



入門講座

実験テクニック編(流体計測)基礎概説-1

圧力測定

Pressure Measurement

井口 学

Manabu Iguchi

松浦清隆

Kiyotaka Matsuura

北海道大学 大学院工学研究科
物質工学専攻 教授

同上 助手

1 はじめに

流体の圧力測定を測定位置に着目して分類すれば、流体を取り巻く境界壁面での測定と流体内部での測定に大別される。前者については古くから活発に研究が行われており、通常の条件下における測定法はほぼ確立されているといえよう¹⁻⁴⁾。後者については、センサーを流れの中に挿入するために流れ場が乱されることもあり、定常流れの測定に関しては特に問題ないが、圧力が時間とともに変化する非定常流れの場合の測定は格段に難しくなり、多くの点に注意を要する^{5,6)}。本稿では、流体の圧力を測定する際に用いられる計器とその特徴を述べるとともに、実際に使用する際に留意すべき事項について概説する。

2 圧力に関する基礎的事項

2.1 圧力の定義

流体の内部にとったある微小面積 ΔA に働く垂直な力を ΔP とすると、圧力 p は次式で表される¹⁾。

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \dots\dots\dots (1)$$

2.2 圧力の単位

単位のSI化は世界的な趨勢にあって、圧力の単位もパスカル(Pa)へ移行しつつあるが、現状では依然として種々の従来単位が併用されている。そこで、各種圧力単位相互の変換が便利のようにTable 1に換算係数を掲げた。

2.3 圧力の性質

- (1) 流体の圧力は流体と接触する面に垂直に働く。
- (2) 圧力はスカラー量であり、静止流体中の1点における圧力はいずれの方向にも等しい。

Table1 Conversion factor for pressure

	bar	kgf/cm ²	mHg	mH ₂ O	atm	Pa
1bar	1	1.019716	0.750062	10.19716	0.986923	10 ⁵
1kgf/cm ²	0.980665	1	0.735559	10.0	0.967841	9.80665×10 ⁴
1mHg	1.333224	1.359510	1	13.5951	1.315789	1.33322×10 ⁵
1mH ₂ O	0.0980665	0.1	0.0735559	1	0.0967841	9.80665×10 ³
1atm	1.013250	1.033227	0.76	10.33227	1	1.01325×10 ⁵
1Pa	10 ⁻⁵	1.01972 ×10 ⁻⁵	7.50062 ×10 ⁻⁶	1.01972 ×10 ⁻⁴	9.86923 ×10 ⁻⁶	1

- (3) 密閉容器中の液体に加えた圧力はすべての部分にそのままの強さで伝わる。これはパスカルの原理と呼ばれている。周知のように乗用車のパンク修理に用いられる油圧ジャッキはこの性質を利用している。

2.4 絶対圧、大気圧、ゲージ圧

流体計測で用いられる圧力に関するいくつかの専門用語について述べる。絶対圧は絶対真空を基準に表した圧力であり、ゲージ圧は大気圧を基準にとって示した圧力である。したがってこれらの圧力の間には次の関係が成り立つ。

$$\text{ゲージ圧} = \text{絶対圧} - \text{大気圧} \dots\dots\dots (2)$$

工業上はゲージ圧のことを単に圧力と呼ぶことが多い。

2.5 総圧、静圧、動圧

Fig. 1に示すように、流速が v の一様な流れの中に頭の丸い物体(Blunt body)を挿入したとき、流れがせき止められて流体は物体上のある点Sから分かれて流れていく。この点をよどみ点と呼ぶが、そこにおける圧力(総圧と呼ぶ)は物体の影響の及ばないところの圧力(静圧と呼ぶ)よりも $\rho v^2/2$ だけ高くなる。 ρ は流体の密度であり、この圧力の増分を動圧と呼ぶ^{7,8)}。速度計測の稿で述べるピトー管は動圧を測定して流速を求める計器である。

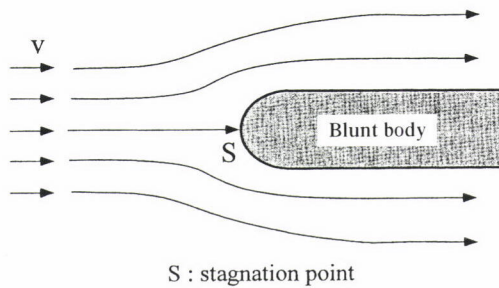


Fig.1 Flow around a blunt body



圧力の測定原理と計測器

3.1 圧力変換器の種類

圧力測定用計器は測定原理によって以下のように3種類に大別される^{9,10)}。

3.1.1 重量平衡式圧力計

圧力に基づく力を固体あるいは液体の重量と釣り合わせる方式であり、(1)液柱計、(2)沈鐘式圧力計、(3)分銅式圧力計など多くの種類がある。検定は必要ないが、応答性が悪いので圧力が時間とともに変化するような非定常流の計測には適さない。一般的には1 Paから100kPaの範囲で使用される¹⁾。特に微小な圧力の測定に適している。

