2 細線熱後流式微小流量計の開発*

富士原 民雄^{*1}, 鬼頭 修己^{*2}

Development of a Micro Flow Meter using 2 Fine Wires

Tamio FUJIWARA^{*3} and Osami KITO^{*3} Department of Systems Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi, 466-8555 Japan

Recently, development of micro-machine technology is marked and the requirements from this field to the fluid measuring techniques are increasing. The flow rate measurements are the basic needs for the technology, however we do not have a reliable micro-flow meter yet. We have developed a new micro-flow meter system using a capillary and two fine wires. This system makes it possible to measure flow rate of order of $0.1 \text{ [mm}^3/\text{s]}$. This system has a potential ability of measuring much smaller flow rate, say $0.01 \text{ [mm}^3/\text{s]}$.

Key Words: Micro-Machine, Micro-Flow, Flow Meter, Capillary, Fine Wire

1. 結 言

流速や流量が微小な流れに関する研究は、化学、生体・医療技術の分野で行われてきたものの、機械工学ではそのような流れを研究対象とすることが少なく、これまで十分行われてこなかった。

しかしながら、近年のマイクロマシン技術の著しい進歩や、各研究分野のボーダレス化に伴い、機械工学の分野においても微小な流れを取り扱う機会が多くなっている。その結果、微小な流れにおける種々の物理量の測定を可能にするような装置の開発が、必要不可欠となってきている。そのような微小量測定装置の一つとして、微小流量計が挙げられる。例えば、現在著者らが行っている電気浸透⁽¹⁾と呼ばれる現象に関する研究では、 $0.1 \text{ [mm}^3/\text{sec]}$ オーダ、あるいはそれ以下の流量計測を必要としている。

現在市販されている機械式の微小流量計の最小測定流量は、 $10 \text{ [mm}^3/\text{sec]}$ 程度である。機械式の流量計では、流れによって羽根車などの機械要素を駆動させることにより、流量を測定している。機械要素の運動には摩擦による抵抗を伴う。低流量では、この摩擦抵抗により機械要素が動かなくなることから、低流量での測定限界が生じる。機械式微小流量計の技術では、この摩擦抵抗を減らし、効率よく機械要素を駆動させることが要求されるが、機械要素が運動する以上、摩擦

抵抗を零にすることは不可能である。

したがって、ここで対象とする微小流量計には、機械式とは異なった原理をもつものが望ましい。この種の流量計としては、流体に熱を加えその熱の移動速度から流量を求める「熱後流式」流量計がある。熱後流を用いた微小流量計の研究は、Miller⁽²⁾が報告しており、 $1 \text{ [mm}^3/\text{sec]}$ オーダの流量測定が可能な流量計が示されている。また、この流量計は、LeBlanc⁽³⁾が行った低流量ポンプに関する研究において実用されている。

本研究では、Millerらの流量計よりさらに低流量に測定範囲を拡大するため、毛細管と2本の金属細線を用いた「2細線熱後流式微小流量測定システム」を開発した。本システムの原理はMillerらの流量計と同じ熱後流式であるが、さらに低流量を正確に測定するため、以下の2点について改良を行った。まず、Millerらの流量計では、 $25 \text{ [mm}^3]$ であった測定部体積を $0.14 \text{ [mm}^3]$ に小さくした。また、Millerらの流量計では、温度センサーとして $\phi 2.5 \text{ [mm]}$ のガラスコートされたサーミスタを用いたが、本装置では $\phi 5 \text{ [}\mu\text{m]}$ のタングステン線をセンサーにし、センサーの熱容量を小さくすることにより応答性を高めた。この改良によって、これまでに $0.1 \text{ [mm}^3/\text{sec]}$ オーダの水の流量を正確に測定することを可能とした。本稿ではこの微小流量計の開発結果および今後の課題と可能性について述べる。

* 原稿受付 2000年5月18日。

^{*1} 正員、名古屋工業大学大学院(☎466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。^{*2} 正員、名古屋工業大学工学部機械工学科
E-mail: fujiwara@cfm.mech.nitech.ac.jp

Fig. 1 Schematic diagram of flow meter system

2. 測定原理

図1に2細線熱後流式微小流量測定システムの測定原理を示す。測定装置は、管中央に2本の金属細線が張られた毛細管からなる。なお、実際の装置では図のように2本の細線が平行ではなく、上流側では水平方向、下流側では鉛直方向に張られている。

