後流を伴う一様流中の円形噴流に関する実験* (平均流の特性)

山田 広也^{*1}, 中村 育雄^{*2}
山下 新太郎^{*2}, 矢野 治久^{*1}

Experiments on the Circular Jets with the Uniform Flow having Wake (Mean Flow Properties)

Hiroya YAMADA, Ikuo NAKAMURA,
Shintaro YAMASHITA, and Haruhisa YANO

Experimental results of the mean flow properties of a three-dimensional jet injected from a hole located on the downstream side of a circular cylinder into a uniform flow with a wake or into a quiescent fluid are presented. With regard to half widths, L_y and L_z of the jet injected into the quiescent fluid, L_z is slightly larger than L_y . The relative similar profiles of the jets with different Reynolds numbers injected into the uniform flow differ considerably between the vertical direction, y and the horizontal direction, z . The half width L'_z in this case is considerably larger than L'_y in the upstream region, but the two length become nearly equal in the downstream region. The isopleth of the mean velocity is shown to exhibit nonsymmetry and three dimensionality of the flow field.

Key Words: Fluid Mechanics, Circular Jet, Wake, Three-dimensional Mixing, Coflowing Jet, Flame Holder, Turbulence

1. ま え が き

本研究でとりあげる流れ場は、図 1 に示すような円柱の下流側背面に設けられた円形穴から静止流体中ならびに一様流中へ空気噴流を吹出すものである。このような流れ場では、円柱の下流に後流が発生し実際には後流を伴う一様流中へ円形噴流を吹出す流れ場となる。この種の流れは、工業上自己推進物体の後流⁽¹⁾、ガスタービン翼冷却時の後縁吹出し^{(2)~(4)}や高速気流中の火炎の安定化⁽⁵⁾などに関連して重要である。このため、これまでも火炎の安定化に関連して円柱形保炎器の吹出し効果を調べた辻らの研究⁽⁶⁾、その火炎構造を調べた研究^{(7)~(8)}などがある。しかし、これらの研究においては流れ場の詳細が調べられていないように思われる。また、本流れ場に類似した流れとしては同軸噴流、すなわち一様流中への吹出しがある。この流れ場についてはこれまでも調べられている^{(9)~(12)}が、これに対して本流れ場は後流を伴う一様流中へ吹出すところが異なっている。

そこで、本研究は円柱に設けられた円形穴から後流

を伴う一様流中ならびに静止流体中へ噴流を吹出し、これらの噴流の三次元的な混合過程を実験的に調べたもので、ここでは平均流の特性、すなわち平均速度の相似分布、最大速度の減衰、半値幅の発達、平均速度の等値線および立体図のパターンの特徴について報告する。なお、乱れの特性については次報で報告する。

主な記号 (図 1 参照)

d : 噴流出口の直径
 D : 円柱の直径
 L_y, L_z : 静止流体中の場合の y, z 方向の半値幅
 L'_y, L'_z : 見掛け上の一様流に対する相対速度分布の y, z 方向の半値幅

$D = 5 \text{ mm}$, $d = 2.5 \text{ mm}$, $U_0 = 20 \text{ m/s}$

図 1 流れ場と座標系

* 平成元年 4 月 3 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 8 月 23 日

*¹ 正員、大同工業大学 (〒457 名古屋市南区大同町)。

*² 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

- z 方向の半値幅
 Re : レイノルズ数 $= U_j d / \nu$
 U : x 方向の平均速度
 U_j : 噴流出口の平均速度
 U_m : 噴流の最大速度
 U_0 : $x = -95\text{mm}$ の位置での基準主流速度
 U' : 後流の x 方向平均速度
 U'_c : 後流の中心断面 ($y=0$) における平均速度
 U_∞ : 一様流速
 U'' : 見掛け上の一様流に対する相対速度 $= U - U'$
 U''_m : U'' の最大値
 x, y, z : 吹き出し口の中心を原点とする座標系
 η : それぞれ半値幅で無次元化した y 座標
 ρ, ν : それぞれ流体の密度と動粘性係数

2. 実験装置および方法

実験に用いた風洞の測定部断面積は一辺 300 mm の正方形で主流の乱れ強さは約 0.5 % である⁽¹³⁾。本実験では測定部入口から 1080 mm 下流の位置で吹き出しを行った。基準流速 U_0 としてこれから 95 mm 上流の位置での主流速度を用いた。測定部における一様流の圧力こう配は吹き出し位置より 40 mm 上流からほぼ一定に保ってある。吹き出しは図 1 に示すように測定部を水平に貫く外径 5 mm のステンレス管のSPAN中央に開けられた直径 2.5 mm の吹き出し口から噴流を発生させた。噴流の吹き出し口は図 1 に示したように通常の吹き出しノズルのように出口が平面ではなく曲面である。吹き出し流量は層流形流量計で測定した。

