

段落ち流れの剥離領域における流れの組織構造に関する研究

徳山工業高等専門学校	学生会員	○松下 悠太
徳山工業高等専門学校	正会員	渡辺 勝利
徳山工業高等専門学校	正会員	佐賀 孝徳

1. はじめに

段落ち流れは、再付着点を伴う剥離流れの典型例であり、河川における落差工などに見られる。段落ち流れの乱流特性に関する様々な知見が得られてきたが^{1,2)}、組織構造については、禰津らの研究³⁾に認められるが、十分な解明には至っていない。組織構造は、流れの諸特性を支配する重要な構造であることから、その詳細を明らかにすることは極めて重要である。

本研究では、段落ち剥離領域における組織構造の特徴を流速計測法および流れの可視化法を用いて検討した。

2. 実験方法

本実験には、図-1 に示した幅 40cm、長さ 9m、高さ 25cm の透明アクリル樹脂板製の滑面湾曲開水路を用いた。本水路の壁面上に厚さ(h)4cm の塩ビ樹脂板を水路の最上流端から 1m 下流まで設置し、その下流端を段落ち流れとして取り扱った。水路の上流端には径 4mm、厚さ 3.2cm、幅 40cm、高さ 25cm のハニカムを整流装置として設置した。また、水路の下流端には水路調整用の堰を設けた。図-2 には段落ち部水路形状および座標系を示している。

実験では、PTV(Particle Tracking Velocimetry)による流速計測および流れの可視化を行った。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)、照明としてレーザースリット光膜(厚さ 1mm)を用いた。流れの可視化では蛍光染料注入法を用いて流れ水平断面視、縦断面視、横断面視を行った。図-3 にその手法の概要を示す。

3. 実験結果

図-4 には平均主流速縦断面分布を示している。これより、段落ち高さの $y=4$ cm を境界に水表面側では高速、

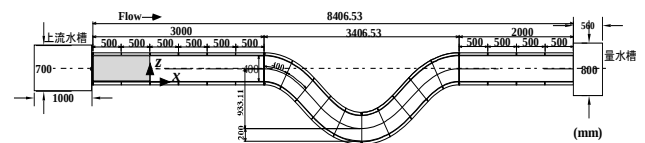


図-1 実験水路

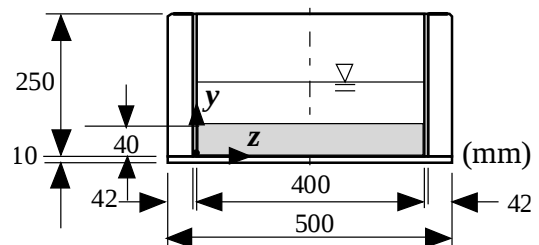


図-2 水路横断面形状

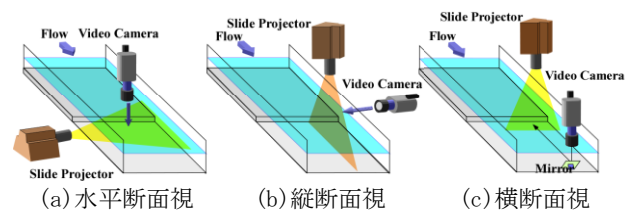


図-3 流れの可視化法概要

その底壁側では低速で、低壁面付近では逆流が生じていることが認められる。この流速分布の経時変化を示したものが図-5 である。これらより、平均主流速分布同様に、 $y=4.0$ cm 付近以下では、低速域が形成されることが認められる。また、低速域の上側の界面は時間的に上下方向に変動していることが明らかである。

図-6 は、 $T=4$ sec と 5sec における瞬時流速ベクトル (u, v) を示している。 $y=4.0$ cm 以下では逆流を示す。低速ベクトルを示している。 $T=4$ sec では、段落ち直下では反時計方向の流速ベクトルが分布しており、その下流側では上流へ向かう逆流が顕著で、時計周りのベクトルとの境界で水表面方向へ流速ベクトルの流向が変化していることが認められる。この上向きの流れが

