

水路蛇曲部における側壁領域の乱流構造

渡辺勝利¹・大成博文²・佐賀孝徳³・斎藤 隆⁴

¹正会員 工博 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 山口大学名誉教授 (〒755 山口県宇部市上宇部山門2908-3)

染料流脈形象と粒子流跡を同時可視化する方法を用いて、直線から蛇行に移行する水路乱流における側壁領域の組織構造と二次流れの構造を究明した。水路の蛇行に伴って、その側壁領域には、湾曲の影響を受けた第1種二次流れが、もともと直線水路乱流側壁領域で発達していた乱流二次流れ内に発達する。この発達に伴い、流れ方向および横方向に大規模なスケールを有する組織構造が形成される。この構造は、左岸と右岸でそれぞれ異なる大規模なせん断構造の形成に重要な役割を果たす。

Key Words: *turbulent meandering channel flow, corner flow, Dye streak pattern Particle Tracking Velocimetry, coherent structure, large-scale secondary flow, shear structure*

1. 結論

水路線形が直線から湾曲を開始する水路の側壁近くの流れは、もともと直線部で形成された乱流二次流れのなかに第1種二次流れが発生・発達し、それらが複雑に相互作用を及ぼしながら変化するきわめて複雑な3次元乱流である。この乱流構造の解明は、水工学の分野における湾曲部の洗掘、堆積現象と関係し、流体力学的課題においては、第1種二次流れによる平均流の3次元化が与える乱流現象の解明¹⁾と深く関係している。

これまでに、固定床蛇行流、湾曲流においても優れた研究が行われ、その側壁近傍の流れの特徴が明らかにされている。

可視化法では、木下²⁾による単断面蛇行流における先駆的な研究があり、内岸、外岸における大規模組織構造の形成と二次流れの存在が観察された。この研究を踏まえて、宇民・上野³⁾は、PTVを複断面蛇行流に適用し、内岸から外岸にわたる低水路河岸に形成された大規模な河岸渦の存在とその構造性を明らかにしている。

流速計測法では、Humphreyら⁴⁾がLDVを用いて正方形断面を有する90度ベンド内の乱流計測を行い、

内、外岸付近でレイノルズ応力分布が顕著に異なることを示した。玉井ら⁵⁾は、連続湾曲水路の流速計測を行い、側壁付近の平均流速分布の特徴を指摘し、その二次流れの構造性を考察した。池田ら⁶⁾は、空気蛇行流の乱流計測を行い、側壁付近の主流速やレイノルズ応力の分布特性を明らかにした。

数値計算では、杉山ら^{7), 8)}が、正方形断面を有する曲がり管路内乱流の平均速度場、応力場の解析を行い、第1種、第2種の二次流れの遷移挙動および内岸、外岸付近のレイノルズ応力の実験値を良好に予測した。

このように、蛇行流、湾曲流の側壁近傍の流れに関して、固有の組織構造の存在、平均流速分布、乱れ統計量の分布特性などが明らかにされ、それらを数値計算によって予測することも可能となってきた。

一方、著者ら⁹⁾は、直線開水路乱流側壁領域の二次流れを観察し、そこに形成された組織構造が大規模な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。また、連続蛇行水路乱流の側壁領域において、「大規模凸岸渦」および「水平渦」と呼ばれる組織構造が大規模な二次流れの形成に寄与していることを示した¹⁰⁾。さらに、直線から蛇行水路に移行する流れの「乱流第1種二次流れ」の発生に

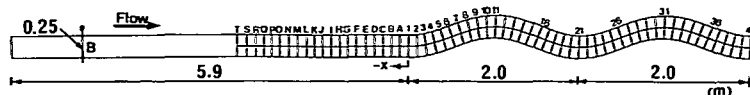


Fig.1 Schematic of experimental setup

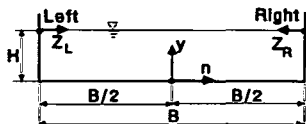


Fig.2 Coordinate system

Table 1 Experimental condition

Case	U_c (cm/sec)	B(cm)	H(cm)	B/H	Re ($U_c B / \nu$)
case A	11.6	25.0	4.0	6.25	4000
木下 ²⁾	19.9	20.0	2.5	8.0	5000
玉井ら ³⁾	22.3	30.0	3.0	10.0	6700

起因する組織構造の傾斜特性を明らかにし、それが「横方向二重せん断層」の形成に重要な関係を有することを見出した¹¹⁾。

以上のように、蛇行部や湾曲部における側壁近傍の乱流構造に関する究明は徐々に本質的な発展を遂げてきているが、その瞬時空間構造については、いまだ不十分な解明に留まる部分が少なくない。とくに、水路側壁付近の流れ方向および横方向の乱流構造については水路湾曲という複雑な境界条件の変化も加わって、未解明のままであり、側壁近くに形成された組織構造と瞬時および平均速度特性の関係についてはほとんど解明がなされていない。

そこで、本研究では、これらの未解明の課題を究明するために、水路線形が直線から蛇行へ変化する「蛇曲部」における「側壁領域」の乱流構造をDPTV法^{12), 13)}(Dye streak pattern Particle Tracking Velocimetry)を中心とする可視化法を用いて実験的に検討し、それらに関する重要な知見を得た。

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。蛇行水路の中心線形には、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, 2には実験水路の平面図、断面図をそれぞれ示している。なお、本論では、前報¹¹⁾と同じく、断面1~11までを「蛇曲部」、側壁の影響を受けやすい側壁からの距離が水深の約2倍までの領域を

