

# 開水路乱流側壁領域の組織構造と 二次流れの形成機構

佐賀孝徳<sup>1</sup>・大成博文<sup>2</sup>・渡辺勝利<sup>3</sup>・杉本博幸<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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 (〒745-8585 山口県徳山市久米高城 3538)

<sup>2</sup>正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (〒745-8585 山口県徳山市久米高城 3538)

<sup>3</sup>正会員 工博 徳山工業高等専門学校助手 土木建築工学科 (〒745-8585 山口県徳山市久米高城 3538)

<sup>4</sup>学生会員 徳山工業高等専門学校専攻科 環境建設工学専攻 (〒745-8585 山口県徳山市久米高城 3538)

側壁領域の水表面部に横断面視、水平断面視、また二象限同時可視化を適用することにより、水表面部に形成される組織構造の特徴を考察した。この組織構造は、側壁に形成された壁縦渦が水表面へ発達し、そこからその片側の渦はさらに水表面に沿って水路中央へ発達する準周期的な渦構造であり、この渦構造は、河岸ボイルの形成に重要な役割を演じている。この水表面部の組織構造とこれまで明らかにした隅角部の組織構造が誘起する瞬時の二次流れの特徴について、流れの可視化とPTVを同時に行なうことの可能なDPTVを横断面視に用いて検討を行ない、水表面に形成する渦構造は側壁方向へ向かう瞬時の二次流れとボイルを誘起すること、隅角部に形成される壁縦渦構造が隅角に向かう瞬時の二次流れを形成することを明らかにし、長時間平均像の二次流れの形成機構について言及した。

*Key Words* : coherent structure, corner flow, secondary flow, wall streamwise vortices

## 1. 結論

開水路乱流側壁領域は、側壁より形成される境界層が水表面の境界条件に制約を受けた水表面部と、底壁、側壁から境界層が交互に発達する隅角部の両者が存在する。

境界条件の異なる自由表面と固体壁面からなる隅角領域の二次流れに関する研究は、固体壁面どうしの隅角流れの研究に比べ極めて少ない。

固体壁面どうしによる隅角の乱流二次流れの研究は、Nikuradse<sup>1)</sup>により初めて行われた。彼の重要な結果は、層流に比較して乱流において主流速の等値線が隅角方向へ突出する形状を示すことから、高速流体が隅角へ輸送されていることを指摘したことである。その後、その二次流れの研究は、熱線流速計の開発に伴って、多くの研究者<sup>2)~4)</sup>によって行われ、乱れの非等方性により、隅角近傍に弱いけれども流れ場を三次元化する縦渦の存在が指摘され、流れの長時間平均場における考察が展開された。また、乱れの統計理論に基づく応力モデルを用いた二次流の計算<sup>5)</sup>、計算格子の以下の微細渦には応力モデルを用い、それ以上の構造には、Navier-Stokesの方程式を適用するLES (Large Eddy Simulation) を用いて低レイノルズ数で瞬時の二次流れの存在が示された<sup>6)</sup>。高

速流体が隅角へ流れ込む運動である実在の二次流れの形成機構を解明するには、瞬時の流れ場を追跡する組織構造に関する研究が必要である。しかしながら、Gregaら<sup>7)</sup>が、二次流れの研究をレビューしている中で「隅角部の組織構造に関する研究が欠落している事、そしてその原因は、それらの主要な研究のほとんどが、組織構造に関する研究の草創期に行われた事」を指摘している。

一方、自由表面と側壁により形成される二次流れの研究は、Sternら<sup>8)</sup>、Gregaら<sup>7)</sup>により行われている。Sternら<sup>8)</sup>は、三次元のレーザー流速計で自由表面近くの二次流れを計測しているが、計測の限界から自由表面より $70\nu/u_*$ までしか測定されておらず、水表面近傍の構造が明らかにされていない。Gregaら<sup>7)</sup>は流れの可視化とLDA、さらにDNSにより、水表面部の組織構造について考察を行ない、2つの二次流れ領域の存在を明らかにし、水表面渦<sup>9)</sup>の領域における流れの特徴、水表面渦と逆回転の縦渦がさらに水表面隅角近傍に存在すること、その付け根である低速渦の時間的変動特性、側壁近傍の流体塊が水表面へ輸送されることを示した。しかしながら、その流体運動の本質である組織構造についての特徴は、十分に明確に示されていない。

また、土木の分野において、富永・江崎<sup>9)</sup>、瀬津・

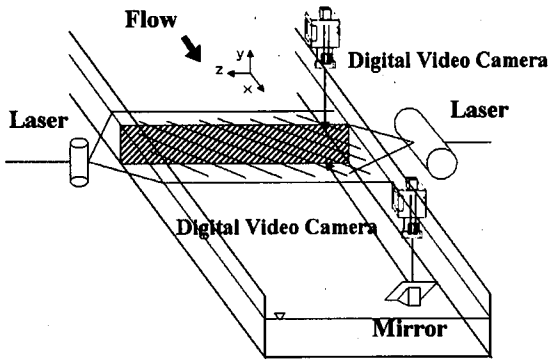


図-1 実験方法の概略

中川<sup>10)</sup>による乱流二次流れの計測による長時間平均された水面渦の存在と応力モデルによる二次流の計算、杉山らは、応力モデルを台形断面、複断面にも適用し、二次流の計算を行なっている<sup>11), 12)</sup>。複断面、植生といった特殊な境界条件を除いては、水表面部の組織構造に関する研究は行なわれていない。また、最近 PIV を用いて開水路乱流横断面内の瞬時流速を調べ、瞬時の 2 次流れの特徴とその大きさが主流速の 20% 程度であることが示されている<sup>13)</sup>。

