

段落ち部周辺の乱流構造

TURBULENT STRUCTURE NEAR BACKWARD-FACING STEP IN TURBULENT OPEN CHANNEL FLOW

渡辺勝利¹・大成博文²・佐賀孝徳³・石川 誠⁴・赤司信義⁵

Katsutoshi WATANABE, Hirofumi ONARI, Takanori SAGA, Makoto ISHIKAWA and Nobuyoshi AKASHI

¹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 山口県徳山市久米高城3538)

²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 山口県徳山市久米高城3538)

³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 山口県徳山市久米高城3538)

⁴正会員 西日本工業大学助手 土木工学科 (〒800-03 福岡県京都郡苅田町新津1633)

⁵正会員 工博 西日本工業大学教授 土木工学科 (〒800-03 福岡県京都郡苅田町新津1633)

Characteristics of turbulent structure of backward-facing step in turbulent open channel flow are investigated using 2D Laser Doppler Anemometry and flow visualization techniques which are dye injection method and DPTV (Dye streak pattern Particle Tracking Velocimetry). The results indicate that double structure of coherent structure is formed at the downstream of the step, and coherent structure formed at the upstream of the step plays an important role to generate three dimensional flow of the downstream of the step. Further, dye streak pattern of coherent structure formed at just downstream of the step is located in the high shear layer.

Key Words : Backward-facing step flow, three dimensional structure, flow visualization techniques, coherent structure, shear structure

1. 緒論

段落ち乱流は、再付着点を伴う剥離流れの典型例である。この流れは、開水路における落差工や管路における急拡大部に発生し、河床洗掘やエネルギー損失に直接関係することから、その解明は水工学、流体力学的に重要と考えられる。

これまでも、段落ち乱流に関する多くの研究がなされている。Nakagawa-Nezuは、開水路乱流内の段落ち流れに関する系統的な究明を行っている^{1), 2)}。彼らは、段落ち乱流における詳細な流速計測を行っている。また、再付着点の圧力変動を計測することによって、段落ち頂部から発生する剥離渦と再付着点下流のコルク・ボイル渦の相互関係を明らかにした。

チャンネル流における急拡大部の流れについては、Eatonら³⁾が流速計測を行い、再付着点の位置の変動性を明らかにした。Aristeuらは⁴⁾、DNSを段落ち乱流に適用し、流れ場に形成される組織構造の3次

元的特徴を明らかにした。また、Hungら⁵⁾も同様にDNSによる段落ち乱流の計算を行い、それが実験結果を良好に再現することを示した。しかし、これらの計算では、段落ち上流部で二次元の速度分布、壁面におけるスリップといった特殊な境界条件が与えられていることに注意しておかねばならない。

段落ち乱流に関する従来の研究は、DNSのような数値計算を除けば2次元の考察に留まっているが、流れ場の総合的理解には3次元の考察が重要と考えられる。また、これまでの解明の対象は段落ち部より下流の流れであり、上流の流れの影響や相互関係についても検討する必要がある。さらには、段落ち乱流に形成される組織構造の解明は、流れ場の本質的理解に不可欠であることから、さらにそれらの究明を進めることが重要である。

一方、著者らは、これまでに開水路乱流に形成された組織構造に関する系統的な究明を進めており、これまでにそれらの時空間構造や速度情報との相互関係を明らかにしてきた^{6), 7), 8)}。著者らによって

