高速応答性を有する気体用層流型流量計の特性解析†

船 木 達 也*・川 嶋 健 嗣*・香 川 利 春*

Characteristic Analysis of Laminar Flow Meter for Gases with High Speed Response†

Tatsuya FUNAKI*, Kenji KAWASHIMA* and Toshiharu KAGAWA*

The unsteady flow rate measurement of gases is very important in various industrial fields. In this paper, we examined theoretically and experimentally the static and dynamic characteristics of a laminar flow meter for gases. We confirmed the flow meter can measure oscillatory flow up to 50[Hz] and the laminar flow meter has phase-lead characteristic theoretically and experimentally. The laminar flow meter with high speed response which is calibrated dynamically can be used for precise pressure control circuits.

Key Words: flow measurement, oscillatory flow, laminar flow meter, dynamic characteristics

1. 緒 言

気体の流量計測技術は、非常に多様な測定原理を活用してさまざまな分野で利用されている。最近では半導体製造装置や燃料電池の流量管理、エンジンや人工呼吸器の流量制御などにおいて、定常のみならず、非定常流量計測が非常に重要となっている。そこで、近年の MEMS 技術を用いた熱式流量センサが数多く開発され、小型化の利点を活かし、非定常流量計測への適用が行なわれている。また、同じく MEMS 技術を用いて製作された静電容量式をはじめとする高精度、高分解能の差圧センサを利用した差圧式流量計も用いられている。

しかしながら、気体の密度は温度と圧力の関数となることから、非定常流量計測はきわめて困難であり、気体用流量計の動特性を試験する方法は確立されておらず ISO などでの規定もなされていない。よって、市販の流量計の応答性は流量をステップ的に変化させたときの応答速度を計測するのみで、ほとんどが 10[Hz] 以下の応答速度である。しかし、半導体技術の高度化・集積化に伴い、半導体チップの着座確認や半導体露光装置用の空気ばね式除振台の流量管理などでは、小流量域において、50[Hz] 程度の高速応答可能な流量計が必要となっている。

一般に微小および小流量計測を行なう際には、差圧式流量計の中でも層流型流量計がよく用いられる。この流量計は、絞り流量計の代表例であるオリフィス流量計とは異なり、生

じる圧力差と測定流量との間に線形関係を有している。このため、広いレンジアビリティの確保が容易で、かつ動特性が良いことが知られている¹⁾。しかしながら、実験による動特性検証はほとんど行なわれておらず、理論的な説明もウォーマスリー数²⁾による評価や管路内の速度分布解析³⁾に関しては多くの研究がなされているものの流量計測への展開はなされていない。

先行研究の一例として、C.R.Stone らによる研究⁴⁾などがあるが、理論式の導出は行なわれているものの、時々刻々の流量応答波形の提示はなされていない。また、内燃機関の間欠気流測定⁵⁾の研究もあるが、最大でも 30[Hz] 程度までの流れの評価しか行なわれていない。

一方、流量計の動特性を検証する手法には、著者らが提案している等温化圧力容器を用いた非定常流量発生装置⁶⁾がある。これを用いれば、標準不確かさ⁷⁾5%(F.S)で任意の振動流を発生可能であり、実際に 100[Hz] 程度までの動特性評価の有用性を確認している。

そこで本研究では、大気圧の乾燥空気を測定対象として、高速応答計測を実現すべく差圧を利用した層流型流量計に着目し、その特性を明らかにした上で設計製作を行ない、高速応答の実現を目的とする。特に、動特性に関しては非定常流量発生装置を用いた検証と、ナビエ・ストークス方程式の非定常項の検討を行ない、理論と実験の両面からの結果を踏まえて、層流型流量計の動特性を評価する。

記号表

b	: 振幅比	[—]
d	: 細管直径	[m]
D	: 流路直径	[m]

† SICE Annual Conference 2003 in Fukui で発表 (2003・8)

* 東京工業大学 精密工学研究所

* Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence Laboratory

(Received April 6, 2004)

