

気体の脈動流量標準に関する調査研究

船木達也*

(平成20年12月8日受理)

A survey on gas flow standards of pulsatile flow

Tatsuya FUNAKI

Abstract

Recently, the measurement of pulsatile flows becomes the important core technology in various industrial fields such as energy savings and environmental protection. Although there are many gas flow meters which can measure the pulsation flows, the evaluation method and technique suitable for the dynamic characteristic have not been established yet. Therefore, the efforts toward the realization of pulsatile gas flow standards are very important. However, the domestic or international standards about the unsteady gas flow measurement are not ready.

This report comprehensively describes the present situation and the effectiveness of pulsatile gas flow measurement in various gas flow meters and the reproduction methods of pulsatile gas flows which are necessary to compensate the dynamic characteristic of the gaseous flow meters. And, as future prospects, the deployment of technology about the pulsatile gas flow standards is discussed.

1. はじめに

産業界からの要請をはじめとして、気体の流量計測は非常に重要な技術となっている^{1)~4)}。日本国内における気体用流量計の校正は、気体中流量⁵⁾では、国家標準設備である定積槽システムによる超精密臨界ノズルの値付けがトレーサビリティ体系の起点となっている。また流量範囲が小さい気体小流量^{6)~8)}では秤量法による音速ノズルの値付けを起点としている。それらを基準にして、JCSS⁹⁾の認定事業者が保有する特定二次標準器へと値付けがなされた後、各事業者の基準流量計が校正される。さらにその基準流量計を使用して、各社の製品流量計を校正していく経路を辿り、トレーサブル体系が構築されている。近年、産業界における経済的取引のグローバル化や環境・省エネ対策への意識変化などに伴い、計量のトレーサビリティ確保の重要性が以前よりも増して、強く認識されるようになってきた。これらのニーズに応えるべく、必要な気体流量標準の供給や開発を、独立行政

法人産業技術総合研究所計量標準総合センターの気体流量標準研究室のグループが担っている。

このように気体の定常流に関しては国家標準から実用流量計までのトレーサビリティ体系が確立され運用されているが、産業界で昨今問題となっている非定常流れに関してはそのガイドラインは未だ整備されてきていない。

脈動流を含む非定常流は産業界の様々な場面で遭遇する現象である。例えば、エンジンの吸排気¹⁰⁾や、ポンプをはじめとした各種駆動源に由来するもの、配管の共鳴・共振現象に由来するもの、はたまた流れが層流から乱流へと遷移する際や剥離を伴う流れなど、挙げはじめるときりが無い。また、身近な非定常流の事象として、われわれの呼吸活動もその一つといえる。

ここで流動現象の生成プロセスを今一度考えてみる。改めて説明するまでもないが、流体を流すためには圧力勾配を生じさせなければならない¹¹⁾。そのためには通常ポンプやコンプレッサ等を用いて加圧もしくは昇圧し、圧力が高い状態を作り出す。これらの装置は回転運動や往復運動により加圧、昇圧するため、発生する流れはそれらの周期に起因する周期流れとなる。つまり定常流で

* 計測標準研究部門 流量計測科 気体流量標準研究室

はない。厳密に言えば、定常流での校正とは脈動成分が非常に小さい、もしくはその影響が無視できるレベルの範囲で流量計の特性を評価する作業といえる。すなわち、定常流は非常に特殊な条件であり、かつ非定常流の一種類と見ることができる。言い換えれば、実際に測定する流れは非定常な流れである場合がほとんどである。そのため、流量計の非定常特性の計測は非常に重要な問題となってきた。

そこで本稿では、気体の脈動流量計測の経緯と現状を整理するとともに、脈動流量標準の整備に向けた課題をこれまでの研究成果や技術的アプローチを踏まえながら調査する。また、今後の気体の脈動流量標準に必要な情報を明示し、検討を行う。

2. 気体の定常流量計測

2.1 計測とトレーサビリティ

一般に、科学技術分野では測定結果を比較検討することがよく行われる。流量計測においても例外ではなく、トレーサビリティによる国際標準から国内標準、そして末端への校正伝播のシステムが確立されている。ここで重要となるのが、測定が共通の尺度によって行われることにある。この点から校正装置および校正そのものの行為は、測定における基本行為といえる。

流量計でも同様である。実際に流体を流し、流体の流れによる指示を校正した測定器を用いて、この測定器の指示値と試験した測定器の指示値とを比較する。これは実流試験とも呼ばれる。

2.2 特徴

測定対象の物理的特徴をまとめる。気体、液体を問わず流体の種類により様々な性質を有している。一般に液体では作動流体として水がよく用いられるが、油圧機器¹²⁾に用いられる油も重要となっている。しかしこれらの場合、流体の圧縮性を考慮することはほとんどなく、特殊な条件を除いて統一的に非圧縮性として取り扱うことができる。一方、気体の場合、その圧縮性による影響を十分検討しなくてはならない。なぜならば、気体の密度は圧力と温度の関数だからである。また実際の気体を流しての実流試験は、取り扱うガスの特性などから困難な場合も多い。したがって多くの場合、空気もしくは窒素ガスを利用して計測機器の校正を行い、他の気体での使用を想定した補正を行うことで対応をしている。実際、気体中流量でも空気のみを測定対象の流体として現時点では規定している。

その他、流量計は流体の物理的性質だけでなく、流れの状態によっても測定結果に影響を受ける場合がある。したがって、校正時には実際の流れと同じ状態（例えばレイノルズ数を一致させるなど）とすることが望ましい。言い換えれば、同じ体積流量でも温度や圧力の条件によって流れの状態は異なる場合があり、普遍的な視点で評価することに留意しなければならない。

2.3 流量計の種類

流量計はあらゆる場面で活用され、古くから種々の方法が提案されている。それらは直接測定方式と間接測定方式に大別できる¹³⁾。直接測定方式は単位時間に流路断面を通過する流体の体積もしくは質量を直接測定する手法である。間接測定方式は流速などの流量と一定の関係を有した物理量を測定し、間接的に流量を算出する手法である。

直接測定方式の例には、油層中におけるベル（沈鐘）の内容積が密封された状態でベルの上下する速度から体積流量を測定するベルプルーバ¹⁾や、ガスメータなどの一定体積の流体を送り出す回数により測定する容積式流量計¹³⁾などがある。

間接測定方式としては、流路中に設置された物体の前後の圧力差を測定する絞り流量計^{14)、15)}や、差圧が一定となるように流路の通過面積を調整する面積式流量計¹⁶⁾、流体の流れの中に設置した羽根車に働く力により回転運動を生み測定するタービン流量計¹⁷⁾、加熱物体の冷却率が流速の関数と対応関係を有する特性を利用した熱式流量計¹⁸⁾、コリオリ力を利用して質量流量を測定する流量計、ファラデーの電磁誘導の法則を利用した電磁流量計¹⁹⁾、ドップラ効果を利用する超音波式流量計¹⁸⁾やカルマン渦を利用した渦流量計²⁰⁾などがある。