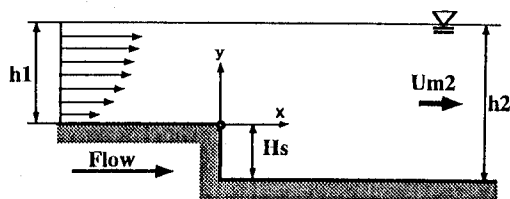


図-1 段落ち部概略

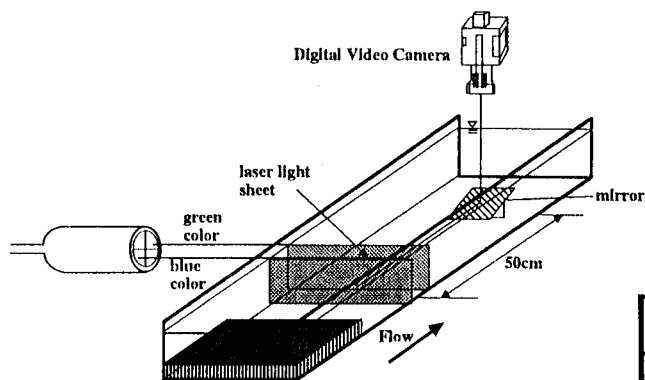


図-2 横断面視法概要

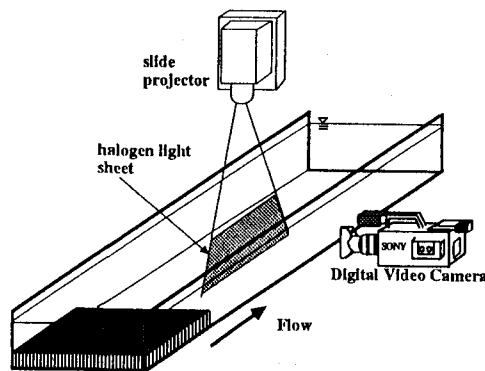


図-3 DPTV概要

表-1 実験条件

CASE	U_{m2} (cm/s)	U_{max} (cm/s)	$h2$ (cm)	Hs (cm)	Re ($U_{m2}h2/\nu$)	Fr ($U_{m2}/\sqrt{gh2}$)
present	4.6	8.3	9.5	2.0	5000	0.05
Nakagawa ¹⁾ -Nezu	14.2	24.3	5.8	2.0	8200	0.19

開発された DPTV (Dye streak pattern Particle Tracking Velocimetry)⁹⁾は、組織構造の形象特性と速度情報を同時に抽出できる手法であり、この手法によって開水路乱流のせん断構造特性が明らかにされた¹⁰⁾。段落ち流れは大規模な剥離せん断層を伴うことから、そのせん断構造に注目した解明の取り組みも重要と考えられる。

本研究では、以上のことを踏まえて、段落ち部周辺における乱流構造の特徴が流れの可視化法を用いて考察され、いくつかの興味深い知見が得られた。

2. 実験装置および方法

実験には、水路勾配を1/1000に調節した長さ10m、幅60cm、高さ15cmの透明アクリル樹脂板製の直線開水路が用いられた。この水路の上端から5m下流まで厚さ2cmのアクリル板が置かれ、その下流端を段落ち部とした。本水路の上流端には整流装置(径4mm、長さ3.2cm、幅25cmのハニカム)、下流端には水位調節用の堰が設られている。図-1には、段落ち部の縦断面概略図および座標系が示されている。

実験では、流速計測と流れの可視化が行われた。

流速計測では、2成分ファイバー型レーザー流速計が用いられ、平均流速($\bar{U}$)、乱れ強度(u' , v')、レイノルズ応力($-\bar{u'v'}$)の詳細な計測が行われた。

可視化実験では、組織構造の平面視、横断面視、縦断面視がなされた。平面視では、トレーサーとし

て蛍光染料水溶液(比重1.005)、照明として紫外線ライトが用いられた。本手法の詳細は文献6)にあるので、ここでは省略する。

図-2には、横断面視の概略が示されている。本手法では、平面視と同一のトレーサーと照明としてレーザーライトシートが用いられた。レーザーライトシートは緑と青の2色であり、両者は6cm離れている。可視化の際は、緑のシートを単独で用いる場合と回転円盤によって一方のレーザー光線を周期的に遮断して、わずかな時間差を持つ2断面の横断面視が行われた。本手法については文献7)に詳述されているので、ここでは省略する。

縦断面視では、図-3に示したDPTVが採用された。本手法においては、平面視および横断面視に用いた同一の染料トレーサーと微細粒子(比重1.008、平均粒径 $300\mu\text{m}$)を混ぜ合わせたトレーサーが使用された。可視化断面より上流2mから注されたトレーサーは、流下に伴い組織運動内に取り込まれ、立体的な流況を可視化する。それがスリット光膜(厚さ3mm、長さ25cm)を通過する際流況がデジタルビデオカメラで撮影された。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) 段落ち乱流の組織構造

