

複断面水路接合部における組織的渦の形態に関する一考察

Predominant Factors and Properties of the Organized Turbulent motion
in a Compound Channel Flow

池田裕一*・藤野 毅**・須賀堯三***

By Hirokazu IKEDA, Tsuyoshi FUJINO and Kyoza SUGA

Predominant factors of the organized turbulence at the interface between the main channel and the floodplain are experimentally investigated. It is shown that, in the case of shallow water, the free shear layer in the lateral direction generates periodical large vortices along the interface. In the case of deep water, on the contrary, horse-shoe vortices are generated at the edge of the floodplain and deformed three dimensionally, producing boiling phenomena. The flow along a longitudinal A-shaped ridge is also examined and the effects of the cross sectional shape on the organized motions are discussed.

Key words: compound channel, free shear layer, wall shear layer, organized turbulence, horse-shoe vortex.

1. はじめに

複断面水路の流れでは、高水敷上と低水路内の流れの接合部において、活発な組織的乱流運動が生じており、両者の間の運動量・物質交換あるいは2次流・乱れ特性に多大なる影響を及ぼしている。この組織渦の性状についてはいろいろなパターンがあることが報告されており、たとえば福岡ら¹⁾は、水面流況を可視化し、組織渦が規則的に配置されたり、かなりランダムに発生したりと、条件によって流況が2タイプに分かれることを指摘している。その一方で今本・石垣ら^{2) 3)}は、横断面内を可視化し、横断方向の2次元的な混合と、高水敷先端からの斜昇流による3次元的なものとの、2種類の混合機構があることを示している。これら2つの研究では、2種類のパターンが見られるという意味では類似した結果が得られており、興味深いところであるが、お互いの対応関係については、さほど検討はされていないようである。

また、富永ら^{4) 5)}は横断面内の2次流・乱流特性について詳細な計測を行ない、水深の変化や高水敷法面の勾配に応じて、その分布・強度が変化することを見出している。しかしながら、こうした変化と組織渦構造との関連性については未だに不明な点が多く、組織渦の発生メカニズムに基づいて、これらの因果関係を明らかにしていく必要がある。

ところで、組織的渦構造の発生には、一般に流速が急激に変化するせん断層が重要な役割を果たしている。複断面流れの場合、図-1のように、低水路と高水敷との流速差によって生ずる横断方向の自由せ

