

磁気ひずみ効果を利用した図示馬力の遠隔指示装置

(第1報 ストローク微分型指示装置)

堀 保 広* 辻 歌 男*

Indicated Horsepower Measuring Instrument using the Magnetostrictive Pressure Indicator

(1st Report)

By

Yasuhiro Hori, Utao Tuzi

This paper deals with a new instrument invented for measuring indicated horsepower, indicated mean effective pressure and the maximum cylinder pressure of a Diesel engine. If an oscilloscope is used, this instrument can display a diagram of cylinder pressure vs time or cylinder volume on it. The feature of this instrument is that the pressure transducer utilizing the magnetostriction effect is mechanically tough and has very large output.

The basic principle of the mean effective pressure measuring system is to compute electrically the area of the pressure curve against cylinder volume per cycle, and this computation is performed by integrating the product of cylinder pressure and derivative of cylinder volume with respect to time over the period of a cycle. Horsepower is obtained as a product of mean effective pressure and revolutional speed.

The cylinder pressures picked up with the magnetostrictive pressure indicator are compared with the reference pressures obtained with a Farnbolo indicator, and it is verified that the values of both pressure indicators are in good agreement.

On indicated mean effective pressure and indicated horsepower, the readings obtained with the new instrument agree with the values obtained by means of measuring the area of the pressure vs volume curve with a planimeter within about three per cent accuracy and the maximum cylinder pressure examined with a Henni indicator shows accuracy better than two per cent.

1. 緒 言

ディーゼル船において、図示馬力の計測は主としてマイハークのインジケータによって行なわれている。しかし、この機械的な方法は機関を離れて計測を行なうことができないし、インジケータ線図の採取や、この図より面積測定をして、図示平均有効圧や図示馬力を計算するのに多くの労力を必要とする。また、機関速度が大きくなると、誤差が多くなることが指摘され

ている。¹⁾

最近、船舶の自動化が進められ、その一環として機関もコントロール室において集中監視されるようになった。したがって、図示馬力の計測も、遠隔指示ができ、耐久性、安定性のよい、中速機関にも使える新しい計器が必要となった。そのために、幾つかの研究が行なわれたが、²⁾³⁾ まだ監視用計器として実用の運びに至っていない。監視用という目的を離れて考えると、図示平均有効圧の計測のために、多くの方法が考

* 機関性能部

原稿受付 昭和46年6月30日

えられており、⁴⁾ それらは図示馬力の計測に利用することができる。それらの考案は主として平均有効圧計算の実施方法に関するものであるが、シリンダ圧力の検出にも抵抗線ひずみ計式 可変インダクタンス式 ファンボロ改造式 マイハーク改造式 弾性膜に取り付けた可動鉄片によるマグネットの磁束変化など、多種類のインジケータが使われている。しかし、これらの計器はいずれも研究用として開発されたもので、長期間連続して使用することへの配慮は乏しいようである。監視用としての図示馬力の遠隔指示装置に使われる圧力変換器は、高温高圧下に長期間安定して働らくことが必要であって、そのためには丈夫で、温度特性がよく、出力が大きくなければならない。また、圧力の変化が早いので固有振動が高いことも要求される。これらの要求を満足させる変換器が得られないことが、この種の監視用装置の実用を妨げる主要な原因であると思われる。著者らは、磁気ひずみ効果を利用した圧力変換器が丈夫で出力の大きいことに着目し、これにより目的を果そうと考えた。磁気ひずみ効果を利用して図示馬力を求める場合に、二つの型式が考えられるが、ここで報告するのはその一つである。

2. 原 理

図示馬力は次式によって求めることができる。

$$N_i = \frac{V_s}{4.5 \times 10^5 i} n p_i \text{ PS} \quad (1)$$

ただし、 N_i : 図示馬力 PS

V_s : 行程体積 cm^3

i : 定数、二サイクル機関では 1、四サイクル機関では 2

n : 回転速度 rpm

p_i : 図示平均有効圧 kg/cm^2

また、図示平均有効圧は次式で計算される。

$$p_i = \frac{W_i}{V_s} \text{ kg/cm}^2 \quad (2)$$

ただし、 W_i : 図示仕事 cmkg

図示仕事は Fig. 1 のインジケータ線図の面積である。この面積計算を行なうのに行程体積について積分すると、圧力について行なうのと 2つの方法が考えられるが、いずれの場合にもそれらの積分を電氣的に実行するのに、行程体積や圧力について行なうことには困難が伴うので、次式で示すように時間について積分する方法がとられる。

