

斜め段落ち部を有する開水路流れの構造

Flow Structure of Open-channel Flow with a Backward-Facing Step with a Slope

藤田一郎*, 熊城秀輔**

Ichiro FUJITA and Shusuke KUMASHIRO

*正会員 学術博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**非会員 工修 岡山県庁 (〒700-8570 岡山市内山下 2 丁目 4 番 6 号)

At the location where a backward-facing step or, in the river engineering sense, a drop structure is installed in an open-channel, flow separates and generates a relatively large recirculating region while actively shedding separation vortices in the downstream direction. The shedding of the vortices can be reduced by installing a mild slope at the downstream side of the step, by which the downstream and the upstream flows are more smoothly connected with less energy loss at the step. It is also advantageous for fish to run upstream through the structure when the streamlines are smooth. In this study, the flow at the step with various slope angles are examined experimentally by using the image analysis method with a high speed video camera. It was made clear that a characteristic vortex structure affecting the water surface configuration is generated for a mild slope condition.

Keywords: Backward-facing step, PIV, Open channel turbulence, Vortex detection

1. 序論

段落ち部の流れに関しては従来、数多くの研究が行われてきている。それは、段落ち部の流れには、流れの剥離、再付着、組織渦の発生などといった基本的で特徴的な流れの要素がコンパクトに含まれており、また、現象の再現性も高いためである。そのため、段落ち流れ（バックステップ流れ）の実験データはこれまでさまざまな数値解析コードの検証のために活用されてきた。開水路流れにおける実験的検討については、例えば瀬津らは、開水路段落ち流れを、2 成分レーザー流速計を用いて高精度に計測し、運動量およびエネルギー解析を行い、高せん断層や再付着点付近の乱流構造を解明した^{1,2)}。また藤田らは粗面段落ち流れの PIV (Particle Image Velocimetry) 計測を行い、粗面がある場合には再付着点が短くなることを実験的に明らかにした³⁻⁵⁾。これらの実験的検討で対象とされてきたのは、垂直な落差のある段落ち部であるが、中小河川の落差工では段落ちの下流部に斜路を設け、魚類を配慮して流れの連続性を保つ工夫がなされているケースも見ら

れる。しかしながら、段落ち部に斜路を設けたような局所的な流れ場に関する研究例はほとんどないのが現状である。そこで本研究では、基本的な流れ場の特性を明らかにするために、斜路の勾配および斜路上の粗度を変化させたいくつかのケースを対象として実験的な基礎検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験装置

実験には水路長 6.0m、水路幅 0.15m の循環式直線開水路を用いた。水路の上・下流部にはそれぞれ貯留水槽を設け、ポンプを用いて下流側水槽から上流側水槽へ水を循環させた。また、水路上流側に水路幅と同じ幅の亚克力板を重ねることにより、段落ち流れを実現した。斜路は亚克力で製作し段落ちの下流側に設置した。水路の最下流部には全幅堰を取り付け、堰上げ状態を調節できるようにした。なお、水路はレーザー光膜が自在に入射できるよう全断面透明となっている。

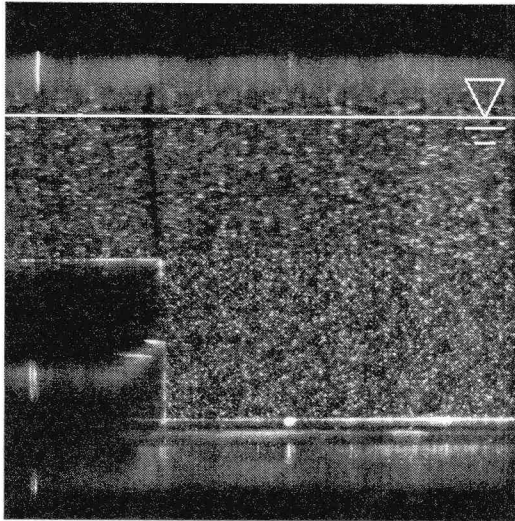


図-1 可視化画像の一例 (512x512pixel)

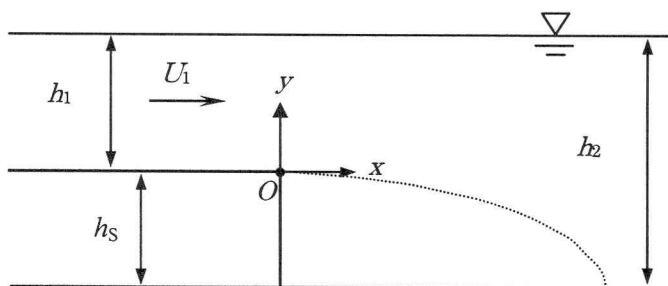


図-2 段落ち部の諸元

2.2 画像計測システム

本研究で使用した画像計測システムは、水冷式アルゴンイオンレーザー（最大出力 7.3W）とハイスピードビデオカメラ（PHOTORON 製、FASTCAM-MAX 120K）で構成される。水冷式アルゴンイオンレーザーからの射出光は、光ファイバーケーブルを介してビームイクスパンダーに導き、水路中央の縦断面を水路下方から照射した。ただし、下方からの照射で計測領域の可視化が不完全になる場合は上方から照射した。今回の実験条件では水面の揺らぎはわずかだったため、水面上方からの照射でも特に問題は生じなかった。レーザー光膜の厚さは 2mm 程度とした。レーザー光膜による可視化画像は、水路側方に設置したハイスピードビデオカメラで、250fps または 500fps で撮影した。実験で使用したハイスピードビデオカメラは、オンボードメモリの制約から 1 回の画像入力操作で取得できるのは RAW 画像 (1024×256pixel または 512×512pixel) の場合、連続 8192 枚であった。従って、画像の撮影時間は 250fps の場合約 32 秒、500fps の場合約 16 秒であった。ただし、ハイスピードビデオカメラのメモリ上からパソコンのハードディスクへのデータ転送には 5 分以上の時間を

