

LPAの入出力特性について

The Input-Output Characteristics of LPA

○佐藤潤一*, 清水久記**, 廣木富士男***, 山本圭治郎†

○Junichi Sato*, Hisaki Shimizu**, Fujio Hiroki***, Keijiro Yamamoto†

*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: 層流形比例素子 (Laminar Proportional Amplifier), 入力圧力 (Input Pressure),
入力形状(Input Geometry), 出力圧力(Output Pressure),
圧力ゲイン(Pressure Gain)

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

層流域で動作する噴流偏向タイプの層流形比例素子(Laminar Proportional Amplifiers 以下 LPA と略す)は圧力ゲインが高く, SN 比が大きいこと, パワー消費量が少ないことや入力インピーダンスが高いという特長をもった素子である. そのため LPA は微圧の検出等への応用が期待されている. また層流域で作用するために素子内の流れに相似則が成り立ちスケールリングが可能とされている. このスケールリングは素子を構成する形状, 寸法によって素子を製作しなくても特性が予測できることが可能となることであり, LPA により流体制御システムを構築するためには重要なことである.

これまでに紹介されている特性解析法¹⁾は乱流噴流の場合の解析であり, 層流における適切な解析法は知見しない. そこで本研究では実験により LPA の入出力特性の特性解析を試みたので報告する.

2. LPA の形状と動作原理について

2.1 LPA の形状について

LPA は, 主ノズル, スプリッタ, 入力ポート, 出力ポート, ベント, ベントベーンで構成されており, 左右対称の形状である. この流路パターンをワイヤーカット放電加工機で精密に加工し, 上下より厚いカバープレートで挟み, また表面をきさげ加工を行って気密性を高めている構造である.

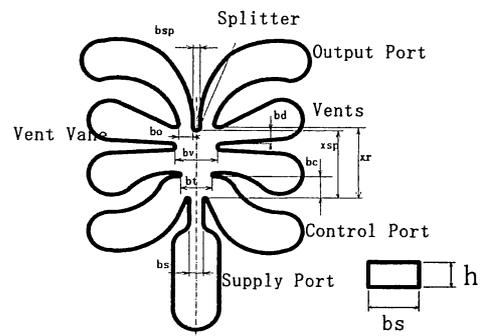


Fig.1 Geometry of LPA

各部の寸法は b_s を基準として次のようにしている。

$b_o/b_s=1.25$, $b_t/b_s=1.5$, $b_v/b_s=3$, $b_d/b_s=2.4$
 $x_r/b_s=8.3$, $x_{sp}/b_s=8$, $b_c/b_s=1$, $b_{sp}/b_s=0.5$

この基本寸法は、これまでの研究から高い増幅率を得るための最適寸法として実験的に得られた寸法値²⁾を用いている。

LPA は層流状態で作動する素子であるので板厚を極力小さくすることにより、流れが乱れるのを抑制し、層流状態を持続する点に特徴がある。

実験は作動流体に空気を用いて行った。

2.2 動作原理

Fig.2 に噴流の偏向を示す。主ノズルより噴出した噴流は左右の入力ポートに加えられた圧力差により運動量の法則に従い偏向する。例えば右入力ポートでの圧力が大の時は、噴流は左側に偏向し、左右の出力ポートにおいて左の出力ポートの圧力が右の出力ポートより圧力が多く回復することになる。

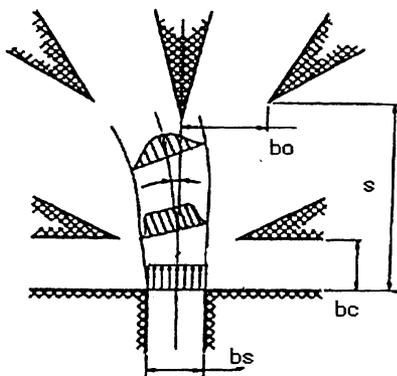


Fig.2 Flow Pattern

これにより入力ポート、出力ポートの圧力差より次の関係式が得られる。

$$G = \frac{\Delta P_o}{\Delta P_i} = \frac{P_{oL} - P_{oR}}{P_{iR} - P_{iL}} \quad (1)$$