毛細管に導かれた流れは完全発達ポアズイユ流になった後、1本目の細線（ヒーター）の周りを通過する。ヒーターにはパルス的に電圧 V_h が印可され、それに応じて細線から流体にジュール熱が伝えられる。下流の細線は温度センサーになっていて、流体の温度変化を感知する。図2に実際のヒーター電圧 V_h とセンサー出力 V_s のサンプリング結果の一例を示す。ヒーターには一定周期のパルス電圧が加えられ、そのジュール熱によって加熱された流体をセンサーが感知していることがわかる。ヒーターに電圧が印可された時刻 t_h からセンサーが感知した時刻 t_s までの時間差 Δt は流体が2本の細線間 l を移動するのに要した時間となるので、管中央の最大流速 v_{max} は次式で与えられる。

$$v_{max} = \frac{l}{\Delta t} \quad (1)$$

また、管内の流量 Q は Hagen-Poiseuille の式より、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{2} v_{max} S \\ &= \frac{1}{2} \frac{l S}{\Delta t} = \frac{\pi l d^2}{8 \Delta t} \end{aligned} \quad (2)$$

として与えられる。ここで S は管断面積、 d は管直径であり、これらは既知量である。したがって、 Δt を測定することにより、流量 Q を求めることが出来る。

3. 微小流量測定装置

図3に製作した流量計の概略を示す。装置は前流部、測定部、後流部の3つのアクリル製のブロックからなり、それぞれに中央に空けられた毛細孔が、3つのブロックを組み合わせることで、1本の毛細管となる。

Fig. 2 Heater voltage V_h & sensor output V_s

Fig. 3 Flow meter apparatus

前流部と後流部には、それぞれ細線を張るための電極が2本ずつ取り付けられている。金属細線は毛細管の中心を通るように電極にはんだ付けする。3つのブロックを組み立てた時には、測定部との合わせ面で細線が挟まれる。細線には $\phi 5[\mu\text{m}]$ のタングステン線を用いた。

細線は電極を通し、それぞれヒーター回路とセンサー回路につながっている。ヒーター回路の印可電圧 V_h 、パルス周期 C_h およびパルスデューティ比 D_h はそれぞれ可変であるが、今回は表1に示す値で実験を行った。センサー回路はセンサー細線の抵抗変化を電圧出力に換算した後、その出力をアンプによって10000倍に増幅するようになっている。センサー回路では非常に高いゲインの増幅を行うため、外部ノイズの影響を受けやすいことから、センサー出力は10[Hz]のローパスフィルターを通した。ヒーター電圧とセンサー出力は、それぞれレコーダー（パーソナルコンピュータ）で同時サンプリングした。サンプリング周波数は200[Hz]

Fig. 4 Calibration apparatus

Table 1 Test condition

Capillary diameter d	$\phi 0.3[\text{mm}]$
Distance between wires l	$2[\text{mm}]$
Heater voltage V_h	$2.5[\text{V}]$
Heater pulse cycle C_h	$3.11[\text{sec}]$
Heater pulse duty ratio D_h	0.5

とした。

4. 検定流発生装置

流量計で測定される時間遅れ Δt を Δt_m と記す。流量 Q と Δt_m との関係を調べるため、予め流量 Q_{test} が分かっている検定流が必要である。図4に検定流を発生させる装置を示す。

装置はステッピングモーターとボールネジを組み合わせた送り装置およびマイクロシリンジからなる。検定流はシリンジのピストンを送り装置により一定速度で送ることにより得られ、その時の流量はシリンジの断面積と送り速度の積より与えられる。

今回実験に用いたマイクロシリンジは3種類で、それぞれの断面積は、 $0.111[\text{mm}^2]$ 、 $0.422[\text{mm}^2]$ 、 $1.71[\text{mm}^2]$ である。また、送り装置の駆動速度は $0.1 \sim 2[\text{mm}/\text{sec}]$ の間で可変である。したがって、この装置によって作られる流量 Q_{test} の範囲は、 $1 \times 10^{-2} \sim 3[\text{mm}^3/\text{sec}]$ で、 Q_{test} の精度は1%以下である。

