



第1回

流量計はなぜ種類が多いのか？

杉 時 夫

このたび四回に分けて、本誌に「流量計測の世界」について書く機会をいただいた。

私は流量計測の専門家ではないが、二十余年にわたり、流量計の製品企画、開発、製造、販売に携わってきたので、これらの経験に基づき、専門でない方々を対象に、流量計測の実態について、私なりの考えを述べることにする。内容の雑ばくさ、誤解、偏見については、何卒ご容赦いただきたい。

私は展示会で弊社のブースを訪問された方々から、時折「流量計にはどうしてこんなに多くの種類があるのか？」という質問を受ける。この質問に対する説明は、十分な回答にはならないまでも、複雑な流量計測の実態をご理解いただく上では大いに有効と思われる。そこで今回は、「流量計の種類が多い理由」について解説する。

「流量計の種類が多い理由」を一口で言えば、流量計測のニーズが他の計測に比べて広域で、かつ多様なためであると言える。

流量計測の対象になる物質は流動するものすべてであり、液体、気体のほかに粉体、粒状体などの固体も含まれ、きわめて多岐である。また、気体、液体、固体の二つ以上が混在する、いわゆる混相流に対しても、しばしば流量計測が必要とされる。

気体と液体の混相流の代表的な例には、温度、圧力が低下して一部が液化した、いわゆる「湿

り蒸気」がある。また、オイルショックの後、盛んに研究されたCOM (Coal-Oil Mix) は液体・固体の混相流、圧送微粉炭は気体・固体の混相流である。また、汚水、気泡を発生する薬液、結露状態の空気などは、不作為に生成された混相流と見なすことができる。このような多様な計測対象に対して、万能の流量計は存在せず、一般に適する計測方法または流量計は、計測対象や目的によってそれぞれ異なる。主要な流量計の一つである電磁流量計は気体の計測には使用できないし、熱式流量計は気体用として優れた性質を備えているが、液体の計測には不向きである。

したがって多様なニーズをカバーするには、他種類の流量計が必要とされるのである。

なお、混相流の流量計測は、各相の混合比を求めるか、または各相ごとの流量を別々に求める必要があり、技術的にきわめて難しい。最もニーズの高い「湿り蒸気」に関しても、十分な流量計測技術は未だに確立されていない。

計測すべき流量の大きさがさまざまであることも、流量計の種類が多い主要な理由の一つである。圧力、温度、液位などの計測では、通常は流体を輸送もしくは貯蔵するハードウェアのサイズに拘らず同一の計測器が使用できるのに対し、流量計では管路のサイズ、あるいは流量の測定範囲に応じて流量計自身の寸法、構造を変えなければならない。したがって同一形式の流量計であっても、サイズ、測定範囲の異なる

ものが多種類必要になる。電磁流量計を例にとれば、検出管の内径は最も小さいもので2.5mm程度であるのに対し、写真1に示す大流量用のものでは3000mmに達する。

さらに被測定流体の状態、すなわち温度、圧力も、流量計の測定原理や構造を決める重要な要素の一つである。被測定流体が高温の場合、流量計を構成するすべての部品の温度がそれぞれの耐熱温度以下になるように配慮する必要がある。流体の近くに置かれるセンサには耐熱温度の高いものを用い、また信号処理用の電子回路は、流体の熱による温度上昇を防止できる構造を採用しなければならない。同様に被測定流体の圧力が高い場合、流体と接触するすべての部分に高い圧力が作用するので、これに十分耐える強固な構造が要求される。一般に耐熱性や耐圧性を高めることはコストの上昇を伴うので、被測定流体が高温や高圧でない場合には、耐熱性、耐圧性の高いものを使用することは不経済である。したがって、被測定流体の種類、流量測定範囲が同じであっても、流体の状態が違え

ば種類の異なる流量計が必要とされるのである。

以上に述べた基本的要素は互いに独立ではなく、実際には組み合わせによってさらに多様化される。たとえば被測定流体の種類、温度、圧力が同じであっても、小流量用と大流量用では、測定原理の全く異なるものがしばしば使用されるし、流体の種類、測定範囲が同じ場合でも、温度と圧力の組み合わせによって適する流量計の種類が異なるのが普通である。とくに近年進歩の著しい半導体センサの場合、高耐圧用には適用できるが高温用への使用は困難であるため、この分野では依然として古典的な原理の流量計が重用されている。やや僭越ではあるが、「このような流量計測の多様性をカバーし、ユーザーのニーズによりマッチした流量計を提供するためである」というのが「流量計の種類が多い理由」に対する私の忌憚のない答である。

