

縦棧粗度を設置した開水路乱流の組織構造

COHERENT STRUCTURE IN TURBULENT OPEN CHANNEL FLOW WITH LONGITUDINAL RIDGE ELEMENTS

渡辺勝利¹・國弘栄司²

Katsutoshi WATANABE and Eiji KUNIHIRO

¹ 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 (〒775-8585 山口県徳山市久米高城3538)

² 学生会員 徳山工業高等専門学校専攻科 環境建設専攻 (〒775-8585 山口県徳山市久米高城3538)

In this research the characteristics of coherent 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. It was confirmed that the formative region of large-scale coherent structure concentrated over the ridge. Further, it becomes clear that the large-scale coherent structure play important role to form the large-scale secondary flow and the instantaneous Reynolds stress over the ridge

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

1. はじめに

棧粗度は河床洗堀の抑制に有効な機能を有する水理構造物である。最近では、それを水路床あるいは水路湾曲部側壁に斜めに設置して、開水路流れを制御する試みがなされている^{1),2)}。このような乱流制御の手法を確立するには、流れ場の乱流特性を理解する必要があるが、流れと平行に置かれた棧粗度、いわゆる縦棧粗度上の乱流構造の解明は、その素過程として重要と考えられる。

縦棧粗度上の乱流構造についてはNezuら³⁾によって詳細な究明がなされている。彼らは、矩形ダクトの上下壁面に縦棧粗度を等間隔に設置した流れにおいて、熱線流速計を用いた詳細な乱流計測を行った。その結果、セル状の大規模な二次流れの存在をはじめとする平均流および乱れ特性を明らかにした。また、渦度方程式、平均流エネルギー方程式に基づいて乱流構造の本質的特徴を明らかにした。また、古屋ら^{4),5)}、中村ら⁶⁾は、流れ方向の単一突起あるいは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、大規模二次流れの存在、壁面せん断応力分布、乱れエネルギー分布の特性等を明らかにした。

このように縦棧粗度上や乱流境界層中の突起群周辺の流れの乱流構造に関する特徴が明らかにされているが、その形成機構については十分な究明がなされていないように思われる。

ところで、筆者はこれまでに、開水路乱流に形成され

た組織構造に関する究明を進め、組織構造が瞬時の渦度やレイノルズ応力を生成していることを明らかにした⁷⁾。

上述の棧粗度上の乱流特性についても、そこに形成された組織構造が直接関係していると推察される。

そこで本研究では、縦棧粗度を底壁面に設置した開水路乱流の乱流構造の特徴を考察し、それらと乱流特性との相互関係について検討した。

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。水路の上流端には整流装置としてハニカム、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。図-1には、本水路の底壁面に設置した縦棧粗度の断面形状とその設置間隔および座標系を示している。この縦棧粗度を中心間隔10cmで、スプリングワイヤ直下から下流8mの地点まで設置した。

本実験では、上流から5m付近において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 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(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た後、流れの縦断面、横断面、水平断面(図-2)におけるトレーサー粒子の流動状況を

