

LPA フィードバック発振流量センサの信号増幅について

The Signal Amplifier of the Oscillating LPA Flow Sensor

○阿部琢真, 清水久記, 廣木富士男, 山本圭治郎

○Takumi Abe, 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 (LPA), 流量センサ (Flow sensor), 発振周波数 (Oscillating frequency)
圧力変換器 (Pressure transducer), 出力圧力 (Output pressure)

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

筆者等の研究を進めている層流形比例素子 (Laminar Proportional Amplifiers 以下 LPA と略す) を用いた LPA フィードバック発振流量センサは, 出力ポートと入力ポートを結ぶフィードバック流路を LPA と同一平面内に設けた構造であり, 流路内での発振現象をもとに流量を測定するセンサである. この LPA は, 層流域で動作するため, 微小流量を測定することが可能であり, 自動計測システムとしての化学, 医療等の分野への応用が期待されている. これまでの研究¹⁾ より, 流量センサの発振周波数と流量にはセンサを構成する形状と密接な関係があることや市販の流量計より低いレベルの流量が測定できること等が分かってきた.

発振周波数の測定には圧力変換器を用いているが, この流量センサの圧力レベルは低いため, 市販の圧力変換器では測定できず, 自作のコンデンサマイクロフォン式圧力変換器を用いて測定を行っているのが現状である. しかしながら, コンデンサマイクロフォンは湿気等に弱いとされ, 圧力測定に正確さが欠けるという問題点がある. また, 液体のような流体では, このコンデンサマイクロフォン式圧力変換器は使用できず,

発振現象が誘起されても測定できないという問題点もある.

そこで, 本研究では, 流量センサの信号を流体のオペアンプである LPA により増幅することを考案し, その可能性について研究を行った. また, 信号は市販されている圧力変換器を用いて正確に計測した.

2. LPA について

2.1 LPA の形状および各部寸法

LPA の形状を Fig.1 に示す.

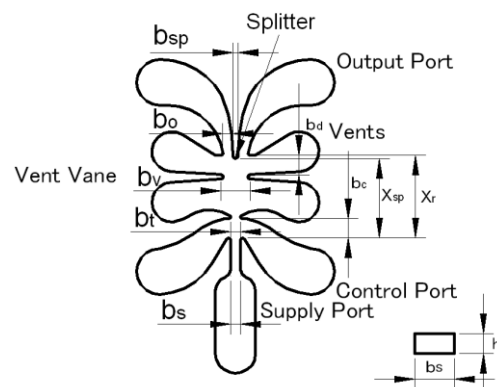


Fig.1 Geometry of LPA

LPA は, 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、ベントベーンで構成されており、この流路パターンを上下より厚いカバープレートで挟み気密性を持つ構造である。

各部の基本寸法は主ノズル幅 bs を基準として以下の通りである。この基本寸法は、これまでの研究²⁾ から高いゲインを得るための最適寸法として実験的に得られた寸法値を用いている。

$$\begin{array}{ll} bo/bs = 1.25 & bt/bs = 1.5 \\ bv/bs = 3 & bd/bs = 2.4 \\ Xr/bs = 8.3 & Xsp/bs = 8 \\ bc/bs = 1 & bsp/bs = 0.5 \end{array}$$

LPA は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。

2.2 LPA の動作原理

Fig.2 に LPA の動作原理を示す。

主ノズルより素子内へ噴出した流れは、左右の入力ポートに圧力差がない場合には真直ぐに流れる。入力ポートに圧力差が生じると、噴流は出力ポートのどちらかに傾く。入力部、出力部の圧力差より次の関係式が得られる。

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

これが圧力ゲインであり、入力と出力の増幅の程度を示す。一般に約 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。

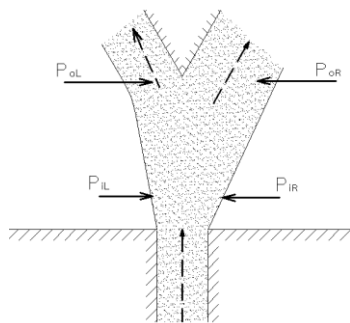


Fig.2 Flow pattern of LPA

2.3 LPA の特性

LPA の性能を示す特性として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がある。それらを次に示す。