（すぎ　ときお　工学博士
東京計装株式会社 代表取締役社長
本会常任理事）

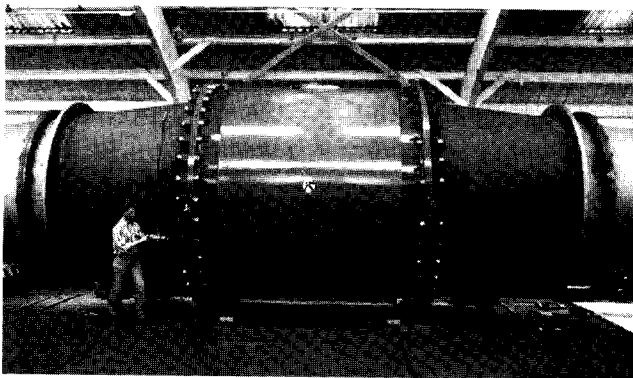


写真1 大口径電磁流量計



第2回

流量計測における気体と液体の違い

杉 時 夫

流体計測の対象となる主な流体は気体と液体であるが、流量計測の立場から見ると気体と液体の間には著しい違いがある。

そこで今回は、流量計測の立場から見た気体と液体の基本的な違いについて述べて見たい。

最も明瞭な気体と液体の相違点は、密度（単位体積あたりの質量）の違いである。0℃、1気圧の空気の密度はおよそ1.29kg/m³、これに対して水の密度は1,000kg/m³であるから、約800倍である。気体の密度は圧力に比例して大きくなるが、圧力が1MPaの圧縮空気ですえ密度は水のおよそ80分の1にすぎない。

一方、流体を流す管路は、建設コストの面では管径が小さいほど望ましいが、流体が管路を流動する際に管壁との摩擦や屈曲部でエネルギー損失が発生し、この損失は流量が等しい場合、大雑把に言って密度の1乗、流速の2乗に比例する。したがって流速を上げる（管径を小さくする）と流体輸送のエネルギー効率が低下して、強力なポンプが必要になり、現実的でない。

このような理由から、通常、密度が著しく異なる気体と液体とでは管路内の流速が大きく相異し、多くの流量計において、方式は同じでも気体用と液体用を兼用することができない。

流速の測定範囲の違いが流量計の構造に大きく影響する代表的な例に軸流羽根車式がある。この流量計は図1のように、流れの中に羽根車を設け、流速に比例した角速度で回転する羽根車の回転数から流量を求める。流速～回転数の

関係は羽根車のねじれ角（ピッチ）によってきまり、調節は出来ないから、流速の高い気体用のものを流速の低い液体の測定に使用すると回転数が低すぎて分解能が得られない。逆に流速の低い液体用のものを流速の高い気体の測定に使用すると、羽根車がオーバーランして破損するので兼用はできない。

ボイル・シャルルの法則が示すように、気体の密度は圧力、温度によって著しく変化する。すなわち、一定質量の気体においては

$$Pv/T = \text{一定} \dots\dots\dots (1)$$

ここで P;圧力、v;体積、T;絶対温度の関係が成り立つ。密度は質量を体積で割ったものであるから、密度は圧力に比例し絶対温度に反比例することになる。

したがって、単位時間に通過した流体の体積（体積流量）では流体の実質的質量（質量流量）

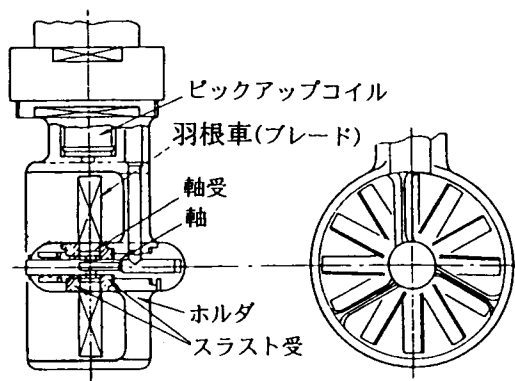


図1 軸流羽根車式流量計

を知ることはできず、体積流量が測定された時の圧力と温度を同時に求める必要がある。

圧力、温度がほぼ既知の一定値に保たれるラインでは、(1)式による単純な補正計算で体積流量を質量流量に換算できるが、実際の圧力または絶対温度が補正計算に用いた値と異なれば、質量流量にも同じ比率の誤差が生じる。このため、体積流量を測定する流量計の場合、圧力、温度が変動するラインでは、圧力計と温度計を別途設けて、体積流量を適宜、質量流量に変換しないと高精度の流量計測はできない。

