円筒壁面上を軸方向に流出する円形噴流*

中島 正弘¹, 田畑 隆英², 李 輝³, 重吉 晃⁴, 野崎 勉³

Circular Wall Jet Issuing along Cylinder

Masahiro NAKASHIMA, Takahide TABATA, Hui LI,
Akira SHIGEYOSHI and Tsutomu NOZAKI

ABSTRACT

This paper is concerned with the water circular jet flow issuing along a circular cylinder and in the longitudinal direction of it. In particular, attention is focused on the flow aspect in the cross section normal to the jet flow. The flow visualization in the several cross sections has been carried out by means of the system composed of the dual-pulse YAG-laser, the CCD-camera, and the CRV unit. The image information has been processed by a PIV method. The wavelet analysis has been also conducted by using the velocity component in the spanwise direction obtained from the image processing. As a result, the interesting flow aspect obtained from the velocity contour maps in the previous experiment has been explained by using the image processing results. Furthermore, it has been clarified that at the downstream location far from the exit of a circular pipe the jet issues with swinging from side to side largely and its frequency is relatively low.

Keywords : Wall jet, Flow visualization, Image processing, PIV, Wavelet analysis

1. 緒 論

壁面に沿って流出する噴流は境界層制御や冷却などの問題に関連し、広く工学的に応用されているので、この壁面噴流に関する研究^{1) - 3)}は多くこれまでなされている。また、戦闘機胴体の周囲に配置されたジェットエンジンからの排気噴流のように、円筒外壁に沿ってその軸方向に流出する噴流も工業的に多く見受けられる。したがって、この種の物体形状の壁面に沿って流出する噴流の様子を詳しく調べることも重要なことと考えられるが、この様な流れ場に関する研究はあまりなされていないようである。

円筒形物体の外壁に沿い、その軸方向に流出する円形噴流について、著者らは空気噴流を用いた熱線流速計による計測を行い、平均流および非定常流特性に関して報告^{4), 5)}している。そして、噴流流出口から離れた下流位

置において等速度線図に膨らみが生じるなど、本流れ場の特徴を明らかにしている。

本研究では水噴流による流れの可視化を行い、得られた情報を PIV 法により画像処理した。また、この時系列データを用いてウェーブレット解析も行い、円筒壁面上を軸方向に流出する噴流の流動特性を明らかにした。さらに種々の直径をもつ円筒形物体を用いて同様の実験を行い、流動特性に及ぼす曲率の影響も調べたので報告する。

2. 実験装置および方法

円筒壁面上を軸方向に流出する円形噴流の可視化実験に用いた装置を Fig. 1 に示す。水噴流が流出する真鍮製円管の長さ l は 1200 mm であり、内径 d は 20 mm である。円管出口における最大流速は 2 m/s であり、これと d を用いたレイノルズ数は 4.0×10^4 である。なお、このレイノルズ数は空気噴流の場合の計測⁴⁾と同じである。また、円筒形物体としては両端をアクリル樹脂製円板で塞いだ外径 $D = 300$ mm、長さ 1000 mm のアクリルパイプを用いている。噴流が流出する円管と円筒形物体は水平に設置され、これらは円管内壁面とパイプ外壁面が外接するようにしてある。この設定作業は土木測量用トラ

* 原稿受付 2001 年 12 月 28 日

¹ 正会員 鹿児島工業高等専門学校 (〒 899-5193 鹿児島県姶良郡隼人町真孝 1460-1, E-mail: nakasima@kagoshima-ct.ac.jp)

² 正会員 鹿児島工業高等専門学校

³ 正会員 鹿児島大学 工学部

⁴ 学生員 鹿児島工業高等専門学校 (現 九州工業大学)

1. YAG laser 2. Cylindrical lens 3. Laser unit 4. Pump
5. Circular pipe 6. Circular cylinder 7. CCD camera
8. Computer 9. CRV unit 10. Monitor

Fig. 1 Flow visualization system.

