

水路の蛇曲に伴う大規模二次流れの構造

渡辺勝利¹・大成博文²・佐賀孝徳³・斎藤 隆⁴

¹正会員 工修 徳山工業高等専門学校助手 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

²正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

³正会員 工博 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常磐台2557)

流れの可視化法を用いて、低レイノルズ数下で直線から蛇行水路へと変化する流れの組織構造を観察し、そこに形成された大規模な二次流れの構造を考察した。水路の蛇曲に伴って、横方向の平均流速分布と組織構造の横方向への傾斜現象が発生する。この現象は、横方向の大規模なせん断構造を発生させ、それが、蛇曲に伴う二次流れの形成に重要な役割を果たすことを明らかにした。

Key Words : turbulent meandering channel flow, low Reynolds number, inclined coherent structure, large-scale secondary flow, shear structure

1. 緒 論

蛇行水路乱流は、蛇行線形の影響を受けた側壁領域および底壁面上の流れによって構成され、基本的には水路の曲率、水路幅水深比などの幾何学条件や慣性力、粘性力および遠心力などの力学条件に依存する流れである。本乱流構造の本質的理解にはその組織構造と二次流れの構造の解明を不可欠としており¹⁾、そのことが洗掘や拡散現象など水工学上の重要な課題と結びついている。このような観点から、これまでも固定床蛇行流に関するいくつかの優れた研究がなされている。

木下²⁾は、流れの可視化法を用いて、蛇行流の三次元流況を先駆的に観察し、その二次流れの形成に重要な役割を果たす組織構造を見出した。また、この観察を踏まえ、横方向の大規模な二次流れと並列らせん流の関係についても鋭い洞察を加えた。玉井ら³⁾は、連続わん曲水路乱流の横方向流速成分を計測し、それをもとに二次流れの発達、減衰過程を考察した。また、森ら⁴⁾は、 $k-\epsilon$ モデルを用いて、河道わん曲部における横方向流速分布から、二次流れの構造を考察した。池田ら⁵⁾は、空気蛇行乱流を用いて流速計測を進展させ、二次流れが縦断方向に発達、減衰を繰り返すことを示し、それが乱れ運動エネルギーの生産項に大きな影響を与えることを明らかにした。

宇民・上野⁶⁾は、木下の研究^{2, 7)}を踏まえて、複断

面蛇行流の組織構造の解明にPIVを適用し、とくに低水路凸岸下流に形成された河岸渦の平面構造を詳しく考察した。著者ら^{8), 9)}は、低レイノルズ数下の連続蛇行水路乱流および直線から蛇行へ変化する乱流場において、固有の組織構造の存在を見出し、それらが二次流れの形成に重要な関係を有することを示した。

一方、流路や壁面の曲がりに伴う流れの二次流れの構造に関する流体力学的な究明も発展してきた。

乱流場の二次流れの構造については、Bradshaw¹⁰⁾が詳しい解説を行っている。彼は、プラントルの第1種と2種の二次流れのほかに、横方向と鉛直方向の平均速度勾配の相対比の相異による、流れの横断面における二次流れのフローパターンを区別する必要性を示した。また、そのことを踏まえて、平均流の3次元化が乱流構造に与える影響に関する解明の重要性を強調した。須藤ら¹¹⁾は、90度ベンド内乱流の3方向流速成分を計測し、主流速分布と二次流れの相互関係、レイノルズ応力および乱れエネルギーの空間分布特性を明らかにした。杉山ら¹²⁾は、代数レイノルズ応力モデルを用いて正方形の曲がり管内の二次流れを詳しく計算し、曲がり管の場所的变化に応じて、第1種と第2種の二次流れが相互に遷移する過程を示した。

このように、水路の蛇行やわん曲に伴う流れの組織構造や二次流れの構造に関するより詳しい究明が、実験と数値計算の分野で徐々に発展してきている。

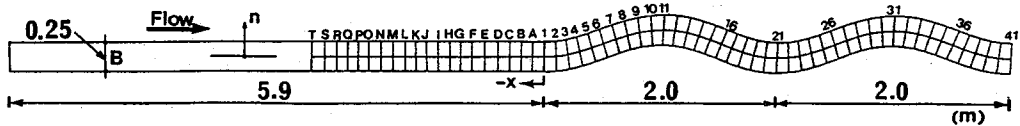


Fig.1 Schematic of experimental setup

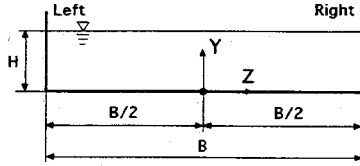


Fig.2 Coordinate system

Table 1 Experimental condition

| Case | Um(cm/sec) | B(cm) | H(cm) | B/H | Re (UmH/ν) |
|------------------|------------|-------|-------|------|------------|
| case A | 11.6 | 25.0 | 4.0 | 6.25 | 4000 |
| 木下 ²⁾ | 19.9 | 20.0 | 2.5 | 8.0 | 5000 |
| 玉井 ³⁾ | 22.3 | 30.0 | 3.0 | 10.0 | 6700 |
| 須藤 ⁴⁾ | 740 | 8.0 | 8.0 | 1.0 | 40000 |

しかし、蛇行やわん曲に伴う水路乱流において、そこに形成された組織運動と二次流れの構造については、それぞれ個々の解明に留まっており、両者を相互に結びつけてその関係を究明した事例はほとんどない。とくに、組織運動の横方向構造と瞬間的な二次流れの構造についての相互関係の検討が不十分であり、それらと横方向流速分布や乱れ統計量との関係についても不明な点が少なくない。

以上を踏まえて本研究では、水路線形が直線から蛇行に向かう、蛇曲水路中央部の乱流場において、組織構造とそれが誘起する二次流れの時空間構造を詳察した。また、直線水路と蛇曲水路の流れに形成された組織構造と二次流れの特徴を比較検討し、その相異を明らかにした。

