

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

EXPERIMENTAL STUDY ON GENERATION FACTOR OF 3-D STRUCTURE IN ORGANIZED
TURBULENT MOTION AT THE BOUNDARY OF BANK VEGETATION

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)

Comparative experiments were performed to examine generation factor of three dimensional structure in periodical large vortices at the boundary between a river flow and vegetation zone along the river. The first comparative experiment showed that the existence of the large vortices itself is most dominant factor rather than the effect of vegetation. The second one indicates that the important mechanism lies in the movement over the depth, not in the turbulence near the bed. And measurement of velocity fluctuations revealed that a strong upward flow is generated slightly behind the center of the vortex.

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

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も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。池田ら⁵⁾は、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た。また、瀬津ら⁶⁾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、これらの研究は三次元構造のうわべの現象を詳細に検討するものばかりで発生要因や発生機構に強く依存したものは皆無である。

発生要因の候補としてはいくつかのものが考えられる。まず根本的な要因としては①主流部の高速水塊が植生部に入り込む際に植生が抵抗として作用すること、②周期渦自身と底面との相互作用で上昇流が発生すること、次に発生機構のスケールとしては③底面付近の乱れの作用、④水深スケールに及ぶ流れのメカニズム、などである。

そこで、本研究はこれらの項目を比較実験で対照することにより、周期渦の三次元構造の発生要因を直接つきとめ、この分野の発展の方向づけを行おうとしたものである。

表-1 実験条件

Case 名	A1	A2	A3	B1	B3
河床勾配	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000
水路幅 B	48	48	48	48	48
植生幅 B _v (cm)	12	12	—	12	—
植生透過係数 K (m/sec)	0.38	0.38	—	0.38	—
動粘性係数 ν (cSt)	1.0	1.0	1.0	5.4	5.5
流量 Q (cm ³ /sec)	2900	2900	2900	1800	1550
水深 H (cm)	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
代表流速 U (cm/sec)	23.0	23.0	23.0	12.0	8.5
レイノルズ数 UH/ν	9660	9660	9660	933	650
フルード数 $U/\sqrt{gH}$	0.36	0.36	0.36	0.19	0.13
渦発生周期 (sec)	6.4	6.4	8.2	9.6	6.1

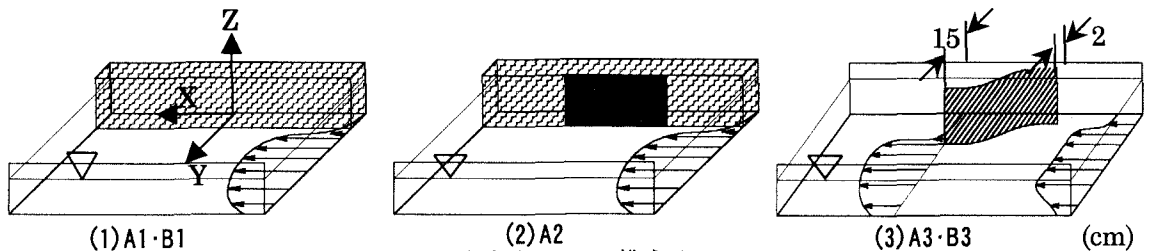
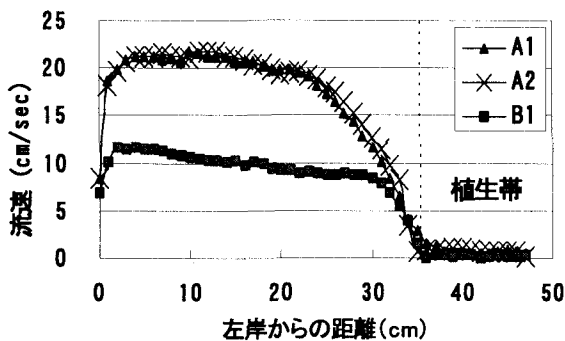
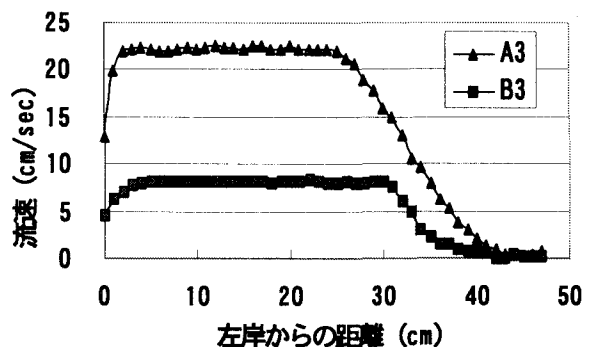