表-1 水理条件

流量: Q (m ³ /s)	0.67×10^{-3}
勾配: I	1/800
上流側水深: h_1 (cm)	2.0
下流側水深: h_2 (cm)	4.0
段落ち高さ: h_s (cm)	2.0
流入平均流速: U_1 (cm/s)	22.3
フルード数: $Fr (= U_1 / \sqrt{gh_1})$	0.50
Reynolds 数: $Re (= U_1 h_1 / \nu)$	4467

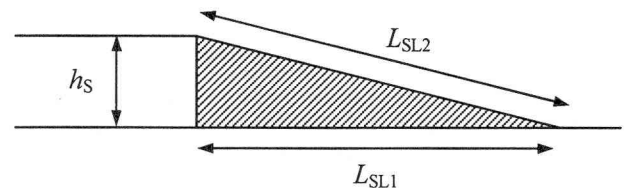


図-3 斜路の諸元 (幅 $B=15$ cm)

表-2 実験ケース

RUN	L_{SL1}/h_s	斜面状態
BS		滑面
SL1	1.0	滑面
SL1S	1.0	二次元粗度面
SL4	4.0	滑面
SL4S	4.0	二次元粗度面
SL7	7.0	滑面
SL7S	7.0	二次元粗度面

要した。なお、流れの可視化には平均粒径が約 $10 \mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン破碎粒子をトレーサとして用いた。可視化画像の一例を図-1 に示す。主流部、剥離領域とも良好に可視化されているのがわかる。主流部では粒子の軌跡が若干流れているが、後述の画像解析には問題にはならない程度と考えられる。

2.3 実験条件および水理条件

水理条件を表-1 に示す。落差高 h_s は 2cm、上流側の水深 h_1 は下流端の堰を調整して 2cm、水路勾配は 1/800、流入部のフルード数は 0.5 に固定して、段落ち形状の比較検討を行った。段落ち部の諸元は図-2 に示すとおりである。斜路の諸元は図-3 に示すが、底辺長 L_{SL1} を 2.0cm、8cm および 14cm の 3 通りに変化させて勾配を調整した。また、斜面の状態は滑面のケースの他に、アクリル棒（切断面の形状は一辺 0.35cm の直角三角形）を 1.5cm 間隔で二次

元配置した相対的に大きな粗面のケースも設定した。これは、斜面に配置された粗石を模擬したものである。表—2に実験ケース名を整理しておく。

3. 画像解析方法

ハイスピードビデオカメラで得られた可視化画像は、トレーサ粒子群の相対的な移動量を小さく抑えることができるため、画像解析には計測精度の高い時空間微分法をサブピクセル補正に用いるPIV⁶⁾を用いた。この方法では、ピクセル単位のマッチングは通常のPIVアルゴリズムで行い、1ピクセル以下の補正に以下に示す時空間微分法（オブティカルフローとも呼ぶ）を適用する。