図-4には、段落ち乱流の平面視の一例が示されて

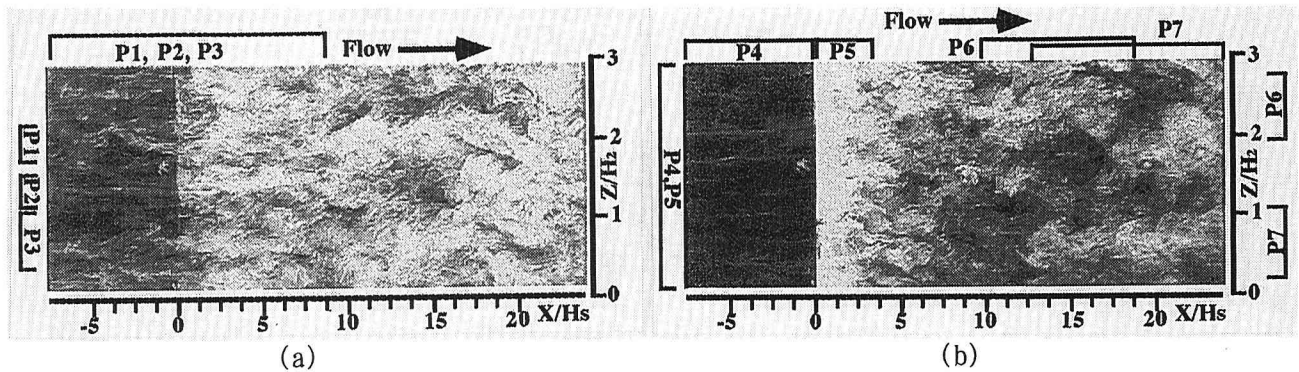


図-4 平面視の一例

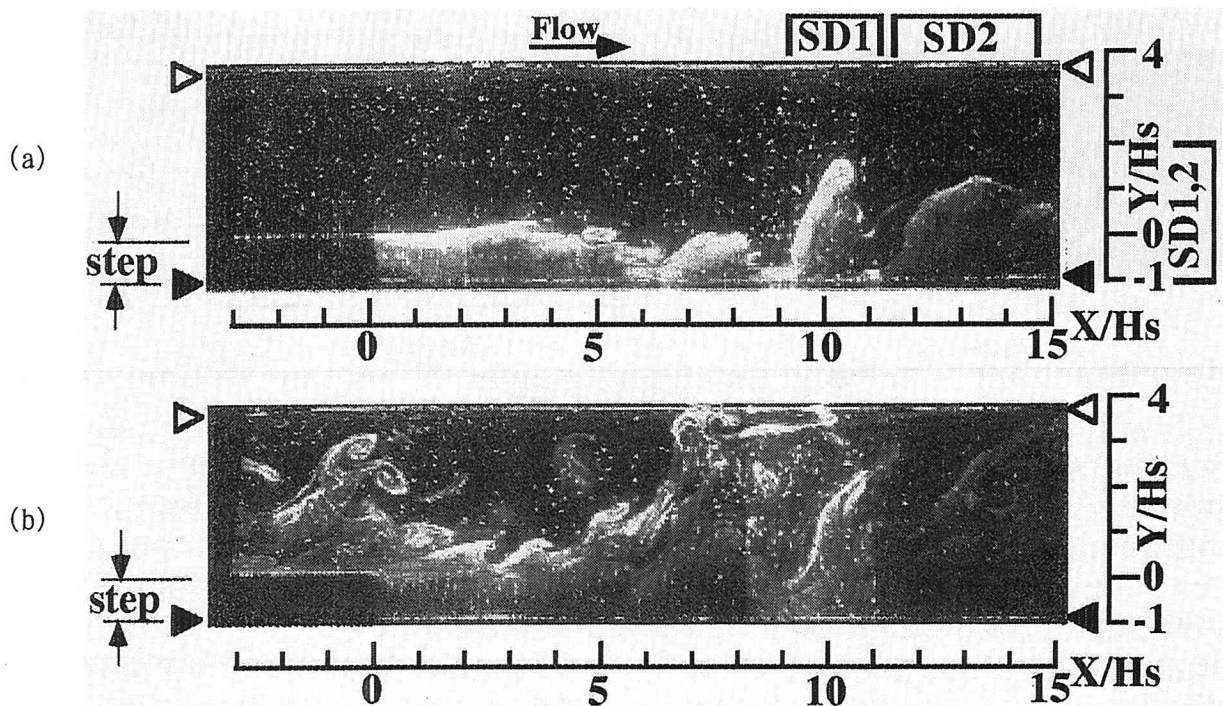


図-5 縦断面視の一例

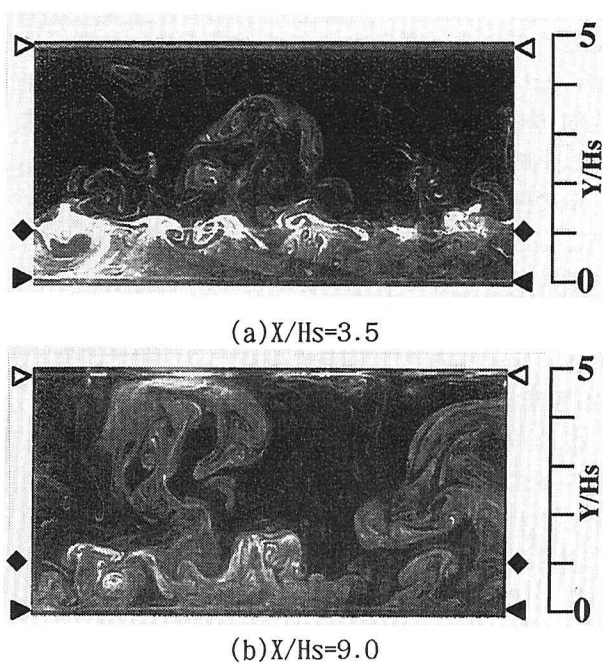


図-6 横断面視の一例

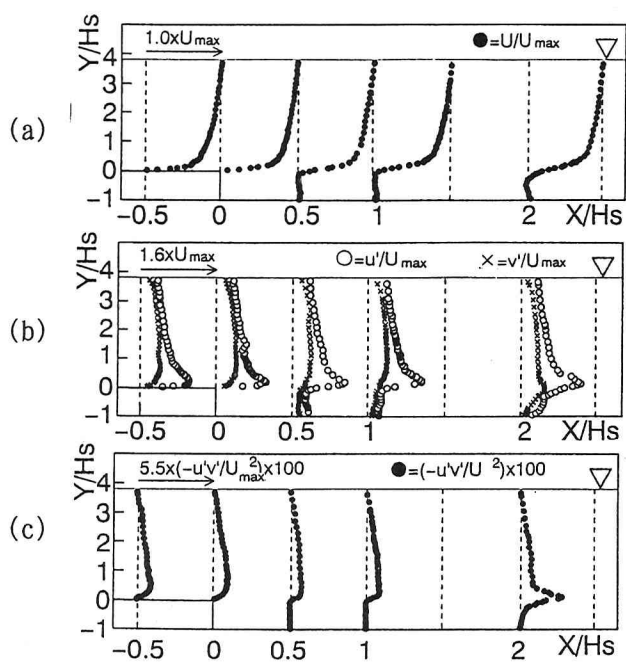


図-7 流速計測結果

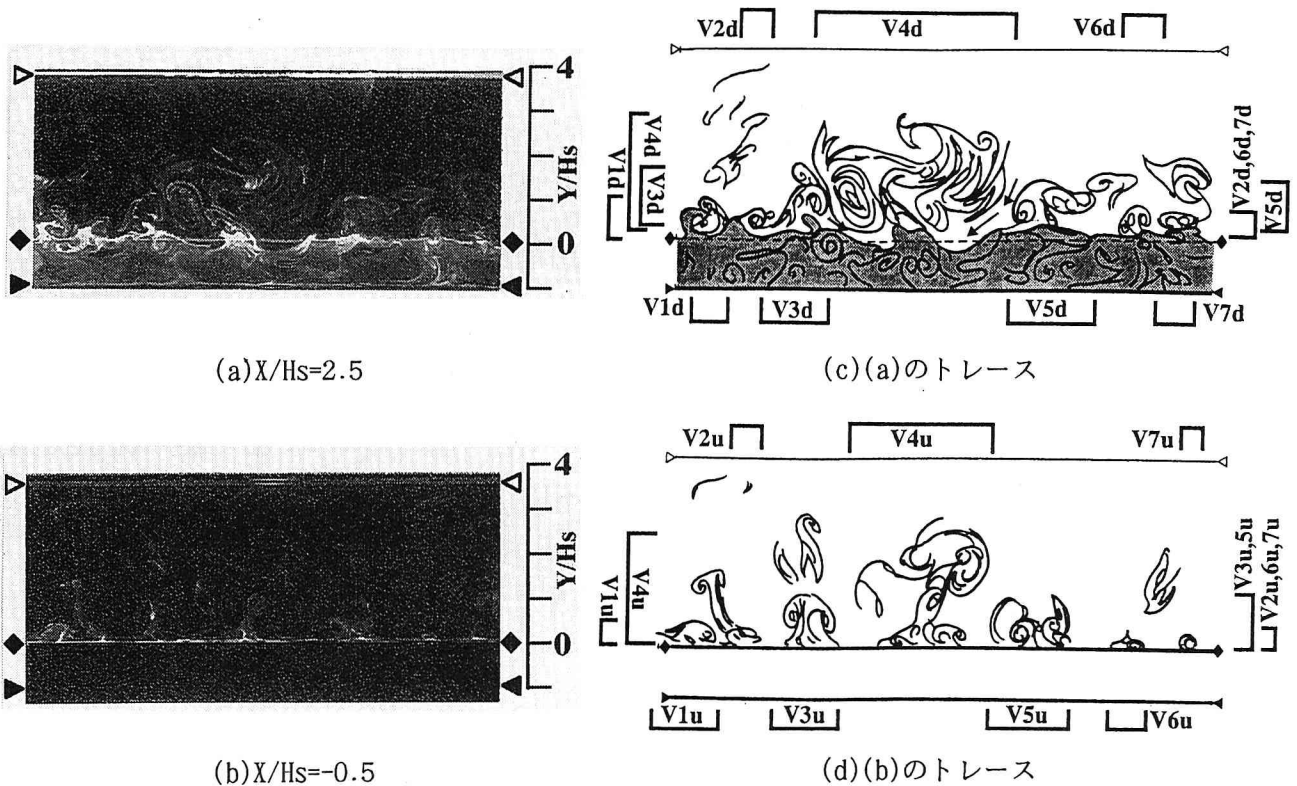


図-8 段落ち部周辺の横断面視