これが圧力増幅率であり、入力と出力の増幅の程度を示す。一般に LPA は約 10 倍のゲインを持っており、このため流体式オペアンプと呼ばれている。

3. 入出力解析

尾崎・原田らの研究³⁾では噴流偏向形増幅素子の特性を次のように解析している。

Fig.3 に噴流の偏向モデルを示す。噴流偏向形増幅素子の入力部において、運動量 J_s, J_{il}, J_{ir} をもった 3 つの噴流が衝突して J_o なる運動量を持つ

つ流れになると考え、運動量のつり合いから次の関係が得られる。

$$J_s = J_o \cos \theta \quad (2)$$

$$J_o \sin \theta = J_{il} - J_{ir} \quad (3)$$

$$\tan \theta = \frac{J_{il} - J_{ir}}{J_s} \quad (4)$$

ここで

J_s : 主噴流の運動量

J_{il}, J_{ir} : 左右の制御噴流の運動量

である。

ただし境界壁面圧による影響は無視できるものとし、この式により流体増幅素子の主噴流の偏向角が与えられる。

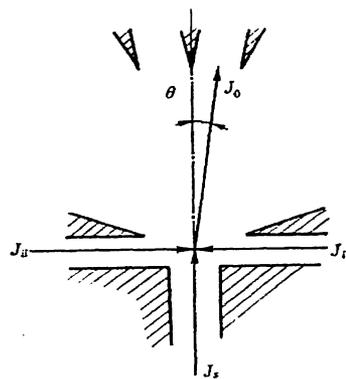


Fig.3 Jet Flow Deflection

噴流偏向形増幅素子では主噴流ノズルより噴出される主噴流が相互干渉領域に噴出される。その主噴流の側面に設けられた制御ノズルより制御噴流が主噴流に対して噴出され衝突する。このとき運動量のつり合いから主噴流は偏向する。また主噴流の下流には受流口が設けられており、主噴流を受ける。主噴流の偏向によって受流口が受ける主噴流の受流流量が変わるので、制御流に比例した出力を取り出すことが可能となる。

尾崎・原田らは噴流偏向形増幅素子の寸法をもとに主ノズル・制御ノズルにおける運動量の関係や噴流の偏向特性の解析を行った。

その結果、入力差圧 ΔP_i と出力差圧 ΔP_o の関係すなわち圧力特性は次式で与えられるとしている。

$$\begin{aligned} \left[\frac{\Delta P_o}{P_s} \right]_{Q_o=0} &= \left[\frac{P_{or} - P_{ol}}{P_s} \right]_{Q_o=0} \\ &= \frac{1.35}{b_o/b_s} \times \left\{ f_2 \left[\frac{3.85}{s/b_s} \left(\frac{b_o}{b_s} + \frac{e}{b_s} - \frac{l b_c \Delta P_i}{b_s b_s P_s} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - f_2 \left[\frac{3.85}{s/b_s} \left(\frac{e}{b_s} - \frac{l b_c \Delta P_i}{b_s b_s P_s} \right) \right] + f_2 \left[\frac{3.85}{s/b_s} \left(\frac{e}{b_s} + \frac{l b_c \Delta P_i}{b_s b_s P_s} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - f_2 \left[\frac{3.85}{s/b_s} \left(\frac{b_o}{b_s} + \frac{e}{b_s} + \frac{l b_c \Delta P_i}{b_s b_s P_s} \right) \right] \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

