

開水路乱流の底壁面付近に形成された縦渦構造と瞬時レイノルズ応力分布の相互関係

徳山高専 学生会員 ○山下裕介
徳山高専 正会員 渡辺勝利
徳山高専 正会員 佐賀孝徳

1. はじめに

開水路、管路、境界層などの壁を有する壁乱流には、様々な組織構造が形成されることが知られている。中でも縦渦構造は、乱流場の質量や運動量の輸送を担う重要な組織構造と捉えられている。縦渦構造とは、流れ方向に軸を持つ回転成分を有する渦構造であり、これまでもその諸特性に関する数多くの研究が行われてきた¹⁾。しかし、せん断応力および乱れの生成と縦渦構造の相互関係といった流体力学的な特性については、数値計算によって究明が進められているものの実験的には十分な解明に至っていないように思われる。

本研究では、流速計測、流れの可視化法を用いて、開水路乱流の底壁面付近に形成される縦渦構造の時間空間特性及び瞬時流速分布との相互関係について検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験には、幅 60cm、長さ 10m、高さ 15cm、水路勾配 1/1000 に設定した、透明アクリル樹脂板製の滑面開水路を用いた。実験では、PTV (Particle Tracking Velocimetry) による流速計測、蛍光染料注入法による縦渦構造の可視化、さらに縦渦構造と瞬時流速分布との相互関係を検討するために PTV と蛍光染料注入法を併用した DPTV²⁾(Dye-streak-pattern Particle Tracing Velocimetry)を行った。PTV においては、トレーサーとして微細粒子(平均粒径 100 μ m, 比重 1.04)、照明としてスライドプロジェクター(1KW)のスリット光膜(厚さ 3mm)を用いた。図- 1 には実験方法概略を示す。この微細粒子を混入した水溶液を上流端から流れに連続的に注入した後、流れの縦断面、水平断面におけるトレーサー粒子の流動状況をハイビジョンカメラ(SONY HDR-FX-1000)で撮影した。組織構造の可視化では、トレーサーに比重 1.005 の蛍光染

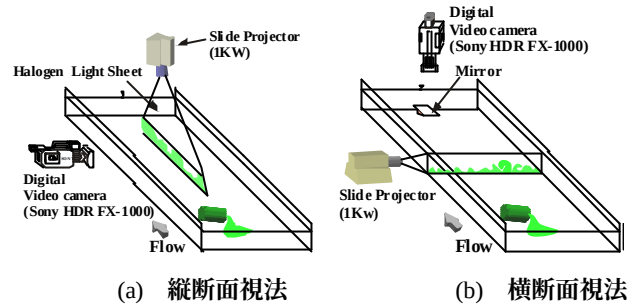


図- 1 実験方法概略

表- 1 実験条件

Case	H(cm)	U(cm/s)	U _* (cm/s)	Q(cm ³ /s)	Re(U _* /v)	Fr U/(gH) ^{0.5}	v(cm ² /s)
A	7.5	5.56	0.295	2523.5	3466	2.05	0.01203
B		5.81		2636.5	3671	2.14	0.01187

料水溶液を、照明には前述のスリット光膜を用いた。トレーサーを流れに注入し、可視化された組織構造の水平、縦断、横断面を前述のデジタルビデオカメラ

で撮影した。DPTV では、微細粒子と蛍光染料水溶液を流れに同時に注入し、スリット光内に可視化された組織構造の断面形象と粒子流動を同ハイビジョンカメラで撮影した。実験条件の詳細は表- 1 に示すとおりである。

3. 実験結果および考察

(1) 流速分布特性

図- 2 (a)は平均主流速分布である。壁乱流の普遍則である直線分布式、対数速度分布に本実験結果は従っている。同図(b)は乱れ強度分布である。乱れ強度 u' は $y/H=0.1(y=0.7\text{cm})$ 付近で最大値が生じ、水表面方向に減少、乱れ強度 v' は $y/H=0.2(y=1.5\text{cm})$ 付近で最大値を生じ、水表面方向に緩やかに減少する。同図(c)はレイノルズせん断応力分布(- uv)である。水表面で0、底壁面付近で最大値を生ずる三角形分布を呈しており、最大値は $y/H=0.14(y=1.0\text{cm})$ で発生していること

