

負荷が付着噴流に及ぼす影響

門脇重道*・上野五郎**・大坂英雄*・山田英巳***・下村一郎****

The Effect of Load on Reattached Jet

Shigemichi KADOWAKI Goro UENO, Hideo OSAKA,
Hidemi YAMADA and Ichiro SHIMOMURA

Abstract

Effects of load on the flow field of wall attachment devices were investigated. From this detailed measurements it was made clear that there were two types of the flow field—the wall reattached flow and the splitter-wall reattached flow. A discussion about such a flow field was made from the results of the velocity distribution and pressure distribution.

From the results mentioned above, we offered one method to clarify the relationship between the geometric shape of Device and the change pattern of flow field.

1. まえがき

純流体素子は、可動部分を有さずに流体の噴射機構のみを利用して流体の流れを制御する制御機器の総称である。制御口やベントを持たない側壁付着形素子については、素子出力口より加えられる負荷による付着流の切換え特性が特に重要な制御要素の一つである。

従来、負荷の影響を素子内の流れ場の変化としてとらえた研究¹⁾は少なく、それらと素子の特性との関連もあまり明らかではない。さらに流体力学的な側面から、コアンダ効果に及ぼす流れ場の特性²⁾のみならず、流れ場自身の解明も興味ある問題であり、また、方向制御弁への応用といった実用上に関する問題からも重要な側面を持っている。そこで著者らは、側壁付着形素子の付着噴流に及ぼす負荷の影響を、速度および圧力分布による流れ場の観点から研究した。すなわち、素子に加えられた負荷の状態と流れ場の関連を種々の幾何形状の素子を用いて調べると、負荷の影響の仕方は素子の形状によって決まることがわかった。また、切換え特性は、メモリー様式を除くと、主噴流が

側壁付着の状態からスプリッタ付着の状態に変化する場合および側壁付着の状態を維持する場合の二種の流れ場の変化様式によって異なることを明らかにした。

主な記号

B : ノズル幅

D : オフセット量

H : スプリッタ距離

α : 側壁傾斜角

R : 負荷の程度 ($R = \Delta/\delta$; Δ はダクト幅, δ はダクト出口幅)

X : オフセット面から側壁に沿った距離

X_{RO} : 付着点距離

X_R : 側壁最高圧力点距離

S : 噴流中心線に沿った距離

U_S : ノズル出口速度

U_{max} : 噴流中心線上の速度

P : 局所圧力

P_s : ノズル出口総圧

P_t : 総圧

P_∞ : 静水圧

C_p : 圧力係数 $C_p = (P - P_\infty) / (P_s - P_\infty)$

C_v : 速度係数 $C_v = \sqrt{\{(P_t - P) / (P_s - P_\infty)\}}$

* 機械工学科

** 徳山工業高等専門学校

*** 大学院機械工学専攻

**** 三菱重工業K. K.

2. 実験装置および実験方法

本研究で従来から行なわれている方法にしたがい、モデル素子を水槽に沈めて実験を行なった。作動流体である水はヘッドタンクから一定圧力で供給される。水槽は静水圧を一定に保つオーバーフロー形式で、素子をサブマージ状態に保っている。図1にモデル素子の形状および主要寸法を示す。素子はアクリル樹脂で作られ、その上下がゴム板のパッキンを介してアクリル板ではさまれている。実験は、ノズル幅を代表長さ

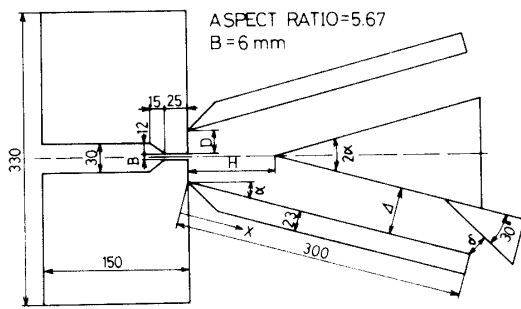


Fig. 1 Experimental apparatus

とした R_e 数を 16×10^3 にして、側壁傾斜角が 7.5° , 10° , 12.5° , 15° , 22.5° の5種類、またオフセット D/B が 2, 4, 6 の3種類について、スプリッタ距離を任意に変化させて行なった。側壁圧力は、側壁中心深さに設けられた $\phi 1$ の測定孔を水柱マンメータに接続して測定を行ない、圧力係数 C_p で示した。上板静圧は、上板にあけた $\phi 1.5$ の測定孔からとり出した測定圧力と静水圧との差圧を差圧計へ導き求めた。これも側壁圧力と同様に C_p で整理した。速度は、回転円筒ピトー管³⁾を用いて素子中心深さにおける総圧を測定して、その局所位置に対応した上板静圧との差より計算し、この値をノズル出口速度で無次元化した速度係数 C_v で示した。負荷は、三角形の負荷用絞り板を素子の附着側ダクト下流より挿入し、ダクト出口幅を変化させることにより加えた。負荷の程度を示す量として $R = \Delta/\delta$ を用いた。附着点の距離 X_{RO} は、直径 1.0 mm の管の先端に取りつけた糸を側壁に沿って附着点近傍に挿入し糸のふれの中立位置より決定した。

