

段落ち剝離剪断層の非定常特性

Unsteady Characteristics of the Separated Shear Layer Behind a Backward-Facing Step
in Open Channel

広島大学工学部 川 西 澄 Kiyosi KAWANISI
広島大学工学部 余 越 正 一 郎 Shōitirō YOKOSI

Instantaneous two-dimensional velocity fields behind a backward-facing step in open channel were successively investigated by the use of flow visualization and digital image processing. Instantaneous spatial distributions of fluctuating velocity vectors, pressure and spanwise vorticity were presented and discussed. Space-time distribution of the longitudinal velocity close to the channel bed and the temporal variation of spanwise vorticity were estimated in order to clarify the low-frequency unsteadiness in the separation bubble. The low-frequency unsteadiness seems to be dependent on the strength of spanwise vorticity in the reattachment zone.

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

1. はじめに

流体機械・装置における剝離、再付着流れは、大きな流水抵抗、圧力変動、熱伝達率などを生ずることから、古くから多数の研究が行われてきた。一方、自然河川においても、河床波上の剝離・再付着流れの乱流構造が、流水抵抗や河床材料の輸送等との関連から興味を持たれ、研究されてきた^{1)~3)}。従来、幾何形状の単純さから後向きステップや厚板前縁部に形成される剝離泡の特性が数多く研究されてきたが、このような単純な幾何形状においても発生する流れは非定常性が強く複雑である。後向きステップに関する研究はEatonら⁴⁾、乱流剝離泡一般については木谷ら^{5), 6)}によってまとめられているが、現象が非定常で複雑であることから、未だ不明な点、推測の域を出ていない点が多く残っている。

著しい非定常性を示す剝離・再付着流れの構造を解明するためには、瞬間的な速度場を連続して測定する必要があるが、流速計を用いてそのような測定を行うことは今のところ不可能に近い。木谷ら⁷⁾は壁面圧力変動が速度場の構造と強い相関を持つことを利用し、壁面圧力変動を参照信号とする条件付平均を行って、間接的に厚板前縁剝離流の非定常な乱流構造を検討しているが、現在まで段落ち流れの瞬間的な速度場を連続して測定した例は見当たらない。本研究は可視化法と画像処理法を用いて、開水路段落ち下流部における縦断面および水平断面内の瞬間的な速度場を連続的に測定し、その非定常乱流特性を検討したものである。

2. 実験方法と流跡画像の処理

長さ30m、幅80cmの変可勾配型水路の整流板から15.2m下流に、高さ(H_s)4cmの段落ちを設置し、厚さ約7mmのスリット光を照射して段落ち下流部の縦断面および水平断面を可視化し、瞬間的な速度場を連続して測定した。トレーサとして用いたポリスチレン粒子(粒径約0.5mm)は水に分散させた状態で、段落ち上流4mの位置に注入した。測定部は側壁、水路床ともガラス製である。座標系は段落ち部の水路床を原点とし、水路床に沿って流下方向を x 、流れに対して横断方向を y 、水路床に垂直上向きを z とした。測定断面は水路中央部における二つの縦断面($x=14.0\sim38.8\text{cm}$, $y=0.0\text{cm}$, $z=0.4\sim10.8\text{cm}$), ($x=45.6\sim68.0\text{cm}$, $y=0.0\text{cm}$, $z=0.4\sim10.8\text{cm}$)と水平断面($x=1.6\sim16.0\text{cm}$, $y=-11.6\sim11.6\text{cm}$, $z=5.0\text{cm}$)である。ポリスチレン粒子の流跡はモータードライブ付きカメラ(露光時間31.4ms, 撮影間隔310~317ms)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25 l/s 、水路勾配1/700、段落ち部における水深(H_0)と最

大平均流速(U_0)はそれぞれ、11.5cmと40cm/sであり、段落ち部の流路拡大率 $H_0/(H_0-H_s)$ は1.54である。

印画紙に焼き付けた流跡画像(縮尺0.5)は分解能200×200PEL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た膨張、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。また、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⁹⁾。速度ベクトルの方向は、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決定した。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($H_s/5$)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。補間方法は、補間格子点に最も近い速度ベクトルを各象限から一つずつ選び、それらを補間格子点との距離の逆数で重み付け平均するものである⁹⁾。

