

層流噴流の乱流への遷移挙動について

The Transition Behavior to Turbulent Flow of Laminar Flow

○千葉惟平^{*}, 清水久記^{**}, 廣木富士男^{***}, 山本圭治郎[†]
○YuiheiChiba^{*}, HisakiShimizu^{**}, FujioHiroki^{***}, KeijiroYamamoto[†]

^{*}一関高専専攻科 ^{**}一関高専 ^{***}工学院大学 [†]神奈川工科大学
^{*}Ichinoseki National College of Technology Advanced Engineering Course,
^{**}Ichinoseki National College of Technology, ^{***}Kogakuin Univ.,
[†]Kanagawa Institute of Technology

キーワード：層流噴流(Laminar Flow), 遷移領域(Transition), 流体抵抗(Fluid Resistance),
圧力低下現象(Pressure Drop Phenomenon), 層流形比例素子(Laminar Proportional Amplifier)

連絡先：〒021-8511 一関市萩荘字高梨 一関工業高等専門学校 制御情報工学科 清水久記
Tel. : 0191-24-4759, : E-mail : shimiz6@ichinoseki.ac.jp

1. 緒言

微圧流体の増幅器として知られている層流形比例素子¹⁾(Laminar Proportional Amplifiers 以下 LPA と略す)は層流域で動作する素子であり、圧力ゲインが高く、パワー消費量が少ないなどの特徴がある。また LPA は層流域で動作するため素子内の流れに相似則が成り立つとされているが、層流域の範囲が狭いため遷移領域までの範囲を広げることが LPA の動作範囲を拡大するためには有効になってくる。しかしながら層流から乱流へ遷移する際には圧力低下現象²⁾が起こることが知られており、これが大きな障害となっている。また、この圧力低下現象はどのような条件下で起こるかは明確にされていない。

本研究では新たに供試素子を作製し、圧力低下現象の起きる条件を実験的に求めることを目的とした。寸法を変更した素子による供給特性と回復圧力特性実験より、主ノズル幅と板厚のアスペクト比と圧力低下現象の関係を明確にすること、及び層流と乱流噴流の入出力特性を明確にすることを試みた。

2. 圧力低下現象

流れには、流速の遅い層流域と流速の速い乱流域がある。層流域から乱流域へ流れが遷移する際には圧力が低下する現象が起こるといわれている。Fig.1 にその現象を示す。

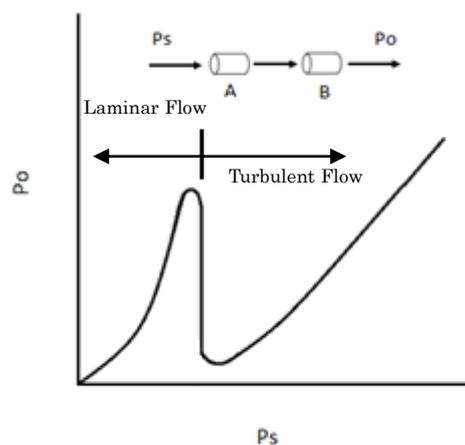


Fig.1 Pressure Drop Phenomenon

対向した二つのパイプ A, B を設け、供給側パイプ A に加える供給圧力 p_s を増加していくと、受

流側パイプ B での回復圧力 p_o も上昇していく。しかし、 p_s が大となると p_o が急激に減少し、その後再び p_o は上昇する。この低下部分が遷移領域であり、これ以上が乱流領域である。この現象は層流から乱流への遷移する際の特徴的現象である。

この現象が発生する理由として、層流域の流れは粒子が層状を維持して流れているが、乱流域では粒子が乱れる。遷移領域では層流に比べ噴流の幅が広がることで、受流側での圧力が低下するといわれている。

この圧力低下現象は、層流域で動作する LPA の特性を検討する上で大きな影響を及ぼしている。例えば、LPA の動作範囲が制限されることや、入出力特性表現で乱流の噴流理論とは合致しないなどの問題点³⁾があるので、これらの改善のためには形状と現象の相互関係を解明することが必要である。

