



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	新しい圧電素子を使用したエンジン指圧計の試作について
Author(s)	吉川, 弘明; Kikkawa, Hiroaki; 村山, 正 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 53, 77-93
Issue Date	1969-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40937
Type	departmental bulletin paper
File Information	53_77-94.pdf



新しい圧電素子を使用したエンジン 指圧計の試作について

吉川 弘 明*

村山 正*

深沢 正 一*

(昭和43年11月30日受理)

On a Few Trials of an Engine Pressure Indicator using a New Piezo Element

Hiroaki KIKKAWA

Tadashi MURAYAMA

Shoichi FUKAZAWA

(Received November 30, 1968)

Abstract

Pressure indicators which have a high performance are frequently required for studying the combustion phenomena of an engine.

Indicators such as strain gauge types or quartz types have been used commonly.

However, the later type is lacking in mechanical strength and in maintaining an electric charge, and the former is not sufficiently sensitive and is not built for durability. Some kinds of piezo electric elements with excellent characteristics over those of quartz have been developed recently. They are, for example, $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}, \text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 - PbZrO_3 . Engine pressure indicators using such elements were made and their characteristics were investigated in this paper. As a result, they were found to have superior properties.

目 次

緒 言	78
1. 指圧計に要求される各種特性について	78
A. 圧力特性	78
B. 温度特性	78
C. ノイズ特性	79
D. 実際に使用する上での諸問題	79
2. 圧電素子の特性について	79
2.1 圧電素子の等価回路	79

* 機械工学科 熱機関学第二講座

2.2 各種圧電素子の比較	81
3. 供試指圧計および増幅器の諸特性について	82
3.1 供試指圧計および増幅器の諸元	82
3.2 静的圧力特性	83
3.3 動的圧力特性	84
3.4 静的温度特性	86
3.5 動的温度特性	87
3.6 ノイズ特性	88
3.7 実際に使用する上での諸問題	89
4. 指圧波形の測定例	90
結 言	92
文 献	93

緒 言

内燃機関の燃焼上の諸問題をとりあつかう場合に、性能の良い指圧計が必要となる。現在、エンジン指圧計としては、水晶を素子とする圧電形指圧計、あるいは、抵抗線歪計形の指圧計がひろく実用されている。しかし、水晶をその素子とするものは、水晶の機械的強度や電荷の漏洩などに関して、問題があり、抵抗線歪計式のものでは、感度が小さいこと、ゲージの耐久性などに関して若干の問題がある。

最近、各種のすぐれた特性を持った圧電素子が開発されつつあり、水晶よりもはるかにすぐれた特性を持つジルコンチタン酸鉛や PCM 形の圧電素子が得られている。そこで、このような素子を利用したエンジン指圧計を試作し、その諸特性について研究を行ない、すぐれた特性を持つエンジン指圧計を得ることができた。以下その結果について報告する。

1. 指圧計に要求される各種特性について

A. 圧力特性

静的圧力特性 指圧計の受圧膜に加えられる圧力が、圧力較正時のように、静的圧力の場合、つぎに示すような特性が要求される。

- i) 高感度であること
- ii) 直線性がすぐれていること
- iii) ヒステリシスがでないこと

動的圧力特性 エンジンのシリンダ内ガス圧力の変動は、燃焼時において、ノックのない場合で 2~3 KHz、ノックが生じている場合には数 KHz 以上の周波数成分を有している。したがって、指圧計の固有振動数は数 10 KHz 以上であることが要求される。

B. 温度特性

静的温度特性 エンジン運転時において負荷などが変化した場合に、シリンダヘッドの温度はその熱容量が大きいために、比較的緩慢な変化をする。これが指圧計のネジ部から受圧

膜，起歪筒を通して起歪筒内の感圧素子に影響をおよぼしたり，あるいは，受圧膜や，起歪筒自体に歪を与えたりするために，零圧力レベルを維持することが困難となり，さらには，感度，直線性，ヒステリシスなどの特性にも影響をおよぼすことが考えられる。

したがって，指圧計に対しては，以下に示すような特性が要求される。

- i) 零圧力レベルの変動が少ないこと
- ii) 感度，直線性，ヒステリシスの温度による影響が少ないこと。

動的温度特性 エンジンシリンダ内のガスは，負荷，回転速度などに応じた広範囲の温度変化を示す。そこで，熱容量の小さい指圧計の受圧膜がこれに応答し，起歪筒間の予圧力の変化を招き，その結果として零圧力レベルの変動を生ずるので，この影響を少なくすることが要求される。

C. ノイズ特性

指圧計は，激しく振動しているシリンダヘッドにとりつけて使用される。そして，指圧計がとりつけられた周囲には，たとえば，点火栓のようなノイズ発生源があり，また，多くの場合，他の電気系統も接近している。したがって，これらの機械的，あるいは，電気的ノイズが信号対雑音の比を低下させるものと考えられるが，このような影響をなるべく受けないことが要求される。

D. 実際に使用する上での諸問題

実際に使用する場合には，以上に述べた基本的な特性の外に，

- i) 耐湿性がすぐれていると
- ii) 経時変化が少ないこと
- iii) 耐久性がすぐれていること
- iv) 小形堅牢であること

の諸特性を満たすことが要求される。

2. 圧電素子の特性について

2.1 圧電素子の等価回路

いま，素子に加わる圧力が振動している場合，および，一定時間一定圧力を保つような場合の出力電圧などを等価回路を用いてあらわすと 図-1 のように表わされる。

したがって，出力電圧 E_0 (V) は (1) 式あるいは (2) 式のよう表わされる。

$$E_0 = \frac{C_i}{C_i + C_0} \frac{E_i}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega R(C_i + C_0)} \right)^2}} \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

