

圧力の測定

工学院大学 飯田 明由

1.はじめに

専門課程の初期に学習する流体力学や流れ学の講義に使われるテキストのほとんどは、静水力学(パスカルの定理や静水圧及び大気圧)から始まり、その後、ベルヌーイの定理について説明するものが多い。ベルヌーイの定理の応用としてトリチェリの定理を説明し、動圧と静圧の関係からピトー管について解説する。したがって、機械系の学生のほとんどは圧力の基礎について大学で学習し、その概念については理解していると思われる。(本講習における福西先生の概論には日常生活において我々が圧力をどんな風実感として捉えているか、わかりやすく説明されているので、そちらも参照してください。)

しかし、実際の機械の内部や流れ場の圧力の“測定”については、学生実験で体験するか、研究室で実際に卒論等につくまでは、経験することが少ないと思われる。特に学生時代に他分野を専攻していて、企業に入ってから流体関連の業務についたような場合は、実際にどのように計測したらよいか悩む場合も多い。圧力計測の原理は比較的簡単なものが多いが、実際に計測する場合は、測定対象物毎に固有の問題が生じるため、いわゆる測定のノウハウを習得しなくてはならない。

本講習では、圧力測定の基礎と実際の測定における問題点を示すとともに、最新の圧力測定手法についても紹介する。

2.圧力の計測

流体に作用する力は、距離を隔てて作用する Body Force (質量に比例)、面を介して作用する Surface Force (表面積に比例)、液体と気体・固体の界面に作用する Surface Tension (長さに比例)に分けられる。圧力は Surface Force であり、面に垂直に作用する成分である。面に垂直に作用する成分であることから壁面の圧力を測定することが容易な反面、空間中の圧力を測るには、測定空間に仮想的な要素を考え、その面に垂直に作用する単位面積あたりの力を測定する必要がある。このため、流れ場における圧力(特に静圧)を測定することは極めて難しい。本講習では主に静圧測定を中心に解説を行うが、まずはじめに、全圧と動圧について説明する。

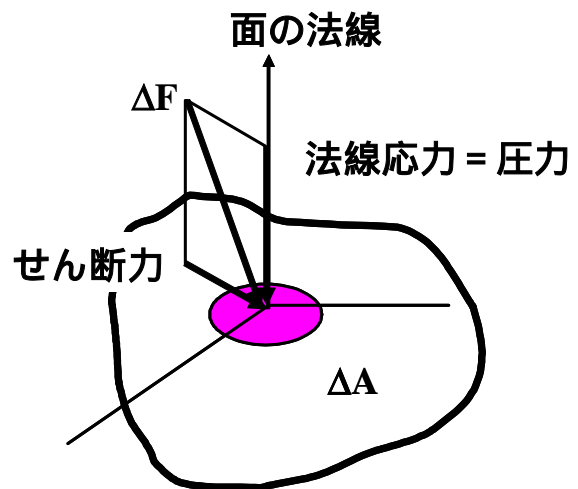


図 1. 流体に作用する Surface Force

2.1 全圧及び動圧計測 一般に(内部エネルギーを考慮しない場合)、ベルヌーイの定理が示すように流体中の力学的エネルギーは圧力や運動エネルギー、位置エネルギーなどの様々な形態をとる。気体の場合、一般に位置のエネルギーは無視できることから、圧力を使ったベルヌーイの式により、

$$P_t = \frac{\rho u^2}{2} + P_o \quad \text{全圧} = \text{動圧} + \text{静圧} \quad (1)$$

という形で表すことができる。式(1)より、動圧については速度を測定することによって求めることができるので、圧力計測としては、全圧計測と静圧計測が中心になる。また、最もよく知られた流速測定装置であるピトー管は全圧と静圧を測定し、両者の差から動圧を求めている。したがって、ここでは全圧と静圧について取り上げる。

全圧計測の場合、気流中に細いパイプ等で作られた全圧管(図2)を挿入してその前面のよどみ点の圧力として計測される。この際、圧力孔が流れの方向を向いていることが重要であり、流れに対して傾いている場合には、測定に誤差が生じる。流れ場の方向が変化する場合や、せん断の大きな流れ場の場合は、外筒つきのものを用いると誤差が小さい。誤差を小さくするには管径を小さくすればよいが、あまり小さいと粘性の影響を受け、注意が必要である(圧力孔の半径に基づくレイノルズ数が30以下の場合は粘性の影響が生じる)。