3. 結果および考察

3.1 一般特性

はじめに負荷の影響を考慮しない場合、スプリッタを有する一般的な側壁附着形素子に関して最も基本的

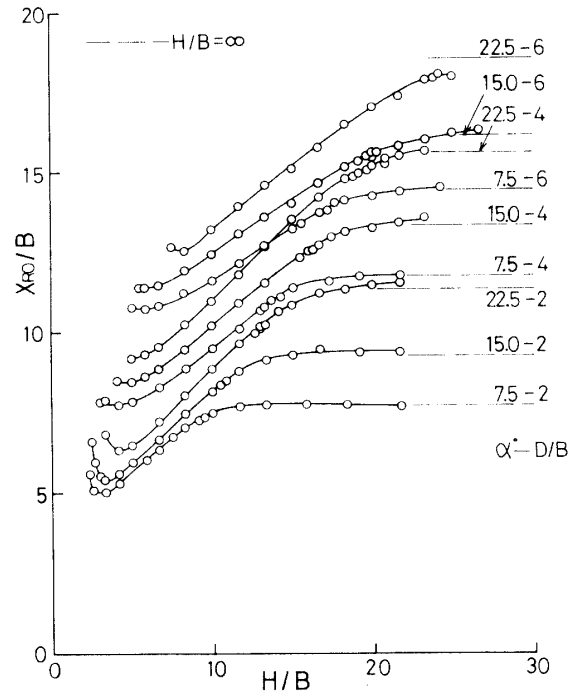


Fig. 2 Relationship between X_{RO}/B and H/B

な素子の特性である附着点の変化について述べる。図2は、附着点距離に対してスプリッタの影響が現われるような比較的小さい H/B の範囲において、スプリッタ距離に対する附着点距離の関係を示している。これによると、 D/B および α が一定の場合には、附着点距離は H/B の増加とともに増加している。このことは、 H/B と α が一定で D/B が増加したとき、あるいは H/B と D/B が一定で α が増加したときにも、同様である。これらのことを考え合わせると、ダクト幅 Δ を増加させるような素子の形状因子の変化は附着点を下流へ移動させる傾向がある。当研究室で行なわれてきた従来の実験⁴⁾ から、 H/B の増加に対する X_{RO}/B の値の変化は、側壁非附着領域、線形領域、遷移領域の過程を経て一定領域に漸近していくことが明らかにされてきたが、本実験の場合にもその傾向が確認された。特に一定領域について詳しくみると、 $H = \infty$ の場合の X_{RO}/B の値よりその値が大きくなる現象を生じ、さらにその後は $H = \infty$ での X_{RO}/B の値に漸近していくと考えられる。この現象は、線形領域や遷移領域においてスプリッタが低圧渦部を小さくするように作用する効果^{5), 6)} とは異なる。すなわち、スプリッタが無制限遠方より近づき附着点距離に初めて変化を与える場合、流路幅はそれほど狭くはなっておらず、上述のスプリッタの効果より、ダクト入口付近に生じている低圧部分と低圧渦部との干渉の方が優位に働き、附着点より下流の低圧部分と低圧渦部との差圧が減少

するため、噴流が下流側へ引っぱられて生じると考えられる。また、 H/B の小さい範囲においては X_{RO}/B がある最低値からふたたび大きくなる現象を生じている。この現象は α が一定の場合、 D/B の減少に伴ない顕著である。 X_{RO}/B の全測定は、噴流が一般の側壁付着の流動を示す範囲に限って行なったが、上述のふたたび増加の傾向を示す範囲は、噴流がスプリッタ壁に沿って流れる二安定状態を示す範囲と接近してしかも連続的につながっており、そのために生じた過渡領域の現象といえる。これらのことより、噴流が側壁付着の流動を示す全範囲において、スプリッタ位置の変化に対する付着点位置の変化は一つの曲線で表わされる連続的变化であり、先に述べた3つの領域もその曲線の一部であるとみなせる。図3は、付着点距離 X_{RO} と側壁圧力分布に示される最高圧力点距離 X_R との関係を、 $H=\infty$ を含めて種々のスプリッタ距離を媒介変数として示したものである。 X_{RO}/B と X_R/B の間には明らかにある比例関係が存在し、 D/B や α の値と無関係に、僅かではあるが常に付着点が側壁最高圧力点より上流にあることがわかる。このように

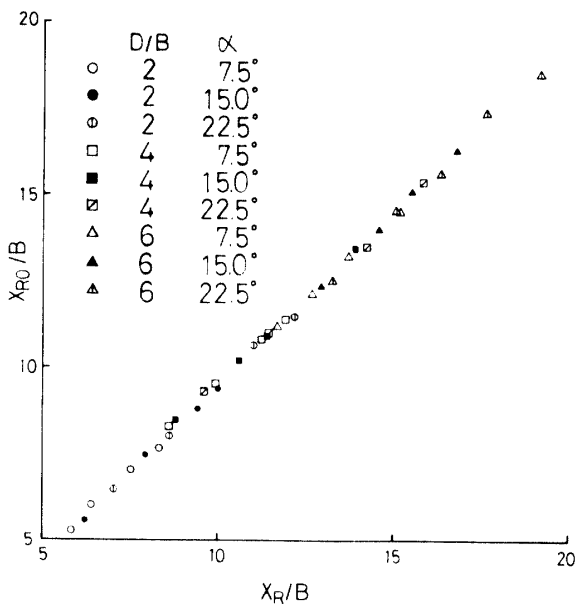


Fig. 3 Relationship between X_{RO}/B and X_R/B

X_{RO}/B と X_R/B との間に一定の関係が存在していることから、付着点を測定する装置等を素子内部に挿入することなく妥当な付着点の位置を推測することができる。

