

「マイクロフローセンサ」を用いた流量計測

株式会社 山武

上運天 昭司
Shoji Kamiunten

キーワード

「マイクロフローセンサ」、流量計測、気体、質量流量、熱式、層流、乱流、遷移、整流、速度境界層、流速分布、フローチャンネル

当社で開発された「マイクロフロー[®]センサ」は、シリコンマイクロマシニング技術と薄膜技術により製作された、1辺が1.7mm、厚さ0.5mmの気体用熱式フローセンサである。高感度、高速応答、小型、低消費電力などの優れた特長を有するが、従来の流速センサにないそのユニークな形状や優れたポテンシャルを流量計測に活かすためには、いくつかの解決しなければならぬ大きな課題があった。ここでは、センサの配置や流れの整流などの研究開発の結果得られた、上流下流に直管部をほとんど必要とせずに、微小流量から大流量までの広い範囲において高精度の質量流量計測を行う方法について報告する。

Flow measurement using a "Microflow sensor"

The micro-flow sensor that has been developed by Yamatake Corp. is a thermal flow sensor for gas that has sides of 1.7 mm and a thickness of 0.5 mm. The sensor was fabricated through utilization of silicon micro-machining and thin film processing technologies. The sensor possesses outstanding features such as high sensitivity, high-speed response, small size, and low power consumption. However, there have been several important problems that must be solved in order to take advantage of the sensor's unique shape, which had not been seen in flow velocity sensors in the past, and fulfill its potential for flow measurement. This article describes a high-accurate mass flow measurement technology for a wide range of applications varying from ultra low flow rate to high flow rate without straight piping of upstream and downstream of flow meter using a "Microflow[®] sensor". This technology has been developed through the results of a study on the sensor positioning and flow rectification.

1. はじめに

地球環境保護のための種々の施策が推し進められている中で、CO₂排出量削減などを目的とした省エネルギーの必要性が一段と高まっており、その一つの手段として燃料、動力、熱交換の媒体および原料などとして使用されている種々の流体の流量管理がますます重要になっている。ところが、流量の計測は温度や圧力の計測に比べて手間やコストがかかり、測定対象や流量レンジなどの面で汎用性が少ないものが多い。さらに、流量計の選定や設置には専門の知識やノウハウが必要であるため、流量計測が満足に行われていないことも多く、高精度で簡便に流量計測を行いたいというニーズがますます増加している。

また、流量の計測方法としては一般的なものだけでも10種類以上のものがあるが、そのほとんどが体積流量を計測するものであり⁽¹⁾、真にエネルギー効率に関係する質量流量を計

測している例は意外に少ない。

そういう状況の中、当社で開発された「マイクロフローセンサ」を用いた流量計測方法は、熱式であるため気体の質量流量を直接計測できるものであり⁽²⁾、また、従来の流量計のように配管内を十分助走した後の発達した流れを計測する方式と異なり、流量計内に流れの整流機構を持ち、その直後の再現性の良い未発達な流れを管壁に設置した「マイクロフローセンサ」で計測する方式のため、上流下流に直管部をほとんど必要とせずに微小流量から大流量までの広い流量レンジにおいて高精度、高分解能、高速応答の計測を行うことができる⁽³⁾。

2. 配管内の流れ

2.1 配管内の層流と乱流

一般的に、配管内の流れは「レイノルズ数 Re が約2000

以下で層流, それ以上では乱流である」または「レイノルズ数 Re が約2000程度(臨界レイノルズ数)を超えると層流から乱流へ遷移する」というように簡単に説明される。レイノルズ数 Re とは, 流体の慣性力と粘性力の比率を表す無次元数であり, 式.1のように表わされる。レイノルズ数 Re が大きいほど, 流体の粘性力より慣性力の影響が大きいことを意味する。

$$Re = U \cdot d / \quad (\text{式. 1})$$

U : 平均流速 [m/s]

d : 代表寸法 [m] (円管の場合は直径)

($=\mu/\rho$): 動粘性係数 [m^2/s]

(たとえば, 300K, 大気圧の空気では $15.83 \times 10^{-6} [m^2/s]$)

μ : 粘性係数 [$Pa \cdot s$]

ρ : 密度 [kg/m^3]

また, 「層流とは乱れがなく流体の分子がそれぞれ流線に沿って層状に流れている流れであり, 乱流とは乱れが大きく流体の分子同士が互いに混ざり合いながら流れている流れである。そして, 管内の流速分布は層流では放物線状, 乱流ではフラットに近い形状である」というように説明される。