境界層のように速度勾配を持つ流れ場の全圧を測定する場合、速度勾配により全圧管の幾何学的な中心と、実際に測定している位置がずれてしまう。このため、速度勾配があるような場合は、先端が速度勾配方向につぶれた全圧管(プレストン管)を使用する。

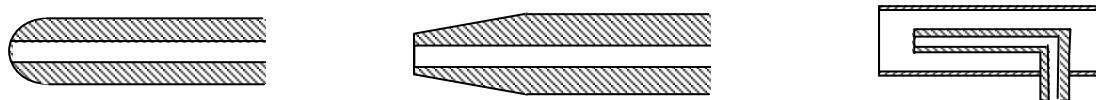


図2. 全圧管の形状の一例

2.2 静圧計測 静圧を測定するには、壁面に小さな孔を開けて壁面に垂直に作用する単位面積あたりの流体力を求める必要がある。一般的な空気流の場合、1mm以下の小孔にすることが多く、0.8mmや0.5mm程度の孔を開けて測定する。測定孔は面に対して垂直に開けられていること、バリなどが無いように仕上げる必要がある。

静圧孔には、一般にテフロン・チューブやビニールチューブを接続し、このチューブによってマノメータや圧力変換器に接続される。チューブの長さが極端に長い場合や、管径が小さい場合、圧力が平衡状態に達するまでに長い時間を要するため、注意が必要である。実験装置の配置の問題からチューブの長さは様々な制約を受けるが、極力短くしたほうが良い。たとえば、著者らの実験では、内径1mm、長さ2mの圧力チューブを使用して圧力を計測した場合、圧力計の指示値が一定値に落ち着くまでにおよそ3分ほどの時間が必要であった。したがって、実験条件を変えてから測定を行うまでに(安全をみて)5分ほどのインターバルを置いて測定を行っている。圧力が一定になるまで待って実験すると、その間に気流温度や実験条件が時間とともに変化してしまうこともあるので、チューブの長さはできるだけ短くしたほうが良い。しかし、製品開発などでは、装置と計測室の間が離れていることも多く、事前に圧力が一定になるまでどの程度の時間が必要か確認し、あまり時間がかかるような場合で複数の測定点がある場合は、圧力計を複数用意するなどの配慮が必要である。

図3はNACA0012翼に40個の静圧孔を開けた翼面静圧測定用のモデルである。各静圧孔は内径0.4mmのステンレスチューブによってモデル外部に引き出され、ビニールチューブを介して圧力センサに接続されている。先に示したように圧力の制定時間に3分以上かかるため、図4に示すような多点圧力センサによって壁面静圧を一度に測定した。多点圧力計測を行う場合、測定時間や測定時の実験条件の変動などを考慮するこのようなセンサを利用することが望ましい。計測に使用した半導体式圧力センサは比較的低価格(1ch 2万円以下)なので自作すれば比較的安価に多点圧力計を揃えることができる。使用したセンサはアンプ内蔵型のため、電源とケースだけあれば簡単に作成可能である。

