

LPA フィードバック発振流量センサの発振周波数について (第 2 報)

The Oscillating Frequency of the Oscillating LPA Flow Sensor (Part2)

○高橋英里香*, 清水久記**, 廣木富士男***, 山本圭治郎†

○Erika Takahashi*, Hisaki Shimizu**, Hujio Hiroki***, Keijirou 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)

伝達時間(Transmission Time), フィードバック(Feedback), 噴流偏向(Jet Deflection)

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

LPA フィードバック発振流量センサは層流形比例素子 (Laminar Proportional Amplifiers 以下 LPA と略す) の入力ポートと出力ポートをフィードバック流路で接続し, 流量センサ内部で誘起する発振現象を利用し, 流量を測定するセンサである. LPA は層流域で作動するため微小流量が測定できるという特徴がある.

これまでの研究^{1),2)}において, 流量と発振周波数の間には, LPA を構成する各流路の寸法と密接な関係があることが分かっているが, センサ内の各流路の寸法が, どのように周波数に影響するのかは明確ではなかった.

そこで本研究では流路各部での信号伝達の遅れを測定し, 各流路の寸法が発振周波数に及ぼす影響を実験的に検討し, 発振周波数の算定式を試みたので報告する.

2. LPA フィードバック発振流量センサの構造と動作原理

2.1 流量センサの構造

Fig.1 に流量センサの構造, 動作原理を示す. 噴流を供給する主ノズル, 左右の入力ポート, 出力ポート, フィードバック流路, 4 箇所の排気孔から成っている. これを上下よりカバープレートで挟んでセンサを構成する.

2.2 流量センサの動作原理

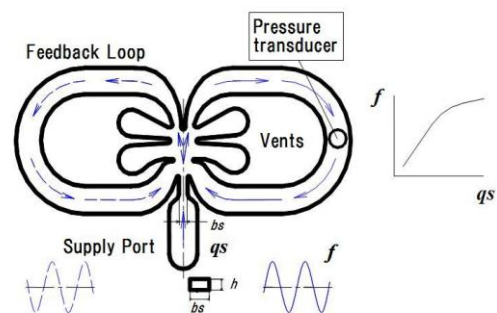


Fig.1 Structure and Operating Principle of Flow Sensor

この流量センサにおいては、主ノズルからの噴流は左右どちらかの出力ポートへ達する。Fig.1において例えば右に流れた場合、噴流は右側のフィードバック流路を通り入力ポートへ向かう。この流れは噴流の根元部分に加わることで噴流が反対側に傾き、左の出力ポートへ偏向する。左側の流路でも同様に流れ、交互に噴流の向きが偏向することになる。この噴流偏向によって発振現象が誘起される。伝達信号はこの流路を一巡するため、発振周波数は、各部の信号伝達にかかる時間の合計の逆数として求められることになる。

2.3 発振周波数特性

Fig.2 に流量センサ($bs=0.75\text{ mm}$, $h=0.5\text{ mm}$)における発振周波数 f と流量 qs の関係を示す。発振周波数はフィードバック流路にコンデンサマイクروفオンを設け測定している。流量測定下限 2.7 ml/s 、上限 60 ml/s 、周波数は $182\sim 814\text{ Hz}$ まで変化している。図より流量の増加に伴い発振周波数が増加しており、発振周波数を測定することで流量が分かることになる。

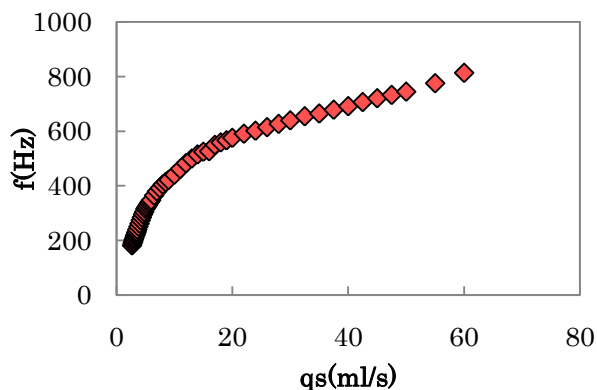


Fig.2 f vs qs ($bs=0.75$, $h=0.5$)