ンシットを用いて確認しながら行われた。

小型ポンプにより汲み上げた水は、円管からアクリル樹脂製の水槽内に設置した円筒壁面に沿って軸方向に噴出する。この水槽内の水と水噴流には流れの可視化のために、平均粒径 $150\ \mu\text{m}$ のイオン交換樹脂製の白色微粒子（比重 1.02）を混入してある。

可視化実験では、噴流の直裁断面内の流れを観察するため、デュアルパルス YAG レーザー発光装置（出力 15 mJ）ならびにシリンドリカルレンズを Fig. 1 に示すように水槽の上方に設置した。そして、シート状レーザーライトをこの面内に照射し、画像情報を Fig. 1 のように水槽後方に設置した CCD カメラ（1/3" CCD, 768(H) × 494(V) 素子）により取得した。なお、Fig. 1 には省略しているが、水噴流の流入により増加した水槽内の流量はオーバーフローパイプからポンプ吸込み水槽内に環流するようにしてあるので、可視化水槽内の水位は一定に保持されている。

本研究で取り扱う流れのモデルと座標系を Fig. 2 に示す。噴流が流出する円管出口の壁面上に座標原点 O をとり、各座標軸 x, y, z をそれぞれ、流れ方向、壁面法線方向、および円周方向にとる。また、最大速度 $U_{\max}$ を含む壁面

Fig. 2 Schematic flow model.

法線方向の平面を噴流中央面と呼ぶ。なお、噴流中央面、噴流の半値幅や速度最大点などの定義は従来からの壁面噴流^{1)–3)}の場合と同様なので詳細な説明はこれらの文献に譲るとして、ここでの説明は省略する。

3. 実験結果および考察

3.1 円筒壁面噴流の流動特性

円筒壁面に沿って軸方向に流出する噴流の一般的な流動特性を明らかにするために、本節では円筒形物体の直径 D と噴流流出円管の内径 d で表される直径比 D/d が 15 の場合の実験結果を例示して考察を行なう。

Fig. 3 に本実験において CCD カメラにより取得された原画像の一例を示す。これは、デュアルパルス YAG レーザを $x/d = 20$ の下流位置において、照射時間 $dt = 0.1\ \text{ms}$ 、照射間隔 $\delta t = 20\ \text{ms}$ の撮影条件で得られたものである。この Fig. 3 において噴流部を白線で囲んでいる。微粒子は y 方向よりもむしろ z 方向の壁面付近に多く集まり、白く見えている。このような粒子群の分布は、空気噴流を用い熱線流速計によって測定された等速度線図^{1)–4)}から明らかになっている拡散方向よりもむしろ壁面側に沿って流れる壁面噴流の流動特性を良く表現している。

このような一連の画像を PIV 法により処理することにより、流れの直裁断面における速度ベクトル線図や等渦度線図を得た。なお、PIV 法は濃度パターン相関法であり、格子数は 31×31 、マスクエリアは縦横ともに $\pm 15\ \text{pixel}$ 、サーチエリアは縦横ともに $\pm 8\ \text{pixel}$ である。さらに、空間解像度は $0.59\ \text{mm/pixel}$ である。一例として、 $x/d = 20$ の下流位置における速度ベクトル線図を Fig. 4 に示す。これは撮影時間 10 秒、300 枚の画像から得られた情報を時間平均処理したものである。これによれば、噴流に向かって両側から静止流体が流れ込む、いわゆるエントレインメントが生じていることが認められる。

次に流れの非定常特性について考察する。Fig. 5 (a) は下流位置 $x/d = 20$ において、ある瞬間に得られた画像を PIV 法により処理したものである。これによれば、噴流は図の右側領域 (z の負方向) から直裁断面内に流入し、

Fig. 3 Original frame. ($D/d=15$, $x/d=20$)

Fig. 4 Averaged velocity vector diagram. ($D/d=15, x/d=20$) Fig. 5 Instantaneous velocity vector diagram.
($D/d=15, x/d=20$)