* 宇都宮大学助手 工学部建設学科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

** 埼玉大学大学院 建設基礎工学専攻

*** 宇都宮大学教授 工学部建設学科

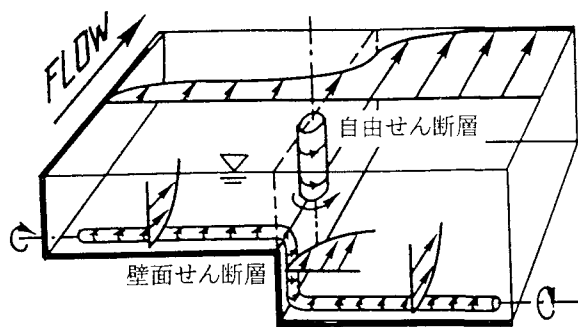


図 1 複断面接合部におけるせん断層

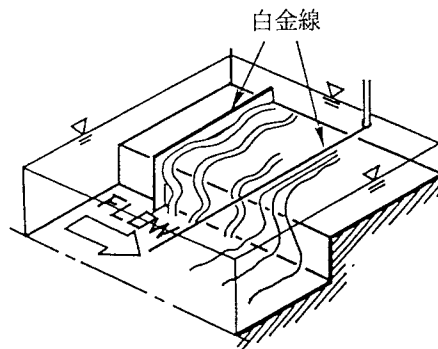


図 2 複断面水路での可視化法

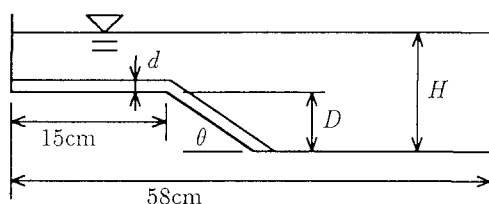


図 3 複断面水路の断面

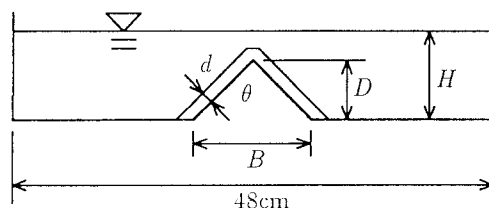


図 4 Δ形河床の断面

ん断層と、河床面での摩擦から生じる壁面せん断層の影響を考える必要がある。そこで本研究では、これら2つのせん断層それぞれの作用が顕著になるような条件下で実験を行い、両者がそれぞれどのような組織渦構造に結び付くのか、その因果関係について比較検討を行うことにした。

2. 実験装置および方法

(1) 複断面水路における実験⁶⁾

複断面水路そのものについての実験には、幅58cm、長さ4m、勾配1/1000の亚克力製水路を用いた。これに、幅15cm、高さ $D=4$ cmの高水敷を上流端から下流端まで取り付け、法面勾配 θ は 90° と 45° の2通りとした。低水路内と高水敷上との流速差により形成される自由せん断層の挙動は、水面下2mmに横断方向に白金線を張り、水素気泡のタイムラインを用いて可視化した。さらにこのタイムラインを写真撮影して、横断方向の流速分布を測定した。

河床面に生じる壁面せん断層の挙動は、このままでは観察が容易ではないので、図-2に示すように高水敷上からその法面にわたって横断方向に棧を一ヶ所だけ設置し、その背後から剥離渦が生じるようにした。このように壁面上の渦糸を突起物などで強調する方法は、壁面乱流境界層に関するいくつかの研究^{7) 8) 9)}で試みられており、定量的な面については疑問は残るものの、組織渦の構造を定性的に把握するには非常に有効なものである。複断面の実験で用いた棧の高さは $d=3$ mmに一定とし、その上部にも白金線を張って、今度は直流電圧をかけて水素気泡シートを発生させ、剥離渦の挙動を可視化した。

実験条件は表-1に示す通りである。A、B、Cの各シリーズとも、水深が浅く低水路と高水敷との流速差が顕著なものと、水深が深く流速差がそれほどでもないものを対にして、それらの相違が比較できる

表 1 複断面水路での実験条件

Run	θ	流量 (l/s)	H (cm)	流速 (cm/s)	
				低水路	高水敷
A1	90°	1.31	5.1	5.2	1.3
A2	90°	1.31	6.0	4.8	3.9
B1	45°	1.31	5.1	5.3	1.7
B2	45°	1.31	6.0	5.0	4.0
C1	90°	1.09	4.8	5.0	1.7
C2	90°	1.09	7.6	2.7	1.9

表 2 Δ形河床上での実験条件

θ	$30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$
流量	1.18 ~ 3.16 l/s
水深 H	7.6 ~ 12.9 cm

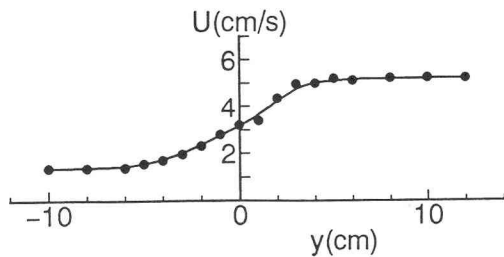


図 5 水深が浅い場合の流速分布 (CASE A1)

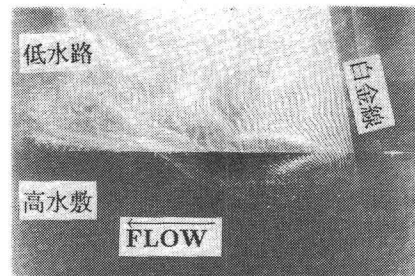


写真-1 自由せん断層 (CASE A1)