いずれも, 層流と乱流の特徴を短く表現した適当な説明と思われる。しかし, 「レイノルズ数 Re が約2000程度を超えると層流から乱流へ遷移する」と言うが, 配管の入り口から出口まで全体が同時に乱流に変わるのであろうか, それともどこかある部分から乱流に変わって行くのであろうかという疑問が起こる⁽⁴⁾。

2.2 入口(上流側)条件と助走距離

レイノルズ数 Re が数百でも, バルブや曲がり管の後では流れは乱れており層流ではない(現象1)。逆に, レイノルズ数 Re が数万でも, 流れが滑らかに入るような入り口形状をした配管に静止した流体を流入させた場合は, 入り口付近で流れは乱れておらず乱流ではない(現象2)。これは, どのようなことであろうか。

配管内の流れについて正しく理解するためには, 配管の入口(上流側)条件と助走距離について考慮する必要がある。上記の現象1の場合は流体の慣性力より粘性力の影響が強いため, 配管の直管部をある距離助走するにつれて, 乱れがおさまり流速分布が放物線状の完全な層流になる。また, 現象2の場合は流体の粘性力より慣性力の影響が強いため, 配管の直管部をある距離助走するにつれ, 乱れが発達して流速分布がフラットに近い形状の完全な乱流になる。乱流において流速分布がフラットに近い形状になるのは, 流体の粘性力の影響が弱いため, 流速の速い部分がより管壁に近づくことができるからである。

つまり, 先に述べた配管内の層流と乱流の一般的な説明

は, 配管の直管部をある距離助走した後の話である。図.1にレイノルズが行った実験を示す。流れが滑らかに入るような入り口形状をした色々な内径の円管に静止した水を流入させたときの流れの様子を, 入り口から注入した色素によって観察している。流速の低いうちは, 色素は流れに沿って線状に流れるが, 流速がある値を超えると色素は不規則に混ざってしまう。これは, 流れが層流から乱流に遷移したことを示している。この実験からも, 色素が乱れるところは入り口からある距離助走したところであることが分かる⁽⁵⁾。

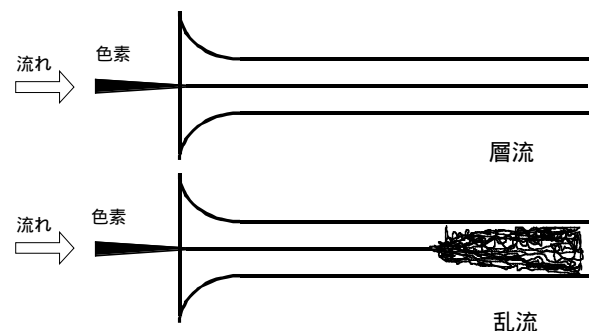


図.1 レイノルズの実験

なお, 円管内の層流または乱流の流速分布ができあがるまでの助走距離(助走区間)については表.1のようにいろいろな研究者から発表されている。層流の場合はレイノルズ数 Re の影響が大きく, たとえば $Re = 100$ の層流では配管直径の2.6倍~6.5倍程度, $Re = 1000$ (たとえば常温常圧の空気が直径20mmの配管を流速0.8m/s程度で流れる場合に相当)の層流では配管直径の26倍~65倍程度とされている。乱流の場合はレイノルズ数 Re の影響は少ないが, 数倍~100倍程度と研究者によって大きく値が異なる。いずれにしても, 一般的な配管内での流れにおける助走区間は大変長く, ばらつきも大きいことが分かる。

表.1 助走区間の距離

層流	
Boussinesq(理論, 1891)	$0.065Re \cdot D$
Shiller(理論, 1922)	$0.029Re \cdot D$
McComas(理論, 1967)	$0.0260Re \cdot D$
Bender(理論, 1969)	$0.0566Re \cdot D$
乱流	
Nikurads(実験)	$(25-40)D$
Kristen(実験, 1927)	$(50-100)D$
Latzko(理論, 1921)	$0.693Re^{1/4} \cdot D$
Boutus, Brighton(理論, 1968)	$(14.25 \log_{10} Re - 46.0)D$
Richman, Azad(理論, 実験, 1973)	$50D$

