

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

Experimental Study on 3-D Structure of Organized Turbulent Motion
at the Boundary of Bank Vegetation

池田裕一*・本村康高**・須賀堯三***

Hirokazu Ikeda, Yasutaka Motomura, Kyoza Suga

*正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部 建設学科 (〒321栃木県宇都宮市石井町2753)

**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)

***フェロー会員 工博 宇都宮大学教授 工学部 建設学科 (同上)

It is well known that horizontal organized vortices are periodically generated at the boundary between a river flow and bank vegetation. These vortices are caused by instability of lateral free shear layer, which is two-dimensional characteristics of the flow. However, It can be easily predicted that the bottom friction affect these vortices to generate three-dimensional structure. Actually, it was found by flow visualization that a strong upward flow occurs at the boundary between a low speed flow from the vegetated zone and a high speed flow from the main flow, and a rotating motion was observed, whose axes are stretched around the edge of the horizontal vortices. On the contrary, at the center of the vortices, any vertical motion was not observed. Velocity fluctuation measurement was also performed. The lateral profile of turbulent intensity and Reynolds stress showed two kinds of peak. One is caused by the two-dimensional motion of horizontal vortices, and the other is by the three-dimensional structure. Analysis of low frequency component of velocity clarify the locations of the upward flow relative to the horizontal vortices.

Key Words : free shear layer, organized turbulence, horizontal vortices, 3-D structure, upward flow

1. はじめに

河川の側岸部に植生帯が存在する場合、そこでの遅い流れと主流部での速い流れとの境界領域において、組織的な乱流運動が間欠的に発生することが知られている¹⁾。この組織的運動は水平方向に大きく広がり、鉛直方向に軸を持つような渦に見えることから、大規模水平渦などと呼ばれることが多い²⁾³⁾。その発生要因は、横断方向に形成された自由剪断層の変曲点不安定であり¹⁾、主流部と植生帯との横断方向の運動量・質輸送に重要な役割を果たしている。そしてほとんどの場合、こうした二次元的な枠組みの中で扱われる。

しかし、この大規模水平渦は、発生要因こそ二次元的なものの、実河川のように水平スケールに比べ水深の浅い流れでは、河床摩擦の影響によって三次元的な構造を有するものと十分予想できる。そして横断面内の二次流構造や鉛直方向の物質輸送に大き

な影響を及ぼすと思われる。ところが、この三次元構造を直接扱おうとする研究は、これまであまり多く行われていないようである。

最近の研究で、例えば富永・八木³⁾は、水平渦をいくつかの水深ごとに水平断面で区切って、その平面流況を調べている。その結果、水平渦は底面付近では横断方向に大きく張り出す円形を成しており、水面近くで底面摩擦の影響が薄れてくると、流下方向に引き伸ばされた細長い楕円形となることがわかった。そしてこれらの平面流況を水深方向に重ねることにより、水平渦の三次元構造が上部で歪んだ楕円錐になっていると指摘している。しかし、各水深での平面流況から間接的に三次元構造を考えているために、鉛直方向の運動がこの組織渦で果たす役割を直接には明らかにしていない。さらに八木・小林⁴⁾は、水平渦の構造安定性について、水深と底面粗度を変化させた実験を行っている。その結果、底

面からの乱れの影響、つまり底面粗度が重要なパラメータの一つであると結論づけている。また池田ら⁵⁾は、植生境界の乱れ成分により水平渦の三次元構造に低速上昇流(ejection)及び高速下降流(sweep)が生じ、それらが乱れを輸送すると指摘している。しかしこうした流況が、実際水平渦の三次元構造のどの部分に関係するのかは指摘されていない。

そこで本研究ではまず可視化実験を行い、大規模水平渦の鉛直構造を直接捉えることにした。固定した撮影装置での可視化実験では、水深が浅いために特徴的な鉛直流況が細かな乱れでわかりにくくなる⁶⁾。そこで、撮影装置を渦流下速度で移動させることで、比較的鮮明な鉛直構造を捉えようと試みた。次に、流速変動の測定を行い、その簡単な分析から可視化された流況との対応に考察を加えた。