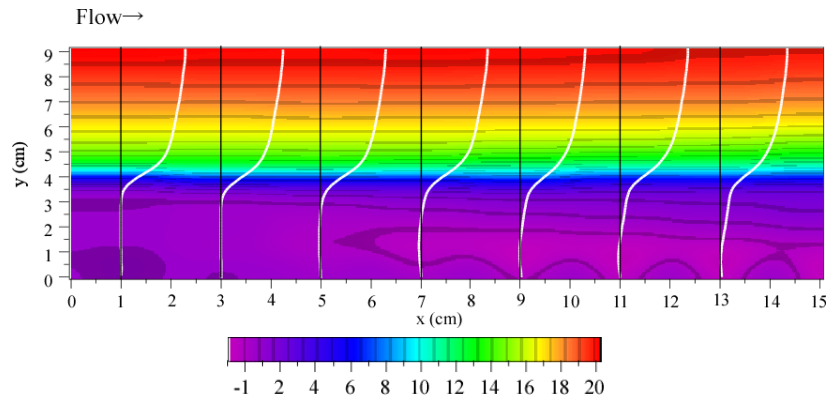


図-4 主流速縦断面等値線分布(u)

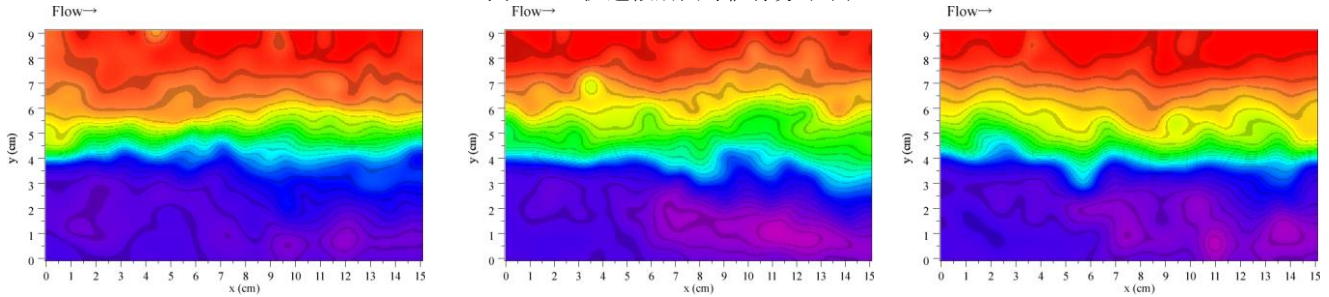


図-5 瞬間主流速縦断面分布 (T=1, 5, 9s)

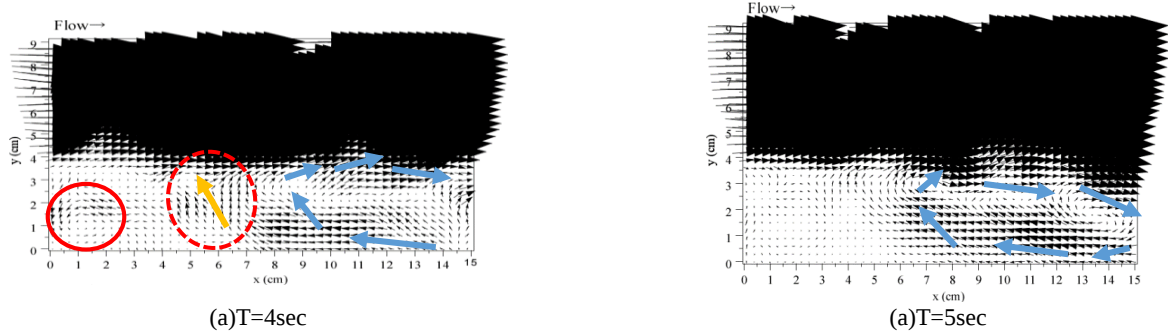


図-6 瞬間主流速ベクトル分布 (u, v)

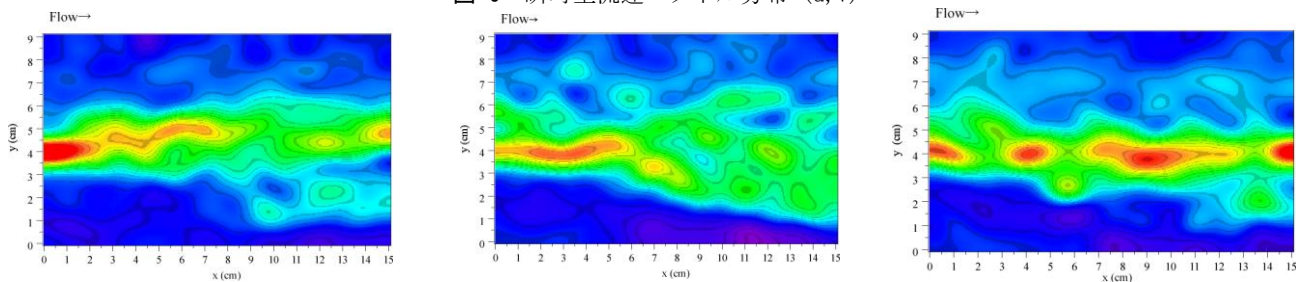


図-7 速度せん断縦断面分布 (du/dy) (T=1, 5, 9s)