近年の傾向としては、センシング技術の進歩から超音波流量計やコリオリ流量計に関する話題が注目を集めている。また、化学分析や環境計測、水素を利用した燃料電池技術などでの活用も多く見受けられる。流量計測の利用分野について、圧力・流量範囲および主として用いられる流量計の種類を表1にまとめる^{1)、21)}。この表は概要のみであるが、非常に多くの手法が使用条件に合わせて使い分けられていることが分かる。

2.4 気体流量標準の現状

気体流量標準はその流量範囲から、気体小流量および気体中流量に分けて供給がなされている。気体小流量は衡量法に基づき、圧力容器に充填したガスの質量変化と充填時間から算出する方法^{7)、8)}である。拡張不確かさ（包

表1 Flow rate measurement and the use field

Pressure range	Flow rate range	Use field	Flow meter
Over 2 [MPa]	Over 10,000 [m ³ /h]	Performance evaluation such as aircraft engines, Gas pipe line, Natural gas power plant	Ultrasonic, Sonic nozzle, Turbine, Orifice
Atmospheric ~ 1 [MPa]	Over 10,000 [m ³ /h]	Compression blower, Aircraft aerodynamic, Natural gas pipe line, Area conditioning	Ultrasonic, Sonic nozzle, Turbine, Orifice
Atmospheric ~ 0.5 [MPa]	Over 1,000 [m ³ /h]	Steam, Process control, Fuel cell, Natural gas	Ultrasonic, Sonic nozzle, Orifice, Vortex
Atmospheric ~ 0.5 [MPa]	Over 5 [m ³ /h]	Process control, Fuel cell, Hospital, City gas	PD, Sonic nozzle, Variable area, Gas meter
Atmospheric ~ 0.3 [MPa]	0.002 ~ 5 [m ³ /h]	Gas collection, Chemicals, Fuel cell, City gas	Thermal, Gas meter, Sonic nozzle
Atmospheric ~ 0.3 [MPa]	0.0001 ~ 0.002 [m ³ /h]	Leak measurement, Environmental analyses, Semiconductor manufacturing	Micro nozzle

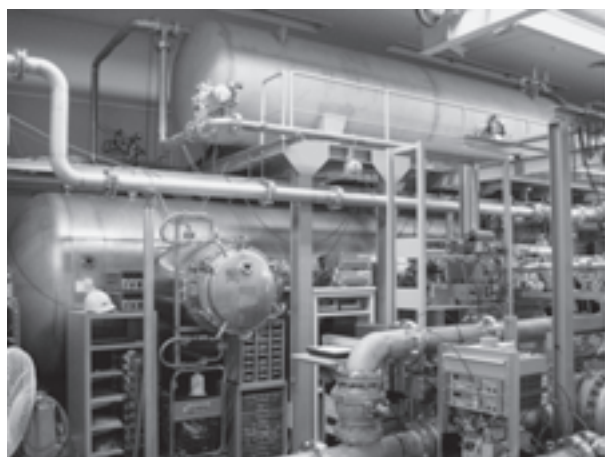


図1 Overview of constant volume tank system for gas medium standard

含係数 $k=2$)は0.25 %である。一方、気体中流量は図1に示すような設備を用いる定積槽方式⁵⁾と呼ばれる手法を用いる。あらかじめ窒素ガスを充てんすることで質量の値付けを行い、ガス充填前後の温度・圧力を計測して気体の状態方程式から質量変化(体積変化)を、また充填

時間をバルブの開閉動作に計時機能をもたせて計測し流量を算出する。ISO型音速ノズルについては、0.1 MPa ~ 0.5 MPaの圧力範囲において校正範囲が5 m³/h ~ 200 m³/hで、拡張不確かさ(包含係数 $k=2$)が0.17 %である。いずれの場合も、単位時間当たりの移動量である質量流量及び体積流量を容器内に充填する形で、質量もしくは体積へと積算し、積算時間を同時に計時することで計測を実現している。気体中流量ではこの音速ノズルを基準とした比較法⁵⁾もあり、0.1 MPa ~ 0.5 MPaの圧力範囲において校正範囲が5 m³/h ~ 1000 m³/hで、拡張不確かさ(包含係数 $k=2$)が0.28 %となっている。

3. 気体の非定常流量計測

3.1 脈動流を含む非定常流れの分類

脈動流は大きな括りとして非定常流れの一種²²⁾⁻²⁴⁾と考えることができる。本稿における調査を本格的に遂行する前に、非定常流れの分類を整理する。ただし、液相か気相、また混相流なのかによってもその分類は異なるため、ここでは特に気体の非定常流れに関して議論することとする。

まず、非定常流れと言っても、変化の仕方によってその種類や呼称が異なってくる。例えば、周期的な非定常流れは脈動流、押し出したり引いたりを繰り返す往復流、往復流の中でも時間平均としては押し出す成分が大きいものを拍動流などと呼んでいる。またその流量波形は基本的に正弦波として表現される。さらに一つの周波数成分のみではなく、複数の周波数成分を含んだ周期性を有する流量波形なども各種計測現場で確認されている。

非定常流れの整理方法の一つとして、流体関連の振動現象という視点からまとめる事例²³⁾がある。これによれば、定常流と非定常流の二種類にまず分別している。定常流では、特に外部流れと内部流れの二種類に分け、前者は渦励起の振動や音響共鳴、各種弾性振動などを包含している。一方、内部流れではサージングや配管振動などがその例となっている。これらの多くは、共振や共鳴現象などに代表されるように特有の周期性が支配する流れであることが特徴といえる。

次に非定常流のカテゴリーについて整理する。はじめに脈動流である。ここには特に強制振動、すなわち配管内の流体による強制振動²⁵⁾⁻²⁷⁾や共振現象、管内流体振動に伴う配管振動²⁸⁾、音響による励起振動などが属する。その他、乱流への遷移や流れ場が乱流であることに伴う励起振動なども挙げる事ができる。さらに流れの急激

な変化を有する場合として、水撃やキャビテーションなどの圧力振動なども、この非定常流の範疇に入る。

そのような中で、特に近年注目されているのが、送風機やポンプによるサージングなどの脈動現象²⁹⁾や、流体の強制振動、共振に伴う脈動流を対象とした測定技術である。例えば、脈動流量計測の活発な分野として自動車業界が挙げられる。ここでは吸気、排気に伴う脈動流量の正確な測定技術確立が急務となっている。現行の平成17年度自動車排出ガス規制をさらに厳しくした次期排ガス規制をクリアする革新技術を確立するためには、これまで以上に脈動流の直接瞬時流量計測可能な機器および評価環境整備が必須となっていることに注目したい。この分野では、高速応答性を実現する高付加価値の流量計開発や流量計測技術の確立にむけて、メーカー間の競争も激化している。最近では、熱式流量計³⁰⁾⁻³²⁾やピトー管式流量計¹⁰⁾など、それぞれの方式の長所を生かしながら、測定を実現している研究報告が見受けられる。しかしながら、これら流量計の動特性をどのように補償したのか、詳細は不明である。また原理的に高速応答性を有していることは理解できても、実流測定の結果を明示した例はほとんどない。この要因として、補償方法が確立されていないことが考えられる。

