

流量計ガイド

～選択と使い方の勘どころ～

黒森 健一

<目次>

0. 本書のねらい	3
1. プロセスにおける流量測定の特徴	4
2. 流量計の分類	15
3. 差圧式流量計	19
4. 電磁流量計	29
5. コリオリ流量計	40
6. 超音波流量計	47
7. 渦流量計	56
8. 容積流量計	62
9. 面積流量計	66
10. その他の流量計（熱式、タービン、開水路）	69
11. 流量計の選択	73
12. 流量計を含むフィールド機器の新しい技術	80
13. 流量計開発の歴史	83
14. 参考文献、参考 Web-site	85

著者略歴

1967年 京都大学理学部物理学科 卒業（生物物理）

1967年 森永乳業（株）入社、68年退社

1972年 北海道大学大学院修士課程 修了（物理専攻）（強誘電体の相転移研究）

1972年 （株）北辰電機製作所（現 横河電機（株））入社、流量計の開発

1979-81年 米国 Fischer & Porter 社に勤務

1995年 電磁流量計の研究で博士（工学）（早稲田大学）

2004年 横河電機（株）定年退職

1972-2004年のあいだ、開水路流量計、電磁流量計、渦流量計、コリオリ流量計、超音波流量計、差圧伝送器など流量計・フィールド機器の開発に携わる。

2004年 東京計装（株）入社、05年退社 （半導体用の超音波流量計）

2005-07年 横河電機（株）コンサルタント （差圧伝送器によるプロセス診断）

著書

計測自動制御学会編：『産業応用計測技術』（共著）、コロナ社、（2003）



0. 本書のねらい

流量計の測定原理から、流体に合ったタイプの選択と適用、使用上の留意点、さらに市場に出ている具体的な機種の特長や製造メーカーまでが一覧できるハンドブック（便覧）や実用書は、すでにいくつか出版されています^{1,2)}。

この本は、比較的若い世代の計装エンジニア向けに、i) 環境問題や省エネルギーの課題にとりくむための流量計測の基礎を解説する、ii) それぞれの測定原理に特有なトラブル事例を紹介し、どのような技術でそのトラブルを回避する対策がなされているかを解説することを目的として執筆されました。

半導体や食品・薬品などの成長分野の業種では、新しいタイプの流量計が開発されていますが、流量計全体をみれば、流量計は実績と信頼性を重視するため、比較的進歩のゆるやかな技術分野だと思います。

筆者は工業計測器メーカーのエンジニアとして30数年、いろいろなタイプの流量計の開発に携わってきました。この間、それぞれのタイプの特徴（長所と短所）を、とくに実際の現場でのトラブルを経験しながら、学んできました。

この経験が、若い世代の開発エンジニアや現場の計装エンジニアの方々に、多少なりとも参考になるのではないかと思いながら、この『流量計ガイド』を執筆しました。読者には、便覧としての活用よりも、最適な流量計を選択するセンスを養ってもらい、できるかぎりトラブルを回避しつつ、種々のタイプの流量計を賢明に使いこなしてもらうことを望んでいます。ところどころに、筆者独自の考え方が織り込まれていますが、カタログや便覧にはない‘流量計測の勘どころ’を感じとっていただければ幸いです。

1. プロセスにおける流量測定の特徴

1. 1 プロセス物理量

プロセスという言葉は、日常生活でもよく使われ、非常にひろい意味をもっている。この本では、主に工場において流体のかかわる製造ラインのことを「プロセス」と定義しておきたい。コンビナートにおける石油精製・石油化学プラントの各種の反応塔・タンクやパイプラインからなる製造ラインが典型的なプロセスの例であり、製紙工場や製鉄工場では最終製品が製造されるまでに、種々の流体を利用しながら連続的に処理される。さらには上下水道において、河川水を浄化して上水をつくる工程や下水を処理する工程も、水そのものを扱うプロセスといえる。

このように、主として流体を扱うプロセスを連続プロセスと呼び、このプロセスを最適に制御する技術をプロセスオートメーションと呼んでいる。もちろん、自動車・電機などの加工組み立て産業においても、ボイラーからの蒸気ライン、空調設備のユーティリティラインなどは欠くことができない。これらのラインもここでいう「プロセス」に含まれる。

種々の反応や処理が施されるプロセスを制御するには、圧力、体積、温度などの物理量とともに、流体の成分、濃度などの化学的な量を正確に把握することが必要となる。このうち、圧力、体積、温度は物質の熱力学的状態を記述するときの基本的な状態量であるが、プロセスでは刻々の時間変化も正確に捉える必要があるため、あるパイプ断面を単位時間に通過する流量が重要となる。

一つのタンクから他のタンクへ流体を移送する配管の途中に流量計を設置し、流量が変化しても時間的に積算すれば、移送した体積が求められる。かなり昔の計量法では「流量計」という用語は便宜的であり、「積算体積計」という用語が正式とされていた。タンクの断面積がタンクレベルの関数として分かっている場合には、レベル測定から体積が求められる。したがってプロセスの体積に関しては、通常、流量とレベルの2つのプロセス物理量の測定がかかわってくる。

一般にプロセスの物理的な状態量として、温度、圧力、流量、レベルの4つが重要なプロセス変数とされている。計装用語では、物理量、化学量にかかわらず、着目するプロセス状態量をプロセス変数という用語で定義することが多い。化学反応のプロセスでは、質量あるいはモル数の単位で反応させるために、密度を測定し体積から質量を求めるか、体積流量ではなく質量流量を出力するタイプの流量計を使って質量を求めることができる。

1. 2 流量と他の物理量（温度・圧力）との違い

温度、圧力の状態量については、連続体とみなされるかぎりの小部分をとってきても、温度、圧力は変わらないという性質をもっている。このような性質を示す変数を示強変数 (intensive variables) とよぶ。流量については、パイプの一部分の流速成分ではなく、パイプ断面全体にわたる積分操作が必要となるので、このような変数は示量変数 (extensive variables) または示容変数と呼ばれる。平均流速を求めて、パイプ断面積を乗ずることも積分操作である。

また、温度、圧力は多くの場合、ほぼ熱平衡状態にあるタンクや反応塔などの状態量を測定するが、流量は単位時間に流れる体積（または質量）を測定するので、時間的な微分操作が必須な変数といえる。ニュートンが最初に微分法を発明したとき、この演算法を流率法 (science of fluxion) と名付けたことは興味深い。ニュートンは、現在の変数にあたる概念を流量 (fluents) とよび、流率 (fluxion) は二つの変数の比で定義した¹⁾。

温度、圧力は時間的な変化率は、流量に比べてそれほど重視されず、空間的に小さく（微分）していても、測定値は変わらないことから、きわめて微小なセンサが実現できるという利点が出てくる。一方、流量については、一点の流速を測定する微小な流速センサは可能であっても、微小な流量センサは実現できない。

これらの違いから、流量測定に対しては、温度・圧力測定とはことなる要求や課題が課されることになる。

- 1) 応答が速いため、流量計が異常を示した場合、迅速な対応が必要となる。しかしながら、ほとんどの場合、配管の一部に流量計を設置しているので、トラブルや故障に対して、すぐ交換という対応をとることができない。このため信頼性がとくに重視され、実績のないタイプや機種は使用されない。

温度・圧力測定の場合には、例えばタンクに何本かの温度センサや圧力センサと取り付けておけば、1本が故障しても何とか運転は続けられる。空間的に小さくできることは、空間的に冗長化できる利点をもたらしてくれる。冗長化とは、測定系の数を増やすことによって信頼性を高めることをいうが、流量計は冗長化しにくいセンサといえる。

- 2) 流量が空間的に加算的（積分的）であることは、大きな流量に対して流量計の校正が非常に困難になってくることを意味する。電磁流量計や超音波流量計では口径 2~3m になる大きな流量計が製作されている。しかし、水を流して校正する（水実流校正という）のでさえ、大規模な実流校正設備を必要とする。また油や空気の実流校正設備はあつて

も、測定流体そのものを使って校正することはきわめてまれであり、実際の流体や設置条件の影響をいつも考慮しなければならない。

1. 3 管路に設置されるプロセス流量計

一般に「流れの測定」といえば、開放空間における空気の流れや河川の水量の測定も含まれるが、この本では、プラントに設置された管路内をながれる流体の流量測定に限定して解説することにしたい。プラント配管内の流量を測定する目的で、管路に設置される流量計を、ここではプロセス流量計とよぶ。通常、工業用流量計ともよばれる。管路はほとんどの場合、円形断面をもつ円形管路であり、気体または液体が充満しながら流れている状態を考える。工場排水などでは、管路全体が水で満たされない非満水の流れもあるので、開水路流量計という項目を別にもうけて解説したい。

ふつうの人々にとって身近な流量測定といえば、家庭用の水道メータやガスメータではないだろうか。水道メータとガスメータは、上で述べたプロセス流量計の定義に当てはまらないが、広く普及しているわりにはその原理がよく知られていないと思われるので、本書でも取り上げて紹介したい。

1. 4 流量測定で使われる共通用語

流量測定について学ぶために、流体力学の素養があることが望ましいが、実際の現場では、流体の運動方程式である [Navier-Stokes の式](#) を解くことはほとんどない。あつたとしても、現在ではコンピュータのソフトウェア（解析コード）を使って、境界条件や初期条件を入力するにとどまる。連続の方程式は管路流れの場合にはあまりにも自明であり、エネルギー保存則であるベルヌーイの定理に関しては、差圧式流量計の場合に適用されるほか、他のタイプの流量計には適用されない。渦流量計では、流体の中に置かれた柱状の渦発生体から放出される「カルマン渦列」という興味ある流体现象を利用する。ベルヌーイの定理とカルマン渦列を除くと、流量測定に直接関連する流体力学の現象は意外にすくない。

流量の測定は、流れとセンシング手段との相互作用でできるので、その相互作用の特徴、強みや弱点を的確に把握することが、最適な流量計の選択や賢明な使い方への近道となる。

この節では流体力学の初歩についてはスキップして、主に流量測定にかかわる共通の用語を、できるだけ流量計を使う側の視点から解説してゆく。

① 精度と不確かさ

現在においても、流量計の測定値の信頼性をあらわす指標として「精度」(accuracy)と

という言葉が用いられている。しかし、国際標準では「不確かさ」(uncertainty)という用語を使うよう勧めている。メーカーの実流校正装置や種々の標準器では「不確かさ」を用いて性能を表しているが、製品のレベルまで「不確かさ」の表記がなされているのは、オリフィスのような差圧式流量計をのぞいて、まだ少ない現状にある。

ここでは、従来使われている「精度」と「不確かさ」の両者について説明する。現在は過渡期と考えられるが、製品レベルまで「不確かさ」が普及するには、まだ相当時間がかかるようである。

(i) 精度

一般的な流量計の精度の表示に仕方には、フルスケールに対する%表示と、指示値に対する%表示の2種類がある。フルスケールとは100%にあたる流量を意味し、たいていの場合、この100%流量の値を変えられる設定手段が設けられている。

例えば、フルスケール流量 $100\text{m}^3/\text{h}$ に対してフルスケール精度が $\pm 0.5\%$ の場合、流量値がどの値をとっても $\pm 0.5\text{ m}^3/\text{h}$ の誤差を意味するので、流量値 $5\text{ m}^3/\text{h}$ に対しては $\pm 10\%$ の指示値誤差に相当することになる。

一方、例えば指示値に対して精度 0.5% という表示の場合、その精度が有効であるのは、一定の流量値より大きい流量範囲に限られる。大部分の範囲で指示値誤差が表示される場合であっても、 0% に近い流量域ではフルスケール誤差を表示される。どのような測定器も出力が 0% に近い場合には、その出力値に対する精度を限度以上、小さくすることは不可能となるからである。

コリオリ流量計のように、フルスケールや指示値に対する誤差のほかに、ゼロスタビリティという付加誤差を設定する場合もある。

流量計の校正(目盛り付け)は、製品の出荷時に流量計メーカーの実流校正設備で校正される。メーカーの実流校正設備は、国の流量標準から一定のトレーサビリティ誤差をもって管理されているが、このトレーサビリティ誤差は、製品の示す精度表示には含まれていない。あくまで流量計メーカーの流量標準を基準にとった精度であると理解しておきたい。

流量計は測定流体や設置条件が変わるとそれらの影響を少なからず受ける。メーカーの実流校正設備は、できるかぎり理想にちかい条件で校正されるが、実際の流体や設置が推奨条件から外れる場合、どの程度影響を見込めばよいかは、ユーザの見積りに任されている。とくに、流体の取引用に使用されるばあいには、このような付加誤差を詳細に見積もる必要がある。

さらに製品の出荷時に校正された流量計について、長期的にその精度が安定して保たれているかどうかは、製品の仕様には記載されていない。容積流量計のように定期的な校正で確認して、一定の変化幅に入っていることを確認できる場合もある。オリフィス板のエッジ摩耗や流量計自体の内面摩耗・付着のような問題が生じている場合には、精度が徐々に悪くなっているにもかかわらず気づかないことがある。

(ii) 不確かさ

これまでの精度の考え方では、何らかの手段で真の値が得られ、測定値と真の値の差を誤差と呼んでいた。しかし、現実にはどんな測定においても真の値は得られず、一定のばらつきをもった測定データが得られるだけである。当然ながら、ばらつきが小さいほど、得られた測定値の信頼性（確からしさ）は増す。

ISO 規格 (ISO5167-1,2,3,4-2003) では流量測定における不確かさの考え方と導出方法を規定している。その詳細については、本書で扱う範囲を超えるので、大略の考え方のみ示す。

- 1) 測定器の入力と出力の関係を数式モデルで表す。
- 2) 不確かさの原因をカテゴリに分けて考える
- 3) それぞれの原因の不確かさを評価する。
測定の繰り返しから平均値の標準偏差を求める。(A タイプの評価法の場合)
信頼限界に関する包含係数を乗ずる。信頼限界 95%の場合には、包含係数は 1.96 である。
- 4) いくつかの不確かさから、二乗和の平方根により合成標準不確かさを求める。(相関がない場合)
- 5) 合成標準不確かさに包含係数をかけて、拡張不確かさを求める。
最終的には拡張不確かさが測定の信頼性を示す尺度となる。

通常の場合には、上記 3) のなかで実際の校正時のみのデータから標準偏差を求めるが、正式な不確かさ評価をするには、ほかの不確かさの原因も枚挙して見積もる必要があるため、十分な不確かさ評価とはいえない。オリフィスの場合については、数式モデルも明確なので、差圧式流量計の章で詳しく解説したい。

② レンジアビリティ (Rangeability)

ある精度を保証する最大流量と最小流量の比をレンジアビリティという。例えば、100~10m³/h にフルスケールを設定できる流量計で、20~100%の間で、±1%の指示値精度を表示する場合には、誤差±1%で測定できる最大流量と最小流量は

100m³/h,2m³/h であるからレンジアビリティは 50:1 となる。レンジアビリティのことをターンドアウンレイシオ(turndown ratio)とも称する。

③ 粘度と動粘度

プロセスで扱う流体は粘性流体である。粘性流体は、管壁に近い流体の平板な微小部分を考えて、管壁に垂直方向に速度勾配が生じており、管壁に近いほど流速は遅く、管壁から離れるほど早い。したがってその微小部分のあいだに剪断応力 τ が生じている。この剪断応力 τ と速度勾配 du/dy との比を粘度 (または粘性係数) μ という。すなわち、

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

粘度の単位は Pa・s (パスカル秒) である。従来使われていた P (ポアズ), cP (センチポアズ) とは

$$1\text{cP} = 0.01\text{P} = 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s} \quad \text{あるいは} \quad 1\text{Pa}\cdot\text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP}$$

の関係がある。温度 20°C における水の粘度は $1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ であり、1 気圧 20°C における空気の粘度は $0.0181 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} = 18.1 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。

粘度を密度 ρ で割った値を動粘度 (または動粘性係数) といい、通常 ν で表す。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

動粘度の単位は m^2/s であり、従来の cSt (センチストークス)、St (ストークス) とは

$$1\text{cSt} = 0.01\text{St} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s} \quad \text{あるいは} \quad 1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$$

の関係がある。温度 20°C における水の動粘度は $1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、1 気圧 20°C における空気の動粘度は $15.02 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である。

液体の流れから想像して、上記の剪断応力は壁面に働く摩擦力 (=粘性力) に相当するから、水の粘度が空気の粘度より約 2 桁大きいことは直観的に理解できる。しかし、水の密度に比べて空気の密度は約 3 桁小さいので、空気の動粘度は水より 1 桁余、大きくなることは直観的に理解しにくい。このことは水のなかで手を動かしたときより、空気のなかで手を動かしたときの影響が遠くまで及ぶ現象に関連している。

④ レイノルズ数

流体の慣性による力と粘性による力の比、すなわち レイノルズ数 と呼ばれる無次元の数は、粘性流体のふるまいを表す代表的なパラメータであり、レイノルズ数が同じであれば、ある物体の周りの流れは、力学的に相似な流れとして扱うことができる。

一様な流れの速度を U 、物体の代表長さを l 、動粘度を ν とすると、レイノルズ数 R は

$$R = \frac{Ul}{\nu}$$

と表される。管路の流れでは、代表長さ l を管の内径 D にとることが多い。粘性力が支配的な流れでは、レイノルズ数が小さくなり、慣性力の大きい流れでは、レイノルズ数が大きくなる。

⑤ 層流と乱流

円管の流れではレイノルズ数が約 2000 以下では、流れは秩序正しい状態の層流になり、これより大きい場合には、不規則に混合した状態の乱流になる。レイノルズ数が 2000～7000 の領域を遷移領域という場合もある。

プロセス流量計の場合は、通常レイノルズ数は $10^4 \sim 10^9$ のような大きな値となるため、乱流状態で流れているとしてよい。ただし層流流量計、熱式流量計の一部、微小口径で低流速の超音波流量計では、層流の状態が生じている。

層流では、図 1.1 のように、円管の中の流速分布は放物線状となるが、乱流では流れが一様に近づき、壁近くの摩擦応力が大きくなる。層流の場合では圧力降下（圧力損失）が流速に比例するが、乱流では圧力降下は流速の二乗に比例する。

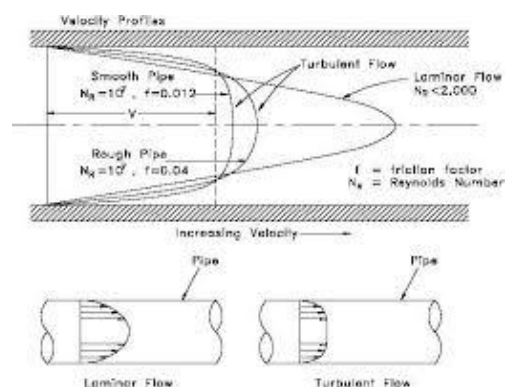


図 1.1 層流(Laminar flow)と乱流(Turbulent flow)

⑥ 流速分布

層流、乱流のいずれの場合も、円管の管軸に対して軸対称な流れであり、管軸方向の流速成分のみをもっており、管軸に直交する成分をもたない流れである。このような軸対称な流れは、直管長さが十分に長く、充分発達した流れの場合に生ずる。

しかし、プロセスの配管は縦横に張り巡らされており、曲がり管（ベンド、エルボ）、バルブ、ポンプなどによって流速分布は大きく影響をうける。流量測定において、流速分布が問題とされるのは、おもに軸対称の流速分布から外れる場合や、管軸に直交する流速成分をもつ場合である。

軸対称から外れた流れを便宜的に‘偏流’という。曲がり管の下流では、曲がりの遠心力が働くため、管軸と垂直な成分をもつ2次流れが必ず生ずる。また曲がり管が2つの異なる平面で連続する配管では、いわゆる‘旋回流’が生じ、タービン流量計や超音波流量計の出力に大きな影響を与える。曲がり管やバルブによる流速分布変化の影響をなくすために、直管長さをとることが一つの対策案となるが、管径が大きくなると数 10D~100D (D: 管内径) の直管長さをとることが難しく、流速分布の影響を見積もる必要が生じてくる。

⑦ 圧力損失

この圧力損失は流量計を配管に設置したとき、流量計のもたらす圧力損失を指す。流量計の上流の圧力と、流量計の影響のなくなる断面における下流側の圧力との差を圧力損失とする。オリフィスなどの差圧式流量計、容積流量計、面積流量計、渦流量計、コリオリ流量計などについては、一定の流量（流速）に対する圧力損失を求めることができる。

もちろん圧力損失の小さいことが望ましいが、プロセス全体の配管の長さ、曲がり管やバルブの数など全ての圧力損失の総和に比べると、流量計による圧力損失は非常に小さい。

⑧ プロセス接続

ほとんどの流量計は、配管の一部に挟み込んで設置される。配管への接続の仕方を、プロセス接続という。配管は一般に[フランジ](#)接続が多いので、流量計にもフランジを付けておき、通常の配管と同じように接続するタイプが標準的である。フランジ規格には、口径、圧力ランク、材質など各種の規格があるため、流量計の上下流配管と同一のフランジ規格の仕様を選ぶ。

フランジ接続ではなく、上下流の取り合いフランジの間に流量計を挟み込むフランジレスタイプもある。ウェーハタイプともいう。このタイプの接続は高圧の流体や 300mm 以上の口径には不向きである点に注意したい。

オリフィスのように上下流のフランジの間に挟む構造であっても、上下流のフランジ規格に適合した仕様とする必要がある。

超音波流量計のクランプオンタイプ（後述）では、既設の配管を利用して取り付けるので、プロセス接続は問題とならないが、配管の材質や厚さ、ライニングの有無など設置のためのデータが必須となる。

⑨ 電気接続

ほとんどの流量計は、何らかの電源を必要とし、流量計の出力に相当する電気信号を上位機種や制御機器に送る。プラントでもっとも普及している 2 線式伝送方式では、DC24V の 2 線のケーブルに 4-20mA の直流電流を伝送する。差圧式流量計、渦流量計、面積流量計など、流体のエネルギーを利用して流量を求める流量計では、ほとんどこの 2 線式伝送である。

一方、電磁流量計、コリオリ流量計、超音波流量計などのように、外部からエネルギーを与え、流れによって変調された信号を流量として求める流量計では、電流出力とは別に電源線が必要となり 4 線式伝送と呼ばれる。このとき、電源は AC100/220V または DC24V から現場に合わせた仕様を選択する。ただし電磁流量計では 2 線式やバッテリー駆動のタイプも以前から開発されている。

容積流量計やタービン流量計では、DC24V の 2 本の電源にパルス出力 1 本を加えた 3 線式の伝送が多く採用されている。

最近ではフィールドバス計装が普及し始めている。このときには、電流信号にデジタル信号が重畳されているため、2 線式あるいは 4 線式の電流出力線をそのまま利用する。

⑩ 検出器と変換器 (分離形と一体形)

多くの流量計は管路に設置された検出部分と流量信号に変換する電気回路部分から、構成されている。通常前者を検出器(detector)、後者を変換器(converter)と呼んでいる。あるいはそれぞれプライマリデバイス(primary device, 一次装置)、セカンダリデバイス(secondary device, 二次装置)ともいう。

