

段落ち流れの組織構造

Coherent Motion of a Turbulent Flow Behind a Backward-Facing Step in Open Channel

広島大学工学部 川西 澄 K.Kawanisi

広島大学工学部 余越正一郎 S.Yokosi

Instantaneous two-dimensional velocity fields around the flow reattachment region behind a backward-facing step were successively investigated by using flow visualization and digital image processing. The distributions of turbulent velocity components and instantaneous Reynolds stress were calculated in order to clarify the momentum transfer mechanism at the reattachment region. Turbulence was generated by a rod upstream of the step in order to examine what effect the upstream turbulence would have upon the reattachment process.

Keywords: backward-facing step, coherent motion, image processing

1. はじめに

剝離、再付着流れの典型例である段落ち流れの乱流構造は、河床波上の流れとの類似性もあって、従来から多くの実験的研究が行われてきた。その結果、瞬間再付着点の位置が時間とともに大きく揺らぐこと、再付着領域においてレイノルズ応力、壁面変動圧力等が極大値をとること、間歇的に上昇流(ボイル)が発生すること等が明らかにされている。しかしながら、従来行われてきた実験的研究は点計測がほとんどであるため、剝離泡内部や再付着後の非平衡乱流境界層の構造は未だ明らかにされていない。本研究は可視化と画像処理によって縦断面内の瞬間的な速度場を連続的に測定し、段落ち下流部の組織構造や再付着領域における運動量輸送のメカニズムを明らかにするとともに、主流乱れが剝離泡の特性に与える影響について検討したものである。

2. 実験方法と画像処理

段落ち下流部の瞬間的な速度場を測定するために、ポリスチレン粒子(粒径0.5mm)をトレーサーとして水路中央部の縦断面を可視化した。使用した水路は長さ30m、幅800mmの可変勾配型水路で、測定部は側壁、水路床ともガラス製である。水路の整流板から15.2m下流に高さ(H_s)40mmの段落ちを設置し、厚さ約7mmのスリット光を水路下方から照射した。座標系は段落ち部の水路床を原点とし、流下方向(x)、鉛直上向き(y)を正とした。スリット光による可視化範囲は $x=110\sim 340\text{mm}$ である。ポリスチレン粒子の流跡はモータードライプ付きカメラ(露光時間62.6ms、撮影間隔364ms)で連続撮影し、ASA3200まで増感現像した後、四号印画紙に焼き付けた。水理条件は流量 $4.7\text{m}^3/\text{s}$ 、水路勾配1/640、段落ちから700mm上流における水深と最大平均流速(U_0)はそれぞれ、176mmと320mm/sである。主流乱れが剝離泡、再付着特性に与える影響を調べるため、ケースBとして、段落ち上流にロッド(直径6mm)を設置して主流乱れを導入した¹⁾。ロッドは段落ち上流100mmの位置に、底面壁から20mm離して設置した。以下、本論文ではロッドを設置しない場合をケースA、ロッドを設置した場合をケースBとする。

流跡画像(縮尺0.6)は分解能 $200\times 200\text{PEL}$ のイメージスキャナーで読み取り、画像の平滑化を目的として、膨張、収縮処理を行った後、流跡画素にラベル付けし、雑音と思われる微小連結成分を除去した。以上の前処理を施した後、流跡線を構成する画素の位置座標の集合に最小二乗法を適用して流跡線の傾きを求めた。流跡線の長さは流跡線の面積を平均幅で除して求め、これから平均幅分の長さを差し引いて速度ベクトルの長さとした²⁾。速度ベクトルの方向を決定するため、主流方向流速を正と仮定して求めた速度ベクトルを、

CRT(画素数1024×768)上に表示して、流跡写真を見ながら対話処理によって方向設定を行った。こうして求めたランダムな位置における速度ベクトルから、8mm($Hs/5$)間隔の格子点における速度ベクトルを補間により求め、以下の数値処理を行った。なお、補間範囲は $x/Hs=3.4\sim 8.0$ 、 $y/Hs=0.1\sim 4.1$ である。

