

開水路床上の半球後流における3次元渦構造

Three-Dimensional Vortical Structures in the Wake behind a Hemisphere on Open Channel Bed

川西 澄*・余越 正一郎**

By Kiyosi KAWANISI and Shōitirō YOKOSI

Instantaneous three-dimensional velocity fields in the wake of a hemisphere located on an open channel bed are obtained by using flow visualization in multi-sections and Mass-Consistent model. The instantaneous pictures of the coherent structure are taken at short time interval and their behaviors are investigated at high Reynolds number. The secondary hairpin vortex has been generated on the upstream side of the large hairpin vortex and coalesced into the large hairpin. The streamwise distances between hairpin vortices are irregular. The three-dimensional distributions of the instantaneous Reynolds stress and pressure are also shown.

Keywords : Wake, Hemisphere, Coherent structure, Three dimensional, Flow visualization, Open channel

1. まえがき

半球後流は、3次元物体による後流の例として従来から詳細に研究されており¹⁻³⁾、最近では半球によって発生する組織渦を浮遊砂輸送促進に利用しようという研究もある⁴⁾。Acarlar & Smith¹⁾は層流境界層中に置かれた半球によって形成されるヘアピン渦を可視化、追跡し、その挙動を詳細に調べているが、その中で、半球によって形成されるヘアピン渦と乱流境界層における組織構造とが酷似していることを指摘している。従来、低レイノルズ数の流れにおける組織構造は、トレーサの秩序的な運動から研究されてきたが、蒔田ら⁵⁾が指摘しているように、渦として秩序構造を把握するためには、3方向すべての渦度成分を求めてその3次元空間分布を調べる必要がある。また高レイノルズ数流れでは、トレーサの秩序的な運動から流れの組織構造を可視化、研究することは困難であり、組織構造はもっぱら条件付き抽出法を用いたアンサンブル平均像によってとらえられている。しかしながら、こうしたアンサンブル平均像が組織乱流の瞬間像の特徴をどれだけ反映しているのかは不明である。

* 正会員 工博 広島大学助手 工学部四類（建設系）
（〒724 東広島市鏡山1-4-1）

** 正会員 工博 広島大学教授 工学部四類（建設系）
（〒724 東広島市鏡山1-4-1）

本研究は、複数断面可視化法と Sherman⁶⁾ が 3 次元風速場の計算に用いた Mass-Consistent モデルを使って、開水路床の上に置かれた半球後流内における 3 次元瞬時速度場の連続的な測定を試み、組織渦の瞬間的な 3 次元像を可視化、追跡し、その挙動を調べるとともに、瞬時レイノルズ応力と瞬時圧力の 3 次元空間分布を求め、それらと組織渦との対応関係を検討したものである。

2. 実験装置および方法

水路上流端から 15 m 下流のスパン中央部の開水路床上に半球 (半径 $R = 53 \text{ mm}$) を設置し、その後流内の瞬時速度場をポリスチレン粒子 (粒径約 0.5 mm) の流跡から連続的に測定した。ポリスチレン粒子は水に分散させた状態で、半球上流 2 m の位置に複数の管 (内径 3 mm) を通して注入した。使用した水路は長さ 30 m 、幅 800 mm 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。

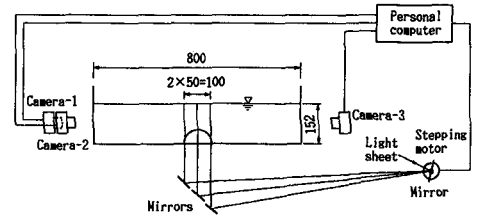


図-1 実験装置

図-1 (end view) に示すように、後流内の 3 つの縦断面をステッピング・モーターに取りつけた鏡で切り替えながら、3 台のモータードライブ付きカメラで連続撮影した。スリット光の厚みは $5 \sim 7 \text{ mm}$ である。カメラのシャッターの開閉とステッピング・モーターの回転はパーソナル・コンピュータで制御した。ステッピング・モーターの単位ステップ角度は 0.36° 、駆動パルス速度は 1.2 kpps であり、断面切り替えには 5 パルスを要した。撮影は、図-1 の左から右に向かって (断面-1, 2, 3) 行ない、断面-3 の撮影が終わると再び断面-1 から撮影を繰り返した。測定縦断面の横方向間隔は 50 mm 、隣接した断面間の撮影時間間隔は回転鏡 (シャッター開放時は静止) の振動の減衰時間を考慮し 80 ms とした。