3. 実験供試素子及び実験装置

3.1 実験供試素子

実験で用いた供試素子の形状を Fig.2 に示す。供試素子はワイヤカット放電加工機を用い、プログラムにより左右対称になるよう精密加工した。素子の各寸法の決定は主ノズル幅 b_s を基準値としており、供給側ポートと受流側ポート間の距離は b_s の 8 倍である。特性比較のために b_s が 0.375mm, 0.5mm, 0.75mm, 1.0mm の素子を作製した。各部の寸法は同じ寸法比率としている。また、板厚 h は 0.1~1.5mm まで多くの板厚の素子を作製した。加工した供試素子を Fig.3 に示す。

また、実験では供試素子をアクリル板で上下より挟み実験素子とした。それを Fig.4 に示す。

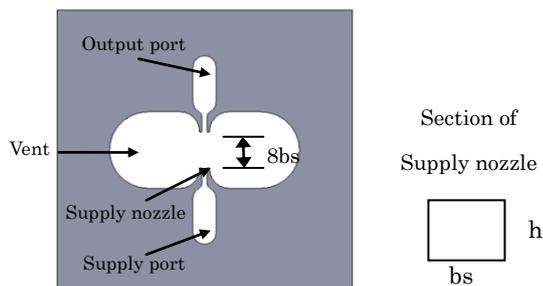


Fig.2 Schematic Diagram of Test Device

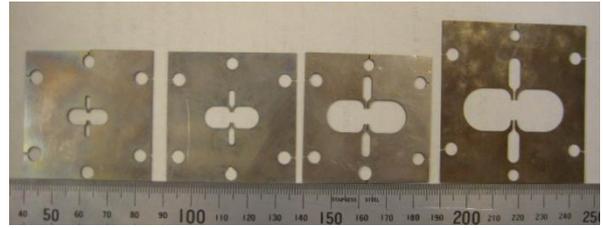


Fig.3 Photograph of Test Device



Fig.4 Structure of Test Device

3.2 実験装置及び実験方法

実験装置の概略を Fig.5 に示す。コンプレッサで圧縮した空気の流量を減圧弁によって調整し、供試素子の供給ポートに導く。その際、流量計によって供給ポートの流量を測定し、供給流量を q_s とする。実験は供試素子の供給側と受流側に U 字管マンオメータを接続し、減圧弁を徐々に開きながら、その p_s , p_o を測定した。

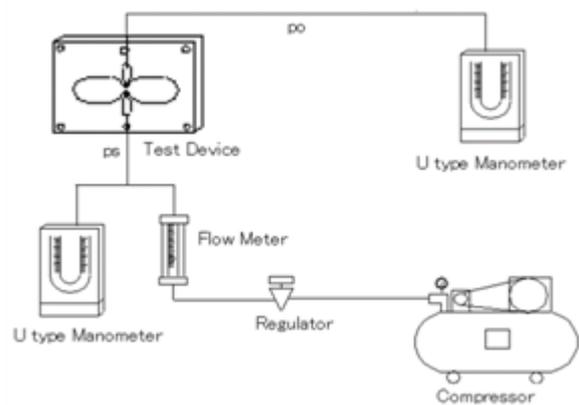


Fig.5 Experiments

4. 実験結果及び考察

4.1 圧力低下現象の有無について

$b_s 0.75$, $h 0.4$ の形状素子の回復圧力特性の実験結果を Fig.6 に示す. 縦軸は回復圧力比, 横軸は供給圧力である.