代表例として、U字管液柱計の概要をFig. 2に示す。毛細管現象が無視できるとき、圧力 p_1 と p_2 の間には次式が成立する。

$$p_1 - p_2 = (\rho_{Hg} - \rho_w)gH \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで ρ_{Hg} と ρ_w は水銀と水の密度、 g は重力加速度である。ただし直管部の断面積 A_1 、 A_2 は互いに等しいと仮定している。

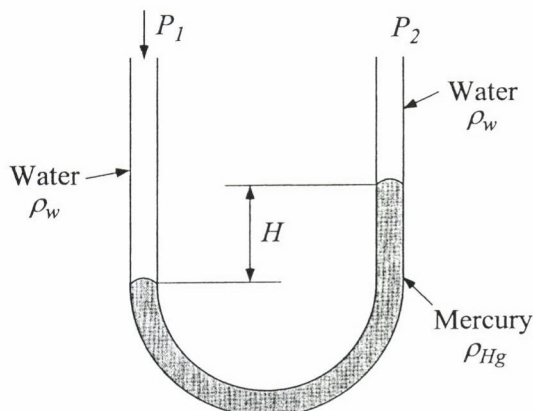


Fig.2 U-shaped manometer

3.1.2 弾性式圧力計

圧力を弾性体の変形による歪みと釣り合わせる方式であり、(1)ブルドン管式圧力計、(2)ダイヤフラム式圧力計、(3)ベローズ式圧力計、(4)アネロイド式圧力計などが挙げられる。変形量を直接読みとれるようになっているが、検定が必要である。10Paから1 GPaの範囲で用いられることが多い¹⁾。特徴としては圧力容器あるいは配管に直接取り付けことができ、簡単に圧力測定ができること、電源等の駆動源が不要であるという長所があり、多くの分野で利用されている。

3.1.3 電気式圧力計

圧力の作用によって生じた変位、電気抵抗などの物理量の変化を電気量の変化に変換して検出する。100MPa以上の範囲でも用いられる¹⁾。代表的なものに(1)電気抵抗形圧力変換器、(2)ピエゾ圧電形圧力変換器、(3)電磁誘導形圧力変換器、(4)静電誘導形圧力変換器、(5)光ファイバー圧力計、(6)磁わい効果を利用した圧力変換器、(7)感圧塗料の発光特性を利用した圧力測定、(8)ルビー蛍光シフト法などがある。なお、受圧要素と変換要素に着目して分類する試みが新宮ら¹¹⁾によってなされている。最近のコンピューターの急速な普及によって、この種の圧力計の重要性は増している。

ここで(7)と(8)についてはなじみが薄いと思われるので、簡単な説明を加える。

特定波長の光をある物質に照射すると、励起状態に遷移したのち失活するときにある波長の光を放出する。放出光の発光強度は周囲の圧力に依存するので、この性質に着目すれば広い面上圧力の同時測定が可能となる¹²⁾。感圧塗料はこの特性を利用しており、NASAではじめて流体計測に用いられた¹³⁾。現在のところ測定は100kPa程度のところで行われている。応答時間は最も短い場合で、0.01ms程度である。

ルビーを混入した試料部に圧力を加えるとレーザーで誘起されたルビー蛍光のR1線の波長 λ が圧力によって変化する事実を利用して圧力を測定する¹⁴⁻¹⁶⁾。波長の変化量と圧力との間には直線関係があり、1 MPa程度の圧力まで測定可能である。なお、最近ではSm: YAGレーザーの蛍光の波長シフトに着目した研究も行われている¹⁷⁾。

3.2 電気式圧力変換器の特徴

近年様々な分野で特に広く使われている電気抵抗形圧力変換器とピエゾ圧電形圧力変換器について少し詳しく述べる。

3.2.1 電気抵抗形圧力変換器

例えば円管内に円周固定のダイヤフラムを組み込み、ダイヤフラムの裏面に歪みゲージや半導体ゲージを取り付けて電気的なホイーストブリッジ回路を構成する。この円管内部に圧力が加わるとダイヤフラムにたわみを生じ、ダイヤフラムに接着されているゲージの抵抗が変化し出力電圧が変化する。出力電圧と圧力の関係をあらかじめ導いておけば、出力電圧変化より圧力が求まる。