1) 入出力特性

入出力特性を Fig.3 に示す。縦軸は出力圧力、横軸

は入力圧力を示す。

入力と出力の間には比例関係があり、形状の大きい LPA の場合には出力圧力は低い。逆に形状の小さい LPA の出力圧力は高い傾向がある。よって、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。▲と◇のマークの $bs0.375$ は高圧力ゲインを得るよう形状を変更した LPA である。

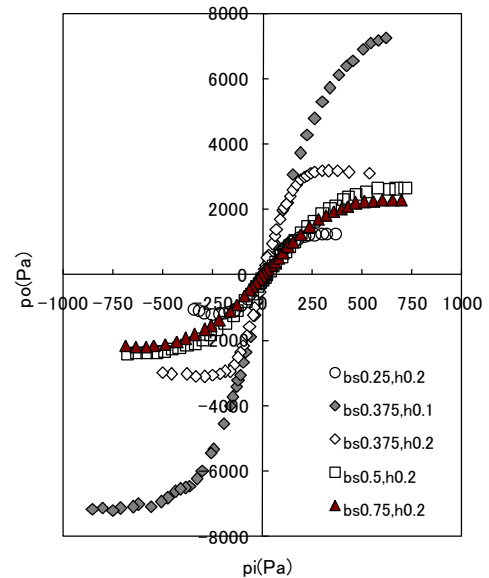


Fig.3 po vs pi

2) 圧力ゲイン-供給流量特性

圧力ゲイン-供給流量特性を Fig.4 に示す。縦軸は圧力ゲイン、横軸は供給流量を示す。

$bs1.0$ 以外の素子は流量の増加にしたがって圧力ゲインはほぼ一定になる。 $bs1.0$ は流量が大きくなってても一定値とはならない。特に $bs0.375, h0.2$ の LPA は供給流量 $0.5 \sim 6.4 \text{ cc/s}$ の範囲で動作し、圧力ゲインは約 26dB であった。

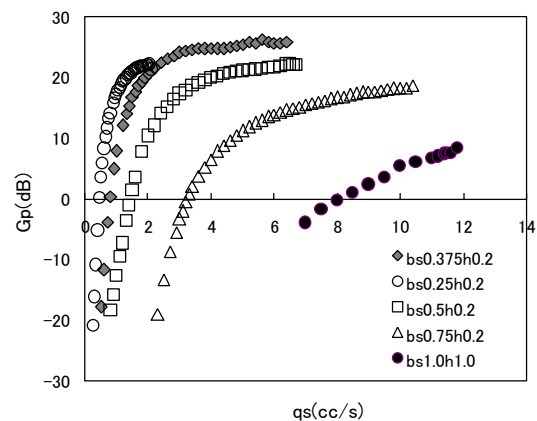


Fig.4 Gp vs qs

3) 周波数特性

周波数特性を Fig.5 に示す. 縦軸は圧力ゲイン, 横軸は周波数を示す.

bs0.375, h0.2 の形状の LPA では, カットオフ周波数は 2200Hz 付近, h0.15 の形状では 2100Hz 付近であり, 板厚が大きくなるとカットオフ周波数は増加する傾向が見られる.

