平行 2 円板流路内の放射状壁噴流の制御の研究* (第 3 報, 主噴流の偏向と壁面への再付着)

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 (3rd Report, Deflection of Main Jet and Reattachment to a Wall Surface)

Toshio TANAKA, Eiichi TANAKA, and Yoshihiro INOUE

This paper presents the results of an experimental study on the control of the deflection and reattachment of a radial wall jet through comparatively wide spaced two parallel disks, with an additional control flow. The flow field may be considered as having properties including those of the deflected jet, reattached jet and wall jet. The effects of opposite wall height (distance of opposite wall surface from the nozzle center plane) and control flow rate (ratio of control flow rate to main jet flow rate) on the flow pattern near the nozzle outlet section were investigated. The velocity profile, shape and length of a jet potential core, and the deflection of a jet center axis depend mainly on the combination of the opposite wall height and the control flow rate.

Key Words: Turbulence, Radial Wall Jet, Parallel Disks, Opposite Wall Height, Control Flow Rate, Jet Potential Core, Jet Center Axis, Recirculating Flow Region

1. 結 言

本研究は放射状壁噴流の偏向と壁面への再付着に関するものである。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)を流出させる。この主噴流に、側壁側にあけられたノズルと同心円状の環状スリットから直角に別の流れ(制御流れ)を衝突させ、主噴流の偏向と側壁面あるいは対向壁面への再付着現象を制御し、側壁面の全面あるいは一部分に沿って流れる壁噴流を形成しようとするものである。このような側壁を有する噴流による流れの場合は、ノズル近くの再循環流領域、再付着点近くの領域および再付着点以後の領域に分けられ⁽¹⁾、これは偏向噴流⁽²⁾、付着噴流⁽³⁾および壁噴流⁽⁴⁾の性質を含んだ流れとなる。前報⁽⁵⁾においては、側壁面と対向壁面の静圧および流路内の静圧分布を測定し、主噴流の側壁面に再付着する範囲、主噴流の側壁面への再付着位置とそこでの圧力および流路内の圧力などに及ぼす対

向壁高さ B/L と制御流量 Q_c/Q_0 の影響を調べた。そして、側壁面への再付着位置は、 B/L にはほとんど影響されず、 Q_c/Q_0 のみに依存し、しかもその変化は $Q_c/Q_0 \geq 0.3$ により異なる傾向を示すことを明らかにした。

本報では、対向壁高さと制御流量を種々変化させた場合の流路内の平均速度と乱れ成分を測定し、まずノズル流出口での主噴流の偏向角、および噴流核の形状、噴流軸の変化あるいは逆流をともなう再循環流領域内の流れの状態などを明らかにする。

本論文で用いた主な記号はつぎのとおりである。なお、図 1 に座標系と主な記号の定義を示す。

B/L : 対向壁高さ (ノズル中央面から対向壁面までの距離 B とノズル幅 L との比)

L : 円柱状ノズルの幅

Q_c/Q_0 : 制御流量 (制御流れのスリット出口での流量 Q_c と主噴流のノズル流出口での流量 Q_0 の比とする)

R : 噴流軸線の曲率半径

u, u' : x 方向に測った平均速度, 乱れ成分

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 : ノズル流出面からの半径距離

* 昭和 62 年 10 月 2 日 北陸信越支部信越地方新潟講演会において講演, 原稿受付 昭和 62 年 3 月 18 日.

*¹ 正員, 岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸 1-1).

