液体用超音波微小流量計のセンサ配置と流量特性[†]

石川 博 朗^{*,***,****}・高 本 正 樹^{*}

清 水 和 義^{**}・文 字 秀 明^{****}・松 井 剛 一^{****}

Sensor Configuration and Flow Rate Characteristics of Ultrasonic Flowmeter for Very Low Liquids Flow Rate[†]

Hiroaki ISHIKAWA^{*,***,****}, Masaki TAKAMOTO^{*},

Kazuyoshi SHIMIZU^{**}, Hideaki MONJI^{****}, Goichi MATSUI^{****}

In this study, small disk ultrasonic transducers were used to develop a very small ultrasonic flowmeter with a pipe diameter of 0.53 mm ID. The feasibility of using a practical ultrasonic flowmeter to measure a liquid flow rate below 1 mL/min was investigated experimentally.

The minimum flow rate of an ultrasonic flowmeter depends on the resolution of the transit time measurement and the zero flow rate stability. The former can be improved by applying the high measurement resolution of propagation time of an ultrasonic pulse with advanced electronics. However, the latter gives rise to a serious problem for low flow rate measurements. One of the causes of the zero flow rate instability is that the superposition of reflected pulses or remaining pulses affects the main pulses. This problem can be easily avoided by carefully selecting the sensor material or appropriate sensor location. The other cause of the zero flow rate instability is the different thermal characteristics of the two sensors. In order to solve the above problem, in this study, a newly designed ultrasonic flowmeter was developed.

A glass tube was used as the measuring pipe of an ultrasonic flowmeter. Detected signals of ultrasonic pulses were processed by applying the zero-cross method and the cross-correlation method for comparison. The performance of the developed ultrasonic flowmeter was examined, in particular, the measurement resolution and the zero flow rate stability were carefully evaluated. Results of the flowmeter calibration were scattered within the range predicted from its measurement resolution. It shows that the flow rate more than 0.2 mL/min can be measured by the developed flowmeter. This suggests to be able to measure a very low flow rate range useful for semiconductor, medical and chemical industries.

Key Words: ultrasonic flowmeter, very low liquid flow rate, zero point stability, cross correlation, small disk ultrasonic transducer

1. はじめに

超音波流量計は、流量範囲が広い、応答性が良いなど、他

の流量計にない利点が多数あげられることから、従来から様々な方法の超音波流量計が研究開発され実用化されてきた。現在では、電子回路技術の向上により超音波流量計の信頼性が向上し、多くの分野で、液体あるいは気体の比較的大きな流量の計測に超音波流量計が利用され、デジタル処理技術を利用した流量計^{1)~3)}なども開発されている。

一方、半導体製造プロセス、医療、化学分析分野などにおいて、微小流量計測の要求があるが、従来から使用されている熱式流量計、差圧式流量計では、十分に微小な流量が測定できないこと、長期安定性や精度が不十分であることなどの問題がある。したがって、実用上の利点が多い超音波による微小流量計測の研究開発がこれらの分野で期待されている。しかしながら、従来の超音波センサ取り付け方式では、流体が液体か気体かによって異なるが、測定部流路径は、超音波検出の分解能の限界のため内径が数十 mm 程度に限定され

[†] 第 39 回計測自動制御学会学術講演会で発表(2000・7)

^{*} 計量研究所力学部 つくば市梅園 1-1-4

^{**} (株)カイジョー 羽村市栄町 3-1-5

^{***} 筑波大学工学研究科 つくば市天王台 1-1-1

^{****} 筑波大学機能工学系 つくば市天王台 1-1-1

^{*} Mechanical Metrology Dep., National Research Laboratory of Metrology, Umezono 1-1-4, Tsukuba

^{**} KAJJO Corporation, Sakaecho 3-1-5, Hamura

^{***} University of Tsukuba, Doctoral Program in Engineering, Tsukuba

^{****} University of Tsukuba, Institute of Engineering Mechanics and Systems, Tsukuba

(Received April 6, 2000)

(Revised August 21, 2000)

る⁴⁾。したがって、測定部流路径を小さくして微小流量を計測する場合には、径の小さい流路への超音波センサの取り付け方法(送受信方法)が大きな問題点となる。また、一般に、計測器にある絶対的大きさのゼロ点ドリフトがあるとき、計測対象流量が小さくなるほど計測器の相対的な測定精度は悪くなる。したがって、計測器の測定範囲の下限は、計測流量が小さくなるにしたがって悪くなる測定精度をどこまで許容するかによって決められることが多い。それゆえに、できるだけ微小な流量を計測するための超音波流量計を開発する場合も、ゼロ点の安定性すなわちゼロ点ドリフトをどこまで抑えられるかが重要な課題となる。