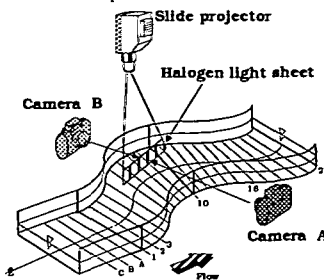


Fig.3 Experimental arrangement of DPTV

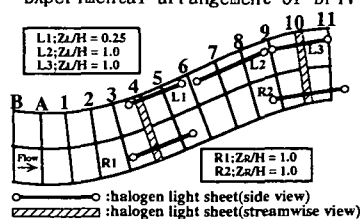


Fig.4 Position of halogen light sheet

「側壁領域⁹⁾」と定義する。この蛇曲部において以下のような可視化実験、流速計測を行った。

可視化実験では、組織構造の実体視、縦・横断面視を行った。実体視では、トレーサーとして蛍光染料水溶液(比重1.005)、照明として紫外線ランプを使用し、蛍光染料水溶液によって可視化された組織構造が2台のカメラによって同時撮影された。本手法の詳細は文献10)にあり、ここでは省略する。

縦断面視には、Fig.3にその概略が示されているDPTV法^{12), 13)}を採用した。本手法では、蛍光染料水溶液(比重1.005)と微細粒子(比重1.008, 平均粒径300 μ m)を混ぜ合わせたトレーサーを使用した。可視化断面の約3m上流よりそのトレーサーを静かに注入すると、それは、流下に伴い組織運動内に取り込まれ、立体的な流況を可視化する。それがスリット光膜(厚さ3mm, 長さ25cm)を通過する際の蛍光染料の流脈象をカメラA(シャッター速度1/125sec)で、粒子流跡をカメラB(シャッター速度1/30~1/15sec)で各々同時撮影した。なお、撮影は、トレーサー注入に伴う初期攪乱が流下して、定常状態を確認した後に開始した。縦断面DPTV法のスリット位置をFig.4に示す。

横断面視においては、側壁付近の組織構造と瞬間二次流れを観察するために、蛍光染料注入法と水素気泡法を併用する手法を用いた¹¹⁾。その横断面可視化には、Fig.4に示す断面4, 10を選んだ。これらの断面の3.3cm上流に陰極線を複数本設置し、気

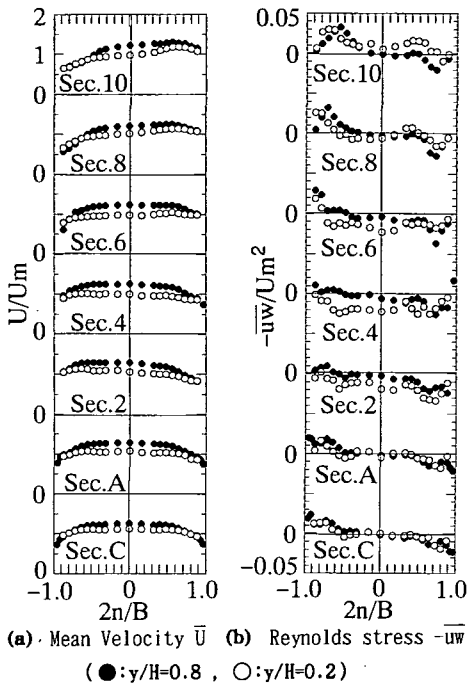


Fig.5 Velocity measurements (Horizontal plane)

泡を膜状に発生させながら、蛍光染料水溶液を上流から注入した。両トレーザーがスリット光膜を通過する際の流況を下流に置かれた鏡を通して撮影した。

流速計測では2成分のレーザー流速計（最大出力5W, DANTBC）を用いて、各断面の法線に沿って主流速（ \bar{U} ）とレイノルズ応力（ $-\overline{uw}$ ）を計測した。また、蛇行部の外岸側壁付近における主流速、流れ方向および鉛直方向の乱れ強度（ u' , v' ）、レイノルズ応力（ $-\overline{uv}$ ）の鉛直方向分布を測定した。その際、主流速は各断面における法線に垂直な方向とした。また、横方向流速は右岸方向を正、鉛直方向流速は水面方向を正とした。実験条件を Table 1 に示す。

3. 実験結果および考察

(1) 考察の視点

水路蛇曲部の側壁領域の乱流構造を考察する際には、以下の視点を踏まえる必要がある。

- ① 水路蛇曲部では線形効果による乱流第1種二次流れが発生し、その発達に伴って大規模な組織構造と二次流れを形成させることが推測される。それを踏まえて考察する必要がある。
- ② 大規模組織構造と二次流れの特徴を明らかにするには、流れの方向および横方向の構造性を明らかにし、それらの総合的な考察が重要である。そのため、組織構造と速度情報を詳察する必要がある。

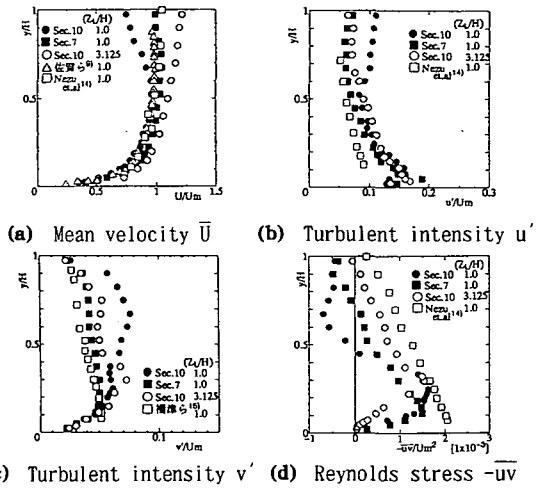


Fig.6 Velocity measurements (Vertical plane)