実験は基準流速 U_0 に対する噴流の吹き出し平均速度の比(速度比) U_j/U_0 を 1, 2, 3 と 3 種類変化させて行った。 U_j は吹き出し流量をノズル出口面積で除して求めた。各速度比におけるレイノルズ数 Re はそれぞれ 3300, 6700, 10000 で U_0 はおよそ 20 m/s である。静

止流体中への吹き出しの実験では一様流中への吹き出しの場合の $U_j/U_0=3$ の時と同じレイノルズ数で行った。測定はまず吹き出しがない場合の円柱の後流場について行った。次に噴流をこの後流を伴った一様流中に吹き出した場合と静止流体中に吹き出した場合につき、 $x/d=31.8\sim 621$ の 10 断面で速度の詳細な測定を行った。測定には定温度熱線風速計を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 静止流体中へ吹き出した場合 本実験のような円柱に開けられた円形穴から吹き出される噴流場では、静止流体中へ吹き出した場合においても以下の半値幅の成長(図 4)に示したように、平均速度の y 方向分布と z 方向分布にわずかな非対称性が認められた。しかし、それぞれの半値幅で無次元化した相似分布は図 2 に示すように対称な分布となる。図は左側に y 方向分布を、右側に z 方向分布を示しており、実線は石垣⁽¹⁴⁾が多くの実験結果と良く一致するとしているガウス分布 [式(1)] を示す。

$$U/U_m = \exp[-(\ln 2)\eta^2] \dots\dots\dots (1)$$

また、このガウス分布と Tollmien および Goertler 分布⁽¹⁵⁾との比較を右上図に示した。本結果は $x/d \geq 31.8$ のすべての測定位置で相似となっており、この相似分布は噴流の外端付近を除く $\eta > 1$ で Tollmien 分布に、 $\eta < 1$ では Goertler 分布に一致していると言える。そして、ガウス分布に比べて $\eta=1$ 付近で速度こう配がわずかに小さくなっている。

図 3 は静止流体中に吹き出した場合の最大速度の減衰を示す。ここで x_0 は仮想原点であり、本実験結果からこれを求めてみると、 $x_0/d = -14$ であった。実線は石垣がこれまでの実験結果と良く一致するとしている U_m の減衰式 [式(2)] である。

$$U_j/U_m = \frac{0.153}{\sqrt{\lambda}} \left(\frac{x-x_0}{d} \right) \dots\dots\dots (2)$$

図 2 静止流体中の相似分布

図 3 静止流体中の U_m の減衰

ここで、 λ は噴流出口の運動量 ($J = \pi d^2 U_j^2 / 4$) に対する x 方向の各位置における積分運動量 ($J = 2\pi \int_0^\infty U^2 y dy$) の割合である。破線は Rajaratnam が多くの実験結果から実用上の減衰式として与えた次式である。

$$U_j/U_m = 0.159 \left(\frac{x-x_0}{d} \right) \dots\dots\dots (3)$$

なお、Rajaratnam は仮想原点に対する実験的不確定性から実用上は $x_0=0$ として良いとしているので、ここでは減衰のこう配のみを比較する目的で $x_0=0$ として示している。まず、本結果を式(2)と比較してみる。本実験データから λ を算出する際、速度分布の非対称性による誤差を含んでおり、得られた λ も x 方向に対してわずかに変化したが下流4断面の平均値をとると $\lambda \approx 1.4$ であった。この値を用いて式(2)と比較すると本結果は良く一致しているがこれは偶然的なものと考えられる。次に Rajaratnam の実用式と本結果を比較すると Rajaratnam の減衰こう配のほうが本結果より大きくなっており、 U_m の減衰が弱い。

図4(a)(b)は静止流体中における半値幅の発達を示す。図4(a)は、本結果の仮想原点が L_y と L_z で異なるためにこう配のみを比較する目的で x/d に対する変化を示した。実線は石垣が実験データとの一致が良いとしている次式を示している。