表-1 実験条件

流量(L/sec)	2.6
水深(cm)	4.3
河床勾配	1/1000
疑似植生透過係数(cm/sec)	38
植生内平均流速(cm/sec)	0.9
主流部平均流速(cm/sec)	21.0
水平組織渦発生周期(sec)	5.4

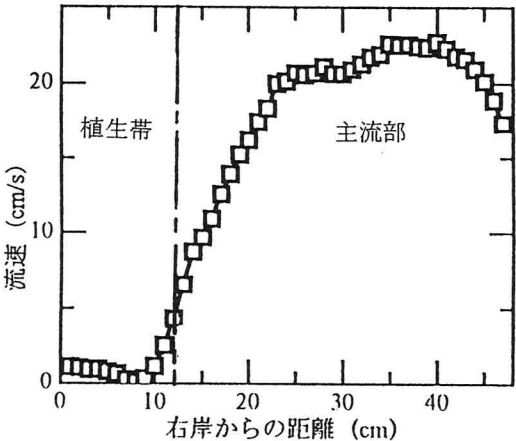


図-1 上流端より 5m 地点の
水深平均横断流速分布

2. 実験装置及び方法

本実験で使用した水路は、全長6.5m、幅48cmの循環式アクリル直線水路である。その右岸側に疑似植生として、幅12cmのプラスチック糸製透水材を設置した。実験条件は表-1の通りである。図-1は、この条件下で計測した水深平均横断流速分布を示したものである⁷⁾。このように十分に自由剪断層が発達した等流状態で、間欠的に発生する大規模水平渦の可視化と流速変動の測定を行った。

図-2は可視化装置の概要を示したものである。この装置は、撮影装置(モータードライブ付きカメラ)、スライドプロジェクタ、台車、これらを動かすアクチュエータ(THK社製)、水路と平行に設置したレールで構成されている。上流端から4.5~5.5mを撮影区間として、水平渦の平面流況を染料で確認しながら、渦の流下速度で可視化装置を移動させた。鉛直断面の可視化にはアルミ粉末懸濁法を用い、上方より幅1cmのスリット光を挿入して、さまざまな断面での流況を側方より観察・撮影した。

流速変動計測には、2成分の電磁流速計(KENEK社製VM-201H改造型)を用い、これに2種類の検出器を接続してそれぞれX,Y両成分とX,Z両成分の流速変動を計測した。計測箇所は、上流端から5m離れた断面内において、半水深(Z=2.1cm)でY方向に47点(1cm間隔)とした。サンプリング条件は、サンプリング間隔0.1sec、サンプリング時間300secである。本来ならば100Hz程度の高周波まで計測すべきであるが電磁流速計の応答が遅いことと、比較的low周波の流況をとらえることが目的であるためこのような条件とした。その代わりに計測時間を長くとり、比較的low周波の流速変動の特徴がよく捉えられるようにした。