管路を流体が流れる際の高温や振動の影響をさけるため、変換器を管路からはなして設置するタイプが標準的である。変換器が検出器と分離されているため、この構成を分離形(separate type)と呼ぶ。変換器が検出器と一体に構成されたタイプも数多く開発されており、この構成を一体形(integral type または compact type)と呼んでいる。

一体形では、変換器と検出器の間のケーブル配線がないので設置は容易であるが、高温や配管振動の影響が少ないことが条件となる。

差圧式流量計の計装の場合、オリフィス板を検出器とは呼ばず、プライマリ (またはヘッド) といい、差圧を電気信号に変換するユニットを変換器と呼ばず、伝送器(transmitter)と呼んでいるのは、古くからの慣習による。

⑪ 防爆と電磁両立性

爆発性雰囲気の場合に設置される電気機器には、基準を満たす防爆性能が要求される。防爆の方式（タイプ）には、いろいろなタイプがあるが、流量計で多く使われているのは、耐圧防爆と本質安全防爆である。前者は容器内で発火しても外部雰囲気の爆発が起こらないような容器構造が必要であり、後者は電気回路に事故が生じても本質的に発火のエネルギーに達しないことが条件になっている。防爆規格の詳細に関しては、ヨーロッパ、北米、日本など地域によって違いがあり、絶えず更新されているため、メーカーまたは専門家にコンタクトするのが近道である。

電気機器から出る電磁波と、外部から入ってくる電磁波に影響されない電気機器の要件を定めた電磁両立性 (Electromagnetic Compatibility) も大事な法的な規制である。電気機器を製造するメーカーは、EMC 試験で、機器の外に出る電磁波について Emission test を行い、外部電磁波の影響は Immunity test を行って、基準 (EMC 規格) を満たすことを確認する。

⑫ キャリブレーション

オフィスなどの差圧式流量計は、寸法検査のみで流体を流しての校正が不要であるが、そのほかのタイプの流量計は校正が必要である。水、油、空気などの実際の流体を流して校正する方法を実流校正 (wet calibration) という。流量計メーカーが流量計を出荷するまえに、そのメーカーの実流校正設備を使って、校正 (目盛り付け) することが多い。流量計のタイプに応じて、実流校正設備の配管条件や能力が設定されている。

校正を受ける流量計の出力は、かならず基準となる流量 (または基準流量計の出力) との比較によって、目盛り付けされる。流量は一定時間内の体積であるから、予め体積が計測してある基準タンクを用いる方法 (体積法または容積法) または流量計を通った流体の質量を測定する方法 (質量法または秤量法) がある。基準流量計を使う場合 (比較法と呼ぶ) は、校正を受ける流量計の不確かさより少なくとも 1/3 以下の不確かさの流量計を用いることが望ましい。一般に、質量法、体積法、比較法の順序で不確かさの程度は大きくなる。

メーカーの実流校正設備はできるだけ理想的な配管条件となるよう作られている。実際のプラントでは、十分な直管長さが取れない、流量変動が大きい、気泡や固形物が混入する、校正で使った流体と異なるなどの影響が入るため、校正時の不確かさより悪くなると考えておくべきである。これらの影響の見積もり評価は、流量計タイプにより異なるため、見積もりは容易ではない。

メーカーの流量標準は、国家標準からの一定の不確かさをもってリンクしている（トレーサブル）ことを保証する必要がある。国家標準まで不確かさの程度が連結していることを「トレーサビリティが保たれている」という。トレーサビリティは、**Japan Calibration Service System**（略称 [JCSS](#)）制度に基づいて校正事業者が認定され、その校正事業者の実流校正設備で、試験を受けることによって保証される。この JCSS 制度は、国際的な規格 ISO 17025（[JIS Q 17025](#) 試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項）に準じている。

海外の工場で製造される流量計についても、ISO 標準 ISO 17025 を満たした実流校正設備で、校正することが望ましい。

2. 流量計の分類

2. 1 測定量による分類

管路に設置されるプロセス流量計を分類する方法がいくつかある。代表的な分類法はつぎの三つである。

- 1) 測定量による分類
- 2) 流体との接触、流れの障害による分類
- 3) 流体エネルギー利用の有無による分類

1) の測定量による分類は、流量計の出力が体積流量、質量流量、積算体積流量のいずれかによって分ける方法である。現在、実用されている流量計をこの分類によって分けたものを表 1.1 に示す。それぞれのタイプの流量計について、原理や特徴、適用流体を簡単に記載した¹⁾。

積算体積流量とは、容積流量計のように流体を一定容積の「ます」ではかり、その回数で積算する流量を指す。渦流量計やタービン流量計は「ます」をもっていないが、原理的に周波数の出力をもつため、容易に 1 パルスあたりの体積に換算できる。

電磁流量計や超音波流量計は測定値から管内の平均流速をもとめ、断面積を乗じて体積流量を出力している。この意味から流速センサをベースにした流量計と位置づけされることがある。ここでは、管内の 1 点を測定するピトー管のようなセンサを流速センサと呼ぶことにする。

2. 2 流体との接触、流れの障害による分類

表 1.2 の分類法は、流量計を設置したとき、測定流体との接触、流れを妨げる障害、流量計の可動部の有無によって分類したものである。

超音波クランプオン形をのぞいて、ほとんどのタイプの流量計は測定流体に接触する。腐食性流体や壁面に付着しやすい流体あるいは摩耗性流体に対しては、十分耐える材質の接触部をもつ流量計を選択しなければならない。スラリーやパルプ液、高粘度流体に対しては、障害物のある流量計は適していない。

流量計検出部に可動部をもつ流量計は、定期的な校正を必要とするものが多い。可動部の摩耗が懸念されるためであるが、このタイプはおもに潤滑作用のある油系の流体に適用される。面積流量計は、フロートが上下するので可動部があるといえるが、タービンや容積流量計のような金属同士の摩耗はない。

コリオリ流量計については、「障害物なし」といえるのは、測定管の内径が上下流の配管

内径と等しい1本直管タイプのみの場合であり、2本管の曲管タイプや内径を絞った1本直管タイプでは、一定の圧力損失があることに注意したい。

表1.1 主なプロセス流量計のタイプ

測定量による分類	流量計タイプ	測定原理	適用流体*1)			特徴
			液体	気体	蒸気	
体積流量	差圧式	絞りの前後に発生する差圧が流量の2乗に比例する	○	○	○	・実流校正が不要・圧損が大きい・直管長が必要・比較的安価
	電磁	磁界の中を導電性流体が横切ると流速に比例した起電力が発生する	○	×	×	・圧損なし・固形分を含む液体可・導電性液体のみ
	面積	テーパ管内のフロートの位置が流量に比例する	○	○	○	・現場指示計として安価・精度やや落ちる
	超音波	流れに斜めに伝播する超音波の速度または周波数が流速によって変化する	○	○	△	・圧損なし・配管の外部より検出可能(クランプオンタイプ)
質量流量	熱式	流体を加熱したとき、上下流の温度上昇が流量によって変化する	△	○	×	・小口径気体用が多い・比較的安価
	コリオリ	振動するU字管などに発生するコリオリ力が、管内を通る質量流量に比例する	○	△	×	・液体用質量流量計として精度良い・比較的高価・中～大口径はなし
積算体積流量	容積	流体を一定量の「ます」で測り、その回数(回転数)から流量を求める	○	○	×	・積算流量計として精度良い・固形物を含む液体不可・定期的校正が必要
	渦	渦発生体の後流に発生するカルマン渦の周波数が流速に比例する	○	○	○	・圧損少ない・高温・高圧の流体に適用可
	タービン	流れの中においた羽根車またはタービンの回転数が流速に比例する	○	○	△	・高精度型あり・軸受部に寿命あり・定期的校正が必要

*1) ○:適用可 △:制約あり ×:適用不可

表 1.2 流体との接触のしかたによる分類

測定流体との接触	流れに対する障害	可動部の有無	流量計タイプ
接触	障害になっている	可動部あり	容積、タービン、面積
		可動部なし	差圧式、渦、熱式、 コリオリ(U字2本形)
非接触	障害になっていない		電磁、超音波(接液形) コリオリ(1本直管形)
		超音波(クランプオン形)	

2. 3 流体エネルギー利用の有無による分類

面積流量計では、測定管内のフロートは流体による抗力で垂直方向に押し上げられながら、流体内の重力と平衡して、一定の指示位置をしめす。またタービン流量計では、管軸方向の流れが羽根車を回転させる方向に働く。これらは流量計が流体エネルギーの一部を利用（抽出）して、流量信号に変換していることを意味する。このタイプの流量計は流体エネルギー抽出形（Energy Extractive）とも呼ばれる。差圧式流量計もオリフィス前後の圧力降下（圧力損失）すなわちエネルギー損失を利用して流量を測定する。古くから開発された流量計は、ほとんど流体エネルギーを抽出するタイプである。

電磁流量計、コリオリ流量計、超音波流量計では、外部から磁界、管の振動、超音波のエネルギーを与え、流れによる変調成分に着目して流量を求める。これらの流量計は流体エネルギーを使わず、外部エネルギー付加タイプ（Energy Additive）と呼ばれる。このタイプの流量計は、電源からのエネルギーを多く使うため、4線式の設計となることが多い。一方、流体エネルギーを利用するタイプでは、検出部へエネルギーを与えないで、2線式のエネルギーで変換部の信号処理を行えばよい。

表 1.3 は流量計を二つのタイプに分けて示す。

さらに、この二つのタイプの差異はゼロ流量付近の出力に特徴がある。流体エネルギーを利用するタイプでは、流速がゼロ近くになると、流体エネルギー（流速の2乗に比例）が非常に小さくなるため信号が得られない。したがって、ある限界以上の流速にならないと測定できないのがふつうである。しかし、差圧式流量計では、流量は差圧の平方根に比例し、ゼロ付近の出力が拡大されるので、例外的にゼロ付近の出力にセンシティブな流量計とされている。

外部エネルギー付加タイプでは、ゼロ付近の流量であっても出力される。さらには逆方向の流れに対しても、ほとんど信号処理のみで容易に出力させることができる。ただし、このタイプの流量計では、流体静止（ゼロ流量）のときの出力（ゼロ点）の安定性に問題が生ずると、すべての流量指示値に影響を与えるので、ゼロ点調整には注意すべきである。流体エネルギー抽出形では、原理的にゼロ流量時の信号がないので、ゼロ点調整に気を配る必要がないともいえる。

外部エネルギー付加形は、管路の圧力損失が少ないため省エネルギーの観点から有利と言われることもあるが、流量計全体では管路の流体エネルギー損失（圧力損失）と流量計の消費電力の合計であるから、いちがいに結論づけることはできない。

表 1.3 流体エネルギー利用の有無による分類

流体エネルギー利用(抽出)の有無	流量計タイプ
流体エネルギー抽出形 (Energy Extractive)	差圧式 面積 容積 渦 タービン
外部エネルギー付加形 (Energy Additive)	電磁 超音波 コリオリ 熱式

3. 差圧式流量計

3.1 原理と特徴

3.1.1 原理

管路のなかに絞りを挿入し、その前後の圧力差（差圧）から流量を求める流量計を差圧式流量計という。絞り流量計とも呼ばれる。絞りの形状から主にオリフィス、ノズル、ベンチュリ管の三種に分類されているが、構造が単純なオリフィスがもっとも多く使われている。原理はベルヌーイの定理に基づいている。

図 3.1 のように管路に同心円状の孔が設けられたオリフィスの圧力タップの上流側、下流側圧力を p_1 , p_2 とすると、ベルヌーイのエネルギー保存則により、

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho_1 g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho_2 g} + z_2 = \text{一定} \quad (3.1)$$

v_1 , v_2 は断面 1, 2 における流線上の流速であり、 z_1 , z_2 は、考慮した流線の断面 1, 2 における基準面からの高さを示す。配管が水平であり、非圧縮性の流体の場合には $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ であるから、(3.1)式は

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

となる。

断面 1 での断面積（管路の断面積に等しい）を A_1 、断面 2 における流れの断面積（オリフィスの孔よりやや小さい面積）を A_2 とすると、連続の式から

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

この二つ式から v_1 を消去すれば $\Delta p = p_1 - p_2$ として、体積流量 q は

$$q = A_2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)}} \quad (3.2)$$

となる。さらに、質量流量を q_m とすると、 $\beta^2 = (A_2/A_1)$ と置き換えて

$$q_m = \rho q = A_2 \sqrt{\frac{2\rho\Delta p}{1-\beta^4}} \quad (3.3)$$

が得られる。

すなわち体積流量または質量流量はオリフィス上下流の差圧 $\Delta p = p_1 - p_2$ の平方根に比例する。管径、絞り径を D, d とすれば、 $\beta = d/D$ であり絞り径比とよぶ。

実際の流体に対しては、最小の断面積 A_2 は正確に求められないので絞りの面積 $\frac{\pi}{4}d^2$ を使う。また流体の粘性による影響も考慮すると、理論式(3.3)のかわりに

$$q_m = C \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\rho\Delta p}{1-\beta^4}} \quad (3.4)$$

のように表せる。この係数 C は流出係数と呼ばれる実験係数である。ほかの方法で流量を求めることができれば、理論値との比として求められる数値である。

圧縮性流体の場合にも、式は複雑にはなり断熱変化の状態式 $\frac{p}{\rho^\gamma} = \text{一定}$ (γ : 気体の比熱比) の関係を用いて理論的に導くことができるが、実用上は、気体の膨張補正係 ε を用いて、つぎのような式であらわされる。

$$q_m = C\varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\rho_1\Delta p}{1-\beta^4}} \quad (3.5)$$

気体の膨張補正係数は、同じ絞りを用いた場合の圧縮性流体と非圧縮性流体の流量の比に相当する。密度は上流側の密度 ρ_1 の値とする。

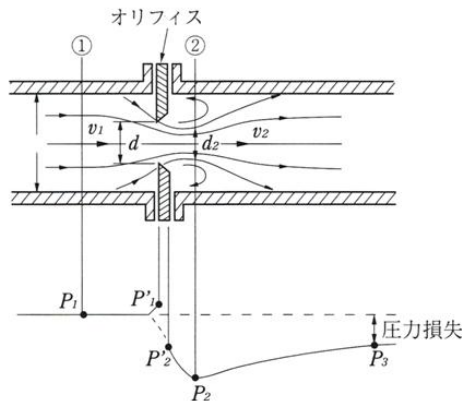


図 3.1 オリフィス板前後の圧力分布 (管径 : D)

3. 1. 2 特徴

差圧式流量計の特徴はつぎのように挙げられる。

- (1) 差圧式流量計の最大の特長は、絞りの寸法を正確に測定すれば、実際の流体を流しての校正をしなくてもよい点である。いいかえれば、世界的な標準規格が整備されている。
- (2) とくにオリフィスは、構造が単純で安価である。
- (3) 液体、気体、蒸気と適用範囲が広い。
(ただし管径や絞り比など設置条件がある。)
- (4) 可動部がなく、保守が容易である。

これら(1)～(4)の長所は、どの教科書にも書かれている。しかし、

- (5) 示量変数である流量が示強変数である圧力によって測定できる。
- 点に、非常に大きなメリットがあることを強調したい。圧力は連続体であるかぎり、いくらでも小さい体積で測定できる点が、センシングにとっては有利となる。この利点を活かし、微小な半導体シリコンセンサを形成し、微小な空間に差圧を導くことができるようになった。

短所としては、つぎの点が挙げられる。

- (1) 流量は差圧の平方根に比例するので、実質的な測定範囲を広くとることができない。すなわちレンジアビリティが比較的小さい。レンジアビリティは1:3ないし1:4程度が多い。
- (2) とくにオリフィスは圧力損失が大きい。同じ差圧式でベンチュリ管にすると圧力損失は少ないが、価格が高くなる。
- (3) 固形物を含む液体には適していない。
- (4) 流速分布の影響を受けるため、絞りの前後にかなり長い直管長が必要である。
- (5) 流体の中にゴミやさびなどが混入すると、圧力をとりだす導圧管がつまることがある。

3. 2 オリフィス、ノズル、ベンチュリ管などの構造

3. 2. 1 オリフィス

管路に同心円状の孔を設けたオリフィス板は、差圧流量計のなかでもっとも単純な構造である。断面図を図 3.1 に示す。孔の縁にある上流側エッジの加工精度は重要で、規格寸法以内ないと、不確かさが保証されない。すなわち摩耗性流体に、このオリフィスは向いていない。

圧力を取り出すには、3つの方法がある。コーナタップはオリフィス直前・直後の圧力を取り出す方法で、通常、環状室を介して取り出す。環状室を設けることによって管路全体の静圧が平均化される。D・D/2 タップは、オリフィスの上流 D と下流 D/2 の箇所に圧力タップを設ける方法である。

フランジタップは、オリフィス板を挟み込む上下流のフランジの一部に圧力タップを設ける。その位置はオリフィス板の端面から 25.4mm(=1inch)とする。それぞれの取り出し方法の、絞り孔径、管径、絞り径比、レイノルズ数については [JIS Z 8762-2](#) に示されている。表 3.1 にこれらの適用範囲を示す。

表 3.1 オリフィスの適用範囲 (JIS Z8762-2)

	コーナタップ、D・D/2 タップ	フランジタップ
絞り孔径 d	$d \geq 12.5$	$d \geq 12.5$
管径 D	$50 \leq D \leq 1000$	$50 \leq D \leq 1000$
絞り直径比 β	$0.1 \leq \beta \leq 0.75$	$0.1 \leq \beta \leq 0.75$
レイノルズ数 Re_D	$0.1 \leq \beta \leq 0.56$ のとき $Re_D \geq 5000$ $\beta > 0.56$ のとき $Re_D \geq 16000 \beta^2$	$Re_D \geq 170 \beta^2 D$
	いずれの場合も $Re_D \geq 5000$ かつ $Re_D \geq 170 \beta^2 D$ を満たす。	
ほかに上下流管路の相対粗さにも条件あり(略)		

3.2.2 ノズル

ノズルは流入部を滑らかな曲線の回転対称形とした絞り機構である。ノズルには長円ノズルと ISA 1932 ノズルがあるが、日本では主に長円ノズルが使われている。(ISA は、昔の ISO にあたる。) このノズルはボイラー周りの高温、高圧、高速の蒸気や水に多く用いられている。

絞りの前面(入口)が滑らかであるため、オリフィスのエッジ摩耗のような怖れがない点が特長である。ただしオリフィス、ノズルともに圧力損失は、流れ後半の拡大部に生じるので、ノズルの圧力損失はオリフィスと同程度である。ノズルの管径、絞り径比、レイノルズ数などの適用範囲は [JIS Z8762-3](#) に示されている。その一部を表 3.2 に示す。

表 3.2 二種のノズルの適用範囲 (JIS Z8762-3)

	長円ノズル	ISA1932 ノズル
管径 D	$50 \leq D \leq 630$	$50 \leq D \leq 500$
絞り直径比 β	$0.2 \leq \beta \leq 0.8$	$0.3 \leq \beta \leq 0.8$
レイノルズ数 Re_D	$10^4 \leq Re_D \leq 10^7$	$0.3 \leq \beta < 0.44$ のとき $70000 \leq Re_D \leq 10^7$ $0.44 \leq \beta \leq 0.80$ のとき $20000 \leq Re_D \leq 10^7$
ほかに上流管路の相対粗さにも条件あり(略)		

3. 2. 3 ベンチュリ管

ベンチュリ管は、絞り下流の拡大部について、緩やかなテーパ状の拡大管を接続させた構造をもち、円すい形ベンチュリ管とノズル形ベンチュリ管の2種がある。ノズル形ベンチュリ管は、流入部（縮小部）をノズルと同様な絞りとしたものであり、円すい形ベンチュリ管は、流入部（入口）を円すい形状としたものである。いずれも入口と出口の間にスロート部と呼ぶ円筒部を設けている。入口円すい部（円すい角 $21 \pm 1^\circ$ ）の前の円筒部に上流側圧力タップ、スロート部に下流側圧力タップが設けられる。下流側の円すい形状は圧力損失を減らすため、ゆるやかなテーパ状（円すい角 $7 \sim 15^\circ$ ）とする。固形物を含む流体や堆積しやすい流体で、圧力損失を少なくして測りたい場合に用いられる。

4章に述べる電磁流量計が普及する前の時代、上水道の浄水場内の流量計として、このベンチュリ管が多く使われていた。円すい形ベンチュリ管の構造を図 3.2 に示す。管径、絞り径比、圧力取り出し口、レイノルズ数、管材の加工法などについては、[JIS Z 8762-4](#) で規定されている。比較的大きな口径が多く、製造方法によって適用範囲が細かく規定されている。

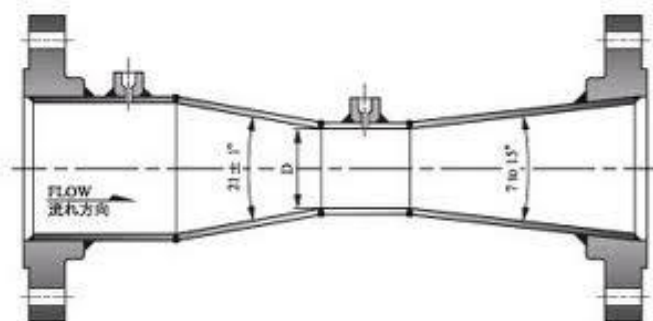


図 3.2 円すい形ベンチュリ管

3.2.4 ピトー管と平均化ピトー管

ピトー管は、流れの中に静圧と総圧（＝静圧＋動圧）を導く管を用いて、二つの圧力の差（＝動圧）から流速を求めるもので、古くから流速測定の基本的な方法として知られている（図 3.3）。動圧は流速による運動エネルギー成分で $\frac{1}{2}\rho v^2$ として表される。ピトー管は流れの 1 点の流速のみを測定するので、点流速計であっても流量計ではない。

ピトー管は、実験室や航空機では多用されるが、実際のプロセスでは、円形管路断面の流量を求めるのにそのまま使うことはできず、多数の点流速を平均化して、ほぼ管全体の平均流速を求める平均化ピトー管（Averaging Pitot tube）が使われている。平均化ピトー管の代表例が [アニューバー流量検出器](#) である（図 3.4）。

アニューバー管は二重の導圧管からなり、流れに対して前後に偶数個の圧力検出孔を設けたもので、口径が大きくなるほど孔の数が増える。圧力検出孔は、前面で総圧、背面で静圧をピックアップするが、それぞれの孔位置が環状(annubar)面積の平均流速が得られるように配置されている。これらの圧力検出孔から導かれた高圧側と低圧側の圧力は、通常のオリフィスと同じように差圧伝送器で受ける。流体の密度を与えれば、管断面の平均流速ないし流量が求められる。

