

## LPA フィードバック発振流量センサにおけるフィードバック流路の影響について

The Effects of Feedback Loop in the Oscillating LPA Flow Sensor

○進藤隆寛\*, 清水久記\*\*, 廣木富士男\*\*\*, 山本圭治郎†

○Takahiro Shindo, 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), 流量センサ (Flow sensor), 発振周波数 (Oscillating frequency), フィードバック流路 (Feedback Loop), 伝達速度 (Transfer Velocity)

**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: shimizu6@ichinoseki.ac.jp

### 1. 緒言

流量計測においては各種の計測方法が発表されているが、現在でも測定できてない未知の部分が存在している。例えば病院の点滴程度の微小な流量は一般的な流量メータでは測定することが出来ていないのが現状である。一方最新の化学や医療の分野で正確に微小流量を測定する必要があり、自動的に微小流量が測定できる流量センサの開発が望まれている。よって微小な流量を測定できるセンサが開発されるならば、応用分野も拡大すると思われる。

微小流量の測定が可能とされている流量センサとして層流形比例素子(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が報告<sup>1)</sup>されている。

この流量センサは LPA の出力ポートと入力ポートにフィードバック流路を設けた構造になっており, LPA 内の発振現象により流量を測定できる原理にもとづいている。

これまでの研究より流量と発振周波数は, 流量センサのフィードバック流路などの形状と密接な関係があることがわかってきたが, フィードバック流路の形状による発振周波数と動作に対する影響は明確ではなかった。そこで本研究ではフィードバック流路の影響を調べるため, フィードバック流路の長さや断面積を変え, 測定流量や発振現象への影響を検討したので報告する。

### 2. LPA フィードバック発振流量センサの動作原理

LPA フィードバック発振流量センサの動作原

理を Fig.1 に示す。主ノズルから形状内部に出た噴流は、始め真っ直ぐに左右の出力ポートに均等に流れる。しかし噴流の乱れやセンサ内部の微小なアンバランスなどの要因により左右いずれかに傾く。例えばわずかに右側に傾いた場合、噴流は右側のフィードバック流路を通り、噴流下部の入力部で噴流の右側に作用し噴流を左側に傾ける。左側に傾いた場合、噴流は左側フィードバック流路を通り、入力部で噴流の左側に作用し、噴流を右側に傾けることになる。これにより噴流は交互に左右のフィードバック流路を流れることになり、発振現象が誘起されることになる。

発振現象による流路の圧力変化は正弦波状の圧力波形となるため、この発振周波数は圧力変換器により測定することができる。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ので、発振周波数を測定することにより流量を算出することが出来る流量センサである。

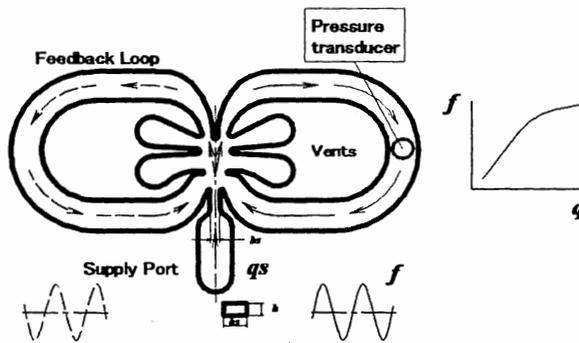


Fig.1 Principle of Operation of LPA Flow Sensor

### 3. 供試流量センサの構造および測定箇所

#### 3.1 流量センサの構造

LPA フィードバック発振流量センサの構造には2通り考えられる。Fig.2のようにLPAにフィードバック流路として別な流路(円管パイプなど)を接続した構造と、Fig.3のように同一平面上に短形断面のフィードバック流路を設けた構造がある。