3.2 流動様式

図4(a), 図5(a)は負荷を加えない場合($R=0$)についてスプリッタを有する素子の代表的流れ場の速度分

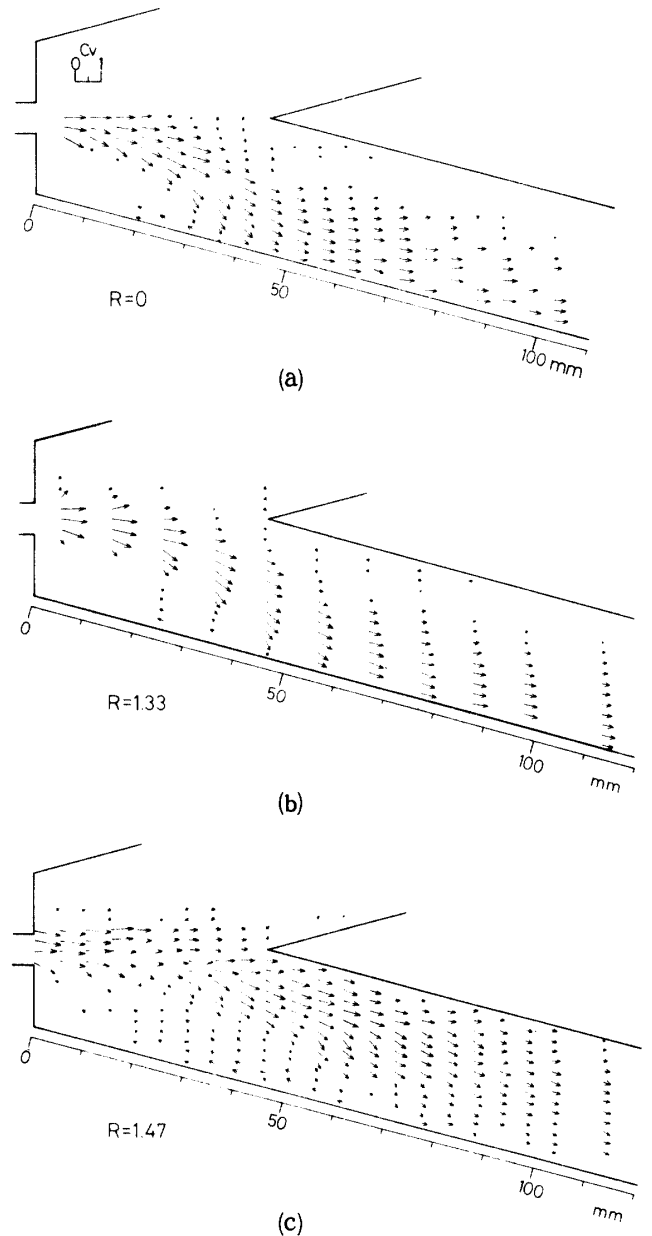


Fig. 4 Velocity distributions ($D/B=2, \alpha=15^\circ, H=45\text{mm}$)

布および静圧分布を示す。ノズルを出た噴流は、スプリッタの存在により急激に曲げられ側壁に衝突していることがわかる。側壁面についてみると、付着点を境にして噴流の一部が上流側へ逆流していく低圧渦領域と壁噴流となって下流へ拡散していく壁噴流領域とに分けられる。また、スプリッタ側壁面については、非付着側からの巻き込み流がスプリッタ先端をまわって供給され、スプリッタ先端付近にかなり広域の渦部を作っている。これをスプリッタ先端渦領域と呼ぶことにする。したがってこれら3つの領域で素子の付着側を代表することができる。図4,5の(b)は、 $R=1.33$ の負荷が加えられた場合で、背圧が上流へ伝播し素子内

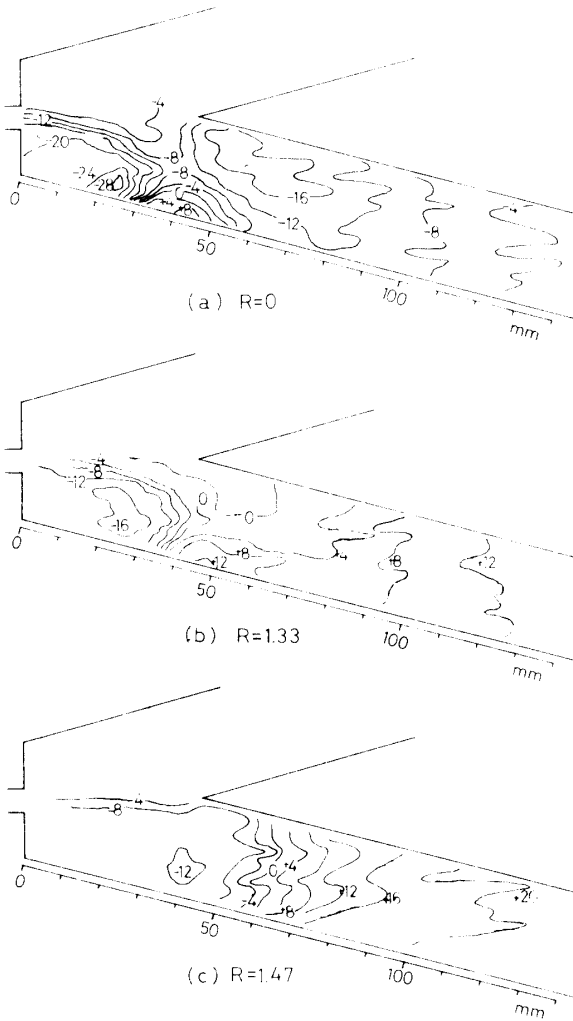


Fig. 5 Pressure distributions $C_p [\times 10^{-2}] (D/B=2, \alpha=15^\circ, H=45\text{mm})$

の付着側全体の圧力は著しく上昇している。この上昇の程度は、側壁圧力分布を表わしている図6において端的に現われているように、壁噴流領域で大きく低圧渦領域や最高圧力点付近ではそれほど大きくないことがわかる。

さらに、低圧渦領域はダクト入口付近にまで拡大し、それに伴ってスプリッタ先端渦領域は縮少している。

低圧渦部の圧力上昇と領域拡大は、噴流を側壁へ強制する力が弱まり噴流の衝突位置が下流に移動したことを示している。また、付着後の噴流の流れの方向についてみると、スプリッタ先端渦領域の縮少のため $R=0$ の場合と比較して、側壁に平行な壁噴流となるのが早いようである。これらのことはスプリッタの存在による影響と相反して関連しており、負荷はスプリッタの効果を弱めるように働くといえる。しかしながらこの負荷の状態における速度および圧力分布の全体の傾向は、数量的変化を除くと、無負荷の場合と同様である。さらに負荷を $R=1.47$ に増すと、図4、5の

