

圧力脈動場における気体用流量計の動特性試験装置の開発

尹 鍾皓*, 秋久 潤**, 加藤 友規***, 川嶋 健嗣*, 香川 利春*

Development of Dynamic Characteristic Measurement System of Gas Flow-meter under Pressure Pulsation Field

Chongho Youn*, Jun Akihisa**, Tomonori Kato***,
Kenji Kawashima*, Toshiharu Kagawa*

Gas flow meters used in industrial processes are often exposed to pressure pulsation which is generated by various operations of the consumption equipment. Signals transmitted from the flow meters are influenced by the pulsation. Prediction of behavior of flow meters for pulsatile flow should be made clear before they are installed in their intended place. This requirement can be satisfied if the process pulsation signals are generated by a simulator. The pulsatile generation and flow measurement system developed in this paper enables this requirement. In the developed simulator, pressures at the upstream and downstream of the flow meter are independently controlled using pneumatic servo valves. Experiments verified that the pressures are correctly regulated pulsation of up to 5 Hz, which covers practically observed pulsation in industrial processes.

Key Words: Pressure pulsation, Flow meter, Pneumatic control

1. はじめに

気体流量の測定は流量計の種類により技術上の要点は異なる。そのため、JISにおいてもISOにおいても、流量計の種類に応じた測定方法の規格がそれぞれ設定されている^{1)~3)}。ただし、流量計の種類は非常に多く、規格ができていないものは、工業上の利用が多いごく一部の流量計に限られている。規格において定めている流量測定は、現在のところ、定常流に関するものしかない。工業用流量計の用途には、各種の機器の特性を知るために流量を測定する場合と、プロセスあるいはプラントに組み込んで、流量の監視やフィードバックのための流量検出に使用するという、二つの場合がある。前者の用途においては、一般的に、定常状態での流量測定が正確に行われれば十分である。一方、後者の場合には、

気体の流れに圧力や流量の脈動成分が重畳される。脈動を伴う流れに対して流量計がどのように応答するかは、話題となってきたとはいえ、測定法や評価法については、規格化されるには至っていない。

現実の問題としては、プラント内で圧力脈動にさらされたときの流量計の挙動をあらかじめ知っておくことが、プラントの安定な運転のために必要である。しかし、流量計の動特性は、規格の制定までにはなお時間を要すると考えられる。このような現状に鑑みて、本論文では、プラント内で圧力脈動が生じているときの、流量計の挙動を予測するための一つの技術的提案を行う。

一般にプロセスの管路系には多数の機器が接続されており、脈動発生源の位置が、管路内のどこであるか、また1箇所であるか、複数箇所であるかも特定できない場合がしばしばある。管路系を完全に再現する装置を製作し、その中で流量計の挙動を調べれば良いのであるが、この手法は現実的でない。すなわち、それは高価であり、設置に時間を要する上、得られた結果を他のプラントに適用できるとは限らない。このような場合に、プラント内の脈動場を模擬的に発生可能な装置があれば、流量計の特性評価に役立つ。

圧力または流量脈動発生に関する先行研究としては、Mottram⁴⁾によるピストン駆動による脈動流の研究、Durst⁵⁾らによる質量流量制御装置、著者らによる非定常流量発生装置⁶⁾が挙げられる。しかし、ピストン駆動による方式は、複数の周波数が重畳した脈動を生成することができない。また、いずれの方式も、供試流量計の上流側から脈動を与える試験方法である。

* 東京工業大学精密工学研究所 横浜市長津田町 4259

(E-mail: youn.c.aa@m.titech.ac.jp)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科 メカノマイクロ工学専攻 横浜市長津田町 4259

*** 福岡工業大学工学部知能機械工学科
福岡市東区和白東 3-30-1

* Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,
Nagatsuta-cho, Yokohama-shi

** Department of Mechano-Micro Engineering, Interdisciplinary Graduate
School of Science and Engineering, Tokyo Institute
of Technology, Nagatsuta-cho, Yokohama-shi

*** Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajiro-
higashi Higashi-ku Fukuoka-shi

(Received June 21, 2010) TRIA 001/11/1001 ©2010 SICE

脈動を伴う流れのなかで流量計の挙動を把握するためには、流量計の上流と下流で観測される圧力、流量のもとで、流量計が発信する信号を計測解析する必要がある。そのためには、流量計の上流側と下流側に、変動する圧力を入力として与え、それに対する流量計の出力信号を測定すれば良い。このようにすれば、流量計の上流、下流に設置された機器のインピーダンス特性に左右されず、また脈動源の位置に関係なく、脈動下における流量計特性を特定することができる。いま、脈動源を二つ備え、プロセスに組み込む予定の流量計をそれら脈動源の中間に設置して、各種脈動に応じた流量計の出力信号を測定すれば、その流量計の任意の管路系内での挙動を正確に予知することが可能となり、プラント管理に役立てることができる。この報告はこれを実現する装置を試作した例を報告するものである。

しかし、流量計の上流と下流の圧力を独立に入力として与えるということは、物理的に可能とは限らない。非圧縮性流体では、不可能である。気体であっても、たとえば、接続管径が一定な管内に設置した電磁流量計や超音波流量計において、上流側、下流側が近接していれば、上流点と下流点の間の圧力差は容易に圧力計の感度以下になり、二つの圧力を独立に与えることができなくなる。逆にいえば、ある種の流量計ではその入口と出口で圧力が異なるという現象は発生しない。しかし、そのような場合には、脈動発生源は一つでよく、本研究で開発した二つの脈動源を備えるシステムは不必要である。

主な記号

$f(u)$	サーボ弁入力電圧 - 質量流量特性	$[(\text{m}^3/\text{s})/\text{V}]$
$f^{-1}(u)$	サーボ弁入力電圧 - 流量特性逆関数	$[\text{V}/(\text{m}^3/\text{s})]$
g_{test}	供試流量計の流体抵抗	$[(\text{m}^3/\text{s})/\text{kPa}]$
K_D	微分ゲイン	$[\text{m}^3/\text{kPa}]$
K_P	比例ゲイン	$[(\text{m}^3/\text{s})/\text{kPa}]$
K_I	積分ゲイン	$[(\text{m}^3/\text{s}^2)/\text{kPa}]$
P	圧力	$[\text{kPa}(\text{gauge})]$
P_{ex}	サーボ弁排気ポート圧力	$[\text{kPa}(\text{gauge})]$
P_{ref}	圧力目標値	$[\text{kPa}(\text{gauge})]$
P_s	サーボ弁供給ポート圧力	$[\text{kPa}(\text{gauge})]$
Q_m	モニタリング QFS が指示する流量値	$[\text{m}^3/\text{s}(\text{STP})]$
Q_{test}	脈動再現時に供試流量計が指示する流量値	$[\text{m}^3/\text{s}(\text{STP})]$
Q_{ref}	脈動再現時に供試流量計が指示すべき流量値	$[\text{m}^3/\text{s}(\text{STP})]$
R	気体定数	$[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
s	ラプラス演算子	$[1/\text{s}]$
u	サーボ弁入力電圧	$[\text{V}]$
V	等温化圧力容器容積	$[\text{m}^3]$
α	モニタリング QFS による抵抗値	$[-]$
θ	空気温度	$[\text{K}]$
ρ	空気密度	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ϕ	直径	$[\text{mm}]$
添え字		

- 1 供試流量計上流側
 - 2 供試流量計下流側
- error 偏差

注：本論文において、流量の単位 $\text{m}^3/\text{s}(\text{STP})$ は、質量流量を、温度 273.15 K、圧力 101.325 kPa、湿度 0% の空気体積流量に換算した値である。

2. 圧力脈動再現装置の試作

2.1 原理

試作装置は緒言で述べたように、特性試験を行う流量計（以下では「供試流量計」と略記する）の上流側と下流側に圧力脈動発生源を独立に接続する構成とする。

脈動発生の方法には、ピストンなど容積式の装置を用いる方法と、弁を用いて管路インピーダンスを変化させる方法とがある。ピストン式は、液体の場合には流量脈動の校正が正確かつ容易に行えるという長所があるが、対象とする流量計のレンジに応じて装置寸法を変えなければならないという短所がある。しかし、気体の場合はこの長所が失われ、短所のみが表面化する。これに対して弁制御方式は、弁を管路に直列、並列に入れられることや、脈動振幅、流量の調節範囲を広く取れるという長所がある。そのかわり、動的な流量を測定できる基準となる流量計がないと、流量の校正が困難という短所がある。