③ 側壁近傍の組織構造と瞬時速度せん断の相互関係を考察する必要がある。

④ ③の大規模構造と平均速度分布、乱れの統計量との相互関係を明らかにすることが重要である。

(2) 流速計測結果

流速計測の結果を Fig.5 に示す。Fig.5(a) は、水面付近（ $y/H=0.8$ ）と底壁付近（ $y/H=0.2$ ）における主流速 \bar{U} の法線方向分布である。直線部の \bar{U} は、水路中央付近に一樣流速の領域が存在する左右対称な分布を呈している。ところが、蛇曲部においては一樣流の領域が消え、内岸側で高速、外岸側で低速の非対称な分布を示している。側壁近傍の \bar{U} の流下方向変化に注目すると、左岸では加速から減速へ、右岸で減速から加速へと変化して、互いに逆の加減速特性を示している。

Fig.5(b) は、レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の法線方向分布である。直線部で $-\overline{uw}$ 分布は、側壁近くでピーク、水路中央で零の点对称の分布を示すが、蛇行部に入るとその絶対値は横方向に内岸でより減少、外岸でより増加の非対称な分布を示すようになる。

一方、流下方向には、 $-\overline{uw}$ の絶対値は左岸（内岸から外岸に変化）で減少から増加、右岸（外岸から内岸に変化）で増加から減少へと変化し、湾曲の効果が両側壁領域に出現している。さらに、断面 4~10の左岸側壁領域に注目すると、 $-\overline{uw}$ は、流下方向に増加するとともに、そのピークの位置が対岸方向に移動していることが注目される。これは、流下とともに、乱れによる横方向への運動量輸送が増大することを意味し、そこに、強力で大規模な組織構造が形成され、それがこの運動量輸送を担うと考えら

3の断面においては、それが断面平均流速 U_m と同程度の領域も出現している。また、その高速域は、流れ方向に小変動を伴いながら非常に長い（水深の5～6倍程度）構造を有している。第2は、壁近くで、流れ方向に高速、低速を交互に繰り返す、小スケールの変動性が認められることである。

この半水深付近の高速域とその上下の低速域の境界では、負および正の瞬時速度勾配が形成され、そのせん断特性を Fig.12(b) に示す。このせん断特性の第1は、「負のせん断領域」が組織構造の縦断面形象の周辺に形成されることである。L1においては、LSS (SD②～④) に沿って負のせん断領域が流れ方向に連なって長く分布し、大規模な負のせん断領域を形成している。L2, L3においても、水表面に形成された大規模組織構造の下部に負の高せん断領域が形成されている。第2は、底壁付近に正の高せん断層が流れ方向に長く形成され、上述の「負のせん断領域」とともに「大規模な2重せん断構造」が形成されていることである。この構造の特徴は、壁近くで正の高せん断層がy方向に狭い領域 ($y/H < 0.25$) で形成され、水面付近 ($0.6 < y/H < 1.0$) で、相対的に弱い負のせん断層がy方向に広く形成されることにある。しかも、Fig.12(c) に示したこの壁近くの高せん断層においては、流れ方向に速度せん断の値が増減（同図 (a) のUの加減速変動と対応）を繰り返し、流下とともに壁近くの数値を徐々に増加させていることが明らかである。これは、流下方向の壁面せん断応力の増加を意味し、河床の洗掘現象と直接関係する重要な特徴と考えられる。

さらに、Fig.12(d) に瞬時鉛直方向流速Vの等値線図を示す。L1では、ほとんどの領域で、xとy方向に小スケールの変動を示しながらも、全体的に上昇成分が卓越している。また、下流の水表面付近の染料集中領域では、正と負の変動が混在している。L2, L3では、水表面付近の大規模な組織構造の前部で下降成分、内部で正と負の成分が流れ方向に交互に存在する特徴が観察され、しかも水深方向にも上昇、下降の変動スケールが増加していることが注目される。とくに、壁近くの上昇と下降運動が、上述の Fig.12(c) における壁近くの高せん断層の厚さの増減と対応していることが注目される。さらに、上述のように、これらの断面における特徴は、壁から離れた領域で高速化することであり、この特徴とV成分分布特性を併せて考えると、高速下降、高速上昇の二成分流速パターンの分類が可能となる。前者は、SD⑦の上流側で、後者は、この下流側で典型的に示される。とくに、断面10 (Fig.6(d)) において、負の $-uv$ が発生した理由は、この高速上昇領域が大

規模に発達したためと考えられる。

以上のように、外岸部の側壁領域においては、内岸に向かう横流れとともに、流れ方向にも大規模な高せん断層が形成されるという特徴が明らかである。

b) 右岸側壁領域

Fig.13 は、右岸側壁付近のR1, R2 (Fig.4 参照) における染料流脈形象の可視化写真である。この両断面における上述の流向パターンとその出現率は、それぞれ「下降・上昇(63%)」、「上昇・上昇(54%)」である。また、R1における染料流脈形象は、壁近くから緩やかにほぼ半水深位置まで上昇しているが、Fig.14(a) から明らかなように、それらの上部の染料の存在していない領域で高速域が形成されている。この高速化は、左岸 (L2, L3) と比較して、流れ場全体がより高速化したことに加え、局所的に断面平均流速よりも大きい値で半水深付近に実現されている。また、この断面は、従来より「水衝部」と呼ばれているが、それは、これらの「二重の高速化」として特徴付けられる。R2においては、壁近くから水表面に向かって傾斜しながら上昇する染料流脈形象が特徴である。この場合も流れ場全体として高速化されているが、最高地点は半水深から水表面付近まで分散して局所的に存在している。