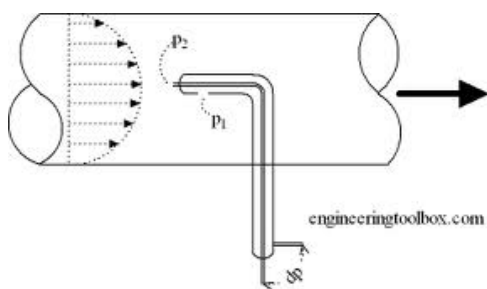


図 3.3 ピトー管

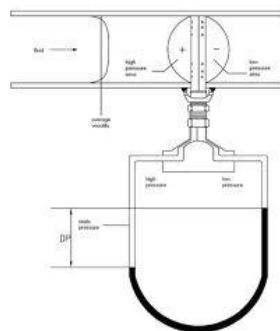


図 3.4 アニューバー管

3.3 差圧の測定

絞り機構の上下流の圧力タップから、導圧管をへて差圧伝送器に高圧側、低圧側の圧力が導かれる。液体の場合の構成図を図 3.5 に示す。導圧管には、主管の圧力を遮断する元弁、差圧伝送器のゼロ調整を行うための三岐弁が設置される。

測定対象が液体、気体、蒸気にしたがって、導圧管の配管方法を適切に変える必要がある。差圧式流量計の絞り機構や差圧伝送器にトラブルはほとんど生じないが、多くのトラ

ブルは導圧管まわりで生ずることに注意したい。とくに蒸気の場合には、オリフィスより高い位置に凝結槽（コンデンスポット）を設け、導圧管内の蒸気の凝結水による影響を除いている。

差圧伝送器は、以前は空気式と電子式に大別されていたが、現在では空気式はほとんど使用されず、電子式が広く普及している。電子式差圧伝送器は、設定されたスパン内の差圧を 4-20mA DC の電流信号に変換して出力する。差圧の測定原理の違いによって、静電容量式、半導体ひずみゲージ式、振動式（金属、シリコン半導体）に分けられる。静電容量式は差圧を金属ダイヤフラムの部屋に導き、ダイヤフラムの微小変位を静電容量の変化として検出するものである。

半導体ひずみゲージは、半導体シリコンダイヤフラムの一部をピエゾ素子として形成し、差圧によるピエゾ抵抗変化を取り出す。

振動式は金属ダイヤフラムに結合されたビームの固有振動数が、差圧によって変化することを利用するものが最初に開発されたが、その後、半導体シリコンの微細加工によりシリコンで微小なダイヤフラムを形成し、その中心部と周辺部に振動子（シリコンでつくった梁（ビーム））を設ける [半導体振動式のセンサ](#)が開発された。

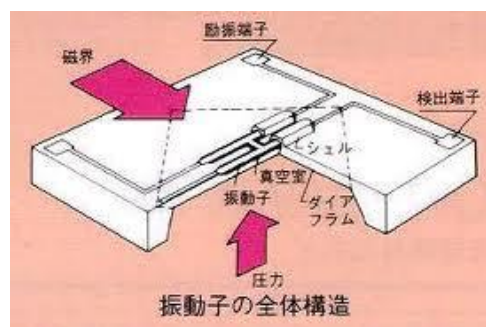


図 3.6 シリコン振動子の差圧センサ

差圧の変動に応じて、振動子の受ける張力と圧縮力の変動を固有振動数の変化として取り出すものである。（図 3.6）

差圧伝送器は静圧 p_1 、 p_2 が非常に大きい場合であっても、差圧 $\Delta p = p_1 - p_2$ のみが差圧センサに伝達される設計を採っている。これは、通常、過大圧保護機構によって実現されている。出力として差圧に比例するもののほかに、差圧の平方根すなわち流量に比例するタイプも選択できる。また従来の 4-20mA DC のほかにデジタル双方向通信ができるフィールドバス対応の伝送器も開発されている。

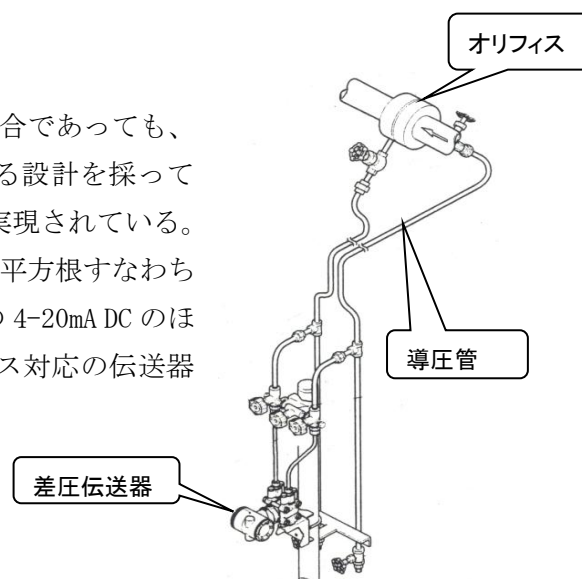


図 3.5 差圧式流量計の計装（液体の場合）

3.4 測定の不確かさ

オリフィスの測定の不確かさについては、元になる ISO 5168 や、その日本版 JIS Z8762-1 に詳しく算出方法が記載されている。ここでは、流出係数の不確かさのみ示す。3つの圧力取り出し方法について、絞り径比 β 、管径 D 、レイノルズ数 Re_D 、管内の相対粗さ Ra/D が誤差なしにわかっているとすれば、流出係数の相対不確かさは

$$\begin{array}{ll} 0.1 \leq \beta < 0.2 \text{ において} & (0.7 - \beta)\% \\ 0.2 \leq \beta \leq 0.6 & 0.5\% \\ 0.6 < \beta \leq 0.75 & (1.667\beta - 0.5)\% \end{array}$$

$D < 71.12\text{mm}$ であれば、さらに次の値を上記の不確かさに加える。

$$0.9(0.75 - \beta)\left(2.8 - \frac{D}{25.4}\right)$$

また $\beta > 0.5$ で $Re_D < 10000$ であれば、上記の不確かさに 0.5%を加える¹⁾。

オリフィスの規格は管径 D が 50mm 以上に適用され、50mm 未満については上記の不確かさは適用されない点に注意しておきたい。

3.5 国際標準の動向

測定原理のベルヌーイの定理では、想定する微小な流管の流速を仮定していた。この流管は、隣り合う流管との粘性の影響を考えていない。実際の管路では粘性の影響により、流速分布が生じている。この流速分布は管路壁の粗さにも依存する。また圧力取り出しの位置によって、差圧の値は異なってくる。差圧式流量計では、これらの要因の影響をすべて流出係数という実験係数で補正する。流出係数は世界的な標準 ISO 5167 のリーダー・ハリス/ギャラガーの式によって与えられている (ISO 5167-1,2,3,4-2004)。

3.6 起こりがちなトラブルとその対策技術

(a) 導圧管つまり

管路内の固形物やさびが導圧管につまると、正確な差圧の測定ができなくなる。導圧管内の液体が、寒冷時に凍結して圧力を伝えないことがある。また凍結防止のためのヒータが故障して、導圧管内が凍結してしまうトラブルも起きることもある。

これまで、導圧管に‘つまり’が生じた場合、差圧の出力異常から調べていって導圧管つまりを見出し、外部からブローなどで対処するケースが多かった。しかし、フィールドバス通信に対応した最新の差圧伝送器では、導圧管つまりの診断機能を搭載しているものが開発されている。

絞りの上下流の圧力は、管路に流れがある状態では、定常に見えるようでも定常値の上下を微小な振幅でゆらいでいる。導圧管の高圧側または低圧側の一部に‘つまり’が生ずると、差圧伝送器に伝わる‘ゆらぎ’の振幅が減少する。差圧伝送器の高圧側、低圧側の圧力センサの周波数特性が十分に高帯域まで測定できるならば、これらの圧力ゆらぎの振幅の変化を捉えることによって、導圧管つまりの進み具合を診断することができる。

[実際の差圧伝送器](#)では、単純にゆらぎの振幅を測定するのではなく、差圧信号との相関関数を求めて、一定時間内のデジタル演算をもとに、つまりの程度を規格化した「ブロッキングファクタ」を求める。例えば、高圧側つまりが生じた場合を +1、低圧側つまりが生じた場合を -1 と規格化すると、つまり診断のしきい値を設定しやすい。通常の導圧管計装では、高圧側、低圧側の導圧管つまりが同じ速さで同程度つまるという現象が起きず、つねにどちらかの導圧管つまりが早く進む。

(b) 直管長不足

短所のところでも記したように、差圧式流量計は一般に、長い上流側直管長と一定の下流側直管長を必要とする。上流に置かれる曲がり管や弁などの配管要素、絞り機構の絞り径比に応じて必要な直管長は [JIS Z8762-2](#) に示されている。円すい形ベンチュリ管の場合は、オリフィスやノズルに比べてかなり短い直管長で十分である。またすべての絞り機構をつうじて、絞り径比が大きいほど、必要な直管長は長くなる。絞り径比が小さくなると、絞り機構自体が整流効果をもたらすため、直管長が比較的短くてよい。

規格の直管長がとれない場合には、絞り機構の上流部に整流器を挿入する。整流器には、ハニカム状の格子と多孔板を組み合わせたザンカーの整流装置や、多孔板と細管を組み合わせた「明石の多孔板」がよく用いられる。上流の配管要素によって、旋回流のような流速分布が生じている場合にはザンカーの装置、1個のベンドのような配管による偏流の流速分布には明石の多孔板を選択する。ただし、それぞれの整流装置は、絞り機構の上流部で、適切な場所を選ぶ必要がある。

(c) 質量流量測定

ボイラー計装においては、蒸気はkg単位で行う。ラインの蒸気は温度、圧力によって密度が異なるため、オリフィスの質量流量の式(3.3)において密度を一定値として与えると、密度が変化したときには出力誤差として表れる。

正確な質量流量を得るには、蒸気を理想気体とみなして、ボイル・シャルルの法則による温度圧力補正を行う。温度は絞り機構の上流部に挿入した温度計（測温抵抗体内臓）でピックアップし、圧力は上流側圧力タップから p_1 を取り出し、流量演算器に入力する。流

量演算器は、差圧伝送器からの体積流量をもとに、温度・圧力補正演算を行って質量流量を出力する。最近の差圧伝送器では、センサが差圧と上流側静圧 p_1 を同時に検出するので、外からの温度のみを差圧伝送器に入力すれば、差圧伝送器内部で温度・圧力補正を行うもの（マルチバリアブルタイプ）が開発されている²⁾。

ラインの圧力が変わらず、蒸気がいつも飽和蒸気であり、その密度が温度のみによる場合には、オリフィスのほかに、渦流量計に温度センサを内蔵したタイプ（マルチバリアブルタイプ）も、対策技術の一つの候補と考えられる。

液体で、密度がそれほど変化しない場合には、体積流量に密度を掛けるのみで十分であるが、密度変化が大きい場合には、絞り機構のないコリオリ質量流量計の採用を検討するほうがよい場合もある。

(d) 脈動流

差圧式流量計は、原則として脈動流には適用できない。たとえ差圧計が差圧の振幅の平均値を出力したとしても、その平方根として演算した流量値は、脈動流量の平均値ではないからある。差圧の変化が（平均値＋正弦波）とみなせて、正弦波の振幅や周波数がわかっている場合には、差圧伝送器の誤差を計算で見積もることができる。差圧の平均値を h 、正弦波変化分の振幅を a とすると、この誤差は (a/h) の関数によって与えられる³⁾。

測定流体が液体でこの誤差が大きい場合には、絞り機構の上流部に気液分離器を置いて、脈動を除去する対策もある。気液分離器の主な目的は気泡の除去であるが、分離器中の気相がバッファーとなり脈動を除く効果もある。

4. 電磁流量計

4.1 原理と特徴

4.1.1 原理

流れに対して垂直方向に磁界を加えると、流れ、磁界それぞれに垂直な方向に起電力が発生する。電磁流量計は、運動する物体についてのファラデーの電磁誘導の法則を応用した流量計である。

図 4.1 のように、内面を絶縁性ライニングで内貼りされた測定管（内径＝ D ）を磁束密度 B の磁界の中におく。管内を平均流速 v で導電性流体が流れると、流れと磁界それぞれに垂直な方向に設けられた電極に、

$$E = k B v D \quad (4.1)$$

の起電力（電圧）が発生する。ここで、 k は比例定数である。

式(4.1)を導出する途中で、流体の導電率 σ が十分大きいという次の条件

$$\sigma \gg \omega \epsilon \quad (4.2)$$

を使っている。ここで ω は加える磁界の角周波数（励磁角周波数）、 ϵ は流体の誘電率である。

測定できる流体は液体のみであり、電極が液に接している接液タイプの電磁流量計では、導電率が $500 \mu \text{ S/m}$ ($5 \mu \text{ S/cm}$) 以上、必要である。通常の水は $100 \mu \text{ S/cm}$ のオーダーであり十分測定可能である。油、有機溶剤など低い導電率の流体は測定できない。

式 (4.1) を導く際、測定管内の磁束密度 B も流速成分 v も空間的に分布しているため、磁束密度が広がっている範囲で、ベクトル積 $v \times B$ の体積積分を行う。

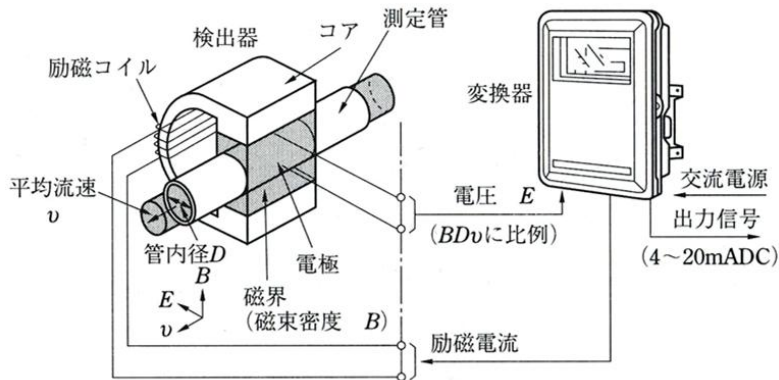


図 4.1 電磁流量計の原理

ファラデーの法則が発見されたのは 1832 年であり、電磁流量計が実用化されたのは、1940 年代であるから、あいだに 100 年以上が経過している。実用化が難しかった理由は、交流成分の発生電圧が直流成分の分極電圧（電極界面につねに発生し、ゆるやかに変動する）に比べて非常に小さいこと、高い入力インピーダンスをもつ増幅器が不可欠であったことが挙げられる。

ファラデー自身も、地磁気の直流磁界を利用してテムズ川の流量を測定しようと試みたが、分極電圧が変動し河床が短絡していたため失敗に終わった。

4. 1. 2 特徴

電磁流量計の特長はつぎのようである。

- 1) 液体の温度・圧力・密度・粘度の影響をほとんど受けなくて、体積流量の測定ができる。
- 2) 導電率が一定以上であれば、導電率の影響を受けない。このため、測定流体の種類にかかわらず、水で実流校正すればよい。
- 3) 測定管内に障害物がなく、圧力損失がない
- 4) 固形物や気泡を含む流体の体積流量が得られる。
- 5) 流量計出力は流量（流速）に比例し、比較的精度が高い。
- 6) 口径 2.5mm～3000mm の広い流量範囲にわたって、同一原理で測定できる。
- 7) 一般に応答が速い
- 8) 正逆流量の測定が可能である。

短所としては、

- 1) 気体や導電性の低い液体は測定できない。
- 2) 大口径では比較的高価であり、設置工事に費用がかかる。
- 3) 腐食性流体に対しては、ライニング材料、電極・接液リング材料の選定に調査・検討を要する。

が挙げられる。3) については後で詳しく解説する。

4. 1. 3 励磁方式

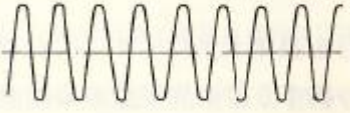
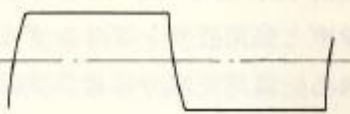
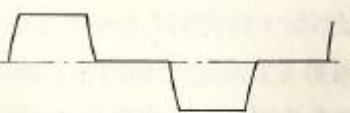
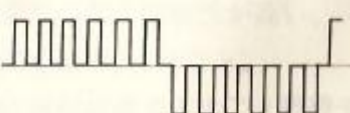
これまでに開発されてきた[励磁方式](#)を表 4.1 に示す。

電極と流体のあいだの分極電圧の影響をのぞくため、電磁流量計の磁界は交流が用いられる。開発された当初は、商用電源を使って、検出器の上下に設置されたコイルに電流をながし、商用周波数（50/60Hz）の交流磁界を作っていた。ところが、図 4.1 の電極からの信号線と管内流体でつくるループを磁界が横切るため、流量信号と 90 度位相の異なるノイ

ズが発生する。(電磁誘導ノイズは磁界の時間微分に比例する)。位相がいつも 90 度と一定ならば、同期整流という回路でノイズを除去できるが、この位相は電極の付着状態で変化するため、ゼロ点(流速ゼロでの流量計出力)が不安定となる欠点があった。

この欠点を改善する目的で、1970 年代、方形波励磁という方式が多く採用されるようになった。この方式は商用周波数の 1/6~1/8 の周波数で方形波状に励磁し、直流部分の安定した領域で流量信号をサンプリングするものである。Pulsed DC 方式とも呼ばれる。この方式にすると、サンプリング区間を商用周波数の一周期(またはその整数倍)に合わせているので、商用電源からの静電誘導ノイズも抑えられ、安定なゼロ点を得られるようになった。

表 4.1 各種励磁方式の特徴 (JIS B 7554 解説)

方式の名称	励磁波形	特徴
(a) 商用周波数励磁		<ul style="list-style-type: none"> 商用電源を用いて励磁し、sin 波の励磁波形とする。 1970年代前半までの主流の励磁方式。
(b) 方形波励磁 (2値励磁)		<ul style="list-style-type: none"> 電子回路によってコイルに流れる電流の向きを切り替え、方形波の励磁波形とする。 現在の主流の励磁方式。
(c) 方形波励磁 (3値励磁)		<ul style="list-style-type: none"> (b)の応用。 無励磁期間の信号を用い、零点の安定性を良くする。
(d) 方形波励磁 (2周波励磁)		<ul style="list-style-type: none"> (b)の応用。 高周波と低周波の励磁を用い、両者の長所を取り出すことによって出力の安定性を良くする。

電磁流量計はスラリーやパルプ液など、固形物を含んだ流体に数多く使われているが、この方形波励磁の電磁流量計ではゼロ点は改良されたものの、スラリーなどの流れのあるとき指示が安定しない、さらに応答が遅いなどの問題が生じてきた。

(1) 流体ノイズに弱い

流体中の固体粒子が電極に衝突すると、電極の直流電位が不規則に変化し、サンプリングされた流量信号に、ノイズとして重畳することがわかってきた。パルプ液や下水などの

スラリー（固形物を含む流体）で、このノイズが大きく生じたので、スラリーノイズと呼ぶ。さらに、流体の導電率が低くなった場合、指示変動が大きくなる問題も生じた。これらはいずれも低周波のノイズであり、方形波励磁は低周波で励磁していることから、どうしても混入してくるノイズである。

(2) 応答が遅い

方形波励磁にすると、信号処理の間隔があくため、応答が遅くなる欠点が目立ってきた。すなわち、方形波励磁でゼロ点の安定はできたが、以前の商用周波数励磁で有効に働いていた低周波ノイズ除去や高速応答の長所が失われることになった。

ゼロ点の安定と流体ノイズへの対策として、低周波と高周波の2つの波形を重ねた磁界を加える2周波励磁という方式が1990年ごろ開発された。測定原理を図4.2に示す。

この方式は、商用周波数の1/8の低周波と1.5倍の高周波を重ね合わせた磁界をくわえ、それぞれ低周波、高周波のサンプリングを行う。低周波側では、十分時定数の大きいローパスフィルタで、流体ノイズを除去する一方、高周波側では、ハイパスフィルタによって速い流量信号のみを通過させる。ゼロ点のノイズは低周波サンプリングですでに除去されている。これら2つの信号処理をして合成したものは、安定したゼロ点、流体ノイズの影響を受けず、応答も速いという特徴をもち、商用周波励磁と方形波励磁の両方の欠点を解決することができた。

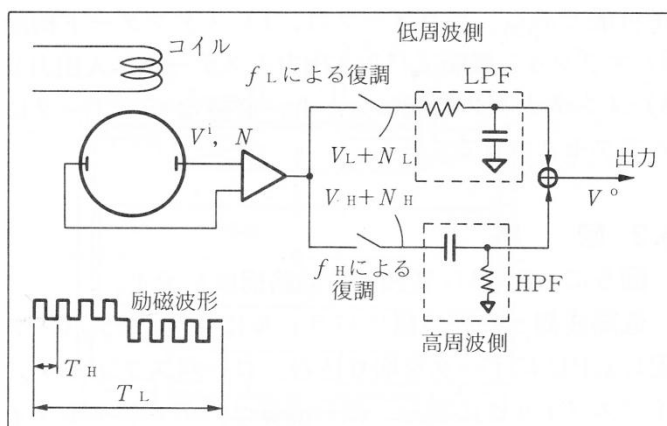


図 4.2 2周波励磁方式の原理

4. 2 電磁流量計の適用範囲拡大

(1) 2線式、バッテリー駆動

流体に磁界を加えるため励磁コイルへの電源は、一般に商用電源（100V/200V 系）か直流電源（DC24V）が使われる。このときは、流量計出力の2線と合わせて4線のケーブルとなるが、差圧伝送器と同じ2線式で磁界形成と信号処理を行うタイプが開発されている。

DC24V の4~20mA は信号成分となるため、4mA 以下の電流で磁界をつくり、かつ変換器の増幅器、デジタル回路、出力回路などを駆動させるための電気回路の工夫が必要とされた。信号起電力は、4線式の場合にくらべて数100分の1と極めて小さい。電磁流量計自身を直流で駆動させても、配管や付近の機器から商用周波数のノイズが入ってくる。このため、変換器回路にノイズの商用周波数に同期させたタイミング回路をつくり、このタイミングに合わせた信号処理を施し、商用周波ノイズを除く手法がとられている。

この手法を駆使しても、流体導電率が低くなると流体ノイズの影響が大きくなり測定できない領域が出てくる。4線式の最小導電率にくらべて約10倍の $50\mu\text{S/cm}$ 以上が測定可能である。励磁エネルギーの減衰をさける必要から一体形の構成となる。

2線式の低消費電力化をさらに推し進めたものが[バッテリー駆動の電磁流量計](#)である。図4.2に構成図を示す。消費電力を極端に減らすため、励磁のタイミングを少なくし、パルス状の磁界を与える。瞬時流量ではなく、積算体積流量を出力すれば十分という考えで開発された。このタイプは水道水のように適用され、現場で積算流量を読み取り、流量指示値の伝送は行わない。リチウム電池を使用し8年間は電池交換なしで動作する。

