放射状付着噴流の制御に関する研究*
(第3報, 再付着点までの流れ)

田中 敏雄**, 田中 栄一**, 井上 吉弘***

Study on Control of Radial Attaching Jet Flow
(3rd Report, Flow before Reattachment Point)

by Toshio TANAKA, Eiichi TANAKA, and Yoshihiro INOUE

This paper describes an experimental investigation on the control of a radial turbulent jet flow reattached to an adjacent offset disc plate with an additional control flow. Mean velocity and turbulent velocity distributions were measured with the aid of a hot-wire anemometer, and the effects of step height and control flow rate (ratio of control flow to main jet flow, suction and blowing) on the flow before reattachment point were investigated. The results were compared with those obtained from the pressure distributions. Changes of the maximum jet center velocity, jet half width and turbulence at velocity maxima, and also deflection of the jet center axis, depend on the combination of the step height and control flow rate.

Key Words: Turbulence, Radial Jet Flow, Control Flow Rate, Step Height, Recirculation Region, Reattachment Point, Jet Center Axis

1. 結 言

本研究は、円柱状ノズルから放射状に流出し、ノズルに平行にオフセット状態に置かれた側壁円板に付着する主噴流に、ノズルと同心円状のスリットから別の流れ(吸込みと吹出しの制御流)を付加し、噴流の側壁面への付着現象を制御しようとするものである。このような側壁面へ付着する流れの場合は、再循環領域(再付着点までの逆流領域)、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⁾、各領域における流れの状態は異なる。前報⁽²⁾においては、壁面静圧および噴流内の静圧分布を測定し、主に再循環領域内の平均圧力、再循環流の中心の位置および側壁面への付着位置などを求め、これらは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、これに続き噴流内の平均速度と乱れ成分を測定し、再付着点までの流れの状態を特徴づける噴流軸上の最大速度とその点の乱れおよび噴流半値幅の下流方向変化、あるいは噴流軸のかたよりなどにおよぼすステップ高さや制御流量の影響を明らかにし、圧

力分布より求めた結果と比較した。

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 : 噴流半値幅(再付着点までは、 y 方向速度分布において $u/U_m=0.5$ を示す点間距離、再付着点以後では、壁面より $u/U_m=0.5$ の点までの距離)

H/L : ステップ高さ

q/Q : 制御流量(スリットから再循環領域内の流れへの吹出しを正、吸込みを負とする)

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'_i : 速度 u の最大値 U_m を示す点の乱れ成分

U_m : y 方向に測った断面における速度 u の最大

図1 座標系と主な記号

* 昭和60年10月26日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和60年4月22日。

** 正員、岐阜大学工学部(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

*** 准員、岐阜大学工学部。

値

x_c, y_c : 再循環流の中心の位置の x, y 座標

x_m : 噴流半値幅 b の極大値を示す位置の x 座標

x_n : 最大速度 U_m の極小値を示す位置の x 座標

x_s : 噴流の側壁面への付着位置の x 座標

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

実験装置については第1報⁽³⁾におけると同じであるので、説明は省略する。平均速度および乱れ成分の測定には $\phi 5 \mu\text{m}$ のタングステン線を張った熱線風速計を使用した。熱線は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は同時に記録される。実験条件も前報⁽²⁾⁽³⁾とほぼ同じで、ステップ高さは $H/L=2\sim 10$ 、制御流量は $q/Q=-1.0$ (吸込み) ~ 0.6 (吹出し) に変えた。

3. 実験結果および考察

3.1 速度、乱れの y 方向分布 図2はステップ高さ $H/L=6$ 、制御流量 $q/Q=0.4$ (吹出し) における噴流内の速度 u/U_0 、乱れ u'/U_0 の分布を x/L の異なる断面について求めた結果である。速度 u/U_0 の分布に

図2 速度、乱れの分布

図3 最大速度の変化

示されるように、噴流軸 (u/U_0 最大点) は吹出しの作用のため $x/L=9$ までは一度大気側 ($y/L>6$) にかたより、その後壁面 ($y/L=0$) 側に近づく。そして $x/L=20$ 付近で噴流は壁面に付着している。この付着点までの断面で u/U_0 が負となっている部分があるが、これは噴流の誘引作用により壁面と噴流との間の空間に循環流が生ずるためである。

