

# 付着形素子の内部流れに及ぼす形状因子の影響

山田 英 巳\*・門 脇 重 道\*\*・大 坂 英 雄\*

## On the Effect of Shape Parameters on the Internal Flow in Wall Attachment Devices

Hidemi YAMADA, Shigemichi KADOWAKI and Hideo OSAKA

### Abstract

The effect of primary shape parameters, such as side wall angle, offset distance and splitter distance, on the internal flow in classical wall-attachment devices has been examined experimentally at a Reynolds number of  $16 \times 10^3$ . The results show how the reattachment distance, pressure distribution and velocity profile in the device are affected by the shape parameters. In particular, the influence of splitter distance was examined in detail. The reattachment distance decreases continuously from a value in the case of without a splitter to a minimum as the splitter distance decreases from the fully far downstream distance. In contrast, the maximum value of the reattachment distance becomes partially and slightly larger than that without a splitter. Thus, the effective range of splitter distance where the reattachment distance varies from the maximum equivalent almost to the value without a splitter to the minimum is determined as the range where the ordinary wall-reattachment flow pattern is directly affected by a splitter. It is shown that the effective range of reattachment and splitter distances nondimensionalized by the correctly defined upper-limit values becomes similar for all devices reported here.

### 1. 緒 言

流体素子は、強力な電磁気ノイズ等の環境下においても安定作動し、かつ可動部が少なく耐久性に優れた制御機器であり、その利用が見直されつつある。流体素子の中で最も基本的な構造をもつ側壁付着形流体素子の内部流れは、主に供給ノズルの幅とアスペクト比、側壁傾斜角、オフセット距離およびスプリッタ距離等の幾何学的形状因子に依存するといわれている。しかしながら、これまでの多くの研究において、スプリッタ位置の変化が素子内の付着噴流に及ぼす影響につい

て述べたものは少なく、わずかに堀越<sup>(1)</sup>、和田ら<sup>(2)</sup>により報告されている程度である。和田らは、スプリッタの存在が付着噴流に影響しはじめる位置を限界スプリッタ距離と呼び、スプリッタ距離がこれより大きい場合には再付着点近傍とその上流の流れはスプリッタのない場合と同様であるとして、非付着側に側壁のない実験モデルを用いて側壁傾斜角とオフセット距離に対する限界スプリッタ距離を求めた。しかしながら、その限界距離より小さいスプリッタ距離の場合における内部流れの特性についてはほとんど言及していない。一方、堀越ら<sup>(1)</sup>は対称な双安定型の付着形素子モデルを用いて、内部流れに及ぼす各種形状因子の影響について調べたが、側壁傾斜角の比較的大きい場合に主眼が置かれており、付着形素子における各種形状因子の影響を明らかにするにはまだ不十分である。また、各種形

\*機械工学科

\*\*徳山工業高等専門学校

形状因子の影響に関する系統的な結果は最近の素子内流れの数値解析<sup>(3)(4)</sup>を検証するための基礎資料としても重要であると考えられる。

以上の点を踏まえて、本実験では対称な付着素子を構成する基本的な形状因子である、側壁傾斜角、オフセット距離およびスプリッタ距離の変化が素子内流れに及ぼす影響を明らかにすることを試みる。

## 2. 実験装置および方法

実験に用いた側壁付着形流体素子は、ノズル部の幅が6 mm、アスペクト比が5、側壁長さが300mmの水を作動流体とするモデルで、主にアクリル樹脂で作られ、その上下が透明なアクリル板で挟まれ、一定水位を保つオーバーフロー形式の水槽中に設置されている。Fig. 1は素子モデルにおける流れ場の概要と記号を示す。