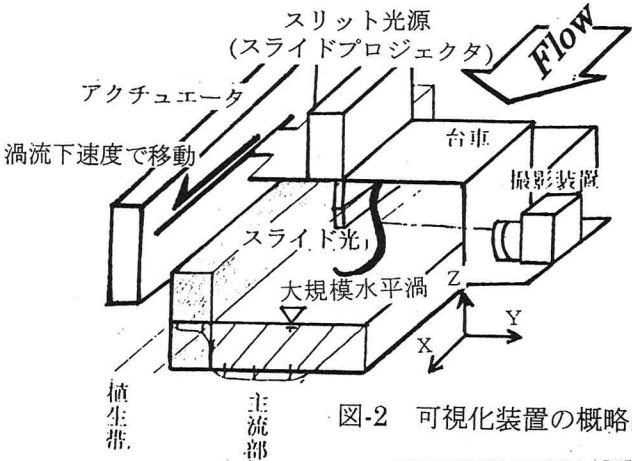


図-2 可視化装置の概略図

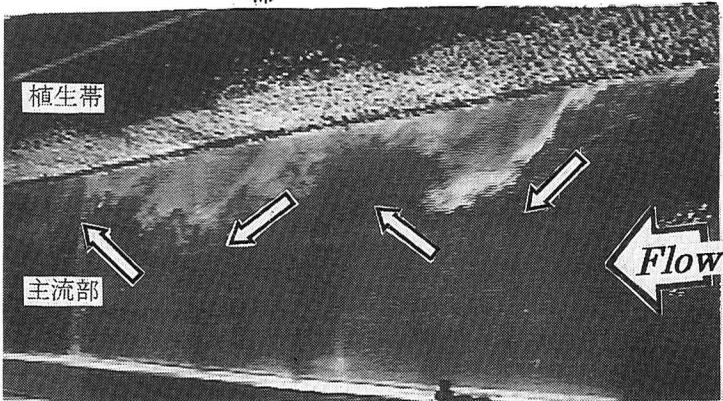


写真-1 植生近傍の横断混合
(斜め上方上流側より撮影)

3. 実験結果及び考察

(A) 移動可視化実験

疑似植生を配した水路に染料を植生内に注入し、全体的な流れを観察すると、写真-1のように植生帯内の低速水塊と主流部の高速水塊とが交互に出入りする様子がみられる。植生内から張り出した低速水

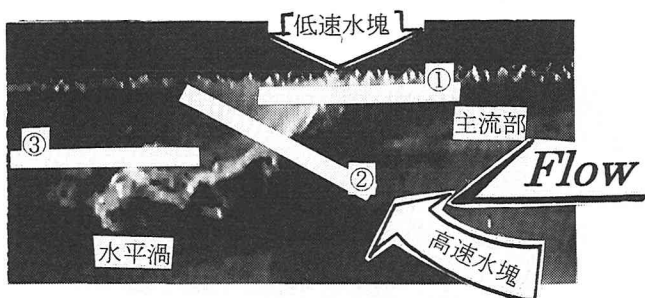
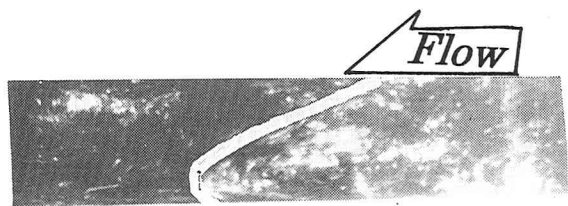


写真-2 平面流況及びスリット挿入位置



(a) 高速水塊先端部の潜り込み

↓ 2.2 秒



(b) 先端部からの上昇流発生

↓ 2.2 秒



(c) 上昇流の分岐・拡大と押し出し

写真-3 植生近傍の縦断面流況(①断面)

塊が植生境界に漸近してきた高速水塊と自由剪断層で接触し大規模水平渦を形成させ、渦半径を拡大させながら流下していく。写真-2は、水平渦が発生・拡大していく平面流況を植生境界近傍で捉えたものである。本実験において、写真-2上に示した3つの鉛直断面について可視化を行った。

①：植生境界に沿った縦断面 (Y=13cm)

植生内の低速水塊が大規模水平渦の一部として張り出そうとする縦断面流況。固定撮影装置からの可視化⁷⁾では、この位置で強い上昇流の発生が確認されている。

②：植生境界面より30° 傾けた断面

植生帯からの低速水塊と、主流部からの高速水塊が最も強く接していると思われる断面。この断面付近で植生境界に漸近してきた高速水塊の多くが流向を植生側から主流側へ変化させている。

③：植生境界面から10cm離れた縦断面 (Y=22cm)