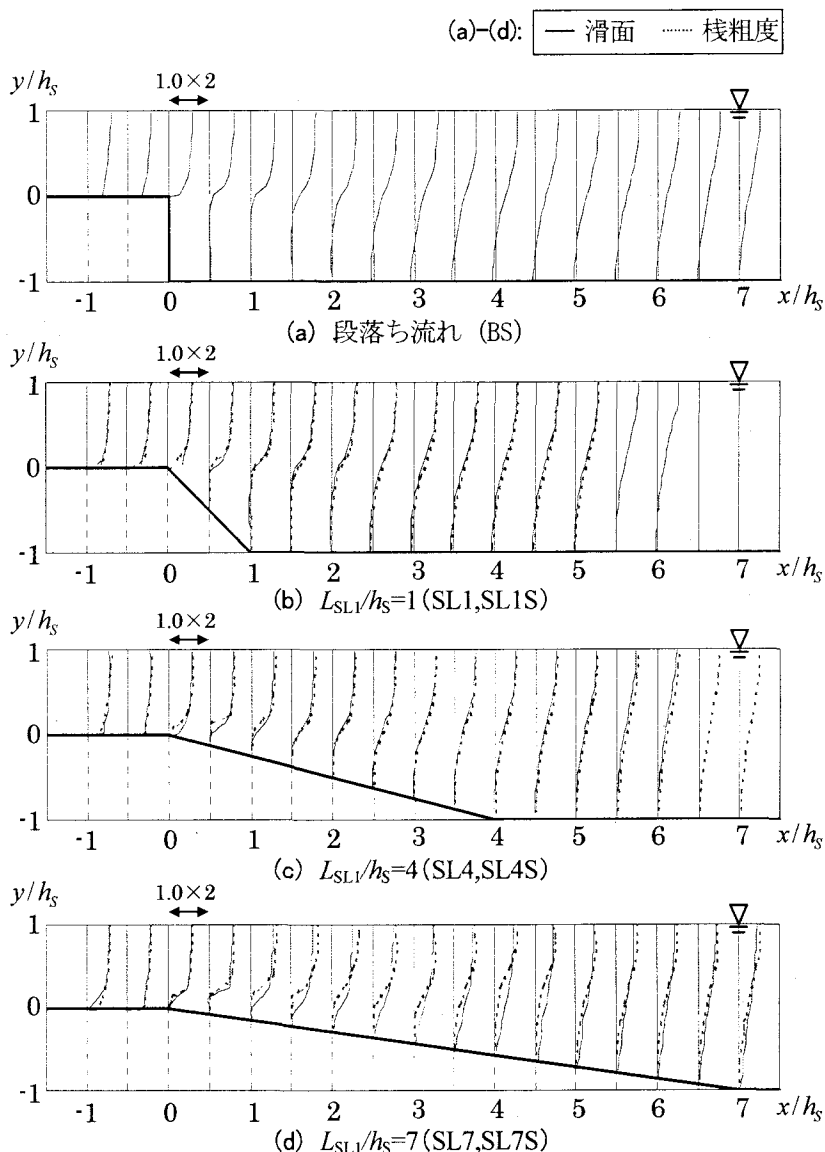
$$\begin{pmatrix} \sum_A f_x^2 & \sum_A f_x f_y \\ \sum_A f_x f_y & \sum_A f_y^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \sum_A f_x f_t \\ \sum_A f_y f_t \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、 f は輝度分布関数、 A は微小積分領域、 (u, v) はサブピクセルレベルのトレーサ移動量に対する速度補正ベクトルである。今回の可視化実験では、大部分の計測で用いた1024x512(pixel)画像の場合、1ピクセルサイズが0.021cm、画像間隔が1/250secであったので1ピクセル移動量に対する流速は5.25cm/sとなる。時空間微分法を用いたサブピクセル補間では一様流では0.01ピクセル、せん断流ではせん断変形量に応じて精度は変化するが、せん断変形量が大きくなければ、0.1ピクセル以下の移動量を検知できるため、今回の画像計測では0.05~0.5cm/s程度の計測精度が確保できたものと考えられる。なお、流速ベクトルは両軸方向に10ピクセル（約2mm）間隔で算出した。

4. 画像解析結果

4.1 平均流速分布

図—4に主流方向の平均流速分布を比較した。BSのケースでは従来の知見通り、ステップ高さの約7倍の地点に再付着点が見られ、良好な計測が行われ



図—4 平均流速分布 (u/U_1)

ていることが確認できる。また、水理条件（流入水深と段落ち高さの比、フルード数）が異なるので直接的な比較はできないが、平均流速分布だけでなく以下に示す乱流諸量の分布についても従来の実験値^{1,2)}とほぼ同様な結果が得られている。

再付着点距離については斜路の取り付けによって若干短くなる傾向が見られる。SL1とSL4における再付着距離の減少は、斜路の存在によって再循環流のサイズが縮小し、主流流れが連行すべき流体容量が小さくなった結果である。SL7のケースでは逆流域はほぼ消滅しており、剥離渦の発生によるエネルギー損失も小さく、管水路におけるディフューザ的な流況に対応している。二次元粗度（栈粗度）が流れ場全体に与える影響は、粗度高さ(0.35cm)が主流部に貫入するSL7Sを除いては現れていない。SL1SとSL4Sでは落差直後に局所的な分布の違いが見ら

れるが、下流には影響は及んでいない。

4.2 乱れ特性

画像計測で得られた乱流統計量のうち、レイノルズ応力分布を図-5に示す。どのケースにおいても自由せん断層の発達に伴ってレイノルズ応力の分布が水面と底面方向に拡散している様子がうまく捉えられている。斜路設置の影響は、SL1, SL1S や SL4, SL4S では顕著には現れておらず、滑面の場合のピーク高さが BS より若干水面側にシフトしていることが認められる程度である。これに対し、SL7 と SL7S では全体的にレイノルズ応力の値が低下している。また、SL7 ではピーク値の出現高さがほぼ一定であるのに対し、SL7S では粗度の影響を受けて水面側に大きくシフトしていることがわかる。

4.3 水面形の比較

本実験においては、斜路の設置によって水面に特徴的な変化が確認できたため、水路中央の縦断面に沿って水面形を計測し比較検討を行った。計測結果を図-6に示す。計測にはデジタルポイントゲージを用いた。斜路の設置によって現れた変化は、図-6からもわかるように周期的な定常波である。これは、単純な段落ち流れである BS のケースでは全く見られなかったものであり、興味深い。BS の結果をみると、水面形は下流の堰で微調整しているものの若干のセキ上げ背水状態となっている。ただし、計測区間での相対的な変化は3%弱(1.2mm程度)であり、水面はほぼ平面形状を保っていると思なせる。BS の場合の水面変動はわずかであったのに対し、斜路を取り付けた場合は、振幅は1mm程度と非常に微小であるが明らかな定常波が確認された。その波長と発生位置は、ケースによって異なっている。定常波の発生の状況を把握するために水面近くの流れ場を以下に詳細に検討する。

