平行2円板流路内の放射状壁噴流の制御の研究*

(第1報, 壁噴流に及ぼす対向壁高さの影響)

田中敏雄^{*1}, 田中栄一^{*1}, 井上吉弘^{*1}

A Study on the Control of the Radial Wall Jet Through Two Parallel Disks (1st Report, Effect of the Opposite Wall Height on the Wall Jet)

Toshio TANAKA, Eiichi TANAKA, and Yoshihiro INOUE

This paper is concerned with the results of an experimental study on the control of a radial turbulent wall jet through two comparatively wide-spaced parallel disks. Distributions of mean velocity, turbulent velocity and wall static pressure were measured with the aid of a hot-wire anemometer and a disk-type pressure hole, respectively. The effect of the opposite wall height (distance of the opposite wall surface from the nozzle center plane) on the flow pattern through two parallel disks was investigated. The changes of the maximum jet center velocity, the jet half-width and the turbulence at the velocity maxima, and also the deflection of the jet center axis, depended mainly on the opposite wall height. Further, the limiting position in which the wall jet flow pattern might be maintained was examined.

Key Words: Turbulence, Radial Wall Jet, Parallel Disks, Opposite Wall Height, Hot-Wire Anemometer, Jet Center Axis, Recirculation Region

1. 緒 言

平行に置かれた2枚の円板間に流出する放射状流れに関する研究はこれまでに多くなされており^{(1)~(5)}, また, そのほか離現象を考慮した場合の流れおよび熱伝達を扱った研究もある⁽⁶⁾⁽⁷⁾. しかし, これらの研究はいずれも2円板の間隔が狭く, しかも流れがその間を満たして流出する場合に限られている. 比較的広い2円板間隔よりなる流路内に放射状に噴流が流出すると, 種々の条件により噴流はどちらかの壁面側に偏り, ついには壁面に再付着し, それ以後は壁面に沿って流れ(壁噴流), 前記の狭いすきま間の流れとは異なった現象を示す. 著者らは, これまでに円柱状ノズルより放射状に流出し, 側壁面に沿って流れる壁噴流⁽⁸⁾, ノズルに平行にオフセット状態に置かれた側壁面に付着する付着噴流⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を扱ってきた. その際, 側壁面に対向して他の壁面を置くと, 壁噴流あるいは付着噴流の特性は異なることが予想された.

本研究は, 円柱状ノズルの下端に接して置かれた側壁と, ノズルをはさんで平行にオフセット状態に置か

れた対向壁からなる比較的広い間隔の平行2円板流路内に, 側壁面に沿って放射状に壁噴流(主噴流)を流出させ, この主噴流に側壁側から直角に別の流れ(制御流)を付加し, 主噴流の対向壁側への偏向と両壁面への再付着現象を制御しようとするものである.

本報では, この内まず, 制御流のない場合について壁噴流に及ぼす対向壁高さの影響を調べる. 種々の対向壁高さについて, 流路内の平均速度と乱れおよび壁面静圧を測定する. そして, 流路内の速度分布と流れの方向, 噴流の最大速度とその点の乱れ, 噴流半値幅および噴流軸などの変化を求め, これらの結果より, 壁噴流の存在する限界位置についても検討する.

本論文で用いた主な記号は次のとおりである. なお図1に座標系と主な記号の定義を示す.

b : 噴流半値幅 (y 方向速度分布において側壁面より $u/U_m=0.5$ の点までの距離)

B : 対向壁高さ (ノズル中央面から対向壁面までの距離)

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

D : 円柱状ノズルの外径

L : ノズル幅

p_0, p_a : 対向壁面の静圧, 大気圧

u : x 方向に測った平均速度

* 昭和62年4月3日 第64期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年11月18日.

*¹ 正員, 岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1).

- u_i : 速度 u の最大値 U_m を示す点の乱れ成分
 U_0 : 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 : ノズル流出面からの半径距離
 x_c : 壁噴流の存在限界位置
 y : 側壁面からの鉛直距離
 y_m : 側壁面から最大速度 U_m までの距離 (噴流軸)

2. 実験装置および方法

円柱状ノズルの形状をはじめ主要な実験装置は、前報⁽¹⁾と同じであるので、その説明は省略する。

平均速度および乱れ速度成分の測定には $\phi 5 \mu\text{m}$ のタングステン線を張った熱線流速計を使用した。また、壁面静圧は半円板形静圧孔⁽¹²⁾により求めた。熱線あるいは静圧孔はサーボモータを使用した自動送り装置により、半径方向 x およびこれに垂直な y 方向へ送られ、その出力と移動距離 (x 方向に 0.5 mm , y 方向に 0.2 mm 間隔) は記録計に同時に記録される。