次に、Fig.14(b) に鉛直方向瞬時速度Vを示すが、これより、上述の流向パターンの決定の妥当性が明らかである。R1では、上流側の水表面付近から壁に向かう下降流が形成されており、下流側では、逆に流れ場全体にわたって上昇成分が顕著である。ところが、R2では、上下流にわたって上昇成分が大部分を占めている。また、Fig.14(c) に瞬時速度せん断を示すが、左岸との比較では、水表面付近から壁近くに至る大規模な負のせん断層がR1, R2には形成されていない。また、R1, R2については、y方向に正負の3重せん断構造が局所的に (SD⑤, ⑥) に形成されている。また、R2では、流れ方向に傾斜する正負のせん断構造が交互にy方向に重なって形成されている。これは、通常の壁乱流に観察される構造に類似しており、右岸では、流下とともに、通常の壁乱流に近い構造が形成されていると考えられ、横流れによる大規模な3次元化が促進される左岸とは大きく異なっているように思われる。

4. 結論

蛇曲水路側壁領域における大規模組織構造と2次流れの構造を究明し、以下の結論を得た。

(1) 直線から外岸に向かう蛇曲水路側壁領域では、第1種二次流れに起因する横流れの発達に伴っ

れる（詳しくは、後述）。一方、水路中央部では、 $-\overline{uv}$ のy方向分布が場所によって異なることを明らかにした¹¹⁾。この傾向は、側壁領域においても同じであり、断面4と10の左右両岸近くでは、底壁近くと水表面付近で $-\overline{uv}$ 分布に大きな相異が認められる。

Fig.6は、断面7, 10の左岸側壁から4.0cm ($Z_i/H=1.0$)における主流速 \overline{U} 、乱れ強度(u', v')、レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直方向分布である。同図には直線開水路の側壁領域の流れとの比較のために、佐賀ら⁹⁾、禰津ら^{14), 15)}の計測結果を付記した。

同図(a)より、蛇曲水路の外岸側壁付近の主流速 \overline{U} は、相対的に水表面付近で低速化、半水深付近で高速化する分布特性を有している。これと同様な特徴が玉井ら⁵⁾、池田ら⁹⁾によっても報告されている。また、この特徴に伴って底壁側には正、水表面側には負の速度勾配が形成され、直線開水路乱流の側壁付近の結果とは大きく異なっている。(b)の乱れ強度 u' は、禰津らの結果¹⁴⁾よりもやや大きいが、断面ごとの差は半水深以上の領域で発生している。また、断面10では、中央と比較して、半水深以上でより大きな値を示している。これらの傾向は(c)の v' においても同様で、壁から離れた領域で顕著な相異が発生している。この相異は、(d)の $-\overline{uv}$ においても明らかであり、壁から離れた領域で $-\overline{uv}$ の減少および負値の発生が顕著である。このように、外岸部においては、水表面、半水深付近の相対的な低、高速化および正、負の速度勾配の発生、また、半水深以上での u' 、 v' の増大、負のレイノルズ応力の発生が顕著な特徴として明らかである。

(3) 水路蛇曲部の3次元流況

Fig.7は、蛇曲部における実体写真である。流れ方向は下から上で、白い部分が蛍光染料水溶液によって可視化された組織構造で低速領域を、黒い部分が相対的な高速領域を表現している。この実体視によって、水路蛇曲部に形成された組織構造は、流れ方向、横方向に大規模なスケールを有し、しかも第1種二次流れの方向に傾斜する（後述）という共通した特性を有することが観察される。

図中の、P①、②、③の各種low speed streaks（以下、LSSsと呼ぶ）は左岸側壁に沿って流下方向に形成されている組織構造を示している。P①は、左岸側壁上に形成されたLSSsであり、その先端はまだ水表面には到達していない。P②では、LSSsが水表面まで達し、その横方向スケールは水深程度まで発達している。また、P③では、水深スケールの横幅を有する組織構造がさらに発達し、その先端は水深の約2倍まで達している。このP①～③では、流

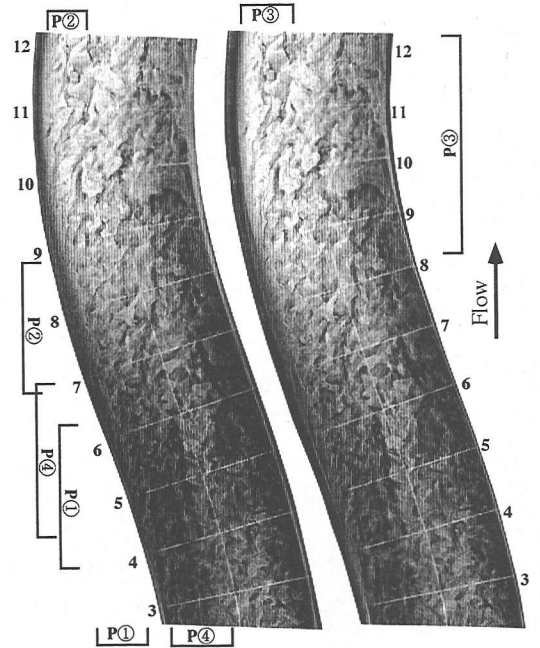


Fig.7 Stereoscopic photograph of coherent structure of turbulent meandering channel flow

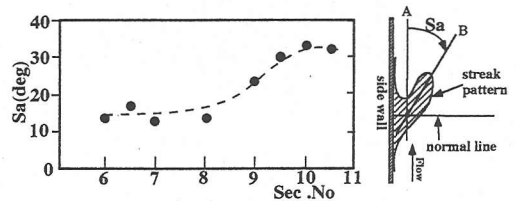


Fig.8 Inclination angle of coherent structure formed near left side wall

下方向に組織構造の発達の度合いが大きく異なり、そのスケールは横方向および流れ方向に、水路中央方向への傾斜を伴いながら増大している。P④は、水路中央部に形成された大規模な組織構造であるが、その横幅スケールは水深程度、流れ方向スケールは水深の4～5倍程度を有する。また、その平面形状は水路中心線に沿わず、右岸方向へ傾斜している。この傾斜は、第1種二次流れに起因した横流れによって形成されるが¹¹⁾、それは中央部のみならず蛇曲水路側壁領域においても明らかである。

