放射状付着噴流の制御に関する研究*
(第 5 報, 速度, 圧力, 可視化による結果の比較)

田中 敏雄**, 田中 栄一**, 井上 吉弘**

Study on Control of Radial Attaching Jet Flow
(5th Report, Comparison of the Results between Velocity,
Pressure and Flow Visualization)

Toshio TANAKA, Eiichi TANAKA, and Yoshihiro INOUE

An experimental study is presented on the control of the reattachment of a radial turbulent jet flow (main jet flow) discharged from a cylindrical nozzle onto an adjacent offset disc plate, with the addition of another control flow (suction and blowing). The effects of various step heights and control flow rates on the flow properties were investigated by the velocity and pressure distributions, and by flow visualization. A flow field was divided into four regions: the initial region, the recirculation region, the transitinoal region and the wall jet flow region. Deflections of jet potential core and jet center axis, changes of jet center velocity and jet half width, and static pressure distributions at the wall surface in each region were examined.

Key Words: Turbulence, Radial Jet Flow, Control Flow Rate, Step Height, Offset Disc Plate, Recirculation Region, Jet Potential Core, Reattachment Point

1. 緒 論

円柱状ノズルから放射状に流出する噴流(主噴流)の側壁円板面への付着現象を, 別の流れ(吸込みと吹出しの制御流)を付加することにより制御しようとする目的で, 前報告⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾までに, 種々のステップ高さで制御流量に対して, 平均速度と乱れ, 壁面静圧と噴流内の静圧の測定および可視化により流れの状態を調べた。そして, 主噴流の側壁面へのかたよりと付着特性は, 側壁効果の程度を表すステップ高さの大小と制御流量の組合せにより異なることを明らかにした。

本報では, これらの結果をもとに, 大小二つのステップ高さで二種類の制御流量(吸込みと吹出し)との組合せの四種類の実験条件を例にして, ノズル流出面近くの噴流核のかたより, 逆流を伴う再循環領域の形状, 再循環流の中心の位置および噴流の側壁面への付着位置などを, 等圧線図, 流線図および可視化写真により検討する。また, 最大速度, 噴流軸および噴流半値幅などと壁面静圧の下流方向変化との比較も行う。本論文で用いた主な記号はつぎのとおりである。

b : 噴流半値幅

C_p : 圧力係数 $= (p - p_a) / (1/2)\rho U_0^2$

C_{p0} : 壁面圧力係数 $= (p_0 - p_a) / (1/2)\rho U_0^2$

H/L : ステップ高さ(壁面からノズル噴出口中央面までの距離 H とノズル幅 L との比)

p, p_0, p_a : 静圧, 壁面静圧, 大気圧

q/Q : 制御流量(制御流の流出流量 q と主噴流の流出流量 Q との比; 制御流用スリットから流れへの吹出しを正, 吸込みを負とする)

U_0 : 主噴流のノズル流出速度

U_m : y 方向に測った断面における速度 u の最大値

x, y : ノズル流出面からの半径距離, 壁面からの垂直距離

y_m : 壁面から最大速度 U_m までの距離(噴流軸)

Ψ : 無次元流れ関数(式(1))

2. 実験装置および方法

実験装置および方法は前報⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾におけると同じであるので, その説明は省略する。

実験条件は, ステップ高さの大小の代表例として, $H/L=4, 8$ を, 制御流量の代表例として $q/Q=-0.4$ (吸込み) と 0.4 (吹出し) を選び, それらの組合せの

* 昭和 61 年 8 月 26 日 北陸信越支部信越地方(長野)講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 3 月 8 日。

** 正員, 岐阜大学工学部(〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)。

4種類について取扱う。ノズル流出速度は前報の結果⁽⁵⁾をもとにして、 $U_0 \approx 40\text{m/s}$ の一定(レイノルズ数は $U_0 L/\nu \approx 1.6 \times 10^4$ に対応)とした。