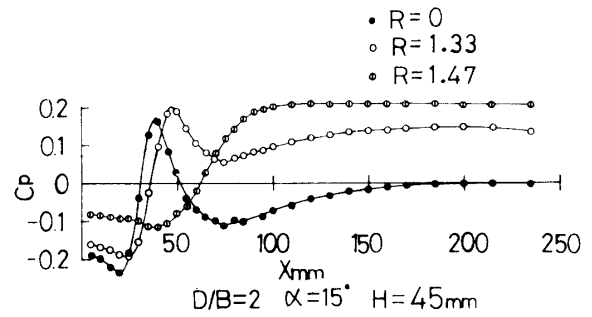


Fig. 6 Pressure distributions on a side wall

(c)のように、これまでの側壁付着の流動と全く異なってスプリッタに沿った流れを示す。この場合、主噴流はスプリッタの先端で一部分岐しているが、非付着側への分岐流はすべて巻き戻されており、非付着側ダク

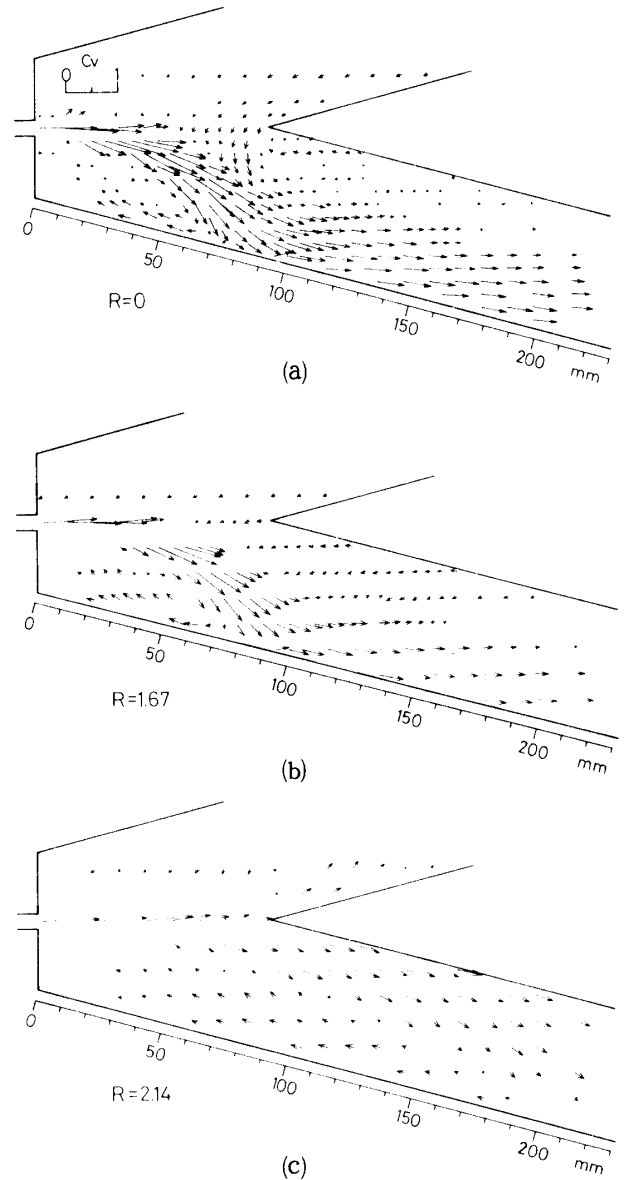


Fig. 7 Velocity distributions ($D/B=4, \alpha=15^\circ, H=90\text{mm}$)

ト出口からの溢流はないことを確認している。また、低圧渦領域は急激に拡大し、その圧力は図4の(b)の場合と比較して高くなっており(負の値が低くなる)、非付着側との圧力差は小さく、側壁付着の流動状態と比較するとその流れ場を維持する安定度は小さいものと考えられる。図6は、図4および図5で示した3つの流れ状態を側壁圧力分布で表わしたもので、便宜的に素子内の圧力分布の様子を観察するうえで都合がよい。

負荷の大きさが増すにしたがって、最高圧力点は連続的にその圧力を上昇しながら下流へ移動するが、ある程度移動した後一時停止する。この現象は図中からは判断できないが、実験観察を通して確認できたものである。この後、圧力分布の型は次の新たな段階、 $R=1.47$ のようなスプリッタ付着の流れを示す型へと急激に変化する。 X_R の負荷による移動量は、種々の