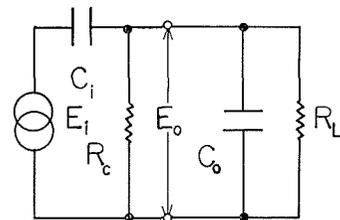
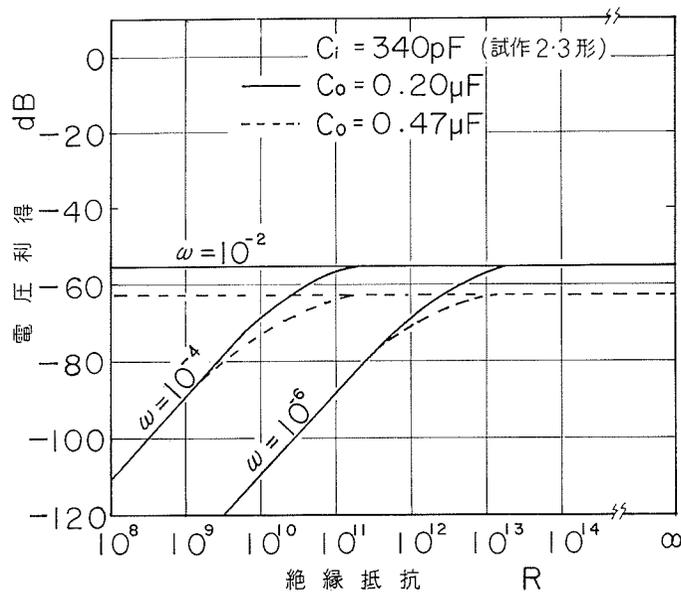


図-1 圧電素子の等価回路

- ただし
- C_i (F): 圧電素子の容量
 - R_C (Ω): 圧電素子の漏れ抵抗
 - R_L (Ω): 負荷抵抗
 - C_0 (F): 接続線と負荷の容量の和
 - ω (rad/S): 角速度
 - τ (S): 時定数
 - d (C/N): 圧電定数
 - ϵ_s : 素子の比誘電率
 - θ (rad): 位相差
 - δ (m): 素子の厚さ
 - S (m²): 素子の電極面積
 - F (N): 力
 - $R = R_C \cdot R_L / (R_C + R_L)$
 - $E_i = d \cdot F / C_i$
 - $C_i = \epsilon_s \cdot S / \delta$
 - $\tau = R(C_i + C_0)$

この式において、振動圧力の周波数が高い場合には、負荷にかかる電圧 E_0 は主として容量 C_i および C_0 によって決まる。そして、これらの静電容量は電圧分路を形成し、電圧 E_0 は周波数に関係なく $E_i C_i / (C_i + C_0)$ で表わされる。

一方振動圧力の周波数が低い場合には、負荷にかかる電圧は、主として C_i のリアクタンスおよび C_0 と R_L の並列インピーダンスによって定まるので、電圧 E_0 は周波数に依存し、周波数の減少にしたがって減少する。



図—2 絶縁抵抗と利得の関係

さらに、一定圧力が加わった場合の出力電圧 E_0 は (2) 式で表わされる。

$$E_0 = \frac{C_i E}{C_i + C_0} \exp\left[\frac{-t}{R(C_i + C_0)}\right] \quad (2)$$

したがって、広帯域にわたる周波数特性を満たすためには、時定数 $\tau = R(C_i + C_0)$ が大きくなければならない。いま、 R によって時定数を変えた場合、 E_i と E_0 の関係を利得 (ただし、 $E_i = 1(V)$) で表わし、各角速度に対して示すと 図-2 の通りである。

一方、出力電圧を大きくするためには、素子の圧電定数 d の大きいことが必要である。

2.2 各種圧電素子の比較

まず、PCM 形素子について若干説明する。

PCM 形圧電素子の主成分は、マグネシウムニオブ酸鉛とチタン酸鉛およびジルコン酸鉛からなっていて、 $Pb(Mg_{1/3}, Nb_{2/3})_x Ti_y Zr_z O_3$ (ただし、 $x+y+z=1$) の化学式で表わされる。この基本組成の一部を置換ないしは微量の添加物を加えることによって、ジルコン酸鉛とチタン酸鉛の二成分系からなる圧電素子よりもすぐれた特性のものが得られる。すなわち、素子をエンジン指圧計として用いる場合、感度を著しく高めるため圧電定数が特に大きいものを用いたり、温度特性を改良するためにキュリー点の位置を変えたり、固有振動数を高くとるために弾性係数の大きいものを用いるなどして目的に応じた種々の指圧計が得られる。さらに、ジルコンチタン酸鉛のような製品のバラツキが少ないので特性の揃った指圧計が得られる。

ここで、これまで、エンジン指圧計用として、広く用いられている素子である水晶と試作 1 形に用いたジルコンチタン酸鉛、試作 2, 3 形に用いた PCM-5 形および、他の PCM 形素子の PCM-18, PCM-52 形素子のエンジン指圧計の特性を示すために必要な諸定数を比較すると表-1 のようになる。

