

貼付式小型示圧計

浅沼 強・高久有幹*・谷勝達哉

On an Adaptable Miniature Pressure Transducer

By

Tsuyoshi ASANUMA, Aritomo TAKAKU and Tatsuya TANIKATSU

Abstract: To analyse behavior of flow around a rotating or oscillating blade in turbomachine, the authors have developed a miniature pressure transducer using a pair of bulk semi-conductor strain gauge to measure the surface pressure on the blade or wall. The device, which is produced in the least size of $4\phi\text{mm}$ in diameter and $\sim 0.4\text{mm}$ in thickness to be adaptable easily and directly to an arbitrary spot on the moving surface, has high sensitivity... $\sim 2.5 \times 10^{-6}/\text{mmAq}$... and high response... $200 \sim 1,000\text{Hz}$... enough to permit measuring the fluctuating pressure on a rotating cylinder or oscillating blade surface.

This paper outlines construction and characteristics of the pressure transducer along with a few applications.

概 要

流体機械の回転翼または振動翼まわりの流れを解析するために、翼面上の表面圧を測定すべくバルク半導体ひずみゲージを用いた小型の示圧計を試作した。それは翼面上の任意の場所に直接貼付できるよう、外径 $4\phi\text{mm}$ 、厚さ 0.4mm という最小寸法につくられている。またこの示圧計は、回転円柱表面の変動圧を測定出来るにたりるだけの高感度 ($\sim 2.5 \times 10^{-6}/\text{mmAq}$) と高レスポンス ($200 \sim 1,000\text{Hz}$ の応答周波数) を持っている。本論文には示圧計の構造と特性の概要を示すと共に、若干の応用例がのべてある。

1. はじめに

流体機械の回転もしくは振動している翼面上の変動圧やターボ機械からの騒音などを、流れを乱すことなく測定することはきわめて重要である。たとえば、ヘリコプタのロータや軸流圧縮機の動翼などの周りの流れの挙動を明らかにするためには、それら翼面上の圧力分布などを測定しなければならない。また、気流騒音の発生機構を解明するためにも、翼後縁から放出される渦もしくは、その近くの壁面上の圧力変動を測定する必要がある。しかるに、従来の示圧計は、一般に、翼の内部に埋め込むか、ねじ込むかされており、その着脱はかなり困難である。よって任意の場所における装着の容易な、いわゆる貼付方式が便利であり、同じ趣旨の示圧計は、すでに試みられてもいる [1][2] ので、われわれもこれを採用するこ

* 東京都立烏山工業高等学校 (研究生)

とにした。そのためには、まず示圧計貼付のため座ぐりが必要であるが、翼面などの強度低下を招かないよう示圧計の厚さをきわめて薄く、たとえば 1 mm 以下に収める必要がある。また、局部圧力もしくは変動圧力を忠実に測定する上から、また曲率のある翼などに貼付することも考慮して、できるだけ小型に、たとえば外径 6ϕ mm 以下にすることが望ましい。空気機械の回転翼面上の圧力などを対象とすると、測定圧力の範囲は、10~100 mmAq と従来の示圧計のそれに比べてかなり低圧であり、十分な感度と直線性が必要である。さらに、振動翼まわりの非定常流れにおける変動圧やそれらからの騒音などを連続的に記録するには、十分高い応答周波数をもたねばならない。なお、対象とする流体機械では、あまり大きな温度変化は、予想されないが温度変化による感度特性が変わったり、零点ドリフトが著しいものでは困るので、温度補償を十分実施することが望ましい。言うまでもないが、NS 比が十分大きく、また、できれば外から加えるエネルギー（印加電圧）のできるだけ小さいことが望ましい。

以上のような要件を具備した貼付式示圧計という観点から、従来の示圧計を検討して見よう。従来よく使われている差動トランスもしくは、インダクタンスを利用する示圧計は、一般に、変動質量が大きいため小型化が困難である。他方、容量型示圧計は、大きさに制限がなければ、かなり微圧、たとえば 1/1,000 mmAq 程度まで測定できるといわれているが、外径 6ϕ mm、厚さ 1 mm 以下に収めることは今のところ不可能のようである。また、ピエゾ型示圧計は、Kistler を含め数多く作られている [3] が、いずれも外径 10 ϕ mm 以上で、圧力も 0.1 kg/cm² 以上と高圧のものばかりである。ただ、最近、模型表面上の圧力測定用として外径 5.1 ϕ mm のものも作られているが、長さが 15 mm 位とかなり長く [4]、また、貼付式示圧計として外径 10 ϕ mm、厚さ 3.8 mm で、低圧用 6 mmAq、応答周波数 1,000 Hz のものが試作されているが、われわれの要求に対し寸法が過大である [2]。このように、ピエゾ型示圧計の中にも外径 6ϕ mm 以下、厚さ 1 mm 以下の示圧計は、いまのところ見当らない。

次に、ひずみ抵抗型示圧計は、現在最も多く製作されており [5]、これは金属箔ひずみゲージと半導体ひずみゲージとに大別される。上記の主旨に沿う超小型示圧計としては、わずかに箔ゲージを用いた外径 6ϕ mm、厚さ 0.5 mm、定格圧力 2 kg/cm² の示圧計が市販されているようであるが [6]、測定圧力の範囲がかなり高いため、いまのところ利用できない。低圧測定用としては箔ゲージに比べ、ゲージ率のはるかに高い半導体ひずみゲージを用いる必要がある。これは、バルク型半導体、拡散型半導体および蒸着型半導体の三つに大別でき、それらのゲージ率は、それぞれ 60~170、100 以上、および 23~50 である。現在、拡散型半導体を用いた小型示圧計としては、たとえば外径 25 ϕ mm、厚さ 0.6 mm のもの [7] や外径 6.4 ϕ mm、厚さ 0.5 mm、重さ 0.25 gr、感度 1.5 mV/psia のもの [1] などが試作されている。しかし、一般に、シリコン基板が受圧膜を兼ねるため、その厚さを 40 μ 以下にすると衝撃あるいは振動などによって破損しやすく、いわゆる、もろい欠点がある。そのため低圧用として膜の薄いものの実用化には、かなり時間がかかりそうである。また、蒸着型半導体としては、たとえば金属面に酸化珪素で絶縁を施し、その上にゲルマニウム (Ge) を蒸着した体内圧測定用の小型示圧計（外径 2 ϕ ~3 ϕ mm）が作られている [8] が、いわゆ

るワイヤ型のため、そのまま貼付するわけにはゆかず、ゲージ率も低く、安定性もいまだ十分とはいえない。このほか、金属面の代わりに有機物フィルムに Geなどを蒸着した半導体フィルム(SFT)[9]や、高分子膜に Se または CdSeなどを蒸着した“heterode”など[10]は試作の段階であり、性能的には全く未知数である。また、最近音響用の感圧素子として開発された感圧トランジスタ[11]や感圧ダイオード[12]を用いたもの、また高分子フィルムの受圧膜を永久分極させた、いわゆる有機半導体のうち、とくにピエゾ抵抗効果を利用するもの[13]、さらに、ペイント状の感圧材を塗布して示圧計を構成させるもの[14](ただし、感度は極めて悪い)などの利用が将来は有望となるかも知れない。さらに、らせん状コイルのインピーダンスによる周波数変調を利用したテレメータ用の tonometer として外径 $2\phi\sim 6\phi$ mm、厚さ $1\sim 2$ mm という小型のものが試作されている[15]。また、“Conductor rubber”の抵抗変化を利用した外径 $1.5\phi\sim 5\phi$ mm という小型の示圧計(もしくはマイクロホン)も試作されている[16]。しかし、これらは、いずれもいまのところわれわれの目標とする貼付式示圧計にそのまま利用できそうにはない。