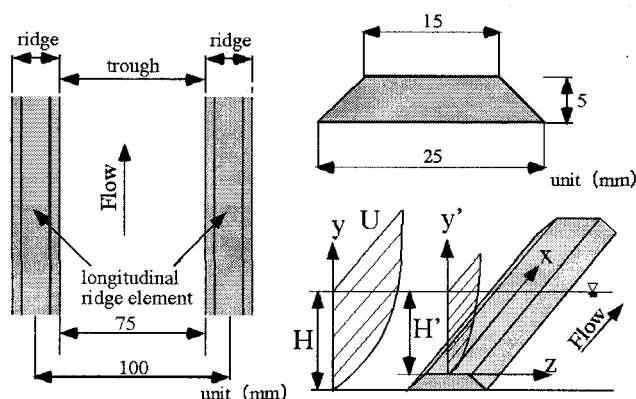


図-1 縦横粗度断面，配置間隔および座標系

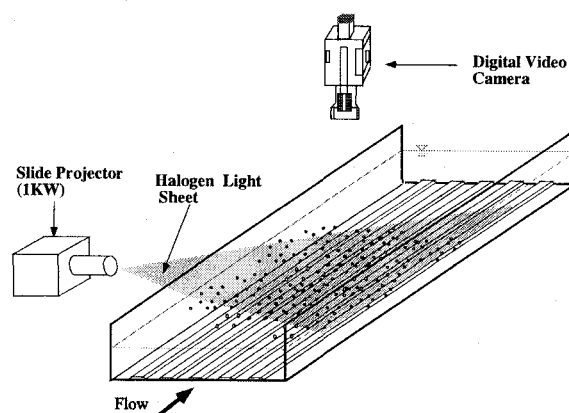


図-2 水平断面PTV概要

表-1 実験条件

Case	水温 (°C)	動粘性係数 ν (cm/sec ²) $\times 10^{-2}$	水深 H (cm)	レイノルズ数 $Re = (U_m \cdot H / \nu)$	平均流速 U_m (cm/sec)	最大流速 U_{max} (cm/sec)
A	21.3	0.976	5.2	3957	7.72	9.3
B	19.8	1.020	5.0	3925	8.01	9.6
C	22.0	0.960	4.8	2186	4.02	—

デジタルビデオカメラ (SONY DCR-VX1000) で撮影した。なお、横断面視においては、可視化断面より下流約1.5mに45°に傾斜した鏡 (幅10cm, 高さ3cm) を設置し、それが可視化断面に影響の及ぼさないことを確認して撮影した。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) , 照明に前出のスリット光を用いた。本トレーサーを可視化断面の上流約2mから約200ccを一度に注入し、注入に伴う攪乱がなくなった後に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で撮影した。また、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抽出するDPTV⁷⁾ (Dye streak Pattern Particle Tracking Velocimetry) を流れの各断面に適用した。

PTVの解析においては、その粒子流動画像を1/30秒毎に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および乱れの分布を求めた。

実験条件は、Nezuら³⁾ の研究結果を参考にして、横断面間隔と水深の比が2:1になるよう設定した。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-4は、PTVによって得られた平均流速分布を示している。本図中のSV, PVの記号は計測断面位置であり、その詳細は図-3に示すとおりである。(a)は主流方向の平均流速(U)の横断方向分布である。本図よりPV0を除くいずれの断面においても、相対的に横粗度 (以下、ridgeと呼ぶ) 上とその周辺では低速、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。また、ridge上とその周辺の速度勾配 ($\partial U / \partial z$) は、底壁面側で大きく、水表面に近づくにつれて減少している。さらに、底壁面付近(PV0, PV1) ではtroughの中心($z/H = \pm 1.0$) 周辺で局所的な低速領域が形成されている。(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ことが認められる。(c)は鉛直方向の平均流速(V)分布である。これよりridge上(SV1, SV2)では壁面の極近くを除いて上昇傾向、trough上(SV4~6)では下降傾向にあることが明らかである。SV1の底壁面極近傍においては下降流が形成されているが、このような結果は、Nezuら³⁾ の測定結果においても同様の傾向が窺える。(d)は横断方向流速(W)の分布を示している。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。(a)はレイノルズ応力($-\overline{u'v'}$)を示している。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のレイノルズ応力分布はNezuら³⁾ の計測結果においても認められることから、ridgeとtroughの境界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($-\overline{v'w'}$)を示している。その分布はほぼ点対称となる形状を呈している。