ように、流量や流速・水深をなるべく合わせた。なお、C シリーズにおいては可視化のみでなく、He-Ne レーザ流速計を用いて流速変動の計測も行った。測定地点は、水面下の高水敷水深の半分のところ、棧の上流側 10cm および下流側 5cm の 2 点である。装置の都合上、流下方向成分のみを測定し、サンプリング周波数は 100Hz、サンプリング時間は、比較的低周波の変動も捉えられるように 5 分間とした。

(2) Λ 形河床を用いた実験

高水敷先端で生ずる組織渦の基本的挙動を理解するために、図-4に示すような Λ 形河床上の流れについても検討を加えた。この実験には、幅 48cm、長さ 4m、勾配 1/1000 のアクリル製水路を用い、これに左右対称な Λ 形河床を上流端から下流端まで取り付けた。 Λ 形の高さは、今回はとりあえず $D = 4\text{cm}$ と一定にし、その頂角 θ を変化させて断面形状の影響を考えることにする。流況の可視化には主として染料(ウォータブルー)を用いた。水面の流況についてはアルミ粉末も散布してその動きを観察した。また、複断面の場合と同様に、 Λ 形河床の部分に 1 ヶ所だけ横断方向に棧を設置し、そこから生じる剥離渦の挙動について検討を加えることにした。実験条件は表-2に示す通りである。

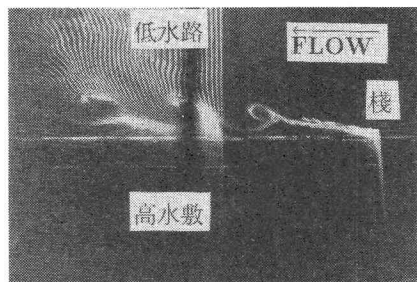
3. 支配要因による組織渦の形態の相違

(1) 自由せん断層が支配的な場合

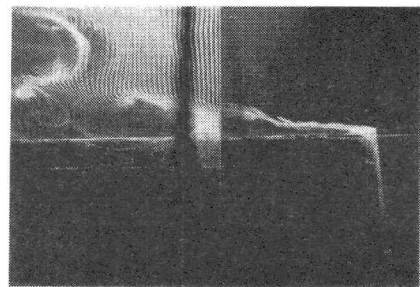
図-5は、RUN A1 での水面付近の流速分布を示したものである。図中の y は横断方向の座標で、低水路と高水敷との接合部を原点とし、低水路側の向きを正としている。高水敷上の水深が浅く、低水路との流速差が顕著な場合には、この図に見られるように、接合部において明確な自由せん断層が形成される。写真-1は、棧の影響のない上流側での水面の流況を可視化したもので、水素気泡のタイムラインが大きくよじれており、大規模な組織渦構造が生じているのがわかる。福岡らが指摘しているように周期的に発生・流下しながら、低水路から高水敷へ、そしてまた低水路へと流動が生じており、今本・石垣らのいう 2 次元的な混合形態に相当する。Tamai, Asaeda & Ikeda¹⁰⁾ は、この発生周期を 2 次元自由せん断層の不安定特性から説明している。同様な現象は河川側岸部の植生域と非植生域との接合部にも見られており、やはり自由せん断層の不安定によって生じていることが確かめられている¹¹⁾。

この場合の壁面境界層の挙動を考えるために、棧を設置した下流の流況を可視化したものが写真-2であり、棧の背後から剥離渦が間欠的に放出されて、そのまま流下していく様子が見られる(写真-2(a))。この場合でも、横断方向の自由せん断層に起因する大規模渦構造が存在することが、タイムラインの挙動から確認することができる(写真-2(b))。棧からの剥離渦がどちらかといえば低水路中央へと向かうのに対して、自由せん断渦は大きく高水敷側にも入り込み、空間的スケールも大きいので、両者は、容易に区別することができる。剥離渦の中には、自由せん断渦の通過に伴い放出されるものも見られた。