5. 実験結果および考察

流量 Q_{test} を用い、 Δt_m を測定した結果を述べる。なお、流体には水を用いた。

5.1 Δt_m の算出法 本装置で直接得られるデータは、ヒーター電圧 V_h とセンサー出力 V_s の時系列である。 Δt_m は、測定データからヒーターの電圧印可時刻 t_h とセンサーの感知時刻 t_s を求め、その差

$$\Delta t_m = t_s - t_h \quad (3)$$

として与える。ここでは、測定データから t_h 、 t_s を定める方法を述べる。

まず、図2に示したヒーター電圧の測定結果について述べる。 V_h が零から立ち上がる時、 V_h の時間変化

Fig. 5 Method of fixing sensing time t_s

は非連続的であり、時間分解能 $0.005[\text{sec}]$ の精度で t_h を定めることができる。

次に $Q_{test} = 0.295[\text{mm}^3/\text{sec}]$ のセンサー出力 V_s の時系列を図5(a)に示す。ヒーターではパルスの熱を加えているので、センサー出力 V_s も矩形波に近い変動をするように思われるが、実際には V_s は正弦波に近い形で変動している。これは、ヒーターからセンサーに流体が移動する間に、途中の毛細管壁面と流体との間で熱の授受が行われるためである。すなわち、ヒーターから熱を伝えられた流体と壁面の間では、流体から壁面に熱が移動し、逆にヒーターから熱を与えられず室温のままヒーターを通過した流体と壁面との間では、壁面から熱が流体に伝わっている。

このように、センサー出力 V_s は時間に対し連続的に変化することから、 t_h のように一義的に t_s を定めることが出来ない。そこで、図5(b)に示すように、センサー感知時刻付近のサンプリングデータを3次近似し、その曲線が極小値となる時刻、すなわち V_s が減少から増加に転ずる時刻を t_s とした。なお、3次近似の範囲は、サンプリングデータと近似曲線が一致するように、 $\pm 0.05 \sim \pm 0.15[\text{sec}]$ で出力結果に応じ対応させた。

Fig. 6 Sensor output V_s for low flow rate

(a), (b) and (c) are for $Q_{test}=0.0422$, 0.0866 and 0.127 [mm³/sec], respectively.

5.2 低流量での測定結果 図5に示した測定結果は、本流量計の測定範囲において中程度の流量での測定結果である。これに対し、図6に、測定範囲のうち低流量にあたる流量でのセンサー出力 V_s の測定結果を示す。この結果より、測定流量 Q_{test} が小さいほど、 V_s の変動が小さくなることが分かる。これは、低流量では、ヒーターからセンサーまで流体が移動するのに要する時間が長くなるため、ヒーターより流体に伝えられた熱の内、センサーにたどり着くまでに毛細管壁面に奪われる熱が多くなり、センサー部での温度変化が小さくなるためと考えられる。

このことにより、低流量ではセンサー反応時刻 t_s の見積もりが困難となり、ある流量以下では Δt_m を得ることが出来なくなる。今回の実験では、 $Q_{test}=0.08$ [mm³/sec] 以下の流量で、 Δt_m が得られなかった。

5.3 イニシャル時間 一定流量の流れに対しヒーターにパルス電圧を印可し始めてからの V_h , V_s およびそれから算出した Δt_m の時系列を、図7に示す。 V_s の変動にはヒーターの印可パルス電圧に対応する変動成分以外に、ヒーター加熱開始から時間と共に徐々に大きくなりやがて安定する大きい時間スケールの変動成分があることが分かる。このゆっくりとした V_s の増大により、 Δt_m が初期においては小さく計測され、ある程度時間が経ったところで安定していることが分かる。この Δt_m が小さく計測される時間をイニシャル時間と呼ぶことにする。

イニシャル時間は、流量計の暖気のための時間であり、この間に毛細管壁面温度がヒーターでの加熱により上昇する。イニシャル時間に測定された Δt_m は、小さく測定されるため、流量測定には用いないようにしなければならない。そこで、イニシャル時間を見積もるために、 Δt_m の偏差を求めた。

まず、イニシャル時間以降に得られる Δt_m の平均を $\overline{\Delta t_m^s}$ とする。この $\overline{\Delta t_m^s}$ に対するそれぞれの Δt_m

Fig. 7 Initial time

Table 2 Initial time

Flow rate [mm ³ /sec]	Initial time [sec]
~0.2	25
~0.3	20
~0.4	15
~0.5	10
0.5~	5

の偏差の割合を、

$$\delta \Delta t_m = \frac{\Delta t_m - \overline{\Delta t_m^s}}{\overline{\Delta t_m^s}} \quad (4)$$