3.2 脈動流に関する学術的研究

前節の分類からもわかるように脈動流と一括りにしても多種多様である。本稿では特に周期性を有する流れを脈動流として捉え、以下で整理を試みる。

1950年代、脈動流に関する理論的解析が数多くなされた。代表的なものとして、円管内の速度分布解析を行ったJ.R.Womersley³³⁾やS.Uchida³⁴⁾の事例がある。また1980年頃には、円管内の助走区間内における流動現象を解析した横田らの事例³⁵⁾や管路内過渡現象について北川³⁶⁾や香川³⁷⁾らの研究成果も報告されている。

一方で、気体の脈動流を計量標準として取り扱う機関はほとんど見受けられない。一部で挑戦的に試みられているのが現状であり、有効な解決策は明示できていない。そのような中で、R.C.Mottramらによるオリフィスやベンチュリなどの脈動流量計測³⁸⁾⁻⁴⁰⁾は実流評価を伴ったものであり、ここ数十年において先駆的な研究と位置付けることができる。またC.R.Stoneら⁴¹⁾の粘性を用いた流量計の解析も興味深い。

ドイツのLSTMのグループらは、非定常流量計測に関する研究⁴²⁾⁻⁴⁴⁾を行っている。ただし脈動流量というような流量計測の概念でのアプローチではなく、非定常流れという物理現象論の色合いが濃い。実際、矩形波状の流

量波形やインパルス状の流量波形などを活用した管内流れの状態遷移の観測研究^{45), 46)}が多くなされている。他にも流体の非定常現象に関しては、流れ方向が切り替わる場合を含めて検討した研究例⁴⁷⁾⁻⁵³⁾などの知見が見受けられるものの、計測という概念に基づいて、非定常流れおよび非定常流量を取り扱っている事例は少ない。

一方、1950年代より脈々と研究がなされている領域として医療分野がある。古くは人体の血液の流れを理論的に解析²⁴⁾することに始まり、その結果から作動流体が気体の場合へと理論拡張されてきている。近年では人体をはじめとする動物の呼吸現象^{54), 55)}に関する研究が数多く報告されている。特に肺の中の流れを評価する際、ピストンやそれを内包する人工呼吸器を用いて人為的に脈動流を再現し、気道内気流解析や実流評価などがなされている点は興味深い。

3.3 気体の脈動流量計測の現状

流量は、定義からも明らかなように単位時間あたりに移動する体積もしくは質量を示している。つまり、本来時々刻々変化する値である。この点を踏まえつつ、産業界をはじめとして学術研究の分野も問わず、大きく2種類のアプローチ方法がとられている。一つはある時間の間に流体がどれほど移動したかという平均値の把握を重要視する場合である。そしてもう一つが、時々刻々変化する流れを直接測定する場合である。産業界では工業的側面から前者の時間平均流量が特に重要と言われている。多くの産業界の現場で計量に携わっている技術者の声を拝聴しても、瞬時流量よりも積算流量やその平均流量がどのように推移するかが重要だとの声が支配的である。これは、経済取引活動を伴う計量活動が対象となるためであり、経済的損失を生じることは最優先で避けなくてはならないことに起因している。ところが、非定常流の計測において問題を複雑化させているのは、速度、圧力、密度が時間や場所によって変化し、ただ時間平均処理を行って測定すれば十分とは必ずしも言えない。

これらを踏まえつつ、気体の脈動流量計測では直接流量の変化を計測する試みが行われてきている。その歴史を紐解いてみると意外に古い。1970年代から1980年代にかけて、脈動流におけるオリフィスの流量特性と測定誤差を評価する事例^{56), 57)}が報告されている。また面積式流量計の例⁵⁸⁾なども報告されているが、多くの場合、試験する流体を実際に流して評価する実流評価と誤差要因の検討がほとんどであった。ところが近年の産業界では、脈動流量計測の重要性が認識されるに伴い、脈動によるトラブルも頻発しつつある。ゆえに、脈動流自体を直接、

かつ高速に計測したいというニーズが流体制御を行っている産業界から望まれるようになってきている。さらに、脈動流を含む流動現象下でも流体制御を実現したい要求なども見受けられ、より高度な流量計測制御技術の開発にも期待が寄せられている。

一方で、脈動流にさらされた流量計の影響を評価する方法はまだ十分に整備されていない。一部前述の R.C.Mottram らの成果に基づいて、ISO/TR 3313⁵⁹⁾ がまとめられている。しかしこのテクニカルレポートでは、対象の測定機器がオリフィスやベンチュリ等限定的であり、かつ脈動流も逆方向流れを含まず、かつ流量振幅が小さい場合を想定しているのみである。したがって、近年の半導体製造技術を活用した熱式流量センサなどに関しては指針すらなく、多くの場合、メーカー独自の評価基準を設け、それと照らし合わせて比較しているのが実情である。よく見受けられる例として過渡的な変化に対する応答を評価する手法がある。決して不十分とは言えないが、十分に妥当性を有した評価となっているとも言えない。管路内での過渡的な流れは電磁弁等の開閉などを利用することにより、容易に発生可能である。事前に発生流量の最大値を調整することもスピコンを使用すれば実現できる。しかし、過渡的な流れ自体は管路内の衝撃波を含む圧力伝搬や急激な気体の温度変化を誘発してしまい、正確に圧力や温度、流量を制御した状態を実現することは難しい。また、過渡的な流れは一般に複数の周波数成分を含む合成波の一つであり、特定の周波数成分について評価するには煩雑さが懸念される。

その他、脈動流を生じている多くの現場では脈動流自体を計測するのではなく、何かしらの工夫によって脈動を除去もしくは低減化し、その上で計測を行うことが多くなされている。すなわち、測定困難な現象を直接捉えるのではなく、困難な現象を除去して考えるという手法である。確かに、この場合脈動流の瞬時値計測が必要なく、一方で脈動流にさらされた計測機器の測定における問題の解決を図っている点で適切といえる。また定常流で校正した流量計本来の使用方法に合致できることから有効な対処法の一つといえる。しかし、平滑化のための設備増設対策が必要となり、コストや整備環境の観点から必ずしも万能な対策とは言い切れない。

3.4 脈動流量計測の実例

超音波流量計を用いた脈動流量計測の実験例がいくつか報告されている。また流量計測という枠組みにとらわれないとすると、非定常流れにおいて流速変化を測定することで脈動流を測定し評価する研究報告も多々ある。