座標系は半球中心の水路底面を原点とし、水路床に沿って流下方向を x 、水路横断方向を y 、水路床に垂直上向きを z とした (右手系)。流速は x, y, z 方向の成分をそれぞれ、 U, V, W とした。各カメラの露光時間は 29 ms 、撮影時間間隔は 238 ms である。測定縦断面の流れ方向範囲は $x/R = 5.6 \sim 11.6$ であり、これは Acarlar & Smith¹⁾ の言う 'growth region' に相当している。各断面とも 37 枚連続撮影し、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 27 l/s 、水路勾配 $1/1000$ 、水深 H は 152 mm 、断面平均流速 U_m は 22.2 cm/s で、等流状態である。半球の半径 R と断面平均流速 U_m を代表長さとして代表速度に選んだレイノルズ数 $Re = U_m R / \nu$ は 1.18×10^4 、フルード数 $Fr = U_m / \sqrt{gH}$ は 0.18 である。

3. データ処理

流跡処理の結果得られた流速 (U, W) を、3 次元格子点上の値に補間するために、まず各測定縦断面 ($x-z$) 内において、 10.6 mm ($R/5$) 間隔で補間した。3 つの測定断面は、同時刻のものではないが、断面間の時間差は短いので Taylor の凍結仮説を適用しても問題はないと考え、断面-2 に対して 16 mm だけ、断面-1 は上流側を、断面-3 は下流側を補間した。補間方法は、補間格子点に最も近い流速値を各象限から 1 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。次に、横断面 ($y-z$) 内データに Akima の方法⁷⁾ を適用し、 y 方向に 10 mm 間隔で内外挿補間を行ない、3 次元格子点上の補間値を得た。流跡から直接求められるのは流速の 2 成分 (U, W) のみであるから、何らかの方法で残りの流速成分 (V) を求めなければならない。本論文では、以下に述べる Mass-Consistent モデルを使って、3 次元格子点における (U, W) からスパン方向成分 (V) を求めた。

Mass-Consistent モデルは Sasaki⁸⁾ によって提案され、Sherman⁶⁾ によって 3 次元風速場の計算に用いられた方法で、連続性を拘束条件とする変分モデルである。3 次元格子点上で得られた流速補間値を $U_0 =$

(U_0, V_0, W_0) とすると、連続式を満足するように、速度ベクトル U_0 を修正する。その際、速度の修正量の体積積分

$$\int_V [\alpha_1^2(U - U_0)^2 + \alpha_2^2(V - V_0)^2 + \alpha_3^2(W - W_0)^2] dV \quad (1)$$

を最小とするような速度場 $U = (U, V, W)$ を求める。ここで、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は修正量に対する重み係数である。ラグランジュ乗数 λ を導入すると、以下のオイラー・ラグランジュ方程式

$$U = U_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (2)$$

$$V = V_0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \quad (3)$$

$$W = W_0 + \frac{1}{2\alpha_3^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

が得られる。境界条件は、 $\lambda = 0$ と $\partial\lambda/\partial n = 0$ の場合が可能である。 $\lambda = 0$ の場合、境界面に垂直な修正は許されるが、面に平行な修正は許されない。逆に $\partial\lambda/\partial n = 0$ の場合、境界面に平行な修正は許されるが、面に垂直な修正は許されない。本実験では、横方向の流速成分は測定されていないので、 $V_0 = 0$ として計算を行なった。重み係数の比は経験的に決めるしかないが、補間値 (U_0, W_0) の精度に関係している。本実験では乱れ速度成分間の比が不自然にならないように重み係数を決めることとし、試行錯誤の結果、計算領域内における V の rms 値が U, W の修正量の rms 値の 4 倍になるように重み係数の比を決めた ($\alpha_1/\alpha_2 = \alpha_3/\alpha_2 = 2.12 \sim 2.64$)。 (2), (3), (4) 式からわかるように、修正量はポテンシャルから求められるので、 $\alpha_1 = \alpha_3$ とすることにより、スパン方向の渦度成分は保存される。境界条件は、上, 下面で $\partial\lambda/\partial n = 0$, その他では $\lambda = 0$ とおいた。

