

毛細管差圧式微小流量計の開発

Development of Micro Flow Meter Based on Pressure Difference Generated by Capillary

○ 富士原民雄 (武蔵工大), 佐瀬順太 (武蔵工大), 大上浩 (武蔵工大)

Tamio FUJIWARA, Junta SASE and Hiroshi OHUE

Dept. of Mech. Eng., Musashi Institute of Technology, Setagaya, Tokyo 158-8557, Japan

A new micro flow meter consisting of a capillary and a pressure gauge has been developed. When fluid flows the capillary, the pressure difference between the entrance and exit of the capillary and the Hagen-Poiseuille equation illustrate the flow rate. In case of the flow meter using a capillary with 0.46 mm diameter and 60 mm length, the steady pressure difference gives the flow rate of 50 nl/s with an accuracy of $\pm 3\%$. Even when changing the pressure difference with time, a compensation calculation gives the flow rate. Therefore, the flow meter enables the measurement of unsteady flow rate.

1. 結論

マイクロ流体現象の研究では、 $\mu\text{l/s}$ ないし nl/s オーダの流量測定が必要になる場合があるが、このような極微小流量を測定するマイクロ・ナノ流量計については、その測定精度や時間分解能、あるいは実用性がいまだ十分とは言えない。そこで、著者の一部は熱式流量計¹⁾の1つである2細線熱後流式流量計を開発し、100 nl/s オーダの水の流量測定を可能にし、さらに nl/s オーダの測定についても可能性を見出している²⁾。しかし、この流量計には、メンテナンス性や汎用性の面で問題を残し、原理上流量測定精度や時間分解能の向上も困難となっている。本研究ではこれらの問題を解決するために、毛細管に流れを導きその両端に発生する差圧を測定することにより流量を求める毛細管差圧式流量計を開発した。本報では、その原理と開発結果について述べる。

2. 実験装置

図1に製作した流量計と検定装置の構成の概略を示す。差圧式流量計で一般に用いられるオリフィスなどの代わりに、本流量計では圧力損失を発生させるデバイスとして毛細管を使用し、その両端に発生する圧力差から毛細管内を通過する流量を求める。毛細管内の流れは Re 数が1未満で層流であり、事実上毛細管出入り口の影響も無視できるので、圧力差 p と流量 Q の関係は Hagen-Poiseuille の式

$$Q = \frac{\pi d^4 p}{128 \mu l} \quad (1)$$

で与えられる正比例の関係となる。ここで、 d と l は毛細管直径および長さ、 μ は流体の粘度である。

流量計本体には内径 $\phi 0.46 \text{ mm}$ 、長さ 60 mm の毛細管が埋め込まれており、両端はそれぞれ差圧計とコックにつながっている。コックは必要に応じ圧力計に入力される差圧を0にするために用いる。流量計の検定の際には、毛細管入り口部にマイクロシリンジポンプをつなぎ、出口部はバッファタンクを介して大気に開放した。差圧計には司測研製 SDP-11 および SPX-D を用い、その出力は A/D ボードを介して PC により記録した。本機のスパンスケールは 20 Pa である。マイクロシリンジポンプとは、マイクロシリンジのピストンをボールネジとステッピングモーターからなる送り装置で駆動することにより微小流れを発生させる装置で、その流量はシリンジ断面積とピストン送り速度の積で与えられる。ポンプには Harvard 製 PHD2000 を用い、シリンジには Hamilton 製ガスタイトシリンジを用いた。