佐賀ら<sup>14)</sup>は、3 つの断面視法を用いて、側壁領域に形成される組織構造を詳察し、側壁、底壁に形成される壁縦渦構造<sup>15)</sup>の配置特性により、隅角方向への瞬時の二次流れが形成されることを示した。また、それらの組織構造の特徴から三次元渦モデルと二次流れの形成機構を示している。その中で、水表面部の渦構造については、若干考察がなされているが、詳細な構造に関する検討は行なわれていない。

また、染料流脈パターンと粒子流跡を同時可視化する手法 (Dye streak pattern Particle Tracking Velocimetry<sup>16)</sup>, DPTV と省略) を開水路乱流側壁領域の横断面視に適用し、底壁に形成される壁縦渦構造と二次流れの若干の考察を行なっている<sup>17)</sup>。

以上の事を踏まえて、本研究では、可視化法を用いて側壁領域の水表面部に形成される組織構造の特徴を考察し、さらに側壁領域の横断面視に DPTV を用い、側壁領域の水表面部、隅角部に形成する組織構造が誘起する瞬時二次流れの特徴を明らかにする。そのことから、長時間平均像の二次流れの形成機構について考察を行なう。

## 2. 実験装置および方法

### (1) 実験方法

実験装置には、長さ 10m、幅 60cm、高さ 15cm、水路床勾配 1/1000 の総アクリル製水路が用いられた。上流に整

表-1 実験条件

	平均速度 $U_m$ (cm/s)	水深 $H$ (m)	$h/\lambda$ 数 $Re$	摩擦速度 $U_\tau$ (cm/s)	ストリークの発達領域 $W/H$	渦の水深方向スケール $D/H$
CASE-1	7.0	4.1	3077	0.47	1.8	0.28
CASE-2	3.6	8.1	3077	0.24	1.6	0.27
CASE-3	12.7	4.3	5807	0.84	1.3	0.29
CASE-4	7.0	7.9	5807	0.47	1.3	0.25
CASE-5	4.4	12.3	5807	0.30	1.2	0.21

流装置としてハニカム、乱流促進としてスプリングワイヤーが設置され、下流には水位調整用の堰が設けられた。実験装置の概略が図-1 に示されている。図中には、横断面視、水平断面視に用いる装置が含まれている。

横断面視では、側壁側より水路横断方向に厚さ 1mm のレーザースリット (2WA レーザー) が挿入され、下流 60cm に設置されたミラーを経由して水路上方よりデジタルビデオカメラによって撮影が行われた。

水平断面視では、実験領域に側壁からレーザースリット (2WA レーザー, 1mm 厚) を水表面近くの位置に挿入し、水路上方からデジタルビデオカメラにより撮影を行なった。また、両者を同時に用いた 2 象限可視化も行なった。可視化に用いられた染料はこれまでと同様の蛍光染料水溶液 (比重 1.005) であり、撮影断面の上流 3m の位置に、側壁、底壁の粘性低層内に注入した。注入時の擾乱が流下した後、側壁領域内の乱流運動によって巻き上げられた染料により、組織構造の形象の可視化が可能となる。

DPTV による可視化法では、開水路中に多数の微小粒子 (平均粒径 300  $\mu$ m のポリスチレン系微粒子) と、蛍光染料水溶液を注入し、写し出された映像を、デジタルビデオカメラにより撮影した。また、横断面視のスリット厚は 1cm (ハロゲンスリット, 1kw) とし、その中央にレーザースリット (1mm 厚) を入れ、可視化形象を鮮明にする工夫を行なった。

表-1 には、実験条件を示す。なお、摩擦速度については、開水路中央部の平均流速分布より求められた。

### (2) 解析方法

横断面可視化の DPTV による解析方法は、デジタルビデオカメラで撮影された 1/15sec 毎の画像を、SONY DV キャッチャにより 3 枚取り出す。画像処理ソフトを用いて画像の鮮明化を行い、3 枚の画像内の粒子をそれぞれ色別し、その後 3 枚を重ね合わせる。その結果、1/7.5 秒間の粒子の流跡が再現される。デジタイザーにより、その流跡の始点、終点の座標を入力し、0.1cm にメッシュ分割された流速ベクトルが求められる。また、解析の精度向上のため、ビデオカメラの球面収差の無い事を確認し、実験が行なわれた。