これに対し、バルク型半導体は、ひずみ出力の直線性や温度補償の点で、他の拡散または蒸着型半導体に比べ、やや劣っているが、ゲージ率が $60\sim 170$ と優れており微圧用として好適であり、しかもバルク半導体ゲージ自身が、すでに市販され容易に入手できる利点がある。なおバルク半導体を用いた小型示圧計としては、たとえば外径 5ϕ mm、厚さ 1.5 mm、または外径 3ϕ mm、厚さ 1.0 mm のもの[17]、また、 6.5×13.0 mm のプレート状で厚さ 1.2 mm のもの[18]などが試作されているようであるが、それらの構造や特性についてはもちろんのこと、それらを使用した実測例などもほとんど発表されていない。

よって、まず直線性や安定性のすぐれた箔ゲージを、ついでバルク半導体を使用し、受圧膜としては、燐青銅を用いることとし、測定圧力の範囲 $10\sim 100$ mmAq、外径 6ϕ mm 以下、厚さ 0.5 mm 以下を目標とする貼付式示圧計を試作した。さらに、これらの諸特性を明らかにするとともに、試作示圧計を円柱表面に直接貼付し、流水中において静止または回転時の円柱表面における表面圧もしくは変動圧を実測したところ、一応所期の結果が得られたので、ここに報告する。

2. 貼付式示圧計の構造

試作した示圧計は、図1に示すようなリング式とカプセル式の2種類である。これらの示圧計は前記の条件たとえば、受圧面の外径をできるだけ小さくするとともに、貼付容易な薄さをもち十分な感度をもたねばならない。そのためには、まず受圧膜の厚さ(δ)を薄くし、できるだけ小さいゲージを効率的に受圧面に配置することなどが必要である。受圧膜の材料としては、エポキシ樹脂、フェノール樹脂および燐青銅、ステンレス鋼などを用いた。しかし高分子材料はいずれも直線性に欠け、ヒステリシスが大きく、耐久性に乏しい。またステンレス鋼はひずみが小さく不適當なので、結局燐青銅を採用することにした。使用したひずみゲージは、表1に示すように銅とニッケル合金の金属箔とバルク半導体とであり、いずれも受圧膜に接着して使用する。そのため実際の受圧膜の厚さは、ゲージのベースと接着層の厚さ分だけ増加することになり、非接着の拡散型半導体(Wafer)に比べてゲージの伝達係数

表 1 供試ひずみゲージ

仕様	ゲージ	金属箔	バルク半導体				
			PN 1 型		PN 2 型		PP 2 型
			P	N	P	N	P
長さ (mm)	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	
幅 (mm)	1.0	0.3	0.6	0.3	0.6	0.2	
抵抗 (Ω)	~120	~60	~60	~120	~120	~120	
ゲージ率	~2.0	120±10%	-90±10%	120±10%	-90±10%	120±5%	
		~210		~210			

P.....{111}, N.....{100}

は低下する。しかし、受圧膜には弾性の高い燐青銅を使用したので、Waferなどに比べ膜厚(δ)を十分に薄くすることが可能であった。また、半導体ゲージの欠点である温度の影響を除くため複数ゲージによる温度補償の方法をとらねばならない。そのためゲージの寸法は、できるだけ小さいことが望ましい。さらに、受圧膜上に均等な圧力が作用する場合、一般に半径方向ひずみ(ϵ_r)に比べ、接線方向ひずみ(ϵ_t)の方が大きいから受圧膜の中心部において、接線方向ひずみの積分値が最大となる付近にゲージを配置するよう考慮した。

2.1 リング式示圧計

従来の示圧計は、リングに薄い受圧膜を半田または銀ろうなどで固定する構造(リング式という)を採用してきた。すなわち、図 1(a),(b)に示すように張力をかけながら燐青銅の受圧膜を真鍮性のリングに半田づけし、その膜の内面に2枚の箔もしくは半導体ひずみゲージを接線方向に接着する。受圧膜の反対側には、厚さ 80 ないし 100 μ の燐青銅の裏ぶた

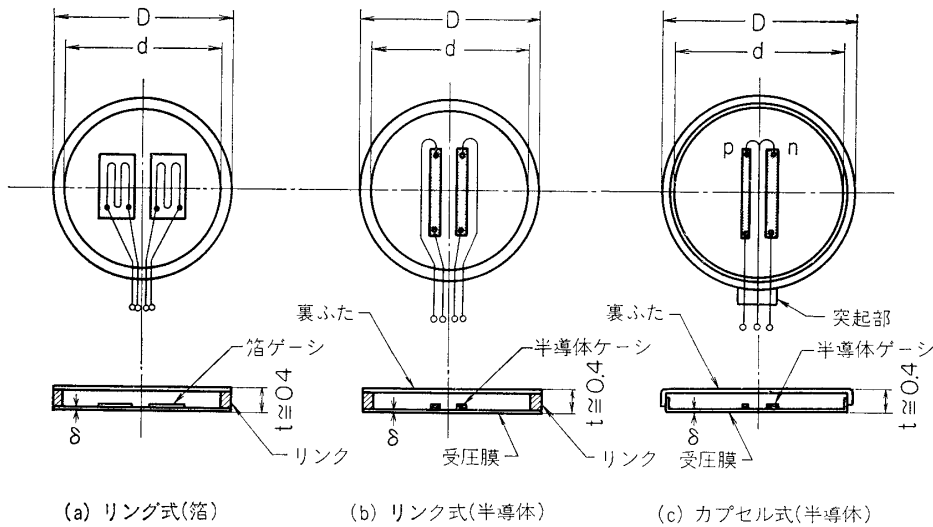
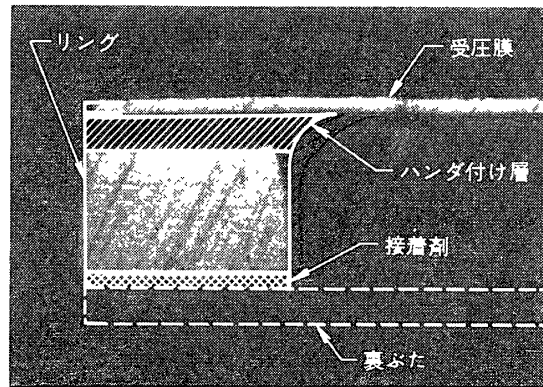
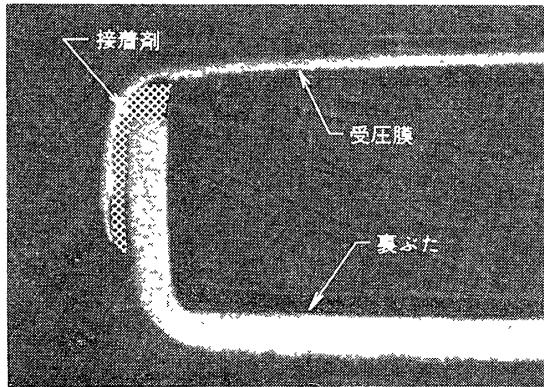


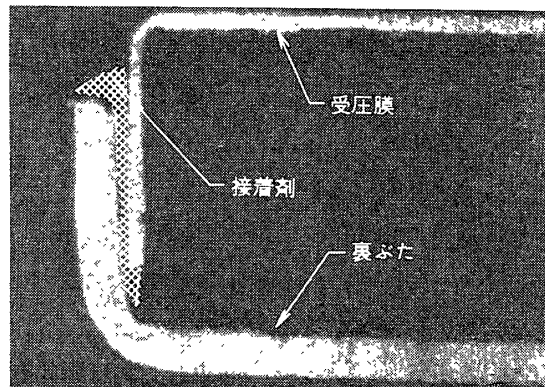
図 1 貼付式小型示圧計の構造



(a) リング式



(b) カプセル式(外側挿入型)



(c) カプセル式(内側挿入型)

図 2 受圧膜の固定状態を示す拡大断面 (倍率 80)