本研究では、30Hz 程度の応答性が確認されている層流型流量計⁷⁾（以下 QFS と略記）を監視流量計として使用して、この短所を解決することにより、弁制御方式を実現する。したがって、取り扱える脈動の周波数も、0Hz から QFS の応答限界までとなるが、プラント配管系で問題となる圧力脈動は数 Hz 程度以下のものが多いので、監視機能は十分に果たせる。

2.2 装置の構成

試作した脈動再現装置の写真と構成図を Fig. 1, Fig. 2 に示す。本試作装置は、都市ガスなどの低圧ラインの模擬を対象とし、圧力振幅は 0.1kPa、周波数は 5Hz まで発生することを目標とする。装置は、上流圧力源、下流圧力源、上流圧力制御部、下流圧力制御部、監視流量計よりなり、監視流量計と直列に供試流量計を装着する構成となっている。上流および下流圧力制御部は、いずれも圧力容器と空気圧用サーボ弁からなり、各サーボ弁への入力信号により、上流圧力 P_1 および下流圧力 P_2 を制御する。

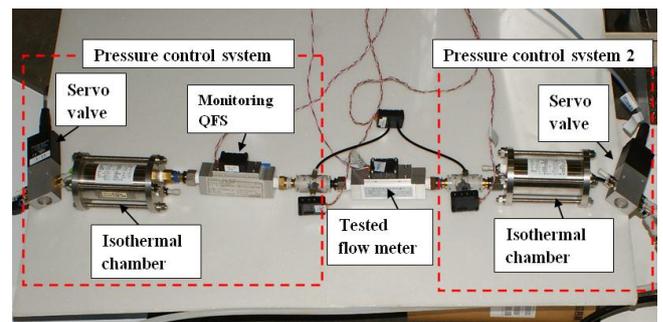


Fig.1 Experimental set up

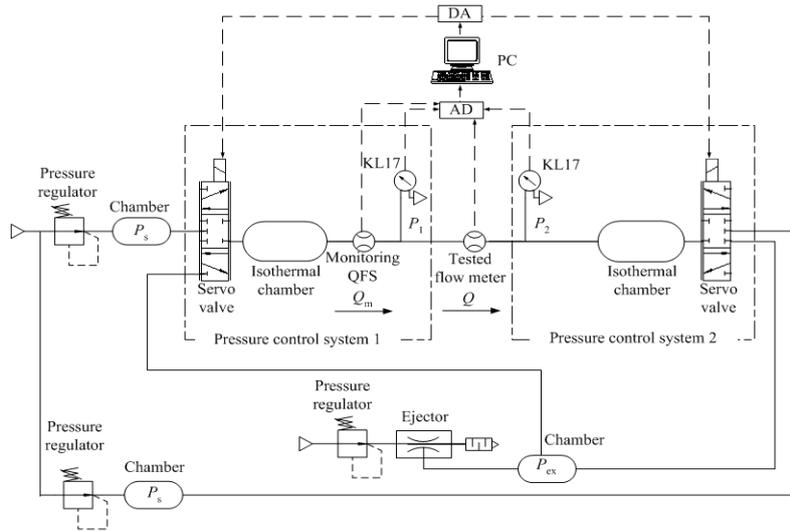


Fig.2 Pneumatic circuit diagram of developed system

本圧力制御系によって供試流量計の前後圧力を制御し、供試流量計の前後差圧を生じさせ、供試流量計に脈動流を与える。流量監視用の QFS を供試流量計の上流に設置している。各圧力センサ、流量計の信号は AD ボードを介してコンピュータに入力され、制御信号は DA ボードを介してサーボ弁に出力される。また、脈動を再現する際の P_1 および P_2 の目標値の設定は、コンピュータ上で行う。

使用した AD/DA 変換装置のサンプリング時間は $600\mu\text{s}$ であったが、サンプリング時間はもっと長くて良い。シャノンの定理により、理論的には、問題となる脈動周波数の 2 倍の逆数程度まで許容される。記録装置の容量が不足しない限り、サンプリング時間は短くて支障はない。