(Revised August 5, 2004)

f	: 周波数	[Hz]
L	: 細管長	[m]
L_i	: 助走距離	[m]
n	: 細管本数	[-]
P	: 圧力	[Pa]
Q	: 標準状態体積流量	[m ³ /s]
Q_a	: 振動流の振幅体積流量 (標準状態)	[m ³ /s]
Q_m	: 振動流の平均体積流量 (標準状態)	[m ³ /s]
Q_s	: 細管1本あたりの体積流量 (標準状態)	[m ³ /s]
r	: 半径	[m]
R	: 細管半径	[m]
Re	: レイノルズ数	[-]
t	: 時間	[s]
u	: 速度	[m/s]
u_m	: 平均速度	[m/s]
u_a	: 振幅速度	[m/s]
W_o	: ウォーマスリー数 ($= d\sqrt{\omega/\nu}$)	[-]
ΔP	: 差圧	[Pa]
ΔP_1	: ハーゲン・ポアズイユ流れに伴う圧力損失	[Pa]
ΔP_2	: ΔP_1 以外に生じる圧力損失	[Pa]
ξ	: 損失係数	[-]
ρ	: 空気の密度	[kg/m ³]
μ	: 粘度	[N·s/m ²]
ν	: 動粘度	[m ² /s]
ω	: 角振動数	[rad/s]

2. 層流型流量計

層流型流量計は多数の細管などを挿入して層流エレメントを構成し、その前後圧力差から流量を計測するものである。今、円管内の流動は、円筒座標系での非圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式である (1) 式で記述できる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (1)$$

現在までに、円管内の非定常流動応答解析の研究報告例としては、円管内助走区間における振動流の解析⁸⁾、管路の過渡応答解析^{9), 10)}や非定常流量計測への適用¹¹⁾など数多くある。しかし、厳密解の導出が困難である点や適用条件などに問題が残っている。したがって、より簡便で、かつ妥当な動特性評価が可能ならば、流量計測技術への貢献度は高いと考えられる。そこで、流れは定常、かつ (1) 式の第2項である対流項は微小であるので無視し、さらに非定常な変化がないとして非定常項も無視する。得られた式を半径方向に積分し、円管における流れが十分発達した層流であるならば、円管内の速度分布は次式で表わすことができる。

$$u = -\frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} \left(\frac{d^2}{4} - r^2 \right) \quad (2)$$

このような円管内の流れはハーゲン・ポアズイユ流れ¹¹⁾と呼ばれ、円管内径 d 、長さ L の細管一本を通過する体積流量 Q_s は、(2) 式を積分して次式となる。

$$Q_s = -\frac{\pi d^4}{128\mu} \frac{dP}{dx} = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128\mu L} \quad (3)$$

なお、層流型流量計全体では、 n 本の細管から構成されているので (3) 式を n 倍することで体積流量が求められる。

以上より、層流型流量計は体積流量が圧力差に比例する特性を有している。なお、大気圧下の空気の密度を ρ_a 、大気圧を P_a 、層流型流量計が設置されるライン圧を P_c とすれば、質量流量 G は次式で求めることができる。

$$G = \rho_a \frac{P_c}{P_a} Q \quad (4)$$

3. 設 計

3.1 手順

今回製作した層流型流量計の設計方法についてまとめる。はじめに、測定対象を大気圧の乾燥空気とし、本流量計の測定最大流量を 16.7×10^{-4} [m³/s] とする。一方、動特性を考慮し、層流エレメントを構成する細管は外径 0.8[mm]、内径 0.6[mm] とした。このとき細管長に応じて、本流量計で生じる圧力差を調節できる。一般に、各種配管系に流量計を設置した場合、流量計自身による損失は極力小さくしたい。しかしながら、極端に損失を小さくしてしまうと、圧力差が測定器の分解能に埋もれてしまい正確な計測を実施できない。そこで、近年の半導体製造技術を応用して製作された微差圧センサを活用することを考え、その測定範囲から最大 400[Pa] とした。この結果、細管長は 50[mm] とした。

つぎに、層流型流量計の応答性能を評価するため、層流エレメントを構成する細管一本に着目し、その静特性および動特性を評価した。静特性では、ハーゲン・ポアズイユ流れで想定される以外の各圧力損失による影響を調べた。さらに動特性に関しては、振動流の応答特性を、ナビエ・ストークス方程式とウォーマスリー数の観点から検討し設計へ反映させた。

3.2 助走区間の影響

一般に層流型流量計は、測定流量と差圧との間に線形関係を有している。しかし厳密にはこの圧力損失以外にも存在する。今、マッハ数が 0.3 以下の領域で使用することを考えているため、流体の圧縮性はほぼ無視できる。流量計前後の圧力差 ΔP は、層流エレメントを構成している細管長 L にわたりハーゲン・ポアズイユ流れと仮定した場合の圧力降下 ΔP_1 と、エレメント入口・出口部における圧力降下および入口助走区間における損失などによる ΔP_2 との総和として表わされる。つまり、

$$\Delta P_1 = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho u^2}{2} \quad (5)$$

$$\Delta P_2 = \xi \frac{\rho u^2}{2} \quad (6)$$

となる。ここで、 ξ は損失係数を示す。また、層流の場合の管摩擦係数は、 $\lambda = 64/Re$ ¹¹⁾ で与えられるので、細管一本あたりの総圧力損失を整理すると、