大規模水平渦の中心部の縦断面流況。染料や固定撮影装置からの可視化では、流況が捉えられなかった断面。

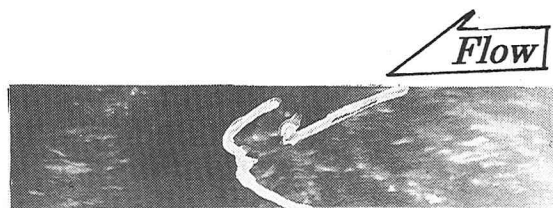


写真-4 水平渦周縁部の断面流況(②断面)

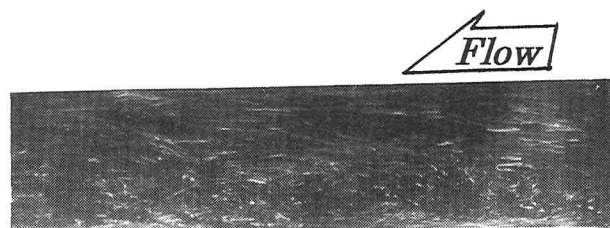


写真-5 水平渦中心部の縦断面流況(③断面)

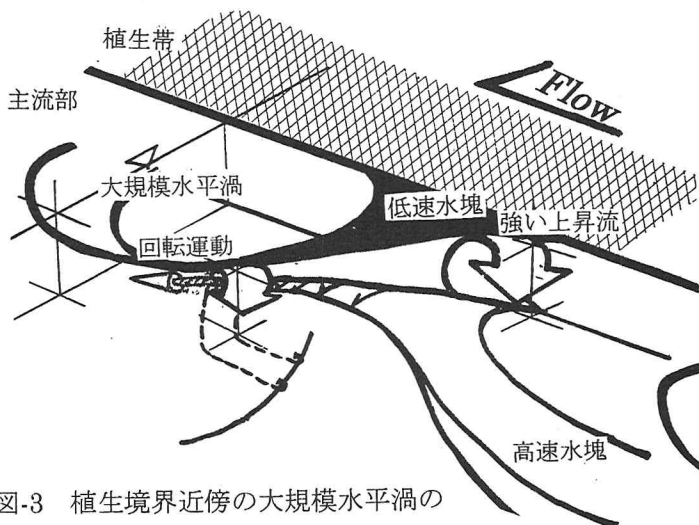


図-3 植生境界近傍の大規模水平渦の三次元構造の模式図

写真-3は、写真-2の①断面を渦流下速度で移動しながら連続撮影したものである。植生境界近傍における三次元流況の大きな特徴として、強い上昇流が発生しているのがわかる。

写真-3(a)では、植生部から張り出す低速水塊(写真上の暗部)の下部に、主流部からの高速水塊(写真上の強く乱れた明部)が潜り込む流況を示している。底面寄りに潜り込む高速水塊は、水深1/3付近を先端とする楔型を形成している⁸⁾。このような流況になる理由として、大規模水平渦の回転による遠心力が底面摩擦で弱まるために、遠心力と圧力勾配のバランスが崩れ、底面付近で水平渦の内側に向かうような圧力勾配が生じることがあげられる⁹⁾。また、高速水塊の侵入によって底面付近の乱れが増大すること、この上昇流発生要因の一つと考えられる。

いずれにせよ、この可視化実験によって大規模水平渦に伴って強い上昇流が生じており、それが水平渦の回転軸に沿うものではなく、植生内の低速水塊と主流部の高速水塊が接する部分で発生していることは明らかである。

写真-3(b)では、楔部分の先端が一瞬波打った後、

強い上昇流を発生させている。さらに(c)では、発達した上昇流が水面付近で分岐した後、それを高速水塊が水深全般にわたって押し流すような流況が見られた。(c)以降は、高速水塊が水深全体に乱れ、再び(a)の状態に変化する流況が確認されている。

写真-4は、写真-2の②断面を渦流下速度で移動しながら観察した流況である。①断面と同様に楔型に入り込む流れが生じており、その先端から上昇流が発生している。ただし①断面と比べると、高速水塊の貫入位置がやや高く、流向がはっきり表れない。

