

圧力測定孔の特性改善について

An Improvement of Dynamics of Cavity-Mounted Pressure Transducers

○飯村 彥郎^{*}, 久慈 信行^{**}, 畑中 浩^{***}

Ikuro Iimura^{*}, Nobuyuki Kuji^{**}, Hiroshi Hatanaka^{***}

^{*}秋田大学, ^{**}アンデス電気(株), ^{***}東北大学

^{*}Akita University, ^{**}Andes Electric Co. Ltd., ^{***}Tohoku University

キーワード：圧力測定孔 (Cavity-Mounted Pressure Transducer), 圧力測定 (Pressure Sensing),
動的圧力測定 (Dynamical Pressure Sensing), 流体計測 (Flow Measurement),
流体制御 (Fluid Control)

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学工学資源学部機械工学科

飯村 彥郎, Tel:018-889-2737, Fax:018-837-0405, E-mail:iimura@ipc.akita-u.ac.jp

1. 緒言

圧力センサを使って狭い流体回路等の圧力信号を検出するには、流れを乱さぬよう壁面に小孔をあけ、更にセンサ受圧面が十分収容できる大きさの受圧室を介して出力が取り出される。その検出小孔と受圧室をまとめて圧力測定孔、または測圧孔と呼ぶことにする。

測圧孔を用いて変動圧力を計測する場合、二つの問題すなわち、測圧孔を介することによる動的測定誤差と、測圧孔の存在によって周囲の非定常流れに影響を及ぼす負荷効果が起りうるが、どちらも受圧室容積が小さいほど、小さく抑えられることが知られている^[1]。しかし空気圧など圧縮性流体で作動する場合には通常、測圧孔の共振が大きく、圧力信号の測定誤差により制御回路の誤動作を生じるおそれがある。

(液体においては測圧孔内に混入気体がなければ、これらの問題はほとんど起らない)。

受圧室容積を極力小さくするには、直径はセンサ受圧面以下にはできないので、奥行きを浅くせざるを得ない。もし極端に浅くした場合に

は受圧室内に半径方向の振動流が生じ、受圧面中心部における圧力振幅の低下、両底面間の流体摩擦抵抗などのため共振ピークは下がるが位相分布はほぼ一様であり、また、共振周波数より十分低い範囲では振幅分布も一様となるので、測圧孔として一層望ましい特性となる^[2]。

ここではさらに検出孔と受圧室に若干の修正を施すことにより、固有周波数はさほど変わらずに減衰は顕著に増加して非線形性も少なくすることが可能な測圧孔を試作し、特性が改善される理由について考察した。

2. 通常形状の測圧孔特性

Fig.1 のような形状の測圧孔において真の圧力を p_1 、測定圧力を p_2 、検出孔への流人体積流量 (非定常) を q とすると

$$L \frac{dq}{dt} + Rq = p_1 - p_2, \quad q = C \frac{dp_2}{dt} \quad (1)$$

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

ただし、 L と R は検出孔の流体イナータンスと

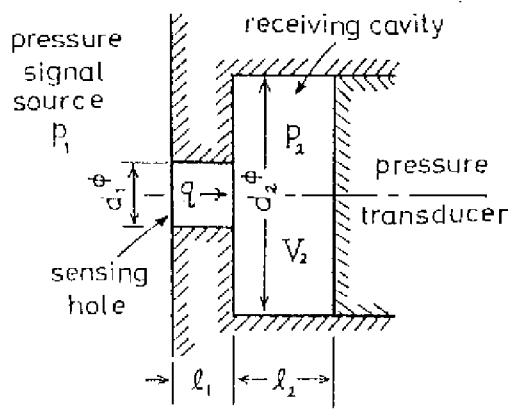


Fig. 1 圧力測定孔の概念図

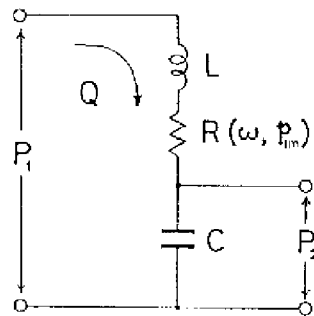


Fig. 2 圧力測定孔の等価回路

流体抵抗, \$C\$ は受圧室の流体キャパシタンスであり, 等価回路は Fig. 2 で表される.

