

## 底壁面に縦棧粗度を有する開水路流れの乱流特性

國弘栄司<sup>\*1</sup> 渡辺勝利<sup>\*2</sup>

### Characteristics of Turbulent Structure in Turbulent Open Channel Flow with Longitudinal Ridge Elements

Eiji KUNIHICO <sup>\*1</sup> and Katsutoshi WATANABE <sup>\*2</sup>

#### Abstract

In this research the characteristics of turbulent structure in turbulent open channel flow with longitudinal ridge elements were investigated by using flow visualization techniques. As the results, over ridges the mean primary flow velocity was low and the turbulence intensities were high. And relatively over troughs the mean primary flow velocity was high and the turbulence intensities were low. Moreover, it was confirmed that a large-scale secondary flow balancing timelessly was formed over the ridge. Further, it becomes clear that the important role was accomplished for the large-scale secondary flow and the formation of turbulence under the large-scale vortex structure over the ridge.

**Key Words :** turbulent open-channel flow, longitudinal ridge element, large-scale coherent structure, secondary flow, flow visualization technique

#### 1. 序論

底壁面に粗度や粗度を有する開水路流れは、滑面の流れと比較して、実河川や人工水路といった実在の流れに近いと考えられることから、その乱流特性の究明は工学的に重要である。

なかでも、開水路流れの底壁面に縦筋や縦棧粗度を設置すると、その平均流速や乱れの分布形状が3次元化することが知られている。このような複雑乱流は、実河川における並列らせん流の形成や熱交換器の放熱効果等と関係することから、その乱流構造の解明は河川工学、流体力学上重要な課題と考えられる。また、粗度によって二次流れを安定して形成させることは、流れの受動制御(passive control)の一例と考えることができ、その応用を可能にするには流れの本質的理解が不可欠であると考えられる。

この流れ場の特徴については、これまでに実験および数値解析によって、その平均流特性や乱れの分布特性の究明が進められている。Nezuら<sup>1)</sup>は、矩形ダクトの上下壁面に台形断面を有する縦棧粗度を等

間隔に設置した流路において、熱線流速計を用いた詳細な乱流計測を行った。その結果、本流れ場には大規模な二次流が形成され、縦棧粗度上では相対的に乱れが増大することが明らかにされた。古屋ら<sup>2)</sup><sup>3)</sup>は、乱流境界層に、流れ方向に置かれた単一の正方形断面、長方形断面を持つ角柱周辺の流れの特徴を熱線流速計を用いて検討した。その結果、角柱周辺の平均流速分布特性、乱れ分布の特性および壁面せん断応力の分布特性が詳細に明らかにされた。また中村ら<sup>4)</sup>は、流れ方向突起群まわりの乱流境界層の特性を熱線流速計を用いて詳細に検討した。その結果、突起群上の大規模2次流れの存在、壁面せん断応力分布、乱れエネルギー分布の特性が明らかにされた。大本ら<sup>5)</sup>は、DNSを縦筋河床上の流れに適用し、平均流および乱流特性を検討した。その計算結果は、計測結果と良好な一致を示した。また、平均渦度方程式をもとに二次流の発生機構について詳細な検討を行った。

このように縦棧粗度や縦筋を有する乱流場に関する研究が進められ様々な知見が得られているが、流

<sup>\*1</sup> 環境建設工学専攻

<sup>\*2</sup> 土木建築工学科

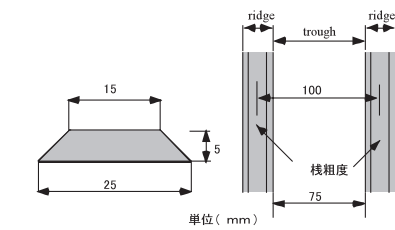
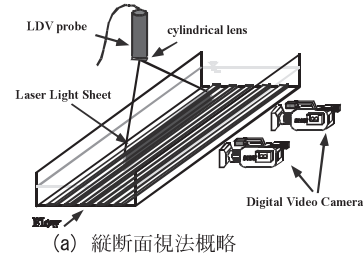
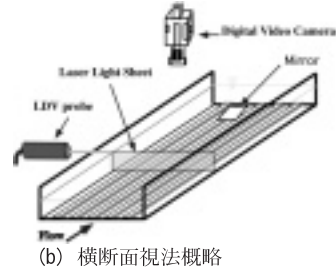