2.3 速度境界層の発達

図.2のように流れが滑らかに入るような入り口形状をした円管に静止した流体を流入させた直後は、円管の内壁面に速度境界層は存在せず、ほぼフラットな流速分布になっている。速度境界層とは、流体の粘性のために流体と管壁の間に生ずるせん断応力によってできる、主流よりも流速が遅くなっている部分のことである。しかし、助走する間に円管の内壁面に沿って層流境界層（流れの乱れが無い速度境界層）が発達し、レイノルズ数 Re が小さい場合はそのまま管内全体が層流境界層に覆われた層流の流速分布になり、レイノルズ数 Re が大きい場合は層流境界層の厚さがある限界値を超えると、乱流境界層（流れの乱れが大きい速度境界層）に遷移して乱流の流速分布へと変化して行く⁽⁶⁾。

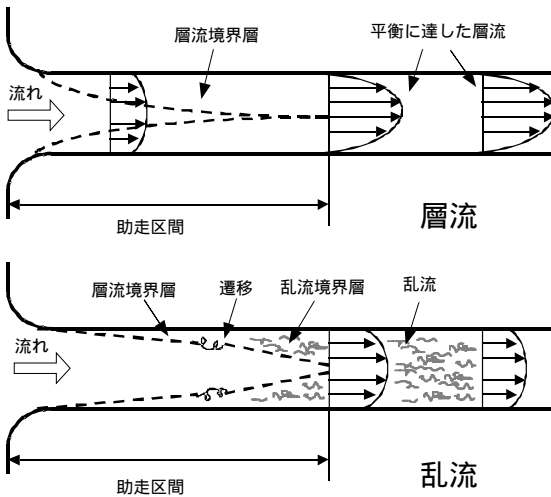


図.2 円管内の流れ

一般的に流量計測は、助走後のほぼ安定した層流か乱流のどちらかの流速分布において行うのが常識であり、オリフィス、渦式など多くの流量計は、上流下流に十分な直管部を設け、十分発達した乱流の流速分布において流量計測を行うことを前提として精度が保証されている⁽¹⁾。層流の流速分布で流量計測を行うものには、細長い管を束ねた層流式流量計（層流管）とバイパスキャピラリー式のマスフローコントローラがある。

通常、流量計測範囲の中で遷移が起こると、流量計の出力が不連続に大きく変化するので遷移点を避けなければならないが、遷移が起こる臨界レイノルズ数は配管の入口（上流側）条件によって大きく左右され、層流→乱流と乱流→層流の遷移では前者の方が高くヒステリシスを持つ⁽⁵⁾。また、レイノルズ数 Re は（式.1）に示すように、流速以外にも流体の密度や粘性係数の関数であるため、流体の温度、圧力、および種類によっても変動し、実際に遷移点を

見極めるのは困難である。

ところが、助走後の発達した流れではなく、流体を流入させた直後の乱れがほとんど無く、配管の内壁面に速度境界層がほとんど存在しないフラットな流速分布の部分に注目してみるとどうだろうか。この部分では、レイノルズ数 Re も層流も乱流も遷移も関係ない。つまり、このような、乱れがほとんど無く、速度境界層がほとんど無い部分を配管内または流量計内に再現性良く作り、この部分または層流境界層の発達過程初期で流量計測を行えば、レイノルズ数 Re 、層流、乱流、遷移に関係なく、広い流量計測範囲を持つ流量計を作ることができると予想される。

3. 質量流量

3.1 質量流量の計測

現在、世の中で使用されている流量計のほとんどは体積流量を計測するものであるが、下記のような分野では真に必要としている量を求めるため質量流量の計測を行うべきである。

1. 商取引
2. 燃焼制御
3. 医療ガスの投与
4. 流体を原料とした製造
5. 流体を動力とした機器
6. 空調制御

特に気体の場合は、図.3のように温度・圧力により体積が大きく変化するので、体積流量計の場合は計測時の温度・圧力を明確にしておかなければならない。

なお、質量流量の単位としては、本来は単位時間あたりの質量で示すべきものであるが、便宜上、基準状態（0℃, 1気圧）あるいは標準状態（たとえば、20℃, 1気圧）などの温度・圧力の条件を明記した上で、単位時間あたりの体積で示されることが多い。