式(2)をフーリエ変換すると, 真の圧力 \$P_1\$ に対する測定圧力 \$P_2\$ の振幅比 \$M\$ と位相差 \$\phi\$ は

$$M = |P_2 / P_1| \cong p_{2m} / p_{1m} = \left[(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

$$\phi = \angle P_2 / P_1 = -\tan^{-1} [\omega RC / (1 - \omega^2 LC)] \quad (4)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{\rho l_1}{A_1} \left(1 + \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{d_1}{l_1} \right), C = \frac{V_2}{\rho c^2} = \frac{\pi d_2^2 l_2}{4\rho c^2} \\ R &= \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{\rho}{2C_d^2 A_1^2} C \omega p_{1m} M + \frac{8\pi\rho\nu l_1}{A_1^2} + \frac{\rho l_1}{A_1} \sqrt{\frac{2\pi\nu\omega}{A_1}} \end{aligned} \right\} (5)$$

\$\omega\$ は圧力の変動角周波数, \$\rho\$ と \$\nu\$ は流体の密度と動粘度, \$c\$ は流体中の音速であり, \$d_1, l_1\$ と \$d_2, l_2\$ はそれぞれ検出孔と受圧室の直径, 長さを表す. よって測圧孔の動特性は圧力振幅と周波数に依存する抵抗をもつ二次系で近似される.

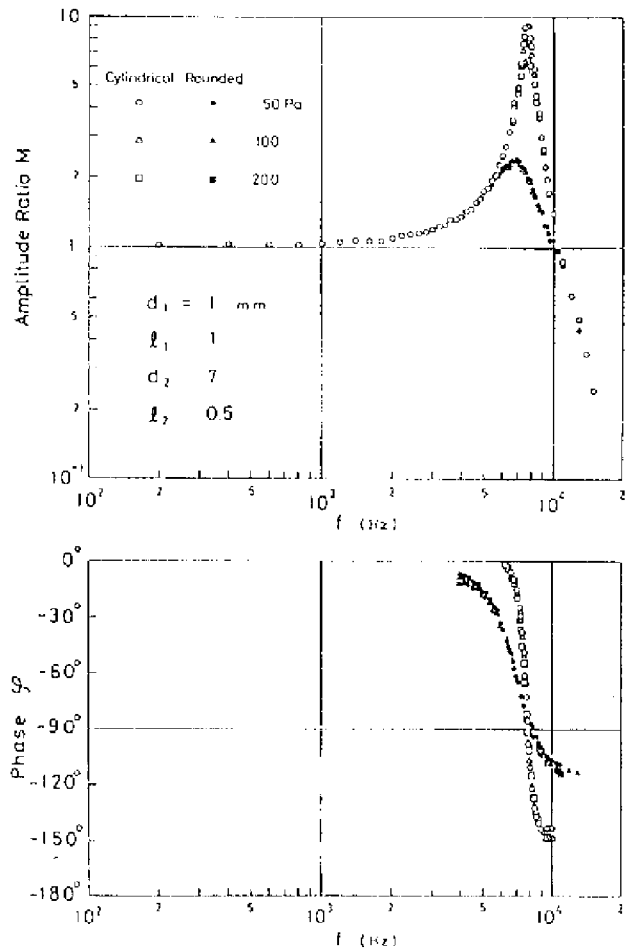


Fig. 3 受圧室に「非定常漏れ」があるときの周波数特性

3. 実験

3. 1 予備実験 (予期せぬ結果)

測圧孔の減衰特性を改善する手段として, 試みに, 検出孔内側 (受圧室側) の切り口に丸みを付けてみた. これによりオリフィスが短くなって \$L\$ が減り,

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad M_p \cong \frac{1}{2\xi} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

によって固有周波数 \$f_n\$ の上昇と共振ピーク \$M_p\$ の低下, さらに丸みが案内になり受圧室内の放射状振動流が促進されてピークの更なる低下をもたらすことが期待されたからである. 作り直された測圧孔による実験結果 (Fig. 3 の黒点) は理想に近い減衰特性に改善されたと思われたが, 実際には組立てにおける摺合せの僅かな「ゆらみ」が原因であることがわかった. しかし低周波域では振幅比が 1 だから定常的な漏れはなく, 僅かな「すきま」による「非定常漏れ」が見かけの減衰に寄与していたと考えられる.