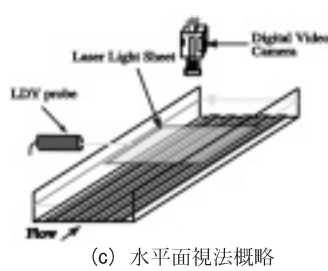
図-1 稜粗度断面および配置間隔



(a) 縦断面視法概略



(b) 横断面視法概略



(c) 水平面視法概略

図-2 流れの可視化法

表-1 実験条件

	水温 (°C)	動粘性係数 $\nu$ *10 <sup>-2</sup>	水深 H(cm)	レイノルズ数 $Re=UmH/\nu$	平均流速 $U_m$ (cm/sec)
CaseA	21.3	0.976	5.2	3957	7.72
CaseB	19.8	1.020	5.0	3925	8.01
CaseC	22.0	0.960	4.8	2186	4.20

れ場に形成される組織構造の究明はほとんどなされていない。組織構造は基本的に乱れの発生や運動量の輸送に主要な役割を果たしていることから、その解明は乱流研究の主要な課題となっている。さらに、本流れ場のような、壁面の境界条件が滑面と異なるいわゆるnon-canonicalな乱流場における組織構造の解明は、流体力学上、極めて重要な課題となっている<sup>9)</sup>。

以上を踏まえて本研究では、底壁面に縦稜粗度を設置した開水路流れに形成される組織構造の諸特性に注目して、その乱流構造を究明した。

## 2. 実験装置および方法

本実験には、水路勾配を1/1000に設定した、長さ10m、幅60cm、高さ15cmの透明アクリル樹脂板製の滑面開水路を用いた。水路の上流端に整流装置としてハニカム（径4mm、長さ3.2cm、幅25cm）を設け、その下流26cmの地点には乱流促進用のスプリングワイヤを設置した。また、水路の下流端には、水位調整用の堰を設けている。図-1には、本水路の底壁面に設置した縦稜粗度の断面形状とその設置間隔を示している。本粗度の断面形状はNezuら<sup>1)</sup>の研究を参考にした。この縦稜粗度をスプリングワイヤ直下か

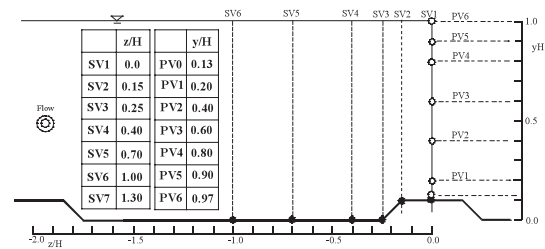


図-3 縦断面視および水平断面視位置

ら下流8mの地点まで設置した。

本実験では、PTV(Particle Tracking Velocimetry)による流れ場の流速測定、組織構造の可視化を行った。PTVにおいては、トレーサーとして微細粒子（平均粒径150 $\mu$ m、比重1.04）を、照明としてレーザースリット光（厚さ3mm）を用いた。この微細粒子を混入した溶液を、上流から流れに連続的に注入し、図-2のように、縦断面、横断面、水平断面におけるトレーサー粒子の流動状況をデジタルビデオカメラで撮影した。縦断面、水平断面の可視化位置は図-3に示している。組織構造の可視化では、トレーサーに蛍光染料水溶液（比重1.005）を、照明に前出のスリット光を用いた。本トレーサーを上流から一定量を注入した後、流れの各断面におけるその流動状況をデジタルビデオカメラを用いて撮影した。

さらには、上記微細粒子と蛍光染料水溶液を同時

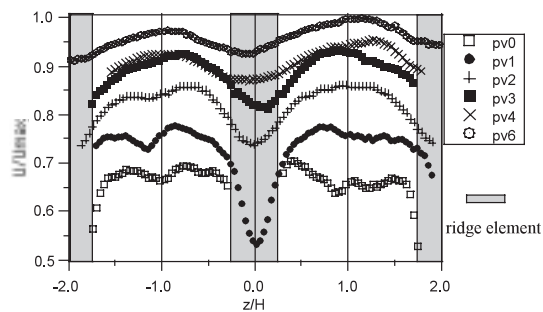
に注入することによって、組織構造と速度情報を同時注出する DPTV<sup>7)</sup> (Dye streak Pattern Particle Tracking Velocimetry)を流れの各断面に適用した。