本研究では、円板状の超音波振動子を利用した音波送受信方法⁵⁾が通信分野で用いられていることに着目し、小型の円板状超音波振動子を内径 0.53 mm の細管内を流れる液体流量計測に利用することにした。試作した超音波流量計を用いて、最も重要な課題であるゼロ点の不安定要因および測定分解能(超音波の伝播時間分解能)について実験的に調べるとともに、その解決策を考案することにより、計測可能な流量の下限を求め、所望する液体用超音波微小流量計の実現可能性を調べることを本研究の目的とした。

実際の半導体製造プロセスなどの分野では、数 mL/min 以下の微小な流量を計測する要求が多いので、本研究で開発する超音波流量計の計測範囲の下限の最大を 1 mL/min に設定した。なお、測定可能な下限流量は、ゼロ点の安定性と測定の分解能などによって決まるため一概に比較することはできないが、ゼロ点の安定性、分解能などが同じとして管路の口径から見積もると、ここで設定した目標下限流量は、従来の超音波流量計の下限流量の 1/100 以下の微小流量に対応する。

超音波流量計の校正を行うために、微小な基準流量を発生させる基準流量設定装置を製作し、この装置による基準流量を電子天秤を用いた衡量法で校正した。この実験装置の合成相対標準不確かさは、流量に依存するが 0.04~0.13% であった。この値は、試作した超音波流量計を校正するためには、十分であると判断された。超音波流量計の測定可能な下限流量は、主として超音波の伝播時間分解能とゼロ点の安定性によって決まるため、受信波形を 4 章で述べる相関法とゼロクロス法によって信号処理し、そのゼロ点の安定性と測定分解能を、比較、評価した。試作した超音波流量計は、計測の再現性を見るため日時を変えて、校正した。その結果、速度分布補正係数は測定値の標準偏差から推定した範囲内に入り、流量 0.2 mL/min 以上で安定した流量計測が可能であることがわかった。したがって、従来、超音波ではゼロ点の不安定性のため困難であった微小な流量域⁴⁾においても実用に供せる微小液体用超音波流量計が開発可能であることが示されたので報告する。

2. センサ配置と高精度計測法の検討

2.1 円板状超音波センサを使用した超音波パルス送受信方法

一般的な伝播時間差方式の超音波流量計は、1 対(測線数が 1 本、対向型の場合)の超音波センサを斜めに傾けて、対向させるように取り付け、超音波パルスの送受信を行っている⁴⁾。超音波の波長は、管の径に対して大きいものが一般的に使われている。しかしながら、このような超音波センサ取り付け方式では、測定部流路径は、流体の種類によっても異なるが、超音波パルス伝播時間分解能の限界のため内径が数十 mm 以上に限定される。したがって、測定部流路径を小さくして微小流量を計測する場合には、従来の取り付け方式は採用することができず、新たに超音波センサの取り付け方法(送受信方法)を検討しなければならない。

この問題を解決するために、本研究では、小型円板状超音波センサを用い、Fig. 1 に示すように、センサの中心に穴を空け、流路を貫通させて取り付ける方法を考案した。超音波パルスは、送信センサの径方向の呼吸振動を取り付け部の流体に伝達させることで、流路に沿って上、下流の両方向に送信される。流路内流体中を伝播した超音波パルスは、流体からの呼吸振動として受信センサで検出される。流路の内径に比べて波長の大きな超音波周波数を使用することで平面波を伝播させることができ、流路が伝播方向に曲がっていても、流路に沿って伝播させることが可能である⁵⁾。

2.2 微小流量用超音波流量計の誤差要因とその対応策

超音波流量計で微小流量を計測するためには、超音波パルスの伝播時間を高精度に計測することと、ゼロ点のドリフトをできる限り小さくすることが必要である。前者の問題に対しては、電子回路の発達により安価で簡易に高精度時間計測を達成することができるようになったが、計測方法によるさらなる工夫が必要である。また、後者の問題に対しては、原因の特定と対策が必要不可欠である。誤差要因となるゼロ点のドリフトの原因には、反射音、残響音など規則性ノイズの重畳や超音波受信センサの個体差、特に温度特性の違いが挙げられ、これらの項目について検討する必要がある。