圧力センサは、圧力センサ KL17 (長野計器株式会社製) を用いる。圧力容器はサーボ弁と供試流量計の間に配置されている。この理由は、仮に圧力容器が存在しなければ、圧力に対するサーボ弁のゲインが非常に高くなり、制御が不安定になるためである。サーボ弁と圧力センサの間に圧力容器を設置することにより、サーボ弁入力電圧変化に対する圧力変化を緩和させ、制御系の安定性を向上させている。本試作装置では圧力容器の容積を $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ とした。圧力容器は、等温化圧力容器 (東京メータ株式会社製) を用いた。温度を一定にすれば、気体圧力は制御しやすくなるので、ここでは等温化圧力容器を用いた。本容器は内部に銅細線が充填されており、空気の充填・放出時における温度変化を微小に抑えることが可能である⁹⁾。スプール型サーボ弁は MYPE-5-010-B-SA (FESTO 株式会社製) を用いる。本サーボ弁は 100 Hz 程度の応答性を有しており、信号電圧に対して弁開度を滑らかに変化させることが可能である。サーボ弁は 5 ポートを有しているが、そのうち供給、制御、排気の 3 つのポートのみを用いる。サーボ弁の排気ポートにはエジェクタ CV-10HS (株式会社妙徳製) を接続し、弁の排気性能を向上させている。サーボ弁の供給ポート圧力 P_s は 30 kPa (gauge)、排気ポート圧力 P_{ex} は -92 kPa (gauge) とする。このときの制御流量特性を Fig.3 に示す。

また、供試流量計の上流側に設置する流量監視用の QFS として QFS-20 (東京メータ株式会社製) を用いた。この QFS により、供試流量計を通過する流量瞬時値の監視を行うことが可能である。モニタリング QFS が正しく校正してあるとき、その指示値が供試流量計の指示値と一致していれば、供試流量計は正しく流量測定を行っていることになる。

