

変動流量に対する流量計の応答性と その評価技術に関する調査研究

芳田泰基^{* **}

(2022年1月31日受理)

A survey work on time response of flowmeter for transient flow rate and its evaluation technique

YOSHIDA Taiki

Abstract

Flowmeters have been developed and calibrated for purposes to utilize under steady flow. Recently, tools for measuring flow rate under unsteady flow however are required more and more in wide industrial field of research and development. Answering such demands, several improvements regarding time response in flowmeters have been reported. Concurrently, a novel system for evaluating time response of flowmeters is necessary in order to test accuracy of time responsiveness in flowmeters. In this survey work, the importance and social demand on flow rate measurement of transient flow are highlighted, and time response of flowmeters based on the principle of several geometrical and methodological types (pressure difference, turbine, electromagnetic, ultrasound, Coriolis, and more) is also surveyed. From knowledge summarized from the previous studies, experimental system and device to evaluate time response of flowmeters are presented in this survey work.

1. 緒言

流量計測の起源は、およそ三千年前の古代エジプトで用いられていたとされる、“clepsydra (水時計)”¹⁾にある。時間計測方法の一つで、容器内に溜めた水が流出することで変動する水面高さから時間を計測するものである。この技術が基となり、容器の横断面積と水頭ヘッドの関数で流量を表す、基本概念の構築に至った²⁾。それから数世紀後、オリフィス式流量計の原型が開発され、古代ローマにおいて家庭用水や風呂水、噴水など、水を分配する際の基準値計測方法として利用されたと伝えられている³⁾。このような歴史的背景から、人類の経済的・社会的発展の上で、流量計測は必要不可欠な評価技術として根付き、今日に至る。現代における流量計測は、流

動物質の輸送・管理・制御の基盤技術として位置づけられ、液体・ガス燃料や配管輸送される液体製品、発電プラントにおける冷却水量の管理といった、幅広い分野で用いられている。産業プラントに実装されているものだけではなく、ガソリン給油量の測定器や、水道メーター、ガスメーターなど、生活基盤を支える計測技術でもある(例えば文献⁴⁾)。これら取引や証明に使用されるものは特定計量器として、計量法第70条に基づいた一定期間ごとの検定が義務づけられ、その精度は法的に維持・管理されている。

このように発展を遂げた流量計測技術は、今なお細分化・更新を続けている。これまで多種多様な物理的・化学的性質を持つ物質を取り扱う現代産業の高度化を支えてきた。輸送圧力の高低や温度の大小、並びに輸送量の大小などといった測定条件への適用性だけではなく、気体や液体、固液及び気液混相流体、高粘性流体、極低粘

* 工学計測標準研究部門 液体流量標準研究グループ

** 工学計測標準研究部門 流量計試験技術グループ

性流体など、対象としての適用範囲が拡大されてきた⁵⁾。これら多様な測定条件及び対象への適用性を担保するため、枝分かれ的に開発され、代表的な例のみ取り上げても、電磁式やコリオリ式、超音波式など、十数種類の流量計が実用化されている。それら流量計は、流量を計測するという同じ到達点を目指した評価技術であるが、その評価過程・計測手段の違いから考慮すべき不確かさ要因が大きく異なる。

このように、数多くの流量計が開発され、その流量計を評価する校正技術は確立されているのだが、高度化が進むにつれて、流量計測の適用対象が時間的に変動するという事例が増えてきた。流量計自体、定常な状態で計測する用途として進展してきたために、流動が非定常に変動する場では、新たな方法・技術を打ち立てる必要がある。事実、それらの検査・校正についても、定常流の下で評価することが大前提と明文化されている。JIS B 8570-1⁴⁾には、“流量は、指定の値で試験している時間中、一定に保つ”ものとし、試験中の流量の相対変動の上限についても数値で定義されている。国内の水道メーターはこの基準に則っており、日本計量機器工業連合会が公開している資料「水道メーター関連法規の手引き」⁶⁾でも、この基準が引用されている。水道メーターに関する国際的な計量基準、OIML R 49-1⁷⁾や、ISO 4064-1⁸⁾においても、定常流においてのみ検査を行うように規定されている。このように時間応答性や安定性については、流量計の検定においても対象とされていないことがわかる。

流量計の変動応答性を考える上で重要となるのは、機械的な慣性や計測素子における時定数特性、乱流や非ニュートン流動など非線形現象、設置環境要因としての二次流れ等、多岐に渡る過渡的要因である。これら過渡応答性に焦点を当てた先行研究は、これまでもいくつか確認できるが、そのほとんどが特定の流量計一つに焦点を絞ったものである⁹⁾⁻¹¹⁾。問題の複雑さから、流量計の時間応答性を統一的に評価する技術については、確立されていない。欧州の国際共同プロジェクト (European Metrology Programme for Innovation and Research; EMPIR¹²⁾) として、変動する流量計測への取り組みが近年開始されたばかりである。このように、流量計測の応答性評価技術は未だ本格的に着手されていないのが現状である。この評価技術の実現には、流量計測における機械工学的な理解だけではなく、非線形な流動への流体力学的な理解、双方が要求される。

本調査研究では、非圧縮性流体の流量計を対象として取り上げ、その中でも、変動する流量の計測に対する時間応答性とその評価方法について焦点を当てる。目的と

して、流量計の時間応答性を統一的に評価する技術の提案を目指す。まず、§ 2では、変動流量計測の社会需要を示すとともに、各種流量計の原理を要約し、想定される“原理的な時間応答性”について調査した結果を記す。§ 3では、過渡的に変動する流動場において、その流量を評価する技術について、その周辺研究と現状について述べる。そして、前節までの議論を踏まえた上で、変動流量を評価する上で考慮すべき不確かさ要因や、流量計の時間応答性に対する評価方法を提案する。

2. 変動する流量の計測に関する現状

本節では、変動する流量の計測とその評価技術における社会需要を考察するとともに、非定常な流動場での流量評価に関する先行研究を示し、その研究動向と現状をまとめる。

2.1 変動する流量の計測における社会需要

非定常な流動は、可制御下にある産業プラントであっても平常運用で起こりうる。弁の開閉による変動や、流体輸送ポンプによる脈動、曲がり管下流の二次流れなどが具体的な例として挙げられる。その他、熱流体工学では水蒸気を含む気液二相流、土木工学では集中豪雨時の下水流量変化、食品・化学工学では製造プラント内での物性変化による流動性の時間変化が、それぞれ避けようのない現象として起こり、過渡的な変動流量としてその非定常性が現れる。産業や学術研究には限らず、身近なものとして、トイレやお風呂に使う生活用水は頻りに流量が変動する顕著な例であろう。各家庭において様々な用途で水道が使用され、非定常に流量が変動する。都市部に多く点在する集合住宅では、さらに複雑な流量変化が生じることは言うまでもない。このように非定常に流量が変動する状況は多数存在し、変動する流量を正確に計測することは重要である。

変動流量への応答性に対する懸念だけではなく、過渡的に変動する流量そのものを正確に計測し、利用したいという要望もある。最たるものはエンジン燃焼効率評価の基準となる燃費計・排ガス流量や、半導体製造における洗浄技術、医療分野における生体内血流の脈動計測である。ガソリンエンジンでは燃料供給の高周波数帯域の変動が起こり、流量計がどれほど瞬時値に追従しているかが重要となる。半導体製造では薬液の流動制御がバルブによって行われる場合が多く、繊細な流量の監視と制御が要求される。生体内脈動には、生体特有の非線形性かつ 1 Hz 以下程度の周波数を伴った微小流量変動をと

らえる必要がある。このように小流量域、大流量域に広く、かつ分野横断的に、これら変動流量を重要視する応用先は存在している。

2.2 変動流量の計測における経済的需要度の検討

ここで、経済的需要度を確認するために、変動する流量とそれを計測する流量計について、数値シミュレーションを行い、計測誤差について試算を行う。流量の時間変動に対する流量計の応答は、一次遅れ関数で近似されることが多い。詳しくは § 2.3 で述べるが、流量計には様々な原理があるため、流量の増減に対して異なる応答性を示すことがわかっている¹³⁾。ここで、ステップ関数状に流量が変動する場合を考える。流量が増加する時、一次遅れの時定数を τ_{up} 、変動前の流量を q_a 、変動後の流量を q_b 、変動初期時刻を t_0 とすると、流量の時間応答は、

$$q(t) = (q_b - q_a) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_{up}}\right) \right] + q_a, \quad (1)$$