熱式流量計は、特殊なものを除き気体専用であるが、測定原理上「密度×体積流量」が検出できる、いわゆる質量流量計であり、圧力計、温度計を追加しなくても高い精度が得られ、コスト・パフォーマンスが優れているため、近年急速にマーケットが拡大している。

一方、液体は基本的に非圧縮性であり、圧力の変動による流量測定誤差はきわめて小さい。温度変化に対しては熱膨張により密度が変化するが、気体の場合に比べて精度に及ぼす影響は小さく、補正も容易である。したがって被測定液の組成が変り密度が大きく変化するライン、または被測定液の密度が不明のラインなどを除けば、質量流量計測のニーズは気体の場合に比べてはるかに少ない。近年急速に普及したコリオリ式質量流量計は、組成や密度が不明の被測定流体の質量流量の計測が高精度でできる画期的な流量計であるが、原理的に「密度×流速」の小さいラインには不向きで、高圧で小口径の場合を除き、気体には適用できない。

気体に比べて液体の流量測定の場合に特に影響が大きい要素に粘性(粘度)がある。濃硫酸、燐酸、糖蜜、食用油、重油など、多くの分野で粘度の高い液がしばしば流量測定の対象となる。

流体が管路内を流れる際、粘度は流体と管壁との間に生じる摩擦力に影響を及ぼし、管内の流速分布が粘度によって変化する。分かり易く言えば図2のように、流量が等しい場合、粘度の高い液では粘度の低い液よりも管壁付近の流

速が低く、中心部の流速が高くなるのである。したがって、原理的に流速分布の影響を受けないコリオリ式流量計や電磁流量計を除き、大多数の流量計が、高精度を得るためには、被測定液の粘度の相異に対する補正を必要とする。

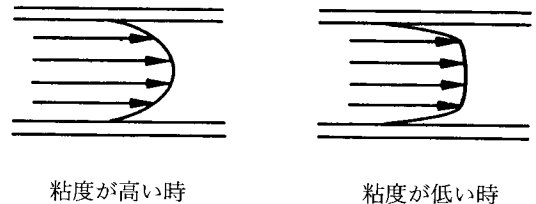


図2 流体の粘度と管内流速分布

先人達の研究により管内の流速分布・流体の粘度・密度・管の内径の間に「レイノルズ数」で知られる相似則が見出され、これを用いれば上記の粘度の違いによる管内の流速分布の影響を、被測定液による校正を行わずに、理論的に補正できることは誠に有難いことである。

また、流体固有の物理的な性質も、一部の流量計にとって適用の可否を決める要因となる。導電性は電磁流量計にとって必須の条件であり、液体であっても導電性が極めて小さい石油類、有機溶剤、超純水等には適用できないし、多くの熱式流量計は熱伝達の良い液体には使用できず、気体専用である。

以上のように、ほとんどの流量計において、気体用と液体用は兼用ができず、これが圧力計や温度計との大きな違いなのである。

（すぎ ときお 工学博士
東京計装株式会社 代表取締役社長
本会常任理事）



第3回 質量流量計

杉 時 夫

技術面から、ここ四半世紀の流量計の歴史を振り返る時、最大の出来事の一つにコリオリ式流量計の実用化が挙げられる。コリオリ式流量計は、良好な使用条件の下では在来の流量計の中で最も高い精度が得られることもさることながら、完全な「質量流量計」の原理による初めての製品であることに、技術的に大きな意義があると言えよう。

