

解 説

層流形流量計と等温化压力容器による流量測定系の提案と
その有効性の検証*

船木達也**

*平成 19 年 6 月 20 日原稿受付

** (独)産業技術総合研究所, 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

1. はじめに

去る 2007 年初頭, 当時は大学で助手として研究活動と学生指導に追われる日々を過ごしていた最中に突然の吉報を頂戴した. 小生が平成 18 年度 SMC 賞を頂けるとの連絡であった. 最初はわが耳を疑い, 一方で小生の研究が少しでも評価していただけたことへの喜びも込み上げてきたことを記憶している. 今回, 授賞を機に緑陰特集号へ寄稿する機会を頂戴したので, 授賞対象である「層流形流量計と等温化压力容器による流量測定系の提案とその有効性の検証」に関連する研究内容から, 本稿では気体用の高速応答性を有する層流形流量計の開発と, 等温化压力容器を用いた連続型非定常流量発生装置の開発に関する話題を取り上げ説明しようと思う. 最後に, この分野における将来展望について, 私見ではあるが簡単に述べさせていただき, まとめることとする.

2. 高速応答性を有する層流形流量計の開発

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. 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. したがって, 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場合の応答速度を計測する手法が良く用いられ, その応答速度は 10[Hz]以下である. 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う際には, 差圧式流量計の中でも層流形流量計がよく用いられる. 超音波式や渦式, 熱式流量計を用いることも考えられるが, その測定原理や仕様の関係から, 実際にはなかなか困難なようである. それに対し, 層流形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, 流体の粘性により, 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¹⁾. このため, 広いレンジアビリティの確保が容易で, かつ動特性が良い特徴を有している. しかしながら, 実験による動特性検証はほとんど行われておらず, 理論的な説明もウォーマスリー数による評価²⁾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十分になされていない. また, 人間の動脈における非定常な流れと脈を打つ血圧との関係を流体力学の視点から研究した事例⁴⁾も報告がなされている.

先行研究の一例として, C.R.Stone らによる研究⁵⁾などがあるが, 理論式の導出は行われているものの, 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の研究⁶⁾もあるが, 最大でも 30[Hz]程度までの流れの評価しか行われていない.

一方, 流量計の動特性を検証する手法には, 川嶋らが提案している等温化压力容器を用いた非定常流量発生装置⁷⁾がある. これを用いれば, 標準不確かさ⁸⁾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、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形流量計に着目し、その特性を明らかにする研究を行った。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い、理論と実験の両面からの結果を踏まえて、層流形流量計の動特性を評価した点が特徴となっている。細管内の流れは層流状態、助走区間はなるべく短く、細管内の流動の応答性を示すウォームスリー数が1以下となるように細管寸法を選定することで、理論的に50Hzまでの応答性を確保する設計を実現している。これらの設計方針などの詳細については、参考文献⁹⁾を参照いただきたい。この細管を束ねて層流エレメントとし、図1の写真に示す層流形流量計を製作した。この流量計に対して、等温化压力容器を用いた非定常流量発生装置で動特性校正を行った。一例として振動流50Hzの測定結果を図2に示す。この図において青線は非定常流量発生装置の発生流量を示し基準流量である。一方、赤線が供試流量計である層流形流量計の測定結果を示している。この結果から両者はほぼ一致しており、良い応答性を有していることがわかる。また、さまざまな周波数に対して同様の比較実験を行い図3に示すボード線図を獲得している。以上より、開発した層流形流量計は50Hzの高速応答性が実現されたことを実験でも確認し、その有効性を示している。また最近では、空気ばね式除振台の圧力制御¹⁰⁾や空気圧ゴム人工筋の変位推定などにもこの層流形流量計が活用された事例が報告されている。

3. 等温化压力容器を用いた圧縮性流体用連続型非定常流量発生装置の開発

気体の非定常流量計測は燃料電池の流量制御、半導体製造装置の不活性ガス制御などにおいて大変重要である。第2章でも述べたとおり、測定対象が気体の場合、密度が圧力と温度の関数となり、その取り扱いが容易でない。これまでに、非定常流量計測の評価手法としてはさまざまなものが提案されている。たとえば、ピストンを活用した手法¹⁾や回転盤を利用した方法¹¹⁾のほか、過渡的な流量変化に対して評価する方法などがある。また、供給圧一定でバルブ開度を制御することで実現した流量制御装置¹²⁾が提案されている。しかし、いずれの方法も開ループによる流量発生であることから、発生流量を補償するフィードバック機能を有していない。よって、精度の高い正弦波状の振動流量を発生することができず、気体用流量計の周波数応答測定方法への適用には課題がある。

