

半球後流内組織渦の挙動

広島大学工学部 正会員 ○川西 澄
 広島大学工学部 正会員 余越 正一郎

1. はじめに

乱流境界層における組織構造であるヘアピン渦が可視化法により観察されて以来、その特性についての数多くの研究がなされている。自然状態での乱流境界層中の組織構造の発生位置や発達過程、その規模などはランダムであるため、条件付き平均により求められた組織構造がその瞬間像をどの程度反映しているか疑問である。また、水素気泡や染料を用いた可視化法は定量的なデータを得ることは一般に困難であり、高 Reynolds 数流れには適用できない。最近、平板上に半球を置いたり、平板から微小噴流を瞬間的に噴出させることにより人工的にヘアピン渦を発生させ、その特性を詳細に調べる研究がなされている¹⁻³⁾。薛田ら³⁾は互いに逆方向に回転する一対の微小噴流を用いてヘアピン渦を誘起し、渦の成長、減衰過程の追跡を試みている。本研究は、高 Reynolds 数の半球後流内における組織渦の挙動を、複断面可視化法と Mass-Consistent モデルを使って調べたものである。

2. 実験と解析方法⁴⁾

長さ 30 m, 幅 0.8 m の可変勾配水路の中央部に半径 $R = 53$ mm の半球を設置し、半球後流内の 3 つの縦断面を短い時間間隔 (80 ms) で連続的に可視化、撮影した。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。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。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。トレーサにはポリスチレン粒子 (粒径約 0.5 mm) を使用し、その流跡を 3 台のモータードライブ付きカメラで撮影した。各カメラの露光時間は 29 ms, 撮影時間間隔は 238 ms で、測定縦断面の流れ方向範囲は $x/R = 5.6-11.6$ である。流跡処理の結果得られた 3 つの縦断面内における流速 2 成分から残りの流速成分であるスパン方向流速を求めるため、Mass-Consistent モデルを使用した。Mass-Consistent モデルは Sherman⁵⁾ が 3 次元風速場の計算に用いたもので、(1) 式の連続式を拘束条件として、(2) 式で表されるように速度の修正量を最小とする条件付き変分モデルである。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

ここに、 V は解析領域、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は重み係数、 U_0, V_0 は補間値である。 V_0 は測定していないので 0 とした。

3. 結果

経過時間 $tU_m/R = 18.9$ と 26.9 における渦度ベクトルの瞬時 3 次元分布を図 1 に示す。ただし、見やすくするために大きなベクトルのみ示してある。解析領域は $x/R = 6.0-11.2, y/R = -1.13-1.13, z/R = 0.3-2.7$ である。図 1 から、大規模なヘアピン渦の脚部に 2 次ヘアピンが発生しているのがわかる。このような 2 次ヘアピンの発生は層流境界層に半球を置いた Acarlar¹⁾ の可視化実験でも観察されている。一般の乱流境界層においても、強いヘアピン渦の上流側に 2 次ヘアピンが誘起されることが示唆されている⁶⁾。このようなヘアピン渦自身によるヘアピン渦の生成が burst における multiple ejections⁷⁾ の原因と考えられる。 $tU_m/R = 26.9$ における渦度ベクトルの side, end view を図 2 に示す。渦脚位置における side view (図 2 (a), (b)) をみると、渦上部のほうが下部より傾斜が急でほとんど鉛直になっている様子がわかる。図 2 (c), (d) は secondary と primary ヘアピン渦頭部の end view を示したものである。渦度ベクトルは上部だけでなく下部も繋った環状の分布を示している。薛田ら³⁾ も指摘しているように、下部にある負のスパン方向渦度を持つベクトルは、ヘアピン渦頭部により誘起された二次的な構造に対応している。

ヘアピン渦により誘起された速度場を図 3 に示す。図 3 (a), (b) はスパン中央部とヘアピン渦の外縁における side view を示したもので、図 3 (a) には低速上昇流がみられるとともに、渦頭部と水路床の間に 2 次構造に対応した反時計回りの渦巻きが存在しているのがわかる。一方、図 3 (b) には sweep に対応した高速下降流が生じているのがわかる。図 3 (c) は secondary ヘアピン渦頭部のすぐ上流側における end view を示したもので、渦脚部による互いに反対方向に回転する 2 つの渦巻きが存在し、その間に上昇流が発生している。 $z/R = 1.3$ の高さにおける top view を示したものが図 3 (d) で、secondary, primary ヘアピン渦脚部に対応した互いに逆方向に回転する渦巻きがはっきりととらえられている。