3. 実験結果および考察

3.1 可視化写真, 等圧線図および流線図の比較

以下における可視化写真は, ノズル流出面に対して垂直な $x-y$ 面に油膜を塗布した可視化用平板を置き, そこに生じた流れの模様を示したものである。

流線図における無次元流れ関数 Ψ は, 次式のように定義され, 図式積分により求められたものである。

$$\Psi = 2\pi r \int_0^y u dy / \pi D_0 L U_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, u は速度の x 方向成分, D_0 は円柱状ノズルの外径, r はノズル中心軸からの半径距離である。

図1~4は, 4種類の実験条件における, それぞれ, (a)可視化写真, (b)等圧線図および(c)流線図を示したものである(なお, 図2の可視化写真中に, 例として主噴流用のノズルと制御流用のスリットの位置を

示す)。各流線図中には, 噴流軸線を破線にて示し, また流れの方向を矢印にて示す。

まず, ノズル流出面近くの噴流核と噴流軸の変化を, それぞれ, 可視化写真と流線図から考察する。

吸込みににおいては, ステップ高さの小さい $H/L=4$ の場合(図1), 側壁面の存在による側壁効果が強く作用し, それに吸込効果が加わり, 噴流核および噴流軸とも側壁面側へわん曲している。しかし, 同じ吸込みでもステップ高さが大きい場合(図2)には, $x/H < 0.6$ の領域内では, 側壁効果と吸込効果はともに作用しなく, 噴流核および噴流軸は一定となる。

一方, 吹出しにおいては, ノズルからの主噴流にノズルと同心円状のスリットからの制御流が直接に衝突する状態となり⁽⁶⁾, $H/L=4, 8$ の場合とも(図3, 4), 吹出し効果が側壁効果にまさり, 噴流核および噴流軸は一度大気側($y/H > 1.0$)に曲げられる。

なお, この噴流核のかたより, 大きさとステップ高さおよび制御流量との関係は第1報⁽¹⁾に詳述した。

つづいて, ノズル流出面より下流の位置のノズル中

(a) 可視化写真

(b) 等圧線図

(c) 流線図

図1 可視化写真, 等圧線図および流線図の比較
(吸込み; $q/Q = -0.4$, $H/L = 4$)

(a) 可視化写真

(b) 等圧線図

(c) 流線図

図2 可視化写真, 等圧線図および流線図の比較
(吸込み; $q/Q = -0.4$, $H/L = 8$)

央面 ($y/H=1.0$) と側壁面 ($y/H=0$) との間には、いずれの場合においても、逆流 [(c) 流線図] を伴う負圧 [(b) 等圧線図] の再循環領域が存在し、この領域での負圧と噴流の外側 ($y/H>1.0$) の大気圧との差により主噴流 (噴流軸) は側壁側にわん曲し、側壁面に付着する。この再循環領域内には、圧力 C_p および流れ関数 ψ がともに負の値の最低となる再循環流の中心が存在し、その位置は等圧線図および流線図においてよく一致し、また可視化写真よりも観察される。

吸込みにおける、ステップ高さの小さい場合 (図1), 側壁効果と吸込効果がともに作用するため、再循環領域での噴流軸は側壁側に強くわん曲する。そして、この再循環領域は最も小さく、しかも等圧線図における等圧線の間隔も密になり、領域全体の圧力および再循環流の中心の圧力は最も低い。同じ吸込みでもステップ高さが大きい場合 (図2) には、側壁効果と吸込効果が下流位置で作用したため、再循環領域内の負圧はかなり高くなり、そのため噴流は下流位置 ($x/H \approx 0.6$) より、徐々に側壁側にわん曲する。

一方、吹出しにおいては、 $H/L=4, 8$ の場合とも (図3, 4), 前述したように噴流核と噴流軸は一度大気側 ($y/H>1.0$) に曲げられるが、それ以後の下流位置では側壁効果が吹出し効果にまさり、噴流は再び大きな曲率半径の円弧状にて側壁側にわん曲する。そして、図4の場合における再循環領域内の負圧は、4種類の実験条件中最も高くなっている。

