

LPA の多段増幅法について

The Multistage Amplifiers of LPA

○川崎慎司*, 菅原翼*, 清水久記**, 廣木富士男***, 山本圭治郎†
○Shinji Kawasaki*, Tsubasa Sugawara*, 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), 多段増幅(Multistage Amplifier),
入出力特性(Input-Output Characteristics), 圧力ゲイン(Pressure Gain),
周波数応答特性(Frequency Response)

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

流体の微圧増幅器として層流形比例増幅素子(Laminar Proportional Amplifiers 以下 LPA と略す)が知られている。この LPA は層流域で動作するため圧力ゲインが高い、パワー消費量が少ないなどの優れた特徴を持っており、このため微小圧力の増幅が可能であり流体式オペアンプと呼ばれている。増幅の効果を上げるためには、多段に LPA を構成する必要がある。これまでの研究において多段結合の動特性は、各段を接続する LPA の形状、寸法や接続管路の特性に影響され、増幅率が大きく異なると報告されている。

本研究では同形状の LPA を用いて多段増幅器を構成しその入出力特性を検討したものである。また、LPA はアナログ信号の増幅を行うことが可能であるため、その増幅率を上げることにより信号のアナログよりデジタル化が可能となる。これまでデジタル動作をする流体式演算器は乱流噴流を用いており乱流であるため空気消費量が大き

く、騒音が発生する等の問題点も上げられており実用化までには至っていない。そこで LPA を用い、デジタル動作が可能であるならば、微小な圧力信号により演算動作ができることになり、用途が拡大するものと考えられる。

以下に実験結果を報告する。

2. LPA の形状および動作原理

2.1 LPA 素子の形状について

LPA 素子の寸法及び構成を Fig.1 に示す。

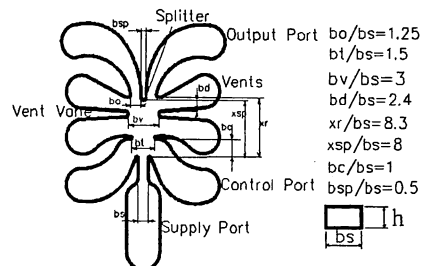


Fig.1 Size and Geometry of LPA

LPA の形状の主要部は主ノズル、スプリック、左右に設けられた入力ポート、出力ポート、ベントおよびベントペーンからなり、左右対称の形状である。

厚いカバープレートを用いてこの流路パターンを上下より挟み込むことにより気密性を持つ構造となる。また素子の各部の寸法は、主ノズル幅 b_s を基準として図の右のように決定している。

2.2 LPA の動作原理

噴流の偏向を Fig.2 に示す。(a)のように供給ポートより噴出する流体は真直ぐ流れるが噴流の左右に加わる圧力に差が生じると噴流はいずれか一方に傾く。

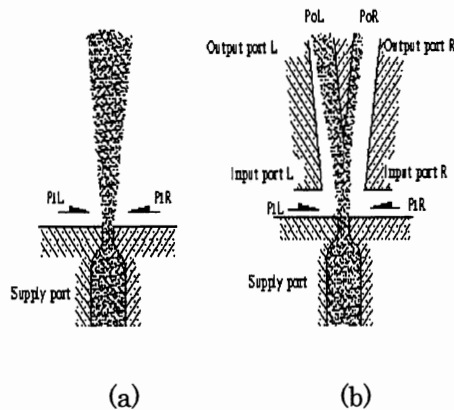


Fig.2 Deflection of Jet

(b)のように左右に入力ポート、出力ポートを設け、図のように右側入力圧力を大とすると、噴流は左出力ポートに偏向することになる。僅かな入力圧力差により噴流を偏向させ、出力ポートに大きな圧力差を得ることができ、また入力圧力差と出力圧力差との間には比例関係が成立する。入力圧力差により出力ポートに回収される出力圧力が異なるので、圧力増幅率 G は次式のように計算される。