3. 信号伝達と内部流路について

発振周波数と各流路の関係を検討するために、流量センサ内部に 8 つの測定点を設け、その測定点での圧力変化をもとに伝達時間を測定する。測定点は信号伝達の上で重要と考えられる箇所に設

けている。その測定箇所を Fig.3 に示す。

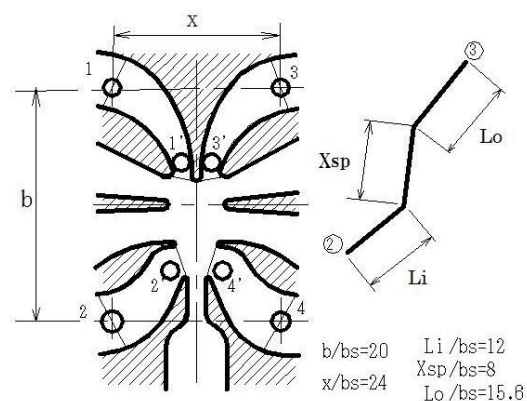


Fig.3 Measured Point

測定によって求めた伝達時間から発振周波数の算定を試みるが、伝達時間を次のように定める。
 $t_{1'1}$ 及び $t_{3'3}$: 左右の出力部流路長さの伝達時間
 $t_{2'2}$ 及び $t_{4'4}$: 左右の入力部流路長さの伝達時間
 $t_{2'3}$ 及び $t_{4'1'}$: 噴流偏向部の伝達時間
 t_{23} 及び t_{34} : フィードバック流路の伝達時間である。

Fig.4 に各流路の名称を示す。

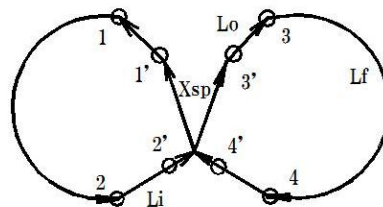


Fig.4 Names of the Ducts

信号は流路内を一巡することにより以下の式が成り立つ。

$$T = t_{1'1} + t_{12} + t_{2'2} + t_{2'3} + t_{3'3} + t_{34} + t_{44'} + t_{4'1'} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

ここで、 T は一周期にかかる時間である。また f は流量センサの発振周波数であり、 T の逆数となる。

これより、各部の信号伝達時間を測定すると、

各部の形状及び寸法がどのように発振周波数に影響するのかが分かることになる。

4. 実験装置及び実験方法

4.1 実験装置概略図

実験装置の概略図を Fig.5 に示す。

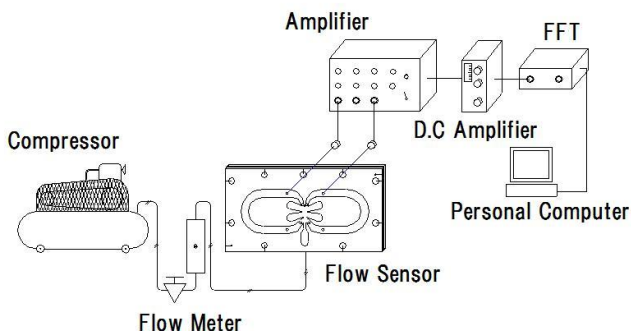


Fig.5 Measurement System

コンプレッサからの圧縮空気をフローメータで流量測定し、流量センサに供給する。センサ内 8 箇所の測定点に取り付けたコンデンサマイクロフォンによって圧力を電圧に変換することで流路内の圧力変化、すなわち発振周波数を測定する。マイクロフォンで測定した信号は微弱であるためアンプを用いて増幅し、FFT（小野測器 DS-0264）を用いて自動計測を行った。