2. 実験装置および方法

実験には、直線と蛇行の水路を連結した水路を使用した。その直線部の長さ、幅、高さは、それぞれ5.9m、25cm、10cmである。また、蛇行部の長さは4mであり、その幅と高さは直線水路のそれと同一である。蛇行部の水路中心線形には、1波長2m、最大偏角20°のsine-generated curveを採用している。水路の上流端に、整流装置（径4mm、長さ3.2cm、幅25cmのハニカム）、下流端には水位調節用の堰を設けた。Fig.1に平面図と座標系を、Fig.2に実験装置の断面図と座標系をそれぞれ示している。なお、本論において蛇行の始まる半波長領域を「蛇曲水路」と呼ぶことにする。

流速計測には2成分ファイバー型レーザー流速計（最大出力5W、DANTEC製）を使用し、直線部、蛇曲部

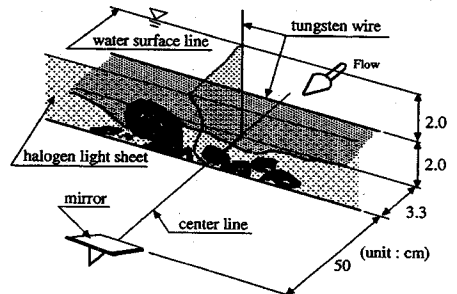


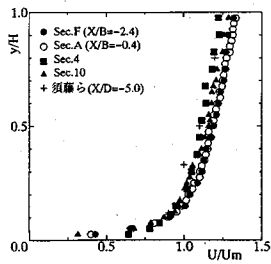
Fig.3 Experimental arrangement used fluorescent dye tracer and hydrogen bubble

の水路中心線上の平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力を計測した。その際、主流速成分Uは計測断面の法線に垂直な方向の流速成分とし、横断方向流速成分Wは、右岸方向を正とした法線方向の流速成分とした。計測断面に、直線部のF、Aと蛇曲部の4、10の4断面を選んだ。

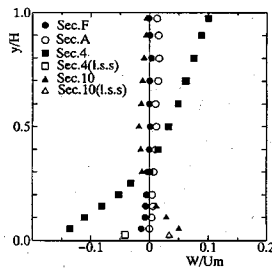
Fig.3に、蛍光染料注入法と水素気泡膜法を併用する横断面可視化法の概略を示す。十字状の陰極線を、可視化断面から上流3.3cmの位置の水路中央部に設置した。水平方向の陰極線は、底壁面から2cmの位置に壁面と並行に、鉛直方向の陰極線は水路の中心に張った。水素気泡膜と染料がスリットを通過する際の横断面形象を35mmカメラ、ビデオカメラによって撮影した。可視化断面は、直線部の断面Fから蛇曲部の断面10まで1断面ごとに選んだ。Table 1に実験条件を示す。レイノルズ数は4000と比較的小さい値であるが、直線部最下流地点の内外層厚さの比は約1対2であり、両層の組織構造を観察することが可能である。水路幅水深比は約6で、水路を横断する二次流れが観察された木下²⁾、玉井³⁾らの値よりも小さいことから、本水路の中央部においても二次流れの観察が可能と判断した。なお、直線から蛇行に向かう水路では、連続わん曲水路のように上流のわん曲部で形成・発達した乱流構造と観察断面のそれとの重複がないことから、蛇曲に伴う二次流れの素過程の観察が可能と思われる。

3. 流速計測結果

各断面のU、Wの鉛直方向分布（Um:断面平均流速）をFig.4に示す。直線部のU分布は同一形状を呈している。蛇曲部では、y/H>0.1において、直線部よりも1

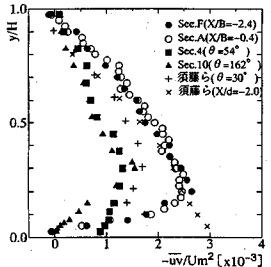


(a) U component

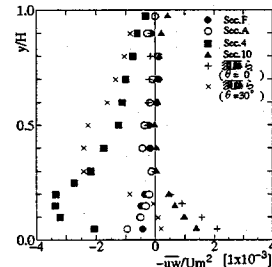


(b) W component

Fig. 4 Mean velocity profiles



(a) $-\overline{uv}$



(b) $-\overline{uw}$

Fig. 6 Reynolds shear stress

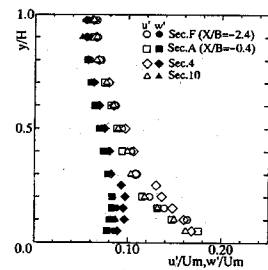


Fig. 5 Turbulence intensity

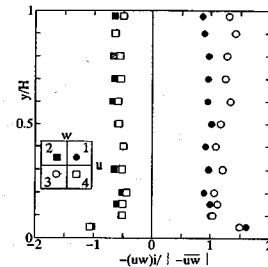


Fig. 7 Contribution to $-\overline{uw}$ from each quadrant of u, w plane

割程度減少している。直線部のWはわずかであり、ゼロに近い。ところが蛇曲部の断面4では、Wの正負分布が $y/H=0.3$ を境にして形成されている。このWは、水表面および底壁面付近で断面平均流速の10~15%にも達している。下流の断面10では、Wの正負が逆転しているが、その絶対値は小さく断面4ほど横流れは発達していない。このような蛇曲部のそれぞれの地点で異なるW分布の特性は、玉井ら³⁾、池田ら⁵⁾の結果と一致する。断面4に典型的に形成されているW分布特性は、横方向の平均せん断層の形成を意味し、内外岸の圧力勾配に誘起される第1種二次流れの存在を示唆している。

Fig. 5に乱れ強度分布を示す。これより、断面4において、 u' と w' が、 $0.1 < y/H < 0.3$ の範囲でわずかに増加し、直線部および断面10との相異を呈している。