PTVおよびDPTVの実験結果については、その粒子流動画像を1/30秒毎に30秒、あるいは60秒間にわたって連続的にコンピュータに取り込み、流体解析ソフトウェア「Flow PTV」(株)ライブラリ)によって瞬時流速成分を求めた。さらに、それらの統計処理を行い平均流速分布、乱れ量分布を求めた。実験条件は表-1に示すとおりである。

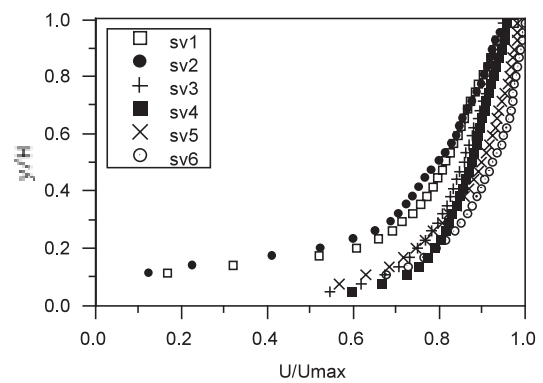
### 3. 実験結果および考察

#### (1) 流速分布特性

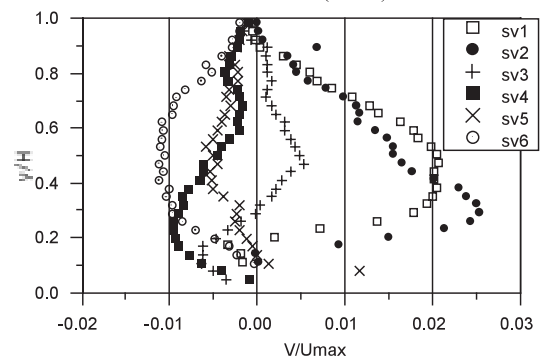
図-4はPTVによって得られた平均流速分布を示している。なお、これらの流速分布はいずれも最大流速  $U_{max}$  (CaseA=9.3cm/sec, CaseB=9.6cm/sec)で無次元化されている。(a),(b)は主流方向の平均流速( $U$ )の横断方向、鉛直方向分布をそれぞれ示している。(a)に注目すると、各々の高さで相対的に積粗度(以下 ridge と呼ぶ)上では低速、底壁面(以下 trough と呼ぶ)上では高速であることが明らかである。さらに、底壁面付近(PV0, PV1)では trough の中心( $y/H = \pm 1.0$ )近傍で局所的に低速になっていることが注目される。また ridge 上で速度勾配( $\partial U / \partial z$ )の変化が顕著であり、それは相対的に底壁面付近が急で、水表面に近づくにつれて緩やかになっていることが明らかである。なお、PV0は積粗度上において底壁面の反射光が強く流速の計測が不可能であった。(b)においては、ridge 上の速度分布は trough 上のそれと比較して、壁面付近でより低速かつ速度勾配が緩やかな分布となっている。また、本図においても比較的 trough 上の流速が速くなっているが、とくにSV4においては底壁面付近でその傾向が顕著である。(c)は鉛直方向の平均流速( $V$ )分布である。同図中の正の値は水表面方向、負の値は底壁面方向の流速を示す。これより ridge 上では上昇、trough 上では下降傾向にあることが明らかである。しかし、SV1の底壁面極近傍においては下降流が形成されていることが注目される。このような計測結果は、古屋ら<sup>3)</sup>や中村ら<sup>4)</sup>の実験結果においても認められる。また、SV4では下降流が形成され、そのピーク値が他のものより底壁面近くに生じていることが明らかである。これが(b)のSV4における流速分布特徴を形成して



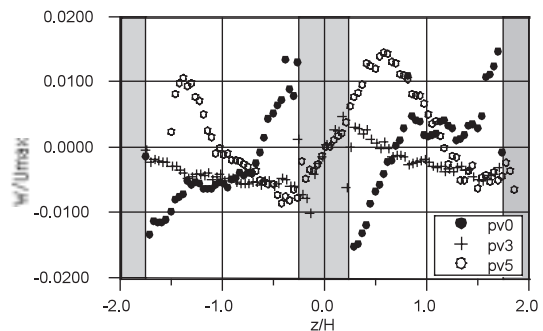
(a) 主流方向流速 (CaseB)



(b) 主流方向流速 (CaseA)



(c) 鉛直方向流速 (CaseA)