4.2 流量センサの寸法

実験で用いた流量センサの寸法を Table1 に示す。流量センサはノズル幅 bs を基準とし、ワイヤカット放電加工機を用いて精密に加工した。

L_f はフィードバック流路長さ、 L_o は出力部の流路長さ、 L_i は入力部の流路長さ、 X_{sp} はノズルからスプリッタまでの寸法を示す。

実験では、 bs と板厚 h の寸法が異なる流量センサの、各部伝達時間の測定を行った。

Table1 Sizes of Flow Sensor (mm)

bs	L_f	L_o	L_i	X_{sp}	h
0.5	40.33	—	—	4.0	0.3,0.4,0.5,0.7, 0.8
0.75	67	11.7	9	6.0	0.3, 0.4,0.5, 0.6, 0.8, 1.0
1.125	89.34	15.6	12	8.0	0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.3
1.5	134.01	23.4	18	12.0	0.7, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5

5. 実験結果及び考察

5.1 伝達時間比率

Fig.6 に流量センサ ($bs=1.5mm$, $h=0.9mm$) における各部の伝達時間の比率を示す。 t_i は各部の伝達時間で、 T は一周期にかかる時間である。

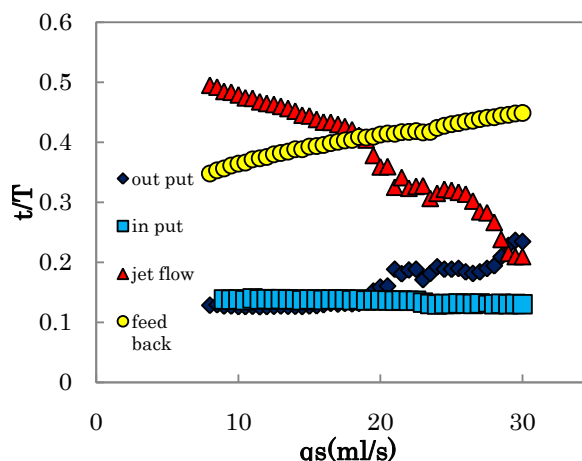


Fig.6 t/T vs qs ($bs1.5$, $h0.9$)

Fig.6 において、噴流偏向部での伝達時間の比率は流量が低い場合、0.5 程度で流量の増加と共に減少し、 $qs=30ml/s$ では 0.2 程度となっている。またフィードバック流路での伝達時間の比率は 0.35 程度から流量の増加と共に上昇し、0.45 程度となっている。入力部、出力部の伝達時間の比率は約 0.15 程度で、入力部は流量が増加しても変化はないが出力部は $20ml/s$ より増加している。

伝達時間の比率は流量によって変化し、変化の状況は bs ごとに異なる。摩擦や抵抗、断面積等が影響していると考えられるが、どれも同じような

傾向が見られた。噴流部の割合が最も大きく、全体の50%~60%を占める。次がフィードバック流路であり、全体の30%程度を占める。入力部出力部の時間割合の増加減少はbsによって様々だが、割合が小さいのであまり影響していないと考えられる。

よって流量が少ない場合には噴流偏向部の伝達時間が発振周波数の50%程度を占めていることがわかる。

5.2 噴流偏向部伝達時間

5.2.1 噴流偏向部伝達時間と流量

Fig.7 に流量センサ(bs=1.5mm)における噴流偏向部の伝達時間 t_j と流量の関係を示す。

図から流量の増加と共に伝達時間も減少しており、また板厚が大となる程伝達時間も大となっている。

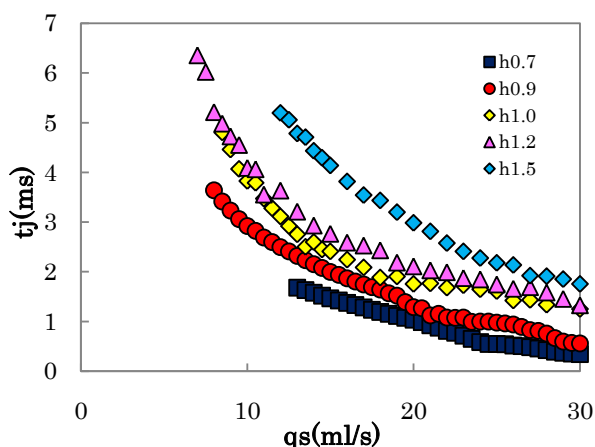


Fig.7 t_j vs q_s (bs1.5)