- y : 側壁面からの鉛直距離
 y_1, y_2 : 側壁面から噴流核の内縁, 外縁までの距離
 y_m : 側壁面から最大速度 U_m までの距離 (噴流軸)
 θ : ノズル流出口での主噴流の偏向角 (ノズル中央面と噴流軸線とのなす角)
 ϕ : 無次元流れ関数 [式 (1)]

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, 前報告⁽⁶⁾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は, I 形熱線プローブ (受感部は, 直径 $5\mu\text{m}$, 長さ 1mm のタングステン線よりなる) を用いた熱線流速計により測定した。熱線はサーボモータを使用した自動送り装置により, 側壁面に垂直な y 方向へ送られ, その出力と移動距離 (0.2mm 間隔) は記録計に同時に記録される。なお, 熱線プローブは, 受感部の長さ方向が x 方向に垂直になるように設置し, 平均速度と乱れの x 成分を測定した。ただし, 逆流領域における流速と方向は, タフト法による流れの方向の観察結果を参考にして決めた。

実験条件も前報⁽⁵⁾とほぼ同じである。円柱状ノズルの幅 $L=6\text{mm}$ および主噴流のノズル流出速度 $U_0=40\text{m/s}$ は前報告の結果⁽⁶⁾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 $U_0 L/\nu=1.6\times 10^4$ に対応する。ここで, ν は空気動粘度)。対向壁高さ B/L は $6\sim 40$, また, 制御流量 Q_c/Q_0 は $0\sim 0.5$ に変えた。本実験においては, この制御流量 Q_c/Q_0 をパラメータの一つとして使用したが, スリット出口とノズル出口の面積はほぼ等しいので, Q_c/Q_0 はスリットとノズルからの流出速度比, あるいは流出運動量比の平方根にほぼ対応する。

3. 実験結果および考察

3.1 速度, 乱れの変化 ノズルから流出した主噴流がスリットからの制御流れの付加により, 側壁面からどのように偏向するか, あるいは制御流量 Q_c/Q_0 により下流方向にいかに変化するかを調べるために, 断

図 1 座標系と主な記号

面内の平均速度 u/U_0 , 乱れ u'/U_0 を測定した。

図 2 は対向壁高さ $B/L=10$ の場合において, 制御流量 $Q_c/Q_0=0.3, 0.5$ (それぞれ側壁面および対向壁面に再付着する例) に対する流路内の速度, 乱れの分布の下流方向変化を示したものである。

制御流量 $Q_c/Q_0=0.3$ の場合 (●印), ノズル流出口近くの領域 ($x/L\leq 4$) では, 主噴流と制御流れの衝突により, 速度 u/U_0 は側壁面と反対側に若干かたよった分布形となり, また, 乱れ u'/U_0 は二つの極大値と一つの極小値をもつ分布形をなす。これより下流では, 噴流は再び側壁側にわん曲し, 側壁面に再付着する。そして, $x/L\geq 10$ では, u/U_0 は側壁面近くで最大値をもち, 一方, u'/U_0 は側壁面近くと噴流の外縁近くで極大値をもつ, それぞれ通常の壁噴流と同じ分布形⁽⁷⁾となる。ここで, $2\leq x/L\leq 6$ の範囲の断面の側壁面 ($y/L=0$) 近くには, $u/U_0<0$ となる逆流領域 (再循環流領域) が存在し, この領域内の圧力 (負圧) と噴流の外側の圧力との差により, 一度対向壁側へかたよった主噴流は再び側壁面側にわん曲する (コアンダ効果)⁽⁸⁾。

制御流量が多い $Q_c/Q_0=0.5$ の場合には (○印), 速度 u/U_0 , 乱れ u'/U_0 の分布とも下流方向に複雑に変化する。ノズルのすぐ近くの領域 ($x/L\leq 2$) では, 主噴流に制御流れが合体し, 速度 u/U_0 はノズル流出速度より大きくなる ($u/U_0>1$) 傾向にある。そして, $x/L<10$ の領域では, 速度 u/U_0 は x/L の増加とともに対向壁側に大きくかたより, これに応じて乱れ u'/U_0 の極

(a) 速度分布

(b) 乱れ分布

($B/L=10$)

図 2 速度と乱れ分布の下流方向変化

大および極小となる位置とも対向壁面側に移り、 $10 < x/L < 12$ の位置にて噴流は対向壁面に再付着する。その後、 $x/L \geq 12$ では噴流は対向壁面に沿って流れる。ここで、 $4 \leq x/L \leq 10$ の領域の対向壁面側には $u/U_0 < 0$ となる再循環流領域が存在している (ただし、 $x/L < 4$ の領域の逆流は小さく、ここでの速度分布は測定できなかった)。一方、 $x/L \geq 2$ の領域の側壁面側にも逆流が存在するが、これは噴流の誘引作用による流路外からの流れであり、この逆流を示す範囲は下流方向に広がっている。

