況を測定し、植生開水路流の3次元流況を詳細にとらえた。本研究で得られた結果を以下に示す。

図-15に植生開水路流の概念図を示す。植生域と非植生域との間に発生するシアは植生密度および Froude 数の増加に伴い顕著となる。シアの増加に伴うせん断不安定によって水平渦が発生する。また、植生域と非植生域との境界部の水面付近で発生している2次流は水平渦によって発生しているため、植生密度および Froude 数の増加によって2次流強度が増加する。発生した2次流は植生側の側壁方向に向かってほぼ水平に流れ、その後、植生内部へと下降する。この時 sweep によって運動量が植生上部から植生内部へと運ばれる。さらに、植生内部に入り込んだ2次流は底面付近で再び非植生領域に流れ、連続式が満足される。その後、非植生領域の側壁付近で上昇し、水面付近へと還流する。2次流はこうした一つの大きな循環を示す。

本研究で提案した新しい渦モデルによって、植生流れの浮遊砂の挙動を推定できる。すなわち、非植生領域の主流(洪水の本川)を流れている浮遊砂は水面付近の2次流によって植生領域に輸送され、沈降する。植生領域の河床近くは流速も小さく、この浮遊砂は河床に堆積し、ごく一部が主流域へと還流

されるにすぎない。従って、洪水後の植生領域には浮遊砂やシルトが堆積し、河川環境を悪化させると考えられ、これらの詳細な研究がさらに必要である。

謝辞：本研究を行うに当たり、貴重な文献を提供していただいた福井大学工学部・福原輝幸教授およびPIVについてご助言いただいた新日本製鐵(株)技術開発本部・津田宜久氏に謝意を表します。また、実験および解析に協力いただいた当時本学卒論生・池谷和哉君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 安田実, 美寺寿人, 樋口経太: 多自然型川づくりの現状と課題, 第2回河川の水利と河川環境シンポジウム論文集, pp.1-8, 1995.
- 2) 芦田和男: 開水路断面急拡部の水利とその適用に関する研究, 京大防災研年報, 第5号, pp.223-251, 1962.
- 3) 石原藤次郎, 志方俊之: 開水路急拡部の水理学的性状に関する研究, 土木学会論文集, 第128号, pp.12-28, 1966.
- 4) 今本博健, 藤井良啓, 藤井義文: 開水路断面変化部における流れの水理特性について(2), 京大防災研年報, 第20号B-2, pp.309-329, 1977.
- 5) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulent structure of backward facing step flow and coherent vortex shedding from reattachment in open-channel flows, *Turbulent Shear Flows 6*, Springer-Verlag, pp.313-337, 1989.
- 6) 今本博健, 久本俊夫: 複断面流れの水理特性に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, pp.665-679, 1974.
- 7) 木下良作: 洪水と流路形態の現地観測, 土木学会水工学シリーズ, 78-A-7, 1974.
- 8) 池田駿介, 村山宜義, 空閑健: 複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造, 土木学会論文集, 第509号, pp.131-142, 1995.
- 9) Shiono, K. and Knight, D.W.: Turbulent open channel flows with variable depth across the channel, *J. Fluid Mech.*, Vol.222, pp.617-646, 1991.
- 10) Tominaga, A., Nezu, I. and Kobatake, S.: Flow measurements in compound channels with a fiber optic laser Doppler anemometer, *IAHR workshop on Instrument for Hydrodynamics Lab.*, Canada Centre for Inland Waters, pp.45-59, 1989.
- 11) Tominaga, A. and Nezu, I.: Turbulent structure in compound open channel flows, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.117, pp.21-41, 1991.
- 12) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H.: Hydrodynamic behavior of compound rectangular open channels, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.119, pp.390-408, 1993.
- 13) Pezzinga, G.: Velocity distribution in compound channel flows by numerical modeling, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.120, pp.948-968, 1994.
- 14) Cokljat, D. and Younis, B.A.: Secondary-order closure study of open-channel flows, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, vol.121, pp.94-107, 1995.
- 15) Thomas, T.G. and Williams, J.J.R.: Large eddy simulation of turbulent flow in an asymmetric compound open channel, *J. Hydraulic Res. IAHR*, vol.33, pp.27-41, 1995.
- 16) 日野幹雄, 歌原英明: 水草のある流れの水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第266号, pp.87-94, 1977.
- 17) 室田明, 福原輝幸: 水生植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第338号, pp.97-103, 1983.
- 18) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次, 北村忠紀: 直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.438/II-17, pp.31-40, 1991.
- 19) 湯城豊勝, 岡部健士: 植生を持つ河床上の流れの抵抗則に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第39巻, pp.471-476, 1995.
- 20) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次: 直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.447/II-19, pp.35-44, 1992.
- 21) 辻本哲郎, 北村忠紀, 中川博次: 植生層構造の不安定現象としての穂波の形成機構, 水工学論文集, 第39巻, pp.519-524, 1995.
- 22) 神田学, 稲垣聡, 日野幹雄: 植生一大気境界における大規模渦構造と運動量交換に関するLESモデルによる検討, 土木学会論文集, No.461/II-22, pp.39-48, 1993.
- 23) 池田駿介, 金沢稔, 太田賢一: 可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の三次元構造と穂波の発生, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.33-43, 1995.
- 24) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告第180号, pp.129-192, 1990.
- 25) 藤田光一, 福岡捷二: 洪水流における水平乱流混合, 土木学会論文集, No.429/II-15, pp.27-36, 1991.
- 26) 福岡捷二, 渡辺明英, 上坂恒雄, 津森貴行: 低水路護岸に樹木群のある河道の洪水流の構造, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.79-88, 1995.
- 27) 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.
- 28) 池田駿介, 空閑健, 陳飛勇: 両岸に植生帯を有する開水路流れに発生する大規模水平渦の安定性と運動量輸送, 土木学会論文集, No.551/II-37, pp.63-73, 1996.
- 29) 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.
- 30) 長谷川和義, 浅井重政, 金高州吾, 馬場仁志: 高植生密度の葦河岸を有する水深の大きな水路における流れの特性, 水工学論文集, 第41巻, pp.379-382, 1997.
- 31) 竹原幸生, 江藤剛治, 村田滋, 道奥康治: PTVのための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文集, No.533/II-34, pp.107-126, 1996.
- 32) 三菱化学株式会社編: ダイヤイオンI基礎編, p.125, 1996.
- 33) 瀬津家久, 上矢博之, 定免英樹, 相良幸輝: 植生開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第41巻, pp.1061-1066, 1997.
- 34) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 定免英樹, 相良幸輝: PIV計測による植生開水路流れの乱流構造に関する研究, 水工学論文集, 第42巻, 1998.
- 35) Nezu, I. and Nakayama, T.: Space-time correlation structures of horizontal coherent vortices in compound open-channel flows by using particle-tracking velocimetry, *J. Hydraulic Research, IAHR*, vol.35, No.2, pp.191-208, 1997.
- 36) 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.