図-1 各実験ケースの模式図



(1) A1・A2・B1



(2) A3・B3

図-2 上流端から 4.5m 点・水深 2.0cm 点の平均横断流速分布

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、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 のプラスチック糸製透水材を設置した。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。

発生要因の検討には、次のように 3 段階の比較実験を行うことにした。

(1) 可視化 A シリーズ

ここでは、まず周期渦の三次元構造の発生要因を特定するために、①植生帯の遮蔽効果と②周期渦自身と底面との相互作用の 2 つを比較することにする。①は、主流

部の高速水塊が植生部に入り込む際に植生が抵抗として作用する結果、三次元構造が現れる可能性を、②は、固定壁上に回転流が存在すると、境界層の影響により上昇流が発生する^{7) 8)} 可能性を意味している。このシリーズでは 3 ケースの比較を行う。すなわち、A1 は水路の右岸側に疑似植生帯を設置したケース、A2 は A1 の植生帯の側方に長さ 60cm の固定壁(アクリル製)を取り付け、植生帯の固定壁効果を強めたケース、A3 は植生帯を取り除き、ガイド板を設置することで流れに流速差をつけ、渦を発生させたケースである(図-1)。

(2) 可視化 B シリーズ

ここでは、周期渦と三次元構造を結びつける支配要因を特定する。そこで、その比較する支配要因を③底面付近の乱れの作用④水深スケールに及ぶ流れのメカニズムとし、両者について比較検討した。そのために、粘性が高いグリセリン水溶液を用い、さらに水路上部にハニ

カム状の整流装置を設置することにより底面付近の乱れを抑え、A1及びA3と同じ装置を用いた(図-1)。

(3) 流速変動測定

最後に生成方法の異なる渦を比較したことの妥当性を検討するために流速変動測定を行った。

各シリーズでの実験方法は以下の通りである。A・B両シリーズでの可視化実験は、上流端から4～5mを観測区間とし、まず水平せん断層に染料を注入することで平面流況を観察し、周期的に発生する水平渦を確認・撮影した。さらに、アルミ粉末懸濁法を用い、水路上方より幅1.5cmのスリット光を照射して、鉛直断面の流況を水路側方より観察・撮影した。

また、流速変動測定には2成分の電磁流速計を用い、これに2種類の検出器(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。粘性の測定にはウペローデ粘度計を用いた。

各実験ケースの条件は、表-1の通りである。ここで示す代表流速は主流部の時間平均最大流速であり、発生周期は可視化で得られた値である。図-2に平均横断流速分布を示す。これより、全てのケースで自由せん断層の形成が確認できる。

3. 実験結果及び考察

(1) 可視化Aシリーズ

疑似植生帯内及びガイド板下流端に染料を注入したところ、3ケースとも写真-1のような横断方向に張り出す渦が周期的に発生していることが確認できた。A1は植生内から張り出した低速水塊が主流部からの高速水塊と自由せん断層で接触し大規模な渦を形成し、渦半径を拡大させながら流下していく。A2では植生帯側方に設置した固定壁の上流部で張り出した低速水塊がA1と同じ過程で渦を形成し、流下していく。A3では植生帯を配置したケースと比べ、渦の張り出し幅が狭くなっていた、これはA1とA2に比べて自由せん断層の形成が発達途中でその幅が狭いためである。そうした相違はあるものの渦の形成過程は植生帯を配置したケースと同じであった。

写真-2～写真-4は、自由せん断層の鉛直断面流況を左岸側方より撮影したものである。Aシリーズの全てのケースにおいて、池田ら⁵⁾が示したものと同様に高速水塊の潜り込み・上昇流の発生が捉えられている。これより、植生帯の有無に関わらず、流れに平面的な渦が存在すれば高速水塊が潜り込み、上昇流が発生するという三次元構造が発生するといえる。