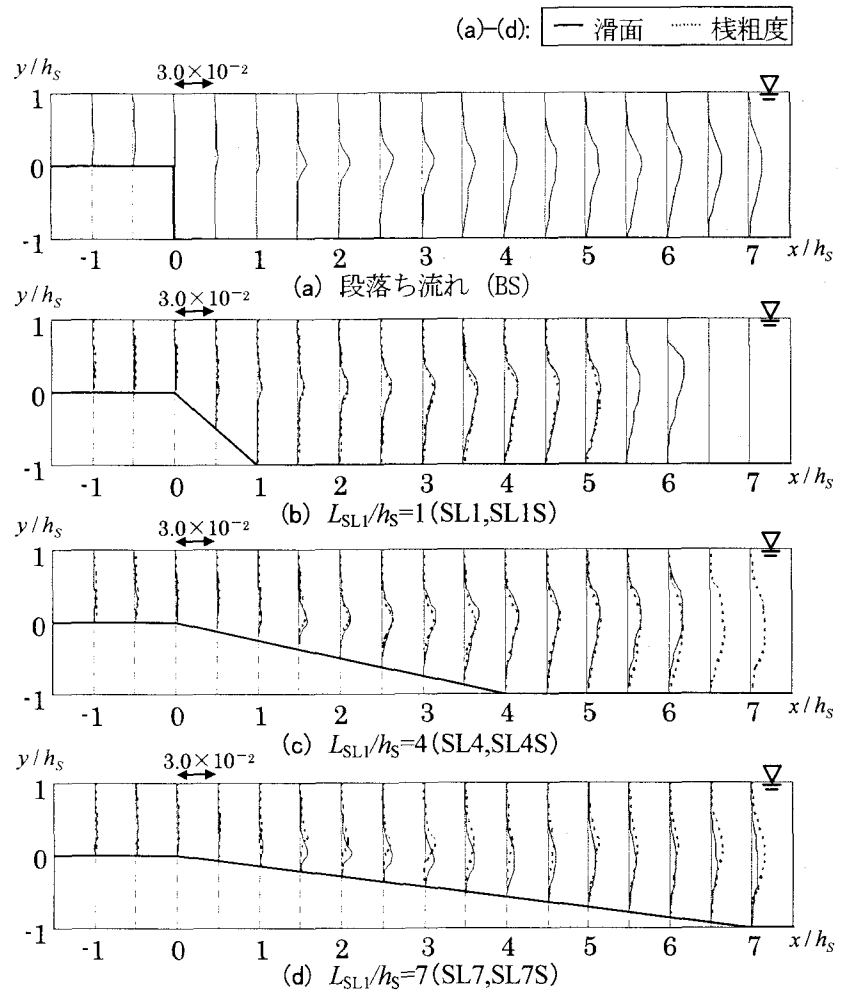


図-5 レイノルズ応力分布 ($-\overline{uv}/U_1^2$)