なお、流れが正から負に変わる領域付近の速度と乱れの分布は正確に求められないので、図 2 におけるその領域の分布は破線にて示した。

3.2 流線図 図 2 に示したような速度分布より流線図が求まる。放射状噴流における流量比で表される無次元流れ関数 ψ をつぎのように定義する。

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

ここで、 r はノズル中心軸からの半径距離、 D はノズルの直径である。流れ関数 ψ の値は、側壁面 ($y=0$) を基準にとり、速度分布を図式積分して求めた。

図 3, 4 は対向壁高さ $B/L=10$ の場合の、それぞれ $Q_c/Q_0=0.3, 0.5$ における流線図を示す (ただし、図 4 における対向壁面側の ψ' は対向壁面を基準にして得られた流れ関数の値である)。図 3, 4 には、またタフト法により求めた流れの方向も示す。

制御流量 $Q_c/Q_0=0.3$ の場合 (図 3)、 $x/L < 6$ の領域

図 3 流線図

図 4 流線図

の側壁面近傍に $\psi < 0$ となる再循環流領域 (比較的小さな) がみられる。一方、対向壁面側には、噴流の誘引作用による流路外からノズル流出面方向に向かう流れが存在する (ただし、この領域での流れは弱く、流線図は求まらず、タフト法による流れの方向の観察結果を示してある)。

制御流量の多い $Q_c/Q_0=0.5$ の場合には (図 4)、ノズル流出面近くにおいて、噴流は対向壁面側へ大きくかたよっていることが、 ψ の流線よりわかる。そして、噴流は $x/L \approx 10$ の位置にて対向壁面に再付着し ($\psi' = 0$ の流線の延長線が対向壁面と交わる位置)、それ以後対向壁面に沿って流れる。ここで、 $x/L < 10$ の領域の対向壁面側には $\psi' < 0$ となる再循環流領域 (比較的大きな) がみられる。一方、 $x/L > 5$ の側壁面側には、噴流の誘引作用による流路外からノズル流出面方向に向かう流れが存在する。このようにして、流線図とタフト法による流れの方向の観察結果により、側壁面近くあるいは対向壁面側における定性的な再循環流の存在が確認された。

以上の図 2~4 は、 $B/L=10$ の場合の $Q_c/Q_0=0.3$ および 0.5 における例であるが、他の B/L および Q_c/Q_0 についても同様な傾向を示す。

3.3 噴流核と噴流軸の変化 ノズル近くの領域におけるノズル流出速度 U_0 が維持されている部分の

図 5 噴流核と噴流軸の変化

側壁面からの距離 y_1, y_2 を求め、それらの下流方向変化より噴流核が求まる。図5は対向壁高さ $B/L=10$ を例にして、制御流量を $Q_c/Q_0=0\sim0.5$ に変化させた場合の噴流核の形状(○印, 実線)を示す(図5には、 $Q_c/Q_0=0.1$ の場合を例にした噴流核の内縁と外縁の位置 y_1, y_2 を示す)。

制御流量がない場合($Q_c/Q_0=0$)は、通常の壁噴流⁽⁷⁾に対応し、噴流核は側壁面($y/L=0$)側に若干かたよった形状をなし、その大きさは $x/L \approx 3.5$ となっている。

制御流れを付加すると、その大きさに応じて噴流核は変化する。制御流量が $Q_c/Q_0=0.1\sim0.4$ では、噴流核はノズル流出面近くで対向壁面側にかたより、その先端近くで側壁面の存在によるコアング効果が作用し、再び側壁面側に曲がる傾向を示す。一方、制御流量の多い $Q_c/Q_0=0.5$ においては、噴流核は対向壁面側に大きくかたよる。ここで、制御流量 Q_c/Q_0 が多くなるにつれて噴流核は短くなる傾向にある。

