

入門講座

実験テクニック編(流体計測)基礎概説-4

流量測定

Flow Rate Measurement

佐々木康

Yasushi Sasaki

井口 学

Manabu Iguchi

北海道大学 大学院工学研究科
物質工学専攻 助手

同上 教授

1 はじめに

鉄鋼製造の各プロセスにおいて原料、輸送、制御などに多種多様なガスや液体が使用されており、効率的かつ適切な操作を行うために、各種流体の流量測定は非常に重要であり、状況に応じて様々な方式で流量測定が行われている。高温プロセス研究の実験においても正確な流量を求めることが必要となる。このため、流量の測定法は流体の種類や流量に応じて数多くの方法が開発され、これらについて多くの解説書やハンドブックも出版されている¹⁻⁴⁾。本稿では管路内の液体、気体の流量測定についてその測定原理を主体に説明する。

前稿⁵⁾で述べられたように、流速はベクトル量であり、測定には速度とその方向の二つの値が必要であるが、流量はスカラー量であり、測定は単位時間あたりに流れる流体の量だけを求めればよい。流量と流速の間には密接な関係があり、流速分布、もしくは平均速度が分かればそれらを断面積全体について積分することにより流量が求まる。一般的に、流量の測定は円管内の流体の場合について行われる事が多いが、円管内の流れに関しては、半径方向での速度分布や最大速度と平均速度の間の関係式などが既に確立しており、円管内の所定の位置での流速が測定できれば、簡単に平均流速を求めることが出来る。そのため基本的には前稿⁵⁾で説明した流速測定法を流量測定法としても使用する事が可能であり、特に平均流速を測定する方式(たとえば、渦流速計や電磁流速計)では断面積を掛ければ流量が得られるため、流量測定方式とも考えられる。もちろん、流速の測定を必要とせず、流量を直接測定する方式も数多く開発されており、用途に応じて各方式の特長を生かし、使用されている。

管路の流量測定方式に関しては色々な分類が出来るが、測定量により分類すると体積流量、質量流量、積算体積流量に区分できる²⁾。体積流量は測定時点において単位時間あたりに流れている流体体積量、質量流量は測定時点において単位

時間あたりに流れている流体の質量、積算体積流量は過去のある時間から現在までに流れた流体の積算体積量を示す。積算体積流量計で流量を測定する場合、ある時点での体積流量を求めるには積算流量値の時間変化、つまり微分値を求めることにより得られる。体積は温度や圧力の関数となるので、減圧下における流量測定においては単位時間あたり何m³の体積が流れているかを示す体積流量でなく、何モルもしくは何Kg流れているかを示す質量流量を求める方が便利である。体積流量に測定時における圧力や温度に対応する密度を掛けることにより質量流量に換算できる。

2 体積流量計

2.1 差圧式流量計

この方式は機械的可動部がなく、また構造的に簡単なため工業的に最も広く用いられている。また標準的な仕様はISOやJIS⁶⁾で規定されており、形状、取り付け方法、流量の計算式などが確立しているため、簡単に運用できるようになっている。実験室ではこの方式の一つであるマノメーターが広く用いられてきた。

流体がパイプ内を一様に流れているとき、任意の箇所に絞り機構を入れると、絞り部を通過する際、流体の速度が上昇し、それにより静圧が低下する(ベルヌーイの法則)。絞りにより生じる流れと圧力変化の概要をFig.1に示した。

Fig.1において①と②の位置における速度と圧力をそれぞれ v_1 、 v_2 、 p_1 、 p_2 とし、 z_1 、 z_2 を基準面からの高さ、 ρ_1 、 ρ_2 は流体の密度とすると、この絞り部の上流側と下流側の間に生じる圧力差は流量と一定の比例関係があり、その関係はベルヌーイの定理から理論的に求めることが出来る⁷⁾。

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho_1 g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho_2 g} + z_2 = \text{const.} \dots \dots \dots (1)$$

ここでgは重力定数である。管路が水平、かつ流体が非圧

縮性とする

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \dots\dots\dots (2)$$

Fig.1に示したようにオリフィスを通過後、流体速度は速くなるが、圧力は逆に低下する。絞りの上流側での断面積を A_1 とし、下流側の断面積を A_2 (実査にはオリフィスの孔の面積より若干小さい) 流れている流量を Q とすると