3. 大規模渦構造と変動圧力、瞬間レイノルズ応力

縦断面内の速度場の一例をFig.1に示す。上側の図が瞬間的な速度ベクトル、下側の図が乱れ速度ベクトルの面内分布である。ただし、撮影開始時を0とした無次元化経過時間 $tU_0/H_s=9.5$ におけるもので、乱れ速度は37枚(時間長11.38秒)の画像から求めた平均流速を差し引いた変動速度である。Fig.1から剝離剪断層を構成している大きな渦構造が下流に流れ出しているのがわかる。

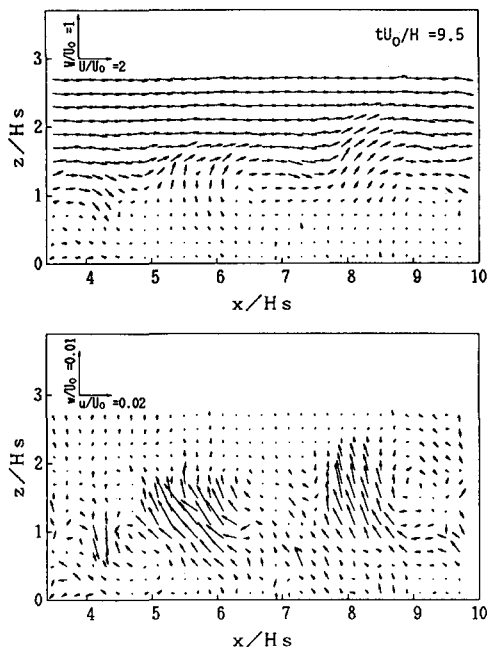


Fig.1 Instantaneous distribution in vertical cross-section of velocity and fluctuating velocity vectors.

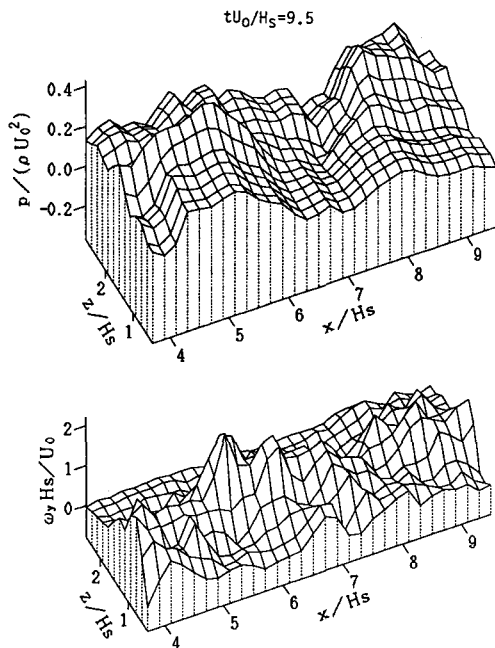


Fig.2 Instantaneous distribution in vertical cross-section of pressure and spanwise vorticity.

乱れ速度ベクトル分布には、速度ベクトル分布に存在する時計回りの渦巻構造に対応する剝離剪断層中の渦構造のほかに、速度ベクトル分布の渦巻間に対応する位置に反時計回りの渦巻がみられる。一連の乱れ速度ベクトル分布から求めた剝離剪断層中の大規模渦のは大体 $0.4U_0 \sim 0.7U_0$ の大きさで、下流に向かって大きくなっており、厚板前縁剝離流れで観測されている値と同程度である¹⁰⁾。

Fig.2上側の図は、重力項を除いた二次元非定常ナビヤ・ストークス方程式に格子点速度を代入して圧力勾配を求め、これを空間積分して求めた瞬間的な圧力の空間分布を示したものである。ただし、格子領域の中央点を0とした相対的な圧力分布で、経過時間はFig.1と同じである。なお、圧力勾配の空間積分は二種類の積分路で行ない、これを平均して圧力を求めている。Fig.1の速度ベクトル分布とFig.2の圧力分布を比べてみると、壁面近傍の瞬間的な圧力変動波形は、剝離泡から流出する渦構造に対応しており、圧力は渦構造の下方で低く、渦と渦の間で高くなっていることがわかる。さらに、Fig.1下側の乱れ速度ベクトル分布と比較すると、壁面近傍の圧力は時計回りの渦巻の下方で低く、反時計回りの渦巻の下方では高くなっている。このような結果は、Kiyaら¹⁰⁾が壁面圧力変動を参照信号とした条件付平均により得ている乱れ速度分布に一致している。大規模渦構造の上側水面に向かっては圧力が高くなっている。