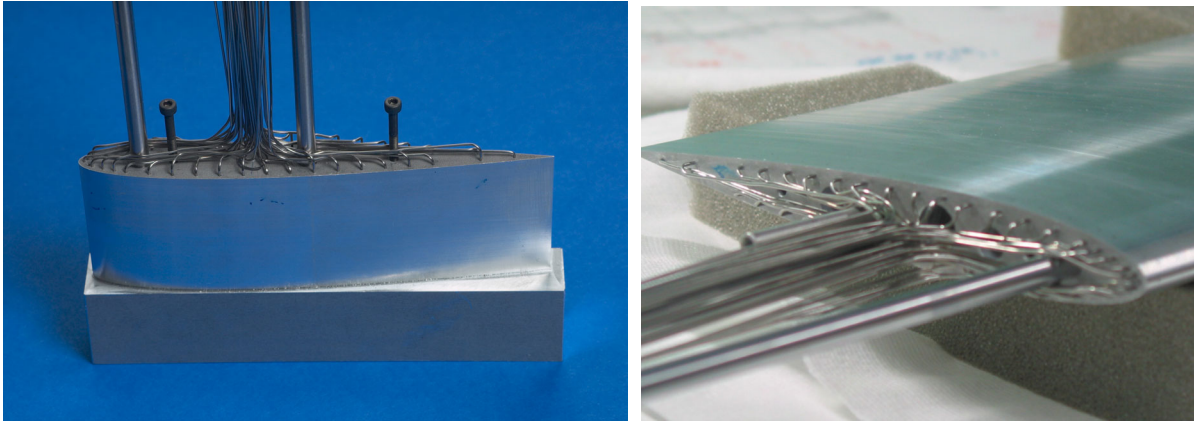


図 3 . 静圧孔および静圧管を埋め込んだ翼モデル (NACA0012)

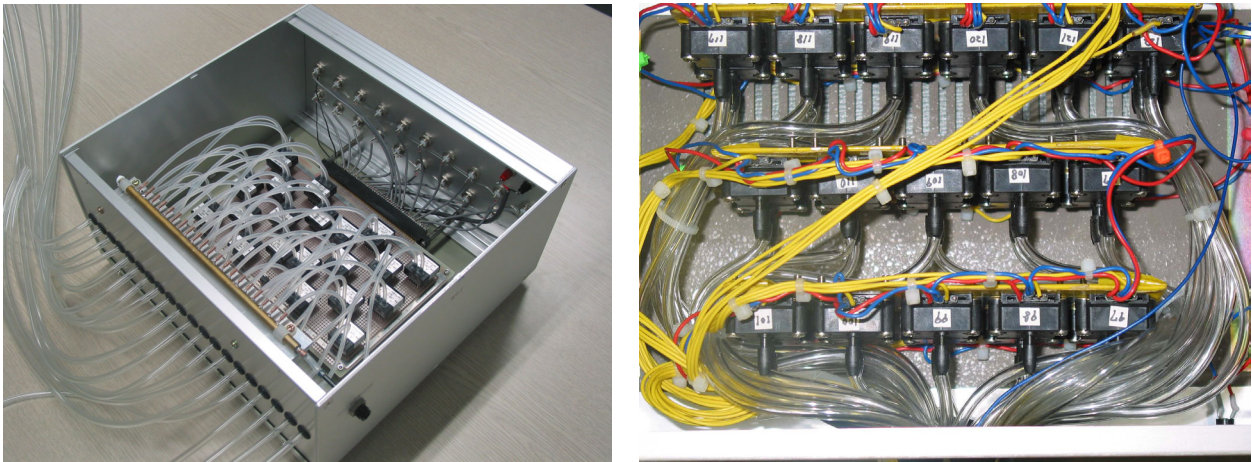


図 4 . 半導体式多点圧力センサ (東京大学生産技術研究所 加藤研究室)

図 5 に示すような圧力校正器を利用して半導体圧力センサとリファレンス用の圧力計を加圧して両者の出力を比較した. 図 6 に測定結果の一例を示す. 校正出力に対しセンサ出力が比例していることがわかる. このときの測定誤差は 1%以内であった. 半導体圧力センサは低価格なので多点圧力を測定するのに適しているが出力特性が温度や振動に依存するため, 定期的な校正が必要である. 校正に市販の圧力校正装置を利用する方法もあるが, 図に示すような比較的簡単な装置でも可能であり, 実験前に必ず校正を行うことを薦める.