(a) x/d に対する変化

(b) $(x-x_0)/d$ に対する変化

図4 静止流体中の半値幅の発達

$$L/d = 0.09 \left(\frac{x-x_0}{d} \right) \dots\dots\dots (4)$$

破線は Rajaratnam の実用式 [式(5)] を示す。

$$L/d = 0.1x/d \dots\dots\dots (5)$$

本結果は吹出し口に近い上流では L_z のほうが L_y に比べてわずかに大きいが下流に行くと両者が同一になる傾向がある。これは本噴流の吹出し口付近では z 方向におけるエントレインメントが円柱の存在によって妨げられ噴流の横断面を z 方向に引き伸ばすような弱い二次流れが発生するためであろうと思われる。本結果の半値幅の発達のこう配を式(4)、(5)のものと比較してみると L_y は式(5)の、 L_z は式(4)のこう配に近いと言える。図4(b)は $(x-x_0)/d$ に対する半値幅の発達を示す。本結果の仮想原点を図4(a)より求めると L_y については $x_0/d = -4.4$ 、 L_z については $x_0/d = -26$ となる。これを用いた本結果の半値幅の発達では L_y は式(5)に L_z は式(4)式にほぼ一致している。図4(a)(b)より本結果の半値幅の発達は L_y と L_z で異なっているが、通常の円形噴流に関する石垣や Rajaratnam の実用式の範囲内にある。

3.2 後流を伴う一様流中へ吹出した場合 図5

(a) y 方向分布

(b) z 方向分布

図5 一様流中の中心断面の速度分布 ($U_j/U_0=3$)

は後流を伴う一様流(以下単に一様流という)中へ吹出した場合の噴流の中心軸を含む平面における平均速度分布の下流方向変化を速度比3のものについて示す。図5(a)にその y 方向分布を示す。 $x/d=31.8, 105, 621$ の各位置に示した一点鎖線は吹出しがない場合の後流(以下単に後流と言う)の分布である。 $x/d \leq 141$ の上流では後流が吹出しによって変形され、その後流の中に噴流が突出した形の分布である。それより下流では噴流によって後流中央部が加速された形の後流に類似した分布形へと変化している。そして最下流の位置においても噴流の分布は後流の分布に一致していない。また、後流中に突出した噴流の速度は下流方向に減衰するが顕著な広がりはない。図5(b)に z 方向分布の下流方向への変化の様子を示す。図5(a)と同様に三つの位置に示した一点鎖線は後流の分布である。後流から突出した噴流の分布形は y 方向のそれに比べて中央部でゆるやかな丸みをもっている。そしてこれは下流に行くに従って減衰しながら広がっていく様子がわかる。

図6は一様流中に吹出した場合の噴流中心軸における速度の下流方向変化を後流の場合も含めて示す。速度比が3の時の中心速度は x/d が100あたりまでは急激に減少するが、 $U_j/U_0=2$ では本測定範囲内においてほとんど一定である。 $U_j/U_0=1$ では後流に類似した下流方向への増加を示している。 $x/d \geq 400$ の下流位置では速度比による差はほとんど認められず最下流の位置においても後流の速度は一様流速と一致していない。また噴流の速度はいずれの速度比においても後流の速度に一致していないことがわかる。なお、各 x/d の位置において U_∞ と U_0 の差は $\pm 1\%$ 以内であった。

図7は一様流中へ吹出した場合の無次元分布を示しており、左側が y 方向、右側が z 方向分布である。なお、これは見掛け上の一様流に対する相対速度の相似

分布である。これまでの二次元⁽¹⁶⁾あるいは円形⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾の同軸噴流の実験結果によれば、一様流に対する相対速度分布は発達域で相似性があるとしている。このような相対速度の相似分布は本質的には静止流体中へ吹出した場合の相似分布と同じであると考えて良いと思われるので前述の石垣のガウス分布[式(1)]との比較を試みた。また、これと同軸噴流の相対相似分布①～③との比較を左上図に示した。図中の実線と④がガウス分布である。Bradbury⁽¹⁶⁾の二次元同軸噴流に対する実験式①は次式で与えられる。

$$\frac{U''}{U''_m} = \exp[-0.6749\eta^2(1+0.027\eta^4)] \quad \cdots (6)$$

また、分布③は円形の同軸噴流に対する谷ら⁽¹⁷⁾の実験結果であり、分布②はSquireら⁽¹⁸⁾が円形同軸噴流について求めた次式である。

$$\frac{U''}{U''_m} = \frac{1}{2} \{1 + (\cos \frac{\pi}{2}\eta)\} \quad \cdots (7)$$

本相似分布は $x/d \geq 31.8$ の全測定断面で相似となっているが y 方向と z 方向の分布に明らかな相異が認められる。ガウス分布と本分布を比較すると y 方向分布は噴流の外端部を除けば良く一致している。しかし、 z 方向分布は噴流の中央部($\eta < 1$)でかなりのずれが認められるが外端部では良く一致している。また、本分布と同軸噴流の分布①～③を比較すると噴流中央部($\eta \leq 1$)では良く一致しているが、外端部($\eta > 1$)ではずれが見られる。また、本結果の y 方向分布は前述の静止流体中の相似分布(図2)と良く一致しているが z 方向分布では噴流中央部に明かなずれが認められる。