Fig.2の下側の図は流れに対して横断方向の渦度(ω_y)の分布を示したものである。Fig.1の乱れ速度ベクトル分布と比べると、時計回りの渦巻の中心では渦度が大きくなっているのに対し、反時計回りの渦巻の中心には大きな渦度のピークは存在せず、Kiyaら⁷⁾が指摘しているように、反時計回りの渦巻は、時計回りの渦によって誘起された流れであり、渦とは見做せない。

平均再付着位置($x/H_s=8.1$)と再付着領域下流($x/H_s=14.0$)における瞬間レイノルズ応力分布の経時変化をFig.3に示す。大きなレイノルズ応力が間歇的に発生していることがFig.3からわかる。Fig.1の乱れ速度ベクトル分布と比較すると、これらの大きな瞬間レイノルズ応力は剝離剪断層中の大規模渦によって発生しており、Kiyaら⁷⁾も指摘しているように、再付着領域におけるレイノルズ応力の主要部分が、剝離剪断層中の大規模渦によって生み出されていると考えられる。再付着領域下流部においても再付着領域と同様、レイノルズ応力の発生は間歇的であるが、ピークの位置はより上方にある。

4. 剝離泡の長周期変動

厚板前縁剝離流においては、大規模渦の運動による非定常性のほかに、これよりもかなり周波数の低い剝離泡全体にわたる大規模な非定常性が存在することが、剝離線のすぐ下流における壁面圧力変動のスペクトルの測定から知られている

^{10), 11)}。そこで、壁面近傍($y/H_s=0.1$)における主流方向流速の時空間分布を時間方向に移動平均して、瞬間再付着位置の低周波変動を示したものがFig.4(a)である。太い実線で示したのが瞬間再付着位置で、破線が負、実線が正の等値線を表している。移動平均の平均時間は0.632秒である。Fig.4(a)から、低周波の大

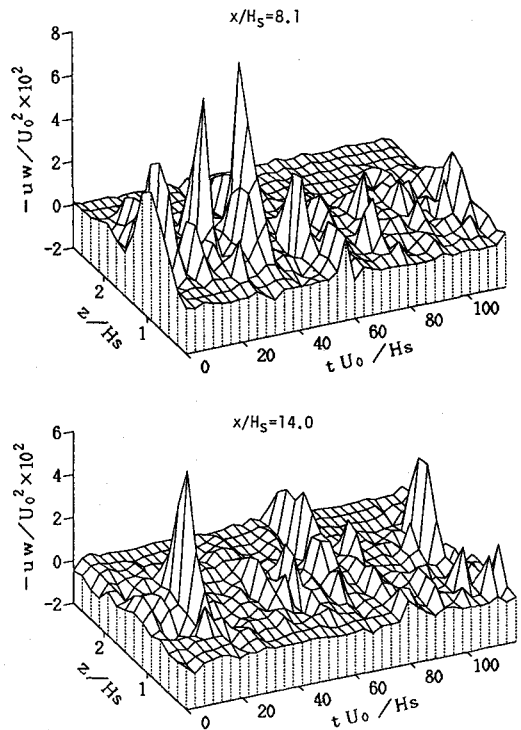


Fig.3 Space-time distribution of instantaneous Reynolds shear stress at stream-wise section $x/H_s=8.1, 14.0$.

きな剝離泡の伸縮起きていることがわかる。

このような大規模変動が生じる機構はまだよくわかっていないが、剝離剪断層の横渦の三次元化を促進することにより平均再付着距離が短くなる¹²⁾ことから、剝離剪断層の横渦構造の三次元化の程度が変化するために、剝離泡の大規模な伸縮が生ずると考えられる。横渦が三次元的に変形すると、流れに対して横断方向の渦度成分は減少するであろう。流れに対して横断方向の渦度の絶対値の断面平均値 ($|\overline{\omega_y}|$) の経時変化を示したFig.4(b)を見ると、Fig.4(a)に示した瞬間再付着位置の低周波変動と渦度のピーク値の経時変化との間に相関のあることがわかる。すなわち、渦度が大きくなると剝離泡は伸び、渦度が小さくなると剝離泡は縮んでいる。剝離泡が伸びる速度に比較して縮む速度はかなり大きい。ここには示さないが、再付着領域の下流部 ($x=45.6\sim 68.0\text{cm}$) における断面平均渦度の経時変化にもFig.4(b)と同様の低周波変動がみられるが、再付着距離が短い時の方が渦度が大きく、Fig.4(b)とは逆の傾向がみられた。