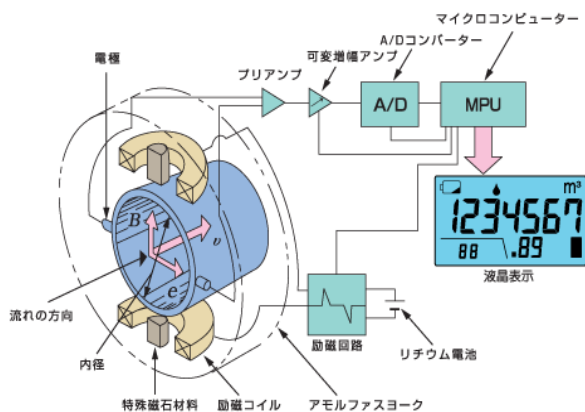


図 4.2 バッテリー駆動の電磁流量計 （愛知時計電機 Web²⁾ より）

(2) 容量検出形

電磁流量計の本質的な弱点は、導電性流体しか測定できないことである。これを、一歩改良したタイプとして容量検出形が90年代後半から開発された。電極が接液するタイプは、

変換器の電子回路からみた場合、測定管に満たされる流体（信号源）の抵抗性インピーダンスを介して発生する電位を検出する。

容量検出形は、測定管をセラミック材料で作り、測定管の外側に置いた電極から容量性インピーダンスを介して、内面に発生する電位を検出するものである。この容量性インピーダンスが非常に高いため、相対的に流体のインピーダンスが高くなっても（導電率が低くなっても）測定が可能となる。一般に容量検出形と呼ばれてはいるものの、静電容量を検出しているのではなく、静電容量を介して起電力を検出しているので、厳密には正確な呼び方とはいえない。

図 4.3 に容量検出形の一例を示す。入力回路にプリアンプ（インピーダンスコンバータ）を設け、電極電位と同じ電位をフィードバックさせて、電極の周囲のガード電極とシールドケースに与えている。浮遊容量による電位降下をふせぐためである。

容量検出形の特徴は、導電率が従来の $1/500$ 、すなわち $1\mu\text{S}/\text{m}$ ($0.01\mu\text{S}/\text{cm}$) の低導電率の流体まで測定できることである。接液電極形では測定できなかった純水、糖液、アルコールが測定できるようになった。このため、とくに食品プロセスの用途が広がった。

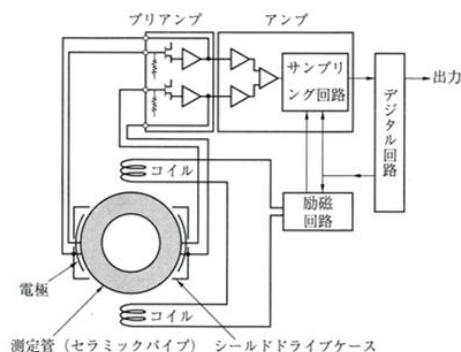


図 4.3 容量検出形電磁流量計の構成

(3) サニタリ形、充填機用電磁

食品のプロセスには、かなり古くから電磁流量計が使われている。可動部や障害物がなく、雑菌などが繁殖しやすい隙間や窪んだ箇所のない構造がない点が好まれた。頻繁に洗浄するのに便利なサニタリークランプというプロセス接続が採用されている。これらは口径 $25\sim 100\text{mm}$ の配管に接続されるタイプであった。

最近では、食品プロセスの最終工程である充填機に専用の電磁流量計（充填機用電磁）が多数設置されるようになった。従来、機械的な定量ポンプで押し出して充填するもので

あったが、定量ポンプの洗浄が面倒な点、並列した数十個の定量ポンプを高速に回転させるには重すぎる点などから、電磁流量計をこの用途に合わせて改良したタイプが開発された。

電磁流量計は 2 台以上が接近して設置されると、互いに磁界が干渉して誤指示を出してしまう。充填機電磁では、数十台が密集して設置されるため、従来の励磁方法では干渉して使えない。

この問題を解決するため、一つは親の変換器からすべての検出器を同じタイミングで励磁する方法があり、もう一つは隣接する電磁流量計の励磁周波数を少しずつ変える方法がある。どちらも、充填機電磁として十分使用でき、短時間に一定体積を充填することができる。たとえば 350ml の缶ならば、繰り返し性 0.2% (0.7ml) のバラツキで充填が可能である。

(4) 非満水電磁

通常電磁流量計では、流体が管内を満たして流れることが必須条件である。工場排水の管路ではほとんど開水路の流れとなり、円管の場合であっても上部に自由表面をもつ非満水の流れとなる。従来、せきやフリュームで測定されていたが、管路内に障害がないという長所を活かして、非満水の電磁流量計が開発された。

水平配管において、従来型の電極は $D/2$ の高さに設置されているため、水位が低い場合には電位を検出することができない。水位の低い場合にも電位をピックアップできるように工夫された。これは 1992 年フィッシャー・ポーター社によって開発された。電極を $0.1D$, $0.3D$, $0.5D$ の高さに設け、水位が変化したときそれぞれの電位からの寄与を求め、測定管の上下に置かれたコイルによる磁界を同一方向、反発方向に変化させて、水位と検出電位との関係を見出す工夫がなされている。

図 4.4 は 1995 年東芝が開発した非満水電磁流量計を示す³⁾。水平に配置された測定管の左右方向に磁界をつくり、管底に 1 個のみの電極をおく構造を採用している。基準電位は磁界から離れた接液リングからとる。非満水の流れがあると、自由表面（電位ゼロ）から管底の電極方向に起電力が発生する。

水位の検出が不要となる利点があるが、水位により流水断面各点の起電力への寄与率が変わることから、起電力と流量との関係を実験的にしらべておく必要がある。

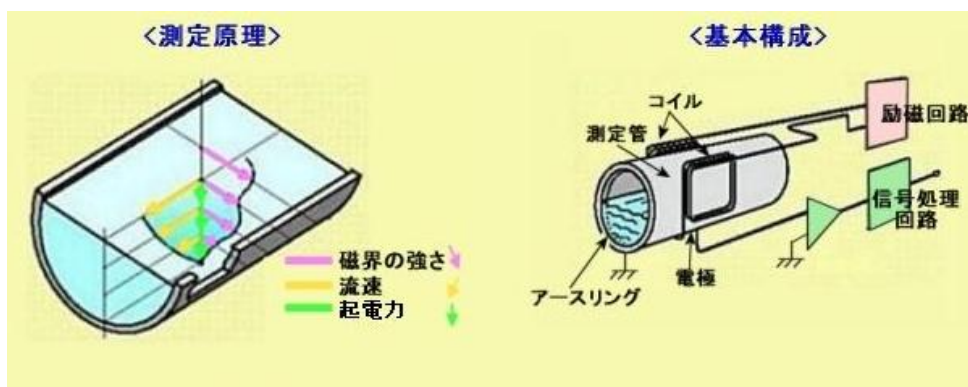


図 4.4 非満水電磁流量計の原理（東芝 Web³⁾ より）

4. 3 接液材料（電極、ライニング、接液リング）の選択

どのようなタイプの流量計であっても、測定しようとする流体に対して耐える材料を使うことはいうまでもない。腐食性や摩耗性の強い流体では、他のタイプの流量計では使えず、電磁流量計しか適用できないというケースが多い。このため、電磁流量計の接液材料の選択には、十分な検討が必要となる。この検討不足が電極リーク、ライニング摩耗、接液リングリークなどのトラブルを引き起こす。

電磁流量計の接液部は、電極、ライニング、接液リングの 3 箇所である。それぞれの材料の耐食性、耐摩耗性、耐熱性、耐付着性、耐浸透性を調べて適切な材料を選定する。ライニング材料については、上下水などの水はゴム系、高温流体にはセラミック、腐食性の酸・アルカリにはフッ素樹脂がすすめられる。電極、接液材料については、ステンレス鋼が標準的であるが、腐食性流体については耐食表をもとに選択する。酸・アルカリの液体では、濃度と温度により腐食性が異なるので細心の検討が求められる。

接液リングは電磁流量計の電圧の基準電位をとるためのものであり、流体に接していなければならない。リング内面全体が接していることが望ましいが、白金などの貴金属では内面全体を接液させることができないので、測定電極と同じような構造で、接液リング電極が設けられる。また、容量検出形電磁では、測定電極が接液しない特長をもっているが、接液リングはやはり必要になることを注意したい。

測定管がセラミックスとなる場合、その材料はほとんどアルミナ Al_2O_3 である。アルミナそのものは耐食性が高いものの、焼結したセラミックの粒界に含まれている酸化ケイ素が、ふっ酸、りん酸、強アルカリに弱いという欠点をもっている。またセラミック材料は熱衝撃にも弱いため、とくに急激に冷却されるラインには注意が必要である。通常、一定時間内の温度変化の上限が定められている。

4. 4 起こりがちなトラブルとその対策技術

(a) 電極付着・ライニング付着

電磁流量計が普及し始めたころ、それまでスラリーや付着性物質を含む流体に適する流量計がなかったため、数多く使われた。ところが、商用周波数励磁の最大のトラブルは電極付着によるゼロ点変動であった。付着が激しい場合にはフルスケールの～30%まで変動することが珍しくなかった。配管にフランジで接続されているため、配管から外して付着物をクリーニングすることは難しい。たとえラインを止め、配管を外して付着物を除去しても、付着しやすい流体の性質は変わらないため、あまりにも付着しやすい流体には向いていないとみなされてしまった。

方形波励磁が開発されてから、電極付着の問題はほぼ解消された。電極の一部に絶縁性付着があっても、電極の一部が接液していれば正常に動作する。

しかし、一般の接液形電極の場合、絶縁性付着が電極全面を覆ってしまうと、変換器の入力インピーダンスの限度を超えてしまうので、測定不能となる。このような付着は、電極付着というより、管内面に全体にわたるライニング付着といえる。

このような内壁全面にわたる絶縁性付着に対しては、容量検出形が有効である。容量検出形はセラミック測定管の外側に電極があり、測定管内側の電位変化をセラミック壁の静電容量を介して検出している。この測定管のインピーダンスに比べて、絶縁性付着物のインピーダンスは非常に小さい（付着物厚みが小さい⇒静電容量が大きい⇒インピーダンスは小さい）ので、測定にはまったく問題がない。しかし容量検出形電磁の接液リングへの付着については現在のところ対策は見出されていないので、付着の激しい流体に対しては、定期的な洗浄または配管を外しての洗浄が必要になってくる。

付着には絶縁性のほかに、導電性の場合もある。流体の導電率より大きい付着物が壁面についてた場合は、どのような電磁流量計であっても、マイナス誤差が生ずる。接液タイプの電磁流量計について、管壁付着物の導電率を σ_a 、流体の導電率を σ_f 、付着物の厚さを t とすると、付着物による誤差 $\Delta \varepsilon$ は、次式で与えられる。

$$\Delta \varepsilon = \frac{2}{1 + \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f}\right) + \left(1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_f}\right) \left(1 - \frac{2t}{D}\right)^2} - 1 \quad (4.3)$$

付着物の導電率が流体のそれより大きいと、管壁が短絡された効果をもつことになり、流量計の出力は低下する。絶縁性のライニングを設けた意味がなくなることに等しい。

磁性体を含む流体を測定する場合、測定管中央の磁界が強い箇所に、磁性体が集中して付着することがある。磁性流体では、付着のおそれとともに、管内の磁界が変化することによる指示誤差（一般にプラス）が現れることがある。磁性流体を電磁流量計で測定するときには、十分な事前検討が必要であり、できれば他のタイプの流量計を検討するほうが望ましい。

(b) 流体ノイズ

方形波励磁のところで、スラリーや低導電率に対してトラブルが生ずることを述べた。2周波励磁方式が開発されてから、流体ノイズの問題はほとんど解決されたが、励磁方式によらない他の対策もある。一つは電極の材質を耐ノイズ性の高いものにする、もう一つは励磁のパワーを高めて、流体ノイズによる変動成分を小さくする対策である。

電極材質については、タングステンカーバイド（WC）などがスラリーに対して強い。これはWC粒を結合している中間焼結物質（コバルト）にスラリー粒子が衝突しないので、スパイク状の電位変化を起こさない理由による。これと同じ理由で、セラミック電磁流量計の白金アルミナサーメット電極もスラリーノイズに強いことが確かめられている。

励磁パワーを従来の2～4倍にあげる方法もある。また電極付着の心配がないときには、商用周波励磁にもどる対策がある。とくに高濃度（～10%以上）のパルプ液に対しては、方形波励磁を使わず、励磁パワー増加で対処する例が、ヨーロッパでしばしば見られた。

(c) 気泡混入

気泡が混入して電極表面を接触しながら通過するとき、方形波励磁では、わずかの指示のふらつきはあるが、スラリー粒子があたって生ずる指示変化に比べて小さい。2周波励磁の場合にも問題は生じない。しかし、気泡の混入の程度が多くなり、液体の体積の～1%以上になると、電磁流量計の出力は実流量よりプラスの誤差を示す。

この誤差は励磁方式や容量検出形の方式に関係なく生ずるので、配管の上流部に設置したセパレータ（気液分離器）で、気泡を分離除去することが望ましい。さらに空気成分が多くなり、水平配管の上部に自由表面が形成される場合には、非満水の電磁流量計で測定しなければならない。

(d) 導電率不均一

電磁流量計では、管内を流れる流体の導電率は一様であることを前提としている。薬液を注入するラインでは、注入箇所の下流側でよく混合されずに、導電率が不均一に分布して流れることがある。とくに流体がパルプ液のようなスラリーでは、注入口から下流側に

数 10 D の直管があっても導電率分布は一樣とならない。

方形波励磁では、このような導電率不均一の流れに指示が変動し安定しないことがあった。これも流体ノイズの一種と考えられ、電極近傍に導電率の異なる液がながれるためであり、2周波励磁にするとこの問題は解消される。

もちろん薬液注入の箇所を流量計の下流側に設置すれば問題は生じない。しかし、紙パルプ製造ラインでの種箱（抄紙機のまへの最終調整タンク）のように、大きなタンクの導電率を一樣に混合することができない場合には、種箱直下の電磁流量計で対策をとらなければならない。

(e) 流速分布

電磁流量計が開発された当初、検出器の磁界分布は測定管全体にわたってできるだけ均一にするのが望ましいとされていた。理論から、均一磁界のもとで、円管の軸対称な流速分布に対しては、正確な流量を出力することが導かれたからである。電極を含む横断面（電極面）の近くのみではなく、管軸方向に 2D 以上の均一磁界を形成するため、大きく長いコイルが設けられていた。均一磁界の電磁流量計では、曲がり管、拡大管、バルブのあとの非軸対称な流れ（偏流）に対しては、誤差が生ずるのは仕方がないとして、流量計の上流直管長を長くとることが勧められた。

70 年代前半、一对の電極に生じる起電力への寄与率 (= 重み関数: 測定管内の場所の関数) の逆数になるような不均一な磁界分布が提案された。そのような磁界分布が可能ならば、軸対称、非軸対称にかかわらず、どのような流速分布であっても、正しい流量を出力するという。厳密な理論検討では、そのような磁界を形成することはできないとされたが、実際には重み関数の逆数に近い不均一磁界をもつ検出器が開発された。この不均一磁界にすると非軸対称な流れに対して、均一磁界の場合より優れた効果を示すうえ、この磁界分布をつくるコイルも長さ 0.7D 前後まで短縮できることがわかったため、すべてのメーカーの電磁流量計の磁界分布は不均一磁界に変わった。もちろん軸対称流に対しては、メーカーの実流校正時に、軸対称流を形成して校正しておけば、正しい出力が得られる。

現在、市販されている電磁流量計では、上流直管長は [JIS B7554-1997\(電磁流量計\)](#) の推奨値にしたがえば、付加誤差は 0.5% 以下に抑えられる。2 平面の曲がり管下流の旋回流に対しては、電磁流量計はまったく影響をうけない。管軸に垂直な平面内の 2 次流れの流速成分は、起電力に寄与しないからである。

5. コリオリ流量計

5. 1 原理と特徴

5. 1. 1 原理

図 5.1 に示すような回転する円板上に乗っていて、回転軸から離れる場合を考えてみる。まっすぐ回転軸から離れようとしても回転する接線方向の逆方向に力が働き、真っ直ぐ進むことができない。逆に回転軸の方向に向かおうとすると、接線方向の力を受けてやはりまっすぐ進むことができない。このような回転座標系において、物体の動く方向と直角に働く力をコリオリの力と呼んでいる。この力は物体の質量 m とその速度 \mathbf{v} および回転系の角速度 $\boldsymbol{\omega}$ に比例する。

ちなみに回転座標系において遠心力が働くことはよく知られている。遠心力は物体が回転系に対して固定していても働くが、コリオリ力は回転円板上をある速度で動いたときに働く力である。直線状の等速運動で運動量保存の慣性が働くこともよく知られている。回転系上の物体においても、角運動量を変化させる動きにたいして、角運動量を保存しようとする慣性がコリオリ力となって現れると理解すれば、コリオリ流量計の原理はさほど難しくはない。

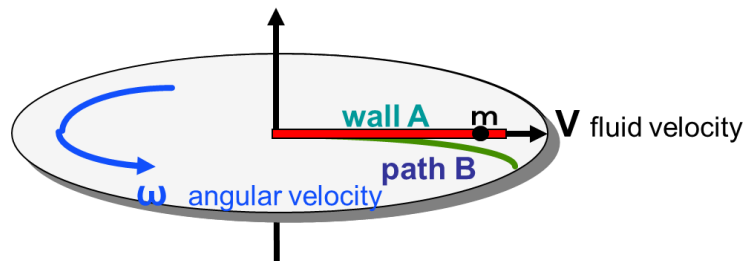


図 5.1 回転座標系で働くコリオリ力

コリオリ力を利用して質量流量を測定する流量計は、当初、流体を回転軸から回転円板に沿わせる構造が考えられ、回転する力に対してそれをとどめようとするトルクを測定するものであった。流体をぐるぐる回転させるのは大がかりであったため、管路の一部を U 字状の測定チューブに導き、この部分を前後の管軸の周りに振動させる構造が開発された。

U 字管の上流側半分では、回転軸から離れる方向だから、外から与える回転振動はコリオリ力を受けて位相が遅れ、下流側半分では流体は回転軸に向かうので位相が進む。このコリオリ力を受けて生ずる測定チューブの「ねじれ」を測定すれば質量流量に比例する。U 字管曲がり部の平面内の遠くから、この U 字管の振動をみたとき、強制的な振動に「ねじれ」が合わさった振動状態となる。この位相ずれの大きさはコリオリ力に比例するので、

管内を流れる流体の質量流量 mv を求めることができる。

開発当初は図 5.2 のような 1 本の U 字管が使われたが、設置する場所の振動の影響を受けて出力が不安定となる欠点が目立った。外部振動の影響を取り除くために、測定管を 2 本とし逆位相で振動させる構造が開発されてはじめて実用に耐えられる流量計となった。この U 字管タイプの開発と 2 本管への改良はアメリカのマイクロモーション社（現エマーソン）によってなされた。

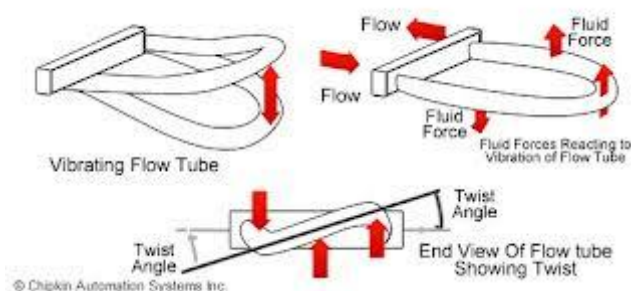


図 5.2 1 本 U 字管のコリオリ流量計

図 5.3 に 2 本 U 字管形の構造を示す。対抗して振動している 2 本の測定管の「ねじれ」の差をとると、2 本を流れる流体の質量流量に比例し、信号の大きさも 1 本のほぼ 2 倍得られる。一方、外部からの振動は 2 本の測定管に対して同相で入るため、差の信号を取ればキャンセルされる。2 本を流れる流量は厳密に等しい必要はないが、剛性や固有振動などについて、できるだけ近い 2 本の測定管を選んで製作される。これをペアリング(pairing)と呼ぶ。

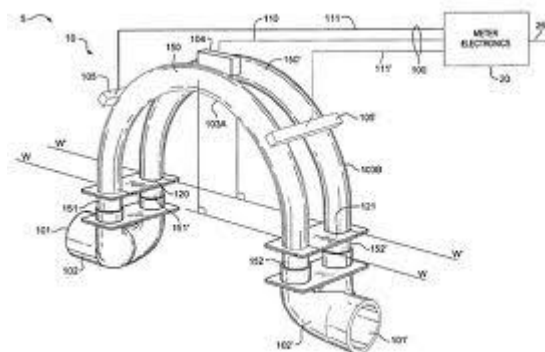


図 5.3 2 本 U 字管構造のコリオリ流量計

測定管の材料はステンレス鋼管を用い、振動は測定管中央部に取り付けられた電磁石で駆動し、U 字管の上下流 2 箇所に取り付けた電磁ピックアップコイルからそれぞれの位相を検出する。位相差は非常に小さく、デジタル信号処理で質量流量に変換される。

できるだけ小さなエネルギーで測定管を振動させるには、測定管の固有振動数で駆動す

ることが重要である。固有振動数は管内の流体の密度によって変化する。この性質を利用して固有振動数から流体の密度を求めることができる。

また振動特性の温度による影響を取り除くため、測定管の一部外側に温度センサ（白金抵抗体）が貼り付けられている。したがってコリオリ流量計からは質量流量、密度、体積流量（＝質量流量/密度）、温度の4つの信号が得られる。

ほとんどの液体のほかに、最近の機種では高圧の気体も測定できる。障害物がないため、スラリーや高粘度の流体に適している。2本U字管が開発されて以来、石油化学プラントの各種モノマーや食品プロセスの高粘度流体に多く採用されてきた。

5. 1. 2 特徴

コリオリ流量計の長所はつぎのようにまとめられる。

- 1) 測定原理上、直接、質量流量と密度が測定できる。
- 2) 質量流量、密度、体積流量、温度と4種のプロセス変数が一つの流量計で検出できる。
- 3) 精度が高い。
- 4) 高粘性流体、スラリーの流量測定に適している。
- 5) 流速分布の影響を受けない。
- 6) 高圧の気体も測定可能である。

短所としては、つぎの点が挙げられる。

- 1) 主に口径は100mm以下の小口径に限られる。口径が大きくなると価格も非常に高価となるため、口径10~25mmの範囲でもっとも多く使用される。
- 2) 他のタイプの小口径流量計とくらべても高価である。
- 3) 外部振動の影響を受けやすいので、配管サポートや設置場所に注意が必要である。とくに1本の測定管のみで製作されている微小口径は、設置場所の振動に注意する。
- 4) 測定管形状によっては、セルフドレインではない構造もある。管内から流体が抜けにくい構造は、食品プロセスに不向きである。食品プロセス用として1本直管の構造が開発されている。(後述)

電磁流量計、コリオリ流量計を2つのタイプを通じて、あまり強調されていない大きな特長がある。この2つの流量計の測定原理は、一つは電磁誘導、もう一つはコリオリの力を利用するため、流体の慣性力や粘性力にはまったく関係しない。したがって流体の粘度、レイノルズ数、あるいはニュートン流体か非ニュートン流体かなど流れの状態について、まったく心配する必要がないことが大きな長所となっている。起電力やコリオリ力の大きさが流速のみに依存し、測定管全体にわたる積分操作が測定原理の中に含まれていることによる。