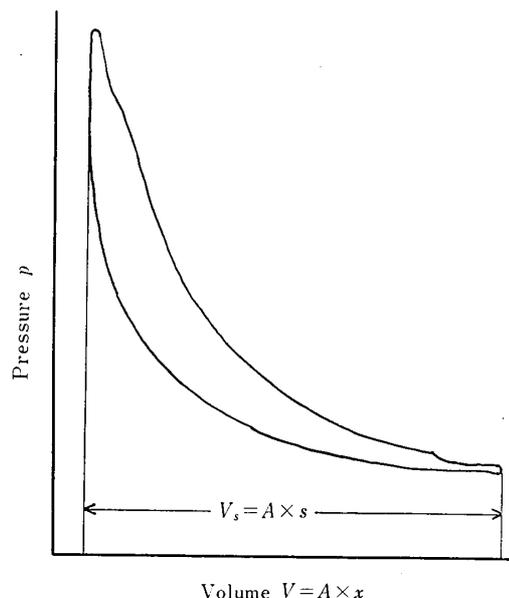


Fig. 1 Indicator diagram

$$W_i = \oint_V p dV = A \int_0^T p \frac{dx}{dt} dt \text{ cmkg}$$

あるいは、

$$W_i = \oint_p V dp = A \int_0^T x \frac{dp}{dt} dt \text{ cmkg}$$

したがって、

$$p_i = \frac{1}{s} \int_0^T p \frac{dx}{dt} dt \text{ kg/cm}^2 \quad (3)$$

あるいは

$$p_i = \frac{1}{s} \int_0^T x \frac{dp}{dt} dt \text{ kg/cm}^2 \quad (4)$$

ただし、 A : ピストンの面積 cm^2

s : 行程 cm

x : 行程、 t の関数 cm

p : シリンダ圧力 kg/cm^2

t : 時間 sec.

T : 周期 sec.

ここで、(3) 式を利用して図示平均有効圧を計算する方法をとる装置をストローク微分型、(4) 式を利用するものを圧力微分型と仮称する。磁気ひずみ効果を利用した圧力変換器では、磁気ひずみ素子を交流磁化することによって圧力の検出が、また直流磁化することによって圧力の時間微分値の検出が可能である。したがって、(1) (3) 式によって図示馬力を求めるストローク微分型と (1) (4) 式による圧力微分型の両装置の製作が可能であり、それら装置の変換器の構造と性能、演算回路、校正法などを考えると、それぞれ長短所を持ち優劣を決め難い。そこで、両型式の装置を製

作の上、試験をして比較検討することにし、まずストローク微分型指示装置を製作した。この装置で馬力を求めるために検出すべき量は、シリンダ圧力、行程の時間微分値、回転速度と他に演算指令用の回転位置で、このため、4つの変換器が必要である。

3. インジケータ

3.1 原理 Fig. 2 は磁気ひずみ素子による圧力測定の実理を示したものである。II形のコアに巻かれたコイルでコアを交流磁化し、縦方向に力を加えると、磁気ひずみ効果により、コアの柱の部分の透磁率が変化しコイルのインダクタンスが変化する。このインダクタンス変化を利用して力の測

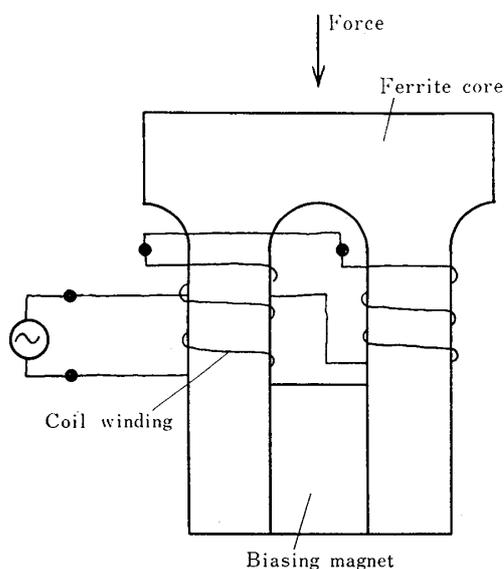


Fig. 2 Schematic illustration of the magnetostrictive pressure transducer

定ができる。加えられた力とインダクタンス変化との関係は (5) 式で表わされる。⁵⁾

$$\frac{\partial L}{\partial P} = K \frac{\partial^2 \lambda}{\partial H^2} \quad (5)$$