そこで、左岸側壁に沿って形成された組織構造が水表面に接した部分の傾斜角を計測し、**Fig.8**に示した。これより、流下方向に組織構造の傾斜角度は、徐々に増大し、断面10では30度を越えている。

このように側壁領域の組織構造は、水路の蛇曲に伴って流れ方向、横方向に大規模化することが明ら

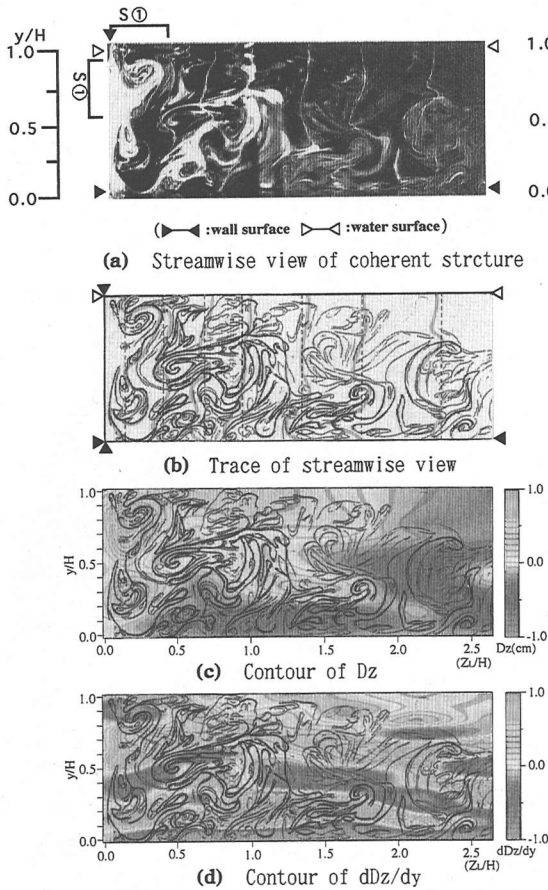


Fig.9 Streamwise view of Sec.4

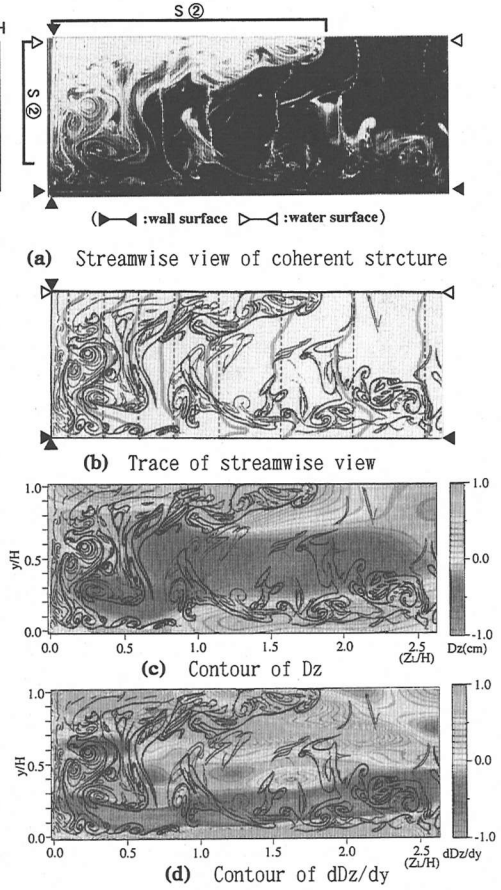


Fig.10 Streamwise view of Sec.10

かであるが、以下それらと二次流れ、瞬時速度分布との相互関係を詳しく考察する。

(4) 側壁近傍の二次流れの構造

断面4における左岸側壁付近の横断面視の結果を Fig.9(a) に示す。図中の7本の白く写る細線は、上流に設置された水素気泡流脈の横断面形象である。また、写真内にはこの流脈とともに、蛍光染料による組織構造の横断面形象も同時に可視化されている。図中のS①は、Fig.7のP①に示されたLSSの横断面形象と同様なものと考えられる。この水素気泡および染料形象は組織運動の部分的反映と考えられることから¹¹⁾、そのせん断特性と二次流れの構造を以下に検討する。

この横断面の両形象をよりわかりやすくするために、同図(b), (c)に、流脈形象のスケッチと水素気泡流脈の横方向変位量(Dz)の等値線図を示す。

これより第1の注目点は、壁近くで第1種の二次流れに起因する大規模な横流れが形成され、各水素

気泡の流脈が内岸方向にいずれも変位し、その横方向スケールは半水路幅程度の大規模な構造を呈していることにある。第2は、側壁領域の水表面近くで、底壁近くとは反対の外岸方向へ横流れが形成されていることである。しかし、この場合の水素気泡流脈の各横方向変位は、底壁の壁近くよりも小さく、より緩やかな横流れとなっている。第3に、これらの中間領域では、強力な組織運動によって水素気泡流脈形象が鋭く左右に揺動し、局所的に互いにそのせん断の方向が異なる高せん断層を発生させていることである。これらは、同図(d)のdDz/dyの等値線図でより明らかである。Dzは横方向流速に比例していると考えられることから、その勾配は、流体力学的には横方向せん断の反映と考えられる。すなわち、壁近くでは、負の高せん断層がy/H<0.1において半水路幅スケールで形成されていることが明らかである。また、0.1<y/H<0.7では、水深および横方向において、交互に正負のせん断層が形成されている。この水深方向に高せん断領域が形成される現象は、