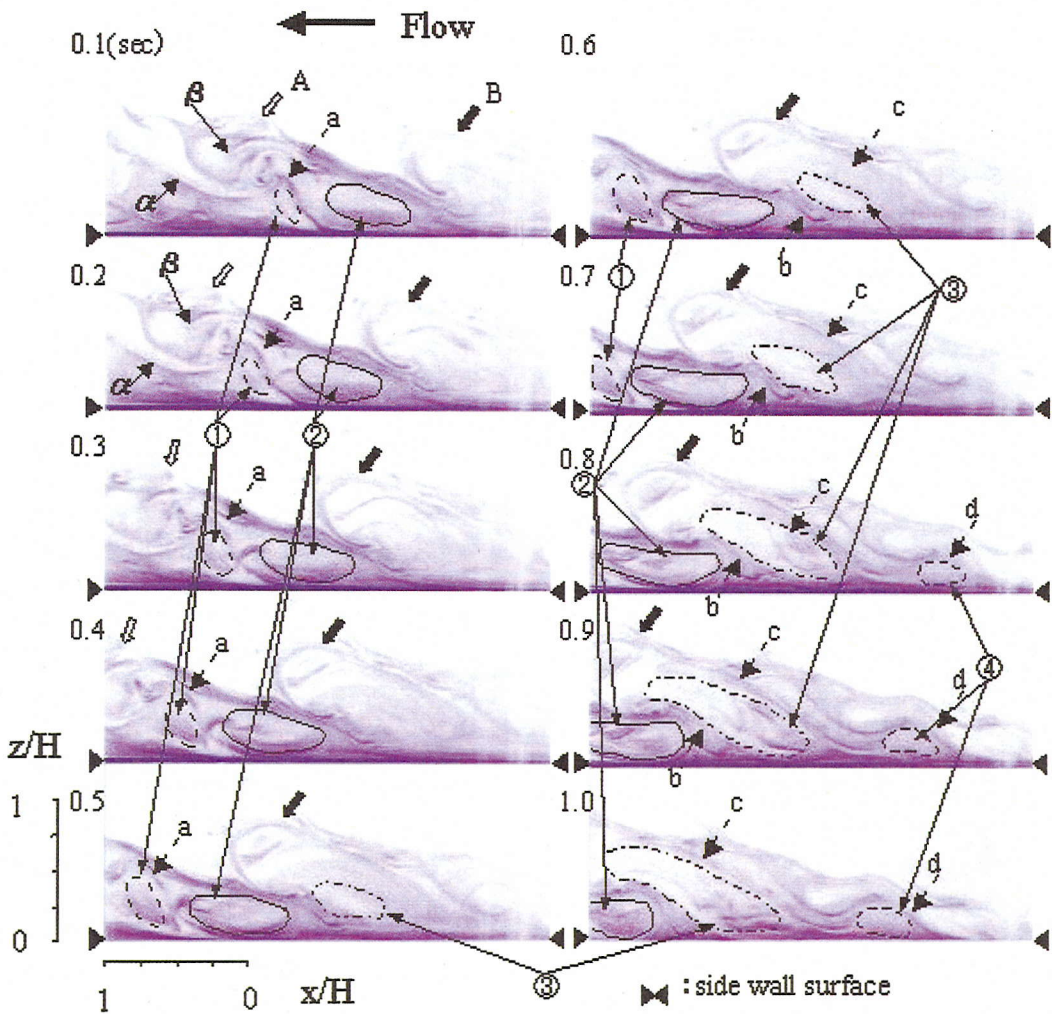


図-2 水表面近傍の水平断面視 (CASE-3)

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 視点

側壁領域の組織構造とそれに誘起される二次流れの考察を行なう上で、以下に示す視点が重要である。

①長時間平均像の二次流れと瞬時の二次流れを区別することが重要である。前者は、長時間平均操作を伴う乱流統計量に基づく二次流れであり、後者は、組織構造により形成される瞬時の二次流れ<sup>14)</sup>である。谷の指摘したように、長時間平均による縦渦の渦度もレイノルズ応力の非等方性も同じ二次流れの属性であり<sup>18)</sup>、その形成機構を解明するには、瞬時の流体運動である組織構造の時

空間特性とそれに誘起される瞬時の二次流れを明らかにすることが、重要となる。さらには、その組織構造の周期的な特性を明らかにする事で、長時間平均像の二次流れとの対応も明らかとなる。

②開水路乱流側壁領域は、底壁、側壁、自由表面の異なる境界条件により支配される複雑なせん断乱流である。そこで、側壁、底壁により構成される隅角部と自由表面と側壁により構成される水表面部に分けて考察する必要がある。特に隅角部については前報<sup>14)</sup>でその渦構造が詳細に調べられており、本論では水表面部の組織構造に注目する。

②水表面部は、側壁より発達する境界層が自由表面に

より制約を受け、固有の隅角流れが形成される。そこで、その組織構造を明らかにすることが重要であり、特に、河岸水表面に発生するボイルとの相互関係を明らかにし、ボイルの構造的特徴と形成機構を考察する。

③本報で考察された水表面部にこれまで組織構造を明らかにした隅角部を加えた側壁領域全体に存在する組織構造と瞬時の二次流れの直接的な相互関係を考察する必要がある。そのことを、踏まえて二次流れの形成機構の考察を行なう。

## (2) 水表面部の組織構造

### a) 河岸水表面の染料流脈と河岸ボイル構造

図-2 は側壁近くの水平断面可視化の連続画像である。画像は、1/10 秒間隔で撮影されている。この図中で、それぞれの下端が側壁に対応し、流れ方向は、右から左である。可視化された断面の高さは  $y/H=0.99$  であり、形象を明確にするために、画像処理が加えられている。なお、この低  $Re$  数の水理条件では、水面波の影響はなく明瞭な可視化形象が得られた。

画像処理を加えない状態では、ストリークが側壁方向から水路中央方向へ発達する現象の形象のみ観察されるが<sup>7)</sup>、画像処理を行うことでトレーサーの少ない領域も表現され、ストリークを輪郭とするバルジに類似した形象の境界層全体の構造が連続して発達していることが明らかになる。ここで、ストリークとは染料流脈の集中した領域であり、バルジは、境界層外端に観察される乱流非乱流の凹凸形状の組織構造である<sup>19)</sup>。

