

条件付抽出法による側岸部植生境界における 組織的乱流運動の三次元構造の基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON 3-D STRUCTURE IN ORGANIZED TURBULENT MOTION AT
THE BOUNDARY OF BANK VEGETATION BY CONDITIONAL SAMPLING METHOD

池田裕一¹⁾・金成修一²⁾・須賀堯三³⁾

Hirokazu Ikeda, Shuichi Kanari, Kyoza Suga

¹⁾正会員 博(工) 宇都宮大学助教授 工学部 建設学科 (〒321-0912 栃木県宇都宮市陽東7丁目)

²⁾学生員 宇都宮大学大学院 工学研究科博士前期課程 建設学専攻 (同上)

³⁾フェロー会員 工博 宇都宮大学教授 工学部 建設学科 (同上)

Conditional sampling method was adapted to clarify the three 3-D structure in periodical large vortices at the boundary between a river flow and vegetation zone along the river has a strong upward flow. It was shown that an upward flow and downward flow occur at the both edges of the free shear layer and main flow zone, and their intensity amounts to 80% of the turbulence intensity lateral velocity component.

Keywords : free shear layer, organized turbulence, 3-D structure, vegetation, conditional sampling

1. はじめに

河川の側岸に沿い植生が繁茂すると、植生境界近傍において植生部の遅い流れと主流部の速い流れの流速差に起因する自由せん断層が形成される。そこでは横断方向の流速分布の変曲点不安定により、水平方向に大きな広がりを持つ組織的な渦が周期的に発生し、主流部と植生部との横断方向の運動量・物質輸送に重要な役割を果たしていることが知られている¹⁾。そして、この渦の二次元的現象については、多くの研究により指摘されている^{2) 3)}。

この渦自体の発生要因は、先に述べたように二次元的なものではあるがその構造は底面の存在より何らかの三次元性を有するものと予想できる。最近の研究で、富永・八木⁴⁾らは、この渦の水深毎の平面流況を調べ、それを水深方向に重ねることで三次元構造を明らかにしようと試みた。その結果、上部が流下方向に細く引伸ばされた楕円形、そして下部では横断方向に引伸ばされた楕円形

となる歪んだ楕円錐であるとし、この底層での大きな鉛直構造の変化は、そこでの横断方向の物質輸送に影響を与えていると指摘している。また瀬津ら⁵⁾は、PIV法を用いて瞬間的な組織乱流構造を解析し、主流部からの高速流体塊が植生領域に入り込み、その直後に植生領域からの低速流体塊が主流部に流出する瞬間像を捉えた。しかしこれらの研究は平面的な運動が主であり、鉛直方向を含む真の意味での三次元運動を捉えるには至っていない。また、池田ら⁶⁾は流れの可視化実験より主流部からの高速水塊が植生境界部の低速水塊の下に潜り込み、その際上昇流が発生するという顕著な三次元性を明らかにし、さらに発生要因に関して⁷⁾、植生帯でなく底面と渦との相互作用が支配的であること⁸⁾、また底面付近の乱れが本質的ではないことを示した。しかし、あくまで定性的な知見を得たにすぎない。

そこで、本研究は2つのプローブを用いて、鉛直方向成分も含めた流速変動測定を行ない、得られたデータに簡単な条件付抽出法をすることによって、周期渦の三次元構造を定量的に把握しようとするものである。

2. 実験装置及び方法

本研究で使用した水路は、全長 6.5m、幅 48cm、勾配 1/1000 の循環式アクリル製直線水路であり、その右岸側に疑似植生帯として幅 12cm のプラスチック製の多孔質体²⁾を設置した。また植生帯の高さは 20cm であり、水深 ($H=4.2\text{cm}$) より高く水没することはない。上流端にはベルマウスを取り付け、流入口から主流部までなめらかに誘導し、不要な乱れをなくした。下流端には堰を設置することで水深の調節を可能にし、等流状態で実験を行えるようにした。本実験の水力条件を表-1 に、実験装置の模式図と座標系を図-1 に示す。ここで、表中の渦発生周期は染料を流し、目視により測定した値である。また、このような条件下で測定した $Z=2\text{cm}$ における横断平均流速分布を図-2 に示す。