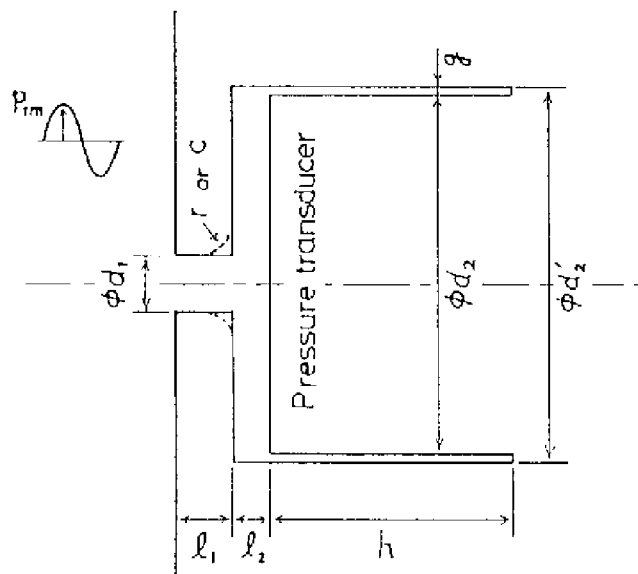


Fig. 4 環状溝を設けた測圧孔

そこで、この「すきま」を積極的に設けることにより減衰増加を試みた。もちろん定常漏れは許されないので、すきまはある深さに限って底を付け、以後「溝」と呼ぶことにする。

3. 2 溝の効果

受圧室の底面外周に Fig.4 のような環状の溝を設ける。溝の幅 g を 0.05, 0.1, 0.15 mm, 深さ h を 2.5, 5 mm と変化させた場合の周波数特性を比較する。ここで用いる測圧孔の基本部分は $d_1=l_1=1$ mm, $d_2=7$ mm, $l_2=0.5$ mm, $d_2'=(7+2g)$ mm である。

Fig.5 は $g=0.05$ mm, $h=5$ mm の場合である。溝の効果は明らかで、溝なしのときに比べて共振ピークは 10 から 4 程度に下がり（振幅 50 Pa の場合）、かつ振幅の影響は少なくなる。位相変化も幾分なだらかになる。Fig.6, Fig.7 は溝深さ 5 mm は変えずに、幅を 0.1, 0.15 mm と広げた場合である。溝幅の増加に従ってピークは上がり、共振周波数は下がって測圧孔としての特性は劣化する。また、溝幅は 0.05 mm と狭くても深さを 2.5 mm と半分にした場合には顕著な効果はなく、単に受圧室容積が溝の分だけ大きくなったと同様な特性になる。