また、A2はA1と比べ、上昇流及びその発生により

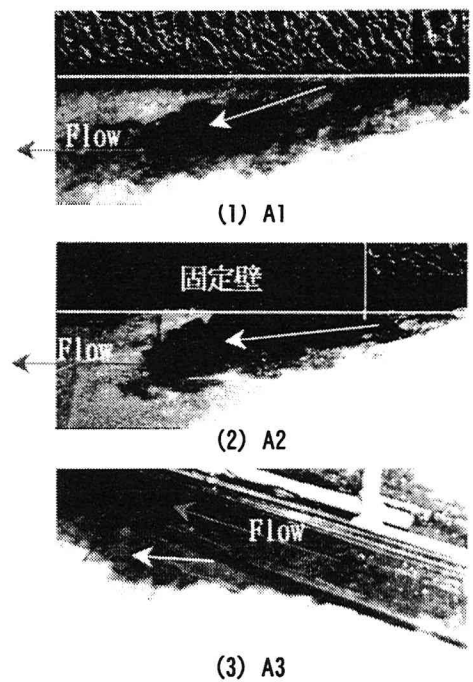
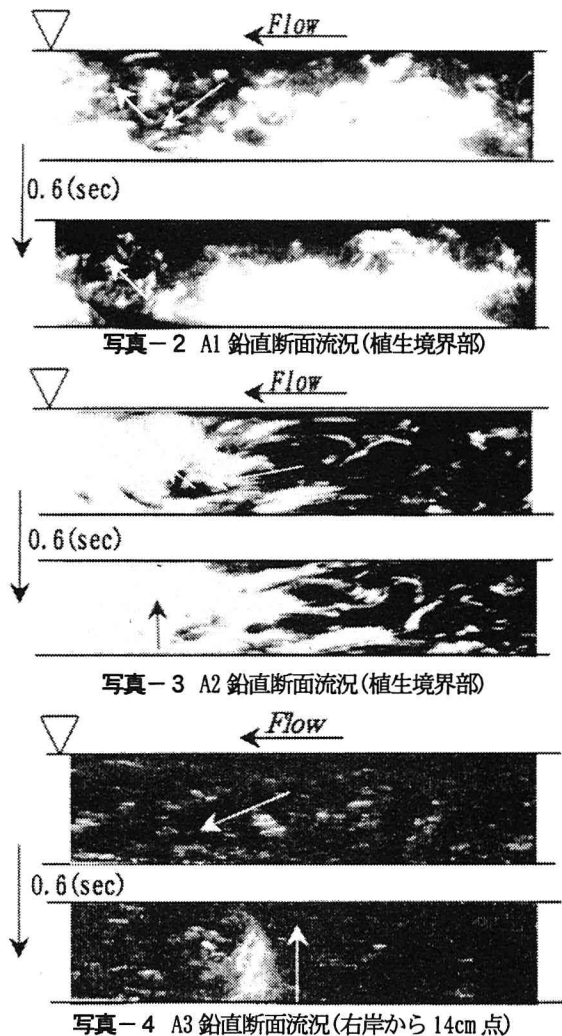


写真-1 Aシリーズの平面流況



誘起される乱れが際立っている。これは A1 では上昇流の一部が植生帯内に流入していくが、A2 では固定壁の存在によりそれが阻害され、阻害された分だけ A1 よりも上昇流及び誘起される乱れが強まると考えられる。つまり、植生帯を固定壁状に密にすれば上昇流が強まるが、そのこと自体が発生要因ではなく、むしろ補助的な要因であるといえる。また A3 は A1 と比べ、鉛直に軸をもつ竜巻状のより明確な上昇流が捉えられている。これは植生帯の様な空間的制約がないため、より自然な形で上昇流が発生しているものと考えられる。

以上、A シリーズの比較実験より、三次元構造の発生要因には周期渦自体の存在が支配的であり、植生帯の遮蔽効果が大きいとより顕著になることがわかった。

(2) 可視化 B シリーズ

A シリーズ同様に、疑似植生帯内及びガイド板下流端に染料を注入し、全体的な流れを観察すると写真-5 のような横断方向に張り出す水平渦が見られ、それが周期的に発生している。B1 は、図-2 の平均横断流速分布が示すように自由せん断層の幅が狭いため、渦の張り出し幅が A1 と比べ狭くなっている。B3 についても自由せん断層の幅が狭いため、A3 と比べて張り出し幅が狭くなっている。

写真-6 は主流部の鉛直断面流況を左岸側方より撮影したものである。これを見ると流れはほぼ層流状態で底面付近の乱れがよく抑えられていることがわかる。

写真-7・写真-8 は、自由せん断層の鉛直断面流況を左岸側方より撮影したものである。B シリーズにおいても、高速水塊の潜り込み・上昇流の発生が捉えられた。しかも A シリーズに比べ、底面付近の乱れが抑えられ、より明確な流向が確認できた。