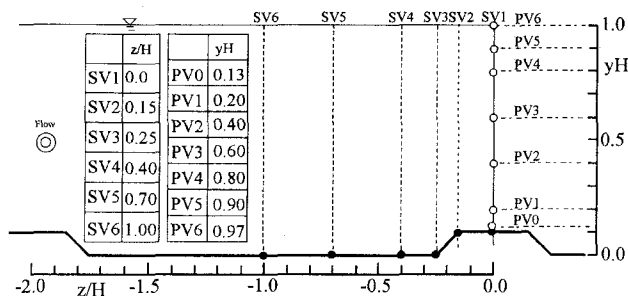


図-3 縦断面および水平断面可視化位置

その正負のピーク値は、底壁面側ではridgeの外端付近で生じているが、水表面に近づくにつれて、trough方向に移動している。

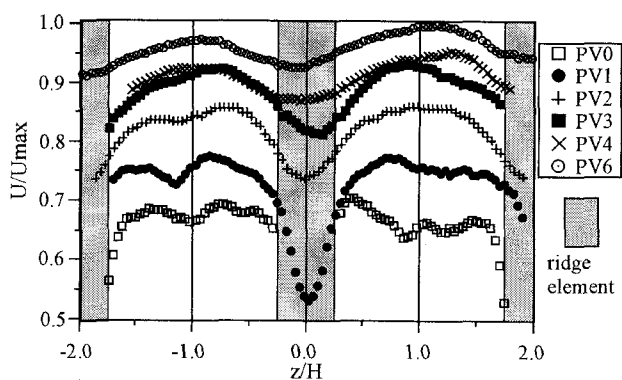
以上のように、ridge上とtrough上では主流速の明瞭な遅速があり、ridge上とその周辺部ではtroughと比較して乱れの生成が顕著であることが、その重要な特徴として明らかとなった。

(2) 組織構造の特徴

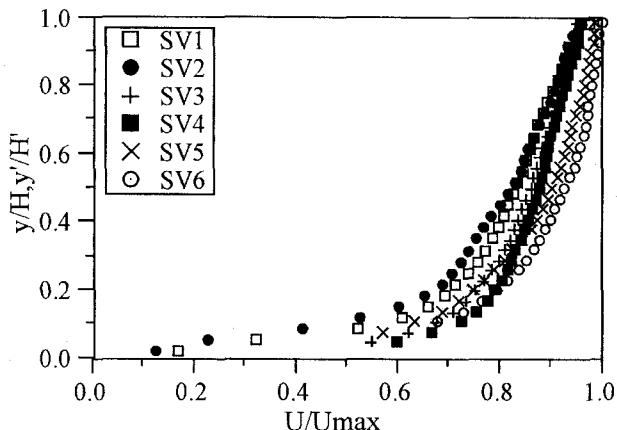
図-6は、流れ場に形成された組織構造の平面視の一例である。図中の白い雲状の領域が組織構造に相当する。これは、栈粗度上において集中して形成されることが流況観察において注目された。図-7は、流れの横断面視の一例である。平面視におけるridge上の染料の集中領域は、(a)に見られるように大規模な渦構造に相当しており、それは(b)に示すように複数の渦構造が合体することにより形成されていることが明らかである。また、この大規模構造はridgeを中心に左右方向へ大きく傾斜あるいは揺動し、trough上に形成された組織構造と相互関係を有していることが観察された。

図-8(a)は、ridge上(SV1)に形成された大規模構造の縦断面形象の一例である。横断面視において観察されたように複数の組織構造が流れ方向に傾斜して折り重なっている様子が認められる。一方、(b)はtrough上(SV6)における縦断面視の一例である。ここに形成される構造はridge上のそれと比較して高さスケールが小さく、水表面方向への発達頻度が少ないことが観察された。

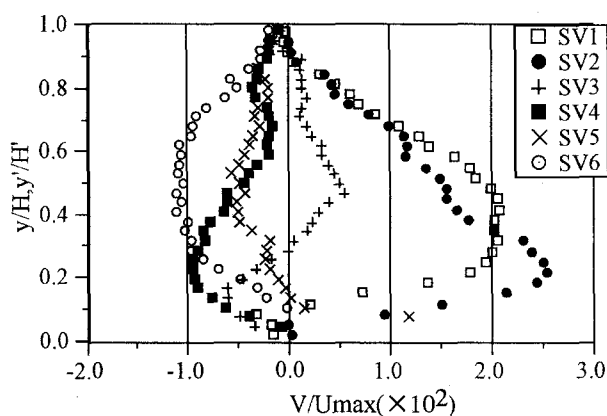
図-9は、流れ場に形成された組織構造の時空間構造図である。本図は、組織構造の横断面形象を画像ソフトによって重合し、立体的に表現したものである。本図の時間軸の長さは平均流速に描画時間(3.3秒)を乗じて示されており、それは水深の5倍程度となっている。ridge上の構造(A)に注目すると、これはridge上とその周辺の3つの渦構造が合体して水表面まで達する大規模な構造となっている。一方、trough上の構造(B)は、2つの渦構造が合体して相対的にridge上のものよりも小規模な構造が形成されている。この両構造の先端付近は合体しており、全体としては歪んだ大きなアーチ型あるいは馬蹄形の構造を呈している。