この側壁より発達する境界層を詳察すると、図示された2つの大規模化した構造A、Bが流下方向へ形象を変化させながら移動する。そのAの下側に傾斜角の大きいストリークaが急激に発達している。これは、ビデオ画像より観察するとAの境界層より下流側にある境界層の「背」と言われる部分(図中の $\alpha$ )の形象がAの先端に存在する水平渦(図中の $\beta$ )の巻き込み運動に伴って急激に持ち上げられたものである。さらに、aの先端部はA先端部の水平渦(図中の $\beta$ )と同様の反時計方向の回転形象を示しており、特に注目する点は、そのストリークの側壁側で主にストリークに向かう流れを伴うボイルと思われる湧き上がり現象(図中の①)が発生していることである。そのボイルも側壁から離れた位置から壁方向へと領域を拡大している。

それに続いて、②の領域においても境界層Aの「背」であるストリークに主として向かう流れを伴うボイルの湧き上がり現象が認められる。これも、下流側の側壁より離れた領域から上流側の側壁方向へと領域を拡大している。さらに、その境界をなすストリークbについてもaと同様の傾斜角を増加させる現象が認められる。そして、ストリークbの直上流部でボイルの湧き上がり現象(図

中の③)がBの中で認められる。このボイルはストリークcに沿って大規模に発達する。さらに、その上流側で④のボイルの湧き上がり現象がストリークdの側壁側で発生する。このように、側壁領域の水表面近傍には、境界層外端で観られるバルジの形象に類似した構造が多く観察され、その外端であるストリークの内側では、主としてストリーク方向の流れを伴った湧き上がり現象である河岸ボイルが発生している。

このボイルは、側壁から離れた領域でも認められ、範囲が  $z/H=0.4\sim 2.0$  と様々であり、図-2のように一度ボイルが発生すると、それに連鎖して多くのボイルが側壁付近に集団的に形成される特徴も認められた。ボイルが側壁近傍に発生すると、その付近に存在していたストリークは、側壁に対する傾斜角を大きくしながら中央に向かうことが認められた(図-2中のa、b)。

これらのボイルの配置特性は、Grega<sup>7)</sup>が観察したストリークの発達する方向に連なる配置特性と一致する。

表-1には、異なる水理条件における水路幅方向のストリークの平均的な発達領域の水深による無次元化された値( $W/H$ )が示されている。これより、ストリークの平均的な発達領域は、 $W/H=1.2\sim 1.8$ の範囲であることが認められる。また、図-2中で指摘されたストリークの側壁側に、流体が湧きあがるボイルがどの条件からも多く認められた。

次に、ストリーク、ボイルの組織構造をより詳しく考察するために、水平断面と横断面の可視化を同時に行う2象限可視化による検討を行った。

### b) 側壁に形成される壁縦渦構造と水表面の組織構造

2象限同時可視化によって得られた画像を図-3に示す。

上部が水平断面、下部がそれと同時刻に撮影された横断面を表しており、流れ方向は、手前から奥に向かって流れている。画像の左端が側壁を示している。

水平断面には、図-2で考察したストリークが側壁より発達する形象が示されている。また、横断面視では、底壁、側壁より壁縦渦の発達した横断面形象<sup>14)、15)</sup>が認められる。また、水表面にも大きく発達、変形した渦形象(図中のa)とその水路中央側に円形の渦形象(図中のb)が存在する。渦の横断面形象については渦軸が横断面に対して垂直でない場合は、渦の断面形象は変形することが知られており、aの渦形象については、水路中央方向に渦軸が傾いていると思われる。このことは、側壁より発達する組織構造としての縦渦構造が水路中央方向へ傾斜することであり、その渦軸に直行する方向の渦運動と流体輸送が活発化されることを意味する。

この2象限同時可視化により明らかにできる点は、両断面形象より3次元構造が考察できる点にある。このa渦の横断面形象の両端は、それぞれ水平断面視で可視化されたストリーク①、②に対応する。またb渦の横断面