さらに、トラブルや問題を誘発する脈動流を再現するために、さまざまな手法を用いて実現し、その環境下で実流測定する事例もある。

時々刻々の流れを測定する際に用いる流量計としてはいくつかの手法があるが、ここでは研究事例の比較的多いコリオリ式流量計⁶⁾、⁶⁰⁾、⁶¹⁾を取り上げる。このコリオリ式流量計はコリオリ力を利用した流量計である。U字型のチューブ2本をその軸に垂直方向に位相をずらして振動させると、U字型チューブ内を流体が流れるとそのときの質量流量に対応したコリオリ力が流体に作用し、二本のチューブの振動に初期の位相からのずれが生じる。この位相差を計測し質量流量を計測する手法である。しかしながら、気体の流量計測への適用は、気体の密度が小さいため、発生するコリオリ力自体が非常に小さく、検出すべき位相差も小さいため克服すべき課題は多い。その他に、熱式流量計や超音波式流量計⁶²⁾~⁶⁴⁾を用いた非定常流量計測の事例は紹介されているが、まだ多くの解決すべき課題を有しているのが現状である。特に測定管路内における速度分布の影響評価が重要であることが知られているものの、特定条件での問題を解決しても万能に活用できるようにはなっていない。さらに産業界でよく使用されているオリフィス流量計⁴⁰⁾、⁵⁶⁾についてもいくつかの文献が見受けられる。詳細については、第5章で述べる。

3.5 傾向と課題

気体の脈動流量計測においては、その脈動流自体を積極的に計測し、新たな革新的技術へと結びつける流量制御技術の側面と、脈動流を減衰させ回避することで流量計測を行う二種類があることをこれまでに述べた。

ここで、各種流量計の脈動流量計測に対する適応度の評価を試みてみたい。ただし、現時点では定量的な議論は難しいため、定性的な議論とする。気体の定常・非定常流量計測における総合的な不確かさを横軸とし、非定常流における追従性・応答性の程度を縦軸とした図2を示す¹⁾、²⁾、⁴⁾、⁶⁾、¹³⁾、¹⁸⁾、²²⁾、³⁸⁾、⁶⁵⁾~⁶⁷⁾。なお本図は、あくまでも測定原理・特徴や現在までの研究成果報告などを踏まえた概念図に過ぎないことに留意していただきたい。この図において横軸は不確かさの大きさを示しており、図の右側にいくほど不確かさが小さく高精度であることを示している。逆に図の左側は不確かさが大きい。また縦軸では流れの周波数変化の大きさを示し、斜線部分は定常流、それよりも周波数が高い領域は非定常な流れであることを示している。ただし、各測定原理に基づく流量計測機器は定常流において測定できることは言うまで

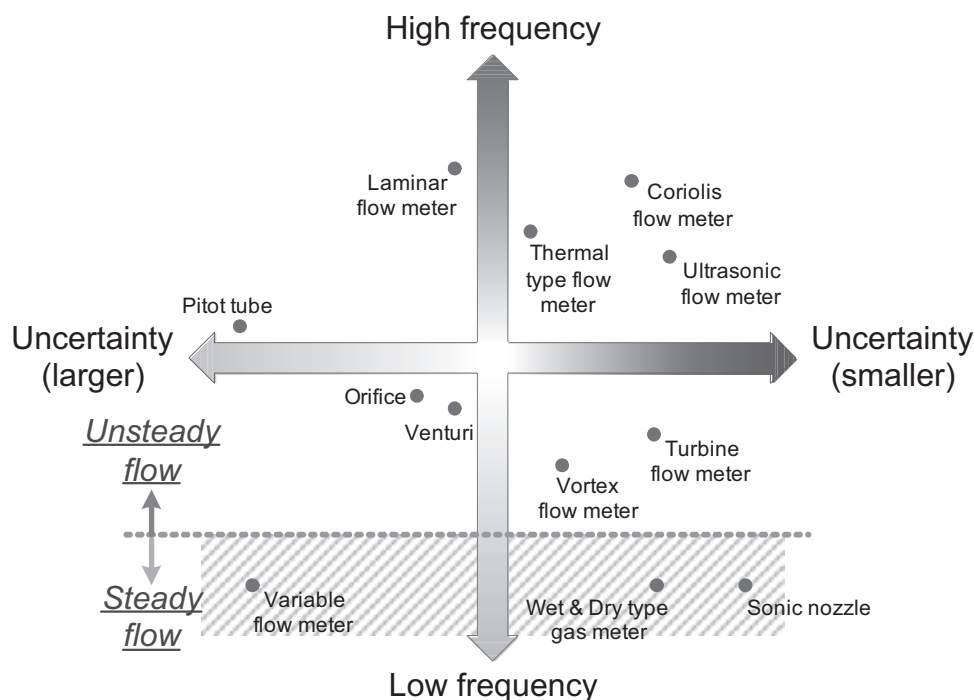


図2 Correspondence relationship of gas flow meters in a pulsatile gas flow measurement

もない。各プロット点は種々の流量計における測定可能な周波数の大きさを表している。この図より、流量計の測定原理やその特徴から、定常流量計測では不確かさの小さい音速ノズルによる流量計測が有用であること、一方簡便ではあるが精度はそれほど期待できない面積式流量計があることがわかる。また非定常流量計測では、高速応答性を有しているといわれる熱式流量計や超音波式流量計などの方式がよく用いられている。層流形流量計も応答性の良い流量計の一つである。しかし、気体用流量計の動特性を校正するガイドラインは現在まで策定されておらず、産業界からのニーズに対応する有用な情報発信が望まれ、図2のようなマッピングは今後より重要度が増していくものと思われる。

以上のように、脈動流量計測はその取り組み方が種々あり、また産業界、学术界を問わず統一的な議論がなされてきたとは言えない。なぜならば、議論を行う共通のプラットフォームとなる統一的な評価基準が整備されていないことに起因しているためと考えられる。この問題を解決するために、脈動流量標準の確立に向けた取り組みを進めることは有用といえる。次章以降で、脈動流量計測の評価手法について紹介し、課題や今後の展望をまとめしていく。

4. 脈動流量標準整備に向けた技術的アプローチ

気体の脈動流量標準整備に向けて、気体用流量計を安定して動特性評価を可能とする手法や装置の整備が必須となっている。本章では、その問題を解決する技術的なアプローチについて検討する。気体の脈動流を再現する手法は様々であるが、大別すると以下の三種類に分けることができる。一つ目は所定の空間から発生する流量を制御可能として発生する手法²³⁾である。簡便に活用できるものの、気体の状態方程式などは特段の場合を除いて考慮されていない。二つ目に、音速流れである閉塞状態を活用した開口面積制御による手法^{23), 42), 56)}である。この場合、直接流量を制御するというにはならないが、前者と比較して、より高精度で高速な流量発生が可能といえる。そして最後に挙げるのが、温度変化を補償した非定常流量の発生手法⁶⁸⁾である。この技術は、東京工業大学 精密工学研究所 香川・川嶋研究室のグループによって開発がなされた。特徴として、気体の温度変化を吸収する機構を提案し、温度変化の高速計測を行わずに、容器内の圧力を制御することで流入出する質量流量を制御可能としている。これら手法において、その特徴から一長一短は見受けられるが、標準整備の観点を考慮すると、発生する質量流量の制御性を有する手法は十分な魅力を有しているといえる。以下、各手法の特徴をまとめる。