5.2.2 噴流偏向部の速度変化

Fig.8 に流量センサ(bs=1.5mm)の噴流偏向部における速度の変化を示す。

この伝達時間は、スプリッタ距離 X_{sp} を伝達時間で計算した速度である。この速度で主ノズルよりスプリッタまでの間を伝っていることになる。

流量の増加に伴い流速も増加しており、板厚0.7mmでは流量30ml/sで35m/sである。板厚が薄いほど主ノズル断面積が小さくなるので、速度

が速く増加率も大きい。bsが1.125, 0.75, 0.5mmでも同様の傾向が見られた。

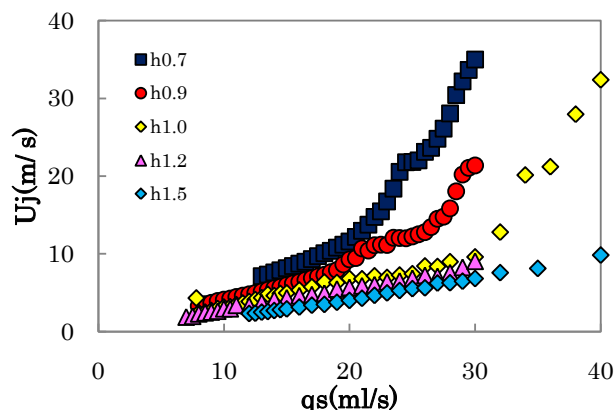


Fig.8 U_j vs q_s (bs1.5)

5.2.3 George Mon の式

George Mon は流量センサの発振周波数に関して、噴流の到達時間 t_j を以下の式³⁾で表している。

$$t_j = \frac{X_{sp}}{U} \quad (3)$$

ここで X_{sp} はスプリッタ距離、 U は噴流の平均流速であり、主ノズルよりの噴出流速の1/2を用いている。

Fig.9 に bs1.5 の流量センサの伝達時間 t_j と流量の関係を表す。横軸は流速 q_s 、縦軸は伝達時間 t_j である。

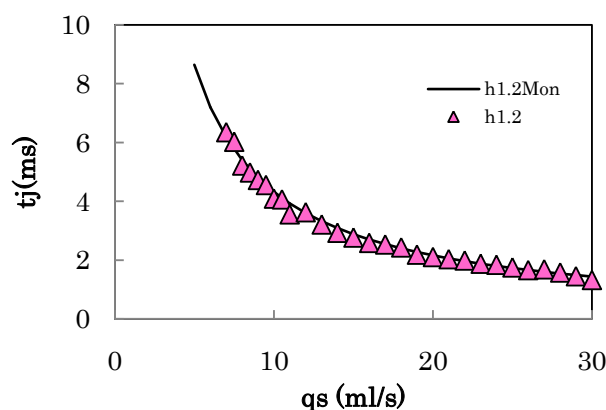


Fig.9 t_j vs q_s (bs1.5, h1.2)

George Monの解析結果と実験値はよく一致しており、噴流偏向部の伝達時間は上式で説明できる。

しかしながら流量が大きくなるとずれが生ずる

ので、流量の広範囲にわたって検討が必要である。
また、他の寸法でも確認したところ概ね一致した。

5.2.4 噴流偏向部伝達時間の算定式

実験結果から、噴流偏向部の伝達時間の算定式を試みた。

噴流偏向部での伝達時間 t_j を次のように仮定する。

$$t_j = A \cdot q_s^B \quad (4)$$

$bs=1.5mm$ の場合の流量センサの場合は係数 A と指数 B は次のようになった。

$$A = 62.37 \lambda^{1.211} \quad (5)$$

$$B = 0.024 \lambda - 1.050 \quad (6)$$

λ はアスペクト比であり、 h/bs である。 $bs=0.5, 0.75, 1.125$ の形状における算定式については Table2 に示す。

5.3 フィードバック流路の伝達時間

5.3.1 フィードバック流路の伝達速度

Fig.10 に流量センサ($bs=1.5mm$)のフィードバック流路内の伝達速度 U_f と、流量 q_s の特性を示す。伝達速度は、流路長さ L_f と伝達時間 t_f により算定した平均速度である。