素子内の流れは、主にノズルの幅  $B$  とアスペクト比  $AR$ 、側壁傾斜角 (スプリッタ半頂角)  $\alpha$ 、オフセット距離  $D$  およびスプリッタ距離  $L_s$  から成る幾何学的形状因子、およびレイノルズ数  $Re$  に依存すると考えられている。このうち、ノズル部の幅と流速に基づくレイノルズ数  $Re = U_0 \cdot B / \nu$  が  $8 \times 10^3$  から  $24 \times 10^3$  の範囲における流れ場の相似性については既に前報<sup>(5)</sup>で報告しているので、本実験では  $Re = 16 \times 10^3$  の一定とした。アスペクト比については、太田<sup>(6)</sup> および堂田ら<sup>(7)</sup> の報告を考慮し、さらに後述するように  $AR = 3$  における和田ら<sup>(2)</sup> や  $AR = 5$  における池田ら<sup>(8)(9)</sup> の結果と本実験結果とが良く一致しているので、 $AR = 5$  の本実験の場合流れ場に及ぼすアスペクト比の影響は顕著ではないものと考えられる。したがって、本報告では素子の主要形状因子として  $\alpha$ 、 $D/B$  および  $L_s/B$  の3種を取り上げ、これらによる内部流れの変化、特にスプリッタ位置の詳細な変化が付着噴流に及ぼす影響について調べる。実験

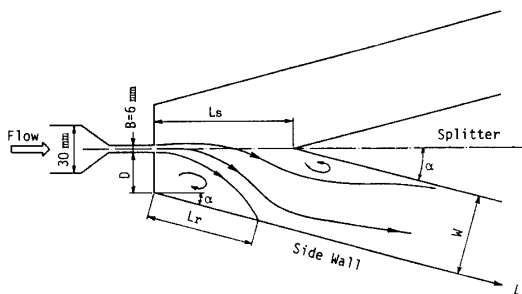


Fig. 1 Experimental setup and coordinate system.

は、側壁傾斜角  $\alpha$  を  $7.5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $22.5^\circ$  の3種類に、オフセット距離  $D$  を  $2B$ 、 $4B$ 、 $6B$  の3種類に、スプリッタ距離  $L_s/B$  を任意に変化させて行った。

側壁圧力分布は、素子中心深さ位置にあげられた圧力孔より取り出された圧力を水柱マノメータにより求め、圧力係数  $C_p = 2(P - P_\infty) / \rho U_0^2$  として表した。  $P$  は側壁圧力、 $P_\infty$  は水槽中の素子中心深さの静水圧、 $U_0$  はノズル部断面平均流速である。素子内の流速は、直径1.5mmの自作の円筒ピトー管の受圧部を素子中心深さ位置で回転させて得られる最大圧力と上板静圧との差より求めた。得られた速度ベクトルは、本実験の測定システム<sup>(10)</sup>、せん断流における変位効果<sup>(11)</sup> および乱れの影響<sup>(12)</sup>等を考慮すると、絶対値で15%、偏角で10°程度の誤差をもつものと推定される。再付着距離  $L_r$  は、側壁に沿って挿入された直径0.8mmの細管の先端の絹糸の振れの中立位置より決定した<sup>(1)</sup>。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 側壁圧力分布

Fig. 2はスプリッタのない場合について側壁圧力分布に対する側壁傾斜角の影響を示す。側壁傾斜角  $\alpha$  の増加につれ噴流の衝突による側壁最大圧力位置が下流に移動し、それとともにその最大値が減少しているのが分かる。Fig. 3は同様にスプリッタのない場合のオフセット距離の影響を示す。なお同図に併記した和田らの  $D/B = 2, 4$  の結果は本実験の結果によく一致している。両者の結果を総合すると、側壁圧力が最大となる位置はオフセット  $D/B$  の増加につれ下流になるが、その最大値は、 $D/B < 2$  の場合側壁と噴流との衝突角が小さいため  $D/B$  の減少につれ、 $D/B > 2$  の場合側壁への噴流の衝突位置が遠ざかるため  $D/B$  の増加するにつれ小さくなり、 $D/B = 2$  付近で最大となっている。一方、Fig. 4はスプリッタ距離による側壁圧

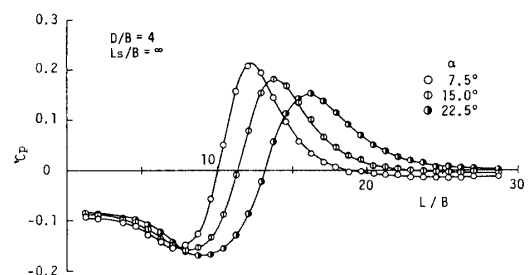


Fig. 2 Effect of side wall angle on side wall pressure distribution.