4.1 ピストンを利用した方法

脈動流の実流評価を検討するに際して、古くから実践されてきている方法の一つである。この方法では、管路の途中や末端に接続したピストンの往復運動により脈動を発生させ、その体積変化から流量変化を誘発し、脈動流を発生させる方法^{23), 57)}である。この方法は非常に簡便に脈動を再現できる長所を有している。また、実際の脈動発生源はこのようなピストンやそれを内包するポンプなどであり、実際面にかかなり近い実流評価を実現できる。しかしながら、ピストン内部の気体の状態変化について十分検討している事例は少なく、また仮に考慮した事例においても温度変化の非定常性まで十分に検討はなされていない。したがって、発生している脈動流を直接かつ高精度に測定することは困難といえる。

一方で、脈動流の中でも流れ方向が切り替わる往復流の再現には適した機構といえる。また、高周波数成分を含む脈動流の再現は、ピストンの往復運動の周波数を高くすることで対応可能であり、容易といえる。

4.2 回転板を利用した方法

一方向の脈動流を発生させる手法として有効と考えられるのが、回転板を利用する手法である。この方法は、回転板に設けた孔の開口面積を回転機構により連続的に可変させ、流量変化を生じさせる^{56), 69)}ものである。直接流量を制御することにはならないものの、開口面積の時間的変化が明確であれば、ある程度発生する流量波形を規定できる。また回転板の回転数と孔の個数により、高周波数成分を含む流量波形を再現できる特徴を有している。さらに、大流量域での脈動流再現については有用性が高い。なぜならば機構はシンプルでありながら、流量変化は回転板を回転させるのみで実現できるからである。しかし、逆流を伴うエンジンの吸気や呼吸などの往復流再現については、その機構的制約から困難である。

4.3 開口面積制御を利用した方法

4.2節の回転板を利用した方法と似ているが、流量制御弁の開口面積を制御する手法によって可変流量を実現するものである。代表的な研究成果としては、F.Durstらによって開発された質量流量発生装置⁴²⁾がある。またノズルの開口面積を変化させて定常流生成ではあるが、より広いレンジの定常流生成を実現する手法⁷⁰⁾なども見受けられる。この手法では圧力や位置に関するシンプルな制御系を構築し、発生流量を高精度に制御できる特徴を有している。ただし、開口部における気体の状態変化や流れ場の遷移現象などが誘発しない場合に限定される。ま

た、呼吸などの往復流を再現する場合、ノズル形状を有するようなものを開口面積制御することは少々困難と考えられる。しかし、スプール型の流量制御弁であれば、スプール内でのポート間リーク流量による影響が懸念されるものの、有用性は高いと考えられる。

4.4 等温化圧力容器を使用した方法

等温化圧力容器を用いた非定常流量計測制御技術は1997年に川嶋らの研究⁷¹⁾によって、はじめて世の中に紹介された。それまでの技術では発生流量を直接制御する手法は提案されておらず、その意味も含めて画期的な手法としてデビューを果たした。その成果は、流量計の動特性評価への応用ということで注目を受け、当時半導体製造技術を駆使して作られた熱式センサの動特性評価⁷²⁾にもその有用性が確認されるなどの成果が得られている。また、高速応答性を理論的に補償して設計を行った層流型流量計の応答性能に関する実流評価試験^{66), 68)}などにも活用され、各種空気圧アクチュエータの制御や流量計測評価などへ展開がなされている。

さらに、気体の脈動流を再現するシステムとして、連続非定常流量発生装置^{73), 74)}や往復流を発生可能とする改良がなされた図3に示すような脈動流量発生装置⁷⁵⁾も開発されている。この装置を利用して、エンジンの吸排気や動物の呼吸を模擬可能な往復流の生成や、そのような場面で使用する気体用流量計の評価に成功した事例も報告されている。一例として、周波数10 [Hz]の往復流を発生した結果を図4に示す。縦軸は質量流量、横軸は発生時間を示している。図中の破線は目標発生流量、実線は脈動流量発生装置による発生流量、一点鎖線は高速応答性を補償した層流型流量計による実流計測結果をそれぞれ示している。この結果より、流れ方向が切り替わる

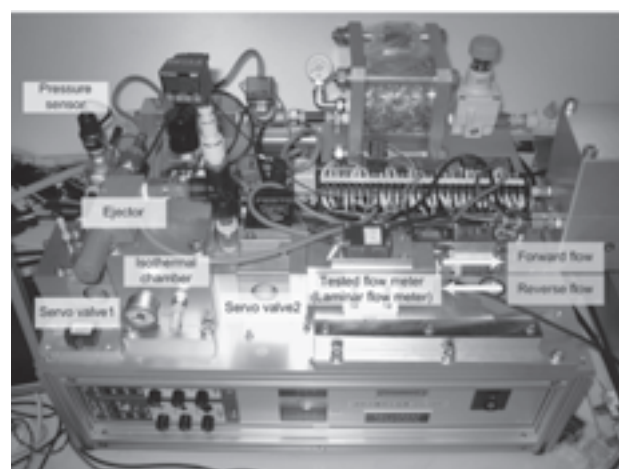


図3 Photograph of oscillatory mass flow generator

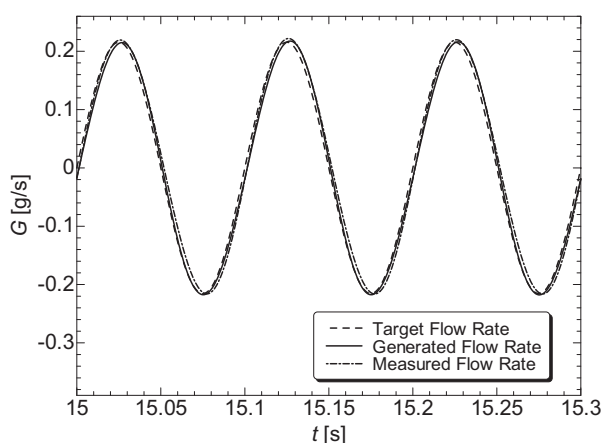


図4 Experimental results of the generated oscillatory flow at the frequency of 10 [Hz] ($G_{ave} = 0$)

往復流の流量波形を高精度に再現できていることがわかる。

5. 気体用流量計による脈動流量計測

3.5節で紹介した気体用流量計の脈動流量計測への適応度について、本章では測定原理ごとに、その特徴や現況を整理する。

5.1 オリフィス流量計

オリフィス流量計は、差圧式流量計の一種であり産業界で最も多く利用されている。脈動流量計測に関しても、いくつかの研究事例⁴⁰⁾が報告されており、その有用性も高い。近年では、半導体製造プロセスの微細加工技術の応用により、高精度化や高速応答性を確保した差圧センサが開発されるなど、センサの性能向上が著しい。これらのセンサを組み合わせることでオリフィス流量計の高速応答性を実現した例⁷⁶⁾も見受けられる。