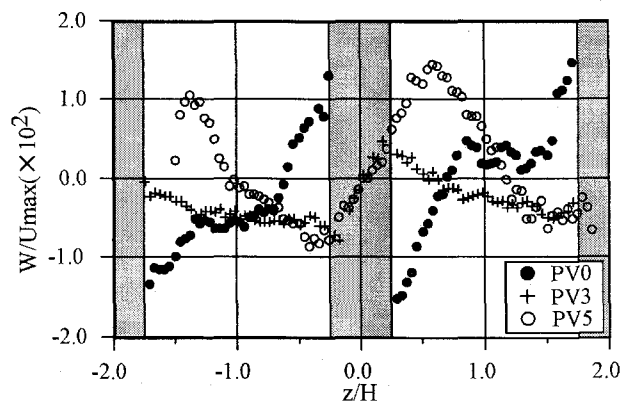
(a) 主流速(U) 横断方向分布 (Case B)



(b) 主流速(U) 鉛直方向分布 (Case A)

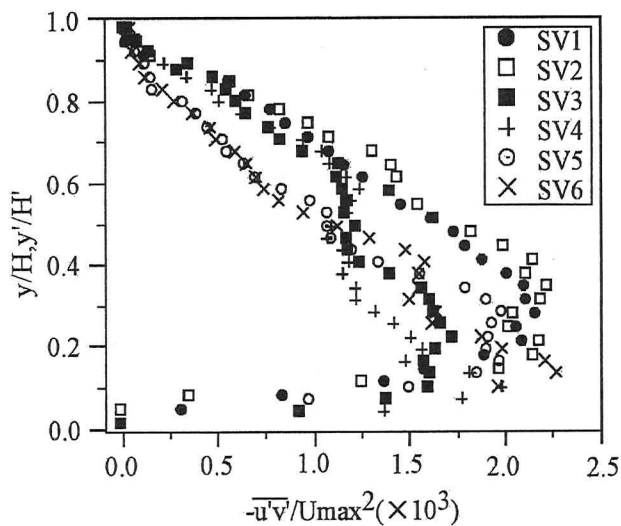


(c) 鉛直方向流速(V) 分布 (Case A)

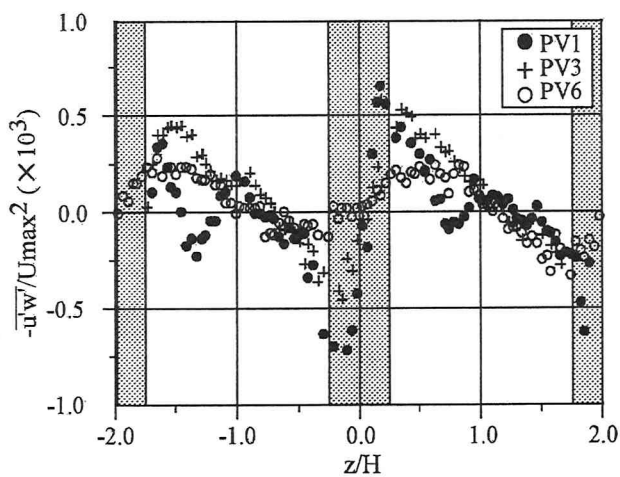


(d) 横断方向流速(W) 分布 (Case B)