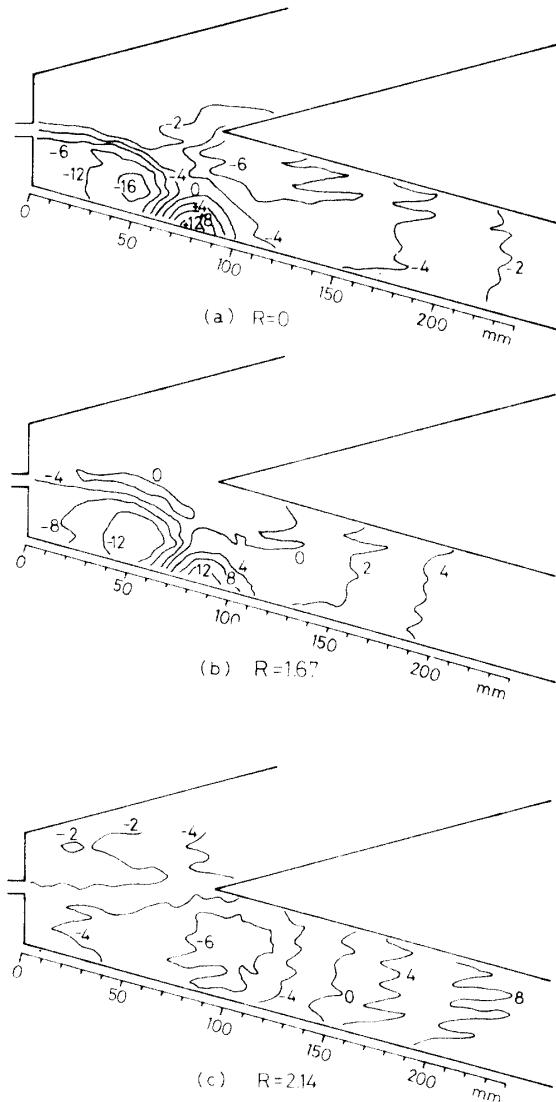


Fig. 8 Pressure distributions $C_p [\times 10^{-2}]$ ($D/B=4$, $\alpha=15^\circ$, $H=90\text{mm}$)

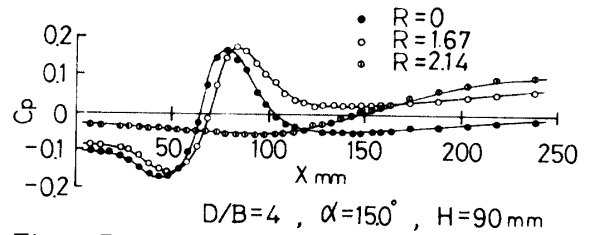


Fig. 9 Pressure distributions on a side wall

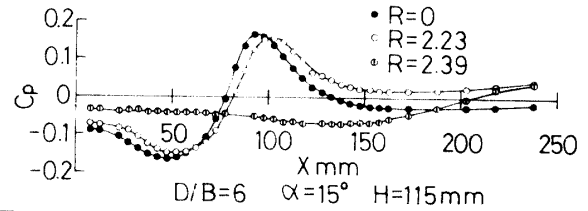


Fig. 10 Pressure distributions on a side wall.

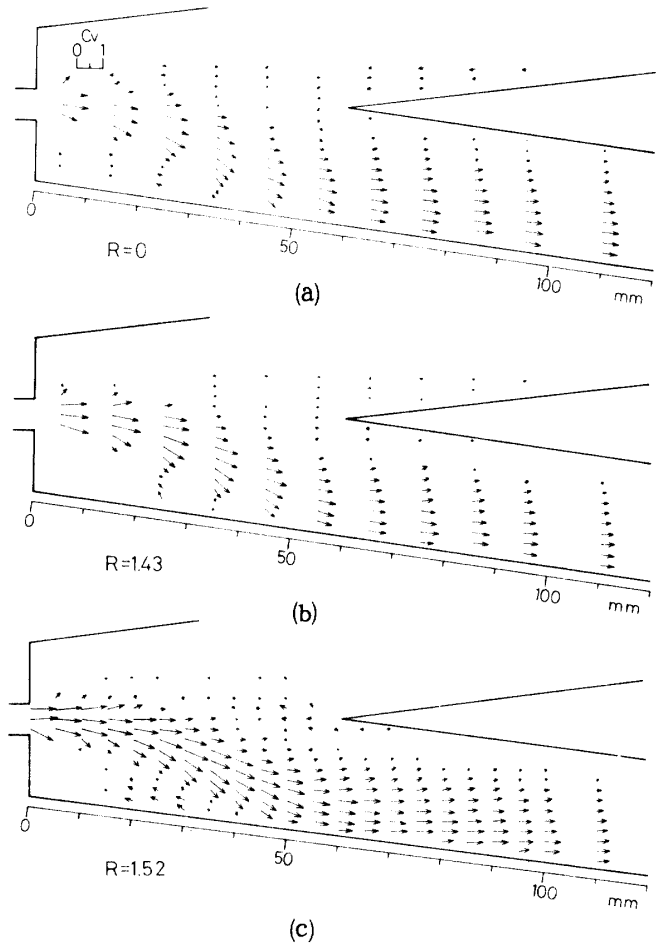


Fig. 11 Velocity distributions ($D/B=2$, $\alpha=7.5^\circ$, $H=60\text{mm}$)

形状の素子について調べると、一般的にスプリッタ距離が小さい場合ほど大きい。次にオフセットを4にした場合、すなわち素子の形状が $D/B=4$, $\alpha=15^\circ$, $H=90\text{mm}$ である場合について、その速度分布、上板静圧分布および側壁圧力分布をそれぞれ図7、図8お

よび図9に示す。前述の形状の素子と比較すると、噴流の拡散が早く速度も早く減衰する傾向はあるが、流れ場の変化様式はほぼ同様であり、負荷を大きくした $R=2.14$ ではスプリッタ付着流れを示している。図9の $R=2.14$ で示した型の圧力分布がこれに対応している。図10は、さらにオフセットが大きい素子 ($D/B=6$) についての側壁圧力分布の変化様式を表わしたものである。この素子の場合も負荷がある段階に達し例えば $R=2.39$ になると、図6の $R=1.47$ や図9の $R=2.14$ と同様の圧力分布を示すにいたる。したがって、 $D/B=6$ の場合にも前述の図4, 5, 7, 8の(c)に相当するスプリッタ付着の流れ状態が存在する。しかし、側壁の長さ 300 mm に対し、スプリッタ付着の流れになると、推測される付着点距離は側壁長さいっぱいまで