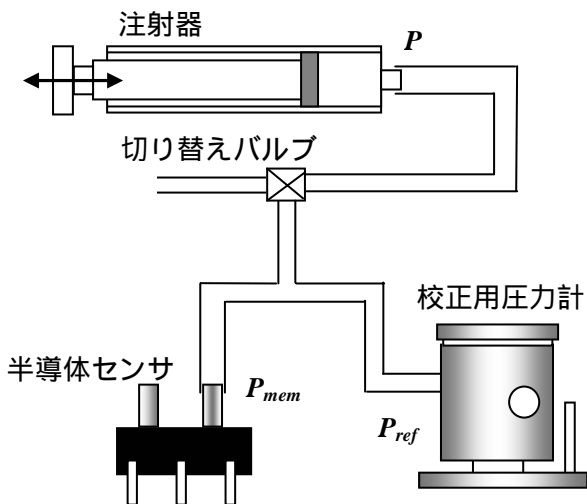


図 5 . 校正装置

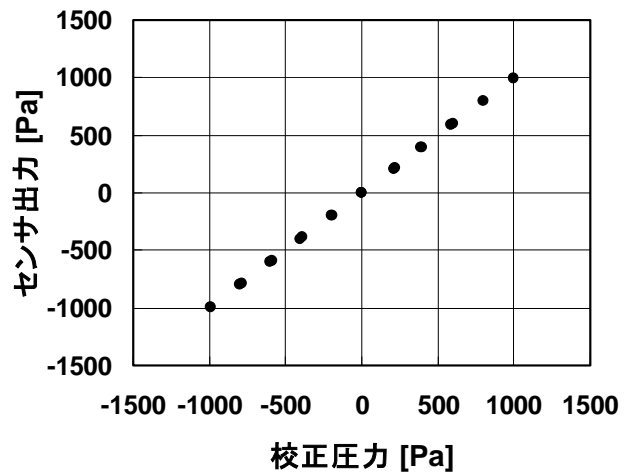


図 6 . 圧力センサの構成結果

図7は前述の2次元翼を用いて、迎角6度及び12度における圧力係数 C_p を測定した結果である。図7は C_p を元に、翼に働く揚力測定結果である。失速前の状態ではレイノルズ数に依存せずにはほぼ同じ C_L - α 特性を示すことがわかる。圧力の測定に時間がかかると、実験の再現性に問題が生じることもあるので、先に示したような多点圧力センサを作成することが望ましい。

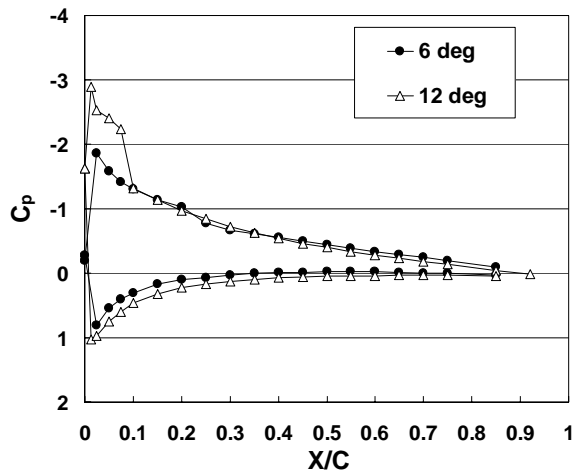


図7. 圧力係数の測定結果

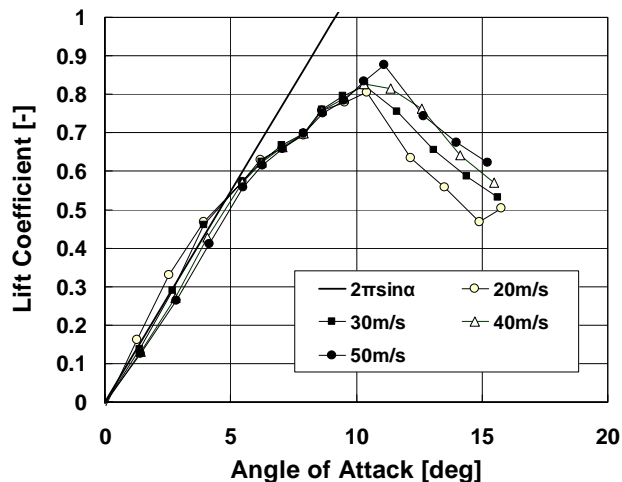


図8. 静圧測定結果から求めた C_L -特性

実験に使用した2次元翼には、壁面静圧変動測定用の半導体圧力センサも埋め込まれている。Kulite社製の半導体圧力センサは前述の壁面静圧測定用に使用したものに比べて、高い周波数まで測定することが可能であり、センサも小型であるため、図9に示すように翼内部に埋め込むことが可能である(ただし、若干高価であり、アンプを含めると1chあたり40万円前後の費用が必要である)。