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 32\mu \left(\frac{L}{d^2}\right)u + \xi \frac{\rho u^2}{2} \quad (7)$$

となる。しかしながら、前述したとおり、層流型流量計ではハーゲン・ポアズイユ流れを仮定した圧力損失以外に助走区間や入口出口での損失を考慮しなければならない。したがって、厳密な線形関係を構築できる範囲は、後者の圧力損失が前者の損失に対して相対的に小さい必要がある。そこで、 ΔP_1 と ΔP_2 との比を考えると、(5) 式と (6) 式および層流時の管摩擦係数を考慮すれば次式が成立する。

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{\xi}{64} \left(\frac{d}{L}\right) Re = \frac{\xi}{64} \frac{\rho u}{\mu} \left(\frac{d^2}{L}\right) \quad (8)$$

この (8) 式において、 ΔP_1 と ΔP_2 の比を小さくすることで、高い線形性を補償できる。本研究では、ハーゲン・ポアズイユ流れに伴う圧力損失以外の割合を 5% 以下とした。この結果、

$$\left| \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \right| \leq 0.05 \quad (9)$$

の条件を得る。ここで、層流状態における助走区間の損失係数は、一般に細管入出部がベルマウスならば $\xi \approx 2.3$ ¹¹⁾ であることを踏まえ、細管の直径 d とすると、必要な細管長 L は次式で求められる。

$$L \geq \frac{Re}{3.2} \xi d \quad (10)$$

本実験では試作した流量計の測定最大流量を 400 [Pa] で 16.7×10^{-4} [m³/s] と想定したので、細管内では最大 $Re = 121.8$ となり必要細管長は 52.5 [mm] と求められた。これは、先に設定した 50 [mm] の細管長では若干不足するもののほぼ問題ないことが確認できた。また、細管の助走区間距離¹¹⁾ は次式で表わされる。

$$L_i = 0.058 \times Re \times d \quad (11)$$

結果、助走距離は約 4.2 [mm] で細管長全体の約 8% に収まることがわかった。

3.3 非定常項の考察

本節では、層流型流量計における動特性への影響因子として非定常項に着目し検討した。はじめに、円筒座標系における非圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式について、影響の小さい対流項を無視して (1) 式を整理すると次式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (12)$$

つぎに、(8) 式を半径方向に積分し $r = 0$ で $\partial u / \partial r = 0$ の境界条件を用いて整理すると次式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{r}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{r}{2\nu} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (13)$$

この式を u と r の変数分離型として、 $r = R$ で $u = 0$ の境界条件を用いて積分し整理すると、円管内の流速 u は次式で表現できる。

$$u = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (r^2 - R^2) + \frac{1}{4\nu} \frac{\partial u}{\partial t} (r^2 - R^2) \quad (14)$$

さらに半径方向に積分し、体積流量 Q は次式となる。

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\pi R^4}{8\nu} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (15)$$

一般に、圧力勾配が生じた際に流動現象が確認されるため、理論的な解析では、初期条件として圧力を与えることが多い。しかしながら、本研究では等温化圧力容器を用いた非定常流量発生装置を用いて、層流型流量計の動特性評価を行なう観点から、発生流量もしくはその際の流速を与えた場合に、結果としてどのような圧力差を生じるかが問題となる。つまり、層流型流量計での測定値は圧力差であり、与えるものは流量である。そこで、(15) 式を圧力差に関して、整理すると次式となる。

$$\frac{\pi R^4}{8\mu} \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right) = Q - \frac{\pi R^4}{8\nu} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (16)$$

ここで、振動流 Q を $Q = Q_m + Q_a \sin(\omega t)$ として与えると、流速 u は流路断面全体均一であるとして、 $u = u_m \{1 + b \sin(\omega t)\}$ となる。ただし、 $b = u_a / u_m$ である。これを (16) 式に代入し、ウォーマスリー数 W_o ^{2), 4)} を用いて整理すると、

$$Q = \pi R^2 u_m \left\{ 1 + b \sqrt{1 + \frac{W_o^4}{1024}} \sin(\omega t + \phi) \right\} \quad (17)$$