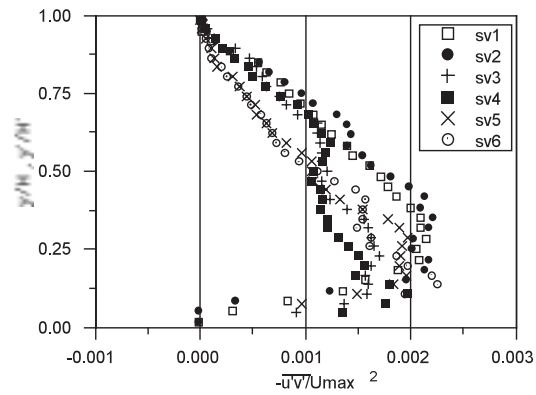


(d) 横断方向流速 (CaseB)

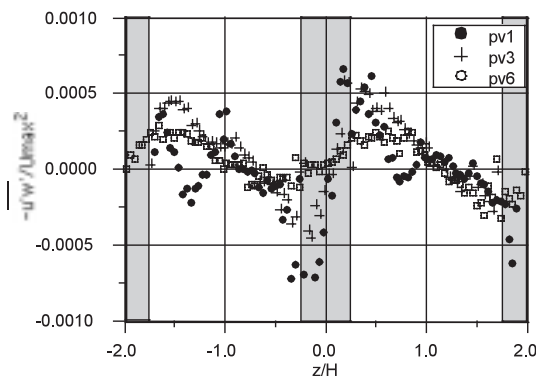
図-4 平均流速分布 (CaseA, CaseB)

いるものと考えられる。(d)は横断方向流速(W)の分布を示している。同図中の正の値は右岸方向、負の値は左岸方向の流速を示している。これより、ridgeの水表面付近ではridgeからtrough方向への流れが形成され、一方、底壁面付近ではtroughからridge方向への流れが形成されていることが認められる。(c)と(d)の結果より、ridge上で上昇し、その両側のtrough上で下降する左右一対の回転を示す大規模な二次流れの存在が推察される。

図-5は、PTVによって得られたレイノルズ応力の分布を示している。なお、レイノルズ応力は(a),(b)ともに最大流速 $U_{max}$ の2乗で無次元化されている。(a)はレイノルズ応力 $(-\overline{u'v'})$ を示している。SV1, SV2についてはridge上からの距離 $y'$ 、ridge上の水深 $H'$ を用いて表している。これより、壁面付近を除いてridge上のレイノルズ応力の値はtrough上に比べて大きいことが明らかである。また、ridgeとtroughの中間部のSV3,SV4は、 $y/H > 0.6$ ではridge上の分布に従い、 $y/H < 0.6$ ではtrough上の分布に近づくような、複雑な形となっている。このようなSV3,SV4のレイノルズ



(a) レイノルズ応力  $-\overline{u'v'}$  (CaseA)



(b) レイノルズ応力  $-\overline{u'w'}$  (CaseB)

図-5 レイノルズ応力分布

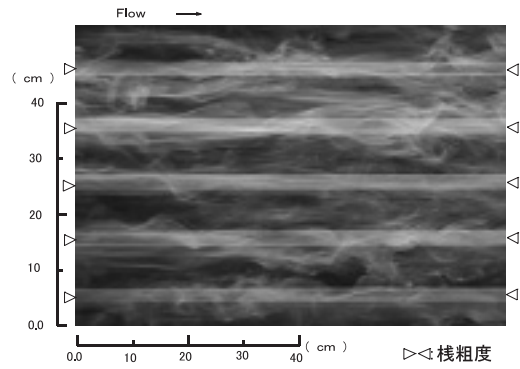
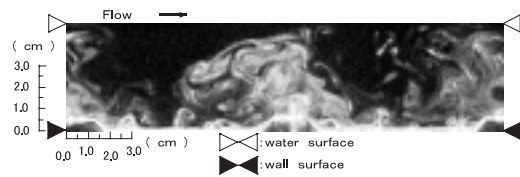
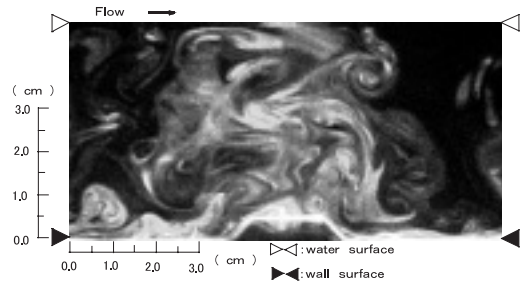


