

LPA を用いた三段増幅器の特性について

The Characteristic of Three-stage Amplifieres with LPA

○菅原翼*, 清水久記**, 廣木富士男***, 山本圭治郎†

○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), 圧力ゲイン(Pressure Gain), 周波数応答(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

層流域で作動する層流形比例素子(Laminar Proportional Amplifiers 以下LPAと略す)は流体増幅器として知られている。このため、LPAはわずかな圧力変化を高い増幅率で増幅することが可能であるが、この増幅率はLPA内部の形状、寸法に依存しており、LPAに関する多くの報告¹⁾がなされている。

しかし、この増幅率はLPA単段では限度があるため、増幅率をさらに向上させるためにはLPAを多段に組み込む必要がある。この多段構成の一例として、初段は板厚の厚い形状とし、二段、三段と徐々に板厚を薄くする構成や、初段に薄い形状を用い、二段、三段と板厚を厚くする構成の場合が考えられる。前者は微圧を高倍率で増加する場合に有効であり、後者はアクチュエータ等を駆動する場合に有効な構成といわれる²⁾。

本研究ではLPAを用いた種々の三段増幅器を作製し、各種特性や用途を検討することを目的としている。三段増幅器の性能を評価する静特性実

験である入出力特性、動特性実験である周波数応答実験を行い、増幅率、ゲイン、位相遅れを測定し、LPAの動作範囲を求めた。また、三段増幅器の応用としてLPAフィードバック発振流量センサの発振周波数の増幅を試みたので報告する。

2. LPAの形状および動作原理

2.1 LPAの形状および寸法

LPAの形状と各部寸法をFig.1に示す。

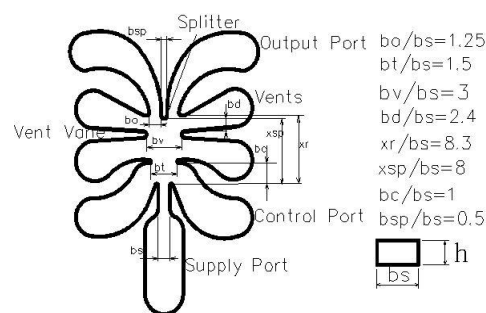


Fig.1 Schematic Diagram of LPA

LPAは供給ポート、主ノズル、スプリッタ、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ベンで構成され、左右対称の形状である。また、LPAの寸法は、主ノズル幅 bs を基準に決定され、 h は板厚である。一般的にこの厚さが薄いほど圧力増幅率が高いといわれている。

2.2 LPAの動作原理

流体を供給ポートからLPAに流し、左右の入力ポートに圧力差 P_{iL} , P_{iR} を生じさせると、噴流は偏向し、出力ポートに圧力差 P_{oR} , P_{oL} が生じる。これにより、圧力増幅率 G は(1)式で計算される。

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

LPAは一般に出力ポートを閉鎖した場合、約10倍の増幅率を持っており、そのため層流形比例素子と呼ばれている。

2.3 LPAの構成

Fig.2にLPAの構造を示す。ワイヤーカット放電加工機で作製したLPA形状Aに厚い真鍮製のカバープレートBを、LPAの側面に両側から挟み込むことにより気密性を持たせている。

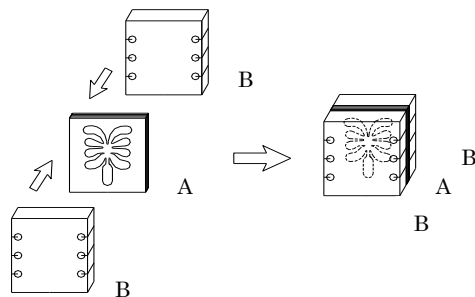


Fig.2 Structure of LPA

3. 実験方法および実験結果

実験方法および実験結果をLPA単段の場合、三段増幅器、流量センサ応用測定の場合に分けて説明する。

3.1 単段特性

3.1.1 入出力特性実験について

Fig.3に入出力特性実験装置を示す。LPAの入

力ポートにはゲッチングマンノメータ、出力ポートにはU字管マンノメータを接続し、減圧弁を調節し、入力圧力差、出力圧力差を測定した。なお、作動流体は空気を用い、LPAの供給流量は一定としている。