表-3は、棧を設置した上流および下流側での自由せん断渦と、棧からの剥離渦の放出周期の平均値を比較したものである。剥離渦の放出周期が明らかに短く、また、自由せん断渦の周期が棧の上流側と下流側でほとんど相違がない。図-6(a),(b) はそれぞれ、RUN C1 における棧の上流および下流側での流下方向流速成分の MEM スペクトルを示したものである。どちらにも低周波側の同様な部分に顕著なピー



(a) 剥離渦の放出と流下

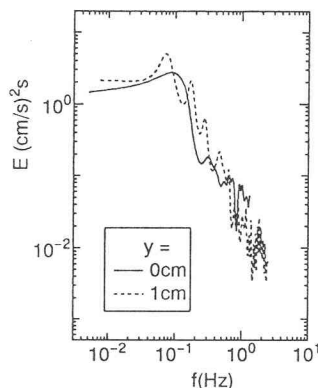


(b) 自由せん断渦との混在

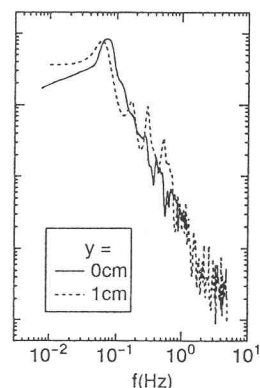
写真-2 棧からの剥離渦の挙動 (CASE A1)

表 3 渦の発生周期の平均値 (単位 秒)

Run cline2-3	自由せん断渦		棧から の放出
	棧の上流	棧の下流	
A1	14.7	15.0	8.1
A2	****	****	7.3
C1	10.9	10.1	4.1
C2	****	****	3.5



(a) $x = -10\text{cm}$



(b) $x = 5\text{cm}$

図 6 水深が浅い場合のスペクトル特性

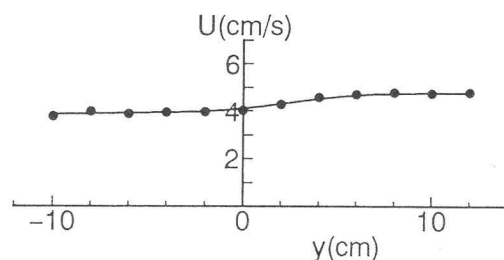


図 7 水深が深い場合の流速分布 (CASE A2)



写真-3 馬蹄形渦 (CASE A2)

クが現れており、これが自由せん断渦の周波数にほぼ一致していることから、流速変動の大部分はこの渦によって生じているものといえる。これに対して棧からの剥離渦については、図-6(b) 中にはその放出周期に対応する部分にさほどのピークは見られない。

(2) 壁面せん断層が支配的な場合

図-7は、水深が深い RUN A2 での水面付近の流速分布を示したものである。低水路と高水敷とで若干の流速差は見られるが、明確な自由せん断層は形成されていない。先のような自由せん断渦についても、その存在を確認することが難しく、発生していたとしても極めて弱いものであったといえよう。替わりに今度は、写真-3に見られるように、棧背後から間欠的に放出された剥離渦が流下するにつれて高水敷の先端から離れた部分が、頭をもたげて馬蹄形状に成長していくようすを捉えることができた。

高水敷先端の部分から頭をもたげるのは、放出される渦糸の曲率とその箇所でも最大で、その自己

誘起速度の影響を強く受けるためである。そして、頭をもたげるにつれて、水面付近の速い流れによって引き伸ばされ、足の部分も含めてきわめて3次元的で複雑な様相を呈するようになる。これは今本・石垣³⁾のいう斜昇流による3次元的な混合機構のメカニズムを表しているものといえる。