ここで

P_s :供給圧力

ΔP_i :入力差圧力

b_o :出力ポート幅

b_s :主ノズル幅

b_c :入力ポート幅

e :センターベント幅の半径

s :主ノズル端から出力ポートまでの距離

l :入力ポートの中心から出力ポートまでの距離

である。

(5)式を用いて、 $b_s=0.75\text{mm}$, $h=0.4\text{mm}$ の素子について計算した入出力特性を Fig.4 に示す。

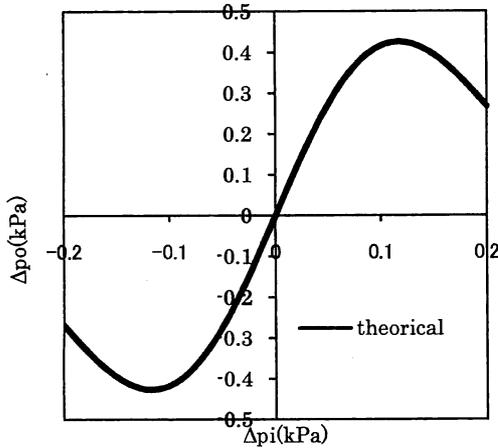


Fig.4 Theoretical Analysis of Input-Output Characteristics($b_s=0.75, h=0.4$)

4. 実験装置および実験方法

実験装置を Fig.5 に示す。コンプレッサで圧縮した空気を任意の値に調節しLPAの供給ポートに導く。この際、供給流量は測定の際は一定とする。

LPAの左右どちらかの入力部にも同じく圧縮した空気を供給し、左右の入力ポートに接続したゲッチングマンノメータにより差圧を測定した。又、出力ポートでの圧力はU字管マンノメータを用いて測定した。入力ポートに加える圧力を徐々に変化させ、各々対応する出力圧力を測定した。

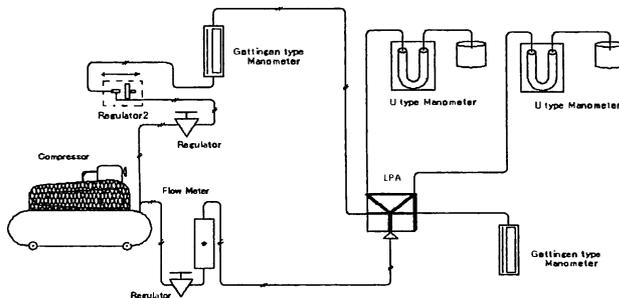


Fig.5 Experimental Plant Layout Drawing

LPAの性能を表現する特性には圧力増幅率を示す入出力特性、動作範囲を示す圧力ゲイン-供給流量特性および動的動作範囲を示す周波数応答特性がある。

本研究での圧力増幅率を示す入出力特性について次に説明する。

LPAの形状が入出力特性に大きく関係することはこれまでの文献や実験データ⁴⁾等から明らかである。

そこでLPAの入力ポート幅を変更した形状を多く作成し、入出力特性の実験を行い特性変化を検討した。

5. 実験結果および考察

実験供試素子は主ノズル幅 $b_s=0.75\text{mm}$ 、板厚 $h=0.4\text{mm}$ とし入力ポート幅 b_c を b_s の 0.92, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 倍と変更した素子を作製した。

$b_c/b_s=0.92$ の入出力特性の実験結果を Fig.6 に示す。

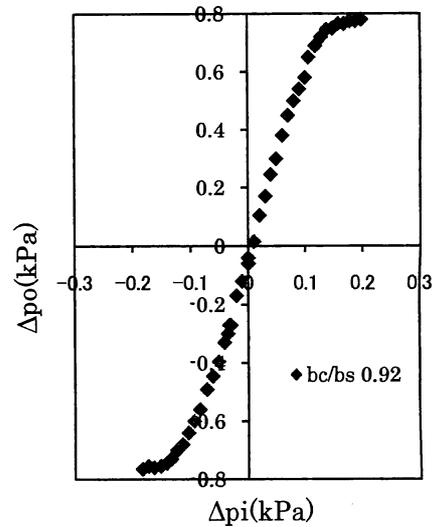


Fig.6 Input-Output Characteristics ($b_s=0.75, h=0.4$)