流速変動測定には 2 成分の電磁流速計 (KENEK 社製) を用い、これに 2 種類のプローブ (I・L 型) を接続し、流下方向を X、右岸から左岸に向かう方向を Y、底面から水面に向かう方向を Z として (図-1)、X-Y 成分 (I 型)、Y-Z 成分 (L 型) の流速変動を測定した。また、プローブのセンサー部の直径は 1mm であり、水深と比べ微小である。測定断面は上流端から 5.0m 離れた断面内において、Y 方向に 23 点 (せん断層: $Y=12\sim 25\text{cm}$ を 1cm ごと、その他を 3cm ごと)、Z 方向に 3 点 ($Z=1, 2, 3\text{cm}$) の計 69 点とした。サンプリング条件はサンプリング間隔 0.01sec、サンプリング時間 180sec である。電磁流速計の応答時間は 0.05sec であるが、今回は比較的低周波の現象を捉えることを目的とするため、これについては問題ないといえる。また、条件付抽出の際に基準となる点の流速変動測定には上記と同じプローブ (I 型) を用い、X 方向の変動が大きい測定断面の 10cm 上流、Y 方向に 15cm (せん断層内)、Z 方向に 2cm (半水深) の点に設置し、基準点と測定断面内の点を同時計測した。

図-3 に基準点 ($X=490, Y=15, Z=2\text{cm}$) における流速変動 u' 及び v' の波形の一例を示す。これより、両者ともほぼ周期的に変動しており、その間隔は 5~6 秒と目視により計測された渦の発生周期と一致する。また、 u' 、 v' の波形がほぼ半周期ずれており、その結果レイノルズ応力が間欠的に高い値を示し、主流部の高速水塊の潜り込みと植生部の低速水塊の張り出しが交互に発生している様子が伺える。

3. 実験結果及び考察

(1) 流速変動特性

図-4 は $Z=2\text{cm}$ における平均統計量の横断分布を示したものである。これより、 $Y=15\text{cm}$ (植生境界部から 3cm) の点に $\overline{u^2}$ のピークが存在しており、これと図-2 の横断

表-1 水力条件

河床勾配	1/1000
水路幅 B (cm)	48
植生幅 B _v (cm)	12
植生透過係数 K (m/sec)	0.38
動粘性係数 ν (cSt)	1.0
流量 Q (cm ³ /sec)	2900
水深 H (cm)	4.2
主流部流速 U (cm/sec)	23.0
レイノルズ数 UH/ν	9660
フルード数 $U/\sqrt{gH}$	0.36
渦発生周期 (sec)	5.4

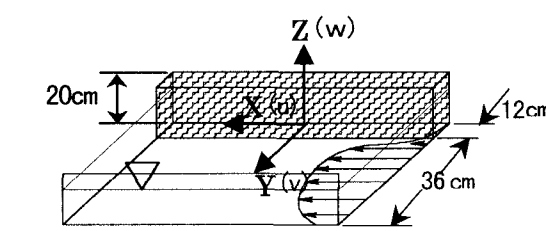


図-1 実験装置の模式図

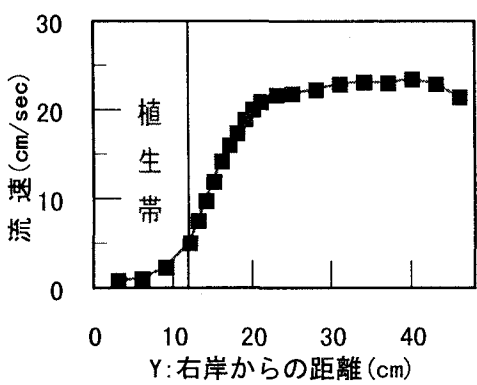


図-2 横断平均流速分布 ($Z=2\text{cm}$)