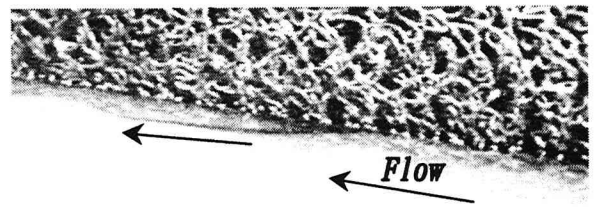
B1 はまず斜め下方に向かう複数の流線が、底面付近まで伸び(写真-7 上)、そして、その先端部が斜め上方に流向を変化させている。またそれに従うようにその後方でも斜め上方に向かう複数の流線が捉えられている(写真-7 下)。

B3 は、B1 の上昇流と比べ、その形が異なり竜巻状の上昇流が見られ(写真-8)、そしてその形を徐々に崩しながら流下していく。これは、A3 と同様に植生帯の空間的制約がないためのものであると考えられる。B3 の可視化で捉えられた竜巻状の上昇流の拡大写真とその模式図を写真-9 と図-3 に示す。

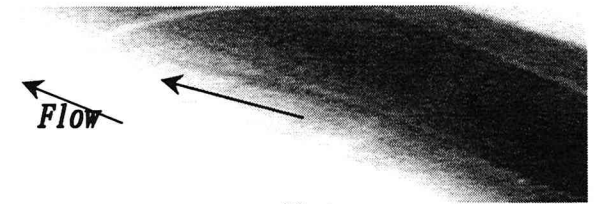
以上のグリセリン水溶液を流体として使用した B シリーズの可視化結果より、上昇流発生 of 支配要因は、バースティングのような底面付近の乱れ的作用ではなく、水深スケールに及ぶ流れ全体の作用によるものであると推測される。

(3) 流速変動測定

最後に、流速変動波形から渦の三次元構造を比較し、生成方法の異なる渦を比較したことの妥当性を検討する。ここでは代表して A1 及び A3 の流速変動の移動平均波

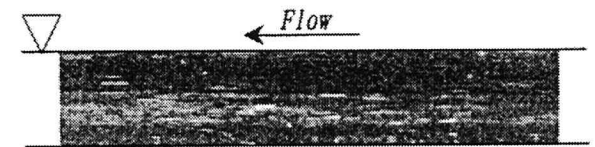


(1)B1



(2)B3

写真-5 B シリーズの平面流況

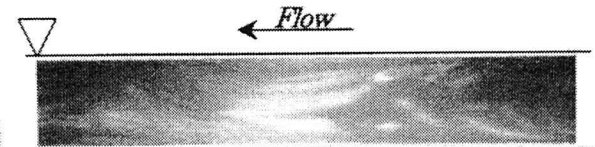


(1)B1 (右岸から 43cm 点)



(2)B3 (右岸から 33cm 点)

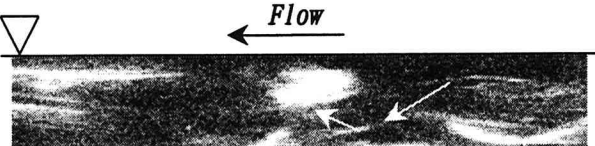
写真-6 B シリーズ鉛直断面流況



0.6 (sec)



写真-7 B1 (植生境界部)



0.6 (sec)

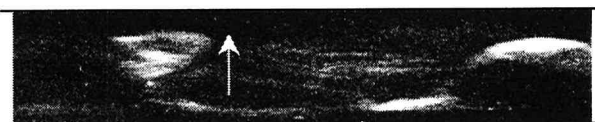


写真-8 B3 (右岸から 14cm 点)