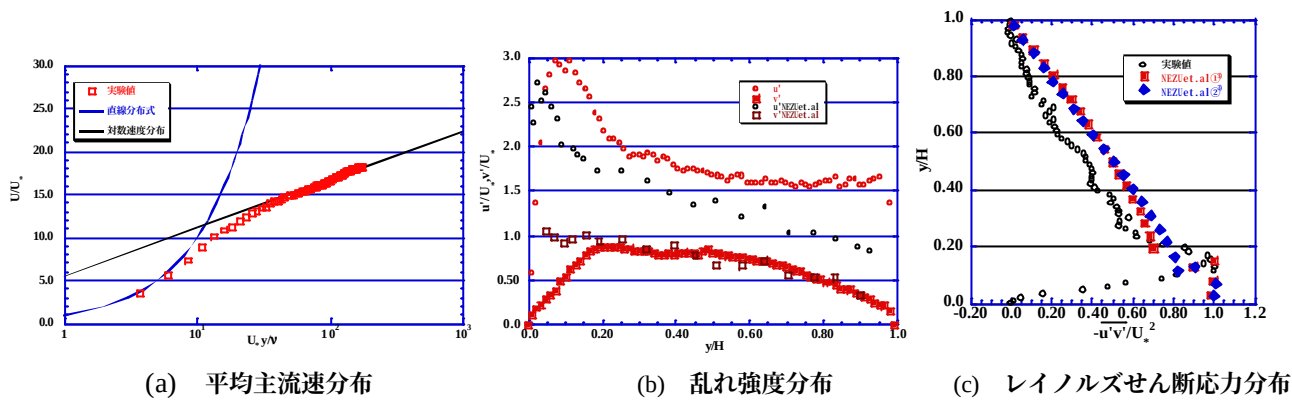


図-2 流速計測結果

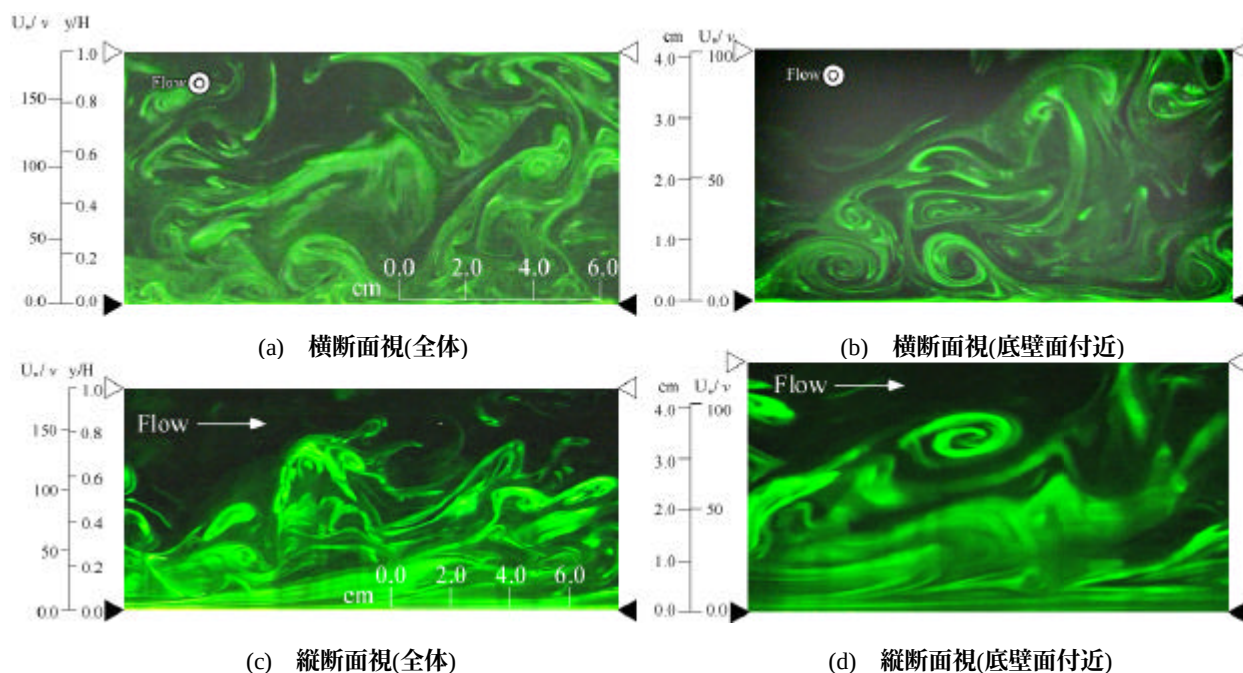


図-3 縦渦構造の可視化

が明らかである。

これらの流速計測の結果から、壁面付近では乱れ強度、レイノルズせん断応力の値が大きいということが明らかとなった。

(2) 縦渦構造とレイノルズ応力の相互関係

流れ場に形成された縦渦構造の横断面視、縦断面視、水平断面視の一例を図-3に示す。同図(a)は底壁面から水表面までを撮影した横断面であり、流れ場に形成された縦渦構造の横断面視を示す。