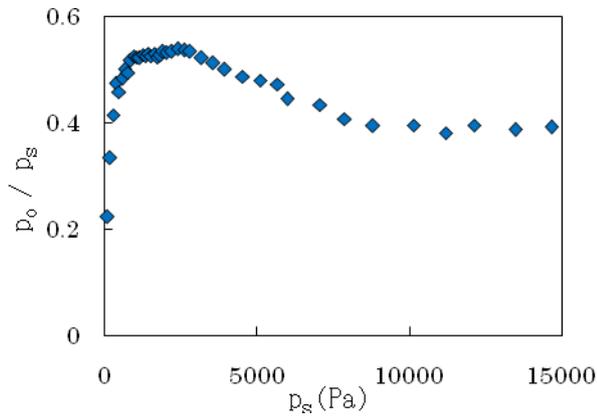


Fig.6 p_o/p_s vs $p_s(b_s 0.75, h 0.4)$

図において p_s の増加とともに p_o/p_s も徐々に増加するが, 3kPa 付近より低下し, 10kPa 付近より再び上昇する傾向を示している. 3kPa 付近において p_s が増加しても p_o が増加せず逆に低下するのは, これまで層流状態にあった噴流に乱れが生じており, 層流より乱流へ遷移する際の圧力低下現象が起きていることを示すと考えられる.

Fig.7 に $b_s 0.75$ で板厚を変更した時の回復圧力特性を示す. 縦軸は回復圧力比, 横軸は供給圧力である.

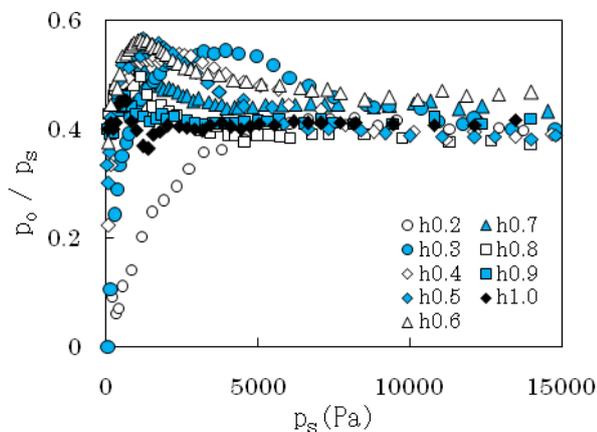


Fig.7 p_o/p_s vs $p_s(b_s 0.75)$

h が大になるに従い, 圧力低下現象が顕著に見られる. 例えば, $h 0.3$ の時は $p_s 5$ kPa から圧力低下現象が見られ, $h 0.5$ の時は $p_s 1$ kPa 付近で圧力低下

現象が起き始めている. h が小の場合, 層流状態を維持して乱れを生じない効果が発生していると考えられる. それに対し, h が大の時は噴流が主ノズルから放出されたのち層流を維持することができなくなるため, 噴流が広がり圧力低下現象が生じる.

次に, 流れを無次元数のレイノルズ数で表示することを試みる. 該当するレイノルズ数としてアスペクト比 λ と水力直径 d_s を代表長さとする次のレイノルズ数⁴⁾を用いる.

$$Re_9 = \frac{u_s d_s}{C_d \nu} \frac{0.36\lambda + 0.6}{(1 + 2\lambda + \frac{0.3\lambda^2}{\lambda^2})} \quad (1)$$

ここで, u_s は主ノズルの流速, ν は動粘性係数, λ はアスペクト比 (h / b_s) である. また, C_d は主ノズルの流量係数, d_s は水力直径で, 以下の式で表される.

$$C_d = \frac{q_s}{b_s h} \sqrt{\frac{\rho}{2p_s}} \quad (2)$$

$$d_s = \frac{2\lambda b_s}{1 + \lambda} \quad (3)$$

Fig.8 にレイノルズ数による回復圧力特性を示す. 縦軸は回復圧力比, 横軸はレイノルズ数である.

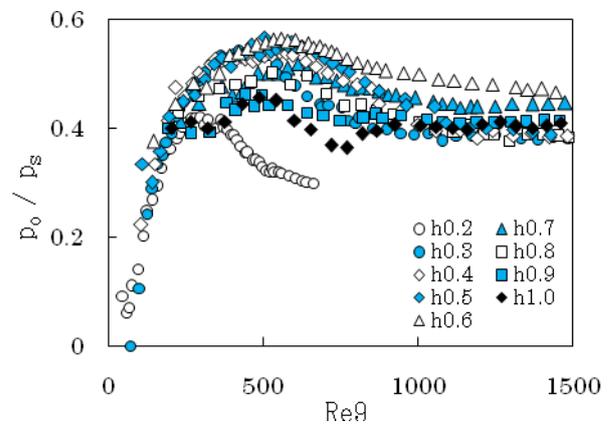


Fig.8 p_o/p_s vs $Re_9(b_s 0.75)$

図においてレイノルズ数 200 付近までは回復圧力の増加はほぼ同様であるが, 低下する時点は形状によって異なっている. $h 0.2$ ではレイノルズ数 300 付近で低下するが, これ以上の h では, p_o/p_s