この部分では、①断面で低速水塊の下部に入りきれなかった高速流が、水平渦の周縁部に沿って回り込みながら、①断面と同様な流況を示すものといえる。その際、流線が彎曲するので、連続彎曲部と同様に新しい二次流セルが底面付近から発達し¹⁰⁾、貫入位置が上側にずれるのではないかと推察される。

またこの貫入する流れの上側では、写真-3(c)に見られるように、上昇流が水面で分岐し、それが楔状に貫入する流れによって再び下方に引きずられるために、回転運動が形成されている。その回転軸は、主流部に向かう高速流によって引き伸ばされるために、主流側ほど軸は流下方向に向き、かつ回転が強くなる(図-3参照)。したがって、大規模水平渦の主流側の周縁部では、横断方向および鉛直方向の流速変動が大きくなるものと予想される。

写真-5は、大規模水平渦の中心付近の流況を捉えたものである。渦中心部では流況が流れの方向に2つの部分にはっきり分けられる。底面付近の乱れが強く強調される部分と、鉛直変動がほとんどない部分である。この渦中心部の流れの構造は、時間的にはほとんど変化せず水平渦とともに流下するようである。

以上の可視化結果より推察される、大規模水平渦の三次元構造を模式的に図-3に示す。特に高速水塊がその横断位置によって異なる水深で接している流況を示している。

(B) 流速変動特性

次に、可視化で捉えた流況を確かめるために、流速変動を計測した。前にも述べたが電磁流速計の応答速度が遅いために高周波の変動成分は十分に捉えられない。しかし今回は、比較的低周波の特徴的な流況をとらえることが目的であるため、高周波成分のとりこぼしはある程度やむを得ないものとして、分析を進めることにする。

図-4は、半水深における平均統計量の横断分布を示したものである。平面流況において、 $\overline{u'^2}$ のピーク位置が $Y=15\text{cm}$ (植生境界より3cm)付近に存在している。これは植生境界に沿った縦断面を可視化した際に見られた、 u' の大きい主流部からの高速水塊と u' の小さい植生帯からの低速水塊が交互に流れる流況に対応している。この縦断面流況は、平面的な横断混合流況とも対応しており、この $\overline{u'^2}$ のピーク位置付近で自由剪断層の変曲点不安定が生じている