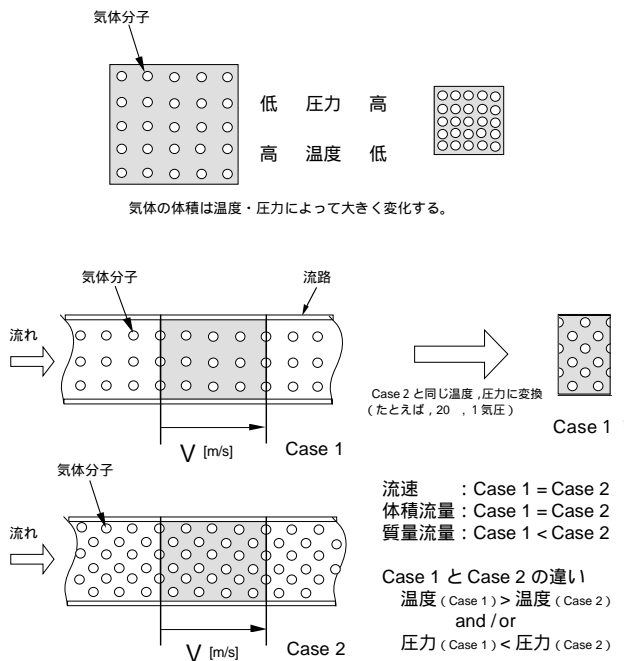


図.3 気体の体積流量と質量流量の違い

質量流量を直接計測できるものには、熱式、ソニックノズル、コリオリ式などがあるが、ソニックノズルは取扱いが難しく高価であり、コリオリ式は主に液体用で気体にはあまり適しておらず高価である。それに対し、熱式は気体の流量計測に関しては、取扱いが容易で比較的安価である。

3.2 熱式質量流量計

流れている流体の中に加熱された物体を接触させると、流体は物体から熱エネルギー（熱量）を奪って自分の温度は上昇する。このとき単位時間に移動する熱量は、流体の定圧比熱（物体の種類により異なる）×流体の上昇温度差×流体の質量流量に相当する。したがって、この関係より流体の質量流量を求めることができる⁽²⁾。なお、この関係が示すように流体の種類はあらかじめ分かっている必要がある。

また、熱式には、測定方法からの分類では、温度差測定法と消費電力測定法があり、構造からの分類では、パイパスキャピラリー（分流細管）加熱型、直接パイプ加熱型、挿入型などがある⁽⁷⁾。

4. 「マイクロフローセンサ」

4.1 構造

「マイクロフローセンサ」は、シリコンマイクロマシンング技術と薄膜技術により製作された、1辺が1.7mm、厚さ0.5mmの高感度、高速応答、小型、低消費電力などの優れた特長を有する気体用熱式フローセンサである。シリコ

ン基台中央のキャビティ上には、窒化シリコンでできた厚さ約 $1\ \mu\text{m}$ のダイアフラムが作られており、その中央にヒータ、ヒータの両側に温度センサが形成されている。また、シリコン基台上には周囲温度センサが形成されている。詳細は「マイクロフローセンサ」チップの製作技術について書かれた他の章を参照していただきたい。

ヒータ、温度センサおよび周囲温度センサは白金薄膜で形成されており、その抵抗値から温度を知ることができる。白金薄膜は、ポリシリコンやサーミスタなどと比較して極めて安定した測温抵抗体であり、温度に対する抵抗値変化の直線性も非常に良い。

また、非常にフラットで凹凸の少ないダイアフラムを実現しているため、流れはダイアフラム上をスムーズに通過し、流れのよどみが無いためダストなどの付着が少ない。

4.2 動作原理

「マイクロフローセンサ」の一般的な動作方法は、図.4 (a) のようなヒータ定温度差制御回路でヒータを周囲温度よりある一定温度高く制御し、図.4 (b) のようなセンサ出力回路で上流側・下流側温度センサの抵抗値差を電圧差として取り出すというものである。流れが無いときは、ヒータの上流・下流側に均一な温度分布ができているが、流れがあると上流側より下流側が高い温度分布になる⁽⁸⁾。このときの上流側・下流側温度センサの温度差（抵抗値差）によって生じる電圧差が、センサ上面を流れる気体の質量流速（流速 U × 密度 ρ と定義する）の関数となる。センサが流路内に設置されているときは、この質量流速に流路の断面積をかけると質量流量になる。