また川嶋らは気体用流量計の周波数応答試験方法として、前述した等温化压力容器を用いた非定常流量発生装置⁷⁾を提案し開発している。この装置では発生流量を直接計測できる長所を有しているが、充填した圧縮空気の質量分しか流量発生ができない問題点がある。このため数周期分の振動流発生に限定されることから、流量計の周波数応答試験装置としては不十分といえる。一方、前述のピストンやポンプなどを活用した方法では発生時間の制約はないが、どの程度の流量を発生しているか、発生時の瞬時流量を直接把握することが困難なため、精度などに大きな問題が残る。さらに、F.Durstらにより提案されている質量流量発生装置では発生時間の制約がなく、周波数の高い領域まで任意の流量波形を生成できる点では優位性があるものの、発生流量の補償の点で同様に問題が残っている。

これら発生時間の制約解消と汎用性向上および発生流量の補償に主眼をおいた上で、既存の非定常流量発生装置の制約条件解消に取り組み、新しい連続型非定常流量発生装置を提案した。なお、標準不確かさに関しては定常流量に対して1%程度のものが主流であるが、振動流に対しては有効な方法が確立していないことから、5%でも十分有用といえる。

これらの機能を満足するために、等温化压力容器への気体の流入と流出を同時に行う方法を提案した。具体的には、連続型非定常流量発生装置は図4に示すように、等温化压力容器とその上流と下流に配置したスプール型サーボ弁から主に構成される(実物は図5参照)。上流側のサーボ弁の開度を調節することで流入流量を制御し、下流側のサーボ弁によって容器内圧力を変化および制御させることで流出流量に関するフィードバック制御系を構築し非定常流量を発生する。詳細については、参考文献¹³⁾をご確認いただきたい。製作した連続型非定常流量発生装置を用いて、さまざまな周波数の振動流を実際に発生させ、その流量を高速応答層流形流量計により比較し性能評価を行っている。振動流1Hzおよび50Hzの発生実験結果例を図6および図7にそれぞれ示す。図中の破線は目標発生流量、青実線は発生装置による発生流量、赤実線は層流形流量計による流量測定結果をそれぞれ示している。

この結果より、本発生装置により安定して振動流発生が実現できていることが確認できる。この他、容器自体の損失や容器内温度変化による影響について考察し、流量制御系への問題がないことなども確認している。さらに、正弦波状の流量波形以外にも生成を試み、発生可能であることを確認している。以上より、本発生装置は気体のファンクションジェネレータとしても活用でき、今後さまざまなアプリケーションへの応用が期待される。

4. 研究の発展

ここまでは気体の非定常流量計測の中でも層流形流量計と連続型非定常流量発生装置の開発について述べた。本章では、これらの開発で培った成果を活用した例を幾つか紹介しようと思う。

はじめに、エアドリルなどの空気圧工具における消費流量計測である。これらの機器は短時間に非常に大きな流量変化を伴うことは知られている。近年、環境対策を意識した技術展開においては、このような機器の省エネ対策が急務となっている。しかしながら、その指針を得るためにも機器が消費する空気流量を測定することが必要となるわけだが、これまでは流量計を用いても測定が困難であった。そこで著者らは第2章で紹介した層流形流量計と等温化圧力容器を組み合わせた過渡的流量変化に対応する流量計測システムを提案¹⁴⁾している。このシステムを用いれば、加圧下での過渡的な流量変化を100Hzの応答速度で計測可能なことを確認しており、産業界での有用性は大きいといえる。