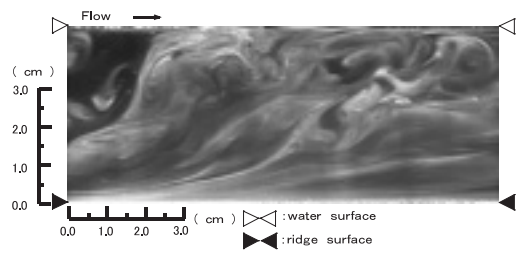
図-6 平面視の一例



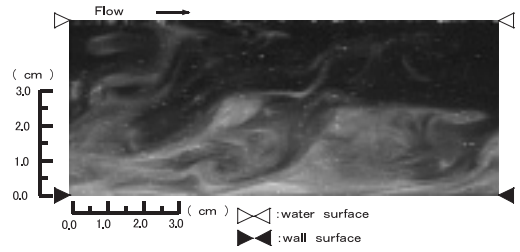
(a) 横断面視



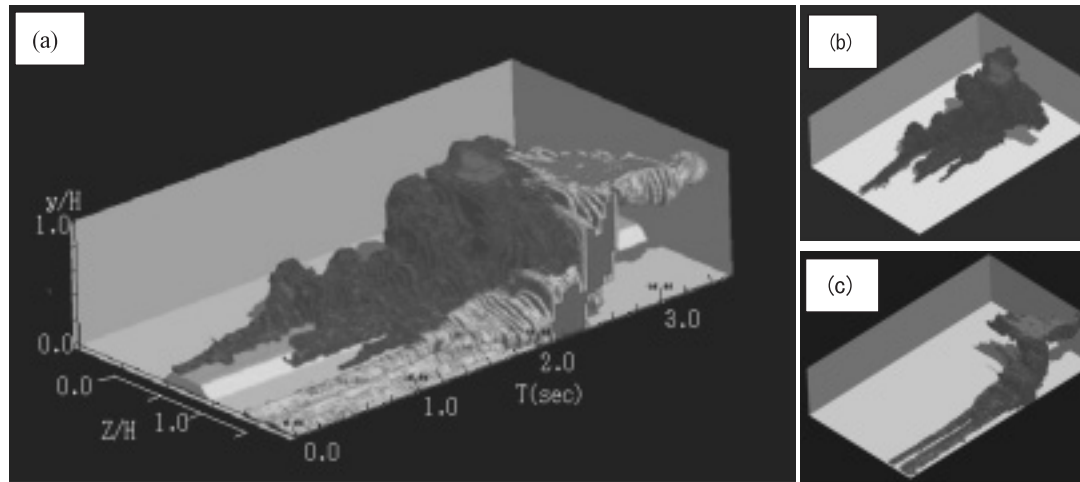
(b) 横断面視拡大  
図-7 横断面視の一例



(a) 縦断面視 ridge(SV1)



(b) 縦断面視 trough(SV6)  
図-8 縦断面視の一例



(a)組織構造図 (b)ridge上の構造図 (c)trough上の構造図

図-9 大規模組織構造の立体構造の一例

応力分布は Nezu ら<sup>1)</sup>の結果においても認められることから、ridge と trough の中間領域では両側の影響を受けた複雑な流れとなっていることが推察される。(b)はレイノルズ応力 $(-\overline{u'w'})$ を示している。この値は、底壁面近くで大きくなることが明らかである。底壁面近傍ではピーク値はridgeの外端付近で生じ、水表面に近づくにつれて、そのピークの位置がtrough方向に移動している。このピークの位置は図-4(a)の速度勾配 $(\partial U/\partial z)$ の大きな位置にほぼ対応している。また、PV0,PV1の $z/H=\pm 1.0$ における複雑な分布もこの速度勾配の変化に対応している。

以上のように、ridge上とtrough上では主流速の明瞭な遅速があり、ridge上とその周辺部ではtrough上と比較して乱れの生成が顕著であることが、その重要な特徴として明らかとなった。

## (2) 組織構造の特徴

図-6は、平面視の結果の一例である。流況観察では横粗度上に染料の集中する領域が顕著であることが注目された。この流れの横断面視の一例が図-7(a)である。平面視における染料の集中領域は大規模な渦構造に相当していることが確認された。その渦構造の拡大写真が(b)である。これよりこの大規模渦構造は複数の渦構造が合体することにより形成されていることが明らかである。

