円管内噴流の流れの安定性に関する研究 (流れ状態の計測)

Study on the Stability of Jet Flows in a Circular Pipe (Detection Method of the Flow State)

○正 井 上 吉 弘 (岐阜大)

北 野 裕 大 (岐阜大院)

正 佐 々 木 実 (岐阜大)

Yoshihiro INOUE, Dept. Mechanical and Systems Eng., Gifu Univ., 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193

Yudai KITANO, Graduate School of Eng., Gifu Univ.

Minoru SASAKI, Dept. Human & Information Systems Eng., Gifu Univ.

Key Words : Jet, Flow Stability, Transition, Hot-Wire Sensor, Flow Visualization

1. まえがき

本研究は円管内に噴出される噴流の安定性に関するものであり、最終目標をこの流れの制御においている。例えば円管内噴流を生ぜしめる油空圧機器内の絞り、アクチュエータを定圧動作させる場合の補償要素として重要な役割を担っている⁽¹⁾。この流れの安定性は、低振動性を要求される精密機器の場合、特に注意すべき設計要件となるが、従来では流れの乱流化への配慮がおもになされているのみである⁽²⁾。噴流が周囲流体をエントレインメントすることはよく知られており、円管内噴流のように周囲が拘束された条件下では、乱流遷移するより低いレイノルズ数で不安定な流れ挙動が出現する。

以上の観点より、本研究では、低レイノルズ数で使用される油圧機器補償用絞りを前提として条件を設定し、実験を行う。絞り形式として、毛細管式とオリフィス式がおもに利用されているが、ここでは絞り出口速度分布形状が素直な場合を取り扱うこととして、円弧ノズル式を採用した。実験レイノルズ数範囲は $Re_j = 500 \sim 1300$ とし、まず流れの可視化観察によって流れ状態を把握する。次に、将来の制御入力としての利用を想定し、円管断面直径方向に張り渡した熱線を用いた予備実験結果を示す。

2. 実験装置と実験方法

図1に流れ場の概略を示す。噴出孔径 $d = 6 \text{ mm}$ の円弧ノズル板 ($R 2 \text{ mm}$, $t 3 \text{ mm}$) を挟み、整流管 (内径 20 mm) と測定用円管 (内径 $D = 38 \text{ mm}$, 長さ $L = 270 \text{ mm}$) が接続されている。直径比は $D/d = 6.3$ であり、ノズルと円管は同心である。作動流体の水は、オーバーヘッドタンクから流量計および流量制御用ニードルバルブを通り、整流管へと導かれる。測定用円管の出口端は容量大なるタンクに開放され、タンクからポンプを用いて水を循環させている。座標系は、ノズル出口の中心を座標原点として、流れ方向に x 軸、横断面方向に y 軸と z 軸をとる。噴流噴出速度を U_j で表し、流れのレイノルズ数を $Re_j = U_j d / \nu$ で定義する。

流れの可視化観察では、フルオレセインを用いた蛍光染料法を採用し、噴流の噴出開始時刻から十分な時間を経た後に、オーバーヘッドタンクから染料を注入した。照明装

Fig. 1 Flow field and coordinate system.

置には水冷 Ar-ion レーザ (2017-04S, 出力 2 W) に光ファイバー式シート光学系を取り付けて用い、可視化像の撮影には、流れ状態の時間履歴を記録するためハイスピードビデオカメラ (Photron社製, FASTCAM SA3) を用いた。

流れの状態量の計測には熱線法を用いた。熱線には直径 $20 \mu\text{m}$ のタングステン線に樹脂コーティングを施したものを、測定用円管の直径方向 38 mm にわたって設置する。熱線の動作温度が約 60°C となるように直流電気回路を調整し、電流 $\tilde{i}$ を測定した。ここで上付きの $\sim$ は瞬時値を表す。長い熱線の取り扱いに関しては森下⁽³⁾を参考にした。熱線軸が y 軸と一致しているとして、熱線からの強制対流熱伝達係数 $\bar{h}$ は y の関数となり、全電気抵抗 R_w は y 方向への積分値となる。局所的な熱平衡の方程式は次式となる。

$$\frac{d^2 \tilde{\theta}}{dy^2} + \frac{1}{\pi d_w^2 k_w / 4} \left(\frac{\tilde{i}^2 R_f}{D} \alpha - \pi d_w \tilde{h} \right) \tilde{\theta} = -\frac{1}{\pi d_w^2 k_w / 4} \frac{\tilde{i}^2 R_f}{D} \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{\theta}$ は局所の瞬時温度差であり、周囲温度 θ_f からの増分とした。また、 d_w , k_w , α , R_f はそれぞれ熱線の直径、熱伝導率、温度係数、周囲温度における電気抵抗を表す。熱線両端間の電位差 E が一定の場合、次式が成立する。

$$\tilde{i} = \frac{E/R_f}{(1/D) \int_{-D/2}^{D/2} (1 + \alpha \tilde{\theta}) dy} \quad (2)$$