4. 実験結果および考察

4・1 組織渦の3次元構造

組織渦の3次元像を可視化するために、渦度ベクトル $\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ を計算した。速度の空間微分は格子点データに3次スプライン曲線を当てはめて求めた。図-2 はその3次元空間分布を示したものである。ただし、図-2 は撮影開始からの経過時間 $tU_m/R = 25.7 \sim 28.7$ における一連の分布で、大きな渦度ベクトルのみを示してある。渦度ベクトルによって可視化された組織渦は、低レイノルズ数の流れにおいて、染料や水素気泡によって可視化されているヘアピン型のものとよく似ている。ここで注目されるのは、水深規模の大規模なヘアピン渦がその脚部に2次ヘアピン渦をともなっていることである(上流側の2次ヘアピン渦脚部にさらに小規模なヘアピン渦が存在している)。Acarlar & Smith¹⁾ は層流境界層中に置かれた半球の後流を可視化し、半球により発生するヘアピン渦の脚部に2次的なヘアピン渦が発生することを示しており、また Kim⁹⁾ による数値シミュレーションの結果にはヘアピン渦の脚部に挟まれた領域にスパン方向の渦度成分が生成されることが示されている。図-2 から、ヘアピン渦頭部の傾斜は脚部に比べて急になっており、上流側にそり返ったようになっている様子がわかる。流下するに従って、2つのヘアピン渦頭

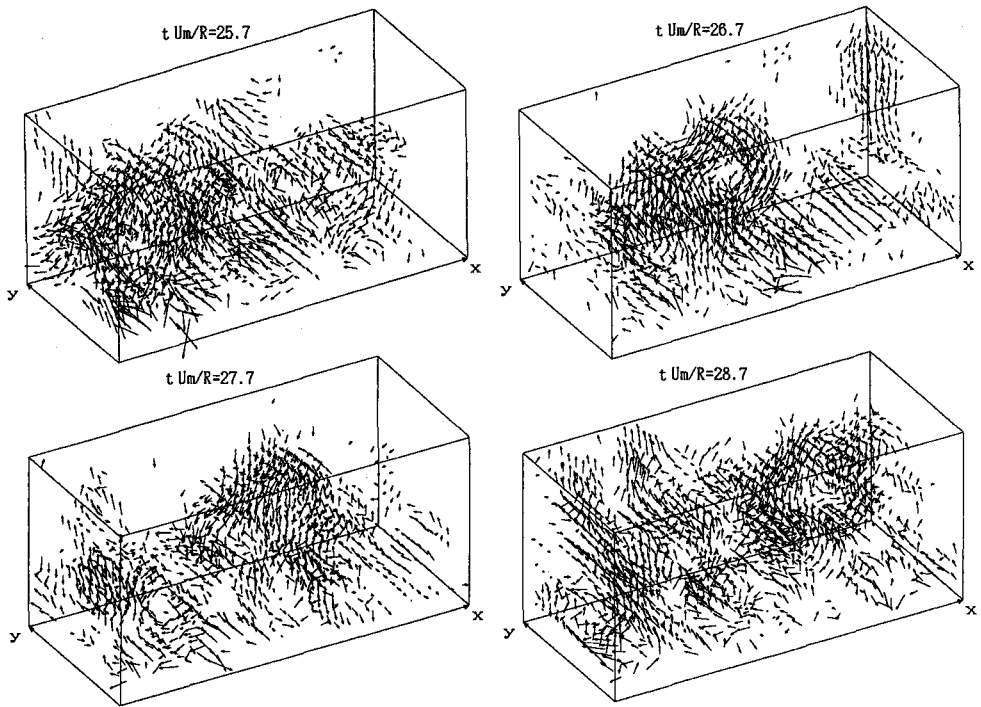


図-2 渦度ベクトルの3次元空間分布

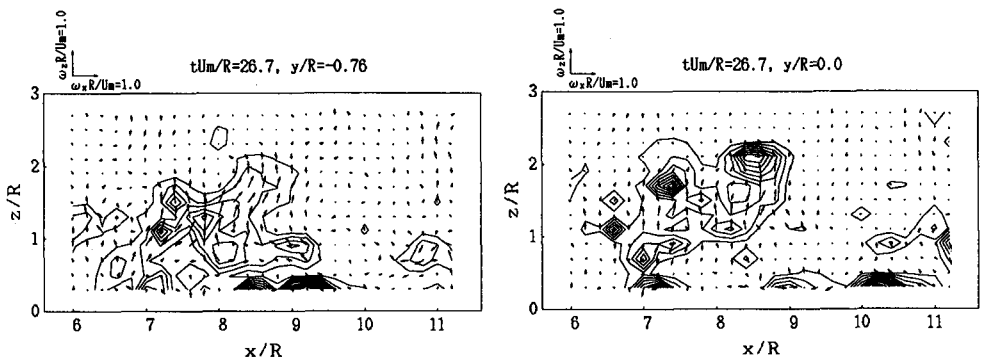


図-3 渦度分布のside view

部は互いに区別できなくなり、2次的なヘアピン渦が大きなヘアピン渦に吸収されるように合体しているのが観察できる。

図-3に $tU_m/R = 26.7$ における渦度ベクトル分布のside viewを示す。各図にはエンストロフィー ($\bar{\omega}^2/2$) のコンターもあわせて表示されている。図-3の左側に示されているside viewは、ヘアピン渦脚部の位置 ($y/R = -0.76$) における縦断面内の渦度ベクトル (ω_x, ω_z) 分布を示したもので、この図から分かるように、ヘアピン渦頭部の傾斜はほとんど鉛直であり、渦の最上部 (tip) は渦頭部よりやや上流側にある。また、Acarlar & Smith¹⁾ により可視化されているような渦脚部が流れ方向に長く伸びている様子は確認できない。図-3の右側に示されているside viewは、ヘアピン渦のスパン中央部の位置 ($y/R = 0.0$) におけるもの