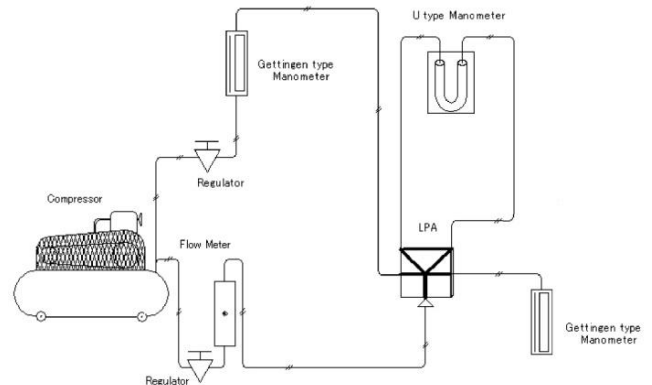


Fig.3 Experiment of Input-Output Characteristic

3.1.2 入出力特性実験結果について

主ノズル幅 bs と板厚 h を変化させた場合のLPAの入出力特性実験結果をFig.4に示す。縦軸は出力圧力差、横軸は入力圧力差である。入力と出力の間には比例関係があり、これが増幅率を示している。流路が狭い場合には内部圧力が上昇するため、形状の小さいLPAでは出力圧力は高くなる。

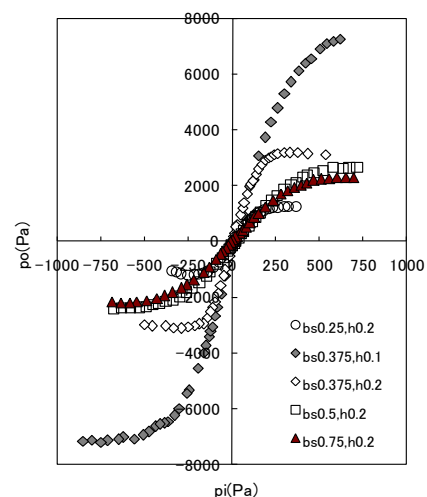


Fig.4 Input-Output Characteristic

3.1.3 周波数応答特性について

Fig.5に周波数応答特性を示す。周波数応答特

性は動的に変化する入力信号に対し、出力信号がどの周波数帯域まで追従できるかを示す重要な応答である。LPAの入力ポートにスピーカから周波数を変えた信号を加え、そのときの入力圧力の振幅 p_i と出力圧力の振幅 p_o より、圧力ゲイン G_p は次式のように求める。

$$G_p = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_o}{p_i} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

一般的な周波数特性は図の右のような特性となる。縦軸が圧力ゲイン、横軸が角周波数である。曲線の最大値が共振周波数、初期の定常状態から3dB減少した周波数をカットオフ周波数と呼ぶ。

