

開水路乱流側壁領域の組織構造に関する研究

佐賀孝徳*・大成博文**・斎藤 隆***

開水路乱流側壁領域に形成された組織構造の時空間特性が3つの断面視法を用いて詳察され、さらにその二次流れの形成機構が検討された。その側壁領域の両壁には、壁縦渦がそれぞれ異なる形態で集中することによって、大規模な組織構造が形成される。この組織構造の形成領域は底壁と側壁のそれぞれにおいて交互に配置され、それらの相互作用によって、閉矩形管路とは異なる固有の大規模な二次流れが形成される。

Keywords : corner flow, secondary flow, flow visualization, coherent structure, wall streamwise vortices

1. 緒 論

開水路乱流の側壁近くには、底壁、側壁、水表面というそれぞれ異なる境界条件に囲まれた流れ場が存在することから、そこには固有の組織構造が複雑に形成されていることが推測され得る。この組織構造の形成領域を「側壁領域」と呼び、それは、「隅角部」と「水表面部」で構成される。すでに、これらの流れ場における乱流二次流れの重要な特徴がいくつか明らかにされている。

隅角部については、Nikuradse¹⁾によってその平均等流速線の歪が初めて見い出された。また、Prandtl²⁾によって、隅角部における等流速線の歪から、そこに乱流二次流れが形成されることが指摘された。さらに、Einstein³⁾、Brundrettら⁴⁾、Perkins⁵⁾によっても、渦度方程式に基づく検討が進められ、隅角部におけるレイノルズ応力の非等方性と乱流二次流れとの相互関係が考察された。

一方、水表面部においては、富永ら⁶⁾や祢津ら⁷⁾によって乱流二次流れの特徴が考察され、そこに水面渦と呼ばれる乱流二次流れの存在が指摘された。

これらの隅角部および水表面部における乱流二次流れに関する究明は、比較的高レイノルズ数の下でなされているが、最近、梶島ら⁸⁾は、LES (Large Eddy Simulation) 法を用いて、従来、計測がなかなか困難とされた低レイノルズ数下でも、正方形断面流路の隅角に二次流れが明確に形成されることを示し、そこでの二次流れの発生機構を考察した。

これらの隅角部および水表面部に形成された乱流二次

本研究は、第33回水理講演会⁹⁾、で発表した内容に、その後新たなデータを加えて考察を重ね、さらに系統的に発展させたものである。

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

** 正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

流れの基本的特徴は、第1に、渦の強さが弱いのに流れを完全に三次元化すること、第2に減衰が僅かで主流方向に長い距離を持続することとされる¹⁰⁾。

しかし、これらの特徴は、長時間平均操作の結果として得られたものであり、流れ場の瞬時瞬時の本質的な構造を解明して得られたものではない。また谷¹⁰⁾が、「縦渦の渦度もレイノルズ応力の非等方性も、すべて同様に二次流れの属性であって、何れが原因何れが結果という区別はない」と指摘しているように、従来の乱流二次流れを求める手法が二次流れの形成機構を本質的に解明したとは言いがたい。

著者らは、これまでに開水路乱流の中央部において、そこに形成される組織構造に関する究明を系統的に行ってきた^{11), 12)}。その結果、開水路乱流の内層にはヘヤピン渦型の壁縦渦が形成され、それが壁近くの組織運動にきわめて重要な役割を果たすことが明らかにされた。さらに可視化と流速計測の同時併用によって、壁縦渦が壁近くの流速変動の形成に直接寄与していることも明らかにされた¹³⁾。

このような組織構造に関するいくつかの重要な解明に従えば、開水路乱流における側壁領域における二次流れの形成機構の究明には、そこに形成された組織構造の時空間的な特徴を詳細に明らかにすることが不可欠である。すでに、著者らは、可視化法を用いて開水路乱流隅角部に形成された組織構造の究明を試み⁹⁾、さらには可視化と流速計測の同時併用によって、組織構造と流れ方向流速変動波形の相互関係を考察してきた¹⁴⁾。

以上を踏まえ、本研究では、開水路乱流側壁領域における組織構造が可視化法を用いて明らかにされ、それを踏まえてその二次流れの形成機構が詳察された。

2. 実験方法および実験条件

実験には、長さ10 m、幅60 cm、深さ15 cmの総ア

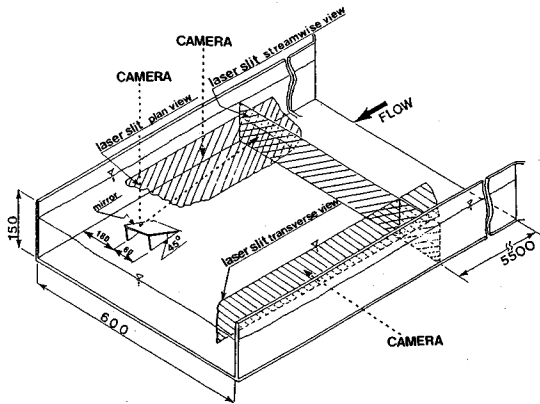


Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Case	U _m (cm/s)	U _r (cm/s)	l(cm)	Re(U _{max} l/ν)
A	6.41	0.38	6.8	4020
B-1	4.69	0.29	10.8	5998
B-2	11.23	0.70	4.5	5998
C-1	2.64	0.18	12.9	4038
C-2	5.02	0.34	6.8	4038
C-3	9.48	0.64	3.6	4038
D-1	2.05	0.14	12.2	2961
D-2	3.52	0.25	7.1	2961
D-3	6.95	0.48	3.6	2961