まず、出力電圧に直接影響をおよぼす圧電定数 d について比較すると、ジルコンチタン酸鉛、PCM-5 形は水晶にくらべて、それぞれ 210 倍、190 倍であり、非常に大きく、特に PCM-18 形は 350 倍と著しく大きな感度を持っており、したがって、 S/N 比の向上も容易ににかりうることが明らかである。また、出力が大きいことから、負荷容量として大容量のものを用いるので、時定数 τ を一定としたときの R は小さな値となり、したがって、湿度が高くなっ

表-1 各種圧電素子の諸定数表

定数	種 類				
	Pb(Zr, Ti)O ₃ 試作 1 形	PCM-5 試作 2, 3 形	PCM-18	PCM-52	SiO ₂ 水 晶
圧電定数 (10 ⁻² C/N)	340	375	630	410	1.8
比抵抗 (Ω -Cm)	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹⁴
キュリー点 (°C)	320	326	180	262	550
弾性係数 (10 ⁶ kg/cm ²)	7.7	7.7	7.7	7.7	2.65
密度 (10 ⁻³ kg/cm ³)	7.7	6.4	10	6.7	88

場合などに生ずる，指圧計自体や増幅器入力側の絶縁抵抗の低下に対しても特別な注意を払う必要もなく，動的圧力測定時の精度が向上し，圧力の静的検定も容易になる。

キュリー点については，水晶を除いて，PCM-5形が最も高く，高温度の条件下で用いるのに適している。

さらに，指圧計の固有振動数に直接影響をおよぼす，弾性係数について比較すると，圧電磁器の内では，PCM-18形が最も大きな値を示しており，高い振動成分を含んだ測定を行なうエンジン指圧計に最も適している。

3. 供試指圧計および増幅器の諸特性について

3.1 供試指圧計および増幅器諸元

本研究に用いた供試指圧計のうち，試作した指圧計の構造は，それぞれ，図-3および図-4に示すようなものであり，また，これらの指圧計と，市販の抵抗線歪計形指圧計の諸元を表-2

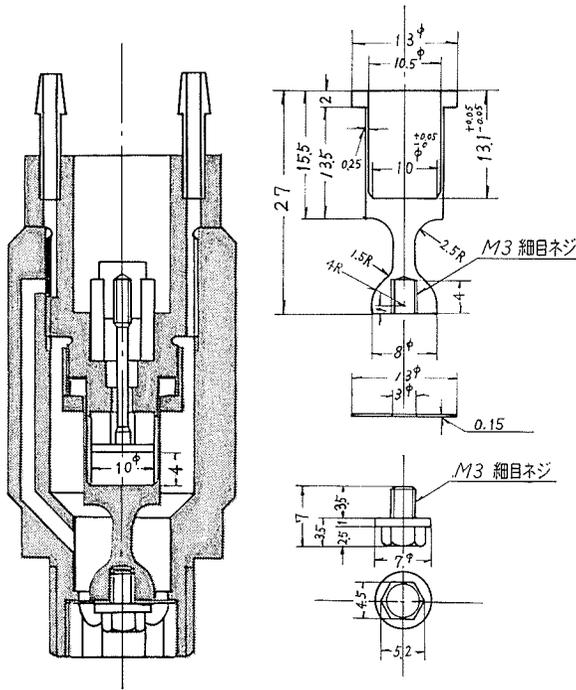


図-3 試作1形指圧計構造図

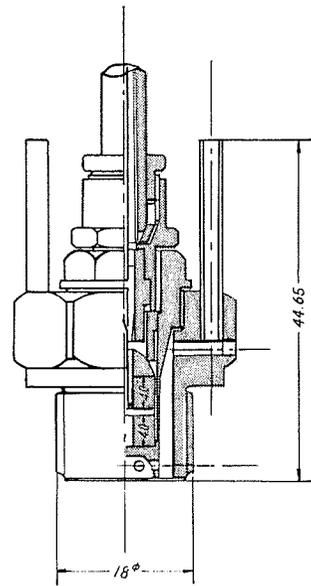


図-4 試作形指圧計構造図

表-2 各種指圧計の諸元

諸 元	形 式			
	試 作 1 形	試 作 2 形	試 作 3 形	抵抗線歪計形
測定圧力範囲 (kg/cm ²)	10	10	100	100
受圧膜の厚さ (mm)	0.15	0.15	0.2	0.15
起歪筒の厚さ (mm)	0.25	0.125	1.0	0.18

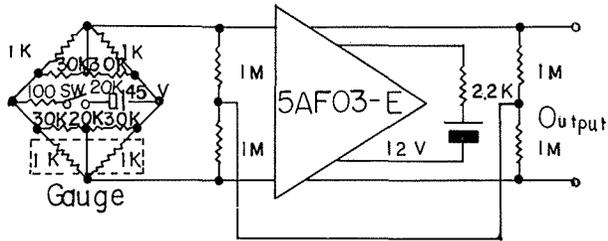


図-5 抵抗線歪計用増幅器

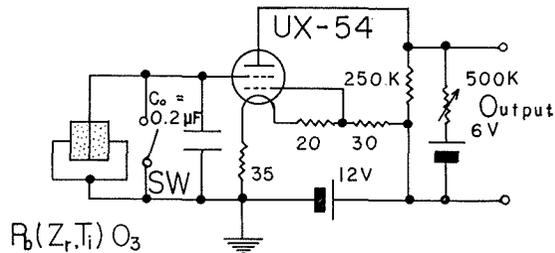


図-6 圧電気増幅器

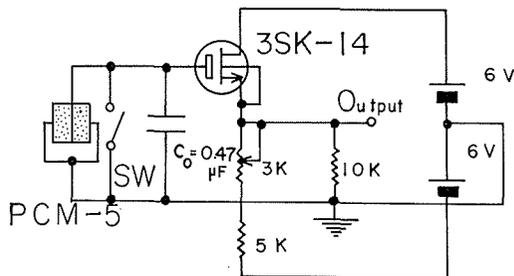


図-7 圧電気増幅器

表-3 各種増幅器の特性

	試作2, 3形用	試作1形用	抵抗線歪計用
周波数特性 (KHz)	0~100	0~5	0~50
増幅度 (dB)	-3	-1.4	24
入力インピーダンス (Ω)	10^{13}	10^{15}	4
出力インピーダンス (K Ω)	1.4	34.5	5.6以下
直線性範囲 (V)	0.2	1	1