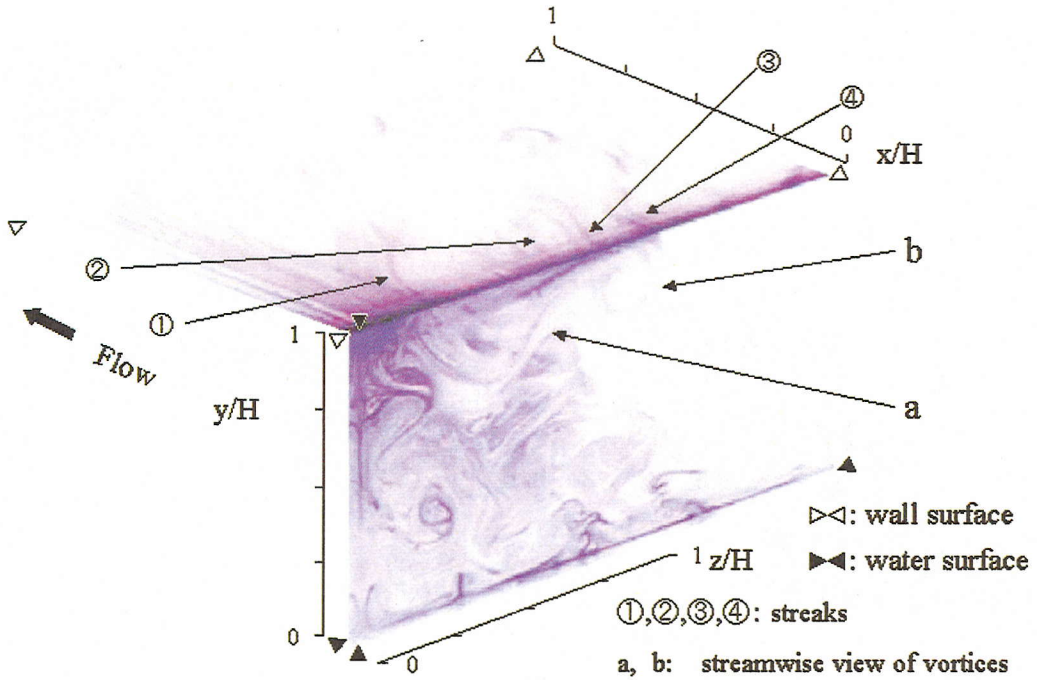


図-3 水平断面視と横断面視の2象限同時可視化 (CASE-3)

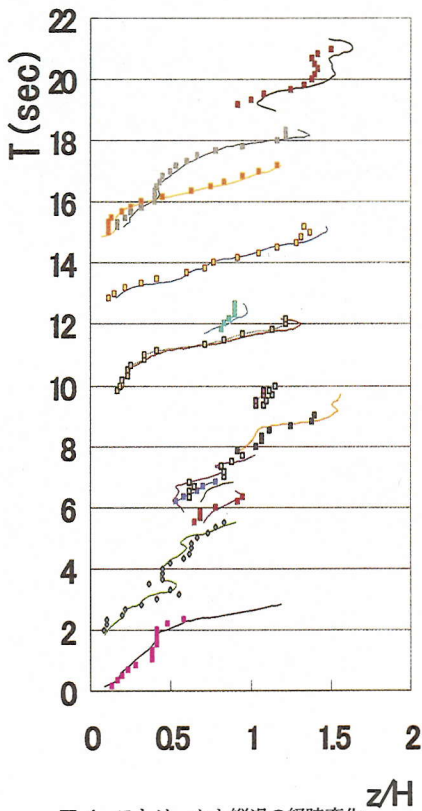


図-4 ストリークと縦渦の経時変化

形象の両端はストリーク③、④に対応する。このことは、図-2で考察したストリークとその側壁側に形成されるストリーク方向の流れを伴って回転するボイルの沸き上がり現象に対応する。特に、②、④のストリークは水平断面視で観察された境界層の「背」に対応し、①、③は、図-2でも見られるボイルに伴って現れる短いストリークである。これより顕著なことは、水平断面で観察されるストリーク<sup>7)</sup>と縦渦の横断面形象(水路中央側)がよく対応していることである。また、bについては、その渦の回転方向は時計回りであり、aについては、ボイルを形成し、その領域が拡大した後の可視化形象と思われる。また、その他の2象限同時可視化画像からも、縦渦とストリークの同様の対応がよく認められた。

次にストリークと水表面近傍の縦渦の対応を明らかにするために、同時可視化されている断面の同時刻に通過するストリークと縦渦(水路中央側)の側壁からの距離を測定した。図-4は、それをグラフに表したものである。縦軸は時間軸(sec)を示し、横軸は側壁からの距離を  $z/H$  で示した。また、グラフ内で、ストリークの位置は実線で示され、縦渦の位置は点で示されている。これにより、ストリークと縦渦(水路中央側)の位置がよく一致しており、両者の対応が明確に示された。ストリークを示す実線は、側壁近くでは傾き角が比較的大きく、離れるに従い小さくなる傾向にある。このことは、ストリークの