として計算し、これを図7に合わせて示した。

この結果、時刻が8[sec]以降の $\delta \Delta t_m$ が $\pm 3\%$ 以内であるのに対し、8[sec]以前では $\pm 3\%$ を超える値となった。ここでは、偏差が $\pm 3\%$ を超えるこの時間をイニシャル時間とした。

イニシャル時間は、実験条件や測定流量 Q_{test} によって変化する。したがって、今回の実験条件における各流量に対するイニシャル時間を、上述の手法で算出した結果をTable 2に示す。なお、示したイニシャル時間は、計算結果を5[sec]単位で切り上げたものである。

5.4 Δt_m のばらつきと再現性 図7に示したように、イニシャル時間を過ぎても Δt_m にはばらつきがある。このばらつきの程度は流量 Q_{test} に依存する。そこで複数回の実験（途中に細線の張替えも行った）を行い、各流量 Q_{test} に対し30個の Δt_m を得た。その結果すべてを図8に示す。この図より、複数回の実験に対し、 Δt_m があるばらつきの範囲内で再現性をもつことが確認できた。また、そのばらつきの程度は、流量 Q_{test} が小さい（ Δt_m が大きい）ほど大きいことが分かる。

Fig. 8 Q_{test} vs. Δt_m Table 3 Uncertainty of Δt_a

Flow rate [mm ³ /sec]	Δt_a [sec]	Uncertainty of Δt_a [sec]
0.10~0.13	1.13~1.28	0.025
0.13~0.25	0.64~1.13	0.020
0.25~0.33	0.48~0.64	0.015
0.33~0.47	0.33~0.48	0.010
0.47~0.90	0.17~0.33	0.005

このように、 Δt_m にはばらつきがあることから、 Q_{test} と Δt_m との関係を示す検定曲線に不確かさが生じる。そこで、この不確かさを小さくするため、同条件で連続して得られた5個の Δt_m をアンサンブル平均したもの、

$$\Delta t_a = \left(\sum_{i=1}^5 \Delta t_m^i \right) / 5 \quad (5)$$

を定義し、今後の考察や流量測定にはこの値を用いた。なお、 Δt_a の不確かさを、表3に示す。いずれの流量においても、 Δt_a の不確かさは3[%]以内である。また、ヒーターパルス周期 C_h は3.11[sec]であることから、5個の Δt_m を得るために必要な計測時間は20[sec] (イニシャル時間と同様5[sec]単位で算出) となる。

5.5 $Q_{test} - \Delta t_a$ 特性 流量 Q [mm³/sec] と時間遅れ Δt の理論式(2)で与えられる Δt を Δt_{th} [sec] とする。今回の実験で用いた測定部寸法 $d = \phi 0.3$ [mm]、 $l = 2$ [mm] では、

$$\Delta t_{th} = \frac{7.07 \times 10^{-2}}{Q} \quad (6)$$

となる。図9に実際に測定された Δt_a を Δt_{th} と比較すると、 Δt_a は Δt_{th} と一致せず、理論値よりも大きくなる。この原因については、以下の点が考えられる。

1. 3つのブロックの毛細管のつなぎ目の段差や、細線などにより流れが乱され、完全発達ポアズイユ流れが保たれていない。
2. 理論では毛細管中央の流体運動のみを考えていて、センサーで感知する温度変化も管中心のみを考えているが、実際にはセンサー細線は管直径に渡って張っており、その全体の電気抵抗変化を見ている。そのため、管中央の最大流速の熱せられた流体粒子がセンサーにたどり着いてもセンサーの一部が熱せられるだけで、センサー全体ではこれを感じできない。そして、流れが進み、ある程度の幅で熱せられた流体がセンサーにたどり着いた時にセンサーで感知できる。
3. 測定中管断面の温度が上昇し、管直径 d および細線間距離 l が熱膨張により大きくなる。