今回はコリオリ式流量計を中心に「質量流量計」について述べることにする。

金属などの固体と同様に、液体や気体も実質的な量は「質量」であり、流量計測の究極的な目的は質量流量の計測である。前回も述べたが、液体の場合は密度の変化が小さいため、通常は流量を体積で測っても質量流量と大差がないが、温度変化の範囲が広い場合や密度の温度による変化が大きい液体の場合には、質量流量を計測することが必要になる。例えば石油類の取引量は以前から質量流量で管理されており、液をサンプリングして密度を測定するか、または液の温度から密度を推定するなどして、容積式流量計によって求めた体積流量に密度を乗じて質量流量に換算する方法が広く用いられてきた。このような場合、質量流量計を使用すれば密度を求めることなしに質量流量が得られ省力化ができるだけでなく、誤差要因が少くなり、より高精度の計測が可能になる。コリオリ式流量計はこのような目的に最適な流量計として、この20年間に急速に普及した歴史的に最も新しい流量計である。

コリオリ式流量計の一般的な測定原理を正確

に説明するのは難しいので、初めて実用化されたU字パイプ式の場合を例にとり、概念的な原理を述べておく。すなわち図1に示すように、上下に回転振動するU字形のパイプ内に流体を流すと、コリオリ力によってZ軸まわりに「流体の密度×流速×振動周波数」に比例する振りモーメントが生じ、パイプに振り振動が生じる。

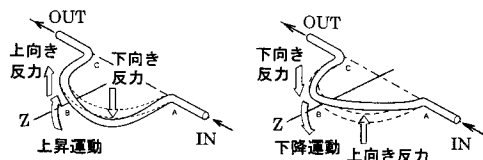


図1 コリオリ式流量計の原理

したがってパイプの振り振動の振幅と振動周波数から「流体の密度×流速」が求まり、これにパイプの断面積を乗じれば「質量流量」が得られる。したがって、流体の種類、物性が未知であっても質量流量が測定できるのである。但し、この振り振動の振幅はきわめて小さく、高精度の測定は容易ではない。また流量を検出するパイプ自身が常時振動しているため、外部から振動が加わると誤差が発生しやすい。これらの技術的な難しさが、コリオリ式流量計が原理的な可能性を注目されながら長い間実用化されなかった主な理由とされている。

初めて実用化に成功したマイクロモーション社（当時）のコリオリ式流量計は、図2のように流れを二本のU字形パイプに均等に分割して流し、互いに逆位相で振動させ、振り振動の振幅を二本のU字パイプの相対的な変位によって

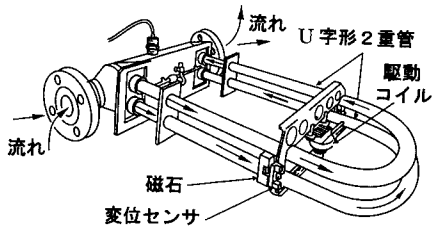


図2 コリオリ式流量計の構造例

求める方法によって問題を解決した。基本的な考え方は微小信号増幅用の電子回路に広く用いられている「差動アンプ」と同様である。

その後、振動するパイプの部分（検出部）の構造の異なる種々の製品が他のメーカー各社から登場し市場が急速に拡大した。現在では図2のような二重曲管式と、単一直管式に二極化しつつあり、それぞれの長所が生きる分野に使い分けられている。

測定原理から明らかであるが、コリオリ式流量計は検出部の出力信号が流体の密度に比例するため、流体の密度が小さくなるにつれて測定精度が低下し、現状では高圧または高密度の特殊なものを除き気体には適用できない。質量流量計測の必要性は液体よりも、圧力、温度の変化に伴って密度が大きく変化する気体においてははるかに大きいので、低密度流体、とくに気体への適用が今後の大きな課題と言えよう。

一方、気体専用の質量流量計として近年マーケットが拡大しているものに、熱式質量流量計（Thermal Mass Flowmeter）がある。気体の流れが熱源から奪う熱量が「流速×密度」に依存することを測定原理としており、基本現象は「風が吹くと涼しい」のと同じである。但し気体が熱源から奪う熱量は、気体の種類によって異なるので、質量流量を知るためには、気体の熱的特性、すなわち、少なくとも気体の種類と組成が既知でなければならない。

現在実用に供せられている熱式質量流量計は、分流細管式（図3）と、挿入センサ式（図4）の二種類に大別される。分流細管式は、主管内

の差圧発生素子の上下、下流間を結ぶ分流細管に加熱と温度測定兼用のPt線を二本巻き、細管内の流量を細管表面の温度分布から求め、これに既知の分流比を乗じて全流量を推定する。