本実験では Fig.2 のタイプを A タイプ、Fig.3 のタイプを B タイプと呼ぶ。

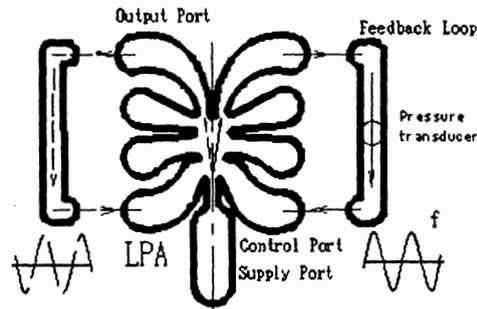


Fig.2 Feedback Loop Type A

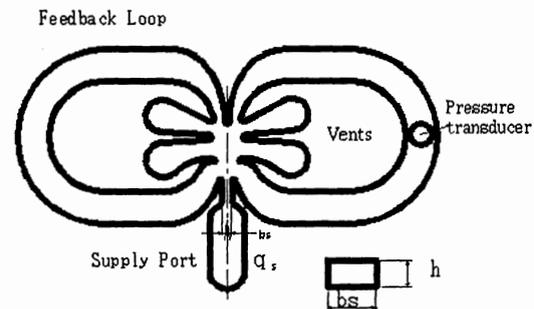


Fig.3 Feedback Loop Type B

これらの流量センサの特徴は、内部には可動部がなく流体の挙動で噴流を偏向することである。このセンサの流量測定範囲は流れが乱流となるまでの遷移領域までの範囲であり、この流量測定範囲を拡大することは流量センサとしての測定可能範囲を広めることになる。よって、センサの厚さを小として流体の摩擦抵抗を大きくし流れの乱れを抑える必要がある。

フィードバック流路は流量センサの原理上重要であるが、この部分の影響は明確にされていなかった。

今回研究に用いた LPA と LPA フィードバック発振流量センサ形状はワイヤーカット放電加工機によって精密に加工し、真鍮製の2枚のカバープレートを挟むことで流量センサを構成している。カバープレートの内側は実際に流体に触れる部分のため、きさげ加工により気密性を高めている。

#### 3.2 測定箇所

発振周波数検討のため測定点を次のようにした。関係寸法を Fig.4 に示す。

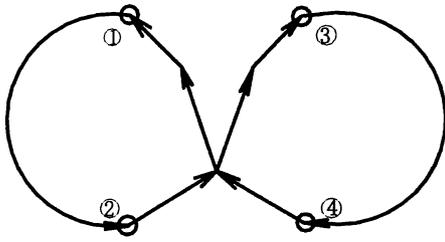


Fig.4 Related Dimension of Signal Transfer

主ノズルより出た噴流はスプリッタ部分で出力ポートに達する。この圧力信号が出力ポートから入力ポートへのフィードバック流路を通り、噴流を偏向側より非偏向側へ傾かせることにより発振が行なわれる。

よって測定点 1 から 2, 2 から 3, 3 から 4, 4 から 1 の区間の伝達時間を測定するとその合計値のとして発振周波数が求まる。

よって発振周波数  $f$  は

$$f=1/\Delta t \quad (1)$$

であり、 $\Delta t$  は

$$\Delta t=t_{12}+t_{23}+t_{34}+t_{41} \quad (2)$$

ここで伝達時間  $t_{12}$ ,  $t_{34}$  は左右のフィードバック流路の伝達時間を示す。また  $t_{23}$ ,  $t_{41}$  は噴流偏向部の伝達時間である。

今回は  $t_{34}$  のフィードバック流路の影響を検討するために伝達時間に着目し、実験を行なった。

#### 4. 実験装置および実験方法

##### 4.1 実験装置

実験装置の概略を Fig.5 に示す。実験では圧力変化はコンデンサマイクロフォン式圧力変換器で検出し、直流増幅器で増幅、ストレージオシロスコープで発振周波数、入力波形と出力波形の伝達遅れ時間を測定した。

いずれの場合も、実験での作動流体は空気とし波形が乱れる流量まで測定を行なった。

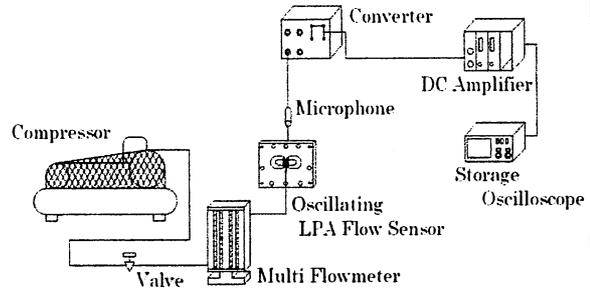


Fig.5 Experiment Outline

#### 4.2 実験方法

実験は A タイプの構造の LPA ( $bs=0.75\text{mm}$ ,  $h=0.5\text{mm}$ ) をパイプ接続し、発振周波数-供給流量特性と出力と入力の信号伝達遅れについて測定を行なった。

パイプ接続した LPA のパイプ長  $l$  とパイプの直径  $d$  を変えながら実験を行なった。パイプの材質は塩化ビニールとし、寸法については Table.1 に示す。

Table.1  $d$  and  $l$

$d(\text{mm})$	$l(\text{mm})$
3	100,200,300,400,500
4.5	100,300,500
6	100,300,500