3. 乱れの強さとレイノルズ応力

36枚の連続写真から求めた乱れの強さ u' 、 v' とレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の空間分布を図1に示す。ただし、段落ち上流部の最大平均流速(U_0)で無次元化してある。4. で述べるように、平均再付着位置(x/Hs)はケースAでは約6、ケースBでは約5である。サンプル数は36と少ないが、従来から言われているように、再付着領域において乱れの強さ、レイノルズ応力はピークを示している。ケースAとケースBのレイノルズ応力を比較すると、ロッドにより主流乱れを導入したケースBの方が、ロッドのないケースAよりレイノルズ応力は小さくなっている。磯本ら¹⁾の実験によれば、主流方向乱れ強さの最大値は、剝離後2.5 Hs 程度まではロッドがある場合の方がない場合より大きいものの、それ以降は逆に小さくなること示されている。ケースAをみると、再付着後 $x/Hs=7$ 付近で乱れはいったん小さくなるが、その後再び大きくなり、ピーク的位置はやや上方に移動している。

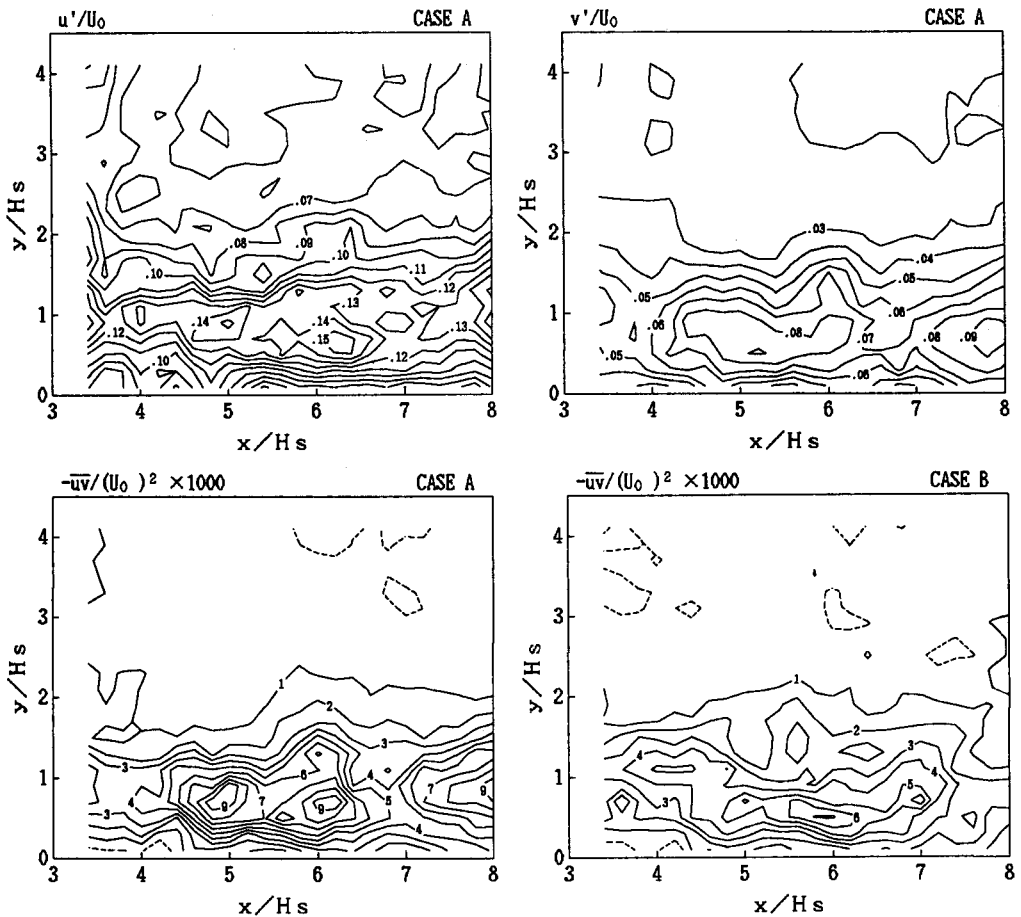


図1 乱れの強さとレイノルズ応力の空間分布

4. 再付着点の非定常特性