であり、ヘアピン渦頭部の位置がエンストロフィーの分布から確認できる。流れ方向に並んでいる3つの渦頭部に対応して、上流側から、 $x/R = 6.6, z/R = 1.1$; $x/R = 7.4, z/R = 1.7$; $x/R = 8.6, z/R = 2.1$ の位置に極大値が見られる。渦頭部の下方($x/R = 7.0, z/R = 0.7$; $x/R = 8.2, z/R = 1.1$)にもエンストロフィーの極大値が見られるが、これらはヘアピン渦によって誘起された2次的な渦度であり、ヘアピン渦頭部とは反対のスパン方向渦度成分を持っている。

4・2 瞬時レイノルズ応力と瞬時圧力の3次元空間分布

2つの時間($tU_m/R = 26.7, 27.7$)における瞬時レイノルズ応力の3次元空間分布を図-4に示す。図-4には大きなレイノルズ応力のみが示してあり、円の直径が応力の大きさに比例している。 $tU_m/R = 26.7$ では2つの大規模なヘアピン渦に対応して、渦の内側の領域に大きなレイノルズ応力が発生しているのがわかる。 $tU_m/R = 27.7$ のレイノルズ応力分布にも2つのピークがみられ、あたかも $tU_m/R = 26.7$ の2つのピークに対応しているように見える。しかしながら、上流側の大きなレイノルズ応力は $tU_m/R = 26.7$ とは異なるヘアピン渦によって引き起こされている。すなわち、上流側のピークは渦頭部が合体している2つの大きなヘアピン渦のうち、上流側の渦の脚部に発生している2次ヘアピンによるものである。測定領域の上流部上方には負のレイノルズ応力がみられるが、これは低速下降流によるものであり、ヘアピン渦による低速上昇流が水面で反射した結果と考えられる。図-5は $tU_m/R = 27.7$ におけるejectionとsweepの3次元空間分布を示したものである。ヘアピン渦の内側にejection(●)がみられるとともに、渦の外縁にはsweep(o)が発生しているのがわかる。sweepによるレイノルズ応力はejectionによるものに比べて弱い。ヘアピン渦の上流側にはsweepは存在せず、ejectionとsweepが流れ方向に継続して発生するようにはみえない。

重力項を除いた3次元非定常Navier-Stokes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瞬時圧力を求めた。速度の微分積分は3次スプライン補間曲線を使って行ない、複数の空間積分路の値を平均したものを積分値とした。結果の一例を図-6に示す。図-6は図-4と同じ時間における瞬時圧力の3次元空間分布を示したものである。ただし、格子領域の中央部を0とした相対分布である。瞬時レイノルズ応力の3次元空間分布と同様、円の直径が圧力の絶対値に比例している。図-6および図-2の渦度ベクトル分布から、ヘアピン渦の存在している領域が周囲より低圧(o)になっていることがわかる。