表 2 供試貼付式示圧計

型式	ひずみゲージ	外径 D mm	厚さ t mm	受圧膜の厚さ δ μ
リング式	箱	5 ϕ	0.4~0.5	40
		6 ϕ	0.4~0.5	20, 40, 80
		8 ϕ	0.5~0.8	40
		10 ϕ	0.6~1.0	40, 50
	半 導 体	6 ϕ (1)	0.4~0.5	40, 80
カプセル式	箱	5 ϕ	0.4~0.6	40
		6 ϕ	0.4~0.6	40
	半 導 体	4 ϕ (2)	0.4~0.5	30, 40

(注) (1) PN 2 & PP 2 (2) PN 1

を接着剤で固定する。また、ゲージからのリード線は、リングと裏ふたとの接合部に設けられた幅 0.2~0.3 mm の三角溝から外部に取り出す。リング式示圧計は、最初外径 10 φmm, 8 φmm ついで 6 φmm と逐次、小型のものへと試作してきたが、一応、径 6 φmm のものがその限度のようであり、これ以下になると、もはや均等な張力を受圧面にかけてながらリングに固定することは極めて困難となった。このようにリングに受圧膜を固定した部分の切断写真が図 2(a)であり、半田により固定することの困難さがよく判る。なお、試作したリング式示圧計の仕様は、表 2 に示してある。

2.2 カプセル式示圧計

これはプレスで碗状にそれぞれ成型された受圧膜と裏ふたとを図 1(c) のように組み合わせた、いわゆるカプセル構造のものである。受圧膜の内面には、リング式と同様に 2 枚のひずみゲージを接線方向に接着する。受圧膜と裏ふたとの組み合わせ方には、図 2 の (b), (c) に示すように受圧膜の中に裏ふたをそう入したものと、裏ふたの中に受圧膜をそう入したものがある。両者を試作試験した結果、前者は受圧膜の周辺固定が不完全であり、その彎曲部が損傷しやすいなどの欠点があるので、結局、後者の内側そう入型を採用し、受圧膜と裏ふたとの間には接着剤を塗布した。また、ゲージからのリード線は裏ふた周辺の一部を折り曲げた幅 0.5 mm の突起部において中継し、固定した上、外部に取り出している。この突起部は、示圧計出口におけるリード線の断線事

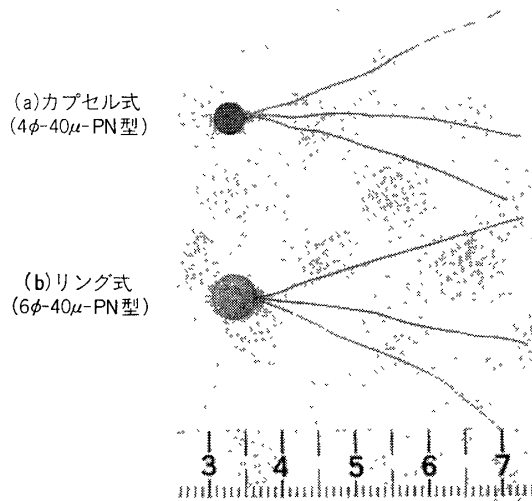


図 3 貼付式示圧計

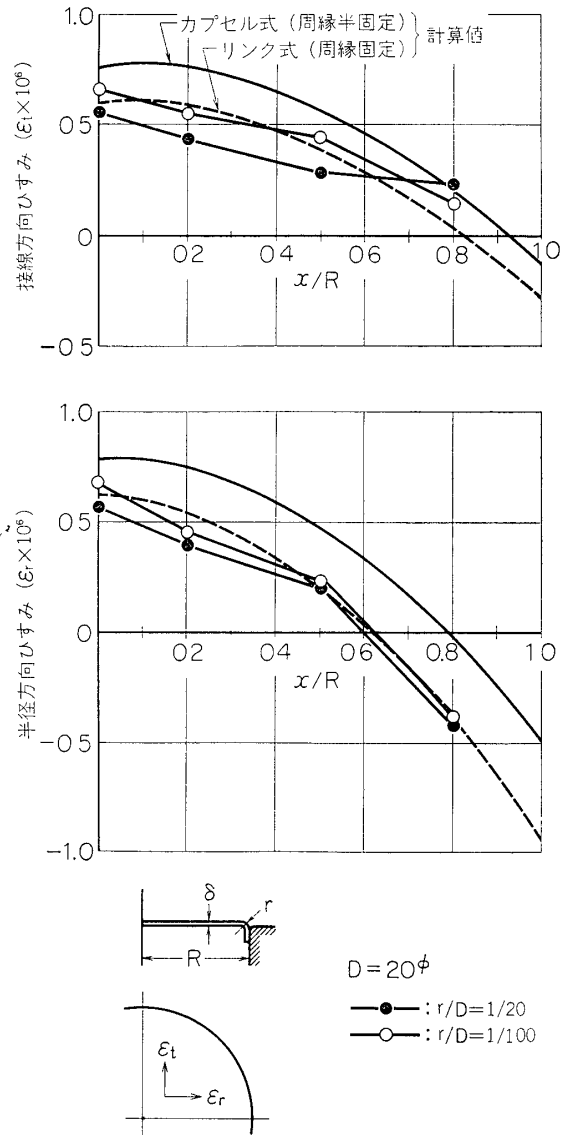


図 4 カプセル式受圧膜のひずみ分布

故を防ぐとともに、示圧計の位置決めをも兼ねている。

なお、カプセル式示圧計は、プレス成型によるため製作が極めて容易なばかりでなく、リング式示圧計に比べ、その外径や厚さなどをより一層小さく作ることが可能なので、貼付式示圧計としては最適の構造と思われる。表 2 に示すように最小寸法 $D \cong 4.0 \phi \text{mm}$, $t \cong 0.4 \text{mm}$ のものまでが製作可能であった。試作した示圧計のうち代表的な 2 つが図 3 に示してある。カプセル式を採用したもう一つの理由は、図 4 の計算値が示すように周縁固定のリング式に比べ周縁に曲率をもつ半固定のカプセル式のひずみの方が大きいといわれているからである [19]。これを確認する目的で、外径 $20 \phi \text{mm}$ の拡大したカプセル式模型についてひずみを実測したところ、受圧膜の曲率の影響はほとんど認められず、むしろ拡大模型の実測値は、いずれも周縁固定の計算値とかなりよい一致を示しており、カプセル式にすることにより感度が特に増大することは期待できないようである。しかし次節にのべるように、カプセルにすると別の理由から感度は増加していることがわかった。

3. 貼付式示圧計の特性

3.1 静特性

試作した貼付式示圧計の静特性は、一般にひずみゲージの不揃いや、その配置もしくは接着条件などによって、かなりのばらつきを示すものである。特にわれわれの試作した示圧計では、 $10 \text{mmAq} \sim 100 \text{mmAq}$ という低い圧力範囲の測定を目標にしているため、受圧膜厚さ (δ) をできるだけ薄くするとともに、弾性係数の小さい膜質のものとして燐青銅を選んだ。よって、まず受圧膜径を $D=10 \phi \text{mm}$ から $4 \phi \text{mm}$ まで、膜厚さ $\delta=80 \mu$ から 20μ まで変え、箔ゲージおよびバルク半導体ゲージ (PP および PN) を用いた表 2 に示すような示圧計を試作し、その特性を調べた。

静特性の測定に当たっては、長さ約 100mm 、外径 $6 \sim 9 \phi \text{mm}$ のベークライト管の先端に試作示圧計を取り付け、これを外径 $90 \phi \text{mm}$ 、高さ 75mm の密閉水槽内に差し込み、ここにかかるヘッド (水頭) をかえながら示圧計の指示を読んだ。このようにして示圧計の感度やその直線性、および零点ドリフトなどを測定した。