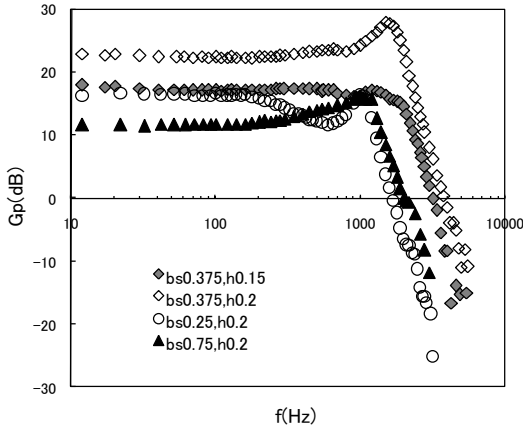


Fig.5 Gp vs f

3. LPA フィードバック発振流量センサについて

3.1 流量センサの動作原理

流量センサの形状を Fig.6 に示す. 主ノズルより出た流体は, 初めは真っ直ぐ流れるが粒子の乱れ等により左右どちらかに傾く. そして, その流れは出力ポートからフィードバック流路を通り, 入力ポートに入り, 入力部で噴流の側面に作用する. 主噴流を偏向側から非偏向側へ傾かせることにより, 交互に流れが左右のフィードバック流路を流れることによって発振現象が誘起される. 発振周波数と流量の間には密接な関係があり, 発振周波数より流量を求めることができる. これが, この流量センサの動作原理である.

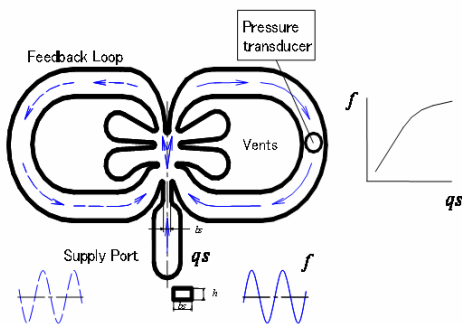


Fig.6 Geometry of Oscillating Flow Sensor

3.2 流量センサの加工方法

本研究では, LPA とフィードバック流路を同一平面上に一体化し加工した. よってフィードバック流路は矩形断面となるが, これは矩形断面の方がフィードバック部での摩擦抵抗が大きくなるため発振が抑えられ測定範囲が拡大するという利点がある.

流量センサの特徴は, 内部には可動部がなく流体の動きのみで噴流を偏向しているが, 流量測定範囲を拡大するために流れが乱流となるまでの遷移領域まで範囲を広げている. そのためには流路の断面積を小さくし壁の影響により流体の摩擦抵抗を大きくし流れの乱れを抑えることは有効である.

流量センサの加工方法を Fig.7 に示す.

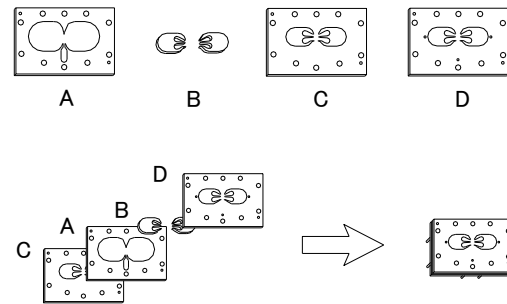


Fig.7 Composition of Flow Sensor

流量センサは, ワイヤークット放電加工機によって精密に加工した. A 材はセンサの外部, B 材はセンサの内部, C 材および D 材はカバープレートである. 流量センサは A 材と B 材を上下のカバープレートにより挟み込む構造とした.

また, カバープレートから漏れないようにするため, 表面はきさげ加工を行っている.

3.3 流量センサの特性

Fig.8 に流量センサの発振周波数-供給流量特性を示す. 縦軸は発振周波数, 横軸は供給流量を示す.

供給流量の増加に伴い, 発振周波数も増加する特性を持っている. よって, 発振周波数を測定することにより, 供給流量が測定できるセンサである.

流量センサの形状は, bs の値を基準に相似形に作成しているが, 発振現象が誘起される供給流量が発振下限であり, これは形状によって異なっている³⁾. bs が大きくなる信号伝達の長さも大きくなるため, 発振周