再循環流の中心の x 方向位置は、噴流の側壁面へのわん曲の程度 (H/L と q/Q の組合せ) に応じて変化し、 H/L が小さく、吸込みの場合 (図1), 最もノズル流出面に近づく ($x/H \approx 0.75$)。一方、再循環流の中心の位置の y 座標は、ほとんどの場合 $y/H \approx 0.5$ となるが [図1~3の(b), (c)], ステップ高さが大きく、吹出しの場合のみ [図4(b), (c)], $y/H>0.5$ となる傾向にある。これは吹出しがかなり強いいため、噴流の場全体が大気側にもちあげられる傾向を示すものである。そして、前報^{(1)~(4)}に述べたように、 $q/Q>0.6$ のより強い吹出しの場合には、本実験の大きさの側壁円板では、流れは側壁面に付着しなくなる。

(a) 可視化写真

(b) 等圧線図

(c) 流線図

図3 可視化写真、等圧線図および流線図の比較
(吹出し; $q/Q=0.4$, $H/L=4$)

(a) 可視化写真

(b) 等圧線図

(c) 流線図

図4 可視化写真、等圧線図および流線図の比較
(吹出し; $q/Q=0.4$, $H/L=8$)

側壁面への付着点は、等圧線図における側壁面上の最大圧力点、あるいは流線図における $\psi = 0$ の流線の延長線と側壁面との交点(各図中、▲または▼印)にて示され、この位置は可視化写真よりも観察される。

ステップ高さが小さく、吸込みの場合、側壁面への付着位置は最もノズル流出面に近づき ($x/H \approx 1.24$)、またそこにおける圧力は最も高い [図 1 (b)]。

3.2 最大速度、噴流軸、噴流半値幅および壁面静圧の下流方向変化 図 5～8 は、それぞれ 4 種類の実験条件における、最大速度 U_m/U_0 、噴流軸 y_m/H 、噴流半値幅 b/H および壁面静圧 C_{p0} の下流方向 x/H への変化を示したものである。ここで、またノズル流出面近くの状態を詳しくみるため、同時に下流位置の流れの状態を知るため、横軸は対数目盛にて表してある。

各値は、ステップ高さ H/L と制御流量 q/Q の組合せにより、下流方向に異なった変化をするが、それに

応じて、流れの場は次の四つの領域に区別される。

(A) 初期領域：ノズル流出面近くの最大速度 $U_m/U_0 = 1$ が維持されている領域で、噴流半値幅 b/H もほぼ一定であり、また、壁面静圧 C_{p0} は負となっている。

(B) 再循環領域：付着点近くまでの U_m/U_0 が減少して極小となり、逆に b/H が増加して極大となるまでの領域で、 C_{p0} は負の値から正の値に変化する。

(C) 遷移領域： U_m/U_0 は再び増加して極大となり、逆に b/H は減少して極小となる(この位置は噴流の縮流点に対応する)領域で、 C_{p0} は正の値から減少して、大気圧に漸近する。

(D) 壁噴流領域： U_m/U_0 は単調に減少し、逆に b/H は増加する領域で、 C_{p0} はほぼ大気圧に等しい。

各図には、この四つの領域の境界を一点鎖線にて示し、それぞれの領域に(A)～(D)の記号を記してある。

4 種類の実験条件に対して、初期領域と遷移領域の大きさはほぼ同じであるが、再循環領域の大きさおよ

図 5 最大速度、噴流半値幅、噴流軸および壁面静圧の下流方向変化 ($H/L=4$, $q/Q=-0.4$)

図 7 最大速度、噴流半値幅、噴流軸および壁面静圧の下流方向変化 ($H/L=8$, $q/Q=-0.4$)

図 6 最大速度、噴流半値幅、噴流軸および壁面静圧の下流方向変化 ($H/L=4$, $q/Q=0.4$)

図 8 最大速度、噴流半値幅、噴流軸および壁面静圧の下流方向変化 ($H/L=8$, $q/Q=0.4$)