縦渦構造の横断面は渦巻きの形象を呈し、底壁面付近では小規模であり、壁から離れた領域では大規模である。同図(b)は横断面の底壁面近くの横断面視の一例を示す。壁面付近における縦渦構造は回転運動が明瞭であり、左右方向への顕著な揺動運動が観察された。

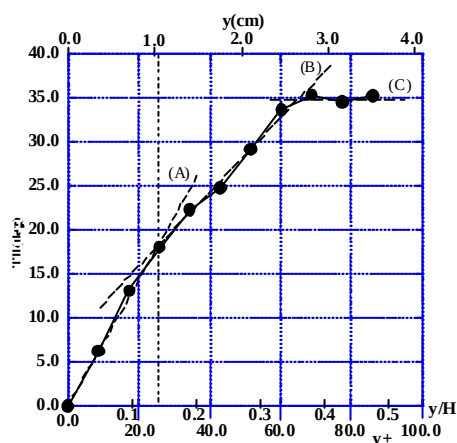


図-4 縦断面視における streak の傾斜角度

同図(c),(d)は全水深と底壁面付近の縦渦構造の縦断面視を示している。縦渦構造の縦断面形象は底壁面付近で縞(streak)状を呈し、壁から離れた領域では横断方向に軸を有する横渦形象が観察された。壁面付