流速変動を起こして界面の上下変動を誘起していることが観察された。上流の逆流は T=5sec に見られるように顕著であり、大規模な時計方向の旋回流を呈していることが観察された。以上のように、段落ちの剥離領域には、互いに回転方向が異なる対を成す循環流が形成されていることが明らかとなった。図-7 には、図-5 に示した瞬間主流速度分布から鉛直方向速度せん断成分 (du/dy) を求めてその経時変化を示したものである。本図より、まず、速度せん断の高い値を示す暖色の領域が段落ちの高さ $y=4.0\text{cm}$ 付近に帯状に分布しているこ

とが明らかであるまた、この高せん断領域は時空間的に不連続であることが認められる。特に $x=6\text{cm}$ 以降の領域で不連続性が顕著である。段落ち下流にはこのような速度せん断分布が認められるが、主流速の水平方向速度せん断 (du/dz) も存在している。図-8 は、段落ち高さ $y=4.0\text{cm}$ における瞬間主流速の水平断面分布である。この図から、 $x=6\text{cm}$ 付近までは横断方向にほぼ一様な低速域が形成されていることが明らかである。それより下流の領域では、高速域と低速域が横断方向に並列するような分布を呈している。この瞬間速度分布

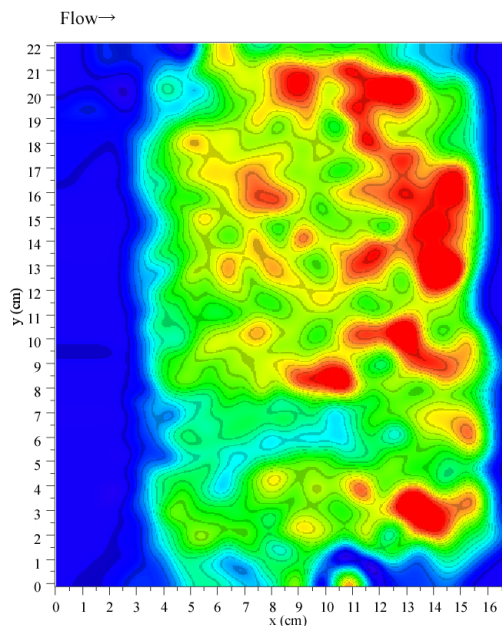


図-8 瞬時主流速水平断面分布 ($y=4.0\text{cm}$)

から横断方向の瞬時速度せん断 (du/dz) の存在が明らかである。以上のことから、段落ち下流域 $x=6\text{cm}$ 以降の領域においては主流速の鉛直方向速度せん断 (du/dy) と水平方向速度せん断 (du/dz) が共存していることが明らかとなった。

2) 組織構造の特徴

図-9には、段落ち直下における縦断面視の経時変化を示している。本図より、まず段落ち直下には青破線で囲んで示したように、渦領域が形成されていることが認められた。ここでは横断方向に回転軸を有する複数の横渦構造が観察された。この横渦構造の形成領域は時空間的に安定しており、図-6の(a)に示したように全体として反時計方向に回転していることが観察された。この横渦構造領域の下流には、赤破線で示したような同様に横断方向に回転軸を有する横渦構造が連続して形成されることが認められた。また、この渦構造の観察では、これが流れ方向にも軸を有していることが推察された。さらに、この横渦構造は段落ち直下ではスケールが小さいが、流下するに従ってそのスケールが増大していることが明らかである。この横渦構造の形成には、流速ベクトル分布でも見られたが、上流からの逆流が重要な役割を果たしていることが観察された。すなわち、段落ち直下の横渦領域に乗り上げその流れが流速変動を引き起こし、それが横渦形成の形成因となっていると考えられる。図-10は、 $y=1.0\text{cm}$ と 4.0cm における水平断面視の一例を示している。 $y=1.0\text{cm}$ では鉛直方