図9の $Q_{test} - \Delta t_a$ 特性は、 $Q_{test} = 0.15$ [mm³/sec] を境に異なる傾向となる。 $Q_{test} \geq 0.15$ [mm³/sec] では、破線で示すように、 Q_{test} は Δt_a にほぼ反比例する。これに対し、 $Q_{test} \leq 0.15$ [mm³/sec] では、 Q_{test} と Δt_a との関係は反比例から外れ、 Δt_a がこれより小さくなる傾向がある。これは、低流量では熱伝導によって移動する熱の影響が大きくなるからと考えられる。本流量測定システムの原理では、流れによって生じる熱移動のみを考慮している。しかし、実際には熱の移動速度は、流れによる速度と流体中を熱伝導によって移動する速度の和として与えられる。 Q_{test} が大きい場合は、熱伝導の速度に比べ、管内の流速の方が大きいためその効果はほとんど無視できる。一方、 Q_{test} が小さくなると、熱伝導の移動の影響が相対的に大きくなり、その結果、 Δt_a が反比例関係から予想される値よりも小さくなる。

熱伝導による熱の移動を確認するために、本装置において零流量でヒーターを加熱した所、その熱に対してセンサーが反応した。したがって、 $Q_{test} - \Delta t_a$ 特性には、熱伝導も影響することが分かった。

5.6 測定流量の精度 本流量計で流量測定を行うには、まず Δt_a を測定し、図9の Q_{test} と Δt_a の関係から、測定された Δt_a に対する流量を換算する。これにより得られた流量を Q_{meas} とする。

Q_{meas} の精度は、 Q_{test} と Δt_a の検定曲線の不確かさに依存する。今回の実験条件では表3示した範囲で Δt_a の不確かさがあることから、これに応じて Q_{meas} に測定誤差が含まれる。表3示した Δt_a の不確かさ

Fig. 9 Q_{test} vs. Δt_a & Δt_{th}

から生じる Q_{meas} の誤差を計算した所、流量測定範囲 $0.1 \sim 0.9 [\text{mm}^3/\text{sec}]$ で、各 Q_{meas} に対し、それぞれ $\pm 3\%$ 以下の誤差となった。

もし、サンプリング時間を長くし、5 個より多くの Δt_m によって Δt_a を求めるようにすれば、 Δt_a の不確かさが小さくなることから、 Q_{meas} の測定精度を高めることができる。

5.7 金属細線の温度変化 5.5 節で考察したように、本流量測定装置の特性を把握するには、装置内の各部における温度変化を知ることが重要である。そこで、2 本の金属細線の温度変化を測定した。

金属の温度 T が $-20 \sim 200^\circ\text{C}$ 程度の範囲にある場合、その金属の電気抵抗 R は、基準温度 T_0 における抵抗 R_0 と物質に固有の温度係数 α を用いて、

$$R = R_0 \times \{1 + \alpha(T - T_0)\} \quad (7)$$

で表される。(4)

ヒーター細線では、印可電圧 V_h と同時に細線を流れる電流 I_h を測定した。これによりヒーター細線の電気抵抗が $R_h = V_h/I_h$ で与えられ、この R_h を用いて式 (7) よりヒーター細線の温度を算出した。

センサー細線は、もともと温度変化 ΔT_s による抵抗変化 ΔR_s を電圧出力として測定していることから、これを逆に換算してセンサー細線の電気抵抗変化 ΔR_s を求め、式 (7) よりセンサー細線の温度変化 ΔT_s を求めた。

図 10(a) に電圧印可時のヒーター細線の温度 T_h を、(b) にセンサーの室温からの温度変化 ΔT_s を示す。この結果より、ヒーター細線は 80°C

近くまで温度が上昇するのに対し、センサーの温度は、 $Q_{test}=0.422 [\text{mm}^3/\text{sec}]$ で 1°C 程度、 $Q_{test}=0.127 [\text{mm}^3/\text{sec}]$ で 0.2°C 程度しか上がらない。以下にその原因について考察する。

ヒーターに電圧を印可すると、ジュール熱によりヒーター細線の温度が上昇し、周囲の水に熱が伝わる。この熱は直ちに流路断面内に拡散するわけではないので、ヒーターの近傍の流体温度だけが上昇し、結果ヒーターの温度が高くなる。しかし、加熱された流体がセンサーに到達するまでに、ヒーターから加えられた熱は断面内に拡散したり、管壁面から外へ放出されたりするので、 80°C 近くまで上昇した流体粒子の温度は、ある程度低下する。さらに、ヒーター細線とセンサー細線の位置関係が直交しているため、センサー細線全体の温度が一様に変化するのではなく、管中心付近では大きく変化し、管壁面近くではあまり変化しない。式 (7) より算出したセンサー温度は、センサー細線全体が一様に温度変化するものと仮定して得た結果であるので、実際には中心付近での温度変化はもっと大きく、反対に壁面近傍では小さいと考えられる。