から計算できる。流量が減少する時、一次遅れの時定数を τ_{down} とすると、流量の時間応答は、

$$q(t) = (q_a - q_b) \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_{down}}\right) + q_b, \quad (2)$$

から計算できる。

比較条件として、時間応答性能、 $\tau_{up} = \tau_{down} = 3 \text{ s}$ を持つ流量計 α と、流量増加時と減少時で異なる時定数 ($\tau_{up} = 0.5 \text{ s}$, $\tau_{down} = 3 \text{ s}$) をもつ流量計 β を仮定する。図 1 (a) (b) は、ランダムな流量変動を設定し、式 (1) と式 (2) によって、流量計 α , β で計測される値をシミュレーションした結果である。横軸が時間、縦軸が流量を示す。赤曲線 q_a が流量計 α による結果、青曲線 q_b が流量計 β による結果、そして破線 q_t は流量変動の真値をそれぞれ示している。図 1 (b) の青曲線による結果では、図 1 (a) の赤曲線と比較して、流量増加直後真値との差が小さく、応答性能が改善されていることがわかる。

計測時間 t に関して、流量の真値と流量計の計測値の差によって生まれる計測誤差は、徐々に累積していく。この誤差の総和を $\Delta\epsilon$ とすると、

$$\Delta\epsilon = \int_0^t (q_t - q_{\alpha, \beta}) dt, \quad (3)$$

で与えられる。図 1 (a) (b) におけるシミュレーション結果から、 $\Delta\epsilon$ の時間変化は図 1 (c) のように計算でき

る。応答性能では、赤曲線で示された流量計 α より、青曲線で示された流量計 β の方が良いはずではあるが、時間累積される誤差 $\Delta\epsilon$ から判断すると、真逆の結果となる。流量計 α では、流量の増減による計測誤差が大きいものの、累積誤差がキャンセルされていることがわかる。なお、脈動変動流量入力に対する流量計の振動応答性能については、§ 3.4.3 で改めて議論する。

図 1 (d) に、身近な流量値の例として家庭用水道における流量を示す。これらの値は、地方自治体の水道局における公開資料¹⁴⁾⁻¹⁹⁾を参考にしている。図 1 (a) (b) で与えられたランダムな流量変動は、これら参考値に近い値と言える。家庭用水道において小刻みな変動は稀有な状況ではあるが、この 1000 s のシミュレーションでは、 $0.01 \text{ m}^3/\text{h}$ (10 L) 程度の計測誤差が計算されている。

このシミュレーションから、流量計の性能向上にとって、流量の増減に関する時間応答性のバランスが重要だということがわかる。流量増減に対する応答性の不均衡が指摘されている例としては、タービン流量計など機械的可動部を持つ流量計があげられる (詳しくは § 2.3 で述べる)。これは、水道メーターやガソリンメーターなど広く活用されている技術であり、応答性の評価は将来的な技術の発展には欠かせないことは明らかである。ゆえに、「変動する流量に対し流量計がどれだけ正確に、かつどのように応答しているか」について評価できる計測技術の重要性は、産業的にはもちろんのこと、経済的にも高いといえる。

2.3 各流量計の原理に基づいた変動流量への応答性調査

本小節では、主として用いられている流量計の基礎原理について考察し、そこから考えられる応答性について調査し、先行研究をいくつか取り上げる。その中で、応答性が計測原理の制約によって影響される条件など、可能な限りまとめる。

2.3.1 差圧式

管内に絞り部を設け、その前後で計測される圧力値を計測し、損失量と体積流量の関係を比例係数として与える計測方法である。適用条件に応じて、オリフィスやベンチュリ、楔形、Drag-plate 等、多様な絞り部 (圧力損失発生部) が考案されている²⁰⁾⁻²³⁾。一例として、オリフィス式流量計の概略図を図 2 に示す。低価格、かつ国際的な規格があり、実流校正が不要という利点がある。しかしながら、ベルヌーイの定理から方法論が成り立っているために、非定常な流量条件では経験則に基づく補正係

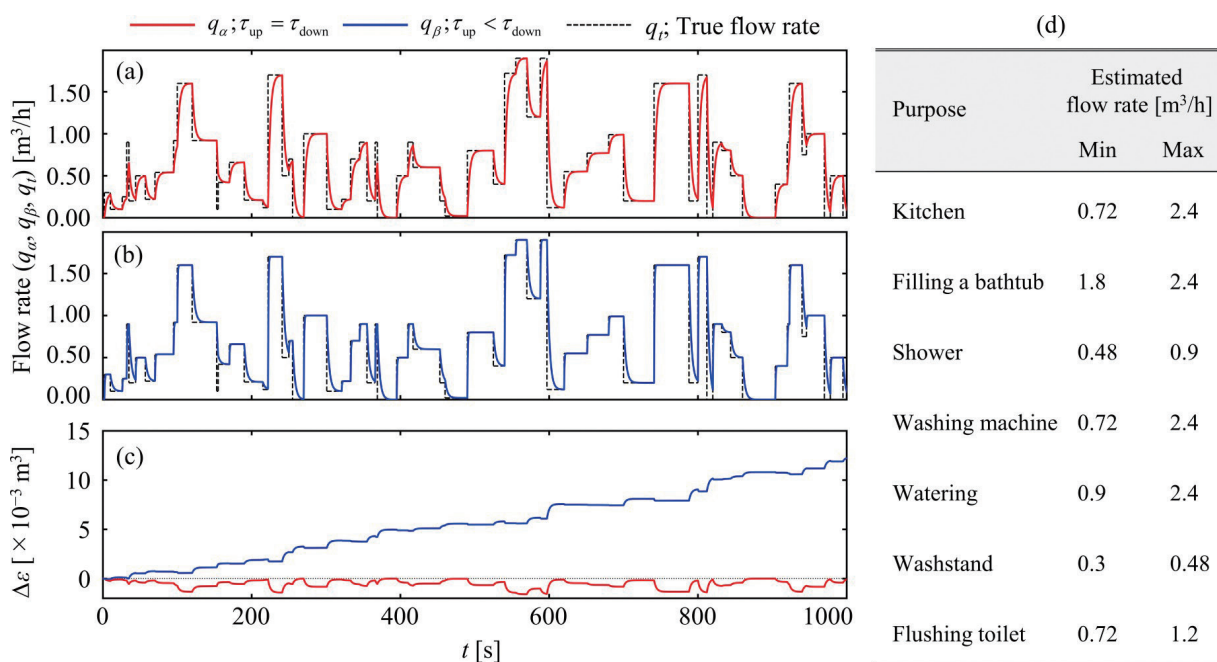


図1 変動する流量に対する流量計の応答性シミュレーション；(a) 時間応答性能, $\tau_{up} = \tau_{down} = 3$ sを持つ流量計 α ；(b) 時間応答性能, $\tau_{up} = 0.5$ s, $\tau_{down} = 3$ sを持つ流量計 β , (c) 各シミュレーション結果における計測体積の時間累積誤差, (d) 家庭用水道で想定される流量値例 (参考資料¹⁴⁾⁻¹⁹).

