圧力測定孔の周波数特性

Frequency characteristics of cavity-mounted pressure sensors

○ 及川光彦郎 (秋田大)

加藤久美子 (秋田大)

正 飯村 彦郎 (秋田大)

正 佐々木芳宏 (秋田大)

Kouichiro OIKAWA, Akita University, Tegata-gakuenmachi 1-1, Akita city, Akita

Kumiko KATO, Ikuro HIMURA, Yoshihiro SASAKI, Akita University

Key Words: Cavity-mounted pressure sensor, Frequency characteristics

1. はじめに

圧力センサの受圧部は通常、若干の大きさを持つ平面である為、細い管路内のような狭い測定箇所または曲がった壁面などにおいては流れを乱さずにセンサを直接取り付けことは困難なことが多い。

このような場合には Fig.1 のように測定部の壁面に小孔を開け、さらにセンサ受圧面が十分収納できる空洞を設けそこに導かれた圧力が測定される。この小孔を検出孔、空洞を受圧室と呼び、それらをまとめて圧力測定孔または測圧孔と呼ぶ。測圧孔は上述のほかセンサ受圧面の保護やノイズ成分にたいする遮断要素（フィルタ）としても利用される。

しかし、測圧孔を介して測定された圧力信号は、センサ受圧面で直接検出しないことにより測定誤差が生ずるという欠点がある。

そこで、測圧孔により検出された出力波形から正しい圧力波形を推定するために、測圧孔の周波数特性を知ることは不可欠になる。通常、検出孔の直径と長さは同程度である。

しかし、センサを測定部の近くに取り付けることができないことが多く、その場合には受圧面自体の検出孔を長くする場合がある。そこで、本研究では、検出孔の長さによる周波数特性の変化を実験により求め、検出孔が短い(オリフィスモデル)場合の理論値と長い(管路モデル)場合の理論値と比較して、両モデルの予測精度を検討する。

2. 理論式

2-1 オリフィスモデル

Fig.1 において、真の圧力を p_1 、受圧室圧力を p_2 とする。検出孔を通る非定常な体積流量を q とする。Fig.1 を等価回路で表すと同図右のようになる。

検出孔による流体抵抗、流体イナータンスをそれぞれ R と L 、受圧室容量を C とすると次の式が成り立つ¹⁾。

$$LC \frac{d^2 p_2}{dt^2} + RC \frac{dp_2}{dt} + p_2 = p_1 \quad (1)$$

L , C はそれぞれ

$$L = \frac{\rho l_1}{A_1} \left(1 + \frac{8}{3\pi} \frac{d_1}{l_1} \right) \equiv \frac{\rho l_1}{A_1} k \quad (2)$$

Fig. 1 測圧孔（オリフィスモデル）と等価回路

Fig. 2 測圧孔（管路モデル）と等価回路

Fig. 3 実験装置概略

$$C = \frac{V_2}{\rho c^2} \quad (3)$$

また流体抵抗 R は、

$$R = \frac{8}{3\pi} \frac{\rho}{2C_{d0}^2 A_1^2} \frac{V_2}{\rho c^2} \omega p_{1m} M + k, \quad \frac{8\pi \rho v l_1}{A_1^2} \quad (4)$$

これらの式より L は検出孔の長さと同様に、 C は受圧室の容積に、 R は主に検出孔の直径と圧力振幅に依存していることがわかる。

2-2 管路モデル²⁾

次に検出孔が長い管路状の場合について考える。Fig.3において管路の微小長さを dx とし、圧力 $p(x,t)$ と流量 $q(x,t)$ が微小で、かつ x と t のみの関数であるとすれば

$$\frac{\partial P(x,s)}{\partial x} = -Z(s)Q(x,s) \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q(x,s)}{\partial x} = -Y(s)P(x,s) \quad (6)$$

と示される。 $Z(s)$, $Y(s)$ はそれぞれ単位長さあたりのインピーダンスおよびアドミッタンスである。 (s はラプラス演算子)

上式より単位長さあたりの伝播定数 Γ 、特性インピーダンス Z_* は以下ようになる。

$$\Gamma(s) = \sqrt{ZY}, \quad Z_*(s) = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (7), (8)$$