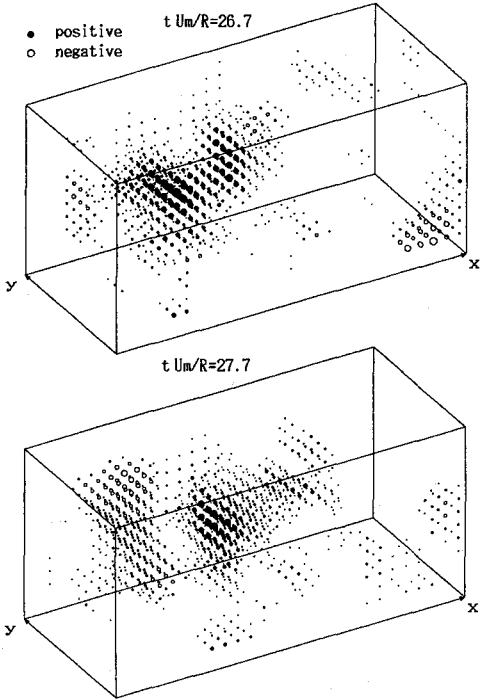


図-4 瞬時レイノルズ応力の3次元空間分布

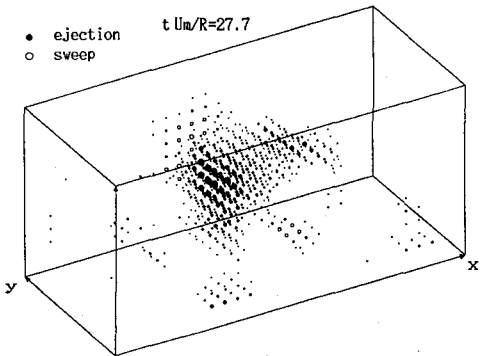


図-5 ejectionとsweepの3次元空間分布

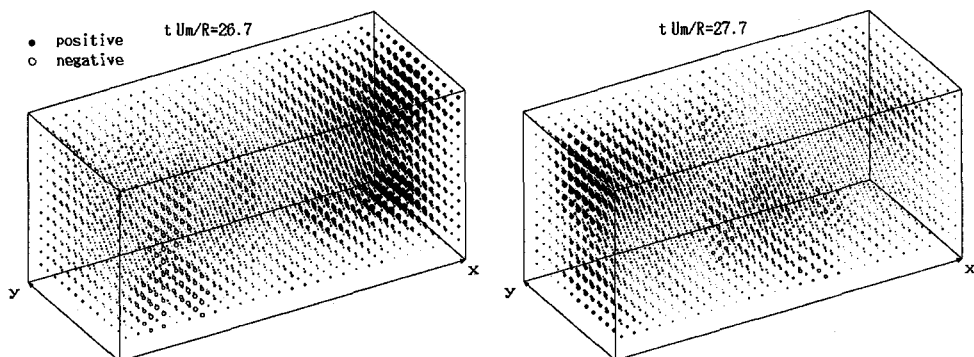


図-6 瞬時圧力の3次元空間分布

5. むすび

本研究では、複数断面可視化法と Mass-Consistent モデル (変分モデル) を用いて、開水路床上に置かれた半球後流の3次元瞬時速度場の連続測定を試みた。測定した瞬時流速から、渦度ベクトルの3次元空間分布を計算し、組織乱流の3次元構造を可視化、追跡するとともに、瞬時レイノルズ応力と瞬時圧力分布を計算した結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 水深規模の大きなヘアピン渦は、その脚部に2次的なヘアピン渦をともなっている。それらの渦どうしはかなり接近しており、流下するにしたがって、合体するのが観察される。
- (2) 渦度ベクトルにより可視化された組織構造の瞬間像は、従来、低レイノルズ数流場で観察されてるようなヘアピン型の渦であるが、渦脚部が流れ方向に長く伸びている様子は確認できない。また、ヘアピン渦の流れ方向間隔は不規則である。
- (3) ヘアピン渦の内側には強い ejection による大きなレイノルズ応力が発生している。一方、渦の外縁には sweep によるレイノルズ応力が発生しているが、ejection によるものに比べると弱い。また、ejection と sweep が流れ方向に継続して発生するようにはみえない。
- (4) ヘアピン渦が存在している領域は、周囲に比べて圧力が低くなっている。

参考文献

- 1) Acarlar, M.S., and Smith, C.R. : A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Part 1. Hairpin vortices generated by a hemisphere protuberance, J. Fluid Mech. , Vol. 175, pp. 1-41, 1987.
- 2) 高橋迪夫 : 水路床上に存在する半球下流部の流れの構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 417 号/II-13, pp. 73-82, 1990.
- 3) Tamai, N., Asaeda, T., and Tanaka, N. : Vortex structures around a hemispheric hump, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 39, pp. 301-314, 1987.
- 4) 田中則夫・金子哲也 : 物体周りの組織渦を利用した浮遊砂の促進について, 水工学論文集, 35 巻, pp. 365-370, 1991.
- 5) 蒔田秀治・佐々木司 : 乱流境界層中の大規模馬蹄形渦, 日本機械学会論文集 (B), 57 巻 533 号, pp. 30-37, 1991.
- 6) Sharman, C.A. : A mass-consistent Model for wind fields over complex terrain, J. Appl. Meteor., Vol. 17, pp. 241-253, 1978.
- 7) Akima, H. : A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 4, pp. 148-159, 1978.
- 8) Sasaki, Y. : An objective analysis based on the variational method, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 36, pp. 77-88, 1958.
- 9) Kim, J. : Evolution of a vortical structure associated with the bursting event in a channel flow, Turbulent Shear Flows 5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 221-233, 1987.