数に結果が強く支配される。また計測の特性上、上流部と下流部の二点で圧力を計測する必要があり、圧力計としての応答性を考慮する必要がある。一般的に、圧力センサにはヒステリシス特性（圧力が増加する場合と減少する場合で、その測定値が異なる履歴を辿る特性）があり、それが応答性に影響する。さらに、流量計として販売されている計器に取り付けられている圧力センサの時定数など、センサ自体の性能は公開されておらず、得られた流量から補正をかけることは難しい。

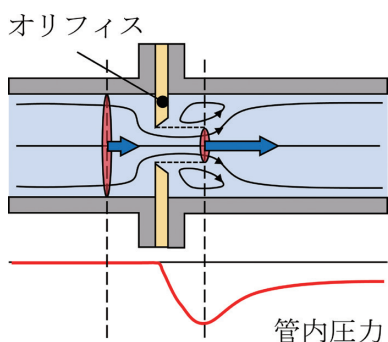


図2 差圧式（オリフィス）流量計の概略図

2.3.2 面積式

垂直に設置されたテーパ管下部から流体を流入させることで生じる、圧力差によるフロートの浮上高さから、

流量を評価する方法である^{24),25)}。ロータフローレータや、浮き子式流量計とも呼称される（図3）。安価で、電源の必要がないため、容易に導入できる。流量計測の原理も非常にシンプルで、 $\rho_f g V_f = \rho g V_f + F$ で示される力のつり合いから求められる。ここで、 ρ_f , ρ , V_f , g , F は、それぞれフロート密度、流体密度、フロート体積、重力加速度、流体抗力を示す。 F は層流条件と乱流条件では用いる経験式が異なる。力のつり合い式からもわかるように、時間変化がそもそも考慮されておらず、定常な状態のみに適用できる方法である。仮に適用した場合、フロート部自体の慣性による影響が無視できず、テーパ管内の流動が乱れることが予想される。また、流量が変動し、層流から乱流に流動遷移が起こる場合、流体抗

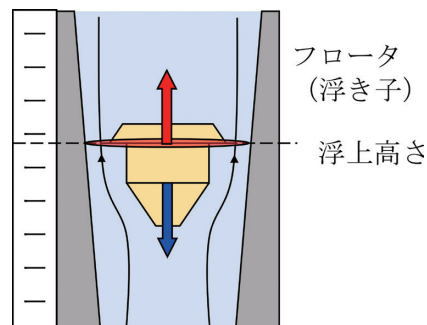


図3 面積式（浮き子式）流量計の概略図

力係数の最適選択が難しいという問題もある。

2.3.3 渦式

管内に物体を設置し、その後流に発生するカルマン渦の発生周波数と、代表流速が比例する原理を利用し、流量を計測する方法である(図4)。これまで様々な形状の渦発生部が提案されている^{26),27)}。渦の周期を検知するために、サーミスタや圧電素子を用い、変化する力を検知する。構造が単純で機械的可動部がなく、堅牢な計器として知られる。アナログ信号検出のため分解能等の制約はアナログ・デジタルコンバータの性能に左右される。流量計測のレンジアビリティ(最大流量と最小流量の比)は大きい。変動流のように流量が変動する場合、帯域通過フィルタが機能しないため、ノイズ対策が難しいことが想定される。また、そもそも渦が発生しないような高粘性液体や小流量には適さない。周期的な信号を検出するため配管の振動に弱く、上流部の流速分布の影響を受けやすい^{28),29)}。一定時間内の信号を周波数解析するため、脈動流条件下では短時間フーリエ変換やウェーブレット変換を用いる必要があり、解析上の不確かさを考慮する必要が出てくる³⁰⁾。周波数解析が必須であるために、流量が一定周期の脈動ではない場合、精度を担保することが難しい。

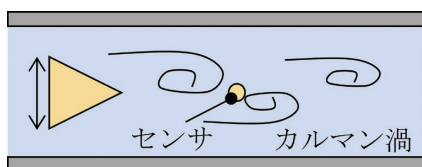


図4 渦式流量計の概略図

2.3.4 タービン式

管内に設置されたタービンが流動によって駆動され、その回転速度が体積流量に比例することを利用する計測方法である^{31),32)}。羽根車の回転面へ流速ベクトルを直角に当てる軸流式と、回転面と並行に当てる接線流式がある(図5)。再現性に優れ、低粘度流体の流量が計測できる半面、軸受けが摩耗するため定期的なメンテナンスが必須となる。流入するベクトルがタービン部駆動のトルクを決定し、旋回流などの二次流れが誤差となるため、直管・整流部を流入部前方に設ける必要がある。流量の上昇に対する応答性は比較的高いが、流量の減少に対する応答性が鈍いという報告がある³³⁾。このことからわかるように、タービン部が高速に回転した状態で流量が減少すると、慣性で流量を過剰評価してしまう。また、管

内圧力次第ではキャピテーション発生由来の誤差が生じる可能性がある。

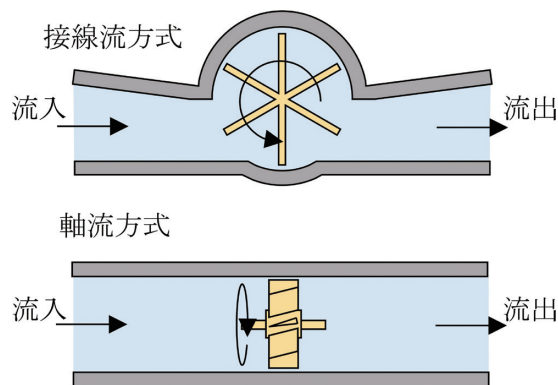


図5 タービン式の一例：羽根車式流量計の概略図

2.3.5 電磁式

電極部が接液する通常のものとは接液しない静電容量式のものがあり、前者は管を横断するように磁界を発生させ、導電性の液体が流れる時に生じる起電力と流速の間に成り立つ関係(図6)から流量を計測し、後者は基本的には同じだが、発生した電荷を流量計流路部の部材を介して検出する方法である³⁴⁾。圧損が原理上全くなく、密度・粘度の影響がないが、原理上、管内の流速分布が軸対称性を持つ必要があり、二次流れがある条件ではバイアス誤差が生じる^{35),36)}。流量だけではなく質の変化でも電荷に変化が起こるため、その性質を利用すれば混入物を含む液体の検出が可能である(単純に流量を計測する目的であれば、ノイズの原因ともなる)。超純水や油など、導電率が極小のものは測れず、導電率が低い流体ほど計測時に発生するノイズが大きく、印可電流の周波数を上げることで対策する必要がある。高周波な電磁ノイズを取り除く目的で、センサ内に一次遅れ回路が仕込まれており、計測器としての時定数が0.1 s程度と見積もられている^{5),37)}。ゆえに、脈動流変動が高周波になると、ほぼ追従しない。

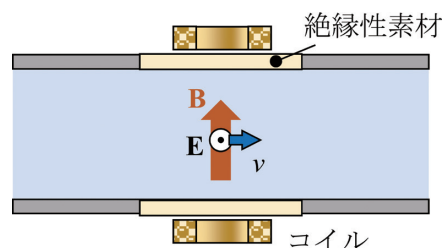


図6 電磁式流量計の概略図

2.3.6 超音波式

基本原理は、管内の流速を超音波伝播の性質を利用して、計測し流量に換算するもので、流速分布が軸対称性を持つことが求められる。主に実装されているのは、伝播時間差法とドップラー法である³⁸⁾⁻⁴¹⁾。前者は超音波の流体中伝播時間が流速に応じて変化する特性を利用する(図7)。後者は流体中に分散する超音波反射体の速度に応じて周波数がドップラー効果で変調することを利用する。現在実用されているほとんどが前者の方式をとっている。基本的に圧力損失はなく、配管の外に送受信素子を設置して流量を測定できる。伝播時間差法では液中の固形分や気泡が多いと誤作動したり、計測が不可能になるが、ドップラー法では超音波を反射する分散体がないと計測できない。伝播時間差法では、流速を管内断面全体の積算値として評価する一方で、ドップラー法は管中心一点の速度を取得する。それぞれ、流量補正係数を考慮することで流量に換算される。流速分布を推定した評価なので、非ニュートン流体へ直接適用できない。超音波式による計測では、機械的あるいは電磁気的な遅れ特性がないため、原理上の時間応答性は非常に良い⁴²⁾。仮に水(音速: 1480 m/s)が満たされた口径100 mmの円管に伝播する超音波が一往復する時間は、1 μs程度であり、計測上問題にはならない。

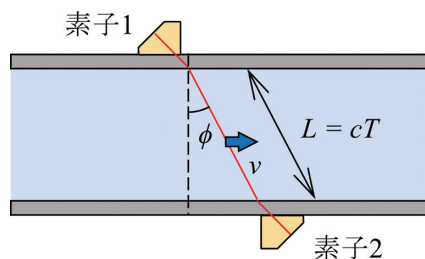


図7 超音波式(伝播時間差式)流量計の概略図

2.3.7 コリオリ式

曲管内に流れが生じると、コリオリ力の作用で管が歪曲する。そのねじれ角度が質量流量に比例することを利用する方法である(図8)。アクチュエーターによって振動が印可された一对のU字管を用いる幾何方式が近年の主流となっている^{11),43)-45)}。この設計による効果は、対の管に共振を起こすことで外部振動の影響を阻害し、計測を安定化させられることにある。流量計前後に直管部が不要で、質量流量を直接計測できる。外部振動に弱いこと、他の流量計に比べて、高価なことが大きな欠点である。流体の適応範囲も広く、高粘度流体も原理上測定可能である。また、二本の管内を均等な条件に保つ必