レイノルズ応力分布を Fig. 6に示す。直線部における $-\overline{uv}$ は、 $y/H=0.2$ で最大値をとり、水表面および底壁面方向に減少する分布を呈している。一方、蛇曲部における $-\overline{uv}$ は、直線部の値に比べていずれも小さくなっている。断面4の $-\overline{uv}$ は、 $y/H=0.3$ 以下の底面方向への減少が緩やかである点、断面10における $-\overline{uv}$ は、断面4の減少傾向と異なる点がそれぞれ注目される。

また、 $-\overline{uw}$ については、直線部でほぼゼロに近いのに対し、蛇曲部では、顕著な分布特性を示す。断面4では、 $-\overline{uw}$ は壁から増加し、 $y/H=0.2$ 付近で最小となり、壁から離れるにしたがって徐々に増大している（この場合、Wの右岸方向を正としている）。この $-\overline{uw}$ の値は、

同一断面の $-\overline{uv}$ の最大値の約3倍にもなり、 $-\overline{uw}$ の増加が、 $-\overline{uv}$ の減少に対応している。次に、同断面における u, w を4象限分割し、各象限における $-\overline{uw}$ への寄与率を Fig. 7に示す。これより、1, 3象限の寄与率が2, 4象限に比較して約2倍大きく、この寄与の差が $-\overline{uw}$ の負値を示す原因となっている。この場合、1象限の卓越は主流方向の高速流体が右岸方向へ輸送されることを意味し、逆に、3象限成分の卓越は、主流方向における低速流体がそれとは反対方向に輸送されていると考えられる。しかし、3象限における寄与率が1象限よりもわずかに大きい理由については不明である。断面10においては、 $y/H > 0.3$ で、 $-\overline{uw}$ は直線部と同様にほとんどゼロに近く、 $y/H < 0.3$ で壁に向かって正值としての増大傾向を示している。これらは、断面4, 10における $-\overline{uv}$ の相異と対応しているように思われる。

以上の $-\overline{uv}$ 、 $-\overline{uw}$ についての変化は、乱れによる運動量輸送を示すことから、水路の蛇曲によって、乱れによる鉛直方向の運動量輸送が壁近くで減少し、逆に横断方向の運動量輸送が増加することを示している。このような $-\overline{uv}$ および $-\overline{uw}$ の増減傾向は、高レイノルズ数下の空気蛇行流における池田ら⁵⁾の結果、湾曲管路流の須藤ら¹¹⁾の結果にも明らかであり、重要な特徴として注目される。

以上のように、平均流速W、レイノルズ応力の $-\overline{uv}$ 、 $-\overline{uw}$ は、水路蛇曲に伴って顕著に変化することが明らかとなった。また、それらの分布特性が $y/H=0.2 \sim 0.3$ 付近



Fig.8 Streamwise views of coherent structure

を境にして顕著に異なる傾向を示すことを踏まえて、組織構造を考察することが重要である。

4. 組織構造と二次流れの相互関係

(1) 視点

本論の考察には、次の視点を踏まえる必要がある。

① 直線および蛇曲水路の中央部の流れにおいて、それぞれ形成される固有の組織構造を比較し、その相異を明らかにする。

② 水路の蛇曲に伴って発生する二次流れには、プラントルの第1種および第2種として定義される二次流れ、さらには底壁面から発生した組織運動が誘起する瞬間二次流れで構成される。また、流れの横断面のフローパターンは、横流れ型と渦型が存在する¹⁰⁾ことから、これらを踏まえて考察する必要がある。

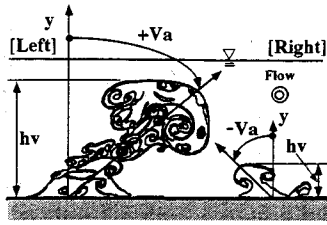
③ ②の各二次流れは、各種各規模のせん断層によって形成されていると考えられ、そのせん断構造の時間空間特性を考察することが重要である。

(2) 組織構造の傾斜特性

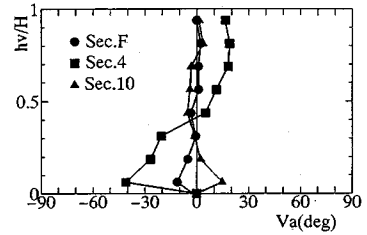
a) 傾斜構造

Fig.8は、断面F、4、10における水路中央付近の組織構造の横断面形象を示す。各図における水表面、底面、水路中心点は、△、▲、◆をそれぞれ結んだ位置に相当する。直線開水路の左右側壁方向をL、Rで示す。同時に、蛇曲部においては内外岸をIN、OUTでそれぞれ示している。

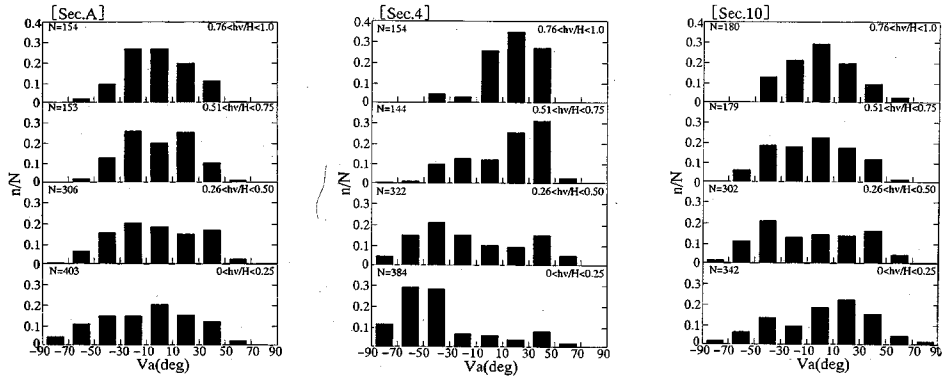
同図(a)には、断面Fを通過する大規模な組織構造の横断面形象 S①、S②が可視化されている。同図(b)内のS③には、断面4において、大規模な組織構造が外岸方向に大きく傾斜した横断面形象が可視化されてい