#### 5. 実験結果および考察

##### 5.1 発振周波数-供給流量特性

これまでの研究<sup>2)</sup>において発振周波数-供給流量には密接な関係があることが分かった。形状によりその増加量や特性は異なっているが、形状による発振周波数の影響は不明であった。

Fig.6 にフィードバック流路をパイプ接続した LPA (A タイプ) と一体型の流量センサ (B タイプ) の発振周波数-供給流量特性の一例を示す。

実験に用いた A タイプと B タイプの素子寸法は  $bs=0.75\text{mm}$ ,  $h=0.5\text{mm}$  である。

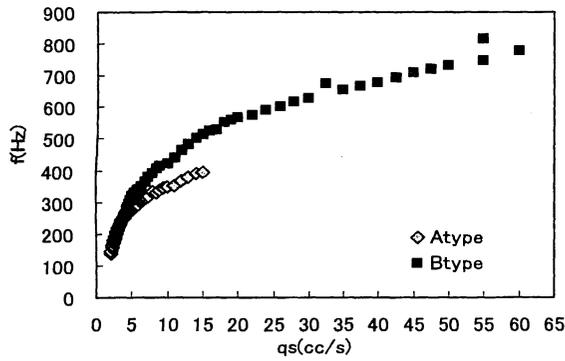


Fig.6 Oscillating Frequency vs Supply Flow Rate

縦軸は発振周波数，横軸は供給流量である。Bタイプは 50cc/s 付近までが測定範囲となるが，Aタイプでは 15cc/s 付近と狭くなっており，測定できる流量範囲が大きく異なっている。これはBタイプのような構造はフィードバック流路がAタイプと異なり狭く，流量抵抗が大となっている。よって噴流を乱すことが少なく，流量測定範囲が拡大する効果を生ずるものと考えられる。ことより流量センサの形状においてはフィードバック流路は重要な役割を持っているので，どのように影響するか次に検討した。実験は容易にフィードバック流路の寸法を変更できる A タイプの LPA を用い実験を行った。

A タイプのフィードバック流路の寸法を変えた発振周波数-供給流量特性 Fig.7 に示す。

ここでは使用したパイプの寸法は直径 3, 4.5, 6mm の 3 種類，長さは 100mm から 500mm まで段階的に変化させた。図において縦軸は発振周波数，横軸は供給流量である。供給流量を増加させていくと，それに伴い発振周波数は増加するが，その関係は線形であることが望ましい。

図より，フィードバック流路長毎に供給流量に対する発振周波数の値が異なっている。直径 3mm の場合，長さが大となるに従い発振周波数は低下する。これは長さが大となると抵抗が大となり，フィードバック流路の伝達時間が大となる。

よって発振周波数が低下したものと考えられる。又，長さ大の場合には線形範囲も狭く，分解能も低下する傾向がある。

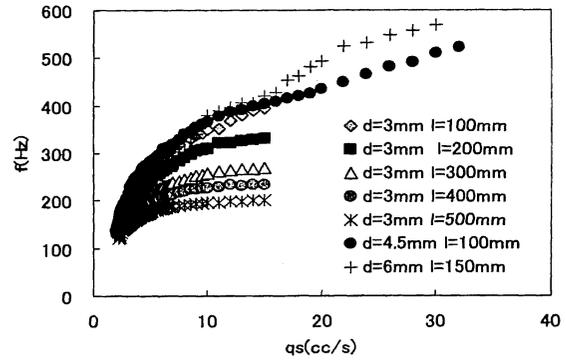


Fig.7 Oscillating Frequency vs Supply Flow Rate

直径の変化では径が大となるに従い，線形範囲も拡大している。また発振周波数の値も大となっている。これは直径が大となると流路の抵抗が小となり，伝達時間が小となったためと考えられる。このようにフィードバック流路は測定範囲，発振周波数にも大きく影響することがわかる。

## 5.2 フィードバック流路内速度-供給流量特性

接続フィードバック流路の寸法による影響を調べるために，流量センサの一方のフィードバック流路の 3 と 4 の部分に圧力変換器を取り付け，信号伝達時間を測定した。そしてその伝達時間の差と流路長よりフィードバック流路内の流体の速度を計算した。又，噴流の速度は 2 と 3 の伝達時間と長さより算出した。