5. 2 いろいろな測定管形状

1980年代に2本U字管タイプが普及し始めたが、90年代に入っているいろいろな測定管形状のコリオリ流量計が開発された。流量計として1本の直管が望ましいことは当然であったが、1本直管の開発は難しく、直管式といっても当初は2本直管タイプが普及した。また曲管タイプではU字管のほかに、S字形、 β 形、J字形、らせん形などの形状が開発された。これらは、先行するマイクロモーションの特許を避けるため種々考案された。いずれも外部振動の影響を除くために2重管構造となっている。

コリオリ流量計の理想形状と考えられる1本直管タイプは90年代はじめ Schlumberger やオーバルによって開発されたが、2000年代にはいってE+HやKrohneから販売されるようになって実質的な普及が始まった。初期のものはSN比をよくするために、前後配管径より測定管口径を絞って流速を上げているため、1本形状であっても圧力損失がかなり大きい問題が残されていた。E+H社の1本直管の原理図を図5.4に示す。測定管にカウンタバランスを設け、逆位相で振動させると、全体の重心が動かない構造とすることができる。この構造により外部振動の影響を除く。

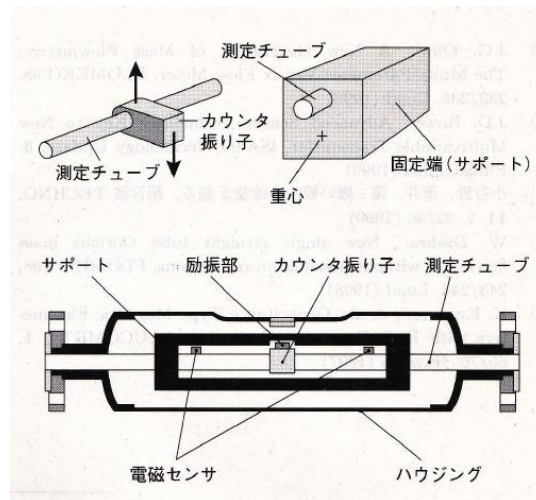


図5.4 1本直管形のコリオリ流量計 (Endress+Hauser 社)

しかし、これらの1本直管構造はU字管構造にくらべて、強制振動の振幅は小さく、コリオリ力による位相変化もはるかに小さいため、最小流速が大きい（レンジアビリティが小さい）、ゼロ安定度がそれほどよくない、という欠点はまだ残されている。

おなじ1本直管構造でも、管全体を振動させるのではなく、管軸は不動のまま、円管の管壁を楕円状に変形させるラジアルモードのタイプも開発されている。管壁付近の流体にコリオリ力が働き、測定管の上流側では位相がおくれ、下流側では位相が進む。図5.5に

測定原理図を示す(図は誇張されて描かれている)。図 5.5 で、流体の通る 1 本の直管断面を Fig. 6⇒5⇒6⇒7⇒6 のように振動させる。外部振動は管全体を振動させるので上流、下流側センサには同相で入ってくるが、信号は二つのセンサの差信号をとるため、外部振動の影響を免れている。

液体のみではなく、気体の流量も、比較的低流速から測定できる特徴もっている。また大きな口径では管全体を振動させるのは難しかったが、管壁のみを楕円状に変形させる強制振動ならば、比較的容易である。従来のコリオリ流量計では困難であった 150～300mm の口径にも 1 本直管の特長を活かすことができる。

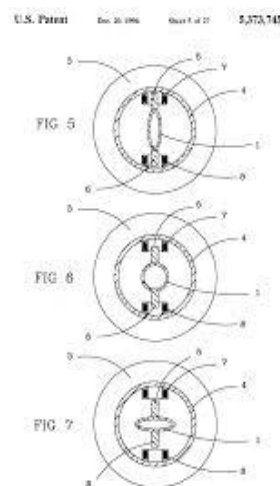


図 5.5 ラジアルモードのコリオリ流量計

5.3 幅広いアプリケーション

コリオリ流量計はこの 20～30 年のあいだに急に用途が拡大した流量計なので、とくにこの流量計に限って用途が広がりつつある現状を解説しておきたい。

(1) 石油化学のモノマー類

石油化学・化学プラントでは、化学反応をともなうプロセスが多くあるため、質量流量によってプロセスを制御することが求められる。コリオリ流量計が普及するまえは、体積流量を測る流量計と密度計によって、間接的に質量流量を求めていた。また、モノマーなどの流体は粘度が高くなる場合もあり、オリフィスや容積流量計など、それまでの体積流量計では、十分にカバーできない流体もあった。コリオリ流量計は高粘度流体も測定できるうえに、質量流量が間接法に比べて高い精度で測定できるため、最初に、石油化学プラントのモノマーなどの流体に用途が広がった。

(2) 食品プロセス

つぎに用途が大きく広がったのは食品プロセスである。食品をつくるプロセスでは、高粘度の流体や、気泡を含む流体が多い。雑菌の繁殖をさけるため、凹んだ箇所や窪みがなく、可動部のない構造が理想とされる。さらに冷水のあとに蒸気洗浄工程などがあり、熱衝撃もかかるプロセスである。それまで電磁流量計のサニタリー形（フランジ継手がサニタリータイプ）などが使われていたが、電磁流量計では導電性という条件が課されるため、オイル類、マヨネーズ類などは測定できなかった。コリオリ流量計によって、油性、水性にかかわらず、ほとんどすべての食品の流量が測定できるようになった。ただし、食品プロセスでは、できれば2本構造も回避したいという要求もあって、1本直管タイプが理想的な測定管形状とされた。

(3) 高圧ガス

開発当初から、コリオリ流量計は主に液体用の流量計として考えられてきた。石油化学プロセスでは液体のみではなく気体の流量測定も多い。流体密度×流速が信号の大きくなるので、気体の場合には高圧（=高密度）の流体から実用が始まった。ここで高圧という範囲はほぼ1 MPa以上の仕様を示す。同じ圧力でも分子量の大きい気体ほど流体密度は大きくなるので炭化水素ガスから普及が始まったが、しだいに無機ガスにまで適用されるようになった。

最近では、燃料電池に使われる水素ガス（もっとも分子量の小さいガス）にまで[コリオリ流量計](#)が使われている。この水素ガスは35～70 MPaの高圧で供給されるため、分子量が小さくても、流体密度が大きくなる。当然のことながら、流量計の測定管はこの圧力に耐えるため、管の肉厚を厚くしなければならない。一方、信号の大きさは測定管の振動振幅に比例するため、肉厚が厚くなると信号が小さくなってしまう。つまり高圧タイプのコリオリ流量計ほどS/N比が悪くなるので、これらのタイプは特殊仕様として販売されている。

5. 4 起こりがちなトラブルとその対策技術

(a) 外部振動

微小口径のコリオリ流量計では、ほとんど1本管（曲管）が採用されている。1本管では外部振動の影響を除去する構造をもっていないため、外部振動が入らない設置とすることが要求される。

微小口径のつぎに外部振動の影響を受けやすいのは、1本直管タイプである。配管の応力が直接、測定管に伝わると固有振動数が変化したり、あるいは外部からの衝撃ノイズが入りやすい。1本直管タイプでは、測定管に隣接するフランジのみではなく、さらに離れたフランジ部でもサポートする必要がある。直管タイプでは、管軸に垂直な方向の外部振動

のみでなく、管軸方向の振動も出力に影響を与えることがある。管軸方向の外部振動が大きい場合には、流体条件が許すかぎり、U字管形を採用することが望ましい。

(b) 気泡混入

流体がスラリーであっても、固形粒子を含めた流体全体に対してコリオリ力は働くので、正しい質量流量が得られる。気泡を含む流体に対しても、同じように平均の流体密度に対するコリオリ力が働くが、気泡の含有率が多くなる（～1%）と、測定管の強制振動の際、散逸エネルギーが急激に大きくなり、強制振動が不能となるトラブルが生じる。測定管が振られるとき、気泡とその周囲の液体との間の速度の差が生じることにより、振動エネルギーが吸収されるため、固有振動を続けるための励振電流が急激に上昇する。これがリミットまで行くと、励振が止まってしまう。

気泡混入を検知する機能のコリオリ流量計は開発され始めたが、気泡検知の段階であり、十分な気泡対策の技術までに至っていない。現状もっとも有効な対策は、流量計上流にセパレータ（気液分離器）を設置することぐらいである。

(c) 測定管の付着と腐食

流体中に付着性物質が含まれている場合、測定管の内壁に付着が成長することがある。電磁流量計の電極付着のように、急に出力に影響を与える現象は起きない。均一に付着が成長すると固有振動数が変化する。強制振動は固有振動数の変化に追随するので、質量流量の測定には影響が現れないが、密度測定に影響が出てくる。また食品プロセスで2本管構造を採用した際、2本の測定管が合流する箇所ですべて付着が生じやすい。この点から、食品プロセスでは、1本直管構造が望ましいといえる。あるいは製造工程の一部に付着物を洗い流すフラッシングを組み込むことも対策の一つになる。

高温では粘度が低いが、低温になると粘度が高くなるピッチなどが測定される場合がある。配管や流量計全体を加熱するヒーターが故障すると、測定管内部の流体が固化し、流量計が二度と使えなくなるというトラブルも報告されている。

付着より大きなトラブルになりやすい原因の一つは測定管の腐食である。コリオリ流量計は、測定管を常時振動させるため、測定管の付け根部分には繰り返し応力が絶えず働いている。この繰り返し応力は、高温や高圧の条件になると、さらに測定管材料の応力腐食割れを促進させる。測定管材料はほとんどステンレス鋼であるが、過酷な流体条件のときには、繰り返し応力による腐食割れのトラブルの可能性を事前に検討すべきである。

最近では、腐食検知の機能をもつコリオリ流量計が開発されはじめたが、まだそれほど普及していない。

6. 超音波流量計

6. 1 原理と特徴

6. 1. 1 伝搬時間差式の原理

超音波流量計の原理は、伝搬時間差式とドップラー式の2つに大別される。伝搬時間差式は、流れている流体中に超音波を伝搬させるとき、流れに沿った方向と流れに逆らう方向で超音波の伝搬速度が異なる（=伝搬時間が異なる）ことに着目した流量計である。

図 6.1 に測定原理を示す。管路と斜めに交叉する線（測線と呼ぶ）上に送受波器を設置し、流れに対して順方向と逆方向に交互に超音波パルスを入射し、受波するまでの時間を測定する。管路の外側に送受波器を取り付ける構造をクランプオン形と呼ぶ。

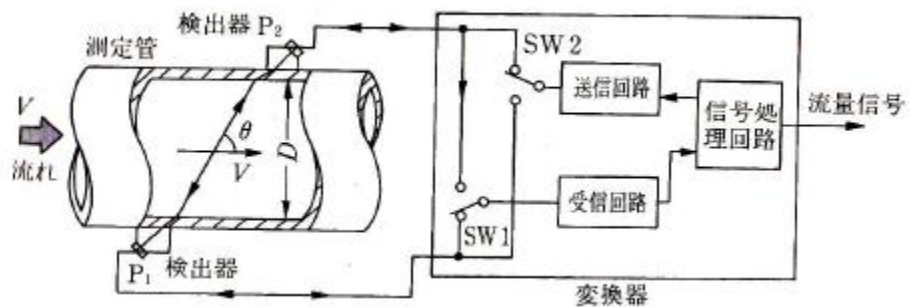


図 6.1 超音波流量計の構成（伝搬時間差方式、クランプオン形）

流体中の音速を C 、測線と管軸のなす角を θ 、管内超音波の伝搬する距離を L 、管軸方向の流速をひとまず一様流と考え V とすると、順方向、逆方向の超音波の速度は $C+V\cos\theta$ 、 $C-V\cos\theta$ となるから、順方向、逆方向の伝搬時間 t_d 、 t_u は

$$t_d = \frac{L}{C+V\cos\theta} + \tau$$

$$t_u = \frac{L}{C-V\cos\theta} + \tau$$

となる。ここで τ は管材、ライニング材、ケーブルなどを通る時間である。二つの伝搬時間の差を Δt とすると、流速 V が音速 C に比べて十分小さいことを考慮して流速 V は次式で表される。

$$V = \frac{C^2}{2L\cos\theta} \Delta t \quad (6.1)$$

この式より、C, L, θ がわかっているならば、伝搬時間差 Δt から流速 V が求められる。この式では音速 C が温度によって変化すると測定に影響を与える。二つの伝搬時間の和から、静止流体に対する伝搬時間 t_0 を

$$t_0 = \frac{1}{2} (t_d + t_u) = \frac{L}{C} + \tau \quad (6.2)$$

とおき、これを式 (6.1) に代入して C を消去すると

$$V = \frac{L}{2(t_0 - \tau)^2 \cos \theta} \Delta t \quad (6.3)$$

と表される。この式を用いると流体の温度変化から生ずる音速変化の影響を取り除くことができる。

実際の管内の流れは、中心付近は速く、壁面に近いところでは遅くなる流速分布をもっている。微視的にみた流束について伝搬時間差の式 (6.1) を測線に沿って線積分したものが実際の伝搬時間差 Δt_m となる。

測線を斜めに横切る微視的な流束の管軸方向の速さを v_1, v_2, \dots, v_n とし、それぞれの流速で生じる時間差を $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ とすると、微小測線の長さは L/n だから

$$\Delta t_1 = \frac{2L \cos \theta}{nC^2} v_1$$

$$\Delta t_2 = \frac{2L \cos \theta}{nC^2} v_2$$

.....

$$\Delta t_n = \frac{2L \cos \theta}{nC^2} v_n$$

測線全体の伝搬時間差を Δt_m とすると、これは上式を加算 (線積分) したことになるので、

$$\Delta t_m = \frac{2L \cos \theta}{C^2} \cdot \frac{1}{n} \sum_i v_i$$

この式で、 $\frac{1}{n} \sum_i v_i$ が測線平均流速に相当する。この伝搬時間差 Δt_m をふたたび式 (6.2) を用いて

$$V_m = \frac{L}{2(t_0 - \tau)^2 \cos \theta} \Delta t_m \quad (6.4)$$

と表し、この V_m をあらためて測線流速と呼ぶ。 V_m はあくまで測線上の平均流速を表し、管断面全体の平均流速 \bar{V} を表すものではない。

実用上は、測線流速 V_m と平均流速 \bar{V} の比 k (流量補正係数) を使って流量を求めている。すなわち流量 Q は、 D を管内径として

$$k = \frac{V_m}{\bar{V}},$$

$$Q = \frac{\pi D^2 \bar{V}}{4} = \frac{\pi D^2 V_m}{4k} \quad (6.5)$$

として求められる。

流量補正係数 k は管内の流速分布の変化によって変わるので、レイノルズ数を用いて補正係数を求める。いずれも上流直管長さを十分にとった発達した流れについて実験的に求めたものでいくつかの補正式がある。代表的なビルゲルの式を次式に示す。

$$k = 1 + 0.01(6.25 + 431Re^{-0.237})^{1/2}, \quad (3 \times 10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^6)$$

上流直管長が十分にとれず、曲がり管などの影響が残るときには、この流量補正係数を入れても補正しきれない誤差が含まれることになる。測線上の平均流速しか測定できない点が超音波流量計の難点であり、多数の測線を配置して、できるだけ管断面全体の流速を測定するタイプが多く開発されている。多測線の超音波流量計をマルチビームタイプとよんでいる。

クランプオンタイプは、既設配管に設置できる長所をもつが、メーカの製作した測定管そのものに送受波器を取り付けた接液タイプ（スリーブタイプとも呼ぶ）も開発されている。接液タイプのほうが精度は高いが、既設管に設置可能な長所は失われる。接液タイプは精度が高いとはいえ、メーカでの実流校正の際の保証精度であり、上流直管長を十分にとって設置しなければ表示通りの精度は得られない。

対象流体は液体が多く、最近ではガスに広く適用され始めた。ガスの場合には、管材とガスとの音響インピーダンスが違いすぎるため、クランプオンタイプを実現することは難しく、ほとんどは接液タイプの構造に限られる。境界面で音響インピーダンスの差が大きすぎると、超音波は入射せず反射されてしまう。ガスの音響インピーダンスは、固体や液体のそれより 4~5 桁小さい。

6. 1. 2 特徴

伝搬時間差方式でクランプオンタイプの最大の長所はつぎの点である。

1) 管の外側に送受波器を設置すれば、流量が測定できることである。したがって既設の管にも設置可能である。

このほかにも下記の長所が挙げられる。

2) 流体に接触しないで測定ができる。

この長所を利用して、最近では半導体プロセスに数多く適用されている。半導体プロ

セスでは、一般プロセスのようなクランプオン構造はとらず、コの字状の小口径樹脂管に送受波器を対抗させて配置するものが多い。(後述)

- 3) 大口径の管になるほど比較的安価に設置できる。
- 4) レンジアビリティが大きい。
- 5) 正逆流量が測れる。

超音波流量計の短所はつぎのようである。

- 1) 流体中に気泡が混入すると、超音波が散乱され流量演算ができない。
また固形物が多く含まれる流体も、超音波が透過しないので測定できない。
- 2) 流速分布(偏流、旋回流、2次流れなど)の影響をうけるため、長い直管長が必要である。とくに拡大管、各種弁、2平面エルボ、ポンプなどの下流に設置される場合は30D以上の長い直管長が必要となる。計測器工業会から推奨直管長の指針が示されている。設置条件が十分でない場合、校正時の精度が期待できない。
- 3) 管壁に付着が成長すると、超音波パスの変化や伝搬時間に影響を与えるため、誤差をもたらす。
- 4) 気体の場合には既設管への設置が難しい。

6. 1. 3 ドップラー式の原理

入射された超音波が、流体中の散乱粒子によって散乱されるとき、散乱された超音波の周波数が変化するドップラー効果を利用する。図 6.2 に測定原理を示す。管壁に送波器と受波器が一体となったものを設置し、流れに逆らって斜めに超音波を入射する。散乱された超音波は受波器でうけ、送波と受波の周波数の差から流速を演算する。

送波と受波の周波数を f_t, f_r とし、散乱される場所の流速を V 、音速を C 、流れ方向と超音波の伝搬方向とのなす角を θ とすると、二つの周波数の差 f_d は次式のように表される。

$$f_d = |f_t - f_r| = \frac{2V \cos \theta}{C} f_t$$

この周波数差(ドップラー周波数)から測定箇所の流速を求め、補正係数を入れて平均流速、流量を求める。流体中に散乱粒子または気泡がないと散乱超音波の周波数を求められないため、流体成分(気泡または懸濁粒子の含有量)に一定の条件が課される。しかしながら上下水道や各種用水で使われている水では、ほとんどドップラー方式による測定が可能である。

ドップラー式は管路のある一部分からの散乱超音波を捉える。その一部分の流速は管全体の平均流速ではないため、流量に変換するときの誤差はかなり大きくなる。すなわちドップラー式は伝搬時間差式より精度は低い。このため固定式の設置ではなく、可搬式(ポ

ータブル) のモニター用流量計として使われるケースもある。口径の小さい場合には、伝搬時間差式のポータブル形も開発されている。

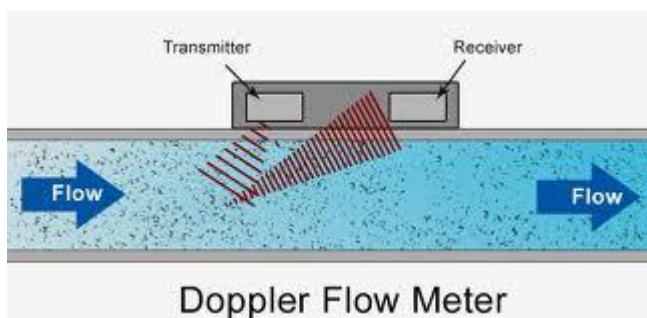


図 6.2 ドップラー式の超音波流量計

6. 2 いろいろな測線方式

伝搬時間差式の超音波流量計では、流速分布の影響を少なくするため、一本の測線を用いる Z 法のほかに、反射や複数の測線を組み合わせるいろいろな測線方式が提案されている。代表的な測線方式を図 6.3a～d に示す。

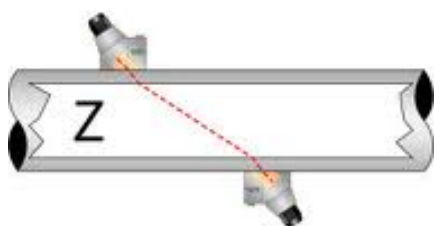


図 6.3a Z 法

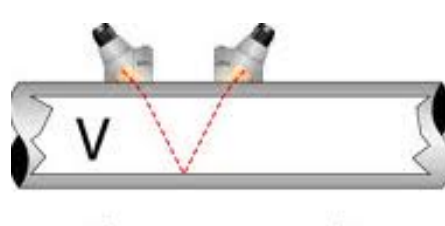


図 6.3b V 法

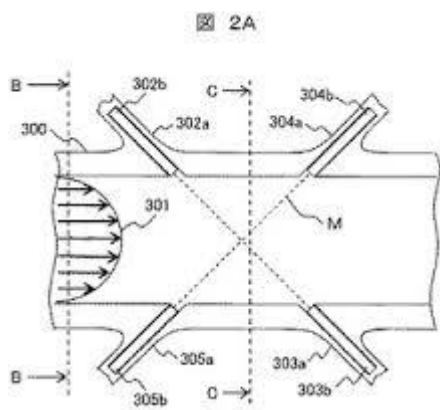


図 6.3c X 法

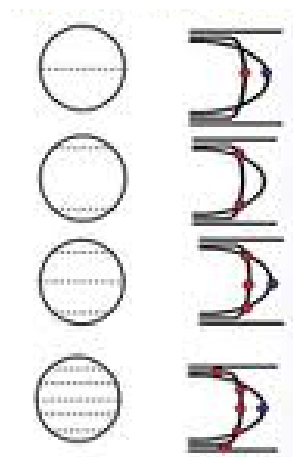


図 6.3d 平行多測線法

V法は対抗する管壁での反射を利用する方法で、測線面内で管軸に垂直な流速成分の影響を打ち消すことができる。ポータブル形で管径が比較的小さい管に多く採用されている測線方式である。またX法は、Z法の測線を同一平面内で交差させたものであり、やはりV法と同様な流速成分の影響をのぞくことができる。

またZ法測線を直交させる2平面X法、さらにはV法を直交させた2平面V法も開発されている。管の中心付近を通る測線を増やすと、中心付近の流速成分が支配的となり、管壁に近い成分の寄与が少なくなる。この傾向を避けるため、多測線の平行Z法または平行V法も提案されている。クローネ社は、管の中心を通らない平行な2～3本のZ法（平行Z法など）の機種を、液体用、気体用として開発している。

これらの測線方式は主に偏流の流速分布の影響を除くことを目的としているが、さらに旋回流の影響をのぞくための測線と組み合わせた測線方式も開発されている。図6.4はインストロメット社が開発した[天然ガス用5測線超音波流量計](#)（スリーブタイプの測線配置）を示す。3本のV法の測線は120度離れた送受波器から入射され、おもに偏流の影響をのぞく。管軸と交叉しない2本の測線は、2回の管壁反射を経て、右回り、左回りに送受信する。2本の測線により旋回流の影響を取り除く利点をもっている。このタイプの流量計は、天然ガスの取引用流量計として、ガス用としては0.5%の高い精度で測定できる。