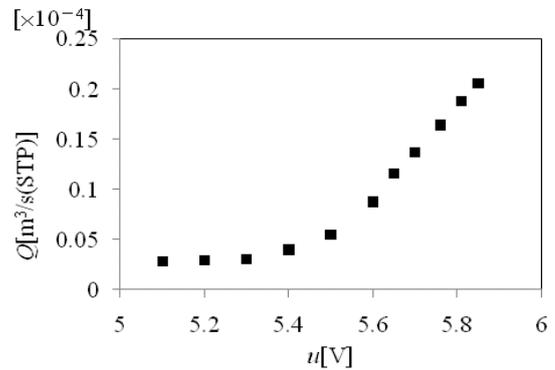


Fig.3 Flow characteristics of the servo valve

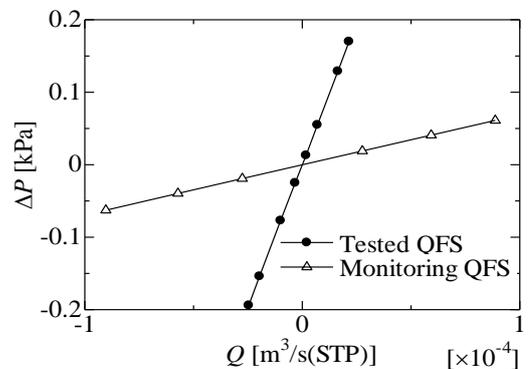


Fig.4 Impedance characteristics of the flow meters

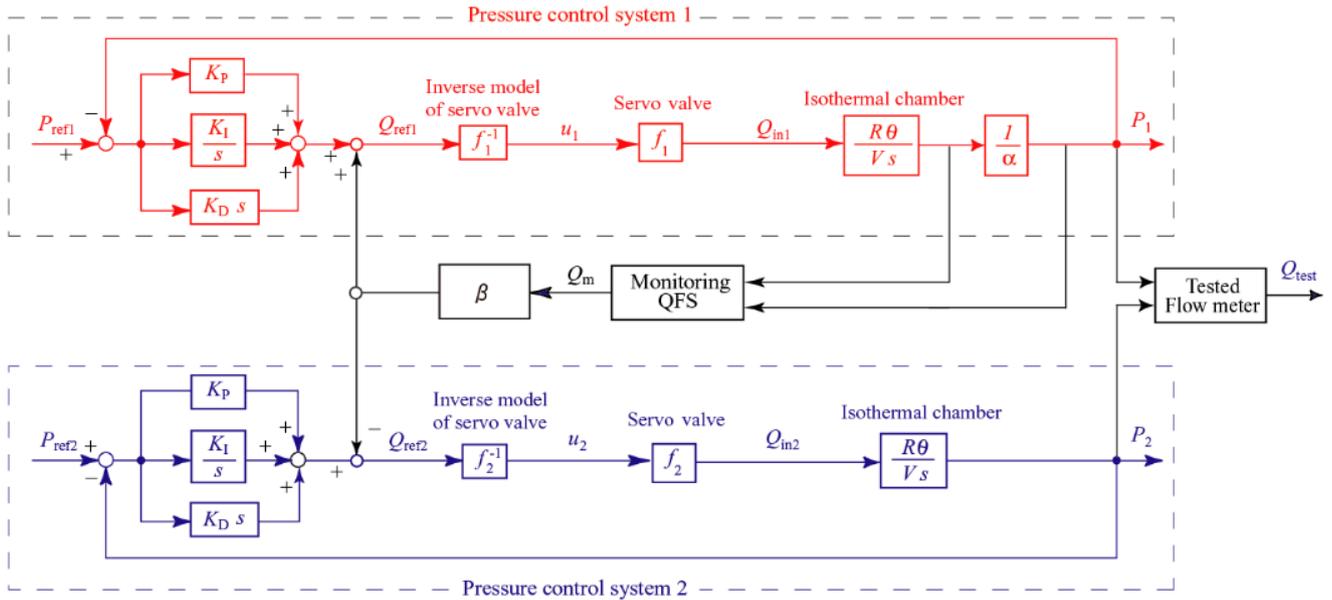


Fig. 5 Block diagram of the pressure pulsation simulator

二つのサーボ弁で P_1 と P_2 を制御しようとするのであるが、上流側サーボ弁と供試流量計の間に、モニタリング QFS が設置してある。モニタリング QFS の抵抗値は、上流側の圧力制御系に抵抗要素としての影響を与えるので、モニタリング QFS の抵抗値は、供試流量計の抵抗値に比べて小さいことが望ましい。Fig. 4 に、供試流量計とする QFS と、モニタリング QFS の抵抗特性を示す。この試作例の場合、モニタリング QFS の抵抗値は供試流量計の抵抗値に対して 1/10 以下 (9%程度) である。

2.3 制御方法

脈動場再現装置の制御ブロック線図を Fig. 5 に示す。供試流量計前後の圧力制御系として、PID 制御ループを構築した。すなわち、PID 調節器のパラメータの調節により、サーボ弁の非線形性、接続管路による圧力損失などの影響に対応し、圧力を目標値に近づけるようにする。圧力微分値の取得には、圧力センサの信号に対してカットオフ周波数 35Hz の擬似微分を行う。二つの圧力制御系が干渉しあう本制御系では、微分は不安定を引き起こしやすいが、サーボ弁スプールの慣性による積分効果に対応することを考えて、微分要素も加えた。

本装置は供試流量計を介して制御対象 P_1 と P_2 が繋がっているため、圧力制御を行う際に相互干渉が生じる。そのためモニタリング QFS から得る流量の信号 Q_m の定数倍 (β 倍) を用いて、干渉の影響を低減させている。また、サーボ弁は事前に入力電圧と通過流量の関係を測定しておき、その逆関数をコントローラに組み込むことにより、サーボ弁の不感帯の影響を低減させている。

なお、供試流量計上流側の圧力制御系にはモニタリング QFS が含まれているため、その抵抗を係数 α として伝達ブロックに記入している。また、本制御系は非線形系であるため、脈動 PID 制御パラメータ選定は試行錯誤的に決定した。

3. 実験結果

3.1 目標値の採取

提案する脈動再現装置は、再現目標値 P_{ref1} および P_{ref2} を事前求めておく必要がある。大規模管路系内に流量計が挿入されている場合には、目標値自体をシミュレーションにより得ることもある。管路系が小規模ならば実際の配管が使える。本論文では小口径の実際の配管を用いて脈動再現のための目標値を求める。本章では、目標値を求めるための実験 (予備実験と称す) について説明する。