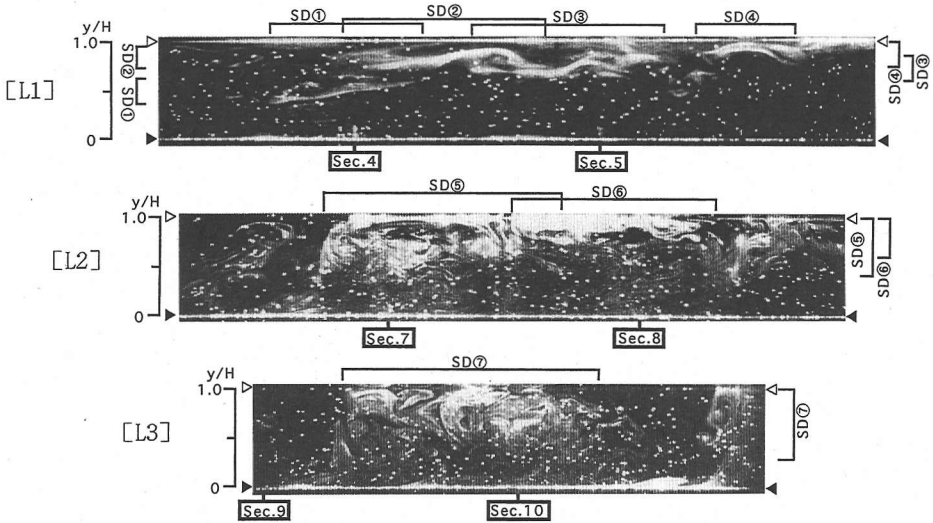


Fig.11 Side views of coherent structure formed near left side wall

前報¹¹⁾の蛇曲水路中央断面においても観察されている。しかし、この場合、水路側壁近くでは、高せん断の横方向スケールが中央側と比較してより小さく、3次元性に富む構造が形成され、上流からの乱流二次流れの構造が維持されている。

Fig.10(a)～(d)は、断面10における前図と同じ一連の図である。これらから、まず第1に、水路中央部から外岸方向に大規模な横流れが形成されていることが注目される。この横流れは、水深方向に半水深程度、横方向に半水路幅程度の大規模なスケールを有している。第2は、壁近くの横流れが、断面4とは逆方向で、壁近くの二重せん断層の符号が逆転していることである。第3は、水面近くに、大規模な内岸に向かう構造が形成されていることである。この内岸方向の横流れの形成に伴って、外岸側壁付近の組織構造の対岸方向への傾斜角が増大すると考えられる。図中のS②は、Fig.7のP③に示された大規模組織構造の横断面形象と同様なものと考えられる。この染料流脈パターンと横流れの界面付近では、正の高せん断層が形成されている。この高せん断層は、横方向の流体輸送が著しいことを示しており、これが上述の $-\overline{uw}$ の増大(Fig.5(b))や、断面10における半水深以上における乱れ強度 u' 、 v' の増加、負の $-\overline{uv}$ の形成に寄与していると考えられる。このように、本断面では、壁近くと水表面付近で横方向に大規模な高せん断領域が形成され、第1種二次流れがより大規模に発達することが明らかである。

(5) 側壁領域の組織構造と瞬時速度情報

a) 左岸側壁領域

Fig.11は、左岸側壁付近のL1～L3(Fig.4参照)に

おける染料流脈形象の可視化写真である。これらの流脈形象と同時可視化された粒子流跡写真について、各断面について100枚程度を流向パターンで9種類に分類した。このパターンは、粒子流跡の縦断面可視化写真から決められた。可視化写真を中央部で上・下流に二分し、それぞれの領域の瞬時ベクトル分布から、上昇、下降、水平の3パターンに概略的に分類した。その流向パターンと出現率は、L1で「上昇・上昇(47%)」、L2では「下降・上昇(49%)」、L3では「下降・上昇(49%)」であった(ただし、写真の左右両端付近では、この分類に従わない場合もあった)。

L1は、凸岸下流の側壁近傍の流れの縦断面であり、断面4付近で側壁に沿って斜めに上昇するLSS(SD①)が観察される。なおSD①は、Fig.7のP①に示されたLSSおよびFig.9(a)のS①に示された組織構造の縦断面形象と同様なものと考えられる。このLSSは、断面4と5の中間付近で水表面に達し、その後は水表面付近で流下方向に長く、集中して連なる形象(SD②～SD④)を呈している。L2、L3の断面においては、大規模な塊状のLSSの集中領域(SD⑤～SD⑦)が観察される。SD⑤、⑥は、Fig.7のP②に示されたLSSの縦断面形象と同様なものと考えられる。また、SD⑦は、Fig.7のP③に示されたLSSおよびFig.9(a)のS②に示された組織構造の縦断面形象と同様なものと考えられる。これらL1～L3の大規模なLSS集中領域(SD①～SD⑦)は相対的に低速域、そしてその下部の染料が存在しない領域は高速域であることが、Fig.12(a)の瞬時主流速 U の等値線図から明らかである。これより注目点の第1は、最高速度が壁近くの $0.2 < y/H < 0.5$ に発生していることであり、L2およびL