フィードバック流路における流速は流量の増加に伴い増加していることが分かる。

この信号伝達速度は、噴流偏向部速度の 5~30 倍程度速い。これはフィードバック流路では、噴流偏向部よりも速い速度で信号が伝わっていることを示す。よってこの部分は噴流が信号として伝播しているのではなく、例えば小圧縮波のような状態で信号が伝わっているものと考えられる。

なお $bs=1.125, 0.5$ でも同様の傾向が見られた。

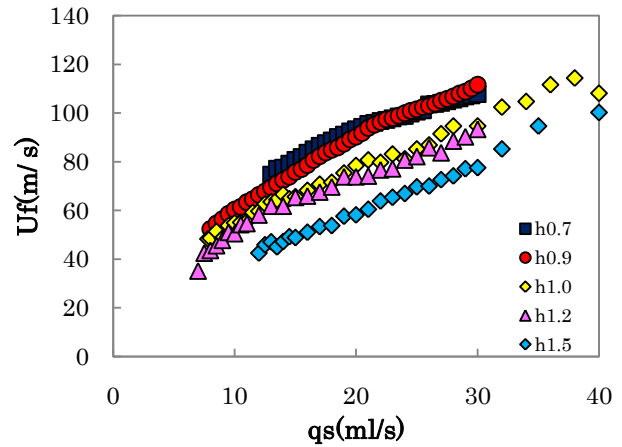


Fig.10 U_f vs q_s ($bs=1.5$)

5.3.2 フィードバック流路伝達時間の算定式

Fig.11 に流量センサ($bs=1.5mm$)におけるフィードバック流路の伝達時間と流量の関係を示す。

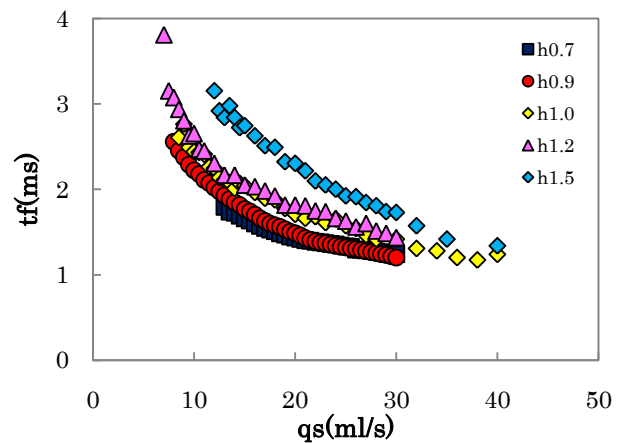


Fig.11 t_f vs q_s ($bs=1.5$)