予備実験の装置図を Fig. 6 に示す。供試流量計の前後に圧力センサを取り付け、下流には $\phi 12\text{mm} \times 4.83\text{m}$ のナイロンチューブを接続した。作動流体は空気、使用する圧力センサは KL17 (レンジ $\pm 200\text{Pa}$) である。また、供試流量計の上流側に、脈動源として空気圧用スプール型サーボ弁を設置した。本サーボ弁の供給圧 P_s は $30\text{kPa}(\text{gauge})$ とし、排気圧 P_a は $-92\text{kPa}(\text{gauge})$ とした。

供試流量計の上流に設置したサーボ弁を駆動して、供試流量計に脈動を与える。ここでは、逆流の生じない 1 方向流れを対象とする。また、使用する圧力センサのレンジの制限を考慮して、生成する流量は最大 $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}(\text{STP})$ とした。

サーボ弁の入力電圧は 1Hz の正弦波と、1Hz および 5Hz の正弦波が重畳した波形の 2 種類とした。複数の周波数が重畳した脈動を与える理由は、プラント配管に生じる脈動が複数の周波数が重畳したものとなることが多いためである。

サーボ弁に平均電圧 5.6V、振幅 0.2V の正弦波を入力した実験結果を Fig. 7, Fig. 8 に示す。流量 $1 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}(\text{STP})$ におけるレイノルズ数は約 70 である。この実験により得られた供試流量計の前後圧力 P_1, P_2 を脈動再現実験の目標値とする。

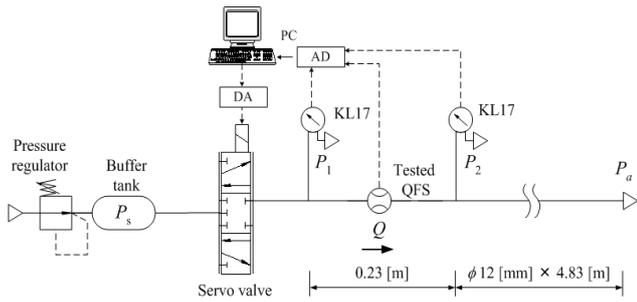


Fig. 6 Experimental apparatus for reference signal sampling

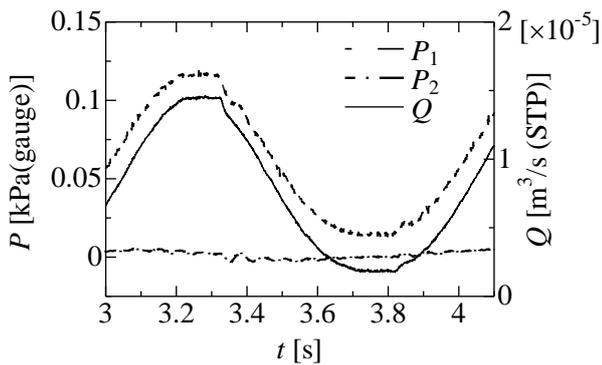


Fig. 7 Experimentally obtained sample signals (1Hz)

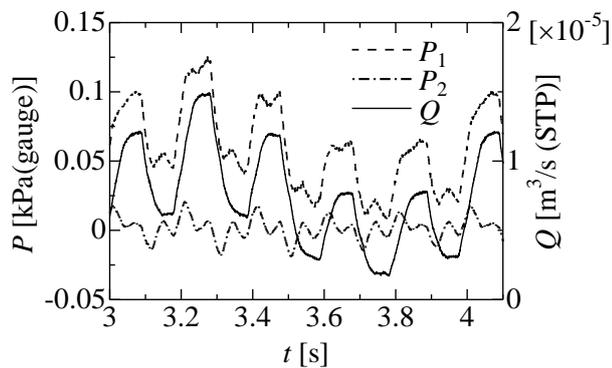


Fig. 8 Experimentally obtained sample signals (1Hz and 5Hz)

3.2 脈動再現の実験結果

本節では、第2章で提案した脈動再現装置を用いて、第3.1節で採取した圧力脈動を再現した実験結果を示す。供試流量計は第3.1節と同じものを用い、再現目標値 P_{ref1} および P_{ref2} は、第3.1節で示した P_1 および P_2 を用いる。本節で再現する圧力脈動値が再現目標値である P_{ref1} , P_{ref2} と一致していれば、提案する装置が圧力脈動再現を達成したことになる。