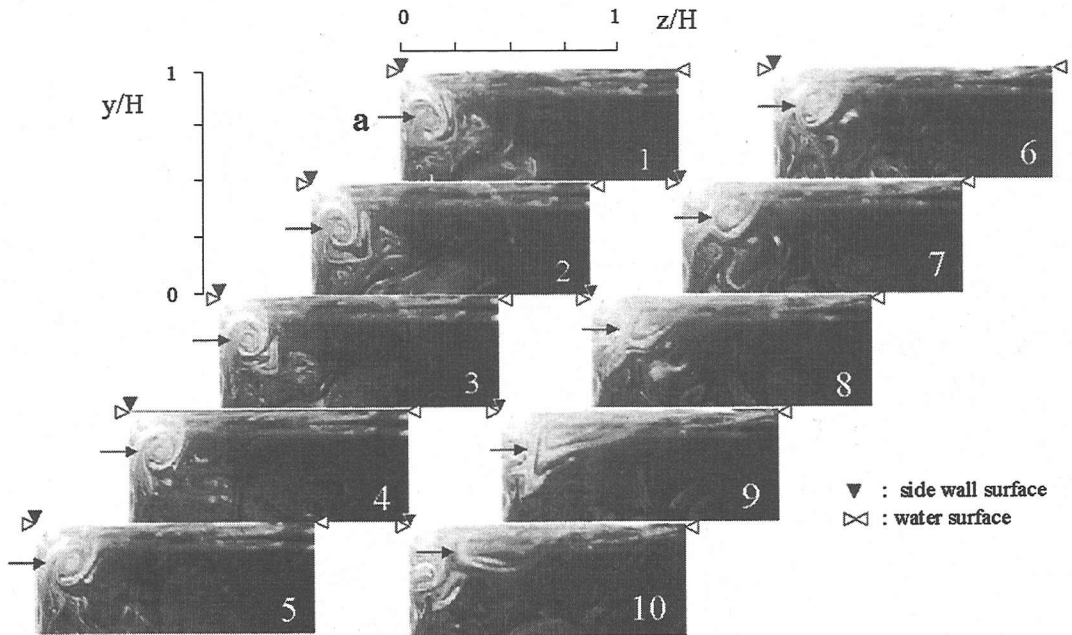


図-5 水表面近傍の横断面形象の経時変化 (CASE-3)

水路中央への発達速度が側壁では遅く、水路中央側で速くなる傾向を示している。また、ストリークが形成される平均周期  $T$  は最大流量と水深で無次元化すると  $U_{max} \cdot T / H = 2.2$  であった。

表-1には、種々の水理条件の下で、この水表面に形成される縦渦の平均水深方向スケールを水深で無次元化した値  $(D/H)$  を示している。これより、渦の平均水深方向スケール  $D/H$  は、ほぼ  $0.2 \sim 0.3$  であることが示されている。このことは、従来長時間計測により求められた二次流れより考察される水表面渦<sup>9)</sup>のスケールより若干小さくなっている。

次に水表面近傍に形成される渦形象の変化について考察を行う。図-5は、水表面近傍の横断面視の1秒間の時系列可視化形象が示されている。それぞれ1/10秒間隔で水表面近傍の渦構造の変化が表されている。ただし、横断面の可視化画像は画像番号10から1の時刻順で撮影されている。これは、時刻経過に伴って下流側の構造の形象から撮影されるためであり、組織構造の発達過程を考える上では逆の時刻で考察を行う必要がある。

側壁に形成された壁縦渦<sup>15)</sup>  $a$  が水表面方向に揺動し(図中の番号1~4)、水表面に到達した(図中の番号5, 6)後、その水路中央側の渦が形象を変化させながら水路中央方向に移動する形象(図中の番号7~10)が認められる。図番号9, 10では、渦の形象が横方向へ引き伸ばされており、特に8から9の間では急激な渦の変形が認められることから、前述した渦軸の水路中央方向への傾斜によるストリークの傾斜角度の増大が認められる。

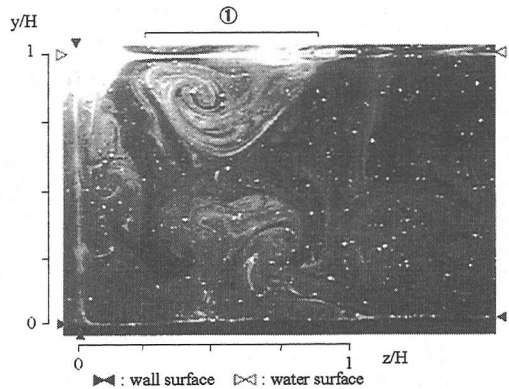


図-6 DPTVによる横断面可視化形象 (CASE-3)

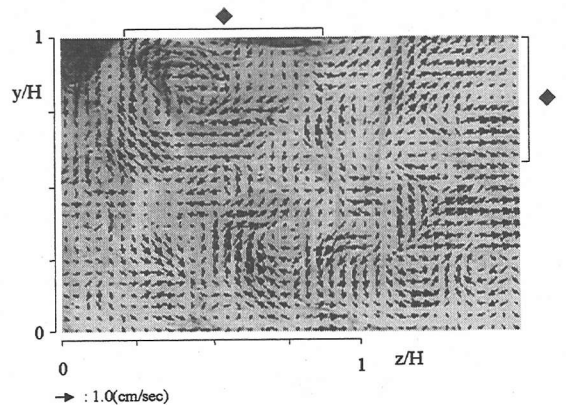


図-7 DPTVによる瞬時流速ベクトル

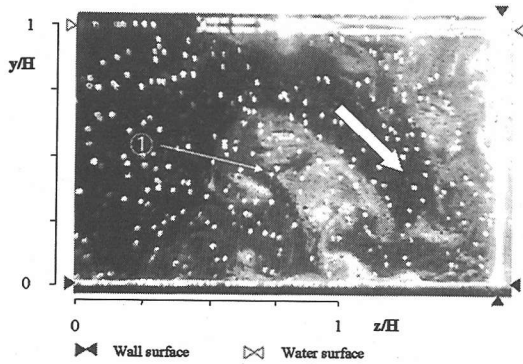


図-8 DPTVによる横断面可視化形象 (CASE-3)

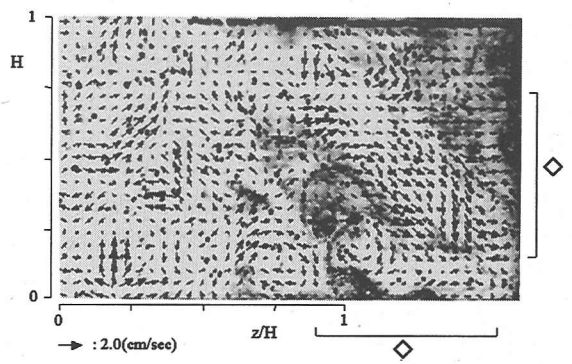


図-9 DPTVによる瞬時流速ベクトル

しかし、9から10ではその水深方向の変化は認められるものの横断方向にはあまり変化が見られないので流下方向に平行なストリークが形成されていると思われる。これは、図-3の同時可視化で得られた渦aに対応しており、また図-2で観察されたaのストリークの急激な傾斜角度で発達し、その側壁側で観察される①のボイル現象に対応する。