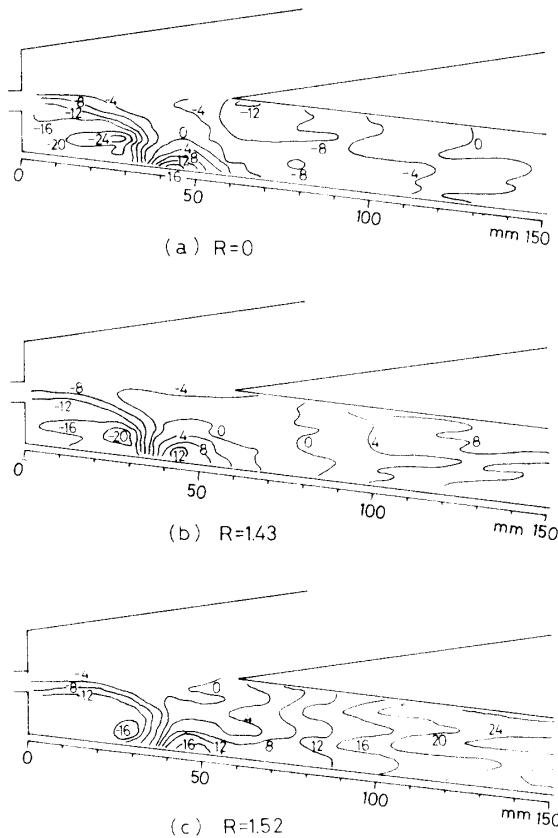


Fig. 12 Pressure distributions $C_p [\times 10^{-2}] (D/B=2, \alpha=7.5^\circ, H=60\text{mm})$

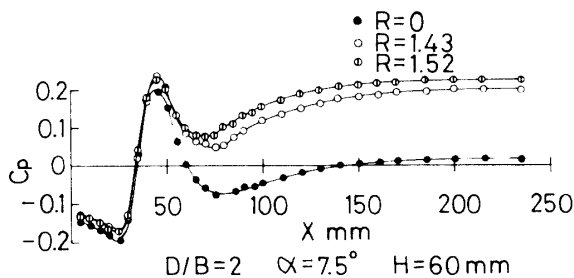


Fig. 13 Pressure distributions on a side wall

達し、実験範囲に対して側壁の長さが不十分であると考えられる。図11, 図12および図13は、その形状が $D/B=2, \alpha=7.5^\circ, H=60\text{mm}$ の素子における速度分布、上板静圧分布および側壁圧力分布である。図11, 12, 13の(a)から(b), (c)へと移る流れの状態の変化は、前述したすべての素子の内部流れが側壁付着の流れ状態を示す範囲では、全く同様の傾向にある。図12および図13によると、負荷による背圧の影響は壁噴流領域では大きい、低圧渦領域への影響としてはこれまでの場合と比較して非常に小さい。

また、低圧渦領域はあまり拡大せず、スプリッタ先端渦領域の減少も小さい。これらはスプリッタが比較的遠い位置にあるとき、付着点より上流の流れの状態は負荷によってほとんど変化しない¹⁾ ということを示唆するものと思われる。図11を詳細にみると、噴流中心線は示していないが、負荷の増加に伴って付着後の噴流の蛇行が大きくなっていくのがわかる。この現象はこれまでに示した場合にもみられるものであるが、その程度が大きくなるうちに、スプリッタ付着の流れ状態に変化してしまいあまり顕著ではなかったためと思われる。この形状の素子ではこのような不安定要素を増加させながらも側壁付着の流れ状態を維持し、スプリッタ付着の流れ状態を示すことはない。