円筒壁面に沿って流れていることがわかる。さらに、これに伴って左側領域 (z の正方向) の噴流周辺の静止流体がこの流れに巻き込まれていることもわかる。次に、Fig. 5 (a) が得られてから約 0.5 秒経過した画像から得られたベクトル線図を Fig. 5 (b) に示す。この場合は、Fig. 5 (a) の場合とは逆に、噴流は左側領域 (z の正方向) から直裁断面内に流れ込んでいる。さらに、この場合もエンタインメントが観察される。壁面噴流は壁面に垂直方向よりも円周方向への拡散が顕著になる特徴的な現象が多く、研究者によって測定された等速度線図^{1) - 4)}から明らかになっているが、Fig. 5 の速度ベクトル線図はこの現象を良く説明していると思われる。

下流位置 $x/d = 40$ における流れの様子を速度ベクトル線図、および、この速度情報から算出された x 方向の渦度を等渦度線図の形で表し、これらを Fig. 6 に示す。なお、流れが下流に進むことにより、噴流の拡散により流れ場が大きくなる。これに対応するために、CCD カメラによる映像は流れ場全体を撮影する必要がある。したがって、円筒形物体は Fig. 5 と同じく $D = 300$ mm であるが、図中に占める円筒形物体の相対的大きさが変化していることに注意願いたい。

Fig. 6 (a) の速度ベクトル線図からわかるように、この瞬間は噴流主流部左側の噴流外縁付近に時計方向に回転

Fig. 6 Instantaneous flow feature ($D/d=15, x/d=40$).

する大規模な旋回渦がみられる。これは、Fig. 4 に示したエンタインメントによる流れと Fig. 5 や 6 に認められる円筒壁面に沿う流れとが複合して旋回渦 (縦渦) に発達したものと考えられる。そして、この旋回渦に対応して Fig. 6 (b) の等渦度線図にも噴流外縁付近に赤色で示される渦度の強い領域が分布しているのが認められる。なお、この付近において噴流の内・外部で、赤色系の暖色と青色系の寒色で示される互いに回転方向の異なる渦度分布が見られる。このような渦度分布は凸曲面に沿う円形噴流²⁾の乱流計測においても報告されている。さらに、Fig. 6 (a) および (b) の結果からもわかるように、噴流中央面は y 軸と一致せず、Fig. 6 の画像が得られたこの瞬間では左側 (z の正方向) に大きく傾いている。

次に、この噴流中央面の左右への傾きについて考える。この考察を行なうとき、速度ベクトル線図と等渦度分布の画像を重ねることにより、比較的容易に噴流中央面を求めることができる。すなわち、噴流は壁面付近で左右に分岐するので、ベクトル線図からその分岐点が特定できる。また、等渦度分布においては、噴流中央面を境として渦の回転方向が異なる。すなわち、上述したように寒色系と暖色系の色彩の変化で噴流中央面が特定できる。一例として、 $x/d = 20$ の下流位置において得られた任意の時間における速度ベクトル線図と等渦度分布を重ねて表示したものを Fig. 7 に示す。そして、上述したような方法で求めた噴流中央面を図中に白線で示している。この噴流中央面は前項で定義したとおりであるが、Fig. 7 は噴流直裁断面であるので、この噴流中央面は一本の線で表されている。これによれば Fig. 7 (a) では噴流中央面は左側に、Fig. 7 (b) では右側に大きく傾斜している。すなわち、これら 2 枚の図から噴流中央面は時間の経過

Fig. 7 Fluctuation of jet mid-plane ($D/d=15, x/d=20$).

とともに左右に大きく揺動していることがわかる。

この噴流中央面の左右への揺動の程度を定量的にみるために、**Fig. 8**に示すような揺動角 θ を定義した。もし、噴流中央面が左右に揺動しなければ、噴流中央面は xOy 平面と一致し、 $\theta = 0^\circ$ となる。また、**Fig. 8**には各瞬間における直裁断面内での噴流を模式的に記している。この様にして算出した噴流中央面の揺動角 θ の時系列変化を **Fig. 9**に示す。 $x/d = 20$ の場合、 θ の変動の振幅は比較的小さく、またその周期も短い。本流れ場の壁面噴流は乱流噴流であるため、噴流中央面のこの変動程度の振れを伴いながら流れることは容易に理解できる。これに対して $x/d = 40$ の場合、 θ の振幅は大きく、またその周期も長い。これは **Fig. 6**に示したように噴流外縁に交互に大きな旋回渦がこの下流位置で発達し、これにより噴流中央面が大きく左右に揺動しているためである。噴流中に置かれたハーフデルタ翼により縦渦を発生させ、これにより噴流の操縦を試みる研究⁶⁾が報告されている。本流れ場もこの様な観点でみれば、旋回渦（縦渦）によって噴流が制御されていると考えることもできる。