ここには、試作圧力計のうち外径 $6 \phi \text{mm}$ 以下の代表的なものにつき、受圧膜の厚さ (δ) やゲージの種類による静特性の比較が図 5 に示してある。図によると箔ゲージを用いる場合、感度の最もすぐれているのは、リング式の膜厚 $\delta=20 \mu$ の示圧計で、膜厚さが増加するにつれて、感度は低下している。しかし、逆にその直線性はよくなり、ばらつきも少なく、ドリフトもほとんど見られない。それゆえ感度は多少、犠牲にするとしても、受圧膜厚さとしては、 $\delta=40 \mu$ 程度が最適と考えられる。よって箔ゲージを用いた場合、同一外径 ($D=6 \phi \text{mm}$)、同一受圧膜厚さ ($\delta=40 \mu$) のリング式とカプセル式示圧計のひずみ出力 (ϵ) を比較すると、図から明らかなようにカプセル式の方がリング式に比べ約 1.3 倍すぐれていることがわかる。これは、同一外径の場合、リングの幅に比べてカプセル裏ぶたの厚さが薄いため (図 2 参照)、その分だけカプセル式示圧計の有効受圧面積が増大したためであろう。

次に半導体ゲージを使用する場合、最も感度のすぐれている組み合わせは、リング式の外径 $D=6 \phi \text{mm}$ 、受圧膜厚さ $\delta=40 \mu$ の PP 2 型のものであり、同じ外径の箔ゲージを用いた示

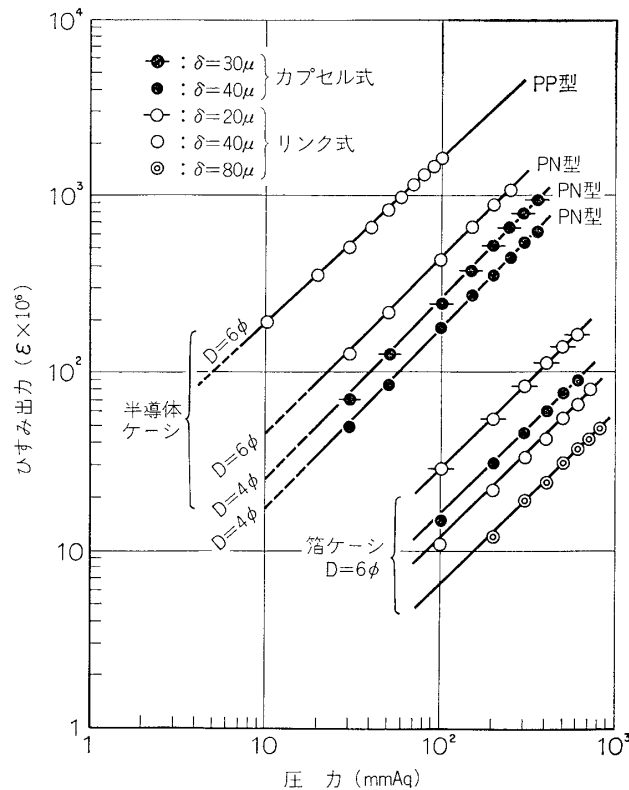


図 5 貼付式示圧計の静特性

圧計のひずみ出力に比べ 100 倍以上の値を示している (図 5 参照)。これは主として使用したバルク半導体ゲージのゲージ率が約 100 倍近くすぐれていることによるものである。しかしながら温度補償された PN 型の示圧計の感度は、PP 型に比べ、約 1/4 に低下しているが、試作示圧計感度のばらつきが少なくなり、概して安定である。このような利点からカプセル式示圧計はいずれも PN 型のバルク半導体ゲージを採用することにした。さらに、外径 $D=4.0\phi\text{mm}$ 、 $\delta=40\mu$ 、PN 型半導体を使ったカプセル式示圧計のひずみ出力は、当然低下しているが、それでも $D=6.0\phi\text{mm}$ 、 $\delta=40\mu$ の箔ゲージのリング式示圧計のそれに比べ、一桁以上すぐれていることがわかる。また、これら試作示圧計のひずみ出力の直線性は図 5 からわかるように、かなり広い圧力範囲にわたり良好である。最後に試作した貼付式示圧計の感度のばらつきを示そう。図 6 によると、箔ゲージの示圧計のばらつきは最も少なく、バルク半導体ゲージのそれはやや大きく、とくに最小径の $4\phi\text{mm}$ のものではばらつき幅が最も大きい。これはおもにゲージの配置や接着条件などが大きく影響したためと推測される。

試作示圧計の温度特性として、検定水槽の水温を 0°C から 80°C 前後まで変化させ、各水圧に対するひずみ出力や零点ドリフトを調べた。その代表例として、半導体ゲージのリング式示圧計 ($6\phi\text{mm}-40\mu\text{-PP2}$ 型) とカプセル式 ($4\phi\text{mm}-40\mu\text{-PN1}$ 型) の温度特性が図 7 に比較してある。図 (a) によると両示圧計感度の温度特性は、測定温度範囲にわたり、ほ

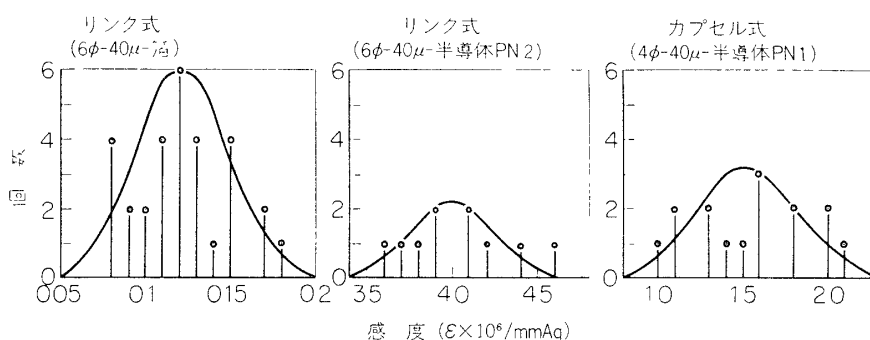


図 6 示圧計の感度のばらつき

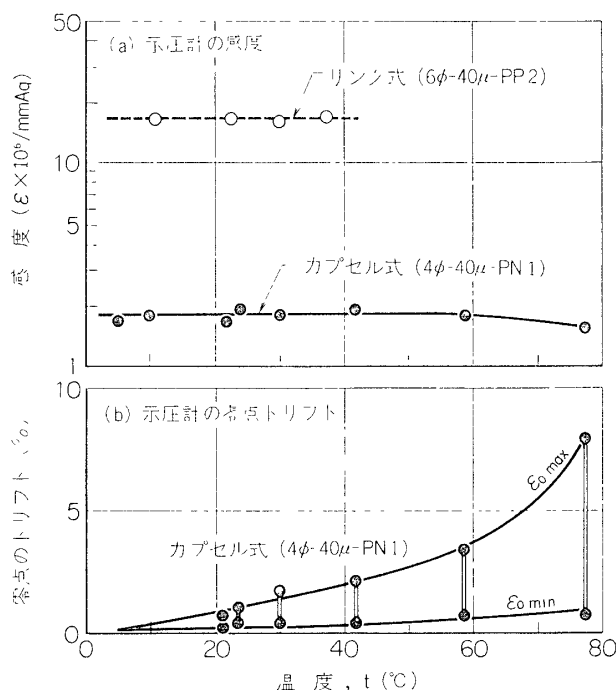


図 7 示圧計の温度特性

ば一定と見なして良いようである。またカプセル式示圧計では、図(b)に示すように温度上昇とともに零点のドリフトがかなりある。しかしカプセル式示圧計の定格ひずみ出力に比べると、零点ドリフトは数%程度であり、常温の流水中における以下の実験では、ほとんど影響ないものと考えてさしつかえない。

3.2 動特性

貼付式示圧計の動特性を求める目的で、周波数応答の実験を行ない、ひずみ出力の振幅変化と、十分高い周波数応答をもつ基準示圧計 (Kistler) との位相の変化を測定した。それに用いた実験装置は図8に示してある。発生した気泡を上部のコックから完全に排出するため、とくに油を用い、油槽は円錐型に作られている。また油槽の円錐壁面には試作示圧計と 130 kHz の固有振動数をもつ基準示圧計 (Kistler) を対称の位置に、装着してある。油槽の