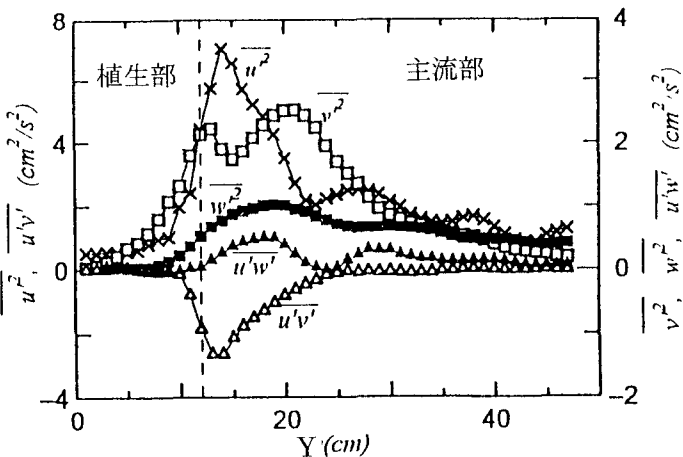


図-4 半水深における平均統計量の横断分布

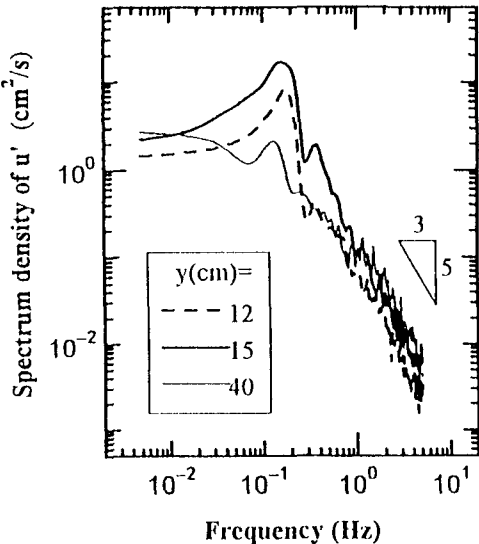


図-5 主流速変動 u' のスペクトル

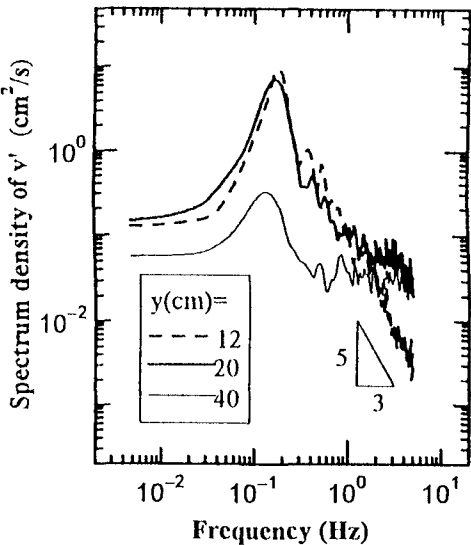


図-6 横断流速変動 v' のスペクトル

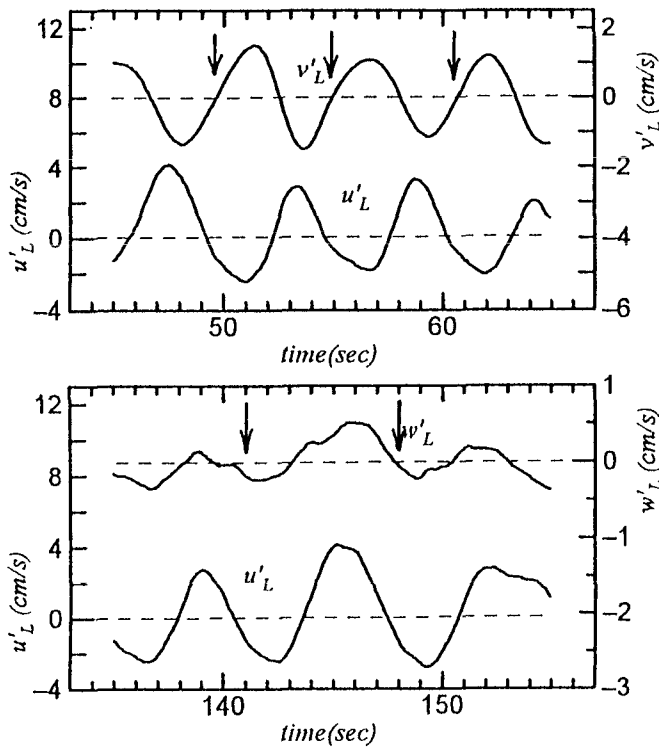


図-7 流速変動成分の移動平均波形
(Y=15)