また、定常状態からカットオフ周波数までの範囲が帯域幅であり、これが動的な変化に対するLPAの動作可能な範囲とされている。

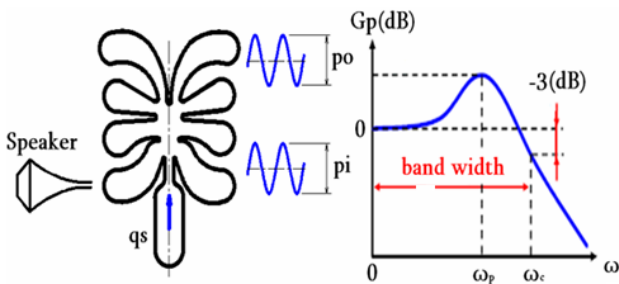


Fig.5 Frequency Response of LPA

位相遅れは、LPAの入、出力部信号波形の山のずれを測定することで求められる。

3.1.4 周波数応答実験装置について

周波数応答の実験装置を Fig.6 に示す。

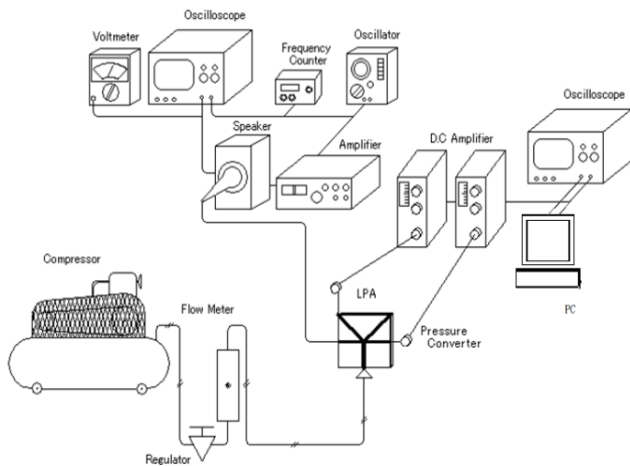


Fig.6 Experiment of Frequency Response

LPAの供給流量は、減圧弁、流量計を用いて任意の値に調節する。LPAの入力ポートへは、周波数発生器により発生させた周波数を、スピーカを通して波形を加える。またLPAの出力ポートに圧力変換器を接続して電気信号に変換し、増幅器で信号を増幅している。この信号をオシロスコープで確認しながら、デジタル波形変換器によりパソコンで計算処理している。

3.1.5 周波数応答実験結果について

3.1.5.1 供給流量変化とゲイン特性

Fig.7に bs0.75, h0.4 のLPAにおいて供給流量 q_s を変化した場合の周波数応答特性実験の結果を示す。縦軸は圧力ゲイン、横軸は周波数である。

q_s を三段階に変化させたが、 q_s が 3.9cc/s の場合、周波数が 1000Hz 付近までは圧力ゲインは約 14dB 程度で、ほぼ一定の値で推移し、その後は圧力ゲインの減少傾向が見られる。カットオフ周波数は 1200Hz 程度と推定される。同様に、 q_s が 6cc/s の場合は、定常状態の圧力ゲインは 17dB、カットオフ周波数は 2200Hz である。また、10cc/s の場合においては、定常状態の圧力ゲインは 17dB 程度の値で推移し、カットオフ周波数は 2800Hz と推定される。

以上の結果より供給流量が増加するほど帯域幅が広がる傾向が確認できる。一方、ある一定の供給流量を超えると圧力ゲインの増加傾向は見受けられず、周波数応答特性に若干の乱れが生じることもわかった。そのため、供給流量は使用するLPAによって適切な値を用いる必要がある。

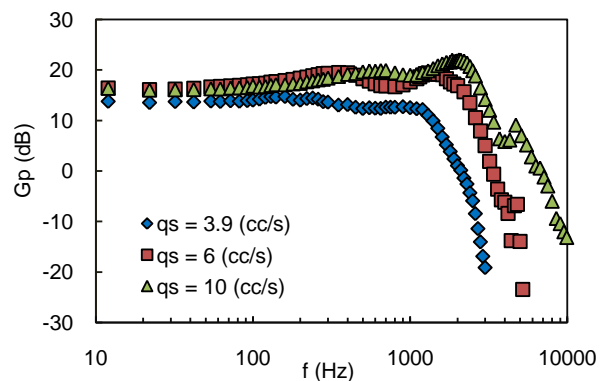


Fig.7 Gain Characteristic of LPA(bs0.75, h0.4)

3. 1. 5. 2 主ノズル幅変化とゲイン特性

Fig.8 に bs0.375, h0.4 の素子で q_s が 4.8cc/s の場合と, bs0.75, h0.4 の素子で q_s が 6.0cc/s の場合の実験結果を示す. bs0.375 の場合, 圧力ゲインは定常状態で約 24dB, カットオフ周波数は 500Hz であった. bs0.75 の場合と比較すると, 圧力ゲインは高いものの, カットオフ周波数が低くなる傾向が見られる.

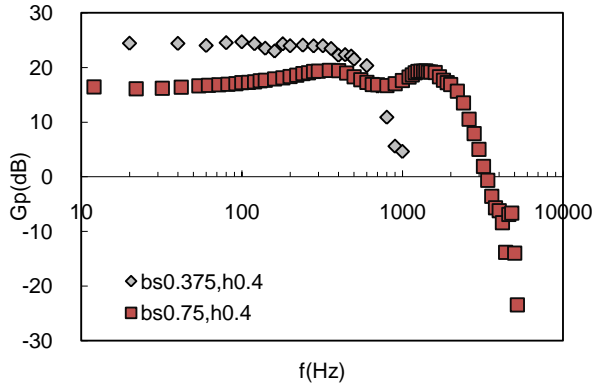


Fig.8 Gain Characteristic of LPA

3. 1. 6 供給流量変化と位相特性

Fig.9 に bs0.75, h0.4 の素子の位相特性を示す. 縦軸は位相遅れ, 横軸は周波数である. 周波数が増加するにつれ, 徐々に位相遅れが増加するが, 供給流量が大となるほど位相遅れは少ないことを示すことがわかった.