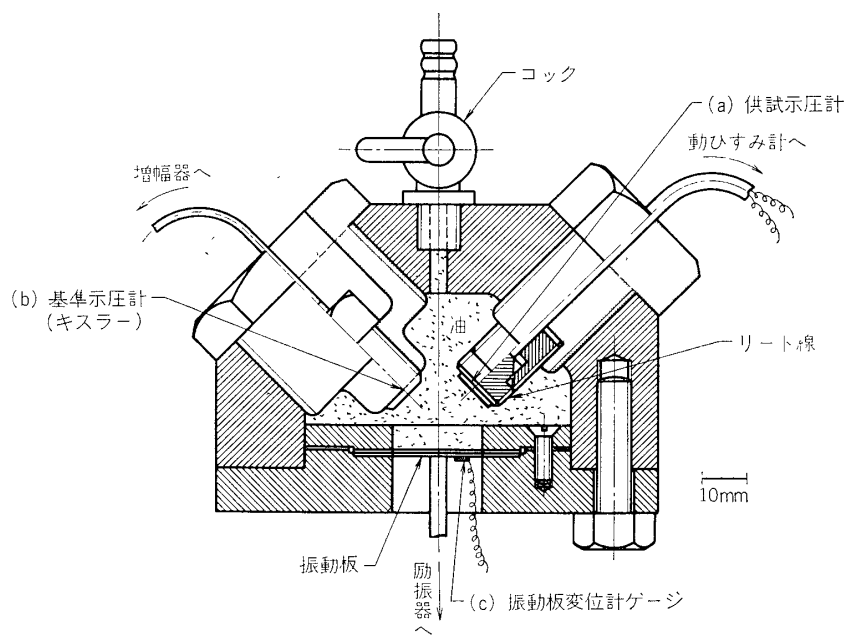
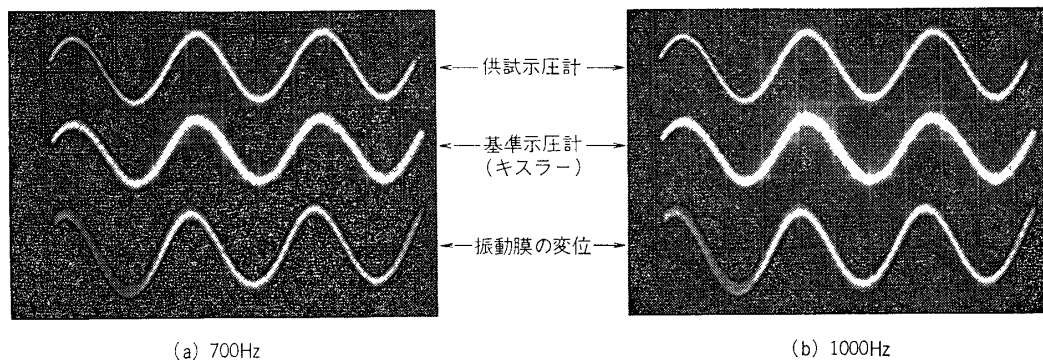


図 8 周波数応答のための装置



(a) 700Hz

(b) 1000Hz

図 9 カプセル式示圧計 ($4\phi\text{-}40\mu$, 半導体 PN1) の周波数応答

底部に取り付けてある振動板 (30 W の電磁式励振器で作動する) により, 1 Hz から 6 kHz までの周期的な圧力変化を両示圧計に均等に与えることができる. 試作と基準の両示圧計および振動板の変位を同時記録した一例が図 9 である. これらの波形から振幅の変化と基準示圧計に対する供試示圧計の位相差を求め図示すると図 10 のようになる. まずリング式示圧計の振幅比や位相差は, 1,000 Hz 近くまでほぼ一定であるが, カプセル式示圧計では振幅比は約 300 Hz, 位相差はすでに約 200 Hz 付近から低下しはじめている. これはリング式示圧計では, 受圧膜に一定の張力を加えながらリングに固定しているのに対し, カプセル式ではプレス成型時に加えた張力だけであり, 張力が不足し, しかも受圧面を裏ふた内にそう入固定しているため, 周辺固定の条件が半固定に近いためであろう. 感度が約 1.3 倍増大したカプセル式示圧計の応答周波数は, リング式に比べかなり低下し, 約 200~300 Hz になっている. したがって十分高い周波数応答を必要とする実験では, カプセル式示圧計には適用

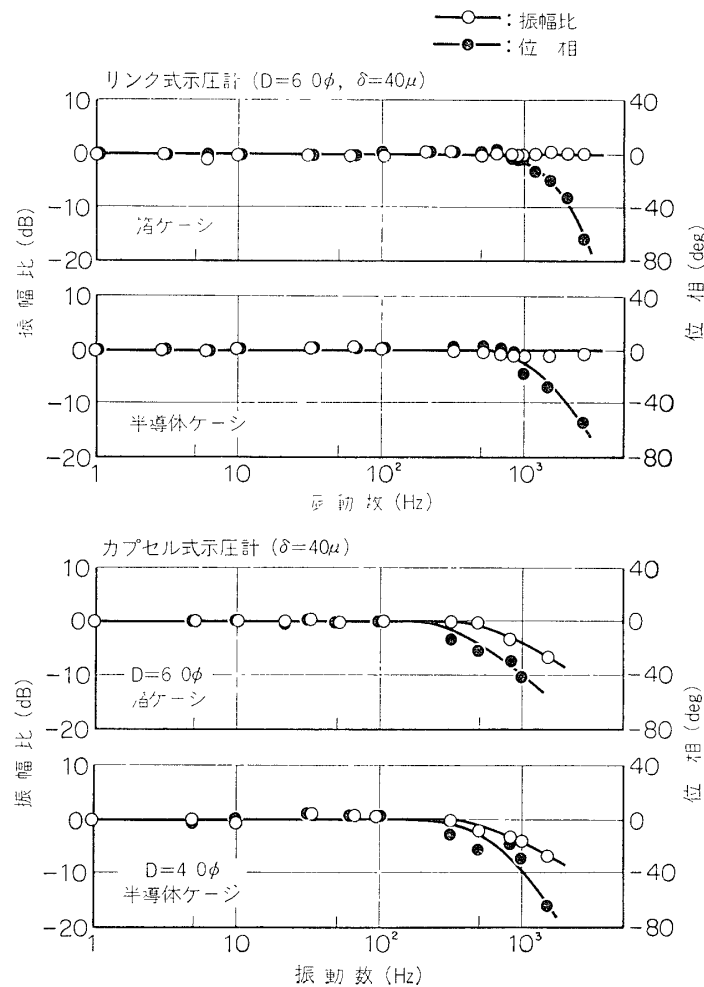


図 10 供試示圧計の周波数特性

限界のあることに留意しなければならない。

4. 円柱表面圧の実測

以上の検討により $\sim 10 \text{ mmAq}$ から 100 mmAq という低圧用貼付式示圧計として、 $D=6 \phi \text{ mm}$ 、 $\delta=40 \mu$ 、燐青銅バルク半導体ゲージ PN2 のリング式と、 $D=4 \phi \text{ mm}$ 、 $\delta=40 \mu$ 、燐青銅バルク半導体ゲージ PN1 のカプセル式示圧計とが最適であることがわかった。よって本報告では貼付式小型示圧計のうち、とりあえずリング式示圧計を貼付した円柱を、一様な流水中で静止もしくは回転させた時の表面圧およびその変動圧力を測定することにした。

4.1 静止円柱の場合

図 11 に示すように、回流水路の一部に設けられた幅 60 mm 、高さ 150 mm の水路 (Water Tunnel) 内に外径 $25 \phi \text{ mm}$ の円柱を水平におく。円柱表面には $\sim 0.6 \text{ mm}$ の座ぐりをほどこし、その中に $6 \phi \text{ mm}$ のリング式示圧計を一個貼付する。このリード線は円柱内部を通りスリッピングを経て、ひずみ計用増幅器に接続してある。まず水路内の流速 (U) を変え