ただし、 L : コイルのインダクタンス

P : 力

λ : 磁気ひずみ

H : 磁界の強さ

K : 定数

すなわち、インダクタンス変化は加えられた力に比例し、比例の定数はコイルとコアによって一義的に定まる K と、 λ の H による 2 次の微分係数との積である。 λ は H の関数であり通常 S 形をとって変化するので、この微分係数も正負両符号にわたる変化をする。図のコア磁石は、コアにバイアス磁界を与えて微分係数を大きな値とするために必要であるが、また圧力-インダクタンス変化曲線の直線性をよくし、ヒステリシスを小さくして、特性を改善するためにも重要である。⁵⁾

3.2 測定回路 フェライトを用いた変換器のインダクタンス変化を利用して力の測定を行なう場合、周波数変調方式の回路が工夫されている。⁶⁾ この方式はデジタル変換が容易であり、デジタル演算を行なう場合には有利である。しかし、この装置ではアナログ演算方式をとったので、Fig. 3 に示すような振幅変調方式の回路を使用した。この回路は磁気ひずみ効果を利用した計器では、しばしば用いられるものである。このブリッジ回路は交流ブリッジ回路と検波回路を組み合わせたもので、前述の磁気ひずみ素子は測定用ゲ

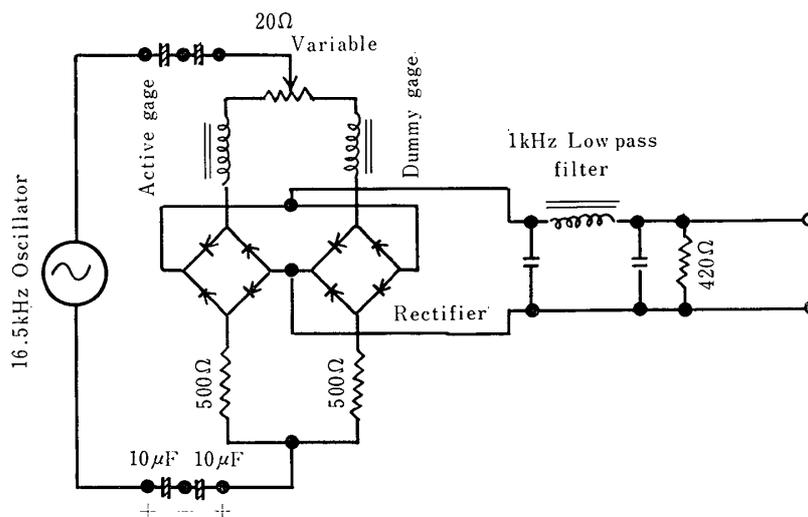


Fig. 3 Bridge for use with the magnetostrictive pressure transducer

ージとしてブリッジ回路の一边をつくる。また、この測定用ゲージと同一の素子を補償用ゲージとして用いる。ブリッジの出力は、搬送波を除くための低域濾波器を通して外部に取り出される。なお、電源回路に入れたコンデンサは、電源回路とブリッジ回路を直流的に遮断し、ブリッジ回路の接地を容易にするためのもので、出力を直接メータで読み取る場合には必要ない。

この回路は構成部品が少なく簡単なので、故障の心配が少なく長期間の測定に適している。また、位相検波を行なっているので力の正負が区別できる、零点調整が一個所でできるのでバランスがとりやすいなど、多くの長所を持っている。