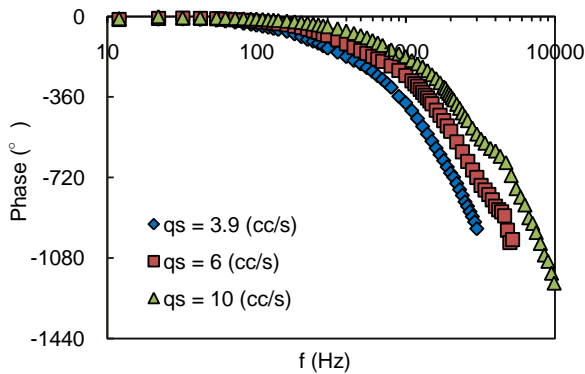


Fig.9 Phase Characteristic of LPA (bs0.75, h0.4)

3. 1. 7 主ノズル幅変化と位相特性

Fig.10 に h0.4 で比較した bs0.375 と bs0.75 の実験結果を示す. bs が変更されても位相遅れはほぼ同等の値を示している.

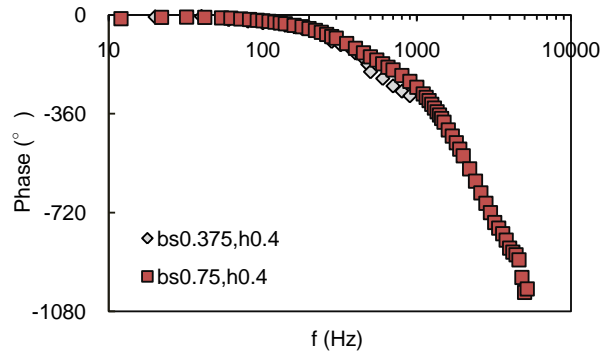


Fig.10 Phase Characteristic of LPA

3. 2 三段増幅器の寸法

本研究では LPA の増幅効果を上げるために, 5 種類の三段増幅器を考察した. その各寸法を Table1 に示す. ここで基準 LPA を A, B, C, 改善形 LPA を A', B' と表す. 改善形 LPA は特性改善のため流路内部寸法を変更した LPA³⁾ である. また, h および q_s の横の添字は, 使用した段数である. なお, 供給流量は実験的に検討を行い, 最適な値を用いた.

Table1 Composition of Three-stage LPA

type	bs	h1	h2	h3	qs1	qs2	qs3
	(mm)			(cc/s)			
A	0.75	0.4	0.3	0.2	8.7	5.2	14.0
A'		0.2	0.3	0.4	4.8	4.6	12.2
B		0.4	0.3	0.2	8.7	5.2	14.0
B'		0.2	0.3	0.4	9.0	7.0	7.0
C	0.375	0.4	0.3	0.2	4.8	4.2	4.0

3. 2. 1 三段増幅器の構成

三段増幅器の構成を Fig.11 に示す. LPA の出力ポートが次段の LPA の入力ポートに繋がるように LPA の上下を反転させて並べ, 3 枚を一つのカバープレート内に挟みこんだ. ここで, LPA 間には図の B のようなスペーサーを挟み込んでいる.

この方式は接続流路の影響がない有効な方法である. なお, 多段増幅器の圧力増幅率は, 一段目の入力ポートの圧力差と最終段の出力ポートの圧力差により(1)式と同様に算出する.