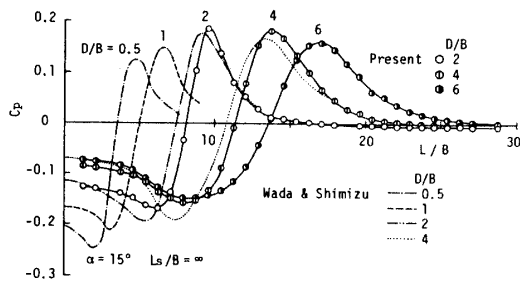


Fig. 3 Effect of offset distance on side wall pressure distribution.

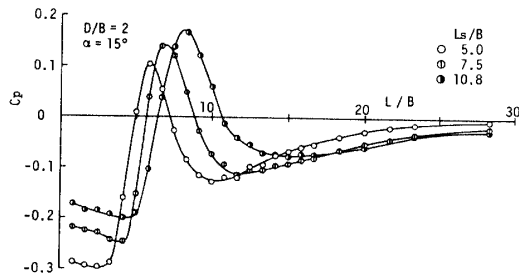


Fig. 4 Effect of splitter distance on side wall pressure distribution.

力分布の変化を示している。スプリッタ距離が小さい場合ほど側壁最大圧力位置およびその値と低圧渦領域の値がしだいに減少している。また Fig. 2, 3 のスプリッタのない場合と比較すると衝突領域下流で一度負の圧力にまで低下したのち静水圧に漸近する点が異なっている。ただこの負圧は  $L_s/B$  の増加につれ小さくなっている。さらに  $L_s/B$  が増加するとしだいにスプリッタなし ( $L_s/B = \infty$ ) の場合に連続するものと考えられる。

### 3. 2 再付着距離

Fig. 5 は、各  $D/B$ ,  $\alpha$  におけるスプリッタ距離に対する再付着距離の変化を示す。図中の一点鎖線はスプリッタのない場合の再付着距離である。いずれの  $D/B$  および  $\alpha$  の場合においても再付着距離は、スプリッタ距離  $L_s/B$  の小さい領域における極小値より  $L_s/B$  の増加につれ累積度数曲線的に大きくなり、一度スプリッタの無い場合の値を僅かに超えた後、その値に漸近することが分かる。スプリッタ位置が再付着距離の極小となる距離より小さくなると非出力口より主噴流の一部が分流し始め、素子内流れは例えば Fig. 6 の側壁圧

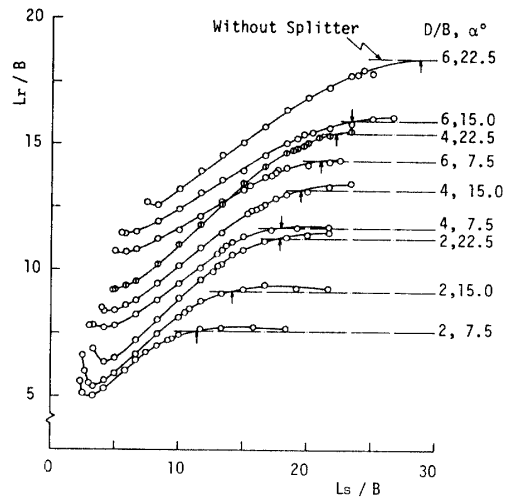


Fig. 5 Relationship between reattachment distance and splitter distance.

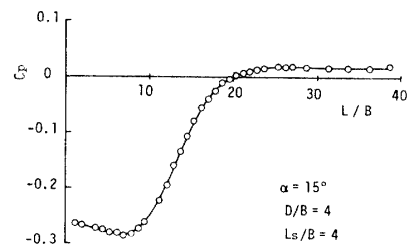


Fig. 6 Side wall pressure distribution in devices with leak flow from opposite duct.

力分布が示すように、通常の側壁付着流れのパターン (Fig. 10) とは異なってくる。このように再付着距離が最小となる時のスプリッタ距離を側壁付着流れパターンとなるスプリッタの影響範囲の下限、即ち下限スプリッタ距離とする。

Fig. 7 は、スプリッタのない場合の再付着距離の結果を他の研究結果と比較検討したものである。図中の Levin らおよび Perry の結果は文献(13)より引用した。本結果は、Levin らおよび和田ら<sup>(2)</sup>の結果に近く、少なくともスプリッタのない場合について良好な素子特性を示しているものと考えられる。ところが堀越ら<sup>(1)</sup>の値は他のものと比べかなり低くなっている。一方、スプリッタの効果についての比較は  $D/B$  や  $\alpha$  の同一条件の他の結果が少ないので難しく、僅かに池田<sup>(8)(9)</sup>らおよび堀越<sup>(1)</sup>らの結果と比較したものを Fig. 8 に示す。  $L_s/B$  の小さいところでは同一条件である池田らの結果に近いことが分かる。しかし  $\alpha = 45^\circ$  である堀越らの結果は