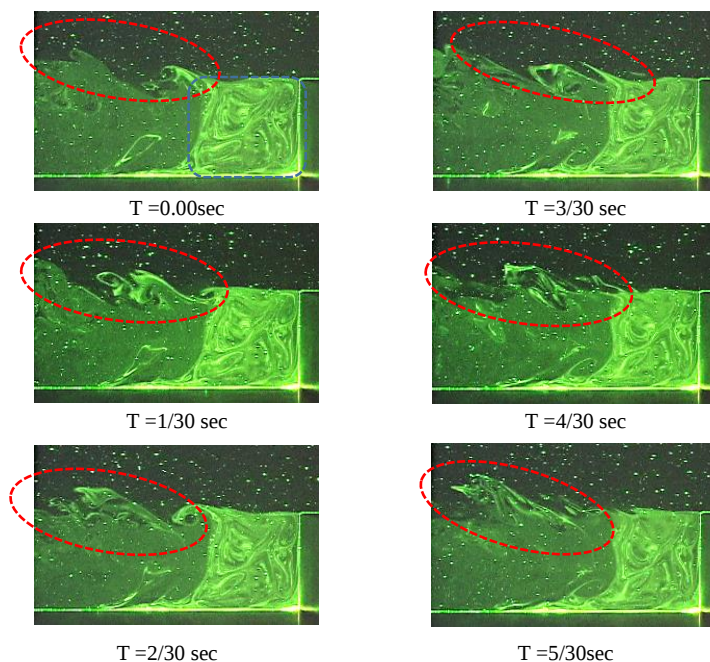


図-9 縦断面可視化 (1/30秒間隔)

向を軸とする旋回流が観察された。また、 $y=4.0\text{cm}$ では段落ち直下では帯状の形状を呈する形象が、流下すると鉛直方向に軸を有する渦形象に変化し、それが下流になるとそのスケールが増大していることが認められた。この形象は、縦断面視において観察された横渦構造の水平断面形象に相当している。この横渦構造は横断方向とともに鉛直方向の回転成分も有していることから大変興味深い。図-11は、段落ち部からの流下距離に伴う横断面視の一例を示している。 $x=1\text{cm}$ における横断面形象には渦巻き形象は認められない。 $x=4\text{cm}$ では縦渦構造の存在を示す渦巻き形象が底壁上および段落ち高さ境界付近に認められる。 $x=8\text{cm}$ では段落ち高さの境界付近の縦渦構造のスケールがやや増加し、 $x=16\text{cm}$ ではさらにその傾向が増大している。この界面付近に観察された縦渦構造は、縦断面、水平断面において観察されたそれぞれの渦構造に対応している。すなわち、段落ち下流には縦渦構造が形成され、それが流下方向に発達していることが明らかとなった。

(3) 段落ち流れ剥離領域の流れの概念図

図-12は、段落ち流れ剥離領域における組織構造の概念図を示している。段落ち部の剥離領域には、互いに反対方向に回転する旋回流が形成されている。下流側の逆流による旋回流は非常に強く、その流れ成分が上流側の旋回流との境界で上昇流となり、それが流れの不安定性を引き起こす。段落ち下流部では比較的高い値の速度せん断である du/dy と du/dz が形成されている。こ