入力圧力が 0.1kPa 付近では出力圧力 p_o は入力圧力 p_i に比例しながら増加する。その倍率は約 5 倍である。入力圧力 0.1kPa 以上では出力圧力は増加しない傾向を示す。

入力ポート幅 b_c を変化させて、入出力特性の比較を行った実験結果を Fig.7 に示す。

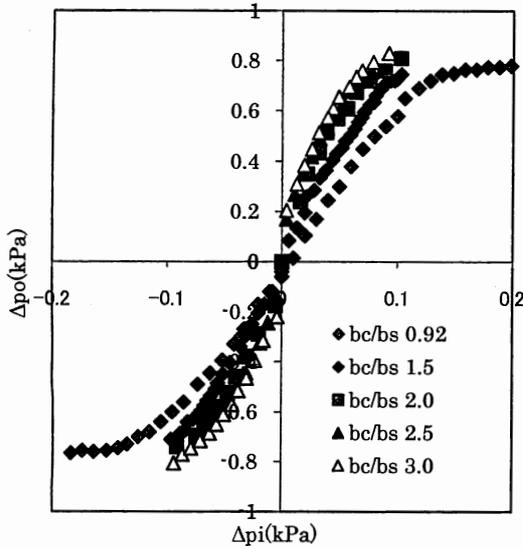


Fig.7 Input-Output Characteristics (Input-port Width)

入力ポート幅を広くすると、入力ポートの断面積が大きくなる。入力ポートでの噴流の運動量は流路の断面積と入力圧力の積で表されるので入力ポートより噴出される流体の運動量が大きくなる、従って主噴流に巻き込まれる運動量が大きくなり主噴流の偏向角が大きくなる。そのため増幅特性は向上するが増幅範囲は狭くなる。また入力ポート幅を主ノズル幅の2倍以上にすると増幅特性の変化はあまり見られなくなる。

6. LPA への特性解析式の適応

特性解析式で得られた入出力特性と同寸法の素子の実験データの比較を Fig.8 に示す。

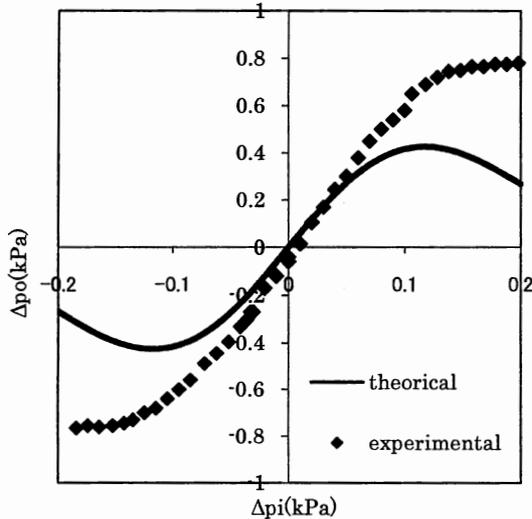


Fig.8 Input-Output Characteristics theoretical vs experimental (bs0.75 h0.4)

ここで理論値と実験値では圧力ゲインが少し異なる。これは特性解析式での流れは乱流域での使用を基準としているため、層流域で動作する LPA の実験データとでは誤差が生じているものと考えられる。そこで(1)の特性解析式を LPA に適用するためには何らかの補正値が必要である。

これに関するこれまでの研究⁴⁾では層流と乱流では流れ方が違うので、左右の圧力の解析式に流速と寸法に関する(6)式を乗じることで実験値との良好な一致が見られるとしている。

$$K = 0.26 + 1.33 \times 10^{-2} \cdot N_r \quad (6)$$

ここで N_r は

$$N_r = \frac{\sqrt{\frac{2p_s}{\rho}} \cdot b_s}{v \left(\frac{1 + 2 \cdot b_s}{b_s} \right) \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right)^2} \quad (7)$$