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = Q \dots\dots\dots (3)$$

となり (2) と (3) から

$$Q = A_2 v_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1-m^2}} \frac{\sqrt{2(p_1-p_2)}}{\sqrt{\rho}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで $m=A_2/A_1$ で絞り面積比と言う。

(4) 式は理想流体が理想的に流れた場合を想定しており、実際の流量は流体の粘性、絞りの形状などによって、差圧だけでは決まらず、補正が必要となる。たとえば、(4) 式において A_2 は絞りの下流の位置での流れの面積であるが、実際には流体の慣性による縮流現象により最小断面積はオリフィスの孔径より小さくなっており、この割合を縮流係数 C_c (<1) で表す。さらにオリフィスの上流と下流の間で摩擦や渦発生などによりエネルギー損失があり、下流側での実際の流速は (3) 式の関係から求めた v_2 より遅くなる。この遅くなった速度を v_2' とすると速度係数 C_v を導入して $v_2'=C_v v_2$ と表すことが出来る。これらの二つの係数を考慮した場合、流量係数を α として、 $\alpha = C_c C_v / \sqrt{1-m^2}$ と定義すると、流量は以下の式で表せる。

$$Q = \alpha m A_1 \frac{\sqrt{2(p_1-p_2)}}{\sqrt{\rho}} \dots\dots\dots (5)$$

気体の流量測定では、さらに圧力変化による膨張の影響の考慮も必要とする場合がある。標準的な流量計については流量係数などの補正係数を求めるために膨大な実験が行われ、それにもとづいて計算式が既に確立し、JISなどにも記載されており、実用的には条件に対応した適切な計算式を用いて差圧 ΔP から流量 Q を正確に求める事ができる。

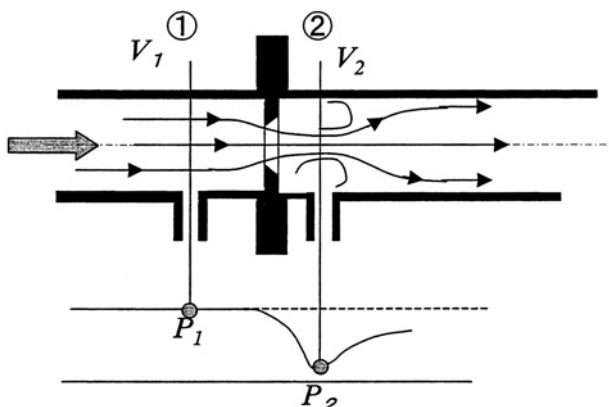


Fig.1 Flow and Pressure distribution of fluid through orifice

2.2 面積流量計

面積流量計は原理的には差圧式流量計の応用例と見なせる。差圧式とともに広く使用されている。差圧式ではオリフィスなどの絞りにより発生する差圧を測定するが、面積式では逆に差圧を一定にし、流量に応じて絞りを变化させる機構となっている^{8,9)}。その基本的な構成をFig.2に示した。

つまりテーパ管中に浮子 (うき) を入れ、下方から流体を流すと流体は浮子とテーパ管の間の環状部を通り抜けるが、このとき流体が流れる流通面積が浮きがあるため狭くなっており、このため差圧が発生する。浮子はこの発生した差圧により力を受け、上昇する。しかし管にはテーパがあるため、浮子の上昇につれ管の断面積が大きくなりそれにより流体が流れる環状部面積が広くなるため差圧が減少し、最終的には浮子の重さと浮子にかかる力 (差圧 $\Delta P \times$ 浮きの最大断面積 A_{max}) とが等しくなる位置で浮きは停止する。差圧式流量計の項で述べたように面積 A の絞りを通るときの流量と差圧の関係は一般的に次式で表される。

$$Q = k A \sqrt{\Delta P / \rho_0} \dots\dots\dots (6)$$

k は実験から求まる定数、 ρ_0 は流体の密度である。浮子の重さを W とすると浮子が釣り合った状態では

$$\Delta P = W / A_{max} \dots\dots\dots (7)$$

となる。よって (6) と (7) から

$$Q = k A \sqrt{\frac{W}{A_{max} \rho_0}} \dots\dots\dots (8)$$

つまり、流量 Q は絞り部の流通面積 A に比例する。絞り部の面積は浮きの位置の関数として既知であるので、浮きの位置から流量を求めることが出来る。浮子としては各種形状の物が開発されている。以前には浮子が安定して直立に上昇する