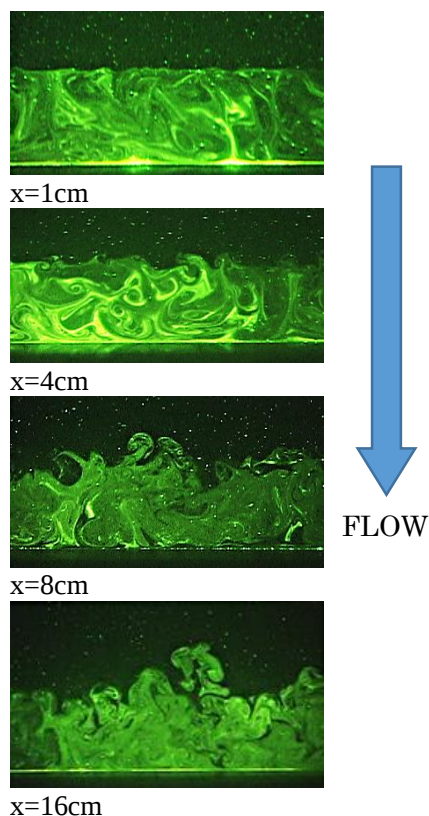


図-11 横断面視

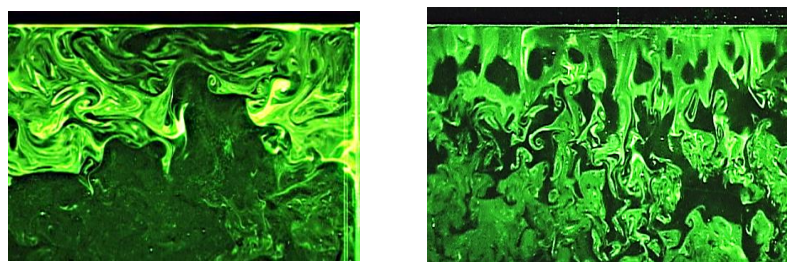


図-10 水平断面視 (y=1, 4cm)

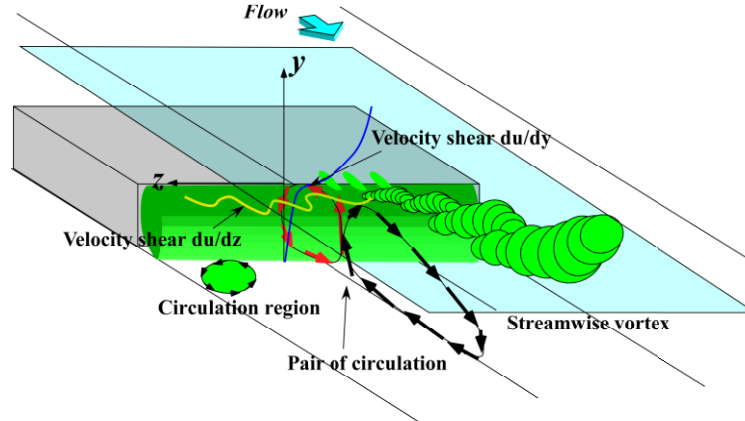


図-12 段落ち流れの剥離領域の組織構造の概念図

の2つの速度せん断の共存は、縦渦構造の重要な形成因である。段落ち部直下には横渦領域が形成されている。この横渦構造の下流には縦渦構造が形成され、そのスケールは下流方向に大規模化するこのような縦渦構造は、基本的に瞬時流速の遅速、乱れの生成に直接寄与していることから⁴⁾、流速分布の縦断面および水平断面分布で見られたような流速の遅速分布の形成に寄与していると考えられる。また、段落ち直下の側壁側の底壁付近には鉛直方向に回転軸を有する旋回流が形成されている。

4. 結 論

本研究において得られた結論を以下に示す。

(1) 段落ち下流の剥離領域には互いに回転方向の異なる対を成す旋回流が形成される。剥離領域下流側の旋回流は強い上昇流を生成し、剥離域と主流域の境界における速度変動を引き起こす。

(2) 段落ち剥離領域においては主流速度せん断である du/dy および du/dz の比較的高い値が生成される2つの速度せん断の共存は段落ち剥離領域固有の特徴である。

(3) 段落ち下流の剥離領域の上流部には横渦領域が

形成される。

(4) 段落ち下流の剥離領域の下流部には縦渦構造が形成され、それは流下方向にそのスケールが増大する。また、その組織運動が縦断面、水平断面の速度の遅速分布を生成している。

(5) 段落ち直下の側の底壁付近には鉛直方向に回転軸を有する旋回流が形成されている。

参考文献

- 1) Eaton, J.K., Johnston, J.P.: Low frequency unsteadiness of reattaching turbulent shear layer, *Turbulent Shear Flows*, Springer-Verlag, Vol.3, pp.162-170, 1982. pp. 841-849, 2009.
- 2) Nakagawa, H., Nezu, I.: Experimental investigation on turbulent structure of backward facing step flow in open-channel flow, *J.Hydr Res*, Vol.25, No.1, pp.67-88, 1987.
- 3) 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, 第31回水理講演会論文集, pp.413-418, 1987.
- 4) 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 國弘栄司: 底壁面に縦棧粗度を設置した開水路乱流に形成された並列らせん流の内部構造, *土木学会論文集B*, Vol. 62, No. 2, pp.186-200, 2006