なお、ヒータの両端電圧を出力とすることにより、熱線流速計のように1素子型のフローセンサとして使用することも可能であり、より高流速までの計測が可能である。しかし、1素子型は外乱や製造のばらつきの影響をそのまま受けてしまうので、流速ゼロのときの出力変化が大きく、精度・再現性などの点で問題がある。それに対し、上記の方式では均一に作られた2つの温度センサの差動出力をとっているため、流速以外の外乱（温度・圧力変化、自然対流、電氣的ノイズなど）や製造のばらつき、および素子の経時変化の影響がキャンセルされ、流速ゼロのときの出力が安定し、非常に高精度で再現性の良い計測ができる。よって、1 mm/s という超低流速も検出可能である。これは、ヒータを周囲温度より60 高く制御したとき、上流側・下流側の温度センサにおいて、およそ0.003 の温度差に相当する。

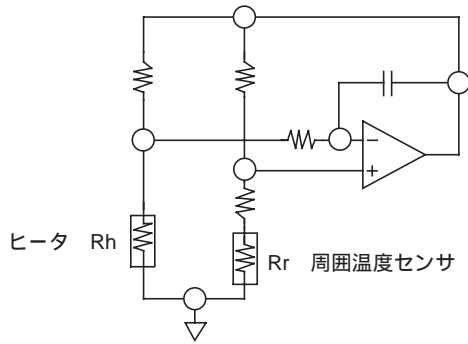


図.4 (a) ヒータ定温度差制御回路

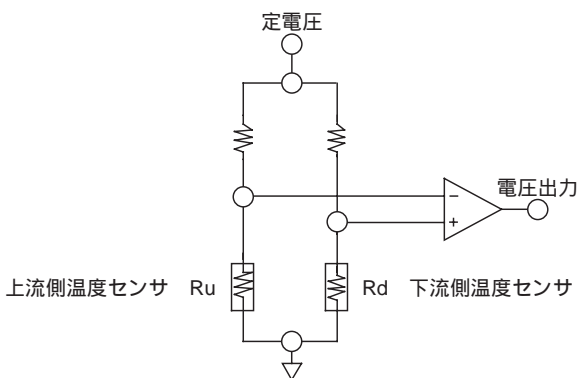


図.4 (b) センサ出力回路

基本的にセンサが平板状であり、流速検出部が流れと平行な上面にあるため、通常の熱線やサーミスタタイプの流速計のようにロッドの先端に取付けて流れの中に挿入しても、その部分の流速がそのままセンサにあたることはない。センサ上面における流速は気体の粘性によりゼロであるため、センサ上面には速度境界層、つまり流速勾配ができる。よって、厳密にはセンサ出力は、センサ上面近傍の温度分布ができていない部分の流速の関数であり、別の言い方をすると、図.5のようなセンサ上面における流速勾配の関数である。(また、気体の粘性係数と流速勾配の積である壁面せん断応力の関数であるということもできる)

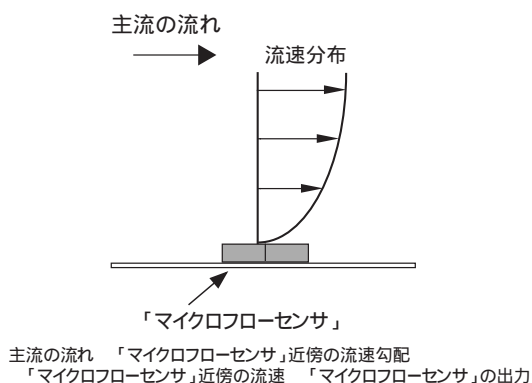


図.5 「マイクロフローセンサ」近傍の流れ

なお、現在はヒータとセンサの距離を離れた低流速タイプの「マイクロフローセンサ」と、ヒータとセンサを近接させた高流速タイプの「マイクロフローセンサ」を用途に応じて使い分けており、それぞれの代表的な特性を図.6に示す。また、水素とヘリウムは他の気体に比べて熱伝導率が極端に大きいため、ヒータ周りにできる温度分布の範囲が非常に狭くなり低流速タイプのセンサでは計測が困難であるため、水素とヘリウムの計測にはヒータとセンサを近接させた高流速タイプのセンサを使用する。

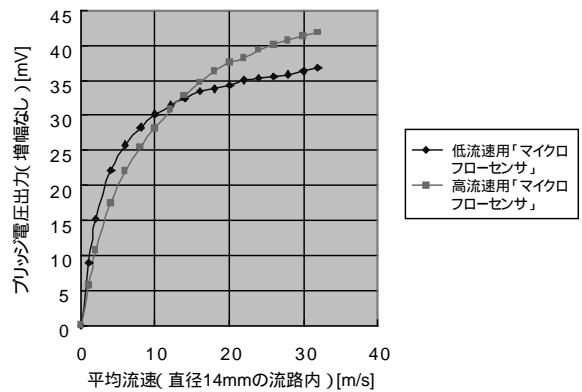


図.6 「マイクロフローセンサ」の流速特性(例)