に示す。なお、これに組み合わせて用いた増幅器は図-5~7に示すようなものであり、それぞれ、表-3に示すような特性を持っている。

3.2 静的圧力特性

図-8は、4種類の供試指圧計に、圧力計試験器によって一定圧力を加え、この時の増幅器出力を圧力に対して示したものである。

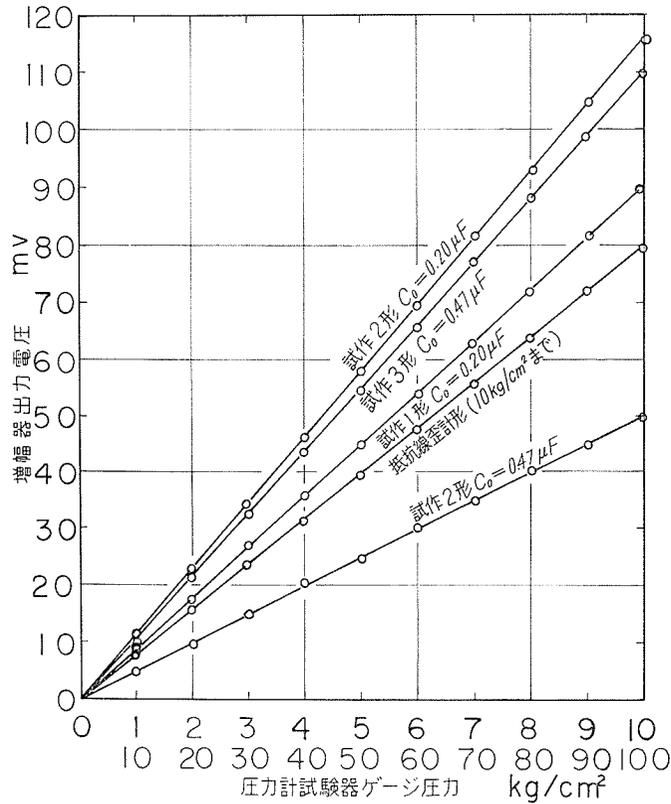


図-8 増幅器出力電圧と圧力計試験器ゲージ圧力の関係

まず、感度に関して、抵抗線歪計形のものでは、指圧計出力を40倍し、さらに、ブリッジ電圧としてゲージに対する許容電圧一杯の40Vを使用しているのに対して、圧電形のは負荷容量 C_0 により、指圧計出力をさらに大きくできる。

つぎに直線性に関しては、抵抗線歪計形、圧電形ともに実用上支障のない程度の直線性が得られ、また、ヒステリシスについても良好な特性が得られた。

エンジンにとりつけ、一定時間運転後さらに静的検定を行なったところ、感度、直線性、ヒステリシス、いずれも変化がなかった。

3.3 動的圧力特性

指圧計受圧膜に既知の入力振動圧力を加えて、その出力から系の伝達関数を求めることによって、指圧計の動的圧力特性を知りうるが、指圧計の応答が速いために、機械的入力を作ることは困難である。衝撃波管を用いて階段状の入力圧力を加える方法もあるが、ここでは、簡単のために、受圧膜上に鋼球を衝突させて入力を与え、この応答波形から直接、動的圧力特性を求める方法を用いた。

この場合に、インパルス応答から周波数特性を求める式(3)を用いて周波数特性を調べ、さらに、低周波発振器によって指圧計を電氣的に駆動し、この時の入力と出力の関係から動的

圧力特性を求める方法についても試みて、両方式の精度についての比較検討を行なった。

$$|G(j\omega)| = \left[\frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} \right]^2 \cdot T \cdot \left[\left(\sum_{n=1}^{\infty} g_n \cdot \sin n\omega T \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^{\infty} g_n \cdot \cos n\omega T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

- ただし $G(j\omega)$: 系の周波数伝達関数
 ω (rad/S): 角速度
 T (S): 分割周期 (2.23 μ S)
 n : 分割数 (200)
 g_n : $n \cdot T$ の点における応答

波形の振幅

写真-1~写真-3は、各指圧計にインパルスに与えたときの応答波形であり、これらの写真から各指圧形の固有振動数を求めると表-4に示すような結果となる。表に示すように、試作2, 3形の固有振動数は他の形式の指圧計にくらべて高い。なお、図-9は試作2形指圧計の周波数