今本・石垣ら^{2) 3)}の研究では、3次元的な混合形態のうち、水面付近では高水敷に向かい、高水敷河床付近では低水路に向かうパターンが、その逆のパターンよりも頻繁に現れている。これを、今回の馬蹄形渦モデルで考えると次のようになる。すなわち、馬蹄形渦の頭は、その自己誘起速度と低水路の速い流れによって、低水路中央へと伸びていく。こうした渦糸の挙動によって、高水敷先端から低水路側水面に向けて複断面水路特有の斜昇流が間欠的に発生し、高水敷河床付近で低水路に向かう混合パターンが見られると考えられる。また、今回のような極端な場合は別として、通常は自由せん断渦と馬蹄形渦とが混在しており、その際には、自由せん断渦によって馬蹄形渦の頭の部分が高水敷上へと運ばれることもあろう。すると今度は、高水敷先端から高水敷側水面に向けて上昇する流れが誘起され、さきほどとは逆の3次元混合パターンが接合部に現れることになる。そして、前節で見たように自由せん断渦の周期は馬蹄形渦よりも長いので、このパターンの発生頻度がもう一方のものに比べて低くなるのであろう。

図-8(a) および (b) に、棧の上流・下流側での流速変動のスペクトル特性を示す。さきの例のような低周波側の大きなピークは見られない。これは顕著な自由せん断渦が見られなかったのに対応している。しかし、馬蹄形渦(剥離渦)の発生周期に対応する部分にも、明確なピークは見られなかった。これは、このような条件下では、福岡ら¹⁾が指摘しているように、強さ・発生間隔が自由せん断渦に比べてランダムなために、そのピークが捉えきれなかったものといえる。

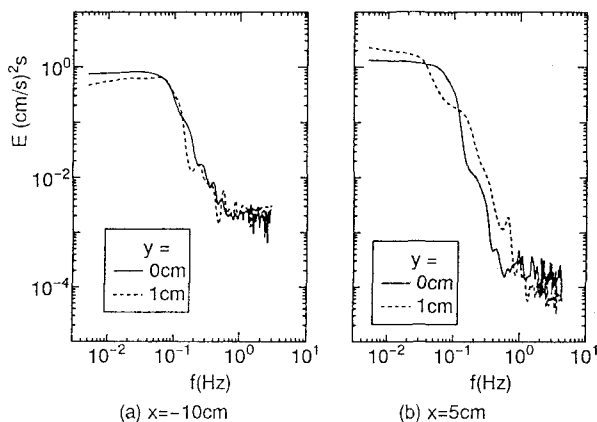


図8 水深が深い場合のスペクトル特性

(3) 断面形の影響について

以上のように、複断面流れにおいては、自由せん断渦と馬蹄形渦という2種類の組織渦構造が見られる。今度は、高水敷の法面勾配を45°にして、断面形の変化がこの2つの形態に与える影響を考えていくことにする。まず、水深が浅いCASE B1の流速分布は図-9のようになる。y軸は、高水敷法面上端(左岸から15cm)を原点に、低水路側を正にとっている。CASE A1のもの比べると、今度は高水敷上の流速はほぼ一定となり、その先端からの水深変化が緩やかなために、低水路内での速度変化も総じて緩やかになっている。このことは、自由せん断渦の中心軸が低水路側にシフトしていることを示している。

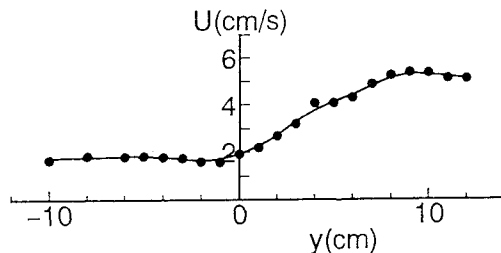


図9 水深が浅い場合の流速分布
($\theta = 45^\circ$, CASE B1)

この場合の流れを可視化してみると、法面勾配が90°の場合と同様に、自由せん断渦が支配的な組織渦構造が見られた。そして目視にとどまったが、その横断方向のスケールが広がっているようであった。これは、渦の中心位置が水深の深い側にずれたために、より多くの水塊を巻き込むようになったと同時に、断面形状の変化が横断方向の水塊の移動に有利に作用したためと考えられる。とはいえ、現段階で