波数は低下している。

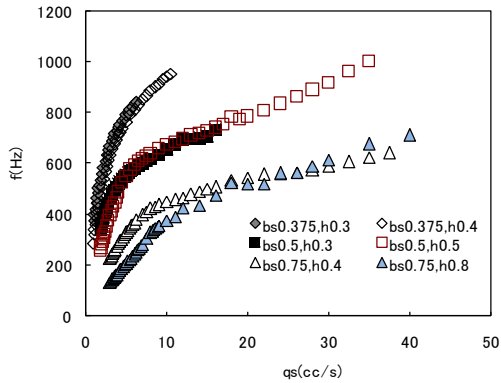


Fig.8 f vs qs

4. コンデンサマイクロフォン式圧力変換器について
 コンデンサマイクロフォン式圧力変換器を用いた流量センサ(bs0.375mm 形状)の実験結果を次に示す。

Fig.9は発振周波数—供給流量特性で、4回測定した結果である。縦軸は1回目の周波数値を基準とした比率で横軸は供給流量である。測定4回目は湿度の高い状態で測定であったが、周波数の高い領域で10%以下の差があるのみで、周波数測定においては変化が見られないことが分かった。

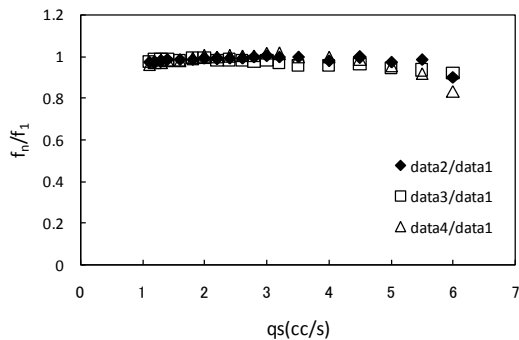


Fig.9 f_n/f_1 vs qs

次に Fig.10 に圧力—供給流量特性を示す。縦軸は1回目の測定圧力を基準とした比率であり、横軸は供給流量である。4回目に測定した時の天候は、雨が降った後で、湿度が高い時であり、約10%から40%程度の誤差が生じている。これより、コンデンサマイクロフォンは湿度変化に大きく影響を受けることが分かる。

よってコンデンサマイクロフォン式圧力変換器では、周波数測定は正確であるが、圧力測定においては信頼性が欠けるため、別途測定方法を検討することが必要である。

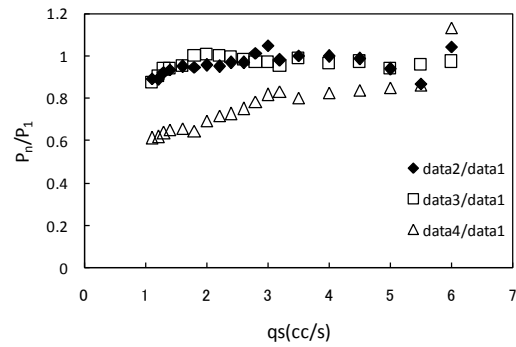


Fig.10 P_n/P_1 vs qs

5. 信号増幅の方法

LPAは流体式オペアンプであるので流量センサの圧力信号はLPAで増幅した方が直接的であり、有効であると考えられる。流量センサとLPAの接続方法をFig.11に示す。

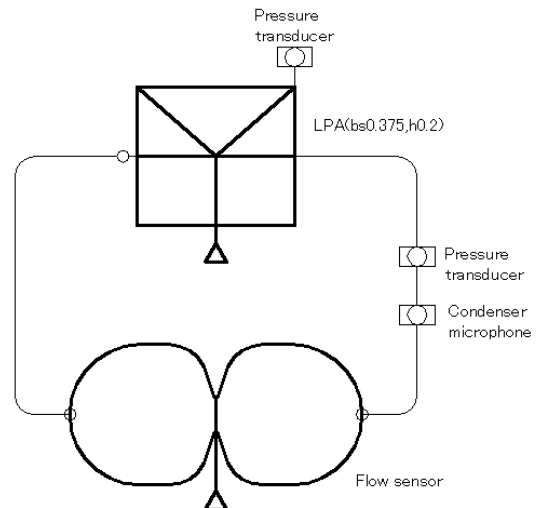


Fig.11 Connection of Flow Sensor

LPAの出力部にはトヨタ工機製 PMS-5 の圧力変換器を、又、入力部にも同種な圧力変換器を設けて、それぞれ直流増幅器により信号増幅し、小野測器製 FFT を用いて測定を行った。