このような側壁より発達する壁縦渦の組織構造は、Gregaら<sup>7)</sup>によって側壁領域の近傍の流体塊が水表面へ運ばれる現象の存在が指摘されているが、その構造的性についてはこれまでに明らかにされておらず、それを渦構造の観点より、より詳しく明示したものであり、注目すべき点である。

これらの結果より、水表面で観察される側壁より中央方向へ発達するストリーク構造<sup>7)</sup>は、側壁より形成された壁縦渦が水表面に到達し水路中央方向へ発達する渦管の一部を示し、その渦運動の上昇流に伴ってボイルを形成すると思われる。すなわち、この構造が、側壁領域水表面部の支配的な組織構造であることが明らかにされた。

この渦構造と速度情報を重ね合わせて考察するため、次で横断面視にDPTVを適用して考察を行う。

### (3) 組織構造と瞬時二次流れ

#### a) 水表面部の組織構造

図-6は、DPTVの横断面可視化画像である。流れ方向は紙面より奥方向、左側が側壁となっている。水表面に存在している縦渦(図中の①)は、大きさが水深の1/3もある大規模な渦である。これは、時計方向の回転を示す形象を示しており、前節で考察された側壁から水路中央方向へ発達する縦渦である。この縦渦の側壁側には、水表面部方向への染料の存在しない領域が形成されている。このことは、染料のない水路中央側から流体が運ばれていることを示唆している。

次に、2値化した可視化形象を重ねた横断面瞬時速度ベクトルを図-7に示す。ここで注目することは、図-6の縦渦(①)と速度ベクトル(◆)の対応である。

この縦渦の水表面側は、水路中央方向、中央側で下降流、下側で側壁方向、側壁側で上昇流が形成されている。この水表面での流れ方向は、図-2に示されたボイルの特徴と一致する。すなわち、この縦渦により、その近傍に顕著な瞬時の二次流れが誘起されていることを示している。特にこの縦渦の側壁側で強い上昇流が形成され、水表面では水路中央方向の流れが形成されており、これがボイルの形成に重要な役割を果たしていることを示している。

また、その縦渦の下側では、強い側壁方向の二次流れが形成されており、隅角部と同様に河岸防災上注目すべき点である。

さらに、この縦渦に誘起される瞬時の二次流れの特徴に渦構造の水表面近くで準周期的に水路中央方向に移動する時空間特性を重ね合わせて考察することで、長時間平均像としての二次流れの特徴である水路横断方向に長い楕円形状を示す水表面渦の形成機構が明らかにされた。

#### b) 隅角部の組織構造

図-8は、DPTVの横断面視による可視化形象を示した図である。側壁は右側で、流れ方向は紙面手前から奥である。

この可視化画像の特徴は、底壁より発達した壁縦渦<sup>15)</sup>が形成されている。これは、著者ら<sup>14)</sup>がこれまでに明らかにした「隅角方向の二次流れの形成には、底壁および側壁より形成される壁縦渦が互いに大規模化し、それらが二次流れを誘起する」ことに対応しており、DPTVの解析は、そのことを実証することになる。図-8の底壁より大規模化した壁縦渦①は、流下方向に3重の階層構造を有している。この上部には図中に示されるトレーサーの存在しない領域が形成されている。このことは、トレーサーの存在しない水路中央側からの流体塊の進入が考えられる。

この領域における速度情報が、図-9に2値化した可視化形象を重ねた流速ベクトル図として示されている。ここで、注目する点は矢印部分に対応する領域(図中の◇)では、約45度の角度で隅角部に向かう大規模な瞬時の二

次流れの領域が形成されている。さらに、詳細に対応を考察すると、①の壁縦渦の渦形象外端で渦形象に対応する方向の瞬時の二次流れが形成されている。このことから、隅角部の底壁より大規模化した壁縦渦構造によって、隅角方向の二次流れが誘起されていることが示されている。なお、この他にも多くの壁縦渦構造と瞬時二次流れ対応関係を調べており、上記と同じ対応が明らかにされた。

さらに、水表面部同様に、隅角部に形成される壁縦渦の時空間構造の特徴とその瞬時二次流れを合わせて考察する事で、長時間平均像である二次流れの形成機構が明らかとなった。

特に、この瞬時の二次流れの最大流速は、水表面部、隅角部ともに主流速の約20%であった。一方、長時間平均操作を行った場合は、主流速の数%であり<sup>9)</sup>、これまで乱流計測で行われていた二次流れより、6~7倍程度強い瞬時の二次流れが形成されていることを示している。このことは、禰津<sup>13)</sup>の最近の研究とも一致する。

#### 4. 結論

開水路乱流側壁領域の水表面部の組織構造と側壁領域に形成される組織構造とその瞬時流速変動特性について考察が行なわれ、河岸侵食の原因となる組織構造と二次流れの形成機構が明らかにされた。