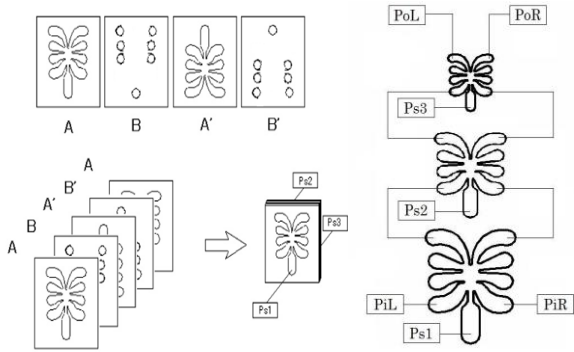


Fig.11 Connection of Three-stage LPA

3.2.2 入出力特性実験結果

Table2 に bs0.375 の LPA を用いた三段増幅器の入出力特性における LPA の構成と供給流量の設定値を示す。また、その実験結果を Fig.12 に示す。縦軸は出力圧力、横軸は入力圧力である。LPA の段数を二段、三段と増やすほど圧力増幅率が高くなる。一方、出力圧力が入力圧力に比例する範囲は狭まる傾向がある。

Table2 Composition of LPA

stage	bs	h1	h2	h3	qs1	qs2	qs3
	(mm)			(cc/s)			
One	0.375	0.2	—	—	4.8	—	—
Two		0.4	0.2	—	4.8	4.0	—
Three		0.4	0.3	0.2	2.4	3.0	4.8

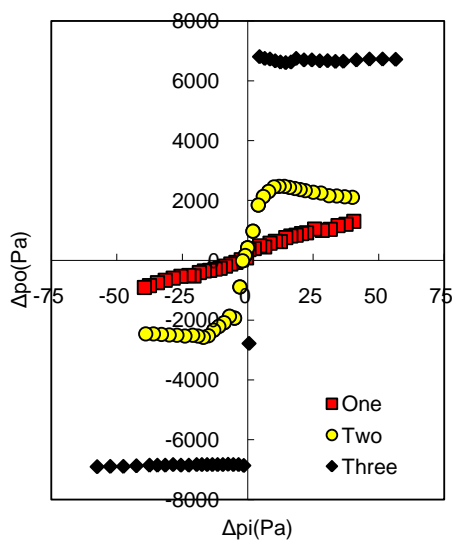


Fig.12 Input-Output Pressure Characteristic of Three-stage LPA(bs0.375)

3.2.3 周波数応答実験結果

3.2.3.1 基準 LPA 構成による実験結果

Fig.13 に基準 LPA の三段増幅器 A タイプと B タイプの実験結果を示す。A タイプは素子の一段目から順に、板厚を 0.4mm, 0.3mm, 0.2mm と徐々に薄く構成した場合であり、B タイプは反対に 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm と厚さを増やすように構成した場合である。この A タイプは圧力センサの三段増幅器として、また、B タイプはアクチュエータ等を駆動するための三段増幅器として有効であるといわれている。A タイプについては、定常状態で圧力ゲインは 40dB であるのに対し、B タイプは 25dB 程度であった。カットオフ周波数に関しては、A タイプは約 1000Hz, B タイプは 600Hz と A タイプの方が良好な値が得られた。

以上のことより、圧力センサの信号の三段増幅を行う際は段数を重ねるごとに素子の厚さを薄くする方が望ましいことが確認できた。

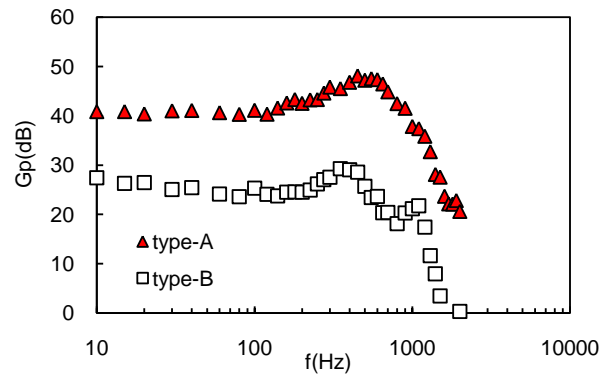


Fig.13 Gain Characteristic of Standard Three-stage LPA(bs0.75)

3.2.3.2 改善形 LPA 構成による実験結果

Fig.14 に改善形 LPA の三段増幅器 A'タイプと B'タイプの比較を示す。A'タイプは、定常状態の圧力ゲインは約 37dB, カットオフ周波数は 1300Hz, B'タイプに関しては、圧力ゲインは約 28dB, カットオフ周波数は 1200Hz であった。以上より改善形 LPA に関しても多段増幅を行う場合、板厚を徐々に薄くする方が有用であるといえる。