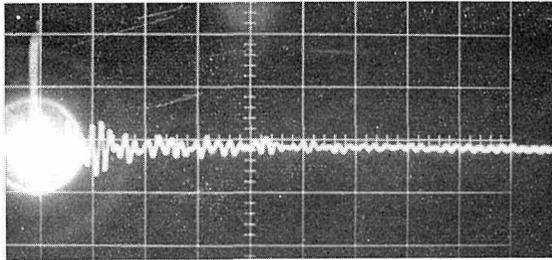


写真-1 抵抗線歪計形指圧計のインパルス応答波形 200 μ s/div

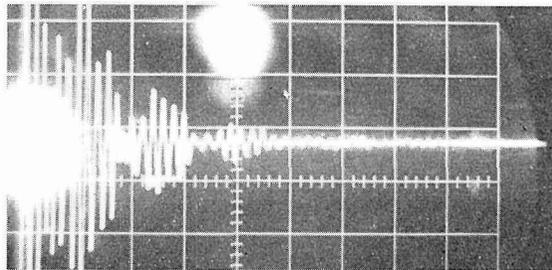


写真-2 試作1形指圧計のインパルス応答波形 200 μ s/div

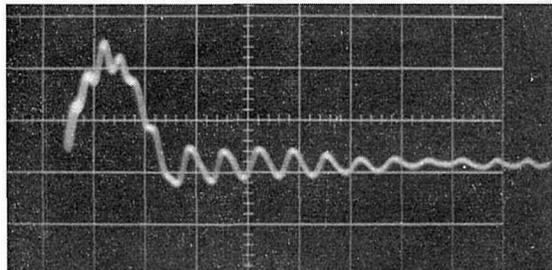


写真-3 試作2形指圧計のインパルス応答波形 50 μ s/div

表-4 各種指圧計の固有振動数

固有振動数 (KHz)	試 作 1 形	試 作 2 形	試 作 3 形	抵抗線歪計形
低 次	27	47	—	24
高 次	33	63	73	36

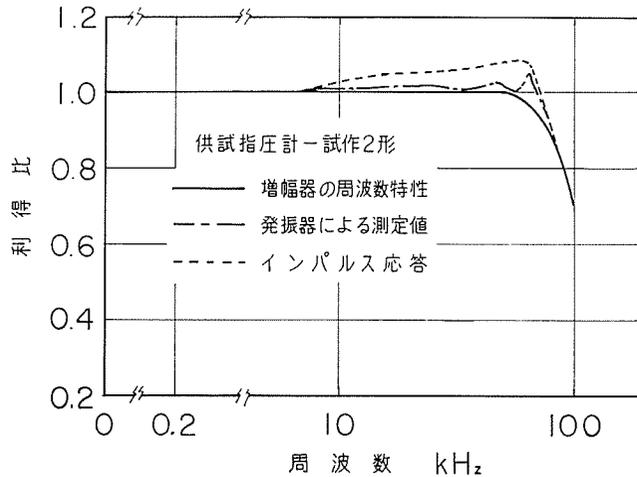


図-9 試作2形指圧計の周波数特性

特性を示すものであるが、図に示されるように、きわめて良好な特性を持っている。ただし、縦軸は $|G(j\omega)/G(j0)|$ にとってある。

3.4 静的温度特性

指圧計が温度によって受ける影響だけをとりだして調べるために、図-10に示すような装置を用いた。

潤滑油温度を $100\sim 300^{\circ}\text{C}$ の範囲で変えた時の指圧計の零点移動量を図-11に示してある。いずれの指圧計においても、指圧計冷却水流量が少ない場合には、零点の移動が見られるが、なかでも、圧電形のものが高きな値を示している。この原因は主として、圧電素子に生ずる焦電気の影響によるものと考えられる。しかし、この焦電気効果によって発生した電荷は、増幅器の入力側にある短絡スイッチを閉じることによって放電し、零圧レベルにもどすことが可能であるので実用上支障はない。

また、感度や直線性およびヒステリシス特性におよぼす温度の影響を調べた。まず、定格出力で運転しているエンジンに各指圧計をとりつけて、指圧計冷却水流量 500 cc/min の時の入口と出口の温度差を測定したところ、 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$

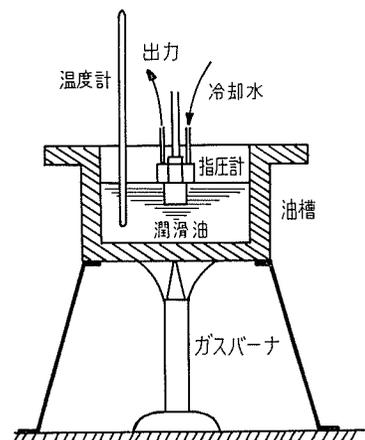


図-10 静的温度特性実験装置

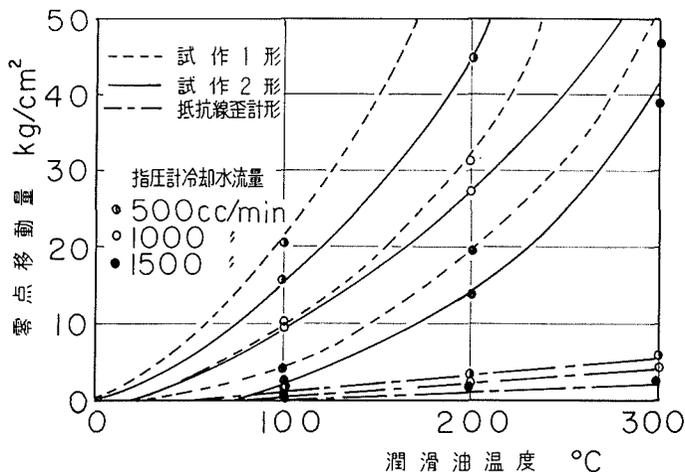


図-11 零点移動量と指圧計ネジ部周囲温度の関係

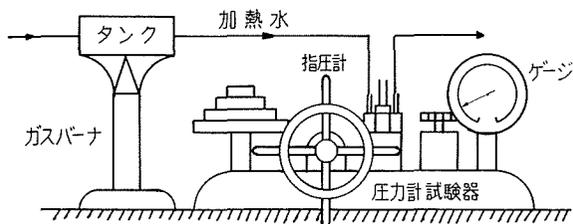


図-12 静的温度特性実験装置

となった。つぎに、図-12に示すような装置に指圧計をとりつけ、これに加熱水を通して、指圧計冷却水の温度がエンジンにとりつけた時と同程度の値になるように調節して、圧力計試験器により上記の諸特性を調べた結果、いずれの指圧計においても変化は認められなかった。