図-8はridge(SV1)上およびtrough(SV6)上の縦断面視の一例である。ridgeの大規模構造内では水表面まで達する強い上昇流が頻繁に発生していることが観察された。一方、troughでは、底壁面に発生した渦

構造の水表面への発達、下降流により抑えられている様子が観察された。

図-9は、ridge上およびtrough上に形成された大規模組織構造の時空間構造図の一例である。本図は大規模構造の横断面形象をスケッチし、それを3.3秒間(99枚)にわたってコンピュータを用いて重合したものである。本図の時間軸の長さスケールは平均流速に描画時間(3.3秒)を乗して示されている。ridge上の構造に注目すると、これはridge上とその周辺の3つの渦構造が合体して、水表面まで達する大規模な構造となっていることが明らかである。その部分を抽出したものが(b)であり、それは大規模化すると共に右岸方向に張り出している。一方、trough上では、2つの渦構造が合体して相対的にridge上のものよりも小規模な構造が形成されている。その部分を抽出したものが(c)である。この構造は縦断面視で観察されたように、水表面への発達が抑えられており、その水表面への発達は急角度であることが $T=2.0\text{sec}$ 付近にて認められる。また、本構造は左岸方向に張り出していることが分かる。注目すべき点は、この両者は先端部では合体して、全体としては大きなアーチ型あるいは馬蹄形の構造を形成していることである。このような大規模構造は概念図やモデルとしては描かれているものの、時空間構造が示された例は無く、本結果は極めて重要であると考えられる。

図-10は、このような大規模構造の形成領域の経時変化を検討したものである。本図は、横断面視画像をPV1-6のそれぞれの断面で約1mmの厚さで切断し、その画像を30秒間つなぎ合わせたものである。

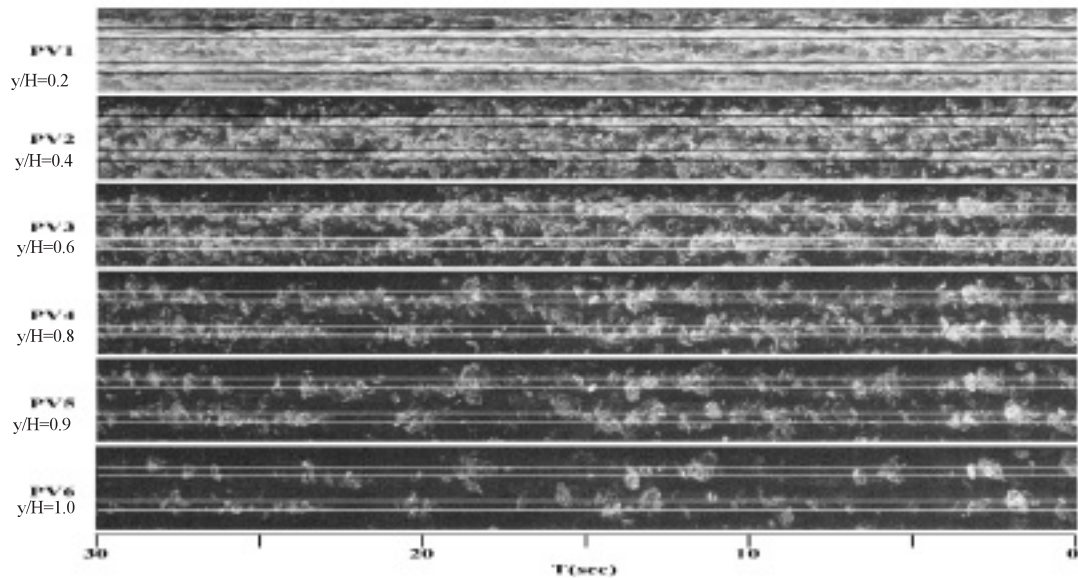


図-10 組織構造の経時変化

なお、栈粗度の位置は図中に直線で示しているが、PV1,2では黒線で、PV3~6では白線でそれぞれ示している。PV1においては染料は、長時間にわたって広い領域に存在し、太いstreakとして表れている。とくに、ridge上ではそれが顕著に認められる。trough上にも相対的に短く、やや細いstreakが認められる。PV2ではPV1と異なりstreak上の染料の存在は消失し、渦構造の水平断面に類似した形象が見られる。PV3~6へ底壁面からの高さが増加すると、染料の存在領域はridge上およびその周辺に集中しており、その形成時間も間欠的になっていることが明らかである。