5. 水平断面内の流れ場の構造

Fig.5に、水平断面内 ($x=1.6\sim 16.0\text{cm}$, $y=-11.6\sim 11.6\text{cm}$, $z=5.0\text{cm}$) における瞬間主流方向流速と鉛直方向渦度の分布を示す。Fig.5からわかるように、低速領域が正の渦度と負の渦度のピーク間に存在し、段落ち直後から剝離剪断層がヘアピン渦のような三次元的な渦構造をしていることがわかる。低速領域の横方向間隔は段落ち高さの1~2倍程度である。

Fig.7は剝離泡が伸びている時 ($t U_0 / Hs = 21.7$) と縮んでいる時 ($t U_0 / Hs = 86.8$) における圧力分布を示したものである。圧力分布は比較的二次元性が強く、Fig.5の主流速度分布とくらべると、高圧部に対応して低速領域が横方向に並んで存在することがわかる。剝離泡が縮んでいる時は圧力変動は小さくなっている。

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り、開水路段落ち下流部の瞬間的な速度場を連続して測定し、その非定常乱流特性を検討した。得られた結果を要約すると以下のようである。

- (1) 再付着領域における大規模渦構造の移流速度は $0.4 U_0 \sim 0.7 U_0$ の大きさで、厚板前縁剝離流において観測されている値にほぼ等しい。
- (2) 壁面近傍の圧力変動波形は、剝離泡から流出する大きな渦構造に対応しており、圧力は渦構造の下方で低く、渦と渦の間で高くなる。
- (3) 再付着領域においては、大きな瞬間レイノルズ応力が間歇的に発生する。これらの大きな瞬間レイノルズ応力は剝離剪断層中の大規模渦によって発生しており、レイノルズ応力の主要部分がこの大規模渦によって生み出されていると考えられる。
- (4) 瞬間再付着位置の低周波変動と剝離泡における剝離剪断層の渦度(流れに対して横断方向)の変動との

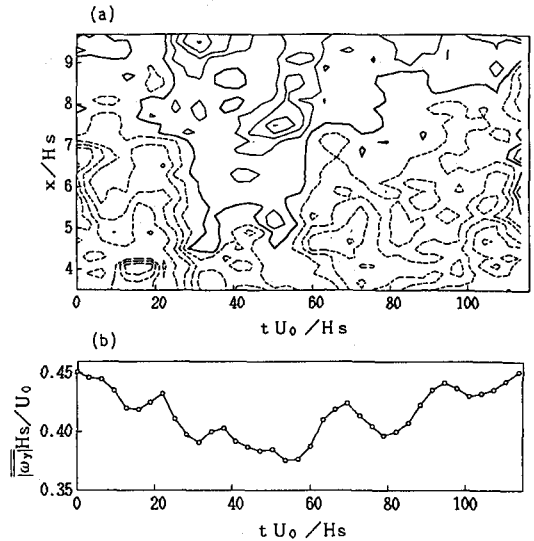


Fig.4 (a) Space-time distribution of contour lines of instantaneous longitudinal velocity close to the channel bed.

(b) Temporal variation of spanwise vorticity.