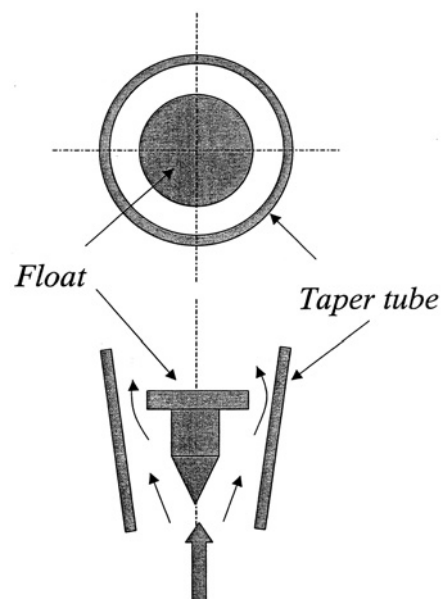


Fig.2 Flow around float

ように浮子に螺旋状の溝を付け、浮子が回転運動をするようにした流量計があり、一般にロータメーター (Rotameter) と呼ばれていたが、現在はあまり使用されていない。

2.3 層流流量計

差圧式流量計は絞りを入れ、乱流状態で測定する事が前提となっている。この場合、絞り部の前後に発生する差圧は流量の2乗に比例する。しかし細管や狭い隙間などによる絞り部を流体が層流で流れている場合、絞り部の前後に発生する差圧は流量に比例する。このことは円管内の流れの場合、いわゆる *Hagen-Poiseuille* 流れ¹⁰⁾ として良く知られている。つまり半径 R 、長さ L の円管内を粘度 η の流体が流れる場合、その流量と差圧 ΔP の関係は以下の式で表される。

$$Q = \pi R^4 (\Delta P) / 8L\eta \quad \dots\dots\dots (9)$$

つまり管の寸法と流体の粘度が分かれば、差圧から流量を求める事が出来る。層流流量計はこのような絞り機構をもちいて層流状態を保ちながら差圧を発生させて流量を測定する方式であり、差圧式に比べて圧力損失が小さく、測定範囲が広い長所がある。特に微小流量の計測に適しており、後で述べる熱式流量計の校正に用いられている。層流流量計の概略図を Fig.3 に示した。図にも示したが実用的には層流状態を乱さないために、差圧を測定する細管絞り位置の前後に整流格子などを設置する。

2.4 電磁流量計

電磁流量計はファラデーの電磁誘導の法則にもとづいて導電性の液体の流量を測定するもので、Fig.4 に電磁流量計の概念図を示した¹¹⁾。つまり、円管内の所定の位置において垂直に磁界が与えられているとき、その磁界を導電性の液体が横切ると、液体の平均速度と磁界の強さに比例した電圧が液体に発生する。この発生する電圧を液流れと磁界の両方に垂直な位置に設置した電極で測定する。

発生する起電力を E 、磁束密度を B 、平均流速を v 、管の直径を D とすると

$$E = kBDv \quad \dots\dots\dots (10)$$

の関係が得られる。ここで k は定数である。管の断面積は $(\pi/4)D^2$ なので液体の流量 Q は $(\pi/4)D^2v$ となる。よって、

$$Q = \frac{\pi D}{4kB} E \quad \dots\dots\dots (11)$$

の関係が得られる。この発生する起電力 E の大きさを測定することにより、導電性流体の流量 Q を求める事が出来る。当然ながら、本法は導電性のある液体の流量測定に用いられ、気体には導電性がないので使用できない。また原則的には管内が液体で完全に満たされていない場合は測定できない。本法は外部から間接的に測定できるので血液の流れ測定など医療用分野にも用いられている。