- 37) 大本照憲, 福井洋幸, 林俊一郎: 水生植物を伴う流れの三次元構造について, 水工学論文集, 第42巻, pp.427-432, 1998.
- 38) 禰津家久, 鬼束幸樹, 定免英樹: 植生を伴う開水路乱流の2次流と河床せん断応力, 第3回環境流体シンポジウム, pp.315-316, 1998
- 39) 禰津家久, 中川博次: 一様開水路および閉管路の三次元乱流構造に関する研究, 土木学会論文集, No.369/II-5, pp.89-98, 1986.
- 40) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Cellular secondary currents in straight conduit, *J. Hydraulic Eng., ASCE*, Vol.110, pp.173-193, 1984.
- 41) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 42) 福原輝幸: 開水路乱流の構造解析とその応用に関する研究, 大阪大学博士論文, 1983.

(1998. 3. 23 受付)

COHERENT STRUCTURE AND ASSOCIATED TURBULENT CHARACTERISTICS IN OPEN-CHANNEL FLOWS WITH VEGETATION AT HALF WITH

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA, Hideki JOHMEN and Yuki SAGARA

Turbulence measurements of partly vegetated open-channel flows were conducted accurately with PIV (Particle Image Velocimetry) and LDA (Laser Doppler Anemometer). The horizontal vortices near the free surface are generated by the shear instability which increases with an increase of the vegetation density and the Froude numbers. Secondary currents near the free surface are generated by the horizontal vortices and its strength increases with an enlargement of the vegetation density and the Froude numbers. This hydrodynamic mechanics of secondary currents is quite different from non-vegetated open-channel flows, in which the secondary currents are generated by the anisotropy of turbulence. A new eddy model is proposed to explain both the secondary currents and horizontal large-scale vortices in partly vegetated open-channel flows.