図-4 平均流速(U, V, W) 分布



(a) レイノルズ応力 $(-\overline{u'v'})$ 分布



(b) レイノルズ応力 $(-\overline{u'w'})$ 分布

図-5 レイノルズ応力分布

図-10は、流れ場に形成された組織構造の形成領域の経時変化を示したものである。本図は、PV1,3,6に対応する高さにおいて横断視画像を約1mmの厚さで切り抜き、それを900枚（30秒間）繋ぎ合わせた画像である。本図においては、組織構造が形成されている領域すなわち染料の存在領域は白く、それが存在しない領域は黒く表現される。PV1ではstreak状を呈する染料の存在領域が認められ、とくにridge上とその周辺ではそれが太く、長いものが分布している。PV3では染料の存在領域は大半がridge上に集中して、時間的にも連続していることが明らかである。PV6でも染料の存在領域は間欠的ではあるがその存在領域はridge上に集中していることが明瞭である。これらの結果を総合すると、ridge上には、水表面まで到達する大規模な組織構造が時間的に安定して形成されていると考えられる。

図-11は図-10の画像を2値化し、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

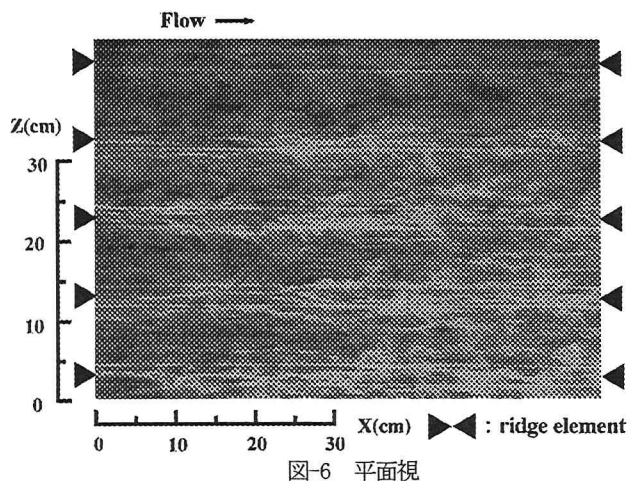
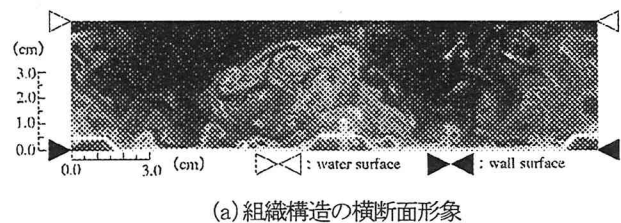
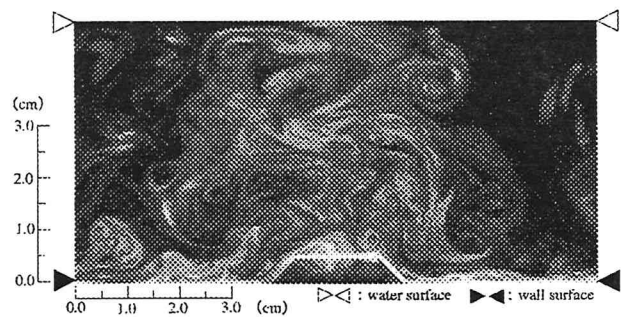


図-6 平面視

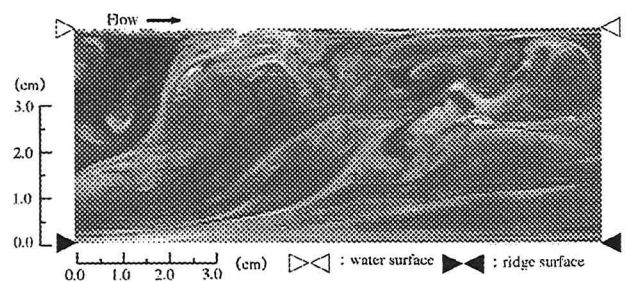


(a) 組織構造の横断面画像

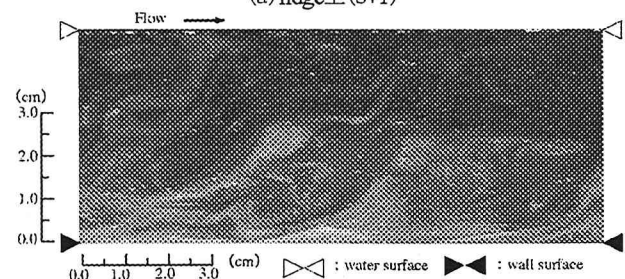


(b) 大規模構造の内部流況

図-7 横断面視



(a) ridge上(SV1)