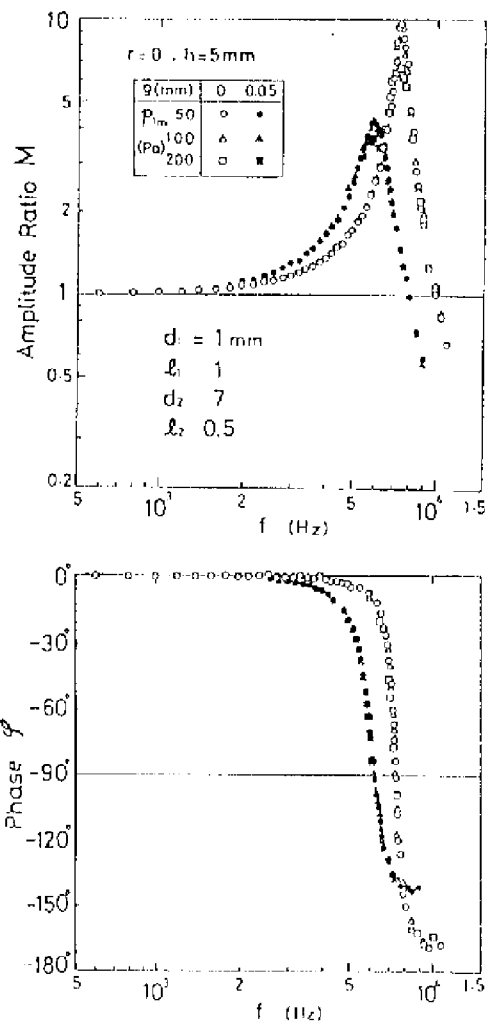


Fig. 5 環状溝つき測圧孔の周波数特性；
 $g=0.05$ mm, $h=5$ mm

3. 3 検出孔の丸みまたは面取りの効果

受圧室に $g=0.05$ mm, $h=5$ mm の溝を設け、さらに検出孔内側に $r=0.5$ mm または面取り $c=0.25$ mm を施した場合の特性を Fig. 8, Fig. 9 に示す ($c=0.25$ mm は $r=0.5$ mm とおおむね等価な面取り量と思われ、 c の方が工作は簡単である)。丸み等の付加は減衰特性の改善にはほとんど利点はないが、溝の付加によって下がった共振周波数をいくぶん上げる効果はある。例えば、 $r=g=h=0$ の通常形状の場合、共振点は 7400 Hz であるが、溝によって 5950 Hz に落ちる。それが丸みによって 6500 Hz に回復し、ピーク高さはほとんど変わらないが振幅の影響は若干少なくなる。種々寸法の溝、丸み等による共振点の実験値をまとめて Table 1 に示す。