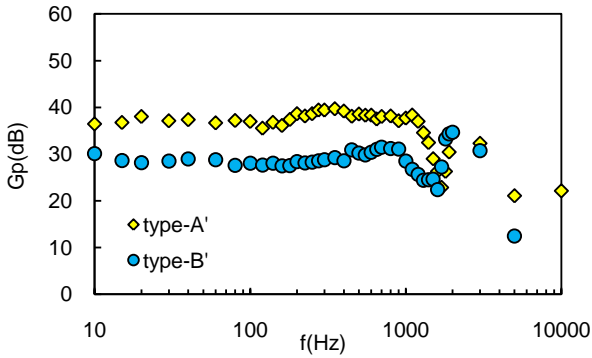


Fig.14 Gain Characteristic of Improved Three-stage LPA(bs0.75)

3. 2. 3. 3 三段増幅器の特性比較(基準, 改善形)

Fig.15に板厚を徐々に薄くしていった場合の基準 LPA と改善形 LPA の比較を示す. 基準 LPA の方が圧力ゲインは若干高いが, 共振周波数付近において圧力増加が見られる. 一方, 改善形 LPA の場合, 共振周波数付近の圧力ゲインの増加傾向は見られず, 比較的一定となっている. カットオフ周波数に関しては, 改善形が高い値を示し, より広い帯域幅が得られた.

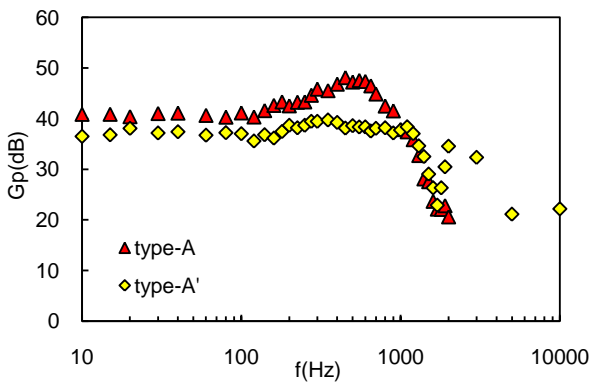


Fig.15 Characteristic comparison of A-type

3. 2. 3. 4 主ノズル幅変化の影響

Fig.16に bs0.375 と bs0.75 の LPA の周波数応答を示す. bs0.375 の場合, 圧力ゲインは最大 50dB 程度の値であった. しかしながら, 一定な範囲は少なく, 周波数が増加するにつれ, 徐々に圧力ゲインの減少傾向が見られ, 不安定となっている. カットオフ周波数についても, 120Hz 程度と bs0.75 の場合よりもかなり低い値となった.

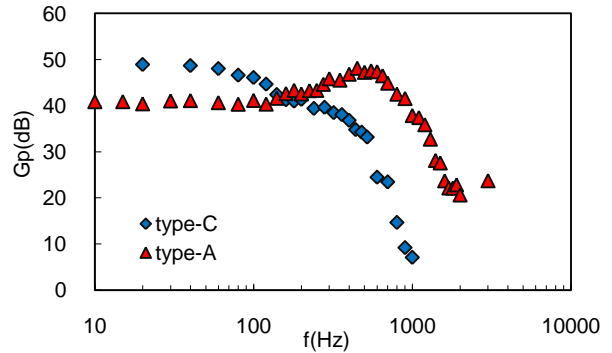


Fig.16 Gain Characteristic of Three-stage LPA

3. 2. 4 三段増幅器の位相特性

3. 2. 4. 1 bs0.75 の実験結果

Fig.17 に bs0.75 の場合の三段増幅器の位相遅れを示す. 周波数が増加するにつれ徐々に遅れが増加する傾向が見られる. 改善形 LPA の方が基準 LPA と比較し, 若干遅れが緩やかとなっている.