図-11は図-10の画像を2値化して求めた、それぞれの断面における染料の時間平均存在頻度を表したものである。この染料の時間平均存在頻度は図-4(a)の流速分布とほぼ逆位相になるという興味深い結果となっている。これは、大規模構造が主流速の遅速の生成に直接関係していることを示している。また、本図を詳しく見てみると、 $y/H=0.2$ において、○で示すようにtrough中心付近で頻度が局所的に高くなっている。これはtrough中心付近に組織構造が存在することを示しており、図-4(a)において底壁面付近のtrough中心近傍での局所的な減少に対応していると考えられる。

### (3) 組織構造と速度情報の相互関係

図-12は、ridge上の縦断DPTVの一例である。(a)は

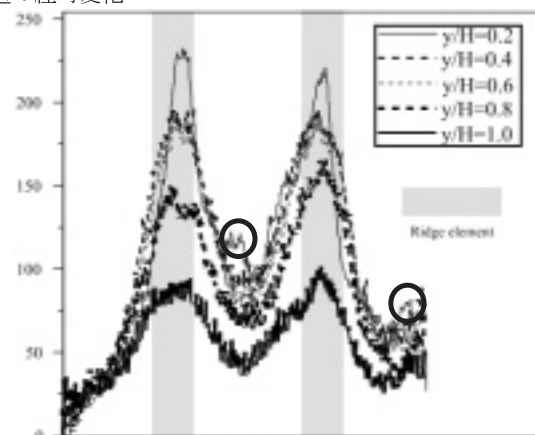


図-11 染料の存在頻度

大規模組織構造の縦断面形象の一例である。図中の白い点は粒子であり、これらから求めた瞬間ベクトルから平均流速を差引いた速度変動ベクトルを示したものが(b)である。図中では、 $u' < 0$  で、 $v' > 0$  となる、いわゆる二象限を示すベクトルが多く存在していることが明らかである。とくにそれらは、ridge上の組織構造内で多く分布していることが、本図ならびに他の解析結果からも明らかとなった。(c)は瞬間レイノルズ応力( $-\overline{u'v'}$ )の分布を示したものである。これより、大規模組織構造内にレイノルズ応力の比較的大きな値が分布していることが明らかである。また、底壁面から離れた領域でもレイノルズ応力の正の大きな値の分布が存在していることも認め

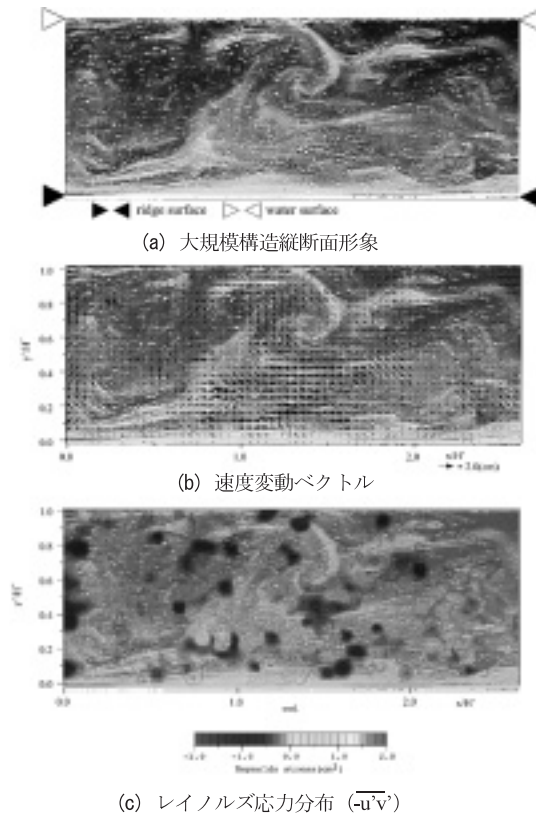


図-12 縦断面DPTV解析結果

られる。この正の値は、上記の二象限を示す変動ベクトルに相当している。上述のように ridge 上には大規模構造が時間的に安定して形成されることから、この構造が ridge 上における相対的に大きなレイノルズ応力の生成に主要な役割を示していると考えられる。