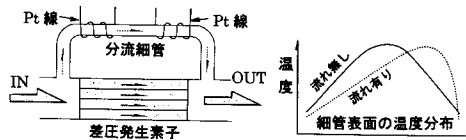


図3 分流細管式熱式質量流量計

一方挿入センサ式は、流路内にヒーターと温度センサを挿入し、ヒーターと気体の温度差が常に一定になるようにヒーターの電力を制御し、ヒーターに供給された電力から流量を求める。

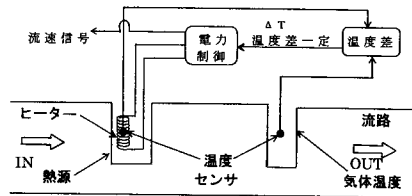
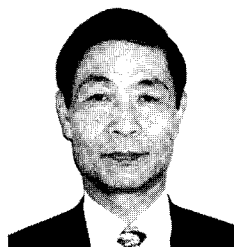


図4 挿入センサ式熱式質量流量計

両者とも長所、短所があり、それぞれの長所が生きる分野で使用されており、分流細管式は近年、流量調節弁と組み合わせられ、マスフローコントローラとして半導体製造装置の定流量制御に使用され、マーケットが急激に拡大しつつある。

圧力、温度センサおよび補正演算装置を付加することなくリアルタイムで気体の質量流量が計測できる熱式質量流量計は、他の体積流量を測定する流量計に比べて主にコスト、精度の面で大きなメリットがあり、特に挿入センサ式は適用範囲が広く、耐久性、コストパフォーマンスに優れるなど潜在的ポテンシャルも高いため、コリオリ式流量計と同様、将来が期待される。

（すぎ ときお 工学博士
東京計装株式会社 代表取締役社長
本会常任理事）



第4回

IT化社会の流量計測技術

杉 時 夫

本稿は4回シリーズの最終回なので、IT化社会との関連を中心に、近未来の流量計測技術の動向について私見を述べることにする。

ITベンチャー企業の株価が、わずか数ヶ月のうちに数十分の一に暴落する現状では、今後のIT化社会がどのようなものかを詳細に予測することは難しいが、「個人レベルで利用できるワールドワイドの低コスト情報通信網が構築され、端末としてパソコン、携帯電話、テレビ、ゲーム機など、通信手段として光ケーブル、電話線、無線（電波）がそれぞれの特長を生かして広く普及する」ことはほぼ確実と見てよいであろう。そこで上記の前提において、IT化社会にマッチするために計量計測技術が指向すべき方向を、流量計を具体例として考察してみる。

まずハードウェアの面では、計測器の出力値は一つの「情報」であるから、まず重要なのはIT化社会の端末とのインターフェースである。具体的に言えば、パソコンや携帯電話などの標準的な端末に計測データを受け渡す簡便な手段が必要になり、従来の0～5V、4～20mAなどのアナログ出力に代わって、デジタル方式が普及すると考えられる。パソコンとの接続では、マイクロソフトがサポートするUSB方式が、最近のパソコン及び周辺機器の多くに標準装備されるようになり、着実にデファクトスタンダードの地位を固めつつある。またUSBのワイヤレス版とも言える「ブルートゥース」も国際規格化され開発が進んでいる。近い将来、流量計においても、装置組込用、実験研究用などの分野

では、USBや「ブルートゥース」対応形のニーズが高まることが予想される。

携帯電話に関しては、主用途である移動端末に計測器を直接接続して使用するニーズは少ないが、今後発達する携帯電話のインフラを広域無線通信網として用いた計量計測システムが有望と考えられる。本年4月のINTERMEASURE 2000において計工連が展示した「ケーブルレス計量計測システム」は、携帯電話（PHSを含む）のネットワークを利用して計測データを伝送するシステムの一つの提案モデルであるが、信号伝送ラインの敷設に要するコストが全く不要なこと、携帯電話ネットワーク内のどこからでもアクセスが可能なこと、電源のない僻地や防爆地域にも設置が可能なことなど、多くの長所があり、今後のIT化社会の発達の過程で新しい計量計測システムとして具体化され、新しい計量計測のニーズの創出につながることを期待される。現段階で予測されるニーズには、気象観測、環境計測、天変地異の予知、広域パイプラインの監視など、電源の確保が困難な地域に計測器を設置するケースが多いが、この場合、太陽電池と二次電池を組合せたパワーパックを電源として使用することになるので、計測器、無線通信ユニットの低電圧動作とローパワー化が必要となる。とくに現在の携帯電話は送信時の消費電力が大きいため、上記のパワーパックで動作させる場合、データの伝送頻度を高くすることが難しい。この問題を解決し適用分野を拡大するためには、電源供給が可能な場所にあ