3.3 噴流中心線流速

図14および図15は、噴流中心線上の流速の減衰の様子を、縦軸に噴流中心線流速 U_{max} 、横軸に噴流中心

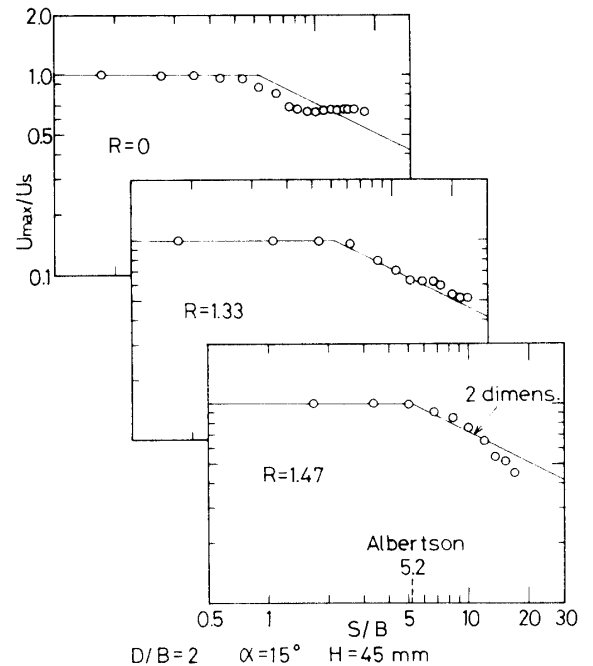


Fig. 14 The decay of maximum velocity for reattachment jet

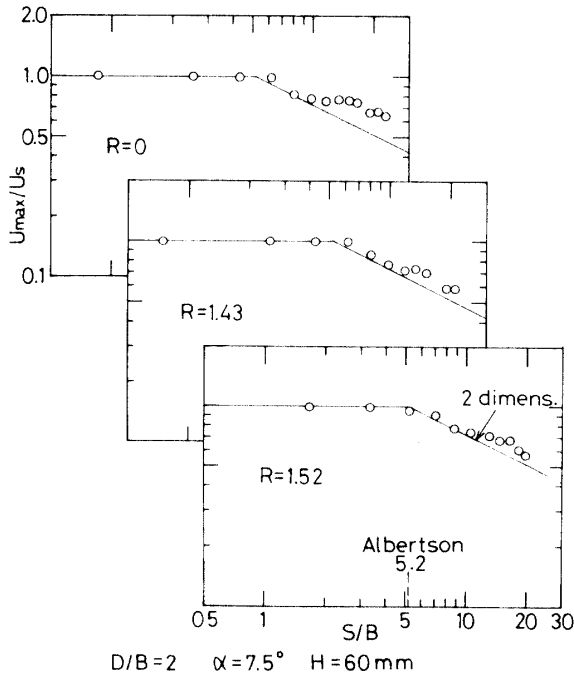


Fig. 15 The decay of maximum velocity for reattachment jet

線に沿った距離 S をとって両対数目盛で示したものである⁷⁾。図14は $R=1.47$ でスプリッタ付着の流れ状態を生じる素子、図15は側壁付着の流れ状態のみ示す素子の場合である。両図を比較すると、素子の形状や負荷の有無にかかわらず、側壁付着の流れ状態では同様の傾向を示している。たとえば発達領域の速度減衰過程の途中に、一時速度一定の部分が存在している。しかしながら、その傾向が現われる位置やその部分の範囲は、素子の形状や負荷の大きさによって異なっている。これは、噴流がダクト入口付近でスプリッタ先端渦と側壁にはさまれて速度の減衰が抑制され、そのち再び拡散減衰していくためと考えられる。図14の $R=1.47$ では速度の一定領域がみられない。この場合は、噴流がスプリッタ付着の流れ状態となっているため、スプリッタ先端渦による流路幅の減少がないためであろう。また、ダクトに入ると逆圧力勾配が大きくなり、速度の減衰が急激となる。

3.4 素子の形状と切替え様式

これまでに述べてきた速度および圧力分布の結果から、下流より負荷をうけた付着噴流は2種類の流れ場の変化様式を示すことがわかった。すなわち負荷によって噴流が切替わる過程に、切替え直前まで側壁付着の流れ状態を持続する様式と、スプリッタ付着の流れ状態を経て切替わる様式が存在することが明らかとなった。このような2通りの切替え様式の相異に対する素子の形状と噴流の流れ状態との関係を、オフセット

D/B と側壁傾斜角 α を一定にし、スプリッタ距離を素子形状の代表値、付着点距離を流れ状態の代表値として調べてみた。その結果の一例を図16に示す。測定点は無負荷の場合の X_{RO}/B を示すが、測定点の丸印の中の記号は、その位置にスプリッタがある場合の負荷による切替え様式を表わす。すなわち \odot はスプリッタ付着の流れ状態を経て切替わる様式、 \bullet は側壁付着の流れ状態から直接切替わる様式である。これより、

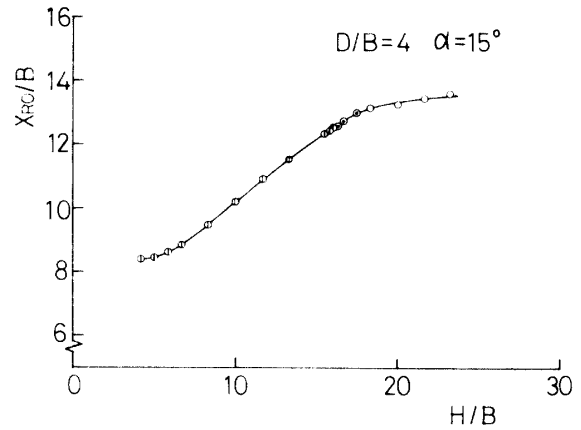


Fig. 16 Switching type for various values of splitter distance

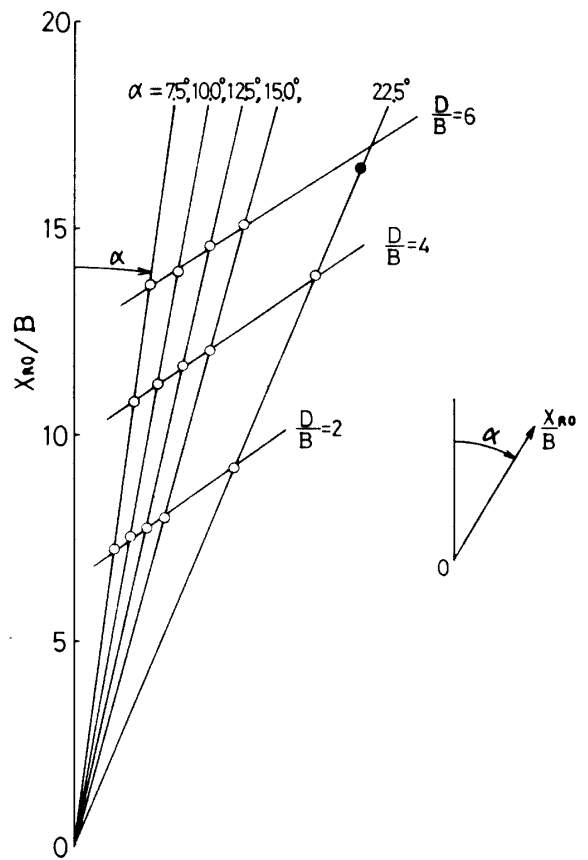


Fig. 17 Reattachment distances of critical line for two switchingtypes

$D/B=4$, $\alpha=15^\circ$ の場合の切換え様式を区別する境界のスプリッタ距離, あるいは付着点距離が得られることになる. 他の条件についても同様のことがいえる. このような測定を種々のオフセットや側壁傾斜角の場合について行なった.