いる。流れ方向は左から右であり、図中の白い部分が蛍光染料によって可視化された組織構造に相当する。この図より、段落ち部を境界に、その上下流で流況が大きく異なることが明瞭である。(a)は段落ち上流の開水路乱流で形成された大規模構造(P1, P2, P3)が段落ち部に流下してきた様子を示している。それらの横方向スケールは上流水深(h_1)程度で流れ方向に長く形成されている。(b)では、上流の染料が薄くなり、段落ち下流の流れが可視化されている。P4は、上流の底壁面上に形成されたLSS(Low Speed Streaks)である。P5は、段落ち直下の染料の滞留領域である。これは水路横方向に歯形状を呈していることから、流れが横方向に不均一であることを示唆している。P6, P7は、下流の底壁面から発達、大規模化した組織構造である。両者の横幅は下流水深(h_2)程度であり、その間隔はその2倍程度である。このような大規模構造は再付着点付近($X/H_s = 6 \sim 7$)より下流で形成されることが観察された。

図-5は、水路中央部における縦断面視の一例である。(a)は段落ち直下部にトレーサーを注入した場合である。直下部は剥離領域であり、そこでトレーサーはわずかに鉛直方向の変動を示す。再付着点付近より下流の $X/H_s = 8 \sim 10$ ではSD1, 2のような水表面方向への急角度を有する組織構造が形成される。これらは、平面視において観察されたP6, 7に相当するものと思われる。一方(b)は、上流部にトレーサー