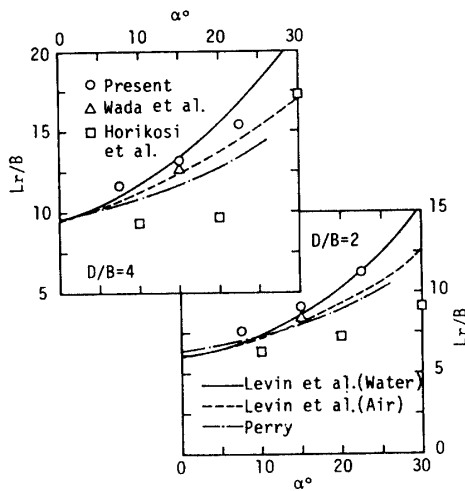


Fig. 7 Comparison between reattachment distances in some devices without splitter.

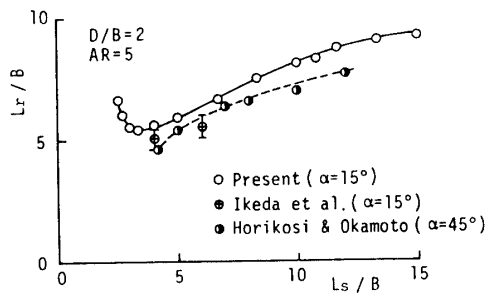


Fig. 8 Comparison between reattachment distances in some devices with splitter.

上述のスプリッタなしの場合と同様にかなり小さく、また本実験の  $L_r-L_s$  曲線の傾向とも異なるようである。

オフセット  $D/B$  が 2 の場合について再付着距離  $L_r$  と側壁最大圧力距離  $L_p$  が直線関係にあることは既に前報<sup>(5)</sup>において示した。本実験ではオフセットの範囲がさらに  $D/B=4, 6$  と拡張されているので、再びこの関係について調べてみた。Fig. 9 は、 $D/B$  および  $\alpha$  を図中の範囲とし、側壁付着流れの状態のもとでスプリッタの条件を任意に変化させた場合における  $L_r/B$  と  $L_p/B$  との関係をも最小二乗法近似した結果を示す。切片の値が 3% 程度異なるが、前報で与えたものとはほぼ同様の直線関係

$$L_r/B = L_p/B - 0.61$$

が成り立っているといえる。

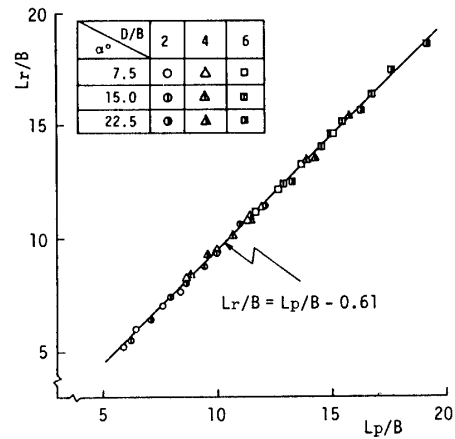


Fig. 9 Relationship between reattachment distance and maximum side wall pressure distance.