(a) Definition of inclination angle of coherent structure



(b) Inclination angle profiles



(c) Histogram of inclination angle

Fig.9 Characteristics of inclination angle of coherent structure

る。また、壁近くのS④～⑦には壁縦渦¹³⁾が、それとは逆の内岸方向に傾斜して形成されている。

ところが断面10まで流下すると、それぞれの傾斜構造はより緩やかになっているものの、それぞれ逆方向の傾斜をS⑧～⑫で示している。このように、水路の蛇曲に伴って形成される組織構造は壁近く($0 < y/H < 0.2 \sim 0.3$)と、そこから離れた大領域($y/H > 0.3$)で、それぞれ横方向平均流速 W の方向に沿う傾斜特性を有しており、これを「横方向の傾斜構造」と呼ぶ。

b) 傾斜角特性

Fig.9(a)に示すように、組織構造の横方向傾斜角を計測した。計測領域は、水路中央を中心とする $2H$ の範囲である。読み取り個数は1000個である。同図(b)に、その平均傾斜角分布を示す。直線部と比較して蛇曲部断面4の傾斜は明らかであり、 $y/H = 0.3 \sim 0.4$ 付近でその正負が逆転している。この逆転はFig.4に示された W 成分の鉛直分布と同一であり、組織構造の傾斜現象は横方向の平均流速分布に依存していることが明らかである。断面10では、壁近くで断面4と逆の正値を示している。これらの傾向をより詳しく検討するために、同図(c)のように壁からの高さに応じた傾斜角の頻度分布を検討した。直線部の断面Fではその頻度分布に顕著な偏りは認められない。ところが、それが蛇曲部の断面4では壁近くで -50 度付近の最頻値を示し、壁から遠ざかるにつれて、正の傾斜角の方へその最頻

値が移動している。断面10では、壁近くで正の 20 度付近で最頻値を示している。

c) 低速縞の経時変化

壁面近くの傾斜構造をさらに検討するために、低速縞の経時変化特性を調べた。壁縦渦の足元部では、横方向から染料が集中することによって、流れ方向に長く伸びた筋状のlow speed streak (以下、LSSと呼ぶ)が形成される¹³⁾。そこで、この足元部の染料集中部すなわちLSSの横断面形象に注目して、その形成位置の経時変化を追跡した。Fig.10に、断面F, 4, 10における、その経時変化を示す。図中の実線は、LSSを時間方向に連ねて描いたものである。また、図中の△は水路中心位置を示す。直線部のLSSの軌跡は、わずかな左右の揺動はあるものの、全体としては流れ方向に沿って形成されている。しかし、蛇曲部の断面4, 10ではいずれも内岸側へと傾斜しており、直線部との相異は明らかである。また、各断面におけるLSSの軌跡の平均間隔 λ^+ は、いずれも $100 \sim 110$ wall unit (ν/u_* , ν :動粘性係数, u_* :摩擦速度)であり、蛇曲部でも縞構造の間隔に基本的な変化は発生してないことが明らかである。この傾向はFlackら¹⁴⁾によっても指摘されている。ところで、断面4および10付近におけるLSSの平面形象は、ほとんど流れ方向に沿って直線状を呈する⁹⁾ことから、両図におけるLSSの傾斜は、実際にはLSSの横方向への移動軌跡と考えられる。この軌跡

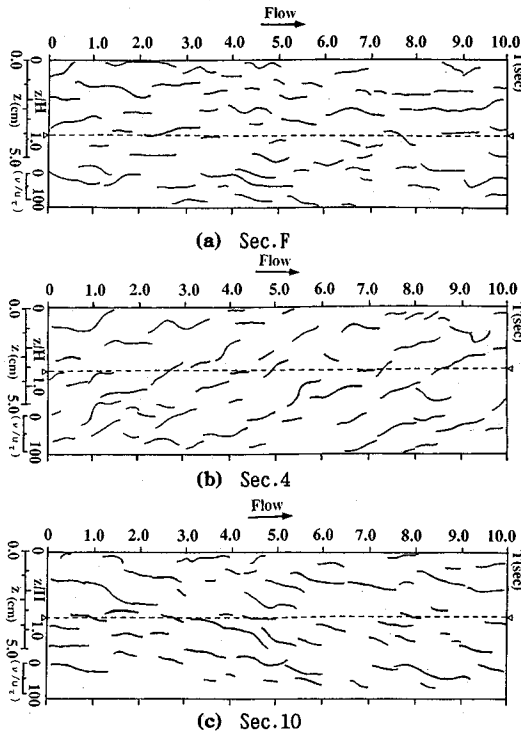


Fig.10 Time series of location of low speed streaks

からLSSの移動速度を求め Fig.4(b)内に示した。この2点は、LDV計測結果の傾向に沿っている。

(3) 瞬時および平均せん断構造

a) 染料流脈と水素気泡流脈の相互関係

組織構造の傾斜現象とせん断特性の相互関係を考察するために、蛍光染料と水素気泡をトレーサーとする横断面可視化の一例とそのトレースを Fig.11(a)~(d)に示す。この場合、水素気泡の陰極線から可視化断面までの平均到達時間 $T^+ (=u \cdot T / \nu)$ は到達時間は、8程度である。Bernardら¹⁵⁾は、DNSを用いて組織構造の発達過程を $T^+=6$ ごとに考察しており、その間の組織構造の変化はわずかである。本実験における到達時間はその1.3倍ほどであり、この間で組織構造の大きな変化はないと考えられる。

(a)の壁近くには、内岸方向へ傾斜した壁縦渦の横断面形象が、十字線よりも上部では、外岸側へやや傾斜した大規模な組織構造が可視化されている。このとき、水素気泡の横断面形象は、上流の十字線位置からずれて複雑な屈曲を示している。鉛直方向の陰極線からの水素気泡流脈は、比較的小スケールの変動を伴いながら、壁近くで内岸側へ、半水深以上の領域で外岸へ、それぞれの変位を示している。水平方向については、外岸側にやや大きく下降成分として変位している。注