びそこでの各値の変化の状態は異なる。

まず、ステップ高さの小さい $H/L=4$ における吸込みの場合 (図5), とくに再循環領域内での最大速度 U_m/U_0 の減少と、噴流半値幅 b/H の増加の程度は激しく、また壁面静圧 C_{p0} の負圧から正圧への変化の程度も大きい。しかも、噴流軸 y_m/H は初期領域から側壁側へ曲がりはじめ、再循環領域内でのその曲がり方も大きい。これらは、ステップ高さの小さいことによる側壁効果がノズル流出面近くから作用し、これに吸込み効果が加わり、噴流の側壁側へのかたよりが強く、側壁面への付着もはやいことを意味する (図1)。

つぎに、 $H/L=4$ における吹出しの場合 (図6) には、吸込みの場合 (図5) に比べて、再循環領域はかなり大きくなり、したがって、この領域内での U_m/U_0 の減少と b/H の増加の程度は比較的ゆるやかである。ただし、ノズル流出面近くでは吹出し効果が側壁効果にまさるため、噴流軸 y_m/H は初期領域から一度大気側 ($y/H > 1.0$) にかたよる。しかし、それ以後の下流位置では、逆に側壁効果が吹出し効果にまさり、再び y_m/H は側壁側へ曲がる。壁面静圧 C_{p0} の大きさとその変化の程度は、吸込みの場合に比べかなり小さい。

ステップ高さの大きい $H/L=8$ における吸込みの場合 (図7), ノズル流出面近くでの側壁効果は小さく、しかも吸込み作用も直接働かなくて、噴流軸 y_m/H は再循環領域の途中 ($x/H \approx 0.6$) まで一定となる。その後は、吸込効果が作用しだし、 y_m/H は側壁側へ曲がる。再循環領域内での U_m/U_0 の減少と b/H の増加の程度、あるいは C_{p0} の大きさとその変化の程度は、比較的小さい。

つぎに、 $H/L=8$ における吹出しの場合 (図8), ノズル流出面近くでは、吹出し効果が作用して噴流軸 y_m/H は一度大気側にかたよる。それ以後は、側壁効果が再び作用しだして、 y_m/H は側壁側へ曲がる。そ

して、この場合の再循環領域は最も大きくなり、この領域内における U_m/U_0 の減少と b/H の増加の程度はゆるやかである。また、全領域における壁面静圧 C_{p0} の大きさとその変化の程度は最も小さい。

壁噴流領域における U_m/U_0 の減少と b/H および y_m/H の増加は、いずれの場合もほぼ同じで、その変化は第4報⁽⁴⁾に詳述したように、放射状壁噴流⁽⁷⁾と同様な変化を示す。

4. 結 論

以上に述べたように、本報は放射状噴流の側壁面へのわん曲と付着特性に及ぼすステップ高さおよび制御流量の影響を、速度と圧力場および可視化により検討したものである。

ステップ高さの大小と制御流量 (吸込みと吹出し) の組合せにより、ノズル流出面近くの噴流核および噴流軸は微妙に変化すること、それに応じて、それ以後の噴流軸のかたより、再循環流の中心の位置、側壁面への付着位置などが異なることを、等圧線図、流線図および可視化写真により確認した。

また、初期、再循環、遷移および壁噴流の四つの領域の大きさと、各領域における最大速度、噴流軸、噴流半値幅および壁面静圧の変化などと、ステップ高さおよび制御流量との関係を明らかにした。

文 献

- (1) 田中・ほか2名, 機論, 51-468, B (昭60), 2714.
- (2) 田中・ほか2名, 機論, 51-471, B (昭60), 3706.
- (3) 田中・ほか2名, 機論, 51-472, B (昭60), 4183.
- (4) 田中・ほか2名, 機論, 52-481, B (昭61), 3210.
- (5) 田中・田中, 機論, 41-351 (昭50), 3180.
- (6) 岡本・榎田, 機論, 47-419, B (昭56), 1207.
- (7) 田中・田中, 機論, 42-358 (昭51), 1849.