脈動再現の結果を Fig. 9, Fig. 10 に示す。両図の上部は圧力値、中央部は流量値、下部は流量値の偏差である。圧力値では破線が本節での再現目標値で、実線が再現実験における結果である。1Hz の結果では、流量波形の山の部分は精度良く再現できているが、谷の部分では偏差が生じている。これは谷の部分で、 P_1 , P_2 の圧力差が小さいためと考えられる。圧力差が小さいと、 P_2 を

目標値に追従させる際に使用するサーボ弁が不感帯近傍で使用されることになり、制御性が悪化する。制御ゲインを高めて、偏差を低減できたが、弁に振動が発生し、流量波形に高周波の振動が生じた。

実験では偏差を無くすることよりも目標波形の脈動成分の再現を優先させ、流量波形に振動が生じない範囲でゲインを設定した。その結果、1Hz および 5Hz の再現実験では圧力の偏差は 21Pa 以内、流量の偏差は $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (STP) 以内に収まった。したがって、提案する装置により、脈動を再現できたといえる。また、 Q_{ref} と Q_m がほぼ一致していることから、モニタリング QFS が供試流量計を通過する流量を正確に監視できていることがわかる。

以上の結果により、提案する脈動再現装置が、5Hz 程度までの脈動を再現可能であることがわかった。

4. まとめ

本研究では、圧力脈動場における気体用流量計の動特性試験装置を提案・開発した。

等温化压力容器と空気圧サーボ弁を用いた圧力脈動再現装置を試作し、気体用流量計の前後圧力を空気圧サーボシステムによって制御することにより、圧力脈動を再現した。

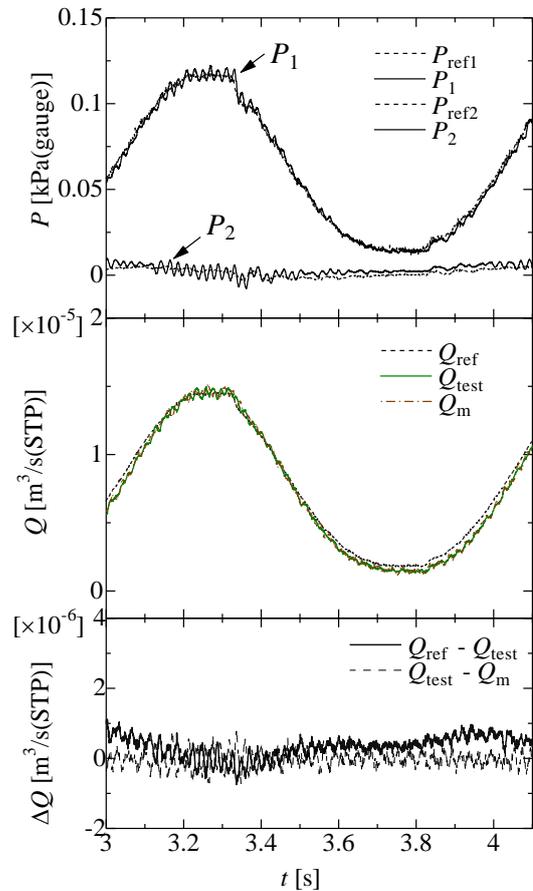


Fig. 9 Reproduced flow and pressure pulsation (1Hz)