5.2 ベンチュリ式流量計

ベンチュリ式流量計も、オリフィス流量計と同じく差圧式流量計の一種といえる。オリフィスやノズルと比較して構造上沈殿物が貯留しにくいなどの特徴がある。この流量計の応答性については、実流評価を含めた知見はあまり確認されていないものの、近年10 [Hz]程度の応答性を有するような成果⁷⁷⁾が報告されている。

5.3 ノズル

ノズルはオリフィス流量計と比較して、耐久性に優れるとともに流出係数が大きく、流れ場を乱さない領域で

使用すれば高精度な流量計測が実現できる²⁾。しかしながら、構造が複雑であり、製作に際しては相応の技術レベルが要求されるため高価である。一般に脈動流量計測に用いることはなく、定常流量発生装置の構成機器の一つとして用いられることが多い。

5.4 熱式流量計

熱式流量計^{2), 13), 18)}は、その測定原理から熱式流速計が基本となっている。一般に熱式流速計は非常に高速応答性を有していることが知られており、管路内流速分布などの測定においてよく用いられる。近年では半導体製造プロセスを応用して、面構造の熱式流量センサが開発され多くの気体用流量計の製品が普及している。この熱式流量センサの応答性を評価した事例⁷²⁾もあり、熱式流速計ほどではないまでも高い応答性が確保されている。ただし、脈動流での計測に際しては測定流路における流速分布を予め補償する必要があるなど、最大限の能力を引き出すにはノウハウの蓄積が必要となっている。

5.5 渦式流量計

渦式流量計は、測定管路内に渦を生じる柱状物体などを配置し、そこより生じるカルマン渦列の周波数と流速の関係を利用した²⁾ものである。したがって、前述の熱式流量計と同様、流速から流量を算出する方式である。このことから、脈動流などの非定常流れにおける流量測定には用いられることがほとんどない。特に時々刻々の流量変化に対応して、渦列がどのように生成されるかは不明な点が多く、脈動流計測には不向きといえる。

5.6 超音波式流量計

超音波流量計^{2), 18)}は近年良く用いられる流量計の一つであり、流路計自体の圧力損失は小さく高精度に流量計測ができる特徴を有している。また伝播時間差法²⁾とドップラ法²⁾の二種類に測定原理は大別され、用途に応じて適宜利用されている。特に伝播時間差法を用いた超音波流量計は安価で手に入れることができ、流量の大小を問わず利用されている。気体の脈動流量計測においても同方式のものが良く用いられ、その特性評価した事例も数多い。

5.7 層流式流量計

層流式流量計¹⁸⁾は管路壁面の粘性による圧力損失を利用した流量計である。前述のオリフィス流量計では、測定流量と生じる差圧の関係が非線形となるが、この層流式流量計は測定流量と生じる差圧との間に線形関係を有し、

測定管路内の流れ場が層流状態であることを最大の特徴としている。また、管路内の流れ場が層流であるため、脈動流が管路を通過する際の圧力や流量変化は理論的に導出可能であり、1950年代を中心に数多くの研究成果^{33), 34)}が報告されている。また層流式流量計の応答性に関する議論も1970年代ごろを中心に活発に行われ²²⁾、優れた応答性を有していることが知られている。近年では、正確に脈動流を再現できる装置を活用した実流評価もなされ、高速応答性を補償した層流式流量計⁶⁶⁾も提案されている。

5.8 コリオリ式流量計

コリオリ式流量計はコリオリ力を測定して直接質量流量を測定する方式の流量計²⁾である。歴史的には比較的新しい。高精度測定が可能であり、磨耗などを起こす機械的可動部がなく保守性に優れ、チューブの振動数計測から密度を導出できるなど多くの特徴を有している。脈動流量計測に対しても追従性が高いといわれているが、測定対象が気体の場合、検出できるコリオリ力が非常に小さいため不向きである。しかし、液体や高压ガスなど密度が比較的高い流体の流量計測については得意としている。

6. 気体の脈動流量標準確立への課題

産業界のニーズを満足しつつ、有用な気体の脈動流量標準の確立を目指す際には、以下のような課題が挙げられる。一点目に、脈動流の瞬時流量値の計測の応答性と精度およびそれらの必要レベルの明確化である。二点目に、脈動流平均値の精度補償と信頼性向上である。三つ目に、気体流量計における周波数応答特性の評価手法の確立である。四つ目に流れ方向切り替えの有無や周期性を有さない非定常な流れへの拡張である。五つ目に、圧力や温度、湿度など現場脈動にどれだけ近い流動場を正確に再現でき、かつそれらを評価可能な環境へと整備していくかである。

気体の非定常流れにおいて、圧力および流量の両方が非定常に変化することは自明である。しかしながら、仮に脈動流量発生装置ができたとしても、供試流量計が設置される環境は、物理条件である温度、圧力、湿度、流体の物性などの影響を受ける。また、供試流量計を設置している配管仕様や供試流量計自体のインピーダンス特性により、全ての同一条件を再現することは困難といえる。そのため、脈動流下で計測する気体用流量計に対する統一的なガイドライン整備に向けて、いくつかの大勢を占める基準や条件を整理・抽出し、優先順位の高い項

目に沿った指針を構築することがまずは必要と考える。

4.4節で紹介した等温化压力容器による流量制御系を内包した装置における発生時間の制約解消⁷⁴⁾は、気体用流量計の動特性校正技術確立等に向けた進展に大きく寄与した。また往復流発生への展開も実現でき、世界に類のない新しい技術が確立するに至りつつある。しかしながら、現場での流量計測評価における重要な因子、すなわち脈動流の平均値評価に関する観点が欠落している。前述したように、脈動流評価では脈動流の瞬時値評価と、ある時間内での平均値を評価する場合の二種類に大別できる。産業界では特に後者のほうが重要度は高く、前者はごく限定されたフィールドでしか活用される場面はない。4.4節の脈動流量発生装置は、流量計の応答性評価という視点では高い有効性を示すことができたが、平均値を補償、評価する手法としては問題点も多い。そこで昨年度から、音速ノズルを活用した新たな発生流量平均値の補償方法の開発が進められ、実用化に向けた検証ならびに課題の克服が進められている。また、究極的な時間平均成分の補償方法として有効な手法は、容積が既知の压力容器内に脈動流の気体を回収して積算し、回収時間で除して算出する衡量法の利用である。いずれにしても、時々刻々変化する動きのある流れを直接計測する方法と、容器に回収するなどの間接計測する方法とをうまく組み合わせ問題解決していく必要がある。