が低下する時点のレイノルズ数は増加する傾向を示しており、 $h0.5$ ではレイノルズ数 600 付近と低下する時点が最大となっている。さらに h を増加させると、 p_o/p_s が低下する時点のレイノルズ数が減少する。

$b_s0.75$ では $\lambda0.67$ の素子形状が最も長く層流状態を維持していることを示し、この素子形状を境として乱流への遷移が起きやすくなっている。

同様に b_s を変更した時の回復圧力特性の結果は、 $b_s1.0$ では $\lambda0.5$ が最も長く層流状態を維持したが、 $b_s0.375$ では $h0.4$ 、また $b_s0.5$ では $h0.5$ が最も長く層流状態を維持しており、これらの b_s では $\lambda1.0$ 以上において層流状態が最も長い。

4.2 供給部の流体抵抗について

次に供給部の流体抵抗について検討する。圧力と流量の比が流体抵抗であるが、これは流体の流れやすさの程度を示す。

Fig.9 に $b_s0.75$ での流体抵抗特性を示す。縦軸は流体抵抗 R 、横軸はレイノルズ数 Re_9 である。ここで、流体抵抗は $R = p_s/q_s$ (kg/m^4s) で示す。

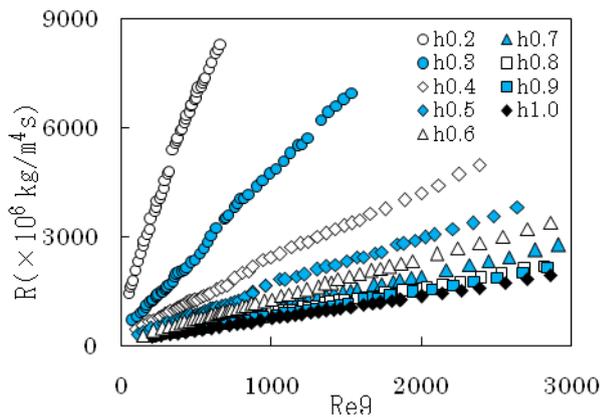


Fig.9 FluidResistance($b_s0.75$)

乱流の特徴である非線形性は認められないが、線形の不連続な時点が存在する。

また、板厚が小であるほど上下の壁の摩擦の影響が大きくなることにより流体抵抗が増大する。すなわち、ノズル断面が狭くなるに従い流体抵抗が増すことがわかった。 b_s を変更した際もこれらと同様の傾向を示した。

次に各 b_s の比較のため、Fig.10 に各 b_s における

流体抵抗を示す。縦軸は不連続が発生するまでの流体抵抗 R 、横軸はアスペクト比 λ を示す。

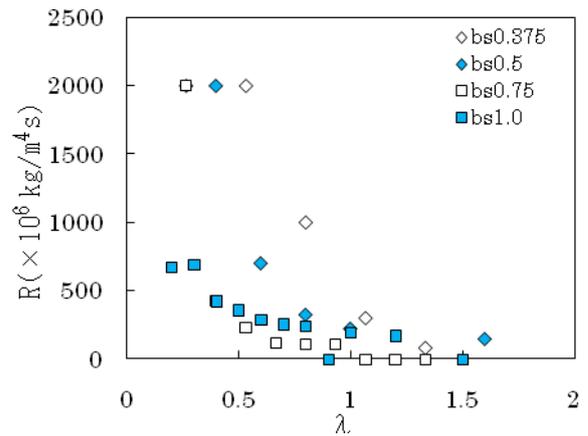


Fig.10 Comparisons of Resistance of Flow

各 b_s の流体抵抗は λ に比例して減少することを示しており、 λ が小の時は非常に高い流体抵抗の値となっている。また、 $b_s0.75$ では $\lambda1.0$ 以上、 $b_s1.0$ では $\lambda1.5$ で流体抵抗がゼロとなっており、上下の壁の影響が極めて少ないことがわかった。