(1) 金属ゲージ型(線ゲージ、箔ゲージ)

金属の線とか箔でホイーストブリッジを構成したゲージをステンレス鋼や銅ニッケル合金などのダイヤフラム上に接着する方式であり¹⁸⁾、ゲージ材料の歪みによる電気抵抗変化を利用している⁹⁾。出力の直線性が優れており、ヒステリシスも小さく、圧力変換器が外力を受けず自由振動するときの固有振動数は数十kHzに達する。また、衝撃にも強く、かつ取り扱いが容易で長期的な安定性が得られることから、広く使用されている。

(2) 半導体ゲージ型

半導体結晶のピエゾ抵抗効果とその高異方性を利用した圧力変換器である。ただし蒸着形の半導体は異方性を示さない¹⁹⁾。ピエゾ抵抗効果とは、結晶に外部から応力を与えると応力の大きさに比例して結晶の固有抵抗が変化し、応力を取り除けばもとの状態に戻る効果である。半導体ゲージの最も古い方式は、シリコン半導体結晶を短冊状に切りだして金属ダイヤフラム上に接着し、ゲージを構成する方式である²⁰⁾。この変換器は金属ゲージ形に比べて優れた感度を持っているため小型化が可能であるが、ダイヤフラムとゲージの材質の線膨張係数が異なるため温度保障の困難さ²¹⁾、接着剤の長期安定性の問題などが内在し、温度特性〔零点移動〕や取り扱いなどについては、金属ゲージ形に比べて若干劣っている点もある²⁰⁾。

これらの点を改良するために、半導体拡散形および蒸着形のゲージが開発されている。拡散形歪みゲージとは、薄い低濃度のSi基盤結晶の上に高濃度の不純物(ボロン)を拡散し、薄膜の拡散層が所定の形に形成されたもので、それをそのまま歪みゲージとして使用できるようにしたものである^{22,23)}。蒸着形とは小さなダイヤフラムに蒸着薄膜半導体歪みゲージを形成したものである。例えば、金属ダイヤフラム上にSiO₂層で絶縁し、その上にゲルマニウムを蒸着し、ブリッジに形成したものがあ。これらによって接着形よりもさらに小型化が可能で、拡散形では受圧面の径が1mm以下のものも市販されており、固有振動数も100kHz以上と高くすることが可能である。

3.2.2 ピエゾ圧電形圧力変換器

水晶、電気石、ロッシェル塩、チタン酸バリウム、トルマリン、磷酸カリウムなどの結晶に外力を加えて変形させると電気分極により結晶表面に電荷が生じ電圧が発生する。これはピエゾ圧電効果と呼ばれており、この効果を利用すれば圧力測定が可能である。

ピエゾ圧電形圧力変換器は直線性、ヒステリシス、再現性が良好であり、固有振動数も数百kHzと高い。また衝撃圧力に対しても強く、小型でセンサーの質量が小さいので、加速や振動の影響を受けにくい。ただし、変動圧力しか測定出来ない点に注意を要する¹⁰⁾。

3.3 圧力変換器の検定

圧力変換器を試作する場合はもちろんのこと、市販品を購入した場合にもなんらかの方法で検定を行い、性能を確認しておく必要がある。さらに使用中にも定期的に検定を行うべきである。低周波数で変動する圧力の場合には、圧電形以外の圧力計は静的な方法で検定する。動的な検定には相対的検定と絶対的検定の2種類の方法があるが、それらについては例えば文献²⁾を参照されたい。

4 圧力変換器の取り付け方法と注意事項

圧力を検出すべき平面に圧力変換器の受圧面を一致させることができない場合には、流体を別の場所まで導いて測定する必要がある。ところが取圧孔や導圧管から構成される検出機構の選択を誤ると、たとえ圧力変換器そのものの固有振動数 f_0 が非常に高い場合であっても、測定可能な圧力変動の周波数範囲は極端に狭くなる。