水路床近傍($y/H_s=0.1$)における逆流率(I_r)の x 方向分布を図2に示す。従来言われているように、 $I_r=0.5$ となる位置がほぼ平均再付着位置に一致している。段落ち上流のロッドにより主流乱れを導入した場合、段落ち高さ程度平均再付着位置が上流に移動しているのがわかる。佐々木ら³⁾は厚板前縁の剝離泡に関する実験において、主流乱れが剝離剪断層の三次元構造への遷移を早め、大規模な二次元構造の成長を阻害するため、平均再付着距離が短くなると述べている。

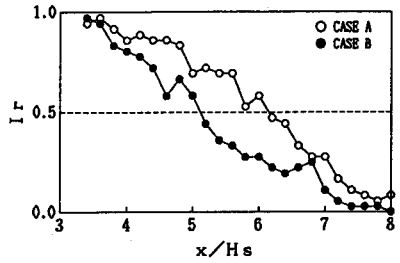


図2 逆流率分布

図3は $y/H_s=0.1$ における主流方向流速の時空間分布を示したものである。等値線の間隔は $0.05U_0$ で、点線が負、破線が0、実線が正の値を示しており、順流部には影を付けてある。図3から、ケースBはケースAにくらべて平均再付着位置における順流、逆流の持続時間が短く、順流と逆流が頻繁に繰り返されていることがわかる。ケースA、Bとも順流領域の中に逆流域が存在し、瞬間再付着点が複数存在する場合がある。これは剝離泡から流れ出した大規模渦によるものと考えられ、格子点速度分布をみると、大規模渦の下方で逆流となっている。