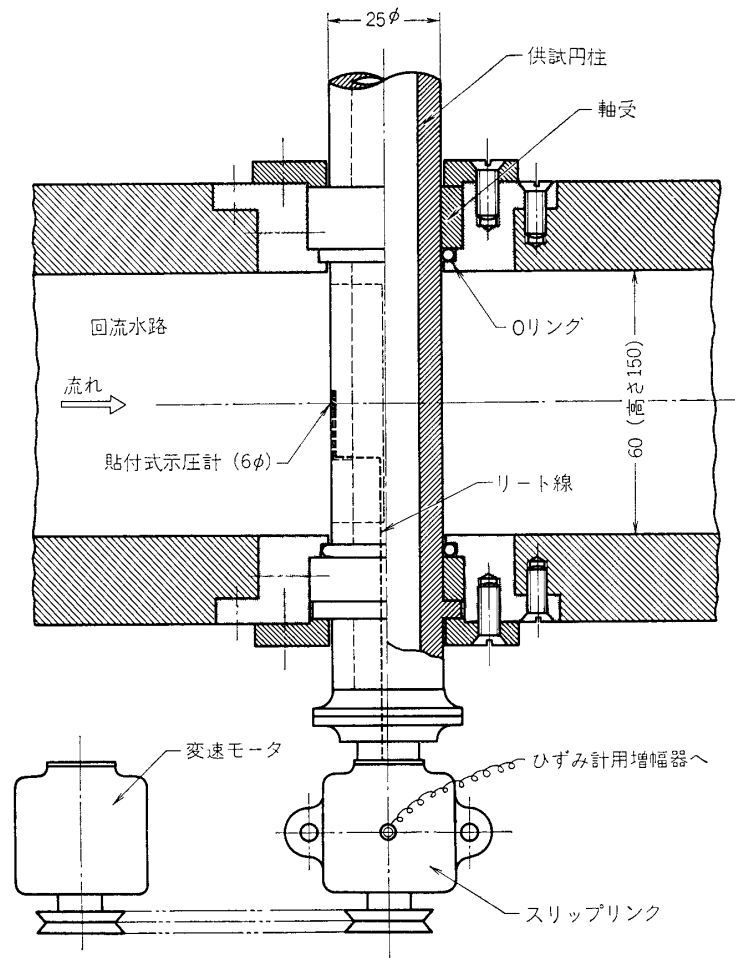


図 11 流水中の圧力測定装置

て円柱径 (d) を用いたレイノルズ数, $Re=U \cdot d/\nu$ を $(2\sim 4) \times 10^4$ の範囲に変える. このとき, 示圧計と流れ方向とのなす角 (θ) を 0° から順次, 変えながら静止水平円柱表面上の圧力を測定する. なおその回転角は角度目盛により直読することができる. 図 12 にはマンメータと供試示圧計によって測定された圧力分布の実測例が示してある. ここに圧力係数は, $C_p=(p-p_0)/(\frac{1}{2}\rho U^2)$ であり, p は円柱表面上の静圧, p_0 は円柱から十分, 離れた所の流れの静圧であり, だいたい, これらの差圧 Δp の範囲は $30\sim 250 \text{ mmAq}$ であり, 流速は $U=0.8 \text{ m/s}\sim 1.6 \text{ m/s}$ である. 図において, $Re=2 \times 10^4$ の場合, マンメータと示圧計による実測値を比較すると, $\theta=80^\circ\sim 110^\circ$ の範囲を除き, きわめて良い一致を示している. この角度範囲では流れが円柱面から剝離し, このようなばらつきを示すものとも思われる. また示圧計の受圧面が円柱の中心軸に対して完全に平行に貼付されていないことによる影響もあるだろう. さらに図には $Re=4 \times 10^4$ に対する実測値も示してある. このほかマンメータを使った A. Thom [20] および A. Fage & V. M. Falkner [21] および E. Achenbach [22] の実測値が比較のため記入してあるが, $\theta=60^\circ$ 以上では, 示圧計の測定値に比べかなり大きな値を

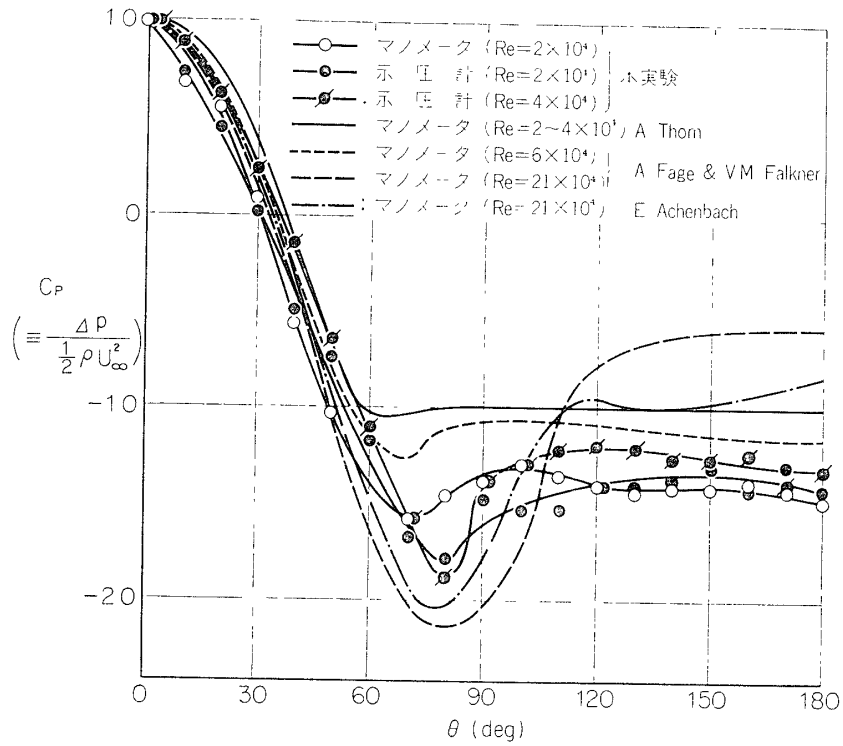


図 12 静止円柱の圧力分布の比較 (リング式, $6\phi-40\mu-PN2$)

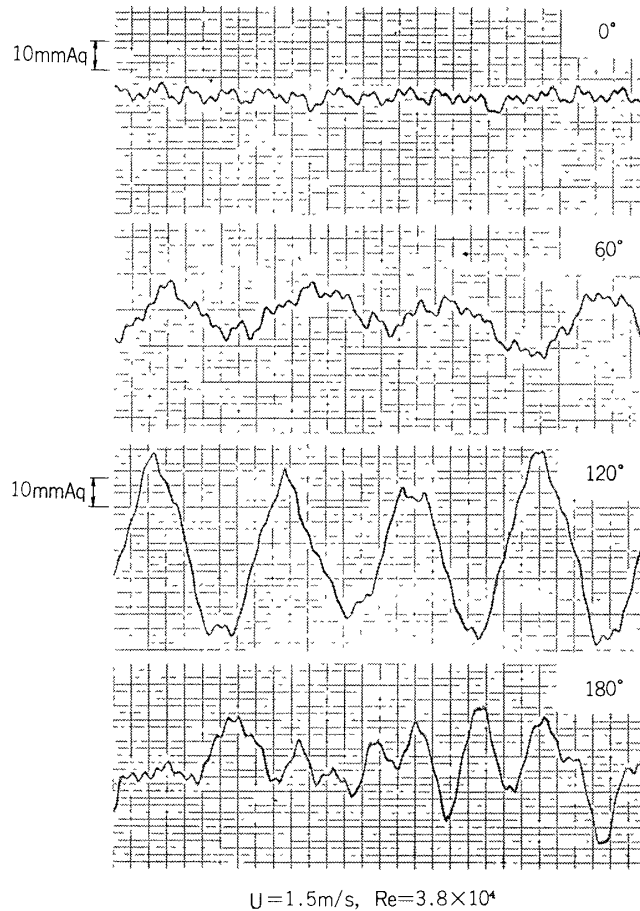


図 13 流水中における円柱表面の変動圧力の実測例 (リング式, $6\phi-40\mu-PN2$)