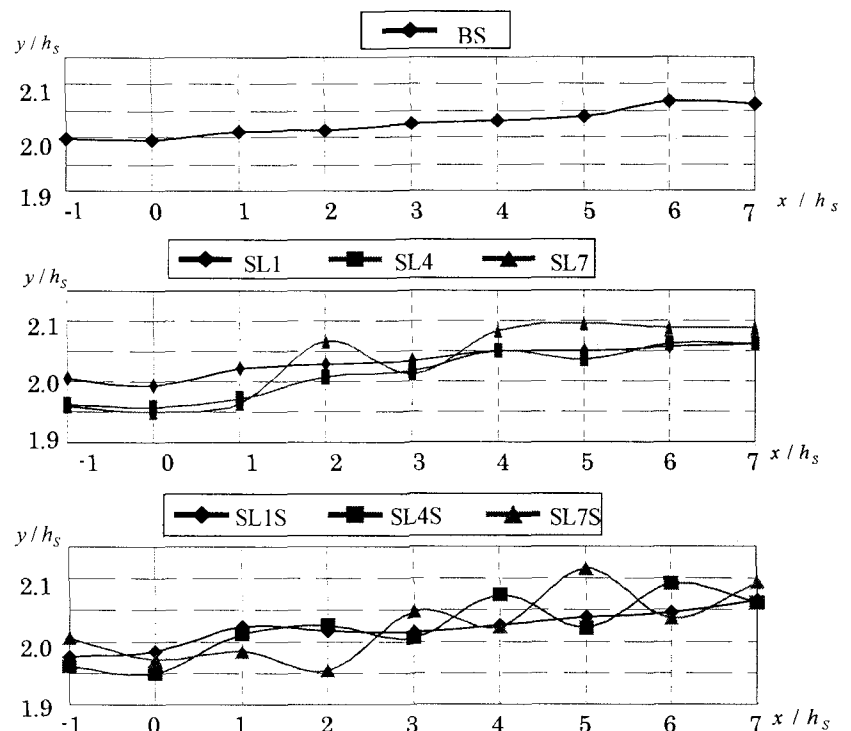


図-6 水面形の比較

4.4 上昇流の発生確率分布

ここでは、PIV解析で得られた詳細な流速分布データから上昇流の発生確率を次式より求めた。

$$P_{up} = n_v / n \quad (2)$$

ここに、 n :各計測点の流速データ総数 (=8191), n_v : $v>0$ となるデータ総数である。データ整理した結果を図-7に示す。これより、BSの場合は、剥離領域内の段落到に近い領域で上昇流が卓越していることがわかる。これは、剥離域内の再循環流れが比較的稳定した方向性を持って循環していることを意味する。BSの場合、水面付近での上昇流の発生確率はあまり高くない。これに対し、斜路を取り付けた場合は、すべてのケースにおいて特徴的な分布パターンが見られた。すなわち、図-7から明らかなように、水面付近では、図-6に示した定常的な水面形に対応して上昇流の発生確率が周期的に変化している。このうち、SL4とSL4Sの P_{up} はほぼ同じ位相で変化しているのに対し、SL7とSL7Sは変動の位相が明らかに異なっている点が注目される。これは、ここまでの考察からも明らかなように、SL7Sでは粗度の影響が主流部にまで及んでいることが要因と思われる。粗度の影響が水面にまで及んでいることは P_{up} の分布を比較して初めて明瞭な形で示すことができたと言える。

また、中層部の P_{up} の分布を詳細にみると、SL4では $x/h_s=3.5$ と 5.5 付近、SL4Sでは $x/h_s=5.0$ と 6.5 付近、SL7では $x/h_s=5.5$ 、そしてSL7Sでは $x/h_s=2.5, 4.5$ と 6.0 付近に上昇流の発生確率が底層から水面へつながった領域が現れている。この傾向は特に粗度を配置した場合に顕著である。以上のことは底面で発生した剥離渦の上昇に伴う現象、あるいはわずかなではあっても水面変動がきっかけとなって生じた現象と思われるため、瞬間瞬間