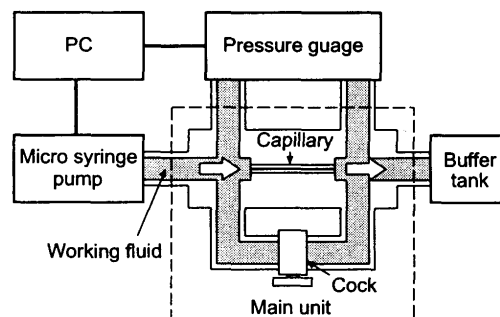


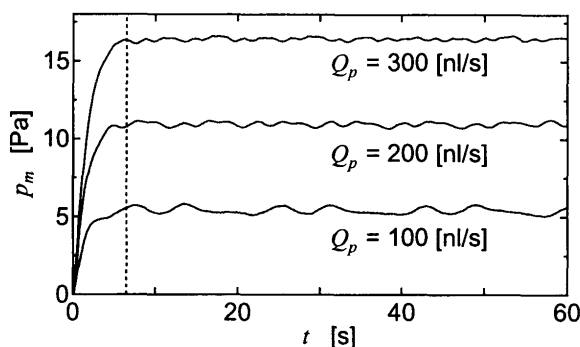
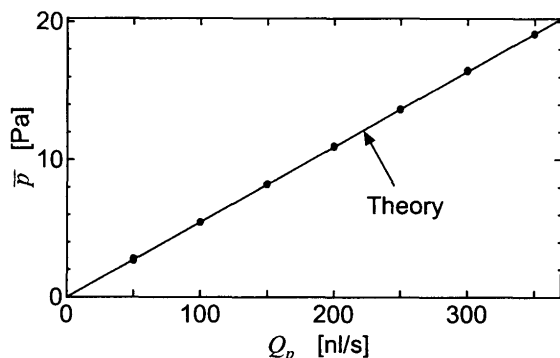
Fig.1 Experimental apparatus.

3. 実験結果および考察

流量計の出力特性を調べるため、マイクロシリンジポンプによって作られる検定流を用いて流量計を検定した。以下にその結果と考察を述べる。なお、式(1)は粘度 μ を含むため、圧力差は流体温度の影響を受ける。本論文では基準温度を $T_0 = 20^\circ\text{C}$ とし、測定時の温度 T が T_0 と異なる場合には、各温度での粘度より、 T_0 の場合に換算した値を示す。

3.1 ステップ的な流量変化に対する出力の時間特性

流量と圧力差が共に0で定常状態から、時刻 $t=0$ よりステップ的に任意のポンプ設定流量 Q_p で送液した場合に測定された圧力差 p_m の時系列の測定例を図2に示す。実験の結果、各設定流量 Q_p に対して p_m の時間特性は7s前後で分けられ、それぞれを初期変動時間、定常時間と呼ぶことにする。初期変動時間では流量の変化に対する過渡特性として定常時間の p_m の値に漸近していくように増加した。この p_m の変動は、流量変化に伴う差圧変化に対して差圧計のダイヤフラムが変形していくことによるものである。一方、定常時間に見られる変動は、マイクロシリンジポンプで設定した流量に対して実際に発生する流量には変動があることに起因している。ポンプで発生させた検定流量は、マイクロシリンジ断面積とピストン送り速度の積で与えられるが、送り速度を電気マイクロメータで測定したところ、ボールネジのピッチの精度に起因する変動があった。したがって、実際に発生させた流量にも変動があり、これが差圧 p_m の変動要因となっており、ポンプが変動のない一定流量を発生させられるならば、定常時間の測定圧力 p_m も一定となるものと考えられる。なお、実測した送り速度から換算した流量 Q の時間平均は設定流量 Q_p に一致している。

Fig.2 Time series of the pressure difference p_m when beginning to flow.Fig.3 Relation between the mean pressure difference $\bar{p}$ and the setting flow rate Q_p .

3.2 定常時の流量と圧力差の関係

初期変動時間と検定流量の変動の影響を除くため、定常時間の p_m の時間平均を $\bar{p}$ とし、 Q_p との関係を図3に示す。また、式(1)で表される理論値も実線で示す。この結果、 $Q_p = 50 \sim 350$ nl/s の範囲では、実験値が理論に一致し、圧力と流量の関係が Hagen-Poiseuille の式で表されることが確認できた。理論値に対する実験値の誤差は $Q_p \geq 100$ nl/s では $\pm 0.6\%$ 、 $Q_p = 50$ nl/s では $\pm 3\%$ であった。また、毛細管の寸法を変更することにより、さらに低流量でも測定が可能になると考えられる。