2.5 超音波流量計

超音波の利用による流量測定には、流れている流体中の超音波伝搬速度が流れの影響を受けることを利用する方式と、流体とともに運動している微少粒子により超音波の散乱波が受けるドップラー効果を利用する方式がある¹⁴⁾。超音波伝搬速度が流れの影響を受けることを利用する方式の原理は簡単で、その概念図を Fig.5 に示した。管路内に超音波の送受信機を距離 L だけとはして2組設置する。一つは流体が流れている方向に超音波を送り、他方は反対方向に送る。この場合、

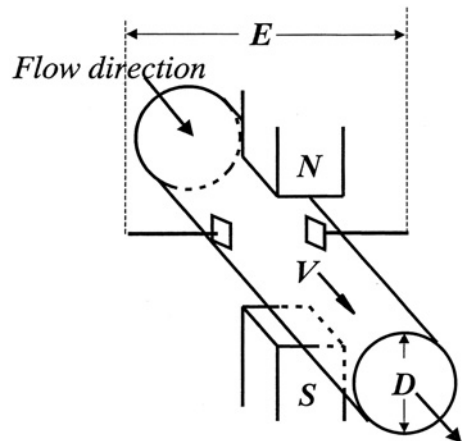


Fig.4 Schematic of electromagnetic flow-meter

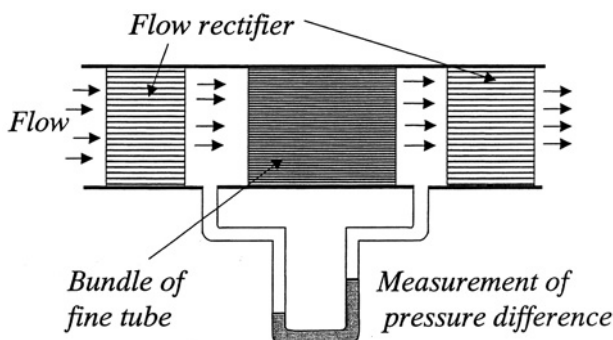


Fig.3 Schematic of laminar flow flow-meter

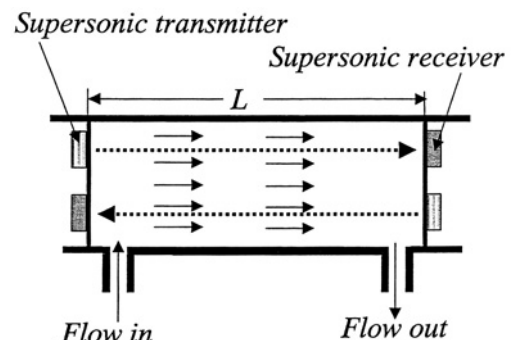


Fig.5 Schematic of supersonic flow-meter

流れに沿った場合と逆方向それぞれの超音波到達時間 t_1 、 t_2 は

$$t_1 = L / (C + V) \quad (\text{流れ方向}) \dots\dots\dots (12)$$

$$t_2 = L / (C - V) \quad (\text{反対方向}) \dots\dots\dots (12)'$$

となる。ここで L は管内を通過する距離、 C は静止流体中での音速、 V は流体の流速を示す。つまり超音波は流れに沿った場合の方が流れに逆らう場合より早く伝搬する。この伝搬速度の差は流体の流れに依存することになるため、この伝搬速度の差異を測定して流体の速度を求め、この流速から流量を求めることが出来る¹²⁾。

通常の条件では音速 C は流体速度 V に比べて遙かに大きいので $C \gg V$ としてこれから両者の到達時間差

$$\Delta t = (t_1 - t_2) = 2LV / C^2 \dots\dots\dots (13)$$

となり、 Δt を求めれば流速が求まる。Fig.5では簡単のため超音波の流れに平行に送信する概念図を示したが、実際には管壁の一方から反対壁に管内を横切るように送信する場合が多い。この場合、求まる流速は管内を通る超音波経路上の線平均流速であるが、円管での流れは中心部で早く、管壁付近では流速が遅いため、求めた V の値は平均流速とは異なる。このため、求めた線平均速度 V の値を平均流量に換算するための換算係数がレイノルズ数 Re の関数として与えられている⁴⁾。また通常の条件では、音速と比べて流体流速が小さくまた音速は温度の関数であるため誤差が大きくなる。このため、これらの誤差を減らすため、種々の工夫がなされ、実用的にはシングアランド法や時間差法などが開発されて用いられている。この方式は気体でも液体でも測定が可能であり、また管の外側から超音波を送信するため、配管の加工を必要としない便利な方式である。しかし流体中に懸濁粒子がある場合は超音波が散乱されるため使用が困難となる。逆に懸濁粒子が存在する場合は次に述べるドップラー方式による測定法が有効である。