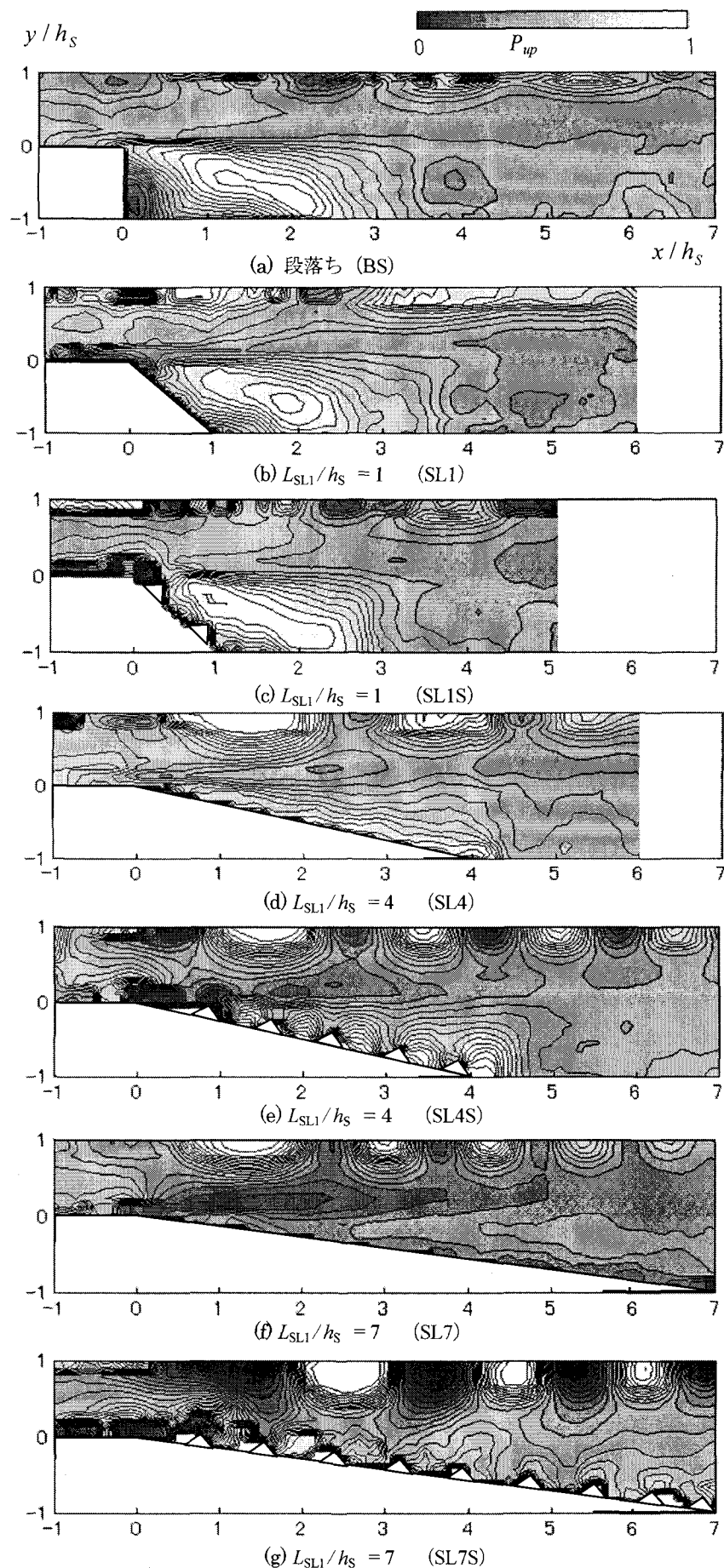


図-7 上昇流の発生確率分布

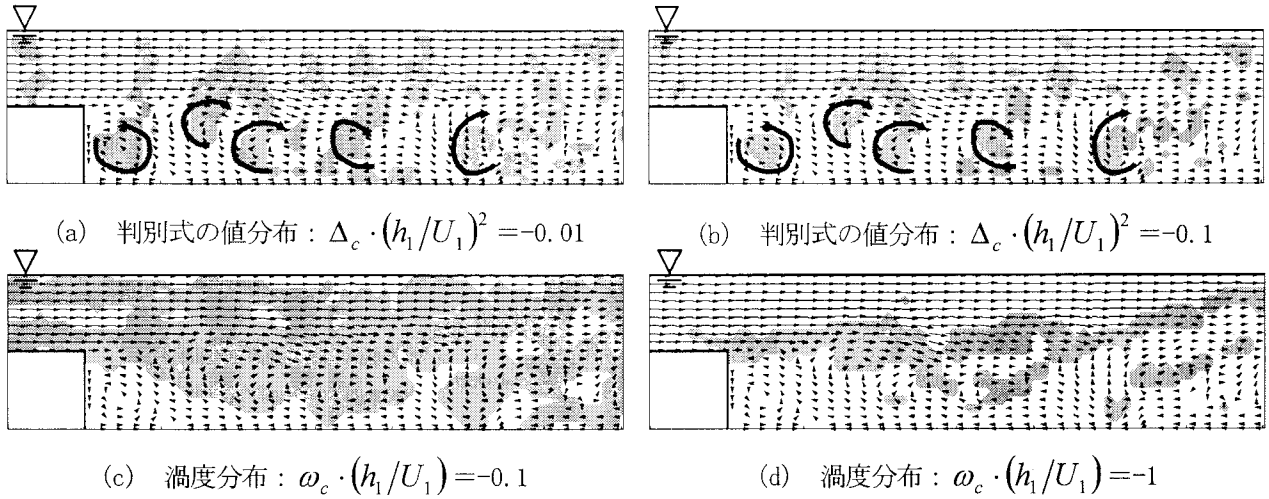


図-8 一定の値 Δ_c , ω_c 以下となる固有値 Δ , 渦度 ω の分布

の渦中心(渦核)の存在場所をできるだけ正確に把握する方法について以下に検討した。

4.5 渦核の検出方法

渦中心の検出法にはQ定義法⁷⁾や λ_2 定義法⁸⁾など様々な方法が提案されているが、一つの方法として速度勾配テンソルの瞬時・局所の不変量を用いて検出する Δ 定義法がある⁹⁾。三次元流れにおいては速度勾配テンソル ∇u の固有値 λ は以下の式で与えられる。

$$\lambda^3 - P\lambda^2 + Q\lambda - R = 0 \quad (3)$$

ここに

$$P \equiv u_{i,j} = 0 \quad (4)$$

$$Q \equiv 1/2(u_{i,j}^2 - u_{i,j}u_{j,i}) = 1/2(u_{i,j}u_{j,i}) \quad (5)$$

$$R = \text{Det}(u_{i,j}) \quad (6)$$

ここで、式(3)の判別式 Δ は

$$\Delta = \frac{27}{4}R^2 + Q^3 \quad (7)$$

で与えられるが、 $\Delta < 0$ のとき λ は1つの実数解と2つの虚数解を持ち、そのことは流線が局所的に閉じていたり、らせん状になっていたりすることを示している。すなわち、その部分に渦が存在していることを示唆している。この解析手法は主に三次元の流れに対して行われるが、二次元流れに適用しても良好な結果が得られている¹⁰⁾。二次元流れに適用すると、 λ および Δ は以下の式により表される。

$$\lambda^2 - p\lambda + q = 0 \quad (8)$$

$$p = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (9)$$

$$q = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (10)$$

$$\Delta = p^2 - 4q \quad (11)$$

二次元流れの場合、判別式が $\Delta < 0$ となるときに固有値 λ は2つの虚数解を持ち、その部分に渦の中心が存在するとされる。本研究における撮影条件や実験条件から流れ場には時計回りの渦が卓越すると考えられるため、ここでは時計回りの渦の発生状況に着目する。すなわち、ある点において $\Delta < \Delta_c (< 0)$ かつ $\omega < \omega_c (< 0)$ を満たすデータの数を n_{rot} 、時系列データの数を $n (= 8191)$ とすると、時計回りの渦の発生頻度 P_{rot} は次式より求められる。

$$P_{rot} = n_{rot}/n \quad (12)$$

ここで示した渦検出法の有効性を示したのが、図-8である。図-8では、段落ち流れのケースBSを対象として、ある瞬間における判別式の値、渦度がそれぞれ Δ_c と ω_c より小さくなる領域をハッチングで示した。なお判別式の値及び渦度は流入部の平均流速 U_1 、ステップ上流側の水深 h_1 を用いて無次元化した。図-8では $\Delta_c (h_1/U_1)^2 = -0.01, -0.1$ 、および $\omega_c (h_1/U_1) = -0.1, -1$ がしきい値の場合の各分布を比較しているが、 Δ_c の分布は二次元断面内に現れた渦核の中心と良好に対応していることがわかるのに対し、渦度分布でははっきりしないことがわかる。従って、渦の回転方向を限定するためのフィルターとして渦度を用い、渦核を検出するためのフィルターとして Δ_c を利用する P_{rot} は剥離渦を二次元断面で見た場合の検出パラメータとして有用と考えられる。