したがって

$$\frac{P}{P_i} = \cosh \Gamma(l-x) + \frac{Z_*}{Z_L} \sinh \Gamma(l-x) \quad (9)$$

$$\frac{Q}{Q_i} = \frac{Z_L}{Z_*} \sinh \Gamma(l-x) + \cosh \Gamma(l-x) \quad (10)$$

ただし、 $Z_L = P/Q_i$ は負荷インピーダンスである。

$x=0$ で $P=P_i$, $Q=Q_i$ とすると、 $x=0 \sim l$ までの圧力伝達関数は

$$\frac{P_l}{P_i} = \frac{1}{\cosh \Gamma l + (Z_*/Z_L) \sinh \Gamma l} \quad (11)$$

$$\frac{Q_l}{Q_i} = \frac{1}{\cosh \Gamma l + (Z_L/Z_*) \sinh \Gamma l} \quad (12)$$

である。また流体圧管路の Z と Y は

$$Z = \frac{\rho c}{A} \left[1 - \frac{2J_1(ja\sqrt{s/\nu})}{ja\sqrt{s/\nu}J_0(ja\sqrt{s/\nu})} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$Y = \frac{A_1 s}{\rho c^2} \left[1 + \frac{2(\gamma-1)J_1(ja\sqrt{\sigma/\nu})}{ja\sqrt{\sigma/\nu}J_0(ja\sqrt{\sigma/\nu})} \right] \quad (14)$$

ここで J_0 , J_1 それぞれ 0 次, 1 次のベッセル関数, γ は気体の比熱比, σ はプラントル数を表す。

よって管路モデルにおける圧力伝達関数は次式で表される。

$$\frac{P_2}{P_1} = G = \frac{1}{\cosh \Gamma l_1 + \frac{Z_*}{Z_L} \sinh \Gamma l_1} \cdot \frac{1}{Z_L C s} \quad (15)$$

3. 実験

実験装置の概略を Fig.3 に示す。本研究に用いた測圧孔の寸法は、検出孔の直径 d_1 が 0.5mm, 長さ l_1 が 0.5, 1, 2, 4, 8, 16mm, 受圧室の直径 d_2 が 7mm, 深さ l_2 が 4mm である。圧力測定孔の材質は黄銅で、7mm という直径は使用する圧力センサの受圧面直径 5mm に適合するように定めた。また、受圧面と受圧室底面は同一平面になるように取り付けた。

(a)オリフィスモデル (b)管路モデル

Fig. 4 実験結果

実験は検出孔の長さや圧力振幅の影響を測定しシミュレーションによる理論値と実験値との比較を行った。

4. 結果および考察

Fig.4 より、検出孔 l_1 が長くなるほど共振周波数が低くなっているのがわかる。また、位相ずれは比較的低周波域から生じ始めている。これはいずれも、測圧孔の固有周波数 ω_n がおおむね検出孔 l_1 の平方根に反比例している為と考えられる。

検出孔の長さが短い場合、共振点付近において圧力振幅の影響が見られる。これは共振点付近で検出孔を通る流量振幅が増大し、これにより抵抗 R が大きくなるためゲインが小さくなるためと考えられる。

位相差について、オリフィスモデルでは実験値とずれがあるが管路モデルにおいてはほぼ近い値が得られている。

検出孔の長さが短い場合はオリフィスモデルと、長い場合には管路モデルの理論値とよく一致していることがわかる。

5. 結言

検出孔の長さや圧力振幅が測圧孔の周波数特性にどのような影響を与えるのかを管路の信号伝達理論を用いた理論と実験により検討した。

測圧孔の長さが長くなるほど、共振周波数のピーク値は低くなり、位相のずれが低い周波数から生じている。また、共振点での圧力振幅の影響はほとんどなくなることが示される。

理論値については、実験値とほぼ近い値を求めることができたので精度はよいと考えられる。

参考文献

- 飯村 彦郎: 圧力測定孔の動特性に関する研究, 東北大学博士学位論文(1992)
- 下日向 正行: 圧力測定孔の周波数特性, 秋田大学工学資源学部機械工学科平成 14 年度卒業論文(2003)