### 3. 3 内部流れの比較

Fig.10(a)~(b)は、オフセット距離、側壁傾斜角およびスプリッタ距離の変化に対応する内部流れの速度ベクトルを示す。いずれもスプリッタの存在する場合の典型的な側壁付着流れのパターンを示している。ノズル部からの主噴流はスプリッタの先端に近づくとき急激に側壁方向に曲げられ、またスプリッタ先端部では非付着側からの巻込流が剥離しスプリッタ壁に沿ってかなり大きな再循環流領域を形成しているのが分かる。その大きさは、相対的な出力流路幅  $W/B$  の増加に対応している。また衝突後の噴流は側壁に沿う壁噴流的速度分布を呈していることが分かる。Fig.10(a), (b)は、 $D/B$  が 2、 $L_s/B$  が 7.5 のままで側壁傾斜角がそれぞれ  $\alpha=7.5^\circ$  および  $15^\circ$  の場合の比較で、 $\alpha$  による路幅の増加とともに全体的に噴流の広がりが大きくなっている。次に  $\alpha$  を  $15^\circ$  に固定のままで  $D/B$  と  $L_s/B$  を 2 倍にしたものの比較を Fig.10(b), (c) に示す。Fig.10(c) の場合、出力流路に対するノズル部の幅が相対的に小さくなったことを除くと素子形状はほぼ同一である。したがって主噴流領域の占める空間および衝突域下流の出力流路に占める壁噴流の幅も小さいので、その分スプリッタ壁側の再循環流領域が大きくなっており、内部流れの状況はかなり異なっている。Fig.10のそれぞれの場合に対応する側壁圧力分布を Fig.11 に示す。これまでに誤ってスプリッタの存在する場合として Fig. 6 のタイプの側壁圧力分布が提供されている例があるが、Fig.10 および Fig.11 の結果より側壁付着流れのパターンに対応する側壁圧力分布は再付着点の直後に圧力の最大値をもつ分布形状となることが分かる。

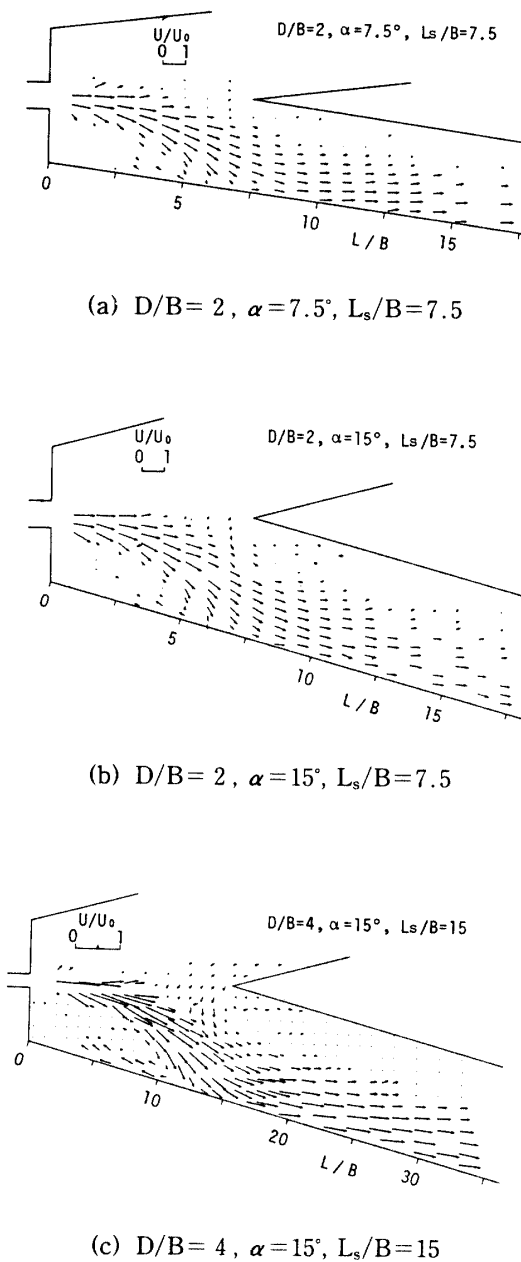


Fig.10 Velocity Vectors in device.

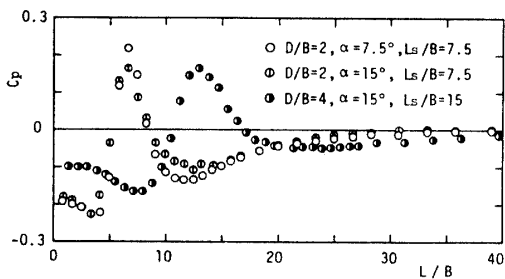


Fig.11 Side wall pressure distributions.