4.3 供給部の流体抵抗について

Fig.8 より圧力低下現象には、層流から乱流への遷移が短時間に行われるタイプ、層流状態の維持が長いタイプ、及び層流から乱流への遷移が緩やかに行われるタイプなどが存在する。そこで素子形状と圧力低下現象の関連を検討することを試みた。

関係の図を Fig.11 に示す。回復圧力比 p_o/p_s の最大値を最大回復圧力比、最大回復圧力比からの低下率を圧力低下比、 p_o/p_s の平行部分を平行部、最大回復圧力比までの上昇部分を上昇幅とする。

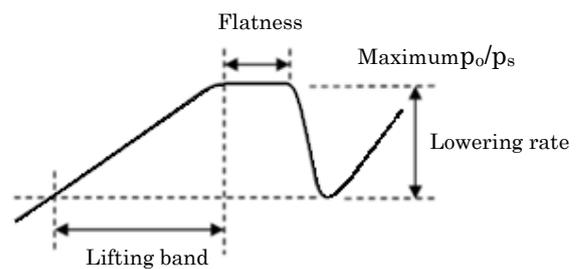


Fig.11 Values of Pressure Drop

Fig.12 に $b_s0.75$ 素子での上昇幅と平行部の関係を示す。縦軸は上昇幅と平行部を示すレイノルズ数の範囲、横軸はアスペクト比である。

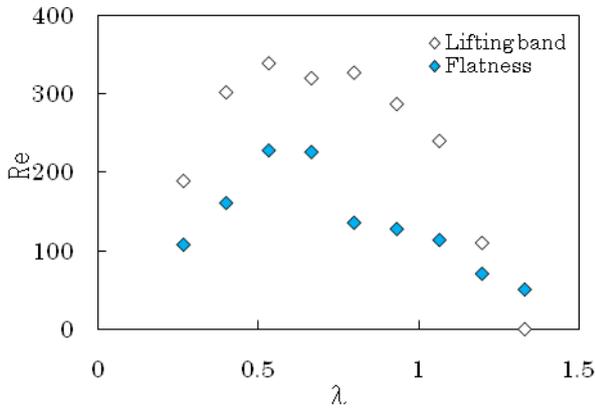


Fig.12 Lifting bands of Laminar($b_s0.75$)

$\lambda0.5\sim0.67$ の範囲においては上昇幅、平行部ともに高い。上昇幅の大小は供給ノズルから出た噴流が受流側ノズルの間でどの程度層流状態を維持できるかを示している。よって、上記のアスペクト比の部分層流状態を長く維持している形状と考えられる。