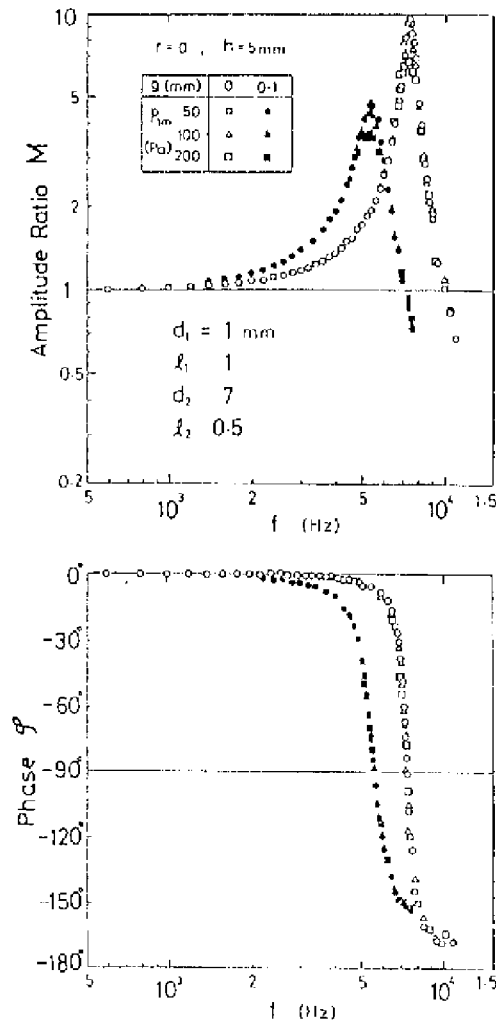


Fig. 6 環状溝つき測圧孔の周波数特性；
g=0.1 mm, h=5 mm

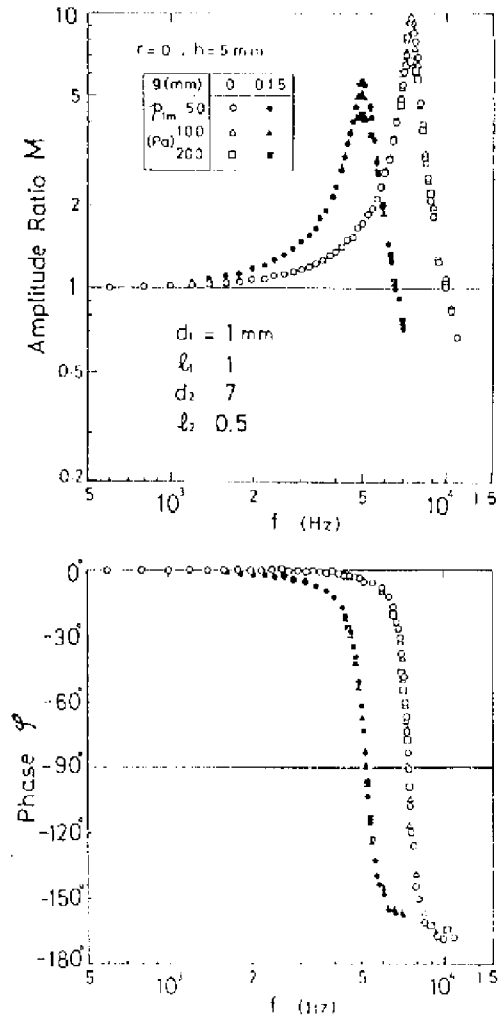


Fig. 7 環状溝つき測圧孔の周波数特性；
g=0.15 mm, h=5 mm

4. 溝の効果の解析

Fig. 10 のように、溝は環状断面の終端が閉じた管路と見なすことができる。長さ（深さ） h の終端閉止管路の入力インピーダンス Z_i は、単位長さ当りのインピーダンスとアドミッタンスをそれぞれ Z, Y とすれば

$$Z_i = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \cdot \frac{e^{\sqrt{ZY}h} + e^{-\sqrt{ZY}h}}{e^{\sqrt{ZY}h} - e^{-\sqrt{ZY}h}} \quad (7)$$

$\sqrt{ZY}h$ が小さいときは、分子、分母を展開して2次までとれば

$$\begin{aligned} Z_i &\equiv \sqrt{\frac{Z}{Y}} \left(\frac{\sqrt{ZY}h}{2} + \frac{1}{\sqrt{ZY}h} \right) \\ &= \frac{Z}{2}h + \frac{1}{Yh} \\ &\equiv R' + j\omega L' + \frac{1}{G' + j\omega C'} \end{aligned} \quad (8)$$

すなわちインピーダンスの半分と、アドミッタンスが直列に接続された要素となり、これらが更に抵抗 R' 、イナータンス L' 、コンダクタンス G' 、キャパシタンス C' からなるものとして、溝のインピーダンスは Fig. 11(a) の等価回路となる。

同図(b)のようなすきまの狭い環状断面管路は(c)のようにアスペクト比の大きい矩形断面管路と等価であると考えられ、次の近似が可能である³⁾。

$$\left. \begin{aligned} R' &\equiv \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho h}{\pi d_2 g} \sqrt{\frac{v\omega}{2g}}, & L' &\equiv \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho h}{\pi d_2 g} \\ G' &\equiv \frac{\pi d_2 g h}{\rho c^2} (\gamma - 1) \sqrt{\frac{v\omega}{2\sigma g^2}}, \\ C' &\equiv \frac{\pi d_2 g h}{\rho c^2} \end{aligned} \right\} (9)$$

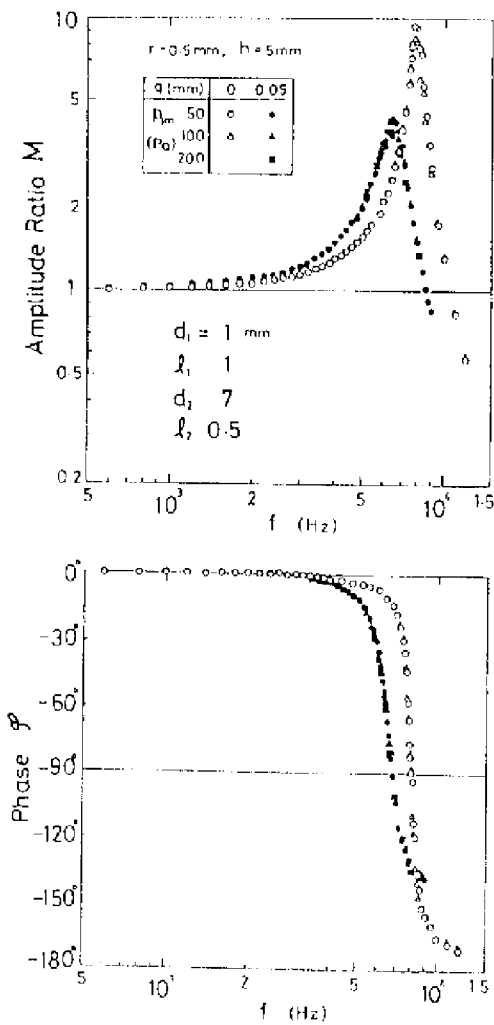


Fig. 8 環状溝と孔丸つき測圧孔の周波数特性 ;
 $g=0.05 \text{ mm}$, $h=5 \text{ mm}$, $r=0.5 \text{ mm}$