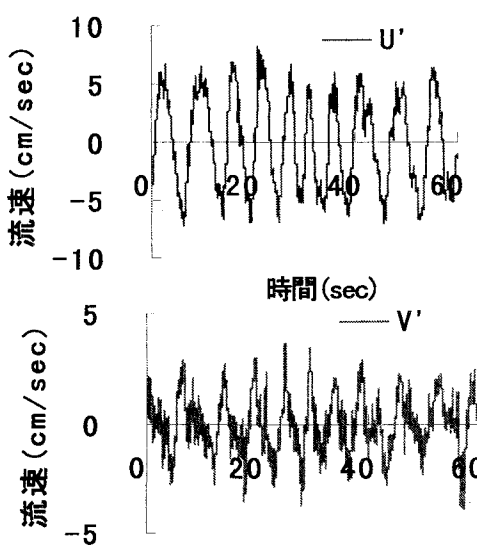


図-3 基準点の流速変動の波形

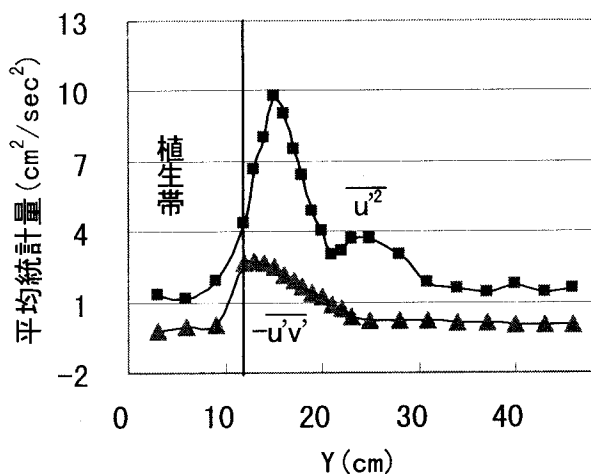


図-4 平均統計量 (Z=2cm)

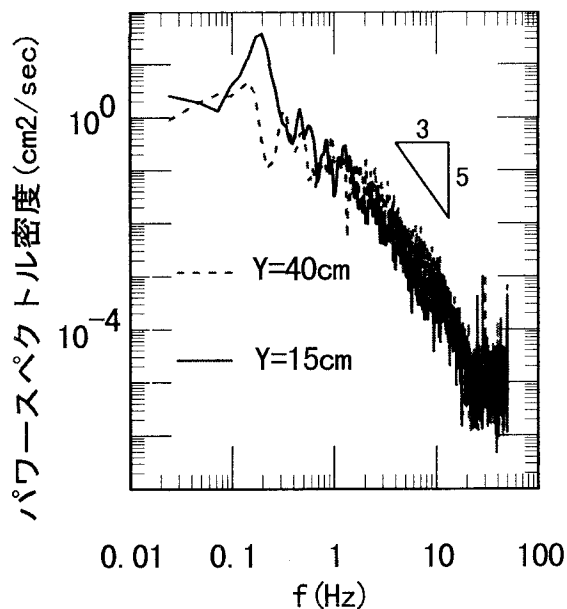


図-5 主流速変動 u' のパワースペクトル

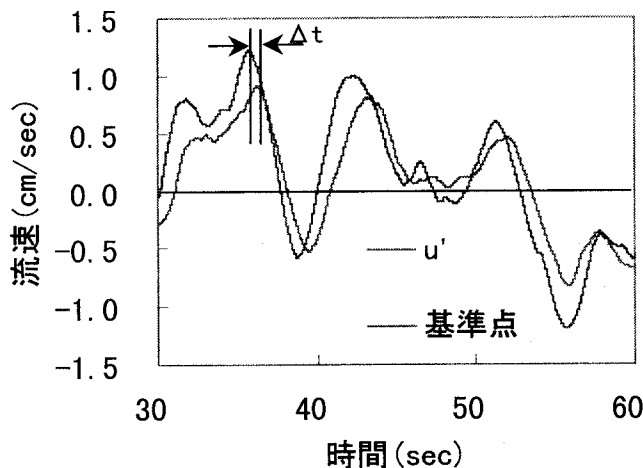


図-6 基準点と測定断面における u' の移動平均波形 (Y=15cm, Z=2cm)