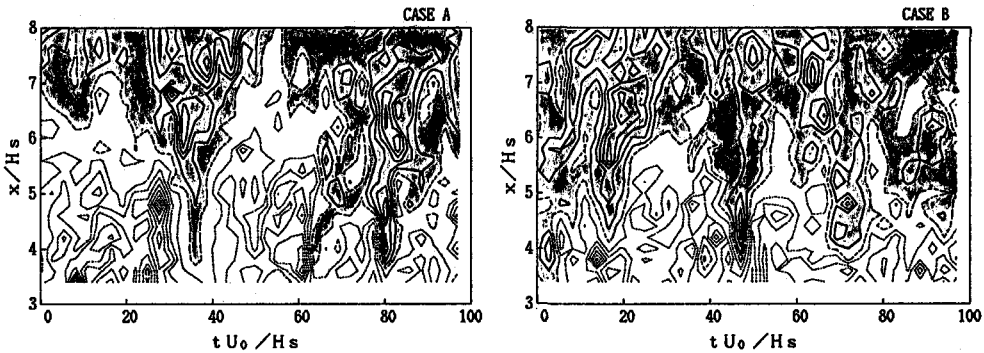


図3 壁面近傍主流方向速度の時空間分布

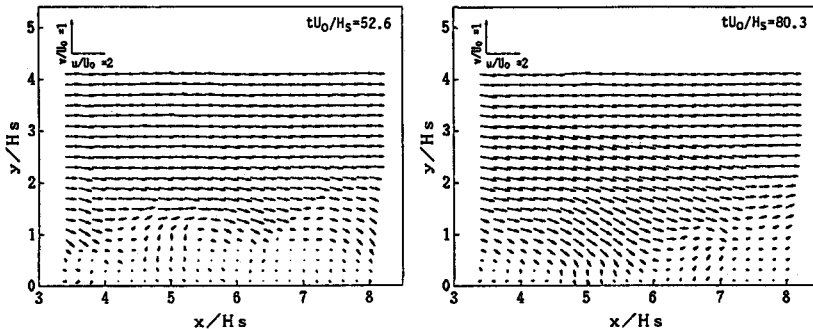


図4 格子点速度ベクトル

5. 乱れ速度と瞬間レイノルズ応力及び渦度の分布

ケースAについて、瞬間再付着距離が長い場合と短い場合の例として $tU_0/H_s=52.6$ と 80.3 における格

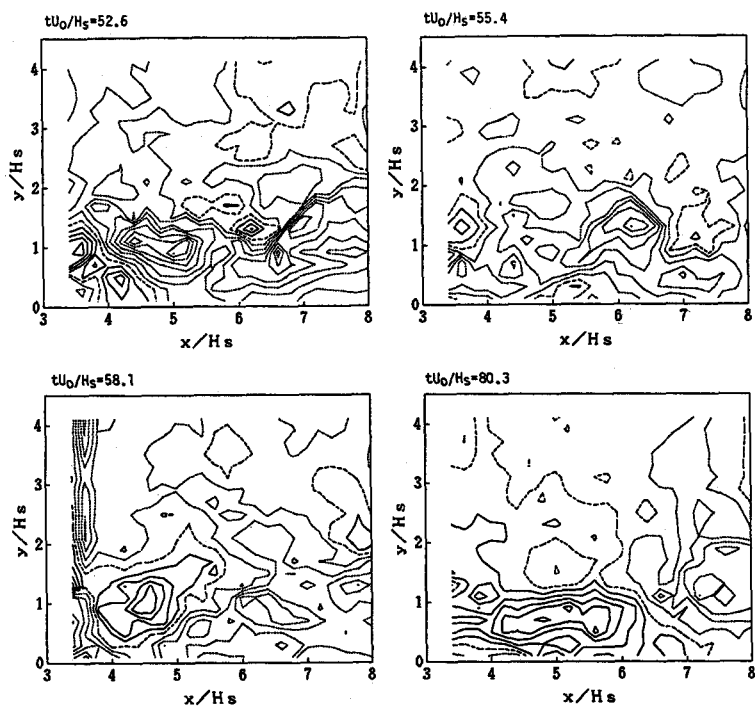


図5 主流方向乱れ速度の空間分布

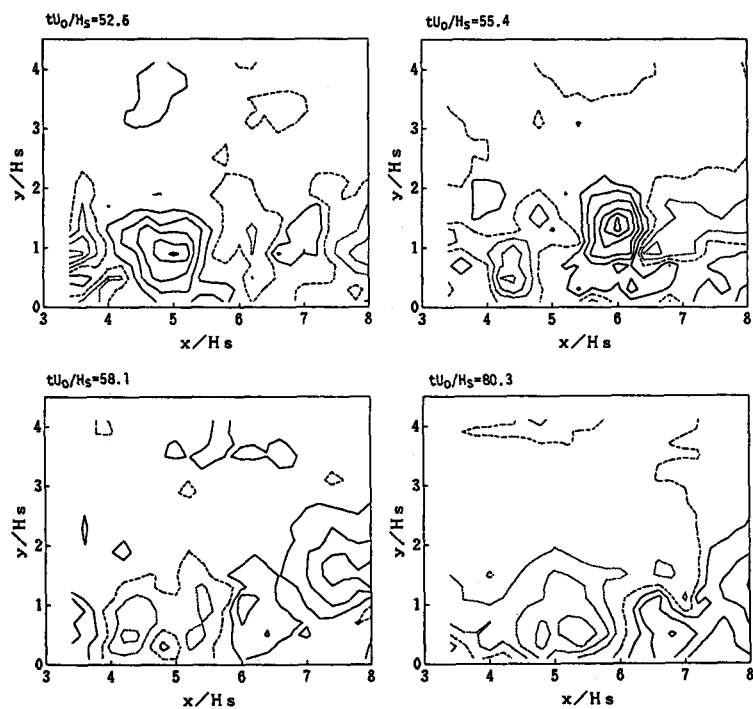


図6 鉛直方向乱れ速度の空間分布

子点速度ベクトルを図4に、主流方向と鉛直方向乱れ速度(u, v)の空間分布($tU_0/Hs=52.6\sim 58.1, 80.3$)を図5と6に示す。乱れ速度の等値線間隔は $0.05U_0$ で、負を点線、0を破線、正を実線で示してある。図4の速度ベクトル分布からわかるように、剝離泡を構成している大きな渦構造が下流に流れ出しており、瞬間再付着距離が短い $tU_0/Hs=80.3$ では、渦の間に高速流体が上方から壁面に向かって流入しているのがみられる。瞬間再付着距離が長くなっている $tU_0/Hs=52.6$ における乱れ速度分布をみると、 $x/Hs=5$ 付近に、 $u < 0$ で $v > 0$ の領域が水深全体にわたって存在することがわかる。またさらに、一連の乱れ速度分布($tU_0/Hs=52.6\sim 58.1$)をみると、 $u < 0$ で $v > 0$ の流体塊がしだいに上昇しながら流下していくのがみられ、次に述べるように、これに対応した瞬間レイノルズ応力のピークが存在する。