ヒーター細線は 80°C 近くまで温度が上がるのに対し、センサーで感知出来る温度変化は 1°C と非常に小さい。流量計の性能を上げるには、ヒーターから加えられた熱をなるべく多くセンサーで感知するようにすることが有効である。

5.8 測定部寸法 d, l の Δt_a に及ぼす影響 前節までの実験は、毛細管直径 d 、細線間距離 l がそれぞれ $\phi 0.3, 2 [\text{mm}]$ の流量計で行ったものであるが、本研究では、これ以外にも $d = \phi 0.5 [\text{mm}]$ 、 $l = 2 [\text{mm}]$ と $d = \phi 0.5 [\text{mm}]$ 、 $l = 4 [\text{mm}]$ の流量計を製作し、実験を行った。ヒーター印可電圧の条件は、パルス周期 C_h とパルスデューティ比 D_h は表 1 に示した値で変更せずに行った。しかし、細線の長さは管直径と等しくおくので、 $d = \phi 0.3 [\text{mm}]$ と $\phi 0.5 [\text{mm}]$ では細線の長さが異なる。したがって、細線の長さに合わせヒーターの印可電圧 V_h も変えて、 $d = \phi 0.5 [\text{mm}]$ では $V_h = 0.4 [\text{Volt}]$ とした。

以上の 3 種類の測定部寸法を持つ流量計の Δt_a の測定結果を、図 11 に比較する。実験の結果、 d, l 共に大きくなるほど、 Δt_a が大きくなった。この結果は、式 (2) から理解できる。

低流領域では、 d, l が大きくなると、流量 Q に対する Δt_a が大きくなり、その間に管壁面から放出される熱が増えるので、センサー出力の変動が小さくなる。その結果、図 5 のようにして求めた t_s の精度が低下し、低流量での測定限界流量が大きくなる。

Fig. 10 Temperature of fine wires

高流量域では、 Δt_a が小さくなることから、測定限界が生じる。したがって、 d , l を大きくすることにより、流量 Q に対する Δt_a を大きくすれば、高流量の測定限界が大きくなる。すなわち、測定部寸法 d , l を大きくすると、測定流量の下限、上限共に大きくなる。反対に、 d および l を小さくすれば、 Q_{meas} の測定下限および上限が小さくなるので、さらに低流量を測定することが可能となる。

6. 結 言

Miller らの微小流量計に対し、さらに低流量を測定するために、本研究で開発した 2 細線熱後流式微小流量計では以下の点について改良した。

- 測定部体積を $25[\text{mm}^3]$ から、最小で $0.14[\text{mm}^3]$ にした。
- ヒーターおよびセンサーを、ガラスコートしたサーミスタから $\phi 5[\mu\text{m}]$ のタングステン線に変更した。

これにより、以下の結果を得た。

1. 従来では $1[\text{mm}^3/\text{sec}]$ オーダが限界であった微小流量の測定が、 $0.1 \sim 0.9[\text{mm}^3/\text{sec}]$ の流量を測定できるようになった。
2. 流量の測定精度は測定時間により異なり、 $20[\text{sec}]$ の測定時間では 3% 以下の測定精度を得た。また、測定時間を長くすることにより、精度を高めるこ

Fig. 11 Effects of d and l to Δt_a

とが可能である。

3. 測定には暖気のためのイニシャル時間が必要であり、その時間は最大で $25[\text{sec}]$ である。
4. 流量測定範囲は管断面直径 d および細線間距離 l に依存しており、これを変更することにより、測定範囲を変更できる。

References

- (1) T. Tsuda *Electric Field Applications in Chromatography, Industrial and Chemical Processes*, VCH, (1995), pp.47-74
- (2) T. E. Miller, Jr., H. Small, *Thermal Pulse Time-of-Flight Liquid Flow Meter*, "Anal. Chem.", 54, (1982), pp.907-910
- (3) J. C. LeBlanc, *The Stableflow Pump - a low-noise and drift-free pump for high performance liquid chromatography*, "Rev. Sci. Instrum.", 62, (1991), pp.1642-1646
- (4) 池田哲夫, 電気理論, 森北出版, (1989), pp.15