は目視のみの評価に過ぎないので、今後定量的な評価も含めて詳細な検討を進めていきたい。

つぎに水深が深い CASE A2 の場合と同様に顕著な流速差は見られなかった。流れを可視化すると、さきと同様な棧からの剥離渦の放出および馬蹄形渦への成長が見られたが、法面勾配が 90° の場合に比べて、馬蹄形渦の規模や変形量は小さくなっていた。このような相違が現れたのは、高水敷先端部分での渦糸の曲率が小さくなったために、自己誘起速度による変形が抑えられたためと考えられる。これについても定量的な評価はできなかったが、高水敷先端の角度の変化が馬蹄形渦に与える影響については、問題を単純化し、左右対称な Δ 形河床上の流れを用いて基礎的な検討を加えることにした。

4. 馬蹄形渦に関する基礎的検討

(1) 水平面内の蛇行運動

まず、 Δ 形水路床上の大まかな流れを見るために水面流況をウォーターブルーで可視化したところ、写真-4に見られるように、その流脈は乱れながらも、ゆっくりと蛇行しているのがわかった。図-10は水平面内の流速分布を示したもので、 y 軸は Δ 形の頂点を原点に右岸側向きを正としている。 z は平坦河床からの高さである。これを見ると、 Δ 形の頂点で流速が遅くなり、円柱背後の wake に類似している。

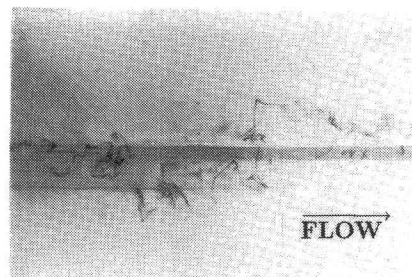


写真-4 Δ 形河床上の蛇行運動 ($\theta = 60^\circ$)

そこで、横断方向の長さスケールに Δ 形の幅 B を、流速のスケールに断面平均流速 U を使い、レイノルズ数 Re_B と蛇行周期のストローハル数 St_m の関係をプロットすると図-11となる ($St_m = f_m B / U$, $Re_B = UB / \nu$, f_m は蛇行の周波数、 ν は動粘性係数)。棧の高さを変えた場合でも、ほとんど変化が見られない。これより、この水平面内の蛇行運動は、全体的な流速分布の不安定によって生じるもので、複断面流れの自由せん断渦に対応しているといえるだろう。

(2) 馬蹄形渦による上昇流とその基本特性

つぎに、アルミ粉末を散布して水面全体の流況を可視化すると、写真-5のように、 Δ 形の上方に当たる部分のところで、水面下方からの上昇流によってアルミ粉末が押し上げられて、穴を開けているのが見られた。写真-6は、 Δ 型に取り付けた棧の背後に染料を注入し、これを側方より見たものである。棧の背後から剥離渦が放出されて、それが頭をもたげて馬蹄形に変形していく。それが水面に達するところで、水面のアルミ膜に穴があくことも確認できた。こうして、 Δ 形河床上でのボイルの発生機構は、複断面流れにおける斜昇流と同じく、河床からの馬蹄形渦の発生であることがわかる。

図-12は、馬蹄形渦発生周期のストローハル数 St_h とレイノルズ数 Re_d との関係を整理したものである。浅枝らの研究¹²⁾ にならって流速スケールには断面平均流速 U 、長さスケールには棧の高さを用いている ($St_h = f_h d / U$, $Re_d = Ud / \nu$, f_h は馬蹄形渦の発生周波数)。これを見ると、ひとつの角度に対し

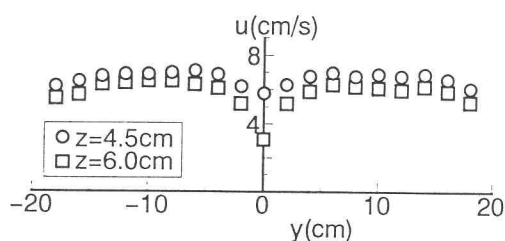


図 10 Δ 形河床上の流速分布 ($\theta = 60^\circ$)