また、「マイクロフローセンサ」の流れに対する応答速度については、流れ自体の流速分布形成に時間がかかるため、センサの応答速度のみを測定することは難しいが、カルマン渦発生体の後流に置かれた「マイクロフローセンサ」の周波数応答の測定や⁽⁹⁾、発達した壁面乱流での応答周波数の測定から500Hz程度までの追従が確認されている⁽¹⁰⁾。これらの結果から、応答速度は2ms程度であると言える。

なお、「マイクロフローセンサ」の特性や応答速度は動作回路によっても大きく変化するので、動作回路の設計も目的に応じて慎重に行う必要がある。

4.3 気体の種類による影響

「マイクロフローセンサ」の出力は、上述したようにセンサ上面を流れる気体の質量流速(流速 U × 密度 ρ と定義する)の関数である。しかし、熱式センサの宿命として厳密には流速 U と密度 ρ の他に、気体の定圧比熱 C_p と熱伝導率 λ の関数でもある。また、流速勾配に係るパラメータとして粘性係数 μ とセンサが設置されている部分の形状(代表寸法 L)の関数でもある。つまり、流速 U と密度 ρ だけが質量流速(質量流量)に関係する量であり、他は誤差要因である。

しかし、定圧比熱 C_p は気体の温度・圧力にほとんど無関係であり、気体の種類のみに関係する。熱伝導率 λ と粘性係数 μ は、気体の圧力にほとんど無関係であり、気体の種

類と温度のみに関係し、温度に対して正の特性を持つ⁽¹¹⁾。なお、ここでの圧力とは10kPa程度以下の真空領域は除く。また、センサが設置されている部分の代表寸法L(例えば、流路の直径やセンサの高さなど)は、一度決めてしまえば変化しないので無視できる。

通常の計測では、最初に気体の種類は決まっており、温度に関しては図.5(a)のような、周囲温度センサを含む回路に温特を持たせることでキャンセルできる。よって、「マイクロフローセンサ」で、気体の質量流速または質量流量の計測を行うことができる。

気体の種類による出力の違いは、大まかには $(\rho \cdot C_p) / \lambda$ の比較で予想できる。気体の密度 $\rho \times$ 定圧比熱 C_p は、気体の対流熱伝達の大きさ(つまり、流れによってどれだけ熱が奪われるか)を表わしている。また、熱伝導率 λ は名前のとおり気体の熱伝導の大きさ(つまり、流れのないとき気体の分子運動によってどれだけ熱が奪われるか)を表わしており、流れのないときヒータの周りにできる温度分布に関係している。なお、これは物質(気体)中での熱の伝わりやすさを表わす無次元数である、熱拡散率(温度伝導度) α の逆数になっている。

5. 流量計測方法

5.1 センサの配置

「マイクロフローセンサ」を用いて流量計測を行おうとするとき、まず、「マイクロフローセンサ」を流路(配管)内のどこに配置するかということを考えなければならない。いろいろな検討の結果、従来の流速センサにないそのユニークな形状(計測部が平面で流れに平行)や特性を使いこなし、その優れたポテンシャルを引き出すためには、以下の理由により「マイクロフローセンサ」を流路(配管)の内壁面に配置するのが最適であるという結論に至った。

- (1) 計測部が平面になっているセンサ形状のため、壁面への設置に適している。
- (2) 低流速で感度大・高分解能というセンサ特性のため、流速の遅い壁面に配置することにより広い流量計測範囲を獲得できる。
- (3) 流れに対向する部分がほとんど無くなるため、浮遊ダストなどの衝突が少なく信頼性が向上する。
- (4) センサをロッドなどで流路(配管)内へ保持する必要が無いため機械的に安定であり、センサの設置による流れの乱れも少ない。よって、再現性が良好であり、経時変化が少なく、圧力損失も少ない。

また、速度境界層が発達過程初期の、流れの乱れが非常に少ない層流境界層内に配置することが好ましい。図.7に

平板における乱流境界層への遷移の様子を参考例として示すが、流れの中に置かれた平板の先端から層流境界層が発達し、助走して行くところある条件で乱流境界層に遷移する⁽⁶⁾。乱流境界層内では、主流の数10%程度の流速変動が起こるので⁽¹⁰⁾、流量計測を行う場合はこの領域は避けるようにする。