図5、6の乱れ速度分布と同じ時間における瞬間レイノルズ応力($-u v$)の空間分布を図7に示す。瞬間レイノルズ応力の等値線間隔は $0.005(U_0)^2$ であり、乱れ速度と同様に、負を点線、0を破線、正を実線で示してある。図4の速度ベクトルと比較すると、 $tU_0/Hs=52.6$ では、大規模渦の上流側の縁にあたる $x/Hs=5$ 付近で剝離泡内の低速流体が上昇して剝離剪断層に連行される結果、瞬間レイノルズ応力は大きな値を示していることがわかる。一方、瞬間再付着距離が短い $tU_0/Hs=80.3$ では、上方から壁面に向かって高速流体が流入するために $x/Hs=5$ 付近に瞬間レイノルズ応力のピークが発生している。また、壁面に衝突した流体は下流に流れ去りつつある大規模渦によって巻き上げられ正のレイノルズ応力が発生している。このように、平均再付着点領域でレイノルズ応力が大きくなる原因は、剝離泡内の大規模渦による低速流体の剝離剪断層への連行と、大規模渦間に発生する上方から壁面に向かう高速流体にあることがわかる。 $tU_0/Hs=52.6\sim 58.1$ における瞬間レイノルズ応力の分布をみると、図5、6に示した一連の乱れ速度分布に対応して、瞬間レイノルズ応力のピークも下流に移動してゆくのがわかる。このように、瞬間レイノルズ応力のピークは、平均再付着点のまわりを揺動するのではなく、平均再付着点より段落ち高さ程度上流に現れたピークが大規模渦とともに下流に移動するパターンが多い。