要があり、気泡等で密度条件が偏ると計測誤差が生じる^{46),47)}。応答性に関して、流量をステップ関数状に変化させた条件で調べた先行研究がある⁴⁸⁾。その中で用いられている流量計は、時定数にして2 s程度と報告されている。近年の報告⁹⁾では、光送受信器の導入によって、1 ms程度まで達成されており、今後も技術更新が期待されている。

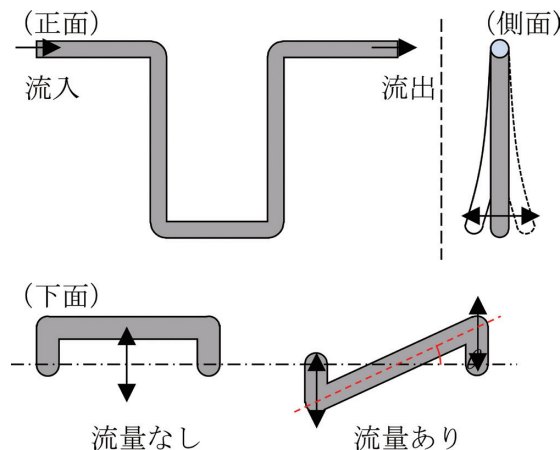


図8 コリオリ式流量計の概略図

2.3.8 容積式

ケースによって作られた空間内を二つの歯車が回転することで、単位時間に一定の容積を送り出す原理である。歯車の形状にはいくつか種類があり、楕円形の形状を持つオーバル型(図9)が代表的である。一定容積を直接計測するため高精度で、省電力なため電池でも動き、電源が必要ない。低レイノルズ数(高粘度)であれば歯車から液体が漏れることなく高精度に計測されるが、高レイノルズ数(低粘度)では精度に影響が現れる。また、流速分布形状が測定に影響しないため、流量計前後に直管を設ける必要がない。原理上、計測時に脈動を生じ、圧力損失が大きいことが欠点として挙げられる。原理的には、歯車の回転角度で連続関数として流量を推定でき

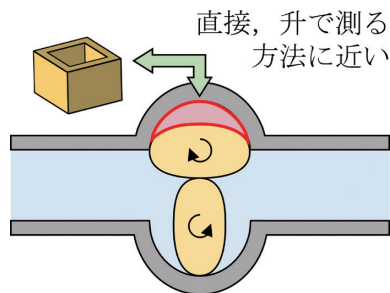


図9 容積式流量計の概略図

る。商用の計測器では歯車一回転毎にパルス信号が出力されるため、他の流量計と比較して、流量に対する出力信号数が少ない。それゆえ積算流量としては高精度だが、流量変動の微分量としては対応できない。

2.3.9 まとめ

以上、主要流量計、八種類についてその時間応答性について調査した。これら流量計は、これまで工業的に使用されてきたものであり、その実用性は十分に示されている。しかしながら、変動流量への応答性に焦点を絞って考えると、どれも研究結果に乏しく、推察の域をでないことが多い。これは、そもそも流量計が変動流を目的に作られていないことに起因する。逆説的ではあるが、このように研究結果が乏しいという事実からも、流量計の変動流量に対する応答性能を評価することは重要な課題であると理解できる。また、一般に知られているその他流量計として、熱式、層流式、フルイディック式、旋回流式、ピトー管式、せき式があるが、本稿では調査を割愛した。

3. 流量計の応答性評価技術の提案

この小節では、§1と§2においてまとめた情報に基づいて、流量が変動する状況で考慮すべき不確かさ要因を抽出する。また流量計で計測した変動流量値を評価するために必要となる技術について提案する。

3.1 変動流量における不確かさ要因の抽出

§2で各流量計の計測特性を調査した結果、流量が変動する条件で考慮すべき不確かさ要因は、[a]-[e]の五つに大別できる。表1に、それぞれの特性をまとめた。

[a] 機械可動部による慣性要因

タービン式や面積式等、流速によって機械可動部が受動的に駆動する方式で発生し、流量変動が大きいほど顕著な影響を受ける。これらは慣性が原因となるため解消することは難しく、変動流量計測には適していないと判断できる。また容積式もそのような特性を持っている。しかし慣性によって駆動された場合管内に脈動を与えるが、計測値の不確かさとして影響はさほど大きくない。コリオリ式も流量に応じて機械可動部が駆動する方式の一つではあるが、流速ではなく質量流量が測定対象であり、慣性モーメントが駆動力となる原理である。流量導出の定義式にも慣性項が考慮されていること⁵⁾、さらに振動周波数が非常に高いことから、先行研究⁹⁾のように高い応答性が実現できていると考えられる。

[b] フィルタリングによる要因

高周波数の雑音除去や、流量値ゼロ付近の補正、ローカット機能（ある閾値以下の小流量値をカットする機能）、あるいはダンピング時定数設定等、流量計伝送器の設定パラメータに依存する要因である。製造元によって、設定値が計測値へ与える応答性への影響は異なる。パラメータによっては計測精度そのものに影響が現れるため、慎重な設定が求められる。

[c] 電子回路・素子の時定数要因

圧力センサ素子の緩和性能や、回路内のアイソレータ（あるいは、ディストリビュータ）によって、強く影響される。デジタルあるいはアナログの信号を取り扱う以上、すべての計器に共通して関わる要因ではあるが、圧電素子やコンデンサがセンサ内に組み込まれている場合に考慮すべき要因である。圧力センサを例に挙げると、

表1 主要流量計の応答特性評価（✓が多いほど、応答性の影響が大きいことを示す）

	可動部慣性	LP フィルタ	センサ時定数	管内流動状態	流量計算時間
差圧式流量計	-	✓	✓✓	✓✓	✓
面積式流量計	✓✓✓	-	-	✓✓✓	-
渦式流量計	-	✓✓	✓✓	✓✓✓	✓
タービン式流量計	✓✓✓	-	-	✓✓**	-
電磁流量計	-	✓✓✓	✓	✓✓	✓✓✓
超音波流量計	-	✓	✓	✓✓	✓✓
コリオリ質量流量計	✓	✓	✓	✓	✓✓
容積式流量計	✓✓*	-	-	-***	-

* 管内流に脈動発生

** キャピテーション発生で誤差大

*** 高レイノルズ数で誤差大

時定数が 10 ms 程度のものが多く、10 Hz 以上の変動流で影響があると推察される。一定周期の脈動であれば積算流量としての影響はほとんどないが、非周期変動が起こる場合、積算流量としてもバイアス誤差が生じる。[a]と同様に、ハードウェア的な特性であり、改善するためにはコストの高いものと入れ替える必要がある。

[d] 脈動流・乱流遷移等の流速分布要因

流速分布を推定した補正係数が必要となる方式や、流動現象の性質そのものを流量として評価する方式に影響する。非定常な流動による流量計への影響評価については、1990年代から精力的に調査が進められており、数多くの報告が確認できる^{11),20),28),35),36),49)-53)}。この要因では、小流量から大流量へ移り変わる際の乱流遷移現象や、ステップ関数状に流量が発生した際の発達流れ、脈動流由来の特徴的な現象による影響⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾が想定される。これについては、容積式と秤量式を除く、全ての流量計に影響が及ぶと考えられる。一定の周期関数的な変動であれば、位相平均処理で計測誤差の低減が期待できるが、非周期的な変動への対応は非常に難しく、瞬時値での高精度計測が求められる。特に、渦式では流速分布変化の影響は然ることながら、脈動自体の周波数とカルマン渦の発生周期に近いオーダーとなると致命的な誤検出が起こる。

[e] 流量値計算時間に由来する要因

回転数等、幾何的要素で流量が決定する、面積式や容積式以外の全てに当てはまる要因である。製造元の計器毎に計算アルゴリズムは異なり、流量計の特徴によっても、違いがある。ある一定時間データを収集して、平均値を計算する必要があるため、高クロックのプロセッサを搭載していても、応答性の改善は難しい場合が多い。