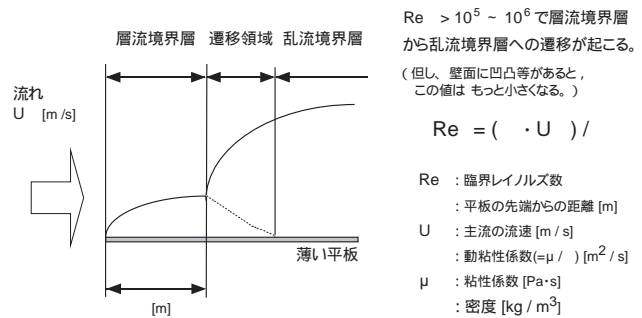


図.7 流体の流れに平行に置いた薄い平板における境界層の発達

5.2 流れの整流

「マイクロフローセンサ」は非常に高感度・高速応答で流速検出部のサイズが微小なため、他の流量計では問題にならないようなわずかな流れの乱れや微小な渦も忠実に検出してしまおう。通常の配管では、上流側にバルブ、曲がり管、段差などの乱れの発生源が必ずと言って良いほど存在するため、「マイクロフローセンサ」をそのまま配管に取付けても出力が乱れ過ぎて信号処理が困難であり、再現性も悪くなる。よって、流れの中の渦を細かくするための確実に繊細な整流機構が必要である。また、基本的に流路内の1点での計測のため、流速分布の偏りを矯正し再現性のある均一な流速分布を作る必要がある。これらの要求は、複数の金網を間隔を空けて配置することで達成でき⁽¹²⁾⁽¹³⁾、メッシュサイズや配置間隔および枚数は、流路径や要求精度および許容圧力損失などから決められる。

また、上流側の曲がり管などから発生する旋回流が問題になる場合は、流路を薄い板や細管で仕切ったハニカムで取り除くことができる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。しかし、ハニカムの下流側では各セルから流出した噴流により流れが大きく乱れる(大きい渦が発生する)ので、必ずハニカム下流側の少し離れたところに金網を配置して乱れを抑える(渦を細かくする)必要がある。

上記の整流機構により、「マイクロフローセンサ」の流量に無関係な出力変動を無視できる程度の乱れがほとんど無い流れを作ることができる。そして、2.3項で述べた、レイノルズ数 Re も層流も乱流も遷移も関係ない、流路の内壁面にほとんど速度境界層が存在しないフラットな流速分布の部分は、上述した金網か、理想的には流れの条件に合わせて設計された絞り(ノズルまたは縮流部)⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾によって得ることができる。金網の場合は、その下流側に少

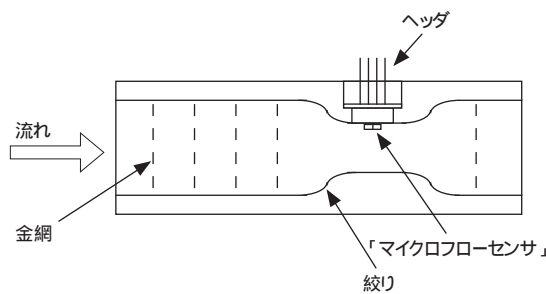
し離れたところ(各網目からの噴流の混合が完了したところ)絞りの場合は絞りの直後か途中にセンサを配置する。

5.3 フローチャンネル(流路)

「マイクロフローセンサ」を流量計として構成するためには、その目的に合わせた以下の機能を持つフローチャンネル(流路)が必要である。

- (1) 測定する気体の流れ方向と「マイクロフローセンサ」の計測方向を合わせて、「マイクロフローセンサ」を機械的に固定する。
- (2) 流量計測範囲に応じて流路の直径(断面積)を決め、流路内の平均流速を「マイクロフローセンサ」の流速計測範囲に合わせる。
- (3) 流れを整流(流れの乱れを小さくし、流速分布の偏りを矯正)する。
- (4) 「マイクロフローセンサ」の直前で流路内壁面の速度境界層を排除し、流速分布をフラットに近づけ、センサが常に層流境界層内(境界層発達初期段階)に位置するようにする。