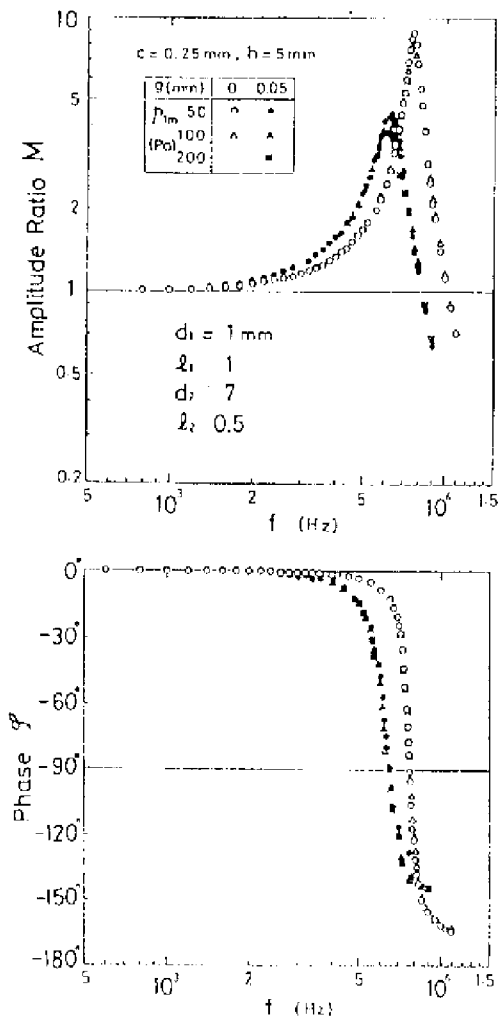


Fig. 9 環状溝と孔面取りつき測圧孔の周波数特性 ;
 $g=0.05 \text{ mm}$, $h=5 \text{ mm}$, $c=0.25 \text{ mm}$

Table 1 各種測圧孔の共振点 (実験値)

		$r=0$		$r=0.5 \text{ mm}$		$C=0.25 \text{ mm}$	
$g \text{ (mm)}$	$P_m \text{ (Pa)}$	$f_p \text{ (Hz)}$	M_p	$f_p \text{ (Hz)}$	M_p	$f_p \text{ (Hz)}$	M_p
$g=0$ $h=0$	50	7400	9.55	7900	9.30	7600	8.75
	100	7400	8.55	7900	8.50	7600	6.00
	200	7400	6.75				
$g=0.05$ $h=5$	50	5950	4.35	6500	4.34	5300	4.45
	100	5950	4.20	6500	4.15	6250	4.35
	200	5900	3.23	6450	3.80	6700	3.85
$g=0.1$ $h=5$	50	5400	4.83	6100	5.10		
	100	5400	4.44	6100	4.80		
	200	5400	3.70	6100	4.00		
$g=0.15$ $h=5$	50	5000	5.65	5500	5.90		
	100	5000	5.10	5500	5.28		
	200	5000	4.23	5500	4.60		
$g=0.05$ $h=2.5$	50			7400	7.85		
	100			7350	7.30		
	200			7350	6.05		

ただし、 γ は比熱比、 σ はプラントル数を表す。

受圧室に溝を設けた測圧孔の動特性は、通常
 の受圧室キャパシタンス C に溝のインピーダ
 ンス Z_i を並列接続した Fig. 12 の等価回路で表さ
 れるとすれば、全体の伝達関数は

$$G(j\omega) = \frac{P_2}{P_1}(j\omega) = \frac{1}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C + (1/Z_i)}} \quad (10)$$