次に、噴流が左右に揺動する現象をフーリエ空間で調べるために、流れの直裁断面内における 300 枚の画像（10 秒間）を用いて、互いに隣接する 2 つの画像について PIV 法により画像処理した。そして、熱線流速計による

Fig. 8 Fluctuating angle of jet mid-plane.

Fig. 9 Variation of fluctuating angle.

計測結果⁴⁾も参考にして、噴流特性量のひとつとしてよく用いられている噴流の半値幅に相当する噴流外縁付近の 1 点に着目し、この点の y および z 方向の速度成分 v および w の時系列データを得た。その一例として、 $x/d = 20$ の場合の計測点 ($y/d = 0.33$, $z/d = 2.88$) を **Fig. 10**に示す。そして、時系列速度データのうち、速度成分 w の変動に着目し、これをウェーブレット変換して、噴流中央面の揺動の目安とした。その解析結果を **Fig. 11**に示す。このウェーブレットは連続ウェーブレット変換であり、マザーウェーブレットには Morlet 関数⁷⁾を使った。なお、ウェーブレット解析においては、時系列データを取得する計測機器の時間分解能も考慮する必要がある。すなわち本研究の場合、1 秒間に 30 フレームを取得する CCD カメラによるデータであること、およびナイキスト周波数も考慮に入れて考察する。この様なことから、ウェーブレット解析結果を示す **Fig. 11**では、30 Hz 以下の周波数領域のみを表示し、さらに 15 Hz 以下の周波数帯域についてのみ、ここでは考察する。幸いにも **Fig. 11**からわかるように、ウェーブレット解析結果は比較的、低周波領域でも顕著な周波数特性を示している。**Fig. 11** (a)に示した $x/d = 20$ の場合、 $t = 7.5$ sec 付近で 15 Hz 前後の周波数帯域において赤紫色で示されるウェーブレット係数の高い領域が短時間だけ出現している。また、5 ~ 15 Hz の周波数帯域でも青色で示される有意な値のウェーブレット係数領域が約 1.5 ~ 2.0 秒間隔で出現していることもわかる。これに対して、**Fig. 11** (b)に示した $x/d = 40$ の場合、5 ~ 15 Hz の周波数領域にウェーブレット係数値のかなり高いことを表す赤紫色の領域が約 1.5 ~ 2.0 秒間隔で出現している。特に、 $t = 4$ sec と 6 sec においてはこれが顕著に現れている。さらに、 $t = 5 \sim 8$ sec 付近では濃い青色で示される領域がこれ以下の低周波数帯域でも認められる。

次に、**Fig. 11**のウェーブレット解析結果と噴流中央面の揺動角の時系列変化を示した **Fig. 9**の実験結果とを総合して考察する。 $x/d = 20$ の場合には噴流中央面は比較的短い周期で揺動しているものの、その規模はあまり大きくなく噴流の半値幅付近まで、その揺動は及んでいな

Fig. 10 Measuring point for wavelet analysis.

Fig. 11 Wavelet transform ($D/d = 15$).