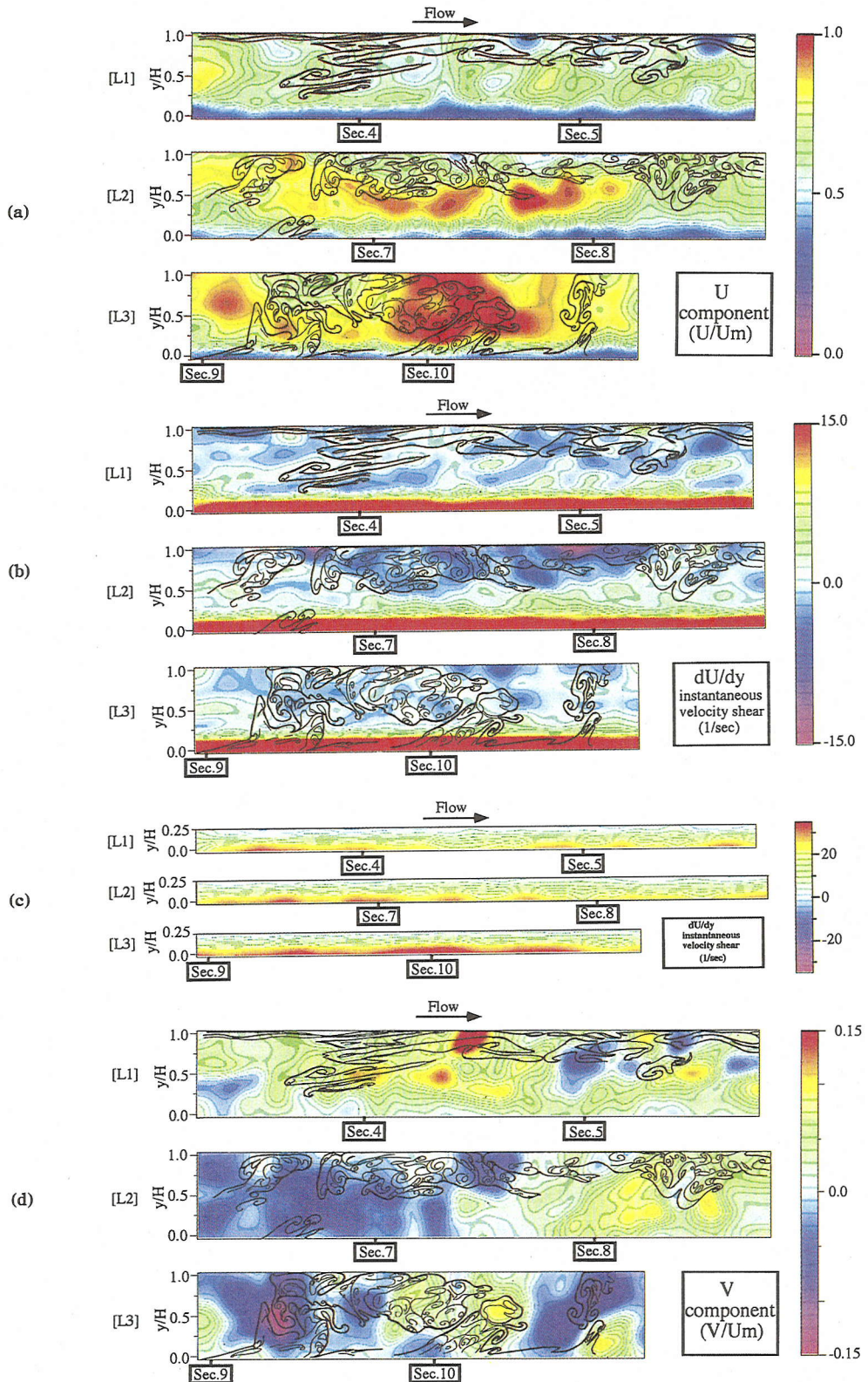


Fig.12 Correlation between coherent structure and instantaneous velocity profiles