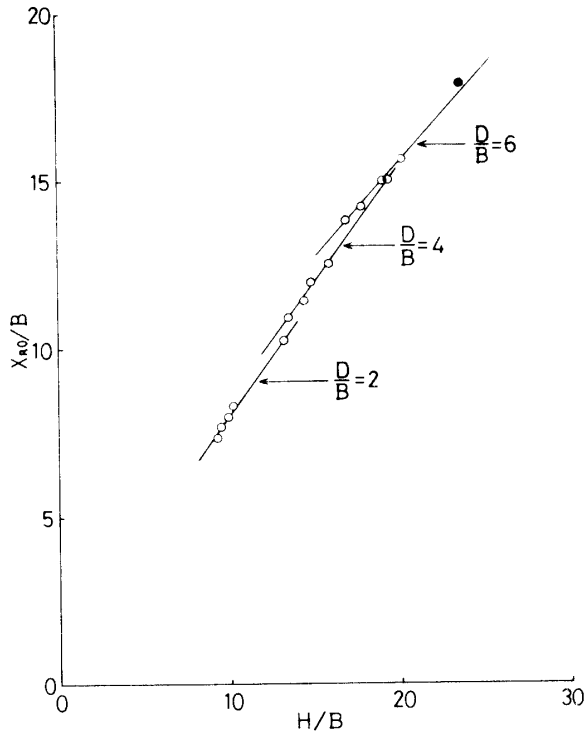


Fig. 18 Splitter distances of critical line for two switching types

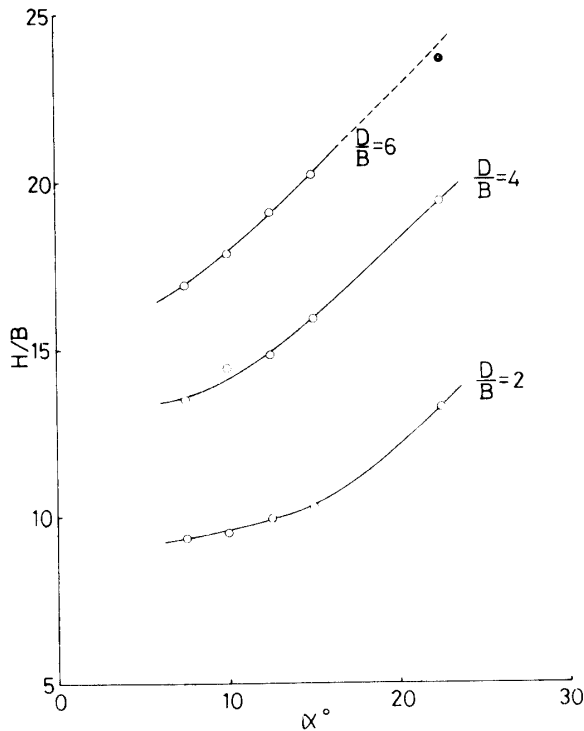


Fig. 19 Relationship between the geometrical shapes of Device and two switching types

合について行なった. それより得られた切換え様式の境界における X_{Ro}/B および H/B を, D/B および α について整理したものが図17および図18である. 図17は素子の形状を考慮して, 一種の極座標のように表わしたものである. 各オフセットについては側壁傾斜角の変化に伴った切換え様式の境界を示す無負荷での付着点は直線的に変化し, この直線の上部が側壁付着を維持して切替わる様式を示している. また, 切換え様式境界の付着点は素子の形状と関連が深いことがわかる. ただし, 図中の黒丸で示した点は, 本装置の適用限界を越えるものであるために区別しておいた. 図18の X_{Ro}/B と H/B の関係は, 本実験の範囲では, 図17に対応してそれぞれのオフセットについて直線関係にあるとみなせ, この場合は, 直線の下部(右側)が側壁付着を維持して切替わる様式を示している. したがって, オフセットと側壁傾斜角が既知の素子では, 図17より, 切換え様式を区別する付着点の位置を推測し, さらに図18より, それに対応して得られたスプリッタ位置と比較することにより切換えの様式が知られることになる. 以上のことから, 負荷による流れ場の変化の仕方は, 素子の幾何形状のみによって決定され, その切換え様式の境界線は図19のように素子の形状因子のみによって表わされる. 図中の各オフセットについて曲線の下側の領域が, スプリッタ付着の流れ状態を生じて切替わる様式を示す. 図17~19は, 主にスプリッタの連続的变化による測定によって得られた結果であり, 比較的小さいスプリッタの距離が生じることを示している. しかしながら図19からは, スプリッタを一定にしておいて他の形状因子である D/B あるいは α を連続的に変化した場合の結果も推測できる. すなわち, たとえばスプリッタ付着の流れを生じやすいのは, オフセットについてはその値が比較的小さい場合, また側壁傾斜角についてはその値が比較的大きい場合であることがわかる.

4. 結 論

側壁付着形純流体素子への負荷の影響について, 詳細な実験により, 特に流体力学的立場から流れ場に着目することにより, 次のことを明らかにした.

(1) スプリッタの相対的な位置によっては, 付着点より上流およびダクト入口付近の流れ状態は負荷のため変化する.

(2) 負荷は, 低圧渦部を小さくするようなスプリッタの一般的効果を弱めるように働く.

(3) 切換えに至るまでの流れ場の変化の仕方を切換えの様式として扱ると、メモリー様式以外に、2種類の切換え様式が存在する。すなわち、噴流が側壁付着の流れ状態からスプリッタ付着の流れ状態に変化して切替わる様式と、切換えの直前まで側壁付着の流れ状態を維持する様式である。

(4) 切換えの様式を区別する境界線は素子の幾何形状のみによって表わされる。したがって、一般的に、負荷による切換えの様式は素子の形状に起因している。

終わりに本研究の実験を遂行するに際し、協力をいただいた当時の卒研学生村上義博君（現朝日工業社）、ならびに委託生岡田行雄氏（東洋曹達）に感謝いたします。

文 献

- 1) 鬼頭幸三：機械学会論文集，41, 349, 2663 (1975)
- 2) C. Bourque & B.G. Newman: Aeron Quarterly, 11, 201 (1960)
- 3) 上野五郎，門脇重道，大江清登：山口大学工学部研究報告 24, 205 (1973)
- 4) 大江清登他：機械学会講演論文集，717-3, 109 (1971)
- 5) 和田力・清水頭：計測自動制御学会論文集，6, 3, 214 (1970)
- 6) 堀越長次・岡本哲史：機械学会論文集，36, 291, 1898 (1970)
- 7) 下村一郎：昭和49年度山口大学修士論文 (1975) p.100

(昭和51年10月15日受理)