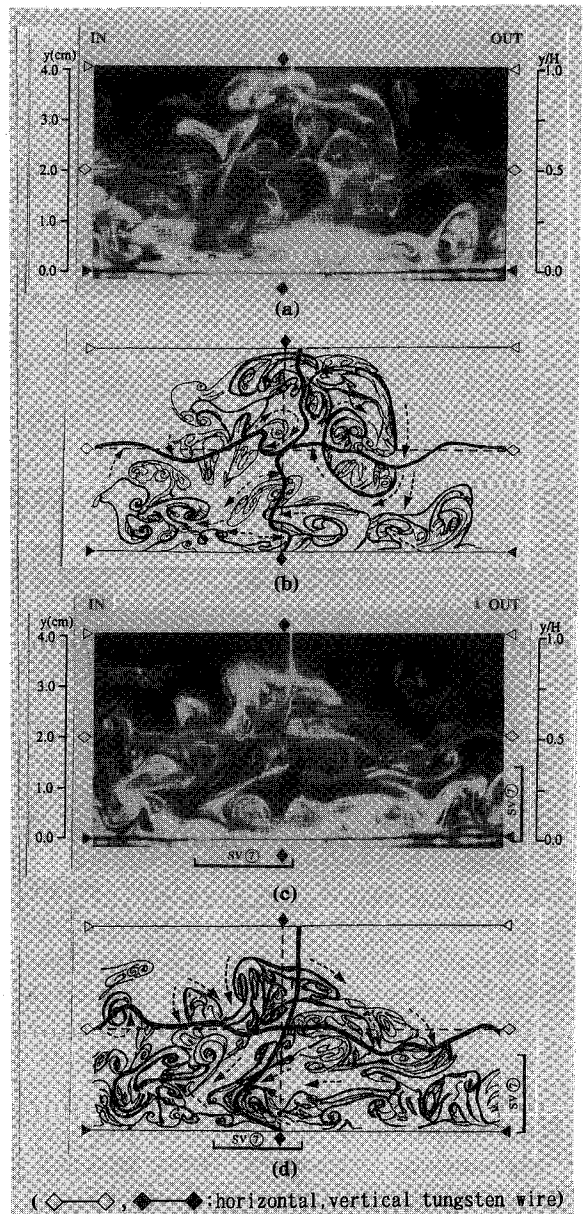


Fig.11 Fluorescent dye tracer and hydrogen bubble visualization

目すべき点は、これらの変位とともに水素気泡流脈の勾配が発生していることであり、これは横および縦方向のせん断の反映と考えられる。

このように、大規模な組織構造の内部で上昇流、周辺付近で下降流が形成され、さらには、傾斜方向の頭部で外岸側、足部で内岸側へ水素気泡が変位し、全体としては時計回りを示すことから、それらを総合すると、そこには大規模な二次流れの形成が推測され得る。

(c)でも、(a)と同様の変位が形成されているが、この場合は壁近くで壁縦渦 (SV⑦)の内岸方向への急

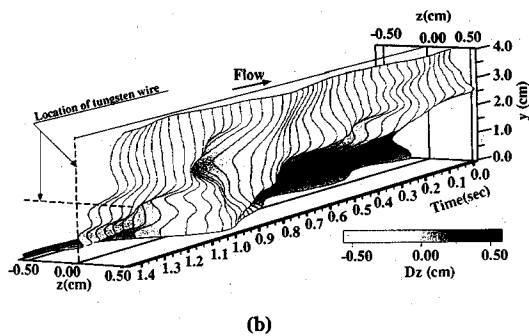
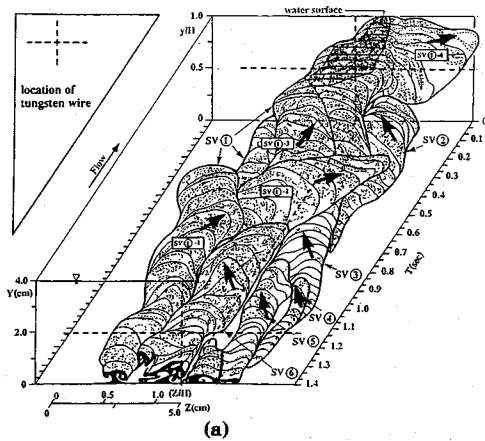


Fig.12 Spatial and temporal structure of large-scale coherent structure

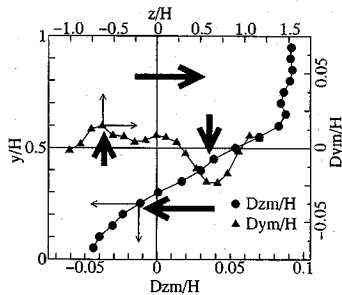


Fig.13 Mean deformation of streak line of hydrogen bubble

傾斜のために、その方向に大きな水素気泡の変位が形成されている。また、(b)、(d)には、佐賀ら¹⁶⁾の結果を踏まえて、染料および水素気泡流脈の形象から推測された局所的な二次流れが矢印点線で示されている。

これらの一連の挙動を時空間的により明確にするために、Fig.12(a)、(b)を描いた。(a)は、組織構造の横断面形象を42コマ(1コマ0.03秒)にわたって描き連ねたものであり、図中の $T=0.4, 0.47$ 秒がFig.12(a),(b)の画面である。この図から、壁近くで内岸方向へ(SV②~⑥)、壁から離れたところで外岸方向へ

(SV①)の組織構造の傾斜現象がより明確に認められる(矢印)。また、(b)は鉛直方向陰極線から発生した水素気泡の流脈の連続画像であり、壁近くと壁から離れたところでの同様の傾斜変位が観察される。