3.3 構造 Fig. 4 はインジケータの構造を示したものである。シリンダ圧力はプランジャを経て、測定用ゲージのコアに伝えられる。燃焼ガスやシリンダヘッドより受ける熱は、管を通りプランジャ部を冷却する水で除かれる。プランジャよりのガス漏れは、耐熱性のふっ素ゴムOリングで止められる。補償用ゲージは測定用ゲージの近くに置かれて温度補償を行なうと同時に頭部にプランジャと同一重量の鉛の小片を付け、測定用ゲージと同一方向に置かれて、機関の振動によってはいる雑音の補償を行なう。

コアは Ni-Cu 系フェライトで、100 kHz の超音波振動子として市販されているものをそのまま使用した。このバイアスマグネットによって与えられる磁界の強さは約 10 エルステッドで、電気機械結合係数が最大値をとる値に選ばれている。コイルは線径 0.15 mm のホルマル線を片方の柱に 250 回、両方で 500 回巻き、直列につないで使用した。無負荷時のインダクタンスは 3.3 mH であった。

3.4 温度特性 温度特性は安定性を支配する重要な因子である。このインジケータでは、補償用ゲージによって温度変化の影響を少なくするように工夫されているが、この補償によって、どの程度改善できるのか、温度特性を零点の移動と感度の変化に分けて調べた。

インダクタンスは応力と温度との関数で、近似的に次式で表わされる。

$$L(\sigma, T) = L_0 \left\{ 1 + \alpha\sigma + \beta T + \frac{1}{2}(\alpha_1\sigma^2 + 2\gamma\sigma T + \beta_1 T^2) \right\} \quad (6)$$

ただし、 σ : フェライトコアの応力

T : 標準値よりの温度変化

L_0 : $\sigma=0, T=0$ のときのインダクタンス

$\alpha, \alpha_1, \beta, \beta_1, \gamma$: 定数

ブリッジ回路よりの出力は、測定用ゲージと補償用ゲージとの差に比例する。したがって、補償用ゲージで温度補償を行なったとき、温度変化による零点の移動は次式の値に比例する。ただし、標準温度で両ゲージのインダクタンスの値を同じに合わせたものとし、さらに $\alpha_1 = \beta_1 = 0$ の直線近似を行なった。

$$L(0, T) - L'(0, T) = L_0(\beta - \beta')T \quad (7)$$

ただし、 L', β' : 補償用ゲージに関する値で、それぞれインダクタンス、温度係数

この式によれば、測定用ゲージに近い温度係数を持つ補償用ゲージによって、零点の移動を小さくすることができる。

つぎに、測定用ゲージが力を受けて応力が σ となったときのブリッジ回路よりの出力は、次式の値に比例する。

$$L(\sigma, T) - L'(0, T) = L_0\alpha\sigma + L_0(\beta - \beta')T + L_0\gamma\sigma T \quad (8)$$