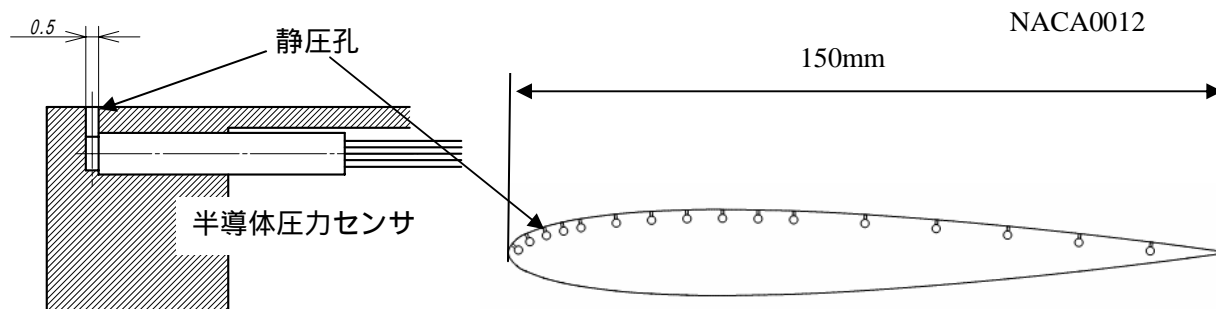


図9. 壁面静圧変動測定装置

リーディング・エッジだけでなく、トレーリング・エッジ付近まで圧力センサを埋め込むことが可能である。ただし、小さいとはいえ圧力センサの受感部は直径2mm、長さ20mm程度の円柱のため、そのまま翼内部に埋め込むことは難しい。そこで図9に示すように、壁面に垂直に開けられた圧力孔に対して側面から半導体センサを挿入して翼モデルに埋め込んだ。このため、センサと圧力孔の間には0.5mmほどの空隙ができる。圧力孔と空隙によってヘルムホルツ共振が生じる。この場合の共振周波数は約17kHzである。したがって、このシステムで測定可能な周波数は約12kHzである。より高い周波数の測定を行うにはセンサ自体を小型化するなどして、センサと測定孔の間の空隙を小さくする必要があるが、一般に受圧部の面積と圧力測定感度が比例するため、極端に小さなセンサにすることは難しい。

ここで静圧変動測定時に問題となるヘルムホルツ共振について触れておく. 図 10 に示すように直径 d , 長さ l の静圧孔にセンサを取り付ける場合, センサのほうが大きいため, センサと静圧孔の間に空隙(体積を V)ができる. 圧力が変動すると, 静圧孔頸部の空気(質量 $m = \rho S l$)が頸部から空隙に向けて移動するが, この際, 空隙内の体積 V を圧縮するため, 反発力が生じる. したがって, 静圧孔と空隙部によって単一共振系が形成される. このとき, 圧力孔における共振周波数 f_r は

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi d^2}{4V(l + 0.6d)}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl'}} \quad (2)$$

と表すことができる. このため, 共振周波数を高くするには, 静圧孔の面積 S を大きくするか, 空隙部分の体積 V または静圧孔の長さ l を短くする必要がある. 変動静圧を測定する場合, 事前に共振周波数を調べておく必要がある.

図 10 に静圧変動センサの出力特性の測定結果を示す. 多くの場合, 式(2)で求めた共振周波数と実験値は一致する. しかし, 空隙の体積 V を正確に求めることが難しいので, 正確な共振周波数が必要な場合は実験で確認する必要がある. 一般には, 設計図面から各部の寸法を割り出し, 式(2)を用いて共振周波数を計算し, それより低い周波数帯域で使用するようにすればよい.