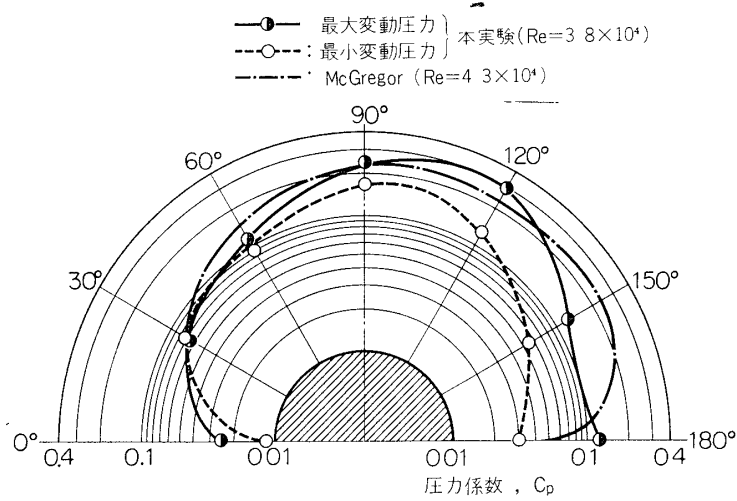


図 14 静止した円柱表面の変動圧力分布
(リング式, 6φ-40μ-PN2)

示している。しかし、円柱全般にわたる C_p の傾向はいずれもよい相似を示している。

次に静止円柱の表面上における変動圧の実測例を図 13 に、その結果を図 14 に示す。変動圧の著しいのはやはり $\theta=80^\circ\sim 120^\circ$ の範囲にある。図には参考のため、D. M. McGregor [23] の測定値が記入してあるが、この値は 1/3 オクターブバンドを用いて測定された変動音圧レベルであり、直接、両者を比較することはできないが、一応両者の間に相関のあることがわかる。

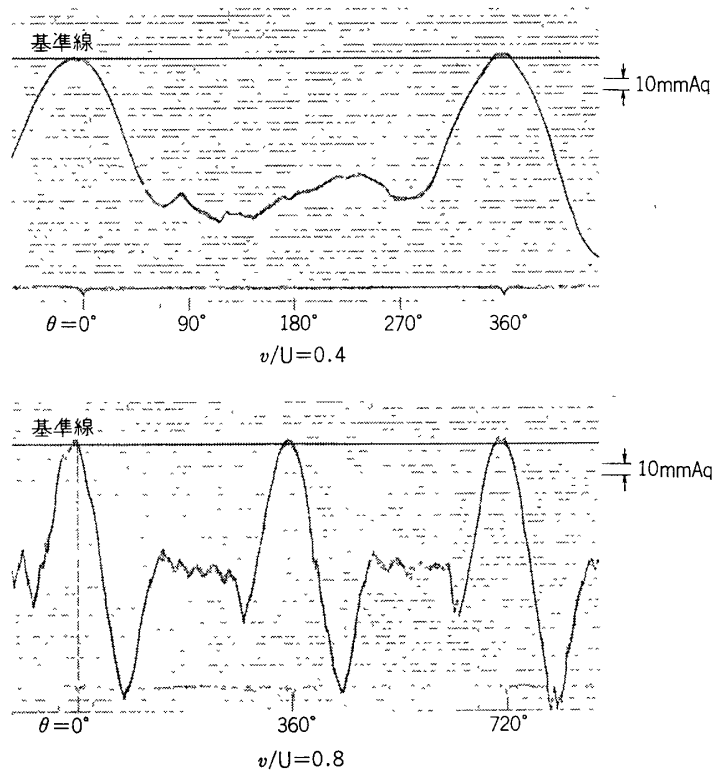


図 15 回転する円柱表面の静圧 ($Re=4 \times 10^4$)

4.2 回転円柱の場合

一様な流れの中におかれた供試円柱を、変速モータにより回転させる場合、示圧計からのリード線はスリップリングを経て増幅器へ連絡する。このさい流速 (U) と円柱の回転周速 (v) との速度比を $v/U=0.3\sim 1.0$ の範囲に変えながら、円柱表面に貼付した 6.0ϕ mm の箔ゲージの示圧計によって表面圧を測定する。 $Re=4\times 10^4$ の場合、速度比 $v/U=0.4$ と 0.8 の2つの場合につき測定した示圧計記録の代表例が図 15 に示してある。図によると、回転

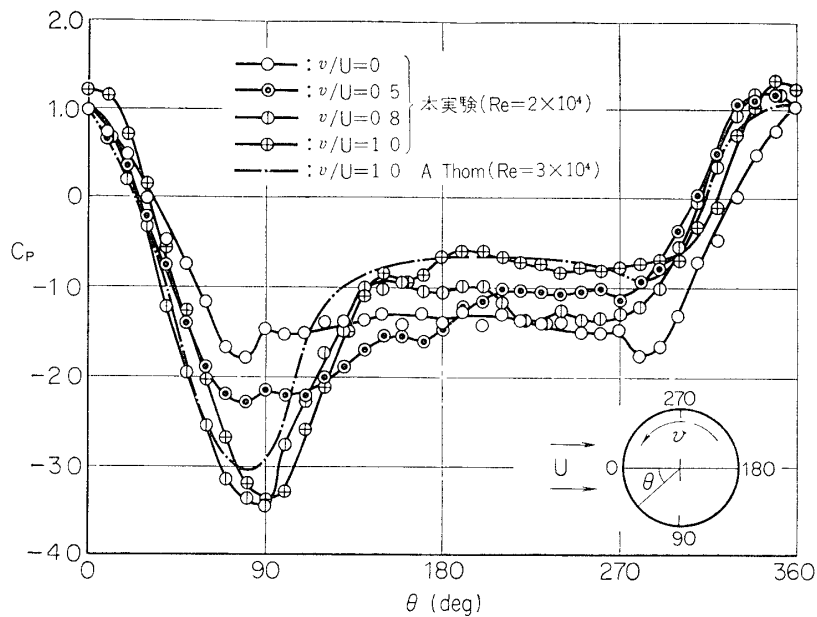


図 16(a) 回転する円柱表面上の圧力分布 ($Re=2\times 10^4$)

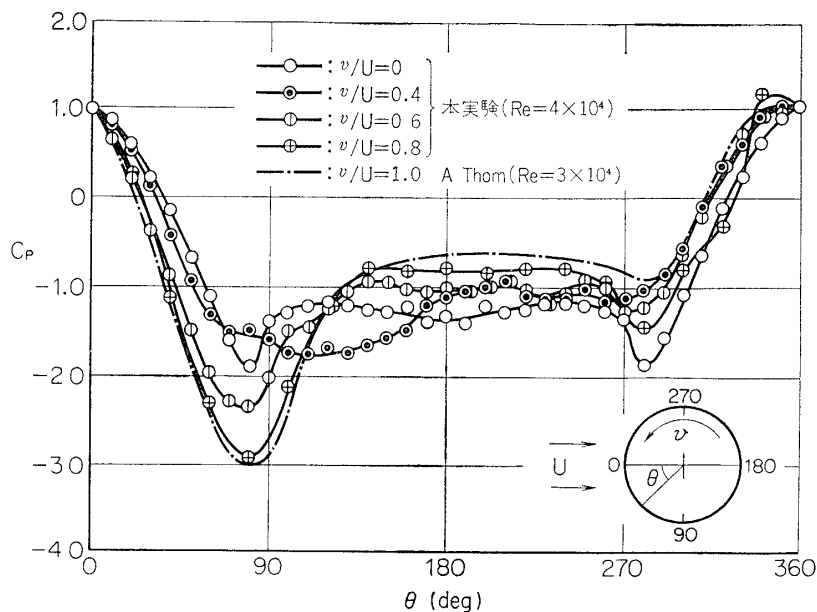


図 16(b) 回転する円柱表面上の圧力分布 ($Re=4\times 10^4$)