本実験における円柱状ノズルの外径 $D=90 \text{ mm}$ と幅 $L=6 \text{ mm}$ および噴流のノズル流出速度 $U_0 \approx 40 \text{ m/s}$ は前報の結果⁽¹⁾をもとにして、それぞれ一定とした (ノズルレイノルズ数は $U_0 L / \nu \approx 1.6 \times 10^4$ に対応する。ここで、 ν は空気動粘度)。対向壁高さ B とノズル幅 L の比 B/L (この値をこれ以後対向壁高さという) は 5~40 に種々変えた。なお、側壁および対向壁の円板の外径は、ともに 830 mm であり、したがって、両壁面の長さ (ノズル流出面からの長さ) とノズル幅 L との比は約 61.5 である。

本実験の前に、対向壁面のない場合のノズル近くの流れと乱れの分布を測定して、通常の (単純な) 壁噴流特性を検討し、また、ノズル軸まわりの流れの軸対称性は保たれていることを確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 速度分布の下流方向変化と流れの方向

図 2 (a)~(c) は、それぞれ対向壁高さ $B/L=20, 10$ お

図 1 座標系と主な記号

および 8 における流路内の速度分布の下流方向変化と、タフト法により求めた流れの方向を示す。

流路幅の広い場合には [図 2 (a), $B/L=20$], 側壁面側の噴流の速度分布は、流路の出口近くの領域まで ($x/L \leq 50$), 単純な壁噴流 ($B/L \rightarrow \infty$ に対応) とほぼ同じ分布形をなす。一方、対向壁側には、噴流の誘引作用のため、全断面にわたって外部からの流入によるノズル流出面方向に向かう流れが存在する。ただし、この流入速度は小さく、速度分布は正確に測定できなく、流れの方向のみを図示してある。

流路幅が狭くなると [図 2 (b), $B/L=10$], $x/L \leq 40$ の領域における側壁面側の噴流の速度分布は $B/L=20$ の場合の分布とほぼ同じであるが、 $x/L=50, 60$ の断面における噴流の速度分布は平坦になる (噴流とはいえなくなる)。一方、対向壁近くには、ほぼ全断面にわたって噴流の誘引作用による逆流がみられる。ただし、流路の出口断面 ($x/L=60$) の対向壁近くの逆流の程度は小さく、また、少しの外乱によりここでの流れの方向が変化する不安定な状態であることがタフト法により観察された。

流路幅がより狭くなると [図 2 (c), $B/L=8$], 流路の出口近くでは ($x/L=50, 60$), 流路の高さ全体にわたって外向きの流れが存在し、対向壁近くにおいても、外部からの流入はみられない。一方、 $x/L \leq 40$ の領域の対向壁側には逆流がみられ、この領域 (閉じた再循

(a) $B/L=20$

(b) $B/L=10$

(c) $B/L=8$

図 2 流路内の速度分布と流れの方向

環領域)に再循環流が存在する。

以上、図 2 (a)~(c)は $B/L=20, 10, 8$ の測定例であるが、他の B/L に対する結果も含めて、本実験の範囲内では、対向壁高さ $B/L=10$ を境にして、流路内の流れの状態が異なることが明らかになった。

3.2 対向壁面の静圧の変化 流路内の圧力場を検討するために、側壁面および対向壁面の静圧を測定したが、側壁面上の静圧の値は単純な壁噴流と同様小さく、また、その分布に大きな変化はみられなかった。

図 3 は対向壁高さ $B/L=5\sim40$ における対向壁面の静圧 C_{p0} の下流方向変化を示したものである。

流路幅の広い場合には ($B/L=40, 20$)、流路の長さ全体にわたって ($x/L < 60$) 外部からの流入に伴い、壁面静圧 C_{p0} は負となるが、その値はほぼ一定であり、しかも小さい。

流路幅が狭くなると ($B/L=10$)、 C_{p0} は下流方向に若干変化するが、流路の出口付近 ($x/L \approx 60$) では、大気圧に漸近し、外部からの流入が少なくなる傾向を示す [図 2 (b) 参照]。

流路幅がより狭くなると ($B/L=8, 6, 5$)、 C_{p0} は下流方向へ大きく変化する (この壁面静圧の下流方向への変化は、ノズルに平行にオフセット状態に置かれた側壁面に付着する付着噴流の分布⁽⁹⁾に類似している)。すなわち、各 B/L に応じて対向壁近くの領域に逆流の存在を示す低い壁面静圧 (負圧) がみられる。この負圧の最低を示す位置付近に再循環流の中心が存在するものと予想される⁽⁹⁾。

3.3 最大速度、乱れおよび噴流半値幅の変化 図 4、図 5 は、対向壁高さ $B/L=5\sim40$ における、最大速度 U_m/U_0 、最大速度点の乱れ u'_i/U_0 および噴流半値幅 b/L の下流方向変化を示す。