LPAは主ノズル幅が0.375mmの形状であり、供給流量は4.8cc/sに一定とし、寸法の異なる流量センサを接続し、信号増幅の可能性を検討した。

流量センサの形状として下記の4種類を測定した。

- 1) bs0.375 h0.2の形状流量センサ
- 2) bs0.5 h0.4の形状流量センサ
- 3) bs0.75 h0.8の形状流量センサ
- 4) bs1.0 h1.0の形状流量センサ

LPAの入力端の一方は開放とし出力端は閉上状態とし

ている。

6. 実験結果および考察

6.1 圧力波形について

bs0.375 の流量センサを用いて測定を行った出力波形を Fig.12 に示す。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によって検出し、測定を行った。上段が LPA 出力部、中段が流量センサ出力部、下段が流量センサの出力部でのコンデンサマイクロフォンの圧力信号であり、FFT により測定した。

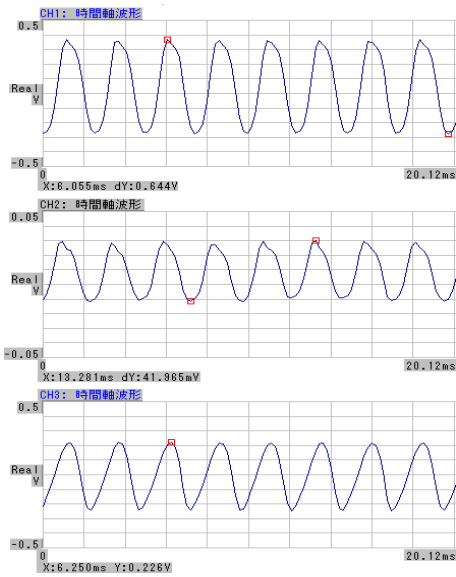


Fig.12 Output Wave

入力信号の波形は極めて微弱であり、流量センサに LPA を接続することによって出力は増幅されることが分かる。

コンデンサマイクロフォンによる圧力波形は正弦波状の波形となっており増幅率を上げても乱れは少ない。一方、同じ入力部に設けた PMS-5 の圧力変換器で測定した圧力振幅は 18Pa 程度であり、極めて低く、増幅率を上げるとノイズが大きくなり発振周波数を測定することは困難である。

出力部での圧力波形の振幅は約 0.9V であり、波形もノイズもなく、発振周波数を測定するためには LPA を接続することは有効である。特にコンデンサマイクロフォン式圧力変換器で測定できない液体を対称とする流量測定には有効な方法で、これまで測定できていない発振下限が測定できる可能性がある。また、LPA の増幅率からこれまで不正確な流量センサの発振周波数の圧力レベルを算定できる等の効果もある。

6.2 流量センサの出力圧力特性

流量センサの出力特性を Fig.13 に示す。縦軸は流量センサ出力圧力、横軸は流量センサの供給流量である。圧力は PMS-5 の圧力計で測定した圧力であり、4 種類の形状の結果を示す。

図において流量センサの形状が大きいほど動作範囲が広く、また、形状が大きいほど流量に対する圧力は小さく、形状が小さいほど圧力の増加率は大きい。

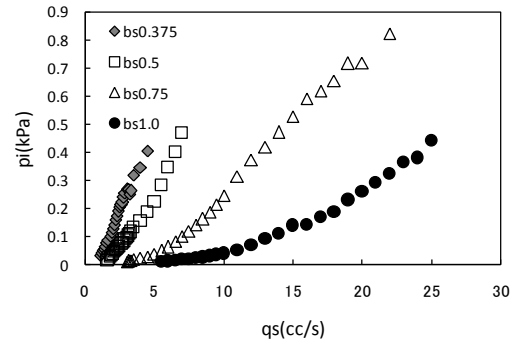


Fig.13 pi vs qs

6.3 LPA 出力圧力特性

流量センサの信号を増幅した LPA の出力特性を Fig.14 に示す。縦軸は LPA 出力の圧力、横軸は流量センサの供給流量である。

流量の増加に伴い圧力も増えるが、ある流量になると、圧力は一定になり減少する傾向があることが分かる。

LPA として bs0.375, h0.2 の形状を用いているが、この傾向は、LPA の入出力特性によって決定されるのである。よって、流量センサに応じた LPA を選ぶ必要がある。