(1) 水表面部では、側壁より形成される壁縦渦構造が水表面側に揺動し、水表面近傍に到達する。その水路中央側の渦は側壁より徐々に離れて発達する。水表面で観察される側壁より発達するストリーク構造は、この後者の渦管が水表面に到達した一部である。

(2) ストリーク構造の発達の時系列特性は、その渦管の時系列変動特性と一致し、流下に伴って、水路中央方向へ発達する。また、それは、 $U_{max} \cdot T/H = 2.2$ 程度の周期的な特徴と、水深の1.2~1.8倍程度の発達領域をもち、水深方向には水深の2~3割の渦領域が存在する。

(3) 側壁より水表面へ発達した壁縦渦は、渦管の回転方向の瞬時の二次流れを誘起し、特に渦管の側壁側では、上昇流を誘起し、ポイルを形成する。また、渦の底壁側の誘起速度は、隅角方向への強い瞬時の二次流れを誘起する。

(4) 隅角部において、底壁に形成された壁縦渦構造は隅角へ向かう瞬時の二次流れを誘起する。さらに、これらの瞬時二次流れの強さは、主流速の20%程度である。

(5) 側壁領域の水表面部に形成される組織構造の時空間特性とそれにより誘起される瞬時の二次流れの特徴より、開水路乱流の長時間平均像としての二次流れの特徴である水表面渦の形成機構が明らかにされた。また、隅

角部の二次流れの形成機構は、底壁、側壁により形成される交互に大規模化される壁縦渦構造により誘起される瞬時の二次流れが間欠的に発生することであることが明らかにされた。

#### 参考文献

- 1) Nikuradse, J.: Untersuchungen Über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen VDI, Forschungsheft, Bd. 291, 1926.
- 2) Einstein, H. A. and Li, H.: Secondary currents in straight channels, Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 39, pp. 1085-1088, 1958.
- 3) Brundrett, E. and Bains, W. P.: The production and diffusion of vorticity in duct flow, J. Fluid Mech., Vol. 19, pp. 375-392, 1964.
- 4) Perkins, H. J.: The formation of streamwise vorticity in turbulent flow, J. Fluid Mech., Vol. 44, pp. 721-740, 1970.
- 5) Naot, D. and Rodi, W.: Calculation of secondary currents in channel flow, J. Hydraul. Div. Proc., ASCE, Vol. 108, pp. 948-968, 1982.
- 6) 梶島岳夫, 三宅裕, 西本俊幸: 正方形断面水路内のLES, 機械学会論文集 (B編), 第57巻, 540号, pp. 1-8, 1991.
- 7) Grega, L.M., Wei, T., Leighton, R. I. and Neves, J. C.: Turbulent mixed-boundary flow in a corner formed by a free surface, J. Fluid Mech., Vol. 294, pp. 17-46, 1995.
- 8) Stern, F., Parthasarathy, R., Huang, H.P. & Longo, J.: Effects of waves and surface on turbulence in the boundary layer of a surface-piercing flat plate, ASME Symp. on Free Surface Turbulence, Lake Tahoe, NV, 1994.
- 9) 富永晃宏, 江崎一博: 長方形断面開水路の三次元乱流の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第357号/II-3, pp. 81-88, 1985.
- 10) 禰津家久, 中川博次: 一樣開水路及び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.
- 11) 杉山均, 秋山光庸, 亀澤正之: 台形断面を有する三次元開水路流れの乱流構造解析, 土木学会論文集, 第527号/II-33, pp. 27-36, 1995.
- 12) 杉山均, 秋山光庸, 松原珠: 複断面水路内の乱流構造解析と縦渦生成に関する研究, 土木学会論文集, 第515号/II-31, pp. 55-65, 1995.
- 13) 禰津家久, 鬼東幸樹, 前原慶人: PIVを用いた開水路横断面内における瞬間流速構造の解析, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, 第2部, pp. 568-569, 1999.
- 14) 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.
- 15) 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.



- 16) 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 卷, pp. 829-832, 1993.
- 17) 杉本博幸, 佐賀孝徳, 大成博文, 渡辺勝利: 開水路乱流隅  
 角部における横断面構造, 日本流体力学会年会'98 第3回  
 環境流体シンポジウム講演論文集, pp. 331-332, 1998
- 18) 谷一郎: せん断流れにおける縦渦の形成, ながれ 2,  
 pp. 160~165, 1983.
- 19) 玉井信行, 榎津家久, 小松利光, 大成博文, 大橋正和, 浅枝  
 隆: 乱流における組織構造の役割, 土木学会論文集, 第 423  
 号/II-14, pp. 25-41, 1990.

(2000.1.5 受付)

## COHERENT STRUCTURE AND FORMATION MECHANISM OF SECONDARY FLOW IN TURBULENT OPEN CHANNEL FLOW IN CORNERS

Takanori SAGA, Hirofumi OHNARI, Katsutoshi WATANABE and Hiroyuki SUGIMOTO

Turbulent shear flow in a corner formed by a solid wall and a free surface is investigated using many flow visualization techniques and DPTV which combines Dye streak injection with Particle Tracking Velocimetry. The "wall streamwise vortices" are formed on the side wall and then developed to a free surface. And the vortices are moving away from the wall at the free surface. The vortices induce the secondary flow to the side wall and to the free surface. Parts of the vortices tube agree with streaks on a free surface. The vortices form the boils on the free surface.