超音波流量計の適用されるプロセスは、上水、工業用水などの比較的清い流体で、大口径（300mm以上）の管路であるケースが多い。口径が大きくなるほど、上下流の直管長を十分とれないケースが多いため、2測線などのマルチビームが採用される。測線を増やせば、流速分布の影響をかなり軽減することはできるが、完全に取り除くことはできない。

超音波流量計の測定原理から、1次元の測線上の平均流速の情報を、測線2本、3本と増やしていても、管断面全体の積分操作がないために高精度化には限界があると考えられる¹⁾。

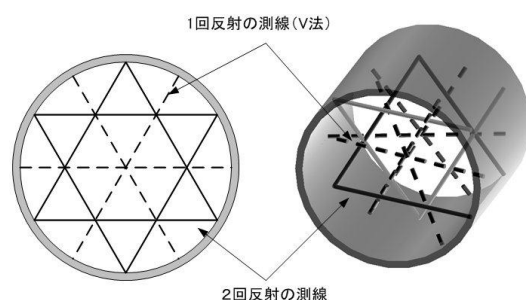


図6.4 天然ガス用の5測線超音波流量計(Elster-Instromet社)

6.3 半導体プロセスの超音波流量計

1990年代以降、半導体を製造するプロセスに超音波流量計が多数使用されるようになった。半導体製造プロセスには、エッチング用の腐食性・摩耗性流体やシリコン洗浄用の純水などの流体が多く使われている。この流量を測定する流量計は、流体によって侵されないこと、かつ流体へ不純物を出さないことが必須条件とされる。多くのラインでは、サイズも流量範囲も比較的小さく、優れた耐食性をもつフッ素樹脂のチューブが使用されている。

フッ素樹脂のなかでも、射出成型できる PFA 樹脂を、コの字状に成型し流路の外側に超音波送受波のための圧電素子を装着する流量計が開発されている（図 6.5）。超音波は流れと同じ方向か反対方向に伝搬し、斜めに交叉することはない。伝搬時間差式の測定原理では、式 (6.2) において $\theta=0^\circ$, $\cos \theta=1$ に相当する。コの字状の管路で圧力損失を生ずるが問題になる程度ではない。このタイプの流量計は、できるだけ微小な流量までも測定できることが長所となっており、口径 5mm で数 ml/min という微小流量まで測定できるものもある。

図 6.5 は流路の内部を透過する超音波の伝搬時間差を検出するものであり、管路材料の PFA 樹脂の物性とは直接関係がない。しかし、最近では、PFA パイプを伝搬するガイド波を利用し、このガイド波の伝わる速度と流れとの相対速度の違い（=伝搬時間差）から微小流量をもとめるものが開発されている²⁾。

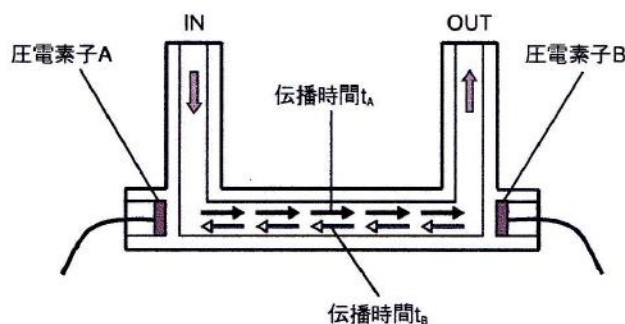


図 6.5 半導体プロセス用の超音波流量計検出器（東京計装 Web より）

6.4 起こりがちなトラブルとその対策技術

(a) 気泡混入

超音波流量計で、もっとも多いトラブルは気泡混入による指示不良である。気泡が少ないラインと想定していても、流速が高くなったときにはキャビテーションが生じやすく気泡がしばしば混入することがある。気泡混入による受波不能をさけるために、何回かの超音波パルスの送波のうち 1 回でも受波できれば信号処理して流量を出力するタイプが開発

されている。しかし気泡の混入量が多く、受波できない状態が長く続けば、大きな指示誤差は避けられない。

小口径のラインでは、気泡をのぞくために気液分離器（セパレータ）を上流部に設置することが可能であるが、サイズ 200mm 以上のラインではセパレータも大規模となり、設置は難しい。

一方、超音波流量計は大口径ラインに設置されることが多いため、気泡混入トラブルが生じた場合は、上流の配管要素で弁や拡大管など、気泡が発生しやすい場所からできるだけ離れた設置場所を検討すべきである。上下流の直管長の条件もかなり厳しいことから、適切な場所が見つからないときには、ドップラー式超音波流量計または電磁流量計の採用を考えなければならない。

(b) 検出器設置

「既設管へ設置できる」という長所の裏側には、「検出器設置の際の設定不十分からトラブルが生じやすい」という欠点が潜んでいる。検出器の設置にあたっては、まずは設置場所の選定であり、つぎは既設管の管外径、厚みの測定、ライニングの有無、さび・付着物の有無の調査である。ライニングやさび・付着物がある場合には、その厚みも測定しておきたいが、大抵の場合、鋼管の厚みは外から測定するものの、ライニングは推定値であったり、さび・付着物に関しては無視されることが多い。

クランプオンタイプの Z 法の場合、送受波器の設置は、変換器の受波感度を見ながら最適位置が決められる。送受波器は堆積や気泡溜りを避けるために、水平配管の管底と管頂には設置しない。

ライニングや付着物の設定が、実際と異なる場合には、最初から管内径の寸法に誤差があるまま測定を始めることになる。また経年変化によって付着物やスケールが厚くなる場合も誤差要因となる。

検出器設置の際の設定不十分な要因を除くには、クランプオンタイプより接液タイプが望ましい。付着物が懸念される場合でも、接液送受波器の部分が脱着できるタイプが開発されている。ただし、接液タイプであっても検出器の設置は、クランプオンタイプと同様に、流速分布の十分発達した場所、気泡の生じにくい場所を選択しなければならない。

(c) 実流校正と流速分布

(i) クランプオンタイプ

伝搬時間差方式のクランプオンタイプでは、実流校正をしないで出荷されるため、検出

器設置の際、できる限り実際に近い条件を設定入力する必要がある。設置場所の流速分布は「充分発達した流れの流速分布」を仮定しているため、流速分布が偏流、旋回流などのように乱れていると、その影響で誤差を生じる。ただし多くの場合、誤差がどれほど生じているか確認することができない。測線の数を増やせば、誤差はある程度小さくなるが、費用対効果が明らかでないために、測線を増やす対策は見送られることもある。

(ii) 接液タイプ

接液タイプはメーカーの実流校正設備で校正され出荷される。メーカーの試験設備は、特定の口径については理想的な配管条件となるようにつくられているが、試験をうける検出器の口径については、十分な直管長をとれない場合もある。ほかのタイプの流量計より、上下流に長い直管長を必要とするので、校正時の配管条件と実際の配管条件が異なる場合には、接液タイプであっても流速分布の違いによる誤差を見込まなければならない。

最近では、上流の配管要素と位置によって、どの程度誤差を見込むか数値シミュレーションで見積もることもできるようになった。

7. 渦流量計

7.1 原理と特徴

7.1.1 原理

流れの中に、流れを妨げるような形状の柱状の物体をおくと、その下流部に交互に渦列が放出される(図 7.1)。流線形ではないこのような物体を、流体力学では' bluff body' (鈍い物体) とよぶ。カルマンは、下流部 (wake (後流) とよぶ) に発生する渦の周波数 f と、流速 v のあいだにつきのような比例関係が成り立つことを示した。

$$f = S_t \frac{v}{d} \quad (7.1)$$

ここで、 d は柱状物体の幅を表し、 S_t は一定のレイノルズ数範囲で、一定の値をとるストローハル数を表す。

渦流量計では柱状物体のことを渦発生体とよぶ。渦流量計は、発生する渦の周波数を測定し、流速ひいては流量を求めるものである。この渦周波数は、液体、気体に関係なく、同じ関係式が成り立つので、液体、気体、蒸気の広い範囲の流体に適用できる。

渦周波数の測定には、いろいろな方式が開発されたが、現在では渦発生の際、渦発生体に生ずる応力の変動を圧電素子によって検出する方式が多くなっている。当初、プロセスの円形管路に、どのような断面形状の渦発生体を設けるかが、設計上の重要なポイントであった。できるだけ広いレイノルズ数の範囲で、比例定数 (ストローハル数) が一定になるような形状が理想的とされる。

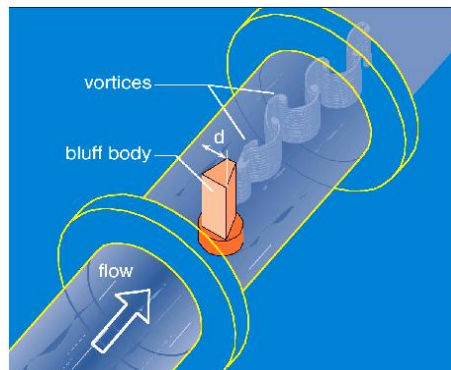


図 7.1 Bluff body 後流のカルマン渦列

7.1.2 長所と短所

渦流量計の長所としてつぎの点が挙げられる。

- 1) 液体、気体、蒸気の広い範囲の流体に適用できる。
水で実流校正すれば、そのメータ定数(パルス/単位体積)は他の流体にも適用できる。
- 2) 流路に渦発生体のみを設けるシンプルな構造である。
- 3) 圧力損失は差圧式より少ない。(おおむね $1/4 \sim 1/2$)

短所としては、つぎのようである。

- 1) 流速が低い場合や粘性が高い場合、すなわちレイノルズ数が小さい場合には、カルマン渦列が発生しなくなるか不安定になるため、測定できなくなる。
- 2) 固形物や気泡、付着物の多い流体には適さない。
- 3) 渦周波数を力の振動センサによって検出するタイプでは、管路の振動によって影響を受けることがある。

7.2 渦発生体と渦検出方式

7.2.1 渦発生体

当初、渦発生体の断面が、円形、四角形、三角形、台形などいろいろな形状のものが開発されたが、安定な渦が発生するためには、渦の剥離点が決まった場所であるほうがよいことから、流れに対してエッジをもつ四角形、逆三角形、逆台形の断面が採用されている。渦発生体の例を図 7.2 に示す。

また、渦発生体の幅 d は管路内径 D の 0.28 倍前後に設定すると、ストローハル数一定の流量範囲が広くとれることがわかっている。渦発生体の中央部はほぼ 2 次元流れに近いが、渦発生体の上下、管壁に近いところは流路が妨げられるため馬蹄形の渦が生じ、主流の渦列の安定性に影響を与える。この点を考慮し、渦発生体の上下部分に台座を設けるタイプもある。

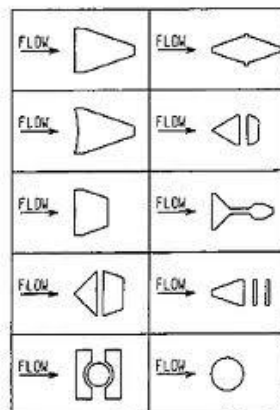


図 7.2 渦発生体の断面形状

7.2.2 渦検出方式

初期には、渦発生体の後流に渦列の交番差圧を受けるベーン（受圧板）を置き、ベーンの中に渦検出センサを組み込む方式が開発された。渦発生体と別に渦検出センサを設ける構造を2体形ともいう。しかし、ベーン構造のもつ固有振動数が渦周波数検出のノイズ源となるため、渦発生体のなかに渦検出センサを埋め込むタイプが主流となっていった。渦発生体の中に、圧電素子を2重に埋め込んだ構造の例を図7.3に示す。

この構造において、渦発生体に固有な振動モードのモーメントと、流路中の渦発生体が渦の交番差圧を受けるときのモーメントを分離するために、圧電素子を2つ配置している。この例では交番差圧がはたらく揚力方向のみの成分を受け、抗力方向や渦発生体の軸方向の成分をキャンセルする工夫がなされている。

渦発生体のなかに、交番差圧を導く導圧孔を設け、この孔の中心部に2重円筒を配置し、内筒、外筒のあいだの静電容量の変化から渦周波数を検出するセンサも開発されている。また、液体用に限られるが、渦発生体の後流に超音波送受波器を装着し、管の外から渦周波数を検出する方式もある（後述）。

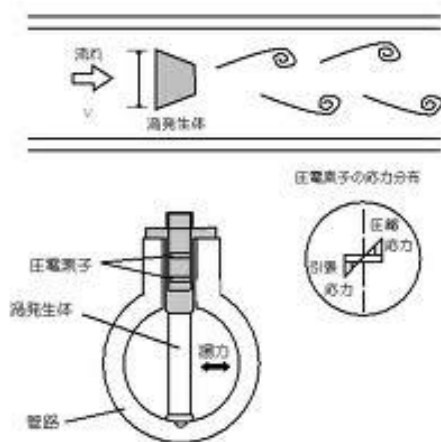


図 7.3 渦発生体中に圧電素子2枚を埋め込んだ渦流量計

7.3 蒸気アプリケーション

渦流量計の適用できる流体は、液体、気体、蒸気と広いが、なかでも蒸気流量の測定に適しており、蒸気用の専用機種も開発されている。

通常の渦流量計を蒸気ラインに設置する場合は、差圧式流量計とおなじように、温度、圧力（静圧）センサを別に設置し、理想気体を仮定した温度圧力補正を流量演算器で行

う。流量演算器では、蒸気密度の演算も同時に行うので、蒸気ラインで要求される質量流量を出力できる。

とくにボイラーの運転においては、ボイラーから出る蒸気を飽和蒸気とみなして計装することが少なくない。渦流量計を流れる蒸気が飽和蒸気とみなすことができると、計装は非常に簡単となる。飽和蒸気では温度または圧力を与えると、蒸気表からその密度がわかる。渦流量計の渦発生体の中に、温度センサ（測温抵抗体）を内蔵させ、この温度出力を渦流量計変換部に入力する。変換器では蒸気表テーブルにより密度に変換される。飽和蒸気の温度、密度、体積流量、質量流量の4つの変数を出力できるので、このタイプの渦流量計を[マルチバリアブルタイプ](#)と呼んでいる。

ボイラー計装においては、ボイラー本体の運転が重視されボイラーから供給される蒸気の状態や漏れなどの監視は行われることが少なかった。最近では、省エネルギーの観点からボイラー出口から離れたラインにおいても、蒸気流量をモニターする動きがみられるようになった。

7.4 起こりがちなトラブルとその対策技術

(a) 外部振動(配管振動、音響ノイズ)

渦流量計でもっとも起こりがちなトラブルは、外部振動トラブルである。力を受けて渦周波数をカウントする渦検出センサは、振動センサでもある。流量計が挿入される配管は、流れが速くなるほど、その振動が大きくなる。また流れが止まっても、ポンプやバルブなどの流体機器から配管あるいは流体を通して、機械的振動が伝わる。ボイラー計装では、ヘッダー付近で発生する高周波の騒音ノイズが、ガス流量の周波数帯域に入ってくると、測定に大きな影響を与えることがある。

渦流量計の原理(7.1)式からわかるように、口径が大きいすなわち d が大きいほど、また流速が低いほど、渦周波数は低くなる。気体の場合の常用流速は液体より約1桁大きい。したがって、口径が大きく(～300mm)液体の下限流速付近では、渦周波数は1 Hz 以下であり、口径が小さく(～15mm)気体の最高流速付近では、渦周波数は1 kHz 前後に達する。渦流量計の変換部では口径、流体種に応じて、測定範囲の周波数帯域を選択するフィルタが必ず搭載されている。しかし外部振動ノイズの周波数が、この領域にはいってくると回路のフィルタではとりきれない。

渦放出にともなって渦発生体に働く応力のみ検出するように、いろいろな技術が開発されてはいるが、応力検出センサで外部振動ノイズを除くには限界がある。外部振動を除くために、液体に対しては超音波をもちいて交番渦を検出するタイプもいくつか

開発された（図 7.4）。

しかし、超音波送受波器をつかった渦検出では、気泡に弱いという超音波特有の欠点が妨げになる。渦発生体の上流部で気泡が発生していなくても、発生体の直後で静圧が低下し、気泡が急に増え超音波が散乱される。いまのところ、振動および気泡両者に対して十分強いというセンサはまだ現れていない。

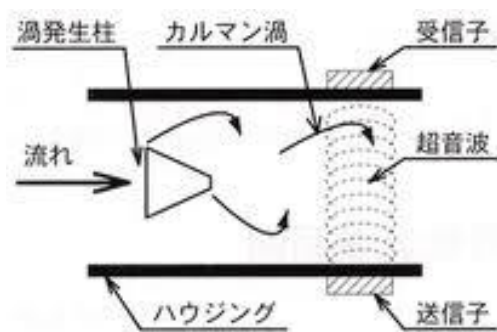


図 7.4 超音波による渦周波数の検出

(b) 気体、蒸気の下限流速

渦流量計を設置するためサイジング（流量に応じて適切な口径を選択すること）を行う際、気体・蒸気の下限流速が意外に高いことに注意したい。流体の密度を ρ 、流速を v とすると、応力検出センサが受ける力は ρv^2 に比例する。ライン圧力が低く、流体密度 ρ が小さい場合、流速 v がかなり高くないと、検出感度に達しないからである。流量計の仕様によっては、気体の測定範囲を、流速だけで定義するものもあるが、原理上、密度との兼ね合いで下限流速は決まる。

渦流量計は、通常、前後配管と同じ口径のものが選択されるが、気体・蒸気でそのサイズの下限流速よりさらに低い流速まで測定したいときには、口径を絞ったレジャーサタイプが用いられる（図 7.5）。口径を約 7 割に絞れば、下限流速は同じ口径のときの 5 割のところまで下げられる。しかし、レジャーサタイプを採用すると、i) 拡大部での圧力損失が生じる ii) フランジ接続タイプが多いのでかえってコストが上昇する というデメリットをとまなうので注意が必要である。



図 7.5 レジャーサタイプの渦流量計（横河電機）

(c) 応力腐食割れ

渦流量計は、高温、高圧の流体に用いられることが多い。渦発生体には、抗力や繰り返しの交番応力が常時はたらく。また渦発生体内に設けた振動センサに力を伝達するため、渦発生体の外筒の肉厚はそれほど厚くすることはできない。このため、応力集中部が繰り返し応力を受け、応力腐食割れのトラブルを起こすことがある。2体形のベーンで、交番揚力を受けるタイプでも、ベーンを支える部材に応力腐食割れの起きる可能性がある。

対策として、渦発生体の材質を変更するかまたは力を利用しない渦センサに変える方法がある。測定流体が蒸気の場合には、応力腐食割れの心配がないオリフィスに変更することも有効な対策のひとつとなる。

8. 容積流量計

8.1 原理と特徴

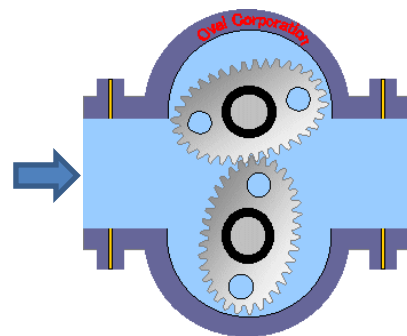
8.1.1 原理

容積流量計は、二つの円形ではない歯車によって流体を、一定体積の部屋に連続的に送り込み、歯車の回転数から流量を求める。流体は連続的に流れるものの、升（ます）をつかって体積を求める方法を流量計に応用したと考えられる。楕円形のギアをもつオーバルギア式の原理を図 8.1 に示す¹⁾。

一方の楕円の長径方向が流れ方向と並行になったとき、そのギアに回転力が加わり、二つのギアが回る。このギアが 1/4 回転したときに、今度は反対側のギアに回転力が加わる。上流側から圧力がかかっているため、これが連続してつぎつぎに流体が下流に送り出される。ギアと流量計内壁の間の体積を V とし、ギアの回転数を N とすると、 90° 回転のときに V だけ送り出されるので、流量は $4NV$ となる。

この流量計は、原理から積算体積流量計であるが、ギアの回転速度が瞬時流量に比例するため、瞬時流量計としても使われる。一定量ずつ移送されることから、PD メータ (Positive Displacement Meter) とも呼ばれる。

図 8.1 オーバルギア式の
容積流量計 (オーバル Web¹⁾ より)



8.1.2 特徴(長所と短所)

(a) 長所

- 1) 一定体積を直接測定するので、精度が良い。
- 2) 積算体積流量が直接得られる。
- 3) 流体の温度・圧力の影響はあまり受けない。
一定以上の粘度ならば、粘度の影響は受けない。
- 4) 流量計前後の直管長は不要である。

5) 外部エネルギーの供給がなくても測定できる。

(b) 短所

- 1) 流体中に固形物やごみがあると、ギアの間、ギアと容器壁の間にはさまって測定に支障をきたす。このため、上流側にストレーナの設置が必須である。
- 2) 高粘度流体のほうが、精度はよくなるが、一方圧力損失も大きくなる。
- 3) 低粘度流体では、隙間から流体が漏れやすくなるので、精度が悪くなる傾向がある。
- 4) 大流量では検出部が大きくなり、高価となる。
- 5) 流量計の下流側は脈動流となって流れ、大口径では振動や騒音も大きくなる。
- 6) 可動部の摩耗があるため、定期的な実流校正が必要となる。

8.2 構造と方式

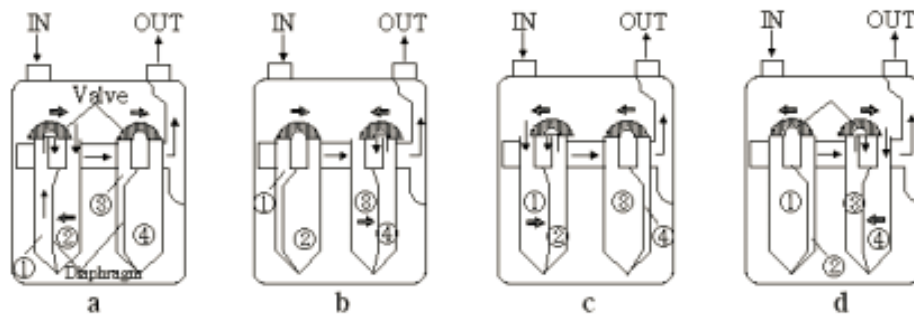
図 8.1 に示した楕円形（オーバル）のギアを回転させる方式を回転子式という。楕円ではなく、‘まゆ’の形の二つのギアを回転させるルーツギアも回転子式の一つである。液体用の容積流量計には、回転子式のほかに、スパイラル回転子式、ロータリーピストン式、4ピストン式などがある。いずれも、一定体積の部屋に流体が入り、回転とともに送り出される原理を応用している。