流量センサ内での噴流偏向部とフィードバック流路部での伝達速度の違いを Fig.8 に示す。

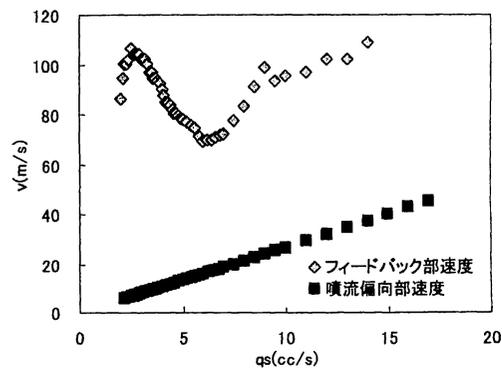


Fig.8 Transfer Velocity Comparisons of Flow Sensor

縦軸は伝達速度，横軸は供給流量となっている。

図よりフィードバック流路部での伝達速度が噴流偏向部の速度よりも大きく、流量センサの場所によって速度が大きく変化していることがわかる。またフィードバック流路の伝達速度は初め増加するが、2cc/s 付近より低下し、6cc/s 付近より上昇する結果を示した。このことから流量センサ内でフィードバック流路では小圧縮波の伝播として信号が伝わっていると考えられる。

次にパイプ直径は 3mm とし、フィードバック流路長を変化させたときの伝達時間を Fig.9 に示す。

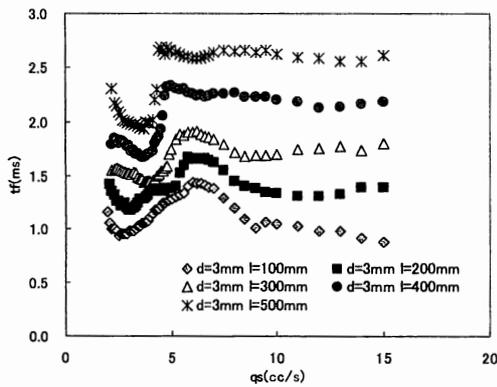


Fig.9 Transfer time vs supply flow rate (d=3mm)

縦軸は伝達時間、横軸は供給流量を示す。図より、フィードバック流路長が異なると伝達時間が変化が生ずる。フィードバック流路長が長くなるに従い、伝達時間も長くなっている傾向を示している。また全ての長さにおいて、供給流量が少ない時、伝達時間は一端下がり、その後伝達時間は増加していきしだいに一定となる傾向がある。

更にこの特性を調べるためにパイプ径を変え、伝達時間がどう変化していくか実験を行った。パイプ径 4.5mm と 6mm とし、フィードバック流路長を変えていったときの Fig.10 に直径 4.5mm の場合、Fig.11 に直径 6mm のフィードバック流路長を変えた場合の伝達時間-供給流量特性を示す。

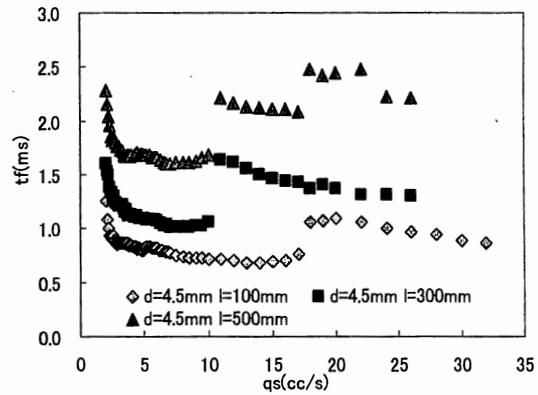


Fig.10 Transfer time vs supply flow rate (d=4.5mm)

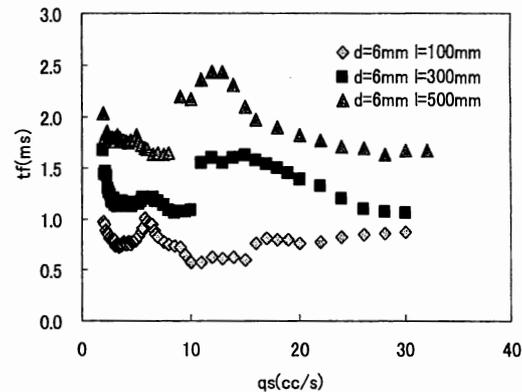


Fig.11 Transfer time vs supply flow rate (d=6mm)