を注入した場合である。この図から明らかなように、上流部からは水表面まで到達した大規模組織構造が段落ち部下流に流下してきている。図中の $X/H_s = 6 \sim 10$ では、上流の構造と段落ち下流の構造が上下に重なる2重構造を呈している。

この2重構造は、図-6に示された横断面可視化にも一層明らかである。同図(a), (b)は、 $X/H_s = 3, 9$ における横断面視である。この両図では、底壁面付近の組織構造の上方に上流の組織構造が重なって可視化されている。両者の境界は明瞭であり、前者は後者に比べてより白く写されている。これは、上流の染料の滞留領域から染料が補給されるためである。

以上のことから、段落ち乱流における組織構造は、上流の開水路乱流で形成された組織構造と段落ち下流で形成された組織構造の両者が上下に重なり合う2重構造を特徴とすることが明らかとなった。また、段落ち下流の流れは再付着点の前後で流れの構造が大きく変化することが示唆された。

(2) 段落ち部周辺の3次元流況

段落ち部の上流で形成された組織構造が段落ち部を流下する際には、下流の構造に何らかの影響を及ぼすことが推測される。そこで段落ち周辺部の流れに注目してその特徴が考察された。

a) 平均流および乱れ特性

図-7には、 $X/H_s = -0.5 \sim 2$ にわたる領域の平均流速分布($\bar{U}$)、乱れ強度(u' , v')およびレイノルズ応力

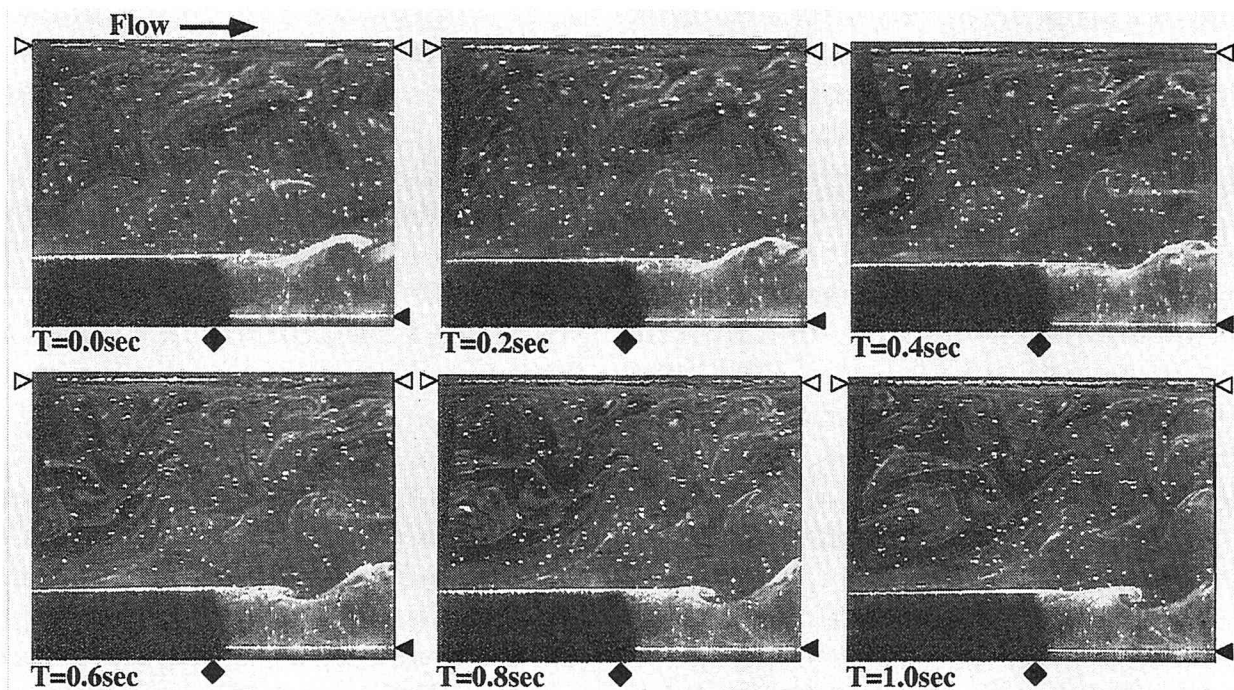


図-9 DPTVによる縦断面視の連続画像

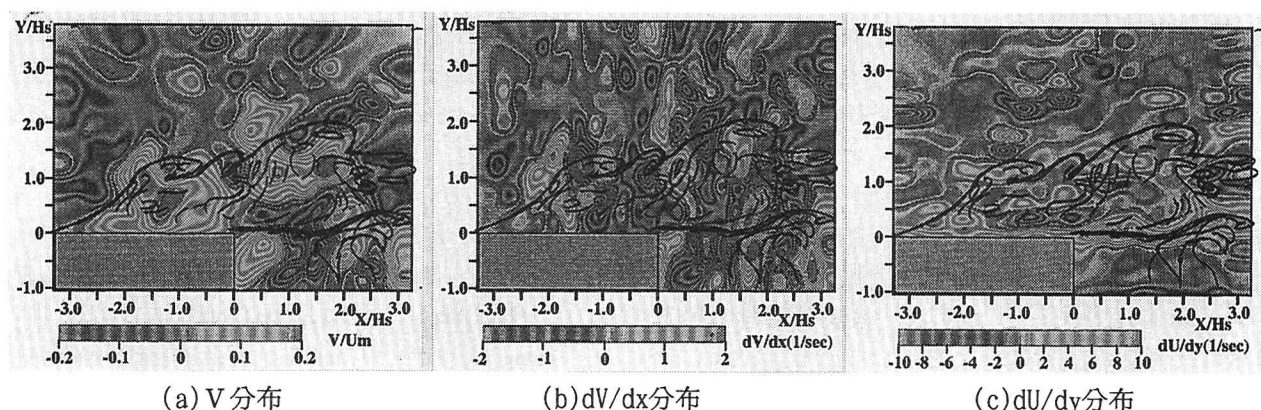


図-10 $T=0.2$ における組織構造の縦断面形象と速度情報の相互関係