4.6 渦中心(渦核)の平均分布

上述の渦検出の方法を用いて、各ケースの P_{rot} を求めた結果を図-9に示す。ここでは $\Delta_c \cdot (h_1/U_1)^2 = -0.01$, および $\omega_c \cdot (h_1/U_1) = -0.1$ とした。この図より、BS, SL1 および SL1S では主要な渦核は剥離領域内の底面付近にのみ分布していることがわかる。発生の中心は段落直後の領域と再循環領域の中央に対応する $x/h_s = 2 \sim 3$ 付近であり、再付着点付近 ($x/h_s = 7$) から逆流してきた流れが段落下流の死水域的な領域の水塊と衝突して時計回りの渦が多数発生している様子がわかる。これに対し、SL4 の分布形では $x/h_s = 2$ および $x/h_s = 4$ の付近で、渦の発生頻度が底面から水面までつながっていることが確認できる。この位置は、図-7 (c)において水面近くで流れが上昇流から下降流に移行する場所、換言すれば水面がわずかではあるが局所的に盛り上がっている地点にほぼ一致していて興味深い。このような視点で残りのケースを図-7と比較しながら調べると、SL4 のときと同様の傾向が明確に現れていることがわかる。特に、粗度の影響が明確になる SL7S では、粗度要素一つおきに底面から水面まで渦検出領域が繋がった特徴的な分布が得られている。各粗度要素から上昇流が発生しなかったのは、粗度間隔が粗度高さの4倍程度と比較的小さいため、一つの要素から発生した剥離渦の領域が一つ下流側の粗度要素を包含する形で現れていることが要因と思われる。すなわち、一つの上流側の粗度要素から発生した剥離領域は一つの粗度要素を飛び越えた地点で再付着し、そこで再び剥離渦が発生したものと考えられる。底面付近から発生した剥離渦が水面に衝突したと見られる付近で水面が局所に増大していることから、水面の変化は剥離渦起因のもので推定することができる。図-10に SL7S のレイノルズ応力分布のコンター図を示す。図-5では不明確であったが、この図より空間的な