ドップラー方式¹³⁾は流体中に浮遊している微少粒子や気泡からの超音波反射を利用する測定法で概念図をFig.6に示

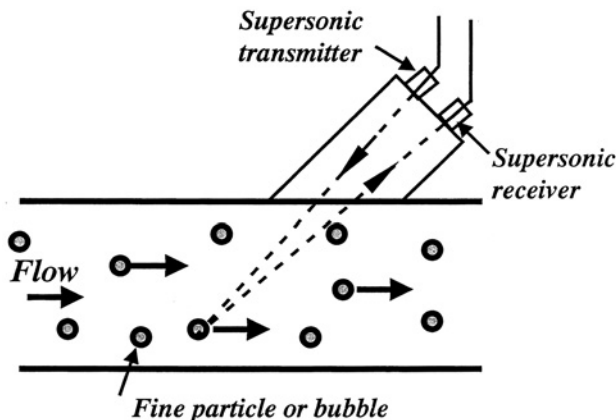


Fig.6 Flow rate measurement based on the Doppler effect

した。流体中に微少な粒子や気泡が存在し、これが流体と同じ速度で流れている場合を考える。管路内に超音波の発信器と受信機を取り付け、粒子などに向けて超音波を発進し、粒子などからの散乱波を受信する。音速に対して粒子などの速度が小さい場合、送信した超音波周波数 $f(tr)$ と散乱されて戻った受信超音波周波数 $f(sc)$ の差、つまりドップラー周波数 $f(dp)$ は以下の式で表される。

$$f(dp) = |f(tr) - f(sc)| = f(tr) \frac{2V \cos \theta}{C} \dots\dots\dots (14)$$

ここで C は音速、 V は流速、 θ は粒子の運動方向と超音波の伝搬方向とがなす角度である。

つまり超音波の送信波と受信波の周波数の差が求まれば、(1)式から流体の速度 V を求めることが出来る。ドップラー方式では測定部が1点であるため流速分布の影響を大きく受けるので流量換算するためには、管路内の流速分布を知っておく必要がある。また一般的には気泡や固形物などが無いと測定できないが、配管に曲がり部などを入れると流れが乱れて圧力境界面が生じる。ここに超音波を送り、そこからの反射波との周波数の差を用いて流速を求める方式も開発されている。この場合、気泡や固形物などがなくても測定が出来る。

3 質量流量計

3.1 熱式流量計

熱式流量計は測定部の流体による温度変化を利用して流体の質量流量を測定する方式で既に1911年にいわゆるトーマスガスメーターとして提案されている。しかし熱式流量計が実用的に広く使用されるようになったのはNASAにより、流量測定だけでなく流量制御をも可能としたマスフローコントローラーが開発されてからである。熱式流量計は低圧下や微小流量でも精度良く流量測定が出来るため、半導体産業で広く用いられるようになり、大きく発展した。主に気体に用いられる。原理は簡単で、Fig.7にその概略を示したが、中央部をヒーターにより加熱した金属管に流体を流す。気体の流れしていないときはヒーターの両側にある2つの温度は同じ値を示すが、気体が流れているときは、ヒーターから熱エネルギーが流体に移動するため、下流側の測温点の温度が上がり、二つの温度計において ΔT の温度差が生じる。このとき移動する熱量 Q は流体の定圧比熱(C_p)×流体の温度上昇(ΔT)×流体の質量流量(v)に比例する。つまり