クリル製開水路が用いられた。上下流端には、整流装置（長さ 3.2 cm, 径 4 mm, 幅 60 cm のハニカム）および水位調節用の堰が設けられた。この水路の上流端から 5.5 m 下流付近の側壁領域において、横・水平・縦断面視による可視化が、Fig.1 のレーザースリット法¹¹⁾を用いて行われた。撮影は、横断面視では下流方向に置かれた鏡を通して水路上方から、水平断面視では水路上方から、縦断面視では側壁方向から、35 mm カメラおよびビデオカメラにより行われた。トレーサーには、フルオレセインナトリウム水溶液（比重 1.005）が用いられ、それが、上流端より側壁と底壁の両方に一度に注入された。注入後、トレーサーは、両壁の粘性底層の一部に滞留しながら流下し、その流下に伴って側壁領域内に形成された乱れ運動自身によって巻き上げられ、その結果として、組織構造が表現された。また、撮影時に用いた鏡については、それが隅角部の流れを遮断しないように側壁から離れて設置され、その角度も流れ方向に対して若干傾斜させられた。その他の可視化法の詳細については、文献¹²⁾に示されており、ここでは省略する。

また、実験条件を Table 1 に示す。

3. 実験結果

(1) 考察の視点

開水路乱流側壁領域の組織構造とその二次流れの形成機構を考察する際に、以下の視点を踏まえることが重要

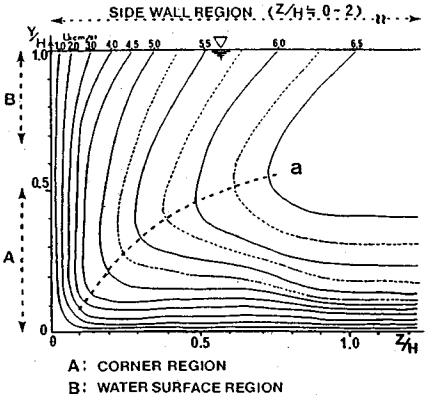


Fig.2 Mean velocity contours in corners

である。

第 1 は、乱流二次流れと瞬間的な二次流れを明確に区別することである。すなわち、前者はプローブ計測による速度信号の長時間平均によって得られた流れ場の特徴であり、後者は組織運動によって誘起された瞬間的な流れ場の特徴を示すものである。この両者には、乱流としての流れ場の構造的な把握において本質的な相違がある。

第 2 は、この側壁領域には水表面という境界条件が存在することから閉矩形管路とは異なる固有の二次流れが形成されることである。そのことを踏まえた上で考察する必要がある。

第 3 は、第 1, 2 の視点を踏まえて、底壁および側壁に形成される組織構造のなかでも、水路中央部とは異なる壁縦渦の時空間構造に注目することであり、さらには、それをもとに瞬間的な二次流れの形成機構を考察することである。