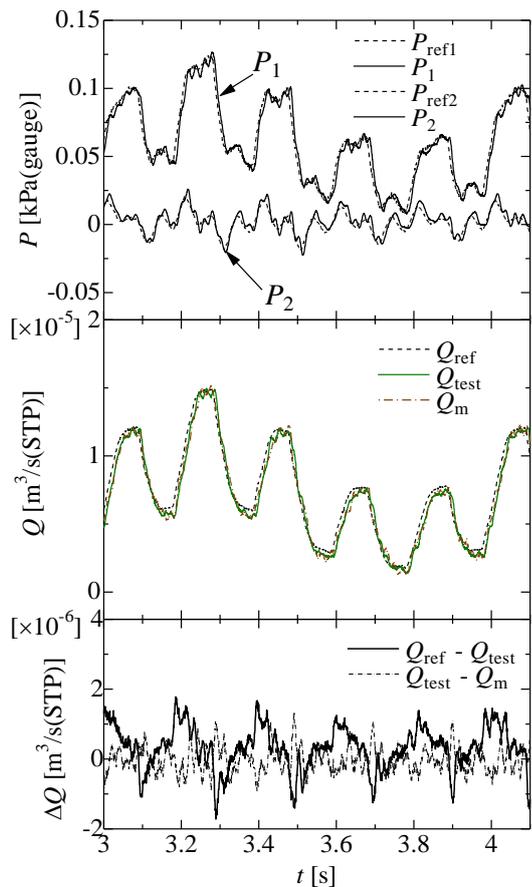


Fig. 10 Reproduced flow and pressure pulsations (1Hz and 5Hz)

1Hz の正弦波と、1Hz および 5Hz の正弦波が重畳した波形を圧力目標値として脈動再現実験を行った結果、本装置が圧力振幅 0.1kPa、周波数 5Hz までの脈動を精度良く再現可能であることを確認した。

謝辞

本研究に協力して頂いた東京瓦斯株式会社の大和久崇様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) JIS Z 8762: 円形管路の絞り機構による流量測定方法 (2007)
- 2) JIS Z 8761: フロート形面積流量計による流量測定方法 (1999)
- 3) JEMIS032: 超音波式流量計による流量測定法 (1987)
- 4) Mottram R.C.: The measurement of Pulsating Flow Using Orifice Plate Meters, Flow Its Measurement and Control in Science and Industry, Instrum. Soc. Am., 1-2, 197/208 (1974)
- 5) Durst F, Heim U, Unsal B and Kullil G: Mass flow rate control system for time dependent laminar and turbulent flow investigations Meas. Sci. Technol., 14, 893/902 (1974)

- 6) T. Funaki, K. Kawashima, S. Yamazaki and T. Kagawa : Generator of variable gas flows using an isothermal chamber, Meas. Sci. Technol., 18, 835/842 (2007)
- 7) 船木達也, 川嶋健嗣, 香川利春 : 高速応答性を有する気体用層流型流量計の特性解析, 計測自動制御学会論文集, 42-5, 461/466 (2004)
- 8) 川嶋健嗣, 藤田壽憲, 香川利春 : 等温化压力容器を用いた空気の非正常流量計測, 計測自動制御学会論文集, 33-3, 149/154 (1997)

[著者紹介]

ゆん ぞん ほ 君
尹 鍾 皓 君



2005年東京工業大学大学院精密機械システム専攻博士課程修了。同年ボッシュ (株) 入社。07年東京工業大学精密工学研究所高機能化システム助教, 現在に至る。圧縮性流体の計測と制御の研究に従事。博士 (工学), 日本フルードパワーシステム学会, 日本シミュレーション学会の会員

あき ひさ じゆん 君
秋 久 潤 君



2008年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。2010年東京工業大学大学院総合理工学研究科メカノマイクロ工学専攻修士課程修了。

か とう とも のり 君 (正会員)
加 藤 友 規 君 (正会員)



2007年東京工業大学大学院総合理工学研究科メカノマイクロ工学専攻博士課程修了。東京都立産業技術高等専門学校助教を経て現在、福岡工業大学工学部知能機械工学科助教。空気ばね式除振台の制御などの研究に従事。博士 (工学), 技術士 (機械部門)

かわ しま けん じ 君 (正会員)
川 嶋 健 嗣 君 (正会員)



1992年東京工業大学工学部制御工学科卒業。1997年同大学院理工学研究科制御工学専攻博士後期課程修了。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, 現在同大学准教授。博士 (工学)。計測自動制御学会, 日本フルードパワーシステム学会, 日本機械学会などの会員

か がわ とし へる 君 (正会員)
香 川 利 春 君 (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, 76年東京工業大学助手, 講師, 助教授を経て, 現在精密工学研究所教授。圧縮性流体システム, 流体計測, 生体計測に関する研究に従事。工学博士。日本フルードパワーシステム学会, 日本機械学会, 日本シミュレーション学会などの会員