つぎに、往復流発生を実現する取り組みについて紹介する。第3章の圧縮性流体用連続型非定常流量発生装置は単一方向の非定常流量を安定して発生可能であることは前述したとおりである。これと同等の機能を有するマスフローコントローラはF.Durstらドイツの研究グループも研究開発に取り組み、製品化がなされている。しかしながら、エンジンやポンプの脈動流れは必ずしも一方向の流れとは限らない。たとえば、次世代の技術として期待されている燃料電池においては、水素と酸素を供給する駆動源にはポンプなどが多く用いられ、その特性評価を行うことは性能改善などにおいて非常に重要となっている。また、バイオ技術の進歩とともに μ -TASなどの実用化に向けた研究が盛んに行われ、マイクロ流路内での振動流解析の研究事例¹⁵⁾や逆流を含む流れ場での流速分布解析¹⁶⁾などが成果として報告されている。しかし、逆流を含む脈動流れについて流量を正確に規定した上で、実際に実験によって評価を試みることは困難といえる。ピストンやポンプなどを活用した場合、逆流を含んだ流量波形の生成は可能であるが、発生流量自体を直接把握が難しい。また前章で紹介した連続型非定常流量発生装置では、流れ方向に依存せず流量発生するという制約を解決できていない。そこで、真空源を活用した往復流対応型圧縮性流体連続発生装置を提案¹⁷⁾し、その有効性を評価する研究にも取り組んでいる。一例として、図8に往復流1Hzの発生実験結果例を示す。凡例は図6と同様である。この結果より、往復流も安定して発生可能であることが確認できる。このように、第2章および第3章で紹介した研究成果を踏まえ、より産業界のニーズに即しながら発展させることで、新しい研究成果の創出がなされている。

5. おわりに

以上、本稿では圧縮性流体、特に空気を対象とした非定常流量計測と流量制御技術の双方について具体的な研究事例を紹介しまとめてみた。この圧縮性流体の非定常流量計測および流量制御に関する技術は、産業界からの需要が今後もより一層増加していくものと考えられる。ここで重要となるのが、圧縮性流体の非定常流量計測におけるガイドラインではないだろうか。小生が現在所属する研究室では気体流量標準を供給・維持・管理する業務を担っている。仕事柄というわけではないが、脈動流量標準の維持・供給・管理はある意味、天命を授かったといえるのかもしれない。本稿でご紹介した研究成果などを踏まえながら、是非、将来供給していきたいと考えている。

6. 謝辞

本稿にかかわる研究を進めるにあたり、当方が以前勤務していた東京工業大学精密工学研究所 香川利春教授ならびに川嶋健嗣准教授に数多くのご指導・ご支援を頂戴しました。この場を借りまして厚く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 川田裕郎, 小宮勤一, 山崎弘郎編: 流量計測ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1979).
- 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. Vol.127, (1955) pp.553/563.
- 3) Shigeo Uchida: The pulsating viscous flow superposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in a circular pipe. Z.Angew.Math.Phys., Vol.7, (1956) pp.403/422.
- 4) M.Zamir: The Physics of Pulsatile Flow, Springer-Verlag New York, Inc. (2000).
- 5) C.R.Stone and S.D.Wright: Non-linear and unsteady flow analysis of flow in a viscous flowmeter, Trans.Inst.MC., Vol.116, (1994) pp.128/141.
- 6) 川合一郎他: 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, Vol.38, No.306, (1972) pp.295/302.
- 7) K.Kawashima and T.Kagawa: Unsteady flow generator for gases using isothermal chamber, Measurement, Vol.33, (2003) pp.333/340.
- 8) ISO: Guide to the expression of uncertainty in measurement, (1993).
- 9) 船木達也, 川嶋健嗣, 香川利春: 高速応答性を有する層流型流量計の特性解析, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.10, (2004) pp.1008/1013.
- 10) 加藤友規, 川嶋健嗣, 澤本晃一, 船木達也, 香川利春: スプール型サーボ弁と層流型高速流量計を用いた空圧式アクティブ除振台の制御, 精密工学会誌, Vol.72, No.6, (2006) pp.772/777.
- 11) 渡辺紀之, 小宮勤一: オリフィス流量計による気体の脈流の測定, Technical Report 64, 計量研究所報告, (1972).
- 12) F.Durst et al.: Mass flow rate control system for time-dependent laminar and turbulent flow investigations, Measurement Science and Technology, Vol.14, (2003) pp.893/902.
- 13) 船木達也, 川嶋健嗣, 香川利春: 気体用連続非正常流量発生装置の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.5, (2006) pp.461/466.
- 14) 船木達也, 仙石謙治, 川嶋健嗣, 香川利春: 等温化圧力容器を用いた空気圧機器消費流量測定装置の開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.36, No.2, (2005) pp.39/44.
- 15) Christopher J.Morris nad Fred K.Forster: Oscillatory flow in microchannels –Comparison of exact and approximate impedance models with experiments-, Experiments in Fluids, Vol.36, (2004) pp.928/937.
- 16) Debopam Das and Jaywant H.Arakeri: Transaction of unsteady velocity profiles with reverse flow, Journal of Fluid Mechanics, Vol.374, (1998) pp.251/283.
- 17) T.Funaki, S.Yamazaki, N.Yamamoto, K.Kawashima and T.Kagawa: Oscillatory gas flow generator using isothermal chamber, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, (2006) pp.5212/5217.