これらの他、流量計自体で適用できる流量範囲が設計上の最適形状で定義されているものほど、適用範囲を跨ぐような変動流量条件には向かない。§1で言及したように、流量計は定常条件での流量計測を目的に設計されており、ある程度使用条件を絞って設計することで高精度な計測を実現していることに起因する。容積式や超音波式、電磁式、秤量式は、この要因による影響には原理上制約を受けない。

3.2 応答性評価に関する先行研究

流量計の応答性評価を中心に研究している例はいくつか確認できる。

Henry *et al.* (2003) は、コリオリ式流量計と電磁式流

量計を同一ライン上に取り付け、それぞれの時間応答性を評価した。この取り組みでは、ステップ関数状に流量を変化させた条件の下、コリオリ式流量計における測定値は 16 ms 程度の時間遅れでステップ関数状の応答を示す一方で、電磁式流量計はステップ関数状には応答しなかったことが報告されている⁵⁷⁾。

Mckee (1992) は、気柱振動を利用して気流に周波数が $O(10 \text{ Hz})$ の脈動を発生させ、タービン流量計の脈動応答性を調査した³¹⁾。流量計から得られるパルス信号を計測し、タービン流量計のローターにおける時間応答性が評価されている。

Wiklund *et al.* (2002) は、流量計の動的な応答性を定量化するために、流量をステップ関数及び三角関数状に入力し、調査する方法についてまとめた⁵⁸⁾。この報告では、差圧式や電磁式、渦式、コリオリ式に関する時間応答性がまとめられている。しかしながら、リファレンスデータとしての流量評価をタービン式流量計で行っているため、結果の有効性が低い。

以上の取り組みを要約すると、これまでの流量計の応答性評価では、大きく分けて二つの方法が代表的といえる。

- [1] ステップ関数状に変動させた流量に対する測定値の時定数的応答評価
- [2] 三角関数の入力波形で制御した流量に対する測定値の周波数応答評価

[1]では、計測装置として、流量変化にどの程度追従して計測が実現できるのか明らかにできる。この評価方法では、時間遅れだけではなく、流量変動後の計測値のふらつきが、どのくらいの時間スケールで安定化するかについて検証できる。[2]では、繰り返しの変動に対し、周波数解析で得られるスペクトル強度・位相特性が明らかとなる。入力する周波数を変化させることで、流量計の周波数応答を明らかにできることがこの方法の利点といえる。

このように、時間応答性の評価について焦点を当てた研究はいくつか存在するものの、変動流量の制御方法は当然統一されていない。ゆえに制御系による応答特性なのか、計測値としての応答特性なのか、はっきりと切り分けがなされていない。実現すべき変動流制御方法に求められることは、入力する流量の変動制御に自由度（ステップ応答、三角関数応答、三角波応答など）を持たせることと、過渡的な変動制御量の精度の高いリファレンスデータが取り出せることの二点にある。

秤量タンクを用いた流量計測方法は、一定時間流した液体をタンクに溜め、その重量から積算流量を計測する方式である。これまでの知見から、最もシンプルでリファレンスデータとして信頼度が高い。しかし、液体を循環させるパイプラインから秤量タンクへ切り替える際、大流量計測になるほどダイバーター切り替えにかかる時間が流量計測の不確かさの要因となる。当液体流量標準研究グループの取り組みとして、計測における不確かさを軽減するため、様々な切り替え方法が実装されてきた^{59),60)}。この秤量タンクによる計測は積算流量ではあるが、重量を時系列データとして取り出し、時間微分することで瞬時の流量に換算できる。しかし現実的な課題として、秤量タンク自体の振動や、タンク内液相の揺らぎ、気相の混入などの影響⁶¹⁾で、時間差分処理は機能しないと考えられる。差分計算上、誤差が増幅されてしまい、流量が過渡的に変動する場合この影響はより顕著に現れることが推測される。

2000年代に開発され、実用されてきた方式として、秤を使わない体積プルーバ式⁶²⁾がある。これは、円筒型容器とピストン内に液体を注入し、ピストンの変位を記録することで、瞬時流量が計測できる装置である。容器内の液体が一定の容積に達すると、ピストンに設けられたポペットバルブを開く設計になっており、秤量タンク装置のように送液ラインを切り替えずに流量計測を行える。この方法は容積を計測するもので、変動流量のリファレンスデータとして十分高精度な計測方法である。近年では小型化が進みパイプライン上に設置できる方法が考案された^{63),64)}。このような定容積のシリンジを使った流量評価方法は、医療用途など小流量条件でもその有効性が示されている⁶⁵⁾。しかし、周期的に流量を制御したり、

任意の流量入力を加えるためには、別途制御系が必要となる。

3.3 応答性評価に有効な装置の提案

これまでの調査結果から、流量計の時間応答性を評価するために要求されることは二つに大別できる。流量を非定常に変動制御できることと、制御した流量の参照となるデータの確からしさである。変動制御に関しては、任意波形制御を通常の送液ポンプで行う場合、装置由来の高周波脈動が課題となる。流量の参照データに関しては、秤量タンクによる単位時間あたりの重量計測が最も信頼性が高い方法だと考えられるが、非定常な変動流量の場合はタンクの揺れや、秤の時間応答性が課題とされてきた。

それらを踏まえて、図10で示すパイプラインとピストンシリンジ装置で構成されるシステムを用いた評価方法を提案する。以後、この装置を可制御体積プルーバ(CVP)と呼称する。高い水頭ヘッドを持たせたオーバーヘッドタンクから流量調整弁(FCV)を接続する。定常な流量 q_0 に調整された管に、内径 $2r_p$ のシリンジとピストンを組み合わせ、電動アクチュエータ(MA)で駆動し、変動流量 q_p を発生させる。ここで、流量の変動量はピストンの往復変位速度 dx/dt と内径 r_p から、

$$q_p = r_p^2 \pi \frac{dx}{dt}, \tag{4}$$

で与えられる。ピストン往復速度が等速 v_p の場合、ステップ関数状の流量 q_p が、 q_0 に加えられることになる。またこの時、ステップ制御が維持可能な時間は、 L/v_p の以下の値で制限される(L はピストンの最大ストローク)。

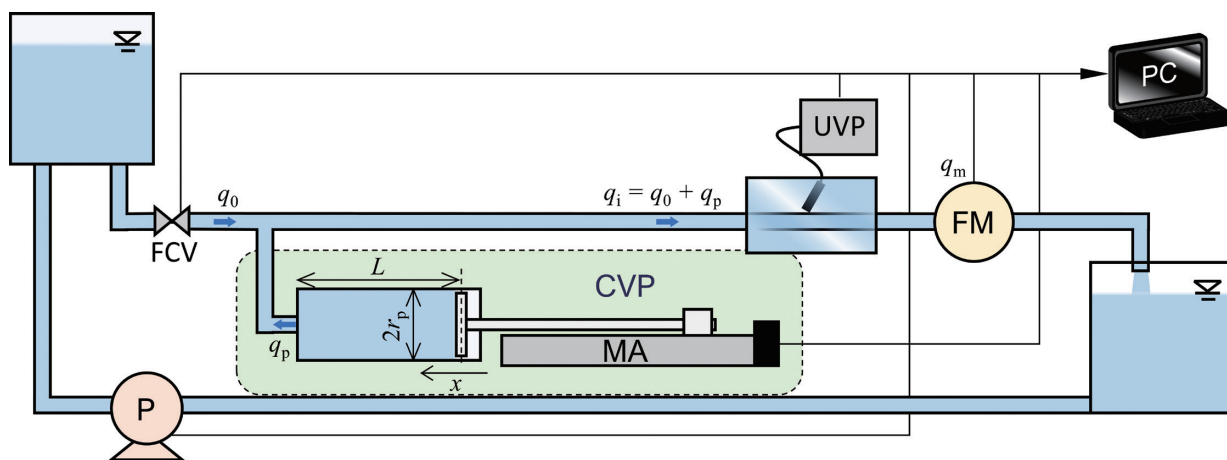


図10 変動流量計の応答性評価のための装置概要図。ここで、CVPは可制御体積プルーバ、UVPは超音波流速分布計測装置、FMは評価対象の流量計、FCVは流量調整弁、Pは揚水ポンプ、MAは電動アクチュエータをそれぞれ示す。