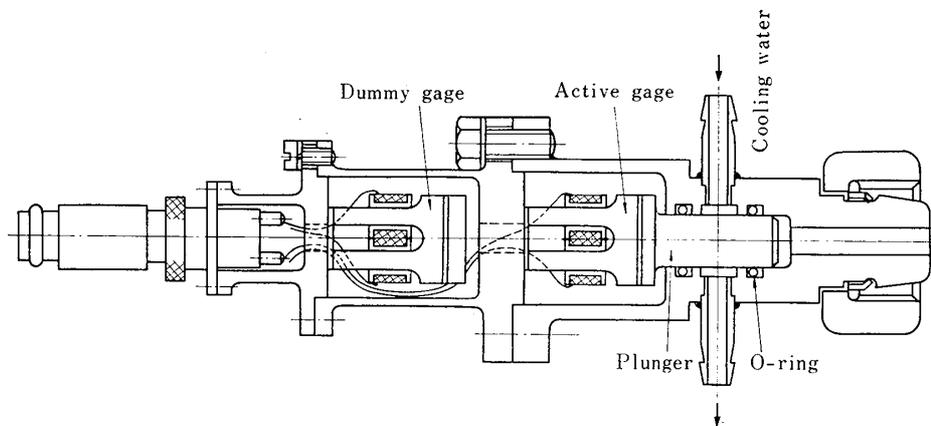


Fig. 4 Arrangement of the magnetostrictive pressure transducer

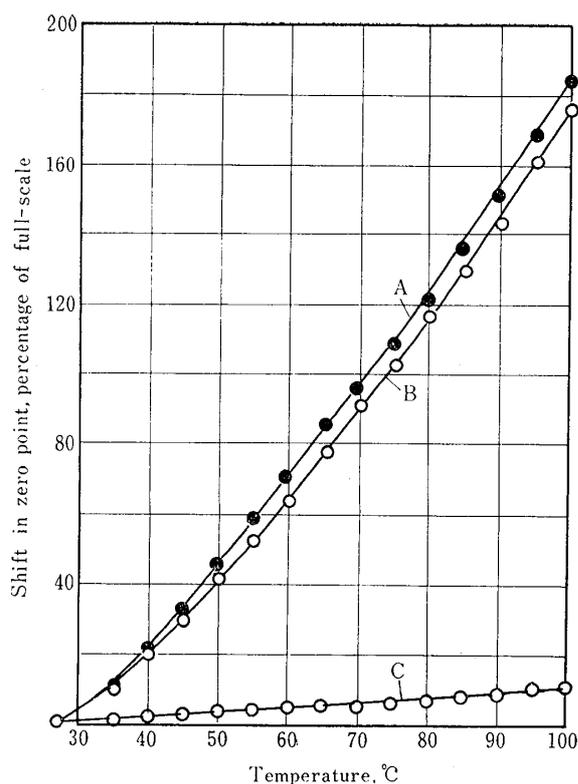


Fig. 5 Temperature characteristics

- A: Shift curve of zero point by the temperature change of the active gage
 B: by the temperature change of the dummy gage
 C: by the temperature change of the active gage compensated with the dummy gage

右辺の第1項は荷重によるインダクタンス変化で測定量に比例する項, 第2項は温度変化によるインダクタンスの変化で, 温度変化による零点の移動に比例する項, 第3項は温度変化による測定量の変化に比例する項である。

Fig. 5の曲線AとBは, 測定用および補償用ゲージをそれぞれ別個に無負荷の状態, 恒温槽内で温度変化させたときのブリッジ回路よりの出力, すなわち零点の移動を示したものである。また, Cは補償後, すなわち両ゲージを同時に温度変化させたときの零点の移動量である。このC曲線より, 補償後の零点移動の温度係数として $0.15\%/^{\circ}\text{C}$ の値が得られる。この値はA, B両曲線の差を小さくすることにより, さらに小さくすることができるが, それはフェライトコアの巻線の本数を細かく加減することにより果される。つぎに, Fig. 6の直線Aは全負荷の約35%の荷重を加えて温度変化を与えたときのブリッジ回路よりの出力の変化を示したもので, また直線Bは前に求めた温度変化

による零点の移動を示したものである。これら両直線より, 温度による感度の変化を示す直線Cが得られる。このCより, 感度の温度係数 $0.0014\%/^{\circ}\text{C}$, kg/cm^2 (1°C , $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ あたりの変化) が得られる。この温度による感度変化は(8)式で示されるように補償することはできないが, 冷却によって大幅の温度変化を与えなければ, インジケータの圧力変換器として実用できることを示す値である。

3.5 応答性 Fig. 7は, 磁気ひずみ素子の頭部に鋼球を落下させたときに生じる素子の振動を示した写真である。これによれば, インジケータの固有振動は約 100 kHz であり, マイハーク M_3 インジケータが約 180 Hz であるのに比べてはるかに高い。通常, インジケータに要求される周波数特性は, 正常な燃焼を対象とする限り, 高速のガソリン機関を含めて, 2 kHz までとされているが, これに対し十分の応答性