$(-\overline{u'v'})$ 分布が示されている。尚、これらいずれの値も $X/H_s=0$ における最大流速 (U_{max}) で無次元化されている。

(a)の $\bar{U}$ 分布については、 $-0.5 < Y/H_s < 0$ における逆流の形成を除いて、上流の $X/H_s=-0.5$ における流速分布の形状が下流の $X/H_s=1$ までほぼ保持されている。 $X/H_s=2$ では逆流がより顕著になり、上流の分布形状から変化が大きくなっている。

(b)の乱れ強度分布において、 u' は流下に伴って緩やかに増大し、 $Y/H_s=0$ 付近でピークが現れる分布に変化している。 v' は、 $X/H_s=0.5, 1$ で上流部の値からやや減少し、 $X/H_s=2$ では u' 同様に $Y/H_s=0$ 付近でピークが現れる分布に変化している。

(c)のレイノルズ応力分布においては、 $X/H_s=-0.5, 0$ において通常開水路で見られる三角形分布を呈し

ている。その下流の $X/H_s=0.5, 1$ においては、三角形分布から台形に変形しているようであり、その値もやや減少している。さらに、 $X/H_s=2$ においては $Y/H_s=0$ 付近でピークが現れる分布変化を示している。このような分布特性は v' のそれと同様であり興味深い。

b) 段落ち部周辺の横断面流況

図-8には、(a)段落ち直下部($X/H_s=2.5$)と(b)直上部($X/H_s=-0.5$)における横断面視の結果が示されている。両者には1/30秒の時間のずれがある。ここで注目されるのは、(a)における底壁面付近の組織構造が上流で形成された組織構造と相互関係を持っていることである。これをよりわかりやすくするために(a)、(b)の両トレースを(c)、(d)に示す。(c)において陰を付けた部分は底壁面上に形成された組織構造の形成領域である。図中のV1d~V7dは、壁縦渦