つぎに乱れ u'/U_0 の分布によれば、ノズル近くの噴流の両端面に対応した速度こう配 du/dy の大きい位置において u'/U_0 は二つの極大値をもち、一方、速度 u/U_0 が最大となる位置において極小値をもつ。

3.2 最大速度、噴流半値幅および乱れの下流方向変化 図3~5はそれぞれステップ高さ $H/L=6$ における噴流軸上の最大速度 U_m/U_0 、噴流半値幅 b/L および最大速度点の乱れ u'_m/U_0 の下流方向 x/L への変化を、制御流量 q/Q をパラメータとして示したものである。各図には比較のため放射状自由噴流の結果⁽⁴⁾ (これは $H/L \rightarrow \infty, q/Q=0$ と対応) を破線①にて示す。自由噴流の各値はともに下流方向に単調に変化するのに対し、付着噴流のそれらは複雑な変化をする。

各制御流量 q/Q に対して、最大速度 U_m/U_0 はノズルから下流に向かってははじめ急減少するのに対し、噴流半値幅 b/L は急激に増加し、ある位置で U_m/U_0 は

図4 噴流半値幅の変化

図5 乱れの変化

極小, b/L は極大となる (この位置は側壁面への付着位置にほぼ対応し, ここまでが再循環領域となる). この位置より下流では, U_m/U_0 は増加し, 逆に b/L は減少し (加速領域), ある位置で U_m/U_0 は極大, b/L は極小となる (噴流の縮流点). これ以後各 q/Q に対して, U_m/U_0 は $(x/L)^{-1}$ に比例して減少し, b/L は x/L に比例して増加する. この U_m/U_0 , b/L の変化は, 吸込みが強い (q/Q が小さい) ほど激しく, また, 噴流の付着点および縮流点はともに q/Q が小さくなるにつれ, ノズル流出面に近づく.

図5に示す最大速度点の乱れ u'_i/U_0 は, ノズル流出面近くでは下流方向に増加し, 各 q/Q について図3に示した最大速度 U_m/U_0 の減衰の著しい位置 ($x/L \approx 4 \sim 9$) にて極大となる. そしてこれまでの領域の乱れ u'_i/U_0 は自由噴流の値よりかなり大きい. これより下流では, u'_i/U_0 は下流方向に減少する.

以上の図3~5は, $H/L=6$, $q/Q=-0.8 \sim 0.6$ における U_m/U_0 , b/L , u'_i/U_0 の結果であるが, 他の H/L , q/Q についても同様な傾向を示す.

図3より求まる最大速度 U_m/U_0 が極小となる位置の x 座標 x_n/L とステップ高さ H/L の関係を, 制御流量 q/Q をパラメータとして示すと図6のようになる. 各 q/Q に対して, H/L の増加につれ x_n/L は増加するが, その変化は H/L と q/Q の組合せにより異なる. ステップ高さの小さい $H/L < 6$ の場合, 吸込み ($q/Q < 0$) においては側壁効果に吸込作用が加わり, H/L の減少につれ x_n/L は急激に減少する. 一方, 吹出し ($q/Q > 0$) においてはその作用のためたとえ H/L が減少しても x_n/L は減少しにくい傾向を示す. しかし, ステップ高さの大きい $H/L \geq 6$ の場合には, 各 q/Q に対して x_n/L と H/L の関係は, 制御流のない場合 (図6中の○印) と同じ傾向で変化する. そして, これらの変化は前報⁽²⁾において示した壁面静圧が最大

値を示す位置の H/L , q/Q による変化と同じ傾向である.