と求まる。ここで、位相角は $\phi = \tan^{-1}(W_o^2/32)$ となる。また、このウォーマスリー数は周波数と動粘度の比を表す無次元数で、次式のように定義される。

$$W_o = 2R \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = d \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = d \sqrt{\frac{\rho \omega}{\mu}} \quad (18)$$

この結果、非定常流量発生装置からの振動流が層流型流量計を通過した場合、流量測定値は位相進みとなる。これは、一定の圧力勾配時に生じる流量の振幅が、高周波になるほど小さくなり、位相遅れとなること^{2)~4)}と視点が異なるだけの同一事象である。したがって、(17) 式より周波数が高くなると、流量ゲインは若干大きく、かつ位相進みとなる。

つぎに、ウォーマスリー数を用いた動特性の具体的な評価を試みる。その導出過程より、圧力勾配が与えられた場合における流量応答特性を示す指標がウォーマスリー数である。そこで本研究では、前述の留意事項を踏まえ検討を行なった。一般に、この W_o が 1 程度であれば、応答性能への影響はほとんどない^{2), 4)}。この場合、振動流の周波数は 7 [Hz] に相当する。また、30 [Hz] 程度の振動流に対しては、 $W_o = 2.1$ となり、ゲイン上昇や位相進みとなる。さらに、ゲインが $\sqrt{2}$ 倍で 45 [°] の位相進みとなるウォーマスリー数は約 2.5⁴⁾ となり、周波数では 40 [Hz] に相当する。言い換えれば、本流量計では 30 [Hz] 程度からゲインの上昇および位相進みの傾向を示すことが予想される。さらに、40 [Hz] 以上の振動流では追従性の補償が困難となる可能性がわかった。この結果より、層流型流量計はその動特性において、ウォーマスリー数の観点から約 40 [Hz] 程度の動特性を有しているという結論を得た。

3.4 仕様

以上を踏まえ、設計・製作した層流型流量計の概略図を Fig. 1 に示す。多数の細管を詰めた層流エレメント前後に導圧孔を設け、この二つの圧力差から流量を測定する。この

Fig. 1 Laminar flow meter

Fig. 2 Laminar elements

層流エレメント (Fig. 2 参照) の直径は 28[mm], 細管長は 50[mm] とした. また細管は, 外径 0.8[mm], 内径 0.6[mm] のものを用い, 入口と出口部分はベルマウス加工を施し余分な損失を生じないようにした. 本実験で使用した層流形流量計の断面では, 理想的には 1225 本分の細管を詰めることができるが, 隙間および詰め方の関係上, 実際は約 1100 本の細管を詰めた状態となった. なお, 層流エレメントの上流側には拡大部, 下流側には縮小部を設け, その上流および下流側には #100 の金網メッシュを配した. また, 導圧孔から差圧センサまでの距離は極力短くするようにした.

4. 実験手法

4.1 静特性

今回製作した層流形流量計の静特性測定に用いた実験装置を Fig. 3 に示す. 作動流体は大気圧の乾燥空気とした. 圧縮空気供給源より減圧弁を通して任意の圧力に減圧し, 速度調節弁へと供給して供試流量計への流量を調節した. 速度調節弁の下流側には, 供試流量計を配し, さらに下流側には基準流量計として, $3.3 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s}]$ 以上の流量域では標準不確かさ 0.3%(F.S) の乾式ガスメータを, それ以下の流量域では標準不確かさ 0.15%(F.S) の湿式ガスメータを用いた. また供試流量計で生じた圧力差は, 最大測定範囲 500[Pa], 標準不確かさ 1%(F.S) の差圧伝送器を用いた.

4.2 動特性

動特性の検証には, Fig. 4 に示す等温化压力容器を用いた非定常流量発生装置⁶⁾を使用した. この装置では, 等温化压力容器内の圧力測定結果を用い, 所定の圧力変動となるようにサーボ弁の開度を調節する制御信号を PC による計算で求めてから与え, 標準不確かさ 5%(F.S) で流量および周波数