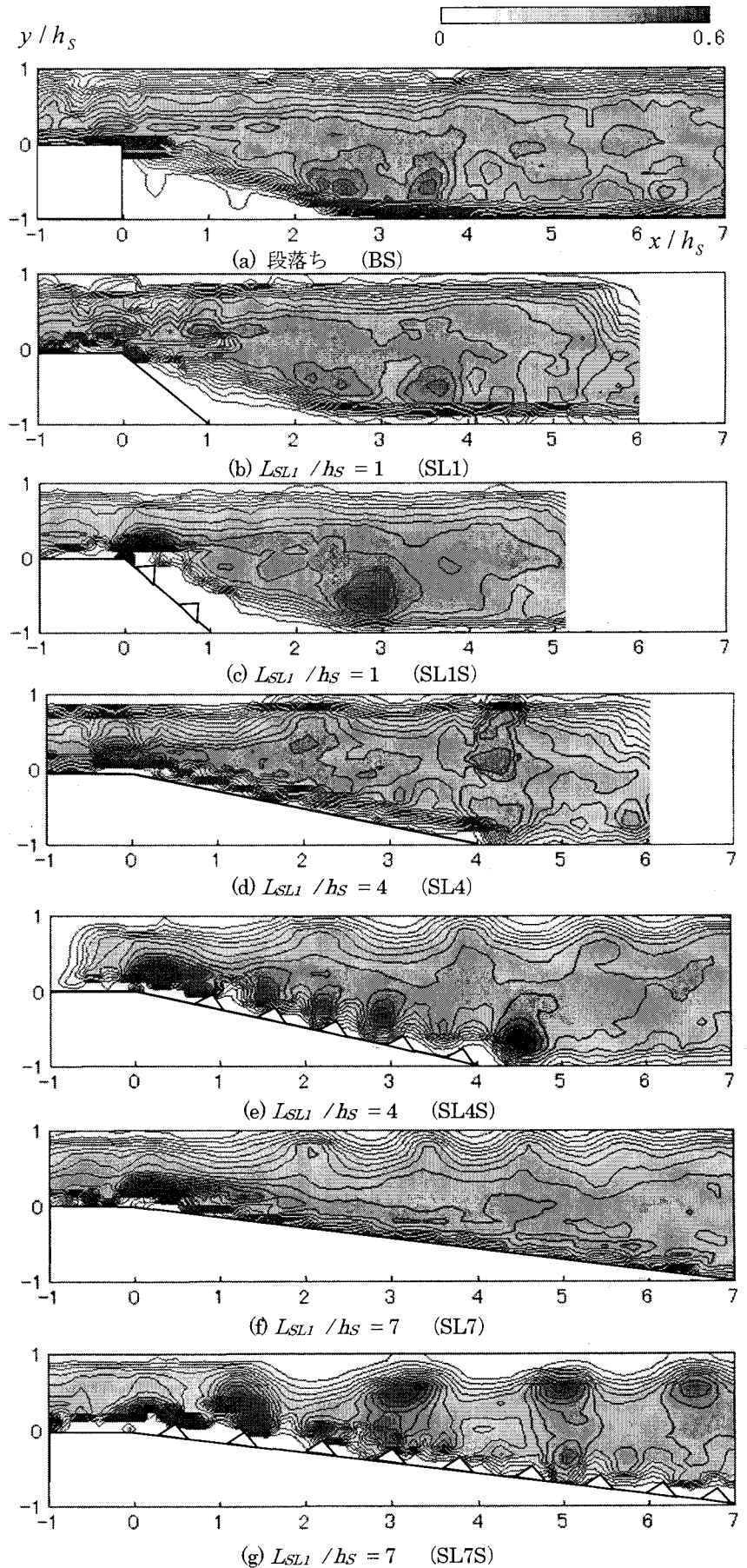


図-9 渦の中心の発生頻度分布 (P_{rot}) :
 $\Delta_c \cdot (h_1/U_1)^2 = -0.01$, $\omega_c \cdot (h_1/U_1) = -0.1$

レイノルズ応力が渦核の高頻度発生領域に対応して増大している様子がわかる。

5. 結論

高速ビデオカメラと高精度なPIVアルゴリズムおよび高密度の速度場の解析により、斜路を有する段落ち部の流れ場を詳細に調べた。

段落ち部下流に斜路を設置した場合に、微小ではあっても水面に定常波が現れたことは想定外の事象であった。微小な水面波の発生要因は、斜路の長さが短い場合は水面の不安定性に起因するものと考えられることもできるが、斜路の長いSL7とSL7Sのケースでは同じ底面形状でも粗度の有無によって水面波の位相が変化したことから、この場合は剥離渦起因の変動ではないかと考えることができる。このことは、二次元場という制約はあるものの、新たに導入した渦の検出法を用いて底面付近から水面に至る連続した渦領域を検出することによってある程度推察できた。ただし、滑面と粗面での発生間隔の違いを理論的に示すことはできなかった。本研究で新たに導入した渦検出方法はこれまでPIVの解析結果にはあまり使われたことのない手法であり、今後、水面変動に対する底面剥離渦の影響等を詳細に検討していく上で有用な方法と思われる。また、ここで得られた知見は底面から発生する渦と水面の相互干渉等を考える上でも興味深いものであり、水面変動を考慮した乱流場の数値シミュレーションの検証データとしても有用と考える。

参考文献

- 1) 禰津家久, 中川博次, 天野邦彦: 開水路段落ち流れによる剥離流の乱流構造に関する研究, 第30回水理講演会論文集, pp.601-606, 1986.
- 2) 禰津家久, 中川博次, 天野邦彦, 藤本和久: 開水路段落ち流れの流速回復過程と再付着点からの組織渦の放出特性, 第31回水理講演会論文集,

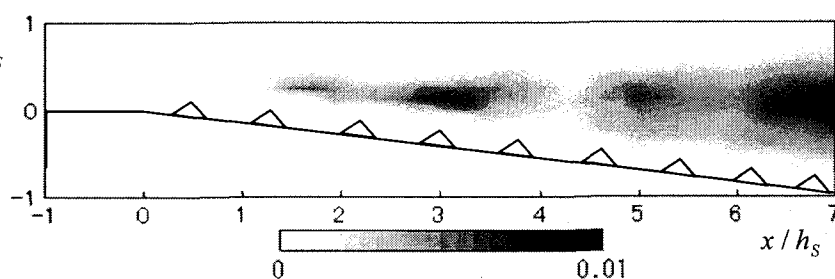


図-10 レイノルズ応力分布($-\overline{uv}/U_1^2$) (SL7S)

- pp.413-418, 1987.
- 3) 藤田一郎, 中山昭彦, 丸山達弥, 高橋香織: 粗面段落ち流れのPIV計測と乱流モデルによる数値計算, 応用力学論文集, Vol.5, pp.681-688, 2002.
- 4) 藤田一郎・丸山達弥・太田周彰: 開水路粗面段落ち部の乱流特性, 平成14年度関西支部年次学術講演会講演概要, II-55, 2002.
- 5) 泉谷直哉, 長浜弘典, 藤田一郎: バックステップ流れに対する粗度の影響, 平成15年度関西支部年次学術講演会講演概要, II-70, 2003.
- 6) 藤田一郎: 時空間微分に基づく高精度PIVの開発, 水工学論文集, 48巻, pp. 721-726, 2004.
- 7) Hunt, J.C.R., Wray, A.A. and Moin, P.: Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows, Center for Turbulence Research Report CTR-S88, 1988.
- 8) Jeong, J. and Hussain, F.: On the identification of a vortex, J. Fluid Mech., Vol.285, pp.69-94, 1995.
- 9) Chong, M.S., Perry, A. E. and Cantwell, B. J.: A general classification of three-dimensional flow fields, Phys. Fluids A, 2(5), 1990.
- 10) Jung, Y., Y., Wontae, K. and Jaeyong, S.: High-definition PIV analysis on vortex shedding in the cylinder wake, Proceedings of Japan-Korea Joint PIV Seminar, pp.1-10, 2002.

(2005年4月15日 受付)