いようである。しかし $x/d = 40$ の場合には、噴流は円筒壁面上を $5 \sim 15$ Hz 前後のかなり低周波振動をしながら下流に流れている。また、その揺動は半値幅付近まで及ぶ大規模な現象になっていると思われる。

著者らは、空気噴流による本流れ場と同様な流れに関して熱線流速計を用いて計測し、平均流および乱流特性を調べている^{4), 5)}。そして、直裁断面内において平均速度を測定し、等速度線図を得ている。それによれば、 $x/d = 20$ までの噴流流出口に比較的近い下流位置では、通常の平面壁に沿う円形噴流³⁾と同様な等速度線図となっている。しかし、 $x/d = 40$ のように噴流の流出口から離れた下流位置において等速度線図に膨らみが生じるといった、この噴流特有の現象が認められる。著者らは半値幅付近における速度変動成分の扁平度を調べ、この現象の説明を試みている。ここでは、ここまで得られた知見をもとに、この特異な現象について考察する。 $x/d = 20$ の場合、本節での議論から明らかになったように、噴流中央面の揺動はあまり大きくない。したがって、平均速度分布から得られた等速度線図にも膨らみは生じない。しかし、 $x/d = 40$ の場合には、噴流中央面の揺動は大規模変動になる。したがって、熱線センサーが平均速度分布で考えた半値幅付近に置かれたとしても、噴流中央面が大きく揺動しているので瞬間的には大きな速度をもった流体塊がこれを通過することになる。この様なことから、平均速度の測定から得られる等速度線図に膨らみが生じるものと考えられる。

3.2 円筒曲率の流れに及ぼす影響

次に、噴流が流出する管の直径を一定にし、種々な直径をもつ数個の円筒を用いて前節と同様な可視化実験を行い、噴流中央面の揺動現象に及ぼす円筒曲率の影響について調べた。用いた円筒の直径は 200 mm および 500 mm である。

円筒直径 D と噴流流出管の直径 d の比 D/d が $D/d = 10$ と $D/d = 25$ の場合の下流位置 $x/d = 40$ における速度ベクトル線図を Fig. 12 に、等渦度線図を Fig. 13 に示す。なお、これらの図は噴流中央面が左側に傾斜した場合のものである。そして、これら 2 つの図と Fig. 6 に示した $D/d = 15$ の場合の速度ベクトル線図や等渦度線図

とあわせて考察する。これらの結果を比較すると、噴流外縁付近に発生する旋回渦は $D/d = 15$ の場合が 10 や 25 の場合よりも規模が大きいことがわかる。また、等渦度線図においても、 $D/d = 15$ の場合には強い渦度が存在することを示す赤色系の領域が認められる。以上のことから、 $D/d = 15$ の場合が旋回渦の規模と強さは顕著であることがわかる。

さらに、前節と同様にして速度ベクトル線図と等渦度線を用いて判断した噴流中央面の揺動角の時系列変化を Fig. 14 に示す。 $D/d = 10$ および 25 の場合には、噴流中央面の揺動は比較的、短周期であり、またその振幅もあまり大きくない。これに対して、 $D/d = 15$ の場合には、他の D/d と比較して振幅および周期ともに大きく卓越していることがわかる。

次に、前節と同様な方法で $D/d = 10$ および 25 の場合における噴流中央面の揺動現象について、ウェーブレッ

Fig. 12 Instantaneous vector diagram at $x/d = 40$. Fig. 13 Instantaneous vorticity contour map at $x/d = 40$.

Fig. 14 Variation of inclined jet mid-plane.

ト解析を行った結果を Fig. 15 に示す。ただし, Fig. 15 (a) の場合のウェーブレット係数のカラーバー表示は Fig. 11 (a), (b) および Fig. 15 (b) のものと異なる。Fig. 15 (a) に示した $D/d = 10$ の場合には, $f = 15$ Hz 前後もしくはそれ以上の周波数帯域で赤紫色の領域が $t = 3.2$ sec, 4.3 sec および 6.4 sec 付近に点在している。しかし, この赤紫色領域のウェーブレット係数は図中に示したように, かなりその値は小さい。したがって, $D/d = 10$ の場合においては, 噴流中央面の運動現象はフーリエ空間的にもあまり顕著には認められない。一方, Fig. 15 (b) に示した $D/d = 25$ の場合にも 15 Hz 以下の低周波数帯域に有意な値をもつウェーブレット係数は現れていない。