規則性ノイズの重畳は、温度変化によって、計測する波と

Fig. 1 Attachment of disk transducers to a pipe

規則性ノイズの波の相対的な位置関係が変わり、受信信号の位相が変化するためにゼロ点のドリフトを生じさせる。この問題に対しては、センサの選定、配置などに注意を払えば比較的容易に回避することが可能である。

一方、センサの個体差は、一般に受信センサの温度特性が異なるためにゼロ点のドリフトを生じさせる。そこで、二つの受信センサの共振周波数の温度特性とゼロ点のドリフトの関係を調べてみる。超音波流量計の上流と下流に取り付けられた受信センサによって、Fig. 2に示すように、温度 T において、異なる周波数 $f_1(T)$, $f_2(T)$ の信号波形 R1, R2 が得られたとすると、Fig. 2(a)より、流れ方向に伝播する超音波の伝播時間 τ_u は、実際の超音波伝播時間計測ではそれぞれ τ_1 , τ_2 の遅れをもって計測されるので、

$$\tau_u = \tau_{u2} - \tau_{u1} + \tau_2 - \tau_1 = \tau_{ut} + \tau_2 - \tau_1 \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \tau_{ut} = \tau_{u2} - \tau_{u1}$$

と表される。

同様に、Fig. 2(b)より、流れに逆らう方向に伝播する超音波の伝播時間 τ_d は(2)式で表される。

$$\tau_d = \tau_{d1} - \tau_{d2} + \tau_1 - \tau_2 = \tau_{dt} + \tau_1 - \tau_2 \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \tau_{dt} = \tau_{d1} - \tau_{d2}$$

ここで、 τ_1 , τ_2 は、(3)式で表される。(Fig. 2では $i=1$)

$$\tau_1 = \frac{i}{f_1(T)}, \tau_2 = \frac{i}{f_2(T)} \quad (3)$$

(a) Ultrasonic waves propagated from R1 sensor to R2 sensor along flow direction

(b) Ultrasonic waves propagated from R2 sensor to R1 sensor against flow direction

Fig. 2 Ultrasonic waves of difference sensors R1 and R2

Table 1 Characteristics of ultrasonic transducers measured by an impedance analyzer

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Resonance frequency (kHz)		Quality factor	
	A	B	A	B
10	254.09	248.68	52.55	23.05
25	252.91	247.92	50.73	22.45
40	252.06	247.05	43.75	20.26

i は、伝播時間計測の起点、終点となる波の数を表す。

伝播時間差 $\Delta\tau$ は、(1), (2)式より、

$$\Delta\tau = \tau_d - \tau_u = \tau_{dt} - \tau_{ut} + 2i \left(\frac{1}{f_1(T)} - \frac{1}{f_2(T)} \right) \quad (4)$$

となる。本研究では、4章で述べるように伝播時間差 $\Delta\tau$ を計測して流量を求める。温度の影響を見るために、(4)式を温度 T で微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial T}(\Delta\tau) &= \frac{\partial \tau_{dt}}{\partial T} - \frac{\partial \tau_{ut}}{\partial T} + 2i \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{f_1(T)} - \frac{1}{f_2(T)} \right) \\ &\approx 2i \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{f_1(T)} - \frac{1}{f_2(T)} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。この(5)式は、センサ共振周波数の温度特性に個体差がある場合、 $\left(\frac{1}{f_1(T)} - \frac{1}{f_2(T)} \right)$ の項が0とはならないため、温度変化によってゼロ点のドリフトが生じることを示し、わずか1度の温度変化でも微小流量を測る上で無視できない程度のゼロ点のドリフトを見積もることができる。

Table 1に超音波センサ共振周波数と振動系の共振の鋭さを表す Q 値の温度特性測定結果の一例を示す。センサの個体差によって、この実験からゼロ点のドリフトが生じていることがわかる。なお、 Q 値の特性変化についても、受信波形の位相に影響を与えるので、ゼロ点のドリフトの原因となる。

また、このほかの要因として受信超音波波形のフィルタ回路が挙げられる。S/N比を向上させるため、共振周波数以外の周波数成分をバンドパスフィルタで減衰させているが、このフィルタの通過帯域特性の差によっても、ゼロ点のドリフトをもたらすので注意しなければならない。