図8は見掛け上の一様流に対する相対最大速度の減衰を示す。本噴流の相対最大速度の減衰は静止流体中の場合のような $U_m \propto x^{-1}$ の関係が成立していなかった。そこで、 $U''_m \propto x^{-n}$ の関係があると考えられるので減衰指数 n を調べる目的で図は両対数で表示した。Ra-

図6 中心速度の x 方向変化

図7 一様流中の無次元分布 ($U_j/U_0=3$)

jaratnam は同軸噴流を一様流に対する相対最大速度比 U''_m/U_∞ が $U''_m/U_\infty \gg 1$ の時を強い噴流, $U''_m/U_\infty \ll 1$ の時を弱い噴流と区別して扱っている⁽¹⁵⁾. 本実験における U''_m/U_∞ は全測定範囲において $0.27 \sim 0.02$ であり Rajaratnam に従うならば本噴流は弱い噴流であると言える. Rajaratnam の理論的考察によれば弱い噴流では $U''_m \propto x^{-2/3}$ の関係が成り立つとしている. 本結果の減衰指数は, 速度比によって異なっており, $U_j/U_0=2$ のとき Rajaratnam の指数に近い値となっている.

図 9 (a) は見掛け上の一様流に対する相対速度分布から求めた半値幅の成長を示す. 本噴流における相対速度分布の半値幅の成長は静止中の場合のような $L \propto x$ の関係が成り立っていなかったため $L'' \propto x^n$ の関係があるものと考えて, 指数 n を調べる目的で図は両対数で表示した. まず, 本噴流における半値幅の変化は吹出し口に近い上流位置では L''_z のほうが L''_y に比べてはるかに大きい下流に行くとき両者は近づく傾向にある. Rajaratnam の理論的考察によれば弱い同軸噴流では $L'' \propto x^{1/3}$ の関係が成り立つとしている. 本結果の指数 n を求めてみると L''_z のほうは速度比による僅かの差があるがこれは測定誤差の範囲内で Rajaratnam の指数に近い値となっている. しかし, L''_y のほうは下流で速度比による差はなく L''_z のおよそ 2 倍と大きくなっている.

図 9 (b) は $U_j/U_0=3$ のときの見掛け上の一様流に対する相対速度分布の半値幅と静止流体中へ吹出した場合の半値幅の変化を比較したものである. 図 4 (a) でも述べたが静止流体中の場合には, 上流では L_z が L_y に比べてわずかに大きい下流ではこれが同一になる傾向がある. 一様流中の相対速度の半値幅の変化においてもこれと同様な傾向を示すが, 静止流体中に比べてその傾向がさらに顕著になっている. これは先に述べた本噴流の上流で発生する二次流れが静止流体中のものに比べて一様流中の場合には後流の影響によりこれがさらに強められるためではないかと考えられる. また, 下流の発達域において一様流中の場合の半値幅の発達割合のほうが, 静止中に比べて L''_y , L''_z ともに小さい.

次に本噴流の三次元的発達過程の解明には平均速度の等値線図やその立体表示が有効であると思われる. そこで, まず後流の $x/d=31.8, 81, 141$ の 3 断面について等値線図を画いた. その結果はここには示さないがすべての位置において各等値線は z 方向に直線であり, 二次元性が良好であった. 次に, 一様流中に噴流を吹き出した場合の平均速度の等値線図と立体図を画

いた. まず, 図 10 (a) ~ (c) に $U_j/U_0=3$ の時の等値線図を示し, 図 11 (a) ~ (c) に立体図を示す. $x/d=31.8$ の位置では一様流から噴流が突出しており, その噴流は明らかに非対称な形状であることが良くわかる. それより下流においては, 後流が下流に行くに従って二次元的に広がり, 一方後流の中の噴流は速度を減衰させながら非対称にしかも三次元的に広がっていく様子が見てとれる.

次に速度比が 2 と 1 についてはここでは立体図のみを示す. 図 12 (a) ~ (c) に $U_j/U_0=2$ の時の立体図を示す. $x/d=31.8$ の位置において噴流は一様流から突出してはいない. そして, 後流の中の噴流の形はやはり非対称である. それより下流に行くとき後流は二次元的に広がり, その中の噴流は減衰しながら非対称にしかも三次元的に広がっていく.