第 4 は、側壁領域に形成された組織構造の特徴と、平均流速分布および壁面せん断応力分布特性の相互関係を明らかにすることである。

第 5 は、以上の視点を踏まえ、開水路乱流側壁領域における組織構造の三次元モデルを構築するとともに、その二次流れの形成機構を明らかにすることである。

(2) 側壁領域の領域区分

上述の側壁領域とその領域区分の定義を以下のように行う。

側壁領域 (side wall region) : 最大流速点が水表面より低下することによって、等流速線が横方向に歪む特徴を有する領域。

隅角部 (corner region) : 底壁と側壁で隅をつくる領域。

水表面部 (water surface regio) : 水表面付近の領域。

また、Fig.2 は、レーザ流速計により計測された平均流速分布をもとに描かれた等流速線図であるが、その

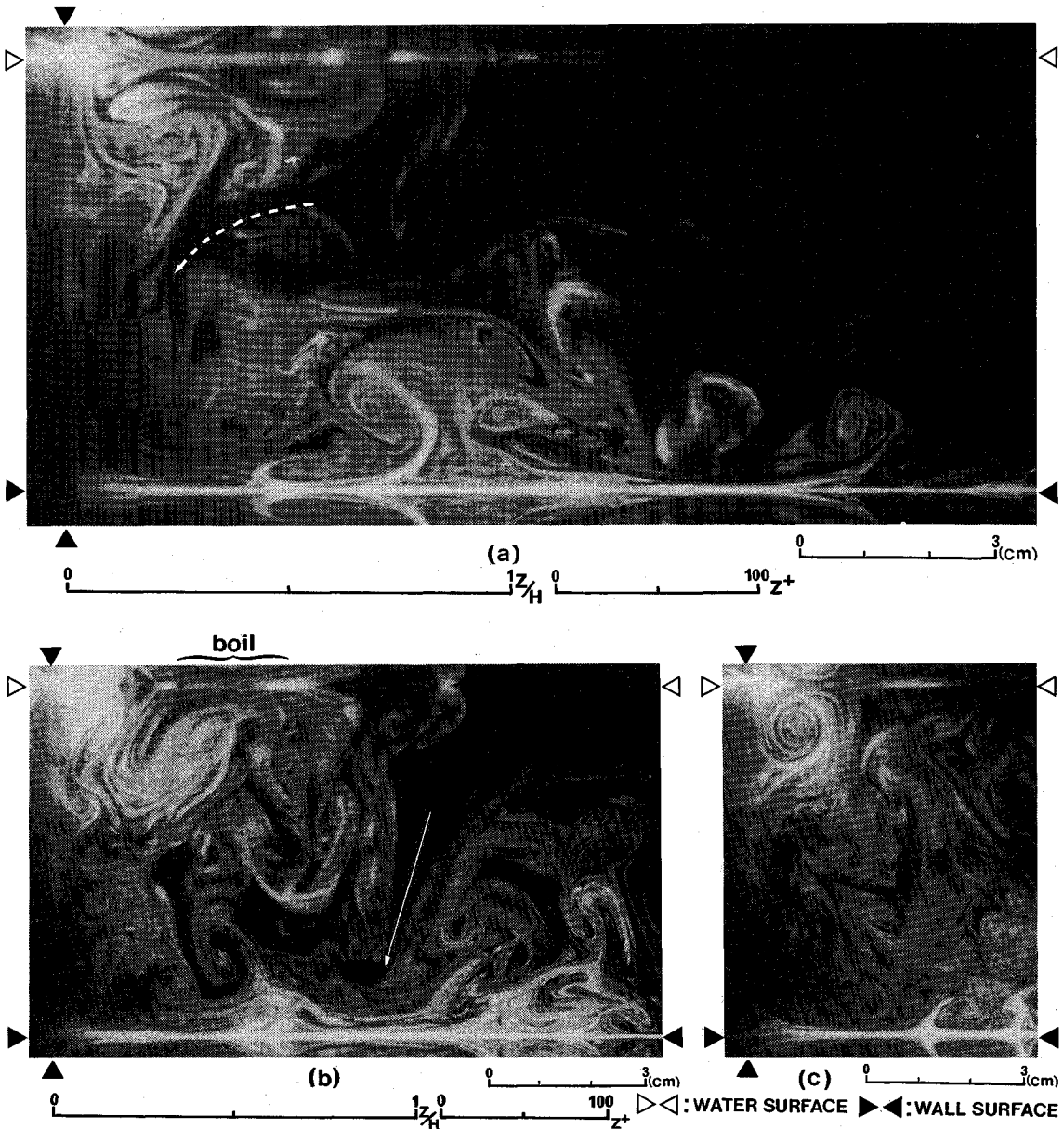


Fig.3 A set of the pictures in streamwise view (Case A)

特徴は、以下の点において従来の結果⁷⁾と一致する。

- ① 図中の点線 a で示される等流速線の曲頂部を連ねる線が水路中央側から隅角へと凸曲線状に向かう。
- ② 隅角部付近の ($Z/H \approx 0.3 \sim 1.0$) の底壁近くで等流速線間隔がより水路中央側と比して広いことから、速度勾配がより緩やかな領域が存在する。
- ③ 水表面部において、横方向に速度勾配が緩やかな領域が存在する。

これらの平均流速分布の特徴は、隅角を二等分する 45 度線を境に底壁側と側壁側とできわめて顕著

な非対称性を示している。以下では、この非対称性に注目しつつ、上記 3 つの特徴を有するそれぞれの領域に形成された組織構造固有の特徴の考察を試みる。

(3) 側壁領域の組織構造

開水路乱流側壁領域には、壁縦渦が底壁と側壁の両方に形成され、それが水路中央部とは異なる固有の時空間構造を有することが考えられることから、その時空間構造とともに、その配置特性および相互作用過程を詳察する。また、壁縦渦と重要な相互関係を有する低速渦 (low

speed streak, 以下LSSと呼ぶ)の特徴についても考察する。

a) 横断面形象

Fig.3には、側壁領域の横断面可視化写真が示されている。(a)~(c)の3例には、側壁領域のそれぞれの領域において特徴的な壁縦渦構造が示されている。

(a)では、隅角部底壁側と水表面部に、壁縦渦が集中して形成されていることが明らかである。この壁縦渦の集中現象が領域的に固定されることが、側壁領域における組織構造の主要な特徴のひとつと考えられる。

底壁側でのこの集中現象は、ほぼ $Z/H=0.3\sim 1.2$ の領域で起こるが、この領域は、上述の平均流速勾配の緩やかな領域とほぼ重なることから、この集中現象が平均流速勾配の緩和に重要な寄与をなしているように思われる。

もう一つの重要な注目点は、壁縦渦の集中現象によって、大規模な組織構造が形成されることである。

一方、水表面部においても、側壁に形成された壁縦渦の集中現象が安定して認められるが、この特徴は、水路中央に向かって横方向に大規模化することにある。これらの底壁と側壁にそれぞれ形成された大規模な組織構造の挙動によって、さらにはそれらの大規模な組織構造同士の相互作用によって側壁領域における大規模な二次流れが形成されているように思われる。(a)内の矢印は、その相互作用によって誘起された高速流体塊が半水深付近から隅角へと進入したと思われる方向を示す。

この二次流れの形成過程については、後で詳しく検討する。

(b)では、底壁の壁縦渦の集中領域に上部から高速流体塊が降下(矢印)することによって、左右に壁縦渦が揺動しようとする瞬間が可視化されている。この場合、(a)で認められた隅角への二次流れは形成されていないようであり、隅角近くに壁縦渦があたかも満たされるような現象が認められる。

また、水表面部では、大規模な壁縦渦の一部が水表面に達し、そこにboilと思われる現象も形成されている。

(c)では、水表面部の側壁近くに形成された壁縦渦の典型的な横断面形象が示されている。この場合、渦対の一方は減衰して片方のみが発達し、単独渦に近い形象が認められる。ここでは、この渦が比較的安定して形成されるという観察も得られた。

b) 水平断面形象

Fig.4には、側壁領域における組織構造の水平断面形象がそれぞれ Y/H を変えて示されている。

(a)の壁近傍では、流れ方向に長く伸びた筋状のLSS構造が認められ、この集中領域が上述の壁縦渦の集中領域にほぼ一致する。また、この筋状のLSSは壁近くで上昇することが知られている¹¹⁾。