(b) trough上(SV6)

図-8 縦断面視

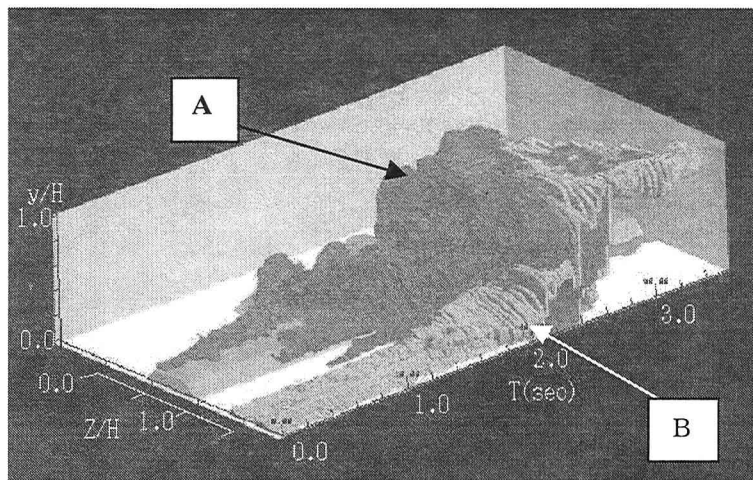


図-9 大規模組織構造の時空間構造図

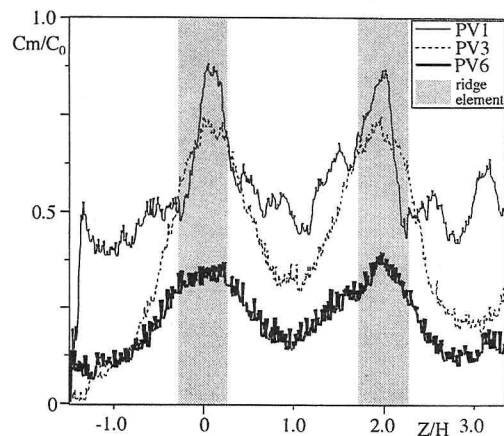


図-11 染料の存在頻度

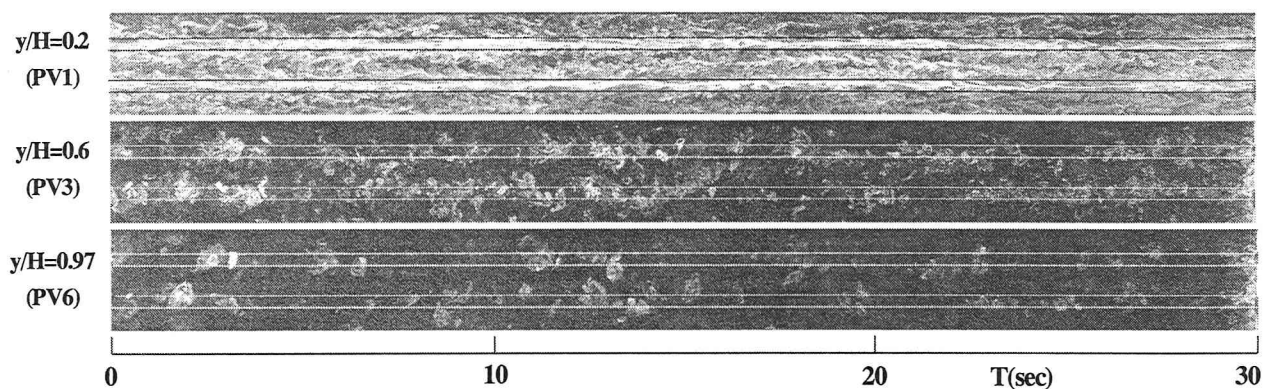


図-10 染料の存在領域の経時変化

位相を示している。これは大規模構造の形成領域では相対的に低速となることを示唆している。PV1ではtrough上に局所的に染料の集中領域が認められるが、これらはPV1, PV2におけるtrough中央部の局所的な低速域の形成と関係があるように思われる。