$$Q = C_p \Delta T v \dots\dots\dots (15)$$

(15)式から C_p が既知の流体の温度上昇 ΔT を測定すれば、質量流量 Q が求まる。

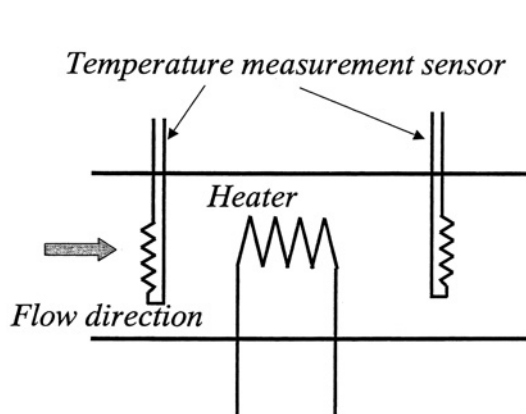


Fig.7 Schematic of thermal flow-meter

3.2 コリオリ流量計

コリオリ流量計は1979年に製品化されたもので、これまでにない全く新しい原理に基づいて質量流量を直接測定する方式である^{14,15)}。Fig.8にその測定原理を示した。流体が流れているU字形のパイプを外部から励磁により上下に固有の振動数で振動させる。パイプは片支持のため先端に行くほど垂直方向の速度が増加、つまり垂直方向の速度が変化することになる。つまり流体はパイプから垂直の加速度を受ける。この場合、[質量×加速度]は力そのものなので、逆にU字パイプが流体に力を加えていることになる。一方、流体は慣性があるので直進しようとするので、流体からパイプに反力が働く。これをコリオリの力と言っている。流体がU字部を過ぎてパイプから戻っていくときには、加速度が逆方向に働くためパイプに働く力はU字部に入る前とは反対方向となる。この結果、Fig.8の下部に示すように、流体がパイプに及ぼす力によりU字管にねじりが生じる。このねじり角 θ (通常、最大流量でこの角度は1度以下)は質量流量に比例するので、このねじり角の変化を測定して流量を求めることが出来る。ねじり角はU字管に設置した磁石とコイルを用いてU字管の振動により励起される電流を測定することにより微小角度を測定して求める。コリオリ式流量計の最大の長所は質量流量を直接求めることが可能な点にある。また通常はスラリー溶液、高粘度溶液、高圧気体、および気泡が均一に分散している流体など通常は測定が困難な流体でも比較的容易に測定することが可能である。

原理的には簡単であるが、実際の測定使用に関しては外部の振動など、種々の多くの誤差要因がある。このため実用的には2本のU字管を組み合わせ、これを逆位相で振動させて、外部からの振動を相殺するなど、誤差を防ぐ多くの改良工夫がなされている。

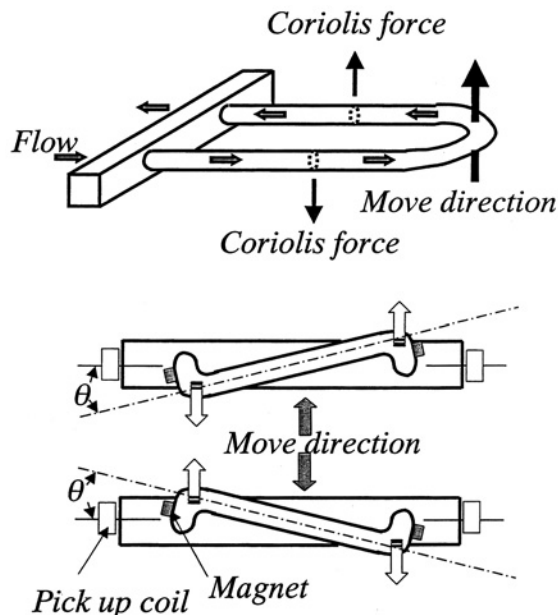


Fig.8 Movement of U-shape pipe in Coriolis' force flow-meter

4 積算体積流量計

4.1 容積流量計

一定の容積を持つ容器に流体をためた後、それを順番に送り出す操作を繰り返す方式で、その容器の容積をあらかじめ求めておけば、送り出した頻度から通過した体積つまり積算流量を求める事ができ、また単位時間当たりの送り出す頻度から流量を求めることが出来る。一般的には乾式ガスメーター、湿式ガスメーターとして良く知られている。簡単ではあるが比較的高い精度で測定することができる。原理が単純なため、多種多様な方式が開発され、用途や精度に応じて使用されている。高精度の測定には2個以上の回転子を組み合わせたオーバル式容積流量計やルーツ式容積流量計がある。