図から流量の増加に伴ってフィードバック流路の伝達時間が減少することが分かる。

噴流偏向部の場合と同様に $bs=1.5$ におけるフィードバック流路伝達時間の算定式を試みた。伝達時間 t_f を次のように仮定する。

$$t_f = C \cdot q_s^D \quad (7)$$

ここで係数 C 、指数 D は次の通りである。

$$C = 15.99 \lambda^{1.438} \quad (8)$$

$$D = -0.406 \lambda - 0.267 \quad (9)$$

5.4 入力部伝達時間の算定式

Fig.12 に流量センサ(bs=1.5mm)の入力部伝達時間と流量の関係を示す。

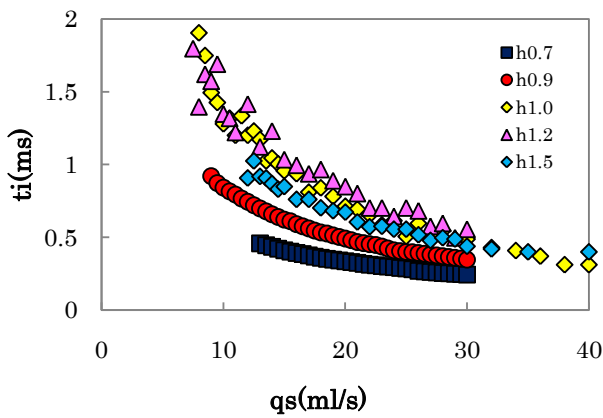


Fig.12 t_i vs q_s (bs1.5)

入力部伝達時間は、流量の増加に伴い減少する。また板厚や bs が小さいほど伝達時間は小となる傾向がある。

同様に算定式を次のように仮定する。

$$t_i = E \cdot q_s^F \quad (10)$$

ここで E, F は次の通りである。

$$E = 5.163 \lambda^{3.343} \quad (11)$$

$$F = -0.744 \lambda + 0.207 \quad (12)$$

また入力部伝達速度は、流量と共に増加していく傾向がある。板厚が薄いほど伝達速度が速くなる傾向があるが、フィードバック流路より速くはない。これは、フィードバック流路の小圧縮波が再び噴流部分に流れ込むための影響と考えられる。

5.5 出力部伝達時間の算定式

Fig.13 に流量センサ (bs=1.5mm) の出力部での伝達時間と流量の関係を示す。

出力部では形状により、流量の増加に伴い減少する場合と増加する場合がある。出力部では噴流がスプリッタによって分けられ、出力部流路に流

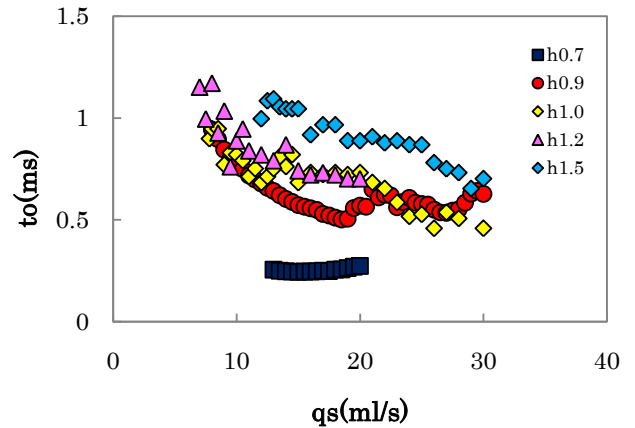


Fig.13 t_o vs q_s (bs1.5)

れ込む部分であるので流れが不安定であり、乱れやすい部分であると思われる。しかしこの部分は全体の伝達時間の一割程度であるため発振周波数にはそれほど影響はないと考える。

出力部の伝達時間の算定式を次のように仮定する。

$$t_o = G \cdot q_s^H \quad (13)$$

ここで G, H は次の通りである。

$$G = 10.55 \lambda^{1.227} \quad (14)$$

$$H = -0.098 \lambda - 0.749 \quad (15)$$

5.6 算定式の値

算定式における噴流偏向部とフィードバック流路の係数を Table2 に示す。また、Table3 に入力部と出力部の係数を示す。

bs1.5, 1.125 は噴流偏向部、フィードバック流路、入力部、出力部の計 8 つの係数、bs0.75, 0.5 は形状が小さいため噴流偏向部、フィードバック流路の計 4 つの係数で示す。

板厚が薄いほど壁の摩擦が大きく、厚いほど流れが乱流に移行しやすい傾向があるので、算定式はアスペクト比の極端に小さい形状やアスペクト比の非常に大きい形状については除外している。