Fig. 3 Experimental apparatus for static characteristic measurement

Fig. 4 Experimental apparatus for dynamic characteristic measurement

を調整した任意の振動流を発生可能なことを確認している. 作動流体は, 大気圧の乾燥空気とし, 発生振動流は, 設計した層流型流量計の測定範囲の中央である平均流量 $8.3 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s}]$, 振幅流量 $5.0 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s}]$, 振幅比 $b = 0.6$ とした. なお, 発生装置の制御ならびに測定値のデータ取得では, 1[Hz] の振動流では 1[ms], 5[Hz] から 20[Hz] では 0.5[ms], 30[Hz] 以上では 0.2[ms] のサンプリング時間とした. また, 本流量計の測定値は圧力差であることから, 静特性の結果をもとに流量換算を行なった. さらに, 等温化压力容器を用いた非定常流量発生装置は, 圧力センサの分解能から, 発生させる振動流の周波数に応じて容器の大きさを変更した⁶⁾. 具体的には, 10[Hz] 以下では $1.413 \times 10^{-3} \text{ [m}^3]$, 以降 40[Hz] までは $0.466 \times 10^{-3} \text{ [m}^3]$, 60[Hz] までは $0.35 \times 10^{-3} \text{ [m}^3]$, 100[Hz] までは $0.186 \times 10^{-3} \text{ [m}^3]$ とし, 高周波数なほど小さい等温化压力容器を使用した. なお差圧測定には, センサ自体の動特性を考慮して, 固有振動数 1.7[kHz], 標準不確かさ 0.5%(F.S) のひずみゲージ式差圧変換器 2 台を, 高压側, 低压側のそれぞれに配置し, 両方とも低压側を大気解放としたゲージ圧計として利用した. センサからの出力信号は, パソコン内で処理し, 圧力差を算出の上, 流量換算を行なった.

5. 実験結果

5.1 静特性

静特性の実験結果を Fig. 5 に示す. この図より, 測定した圧力差 400[Pa] まで本流量計が高い線形性を有していることが確認できた. また, 図中の実線は (3) 式より細管本数を考慮して得られた計算結果を示しているが, 本流量計が理論式とよく一致していることもわかる. つぎに, 本流量計の線形性を評価するために, ハーゲン・ポアズイユ流れで

Fig. 5 Static characteristic of tested laminar flow meter

Fig. 6 Linearity of tested laminar flow meter

の圧力損失 ΔP_1 と全圧力損失 $\Delta P (= \Delta P_1 + \Delta P_2)$ の比を求め Fig. 6 に示す。この結果、今回想定した流量測定範囲内 ($Re \cdot d / L$ が 1.46 以下) において、(9) 式の条件以内に入っていることが確認できた。なお、非常に流量が少ない場合において、想定した圧力損失よりも少ない傾向を示した。これは使用した差圧伝送器自体の測定誤差や流路構造および流れの状態による影響などが考えられる。以上の結果から、本流量計がレンジアビリティは 20:1 を確保できていることを確認した。参考までに細管長 20[mm] の測定結果も表記したが、この場合、助走区間距離が細管長全体に対して約 40% を占有し、高い線形性を広範囲で確保することが困難であることもわかった。

5.2 動特性

動特性試験結果をまとめる。発生流量は平均流量 8.3×10^{-4} [m³/s]、振幅流量 5.0×10^{-4} [m³/s] とし、周波数 10[Hz] の振動流の測定結果を Fig. 7 に示す。なお、図中の破線は非定常流量発生装置より発生した基準流量を示し、実線が層流型流量計による測定結果を示している。この結果、本層流型流量計は基準流量と非常に良い一致が見られ、十分精度よく測定可能であることが確認できた。つぎに、周波数 50[Hz] の測定結果を Fig. 8 に、80[Hz] の測定結果を Fig. 9 に示す。この結果、50[Hz] まで流量ゲインに違いは確認できなかった。位相に関しては、50[Hz] で 15[°] の位相進みとなっ

Fig. 7 Experimental results of oscillatory flow at 10[Hz]

Fig. 8 Experimental results of oscillatory flow at 50[Hz]

Fig. 9 Experimental results of oscillatory flow at 80[Hz]

た。さらに周波数を高くすると、基準流量よりも測定結果は大きな流量ゲインを示した。また位相は、徐々に進みの度合いを強める結果となった。そのほか、Fig. 9 の 80[Hz] の振動流では、基準流量に対して測定結果の流量波形谷部で測定値がより小さくなる結果を確認した。この要因として、高周波時における流体の慣性の影響ではないかと考えられる。

以上の結果をまとめ、本研究で製作した層流型流量計の周波数応答特性をボード線図として Fig. 10 に示す。図中の ○ 印は測定結果、実線は (17) 式より算出した理論値を示す。この結果より、層流型流量計はナビエ・ストークス方程式の解析結果と同じく位相進みとなることを確認できた。また、