流路幅の広い場合には ($B/L=40$)、 U_m/U_0 、 u'_i/U_0 および b/L とも、それぞれ単純な壁噴流 ($B/L \rightarrow \infty$ に対応) とほぼ同じ単調な下流方向変化を示し、とくに十分発達した下流位置では ($x/L \geq 20$)、 U_m/U_0 は $(x/L)^{-1.09}$ に比例して減少し、一方、 b/L は $(x/L)^{0.98}$ に比例して増加する⁽⁸⁾ (図 4、5 においてそれぞれ破線にて示す)。

図 3 対向壁面の静圧の変化

しかし、流路幅が狭くなるにつれて、各値は下流方向位置において、単純な壁噴流とは異なる変化をなす。すなわち、図 2 に示した流路内の速度分布の変化にみられたように、それぞれの B/L に応じた下流位置において、噴流は流路の高さ全体にわたる流れに移り変わり、したがって、最大速度 U_m/U_0 は急激に減衰し、逆に、噴流半値幅 b/L は急激に増加し、もはや壁噴流ではなくなる傾向にある。

3.4 噴流軸の変化 速度分布より求まる最大速度 U_m の側壁面からの距離 y_m の位置 (噴流軸とする) を、対向壁高さ B/L について x - y 面上に示したものを図 6 に示す。図に示されるように、噴流軸 y_m/L の下流方向変化は三つの領域に分けられる。まず、ノズル近くの領域では (B/L に応じた $x/L \leq 6\sim10$)、 y_m/L は、一度、側壁 ($y_m/L=0$) 側に偏る傾向にある。それ以後、単純な壁噴流と同じように y_m/L は下流方向にほぼ直線的に増加する。しかし、下流の位置において (B/L に応じた $x/L \approx 20\sim50$)、 y_m/L は直線からはずれ、急激に増加し、ついには噴流軸の存在がみられなくなる。

図 4 最大速度と乱れの変化

図 5 噴流半値幅の変化

図 6 噴流軸の変化

以上における、噴流軸 y_m/L が直線からはずれる位置（これは図 4 および図 5 において、最大速度 U_m/U_0 および噴流半値幅 b/L が単純な壁噴流の変化からはずれる位置にも対応する）を、壁噴流の存在する限界位置と定義し、その x 方向の位置 x_c/L と対向壁高さ B/L との関係を示したものが図 7 である。図に示されるように、壁噴流の存在限界位置 x_c/L は対向壁高さ $B/L=10$ を境にして異なった変化をなす。この傾向は、3・1 節に述べた $B/L=10$ を境にして流路内の流れの状態が異なることに対応する。

4. 結 論

比較的広い間隔の平行 2 円板よりなる流路内に流出する、放射状壁噴流に及ぼす対向壁高さの影響を調べ、本実験の範囲内で以下の結果を得た。

(1) 対向壁高さ $B/L=10$ を境にして、流路内の流れの状態は異なる。流路幅の広い場合 ($B/L>10$)、噴流の誘引作用により対向壁側には全断面にわたって外部からの流入がある。それに対し、流路幅が狭くなると ($B/L<10$)、流路の出口近くでは、外部からの流入はなくなり、ノズル近くの対向壁側には逆流がみられ、この領域（閉じた再循環領域）に再循環流が存在する。この傾向は、対向壁面の静圧の下流方向変化からも確認された。

(2) 噴流の最大速度とその点の乱れおよび噴流半

図 7 壁噴流の存在限界位置

値幅の変化は、流路幅が狭くなるにつれて、下流位置において、単純な壁噴流とは異なる変化をなす。すなわち、各 B/L に応じた下流位置において、最大速度は急激に減衰し、逆に、噴流半値幅は急激に増加し、もはや壁噴流ではなくなる傾向にある。

(3) 噴流軸の下流方向変化は三つの領域に分けられるが、各 B/L に応じた下流位置において、噴流軸は直線（単純な壁噴流と同様な）からはずれ、急激に増加し、ついには噴流軸の存在が見られなくなる。

(4) 噴流の最大速度と半値幅および噴流軸の変化から求めた壁噴流の存在する限界位置は、対向壁高さ $B/L=10$ を境にして異なった変化をする。

文 献

- (1) Woolard, W. H., *Trans. ASME, Ser. E*, 24-1 (1957), 9.
- (2) 石沢, 機論, 30-219 (昭 39), 1301.
- (3) 石沢, 機論, 31-224 (昭 40), 535.
- (4) 川口, 機論, 36-288 (昭 45), 1341.
- (5) Rall, J. D., *J. Fluid Mech.*, 85-3 (1978), 401.
- (6) 望月・矢尾, 機論, 49-438, B (昭 58), 426.
- (7) 望月・平岡, 機論, 52-478, B (昭 61), 2425.
- (8) 田中・田中, 機論, 42-358 (昭 51), 1849.
- (9) 田中・田中, 機論, 43-372 (昭 52), 2985.
- (10) 田中・田中, 機論, 44-377 (昭 53), 74.
- (11) 田中・田中, 機論, 41-351 (昭 50), 3180.
- (12) 田中・ほか 2 名, 機論, 51-471, B (昭 60), 3706.