上述したような、用途に合わせたフローチャンネルに「マイクロフローセンサ」を設置することにより、流路内の平均流速、流路経、整流機構、流体の種類などによって決まるセンサ近傍の流速勾配が、非常に高い再現性で流量の関数になる。よって、流量とセンサ出力の関係を調べておくことにより、上流・下流側配管の条件および配管内の流れの遷移(層流 乱流)に関係なく高精度で広いレンジアピリティの流量計測が可能になる。フローチャンネルの例を、図.8に示す。



間隔を開けて配置した複数(3~5)枚の金網 + 絞り + 絞り直後に「マイクロフローセンサ」

図.8 フローチャンネル

流路の口径が大きく流速分布を矯正しきれない場合は、流路内に複数個の「マイクロフローセンサ」を設置し、出力を平均化することで精度を向上させることができる⁽³⁾。また、流路内に直径の違う(平均流速の違う)部分を作り、それぞれに「マイクロフローセンサ」を設置すれば、さらに測定レンジを広げることができる⁽³⁾。なお、流量が非常に少なく、流路の径が小さい場合(3 mm程度以下)は、

流れはほとんど乱れていないので、整流機構は不要である。

5.4 他の計測方法

以上、「マイクロフローセンサ」を用いた標準的な流量計測方法について説明したが、それに限らず他にもカルマン渦方式、多孔オリフィス分流式、慣性集塵機構付きの微小流量用⁽¹⁵⁾など、「マイクロフローセンサ」の特長を活かしたユニークなものが開発され実用化されている。詳細については、他の章を参照していただきたい。

6. おわりに

「マイクロフローセンサ」を用いて流量を計測する方法、およびそれに関連した配管内の流れや質量流量について説明した。高性能で使いやすい流量計を少ない材料および低コストで作製し、省エネルギーに貢献することは当社の使命の一つであると考えます。流量レンジの拡大により、今までレンジの異なる2台の流量計が必要だったところを1台に減らすことも大きな意味がある。また、現在満足に計測が行われていない脈動流計測への応用も期待されており⁽¹⁶⁾、今後も「マイクロフローセンサ」の優れた特長を活かして市場のニーズに合ったユニークで高性能な流量計が開発されることと思われる。

7. 謝辞

早稲田大学大田英輔教授ならびに慶応義塾大学前田昌信教授、菱田公一教授には、「マイクロフローセンサ」の開発初期に大変貴重なご指導を頂いた。また、東京理科大学本阿弥眞治教授には、開発当初より現在に至るまで幅広いご指導をいただいている。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 川田裕郎 ほか:流量計測ハンドブック,日刊工業新聞社 P7~P11
- (2) 松山裕:実用流量測定,省エネルギーセンター P145~P154
- (3) 稲垣 ほか:医療ガス供給ライン用流量計(MGM)の開発,山武 Savemation Review, Vol.15 P44~P51,1997
- (4) 佐藤浩:乱流,共立出版 P13~P16
- (5) 植松時雄:水力学(第2版)産業図書 P52~P56
- (6) 白倉昌明 大橋秀雄:流体力学(2),コロナ社 P127~139
- (7) 日本計量機器工業連合会編:流量計測 A to Z,工業技術社 P172~P180
- (8) 本阿弥 ほか:マイクロデバイス周りの熱流動場,第49回理論応用力学講演会講演論文集 2000
- (9) 喜多野:「マイクロフローセンサ」による壁面せん断応力測定システムの開発,東京理科大学工学部機械工学科卒業論文,1994
- (10) 木下 ほか:マイクロ熱膜せん断応力センサの特性評価,日本流体力学会年会講演論文集 P179~P180,1999

- (11) 伝熱工学資料改訂第4版：日本機械学会 ,P328～P365
- (12) 田中：絞り流量計の問題点(3) 整流装置に対する考え方 ,機械の研究 ,第23巻 ,第1号 ,P247～P254 ,1971
- (13) 日本機械学会編：(新版)機械工学便覧 A5 流体工学 ,P85～P86 ,P182
- (14) 実験流体力学調査研究分科会成果報告書：日本機械学会 ,P37～P40 ,1996
- (15) 青島 ほか：エアフローセンサ開発における高精度センサ設計技術 ,山武 Savemation Review ,Vol.14 ,No.1 ,P2～P7 ,1996
- (16) 川嶋 ほか：非定常流発生器を用いた気体用マスフローメータの特性実験 ,第16回流体計測シンポジウム ,P47～P56 ,1999

著者所属

研究開発本部 上運天 昭司