Fig. 10 Bode diagram of laminar flow meter

50[Hz] までの振動流の測定結果と理論解析結果はほぼ一致していることもわかった。しかしながら、70[Hz] 以上では、理論値と比較してゲインが極端に大きくなる傾向となった。この要因としては、高周波域での圧力センサの動特性の信頼性が補償されないことや、理論展開において平均流速を与えた誤差および流体の慣性による影響などが考えられる。なお、位相については理論値とほぼ一致することを確認した。

6. 結 言

本論文では、高速応答性を有する層流型流量計の設計・製作を行ない、その動特性評価を実験および理論の両面から明らかにした。まず、静特性で高い線形性を補償し、動特性試験結果から、本層流型流量計は 50[Hz] までの振動流を十分測定でき、半導体チップの着座確認などへ有効であることを確認した。また、ナビエ・ストークス方程式を用いた解析とウォーマスリー数による検討から、周波数が上昇するにつれてゲインが大きくなり、位相進みとなることも確認した。今後の課題としては、加圧下での層流型流量計の特性を明らかにする点や高周波域のゲインにおける理論と実験結果の違いに関する検討が挙げられる。おわりに、本研究に数多くのご助言をいただいた小宮勤一先生、製作に協力いただいた高山清隆氏に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 小宮勤一ほか：流量計測ハンドブック，日刊工業新聞社 (1969)
- 2) J.R. Womersley: Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known, *J. Physiol.*, **127**, 553/563 (1955)
- 3) Shigeo Uchida: The pulsating viscous flow superposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in a circular pipe, *Z. Angew. Math. Phys.*, **7**, 403/422 (1956)
- 4) C.R. Stone and S.D. Wright: Non-linear and unsteady flow analysis of flow in a viscous flowmeter, *Trans. Inst. MC.* **16-3**, 128/141 (1994)

- 5) 川合一郎ほか：層流形流量計による間欠気流の測定，*日本機械学会論文集*, **38**-306, 295/302 (1972)
- 6) Kenji Kawashima and Toshiharu Kagawa: Unsteady flow generator for gases using isothermal chamber, *Measurement*, **33**, 333/340 (2003)
- 7) 飯塚幸三監修：ISO 国際文書「計測における不確かさの表現ガイド」，日本規格協会 (1996)
- 8) 横田真一ほか：円管内助走区間における振動流 (第 2 報 近似解析と非定常粘性抵抗係数)，*油圧と空気圧*, **11-2**, 107/114 (1979)
- 9) 北川能ほか：空気圧管路の過渡応答の特性曲線法による高速高精度計算法，*計測自動制御学会論文集*, **20-7**, 648/653 (1984)
- 10) 香川利春ほか：特性曲線法を用いた空気圧管路容量系の過渡応答解析，*計測自動制御学会論文集*, **20-11**, 1014/1018 (1984)
- 11) 日本機械学会編：機械工学便覧 基礎編 A5 流体工学 (1986)
- 12) Tong Zhao, et al.: A Real Time Method of Measuring Unsteady Flow Rate and Velocity Employing Differential Pressure in a Pipe, *JSME Int. J.*, **30**-260, 263/270 (1987)

[著 者 紹 介]

船 木 達 也 (正会員)

1998 年東京都立科学技術大学機械システム工学科卒業。2000 年東京工業大学大学院精密機械システム専攻修士課程修了。2002 年東京工業大学大学院精密機械システム専攻博士後期課程中退。同年東京工業大学精密工学研究所助手となり、現在に至る。流体計測制御に関する研究に従事。日本機械学会、日本フルードパワーシステム学会などの会員。

川 嶋 健 嗣 (正会員)

1992 年東京工業大学制御工学科卒業。1997 年同大学大学院理工学研究科制御工学専攻博士課程修了。同年東京都立工業高等専門学校機械工学科助手，2000 年東京工業大学精密工学研究所助教授となり、現在に至る。流体計測制御，ロボット工学に関する研究に従事 (博士 (工学))。日本機械学会，日本フルードパワーシステム学会などの会員。

香 川 利 春 (正会員)

1974 年東京工業大学制御工学科卒業。同年北辰電機製作所入社，1976 年東京工業大学工学部制御システム工学科助手，同講師，同助教授を経て，現在同大学精密工学研究所教授。流体制御システム，流体計測，生体計測に関する研究に従事 (工学博士)。計測自動制御学会評議員，日本フルードパワーシステム学会理事，日本機械学会などの会員。