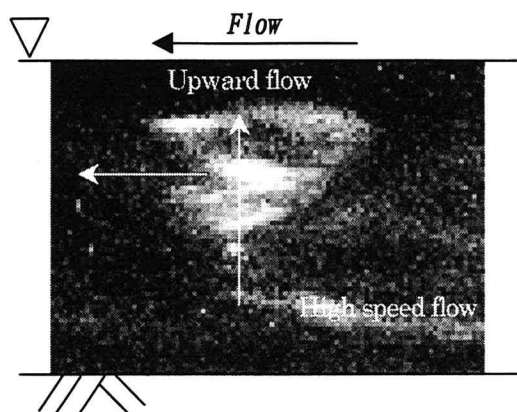


写真-9 B3における上昇流

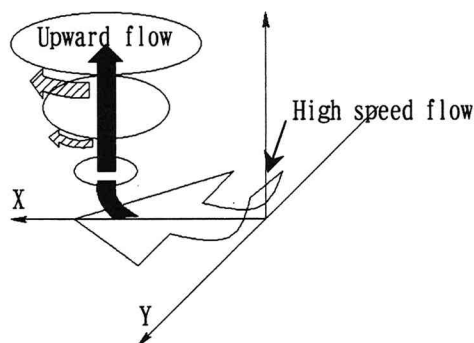


図-3 B3における上昇流の模式図

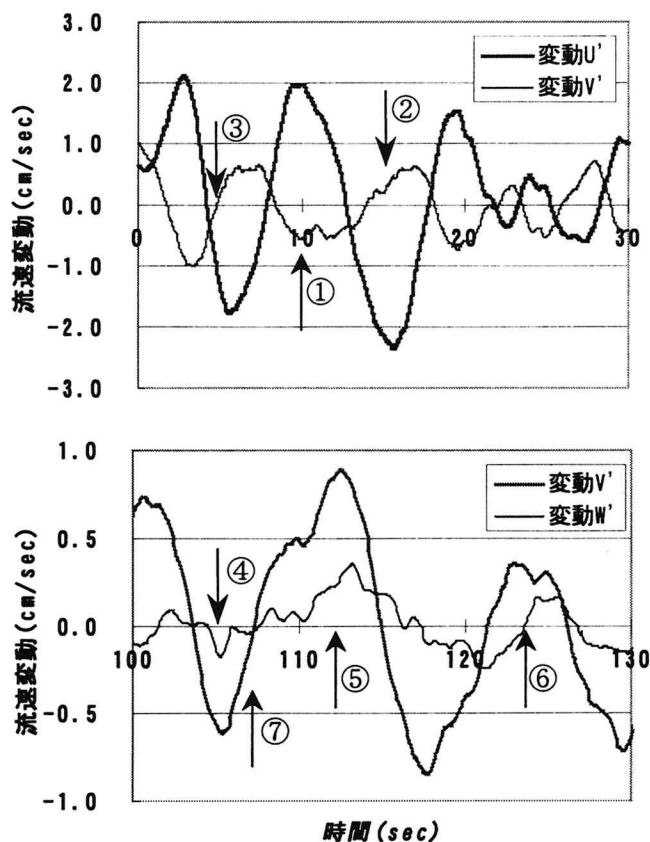


図-4 流速変動の移動平均波形(A1)

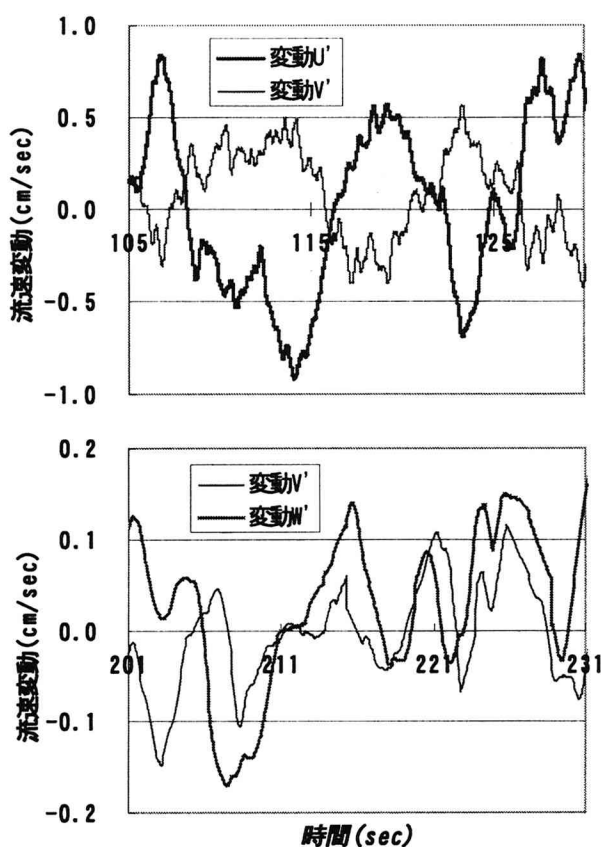


図-5 流速変動の移動平均波形(A3)