### 3.4 限界スプリッタ距離

和田ら<sup>(2)</sup>はスプリッタを十分下流より近づけたとき再付着点がスプリッタのない場合に対し上流に5%移動したときのスプリッタ距離を限界スプリッタ距離と定義した。スプリッタの限界距離を定めることは付着噴流に及ぼすスプリッタによる直接的影響範囲を明確にするうえで重要であると思われるので、以下これについて検討する。前節までに、スプリッタ距離と再付着距離が一本の連続する曲線で表され、再付着距離が最小となる点より大きいスプリッタ距離の範囲において典型的な側壁付着流れのパターンとなることを示した。また本実験に用いたすべての素子形状についてはスプリッタ距離を大きくすると、Fig.5に見られるように再付着距離は一度スプリッタのない場合の値を僅かに超過する。この超過は、スプリッタが下流より付着噴流に接近するときスプリッタ先端付近の再循環流内の負圧の領域のため最初噴流がスプリッタ側に引かれるために生じるものと思われる。したがってFig.5中の矢印で示すように再付着距離が $L_s/B = \infty$ の値と等しくなるスプリッタの位置をその影響範囲の限界基準として決定でき、またスプリッタの有効な影響範囲を幅広く表示できるので、この位置を上限スプリッタ距離 $L_{se}$ と呼ぶこととする。同時にこの位置における再付着距離を上限再付着距離 $L_{re}$ と呼ぶ。

上限スプリッタ距離 $L_{se}$ と上限再付着距離 $L_{re}$ の関係をFig.12に示す。D/Bの同一記号に対し、 $L_{re}$ の大きい結果ほど $\alpha$ が大きい場合に相当する。種々のD/Bおよび $\alpha$ の条件下におけるスプリッタのない場合の再付着距離、すなわち上限再付着距離 $L_{re}$ は、これまでの多くの研究<sup>(6)(13)</sup>により評価されるので、上限スプリッタ距離 $L_{se}$ はFig.12中に示す

$$L_{se}/B = 1.5L_{re}/B$$

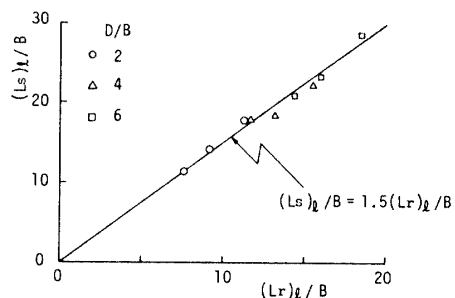


Fig.12 Relationship between upper-limits of splitter and reattachment distances.

の関係により容易に求める山田水学基盤部研究報告,

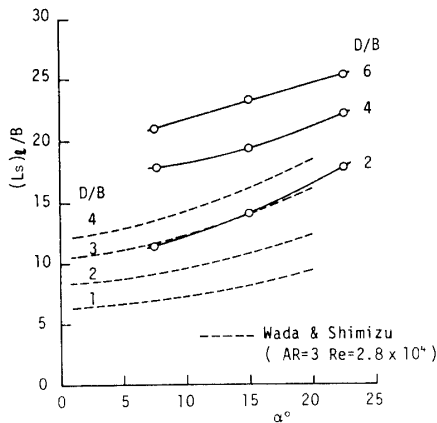


Fig.13 Comparison between maximum splitter distances defined correctly.

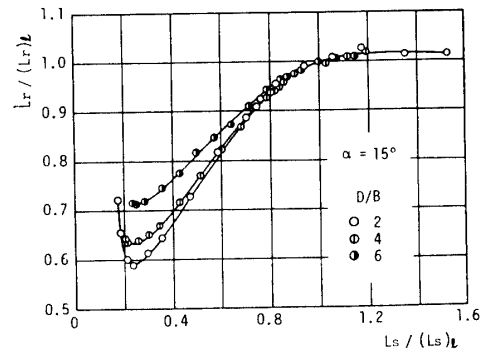
本実験と和田ら<sup>(2)</sup>によるスプリッタ距離の上限値を比較したものである。スプリッタ距離の限界値の決定法の相違のため、スプリッタの影響範囲の上限距離が本実験の場合の方が2割程度大きくなっている。