3.5 動的溫度特性

図-13のようにネジ部周囲を十分に冷却した指圧計の受圧膜に対して、回転門板により、ガスバーナからの火炎を断続して与え、この時に生ずる零点移動量を調べた。

図-14に示すように、抵抗線歪計形のものはかなり広範囲の回転速度で、零圧力レベルの変動を示しているのに対して、試作1形指圧計、あるいは、試作2形指圧計は零レベルの変動の回転速度がはるかに低く、また、変動量も一般に少なく、すぐれた動的溫度特性を示している。この理由は、抵抗線歪計形の場合、受圧膜起歪筒間が単に、予圧力のみによって接触しているのに対して、試作1形指圧計はネジ止めになっているので、予圧力が容易に変化し得ないためと考えられる。しかし、このネジは指圧

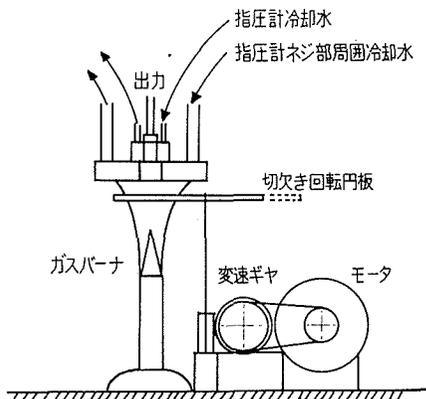
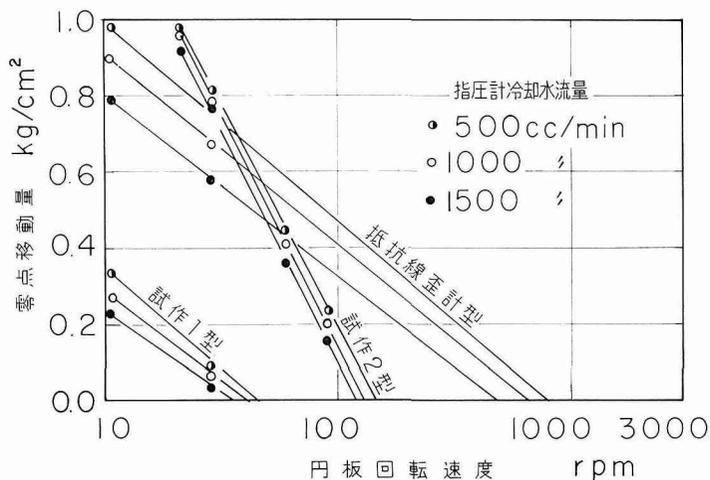


図-13 動的溫度特性実験装置



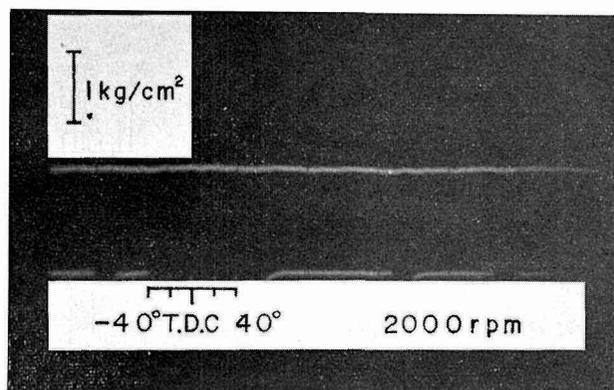
図—14 零点移動量と円板回転速度の関係

計の固有振動数を低下させるものと思われるので、試作2形、および、3形においては、ネジ部を除き、予圧力を増すことによってこの影響の表われるのを防いだ。その結果両方式の中間の特性を示し、回転速度150 rpm以上の動的溫度変化に対しては零圧力レベルの変動は生じていない。

3.6 ノイズ特性

機械的ノイズについては、盲栓を介して、供試指圧計をシリンダヘッドに取り付け、エンジンの各回転速度に対して歪出力を調べた。

抵抗線歪計指圧計をガソリンエンジンにとりつけて運転した場合には、エンジン回転速度が増すにつれて増大する機械的ノイズと回転速度にほとんど無関係なきわめて大きなパルス状の点火栓火花に起因するノイズとの両成分が認められた。また、試作1形指圧計の場合には、500 rpm程度の低回転速度域においては、圧力経過の全過程にわたってコードの振動によると見なされる比較的低い振動数のノイズが認められ、3000 rpm付近では、上死点直後に高周波ノ