であり

ρ は空気密度、 ν は動粘性係数、および λ はアスペクト比で h/bs である。

この研究では $K=1.3$ の補正値を解析式に乗じることで実験値との良好な一致が見られるとしているが、補正値の詳細については明確にされていない。

層流から乱流へ遷移するとき圧力が低下する現象が知られている。その現象を Fig.9 に示す。対向したパイプ A, B において A のパイプに圧力 P_s 加えてゆくと、下流の B のパイプの圧力 P_o も上昇するが層流から乱流へ遷移する際にパイプ B の圧力が低下する。圧力低下後、さらにパイプ A での圧力をに上昇させていくと再びパイプ B の圧力が上昇する現象があるといわれている。これは層流状態より乱流状態に流れが変化する際の特徴的現象である。

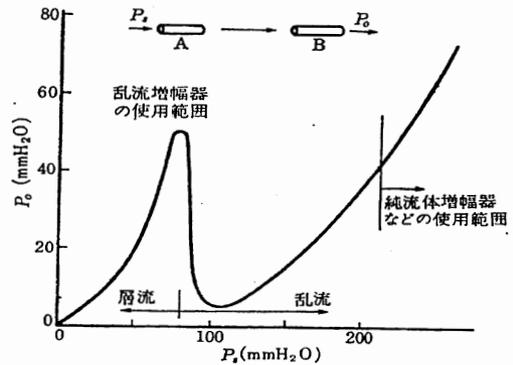


Fig.9 p_o vs p_s

LPA では高い圧力ゲインを実現するために遷移領域付近までを動作範囲としている。そこで次に層流から乱流への遷移領域付近での圧力低下減少を検討し補正値の解析を試みる。

7. 圧力低下現象測定のための実験装置および実験方法

実験装置図を Fig.10 に示す。

供試素子は供給ポート・出力ポート・ベントから構成され、それぞれのポート幅は 0.75mm とした。供給ポート、出力ポート間の距離はノズル幅の 8 倍の 6mm とし、板厚 h が 0.2mm, 0.4mm, 0.5mm, 0.8mm の 4 種類を作成した。

実験時は供給—出力ポートに対応する部分に穴の開けたアクリル板で任意の素子を挟み込み、供給—出力ポートそれぞれにチューブをつなぎ、コンプレッサーで圧縮した空気を減圧弁によって調節したものが素子の供給ポートへ流れる。その際の圧力を供給圧力 p_s とする。

素子に流れ込んだ空気は左右のベント、または出力ポートへと流れる。このときの出力側の圧力を回復圧力（出力圧力）とする。圧力は U 字管マノメータによって測定した。

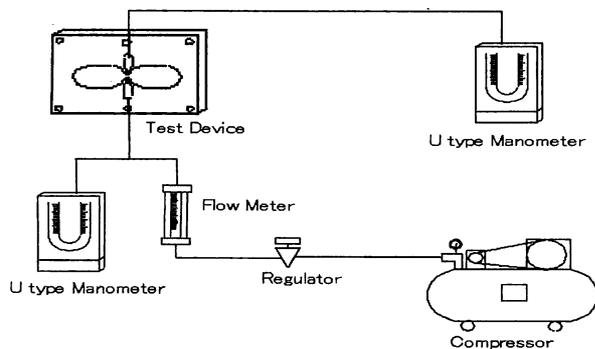


Fig.10 Experimental Plant Layout Drawing

8. 圧力低下現象の実験結果

素子の板厚 $h=0.4\text{mm}$ の時の供給圧力—回復圧力特性を Fig.11 に示す。図の横軸は供給圧力、縦軸には回復圧力と供給圧力との比率を示す。