形を示す。また、変動波形箇所は可視化で捉えられた断面内(A1：植生境界部、B3：右岸から14cm点)の半水深点($Z=2.0\text{cm}$)である。

まず、図-4にA1の流速変動の移動平均波形を示す。 u' と v' の対応関係を見ると、可視化実験で捉えられた平面流況と整合性がとれているのが分かる。すなわち、主流部からの高速水塊が植生帯に入り込む場合は、 v' はマイナス、 u' はプラスの変動を示し(図中の矢印①)、植生帯から低速水塊が張り出す場合は、その逆を示す(図中の矢印②)。また、渦中心部は横断方向の流れ、つまり v' がマイナスからプラスに変化する点(図中の矢印③)で

あり、それらの間隔を見ると約7～9秒であり、可視化実験における水平渦の発生周期とほぼ一致している(表-1)。次に v' と w' の対応関係を見ると、これも可視化実験で捉えられた鉛直断面流況と整合性がとれている。すなわち、 v' がマイナス側に最も高い値を示すとき、 w' も同様にマイナス側に高い値を示し(図中の矢印④)、そこから数秒後の w' が逆にプラス側に高い値を示している(図中の矢印⑤)。これは主流部から植生帯へ向かう流れが下降し、そこから数秒後に強い上昇流が発生していることであり、高速水塊の潜り込みと上昇流の発生を意味している。逆に v' がプラスのとき、 w' もプラスを示し(図

中の矢印⑥)、これは植生帯から主流部へ向かう流れが上昇していることであり、水平渦が上昇流を伴って流下していることを意味している。また、渦中心部(図中の矢印⑦)が通過する約 1/4 周期後に上昇流が発生している。

図-5に A3 の流速変動の移動平均波形を示す。これも A1 同様、 u' と v' の対応関係を見ると、主流部からの高速水塊が自由せん断層内に入り込む場合、 v' はマイナス、 u' はプラスの変動を示し、主流部から低速水塊が張り出す場合、その逆を示し、可視化実験で捉えられた平面流況と整合性がとれている。 v' と w' の対応関係も同様に、 v' がマイナスのとき、 w' もマイナスを示している。これは主流部から自由せん断層へ向かう流れが下降していることであり、高速水塊の潜り込みを意味する。逆に v' がプラスのとき、 w' もプラスを示し、これは自由せん断層から主流部へ向かう流れが上昇していることであり、水平渦が上昇流を伴って流下していることを意味し、可視化実験で捉えられた鉛直断面流況と一致している。また、A3 の流速変動の移動平均波形は A1 のものと比べ、波形が若干不安定なものとなっているが、これは前述したように A3 における渦が張り出し幅が狭く、波長が長いものであり、1つの渦が流下している間に次の渦が張り出してくることが原因であると考えられる。

以上より、流速変動波形から生成方法の異なる渦の三次元構造を比較すると、A1 及び A3 とその波形は類似したものであることから、両者を比較したことの妥当性が確認された。また、可視化結果と整合性がとれていることも確認された。

4. おわりに

本研究は比較実験において側岸部植生境界に生じる水平渦の三次元構造とその発生要因を可視化と流速変動測定によって検討した結果を結論としてまとめると、以下のようなになる。

1) ①植生帯の遮蔽効果と②渦自体の存在とを比較した結果、植生帯の有無に関わらず上昇流が発生したことから三次元構造の発生要因は渦自体の存在である。また、植生帯の遮蔽性を強めた結果、上昇流及びその発生により誘起される乱れが際立ったため、植生帯は上昇流を強める効果を有す補助的な要因である。

- 2) ③底面付近の乱れの作用と④水深スケールに及ぶ流れのメカニズムとを比較した結果、底面付近の乱れがなくても上昇流が発生したことから三次元構造の発生において、水深スケールに及ぶ流れのメカニズムが支配要因である。
- 3) 比較実験において異なる生成方法による渦を比較したが、両者の流速変動波形から推測される三次元構造は同様なものであった。したがって、比較したことは妥当であったといえる。
- 4) 可視化から上昇流は流下・水深方向のみならず奥行きにも広がりもつ大規模なものであり、その形は竜巻状のものである。

以上のように三次元構造の発生要因を特定できたものの、それが現象にどう結びつくのか、それを定量的に裏付けるまでには至らなかった。今後は発生機構を検討するとともに、それに基づいて、条件付平均などでの三次元構造の定量的知見を整理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流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) 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.
- 6) 棚津・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.
- 7) 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.
- 8) Schlichting, H: Boundary Layer Theory, pp.225-230.1979.

(1999.9.30 受付)