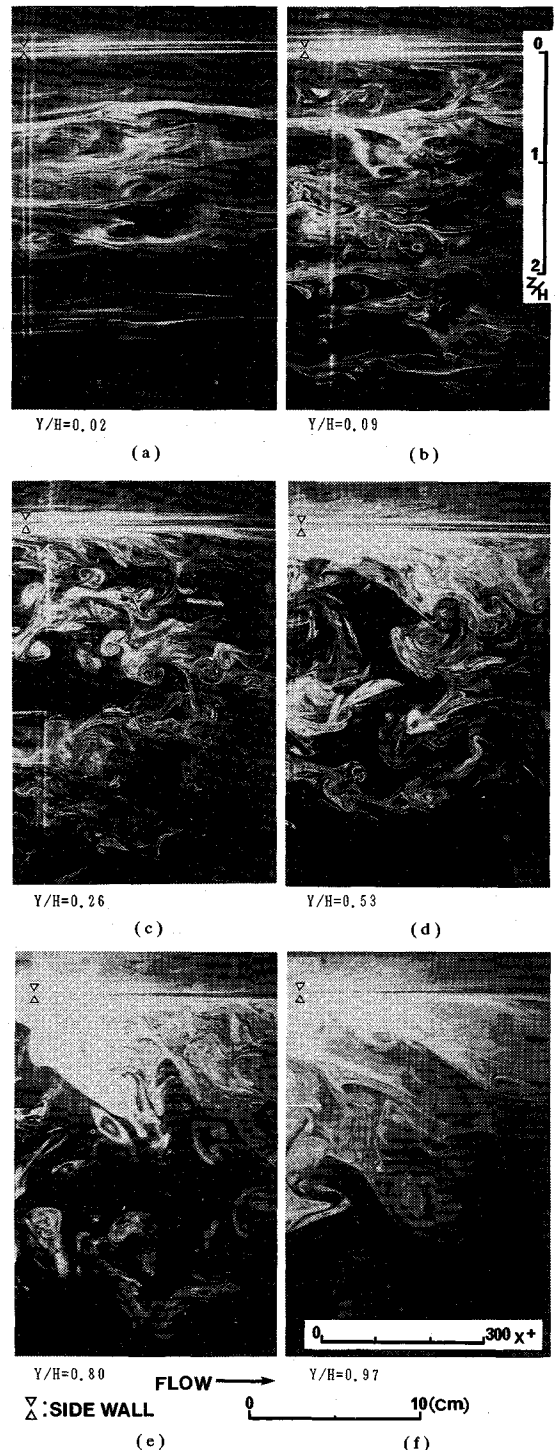


Fig.4 Series of the pictures in plan view (Case A)

(b)では、LSSの揺動が顕著となり、太い筋状のLSSの周辺に細線状のstreaksの形成が認められる。このLSSは、壁縦渦の「足」の部分に相当する水平断面形象と考えられる。

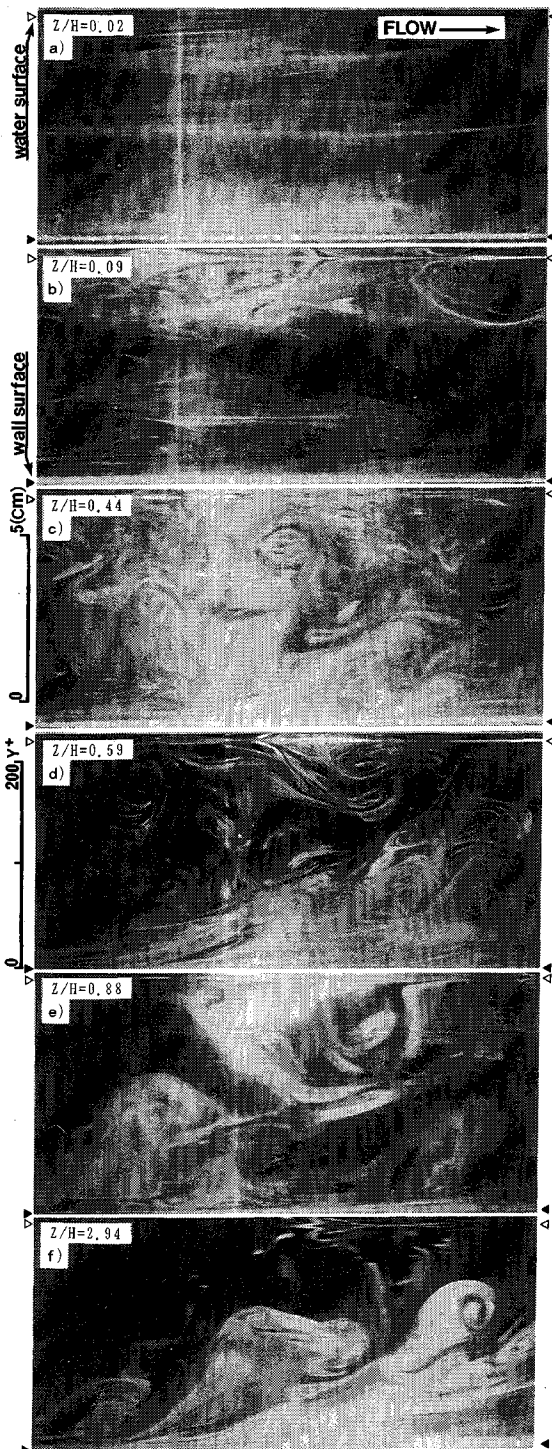


Fig.5 Series of the pictures in side view (Case A)