著者紹介



ふなき たつや
船木達也君

1998年東京都立科学技術大学工学部機械システム工学科卒業。2000年東京工業大学大学院総合理工学研究科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総合理工学研究科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高機能化システム部門助手。2007年(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門 流量計測科 気体流量標準研究室 研究員となり、現在に至る。気体流量標準の維持・供給・管理と圧縮性流体の計測と制御に関する研究に従事。日本フルードパワーシステム学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会などの会員。博士(工学)。

E-mail: funaki.t@aist.go.jp

URL: <http://www.nmij.jp/fluid-flow/GFSS/GFSmain.html>

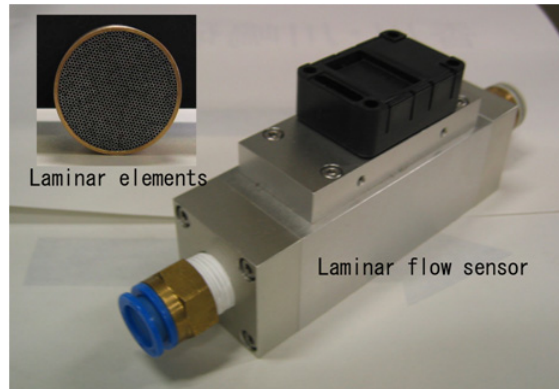


図1 層流形流量計の写真

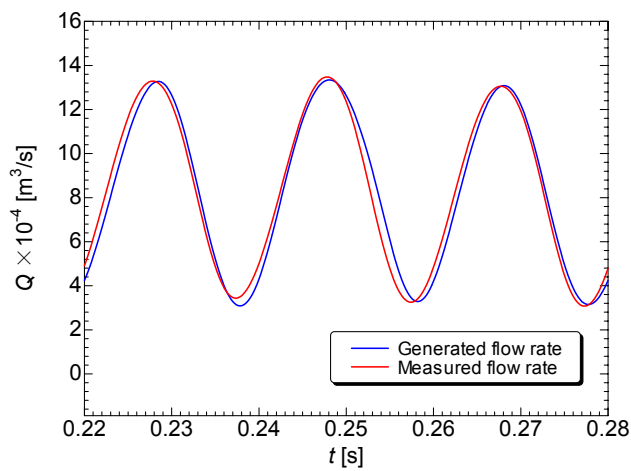


図2 層流形流量計による振動流 50Hz の測定結果例

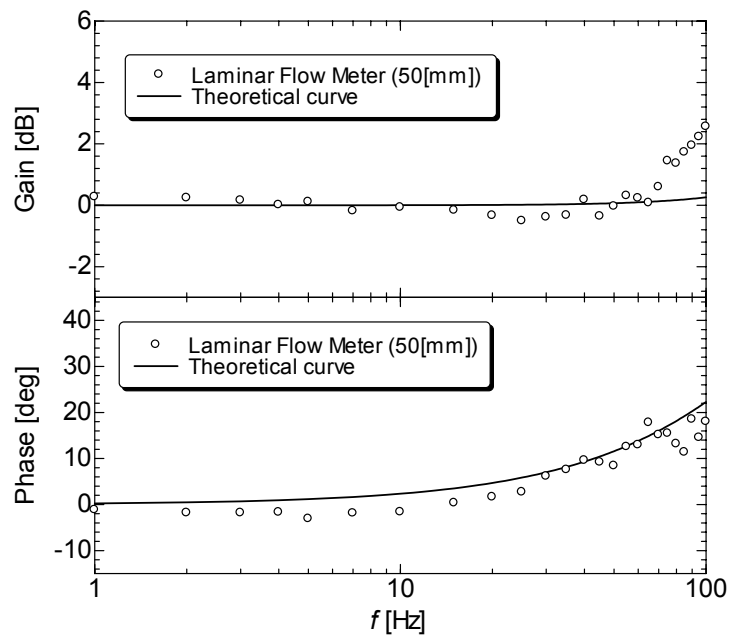