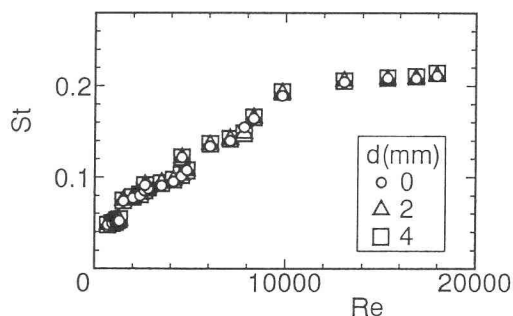


図 11 Δ 形河床上の蛇行周期

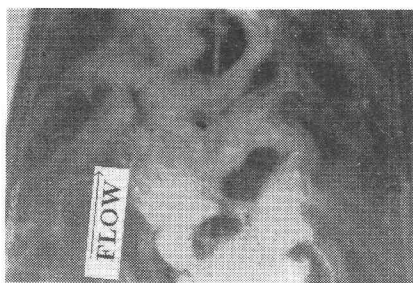


写真-5 A形河床上のボイル (水面流況)

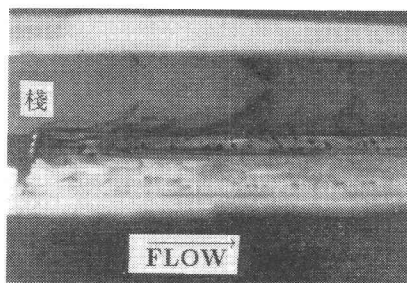


写真-6 A形河床上のボイル (側方より)

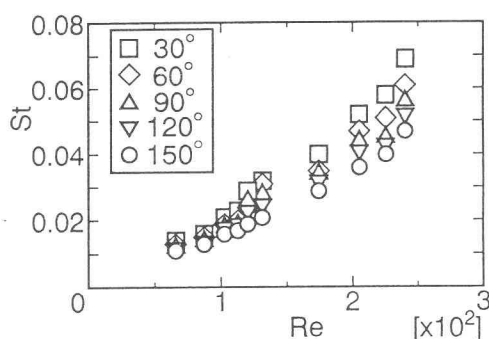


図 12 A形河床上の馬蹄形渦の発生周期

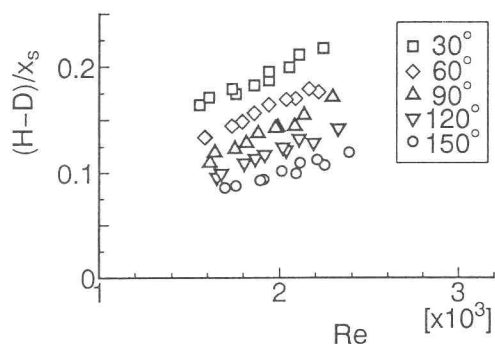


図 13 馬蹄形渦による上昇流の強さ

では棧の高さに関係なく、馬蹄形渦の発生周期を系統的に整理できることがわかる。そして全体の傾向として、A形の頂角が小さいほど、発生周波数が大きくなっている。これは、浅枝らも指摘しているように、角度が小さいほど渦糸の自己誘起速度が強く、剥離渦が早い時期から頭をもたげるので、剥離域からの放出が盛んになるのである。

つぎに、馬蹄形渦が水面に達するまでの流下距離 x_s を写真から読み取り、棧からの上昇勾配 $(H-D)/x_s$ を上昇流の強さとして整理したものが図-13である。横軸のレイノルズ数 Re_D の長さスケールには、とりあえず馬蹄形渦全体のスケールを考えるようにA形の高さ D を用いている ($Re_D = UD/\nu$)。すると、多少のばらつきはあるものの、全体の傾向はよく表されている。これは、図-12にあるように Re_d と St_h の関係がおおよそ直線的なので、馬蹄形渦の発生周波数そのものは棧の高さによりさほどは変化せず、したがって、 Re_D が同じならば棧からの剥離渦に含まれる循環量は棧の高さによってほとんど変わらないためであろう。しかも、頂角による上昇流強度の変化は明らかであり、30°と150°の場合を比べると、2倍もの差が生じている。頂角が小さければ棧背後から放出された渦糸の頂部での曲率が大きく、それが渦糸の自己誘起速度に有利に作用したためである。