容積流量計としては最も簡単な機構のものに石鹸膜流量計がある。所定の管径を持つパイプ内に薄い石鹸膜を張り、下方から流体を流すことにより石鹸膜を上昇させ、所定の距離間を移動する時間を測定することにより短時間当たりに流れる流量を求める。管径の加工精度を上げ、かつ石鹸膜の通過を光強度の変化などを利用すれば非常に正確な流量測定が可能となるため、他の流量計の検定用にも使用されている。用いる液体は気体と反応しない物を用いる必要がある。

4.2 渦流量計

前稿の速度測定⁵⁾で述べられたカルマン渦流速計と同じ原理により流量を測定する方式である。良く知られているように流体の流れに置かれた円柱の後にはいわゆるカルマン渦が発生する。このカルマン渦の発生周波数が流速に比例する

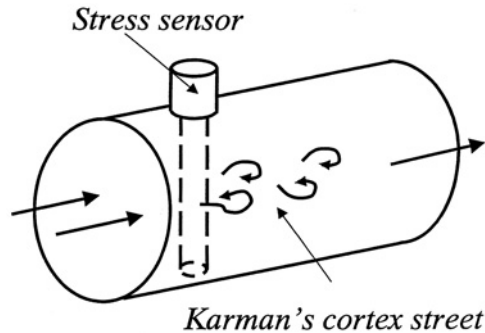


Fig.9 Schematic of vortex flow-meter

性質を利用して流量を測定する方式で、以前はカルマン渦流量計と言っていた。実際の測定には渦のはがれる位置が一定である事が望ましく、円柱でなく断面形状が台形や三角形などの渦発生体が用いられている。測定装置の概念図をFig.9に示した。

渦の周波数とレイノルズ数の関係はこれまで非常に多くの測定がなされており、無次元数、ストローハル数、 $St (=fd/v)$ との関係として実験的に求められているが、レイノルズ数が 10^2 から 10^5 の広い範囲で St 数がほぼ一定の0.2となることが知られている¹⁷⁾。つまり渦発生体の代表長さを d 、流速を v 、渦の発生周期を f とすると

$$f = 0.2v/d \quad \dots\dots\dots (16)$$

の関係が成立する。よって(16)式が成立する範囲において、発生する渦による周波数 f を測定すれば流速 v を求める事が出来、これから流量を計算することが出来る。

発生する渦の周波数の検出は渦が通過することにより生じる流れの乱れにより熱伝達係数が変化することによる熱線やサーミスタの温度変化、(発生する超音波の振幅や周波数の変調の測定)、渦が離れる時に生じる力による渦発生体の微小変位を歪みゲージなどによって測定することなどにより、渦発生体の周波数を求める。Fig.9においては渦発生体の上部に応力感知するセンサーと取り付けられている例を示した。渦流量計では渦発生体の周期の測定が必要なため、測定には一定の時間幅が必要となり、そのため求まるのはこの測定時間幅における平均流量となる。差圧式に比べて圧力損失が非常に少なく、また同一の検出器で液体も気体も測定できる特長がある。原理は異なるが、流れの変動を利用する方法として、フィルディック流量計がある。これは流体のコアンダ効果を利用して流れが二つの出口に交互に流れるように工夫し、その交互の変動周期から流量を求める方式である。

4.3 翼車(タービン)流量計

前稿の速度測定⁵⁾で述べられたプロペラ流速計と同じ原理により流量を測定する方式で、流体中におかれた羽車の回転数と流体の平均速度の関係から流量を求める。一般に水道水の流量測定に用いられている方式である。回転軸に対して斜めに羽をつけた回転車を持つ流量計が軸流羽根車式流量計で羽根車の形がタービンに似ているのでタービン流量計とも言われる。軸に対して放射状に直角に羽をつけた車を持つ流量計を接線流羽根車式流量計と言い、どちらも羽車は流速に比例した速度で回転する。簡単ではあるが、精度はあまり高くない。密度の関係で気体より液体の流量測定に適している。