(c)の $Y/H=0.26$ では、LSSの揺動性はさらに増し、流れ方向に長い筋状のLSSが消えて、代わりに渦対の水平断面形象が観察される。この形象は、LSSの周辺にいくつも形成され、このことからも上述と同様の領域に壁縦渦の集中現象の存在が指摘され得る。また、もうひとつの注目点は、側壁上に形成された壁縦渦の断面形象が新たに認められることである。これは側壁近くで緩い傾斜角を有し、壁から離れるにしたがってその傾斜角を増大させている。

(d)では、側壁からの壁縦渦の発達がより顕著に認められる。この構造は、底壁から発達した大規模な構造の先端部との相互作用も加わって、その横方向スケールにおいて大きな変動性を示すようになる。

(e)、(f)では、側壁からの壁縦渦が一層進行し、その発達領域は水深の2倍を越えるほどにも至る。

c) 縦断面形象

Fig.5には、 $Z/H=0.02\sim 2.94$ において6枚の縦断面可視化写真が示されている。

(a)では、側壁のごく近傍が可視化されており、水表面部における2本のLSSの存在が明らかである。(b)では、水表面部におけるstreaksの集中が明らかであり、その領域は横断面視で観察された壁縦渦の集中領域に対応する。ところが、(c)では、水表面部のstreaksの集中のみならず、底壁面からのその上昇も加わって、断面全体にトレーサーが存在している。これらの水表面部におけるstreaksの集中や底壁上でのトレーサーの上昇は、上述の横・水平断面視における壁縦渦の集中と対応する現象である。(d)、(e)の側壁からやや離れた断面では、水表面部と底壁近くの流れの間に、トレーサーが存在しない領域が存在するが、これは水路中央側から高速流体が進入することによって形成された領域と考えられる。一方、(f)の水路中央に近い断面になると壁乱流が出現し、その内層には壁縦渦が数多く形成されるが、これらが集中して大規模な組織構造を形成し、間欠的に水表面近くまで到達することが、観察された。しかしながら、この領域における壁縦渦の集中現象は、領域的に固定されず、この点が側壁領域のそれと明確に異なる点である。

d) 時空間構造

上述の(a)~(c)における各断面視の結果を踏まえると、開水路乱流の側壁領域に形成された組織構造の特徴は、底壁および側壁上の固有の領域で壁縦渦が集中して大規模な組織構造を形成することにあり、さらに、その大規模組織構造の形成がその形態や規模においてそれぞれ顕著に異なることにある。

そこで、これらの基本的特徴を踏まえて、側壁領域に形成された組織構造の時空間特性を詳しく検討する。

Fig.6には、側壁領域での横断面視による連続撮影の

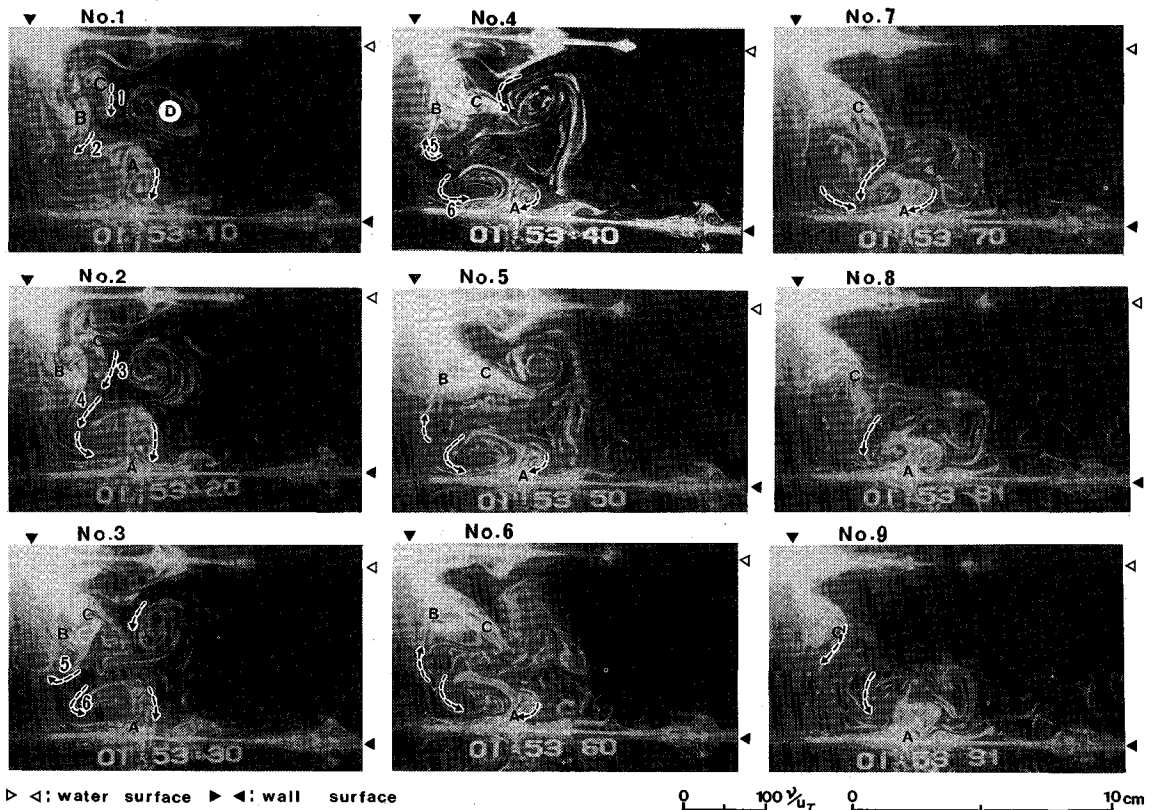


Fig.6 Picture sequence in streamwise view (Case A)