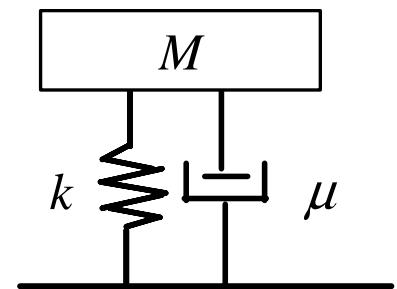
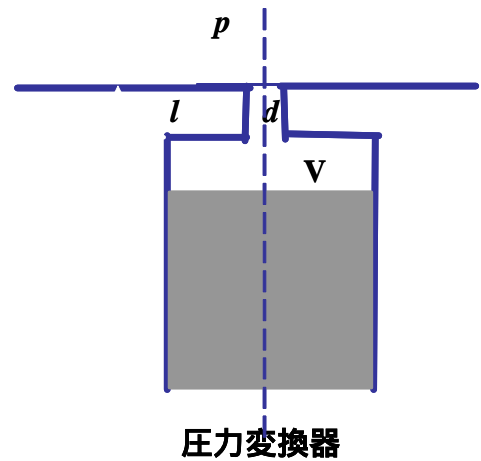
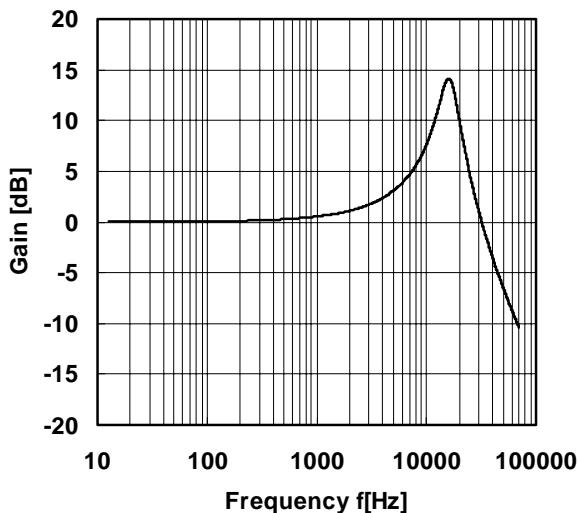
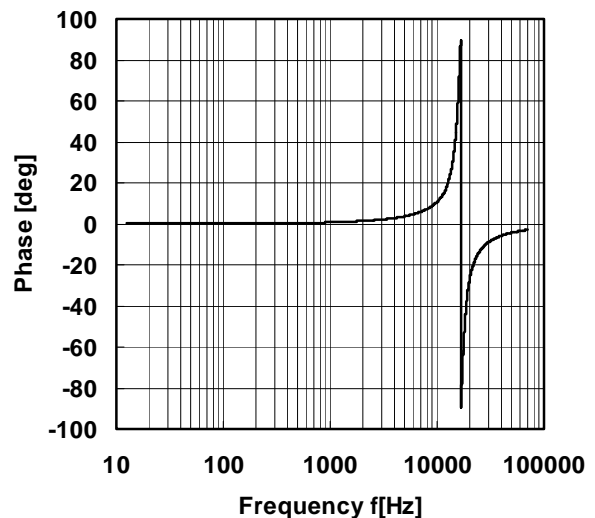


図 10 . 静圧孔の周波数特性モデル



(a) ゲイン



(b)位相

図 11 . 静圧孔の周波数特性

2.3 静圧変動プローブ 壁面静圧の測定は工業製品の開発等に広く利用されており, 先に示したように半導体圧力計を用いて変動圧力の計測も行われている. しかし, 流れ場の空間的な静圧変動を測定した例はあまり多くない. 流れ場の静圧変動は渦度と密接な関係があることから, 流体力学の諸問題を考える上で非常に重要な物理量であるが, 空間における圧力変動を測定することが難しいため, 実験データが限られているのが現状で

ある。

図 12 は北海道工業大学豊田教授によって開発された静圧変動プローブである。このセンサは 1/4 インチの小型マイクロフォンに直径 1mm 程度の静圧管を取り付けたものである。静圧変動を測定する場合は、流れの方向の変化が激しいことも考慮し、静圧管の先端形状は注射針のようにになっている。また、静圧管には直径 0.4mm 程度の孔が 8 個設けられている(静圧孔は 90 度間隔で設置され、4 個一組となっている。この圧力孔を位相を 45 度ずらして 2 組配置してある)。このような静圧孔配置にすることにより、測定部における静圧変動が正しく測定できるように工夫されている。このような工夫を施したことにより静圧変動プローブは乱れ強度 27% の流れ場において、主流に対して、 ± 15 度程度の角度で傾けた場合でも動圧の 2% 以下の誤差で圧力を測定することが可能である。