以上の問題を解決するためには、センサの個体差をその都度検査する方法や、超音波発生方法に共振を利用せず非共振の利用、つまり温度特性を持たないセンサの利用などが考えられるが、いずれも実用性に乏しい。そのため、本研究では、流路をループさせて一つの円板状超音波受信センサ部を二回通過させ、二度超音波を検出する従来になかったセンサ配置とし、この検出された二つの超音波波形から超音波群速度を求める方法を利用することによって、受信センサの個体差の問題を解決することとした。この方法の場合、受信センサに温度依存性があっても、同一のセンサで超音波を受信するため、個体差の問題は解決できる。また、フィルタ回路についても共有することにより、温度変化の影響をほぼ除去でき、ゼロ点を安定させることができ、微小流量の計測が可能となる。

3. 実験装置及び実験方法

3.1 実験装置

液体用超音波微小流量計の校正を行うために、ピストン

ループ方式の基準流量設定装置を使用した。実験装置は、この基準流量設定装置とテスト部に置かれる超音波流量計とにより構成される。Fig. 3 にその装置概略図を示す。基準流量設定装置では体積流量 (Q_v) が 0.2 mL/min~16 mL/min の範囲で流れを、左右に取り付けられたピストンロッド (直径 6 mm $\pm$ 5 μ m, ストローク 300 mm) をサーボモーターで駆動させることにより、発生させることができる。往復で、効率よく測定ができるように 2 本のロッドを取り付けている。

試作した超音波流量計の概略図を Fig. 4 に示す。超音波流量計は、一本の細管、二つの超音波送信センサ Tu, Td, 一つの受信センサ R および信号処理装置から構成される。超音波送信センサ Tu, Td はそれぞれ流路が一度、受信センサ R

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

Fig. 4 Schematic diagram of the ultrasonic flowmeter and signal processing system

は流路がループして二度通過する構造となっている。センサの取り付けは、管路との音響インピーダンスの差異による透過損失を最小限とするため接着剤を管表面に十分薄く塗布し、固定した。ループの長さは 250 mm と 500 mm, Tu-R 間, R-Td 間の距離はそれぞれ 100 mm とした。使用した超音波送受信センサは共振周波数 250 kHz (直径 7.3 mm, 厚さ 1 mm) の径方向振動子で、送信パルスには信号発生器を使用した。測定部管路は内径 0.53 mm, 外径 0.66 mm のガラス管路を使用した。超音波流量計測定部の流路は、管壁を伝播する超音波パルスが流量計測に影響を及ぼさない程度まで減衰させるため、ダンピングが施された構造となっている。

3.2 実験方法

測定を行った流量範囲は、0.2 mL/min~1.6 mL/min である。流量は、基準流量設定装置で発生させ、定常状態で測定を行った。基準流量は、あらかじめ校正されたサーボモーターの回転数によって制御した。使用した液体は純水で、実験室内の温度は 22 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C に制御されている。

超音波流量計測は、リレーによって上流側送信センサと下流側送信センサを切り替え、交互に超音波パルスを発信し、受信センサで超音波パルス波形を検出して行った。超音波パルス波形は、増幅して、バンドパスフィルタを用いて信号処理した後、A/D 変換し、計算機に取り込んで解析を行った。また、超音波流量計の上、下流部に温度、圧力センサを取り付けて実験の状態を監視した。

4. 超音波流量計の流量測定方法

超音波流量計の流量測定方法は、流れによって生じる超音波伝播時間の変化量を測定する時間差法⁴⁾を採用した。この超音波伝播時間を求める際、多くの超音波流量計で採用されているゼロクロス時間計測法は、ノイズの重畳によってゼロクロス点が変動するためノイズに弱く、超音波センサを送受信兼用とするため超音波パルス到達時間が数波長遅れた点で計測され正確でないため、微小流量計測に適していない。また、シングア라운드法は管路内における超音波パルスが長時間残響しており、計測中にその影響を受けるため微小流量計測には適さない。

以上の理由から、本研究では、微小流量計測に適している相関法⁶⁾を採用した。細管内を伝播する超音波は、管壁の摩擦により、大きく減衰する。超音波の伝播時間の計測法に相関法を採用することにより、微弱な信号でも、多数のサンプリングデータを演算に用いるため、高精度に計測することが可能である。本研究で考案した超音波流量計は、受信波形を二度検出し、その波形と波形の相対比較をすることにより、正確な伝播時間を計測することが可能である。

相関法による超音波の伝播時間計測方法は、まず上流側送信センサ Tu から超音波を発射し、受信センサ R で 2 回検出した超音波信号 $X(t)$, $Y(t)$ を A/D サンプリングし、この二つの相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ を (6) 式から求める。

$$Rxy(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)Y(t+\tau)dt \quad (6)$$