Fig.13 に各形状と上昇幅の関係、Fig.14 に各形状と平行部の関係を示す。

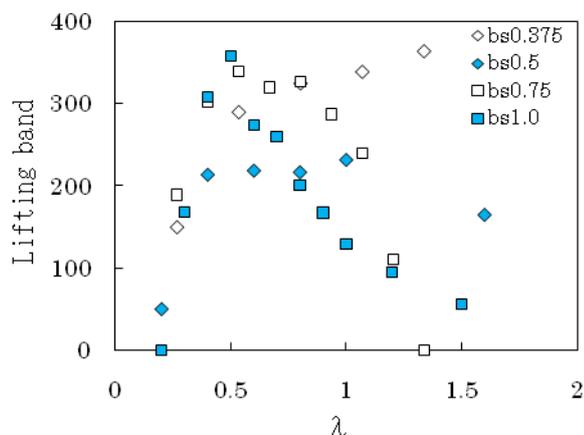


Fig.13 Comparison of Lifting band

$b_s0.375$ での上昇幅は λ が大になるに従い上昇しており、平行部は $\lambda0.8$ を境に減少している。

$b_s0.5$ では $\lambda0.4\sim1.0$ において上昇幅、平行部ともに高くなっている。

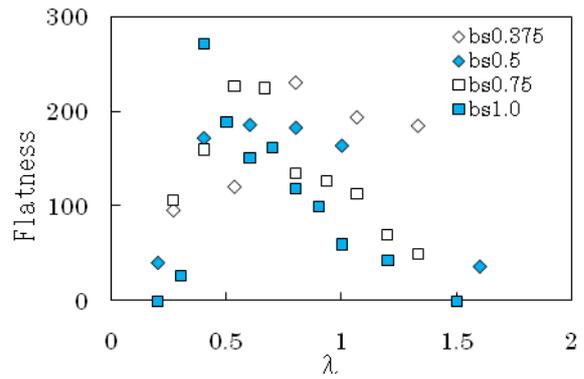


Fig.14 Comparison of Flatness

$b_s1.0$ では $\lambda0.5$ において上昇幅、平行部ともに高く、他の b_s と比較し $\lambda0.5$ を境に減少が顕著に見られる。

λ が小の場合、供給ノズルから出た噴流が受流口に入流するまでの間は上下の壁の影響が大きく、流れは乱れず、その結果上昇幅も狭く、平行部も少ない。一方、 λ が大となると上下の壁の影響が少なくなるため乱れやすく、上昇幅、平行部とも小となることがわかった。平行部においては p_2 が増加しても p_0 はそれまでと異なり、わずかに増加しないことを示す。この部分は層流状態維持の長さに関係がある。

次に最大回復圧力比と圧力低下比の関係を検討した。Fig.15 に $b_s0.75$ 素子の最大回復圧力比、圧力低下比を示す。

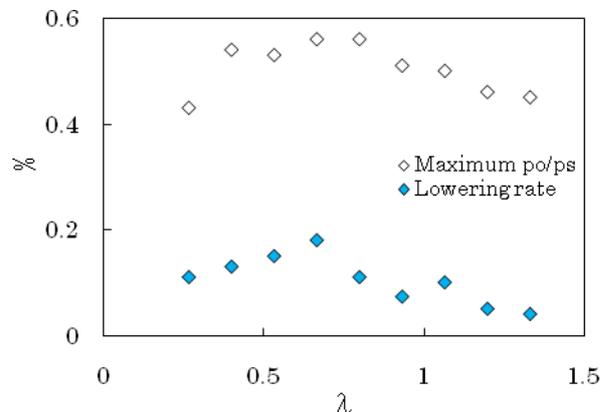


Fig.15 Maximum p_0/p_2 and Lowering rate

$\lambda0.67\sim0.8$ において最大回復圧力比が高く、特に $\lambda0.67$ では圧力低下比も高くなっている。よって、この λ の部分においては高い回復圧力となった後、圧力低下現象により回復圧力比が顕著に減少する