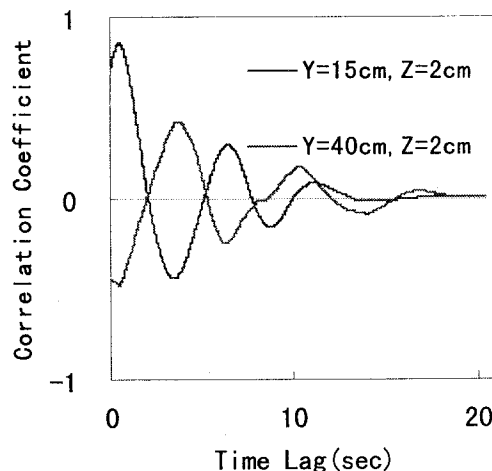


図-7 基準点と測定断面における u' の相互相関

平均流速分布よりこの付近で変曲点不安定が生じているものと考えられる。また、この付近で $-u'v'$ もピーク値を持ち、主流部からの高速水塊と植生部からの低速水塊が激しく混合している流況と対応している。

図-5 は、Z=2cm 点の Y=15cm (せん断層内) 及び Y=40cm (主流部) における u' の時系列データの周波数 f に対するパワースペクトル密度を示したものである。これより、Y=15cm でのパワースペクトルの周波数ピーク位置は約 0.19Hz であり、よってこのピーク周波数を持つ波動の周期は約 5.3sec、これは目視により計測された渦の発生周期とほぼ一致する。また Y=40cm においても、Y=15cm の場合と同様な低周波特性を示しており、これは流れ場全体が発生した周期渦によって支配されていることを意味している。

また、周波数 1Hz 以上の高周波数領域では明瞭なピークをもたず、これは発生した周期渦によって誘起された乱れ成分によるものであると考えられる。よってそれら

の境界を 0.5Hz とし、より明確な周期渦の空間的構造を捉えるため、これ以降、得られた流速変動データに 2 秒間の移動平均を施したものをを用いる。

(2) 条件付抽出法による空間構造

本研究では、基準点の位置が測定断面の 10cm 上流にあるため、その抽出データをそのまま用いることは無理がある。そこでまず 2 つの時系列データの位相を揃える処理を施す。

図-6 に、基準点 (X=490, Y=15, Z=2cm) 及び測定断面 (X=500, Y=15, Z=2cm) における u' の移動平均波形を示す。これから、両者の波形はほぼ一致しているが、両者の間には $\Delta t=0.4 \sim 0.5$ 秒程度の位相のずれが見られる。

図-7 に、基準点と測定断面 (Y=15cm, Z=2cm) における u' の相互相関及び基準点と測定断面 (Y=40cm, Z=2cm) における u' の相互相関係数を FFT 法により計算したものを示す。これより、最初のピークにおける Time Lag は 0.48 秒と図-6 の移動平均波形における位相のずれとほぼ一致