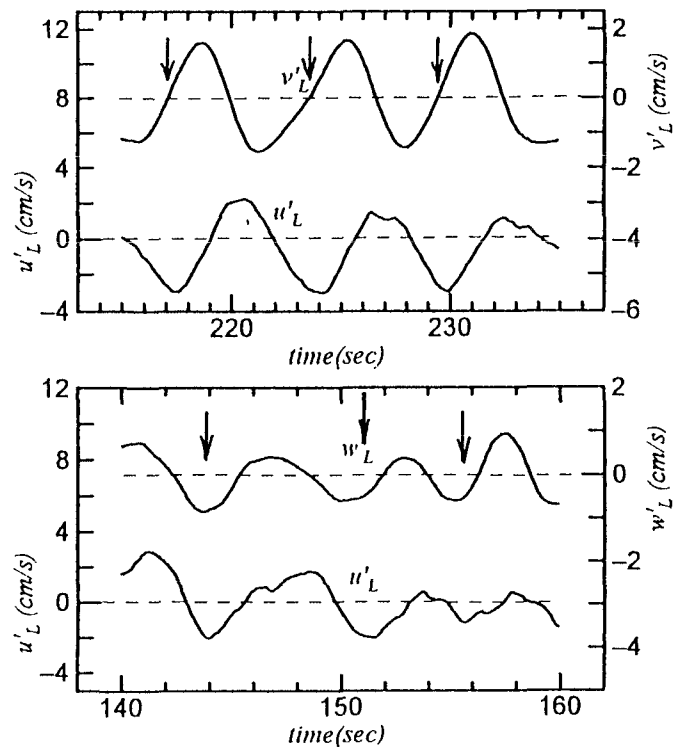


図-8 流速変動成分の移動平均波形
(Y=20)

ものと考えられる。このY=15cm付近では、 $\overline{v'^2}$ と $\overline{u'v'}$ もピークを示している。 $\overline{v'^2}$ のピークは、植生近傍から低速水塊が大規模水平渦として活発に流れ出る流況に対応している。 $\overline{u'v'}$ の負のピークはすなわちこうした平面的な混合で生ずる運動量輸送が、水平渦の中心通過点付近で最大に出ることを示している。

また $\overline{v'^2}$ には、Y=20cm付近に、もう一つピークが現れている。これには、 $\overline{w'^2}$ と $\overline{u'w'}$ のピークも対応している。 $\overline{v'^2}$ は渦中心と同程度、 $\overline{w'^2}$ は主流部の2倍程度の流速変動を示しており、運動量輸送量の $\overline{u'w'}$ の絶対値は主流部に比べて極めて大きい。図-1の流速分布を見ると、このY=20cm付近がちょうど自由剪断層の縁に当たっている。先に可視化実験において、大規模水平渦の周縁部に三次元的な回転運動が生じていることを述べた。この回転運動の影響が非常に大きいことがわかる。

図-5は、半水深における u' の時系列データのスペクトルである。計測点は、植生境界(Y=12cm)と $\overline{u'^2}$ が最大となる付近(Y=15cm)、境界部から離れた位置(Y=40cm)の3点である。可視化で特徴的な流況が捉えられた剪断層領域内のy=12、15cmでのスペクトルの周波数ピーク位置は約 $f=0.19\text{Hz}$ 、つまりピーク周波数を持つ波動の周期が約5.3secとなり、可視化実験の際に目視で計った水平渦通過周期とほぼ一致している。計測された3点を比べると最も植生より離れたY=40cmの点においてさえも、約 $f=0.2\text{Hz}$ のピークを持つ流れが影響していることがわかる。これは大規模水平渦の影響が水路幅一杯に及ぶことを

表している。

また1Hzよりも高周波領域では、どの計測点でも同様な傾向となっており、大規模水平渦にあまり関係の少ない高周波の乱れ成分によるものと考えられる。水平渦の影響が少ないY=40cmと、影響が大きい他の位置とを比べると、0.4~1Hzあたりに低周波と高周波との境界があると考えられる。

図-6は、半水深における v' の時系列データのスペクトルである。計測点は、植生境界(Y=12cm)と $\overline{v'^2}$ が最大となる付近(Y=20cm)、境界部から離れた位置(Y=40cm)の3点である。 v' 成分スペクトルについても図-5と同様な傾向を見ることができる。

以上より今回の実験では、大規模水平渦に伴う低周波と局所的な高周波との境界は、周期にしておおよそ2秒程度といえる。そこで水平渦に伴うスケールの運動をより明確にするために、実際の流速変動に2秒間の移動平均を施した。その結果を図-7、図-8に示す。

図-7は、 u' が最大となるY=15cmでの流速変動成分の移動平均波形を示したものである(この位置は大規模水平渦の中心が通過すると思われる)。 u' と v' の対応関係を見ると、可視化での平面流況と整合性がとれているのがわかる。すなわち、植生帯から低速水塊が出てくる場合は、 v' はプラス、 u' はマイナス方向に変動する。高速水塊が植生帯に入る場合は逆となっている。