この相互相関関数の最大値から流れに沿う方向の伝播時間 τ_u を求める。同様に下流側送信センサ Td から超音波パルスを発射し、流れに逆らう方向の伝播時間 τ_d を求める。 τ_u, τ_d は流れにより差が生じるため、ループの長さを L とすると、超音波流量計で測定される流速 V_p は(7)式で表される。

$$V_p = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{\tau_u} - \frac{1}{\tau_d} \right) = \frac{L}{2} \left(\frac{\Delta\tau}{\tau_u \tau_d} \right) \quad (\Delta\tau = \tau_d - \tau_u) \quad (7)$$

伝播時間から求まる流速 V_p は、超音波パルス伝播経路上の平均流速である。したがって、体積流量 Q_p を求めるためには流路の断面平均流速 V_r を求める必要がある。断面平均流速 V_r と超音波経路上の平均流速 V_p を関係づける係数を速度分布補正係数 k 、管内の断面積を A とすると、体積流量 Q_p は(8)式で表される。

$$Q_p = AkV_p = \frac{AkL}{2} \left(\frac{\Delta\tau}{\tau_u \tau_d} \right) \quad \left(k = \frac{V_r}{V_p} \right) \quad (8)$$

測定可能な下限の流量は τ_d と τ_u との差 $\Delta\tau$ と時間計測分解能 τ_{res} によって決まる。(9)式に流量の測定分解能 Q_{pres} を示す。

$$Q_{pres} = \frac{AkL}{2} \left(\frac{2\tau_{res}}{\tau_u \tau_d} \right) \quad (9)$$

$$(\tau_u = \tau_0 - \tau_{res}, \tau_d = \tau_0 + \tau_{res})$$

ここで、 τ_0 は、流れがないときの超音波伝播時間であり、 τ_{res} は時間計測分解能である。

実験を行うことにより得られる V_p と基準体積流量 Q_r から求まる V_r から速度分布補正係数 k を求める。流量特性は、 k の振舞いで議論する。

5. 実験結果及び考察

5.1 基準流量設定装置の校正

試作した超音波流量計の校正を行うためには、前もって基準流量設定装置の校正を行い、その装置の不確かさを明らかにしておく必要がある。そこで、基準流量設定装置の校正結果とその不確かさについて述べる。なお、実際の超音波流量測定における基準流量の決定には、本結果で得た流量とモーター回転数の関係を用いた。

測定を行った流量は 0.2~1.6 mL/min で、分解能 10^{-5} g の電子天秤を用い、ピストンロッドが 100 mm 移動したときの、ビーカーに流入する水の質量、時間、温度、圧力を測定した。なお、この電子天秤は標準不確かさ 0.05 mg の 100 g 分銅で校正した。流路は、精密電子天秤、ビーカーに接触しないように取り付けられている。蒸発による質量変化を最小限に抑えるため、ビーカーをカバーで覆い、十分安定してから測定した。よって、測定中の蒸発は、無視しうるものとした。また、気泡が混入すると、測定が不安定となるが、本測定では、十分に脱気を行ったので、その影響も無視した。

測定は、定常流れについて、取水質量を Δw 、測定時間を Δt 、密度を ρ とすると、体積流量 Q_r は次式で表される。

$$Q_r = \frac{\Delta w}{\rho \Delta t} \quad (10)$$

(10)式の Q_r に対する相対合成標準不確かさは(11)式で表される⁷⁾。

$$\left(\frac{u_c(Q_r)}{Q_r} \right)^2 = \left(\frac{u(\Delta w)}{\Delta w} \right)^2 + \left(\frac{u(\Delta t)}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{u(\rho)}{\rho} \right)^2 \quad (11)$$

ここで、 $u_c(Q_r)$ は、 Q_r の合成標準不確かさを表し、 u は、各不確かさ要素の標準不確かさを表す。

主な不確かさの要因は、(11)式右辺第一項の取水質量 Δw と(11)式右辺第二項の計測時間 Δt の測定値であり、ピストンロッドの位置計測のタイムラグ(パソコンと測定器の通信にかかるタイムラグ)によって、電子天秤や時間計測分解能よりも測定値のばらつきは大きくなる。このため、ピストンロッドの移動速度が大きくなるに従って、すなわち流量が大きくなると、流入質量と流入時間の相対標準不確かさも大きくなる傾向にある。ピストンロッドが 100 mm 移動したときに流入する質量は、約 2.85 g で、その相対標準不確かさは、0.05%~0.1%である。また、流入時間は、0.2 mL/min で約 850 s、1.6 mL/min で約 100 s で、その相対標準不確かさは、0.01%~0.06%である。