円柱の表面圧変化から円柱表面上の流れの模様を、たとえばはく離などを具体的に推定することができる。

これらの示圧計記録から、 $Re=2 \times 10^4$ および 4×10^4 の場合、速度比を変えた時の圧力係数 (C_p) を求めると図 16 のようになる。図 (a), (b) いずれも速度比を速くすると、 $\theta=90^\circ$ 前後における C_p の最低値は、順次小さくなるが、 C_p の全円周に対する傾向は、大体相似である。そして、これらの傾向は A. Thom [24] ($Re=3 \times 10^4$) の $v/U=1.0$ に対する実験値とも定性的にかなり良い一致を示している。またレイノルズ数が高くなると、当然のことながら C_p の最低値を生ずる角度が $\theta=90^\circ$ から 80° へ進むこともよくわかる。

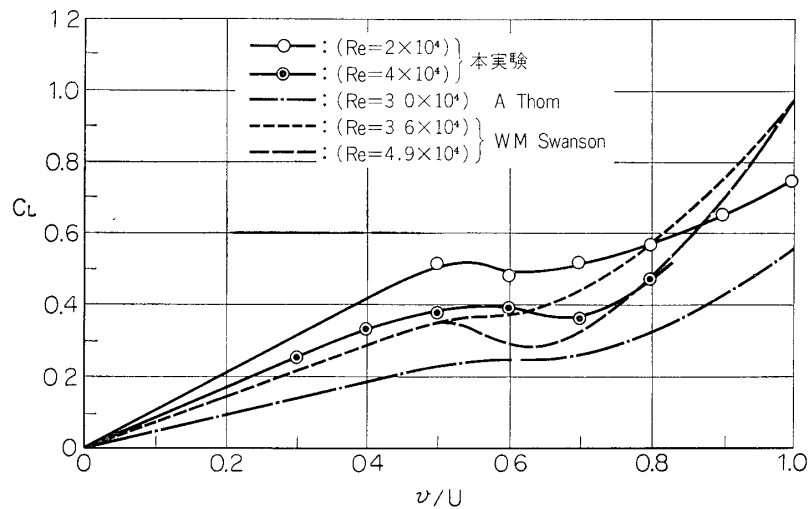


図 17 回転円柱の揚力係数

最後に、これら回転円柱に働く圧力係数から定常な揚力係数 (C_L) を求めると図 17 のようになる。図において、レイノルズ数が増加すると C_L の値は全般的に小さくなっている。また速度比が $v/U < 0.5$ の場合は、 C_L の値は v/U に対しほぼ直線的に変化しているが、 $v/U > 0.5$ になるといったん C_L の値は低下し、0.7 あたりからふたたび増加の傾向を示している。図には A. Thom [24] および W. M. Swanson [25] の実測値が比較してあるが、われわれが求めた実測値と比べ定性的な傾向は極めてよい一致を示している。

5. ま と め

被測定物の表面上に直接装着できる示圧計を用いて局所的な表面圧を測定する目的から、小型で薄く貼付容易な、しかも低圧用示圧計を試作した。それらの特性を調べるとともに、応用例として円柱に貼付してその表面圧の測定を行なった。これらを要約すると次のようである。

(1) いまの所、貼付式示圧計として、作りうる最小外径は $D \cong 4.0 \phi \text{mm}$ であり、その最小厚さは $t \cong 0.4 \text{mm}$ 程度である。

(2) 示圧計の受圧膜としては、ひずみ出力の大きなものが好ましいが、感度のほかにひ

ずみ出力の直線性、動特性ならびに耐久性などの観点から、金属膜、なかでも燐青銅などがすぐれている。またその厚さは特に安定性や耐久性の点から燐青銅の場合、 $\delta=40\mu$ あたりが最小限界のようである。

(3) 示圧計の外径を小さくすると、その自乗に比例して感度は低下する。それゆえ、ひずみゲージとしては、金属箔ゲージに比べて2桁も高い感度を示すバルク半導体を使用すべきであろう。

(4) 従来のリング式示圧計では、最小外径が $6.0\phi\text{mm}$ あたりが限界のようであるが、成型、組立等が容易なカプセル式示圧計にすると、それほど感度を落すことなく、外径を $4.0\phi\text{mm}$ 程度までつめることが可能である。

(5) このようにして作った貼付式示圧計を円柱表面に貼付し、静止円柱の表面上の圧力分布を測定した。これはマンメータによる測定値とかなりよい一致を示すとともに、同様な他の実験結果とも定性的にはよく一致している。

(6) 速度比を変えながら円柱を回転させて、表面圧を直接測定した。これらの C_p の値は特にマンメータによりストロボ式に測定したA. Thomの値とよい相似を示した。さらにこれらの実測値(C_p)から求めた揚力係数(C_L)の値は、W. M. Swansonらの実測値と定性的な傾向はよい一致を示した。

以上により、試作した貼付式示圧計によって、一応回転する物体の表面圧を直接、測定できることがわかった。なおカプセル式示圧計($4\phi\text{mm}$)を、振動する翼面上に多数貼付したときの実験結果については、近く報告する予定である。

1972年12月15日 原動機部

参 考 文 献

- [1] J. Easton: Instrumentation Technology, 14-4 (1967-4), 57
- [2] R. C. Jenkins & H. B. Hopkins: The Review of Scientific Instruments, 35-12(1964), 1684
- [3] H. N. Norton: Instruments & Control Systems, 36-2 (1963-2), 83
- [4] R. Hofland & H. S. Glick: The Review of Scientific Instruments, 40-9 (1969), 1146
- [5] H. N. Norton: Instruments & Control Systems, 36-3 (1963-3), 85
- [6] (共和) ネルソン・アレン・クリテス 特許公報, 昭 42-20917
- [7] O. N. Tufte, P. W. Chapman & D. Long: J. of Appl. physics, 33-11 (1962), 3322
- [8] 酒井ほか 電気学会誌, 86-5, No. 932 (1966)
- [9] 小山富士夫ほか・電子材料, 8-11 (1969), 20 または渡辺ほか 電気学会誌, 87-2, No. 941 (1967), 176
- [10] 鳩山道夫 計測と制御, 10-2 (1971), 102
- [11] 金沢女矩ほか 日本音響学会誌, 28-6 (1972), 275
- [12] 山下睦夫 電子材料, 8-11 (1967), 123
- [13] 松本正一 電子通信学会誌, 55-3 (1972), 397
- [14] D. B. Clark. Instruments & Control Systems, 36-2 (1963-2), 93
- [15] C. C. Collins IEEE Trans. Bio-Medical Engg., BME 14-2 (1967), 74
- [16] B. S. Massey & I. Kurak. J. Sci. Instruments, 43-8 (1966-8), 569

- [17] 知久, 五十嵐: 自動車技術, 18-9 (1964), 706 または 五十嵐: 計測と制御, 5-2 (1966), 89
- [18] Dynascience, Co. Biosystems division. Catalogue Model 1017-0019 (1971), "Implantable blood pressure transducer"
- [19] R. A. Clark: J. of Mechanical physics, 29-3 (1950), 146
- [20] A. Thom: R & M, No. 1082 (1926), 66
- [21] A. Fage & V. M. Falkner: R & M, No. 1369 (1931), 186
- [22] E. Achenbach: J. Fluid Mech, 34-4 (1968), 625
- [23] D. M. McGregor: UTIA Tech. Note, No. 14 (1957)
- [24] A. Thom: R & M, No. 1018 (1926), 82
- [25] W. M. Swanson: J. Basic Engg., 83-3 (1961), 461