Table2 Coefficients of Calculation Formula

bs(mm)	A	B	C	D
0.5	$2.338 \lambda^{1.004}$	0.298λ - 0.503	$0.327 \lambda^{0.068}$	-0.151λ + 0.206
0.75	$8.372 \lambda^{1.546}$	-0.410λ - 0.483	$1.274 \lambda^{1.820}$	-1.066λ + 0.689
1.125	$22.58 \lambda^{0.123}$	0.736λ - 1.638	$9.815 \lambda^{2.355}$	-1.176λ + 0.144
1.5	$62.37 \lambda^{1.211}$	0.024λ - 1.050	$15.99 \lambda^{1.438}$	-0.406λ - 0.267

Table3 Coefficients of Calculation Formula

bs(mm)	E	F	G	H
1.125	$20.29 \lambda^{8.306}$	-4.995λ + 2.796	$4.912 \lambda^{1.392}$	-0.371λ - 0.767
1.5	$5.163 \lambda^{3.343}$	-0.744λ + 0.207	$10.55 \lambda^{1.227}$	-0.098λ - 0.749

5.7 算定値の検討

算定式と実験値との比較結果を Fig.14 に示す.

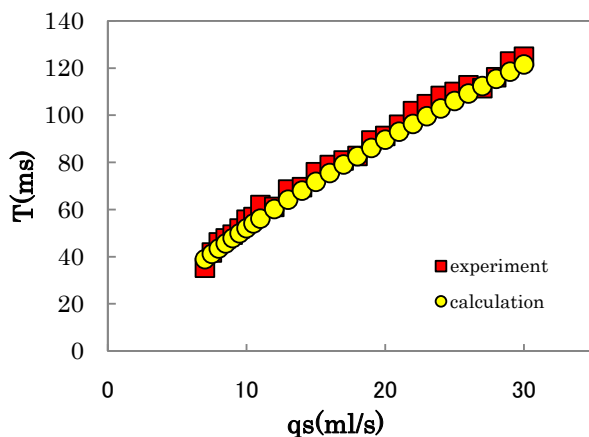


Fig.14 T vs qs (bs1.5)

これは流量センサ(bs=1.5mm, h=1.2mm)の実験による周波数と、算定式から周波数を算出した値を比較したものである。比較的良く一致している。

Fig.15 に実験値と算定値の誤差を示す。誤差は約 10%以内である。

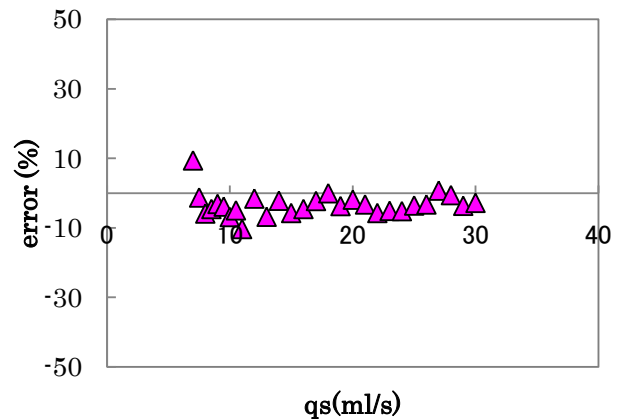


Fig.15 Error vs qs (bs1.5)

これらの結果から、発振周波数の算定が可能となった。

6. 結言

実験の結果、次のことがわかった。

- 1) 噴流偏向部の伝達時間が、発振周波数の内の最も大きな部分を占めており、流量の増加とともにその割合は減少する。
- 2) フィードバック流路では噴流は、流量が少ない場合、小圧縮波の形で伝搬していると考えられる。
- 3) 入出力部では噴流が乱れやすいが、全体に占める比率は 10%程度と小さい。
- 4) 今回の研究では bs ごとの発振周波数の算定式を求めることができた。今後、bs に関係しない標準化のための算定式の検討を行う。

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発振周波数について, 計測自動制御学会 2005 年度産業応用部門大会
- 2) 関谷祐太, 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発振周波数, 計測自動制御学会東北支部第 230 回研究集会 230-13
- 3) George Mon: A fluidic Volumetric-flow, Mass Flow Density and Viscosity Meter, The Journal of Fluid Control 7/18(1987)