つぎに図4より噴流半値幅 b/L が極大となる位置の x 座標 x_m/L を求めると, 各 q/Q に対する x_m/L と H/L の関係は図6に示した x_n/L と H/L の関係とほぼ同じになる. そこでその値をステップ高さ H/L にて再整理した x_m/H と制御流量 q/Q の関係を, H/L をパラメータとして示すと図7のようになる. 各 H/L に対して, 吸込みが強くなる (q/Q が小さくなる) につれ x_m/H は減少し, 一方, 吹出しが強くなる (q/Q が大きくなる) につれ x_m/H は増加するが, その変化の程度は吸込みにおけるより著しい. ここで, 図6, 7に示す x_n , x_m の値を比較すると x_n に比べて x_m の値は若干小さく (図3, 4), そしてこの x_m の値は前報⁽²⁾に示した壁面静圧が最大値を示す値 (側壁面への付着位置に対応) にほぼ等しい.

3.3 噴流軸線 速度 u の分布より求まる最大速度 U_m の位置を x - y 面上に示すと噴流の中心線 (噴流軸線) が得られる. ステップ高さ $H/L=6$ における噴流軸線 y_m/L の制御流量 q/Q による変化を図8に示す. 各噴流軸線 y_m/L は側壁面側にわん曲するが, 図中に示すように q/Q に応じて次の三つの領域に分けられる (各領域の境界を一点鎖線にて示す).

領域①: ノズル流出面近くの領域で, y_m/L は直線的に変化する (この領域の大きさと q/Q , H/L の関係は, ノズル近くの流れを扱った第1報⁽³⁾参照).

図7 噴流半値幅が極大値を示す位置

図6 最大速度が極小値を示す位置

図8 噴流軸線の q/Q による変化

領域Ⅱ: y_m/L は直線よりはずれ、側壁面側に円弧状にわん曲する。

領域Ⅲ: y_m/L の小さいところ、すなわち付着点近くで、 y_m/L は円弧よりはずれ下流側に曲がる。

これらの三つの領域の大きさは、吸込みが強くなる (q/Q が小さくなる) につれノズル面に近づく。

図9は制御流量 $q/Q=0.4$ (吹出し) ~ -0.8 (吸込み) に対する噴流軸線 y_m/H の x/H 方向への変化を、ステップ高さ H/L をパラメータとして示したものである。各 q/Q に応じて、 y_m/H は前述した三つの領域に分けられ、そしてステップ高さのとくに大きい $H/L \geq 8$ においては、 y_m/H はほぼ同一の曲線で表される。また、吹出し ($q/Q=0.4$) においては、すべての H/L に対して y_m/H はノズル近くの領域 ($x/H < 2$) では一度大気側 ($y_m/H > 1$) にかたよっている。

いま図8, 9に示されるような領域Ⅱにおける円弧状の噴流軸線の曲率半径 R/H の制御流量 q/Q による変化を各ステップ高さ H/L について示すと図10のようになる。吸込み ($q/Q < 0$) においては、すべての H/L に対して R/H の q/Q による変化は比較的小さく、吸込みが強くなる (q/Q が小さくなる) につれ R/H はほぼ直線的に減少する。一方、吹出し ($q/Q > 0$) においては、各 H/L に対して q/Q の増加につれて R/H は急激に大きくなり、その程度は H/L が小さいほど激しい。そして $q/Q > 0.6$ の強い吹出しにおいて

図9 噴流軸線の H/L による変化

図10 噴流軸線の曲率半径の変化

は、すべてのステップ高さ H/L に対して前報⁽²⁾にて詳述したように、噴流は側壁面へ付着しなくなる。ここで、ステップ高さのとくに大きい $H/L \geq 8$ においては、 R/H はほぼ同一の曲線で表され、この傾向は図7に示した x_m/H と q/Q の関係によく似ている。

3.4 流線図 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。

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

ここで、 r はノズル中心軸からの半径距離である。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11~13はステップ高さ $H/L=6$ の場合の、それぞれ $q/Q=0, -0.4, 0.4$ における流線図を示す (縦軸の $y/H=1$ はノズル中央面に対応する)。いずれの場合においても、噴流は側壁側へわん曲し、付着点 ($\psi=0$ の流線の延長線が側壁面と交わる点) より上流側に $\psi < 0$ となる逆流領域が形成されている。そしてこの領域内には ψ が最小となる再循環流の中心が存在し、吸

図11 流線図 (制御流なし)

図12 流線図 (吸込み)