図3 層流形流量計のボード線図

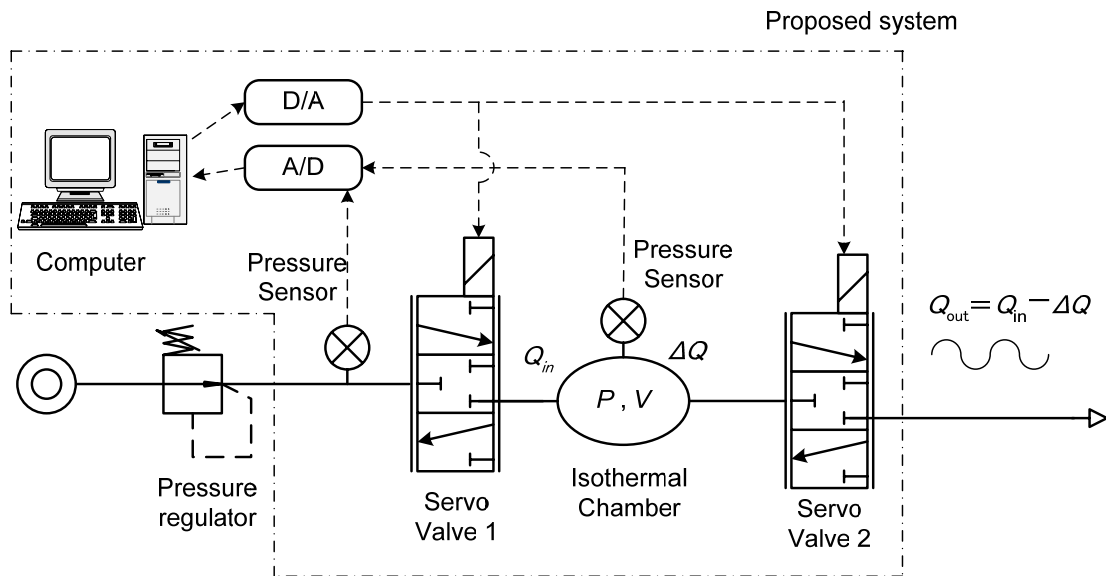


図4 連続型非定常流量発生装置の構成図

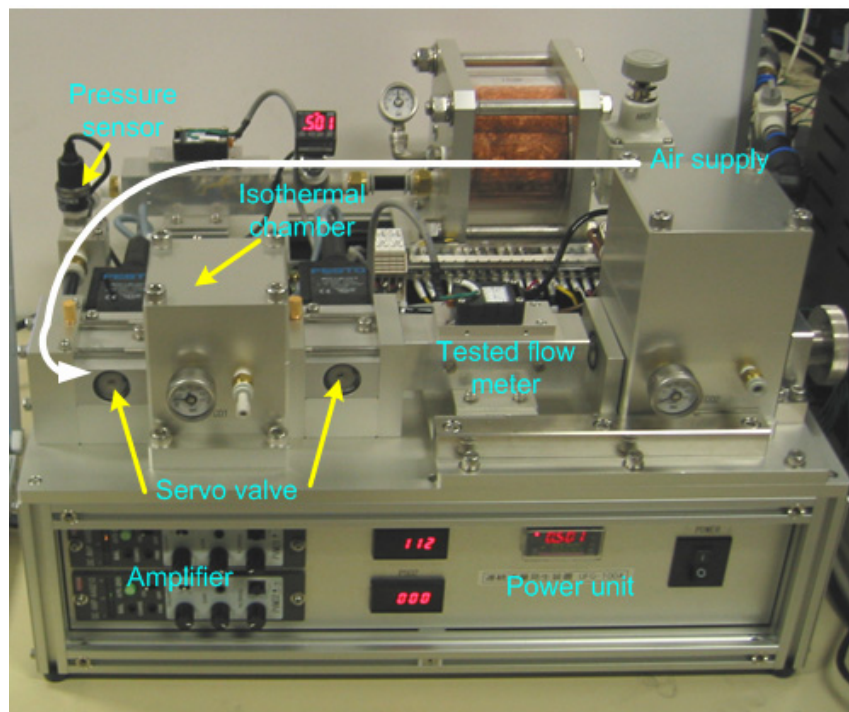


図5 連続型非定常流量発生装置の写真

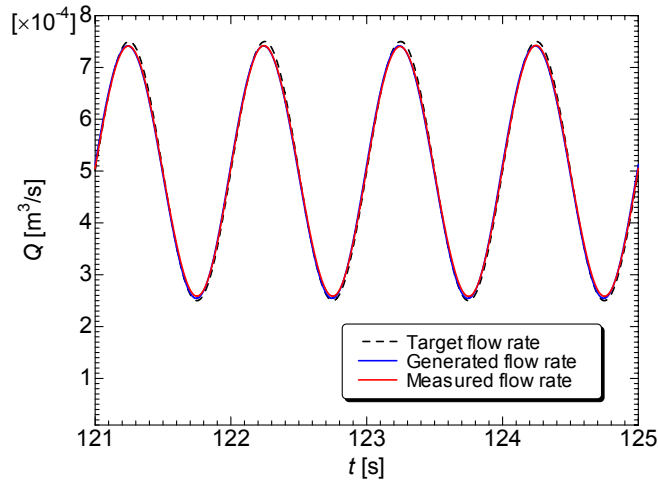


図6 振動流 1Hz の発生実験結果例

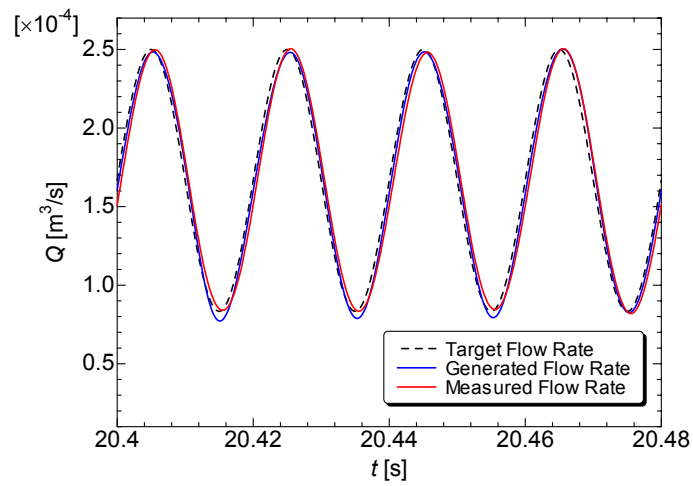


図7 振動流 50Hz の発生実験結果例

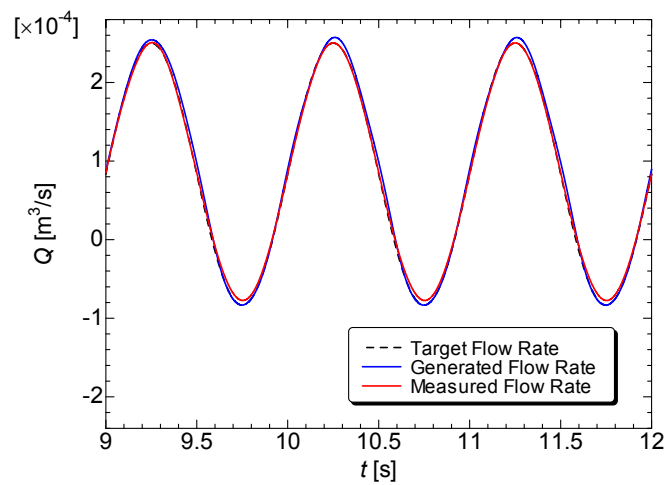


図8 往復流 1Hz の発生実験結果例