図 8 一様流中の U''_m の減衰

(a) 一様流中

(b) 一様流中と静止中の比較

図 9 半値幅の発達

図13(a)~(c)は $U_j/U_0=1$ のときの立体図を示す。 $x/d=31.8$ の位置においてさえ後流の中に噴流らしい形状を見ることはできない。これより下流においてもやはり噴流の形は見られないが、後流が噴流によって増速されそれによって変形している様子が見てとれる。そして下流に行くほど、変形される領域が広がっている。以上の平均速度分布から2次流れが予想されるが、実際、風車によってその存在が確かめられた。これについては次報で乱れ分布と関連して報告する。

4. あとがき

円柱背面に設けられた円形穴から静止流体中ならび

に後流を伴う一様流中へ噴流を吹出し、その三次元的な混合過程を実験的に調べた結果以下のような結論を得た。

(1) 静止流体中の場合における噴流の半値幅は L_z が L_y よりわずかに大きい。下流の発達域での半値幅の成長こう配は通常の円形自由噴流のそれに近い。それぞれの半値幅で無次元化した速度分布は $x/d \geq 31.8$ で相似となり、通常の円形噴流の分布と一致する。最大速度の減衰は石垣の減衰式と一致している。

(2) 一様流中へ吹出した場合の相似分布は y 方向と z 方向においてかなり相違があり、 y 方向のほうは静止流体中の石垣のガウス分布にほぼ一致しているが z 方向は一致しない。最大速度は速度比によって減

(a) $x/d=31.8$

(b) $x/d=81$

(c) $x/d=141$

図10 平均速度の等値線 ($U_j/U_0=3$)

(a) $x/d=31.8$

(b) $x/d=81$

(c) $x/d=141$

図11 平均速度の立体図 ($U_j/U_0=3$)

衰の差が認められるがおおよそ $x^{-2/3}$ に比例して減衰する。

(3) 一様流中の場合の半値幅は上流では L'_z が L'_y に比べてかなり大きいが下流では同一になる傾向がある。

(4) 一様流中の場合の平均速度の等値線図と立体図から噴流の非対称性が認められ、また、後流中の噴流の非対称性でしかも三次元的な広がりの特徴が明らかとなった。

終わりに、本研究の遂行に当たり多くの便宜をはか

(a) $x/d = 31.8$

(a) $x/d = 31.8$

(b) $x/d = 81$

(b) $x/d = 81$

(c) $x/d = 141$

図 12 平均速度の立体図 ($U_j/U_0=2$)

(c) $x/d = 141$

図 13 平均速度分布の立体図 ($U_j/U_0=1$)

って頂いた大同工業大学, 田中保教授に深く感謝の意を表する。また, 本研究にご協力頂いた名古屋大学, 榎田武広助手, および大同工業大学, 神田博邦氏ならびに当時の卒研生諸氏に謝意を表する。

文 献

- (1) 例えば, Tennekes, H. and Lumley, J. I., *A first course in turbulence*, (1972), 124, MIT press.
- (2) Metzger, D., ほか2名., *Trans ASME, J. Eng. Power.*, (1972), 219.
- (3) 安部・ほか4名, ターボ機械, 15-12(1987), 721.
- (4) 小幡・谷口, 機誌, 87-788(1984), 690.
- (5) 辻, 機械の研究, 29-9(1977), 1123.
- (6) 辻・岡野, 東大航空研集報, 3-1(1962), 78.
- (7) 香月・ほか3名, 機論, 51-470, B(1985), 3215.
- (8) 長谷川・ほか3名, 機論, 52-477, B (1986) 2291.
- (9) Forstall, W. Jr. and Shapiro, A. H., *J. Appl. Mech.*, 17-4(1950), 399.
- (10) Juanc, A. and Lambertus, H., *J. Fluid Mech.*, 191 (1988), 19.
- (11) Schetz, J. A., *AIAA J.*, 6-10(1968), 2008.
- (12) Durao, D. and Whitelaw, J. H., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 95-3(1973), 467.
- (13) 山田・ほか3名, 機論, 52-474, B(1986), 740.
- (14) 石垣, 機論, 48-433, B(1982), 1692.
- (15) Rajaratnam, N. (野村訳), 噴流, (1981), 26, 森北出版.
- (16) Bradbury, L. J. S., *J. Fluid Mech.*, 23-1 (1965), 31.
- (17) Tani, I. and Kobashi, U., *1st Japan Natl. Congr. Appl. Mech.*, (1951), 465.
- (18) Squire, H. B. and Truncer, J., *Aeronautical Research Council*, London, R and M. (1944), 1914.