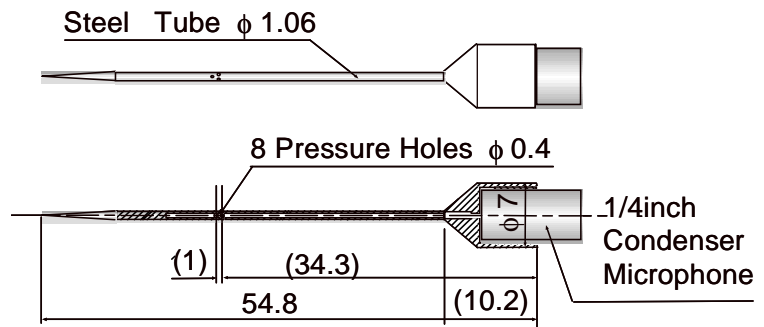


図 12 . 静圧変動プローブ

図 13 に静圧変動プローブを用いて円柱後流の静圧変動を測定した結果を、図 14 に熱線流速計による測定結果を示す。熱線によって測定された速度ベクトルが渦巻いている部分と静圧変動の大きい部分が一致していることから静圧変動によって渦度の集中領域が求められていることがわかる。

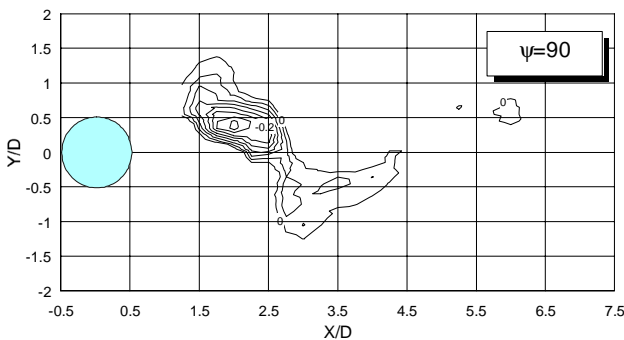


図 13 . 静圧変動

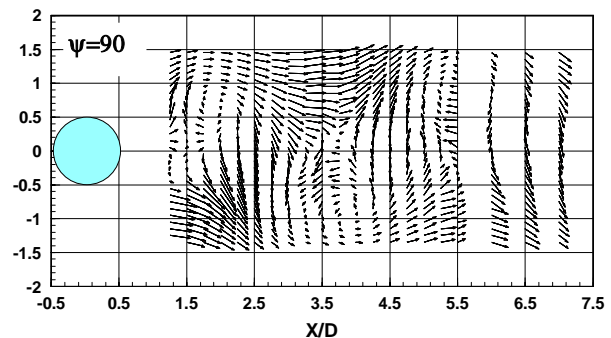


図 14 . 速度ベクトル

一般にマイクロフォンは微弱な圧力変動を測定することが可能であり、ダイナミックレンジも半導体圧力センサよりも広いものが多い。しかし、その構造上、平均圧力の測定ができないため、低周波数の乱流成分を測定することが難しいこと、小型化が難しいという問題がある(市販のものでは 1/8 インチ)。そこで、静圧変動プローブの受圧部に半導体圧力センサ(直径約 2mm)を取り付け、低周波成分を含めた計測を試みた。このセンサを用いて一様等方性乱流場の静圧変動スペクトルを測定したところ、低周波数における圧力変動を捉えることができることが確認された。半導体圧力センサを使用した場合、センサの感度の問題から低速の流れ場の測定が難しくなるが、主流速度が 10m/s 程度あれば測定することが可能である。

2.4 感圧塗料 壁面圧力変動を測定する新しい手法として、感圧塗料が開発されている。感圧塗料はバインダーと呼ばれるシリコンオイルなどのポリマー溶液に白金ポルフィリンなどの複素環式化合物を混ぜたものである。白金ポルフィリンなどの物質に光を当て励起状態にすると、元の基底状態に戻る際に光を放出するが、放出光

の強度は、周囲の酸素濃度や温度に依存する。放出される光の強度(ルミネッセンス強度)が、周囲の酸素濃度により小さくなる現象を酸素消光(Collisional quenching)という。周囲の酸素濃度が O_2 のとき、ルミネッセンス強度 I はスターン・ボルマーの式により

$$\frac{I_0}{I} = 1 + K(O_2) \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 I_0 は無酸素状態におけるルミネッセンス強度、 K はスターン・ボルマー定数である。