(3) 組織構造と速度情報の相互関係

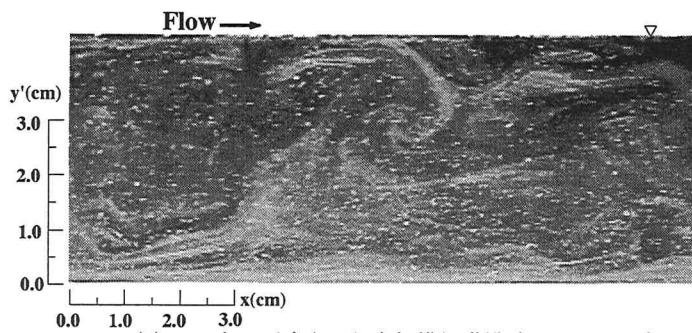
図-12は、ridge上の縦断面DPTVの解析結果の一例である。(a)は水表面まで到達した大規模組織構造の縦断面形象である。図中の白い点は粒子であり、これらから求めた瞬間ベクトルから平均流速を差引いた速度変動ベクトルを示したものが(b)である。図中では、 $u' < 0$, $v' > 0$ となる、いわゆる二象限を示すベクトルが多く存在していることが明らかである。とくにそれらは、ridge上の組織構造内で多く分布していることが、本図ならびに他の解析結果からも明らかとなった。(c)は瞬間レイノルズ応力 $(-u'v')$ の分布を示したものである。等値線は $0.4(\text{cm}^2/\text{sec}^2)$ 間隔で描かれており、正の値は実線、負の値は破線で示している。これより、大規模組織構造内には比較的大きなレイノルズ応力が分布し、特に壁面付近では時間平均値の数倍の大きな値が分布していることが明らかである。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。

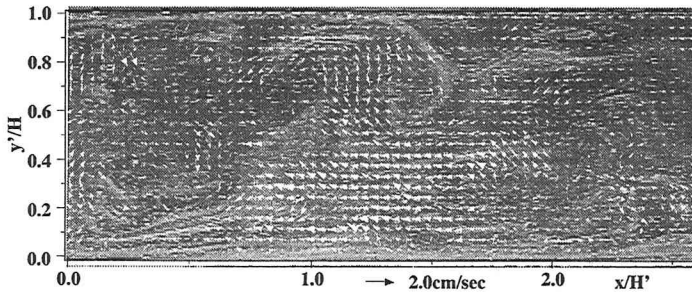
図-13は横断面DPTVの結果の一例である。(a)は、ridge上に形成された大規模渦構造の横断面形象である。この画像では右回転を示す渦形象が示されている。この画像に粒子の軌跡から得られた瞬時二次流れの流速ベクトルを重ねたものが(b)である。これより時計回りを示す渦形象と瞬間流速ベクトルの分布が対応していることが明らかである。このような渦構造によって瞬時の二次流れが誘起されることは、開水路隅角部における佐賀らの研究⁸⁾においても報告されている。この瞬時二次流ベクトルを30秒間平均したものが(c)である。栈粗度の左では左回転、右では右回転の対を成す大規模な二次流れが形成されている。これらより、ridge上の大規模構造は瞬時二次流れを形成させ、壁面付近の低速流体を水表面方向へ輸送することによりridge上周辺の低速化を誘起していると考えられる。