構造の横断面形象である。段落ち部直上・下流の組織構造の相互関係を図中の組織構造のV4dに注目して説明する。V4dは大規模な壁縦渦構造であり、その中央部では上昇流その両周辺では下降流が形成されている（図中の矢印）。このような、組織構造が誘起した流れによって、壁縦渦の中心部に位置する領域では凸に、その周辺部では凹に変形されるものと考えられる。V4d以外の縦渦構造の形成領域においてもこの対応関係が認められる。(d)におけるV1u～V7uは、(c)の壁縦渦構造V1d～V7dの上流部の横断面形象に対応しており、これらが上流で形成された組織構造であることが明らかである。

b) 段落ち部周辺の縦断面流況

次に、段落ち部上下流の組織構造の特徴がDPTVによる縦断面視の結果から検討された。

図-9には、縦断面流況が0.2秒毎に連続的に示されている。図中には、段落ち上流から流下してきた大規模組織構造と段落ち直下流の剥離領域に形成された組織構造が可視化されている。これより注目されるのは、段落ち下流の剥離領域に形成されたstreak状の組織構造が上流の組織構造の流下に伴って水深方向の変形と横渦に類似した形象を呈することである。このような剥離領域の変化は、横断面視における段落ち直下部の組織構造の変形に対応しているものと考えられる。

図-10は、図-9の $T=0.2\text{sec}$ における瞬時鉛直方向流速成分(V)、そのせん断 dV/dx および瞬時主流方向流速(U)のせん断 dU/dy の等値線図と組織構造のトレーサが示されている。(a)では、大規模構造の形成領域は、顕著な上昇領域と対応している。また、段落ち下流の組織構造の凹凸と上昇・下降成分が対応していることが明らかである。(b),(c)の dV/dx 、 dU/dy の等値線図においては、開水路乱流と同様に¹⁰⁾前者が流れ方向に分布するのに対し、後者は逆に水深方向に分布している。この両図より大規模組織構造内には、相対的に高い正負の dV/dx および dU/dy のせん断領域が分布している。一方、剥離領域は高い dV/dx が分布し、streak状の組織構造は dU/dy の高い領域に形成されているようである。

以上の横断面視および縦断面視の結果から、上流の開水路乱流に形成された組織構造と段落ち直下流の組織構造は密接な相互関係を有することが明らかとなった。

4. 結 論

複数の流れの可視化法を用いて段落ち部周辺の乱流構造が考察された。以下に本論の主要な結論を示

す。

(1) 開水路乱流内の段落ち部では、段落ち部上流で形成された組織構造と段落ち部下流の組織構造の両者が上下に重なり合う2重構造を呈する。

(2) 段落ち直下流では、上流の開水路乱流に形成された壁縦渦構造が、段落ち直下の流れの変化に主要な役割を果たしている。

(3) 段落ち直下流には、鉛直方向に変動する染料流脈パターンと類似した瞬時の高せん断領域が形成される。

参考文献

- 1) Nakagawa, H. and Nezu, I.: *Experimental Investigation on Turbulent Structure of Backward-Facing Step Flow in an Open Channel*, *J. Hydraulic Research*, vol.25, pp.67-88, 1987.
- 2) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulent Structure of Backward-Facing Step Flow and Coherent Vortex Shedding from Reattachment in Open Channel Flows*, *Turbulent Shear Flows*, Springer Verlag, vol.6, pp.313-337, 1988.
- 3) Eaton, J. K. and Johnston, J. P.: *Low Frequency Unsteadiness of Reattaching Turbulent Shear Layer*, *Turbulent Shear Flows*, Springer Verlag, vol.3, pp.162-170, 1982.
- 4) Aristeu, S. N., Dominique, G., Olivier, M. and Marcel.: *A Numerical Investigation of the Coherent Vortices in Turbulent Behind a Backward-Facing Step*, *J. Fluid Mech*, vol.256, pp.1-25, 1993.
- 5) Hung, L., Moin, P. and Kim, J.: *Direct Simulation of Turbulent Flow over a Backward-Facing Step*, *J. Fluid Mech*, vol.330, pp.349-374, 1997.
- 6) 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.63~71, 1984.
- 7) 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆: 開水路乱流内層の渦構造, 土木学会論文集, 第363号/II-4, pp.135~144, 1985.
- 8) 佐賀孝徳, 大成博文, 斎藤隆: 開水路乱流内層の渦構造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.
- 9) 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巻, pp.829~832, 1993.
- 10) 大成博文, 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 斎藤隆, 波多野慎: 壁乱流の縦断面せん断構造, 土木学会論文集 (掲載予定)

(1997.9.30受付)