ことがわかった。

Fig.16 に各形状と最大回復圧力比の関係, Fig.17 に各形状と圧力低下比の関係を示す。

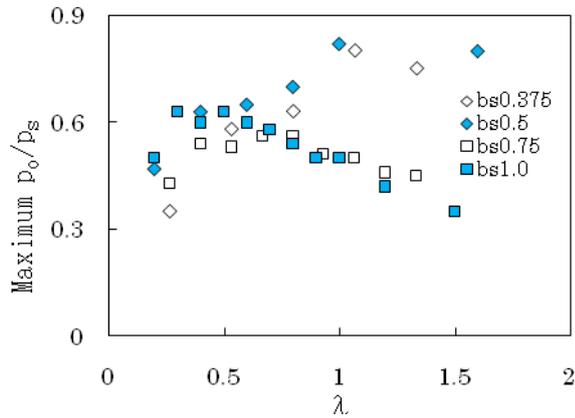


Fig.16 Comparisons of Maximum p_0/p_2

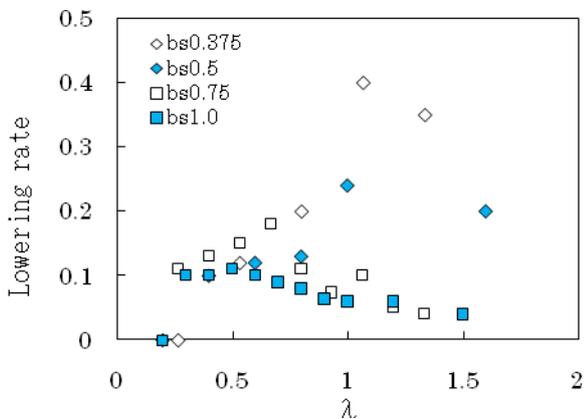


Fig.17 Comparisons of Lowering rate

$b_s 0.375$ と $b_s 0.5$ は同様の傾向を示しており, λ が大になるに従い最大回復圧力比, 圧力低下比とも高くなる. 特に $\lambda 1.0$ 付近において最も値が高くなっている.

$b_s 1.0$ は $b_s 0.75$ と同様の傾向を示しているが, 最大回復圧力比の最大値は $b_s 0.75$ よりも低い λ となっている. これより, b_s が大になるに従い, 最大回復圧力比の最大値の時点の λ が低くなることがわかった.

以上のことから, 各形状における最も長く層流を維持できる最適なアスペクト比を求めることができた. Fig.18 に最適アスペクト比と b_s の関係を示す. 縦軸は最適アスペクト比, 横軸は b_s である.

図より, 最適アスペクト比は b_s の増加とともに

減少する傾向がある.

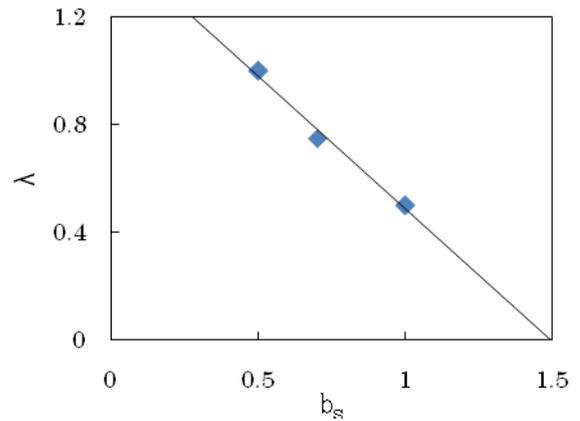


Fig.18 Optimal aspect ratio

これより, 最適なアスペクト比は次式のようになる.

$$\lambda = -1 \cdot b_s + 1.476 \quad (4)$$

4.4 層流と乱流の圧力増加率について

圧力増加は層流と乱流の場合では異なっているので, 次に層流と乱流の圧力増加率について検討する. Fig.19 に $b_s 0.75, h 0.4$ の素子の回復圧力特性を示す. 縦軸は p_0 , 横軸は p_2 を示す.

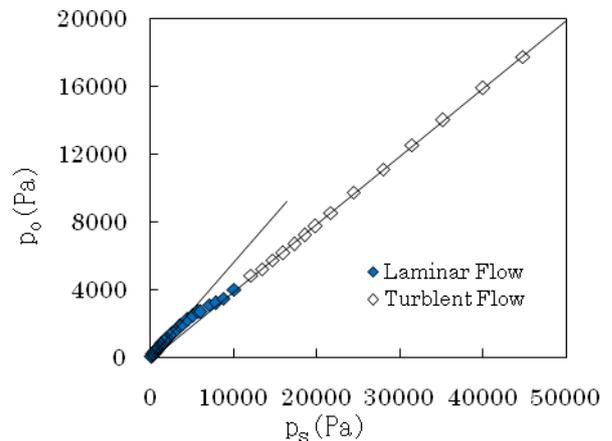


Fig.19 Linearization ($b_s 0.75, h 0.4$)

$p_2 5kPa$ 付近で圧力増加率が異なっている. これはこの付近で層流状態から乱流に遷移していることを示す. 層流と乱流の圧力増加率の近似式は次のようになる.