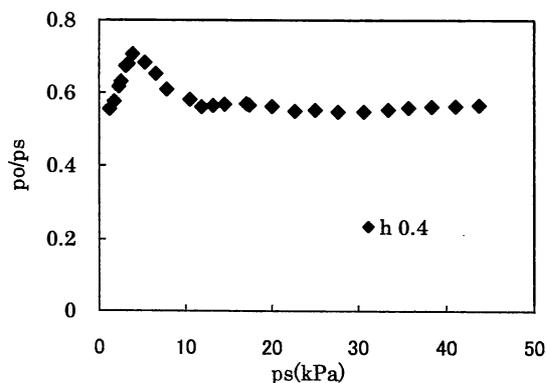


Fig.11 po/ps vs ps (bs0.75, h0.4)

供給圧力の増加とともに回復圧力比も徐々に増加し、5kPa 付近より低下し、10kPa 付近より又上昇する傾向を示している。これにより流れが層流より乱流へと変化する際の圧力低下現象が確認できた。

板厚 h を変更した場合の比較を Fig.12 に示す。

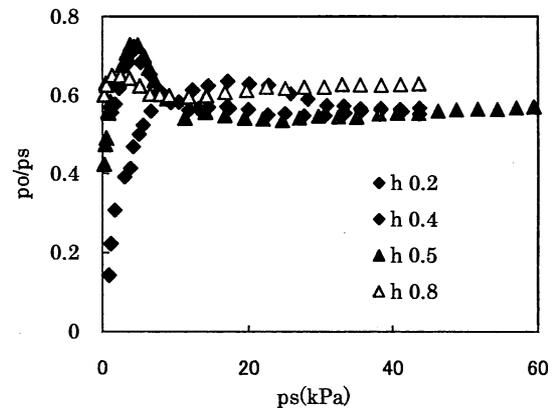


Fig.12 po/ps vs ps

板厚 0.4mm の場合は 0.5mm の場合と同じような傾向を示しており層流から遷移領域にかけて供給圧力に対し回復圧力比は比例的に上昇し、遷移領域から乱流域にかけて回復圧力比が低下し、のちに一定になっている。

一方、板厚が 0.2mm の場合には圧力低下の現象は見られなかったが、これは厚さがごく薄いため上下の壁の影響を受け層流状態を維持しやすく、流体が乱れないためと考えられる。

板厚が 0.8mm の場合は流路の断面積が大きくなり、上下の壁の影響を受けなくなり層流状態を維持できなくなり供給圧力に対する回復圧力比がほぼ一定になっていると考えられる。

次に Fig.12 の横軸をレイノルズ数に変更したグラフを Fig.13 に示す。

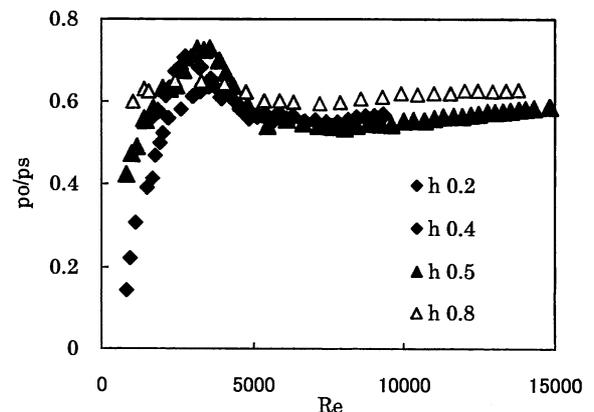


Fig.13 po/ps vs Re

板厚が 0.4mm, 0.5mm についてはレイノルズ数 3000 付近をピークに回復圧力比が低下している。文献にあるような圧力の急激な低下減少こそ確認することはできなかったが、Fig.12 より層流と乱流への遷移領域においては回復圧力比が大きく異なっている。