すなわち、大きな変動や長時間制御のためには、シリンダを相対的に大きくする必要がある。

ピストンによる変動流量 q_p と FCV で調整された定常な流量 q_0 の合計として、総流量 q_i が試験対象の流量計 (FM) に流入し、計測流量 q_m を取得する。この時、流量計の上流部で、超音波流速分布計測 (UVP) によって流速分布を取得し、管内の流動を把握する。外部の貯水タンクへ流出させた後、揚水ポンプによって、オーバーヘッドタンクへ送水する。

計測対象の流体が非圧縮性を持つ場合、変動する体積流量 q_p は、ピストンが駆動する体積で決定できる。さらに式 (4) から、変動流量 q_p における不確かさは、シリンダ内径 r_p や、シリンダの真円度、MA によるピストンの制御速度 dx/dt 、制御位置の精度に由来する。電動アクチュエータから制御位置情報を取得できるが、精度を確認するためにもレーザー等を用いた制御位置計測を行うべきである。

dx/dt の精度評価については、定速制御状態で秤量タンクを用い、総流量 q_i について積算流量計測を行う必要がある。ここで、総流量 q_i には、 q_0 と q_p による誤差が重畳することに留意する。また、ピストンシリンダ部を接続するため、メインの管路に分岐を設ける必要がある。ゆえに、 q_i の流入による流速分布への影響は十分に調査しなければならない。また、バルブによって管内流れを急停止させる際、水撃効果が発生することがよく知られている。この効果では高周波を伴った圧力変動がしばしば観測されるため、CVP による制御でもそれに由来する影響があるか検証する必要がある。

3.4 応答性評価手法の提案

本小節では、§ 3.3 において説明した CVP を用い、解析方法をいくつか示し、評価する流量計の応答性について論じる。通常、流量計にはノイズフィルタリング機能や、閾値を設けてゼロに近い流量を除去する機能 (ローカット)、一次遅れ特性を持たせることで変動を滑らかにする機能 (ローパスフィルタ機能) などが、ハードウェアあるいはソフトウェアに組み込まれている。ここでいう流量計の応答性とは、それら全てを内包した上での性能評価を意味する。

3.4.1 ステップ入力に対する応答評価

流量をステップ関数状に変化させることで、流量計の応答性を時定数として評価できる。ステップ入力として、 q_i を制御するためには、ピストン変位 x を一定速度 $v_p = (x_1 - x_0)/(t_1 - t_0)$ で動かす必要がある (図 11)。

ここで、式 (4) より、 q_p の変動量が大きくなるほど、 v_p を速く設定する。例えば、変動量が $q_p = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、シリンダの内半径が $r_p = 50 \text{ mm}$ 、最大ストロークが $L = 200 \text{ mm}$ のとき、流量制御を維持できる最大時間はおおよそ 5.6 s と見積もれる。

§ 2 で調査したように、各流量計には固有の時定数があり、ステップ入力を流量変動として与えると、図 11 (c) (d) で示されるような応答が予想される。ここで図中黒線は q_i 、赤線は q_m をそれぞれ示す。また、図 11 (c) は流量増加に対する応答で、図 11 (d) は流量減少に対する応答である。時定数による q_m の遅れによって生じる誤差は、

$$S_{\text{up/down}} = \int |q_i - q_m| dt, \quad (5)$$

で計算できる。ここで、§ 3.1 で触れたように、流量計の一次遅れ系の応答効果が大きい場合、 $S_{\text{up/down}}$ の絶対量が大きくなる。また流量計に慣性の影響がある場合、

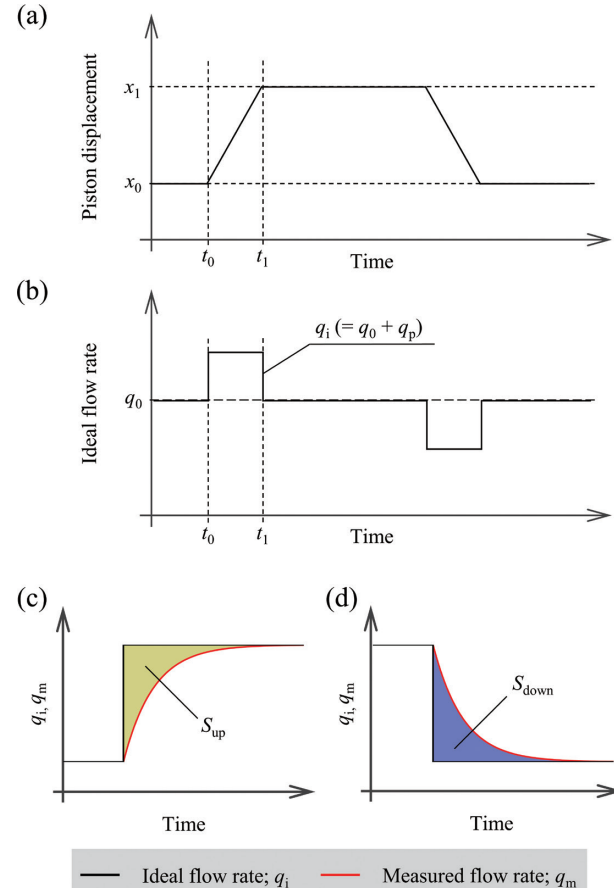


図 11 (a) ステップ入力時における CVP のピストン変位, (b) 入力される理想的な流量変動, (c) 立ち上がり制御された理想的流量変動と流量計の応答, (d) 立ち下がり制御された理想的流量変動と流量計の応答。

流量の増減で応答性が異なる。ゆえに、 $\Delta S = |S_{up} - S_{down}|$ が大きい値となることが推測される。また、一定周期で繰り返し計測し、かつステップ入力強度を変えて評価することで、ステップ入力に対する応答性が時系列かつ流量の変動度合の双方について評価できる。

3.4.2 疑似インパルス入力に対する応答評価

インパルス入力を与えることで、流量計の過渡変動入力後の安定出力までの時間を見積もることができる。先行研究によると、インパルス入力的な振動などで流量が変動する条件では、流速分布が乱れることに起因する誤差が発生すると報告されている¹⁰⁾。図12 (a) のように、ピストン変位を制御すると、図12 (b) のような疑似的なインパルス入力を生成できる。

インパルスの時間幅 t_i は、ピストンの変位速度を速くするほど短くできるので、ピストン駆動の機械的制約でインパルス入力の最小時間幅が決定される。例えば、ピストンをストローク長 $L = x_1 - x_0 = 200 \text{ mm}$ だけ動かす時に、MA による制御可能な最大速度が 1200 mm/s とすると、およそインパルスの時間幅はおよそ 0.17 s となる。各インパルス入力の時間間隔は、原理上制約はない。一度、 x_1 まで変位させた MA を初期位置 x_0 まで戻す際、 $q_0 - q_{min}$ だけ流量が減少する。初期位置に戻さずに x_1 から x_0 に高速に動かし、インパルス入力も発生させることもできるが、その場合は流量が急激に減少するような入力を想定した評価になる。

このようなインパルス入力は、バルブ開閉によって短時間変動が起こる水道や、水撃効果⁶⁶⁾による短周期の変動など、流量計の変動安定性についての評価に適している。評価される流量値の変動については、流量計の計測に由来する要因と、非線形流動に由来する要因に大別される。例えば、図12 (b) において q_{min} が小流量で、管内が層流状態の場合、瞬間的に増大した流量 q_{max} によって局所乱流塊⁶⁷⁾のような乱れが生じる可能性がある。経過時間で流量計の計測値が安定していくと考えると、その統計量を時間の関数として取得する必要がある。

図12 (c) は、理想的なインパルス入力と流量計で出力された流量値の例を示す。流量計が入力に対して、一次遅れな応答を示すことを想定する。このとき図のように少し立ち上がった後、変動振幅 $A(t)$ のように変動しながら、 q_i に漸近していくことが考えられる。この $A(t)$ の時間変化を計測することで、インパルス入力後に出力が安定するまでの時間を評価できる。複数回分のインパルス入力を行い、得られた流量値のアンサンブル平均により、統計的な評価が求められる。また評価された流量

値の変動が、計測由来なのか、非線形流動由来なのかについて、要因を切り分ける必要がある。ゆえにインパルス入力評価の場合には、同計測パイプライン上に取り付けられた超音波流速分布計測法 (UVP) によって流速分布の取得を行う。