る携帯電話に計測データを伝送するローパワーの無線通信ユニットを開発し、図1のような構成とすることが望まれる。これと同時に、計測センサ自身の動作電圧を下げ、ローパワー化することも大切である。

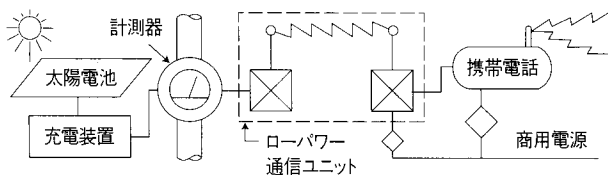


図1 ケーブルレス計測システムの改良案

一方ソフトウェアの面では、流量計との信号授受がアナログ単方向からデジタル双方向になることにより、ソフトウェアによる機能の大幅な向上が可能になる。図2は前回の稿で紹介した熱式質量流量計のUSB対応形の構成例であるが、接続する流量計専用のパッケージソフトをパソコン側に搭載することにより、パソコン側から被測定気体のパラメータ、流れ条件、流量計の動作モードなどの使用条件を流量計に随時ダウンロードし、流量計を常に使用目的に対してベストで動作させることが可能になる。

このような考え方は計測業界には以前からあ

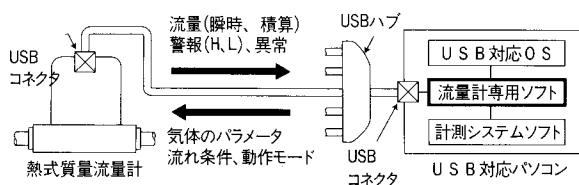


図2 USB対応形流量計の構成例

り、代表例がフィールドバスであるが、未だに普及したとは言いがたい。その主な理由は、製品開発の技術的な難しさ、コストの上昇、標準化の失敗などである。これに対し昨今のパソコン及び周辺機器におけるUSBの普及率、便利性、ユーザの負担コストを見ると、USB対応計測器

の将来性をフィールドバスの場合と同列に論じることができない。

2次ではあるが、「IT革命」とも言われるIT化社会の急速な発展が計量計測技術に及ぼす最大の影響は、半導体を軸とする電子部品の性能の向上、生産量の拡大、それに伴う価格の低下である。好例はパソコンであるが、IT革命を支える電子機器は、時とともに性能が向上し、価格は逆に低下してマーケットが拡大するから、新製品ほど良くて安いことになる。同様に流量計もIT製品に使用される新しい進んだ電子技術や部品を活用することにより、コスト・パフォーマンスを大幅に改善できる可能性が高い。したがって、新しい電子技術を自らの製品に的確に応用する技術力と、製品開発のスピードが、今後一層重要になる。また、IT革命によって今後急速に進歩するデジタル技術を測定原理の面でうまく応用した新製品が優位になると考えられる。具体的に計測に応用できそうな基本技術としては、先述の無線通信、低電圧駆動、ローパワー化に加え、光ファイバ通信、マイクロ波、高機能CPU、超高速信号処理(DSP)、イメージセンサなどが挙げられる。

これらの新技術の有効活用は、新製品のみならず、既存の製品の大幅な性能向上およびコストダウンにも寄与する。私見であるが、流量計においては、コリオリ式流量計、渦流量計、超音波流量計、熱式質量流量計などが原理的に新技術を有効に活用しやすく、今後の進歩がとくに期待できそうである。

結論として、ITの発展によりもたらされる新技術を迅速かつ有効に活用し、コストを含めたユーザの新しいニーズにフィットする製品を提供し続けることが、IT化社会における我々流量計メーカーの生きる道であると考えている。

（すぎ ときお 工学博士
東京計装株式会社 代表取締役社長
本会常任理事）