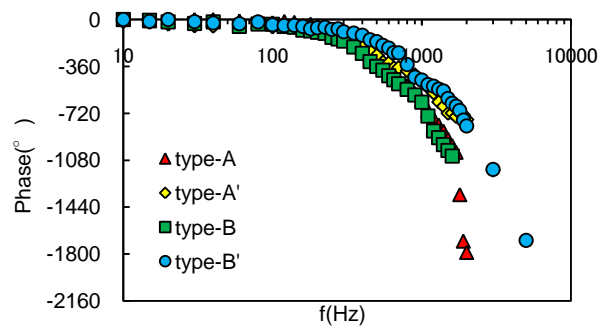


Fig.17 Phase Lag of Three-stage LPA(bs0.75)

3. 2. 4. 2 bs0.375 の実験結果

Fig.18 に bs0.375 における三段増幅器の位相遅れの実験結果を示す. LPA の形状が小さく, 乱れの影響が大きいこともあり, 測定した値にばらつきが大きい.

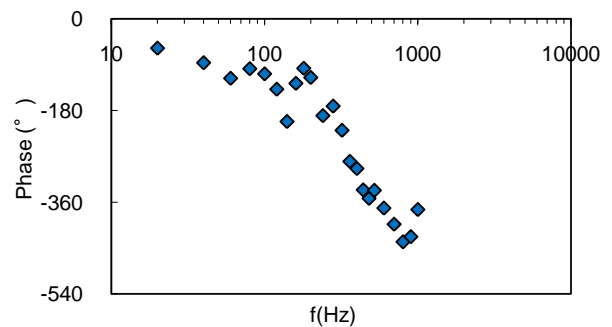


Fig.18 Phase Lag of Three-stage LPA(bs0.375)

3.3 三段増幅器の応用について

三段増幅器の応用としてLPA フィードバック発振流量センサの信号増幅を試みた。

3.3.1 流量センサの原理および問題点

LPA フィードバック発振流量センサの概要をFig.19に示す。LPA 内での噴流の偏向により発振現象が誘発されるが、主ノズルを流れる流量と発振周波数には密接な関係があるため、この発振周波数を測定することで流量を測定することが可能な流量センサである。

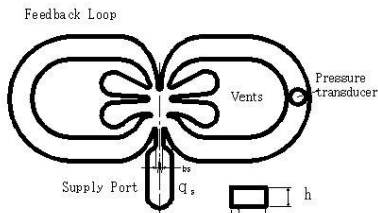


Fig.19 Schematic Diagram of LPA Flow Sensor

しかしながらこの流量センサにおいては、発振周波数の圧力レベルが低いために市販されている圧力変換器では測定できず、自作したコンデンサマイクロフォン式圧力変換器で測定しているのが現状である。そこで、三段増幅器と流量センサを結合し、流量センサの出力である発振周波数の増幅が可能であるかを検討した。

3.3.2 流量センサと三段増幅器の接続

Fig.20に流量センサと三段増幅器の接続の概略図を示す。LPAの入力部と出力部には半導体圧力変換器（ジェイテック製 PMS-5M）を設け、波形の計測を行った。

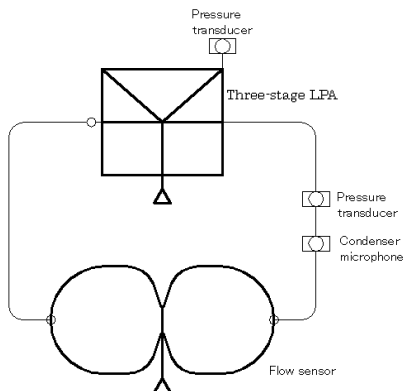


Fig.20 Connection of Flow Sensor

3.3.3 発振周波数と三段増幅器の出力波形

Fig.21に流量センサと bs0.75 の三段増幅器を接続した場合の、出力波形を示す。フィードバック流路からの信号をコンデンサマイクロフォン式圧力変換器および半導体圧力変換器により測定した。①が流量センサの出力部におけるコンデンサマイクロフォン式圧力変換器の波形、②が流量センサ出力部の半導体圧力変換器の波形、③が三段増幅器の出力部の半導体圧力変換器の波形である。