熱伝達係数の y 方向分布が既知の場合には、式(1)と(2)を連立させて動作電流 $\tilde{i}$ を求めることができる。

図2は、一様流と直交して熱線を設置して測定した基本特性を示す。図の横軸は熱線直径に基づくレイノルズ数であり、縦軸は膜温度における熱伝達率 k_m を用いたヌセルト数である。ヌセルト数は、式(1)を変形して次式となる。

$$Nu = \frac{d_w \bar{h}}{k_m} = \frac{\tilde{i}^2 R_f}{\pi k_m D} \frac{1 + \alpha \bar{\theta}}{\bar{\theta}} = \frac{\tilde{i}^2 R_f}{\pi k_m D} \frac{\alpha}{1 - R_f / R_w} \quad (3)$$

図中には、 $Re_w = 0$ の自然対流熱伝達と、水中における強制対流熱伝達の参照値⁽⁴⁾を示す。実験値は参照値と一致せず、その差はレイノルズ数が増加するとともに増大してい

Fig. 2 Performance of the hot wire in a uniform stream.

Fig.3 Snapshots of visualized flow at the Reynolds number of (a) 600, (b) 700, (c) 750, (d) 800, (e) 900, and (f) 1000.

Fig.4 Rearranged images at $y/d = 0.5$ from the time-sequential set of visualized flow at the Reynolds number of (a) 700 and (b) 750.

る。この原因は熱線に施した樹脂コーティング層による熱の通過抵抗にあり、式(3)中の分母にある温度差が、実際には分子の温度差よりも小さくなるためである。

3. 実験結果と考察

図3(a)から(f)までは、噴流レイノルズ数 Re_j を徐々に増加させて撮影されたスナップ画像である。流れの向きは左から右で、画像左端はノズル出口位置となり、画像右端は $x = 35d$ である。画像の高さは流路幅に対応する。まず、 $Re_j = 600$ までの低レイノルズ数領域では、ノズルから噴出された流体は概ねコラム状に流下する。 $x/d < 10$ でコラムの波状変形が観察されるが、下流方向に発達せず、流れは安定している。図3(c)の $Re_j = 750$ では、 $x/d = 20$ 近傍で流れが不安定化し、コラム先端が左右に揺動し始め、 $x/d > 28$ でコラム

Fig.5 Temporal changes of sensor output of the hot wire at the Reynolds number of (a) 650, (b) 675, (c) 700, (d) 725, and (e) 750.

は破断している。ここで、噴流コラムの周辺に観られる染料はリターン流れによるものである。 $Re_j \geq 900$ では、ノズル近傍に出現したコラムの波状変形が短距離で渦輪の巻き上がりまでに発達し、噴流コラムの崩壊を誘発しているようである。コラム崩壊位置は、レイノルズ数が増加するとともに上流に移動する。

図4は、臨界レイノルズ数域におけるコラム崩壊位置の時間変化を、可視化画像から調べたものであり、撮影画像から $y/d = 0.5$ における x 方向への輝度情報を抽出し、時間方向に積層した画像である。画像の特徴は、 x 方向に伸びた縞模様と、 $x/d = 15$ 近傍で時間方向への明暗領域境界の変化にある。前者は波状変形したコラムの x 方向移動に伴うもので、短い時間スケールを有する。図4(a)の $Re_j = 700$ において、その平均周波数は 7.9 Hz となり、ストロハル数で 0.37 となった。図4(b)の $Re_j = 750$ では 8.5 Hz で、ストロハル数は一致した。一方、後者はこれよりも長周期の変化を示し、 $Re_j = 700$ の無次元時間スケールで約 1000 であるが、 $Re_j = 750$ ではこの傾向が顕著には観られない。

最後に、熱線を $x/d = 20$ の断面に設置した場合の測定結果を図5に示す。出力信号として瞬時の熱線加熱電流 i を測定し、レイノルズ分解 $\tilde{i} = I + i$ を施した後、 i/I を図の縦軸にとっている。噴流レイノルズ数は臨界域の $650 \sim 750$ とした。 $Re_j = 675$ までは出力波形の変動幅は小さく、 $Re_j = 700$ において変動幅は大きくなるが、変動領域の時間方向への分布は間欠的である。すなわち、変動幅が小さい時には、噴流コラムが準安定的に存在する流れ状態であり、高変動幅の時間は、噴流コラムが崩壊した状態に対応するものと思われる。一方、 $Re_j \geq 725$ では変動領域の間欠性は弱まり、ほぼ全時間にわたって乱れた信号が得られている。以上より、本研究で試作した熱線による流れ状態の検出については概ね所期の目標を達成することができた。今後、熱線センサーや電子回路の動作安定性を改良する予定である。

なお、本研究は科学研究費（基盤研究(C): No. 24560292）の助成によっている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) Hamoy, A., "Bearing Design in Machinery," Marcel Dekker, Inc., (2003).
- (2) 河合知彦・蛸原健三・山本明, "リニアモータ駆動の超精密5軸ナノ加工機," 精密工学会誌, 72 (2006), 435-439.
- (3) 森下悦生, "長い熱線風速計による後流測定," 日本航空宇宙学会誌, 38 (1990), 591-599.
- (4) 甲藤好郎, "伝熱概論," 養賢堂, (1964).