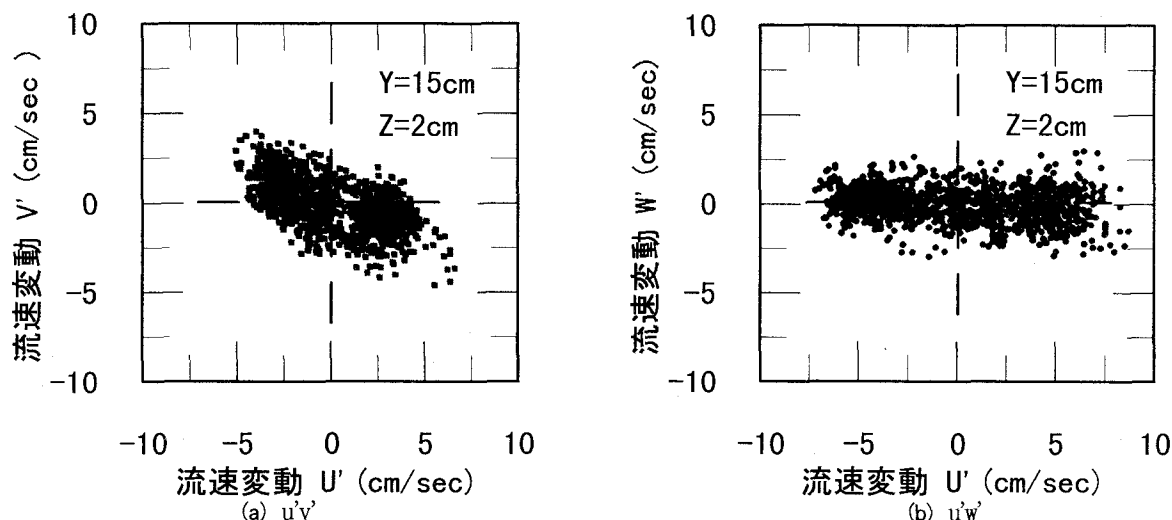


図-8 測定断面(Y=15cm,Z=2cm)における流速変動の4象限分布

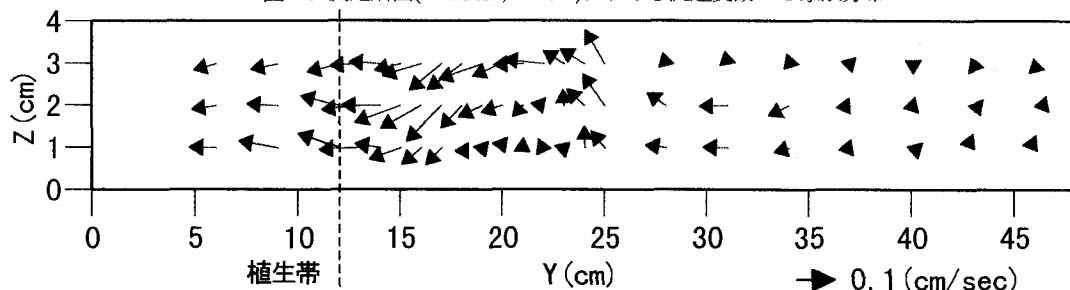


図-9 第4象限(高速水塊の潜り込み)における流速変動ベクトル(v' & w')

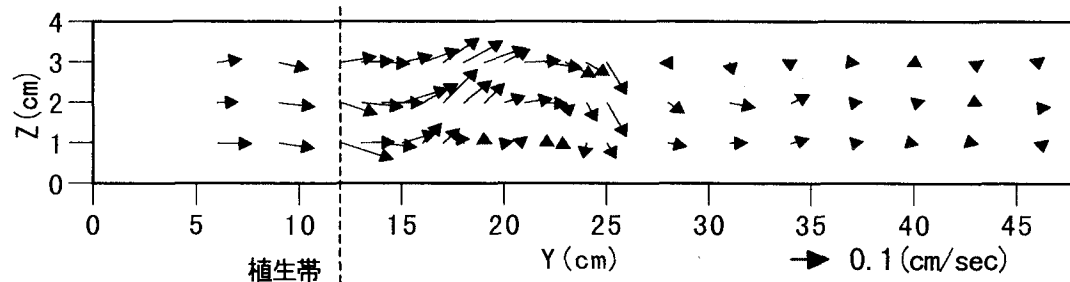


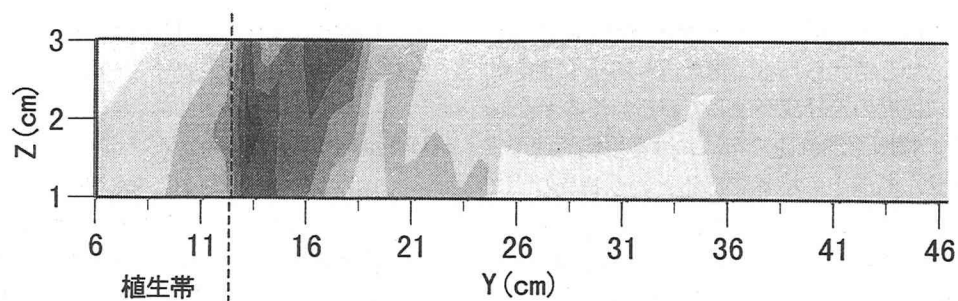
図-10 第2象限(低速水塊の張り出しと上昇流の発生)における流速変動ベクトル(v' & w')