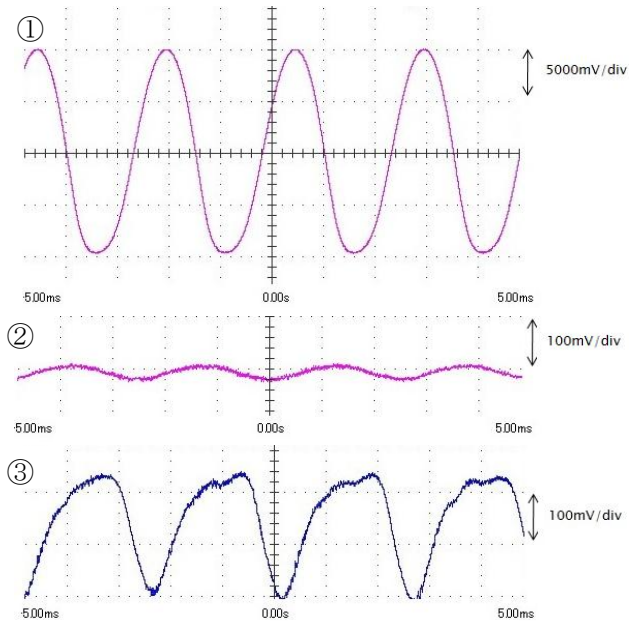


Fig.21 Output Waveform of Three-stage LPA (①5000mV/div, ②100mV/div, ③100mV/div)

三段増幅器の入力信号となる②の流量センサの出力波形は極めて微弱であるが、三段増幅器を接続することで③のように忠実に発振周波数波形が増幅されていたことが確認できた。

3.3.4 発振周波数-供給流量実験結果

Fig.22に三段増幅器と流量センサを接続した場合の発振周波数-供給流量特性を示す。縦軸が周波数、横軸が供給流量である。供給流量が増加するにつれ、発振周波数も増加するが、流量センサでの発振上限まで忠実に応答出来ていることがわかった。

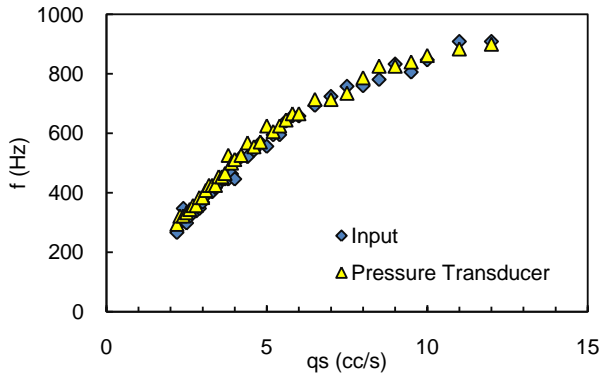


Fig.22 Oscillating Frequency Characteristic of Three-stage LPA(bs0.75)

3.3.5 三段増幅器の周波数変化

Fig.23 に三段増幅器と流量センサを接続した場合の圧力ゲイン特性を示す. 周波数が 400Hz まで圧力ゲインは約 45dB で一定であるが, その後は減少傾向が見られる.

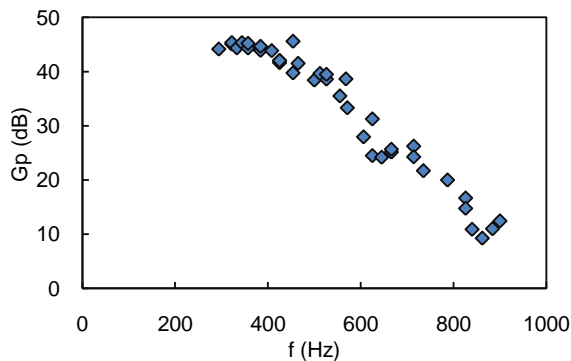


Fig.23 Gain Characteristic of Three-stage LPA(bs0.75)

4. 結言

LPA を用いた三段増幅器を構成し実験した結果, 次のことがわかった.

- 1) LPA を三段増幅することで, より圧力増幅率の高い増幅器が可能となる. 基準 LPA では 1500 倍の圧力増幅率である.
- 2) 三段増幅器の周波数応答における圧力ゲインは定常状態で 40dB, 帯域幅は 1000Hz であった.
- 3) 三段増幅器の応用として LPA フィードバック流量センサの信号増幅を試みたが, 発振周波数を正確に再現できた.

参考文献

- 1) 例えば 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) 川崎慎司, 菅原翼, 清水久記, 廣木富士男, 山本圭治郎: LPA の多段増幅法について, 計測自動制御学会東北支部第 251 回研究集会 資料番号 251-5(2009)
- 3) 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)