一例が示されている。写真下部の数字は、撮影時刻であり、各写真はほぼ0.1秒ごとに並べられている。

側壁領域に形成された壁縦渦のなかでも代表的なものが4つ選ばれ、それらがNo.1内に記号(A~D)でそれぞれ示されている。

壁縦渦Aは底壁上に形成されたものであり、その渦対の頭部はかなり壁から離れた位置にある。一方、壁縦渦Bは側壁上に形成され、その上部に壁縦渦Cが形成されている。

この渦Cと渦Dの間には、それぞれの渦によって下降流(点線1)が誘起され、渦BとAでは、隅角へ向かう流れ(点線2)が形成されつつある。それはNo.2でより進行し(点線3, 4), No.3, 4, 5では、隅角へ向かった流れが、その到達後に反転して両壁に沿う流れを形成させている(点線5, 6)。

一方、渦CとDの相互作用はNo.4で最も強まり、側壁から streaks が離れる挙動が認められる。しかし、No.7では、渦Dは消滅してしまい、壁縦渦BもCに吸収されてしまったかのようである。また、No.7からは、渦Aの傾きは右側へと変化するが、このNo.1~No.9までの渦Aの変化を揺動現象として把握することが可能となるであろう。

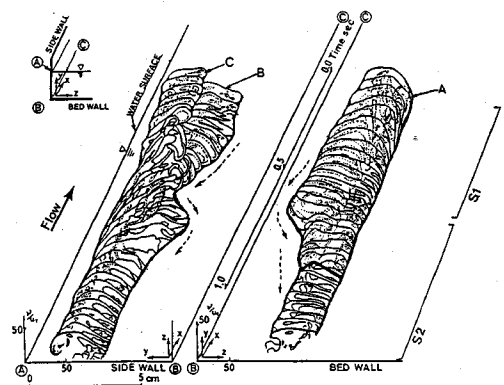


Fig.7 Time-space structure of wall streamwise vortices

以上のA~Cの壁縦渦の挙動を時間的に重ねあわせて両壁におけるその時空間構造がそれぞれFig.7のように描かれた。すなわち、壁縦渦Aは図中のS1内で上流方向にスケールを増大させながら隅角へと揺動するが、これに対して壁縦渦Bは水表面方向へと押しやられるところが、図中のS2に入って、渦Aが反転して右方向へ揺動し始めると、渦Cは隅角側へ自らのスケールを拡大させながら揺動している。図中の点線の矢印は、これらの一連の挙動に添ったものであり、ここに、隅角を

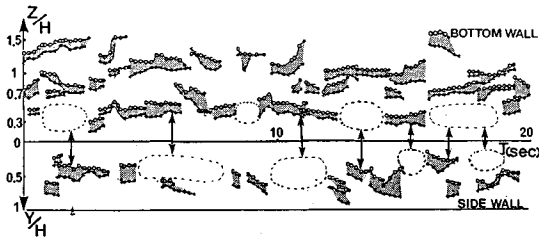


Fig.8 Arrangement of wall streamwise vortices (Case A)

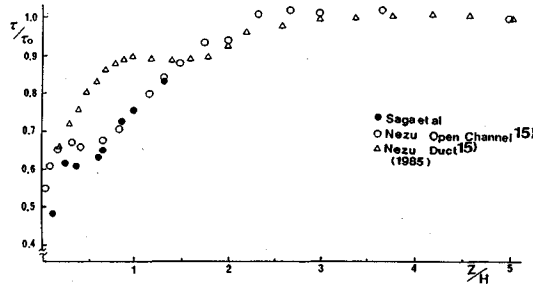


Fig.9 Distribution of the wall shear stress as Z/H (Case A)

挟んでの壁縦渦の交互の揺動性が認められる。

Fig.8には、側壁領域に形成された壁縦渦を構成する渦対の中心点とそれに囲まれた領域を時間軸上で追跡した結果が示されている。図中の記号は、渦対の中心点であり、それに囲まれる領域に陰影が付けられている。また、図中の点線は、渦中心の追跡が切れて、その下流に新しく始まるまでの小空間をスケッチしたものである。これより、底壁および側壁の最も隣接する壁縦渦は、同一の時間軸上で同時に形成されることは希であり、そのほとんどは Fig.7 に示されたように交互に形成されていることが明らかである。

また、両壁における壁縦渦の形成領域は、 $Z/H=0.3 \sim 1.2$ 、 $Y/H=0.3 \sim 1.0$ ほどであり、隅角近くには、それが認められない。また、この領域は、当然のことながら前述の壁縦渦の集中領域を包含している。さらに、壁縦渦の形成率を Z/H 、 $Y/H=0.0 \sim 1.0$ の範囲内で比較すると、底壁側が側壁側の約2倍であり、このことから底壁側で壁縦渦の集中現象が頻繁に起こっていることが示される。

以上のことより、開水路乱流側壁領域に形成された組織構造の特徴として、その形成領域と底壁および側壁の交互の配置特性がさらに加えられ、それらが開水路乱流の側壁領域における二次流れの形成に重要な役割を果たしているように思われる。