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

この素子は噴流偏向形比例増幅素子と呼ばれており、流体信号の増幅器となる。この素子は一般に約 10 倍の圧力増幅率を持っている。

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置図

実験装置図を Fig.3 に示す。LPA の入力ポートに加える圧力を徐々に変化させ、出力ポートでの圧力は U 字管マンノメータとゲッチングマンノメータを使用し測定を行った。なお、作動流体は空気である。

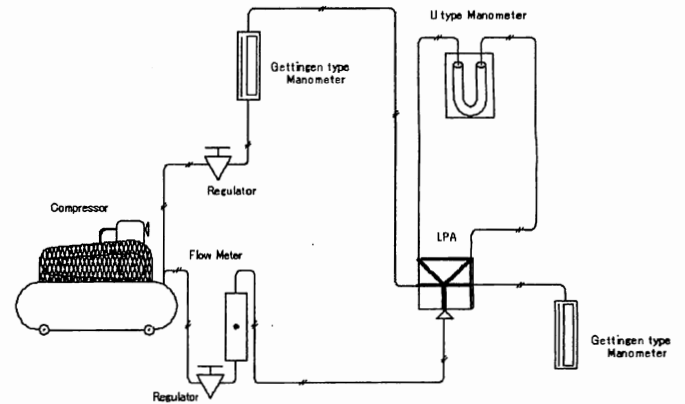


Fig.3 Experimental Plant Layout Drawing

3.2 多段増幅器の接続法について

三段増幅器の接続法を Fig.4 に示す。パイプを使用せず、LPA の出圧力が次の LPA の入力に入るように素子の向きを交互に変え 3 枚を一つのカバープレートの中に挟みこんだ。また、素子間に Fig.4 の B のようなスペーサーを挟んだ。圧力増幅率は、最初段の入力差と最終段の出力差により (1) 式で算出した。

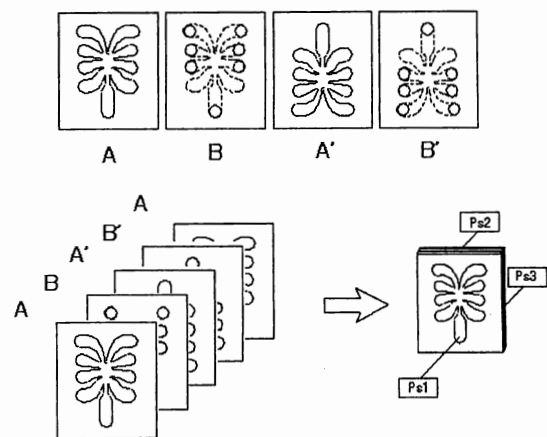


Fig.4 Connection of Three Stage Amplifier

4. 実験結果と考察

4.1 LPA の特性

LPA の性能の特性表示法として 1) 圧力ゲイン-供給流量特性, 2) 供給圧力-供給流量特性, 3) 周波数応答, 4) 入出力特性がある. それらを次に示す.

4.1.1 圧力ゲイン-供給流量特性

Fig.5 に bs0.375mm の LPA の圧力ゲイン-供給流量特性を示す. 縦軸は圧力ゲイン, 横軸は供給流量を示す. 実験では供給圧力を増加しながら, 準静的と考えられる 20Hz の圧力信号を素子入力部に加え, 入力部での圧力振幅 A_i , 出力部での圧力振幅 A_o を圧力変換器を用いて測定した. 圧力ゲイン G_p は次式で求めた.

$$G_p = 20 \log_{10} \left(\frac{A_o}{A_i} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

供給流量の増加に伴い圧力ゲインは増加するが, この程度は形状により異なっている. 各形状ともに 2cc/s 付近よりは大きな増加が見られない. この実験により LPA を多段増幅する際に用いる供給流量より圧力ゲインがわかる. また, 実験は出力圧力が乱流となる時点まで行っているため素子の動作範囲が決定できる.

この特性は多段増幅器を構成する際の各 LPA の供給流量の設定に有効である.