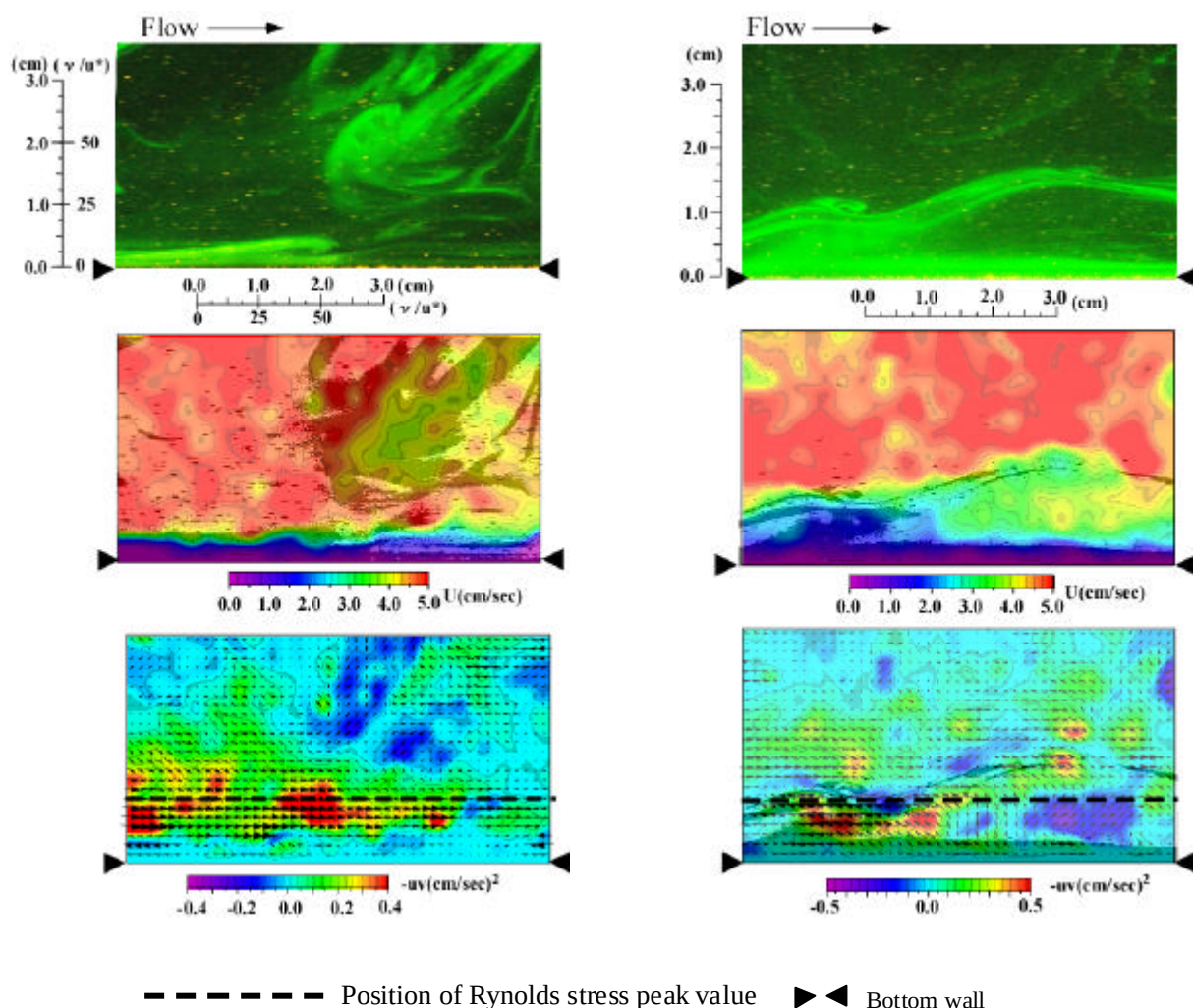


図-5 縦断面 DPTV 解析結果

近の streak は、極壁近くでは底壁面とほぼ平行であるが、壁から離れるにしたがって傾斜角度は急になることが観察された。その角度の変化には測方からの流体の侵入が関係していることが観察された。側方から侵入した流体は、図中の蛍光染料が薄い黒い部分に相当し、壁から離れた相対的に高速と考えられる。壁近くでは乱れ強度やレイノルズせん断応力等の大きな値が生じていることから、streak の傾斜特性を考察することが重要である。

縦渦構造の傾斜特性を把握するために、縦断面視の3分間に亘るビデオ映像において1秒間毎の各高さにおける streak の角度を計測した。図-4は縦断面視における streak の傾斜角度の計測結果を示している。上述のように、壁面付近の縦渦構造の縦断面視は streak 状を呈し、その傾斜角は縦渦構造の傾斜角と考えられる。これより縦渦構造の傾斜角 (TH) は図中に壁からの高さによって増加する傾向にあるこ

とが明らかである。傾斜角度の増加傾向は破線で示したように3つの傾向((A): $0 < y^+ < 25$, (B): $25 < y^+ < 60$, (C): $y^+ > 60$)が認められる。(A)から(B)へ増加傾向が変化する地点では、上述のようにレイノルズせん断応力の最大値となる位置と一致しており、興味深い。

(3) 縦渦構造と瞬時流速分布の相互関係

瞬時流速分布と縦渦構造の相互関係を考察するために、レイノルズせん断応力が最大値を示す $y=1.0\text{cm}$ 付近に注目して、縦断面DPTV可視化ビデオの観察を行った。その結果、底壁面付近では、レイノルズせん断応力の生成過程として知られるSweep(高速流体が壁面に下降する現象)と、Ejection(壁面付近から低速流が上昇する現象)⁴⁾が頻繁に観察された。図-5には、Sweep過程およびEjection過程における縦断面DPTV解析の一例を示す。本図には、縦渦構造の縦断面形象(上)、瞬時主流速分布(中)、瞬時レイノルズ応力