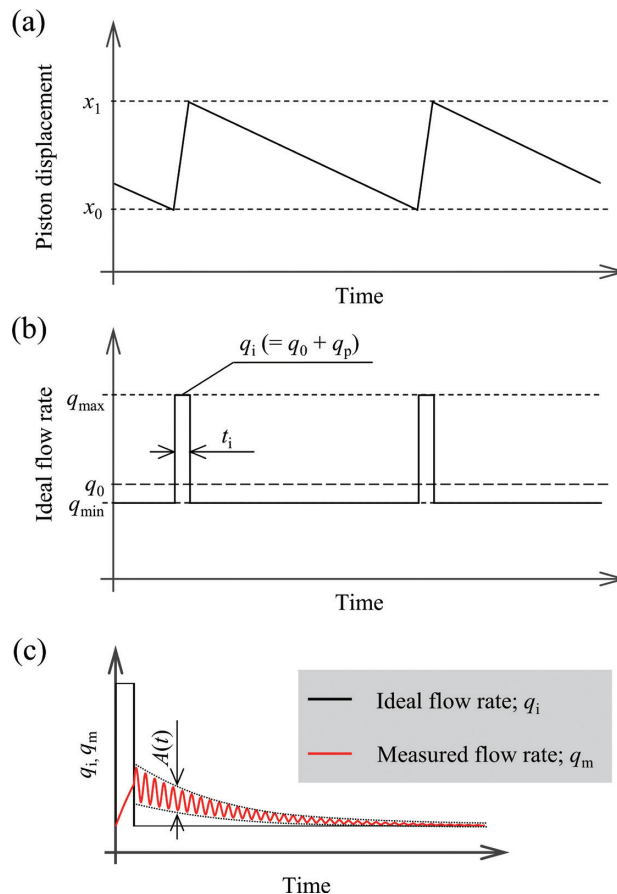


図12 (a) インパルス入力時におけるCVPのピストン変位、(b) 入力される理想的な流量変動、(c) インパルス制御された理想的流量変動と流量計の応答。

3.4.3 三角関数入力に対する応答評価

図13 (a) (b) は、それぞれ脈動変動流量入力時におけるピストンの変位と、理想的な流量の時間変動を示している。流量の振幅を a とすると、 $a = |x_1 - x_0| \omega_p / 2$ で与えられる。ここで、 $\omega_p (= 2\pi f_p)$ はピストンの変位角振動数を示している。このような関係から、流量振幅はピストンの最大ストロークと、角振動数で決定されることになる。

三角関数入力による脈動流量に対する応答性を評価する上で重要となるのは、

- [i] 振動スペクトル強度
- [ii] 入力・出力間の位相差

[iii] 周期毎の時間積分値

の三要素である。

[i]は、入力した脈動流量の振幅 a に対して、出力の変動振幅が応答しているかを確認できる。得られた流量値の時系列データをフーリエ変換し、脈動の角振動数要素 ω_p を計算することで評価される。

[ii]は、入出力における流量伝達がある時定数を伴う応答性を持っている場合、その評価が可能である。[i]と同様に、フーリエ変換した情報から取得可能である。

[iii]では、流量計が慣性の影響等で流量の増減で応答性が異なる場合に有効な評価方法となる。振動位置周期分を時間積分した値を振動応答性能 ϕ と定義すると、

$$\phi = \int_t^{t+\frac{2\pi}{\omega_p}} [q_m(t) - q_0] dt \quad (6)$$

で計算できる。流量計に流量の増減によるヒステリシス

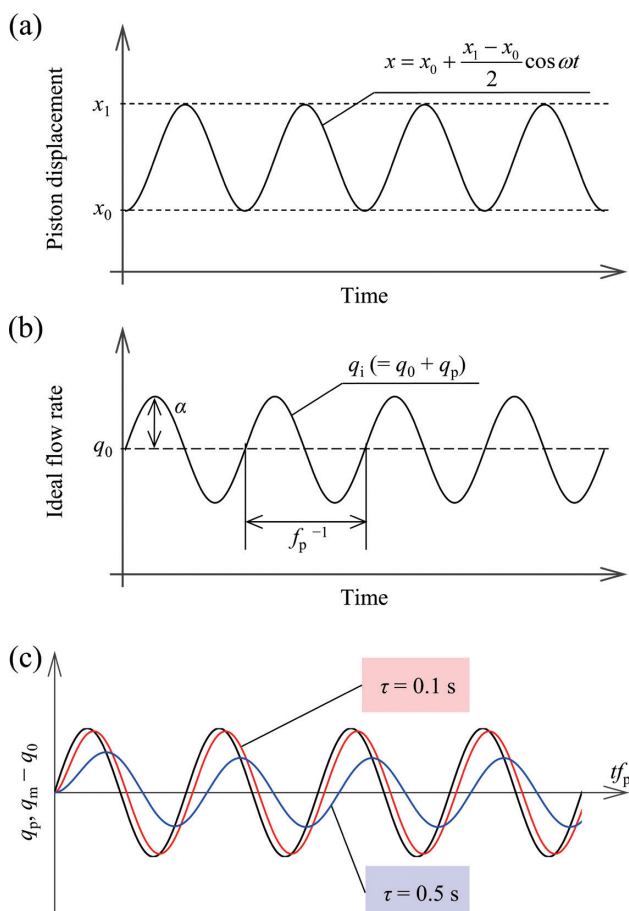


図 13 (a) 三角関数入力時における CVP のピストン変位, (b) 入力される理想的な流量変動, (c) 理想的流量変動と一次遅れ系を仮定した流量計の応答。

が全くない場合、理想的には $\phi \approx 0$ となる。 $\phi \ll 0$ の場合、流量増加への応答性が減少時に比べて卓越していることがわかり、流量計における機械的慣性由来の誤検知と判断できる。逆に、 $\phi \gg 0$ の場合、流量計における機械可動部のダンピング性能による影響と判断できる。また、流量計のノイズ対策としてしばしば取り入れられているローカット機能等によって、低い流量値が除去されていること等も考えられるため、流速分布計測を同時に行い、妥当性を検証する必要がある。

このように、[i]-[iii]では、低い振動数から高い振動数まで流量計測値を評価することで、流量計の脈動周波数応答性まで評価できる。

典型的な振動応答の例として、一次遅れ系を考える。一次遅れ系における正弦波入力への応答は、伝達関数を解くことで、

$$F(t) = \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin[\omega t + \tan^{-1}(-\omega\tau)] \quad (7)$$

と計算できる。ここで、 τ は時定数を示す。 $F(t) = q_m - q_0$ として、振動周波数 $f_p = 0.5$ Hz の正弦波入力に対する振動応答性を計算した。図 13 (c) に示されるように、赤曲線は $\tau = 0.1$ s とした結果、青曲線は $\tau = 0.5$ s とした結果である。これらの結果を比較すると、時定数が大きくなるにつれて、元の入力波形振幅に十分達していないことがわかる。このような一次遅れ系の応答特性は、ノイズ対策、あるいは“表示値の安定性”のため、流量計に標準装備されていることが多い。過度な時定数設定を避けるためにも、脈動流量における応答性評価が重要であるといえる。

4. 結言

流量が変動する場における流量計測に対する社会需要と、各種流量計の応答性について調査を行った。「変動する流量に対し流量計がどれだけ正確に、かつどのように応答しているか」について評価できる計測技術の重要性について言及し、そのような評価技術について、確立に向けて必要となる設備・手法を提案した。本調査研究の結言として、これまで体系化されてきた、定常流量下における流量計の計測性能評価に加えて、非定常な流量変動に対する流量計の応答性評価技術の開発へ舵を切る必要があると提言する。日進月歩に発展を続ける、産業の技術要求に応える評価技術として、変動流量に対する