気体用容積流量計では、回転子式、膜式、湿式ドラム式の 3 種がある。膜式は家庭用ガスメータに使われている。原理を図 8.2 に示す²⁾。ガスメータの内部はまず 2 室に分かれ、それぞれの部屋は隔膜で仕切られた 4 つの計量室からなっている。

一つの計量室にガスが入ると隔膜が伸びるが、その隔膜に押された計量室からガスが送り出される。隔膜が限界まで伸びたとき、切換え弁が作動し、もう一方の 2 室の一つの計量室にガスが流入する。同時に、この計量室と隔膜をへだてた計量室からガスが排出される。このサイクルを繰り返して切換え弁の切換え回数をカウントする。計量室の体積と切換え回数をかければ、積算体積が求められる。

現在の家庭用ガスメータは、地震の振動を検知して作動する遮断弁や流量演算・通信のためのマイクロコンピュータが搭載されているものの、流量を測定するセンサ部は、長い間の実績がある膜式容積流量計の原理が使われている。

液体の中に気体を送り込む湿式ドラム式ガスメータとの対比で、膜式ガスメータを乾式ガスメータと呼ぶこともある。



① 室	流出	空	流入	満
② 室	流入	満	流出	空
③ 室	空	流入	満	流出
④ 室	満	流出	空	流入

図 8.2 膜式容積流量計（ガスメータ）の原理

8.3 起こりがちなトラブルとその対策技術

(a) 異物混入

液体用容積流量計でもっとも注意すべきは異物混入である。流量計の上流にストレーナを設置することが必須となる。ストレーナのフィルタ仕様に不備があると、流量計に支障をきたすことがある。いったん異物混入トラブルが発生すると流量計を配管から外し、メーカーに送っての点検と校正で長期間使えなくなる。このため、流量計を設置する区間はバイパス配管をつくっておくことも必須である。

ストレーナが目詰まりを避けるために、ストレーナの定期清掃も必要となる。容積流量計は精度が高いが、それを維持するには、定期校正はもちろん小さな異常も見逃さない日常のメンテナンスが必要であることに留意したい。

(b) 脈動流

容積流量計は下流側に脈動流を発生させるので、脈動流発生器でもある。下流側の脈動流が問題となる場合には、脈動流を除去する対策が必要になる。気液分離器のように、一定の大きさのタンクを介在させると、脈動流を除くことができる。

(c) 低粘度流体

容積流量計は粘性が低い流体ほど誤差が生じやすい。ギアの間隙から流体が漏れやすくなるためである。容積流量計は、可動部の潤滑を考慮して油系流体の測定に多く使用される。油系流体では、重油、軽油、ガソリンの順で粘度が低くなる。したがって、

ガソリンの場合には、指示流量が実際の流量にくらべて、マイナスの出力となる傾向がある。図 8.3 に器差と圧力損失の 1 例を示す。

‘まゆ’ 状歯車のルーツギア方式では、流体の粘性に合わせて回転子間のすきまを決めることができるため、低粘度流体への一つの対策となっている。粘度が高くなると圧力損失は増える。

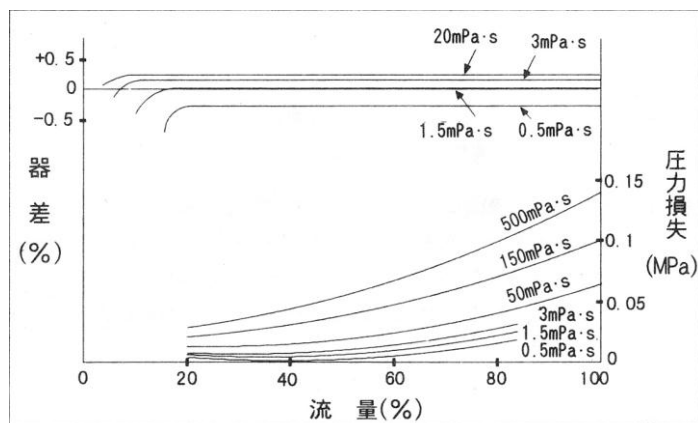


図 8.3 ルーツギア式容積流量計の器差と圧力損失 (トキコ Web より)

図 8.3 において、粘度 $0.5\text{mPa}\cdot\text{s}$ はガソリン、 $20\text{mPa}\cdot\text{s}$ は重油に相当する。また流量 100% は間欠最大流量を示す。

9. 面積流量計

9.1 原理と特徴

9.1.1 原理

面積流量計の原理は、垂直配管の一部をテーパ管とし、テーパ管のなかにフロートを浮かせ、下から上方に流れる流体によってフロートに働く抗力と、フロートの流体中の重力が釣り合う位置から、テーパ管を流れる流量を求める(図 9.1)¹⁾。オリフィスでは中央の孔を流体が通過し、孔径は固定されているが、面積流量計では、フロートの外側環状部分を流体が通り、その通過面積はテーパ管のために流量が大きいくほど大きくなる。原理的には絞りの面積が変化する可変オリフィスの差圧式流量計とも考えられる。

フロートの前後の差圧を Δp 、フロートの最大断面積を A_f とすると、

$$\Delta p \cdot A_f = V_f (\rho_f - \rho_o) g$$

の位置でフロートは釣り合う。ここで、 V_f はフロートの体積、 ρ_f 、 ρ_o はフロート、流体の密度、 g は重力加速度を表す。一定の流量がフロートの周りを流れるとき、フロート位置が下がると、環状の流路が狭くなり、差圧は大きくなり、フロート位置が上方に動くと、環状流路が広がって、差圧は小さくなるので、フロートの見かけの重量と釣り合う位置に、フロートはとどまる。

流通面積 A の絞りを通る体積流量 Q と差圧 Δp の関係は k を定数として、次式で表される。

$$Q = kA \sqrt{\Delta p / \rho_o}$$

二つの式から体積流量 Q は

$$Q = kA \sqrt{\frac{V_f (\rho_f - \rho_o) g}{A_f \cdot \rho_o}}$$

となる。

すなわち、流量 Q は流通面積 A に比例する。一方フロートの位置は流通面積 A に比例するので、テーパ管に目盛りを設けておけば、フロート位置から流量を求めることができる。

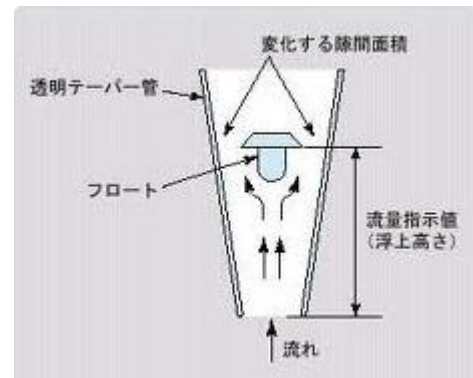


図 9.1 面積流量計の原理¹⁾

9. 1. 2 特徴(長所と短所)

(a) 長所

- 1) 現場指示計として使う場合には電源は不要である。
- 2) 気体、液体、蒸気のいずれにも測定可能である。
- 3) 直管長は不要である。
- 4) 差圧式流量計にくらべて流量測定範囲が広い。測定範囲は一般に最大値の 10~100%である。
- 5) 価格は他の流量計より一般に安い。
- 6) 圧力損失は比較的小さい。
- 7) 耐食性をもたせることが比較的容易である。

(b) 短所

- 1) 精度はあまり高くない。フルスケールの 2%~5%程度である。
- 2) 流量計設置の配管を垂直とする必要がある。
- 3) 固形物を含む流体には適していない。
- 4) 伝送タイプにすると比較的高価になる。

9. 2 構造と機能

9. 2. 1 テーパ管式

テーパ管式には、直接指示形と間接指示形がある。直接指示形は図 9.2 の構造例のように、透明なテーパ管を使用し、テーパ管に目盛りをつけて外部から流量を直読する。テーパ管の材質は、ガラス、透明アクリル、ポリカーボネイトが多い。半導体プロセスの超純水用では、フッ素樹脂を使うものもある。原理上、垂直取り付けであり、精度はフルスケールの±5%程度であるため、主に流量モニター用に使用される。



図 9.2 テーパ管式直接指示形 (東京計装)

間接指示形の構造例を図 9.3 に示す。この例では、テーパ管の材質は金属製であり、フロートの軸を上にもばし、磁気カップリングによって、フロートの位置を検出する。垂直取り付けは変わらないが、フロート部を通過したあと、流路は直角に曲げられて流出側フランジで接続される。間接指示形のバリエーションとして間接指示伝送形もあり、指示機能のほかに、電流信号を伝送することもできる。これら間接指示形、間接指示伝送形には、変換部をテーパ管の上部に置かず、テーパ管の側面に設けたタイプもある。

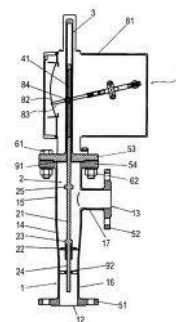


図 9.3 テーパ管式間接指示形

9.2.2 直管式

直管式は、フロートをテーパ状とし、流量が変わると絞り機構とフロート間の流通面積が変わり、同時にフロートの位置が上下する。そのフロート位置を、目盛りをつけた直管状の外筒から読み取る。この場合も直管はガラスのような透明な材質が使われる。

当然のことながら、直管式でも、テーパ管式でも、直接指示形は管の外からフロート位置を読むので、流体は透明でなければならない。不透明液体に対しては当然ながら間接指示形が用いられる。

9.3 起こりがちなトラブルとその対策技術

(a) 付着性流体

付着性流体へ面積流量計を適用することは一般に望ましくない。テーパ管の内側やフロートの側面に付着すると、測定に影響が出るばかりでなく、流量の読みができないことにもなる。また低流量でフロートが低い位置に保持されると、フロートの最低位置で固着する場合もある。付着性流体に対しては接液部材質としてガラス、フッ素樹脂などが適しているが、これらの材質によっても、耐付着性能には一定の限度がある。

(b) 固形物を含む流体(スラリー)、高粘度流体

仕様を確かめた上で、スラリー専用形を使うことができる。とくに摩耗性スラリーではフロートエッジが摩耗すると測定誤差をもたらすので注意が必要である。粘度 約 20 cP 程度の粘性流体まで測定できるが、さらに粘性の高い非ニュートン流体には適用できない。

(c) 熱衝撃

テーパ管または外筒直管がガラス製である場合には、流体による熱衝撃を避けなければならない。大抵は仕様で熱衝撃が許容される温度差が規定されている。熱衝撃が懸念されるときには、間接指示形で外筒が金属製（通常：ステンレス鋼）のものを選択する。

(d) フロート振動(ハンチング)

脈動流があると測定誤差をもたらす。面積流量計の脈動流特性は解析されているが、測定誤差は、脈動流の周波数、流体の性質、流量計の性質によって大きく異なる。脈動流によってフロートが振動するが、特定の周波数では共振が生じて流量計の破壊に至ることもある。対策としては、セパレータなどで脈動流を取り除く方法がある。

脈動流がない場合でもフロートがハンチングを起こすことがある。とくに上流側の圧力（1次圧）が小さい場合、フロートが平衡位置で静止せず行き過ぎてしまい、ハンチング現象が起きやすい。1次圧を上げるかフロート形状を変更するなどの対策がある。

10. その他の流量計

10.1 熱式流量計

流体に加熱した熱源を接触させると、流体によって熱エネルギー（熱量）が運ばれるため、周囲の温度分布は、流体が止まっている場合の分布から変化する。流体が運ぶ熱量は流体の定圧比熱、流体の上昇温度差、流体の質量流量に比例する。熱式流量計の原理は、流体の運ぶ熱量から、流体の質量流量を求めるものである。

熱式流量計の基本的な構成は、図 10.1 に示すように、管路に接触するヒータの上下流に温度センサを配置する。流れのないときには、両側の温度は等しいが、流れが発生すると、下流側の温度は上流側の温度より上昇する。流体の比熱などの条件を与えると、この温度差から質量流量が求められる。同じ構成で、上下流の温度差が一定になるように消費電力を与え、その消費電力から質量流量を求める方法がある。

前者を温度差測定法、後者を消費電力測定法とよぶが、測定技術の手法の分類で、前者が偏位法、後者は零位法を応用したものに相当する。測定対象となる流体は、気体の微小流量がほとんどであり、一部には液体の微小流量にも使われている。

この熱式流量計の用途として、半導体プロセスに数多く使われている。流量計単体ではなく、調節弁と制御部が一体となった「マスフローコントローラ」が普及している。気体の大流量で必須であった温度・圧力補正を必要とせず、直接、質量流量が求められ、コンパクトな計装によって、質量流量を制御することができる。

10.2 タービン流量計

羽根車を設け、流体の力によって羽根車を回転させるタイプの流量計をタービン流量計と呼ぶ。軸流羽根車式と接線流羽根車式に分かれるが、これら二つはそれぞれ、古くからある風車と水車の構造に相当する。軸流羽根車式の代表的な流量計は工業用タービンメータであり、接線流羽根車式の代表例は家庭で使われている水道メータである。

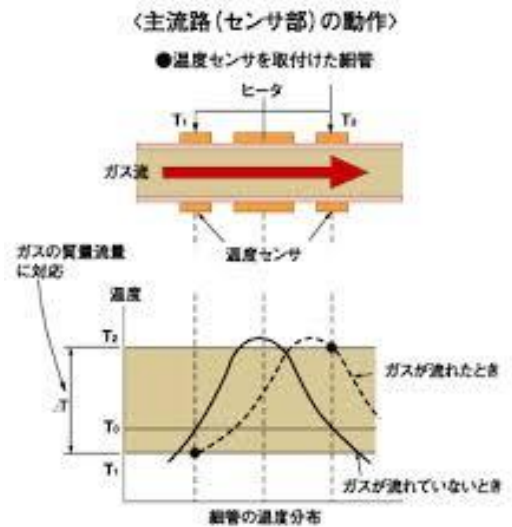


図 10.1 熱式質量流量計の原理

(a)工業用タービンメータ

工業用タービンメータは、主に石油精製・石油化学の分野で使われている高精度の流量計であり、その構造の一例を図 10.2 に示す。管路の上部に磁石とピックアップコイルがあり、流れによってロータ（回転子）のブレード（羽根、磁性体）が回転して磁界をよぎる際に、磁束密度が変化して、起電力変化の信号がピックアップコイルで捉えられる。この変化を増幅してパルス出力に変換する。一定体積あたりのパルス出力（例：pulse/L）が、この流量計のメータ定数(K factor)として目盛りづけられる。このパルス出力をそのまま積算計に取り込んだり、4-20mADC の電流出力に変えて瞬時流量計としても使うことができる。

高速に回転するロータの軸受部の摩耗を最小限にすることから、石油関連の潤滑性液体に多く使われるようになった。流体が流れるときに管軸方向にロータにかかる流体力（スラスト力）による摩耗をさけるために、ロータを下流側から押し戻すハイドロリックバランスという工夫が施されているものもある。精度は指示値の 0.2%～0.5%と非常に高い。大口径も開発されたが、口径は 10～100mm 程度が多い。

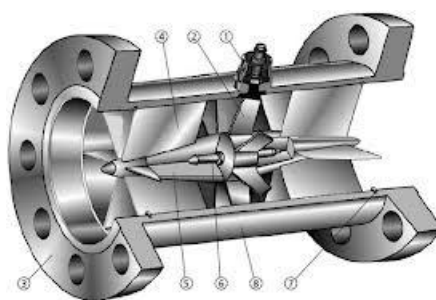


図 10.2 工業用タービンメータ

b)水道メータ

接線流羽根車式には単箱式と複箱式がある。単箱式、複箱式の構造図を図 10.3 に示す。単箱式のロータは鉛直軸のまわりに回転し、流入口からの水は直接羽根にあたる。一方複箱式では、二つの部屋をもうけ、一つの部屋の周囲の数か所の噴流口からの水が羽根にあたってロータを回転させる。羽根車の回転数のカウントには、磁気ピックアップ、光電式、光ファイバー式の 3つの方法がある。

家庭用の小サイズの水道メータはほとんど単箱式で磁気ピックアップのものが多く、また最近では遠隔から検針できる電子式水道メータが普及している。

ロータの回転部分があるために定期的に更新することや、メータの口径やタイプ別に、実流校正ポイントや許容精度も細かく規定されている。通常の流量範囲では指示値の±2%、最小流量付近の範囲では±5%などの精度となっている。

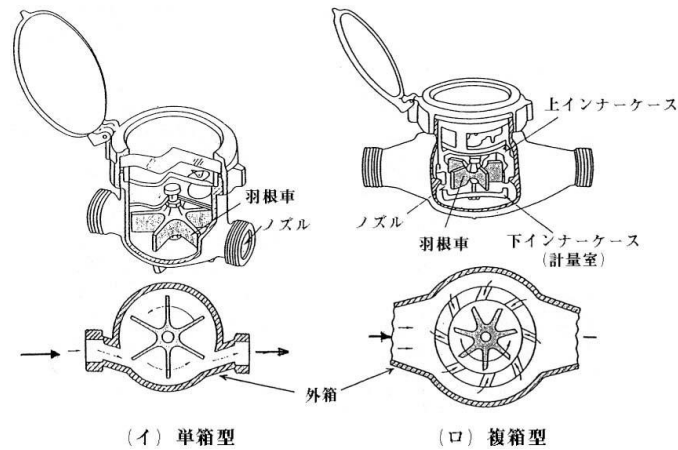


図 10.3 水道メータ（接線流羽根車式流量計）¹⁾

10.3 開水路流量計

これまで述べてきた流量計は各種のプロセスにおいて、すべて円形管路を満たして流れる流量計であった。工場の排水は通常、開水路で流される。また下水はヒューム管などの円形管路を、自由表面をもって流れる開水路の流れである。

開水路の流量計は、主に灌がい用水などの流量測定のために土木や水理学の分野で多く使われてきた。開水路の流れは、水路の形状、勾配、壁面粗度などの条件が複雑であり、流量測定は容易ではない。

大きく分けて、水路の一部に‘せき’またはフリューム（樋）を設け、その直前の水深から流量を求める方法と、水路の中の水流を流速センサによって流量を求める方法の二つがある。‘せき’は水路に設置したせき板を越えて流れる流れの水位から、流量を求める。切欠きの形状によって四角せき、三角せきなどがあるが、せき板の直前で流速が遅くなるため、堆積が生ずることがある。この堆積をなくすためにフリュームが開発されている。

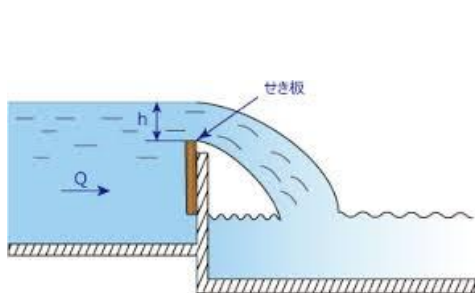


図 10.4 せきによる流量測定

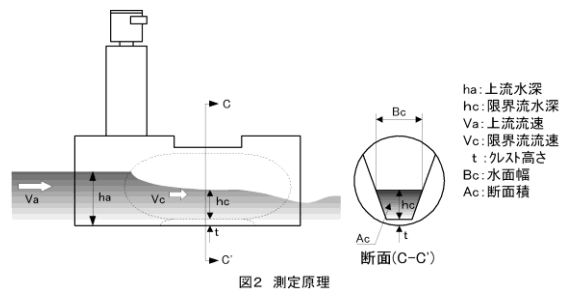


図 10.5 P-B フリュームによる流量測定²⁾

満水管路との対比で考えると、‘せき’はオリフィスに、フリュームはベンチュリ管に相当するといえる。矩形水路のパーシャル・フリューム、円形水路のパーマボラス・フリュームが普及している。

フリュームはもっとも絞った箇所での流れが速くなるが、この流れを「限界流」と呼び、下流側の水位の影響が上流に伝わらないことが条件となっている。このためフリュームの設置にあたっては勾配や上下流の水路幅などを規定された条件に適合する必要がある。

フリュームは、構造が管路のベンチュリ管に似ているけれども、測定技術からみると、管路の気体流量の標準供給に用いられている音速ノズル（臨界ノズルともいう）に対応すると考えられる。音速ノズルは、一定の条件で上流側の圧力のみから流量を求めることができる。自由表面の波が音波に相当し、上流側の水深が上流側圧力に相当すると考えると、いずれも下流側の影響が上流側に伝わらないことが、両者の測定法の要点となっている。

水流中に流速センサをおく方法として、古くはピトー管、プロペラ式のカレントメータなどが使われていたが、最近では超音波ドップラー式が多く、一定の水深における流速を測定する。圧力計または超音波レベル計で水路の水深を求め、水路の形状から流水断面積を求める。

開水路の流量は、測定流速を流水断面の平均流速に変換し、流水断面積に乗じて求める。平均流速への変換係数が、単純に水深の関数ではなく、水路の勾配や壁面粗度にも依存するので、一般に精度の高い測定は難しい。

円形管路の開水路では、電磁流量計のように磁界をかけて、水流の起電力から流量を求めるものも開発されている。この技術では、磁界形成の方法、水流に接液させる電極の構造など多くの工夫がなされているが、満水管路の電磁流量計ほどには普及していない。

11. 流量計の選択

11.1 タイプ別流量計と対象流体

これまで述べた流量計のタイプ毎に、測定に適した流体もあれば、避けた方がよい流体もある。また、測定すべき流体からみると、適用可能な流量計のタイプが多数ある場合もあるが、たいていは2~3種の中から選択するケースが多い。

表 11.1a, b), 表 11.2 は、タイプ別流量計と対象流体のマトリックスを液体、気体に分けて示す。この表では電磁流量計は導電性液体のみ対象とするので、気体のマトリックスから除かれている。また熱式質量流量計はほとんどガスを対象としているので、液体の表から除かれている。○印は適合していることを示す。

測定すべき流体について、適切な流量計タイプを選択する際には、まず適合しないまたは適合が難しい流量計タイプを個別に排除することから始める。ある流量計タイプで特殊な仕様にする対象流体を測定できるときには、候補として残しておく。2~3種のタイプが残った段階で、下記の項目ごとに検討をすすめていく。

この検討の段階で、もっとも重要なことは、流量計測の目的に適合したタイプ、方式、機種を選択することである。監視用なのか制御用なのかあるいは取引用なのか、それぞれの用途に要求される性能など種々の条件について検討を進める。設置条件や環境条件が満たされるときには、最終的には、経済的条件すなわちこの流量計測にかかるすべてのコストを見積もって、最適な流量計を選択することになる。

- ① 性能：精度（不確かさ）、圧力損失、再現性、直線性、外部出力、レンジアビリティ、応答時間
- ② 設置条件：垂直・水平、流れ方向、上下流の直管長、口径、作業スペース、配管振動、電気接続、付属機器・アクセサリ（ストレーナ（フィルタ）、ストレートナ（整流器）、セパレータ、温度・圧力センサなど）の設置、爆発性雰囲気、脈動流の影響、配管材質、サニタリ要件、電源要件
- ③ 環境条件：周囲温度・湿度、電氣的な干渉、圧力容器安全係数、腐食性雰囲気
- ④ 経済的条件：購入金額、設置費用、運転コスト、メンテナンスコスト、校正コスト、流量計寿命、部品のコストと調達、ポンプ能力と流量計による圧力損失