微小な項を省略して、第1共振点に注目した
 形に書くと

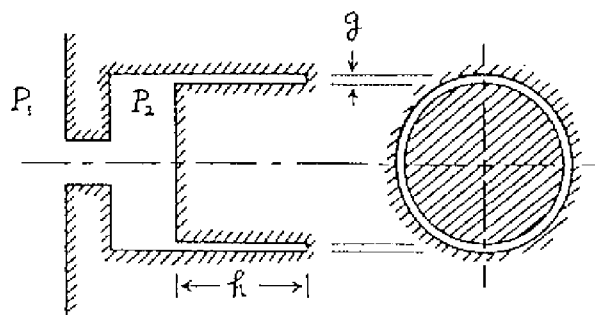
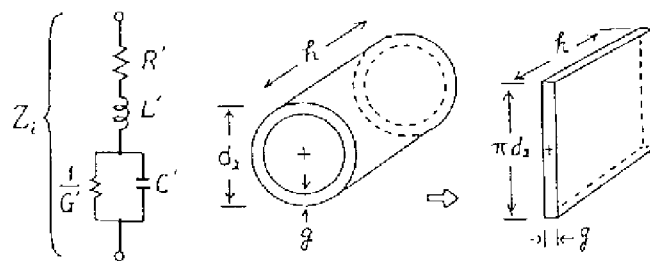


Fig. 10 環状溝つき測圧孔の概念図



(a) 溝のインピーダンス (b) 環状断面管路 (c) 等価矩形管路

Fig. 11 環状溝の模式図

$$G(j\omega) \cong \frac{1 - \omega^2 L' C' + j\omega(R' C' + L' G')}{\left[\begin{array}{l} 1 - \omega^2 LC \left(1 + \frac{C'}{C} + \frac{L' C'}{LC} - \omega^2 L' C' \right) \\ + j\omega \left\{ \begin{array}{l} RC \left(1 + \frac{C'}{C} - \omega^2 L' C' \right) \\ + (1 - \omega^2 LC)(R' C' + L' G') \\ + LG' \end{array} \right\} \end{array} \right]} \quad (11)$$

分母の虚数部において、第1項の R は振幅の影響を含む非線形抵抗であり、また、第2項の $1 - \omega^2 LC$ は第1共振点付近では小さいから、 LG' すなわち G' が線形の減衰に寄与していると考えられる。さらに式(9)からもわかるように G' は周波数が高くなるにつれて有効になり、「非定常の漏れ」を引起すものと見られる。

5. 理論と実験との比較

溝を付加した測圧孔の周波数応答について理論式(11)と、より高い周波数域まで測定した実験結果を比較する。 L, R, C は式(5)を用いる。ただし溝のインピーダンスは先述の式を若干補正し、 R' と C' は1.4倍、 G' は3倍にして計算した。

Fig.13は溝幅が0.05 mmのときの結果である。この狭い幅は実際にはかなりの製作誤差をもつ可能性がある。振幅比は12000 Hz程度までは理論と実験が良く一致しているが、より高い周波数において実験でははっきりしたピークが出ない。一方、位相はそこでも良く一致している。

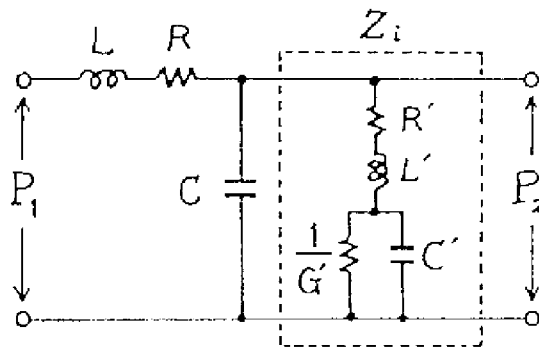


Fig. 12 環状溝つき測圧孔の等価回路

Fig. 14は溝幅を0.1 mmに広げた場合であり、実験でも高周波数に顕著なピークが現れる。幅を0.15 mmにすると更にこの傾向が大きくなる(Fig.15)。よって溝幅を開け過ぎると減衰効果が期待できないばかりでなく、振幅比の第2共振と位相のピークが鋭くなって望ましい特性が得られないことがわかる。

6. 結 言

測圧孔の受圧室外周に狭く深い溝を設けることによって、固有周波数をさほど犠牲にすることなく、減衰と線形性がかなり改善できることを明らかにした。溝のかわりに同様の効果をもつ管状のものを付加する方法も可能で、溝の製作よりも容易と思われる。