写真—4 機械的ノイズ

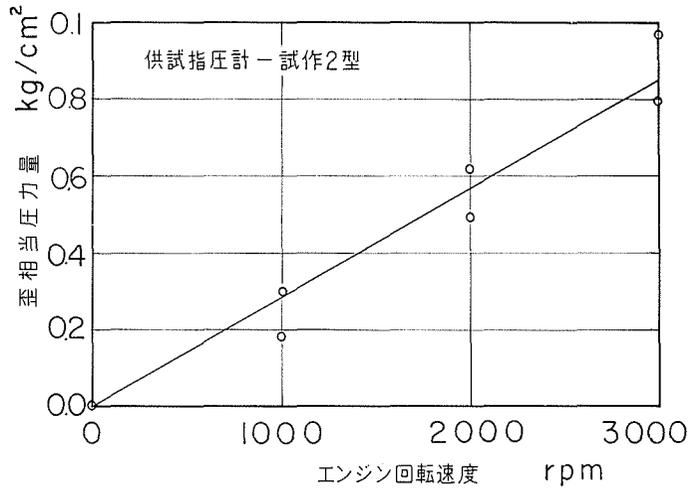


図-15 機械的ノイズ

イズ成分の発生が見られた

これに対して、試作2形および3形指圧計においては、点火栓火花によるノイズは全くなく、低周波のノイズも、コードと素子間のユネクタを改良することによって、まったく除去し得たが、ただ、上死点直後に表われるノイズ成分は未解決のまま残されている。(写真-4参照)。しかし、この成分の振幅は、図-15に示すように実際に使用する圧力範囲に比較して小さく、無視できる程度のものであり実用上支障がない。

3.7 実際に使用する上での諸問題

i) 耐湿性

抵抗線歪計形、試作1形ともに、感圧素子が収納されている部分と、冷却水通路の間は単にガスケット、あるいは、接着剤などによってシールされているため、しばしば絶縁抵抗の劣化に悩まされたが、試作2形および3形指圧計においては、冷却水通路にさらされる接合部分をなくすることによってそれらの影響を除去し、その結果、指圧計の耐湿性は大幅に向上した(図-4参照)。

ii) 経時変化

図-16に、試作2形指圧計について、組み立てた直後の感度が、使用時間の経過とともに変化するようすを示したが、数時間運転の後にはほとんど一定の感度を保つことがわかり、経時変化に関しては実用上支障がないことが解った。

iii) 耐久性

試作2形および3形指圧計は現在まで50時間運転しているが、いまだ故障は生じていない。

iv) 小形化

多くの場合、指圧計がとりつけられる個所は狭隘な場所であるために、指圧計はできるだ

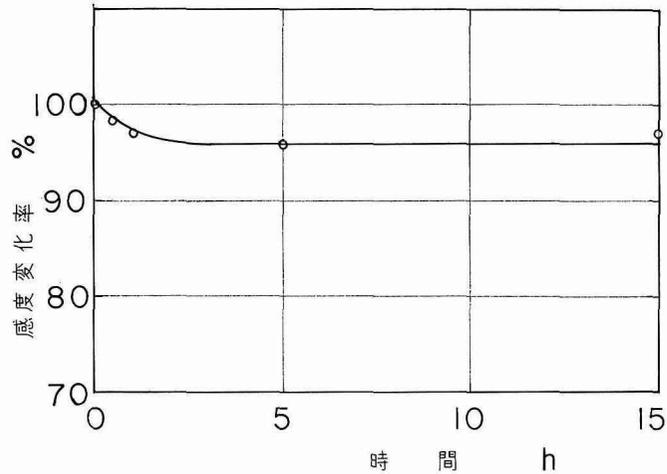
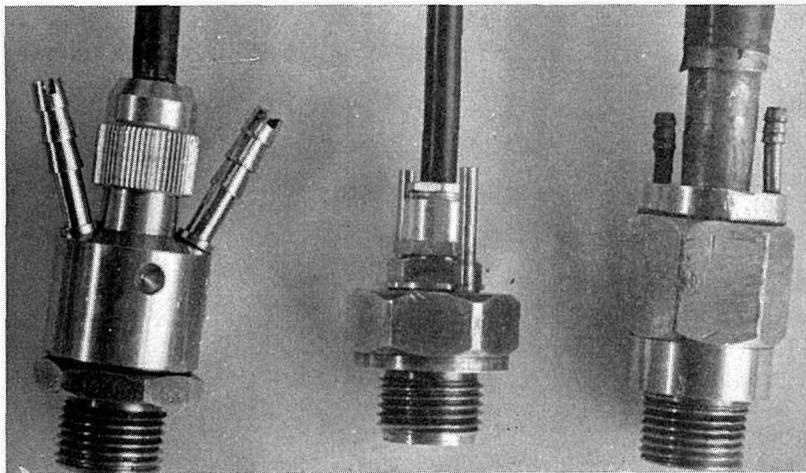


図-16 試作2形指圧計の経時変化



抵抗線歪計形

試作2,3形

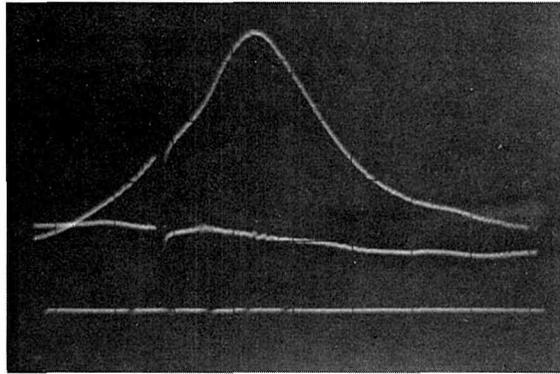
試作1形

写真-5

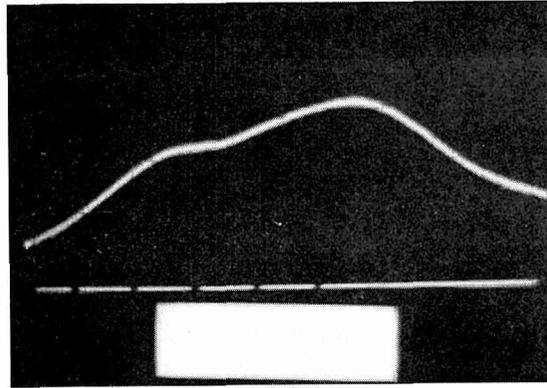
け小形にする必要がある。これに対して試作2形および3形指圧計は写真-5に示すように小形化されている。