一方、ポリマー溶液には周囲圧力の大きさに応じて、酸素透過量に変化する性質がある。したがって、酸素透過性を持ったバインダーに、白金ポルフィリンのような添加物を混入させた塗料を物体に塗布すると、周囲の圧力が高くなるにつれ、バインダー内部に酸素が浸透し、酸素濃度が高くなり、酸素消光によってルミネッセンス強度が低下する。この光の明暗を CCD カメラ等で測定することにより、塗装面の圧力を測定することが可能になる。この方法の場合、物体表面の圧力分布を測定することが可能であり、従来の方法のように圧力孔を開けた部分だけの離散的な値だけでなく、数値解析と同じように圧力の詳細な分布を求めることが可能である。

酸素消光は温度にも依存するため、感圧塗料は一般に温度依存性が高い。温度の影響を少なくするには、酸素が透過する際の圧力を高く設定し、温度に関する感度と圧力に関する感度を分離すればよいが、この場合、低い圧力の計測が難しく圧力測定レンジが数 kPa から 100 kPa となる。したがって、感圧塗料は当初、マッハ数の大きなロケット等の圧力測定に利用されてきた。最近では自動車等の風洞実験にも利用されつつあり、低速の流れ場の計測にも応用されるようになってきている。しかし、温度依存性の問題がネックになっており、温度変化がある場合の補正方法などが検討されている。

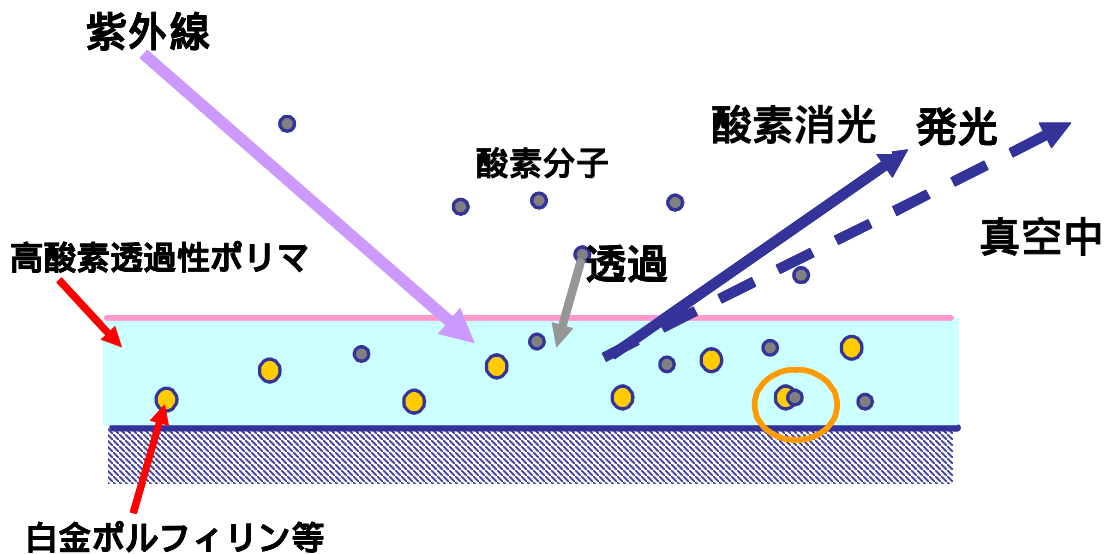


図 15 . 感圧塗料の原理

3. 終わりに

流れの圧力計測、主に静圧変動計測と感圧塗料に関して簡単な解説を行った。圧力計測は熱線流速計による計測や LDV, PIV 計測などと比べ原理が簡単なものが多い。また、たいていの実験において実験条件を設定するために圧力測定が行われていることから、多くの人々が圧力計測を日常的に行っているため、圧力計測自体はルーチンワーク的な仕事になっている。そのため、あまり計測方法について議論されることがなく、教科書等の記述もそれほどページを割いていない。このため、いざ、実際に測定する際になると、戸惑うことが多かったり、測定ノウハウを築くのに時間がかかったりする。紙面の都合上、半導体圧力計の原理やその他の計測手法の原理、ノウハウ等を述べることができなかつたが、この解説が少しでも読者の実験の参考になれば幸いである。