(4) 組織構造と壁面せん断応力の相互関係

Fig.9の壁面せん断力は、Fig.2に示した平均流速分布において、底層内の壁法則より算出された。衿津らの結果に示されるように水路中央から側壁方向に向かうに

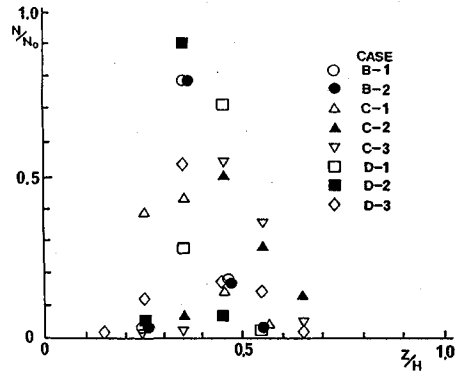


Fig.10 Histograms of spanwise distribution of the low speed streaks nearest the side wall on bottom wall

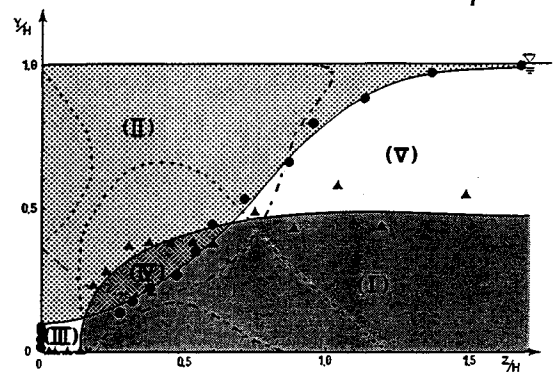


Fig.11 Formative region of wall streamwise vortices developed away from the both wall (Case A)

従って $Z/H=2$ より低下し、特に $Z/H=0.3 \sim 0.7$ 付近でその極小値が存在する。本結果は、その従来の傾向とほぼ一致している。この壁面せん断応力が極小値を示す領域に注目し、その領域を中心にして LSS の形成頻度分布が Fig.10 のように求められた。これより、LSS の最頻値は $Z/H=0.3 \sim 0.5$ であり、これが上述の壁面せん断応力の極小値を示す領域と一致することが注目される。

(5) 組織構造の形成領域と概念モデル

Fig.11には、縦および水平の各断面視のビデオ画像から得られた底壁および側壁に形成された壁縦渦の形成領域が示されている (●および▲は、平均的な側壁・底壁より形成される壁縦渦の外端を示す計算値)。図中の実線は、その平均的な境界面を示し、点線は底壁側の壁縦渦、一点鎖線は側壁側のそれが、大規模化した際の瞬間的な形成領域のパターンを示したものである。

これより、壁縦渦の平均的な形成領域は、底壁と側壁側に別れて存在し、それらが互いに顕著な相異を示すことが明らかであり、このことから両壁における組織構造の形成における非対称性の存在が確かめられ得る。

さて、この図より、次の5つの壁縦渦の形成領域に関する領域区分が可能となる。

I：底壁における壁縦渦の形成領域

壁縦渦は底壁の内層にほぼ形成されるが、側壁に近づくにつれて、その形成領域は減少する。

II：側壁における壁縦渦の形成領域

隅角近くから、壁縦渦の形成領域が水表面方向に拡大し、とくに水表面部においては、それが顕著である。

III：隅角部近くで流体の出入りがわずかな領域

この領域では壁縦渦がほとんど形成されず、二次流れによる流体の出入りが隅角に添ってわずかしかない。

IV：領域IとIIの重複領域

壁縦渦は、底壁と側壁にそれぞれ形成され、その集中によって瞬間的には大規模な組織構造へと発達するが、それぞれの形成領域において、いずれかが大きく発達した場合のパターンが、Fig.11内の点線・一点鎖線で、それぞれ示されている。このそれぞれのパターンは、基本的には交互に発生し、それが繰り返される。このように瞬間的な形成領域のパターンには、大きな変動性が存在するのに対し、壁縦渦のそれぞれの平均的な境界面の重なりはかなり小さい。

V：水路中央部から高速流体が進入する領域

水路中央から進入してきた高速流体と底壁および側壁から発達した大規模な組織構造の3者による相互作用が発生する領域である。

以上のように、側壁領域の底壁と側壁では、壁縦渦の平均形成領域に相異が存在するのみならず、瞬間的には壁縦渦の集中による大規模化が遂げられるときによって、さらに著しい構造的な非対称性が認められた。

そこで、これらの結果を踏まえ、側壁領域における組織構造とそれ同士の相互作用の本質的理解のために三次元概念モデルを Fig.12 に提案する。まず、底壁には壁縦渦が集中して形成され、それが複合して大規模化を遂げて発達する。これに対して側壁側でも壁縦渦が水表面近くに集中して主に水路中央方向に大規模に発達し、その一部が水表面に到達すると河岸 boil に似た挙動が形成される。また、この両壁に形成された大規模な組織構造は、流れ方向にほぼ交互に形成され、それを繰り返すが、その過程で壁縦渦同士の各種の相互作用を誘起する。

第1の相互作用は、より水路中央側から進入してきた高速流体塊と両壁に発達した大規模な組織構造の3者で生起される。このためこの領域では、最も激しい流体輸送の変動が発生し、その結果として、流体塊がより隅角方向へと運ばれる。隅角近くでは、底壁と側壁に交互に形成された壁縦渦の大規模な組織構造による2者の相互