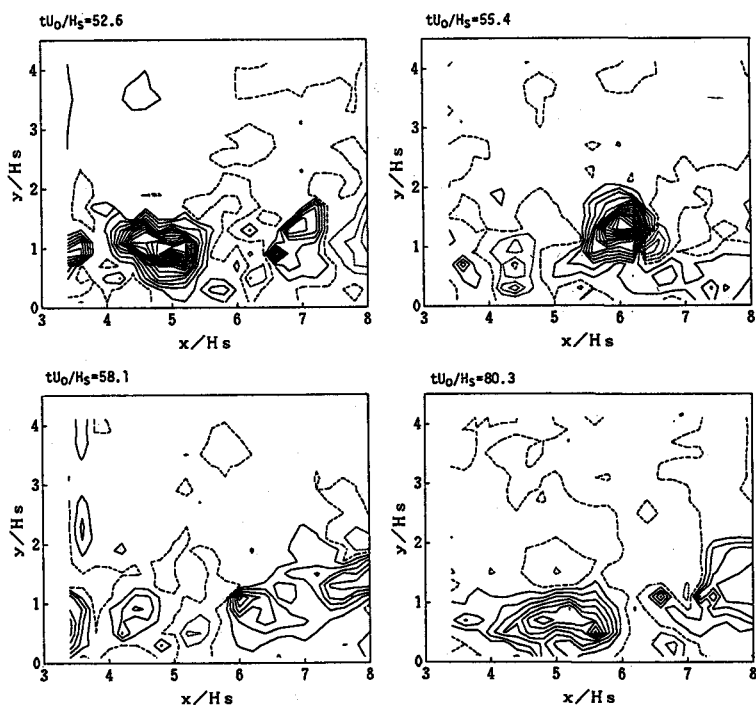


図7 瞬間レイノルズ応力の空間分布

図8は格子点速度から差分近似によって求めた渦度 $\omega = -\partial U/\partial y + \partial V/\partial x$ の空間分布である。時間は図4と同じ $tU_0/Hs=52.6$ と 80.3 におけるもので、等値線の間隔は $0.2U_0/Hs$ である。図4の速度ベクトル図と比較するとわかるように、大規模渦の上縁に沿って渦度のピークがみられる。

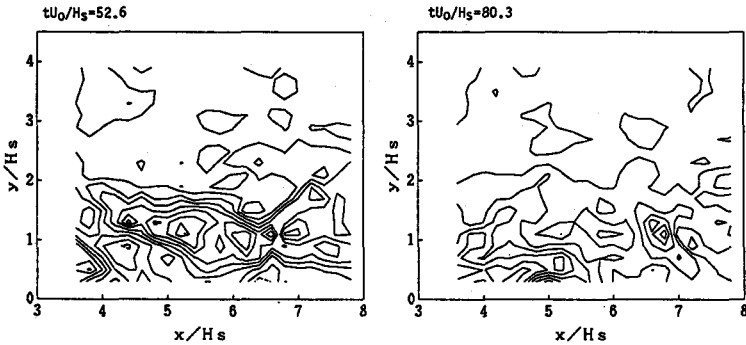


図8 瞬間渦度の空間分布

6. おわりに

ポリスチレン粒子の流跡を画像処理することによって、段落ち下流部の瞬時的な速度場を連続して測定し、剝離泡内部の組織的な渦構造、瞬間再付着点の時空間特性、再付着領域における運動量輸送のメカニズムを検討した。また、段落ち上流にロッドを設置し、主流乱れが剝離泡の特性に与える影響についても検討を加えた。えられた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 剝離泡はいくつかの大規模な渦構造から構成される。再付着領域における大きなレイノルズ応力の発生は、これらの大規模渦による剝離泡内の流体の剝離剪断層への連行と、大規模渦が下流に流出した後上方から流入する高速流体によってもたらされる。

(2) 瞬間レイノルズ応力のピークは平均再付着点のまわりを揺動するのではなく、再付着点領域の上流端付近に現れたピークが大規模渦とともに下流に移動するパターンが多い。

(3) 段落ち上流にロッドを設置し、主流乱れを導入すると、平均再付着距離が短くなるとともに、平均再付着点における順流と逆流の持続時間も短くなり、流向の変化が頻繁になる。

(4) 剝離泡から流出した大規模渦の下流では主流方向流速が小さくなり、逆流となることがある。このため、瞬間再付着点は複数存在する場合がある。

参 考 文 献

- 1) 磯本・本阿弥：後方ステップ流れに与える乱れ強さの影響，日本機械学会論文集，Vol.54(B),No.497, pp.51-58,1988.
- 2) 近江：二次元速度場の流跡写真の画像処理，Vol.6, No.20, pp.19-27,1986.
- 3) 佐々木・木谷：前縁はく離泡に対する主流乱れの影響，日本機械学会論文集，Vol.50(B),No.456, pp.1842-1846,1984.