4.4 動圧板流量計

前稿の速度測定⁵⁾で述べられた流動抵抗流速計と同じ原理により流量を測定する方式で、管路内の一様な流れのなかに垂直に板を設置するとこの板に動圧が生じる。圧力測定の章で述べられたように¹⁶⁾、この動圧、言い換えればこの板に働く力は(流体の密度)×(流速)²に比例する。つまり流体の密度を ρ 、板に働く力を F 、流速を v 、比例定数を k とすると

$$F = kv^2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

流速に断面積を掛ければ流量が得られるので、流量を Q 、管の断面積を S として、

$$Q = S (F/k\rho)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

の関係が成立する。よって(18)式より板に働く力 F を測定すれば流量 Q を求めることが出来る。

4.5 せき式流量計

これまで述べてきた液体の流量測定は原則として管内を完全に満たした状態を仮定しているの、非満水の場合、これらの方式は用いる事ができない。しかし各種廃水などの多くは非満水状態で流れているため、これらの流量を測定するために多くの方式が開発されているが、水の流量測定に良く用いられているせき式流量計について説明する。せきを流れる水の流れをFig.10に示したが、水路の途中に上部に切欠きを設けたせきを用いて、流れをせき止めると、流れはこの切欠きを通過して下流に流れ落ちる。このときせき止めた板の

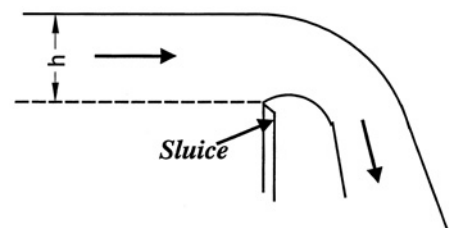


Fig.10 Flow over sluice

上流側の水位 (Fig.10 における h) は流れの流量と一定の関係があるので、この水位を測定することにより流量を求めることが出来る。水位はせきに設けた切欠きの形状により、対応する流量計算式が確立しており、JISにも規定されている¹⁸⁾。

なお切欠きが四角の場合、流量は水位の1.5乗、直角三角形では2乗に比例する。このせきを用いた流量測定法は構造が簡単で価格も安く、精度・信頼性に優れているので、広く普及している。この方式ではある程度の水位差を必要とするが、水位がとれない場合はパーシャルフリューム式流量計を用いる。パーシャルフリューム式流量計は水路の一部を絞ったりするなどして流れを加速して、下流の水位変化の影響が上流に及ばなくすることにより、上流部の水位を測定して流量を求める方式であり、本方式も広く用いられている。

5 終わりに

一般的に使用されている流量測定方式について、その測定原理を中心に解説を行った。前述したように、鉄鋼プロセスの高度化は正確なプロセス変数の測定・制御技術があって達成できるものであり、今後の環境問題などに対応した新しい鉄鋼プロセスに発展にはプロセス自体の開発のみならず、各種センシング技術の開発が決定的に重要であり、流量測定に関しても、これまで測定が困難である混層流の流量測定や、熔融金属などの高温流体に関して、より安定、正確、かつ安価な方式の開発が期待される。

参考文献

- 1) 日本機械学会：技術資料 流体計測法，日本機械学会，(1985)
- 2) 松山 裕：実用流量測定，(財)省エネルギーセンター，
- 3) 川田裕郎ほか編：流量計測ハンドブック，日刊工業新聞社，(1979)
- 4) 片岡照栄，柴田幸男，高橋 清，山崎弘郎：センサハンドブック，培風館，489.
- 5) 井口 学，佐々木康：ふえらむ，1 (2001)，14.
- 6) JIS Z 8762，絞り機構による流量測定，(1988)
- 7) R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot：Transport phenomena, John Wiley & Sons, New York, (1960)，471.
- 8) JIS B7551，フロート型面積流量計
- 9) JIS B8761，フロート型面積流量計による流量測定
- 10) 7) のp.46.
- 11) R. Ricou and C. Vives：J. Heat Mass Transfer, 25 (1982)，1579.
- 12) 日本電気計測器工業界規格 (JEMIS 032)，(1987)
- 13) 山中軍治：計測技術，16 (1988) 5，88.
- 14) 近藤誠二：計測技術，17 (1989) 11，52.
- 15) 佐島 弘：計装，32 (1989) 9，6.
- 16) 井口 学，松浦清隆：ふえらむ，12 (2000)，876.
- 17) 小川 明：渦学，培風館，東京，(1981)，15.
- 18) JIS B8302，ポンプ吐き出し量測定方法，(1900)

(2000年4月27日受付)