そこで、水素気泡流脈の鉛直および水平方向の変位(Dz, Dy)を計測した。Dzは $y/H=0.05$, Dyは $z/H=0.1$ 間隔で0.03秒ごとに読みとられた。Fig.13に1.4秒間(42コマ, $T^+=50$)の傾斜平均変位Dzm, Dymを示す。このDzm, Dymの分布は、それぞれの変位の大きさに約3倍の相異があることから、横方向にやや歪んだ形状を呈している。これは、この微小時間内における時計回りの回転運動を伴う、乱流下の第1種二次流れの存在(矢印)を示唆しており興味深い。

(b)水素気泡流脈の縦横変位とせん断構造の時間特性

断面F,4におけるDz,Dyの15秒間($T^+=500$)の経時変化をFig.14に示す。Dzの外岸方向の変位は暖色で、内岸方向の変位を寒色で示した。また、Dyの水面方向の変位は暖色で、底壁面方向の変位は寒色で示している。

断面4のDz分布の特徴は、 $y/H<0.2\sim 0.3$ で内岸方向へ、 $y/H>0.3$ で外岸方向へ大きく変位し、それらが間欠的な周期特性を示しながらも、流れ方向(この場合、時間軸方向)に長く連なっていることにある。この構造は、断面Fには認められず、両断面において明らかな相異が存在する。一方、Dyについても、断面4では、全体的に弱い上昇成分が存在し、その上に比較的小スケールの上昇成分が間欠的に、しかも外岸方向へやや傾いて形成されている。ところが、直線部においては、その全体的な上昇成分の形成はなく、上下降の変位が全領域にほぼ等しく存在し、断面4とは明らかな相異がある。

そこで、これらの相異をより明確にするために、Dzの鉛直方向の勾配(dDz/dy)を求め、その経時変化をFig.15に示した。これらの勾配の大きい領域は、高せん断層と考えられることから、二次流れの構造を考察する際に、非常に重要な領域である。断面4の鉛直断面では、この高せん断領域が3つの領域($y/H<0.1$, $0.1<y/H<0.7$, $0.7<y/H<1.0$)に大別される。これらの領域ごとのせん断特性は、第1に、壁近くで負、およびその中間領域において、正の高せん断領域が鉛直方向に形成され、流れ方向には、間欠的ではあるが長く連なる構造が存在していることにある。第2に、水面付近で、高せん断層が流れ方向に連なる間欠的構造が消え、流れ方向に比較的小スケールのしかも正負の低せん断値を示す領域が交互に出現していることにある。これに対し、直線部では上述の流れ方向に連なるせん断構造が形成されず、比較的小スケールの構造が交互に、流れ方向、鉛直方向に形成されているのみで、断面4とは顕著な相異を示している。