7. まとめ

本稿では気体の脈動流量計測の変遷と現状を整理した。特に気体用流量計の動特性補償に用いる評価手法に着目するとともに、各種気体用流量計の応答性について概説した。また、これらの研究成果などを踏まえて、脈動流量標準の将来性を検討するのに必要な情報を整理した。

今後の展望として、産業界における脈動流量計測への関心度がどこまで伸びていくかを見極めながら、ニーズに対応した気体の脈動流量標準の確立などを進める必要があると考える。特に、現時点ではそれほど問題となっていないとしても、次世代のエネルギーや環境関連の革新的な技術開発やその評価手法の整備において、間違いなく気体の脈動流量計測技術は必要不可欠なものになると思われる。また、多くの場合、高精度で脈動流量を計測する機器は試行錯誤的に製作され、共通化された評価方法によらず性能を顕示していることを考慮すれば、脈動流量標準を整備していくことは当然の流れといえる。ただし、多くの留意点があることも同時に認識しておく必要がある。たとえば、仮に脈動流量標準を整備できた状況

下で、その標準の有用性や妥当性が産業界から評価されなければ意味がない。つまり、産業界を含めたユーザーからの意見聴取を欠かすことなく、実用的なガイドライン構築を目指すことが重要と考えられる。

以上を踏まえ、気体の脈動流量標準に必要な因子を整理する。一つ目は、脈動流の瞬時流量計測を可能とする機器を校正するための装置および評価手法の確立である。これは高精度な流量計測制御技術の実現と革新的技術の開発にむけた基盤整備の一環として重要と考えられる。二つ目に、脈動流における平均流量評価手法の確立である。脈動流の変化の大きさやその有無によらず、時間平均流量やその積算値の評価を高精度に実現できれば、産業界のニーズともマッチングできるものと思われる。

最後に、本稿が気体の脈動流量計測にかかわる技術者、研究者への一助となれば幸甚である。

謝辞

本調査研究を遂行するにあたり貴重な助言を頂戴しました流量計測科長高本正樹氏、液体流量標準研究室室長寺尾吉哉氏、気体流量標準研究室の皆様には謝意を表します。また本稿で取り上げた等温化圧力容器による気体の非定常流量計測の開発は、東京工業大学精密工学研究所の香川利春教授、川嶋健嗣准教授のアイデアおよびアドバイスをいただき遂行できたものであります。末筆ながら感謝申し上げます。

参考文献

- 1) R.W.Miller, Flow Measurement Engineering Handbook, McGraw-Hill, 3rd ed., New York, (1996)
- 2) (社)日本計量機器工業連合会編：計装エンジニアのための流量計測AtoZ, 工業技術社, (1995)
- 3) E.A.Spencer 著, 石川重次訳：流量標準過去と現在, NEL, (1985)
- 4) (社)日本計量機器工業連合会編：流量計の実用ナビ, (社)日本計量機器工業連合会, (2005)
- 5) M.Ishibashi, T.Morioka: The renewed air flow standard system in Japan for 5-1000m³/h, Flow Measurement Instrumentation, Vol.17, pp.153-161, (2006)
- 6) 中尾晨一：知っておきたい流量計測をより正確にするための知識, 日本工業出版, (2004)
- 7) Shin-ichi Nakao, Yoshikazu Yokoi, Masaki Takamoto: Development of a calibration facility for small mass flow rates of gas and the uncertainty of a sonic venturi transfer standard, Flow Meas. Instrum., Vol.7, No.2, pp.77-83, (1996)
- 8) 中尾晨一：気体用微小流量校正装置の開発と標準移転用流量計としての音速ノズルの特性, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.65, No.630, pp.677-683, (1999)
- 9) 例えば参考として, <http://www.jcsslabo.or.jp/>
- 10) 中村博司他：PITOT 管流量計によるエンジン脈動流計測の解析, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.70, No.695, pp.1673-1678, (2004)
- 11) Frank M.White: Viscous Fluid Flow 3rd.Ed, McGRAW-HILL, (2006)
- 12) 日本機械学会編：機械工学便覧基礎編A5 流体工学, 丸善, (1986)
- 13) 川田裕郎他；流量計測ハンドブック, 日刊工業新聞社, (1979)
- 14) ISO5167: Measurement of fluid flow by means of orifice plate, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full, (2003)
- 15) JIS Z 8762：絞り機構による流量測定法, (1998)
- 16) JIS B 7551：フロート型面積流量計, (1999)
- 17) JIS Z 8765：タービン流量計による流量測定法, (1980)
- 18) 小宮勤一：流体量の測定, 倉書店, (2005)
- 19) JIS B 7554：電磁流量計, (1997)
- 20) JIS Z 8766：渦流量計, (2002)
- 21) 中尾晨一：知っておきたい流量計測をより正確にするための知識, 日本工業出版, (2004)
- 22) 非定常流の流速流量の測定に関する調査研究分科会：非定常の流速流量の測定に関する調査研究分科会報告, 日本機械学会誌, Vol.75, No.638, pp.452-461, (1972)
- 23) 日本機械学会編：事例に学ぶ流体関連振動, 技術堂出版, (2003)
- 24) M.Zamir: The Physics of Pulsatile Flow, Springe-Verlag New York, Inc., (2000)
- 25) 角田勝他：く形断面曲り管内の脈動流 (第1報, 縦横比が1の場合の数値解析), 日本機械学会論文集 (B編), Vol.51, No.469, pp.2872-2879, (1985)
- 26) 多田茂他：曲がり管内の脈動流, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.59, No.564, pp.2377-2385, (1993)
- 27) M.Sumida: Pulsatile entrance flow in curved pipes -effect of various parameters-, Experiments in Fluids, Vol.43, pp.949-958, (2007)
- 28) 田中守他：管内流体振動による配管振動に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.53, No.487, pp.591-597, (1987)