4. まとめ

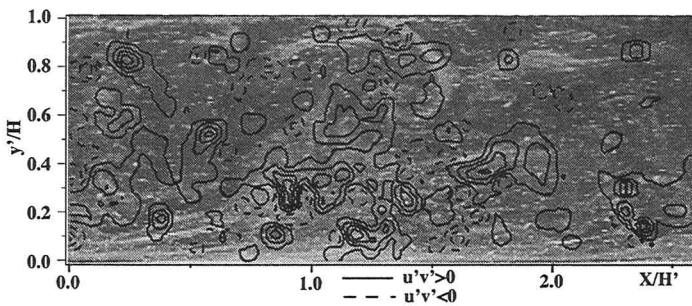
本研究では流れの可視化法を用いて、縦栈粗度を有する開水路流れにおける平均流速分布および乱れ分布特性、



(a) ridge上に形成された大規模組織構造の縦断面画像

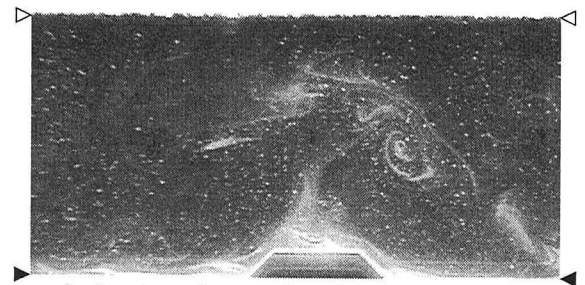


(b) 変動速度ベクトル(u' , v')分布

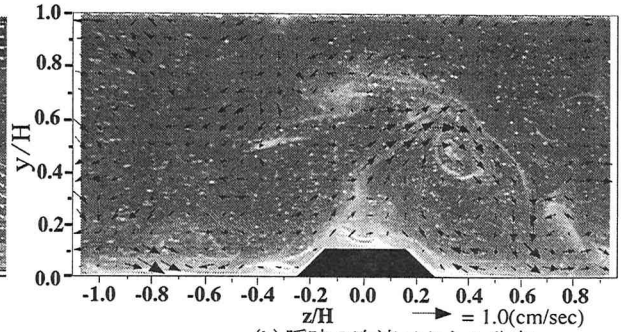


(c) 瞬時レイノルズ応力($-u'v'$)分布

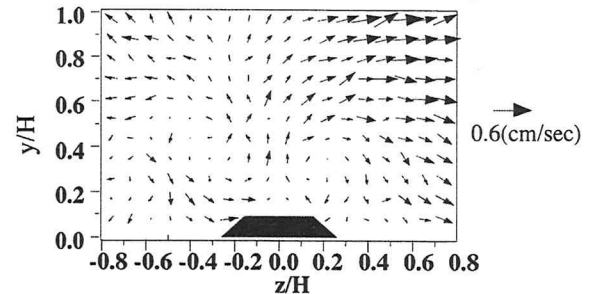
図-12 縦断面DPTV解析結果(Case A)



(a) 大規模構造の横断面画像



(b) 瞬時2次流ベクトル分布



(c) 2次流ベクトル分布

図-13 横断面DPTV, PTV解析結果(Case C)

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以下に示す

(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。

参考文献

- 1) 関根正人, 吉川秀夫, 井田泰蔵, 高松諭, 中村学: 斜め栈粗度による河川湾曲部の制御に関する研究, 土木学会論文集, No.558/II-38, pp.61-70, 1997.
- 2) 辻本哲郎, 清水義彦, 松尾和弘: 斜め栈粗度によるらせん流の制御, 水工学論文集, 第39巻, pp571-576, 1995.
- 3) Iehisa Nezu, Hiroji Nakagawa: CELLULAR SECONDARY CURRENTS IN STRAIGHT CONDUIT, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110/No.2, pp. 173-193, 1984.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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, 土木学会論文集, No.593/II-43, 31-40, 1998.
- 8) 佐賀孝徳, 大成博文, 渡辺勝利, 杉本博幸: 開水路乱流側壁領域の組織構造と二次流れの形成機構, 土木学会論文集, No.677/II-55, pp.33-41, 2001.

(2002. 9. 30受付)