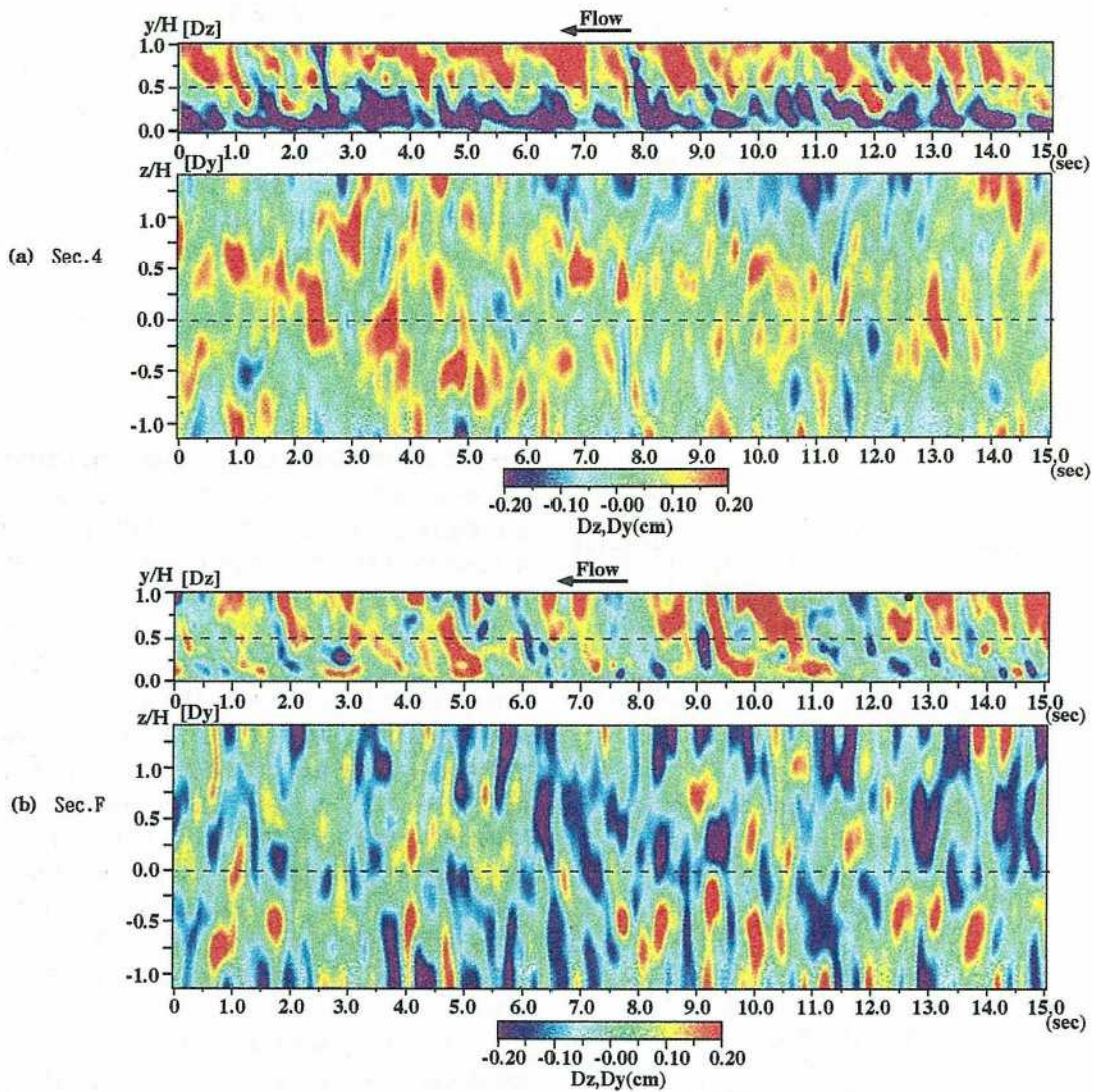


Fig.14 Spatial and temporal structure of Dz and Dy

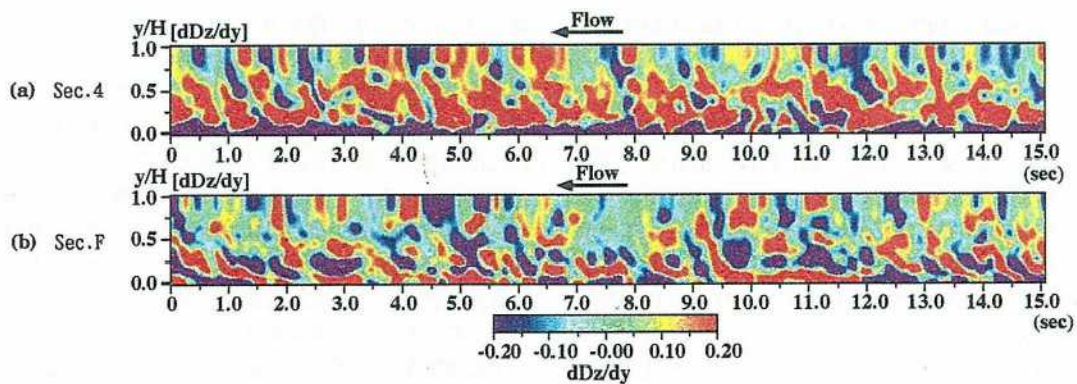


Fig.15 Spatial and temporal structure of dDz/dy

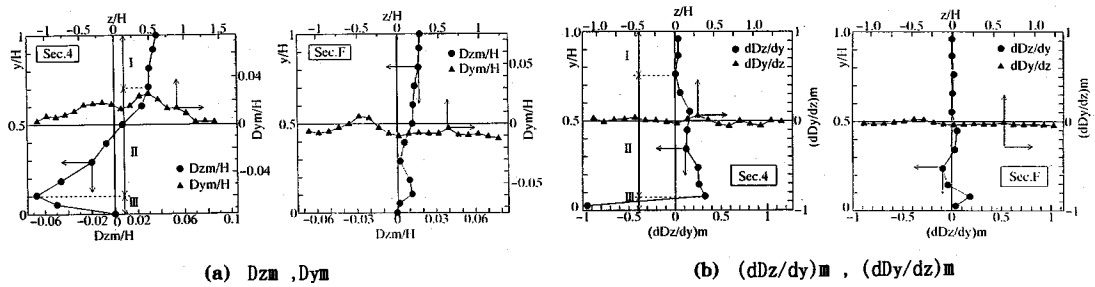


Fig.16 Mean deformation and mean shear rate of streak line of hydrogen bubble

c) 平均横変位および平均せん断特性

ここで、15秒間のDz, Dyおよびその勾配の平均値を求め Fig.16 に示す。まず、断面4における平均変位Dzmは、壁近くで負、そして壁から離れるにしたがって、負から正へ、さらには水表面付近で正の一定値となり、上述の3領域区分 (I ~ III) がその平均変位分布でも明らかである。また、この分布形状は、前述の横方向平均流速分布および組織構造の傾斜角度分布特性とほぼ同一であることから、それぞれのデータの信頼性が相補的に説明され得る。一方、Dymについては、十字陰極線付近でわずかな正値を示し、この部分で弱い上昇流が形成されていることが明らかである。これに対し、直線部の断面Fでは、鉛直および水平方向に平均変位がわずかで、しかもそれぞれの方向に一樣に近い分布を示しており、断面4とは、その横流れ成分において顕著な相異を示している。

これらは、Dz, Dyの平均勾配においても明らかである。すなわち、断面4における、鉛直方向の平均勾配においても、上述の3領域区分が識別され、壁近くの負勾配、中間域の正勾配、さらには水表面付近のゼロ勾配域としての区分が可能である。また、水平方向の平均勾配はほとんどなく、鉛直方向との著しい相異を呈している。これに対し、直線部の断面Fでは、鉛直および水平方向に顕著な勾配の変化は認められない。

以上の本節の結果を総合的に考察すると、まず蛇曲部の断面4においては、水素気泡流脈の横方向変位が、 $y/H=0.1$ 付近で最大となり、そしてその勾配が負から正へと逆転する。これは、横方向のせん断層が鉛直方向に逆転して二重に存在する構造の形成を意味する。Fig.15の壁近くには、この二重構造の経時変化が、壁近くから上向へ、負(紫色)と正(赤色)の領域として示されている。そこで、この二重構造の発生時間を15秒間で調べると、断面4では、壁から負、正と重なる構造の発生確率が74%、その逆の構造は5%であった。開水路の場合には、それぞれ30%と42%というほぼ同数の発生時間率が得られ、両者にはきわめて顕著な相異が存在している。ところで、断面4における二重

せん断構造の形成領域では、 $-\overline{uw}$ の発生、組織構造の最大傾斜角度が発生することから、それらの相互関係が注目される。

また Fig.16 から、横断面全体にわたる平均変位の最大・最小値を調べ、それらの相対比を求めた。変位と勾配の両方において、それらは横と縦方向で約10倍もの相異が明らかである。断面4における二次流れは、横方向のせん断成分がきわめて大きい構造を有しており、Bradshawの定義¹⁰⁾に従えば、横流れ型に相当すると考えられる。