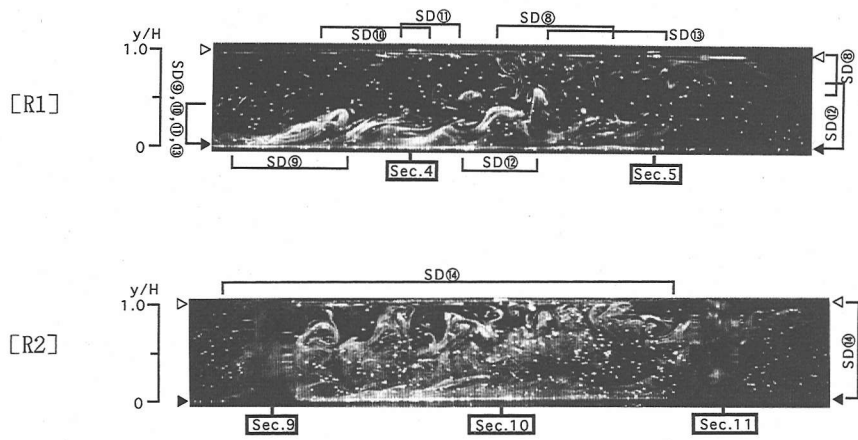


Fig.13 Side views of coherent structure near right side wall

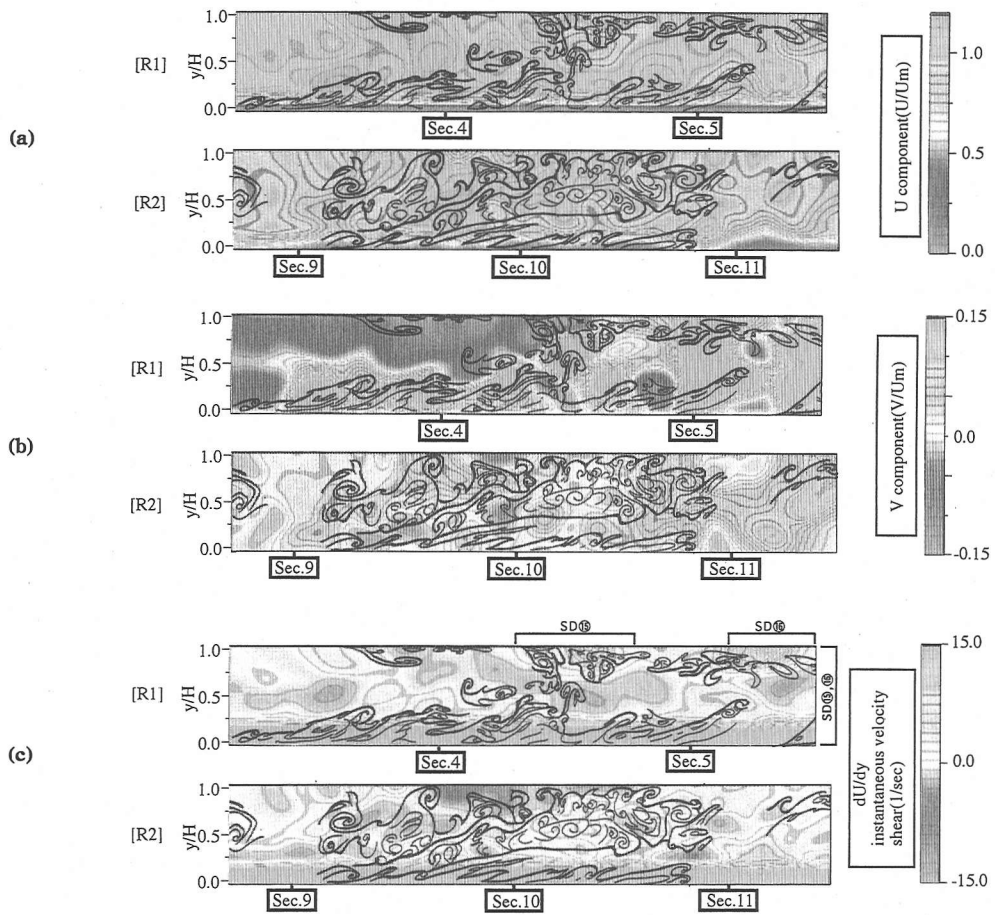


Fig.14 Correlation between coherent structure and instantaneous velocity profiles

て、組織構造が横方向に大規模化し、対岸方向への傾斜角度を増大させる。また、この大規模組織構造は、水表面付近の u' 、 v' および $\overline{-uw}$ の増大、負の $\overline{-uv}$ の形成に重要な役割を果たしている。

(2) 直線部から外岸へ向かう蛇曲水路側壁領域では、第2種二次流れから第1種二次流れへと変化し、それに伴って底壁付近に、横方向に正負の2重の高せん断層が形成される。また、高せん断層は、内岸と外岸で、壁と垂直方向にその正負が逆転する。

(3) 外岸側壁領域には、底壁近くから半水深付近に正の高せん断層が、半水深付近から水表面に負のせん断層が形成される。この両せん断層に挟まれた領域では、蛇行波長の4分の1を越える大規模な高速領域が流れ方向に形成される。

(4) 外岸から内岸に向かう側壁領域(右岸)では、半水深位置の加速を伴う流れ場から、全体が高速化される流れ場に流下に伴って変化し、通常の壁乱流のせん断構造に近づく。この流速分布とせん断特性は、対岸(左岸)とは大きく異なる。

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から有益な助言をいただいた。また、本研究は文部省科研費(奨励研究A:08750639)の支援を受けた。ここに記してともに謝意を表します。

参考文献

- 1) Bradshaw, P.: *Turbulent Secondary Flows*, *Ann., Rev. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 53-74, 1987.
- 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) 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.
- 4) Humphrey, J. A. C., Whitelaw, J. H. and Yee, G.: *Turbulent Flow in a Square Duct with Strong Curvature*, *J. Fluid Mech.*, Vol. 103, pp. 443~463, 1981.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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応力場解析, 日本機械学会論文集(B編), 61巻584号, pp. 85-93, 1995.
- 9) 佐賀孝徳, 大成博文, 斎藤隆：開水路乱流側壁領域の組織構造に関する研究, 土木学会論文集, 第443号/II-18, pp. 55-63, 1992.
- 10) 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.
- 11) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆：水路の蛇曲に伴う大規模二次流れの構造, 土木学会論文集, 第551号/II 37, pp. 38-47, 1996.
- 12) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆：壁乱流における流脈パターンと瞬時流跡の同時抽出, 水工学論文集, 第37巻, pp. 829-832, 1993.
- 13) 大成博文, 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 斎藤隆, 波多野慎：壁乱流の縦断面せん断構造, 土木学会論文集(掲載予定)
- 14) Nezu, I., Nakagawa, H. and Tominaga, A.: *Secondary Currents in a Straight Channel Flow and the Relation its Aspect Ratio*, *Turbulent Shear Flows 4*, Springer-Verlag, pp. 246-260, 1985
- 15) 柵津家久, 中川博次：一様開水路および閉管路の三次元乱流構造に関する研究, 土木学会論文集, 第369号/II-5, pp. 89-98, 1986.

(1996.11.15受付)

TURBULENT STRUCTURE OF CORNER REGION AFFECTED BY CHANNEL MEANDERING

Katsutoshi WATANABE, Hirofumi ONARI, Takanori SAGA and Takashi SAITOU

Characteristics of turbulent structure of corner region affected by channel meandering are investigated using LDV measurements and DPTV (Dye streak pattern Particle Tracking Velocimetry) which visualize dye streak pattern and particle path line simultaneously. First kind of secondary flow develops opposing to second kind of secondary flow of corner region in straight open channel flow. The development of secondary flow results in arising of large-scale coherent structure which contribute to generate large-scale shear structure with different characteristic for the left and right side wall region.