する。また、両者の間隔は 10cm であり、周期渦に伴なう流れの構造は X 方向に約 21cm/sec で移流することが分かる。また、Y=40cm の点においても同様な位置にピークがあり、またその他の点においても同じ傾向が見られたため、周期渦による乱れはほぼ全断面にわたり一定の速度で移流していくと考えられる。よって、両者の間には約 0.5 秒程度の位相のずれがあるので、測定断面の時系列データに 0.5 秒の位相をずらす処理を施す。

図-8(a) (b) に基準点と同位置(YZ 軸に関して)の測定断面(Y=15cm, Z=2cm)における流速変動 $u'v'$ 及び $u'w'$ の 4 象限分布の一例を示す。各象限の総データに対する割合は、(a) は第 1 象限($u' > 0, v' > 0$) 13%, 第 2 象限($u' < 0, v' > 0$) 36%, 第 3 象限($u' < 0, v' < 0$) 12%, 第 4 象限($u' > 0, v' < 0$) 39% であり、(b) は第 1 象限($u' > 0, w' > 0$) 25%, 第 2 象限($u' < 0, w' > 0$) 31%, 第 3 象限($u' < 0, w' < 0$) 17%, 第 4 象限($u' > 0, w' < 0$) 27% である。まず図-8(a)を見ると第 2 象限と第 4 象限に多く分布し、相関が明瞭であるが、図-8(b)を見

ると全ての象限においてほぼ均等に分布しており、若干第 2 象限の割合が大きい。ここで $u'v'$ の 4 象限分布と池田ら^{6), 7)}の可視化実験で捉えられた流況とを併せて考えると、側岸部に植生を配置した流れにおいては、第 4 象限、つまり高速水塊の潜り込み、そして、第 2 象限、つまり低速水塊の張り出しと上昇流の発生との組織的三次元運動に特徴づけられることが分かる。よって条件付抽出の際のしきい値として、それらの特徴をよく示している $u'v'$ の 4 象限分布を適用する。具体的には、基準点における第 2 象限($u' < 0, v' > 0$)あるいは第 4 象限($u' > 0, v' < 0$)の範囲内にあるデータのみを抽出し、0.5 秒の位相をずらす処理を施した同時計測した測定断面のデータに、それぞれの象限において平均することにより、前述の組織的三次元運動を捉える。その結果を次に示す。

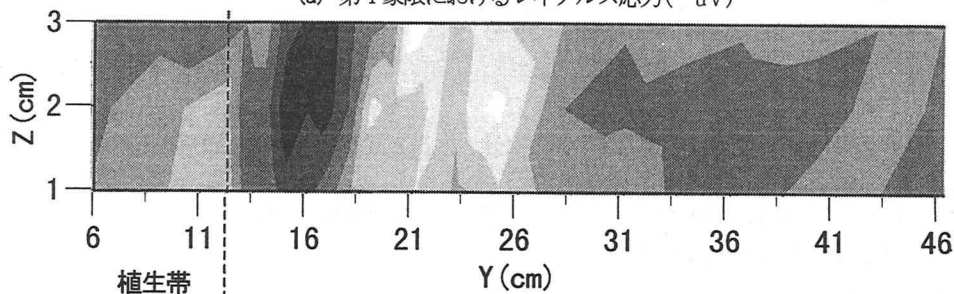
図-9 は第 4 象限(高速水塊の潜り込み)における流速変動ベクトル(v' & w')である。これを見ると、Y=16cm の水面付近で 0.6cm/sec, v' に対して 80%もの強い下降流を



2 1.5 1 0.5 0 -0.5



(a) 第4象限におけるレイノルズ応力($-\overline{u'v'}$)