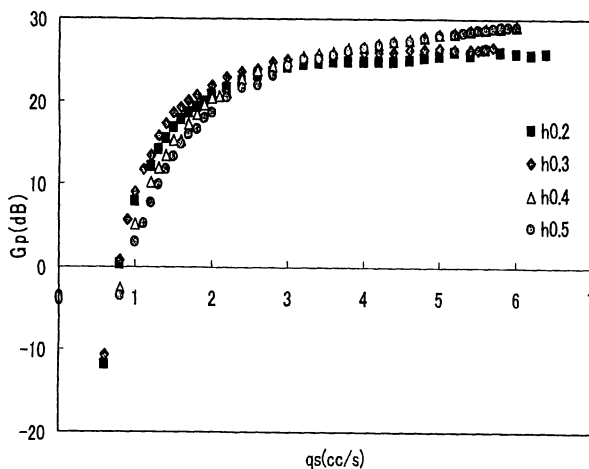


Fig.5 G_p vs q_s (bs0.375mm)

4.1.2 供給圧力-供給流量特性

Fig.6 に bs0.375mm の素子の供給圧力-供給圧力特性を示す. 縦軸は供給圧力, 横軸は供給流量を示す. 供給流量の増幅に伴い, 供給圧力も増加するが素子の板厚により異なっている.

板厚と供給ノズル幅の比はアスペクト比であるが, アスペクト比が小さい場合には供給圧力は高く, 逆にアスペクト比が大きい場合には低下する. このことより, 出力圧力の高い特性が要求される場合には, 板厚の薄い LPA を用いれば良いことがわかる.

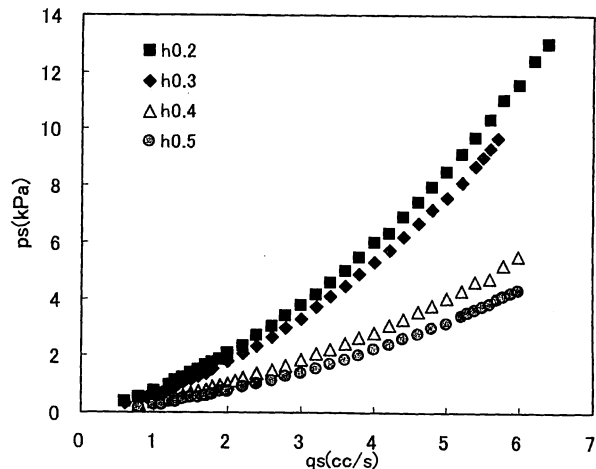


Fig.6 p_s vs q_s (bs0.375mm)

4.1.3 周波数応答特性

周波数応答特性は動的入力信号に対する素子の応答範囲を示す特性である. 素子の板厚および供給流量を Table1 に示す.

周波数応答特性の実験は, 入力ポートにスピーカを接続し周波数を 20Hz から徐々に増加させ, 入力部での圧力振幅 A_i , 出力部での圧力振幅 A_o を測定した. この時の LPA の供給流量は一定である. 圧力ゲイン G_p は圧力ゲイン-供給流量特性と同様に(2)式で算出した.

周波数応答特性を Fig.7 に示す. 縦軸は圧力ゲイン, 横軸は周波数を示す. bs はすべて 0.375mm である.

周波数の増加に伴い圧力ゲインは徐々に低下するが板厚大の場合は一定となる範囲は広い, 一方, 板厚小の場合は一定の範囲は狭い傾向がある.