3.3 差圧変動時の補正計算

初期変動時間は差圧計内ダイヤフラムの変形によりマイクロシリンジポンプから送液された流れの一部が圧力計に流れるため、毛細管を流れる流量はその分だけ減少していることになる。そこで、これらの流量を区別するため、ポンプから送液される流量（測定すべき流量）を Q_m 、圧力計に流れる流量を Q_g 、毛細管を流れる流量（式(1)で表される）を Q_c とする。また、ダイヤフラムの変形量が差圧 p_m に比例し、よって Q_g は p_m の時間微分に比例すると考えると、

$$\begin{aligned} Q_m &= Q_c + Q_g \\ &= \frac{\pi d^4}{128 \mu l} p_m + A \frac{dp_m}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、 A は微差圧計によって決まる定数である。時刻 $t = 0$ に Q_m が 0 から任意の Q_m にステップ的に変化する場合についてこの式を解き、 $t = +\infty$ のときの差圧 $p_\infty = 128 \mu l Q_m / \pi d^4$ で p_m を除した無次元差圧 p^+ は、

$$p^+ \equiv \frac{p_m}{p_\infty} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi d^4}{128 \mu l A} t\right) \quad (3)$$

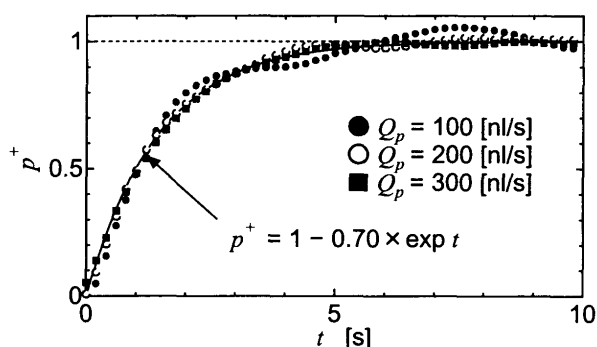
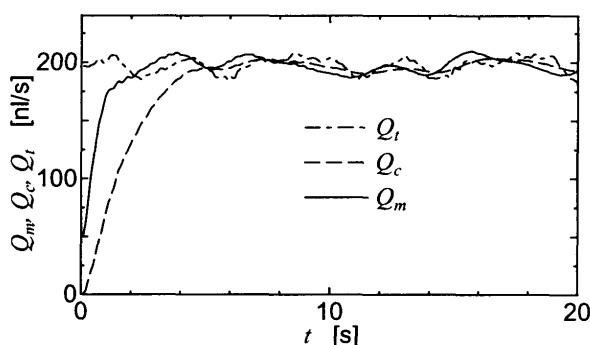
Fig.4 Relation between the dimensionless pressure difference p^+ and the time t .

Fig.5 Time series of the evaluated flow rate.

となる。この式より p^+ は Q_m に関係なく、 t と共に変化する。図2の結果より求めた p^+ とそれらの平均値を式(3)で近似した結果を図4示す。この結果より、ポンプ流量の変動の影響を考慮すれば、実験結果が式(3)で上手く近似出来ており、式(2)が妥当であることが分かる。また、近似結果より $A = 2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Pa}$ となり、流量がステップ的に変化する場合、 $p^+ = 0.99$ になるには 6.5 s かかることが分かった。

よって、本流量計では式(2)を用いれば、非定常な流量の測定も可能である。換算した流量の時系列の一例を図5に示す。なお、破線は式(1)の比例計算による結果、実線は補正計算式(2)より換算した結果である。また、電気マイクロメータで測定したシリンジピストン送り速度から求めた検定流量測定値 Q_t も一点鎖線で示す。この図より、初期変動時間が補正計算によって短縮され、 Q_t の変動に対しても、 Q_m ではこれを検知していることが確認できる。したがって、この計算方法によりダイヤフラム変形の影響を補正し、非定常な流量も本流量計により測定できる。

4. 結言

定常時の本流量計の出力圧と流量の関係は Hagen-Poiseuille の式に一致し、それから換算する流量の誤差は 50 nl/s で $\pm 3\%$ 、100 nl/s 以上で $\pm 0.6\%$ となる。出力圧が変動する場合でも補正計算により非定常な流量を測定できる。

引用文献

- 1) Nguyen, N. T. : Micromachined flow sensors – a review, Flow Meas. Instrum., 1 (1997) 7 – 16.
- 2) 富士原民雄, 鬼頭修己 : 2 細線熱後流式微小流量計の開発, 日本機械学会文集 C 編, 67 (2001) 370 – 376.