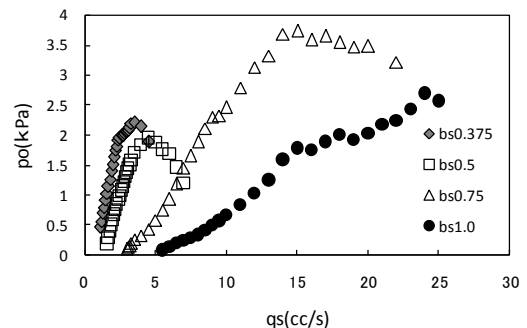


Fig.14 po vs qs

6.4 発振周波数特性

流量と発振周波数の関係を Fig.14 に示す。横軸は流量、縦軸は周波数を示す。

どの形状においても周波数は流量の増加に伴い増加する傾向があり、Fig.13, Fig.14 と同等である。よって、LPAは流量センサの発振周波数を正確に再現していることが分かった。

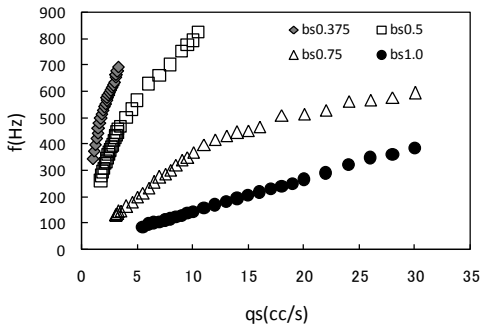


Fig.15 f vs qs

6.5 入力圧力と出力圧力の比率

センサの出力圧力を A_i 、LPA の出力圧力を A_o とすると、その比率 A_R は次式で表わされる。

$$A_R = \frac{A_o}{A_i} \quad (2)$$

比率と流量の関係を図.16 に示す。縦軸は比率、横軸は供給流量である。

前述のLPAの入出力特性に準じた傾向を示している。素子形状が大きいほど、最大比率は大きくなり、bs0.375では約15倍であり、bs1.0では約17倍である。

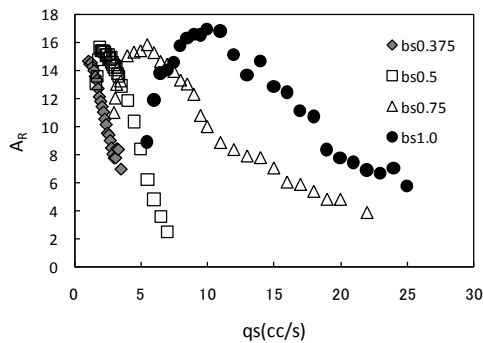


Fig.16 A_R vs qs

7. 結言

実験の結果、次のことが分かった。

- 1) 流量センサとLPAを組み合わせることにより、流量センサの出力圧力を増幅することができた。
- 2) 出力圧力の増幅率から流量センサの出力圧力を推定できる。
- 3) 流量センサの全動作範囲に渡り、出力増幅が可能であることが分かった。
- 4) LPAからの発生周波数は流量センサの発振周波数とほぼ同等な値が得られ、正確に再現していることが分かった。

参考文献

- 1) 清水, 山本: LPA フィードバック発振流量センサの研究 (噴流偏向特性について), 計測自動制御学会第19回センシングフォーラムシンポジウム講演論文集 361/364(2002)
- 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) 門間, 清水, 廣木, 山本: LPA フィードバック発振流量センサの発振下限について, 計測自動制御学会東北支部第230回研究集会 資料番号 230-2 1/5(2006)
- 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 175/177(1995)