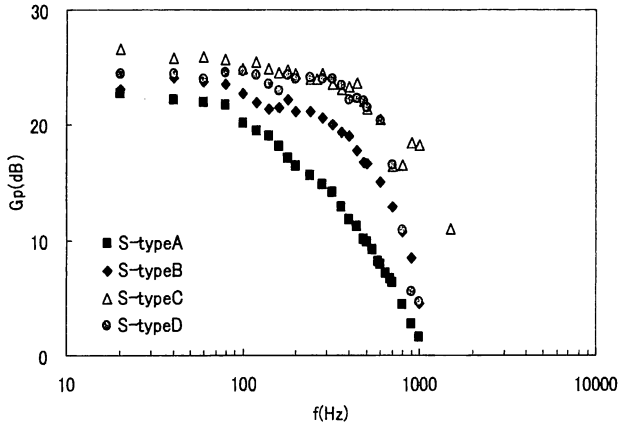


Fig.7 Frequency Response(bs0.375mm)

Table1 Composition of Single Stage Amplifier

type	h(mm)	qs(cc/s)
S-typeA	0.2	4.8
S-typeB	0.3	4.0
S-typeC	0.4	4.8
S-typeD	0.5	4.0

4.1.4 入出力特性

bs0.375mmの単段増幅の入出力特性を Fig.8 に示す。縦軸は出力圧力、横軸は入力圧力を示す。

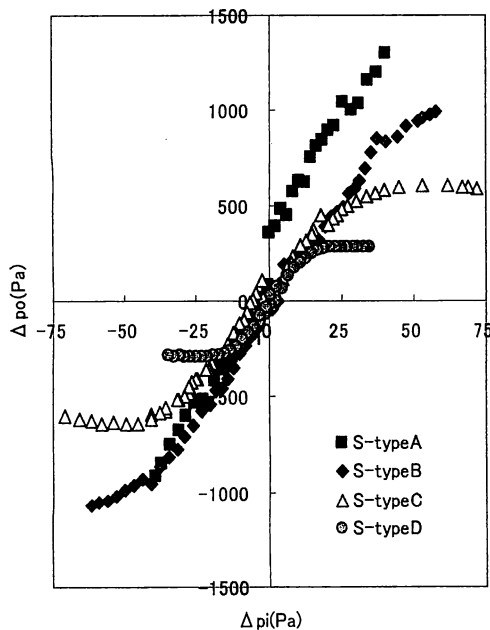


Fig.8 Input-Output Characteristics(bs0.375mm)

入力と出力の間には比例関係があり、圧力増幅率は $h0.3mm$ で約 20 倍であり、各形状とも圧力増幅率はほぼ同等である。さらに形状の大きい LPA の場合には流路断面積が大となるため出力圧力は低い。一方、形状の小さい LPA の出力圧力は高いので、圧力の高い出力信号を得るには形状の小さい LPA を用いれば良いことが分かる。

4.2 LPA の多段増幅について

LPA は出力ポートと次段の入力ポートを結合することにより多段結合が可能である。LPA は約 10 倍の圧力増幅を持っているが、これを多段結合することができるならば、さらに高い圧力増幅が可能となる。そのため、微圧を増幅することができ、用途が拡大することになる。アナログ信号の増幅に利用できるのは LPA の入出力特性の直線範囲の部分である。多段増幅により直線部分の傾きが増加すれば、アナログ信号をさらに増幅させることができる。

4.3 二段増幅結果

Fig.9 に二段増幅の入出力特性を示す。Table2 に二段増幅に使用した素子の構成(各板厚 h およびその供給流量 qs)を示す。LPA の bs はすべて $0.375mm$ である。bs0.375mm の LPA は流路の断面積が小さいため高い圧力を示す。また、薄い素子ほど出力圧力が高いので、増幅器の一段目の板厚より二段目の板厚が小さくなるよう組み合わせた。

二段増幅を行った場合、単段増幅 $h0.3mm$ の圧力増率 20 倍に対して、二段増幅 D-typeC では 93 倍となっている。入力圧力差 P_i が $10Pa$ 以上で出力圧力差 P_o は一定になる。それぞれの組み合わせを比較すると二段目の板厚により、出力圧力が異なることがわかる。そのため、D-typeB と D-typeC においては一段目の板厚が異なるにもかかわらず、同程度の圧力増幅しか得られなかった。このように同じ二段増幅であっても構成する素子の性能によって増幅率が異なることがわかる。