以上をまとめた測定結果を Table 2, 3 に示す。それぞれ、二種類のピストンを使用した結果を示し、各モータ回転数における(10)式から求めた流量と、その流量に対する(11)式から求めた相対合成標準不確かさを示す。本装置の相対合成標準不確かさは、流量によって変わるが 0.04~0.13%の範囲に入ると見積もることができるので、試作した超音波流量計を校正するためには十分であると判断された。なお、本装置の再現性は、サーボモーターの回転数の再現性にも依存するが、日時を変えて、各回転数におけるピストンロッドの移動速度計測を行ったところ、そのばらつきは 0.01%よりも小さく、非常に良い再現性を持っていることがわかった。

5.2 超音波信号処理系の評価

超音波信号処理系のゼロ点の安定性と測定分解能の評価を行うため、流れのない状態で、超音波の伝播時間測定を行っ

Table 2 Flow rates and their relative combined standard uncertainties by the piston rod 1 at various revolution speeds of a servo motor

Revolution speed of servo motor (rpm)	Flow rate (mL/min)	Relative combined standard uncertainty (%)
32	0.200	0.04
64	0.403	0.07
112	0.708	0.07
160	1.012	0.07
256	1.623	0.10

Table 3 Flow rates and their relative combined standard uncertainties by the piston rod 2 at various revolution speeds of a servo motor

Revolution speed of servo motor (rpm)	Flow rate (mL/min)	Relative combined standard uncertainty (%)
32	0.200	0.05
64	0.403	0.03
112	0.708	0.07
160	1.013	0.12
256	1.621	0.13

た、Fig. 5 に試作した超音波流量計の受信波形の一例を示す。図中の第一波群 $X(t)$ と第二波群 $Y(t)$ から、ゼロクロス法と相関法を使用して、伝播時間を求めた。なお、同図でさらに遅れて出現する波形は、端面からの反射波である。図から明らかに、二度目に検出される超音波波形 $Y(t)$ は、大きく減衰している。波長と管の内径がほぼ等しい場合、音波に分散が生じるという報告⁹⁾があるが、本研究で使用した超音波の波長は、約 5 mm で内径 0.53 mm に比べると十分に大きいので、液体中を伝播する超音波のモードは平面波のみで、分散の影響もないと推測される。したがって、波形の減衰は、管壁の摩擦が主要因であると推測される。

超音波波形の A/D 変換はサンプリング周波数 100 MHz、電圧分解能 8 ビットで行い、不規則ノイズを抑えるため、15 回の同期加算平均を行った。波形取得にかかる時間によって、 τ_0 と τ_a の計測は同時に行われないが、その間の温度などの状態変化は非常に小さく、その影響は無視できることを実験を行い確認した。

ゼロクロス法による超音波伝播時間は、受信波形 $X(t)$ と $Y(t)$ のゼロクロス前後のサンプリングデータを線形回帰してそれぞれのゼロクロス時間を求め、その差から求めた。相関法による超音波伝播時間は、まず、サンプリング間隔の分解能で $X(t)$ と $Y(t)$ の時間差を求め、それよりも細かな時間差を相互相関関数を内挿演算して求めた。相関関数のピーク点の時間は 2 次の多項式から推定した。相関演算に用いるサンプリングデータの抽出区間は、温度変化や流れによって音速が変化し伝播時間が変化しても、影響を受けないようなアルゴリズムとした。伝播時間の分解能は上述の演算により高まるが、実質的な測定分解能 τ_{res} は、測定した時間差 $\Delta\tau$ の標準偏差で評価した。

測定結果の一例を Fig. 6 に示す。約 1 時間の計測中でもゼロ点が安定している。この測定中に変化した温度は、22.0~22.5°C である。同一 (100 MHz) のサンプリングデータを間引いて、25 MHz、12.5 MHz として同様に演算を行い、各サンプリング周波数における $\Delta\tau$ の標準偏差を Table 4 にまとめた。この結果より、相関法では、サンプリング間隔の 1/80 程度の時間分解能が実質的に可能であることがわかる。どのサンプリング周波数でも、ゼロクロス法は相関法の倍程度のばらつきで、サンプリング周波数をこれ以下にすると、

Fig. 5 Ultrasonic signals detected by the ultrasonic flowmeter

Fig. 6 Comparison of propagation time differences obtained by the zero cross and the cross correlation methods

Table 4 Measurement resolutions of the zero cross and the cross correlation methods