4. 指圧波形の測定例

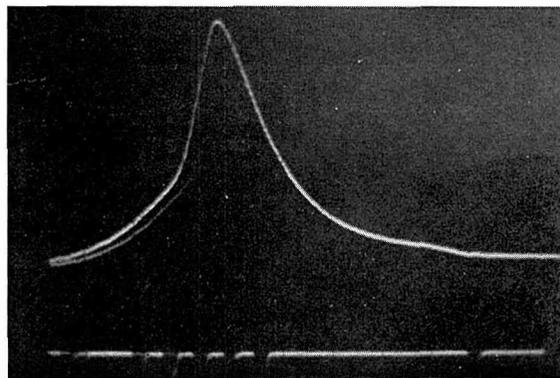
写真-6, 写真-9に各供試指圧計によって得た指圧波形の測定例を示す。写真-6, 7および8は4サイクルガソリンエンジンにおける測定例であり, 写真-6は, 機関を無負荷, 1000 rpm, 点火時期 -25° で運転した場合, 写真-7は, 1000 rpm, 点火時期で 0° で運転した場合, 写真-8は, 無負荷, 2000 rpm, 点火時期 -10° で運転した場合である。写真-9は定格出力 (4 PS-900 rpm) におけるディーゼルエンジンの指圧波形の一例である。



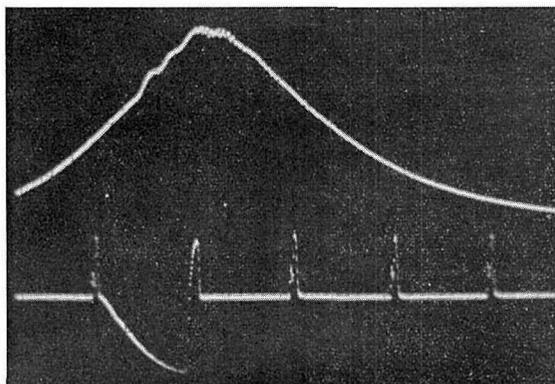
写真—6 抵抗線歪計形指圧計の使用例



写真—7 試作1形指圧計の使用例



写真—8 試作2形指圧計の使用例



写真—9 試作3形指圧計の使用例

結 言

エンジン指圧計に対して要求される種々の事項を満たす、すぐれた特性を持った圧電形指圧計を試作することができた。

試作した圧電形指圧計について述べると次のとおりである。

i) 圧電素子としてジルコンチタン酸鉛、あるいは、PCM形素子を使用することによって水晶を用いた、従来の指圧計で問題となっている電荷の漏洩を少なくすることができ、感度も大きくとれるため、測定系全体が小形になり、とりあつかいが容易になった。

ii) 抵抗線歪計形と比較した場合、 S/N 比が大きくなり、他の電気系統からのノイズ混入が少なくなった。

iii) 感度を下げることなく、60 KHz以上に固有振動数を高めることが可能であり、これによって動的圧力測定範囲の拡大が可能となった。

iv) 温度特性に関しては、圧電磁器は水晶よりも劣る点があるが、指圧計として冷却を通して使用する場合には問題にならない。

なお、今後、試作指圧計の性能を一層向上させるためには、静的な温度変化によって生じる零点移動を小さくするために、冷却水通路を改善することによって冷却効果を高めたり、あるいは、素子と起歪筒間に熱的絶縁物を入れることなどの改良を行なう必要がある。また、遅い温度変化によって生ずる零点圧力レベルの変動を軽減するために、受圧膜と起歪筒の間を固定することも必要であろう。

さらに、機械的ノイズのより一層の低減をはかるため、素子の抑え金の質量を低下させたり、コネクタ部分を改良することなども考えられる。

本研究を行なうにあたって指圧計筐体の試作に際しては、共和電業(株)、野尻芳郎氏のご協力を得た。また、PCM形素子の試作に対しては、松下電器産業(株)無線事業本部研究所の

ご援助を頂いた。ここに感謝の意を表わす次第である。

文 献

- 1) 深沢・村山・吉川：日本機械学会講演論文集, No. 171 (1967. 4, 第44期通常総会).
- 2) 深沢・村山・吉川：日本機械学会北海道支部. 第12回講演論文集 (1968. 10).
- 3) 松岡：日本機械学会誌, 65 (昭37), 520, p. 118-128.
- 4) Hiromu Ôuchi et al.: National Technical Report, 12 (1966), 4, p. 251-259.
- 5) 森田・小島：自動車技術誌, 21 (1967), 4, p. 368-373.
- 6) 神山・三浦：トランスジューサとその応用 (昭39), p. 82-83. オーム社.
- 7) 電気通信学会：電子制御工学 (昭40), p. 40-45.