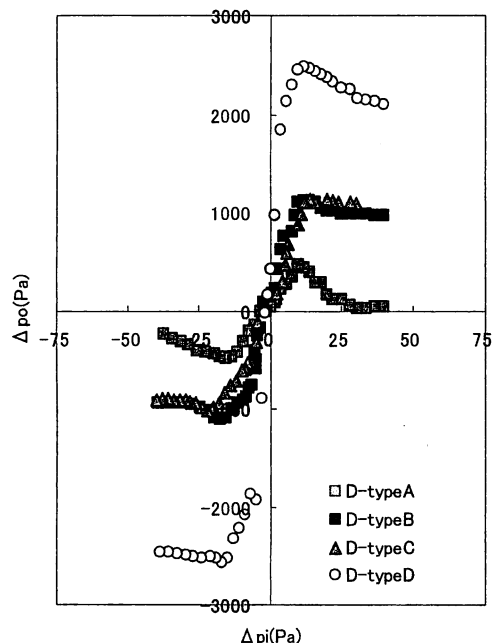


Fig.9 Input-Output Pressure Characteristics of Double Stage Amplifier

Table2 The Composition of Double stage Amplifier

type	h1(mm)	h2(mm)	qs1(cc/s)	qs2(cc/s)
D-typeA	0.5	0.4	4.8	4.0
D-typeB	0.5	0.3	4.8	4.0
D-typeC	0.4	0.3	4.8	4.0
D-typeD	0.4	0.2	4.8	4.0

4.4 三段増幅結果

Table3 に三段増幅に使用した素子の構成(各板厚 h およびその供給流量 qs)を示す. 二段増幅の時と同様に素子の厚さと出力圧力には密接な関係があるため, 増幅器の一段目には $h0.4\text{mm}$ の素子, 二段目には $h0.3\text{mm}$ の素子, 三段目には $h0.2\text{mm}$ の素子を用いた.

Fig.10 に三段増幅の入出力特性を示す. T-type A は二段増幅 D-typeD と同程度の圧力増幅しか得られていない. T-typeB では, 最大で約 1500 倍となった. このことより, 各段での供給圧力の設定が重要であることがわかる.

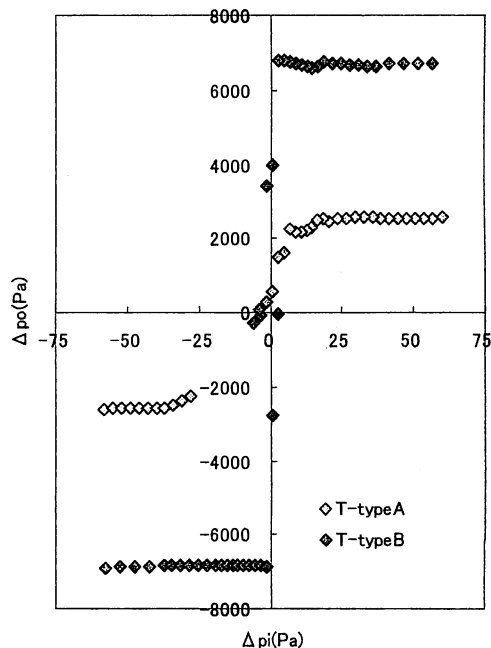


Fig.10 Input-Output Pressure Characteristics of Triple Stage Amplifier

Table3 The Composition of Triple Stage Amplifier

type	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	qs1 (cc/s)	qs2 (cc/s)	qs3 (cc/s)
T-typeA	0.4	0.3	0.2	4.8	4.2	4.0
T-typeB	0.4	0.3	0.2	2.4	3.0	4.8

Fig.11 に各段の入出力特性の比較を示す. 段数を増やすに圧力増幅率が増しているがわかる. さらに, 出力圧力一定となる入力圧力の範囲は段数を増やすたびに狭くなるが, このことにより, 信号のアナログよりデジタル化が可能となる.