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 $x-y$ 面上に示したものを図5に示す(●印, 破線)[ただし、噴流核領域内の y_m は、 $y_m=(y_1+y_2)/2$ の位置と定義する]。前述した噴流核の変化と同様、噴流軸 y_m/L は Q_c/Q_0 に応じて変化する。制御流量が $Q_c/Q_0=0.1\sim0.4$ の場合には、噴流軸 y_m/L はノズル流出面近くで対向壁側にかたよった後、大きな曲率半径の円弧状にて側壁側にわん曲する(側壁面の存在によるコアング効果による)。一方、 $Q_c/Q_0=0.5$ の場合には、噴流軸 y_m/L は、 $x/L < 5$ の範

囲では対向壁側にほぼ直線的に変化し、それ以後曲線的に対向壁側にわん曲し、ついに噴流は対向壁面に再付着する(図4および後述の図8参照)。

図6は比較的流路幅の狭い例としての、対向壁高さ $B/L=8$ における噴流軸 y_m/L の制御流量 Q_c/Q_0 による変化を示したものである。制御流量 $Q_c/Q_0=0.1\sim0.4$ においては、噴流軸 y_m/L は、ノズル流出面近くでは直線的に変化し(その長さは Q_c/Q_0 により異なる)、それ以後ほぼ円弧状にて側壁面側にわん曲している。一方、制御流量の多い $Q_c/Q_0=0.5$ においては、噴流軸 y_m/L は、 $x/L \leq 4$ の領域では直線的に変化するが、それ以後は大きな曲率半径の円弧状にて対向壁側にわん曲し、噴流は対向壁面に再付着し、 $x/L > 10$ では対向壁面に沿って流れる。

図7は制御流量 $Q_c/Q_0=0.4$ (側壁面に再付着する例)において、対向壁高さ B/L を $40\sim8$ に変えた場合の噴流軸 y_m/L の変化を示したものである。この範囲の対向壁高さ B/L では、 B/L にもかかわらず噴流軸 y_m/L の変化はほぼ1本の曲線で表される。そして、噴流軸 y_m/L は、ノズル流出面近くで直線的に変化する領域①、直線よりはずれ側壁面側に円弧状にわん曲する領域②、および円弧よりはずれ下流側に曲がり側壁面に沿う領域③、の三つの領域に分けられる(図7に各領域の境界を示す)。

図8は制御流量 $Q_c/Q_0=0.5$ (対向壁面に再付着する例)において、対向壁高さ B/L を $20\sim6$ に変えた場合の噴流軸 y_m/L の変化を示したものである(図8の斜線部は各 B/L に対する対向壁面を意味する)。いずれの B/L においても、ノズルから流出した噴流は制御流れにより対向壁側に偏向させられるが、ノズル近くでは噴流軸 y_m/L は直線的に変化する。その後、噴流軸は対向壁に近づくにつれてその直線から離れ、大きな

図6 噴流軸の変化

図7 噴流軸の変化

図8 噴流軸の変化

図 9 ノズル流出口での主噴流の偏向角

図 10 噴流軸の曲率半径の変化

曲率半径の円弧状にて対向壁側にわん曲する(対向壁側でのコアンダ効果による)。そして、噴流は対向壁面に再付着した後、対向壁面に沿って流れる。

なお、前報⁽⁵⁾に示したように、 $0.4 < Q_c/Q_0 < 0.5$ の範囲における流れは不安定であり(流れが側壁側あるいは対向壁側のいずれにもかたよる)、この範囲の流れの状態は求められなかった(図 5, 6)。

3・4 主噴流の偏向 図 5~8 に示したように、どの B/L および Q_c/Q_0 においても、噴流軸 y_m/L はノズル流出面近くでは直線的に対向壁側にかたよるが、この直線の傾きを主噴流の偏向角 θ と定義する。