図-13は横断面DPTVの結果の一例である。(a)は、ridge上に形成された大規模渦構造の横断面形象である。この画像では右回転を示す渦形象が示されている。この時の瞬間流速ベクトルを重ねたものが(b)である。これより時計回りを示す渦形象と瞬間流速ベクトルの分布が対応していることが明らかである。この瞬間流速ベクトルを一分間平均したものが(c)である。棧粗度の左では左回転、右では右回転の対を成す大規模な二次流れが形成されている。ridge上の大規模構造は、前述のように時間的に安定して形成され、さらにそれらが瞬時の二次流を形成させることから、この大規模な二次流形成の主要因であると考えられる。

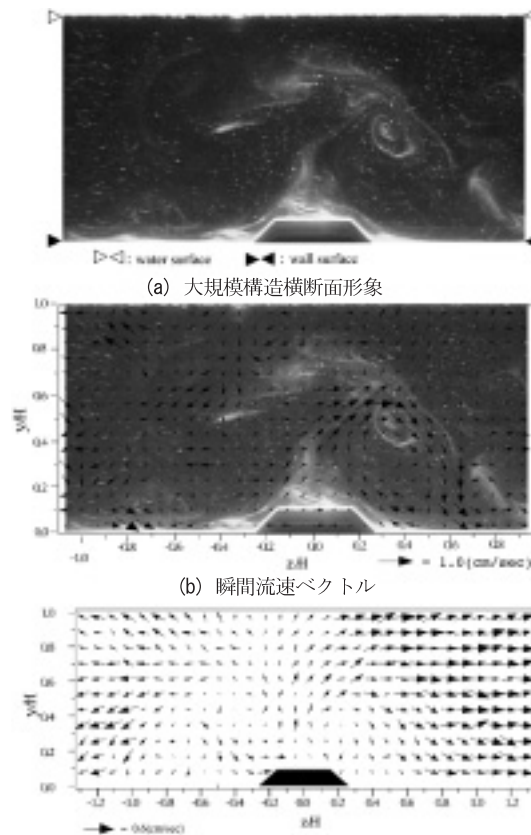


図-13 横断面DPTV解析結果

#### 4. 結論

本研究では流れの可視化法を用いて、縦棧粗度を有する開水路流れにおける平均流速分布および乱れ分布特性、組織構造の特性、その両者の関係を検討した。以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

- (1)主流速については、相対的に ridge 上で低速、trough 上で高速となる。乱れについては、ridge 上で大きく、trough 上で小さくなる。
- (2)ridge 左右にはそれぞれ左回転、右回転を示す大規模な二次流が形成される。
- (3)ridge 上には大規模な渦構造が時間的に安定して形成される。
- (4)ridge 上の大規模渦構造は、主流速分布の遅速の形成、レイノルズ応力の生成および大規模な二次流の形成に重要な役割を果たしている。

## 文献

- 1) Iehisa Nezu, Hiroji Nakagawa: CELLULAR SECONDARY CURRENTS IN STRAIGHT CONDUIT, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, VOL.110/NO1, pp. 173-193,1984.
- 2) 古屋善正, 中村育雄, 宮田勝文, 福与豊: 角に沿う乱流境界層 (正方形断面の角柱の場合), 日本機械学会論文集 (第2部), 42巻359号, pp.2878-2886, 1976.
- 3) 古屋善正, 中村育雄, 宮田勝文, 山康博: 角に沿う乱流境界層 (長方形断面の角柱の場合), 日本機械学会論文集 (第2部), 41巻350号, pp.2091-2099, 1975.
- 4) 中村育雄, 宮田勝文, 中浜亮治, 古屋善正: 流れ方向突起群まわりの乱流境界層, 日本機械学会論文集 (B編), 45巻400号, pp.1816-1824,1979.
- 5) 大本照憲, 林俊一郎: 一般座標系高精度DNSの縦筋河床流れへの適用, 日本計算工学会論文集, paperNo. 20010020, 2001.
- 6) Robinson,S.K: COHERENT MOTION IN THE TURBULENT BOUNDARY LAYER, *Annu.Rev. Fluid Mech*, pp. 601-639,1991.
- 7) 大成博文, 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 斉藤隆, 波多野慎: 壁乱流の縦断面せん断構造, No. 593/ II -43, 31-40, 1998. 5.

(2002.9.5 受理)