各圧力増幅率は $bs0.375\text{mm}$ の単段増幅 S-typeA が 20 倍, 二段増幅 D-typeD が 93 倍, 三段増幅 T-typeB が 1500 倍となった. 通常, 三段増幅の倍率は(一段目の増幅率) \times (二段目の増幅率) \times (三段目の増幅率)で得られ, 今回使用した素子の場合, 三段増幅では約 10400 倍程度の倍率が見込まれる. しかし, 各出力端が開放状態となっているために, 本研究ではそこまで至らなかった.

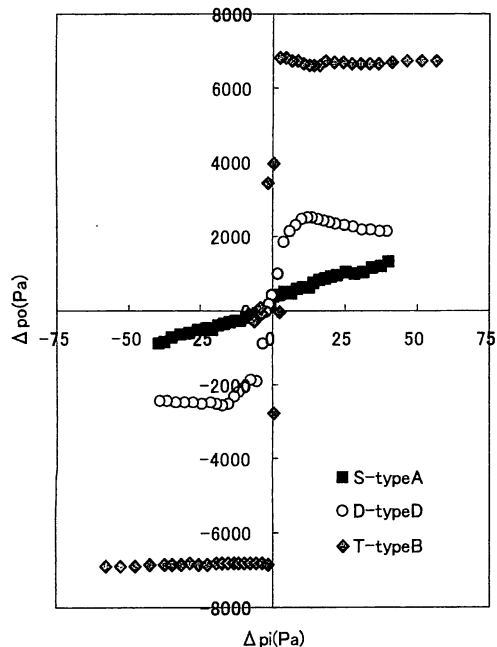


Fig.11 Comparison of Input-Output Pressure Characteristics

4.5 三段増幅周波数応答特性

Fig.12 に各段の周波数応答結果を示す。縦軸は圧力ゲイン、横軸は周波数である。

単段の場合と比較し、三段増幅器では早期に圧力ゲインの低下が見られる。これは、三段増幅器の最終段に高出力圧力を得るためにh0.2mmの素子を用いているため、応答範囲が狭くなっているものと考えられる。

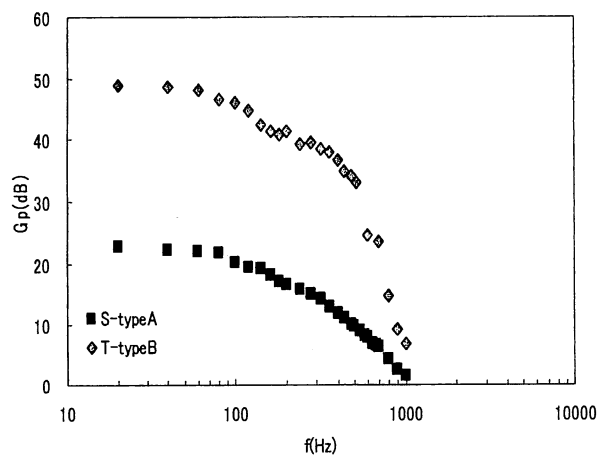


Fig.12 Comparison of Frequency Response

5. 結言

LPA を用い多段増幅器を構成し、実験した結果、次のことが分かった。

- 1) 圧力増幅率は段数を増やすごとに増加し、入力圧力に対して、単段増幅で 20 倍、二段増幅で 93 倍、三段増幅で 1500 倍の出力圧力を得られた。
- 2) 多段増幅の入出力特性においても、接続する LPA の形状、寸法および供給流量の設定に影響を受ける。
- 3) 微小な圧力信号に対して、ステップ形状に近い出力波形が得られ層流域でのデジタル動作が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 清水, 佐藤, 畑中: 層流形比例素子の圧力ゲインと動作範囲に及ぼす寸法形状の影響, 計測自動制御学会論文集 Vol.22, No. 12 76/81(1985)
- 2) 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 175/177(1995)