層流の場合

$$p_0 = 0.563 p_2 - 44.44 \quad (5)$$

乱流の場合

$$p_o = 0.402p_s - 195.0 \quad (6)$$

これより、層流と乱流の圧力増加率は約 1.4 倍異なっていることが分かった。Fig.20 に $b_s 0.75$, $h 0.4$ の LPA の入出力特性³⁾を示す。図の実線部分は乱流噴流の理論計算値である。実験値は層流状態で作動する LPA の実験値である。理論値と実験値は約 1.4 倍異なっているが、前述の層流と乱流の圧力増加率と良く一致している。よって、LPA の入出力特性は乱流の入出力特性を補正することによって表示できることがわかった。

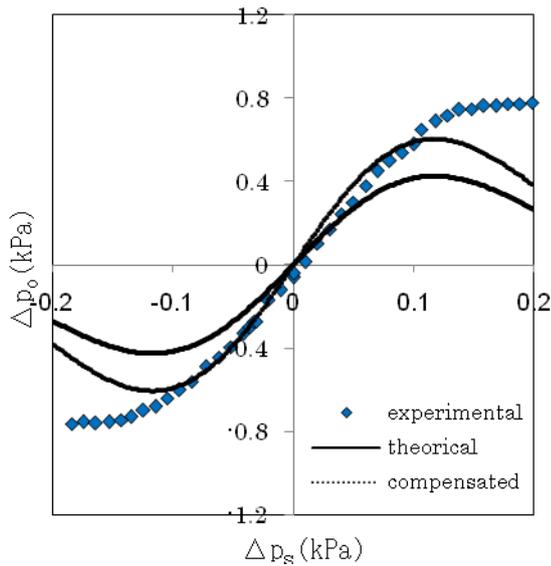


Fig.20 Modified of Input-Output Characteristics($b_s 0.75$ $h 0.4$)

全素子形状の圧力増加率を Fig.21 に示す。縦軸は圧力増加率 A, 横軸はアスペクト比 λ を示す。

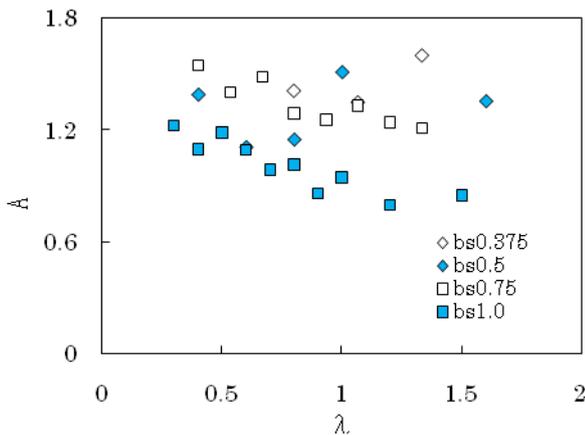


Fig.21 Comparisons of Amplifier

図より、 b_s 大のときは λ が大になるに従い倍率は低下する。一方、 b_s 小の時は λ が大になっても倍率の低下はみられない。

5. 結言

寸法の異なる多くの供試素子を作製し、回復圧力特性などの実験を行った結果、次のことが分かった。

- 1) h 変更による圧力低下現象は、 h が大になるに従い顕著に発生する。
- 2) 0.75 の素子形状ではアスペクト比 0.8 において層流状態を長く維持することができる。
- 3) 層流状態を長く維持する最適アスペクト比が推定できる。
- 4) 0.75, $h 0.4$ の素子形状において層流と乱流の傾きは約 1.4 倍の倍率で異なっている。
- 5) LPA の入出力特性は乱流の入出力特性を補正することによって表示できる。

参考文献

- 1) 清水, 佐藤, 畑中: 平面形状が相似な層流形比例素子の特性比較, (社)計測自動制御学会第 1 回流体制御シンポジウム講演論文集 70/74(1985)
- 2) 尾崎省太郎, 原美明共編: 純流体素子入門 p17(1967)
- 3) 佐藤潤一他: LPA の入出力特性について, (社)計測自動制御学会東北支部第 251 回研究集会資料番号 251-6(2009.7.15)
- 4) 清水久記, 廣木富士男, 山本圭治郎: 層流形比例素子の代表長さについて, (社)計測自動制御学会 2008 年度産業応用部門大会第 9 回流体計測制御シンポジウム 1/6(2008)