溝による減衰の効果は受圧室キャパシタンスが小さいほど顕著に現れることが予想され、応答特性と負荷特性の改善等が目的で小容積の受圧室を採用するとき、この方法はいっそう有効と考えられる。

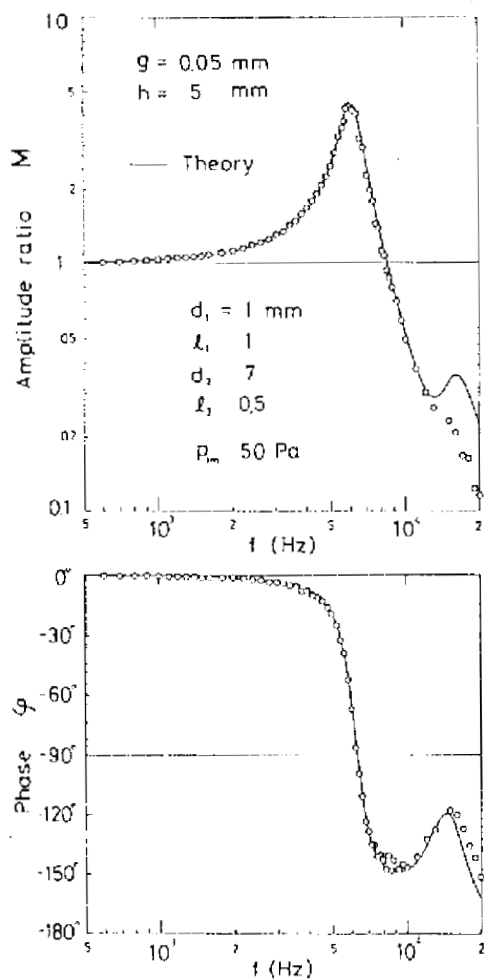


Fig. 13 理論と実験の比較 ; $g=0.05$ mm, $h=5$ mm

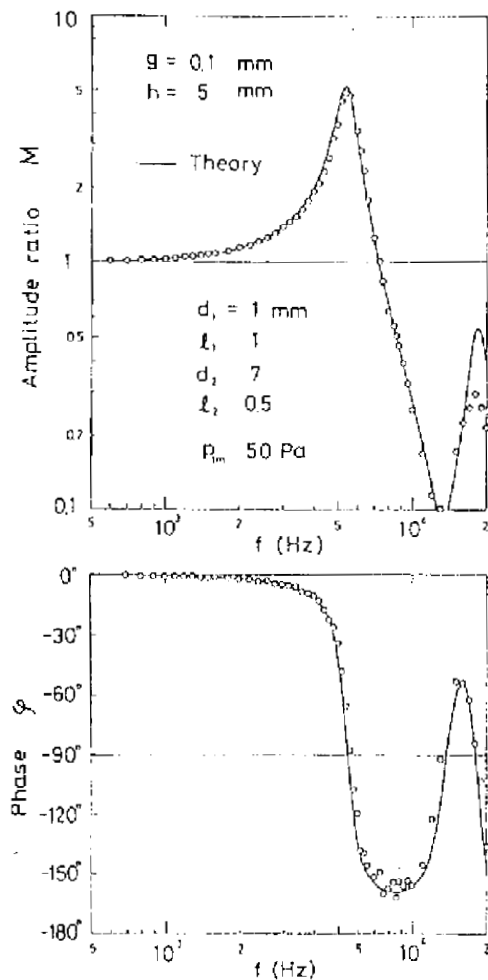


Fig. 14 理論と実験の比較 ; $g=0.1$ mm, $h=5$ mm

参考文献

- [1] 飯村, 石井, 畑中: 圧力測定孔の周波数特性と負荷特性, 計測自動制御学会論文集, 第22巻(1986), 296-302頁.
- [2] I. Iimura, A. Sato and H. Hatanaka: Dynamic Characteristics of a Pressure Sensor Mounted with a Very Flat Cavity, 3rd Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement, and Visualization (FLUCOME '91), San Francisco, 1991, pp. 61-66.
- [3] 佐藤, 畑中: 空気圧矩形管路の動特性, 東北大学高速力学研究所報告, 第38巻, 第366号 (1976), 77-94頁.

Fig. 15 理論と実験の比較 ; $g=0.15$ mm, $h=5$ mm →