図 9 はノズル流出口での主噴流の偏向角 $\tan \theta$ に及ぼす対向壁高さ B/L および制御流量 Q_c/Q_0 の影響を示したものである。対向壁高さ B/L による $\tan \theta$ の変化を示す図 9 (a) によると、各 Q_c/Q_0 に対して、 B/L にかかわらず $\tan \theta$ はほぼ一定となり、対向壁高さはノズル流出口での主噴流の偏向角にほとんど影響を及ぼさない。これは、対向壁高さは側壁面への再付着位置にはほとんど影響を及ぼさないという前報の結果⁽⁵⁾に一致する。一方、制御流量 Q_c/Q_0 による $\tan \theta$ の変化を示す図 9 (b) によると〔この $\tan \theta$ は、図 9 (a) における各 B/L による平均値〕、 $Q_c/Q_0 \leq 0.4$ の範囲では、 Q_c/Q_0 の増加とともに $\tan \theta$ は直線的に増加する⁽²⁾。

図 10 は、図 5~8 に示した噴流軸 y_m/L の変化にみ

られる、領域Ⅱの円弧状にわん曲する噴流軸の曲率半径 R/L と B/L および Q_c/Q_0 の関係を示したものである。対向壁高さ B/L による R/L の変化を示す図 10 (a) によると、各 Q_c/Q_0 に対して、 B/L にかかわらず R/L はほぼ一定となり、対向壁高さは噴流軸の曲率半径 R/L にもほとんど影響を及ぼさない。一方、制御流量 Q_c/Q_0 による R/L の変化を示す図 10 (b) によると〔この R/L は、図 10 (a) における各 B/L による平均値〕、 $Q_c/Q_0 < 0.3$ の範囲では、 Q_c/Q_0 の増加につれて R/L は減少し、 $Q_c/Q_0 = 0.3$ において R/L は最も小さくなる。この Q_c/Q_0 は、前報⁽⁵⁾において示した側壁面への再付着位置での圧力が最大となる値にほぼ等しい。

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の、ノズル近くの流れに及ぼす対向壁高さおよび制御流量の影響について調べ、本実験の範囲内で以下の結果を得た。

(1) 各対向壁高さおよび制御流量により異なるものの、流線図とタフト法による流れの観察により、側壁面近くあるいは対向壁面側における定性的な再循環流の存在が確認された。

(2) 主噴流のノズル流出口での偏向角 $\tan \theta$ は、対向壁高さ B/L にはほとんど影響されなくて、制御流量 Q_c/Q_0 のみに依存する。

(3) 噴流が側壁面に再付着する場合 ($Q_c/Q_0 \leq 0.4$)、各 Q_c/Q_0 に対する噴流軸 y_m/L は、 B/L にかかわらず 1 本の曲線で表され、三つの領域に分けられる。そのうち、領域Ⅱの円弧状にわん曲する噴流軸の曲率半径 R/L は、 $Q_c/Q_0 = 0.3$ において最も小さくなる。

(4) 制御流量の多い $Q_c/Q_0 = 0.5$ の場合には、いずれの B/L においても、噴流軸 y_m/L は、対向壁側にかたより、対向壁面に近づくにつれて大きな曲率半径の円弧状にて対向壁側にわん曲する(対向壁側でのコアンダ効果による)。そして、噴流は対向壁面に再付着した後、対向壁面に沿って流れる。

文 献

- (1) 馬淵・ほか 2 名, 機論, 39-319 (昭 48), 920.
- (2) 岡本・榎田, 機論, 47-419, B (昭 56), 1207.
- (3) Sawyer, R. A., *J. Fluid Mech.*, 9-4 (1960), 543.
- (4) Glauert, M. B., *J. Fluid Mech.*, 1-6 (1956), 625.
- (5) 田中・ほか 3 名, 機論, 53-493, B (昭 62), 2709.
- (6) 田中(敏雄)・田中(栄一), 機論, 41-351 (昭 50), 3180.
- (7) 田中(敏雄)・田中(栄一), 機論, 42-358 (昭 51), 1849.