以上のことから、蛇曲の影響を受けた乱流下の第1種二次流れにおける最も重要な特徴は、組織構造の傾斜に伴う横方向せん断構造が瞬間的に形成され、それが、長時間スケールにおいても平均的な構造を有することにあると考えられる。さらに、このせん断構造は、乱流下の第1種二次流れの形成において重要な役割を果たし、水路幅水深比と蛇行線形のわん曲度の影響を受けた縦横せん断比に依存しながら、流下方向には局所的な変化を遂げていくように思われる。

5. 結論

流速計測および流れの可視化法を用いて、直線から蛇行に向かう蛇曲水路の中央部における二次流れの構造について考察した。以下、本論の結論を示す。

- (1) 直線から蛇曲水路への移行に伴って、横方向の平均流速分布が発生し、第1種の二次流れが形成される。蛇曲部において形成された組織構造は、この横方向の平均流速の発生方向へ傾斜する。組織構造の横方向の傾斜構造は、壁近くで内岸方向へ、壁から離れた領域で外岸方向へ傾斜することを特徴としている。
- (2) 蛇曲部の壁面近傍では、二次流れの方向に沿って低速縞の横方向移動が内岸方向に発生するが、その横方向平均間隔は、直線開水路の場合と変わらない。
- (3) 蛇曲部に形成された組織構造は、瞬間的に各規模のせん断層を発生させるが、それに加えて、組織構造の横方向の傾斜構造は、水深規模の横方向平均せ

ん断層の形成を誘起する。

(4) 蛇曲部のせん断構造は、水深方向に3つの領域に区分される。壁近くには、負および正の二重せん断構造が形成される。この領域でレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の減少、 $-\overline{uw}$ の発生、組織構造の最大傾斜角度が発生する。そのレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ に対する寄与は、4象限分割法における第1および第3象限が卓越し、それらの寄与率は、第2第4象限の約2倍の値を示す。

(5) 直線開水路乱流においては、横方向の平均流速分布、組織構造の傾斜構造および $-\overline{uw}$ 分布の発生は認められず、蛇曲水路における二次流れの構造とは明らかに異なる。また、壁近くの二重せん断構造の発生時間においても、両水路乱流の顕著な相異が明らかである。

本研究は、直線および蛇曲水路の中央部における組織構造の考察に留まっており、今後の課題として、蛇曲部における両側壁付近の乱流構造の解明が必要と思われる。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、福嶋祐介長岡技術科学大学教授には、有益な助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会水理委員会：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究，土木学会論文集第345号/II-1, pp. 41-52, 1984.
- 2) 木下良作：緩流部河道の水流蛇行相似に関する検討業務報告書-三次元流に関する実験的研究-，石狩川開発建設部，1981.
- 3) 玉井信行，池内幸司，山崎晶：連続わん曲水路における流れの実験的研究，土木学会論文報告集，第331号，pp. 83-94, 1983.
- 4) 森 明巨，岸 力：河道弯曲部における二次流れの構造，水理講演会論文集，第27巻，pp. 73-78, 1983.
- 5) 池田駿介，田中昌宏，千代田将明：空気蛇行流の乱流特性量に関する研究，土木学会論文集，第351号/II-2, pp. 77-86, 1984.
- 6) 宇民正，上野鉄男：複断面蛇行流の可視化観測，京都大学防災研究所年報，第32号B-2, pp. 963-983, 1989.
- 7) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，第345号/II-1, pp. 1-9, 1984.
- 8) 渡辺勝利，大成博文，佐賀孝徳，斎藤隆：低レイノルズ数における蛇行水路乱流の組織構造，土木学会論文集，第467号/II-23, pp. 9-18, 1993.
- 9) 渡辺勝利，大成博文，佐賀孝徳，斎藤隆：直線・蛇行水路乱流の組織構造の特徴，水工学論文集，第37巻，pp. 475-480, 1993.
- 10) Bradshaw, P.: *Turbulent Secondary Flows, Ann., Rev. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 53-74, 1987.
- 11) 須藤浩三，高見敏弘，板野則弘：正方形断面を有する90°ベンド内の乱流（第2報，乱れの測定），日本機械学会論文集（B編），55巻515号，pp. 1861-1867, 1988.
- 12) 杉山均，秋山光庸，山中和典，佐藤誉之：正方形断面を有する曲がり管内乱流の平均速度場解析（第1種二次流れ，第2種二次流れの遷移挙動の予測），日本機械学会論文集（B編），61巻581号，pp. 48-55, 1995.
- 13) 大成博文，佐賀孝徳，斎藤隆：開水路乱流内層の縦渦構造，土木学会論文集，第363号/II-4, pp. 135-144, 1985.
- 14) Flack, K. A., Johnston, J. P.: *Near Wall Investigation of Three Dimensional Turbulent Boundary Layers, Stanford University Thermosciences Div. Rep.*, MD-63, 1994.
- 15) Bernard, P. S., Thomas, J. M. and Handler, R. A.: *Vortex Dynamics and the Production of Reynolds Stress, J. Fluid Mech.*, Vol. 253, pp. 385-419, 1993.
- 16) 佐賀孝徳，大成博文，渡辺勝利，斎藤隆：開水路乱流内層の渦構造と流速波形の相互関係，土木学会論文集，第393号/II-9, pp. 131-149, 1988.

(1996.2.1 受付)

CHANNEL-MEANDERING EFFECT ON THE LARGE-SCALE STRUCTURE OF TURBULENT SECONDARY FLOW

Katsutoshi WATANABE, Hirofumi ONARI, Takanori SAGA and Takashi SAITOU

The structure of large-scale secondary flow in a turbulent meandering channel at a low Reynolds number is investigated using LDV measurements and flow visualization techniques. Coherent structure formed in a turbulent meandering channel flow incline to the secondary flow direction which depends on the distribution of transverse component of mean velocity. Large-scale shear layer consisted of three regions characterized by property of different shear in transverse cross section of a turbulent meandering channel flow was formed by the inclination of the coherent motion. The shear structure plays an important role to generate large-scale secondary flow in a turbulent meandering channel.