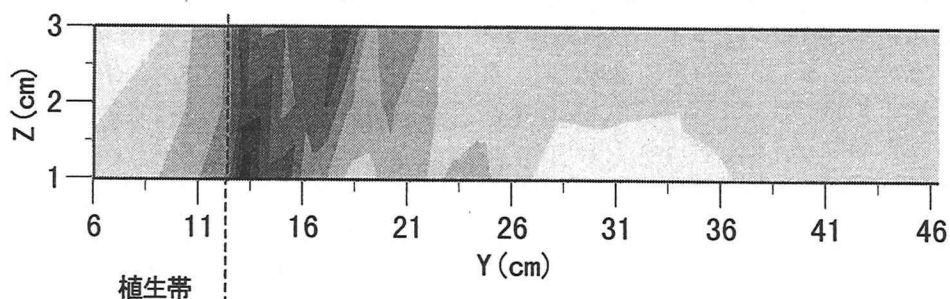


0.4 0.2 0 -0.2 -0.4



(b) 第4象限におけるレイノルズ応力($-\overline{v'w'}$)

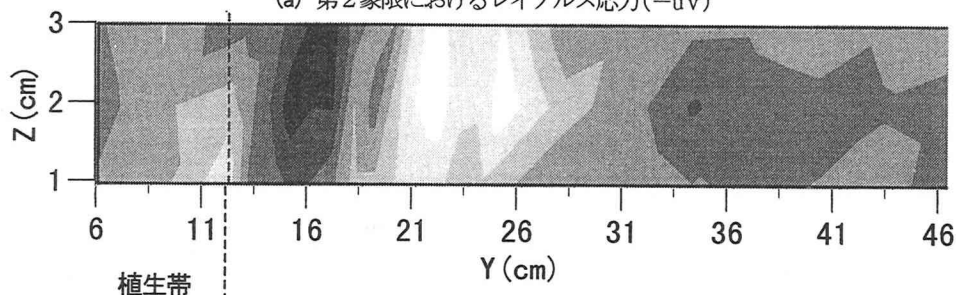
図-11(a), (b) 第4象限(高速水塊の潜り込み)におけるレイノルズ応力($-\overline{u'v'}$ 及び $-\overline{v'w'}$)



2 1.5 1 0.5 0 -0.5



(a) 第2象限におけるレイノルズ応力($-\overline{u'v'}$)



0.4 0.2 0 -0.2 -0.4



(b) 第2象限におけるレイノルズ応力($-\overline{v'w'}$)

図-12(a), (b) 第2象限(低速水塊の張り出しと上昇流の発生)におけるレイノルズ応力($-\overline{u'v'}$ 及び $-\overline{v'w'}$)

示している。このことから、高速水塊は $Y=16\text{cm}$ の水面付近から潜り込むと考えられる。また、 $Y=25\text{cm}$ において先の下降流と同程度の上昇流が生じている。この $Y=25\text{cm}$ の点は、図-2の横断平均流速分布における平均流速が安定する領域とせん断層との境界であるという特異な点であり、ここで何らかの作用により発生したものであると思われる。すると、この上昇流が水面に達し、その方向を変えものが $Y=16\text{cm}$ 付近に示された下降流であり、高速水塊の潜り込みの原因であると予想される。

図-10は第2象限(低速水塊の張り出しと上昇流の発生)の流速変動ベクトル($\vec{v}$ と $\vec{w}$)である。これにおいても、 $Y=16\text{cm}$ において、第4象限で見られたものと同程度の強い上昇流を示しているが、これは低速水塊が植生帯から張り出してくる際にこの付近で強い上昇流を発生させると考えられる。 $Y=25\text{cm}$ 付近でも強い下降流を示しているが、前述したように先の $Y=16\text{cm}$ において発生した上昇流が水面に到達し、下降流となったものと予想される。また、この図-10のベクトル図を反転させれば、ほぼ図-9のベクトル図になる点も非常に興味深い。

図-11(a),(b)は第4象限におけるレイノルズ応力($-\overline{u'v'}$ 及び $-\overline{v'w'}$)のコンターである。これを見ると、(a)では $Y=16\text{cm}$ の水面付近と $Y=13\text{cm}$ の半水深付近で正の極大値を示し、(b)では $Y=16\text{cm}$ の水面から半水深にかけて正の極大値を、 $Y=20\text{cm}$ と $Y=25\text{cm}$ に負の極大値を示している。これは、図-9のベクトル図で述べた高速水塊の潜り込みに対応し、潜り込みの規模の大きさを示している。