Fig.10, Fig.11 とともに縦軸は伝達時間、横軸は供給流量とである。それぞれの図を比較すると、前述と同様に供給流量が小さいときに伝達時間の減少が見られる。また供給流量が大となると伝達時間は急激に増加していく傾向がある。これは流量が小の場合には小圧縮波の伝播という状態で信号伝達が行われるが、次第に流量大となると噴流の流れ、すなわち実流の影響する部分が大となるためと考えられる。しかしフィードバック流路長が短い場合は、長い場合に比べて伝達時間の増加する流量値が異なっている。これは流路長が短い場合、直径に大きく影響を受けないためと考えられる。フィードバック流路部分では小圧縮波の伝播に基づいて考えたが、流路の長さ、直径に大きく影響を受けていることがわかった。

### 5.3 フィードバック流路内の圧力損失特性

フィードバック流路の寸法により、伝達時間が異なっているため、管路内の圧力損失の式として知られている次の式<sup>3)</sup>を用いて圧力損失の検討をおこなった。

$$\Delta h_f = f \frac{l}{d} \cdot \frac{u_f^2}{2g} \quad (3)$$

ここで  $f$  は摩擦係数、 $l$  は管路長さ、 $d$  は直径、 $u_f$  は伝達速度、 $g$  は重力加速度としている。又、 $f$  は 1 とした。また関係するレイノルズ数を次式より算定した。

$$Re = \frac{u_f \cdot d}{\nu} \quad (4)$$

(3)式と同様に  $u_f$  は伝達速度、 $d$  は直径、 $\nu$  は空気の流体の動粘性係数で今回は空気のため  $15.12 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  である。その算定結果を Fig.12 に示す。

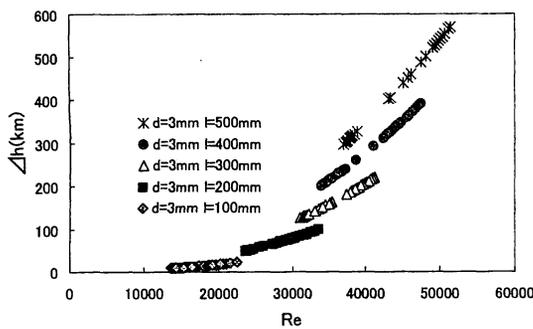


Fig.12 Pressure loss vs Reynolds number

縦軸は圧力損失、横軸はレイノルズ数である。図は接続パイプ直径を 3mm とし、長さを変えていった場合の圧力損失を示す。図より長さにより圧力損失の範囲が異なり、それぞれの傾きも異なっている。この傾向は他の直径の場合も同様であった。また長さ一定とし直径を変えた時の圧力損失の比較を Fig.13 に示す。

図より、長さ変化の場合より圧力損失の比率は小さくなっている。そして直径を大とすると、レイノルズ数と圧力損失の範囲がずれていっており、レイノルズ数の表示範囲も広がる傾向が見られる。

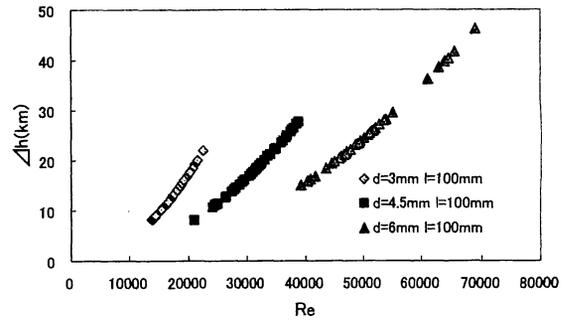


Fig.13 Pressure loss vs Reynolds number (l=100mm)

### 6. 結言

LPA フィードバック発振流量センサのフィードバック流路の影響を検討した結果次のことがわかった。

- 1) フィードバック流路は発振周波数に深く関係しており、長さや直径など寸法を変化させるとそれに伴い、発振周波数と流量測定範囲が影響を及ぼす。
- 2) フィードバック流路では小圧縮波の伝播という状態で、信号伝達が行われており、供給流量を増加させていくと小圧縮波と実流が加わった伝達状態になる。
- 3) 圧力損失もフィードバック流路の寸法に影響を受ける。

### 参考文献

- 1) 清水久記, 廣木富士男, 山本圭治郎: LPA フィードバック発振流量センサの噴流偏向特性について, 計測自動制御学会 2002 年度産業応用部内大会第 3 回流体計測制御シンポジウム 106/109(2002)
- 2) 清水久記, 廣木富士男, 山本圭治郎: LPA フィードバック発振流量センサの形状と発振周波数, 計測自動制御学会 2004 年度産業部内大会第 5 回流体計測制御シンポジウム 44/47(2004)
- 3) 内田茂男著: 流体力学序説 森北出版 p38, 39(1998)