図13 流線図 (吹出し)

図 14 再循環流の中心と側壁面への付着位置

込み (図 12) ほどこの位置はノズル面に近づき、また ψ の最低値も低く、再循環流が強いことを示している。吹出し (図 13) においては、ノズルからの主噴流にスリットからの制御流がノズル近くで衝突し⁽³⁾⁽⁵⁾、その後両者は合流した状態となり、その流れは一度大気側へかたより、それ以後大きな曲率半径の円弧状にて側壁側へわん曲し、側壁面に付着する。

3.5 再循環流の中心の位置および側壁面への付着位置 流線図より求まる再循環流の中心の位置 ($x_c/H, y_c/H$) および側壁面への付着位置 x_s/H と $H/L, q/Q$ との関係を図 14 にそれぞれ実線、破線にて示す。各 H/L に対して、 x 方向の位置 $x_c/H, x_s/H$ と同じような変化をし、吸込みが強くなる (q/Q が小さくなる) につれ $x_c/H, x_s/H$ は減少するのに対し、吹出しが強くなる (q/Q が大きくなる) につれてそれらはともに増加し、その増加の程度は吸込みにおけるより著しい。ここで、 x_s/H の q/Q による変化は図 7 に示した噴流半値幅が極大値を示す位置 x_m/H の q/Q による変化に似ている。つぎに、 $q/Q < 0.4$ の範囲においては、 q/Q にかかわらず $y_c/H \approx 0.5$ となる (再循環流の中心の位置の y 座標はステップ高さの半分の位置にある)。しかし、 $q/Q \geq 0.4$ においては、 q/Q の増加につれて x_c/H が急激に増加すると同時に、 $y_c/H > 0.5$ となり、そして 3.3 節においても述べたように、 $q/Q > 0.6$ の強い吹出しにおいては、本実験

の大きな側壁円板では噴流は側壁面へ付着しなくなる。この ($x_c/H, y_c/H$) および x_s/H は、それぞれ前報に示した圧力分布より求めた再循環流の中心の位置および側壁面への付着位置によく一致している。

4. 結 言

放射状付着噴流の再付着点までの流れにおよぼすステップ高さと制御流の影響を調べ、次の結論を得た。

(1) 最大速度が極小となる位置 x_n/L および噴流半値幅が極大となる位置 x_m/L (側壁面への付着位置あるいは再循環領域の大きさに対応) は、いずれもステップ高さ H/L の大小と制御流量 q/Q の組合せにより異なる。ステップ高さの小さい $H/L < 6$ の場合、吸込みにおいては側壁効果に吸込作用が加わり、 H/L の減少につれ $x_n/L, x_m/L$ は急激に減少するのに対し、吹出しにおいてはその作用のためたとえ H/L が減少しても $x_n/L, x_m/L$ は減少しにくい傾向を示す。ステップ高さの大きい $H/L \geq 6$ の場合には、各 q/Q に対して $x_n/L, x_m/L$ と H/L の関係は制御流のない場合と同じ傾向で変化する。

(2) 噴流軸線の円弧の曲率半径 R/H は、吸込みにおいてはすべてのステップ高さ H/L に対して、吸込みが強くなるにつれ直線的に減少するのに対し、吹出しにおいては吹出しが強くなるにつれ急激に大きくなり、その程度は H/L が小さいほど激しい。そして、 $q/Q > 0.6$ の強い吹出しにおいては、すべての H/L に対して噴流は側壁面へ付着しなくなる。

(3) 流線図より求めた再循環流の中心の位置 ($x_c/H, y_c/H$) および側壁面への付着位置 x_s/H は、いずれも圧力分布より求めた結果によく一致する。

文 献

- (1) 馬淵・ほか 2 名, 機論, 39-319 (昭 48), 920.
- (2) 田中・ほか 2 名, 機論, 51-471, B (昭 60-11), 3706.
- (3) 田中・ほか 2 名, 機論, 51-468, B (昭 60-8), 2714.
- (4) 田中・田中, 機論, 41-351 (昭 50), 3180.
- (5) 岡本・榎田, 機論, 47-419, B (昭 56), 1207.