またいわゆる渦の中心は、横断方向の流れの向きが、植生側から主流側への変化する点、つまり v' がマイナスからプラスに変わるところといえる。この

意味での渦中心が通過するおおよそのタイミングを、図中の矢印で示した。 u' と w' との対応関係を見ると、高速水塊が入り込むときに上昇流が発生していることがわかる。また、上昇流が発生するタイミングは渦中心の通過には対応していない。渦中心が通過する1/4周期程度前に、すでに上昇流は生じており、中心通過時にはむしろ下降流のフェイズに入ろうとしている。

図-8は、 $Y=20\text{cm}$ における流速変動成分の移動平均波形を示したものである。ここは、大規模水平渦の主流側の縁が通過する位置といえる。 u' と w' との対応関係は、 $Y=15\text{cm}$ の場合と同様であるのに対して、 u' と w' との対応にずれが生じているのがわかる。それゆえに、 v' が多少大きく変動しているにもかかわらず、運動量輸送を示す $\overline{u'v'}$ の絶対値は大きくならない。また u' は多少小さくなっているはずだが、 w' の増加の影響の方が大きく、結果として $\overline{u'w'}$ の値が大きくなっている。

ところで石川ら¹¹⁾の条件付き抽出法の結果を見ると、 v' の変動が $Y=15\text{cm}$ と 20cm で同位相だとするのは、あながち無理な仮定でもなさそうである。すると図-7と図-8を比べることにより、上昇流の発生位置が横断方向で変化していることがわかる。すなわち、 $Y=15\text{cm}$ では渦中心通過位置時から3/4周期遅れて上昇流が発生していたのが、 $Y=20\text{cm}$ では約1/2周期の遅れとなっている。これは、上昇流の発生位置が主流部側ほど流下方向にあることを示しており、可視化実験で見られた流況(図-3)に一致するものである。

5. 結論

側岸部植生境界に生じる大規模水平渦について、その三次元構造を可視化と流速波形測定によって検討した結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 植生からの低速水塊と主流部からの高速水塊が接するところで、強い上昇流が生じている。
- 2) この上昇流は、高速水塊が大規模水平渦の周縁を回り込む際にも生じており、これが周縁部に沿って伸びる軸周りの回転運動を形成している。
- 3) 大規模水平渦の中心部の流況は、底面からの乱れが強い層と鉛直変化がほとんどない層の二層から形成され、時間的構造の変化がない。
- 4) 流速の乱れ強度やレイノルズ応力には、横断方向変化に2種類のピークがあり、それぞれ大規模水平渦の平面的な挙動と、上昇流に伴う三次元構造とに対応している。
- 5) 流速変動成分の移動平均波形からも、渦中心で上昇流が発生しているのではないことが確

認できた。また上昇流の発生位置が横断方向に変化することについても、可視化による観察結果を流速波形の分析から裏付けることができた。

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) 池田・空閑：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Ⅱ-30、pp. 131-171. 1995
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 池田・金沢・太田：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Ⅱ-31、33-43. 1995
- 6) 池田・本村・須賀：側岸部植生境界に生じる大規模水平渦の三次元構造の可視化、第1回環境流体シンポジウム講演会論文集、pp. 395-396. 1996
- 7) 池田・本村・須賀：側岸部植生境界の水平渦に伴って生じる上昇流の可視化、第52回年次講演会Ⅱ-58、pp. 220-221. 1997
- 8) 長谷川・浅井・金高・馬場：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. 379-384. 1997
- 9) Boundary-Layer Theory : Schlichting、pp. 225-230. 1979
- 10) 玉井・池内・山崎：連続彎曲水路における流れの実験的研究、土木学会論文集第331号、pp. 83-94. 1983
- 11) 石川・高橋・細井：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

(1997. 9. 30受付)