図-12(a),(b)は第2象限におけるレイノルズ応力($-\overline{u'v'}$ 及び $-\overline{v'w'}$)のコンターである。(a)では第4象限において示された $Y=16\text{cm}$ の水面付近における正の極大値領域が $Y=18\text{cm}$ の水面付近に移動し、また $Y=13\text{cm}$ の半水深付近における極大値領域が底面付近に移動し、かつその値も大きいものとなっており、(b)においては第4象限の $Y=16\text{cm}$ で見られた正の極大値領域が縮小し、 $Y=20\text{cm}$ と $Y=25\text{cm}$ の負の極大値領域が拡大している。これも同様に図-10のベクトル図とよく対応しており、低速水塊が底面付近から強く張り出してくることを示し、一方 $Y=18\text{cm}$ の水面付近には第4象限における高速水塊の潜り込みの残りが存在していると考えられる。

また、図-11の(a),(b)あるいは図-12の(a),(b)を比べると、(b)のレイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ の方が非常に変化に富んだ分布を示していることから、発生する周期渦は横断方向の運動量輸送あるいは物質輸送だけでなく、水深方向にも活発に貢献し、それは三次元構造の重要な部分を担っていることが分かる。

4. おわりに

本研究は2つプローブを用いた2点間の流速測定を行ない、条件付抽出法により植生境界に生じる周期渦の三

次元構造の平均像を定量的に捉えようとした。その結果を結論としてまとめると、以下のようになる。

- 1) $u'v'$ の4象限分布から、第4象限は高速水塊の潜り込みに、第2象限は低速水塊の張り出しと上昇流の発生に対応し、またそれぞれの象限により抽出された流速変動ベクトル図より、横断平均流速分布における平均流速が安定する領域とせん断層との境界部に、植生帯付近に発生する上昇流と同程度の強い上昇流及び下降流が存在するという新しい構造が明らかになった。
- 2) 条件付抽出法を用いたことにより、従来の主流部からの高速水塊が植生部の低速水塊の下に潜り込み、そして強い上昇流を伴った低速水塊が張り出すといった三次元構造を定量的に把握した。
- 3) u' と v' の4象限分布及びレイノルズ応力分布($-\overline{u'v'}$, $-\overline{v'w'}$)より、その発生が周期渦の三次元構造の重要な部分を担っていることが明らかになった。

以上のように、条件付抽出法により周期渦の三次元構造の定量的な知見を得た。しかし、今回の条件付抽出法は大きな渦構造を捉えたものであり、今後はさらに工夫した条件付抽出法を適用し、時系列的な渦構造の変化を捉え、定量的な模式図などを作成していく必要がある。

参考文献

- 1) 池田・太田・長谷川：側岸部植生境界の周期渦の発生機構，土木学会論文集Ⅱ-18，pp.47-54，1992。
- 2) 福岡・渡辺・津森：樹木群を有する開水路における平面せん断流の構造とその解析，土木学会論文集Ⅱ-27，pp.41-50，1994。
- 3) 八木・小林：植生帯によって引き起こされる浅い水平せん断乱流の基本特性の検討，第52回年次講演会，Ⅱ-360，pp.720-721，1997。
- 4) 富永・八木：植生帯周辺に発生する水平大規模渦の鉛直構造について，第51回年次講演会，Ⅱ-193，pp.386-387，1996。
- 5) 瀬津・鬼束・定免・相良：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，pp.409-414，1998。
- 6) 池田・本村・須賀：側岸部植生境界における組織的乱流運動の三次元構造に関する実験的研究，水工学論文集第42巻，pp.421-426，1998。
- 7) 池田・金成・須賀：側岸部植生境界における組織的乱流運動の三次元構造の発生要因に関する実験的研究，水工学論文集第44巻，pp.789-794，2000。
- 8) 池田・大迫・浅枝・玉井：開水路流れ中の下り斜面上を流下する鉛直渦と上昇流，第19回乱流シンポジウム講演論文集，pp.210-214，1987。

(2000.10.2 受付)