さきの複断面水路での実験は、頂角が90°と135°のときに対応するが、このA形河床の実験においても1.5倍程度の相違が認められ、これによって、複断面水路での観察結果が、間接的にはあるが定量的に確かめられたことになる。

5. おわりに

本研究では、複断面接合部に生じる組織渦構造について、その発生メカニズムに重点を置いた比較実験を行った。その結果、組織渦構造の発生には、低水路と高水敷との流速差によって形成される自由せん断層と、河床上に形成される壁面せん断層が支配的な要因であり、それぞれ自由せん断渦と馬蹄形渦として、組織渦の形態を左右していることが確かめられた。また、それらの形態と水理条件あるいは断

面形状との関係を多少なりとも明らかにすることができた。

もちろん、棧を取り付けて観察を行なっているので、ここで得られた馬蹄形渦の特性は一般的なものではない。とはいえ、これは現象のメカニズムの一部分を強調し、その傾向の変化を探るには非常に有効な手法である。そして、現象を支配している因果関係を明らかにし、これとさまざまな水理的・幾何的条件とを物理的に対応づけることによって、これまでの詳細な研究成果を十分に生かしていくこともできよう。本研究は、そのような意味で、複断面流れの特性の理解とその応用に資することを目的としたものである。

謝辞

本研究を行うにあたり、平成元年度文部省科学研究費奨励研究(A)(課題番号 01750492、代表者：池田裕一) および平成3年度河川環境管理財団調査研究助成〔河川美化・緑化〕(代表者：須賀堯三)の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二・藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集，第411号/II-12，pp.63-72，1989.
- 2) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れの斜昇流に関する実験的研究，水工学論文集，第34巻，pp.403-408，1990.
- 3) 今本博健・石垣泰輔・武藤裕則：複断面開水路流れにおける低水路流れと高水敷上流れの混合機構に関する実験的研究，水工学論文集，第36巻，pp.139-144，1992.
- 4) 富永晃宏・江崎一博・小葉竹重機：複断面水路流の三次元乱流構造，土木学会論文集，第417号/II-13，pp.129-138，1990.
- 5) 森上秀樹・富永晃宏・岡田浩幸：複断面水路の乱流構造について(台形低水路の場合)，第43回土木学会年次学術講演会II，pp.372-373，1988.
- 6) 藤野 毅・池田裕一・須賀堯三：複断面接合部における組織的乱流運動の形態の変化，第46回土木学会年次学術講演会II，pp.766-767，1991.
- 7) Viets,H., Bethke,R.J. and Bouguine,D. : Three-dimensional dynamics near a wall, Turbulent Sear Flows, vol.4, pp.34-45, 1985.
- 8) 蒔田秀治・板橋明吉・阿部 誠・佐々浩司：薄板による乱流境界層の中の大規模渦の制御，第19回乱流シンポジウム講演論文集，pp.27-31，1987.
- 9) Acalar,M.S. and Smith,C.R. : A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Part I. Hairpin vortices generated by a hemisphere protuberance, Jour. Fluid Mech., vol.175, pp.1-41, 1987.
- 10) Tamai,N., Asaeda,T and Ikeda,H. : Study on Generation of Periodical Large Surface Eddies in a Comosite Channel Flow, Water Resources Research, vol.22, No.7, pp.1129-1138, 1986.
- 11) 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，第443号/II-18，pp.47-54，1992.
- 12) 浅枝 隆・中井正則・玉井信行・堀川清司：V字形構造物による上昇流，土木学会論文集，第423号/II-14，pp.83-90，1990.