4.1 取り付け方法の分類

圧力変換器の取り付け方法はFig. 3に示すように3種類

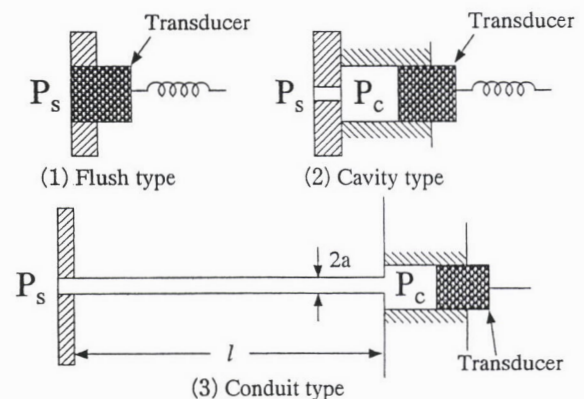


Fig.3 Attachment methods of transducer

に大別される²⁴⁾。

- (1) フラッシュ形
- (2) キャビティ形
- (3) 導管形

測定可能な周波数帯域は(1)から(3)の順序で狭くなる。フラッシュ形では検出部が点とみなせず、加えて受圧面の損傷を被る恐れもあるが、キャビティ形と導管形ではこのような欠点は軽減される。ここでは最も一般的に用いられているキャビティ形について圧力検出機構の固有振動数評価法を示す。導管形の詳細については例えば文献^{24,25)}を参照されたい。

4.2 圧力検出機構の固有振動数計算法

圧力変換器の受圧部の弾性変形が検出機構の動特性に及ぼす影響は、流体が気体の場合には問題ないが、液体の場合には無視できない。したがって、両者は別個に考える必要がある。

(1) 液体の場合

受圧板式の圧力変換器に関しては受圧部の弾性変形と検出機構の動特性との関係に対する近似式が提案されている²⁵⁾。Fig. 4 に示すキャビティ形の検出機構において、固有振動数 f_n は次式で与えられる。

$$f_n = 1.356 f_0 (d/D) / [l + (l_0 + l) / (9h)]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで D と h は受圧板の直径と厚さ、 f_0 は圧力変換器の固有振動数、 d と l_0 は受圧孔の直径と長さ、 l はキャビティの長さである。

(2) 気体の場合

f_n は f_0 に関係なく次式で与えられる²⁶⁾。

$$f_n = c_0 / (2\pi l_0) [x \{l + 8 / (3\pi \lambda_0)\}]^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$x = l / l_0 (D/d)^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\lambda_0 = l_0 / d \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで c_0 は音速である。実際の測定において信頼できる周波数帯域は f_n の1/5程度となる。

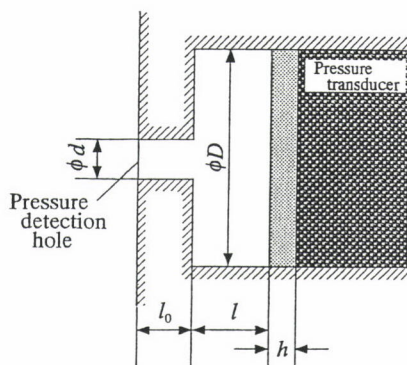


Fig.4 Cavity type

4.3 取り扱いに対する一般的注意

前節に示した解析法から導かれる結論も含めてキャビティ形と導管形に一般的な注意事項をまとめると次のようになる^{27,28)}。

- (1) 検出孔の径 d をあまり小さくしすぎてもいけない。適当な範囲が存在する。
- (2) 検出孔の長さ l_0 をできるだけ短くする。
- (3) 受圧孔容積をできるだけ小さくする。
- (4) 検出孔を取り付ける際、流路内に突起物を生じさせて流れを乱すことのないよう加工に留意すべきである。
- (5) 液体の場合、導管管内の空気を完全に除去する。これが存在すると波形が大きく歪む可能性がある。
- (6) 特に導管形の場合には、途中にコック、弁などの絞り要素があると測定可能な周波数帯域は極端に低くなるから注意を要する。

5 測定例

5.1 ターボ形ポンプ配管系の圧力変動の測定

羽根数 Z と回転数 N で定まるポンプの羽根通過周波数 f_{ZN} と管路内液柱の固有振動数 f_m ($m=1, 2, 3, \dots$)が等しくなると共振が起こり、配管系の圧力脈動振幅が非常に大きくなっていろいろな不都合が生じ、管路が破壊されることもある。これを回避するには理論的に f_m を求め、 f_{ZN} と合致しないようにすることが肝要である。理論計算結果の妥当性を調べるには配管系の圧力脈動の共振周波数 f_m とその振幅を正確に測定することが望まれる。

佐野は²⁹⁾受圧面の直径が5.5mmのフラッシュダイヤフラム形の歪みゲージ式圧力変換器と動歪計を用い、実時間スペクトル分析により比速度が266の両吸込み渦巻きポンプの圧力脈動の周波数と振幅を求めている。