以上の結果を総合して円筒曲率が噴流中央面の運動現象に及ぼす影響について考察する。 $D/d = 10$ のように直径比 D/d が小さい場合は, 噴流は円筒壁面の周方向に沿って大きく拡散することができない。したがって, 噴流外縁付近に出現する旋回流は, Fig. 13 (a) において濃い青色領域で示したように噴流中央面に比較的近い位置で発生する。その結果として噴流中央面は大きく運動することができず, また, その運動する周期も比較的短い。さらに, $D/d = 25$ のように直径比が大きい場合は, 噴流は通常の壁面噴流と同様に円筒壁面に沿って周方向に大きく拡散する。したがって, 旋回流は, Fig. 13 (b) において濃い青色領域で示したように噴流中央面に比較的離

れた位置で発生するので, 噴流中央面はその影響をあまり受けなくなる。そのため, 噴流中央面は大きく運動せず, また, その周期も短い。このようなことから結果として, $D/d = 10$ と 25 の場合には同様な運動角の変化になるものと思われる。一方, $D/d = 15$ の場合, 旋回流は $D/d = 10$ の場合のように噴流中央面に近くもなく, また $D/d = 25$ の場合のように離れた位置でもない適度な位置で発生するので, 噴流中央面はこの影響を大きく受ける。したがって, 噴流中央面は Fig. 9 や Fig. 11 に示したように左右に大きく運動し, その周期も長くなる。

4. 結 論

円筒壁面上を軸方向に流出する円形噴流について, 流れの可視化実験を行った。そして, 流れの直裁断面内の画像から得られた情報を PIV 法により処理することにより, 速度ベクトル線図と等温度線図を求めた。また, 直裁断面内の一点における時系列信号を用いてウェーブレット解析を行った。さらに, 種々の直径をもつ円筒を用いて同様の実験も行い, 円筒曲率が流れに及ぼす影響についても調べた。得られた結論の主なものは以下のようである。

- (1) 噴流流出口から離れた下流位置において, 噴流外縁付近の両側に流れ方向に軸をもつ旋回流が交互に生じ, 噴流はこの影響を受けて円筒壁面上を左右に運動しながら流れる。
- (2) この運動現象は噴流の出口速度にも関係するが, 実験した出口速度では, 円筒形物体の直径と噴流流出円管の内径との比が 15 の場合が最も顕著である。

参考文献

- 1) 高曾 徹, 大橋秀雄: 三次元壁面噴流の乱流拡散 (第 1 報, 速度温度場の平均特性および乱流特性), 日本機械学会論文集 (B), Vol. 47, No. 418 (1981) pp. 1002-1014.
- 2) 飯田誠一, 松田 寿: 曲面に沿った円形乱流噴流に関する実験的研究, 日本機械学会論文集 (B), Vol. 54, No. 498 (1988) pp. 354-360.
- 3) 須藤浩三, 高見敏弘: 乱流噴流の挙動に及ぼす隣接壁の影響 (第 1 報, オフセット噴流の平均特性), 日本機械学会論文集 (B), Vol. 56, No. 524 (1990) pp. 919-925.

Fig. 15 Wavelet transform ($x/d = 40$).

- 4) Nakashima, M., Li, H., Tabata, T., Nozaki, T.: Circular Wall Jet Issuing along Cylinder, Proc. 3rd ASME/JSME Joint Fluid Eng. Conf., (1999) CD-Rom.
- 5) Nakashima, M., Li, H., Tabata, T., Nozaki, T.: Circular Wall Jet Issuing along Cylinder (Wavelet Analysis and Flow Visualization), Proc. 3rd Pacific Symp. Flow Visualization and Image Processing, (2001) CD-Rom.
- 6) 望月信介, 木原真一, 大坂英雄: 縦渦による壁面噴流の制御 (平均流特性および縦渦の挙動), 日本機械学会論文集 (B), Vol. 63, No. 605 (1997) pp. 94-100.
- 7) Li, H.: Identification of Coherent Structure in Turbulent Shear Flow with Wavelet Correlation Analysis, ASME Journal of Fluid Engineering, Vol. 120, No. 4 (1998) pp. 778-785.