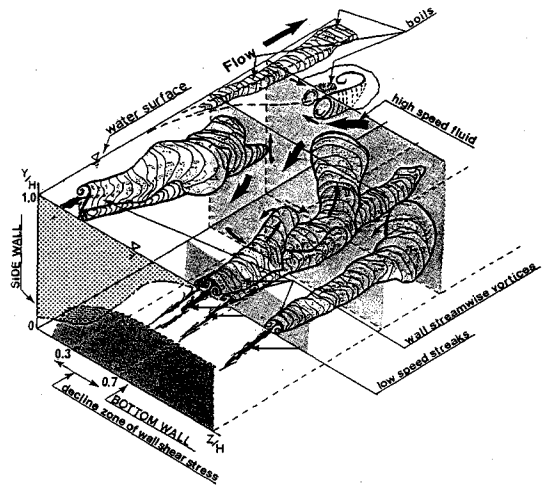


Fig.12 Conceptual model of coherent structure in turbulent open channel flow in corners

作用が顕著となり、その結果として、隅角近傍への二次流れが誘起される。

以上のように、側壁領域における大規模な二次流れの形成には、時空間的に固有の特徴を有する壁縦渦構造とそれ同士によって誘起される相互作用が主要な役割を果たしているように思われる。

ところで、以上の本論の結果は、比較的低レイノルズ数下の実験に基づいて得られたものであり、今後はこれらの結果とより高レイノルズ数下での実験結果を合わせて比較検討することが重要である。

4. 結 論

横断・水平・縦断面視によって開水路乱流側壁領域に形成された組織構造の時空間的な特徴が考察され、その領域固有の壁縦渦構造の解明がなされた。さらに、それをもとに、二次流れの形成機構が詳察され、閉矩形管路とは異なる開水路乱流固有の二次流れが形成されることが明らかとなった。以下に、その主要な結論を示す。

(1) 開水路乱流側壁領域には、水路中央部とは異なる固有の組織構造が存在する。その第1の特徴は壁縦渦の集中現象が領域的に固定されることであり、底壁では $Z/H=0.3\sim 1.2$ の領域、側壁では水表面部に集中して形成される。第2は、その壁縦渦が底壁・側壁では非対称な固有の形態・規模を持ち、とくに両壁より交互に大規模化する配置特性を有することである。

(2) 側壁領域における大規模な二次流れの形成には、時空間的に固有の特徴を有する壁縦渦構造とそれ同士によって誘起される相互作用が主要な役割を果たしている。

(3) 側壁領域の壁縦渦が集中する領域は、平均流速分布の速度勾配が緩やかな領域、低速縞の集中する領域

は壁面せん断応力の極小値を示す領域に、それぞれ対応した。

(4) 上記の結論を踏まえて、開水路乱流側壁領域の組織構造についての概念モデルとそれにもとづく二次流れの形成機構が提示された。

参考文献

- 1) Nikuradse, J. : Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen VDI, Forschungsheft, Bd.291, 1926.
- 2) Prandtl, L. : Über die ausgebildete Turbulenz, Transl. NACA TECH. Memo 435, pp.62~75, 1926.
- 3) Einstein, H.A. and Li, H. : Secondary currents in straight channels, Trans. Am. Geophys. Union, Vol.39, pp.1085~1088, 1958.
- 4) Brundrett, E. and Bains, W.P. : The production and diffusion of vorticity in duct flow, J. Fluid Mech., Vol.19, pp.375~392, 1964.
- 5) Perkins, H.J. : The formation of streamwise vorticity in turbulent flow, J. Fluid Mech., Vol.44, pp.721~740, 1970.
- 6) 富永晃宏・江崎一博 : 長方形断面開水路流の三次元乱流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.
- 7) 柘津家久・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.
- 8) 梶島岳夫・三宅 裕・西本俊幸 : 正方形断面流路内のLES, 機械学会論文集 (B編), 第57巻540号, pp.1~8, 1991.
- 9) 佐賀孝徳・大成博文・渡辺勝利・斎藤 隆 : 開水路乱流隅角部の二次流れの形成機構, 第33回水理講演会論文集, pp.505~510, 1989.
- 10) 谷一郎 : せん断流れにおける縦渦の形成, ながれ2-2, pp.160~165, 1983.
- 11) 大成博文・佐賀孝徳・斎藤 隆 : 壁面領域内乱流構造の立体的可視化, 土木学会論文集, 第345号/II-1, pp.63~714, 1984.
- 12) 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.
- 13) 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.131~140, 1988.
- 14) 佐賀孝徳・大成博文・渡辺勝利・斎藤 隆 : 開水路乱流隅角部の可視化と流速計測の同時併用, 第21回乱流シンポジウム講演論文集, pp.86~90, 1989.
- 15) 柘津家久・中川博次 : 直線開水路乱流の三次元流れに関する実験的研究, 第29回水理講演会論文集, pp.769~774, 1985.

(1991.7.29 受付)

COHERENT STRUCTURE IN TURBULENT OPEN CHANNEL FLOW IN CORNERS

Takanori SAGA, Hirofumi OHNARI and Takashi SAITOU

Coherent structure in turbulent open channel flow in corners is investigated using flow visualization. In the flow visualization, a sheet of laser light, which illuminated fluorescent dye tracer in streamwise, transverse, and plan view, was used. Some new aspects of the coherent structure are inferred from this experiment. The "wall streamwise vortices" on both walls are arrayed alternately, and concentrate to the original regions respectively, where the region of low wall shear stress are formed. And the wall streamwise vortices seem to play important role to form instantaneous secondary flow.