間には相関があり、渦度が大きくなると剝離泡は伸び、渦度が小さくなると剝離泡は縮む。

(5) 剝離剪断層は剝離直後からヘアピン渦のような三次元的な渦構造をしているが、水平面内の圧力分布は二次元的であり、高圧部に対応して、大規模渦が横方向に直線的に連なっていると考えられる。

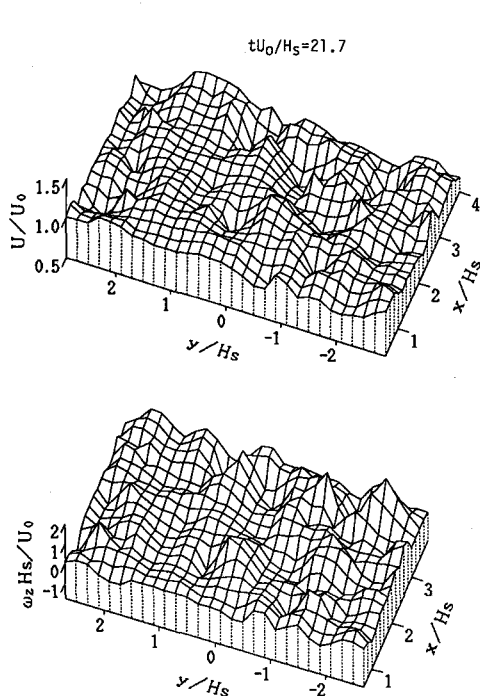


Fig.5 Instantaneous distribution in horizontal cross-section of longitudinal velocity and vertical vorticity.

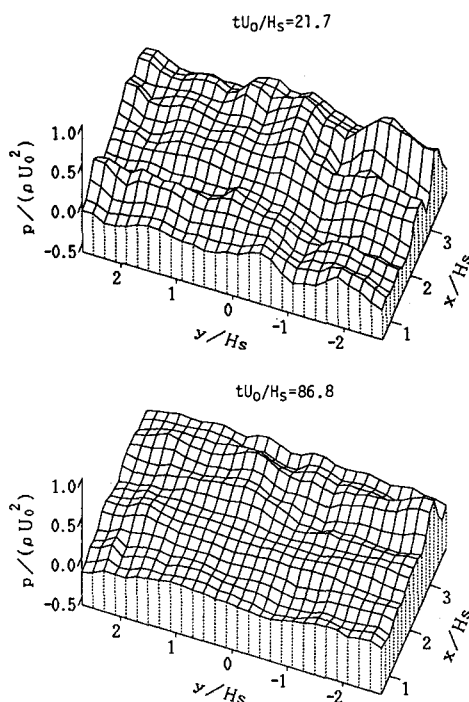


Fig.6 Instantaneous distribution in horizontal cross-section of pressure.

参 考 文 献

- 1) Matthes, G.H.: Macroturbulence in natural stream flow, Trans., A.G.U., Vol.28, No.2, pp.255-265, 1947.
- 2) Jackson, R.G.: Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, J. Fluid Mech., Vol.77, pp.531-560, 1976.
- 3) 上野鉄雄, 宇民正: 砂漣と砂堆の発達過程に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第318号, pp.75-84, 1982.
- 4) Eaton, J.K. and Johnston, J.P.: A review of research on subsonic turbulent flow reattachment, AIAA Journal, Vol.19, No.9, pp.1093-1100, 1981
- 5) 木谷勝: はく離・再付着流れの乱流構造, 日本機械学会論文集(B編), Vol.55, No.511, pp.559-564, 1989.
- 6) 有江幹男, 木谷勝: 剝離流れ, 流体力学の進歩 境界層, 丸善, pp.139-195, 1984.
- 7) Kiya, M., Sasaki, K.: Structure of large-scale vortices and unsteady reverse flow in the

- reattaching zone of a turbulent separation bubble., J. Fluid Mech., Vol. 154, pp. 463-491, 1985.
- 8) 近江和生: 二次元速度場の流跡写真の画像処理, 流れの可視化, Vol. 6, No. 20, pp. 19-27, 1986.
 - 9) 小林敏雄ほか: ステップをもつチャンネル内乱流のビジュアルシミュレーション, 流れの可視化, Vol. 5, No. 18, pp. 275-278, 1985.
 - 10) Kiya, M., Sasaki, K.: Structure of a turbulent separation bubble., J. Fluid Mech., Vol. 137, pp. 83-113, 1983.
 - 11) Cherry, N. J., Hillier, R. and Latour, M. E. M.: Unsteady measurements in a separated and reattaching flow, J. Fluid Mech., Vol. 144, pp. 13-46, 1984.
 - 12) Gai, S. L. and Sharma, S. D.: Subsonic turbulent flow over a rearward facing segmented step, Phys. Fluids, Vol. 27, No. 3, pp. 544-546, 1984.