Fig.14(a) (b)は、スプリッタ距離と再付着距離の上限値を基準としてスプリッタ距離に対する再付着距離の変化を、それぞれD/Bおよび $\alpha$ の影響とともに示したものである。スプリッタ距離が小さくなるにつれD/Bや $\alpha$ による影響が大きくなっているが、側壁付着流れパターン下限 ( $L_r$ の最小位置) においてもその差異はたかだか1割程度であることが分かる。再付着距離の下限はおよそ  $L_r/L_{re} = 0.6$ 、スプリッタ距離の下限はおよそ  $L_s/L_{se} = 0.3$  となっている。以上のことより、スプリッタ距離および再付着距離の上限値を基準にとると、D/Bと $\alpha$ の異なる種々の形状の付着要素子について側壁付着流れパターンを形成する下限から上限までのスプリッタの範囲をおおよそ見積ることができるものと思われる。ただ、Fig.14から推測されるように実質的なスプリッタの影響範囲の上限は上限スプリッタ距離を遥かに越えており、再付着距離がスプリッタのない場合の値にまでもどるスプリッタ距離は、和田ら<sup>(2)</sup>の結果よりかなり大きく、上限スプリッタ距離  $L_{se}$  のおよそ2倍であった。

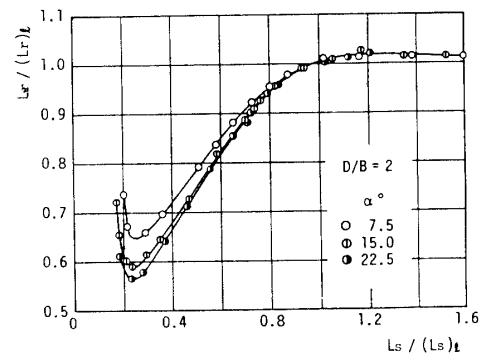
4. 結 言

スプリッタを有する双安定型の付着要素子内の流れについて調べ、以下の点を明らかにした。

(1) 側壁最大圧力位置は、側壁傾斜角  $\alpha$ 、オフセット距離Dおよびスプリッタ距離  $L_s$  の増加につれ下流に移



(a)  $\alpha = 15^\circ$



(b) D/B = 2

Fig. 14 Relationship between normalized reattachment and splitter distances

動する。一方、側壁最大圧力は側壁傾斜角  $\alpha$  の減少、スプリッタ距離  $L_s$  の増加につれ増加し、オフセットD/Bがおよそ2のとき最大となる。

(2) 再付着距離  $L_r/B$  は、スプリッタ距離  $L_s/B$  の小さい領域における極小値より  $L_s/B$  の増加につれ累積度数曲線的に大きくなり、一度スプリッタの無い場合の値を僅かに超えた後、その値に漸近する。再付着距離が最小値からほぼ最大値に変化する範囲がスプリッタが付着噴流に直接的に影響する場合における典型的な側壁付着流れのパターンとなる。

(3) 種々のD/Bおよび $\alpha$ の条件下におけるスプリッタのない場合の再付着距離、すなわち上限再付着距離  $L_{re}$  を評価すると、上限スプリッタ距離  $L_{se}$  は

$$L_{se}/B = 1.5L_{re}/B$$

の関係により求めることができる。

(4) スプリッタ距離および再付着距離の上限値を基準にとると、D/Bと $\alpha$ の異なる種々の形状の付着要素子について側壁付着流れパターンを形成する下限から上

限までのスプリッタの範囲をおおよそ見積ることができる。

最後に有益なご助言を賜った徳山工業高等専門学校上野五郎教授に感謝致します。

#### 文 献

- (1) 堀越・岡本, 機論(2部), **36**, 291(1970)
- (2) 和田・清水, 計自論, **6**, 3(1970), 214.
- (3) 佐野, 航宇誌, **30**, 343(1982)
- (4) 中山・荻野, 機論(B編), **52**, 473(1986)
- (5) 門脇・上野・山田, 機論(B編), **54**, 502(1988)
- (6) 太田, 計自論, **8**, 1(1972)
- (7) 堂田・逢坂・和田, 計自論, **16**, 1(1980)
- (8) 池田・堀越・李・田中, 機論(B編), **52**, 483(1986)
- (9) 池田・堀越・田中, 機論(B編), **52**, 483(1986)
- (10) 上野・門脇・大江, 山口大学工学部研究報告, **24**, 3(1974)
- (11) 林・吉野・若・大坂, 第20回乱流シンポジウム講演論文集, (1988)
- (12) Bradshaw, P., Experimental Fluid Mechanics, Pergamon Press (1964) p.81
- (13) 原田・尾崎, 流子工学, 養賢堂(1971)

(平成2年10月15日受理)