板厚 0.4mm において先ほどと同じ測定データを使用し、横軸に供給圧力、縦軸に回復圧力をとったものを Fig.14 に示す。

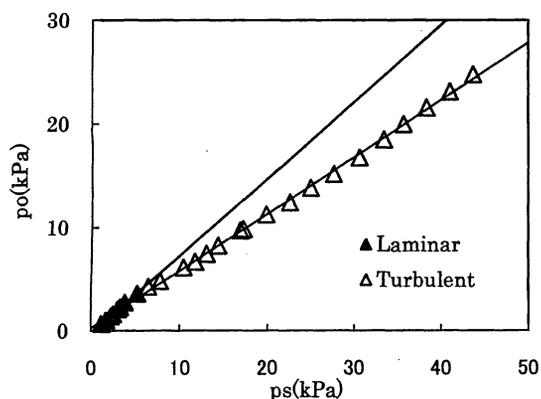


Fig.14 po vs ps (bs0.75, h0.4)

Fig.11 で示したグラフより、供給圧力に対し回復圧力比が比例的に上昇している部分を層流、回復圧力比が低下する以降を乱流と仮定しそれぞれのデータについて最小二乗法により推定する。

それぞれの直線を比較すると層流領域と乱流領域では傾きが異なっていることがわかる。

最小二乗法より求めた直線の傾きを比較すると乱流と層流では 1.42 倍異なることがわかった。

同様に板厚が 0.5mm の場合では 1.28 倍異なることがわかった。

Fig.8 の理論値の出力圧力に Fig.14 で求めた補正値を乗じたもの Fig.15 に示す。

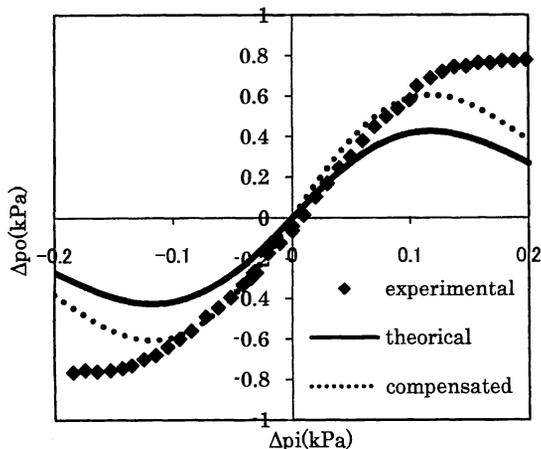


Fig.15 Modified of Input-Output Characteristics (bs0.75 h0.4)

Fig.14 より、補正値を解析式に乗じたものを実験値と比較してみると、補正値を乗じない時のものよりもグラフの傾きが実験値に近く、回復圧力の値も補正後のグラフの方が実験値に近い値となっている。

9. 結言

LPA の入出力特性を解析するため LPA の入力ポート幅の寸法を変更し実験をした結果、次のようなことがわかった。

- 1) LPA の入力ポートの寸法を大きくすると入力ポートより噴出される運動量が大きくなるため、主噴流の傾きが大きくなる。
- 2) 入力ポート幅を主ノズル幅の 2 倍以上にすると傾きの変化が見られなくなる。
- 3) LPA の入出力特性は乱流噴流の特性解析と良好な一致がみられず、補正が必要である。
- 4) 供給-回復圧力特性より層流域と乱流域それぞれに最小二乗法を適用したときのグラフの傾きが異なる。
- 5) 供給-回復圧力特性より得られたグラフの傾きの比率で理論解析式の出力圧力の補正をすることで実験値との良好な一致が見られた。

参考文献

- 1) 原田 正一, 尾崎 省太郎 共編: 流子工学 p157(1971)
- 2) 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, 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)
- 3) 原田 正一, 尾崎 省太郎 共編: 流子工学 p147(1971)
- 4) 清水, 林: 層流形比例素子の静特性に関する一考察, 日本機械学会東北支部一関地方講演会講演論文集 p175/177(1995)