参考文献

- 1) Acarlar, M.S., and Smith, C.R., J. Fluid Mech., **175**, 1-41, 1987. 2) Acarlar, M.S., and Smith, C.R., J. Fluid Mech., **175**, 43-83, 1987. 3) 薛田秀治・佐々木司, 日本機械学会論文集 (B), **57**, 533 号, 30 37, 1991. 4) 川西 澄・余越 正一郎, 水工学論文集, **36**. 5) Sherman, C.A., J. Appl. Meteor., **17**, 241-253, 1978. 6) Bogard, D. G., and Tiederman, W. G., J. Fluid Mech. **162**, 389-413, 1986. 7) Tardu, S., and Binder, G., Recent Developments in Turbulence Management, Kluwer Academic Publishers Netherlands, 147-160, 1991.

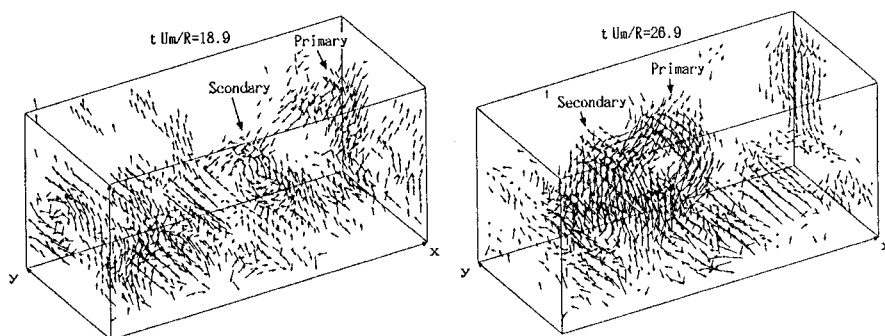


図1 渦度ベクトルの瞬時3次元分布

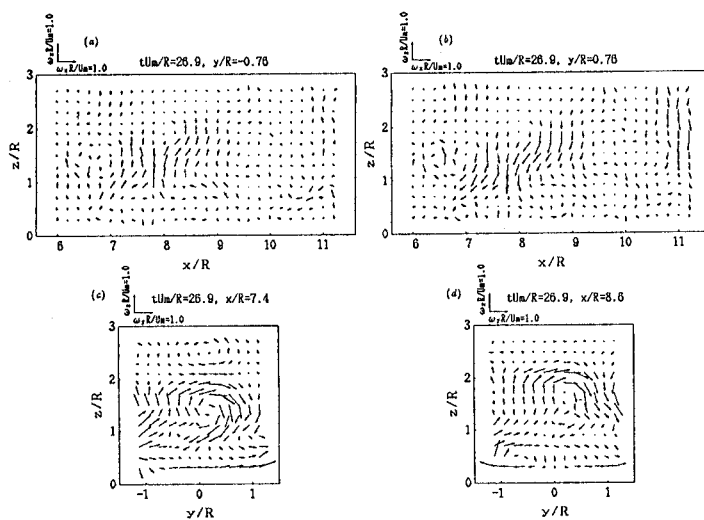


図2 渦度ベクトルのside, end view

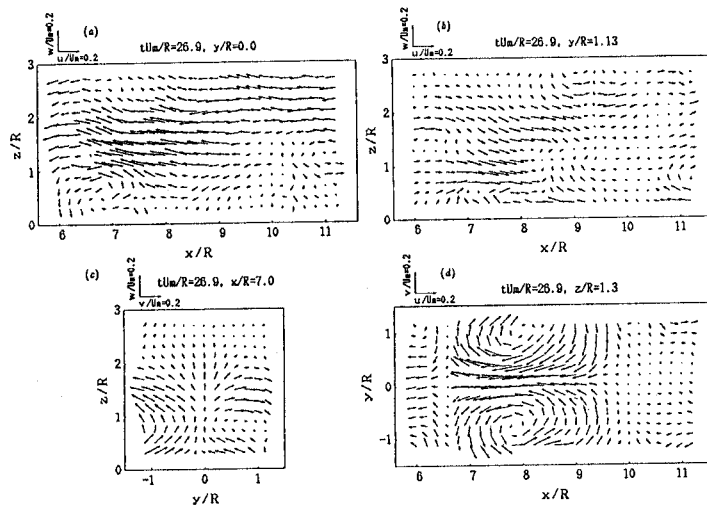


図3 乱れ速度ベクトルのside, end, top view