Sampling frequency (MHz)	Resolution	
	Zero cross (ns)	Cross correlation (ns)
100	1.29	0.60
25	1.58	0.65
12.5	1.70	0.96

急激にばらつきが大きくなる。したがって、12.5 MHz 程度までが実用的なサンプリング周波数で、時間差 $\Delta\tau$ に対する測定分解能 τ_{res} との関係から、相関法を使うことで、ゼロクロス法を使う場合の計測可能微小流量の 1/2 を計測することが可能であるといえる。なお、ゼロクロス法の採用は電圧計測のゼロ点変化(電圧のオフセット変化)の影響を受け、流量測定におけるゼロ点のドリフトの要因の一つとなる。これは、ゼロクロス時間は電圧の 0 V を基準として求めているためである。これに対し、相関法は電圧の極大値を基準として求めるため、電圧のオフセット変化の影響をほとんど受けないという利点がある。

このほか、超音波センサの取り付け構造と超音波の伝播方向から考えると、受音面は、円板状超音波センサ流路取り付け部の幅 1 mm、直径 0.66 mm (細管流路の外径) の円柱の側面と見なすことができる。この受音面は、本実験で使用した超音波の波長 5 mm に比べて受音面幅の割合が大きいが、超音波周波数の 1/4,000 以下の伝播時間測定値の標準偏差を達成していることから、安定な測定が可能であると考えられる。

5.3 試作した超音波流量計の校正結果

試作した超音波流量計は、気温等、使用環境などの影響を受けると思われ、計測の再現性を調べておかなければならない。超音波の伝播時間計測方法は、相関法を用い、超音波波形のサンプリング周波数は 100 MHz、25 MHz、12.5 MHz とした。測定結果を Fig. 7, 8, 9 (100, 25, 12.5 MHz, ループの長さ 500 mm), Fig. 10 (100 MHz, ループの長さ 250 mm) に示す。各プロットは 50 回の平均値で、流量範囲は 0.2 mL/min から 1.6 mL/min である。なお、0.2 mL/min の流量は、本研究で試作した超音波流量計では、約 10 ns の時間差 $\Delta\tau$ が生じる。図中の実線は、(12) 式から求めた速度分布補正係数 k の推定範囲 k_{err} を示す。

Fig. 7 Reproducibility of flow rate measurements at sampling frequency of 100 MHz. A loop length of an ultrasonic flowmeter is 500 mm

Fig. 8 Reproducibility of flow rate measurements at sampling frequency of 25 MHz. A loop length of an ultrasonic flowmeter is 500 mm

Fig. 9 Reproducibility of flow rate measurements at sampling frequency of 12.5 MHz. A loop length of an ultrasonic flowmeter is 500 mm

Fig. 10 Reproducibility of flow rate measurements at sampling frequency of 100 MHz. A loop length of an ultrasonic flowmeter is 250 mm

$$k_{err} = \frac{V_r \pm 2D}{V_r} \left(D = \sqrt{\frac{\sigma_0^2}{n_0} + \frac{\sigma_v^2}{n_v}} \right) \quad (12)$$

ここで n は平均回数, σ は超音波流量計の流速測定値から求めた標準偏差である. 添え字 0 は流速 0 のときの値を意味し, 添え字 v は流速 v のときの値である.

測定結果は, 各サンプリング周波数で, (12) 式の推定範囲内となり, すなわち, ゼロ点のドリフトが無視できるほど小さいことを意味し, 0.2 mL/min 以上で安定した微小流量計測が可能であることを示している.

また, 基準の流量と超音波流量計で測定される流量は, ループの長さ 250 mm と 500 mm のどちらにおいても, ほぼ同じ ($k \approx 1$) 結果となった. これらの結果は, 伝わる波の伝播モードが平面波であるために, 断面の流速分布の影響を受け, 検出される流速が断面平均流速であることを示していると解釈できる. ループの長さが短くなると, 偏流の影響を受け, k 値の流量特性が変化することが考えられるが, 実用的なループ長さの(実験を行った)範囲では, その影響は小さいものと考えられる. また実験を行ったレイノルズ数の範囲は約 8~60 で, 流れの遷移の影響も受けないと考えられる.

6. まとめ

本研究は, 小型の円板状超音波振動子を内径 0.53 mm の細管内を流れる液体流量計測に利用し, 試作した超音波流量計を用いて, 最も重要な課題であるゼロ点の不安定要因および測定分解能について実験的に調べるとともに, その解決策を考案することにより, 計測可能な流量の下限を求め, 所望する超音波流量計の実現可能性を調べることを目的として行われた.