- 29) 松田博行他：管内圧力脈動の現場計測にみられる高周波成分について，日本機械学会論文集（B編），Vol.53, No.496, pp.2510-2514, (1987)
- 30) 石川人志他：高精度エンジン空気流量計測技術，電気学会論文誌E（センサ・マイクロマシン部門誌），Vol.126, No.8, pp.381-386, (2006)
- 31) 小渡武彦他：信号処理による自動車用熱線式エアフローセンサの検出誤差補正，日本機械学会論文集（C編），Vol.65, No.630, pp.198-203, (1999)
- 32) 小島多喜男他：マイクロヒータの信頼性評価と車載用センサへの応用，電気学会論文誌E（センサ・マイクロマシン部門誌），Vol.126, No.8, pp.397-402, (2006)
- 33) 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, pp.553-563, (1955)
- 34) S.Uchida: The pulsating viscous flow superposed on the steady laminar motion of incompressible fluid flow in a circular pipe, *Z.Angew.Math.Phys.*, Vol.7, pp.403-422, (1956)
- 35) 横田眞一他：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，Vol.11, No.2, pp.107-114, (1979)
- 36) 北川能他：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，Vol.20, No.7, pp.648-653, (1984)
- 37) 香川利春他：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，Vol.20, No.11, pp.1014-1018, (1984)
- 38) R.C.Mottram: An overview of pulsating flow measurement, *Flow Meas. Instrum.*, Vol.3, No.3, pp.114-117, (1992)
- 39) R.C.Mottram: Damping criteria for pulsating gas flow measurement, *Flow Meas. Instrum.*, Vol.1, pp.15-23, (1989)
- 40) P.Gajan, R.C.Mottram, P.Hebrard, H.Andriamihafy, B.Platet: The influence of pulsating flows on orifice plate flowmeters, *Flow Meas. Instrum.*, Vol.3, No.3, pp.118-129, (1992)
- 41) C.R.Stone and S.D.Wright: Non-linear and unsteady flow analysis of flow in a viscous flowmeter, *Trans.Inst MC*, Vol.16, No.3, pp.128-141 (1994)
- 42) F.Durst, U.Heim, B.Ünsal and G.Kullil: Mass flow rate control system for time dependent laminar and turbulent flow investigations, *Measurement Science and Technology*, Nol.14, pp.893-902 (2003)
- 43) B.Ünsal, S.Ray, F.Durst, O.Ertunc: Pulsating laminar pipe flows with sinusoidal mass flux variations, *Fluid Dynamic Research*, Vol.37, pp.317-333, (2005)
- 44) F.Durst, K.Haddad, A.Al-Salaymeh, S.Eid, B.Ünsal: Mass flow-rate control unit to calibrate hot-wire sensors, *Experiments in Fluids*, Vol.44, No.2, pp.189-197, (2008)
- 45) F.Durst, B.Ünsal, S.Ray and D.Trimis: Method for defined mass flow variations in time and its application to test a mass flow rate meter for pulsating flows, *Measurement Science and Technology*, No.18, pp.790-802 (2007)
- 46) S.Ray, F.Durst: Semianalytical solutions of laminar fully developed pulsating flows through ducts of arbitrary cross sections, *Physics of Fluids*, Vol.16, No.12, pp.4371-4385, (2004)
- 47) C.J.Morris, F.K.Forster: Oscillatory flow in microchannels -Comparison of exact and approximate impedance models with experiments-, *Experiments in Fluids*, Vol.36, pp.928-937, (2004)
- 48) D.Das, J.H.Arakeri: Transaction of unsteady velocity profiles with reverse flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.374, pp.251-283, (1998)
- 49) S.A.Ahmed: An experimental investigation of pulsatile flow through a smooth constriction, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.17, pp.309-318, (1998)
- 50) T.H.Yip, S.C.M.Yu: Oscillatory flows in straight tubes with an axisymmetric bulge, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.26, pp.947-961, (2002)
- 51) A.Cioncolini, L.Santini: On the laminar to turbulent flow transition in adiabatic helically coiled pipe flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.30, pp.653-661, (2006)
- 52) A.W.Lipsett, I.D.Williamson: Response of a cylinder in oscillatory flow, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.8, pp.681-709, (1994)
- 53) X.Wang, F.Bloom: Stability issues of concentric pipes containing steady and pulsatile flows, *Journals of Fluids and Structures*, Vol.15, pp.1137-1152, (2001)
- 54) 酒井英司他：鳥類の気道を模擬した直角分岐管における振動流の構造と一方向流れ，日本機械学会論文集（B編），Vol.71, No.708, pp.2083-2091, (2005)
- 55) 高下和浩他：狭窄管内脈動流の数値シミュレーション，日本機械学会論文集，Vol.71, No.704, pp.1059-1066, (2006)
- 56) 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, 計量研究所報告, Vol.21-3, No.64, (1972)
- 57) 森棟隆昭他: 絞り流量計による非定常流の測定誤差, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.46, No.411, pp.2232-2236, (1980)
- 58) 牧博司, 池田優一: 浮子面積式流量計による脈動流の流量測定, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.46, No.407, pp.1288-1294, (1980)
- 59) ISO/TR 3313: Measurement of fluid flow in closed conduits -Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments, (1998)
- 60) R.Cheesewright, C.Clark: The effect of flow pulsations on coriolis mass flow meters, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.12, pp.1025-1039, (1998)
- 61) A.Belhadj, R.Cheesewright, C.Clark: The simulation of coriolis meter response to pulsating flow using a general purpose F.E.CODE, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.14, pp.613-634, (2000)
- 62) E. Hakansson and J. Delsing: Effects of pulsating flow on an ultrasonic gas flowmeter, *Flow Measurement Instrumentation*, Vol.5, No.2, pp.93-101 (1994).
- 63) J.Berrebi, P.E.Martinsson, M.Willatzen, J.Delsing: Ultrasonic flow metering errors due to pulsating flow, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.15, Issue 3, pp.179-185 (2004)
- 64) H. J. Dane: Ultrasonic measurement of unsteady gas flow, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.8, Issues 3-4, April 1998, pp.183-190. (1998)
- 65) 松山裕: 実用流量測定, (財)省エネルギーセンター, (1995)
- 66) 船木達也他: 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, pp.1008-1013, (2004)
- 67) 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, pp.295-302, (1972)
- 68) K.Kawashima, T.Kagawa: Unsteady flow generator for gases using isothermal chamber, *Measurement*, Vol.33, pp.333-340, (2003)
- 69) 森岡敏博他: 排気脈動シミュレータの特性試験, 計測自動制御学会2005年度産業応用部門大会講演論文集, pp.32-35, (2005)
- 70) J.-H.Kim, H.-D.Kim, K.-A.Park, S.Matsuo, T.Setoguchi, A fundamental study of a variable critical nozzle flow, *Experiments in Fluids*, Vol.40, pp.127-134, (2006)
- 71) 川嶋健嗣他: 等温化圧力容器を用いた空気の非定常流量計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.33, No.3, pp.149-154, (1997)
- 72) 川嶋健嗣他: マイクロフローセンサを用いた管内一点の流速からの気体の振動流量計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.7, pp.549-554, (2000)
- 73) 船木達也他: 気体用連続非定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, pp.461-466, (2006)
- 74) T.Funaki, K.Kawashima, S.Yamazaki and T.Kagawa: Generator of variable gas flows using an isothermal chamber, *Measurement Science and Technology*, No.18, pp.835-842 (2007)
- 75) T.Funaki, S.Yamazaki, N.Yamamoto, K.Kawashima and T.Kagawa: Oscillatory gas flow generator using isothermal chamber, *SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, pp.5212-5217 (2006)
- 76) 井上慎太郎, 川嶋健嗣, 船木達也, 香川利春: 計測融合シミュレーションを用いた非定常管内流れ場のモニタリング, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.7, pp.837-843 (2006)
- 77) Shunpei Yamazaki, Tatsuya Funaki, Kenji Kawashima and Toshiharu Kagawa: A concentration measurement system for binary gas mixtures using two flowmeters, *Measurement Science and Technology*, Vol.18, pp.2762-2768 (2007)