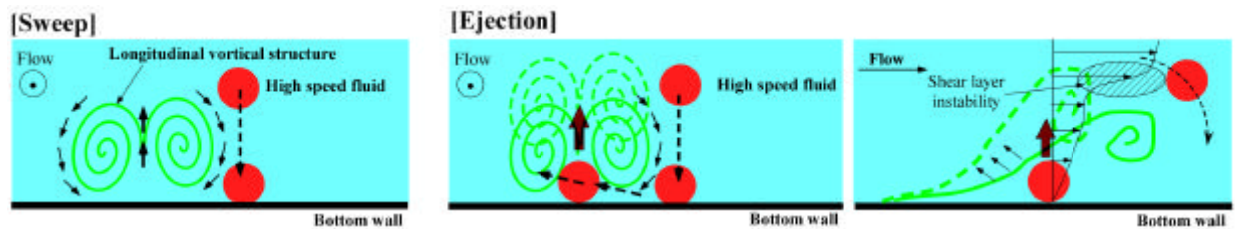


図-6 レイノルズせん断応力の生成と縦渦構造の相互関係

- uv (下)がそれぞれ示されている。同図(a)はSweepの流況に相当する。ここに可視化された縦渦構造は可視化断面を横切っており、上流部はその形象は薄くなっている。可視化断面からはずれた領域は高速であり、断面形象が見られる領域では低速であることが明らかである。この図中の破線は図-2(c)に示したレイノルズせん断応力の最大値発生位置を示している。同図(b)は、Ejectionに相当する。ここで可視化された縦渦構造の縦断面形象は流下に伴って、水表面方向へ上昇することが観察された。この上昇運動の発端となるのが、可視化断面の側方から侵入する流体であり、下流側のstreakの間に挟まれた蛍光染料の薄い領域に相当する。この領域は低速である縦渦構造の形成領域と異なり、比較的高速であることが明瞭である。この高速流の侵入によって、上流から移動してきた縦渦構造は急激に減速し、侵入した流体に乗り上げ、結果的に上昇することになると考えられる。この過程で2象限($u < 0, v > 0$)を示す変動ベクトルが生成され、大きな瞬時レイノルズせん断応力が縦渦構造に沿って生成されていることが明らかである。

図-6には、レイノルズせん断応力の生成過程であるSweepおよびEjectionと縦渦構造の相互関係の概念図を示している。Sweepでは、縦渦構造の回転運動によって壁から離れた領域から高速流が底壁面付近に輸送され、その過程で大きなレイノルズせん断応力($u > 0, v < 0$)が生成される。一方、Ejectionでは、Sweepによって輸送された高速流体が流下する縦渦構造の下流に侵入することにより、縦渦構造の急激な減速および上昇運動($u < 0, v > 0$)が発生し、大きなレイノルズせん断応力($-uv$)が生成されることが考えられる。

以上のように底壁面付近の縦渦構造は、瞬時レイノルズせん断応力の生成に重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

4. おわりに

底壁面付近の縦渦構造と瞬時速度分布の相互関係を流れの可視化法を用いて考察した。その結果、壁面付近の縦渦構造の傾斜角度は壁面からの距離に比例して増加するが、その増加率はバッファ層内で変化することが見出された。また、縦渦構造はレイノルズせん断応力を発生させる Sweep, Ejection と密接に関係しており、瞬時レイノルズせん断応力の生成に主要な役割を果たしていることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Robinson, S.K.: Coherent motion in the turbulent boundary layer, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.23, pp.602-639, 1991.
- 2) 大成博文, 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 波多野慎: 壁乱流の縦断面せん断構造, 土木学会論文集, No.677-55, pp.31-41, 2001.
- 3) Nezu, I.: Numerical Calculation of Turbulent Open-Channel Flows in Consideration of Free-Surface Effect, *Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ.* Vol. 49, No.2, 1990.
- 4) Kline, S.J., Reynolds, W.C., Schraub, F.A., Runstadler, P.W.: The structure of turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.*, Vol.30, pp.741-773, 1967.