5.2 差圧変換器による脈動流量測定

流量測定の稿でも触れるが、オリフィス前後の差圧を測定して流量を求める方式は定常流に対しては非常に精度の良い方法として知られている。このオリフィスを非定常流の流量測定に適用する試みが活発に行われている。非定常流量の測定精度は差圧測定精度に強く依存する。非定常流れの差圧測定方法については例えば高橋の解説²⁵⁾を参照されたい。

6 おわりに

本稿では広く用いられている圧力測定法について述べたが、十分意を尽くせたとは思えない。個々の測定法の詳細

については文献を参照されたい。特に文献³⁰⁾は重要である。21世紀を迎え我々の活動が宇宙、深海底、地中へと及ぶにつれて、厳しい環境で圧力を精度良く測定する必要性はますます増加するであろう。既存の概念に捕らわれない新しい圧力測定法の出現を祈っている。

参考文献

- 1) 技術資料 流体計測法, 日本機械学会, (1985), 1.
- 2) 村田暹, 小川 徹, 三宅 裕: ポフ機械工学における空気力学実験法, 朝倉書店, (1969), 131.
- 3) B. J. Clark and M. Gardner: Measurement systems, Application and design, McGraw-Hill, (1975)
- 4) 谷 一郎, ほか 2 名: 流体力学実験法, 岩波書店, (1977)
- 5) 西 道弘: 日本機械学会関西支部第112回講習会, (1983), 1.
- 6) 村上光清: P-SC-52管内非定常流れの解析と計測に関する調査研究分科会成果報告書, 日本機械学会, (1984), 146.
- 7) 今井 功: 流体力学前編, 裳華房, (1979), 53.
- 8) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, (1974), 22.
- 9) 竹中俊夫: 油圧と空気圧, 2-2 (1971), 97.
- 10) 赤松映明: 日本機械学会関西支部第112回講習会, (1983), 29.
- 11) 新宮博公, 山口義人: 日本航空宇宙学会誌: 30-336 (1982), 2.
- 12) 半田太郎, 宮里義昭, 益田光治, 松尾一泰, 松本尚之, 坂本和之: 可視化情報, 19, Suppl. 2, (1999), 103.
- 13) B. G. McLachlan, J. L. Kavandi, J. B. Callis, M. Gouterman, E. Green, G. Khalil and D. Burns: Exp. Fluids, (1993), 33.
- 14) L.-G. Liu, T. Takahashi and W. A. Bassett: J. Phys. Chem. Solids, 31 (1970), 1355.
- 15) G. J. Piermarini, S. Block, J. D. Barnett and R. A. Forman: J. Appl. Phys., 46-6 (1975), 277.
- 16) H. K. Mao, P. M. Bell, J. W. Shaner and D. J. Steinberg: J. Appl. Phys., 49-6 (1978), 3276.
- 17) H. Yusa, T. Yagi and H. Arashi: J. Appl. Phys., 75-3 (1994), 1463.
- 18) 古川 浩, 赤坂 隆, 荒井太四郎, 久保 敦: 日本機械学会誌, 74-631 (1971), 1008.
- 19) 渡辺 理: 日本機械学会誌, 74-631 (1971), 969.
- 20) 五十嵐伊勢美: 計測と制御, 5-2 (1966), 89.
- 21) 嶋田 智, 西原元久, 山田一二, 田辺正則, 内山薫: 計測自動制御学会論文集, 20-10 (1984), 946.
- 22) 鈴木憲二: トヨタ技報, 16-2 (1975), 16.
- 23) 西原元久: 日本航空宇宙学会誌, 30-336 (1982), 9.
- 24) 吉岡宗之: 日本機械学会関西支部第112回講習会, (1983), 41.
- 25) 高橋浩爾: 油圧と空気圧, 9-4 (1978), 241.
- 26) 畑中 浩: 油圧と空気圧, 9-6 (1978), 397.
- 27) 縄田秀夫: ターボ機械, 2-3 (1974), 37.
- 28) 佐藤勝俊, 宮原今朝夫, 畑中 浩: 計測自動制御学会論文集, 19-2 (1983), 158.
- 29) 佐野勝志: 日本機械学会論文集: 49-440 (1983), 828.
- 30) 改訂計量技術ハンドブック, 工業技術院計量研究所計量技術ハンドブック編集委員会編, コロナ社, (1976), 872.

(2000年4月27日受付)