超音波流量計を校正するため, 微小な基準流量を発生させる基準流量設定装置を製作し, この装置による基準流量を電子天秤を用いた衡量法で校正した. 超音波流量計の測定可能な下限流量は, ゼロ点の安定性と超音波の伝播時間分解能によって決まるため, 受信波形を相関法とゼロクロス法によって信号処理し, そのゼロ点の安定性と測定分解能を, 比較, 評価した. 試作した超音波流量計の再現性についても調べた. 実験結果より, 次の結論を得た.

(1) 一つの円板状超音波受信センサに二度流路をループさせて通し, 二度超音波を検出する従来にないセンサ配置とし, この検出された二つの超音波波形から超音波群速度を求める方式を採用することによって, 受信センサの個体差の問題を解決した. また, フィルタ回路についても共有することによって, 温度変化の影響をほぼ除去できた.

(2) 超音波信号処理のゼロ点の安定性と測定分解能の評価を, サンプリング周波数を変えて, ゼロクロス法と相関法によって行った. その結果, 長時間の計測でもゼロ点が安定し, 相関法を用いることで, ゼロクロス法により得られる流量の 1/2 の流量計測が可能であることが示され, 実用的なサンプリング周波数 12.5 MHz でも, 高い時間分解能(サンプリング周波数の 1/80 程度)を達成することが可能であることが示

された。

(3) 試作した超音波流量計の計測の再現性は、速度分布補正係数 k が測定値の標準偏差から推定した範囲内にほぼ入ることから確認され、0.2 mL/min までの安定した微小流量計測が可能であることが示された。

(4) 従来、超音波流量計ではゼロ点の不安定性のため困難であった微小な流量域においても、試作した超音波流量計を用いることにより、安定した流量計測が可能であり、実用に十分供せることが実験的に示された。

参考文献

- 1) A. Worch: Signal processing for an ultrasonic cross correlation flowmeter, proceedings of IMEKO, TC-9/9.3.4(1999)
- 2) B. Nath and W. Lober: High sample rate ultrasonic gas flow meter for pulsating gas flow, proceedings of IMEKO, TC-9/9.3.5(1999)
- 3) T. Rettich and G. Poppen: Ultrasonic flow measurement in turbulent pipe flow using a correlation technique, Fifth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, 167/170(1997)
- 4) 河田, 小宮, 山崎: 流量計測ハンドブック, 日刊工業新聞社, 243/265(1979)
- 5) 中村, 宮本, 小林: 配水管内超音波通信, 超音波 TECHNO 2, 44/47(1998)
- 6) 南: 科学計測のための波形データ処理, CQ 出版社, 111/121(1994)
- 7) 飯塚: 計測における不確かさの表現ガイド, 日本規格協会(1996)
- 8) 実吉, 菊池, 能本: 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 112/116(1960)

[著者紹介]

石川 博 朗

1998 年筑波大学理工学研究科物理工学専攻修了。現在、同大学工学研究科在学。94 年(株)カイジョー入社、現在に至る。超音波流量計開発の研究に従事。日本混相流学会の会員。

高 本 正 樹 (正会員)

1986 年ロンドン大学インペリアルカレッジ Ph.D コース修了。75 年通商産業省工業技術院計量研究所入所、現在、同所力学部流体計測研究室長。流量・流速の標準と計測技術の研究に従事。日本機械学会、日本流体力学学会などの会員(工学博士)。

清 水 和 義 (正会員)

1986 年明星大学理工学部電気工学科卒業。同年(株)カイジョー入社、超音波流量計の設計・開発に従事。93 年から 95 年の 2 年間、通商産業省工業技術院計量研究所力学部流体計測研究室へ派遣。現在、計測制御システム事業部工業計測技術 Gr 開発チームのチームマネージャー。

文 字 秀 明

1989 年筑波大学大学院博士課程工学研究科構造工学専攻修了。同年筑波大学助手(構造工学系)、92 年同大学講師(構造工学系)、現在に至る。液体金属 HMD 発電装置内の二相流部における損失のメカニズム分散混相流の流動特性に関する研究に従事。

松 井 剛 一 (正会員)

1969 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程退学。同年大阪大学基礎工学部助手、現在、筑波大学機能工学系教授。気液二相流、分散混相流の流動制御、熱流体の可視化画像処理計測などの研究に従事。日本機械学会、日本原子力学会などの会員(工学博士)。