また上記の条件には含まれないが、過去のトラブル頻度、メンテナンス頻度などの実績

と信頼性は大きな評価基準となることは言うまでもない。

表 11.1a) タイプ別流量計と測定対象液体

		液体					
		一般の液体	液体小流量	液体大流量	水・大口径	高温液体	高粘性液体
		$\eta < 50\text{cp}(0.05\text{Pa}\cdot\text{s})$	$Q < 2\text{L}/\text{min}$	$Q > 1000\text{m}^3/\text{h}$	$D > 500\text{mm}$	$T > 200^\circ\text{C}$	$\eta > 50\text{cp}$
差圧式	オリフィス	○		○	○	○	○
	ベンチュリ管	○		○		○	○
	ノズル	○		○		○	○
	平均化ピトー管			○			
電磁流量計		○	○	○	○		○
コリオリ質量流量計		○					○
超音波流量計	伝搬時間差	○	○	○	○		
	ドップラー	○					
渦流量計		○				○	
容積流量計	オーバルギア	○	○				
面積流量計		○	○				
タービン		○		○		○	

表 11.1b) タイプ別流量計と測定対象液体

		液体		
		極低温液体	要サニタリー液体	腐食性液体
差圧式	オリフィス	○		○
	ベンチュリ管	○		○
	ノズル	○		○
	平均化ピトー管			
電磁流量計			○	○
コリオリ質量流量計			○	○
超音波流量計	伝搬時間差			
	ドップラー			○
渦流量計		○		○
容積流量計	オーバルギア			○
面積流量計			○	○
タービン		○		○

表 11.2 タイプ別流量計と測定対象気体

		気体					蒸気
		一般の気体	気体小流量	気体大流量	高温ガス	腐食性ガス	
			Q.<150m ³ /h	Q>5000m ³ /h	T>200℃		
差圧式	オリフィス	○		○	○	○	○
	ベンチュリ管	○				○	
	ノズル	○	○			○	○
	平均化ピトー管	○		○			○
コリオリ流量計					○		
超音波流量計	伝搬時間差	○	○	○			
	ドップラー					○	
渦流量計		○	○		○	○	
容積流量計	オーバルギア						
	ガス隔膜式	○	○				
面積流量計		○	○	○		○	
タービン		○	○	○	○	○	
熱式流量計		○	○				

11.2 タイプ別流量計と業種

表 11.3a, b)は主な産業の業種とタイプ別流量計のマトリクスを示す。業種によって扱う流体の種類がだいたい決まる。当然のことながら、石油関連の業種では油系の流体、上下水・鉄鋼・紙パルプのプロセスでは水系の流体が多い。化学・薬品・半導体の業種では腐食性の流体、食品の分野では高粘性流体や固形物を含むスラリーが多くなる。タイプ別流量計と対象流体・業種のマトリックスから、候補となる流量計タイプを絞り込んでゆく。

11.3 タイプ別流量計とコスト

11.1 の経済的条件に述べたように、最初の購入金額のほかに、さまざまなコストがかかる。流量計の購入費用にしても、多数台数を購入する場合、海外で調達する場合には変わってくる。タイプ毎の流量計購入コストを示す資料は少ないが、イギリス規格 BS7405-1991 には、液体、気体の流量を横軸として、縦軸を購入コストとするグラフ（図 11.4-未掲載）が載っている¹⁾。価格そのものの数値は、国や時代によって変化するので参考とならないが、流量計のタイプ毎の購入コストの相対比較は、現在においても大いに参考となる。

表 11.3a) タイプ別流量計と業種

		石油採 掘・鉱山	石油精製	石化・天 然ガス	化学	薬品	食品	鉄鋼	紙パル プ
差圧式	オリフィス	○	○	○	○			○	
	ベンチュリ管								○
	ノズル			○				○	
	平均化ピトー管		○	○	○			○	○
電磁流量計		○		○	○	○	○	○	○
コリオリ流量計			○	○	○	○	○		○
超音波流量計	伝搬時間差	○	○	○	○	○		○	
	ドップラー	○			○	○	○		○
渦流量計		○	○	○	○	○		○	○
容積流量計	オーバルギア		○	○	○	○	○	○	
	ガス隔膜			○					
面積流量計			○	○	○	○	○	○	○
タービン			○	○	○				
熱式質量流量計				○	○	○	○		
開水路流量計									○

表 11.3b) タイプ別流量計と業種

		半導体	上水	下水	電力・発電	電機・機械	ビル・空調	土木・建築
差圧式	オリフィス				○	○	○	○
	ベンチュリ管		○		○			○
	ノズル				○			
	平均化ピトー管		○		○		○	○
電磁流量計		○	○	○	○	○	○	○
コリオリ流量計		○	○			○		
超音波流量計	伝搬時間差	○	○		○			
	ドップラー			○	○			
渦流量計		○	○		○	○	○	○
容積流量計	オーバルギア							
	ガス隔膜						○	
面積流量計		○	○	○	○	○		
タービン					○			
熱式質量流量計		○						
開水路流量計				○				○

11.4 選択のポイント

既にいくつかのタイプの流量計を使用しているプラントでは、白紙の状態から流量計の測定原理・方式や各メーカーの特徴を調べて、流量計を選択することはほとんどないといってよい。今、使用しているタイプの流量計に問題が生じなければ、改めて流量計の最適な選択ということにはならない。問題の生じない状態が長く続けば続くほど、それだけその流量計の信頼性が高まることになり、流量計のタイプ変更はまったく考えられない。

現状のタイプや機種でトラブルが発生したり、メンテナンスに支障が生じたりした場合、つぎのような検討が行われる。

- (1) 他のタイプ（測定原理）の流量計を検討する。
- (2) 同じ測定原理ではあるが、他の測定方式の流量計を検討する。
- (3) 同じ測定原理、測定方式ではあるが、別の特徴をもつ他社メーカーの流量計を検討する。

(2) は、例えば超音波流量計で、伝搬時間差方式とドップラー方式の 2 種の間で検討するケースである。(3) については細かな特徴や仕様の比較に入るため、ここでは省略し、

(1) の場合で比較的良好におこる流量計選択の事例、あるいは選択に迷う事例をいくつか紹介したい。

① 蒸気：オリフィス（差圧式流量計）と渦流量計

従来、蒸気の流量測定には、オリフィスによる差圧式流量計によって、体積流量を求め、温度センサからの温度と圧力（静圧）を使って温圧補正を行い、質量流量を求めていた。温圧補正には、差圧伝送器とは別に流量演算器が必要であった。‘7章 渦流量計’で述べたように、渦流量計には、飽和蒸気を対象とする条件で、質量流量を出力するマルチバリアブルタイプも開発されている。飽和蒸気を前提とするボイラー周りの計装では、流量演算器の要らない渦流量計が、簡便でコストもかからない。

しかし、口径が大きくなると、オリフィスにくらべて、渦流量計本体のコストが上昇するため、渦流量計の有利さが減少する。コストカーブからみると、二つのタイプが拮抗するのは口径 150～200mm と考えられる。飽和蒸気の状態から外れる流体、また高温・高圧下での渦発生体の応力腐食割れや圧電素子の熱衝撃トラブルが懸念される場合には、オリフィスを選択するほうがよい。

② 導電性の粘性流体：電磁流量計とコリオリ流量計

一定の導電性をもつ粘性流体（液体）は、これまでほとんど電磁流量計で測定されていた。しかし、質量流量を高精度で測定できるだけでなく、密度、温度の出力も得られ

るコリオリ流量計が急速に普及している。もちろん導電性のない粘性流体については、いまのところコリオリ流量計しか有力なタイプは見当たらない。

コリオリ流量計は多くの長所をもっているが、口径が大きくなるとコストが急激に上昇する点が大きな欠点となっている。また食品分野では、導電性のあるなしに関係なく粘性流体が多いが、コリオリの 2 本管構造では、食品のサニタリ要件に適合しない。またコリオリ測定管の種々の形状のうち、堆積・付着が生じやすい構造やセルフドレインではない構造も食品プロセスに向いていない。

導電性の粘性液体という対象流体にかぎっていえば、口径 25mm 以下では、用途に応じて電磁とコリオリを比較検討することになるが、口径 40mm 以上では、電磁流量計のほうがコスト上、有利となる。

③ 大口径の上水・下水・農業用水・工業用水：電磁流量計と超音波流量計

300mm を超える大口径ラインの水流量の測定は、電磁流量計か超音波流量計が使われる。下水では、伝搬時間差方式の超音波が透過しないことがあるため、超音波流量計のうちドップラー方式が適用される。いわゆる‘きれいな水’の場合には、電磁流量計と超音波流量計の伝搬時間差方式のあいだの選択となる。

超音波流量計の検出部は、口径が大きくなってもコストが増えず、一方、電磁流量計の検出器のコストは大口径になるほど高くなる。電磁流量計がそれほど普及していない頃には、口径 1mm あたり 1 万円という時代もあった。電磁流量計も超音波流量計も変換器エレクトロニクスのコストは、時代を経るにしたがって下がってはいるが、検出器のメカニカル部分のコストはほとんど変わらない。したがって、超音波流量計と電磁流量計のイニシャルコストが拮抗する口径が 400mm 前後という事情は、現在になっても変わっていない。

しかしイニシャルコストの問題よりもむしろ、電磁流量計の精度が高く実流校正で保証されていること、流速分布の影響は超音波より小さいこと、一方、超音波流量計は、メーカーの校正精度のほかに設置場所における流速分布の影響を見積もると誤差がかなり大きくなること、選択の重要なポイントとなる。流速分布の影響を減らすために超音波の測線の数を増やした場合においても、この選択の指標は変わらない。

精度が 1 % 異なると仮定し、水の単価を考慮して数ヶ月～1 年間のコスト (損失コスト) を求めると、二つのタイプのあいだの差額がイニシャルコストを超すケースも稀ではない。現状では、取引用または高精度が重視される場合には電磁流量計が、比較的ラフな精度でよい場合、または既設管にしか設置できない場合には超音波流量計が推奨される。

④ 天然ガス：タービンとオリフィス（差圧式流量計）と超音波流量計

天然ガスの比較的低流量では、湿式ガスメータも使われるが、やや口径が大きい（25mm 以上）ラインで高精度を要求される箇所では、タービンメータが使用されてきた。またそれほど精度が要求されない箇所では、オリフィス+差圧伝送器が多く使用されている。しかしながら、最近では気体用の多測線超音波流量計の開発が進み、高精度を要求されるラインに対しても、タービンメータに代わって超音波流量計が使用されている。この傾向は天然ガスが普及している欧州で顕著である。

この3つのタイプではオリフィス+差圧伝送器がもっともコストは低く、口径が大きくなってもそれほど高くないが、タービンメータ、超音波流量計は大口徑ほど高コストになる。この気体用の超音波流量計は、液体用超音波流量計の検出器と異なり、送受波器の装着された管体（気体用でも接液タイプ〔wet type〕と呼ぶ）が口径に比例して大きくなるため、口径とともにコストは急激に上昇する。

この二つのタイプを比較すると、タービンメータは定期的な校正検査のコストがかかること、超音波流量計には可動部がないためメンテナンスコストがかからないこと、の理由から長期的には超音波流量計のほうが有利とされている。

⑤ 半導体プロセス（微小流量液体）：超音波流量計と渦流量計

半導体プロセスの気体は熱式質量流量計がほとんどであるが、微小流量の液体では、純水の用途が多いため、超音波流量計と渦流量計がよく使われている。流体へのコンタミネーションをさけるため、接液部はPFAのフッ素樹脂やPPS樹脂で形成されている。

渦流量計は、渦発生体から放出される渦列の力をベーン（受圧板）が受ける構造になっているため、下限流速（最小流量）を下げるのに限界がある。すなわち同じ微小流量でも、やや大きな流量（フルスケール：1L/min～150L/min）は渦流量計、非常に小さな流量（フルスケール：数10mL/min～数10L/min）には超音波流量計という使い分けが進んでいる。超音波流量計は流速ゼロ付近の出力も得られる。超音波流量計のほうが、変換器エレクトロニクスが複雑になるため、渦流量計よりはるかに高価である。

半導体用の超音波流量計は、コの字状の流路のなかを超音波パルスが流れに順方向、逆方向に透過するときの伝搬時間差から流速を求める。このタイプの超音波流量計は、純水のみではなく、研磨剤を含む腐食性液体（CMP流体）であっても、安定に測定ができる利点をもっている。半導体用の渦流量計の対象流体は、純水または冷却水に限られる。

12. 流量計を含むフィールド機器の新しい技術

12.1 マルチバリエブル

1990年代以降コリオリ流量計が普及した理由の一つに、流体の質量流量のみではなく、密度、温度も同時に測定できる利点が挙げられる。一つのセンサで、多くのプロセス量を把握できることは、イニシャルコストや配線コストの削減につながる。複数のプロセス量を検出するマルチバリエブルは、コリオリのほかに差圧式流量計や渦流量計に広がっている¹⁾。

差圧式流量計では、温度センサからの入力と温度・圧力補正の機能を差圧伝送器に取り込み、プロセス流体の質量流量や密度、温度を出力する。渦流量計では、温度センサを渦発生体内部に設けることにより、飽和蒸気の質量流量を算出して出力する。

マルチバリエブルが注目されるのは、計装が簡便になるメリットのほかに、つぎに述べるフィールドバス計装に適合したセンサであり、計装の高度化が実現できるからである。

12.2 フィールドバス計装とプロセス診断

同じ1990年代、それまでのアナログ伝送にかわって、双方向デジタル伝送のフィールドバスがようやく普及し始めた。1本の伝送路に多数のフィールド機器がつながり、上位機種とフィールド機器のあいだ、またフィールド機器同士のあいだで、双方向のデジタル通信が可能となった。デジタル通信により伝送されるデータの量は飛躍的に増大した。

また一つのフィールド機器で、質量流量、体積流量、密度、温度などが測定できるセンサでは、容易にプロセス変数を選ぶことができる（マルチセンシング機能）。もちろんフィールド全体の計装が変わるため、新規プラントまたは改装ユニットの計装から徐々に浸透したことはいうまでもない。

フィールドバス計装によって、フィールド機器の機能が、単一物理量を検出することにとどまらないで、センサとプロセスとのインターフェースの状態を診断できる機能まで拡張された。これまでは単一の流量または圧力を取り出すとき、その物理量に相当する信号のみを取り出し、信号以外のノイズをできるだけ除去することに努力がなされてきた。

しかし、プロセスインターフェースの状態変化は、ノイズの変化として表れてくることが次第にわかってきた。たとえば、3章で述べた差圧式流量計のオリフィス前後の圧力を検

出する差圧伝送器では、圧力の‘ゆらぎ’の大きさを高速に検知して、導圧管のつまりの程度を診断する²⁾。

従来、‘ゆらぎ’はノイズと考えられていたが、この‘ゆらぎ’そのものが、インターフェースである導圧管の状態を診断する情報を与えてくれる。この‘ゆらぎ’の検出には、ゆらぎの変化する周波数帯より高い周波数によるデジタルセンシングが必須となる。フィールドバスに対応するフィールド機器は、伝送機能のみではなく、高周波成分の検出・演算の機能も兼ねている点で、デジタル信号処理の長所を最大限に発揮させている。

差圧式流量計のほかに、電磁流量計の電極付着診断やコリオリ流量計の気泡・付着診断の開発が既になされている。電磁流量計の電極付着検知もプロセスインターフェースの状態診断にあたる。現在では、インターフェースの診断が多いが、さらにプロセスそのものに診断にまで入る例も出てきている。

渦流量計の渦発生体に働く力は、カルマン渦放出によって生ずる交番揚力のみではなく、配管振動や上流に設置されたポンプからの振動もノイズとして入ってくる。これらの高周波成分の検知から、プロセスの異常を早い段階から把握することができる。

プロセスまたはインターフェースの診断は、トラブルになる前にその予兆を検知することができるので、プラントを効率的かつ安定的に運転・操業するのに欠かせない機能となりつつある。

12.3 無線フィールド伝送

最近では、フィールドバスのつぎの世代の伝送として、無線フィールド伝送が注目されている。信頼性が重視されるプラントでは、一般の携帯電話のような爆発的普及はないものの、用途を選びながら、導入が検討され始めている。

無線の最大の特長は、配線コストのない点である。一方、無線の最大の懸念は、伝送の信頼性のない点である。したがってプラントのモニター用が最初に検討されている。プロセスのモニターのみではなく環境のモニターも含まれる。高所の反応塔など、アクセス困難な場所への設置も、無線センサに適している。無線伝送の信頼性を上げる技術や標準化の動向は他の文献³⁾にゆずり、ここではプロセス物理量との関連に触れてみたい。

温度、圧力（レベル）、流量の物理量の中では、まず温度と圧力が無線フィールド伝送に適していると思われる。1章に述べたようにほぼ熱平衡状態にある塔やパイプでの温度・圧力の変化速度は比較的遅く、空間的に複数のセンサを設置することができる。すなわち冗

長化しやすい物理量から無線化が検討される。

その意味で、流量センサの無線化は、温度・圧力センサでの信頼性と実績が確保されてからようやく検討が始まり、それも最初は流量監視の用途に限られると思われる。

13. 流量計開発の歴史

13.1 タイプ別流量計の開発の歴史

流量計開発の歴史をたどるには、それだけで1冊の本が必要であり、実際、好著も出版されている¹⁾。ここでは流量計開発の歴史をざっと眺め、その特徴のみを示したい。

古いタイプの流量計は300年以上前から使われているものもあるが、ほとんどのタイプは20世紀に開発され普及した。各タイプについて、最初に発表された年代と商業ベースの製品として普及がはじまった年代を図13.1に示す²⁾。

ピトー管、容積式は非常に古いが、現在もっとも多く使われているオリフィスは、1900年ごろから使われ始めた意外に新しいタイプの流量計である。

図13.1では、最初に測定原理が見出されてから実用化するまで、以前は約50年かかっていたが、20世紀に発明された新しいタイプでは、実用化まで約20年と商品になって普及するまでの時間が短くなっている。さらに、この図から流量計タイプの発展の方向が、つぎの特徴をもっていることがわかる。

- (1) メカニカルな測定原理のタイプから、エレクトロニクスの高比重のタイプへ移行している。
- (2) ‘2章 流量計の分類’で述べた「流体エネルギー抽出形」のタイプから「外部エネルギー付加形」のタイプへ移行している。

容積式、タービン、面積式は、流体の力を利用して、メカニカルな部品が動く構造をとっている。20世紀中頃になって開発された電磁、超音波、熱式、コリオリは流量計の外部から、磁界、超音波、熱、機械振動のエネルギーを与え、そのエネルギーと流体との変調成分から流速または流量を求める。

これらのタイプでは、流体の力を直接利用していない。流体に対して外部エネルギーを与えたり、変調成分から信号成分を取り出すには、電気的な駆動部や演算部を必要とするため、エレクトロニクスの高比重が高くなる。比較的新しい渦流量計は、渦発生体後流の渦列を利用しているので、「流体エネルギー抽出形」に分類されるが、渦列の周波数を配管振動ノイズから弁別して検出するには、高度なエレクトロニクスが欠かせない。

- (1) と (2) は流量計タイプの変遷の特徴を違う角度から述べている。これらの特徴

は、将来、開発される流量計タイプの方角を示唆しているとも考えられる。

すなわち、メカニカルな構造に関しては、可動部がなく、できるだけ単純な構造がのぞましく、メンテナンス負担のかからないものが要求される。流体との相互作用によって得られる信号成分は、デジタル処理のエレクトロニクスで変換・通信されるケースが多くなるであろう。

しかし、センシングの原理そのものに、本質的な弱点がある場合には、どんなに高度なエレクトロニクスやソフトウェアを駆使しても、その弱点や限界を乗り越えることができないことを理解しておきたい。

最初の発表	流量計タイプ	商品化開始
1700	容積式 ピトー管 せき	1850-1900
1750-1800	ベンチュリ管 タービン カレントメータ	1850-1900
1850	オリフィス板 ノズル	1900
1910	面積	1930
1930	電磁	1945
1930	超音波	1965
1950	渦	1965
1960	熱式 コリオリ式	1975-1980

図13.1 流量計開発の歴史

14. 参考文献、参考 Web-site

0 章

- 1) 日本計量機器工業連合会編：「流量計の実用ナビ（改訂版）」、工業技術社(2012)
- 2) 松山 裕：「実用流量測定」、(財) 省エネルギーセンター（1995）

1 章

- 1) 志賀浩二：「数学という学問 I」、ちくま学芸文庫（2011）

2 章

- 1) 松山 裕：「実用流量測定」、(財) 省エネルギーセンター、p2 (1995)

3 章

- 1) 小宮勤一：「流体量の測定」 p66, 朝倉書店（2005）
- 2) 伊藤章雄ほか：マルチバリアブル伝送器 EJX910, 横河技報、Vol.50, No.2, p65-68, (2006)
<http://www.yokogawa.co.jp/rd/pdf/tr/rd-tr-r05002-007.pdf>
- 3) 小宮勤一：「流体量の測定」 p134-140, 朝倉書店（2005）

4 章

- 1) JIS B7554-1997 電磁流量計による流量測定方法
- 2) http://www.aichitokei.co.jp/products/03_electromagnetic/index.html
- 3) http://www.toshiba.co.jp/sis/seigyofind/products/emf_himansui_tokutyou.htm

5 章

- 1) <http://www.youtube.com/watch?v=PvXgaDoZr1E>

6 章

- 1) 福原 聡：超音波による高精度流量計測、計測と制御、Vol.49, No.1, p14-19, (2010)
- 2) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2010/pr20101109/pr20101109.html

7 章

- 1) <http://www.youtube.com/watch?v=GmTmDM7jHzA>

8 章

- 1) <http://www.oval.co.jp/techinfo/keisoku/pd.html>
- 2) http://dspace.wul.waseda.ac.jp/dspace/bitstream/2065/445/4/Honbun-02_chapter01.pdf

9 章

- 1) <http://www.m-system.co.jp/reasai/pdf/r0202.pdf>

10 章

- 1) <http://www.keiryou-keisoku.co.jp/databank/sangyo/kenteik/suidou.htm>
- 2) http://keiso-cube.com/proguide/proguide_gesui02.php

11 章

- 1) BSI 7405 - I (1995) : Guide to the Selection of Flowmeters
(図 11.4 : 次回更新時に掲載予定)

12 章

- 1) 黒森健一 : 工業用流量計 - 最近の技術トピックス - , 計測と制御, Vol.42, No.12, p1015-1020 (2003)
- 2) 宮地宣夫ほか : 差圧伝送器の導圧管詰まり診断, 横河技報, Vol.48, No.1, p33-36, (2004)
<http://www.yokogawa.co.jp/rd/pdf/tr/rd-tr-r04801-008.pdf>
- 3) ミニ特集 計測と制御のための無線通信技術, 計測と制御, Vol.48, No.7 (2009)

13 章

- 1) 小川 胖 : 「流れわざのシルクロード」、日本工業出版 (2006)
- 2) F. C. Kinghorn: Flucome'88, September 1988, H.S. Stephens & Associates, p442-448