流量計の評価技術は欠かせないものであると考えている。

謝辞

本調査研究では、液体流量標準研究グループ 古市紀之グループ長、和田守弘主任研究員、及び流量計試験技術グループ 島田正樹 グループ長 より貴重なアドバイスをいただきました。また液体流量標準研究グループ及び流量計試験技術グループの皆様におかれましても、日頃よりご指導、ご助言いただいております。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) J. S. McNown. *La Houille Blanche*, 347-353 (1976)
- 2) F. Cascetta. *Isa Transactions*, 34, 229 (1995)
- 3) M. Reader-Harris. In *Orifice Plates and Venturi Tubes*, 1-31. Springer (2015)
- 4) JIS B 8570-1: 2013. 水道メーター及び温水メーター.
- 5) R. C. Baker. *Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Cambridge University Press (2005)
- 6) 水道メーター関連法規の手引き, 一般社団法人日本計量機器工業連合, 水道メーター技術委員会 (2021年6月17日閲覧, URL: <http://www.keikoren.or.jp/info/20181119.pdf>)
- 7) OIML R 49-1:2013, Water meters for cold potable water and hot water. part 1: Metrological and technical requirements, standard, international organization of legal metrology, bureau international de métrologie légale, paris, france (2013)
- 8) ISO 4064-1:2014, Water meters for cold potable water and hot water. part 1: Metrological and technical requirements, standard, international organization for standardization, geneva, switzerland (2014)
- 9) C. Clark, M. Zamora, R. Cheeswright, and M. Henry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17, 391 (2006)
- 10) J.-J. Miao, C. Hu, and J.-H. Chou. *Flow Measurement and instrumentation*, 11, 41 (2000)
- 11) G. Vetter and S. Notzon. *Flow Measurement and Instrumentation*, 5, 263 (1994)
- 12) S. Saxholm, R. Högström, C. Sarraf, G. Sutton, R. Wynands, F. Arrhen, G. Jönsson, Y. Durgut, A. Peruzzi, A. Fateev *et al.*. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1065, 162015. IOP Publishing (2018)
- 13) M. Mori, Y. Takeda, T. Taishi, N. Furuichi, M. Aritomi, and H. Kikura. *Experiments in Fluids*, 32, 153 (2002)
- 14) 指定給水装置工事事業者工事施行要領, 東京都水道局 (2021年6月20日閲覧, URL: <https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/files/items/20227/File/6.pdf>)
- 15) 給水装置工事設計施工基準・解説, 神奈川県庁 (2021年6月20日閲覧, URL: <https://www.pref.kanagawa.jp/documents/15160/honpen.pdf>)
- 16) 推理計算例, 千葉県水道局 (2021年6月20日閲覧, URL: <https://www.pref.chiba.lg.jp/suidou/kyuusui/tetsuzuki/documents/6-1suiri.pdf>)
- 17) 給水装置工事設計施工基準, 大阪市水道局 (2021年6月20日閲覧, URL: <https://www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000423986.html>)
- 18) 給水装置工事設計施工指針, 札幌市水道局 (2021年6月20日閲覧, URL: <https://www.city.sapporo.jp/suido/jigyosya/shitei/documents/sekkei-teisei2.pdf>)
- 19) 水道施設設計指針 2012, 厚生労働省 (2021年6月20日閲覧, URL: <https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000103928.pdf>)
- 20) P. Gajan, R. Mottram, P. Hebrard, H. Andriamihafy, and B. Platet. *Flow Measurement and instrumentation*, 3, 118 (1992)
- 21) D. Della Valle, P. A. Tanguy, and P. J. Carreau. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 94, 1 (2000)
- 22) V. Singh and T. J. Tharakan. *Flow Measurement and Instrumentation*, 45, 375 (2015)
- 23) A. Golijanek-Jędrzejczyk, A. Mrowiec, R. Hanus, M. Zych, and D. Świsulski. *Measurement*, 160, 107851 (2020)
- 24) U. Bückle, F. Durst, B. Howe, and A. Melling. *Flow Measurement and Instrumentation*, 3, 215 (1992)
- 25) R. C. Baker and I. Sorbie. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12, 101 (2001)
- 26) A. Venugopal, A. Agrawal, and S. Prabhu. *Sensors and Actuators A: Physical*, 170, 8 (2011)
- 27) G. L. Pankanin. *Measurement Science and Technology*, 16, R1 (2005)
- 28) P. Hebrard, L. Malard, and A. Strzelecki. *Flow Measurement and Instrumentation*, 3, 173 (1992)
- 29) Z. Sun, H. Zhang, and J. Zhou. *Measurement*, 41, 349 (2008)

- 30) F. Laurantzson, R. Örlü, A. Segalini, and P. H. Alfredsson. *Measurement Science and Technology*, 21, 123001 (2010)
- 31) R. McKee. *Flow measurement and instrumentation*, 3, 151 (1992)
- 32) K. Atkinson. *Flow Measurement and Instrumentation*, 3, 167 (1992)
- 33) Z. Džemić, B. Širok, and B. Bizjan. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 18 (2018)
- 34) V. Cushing. *Review of Scientific Instruments*, 36, 1142 (1965)
- 35) J. Wang, G. Tian, and G. Lucas. *Flow Measurement and Instrumentation*, 18, 99 (2007)
- 36) Z. Cao, W. Song, Z. Peng, and L. Xu. *Flow measurement and Instrumentation*, 40, 256 (2014)
- 37) M. Coulaud, R. Fraser, J. Lemay, P. Duquesne, V. Aeschlimann, and C. Deschênes. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volume 49, 062024. IOP Publishing (2016)
- 38) E. Muramatsu, H. Murakawa, D. Hashiguchi, K. Sugimoto, H. Asano, S. Wada, and N. Furuichi. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 94, 49 (2018)
- 39) K. Tawackolian, O. Büker, J. Hogendoorn, and T. Lederer. *Flow Measurement and Instrumentation*, 30, 166 (2013)
- 40) N. Furuichi. *Flow Measurement and Instrumentation*, 33, 202 (2013)
- 41) S. Wada and N. Furuichi. *Measurement*, 179, 109439 (2021)
- 42) A. Beaulieu, E. Foucault, P. Braud, P. Micheau, and P. Szeger. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22, 131 (2011)
- 43) M. Henry, D. Clarke, N. Archer, J. Bowles, M. Leahy, R. Liu, J. Vignos, and F. Zhou. *Control engineering practice*, 8, 487 (2000)
- 44) T. Wang and R. Baker. *Flow Measurement and Instrumentation*, 40, 99 (2014)
- 45) M. Anklin, W. Drahm, and A. Rieder. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17, 317 (2006)
- 46) N. T. Basse. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 40 (2016)
- 47) R. Liu, M. Fuent, M. Henry, and M. Duta. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12, 53 (2001)
- 48) J. Paik, K. Lim, and K. Lee. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1, 171 (1990)
- 49) R. Mottram. *Flow measurement and instrumentation*, 3, 114 (1992)
- 50) G. Mattingly and T. Yeh. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2, 4 (1991)
- 51) R. Cheesewright and C. Clark. *Journal of Fluids and Structures*, 12, 1025 (1998)
- 52) G. Bobovnik, J. Kutin, and I. Bajsić. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 69 (2004)
- 53) F. Laurantzson. Ph.D. thesis, KTH (2010)
- 54) S. Uchida. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, 7, 403 (1956)
- 55) E. L. Yellin. *Circulation research*, 19, 791 (1966)
- 56) M. Y. Gundogdu and M. O. Carpinlioglu. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 42, 384 (1999)
- 57) M. Henry, C. Clark, M. Duta, R. Cheesewright, and M. Tombs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 14, 109 (2003)
- 58) D. Wiklund and M. Peluso. *TECHNICAL PAPERS-ISA*, 422, 463 (2002)
- 59) T. Shimada, S. Oda, Y. Terao, and M. Takamoto. *Flow Measurement and Instrumentation*, 14, 89 (2003)
- 60) R. Doihara, T. Shimada, Y. Terao, and M. Takamoto. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17, 141 (2006)
- 61) I. I. Shinder and M. R. Moldover. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21, 128 (2010)
- 62) M. Tombs, M. Henry, F. Zhou, R. M. Lansangan, and M. Reese. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17, 371 (2006)
- 63) O. Büker, K. Stolt, K. Lindström, P. Wennergren, O. Penttinen, and K. Mattiasson. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79, 101934 (2021)
- 64) H. Castro. *Flow Measurement and Instrumentation*, 77, 101877 (2021)
- 65) E. Batista, A. Furtado, J. Pereira, M. Ferreira, H. Bissig, E. Graham, A. Niemann, A. Timmerman, J. A. e Sousa, F. Ogheard *et al.*. *Flow Measurement and Instrumentation*, 72, 101716 (2020)
- 66) A. Bergant, A. R. Simpson, and A. S. Tijsseling. *Journal of fluids and structures*, 22, 135 (2006)
- 67) I. J. Wygnanski and F. Champagne. *Journal of Fluid Mechanics*, 59, 281 (1973)