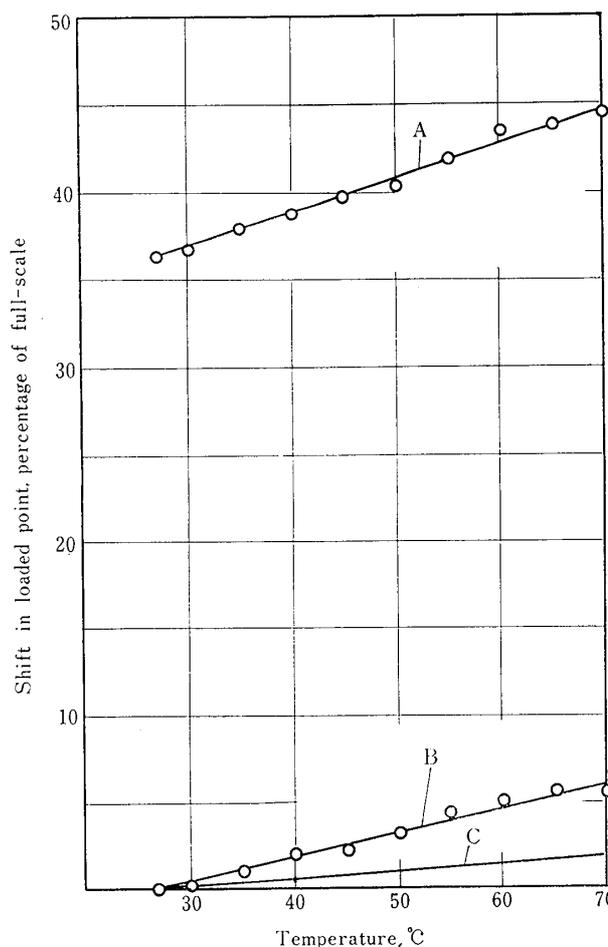


Fig. 6 Temperature characteristics

- A: Shift curve of output in loaded state
 B: of zero point, the same as C in Fig. 5
 C: of sensitivity

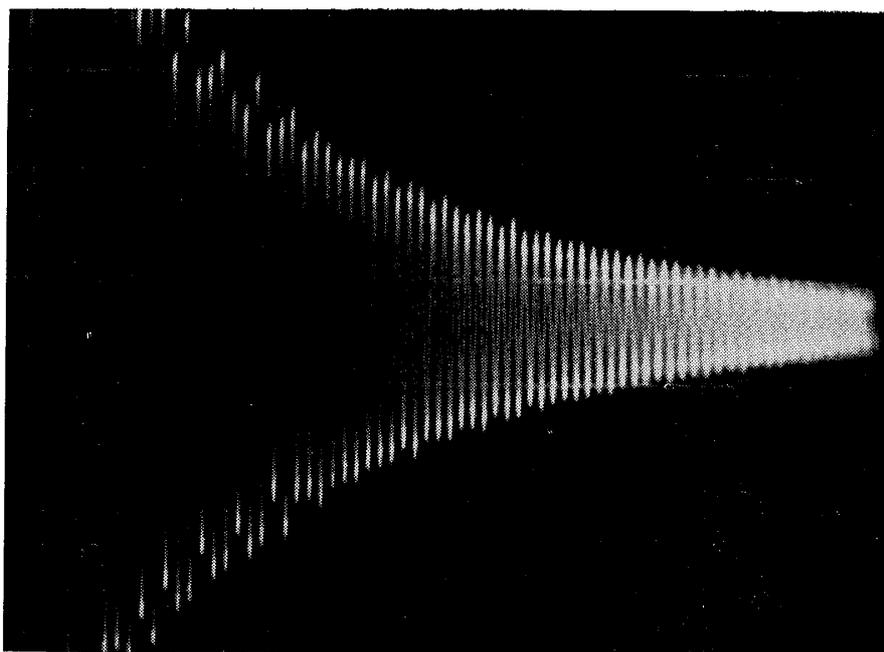


Fig. 7 Example of damping oscillation of the magnetostrictive pressure transducer

を持っている。

4. 行程、回転速度、回転位置の検出

必要な量は行程の時間微分値であるが、これを得るために、まず市販のレデュースングギヤにより行程を検出、これを微分回路に入れて微分値を得る方法をとった。また、回転速度および回転位置は、交流発電機式の回転計およびマグネットとリードスイッチにより検出した。Fig. 8 はこれらの検出装置の写真である。この装置はオールダム継手により、機関軸に直結している。レデュースングギヤはクランク機構の模擬装置で、機関の回転はこの装置によって行程に比例した最大変位 40 mm の直線運動に変えられ、この直線運動は可変インダクンス式の変位計により電圧に変換される。つぎに、回転計の交流出力は 1800 rpm において 7.5 V で、この回転計はシンクロナスベルトを用い、機関速度を 3 倍に増速して駆動される。また、回転位置はマグネットとリードスイッチにより下死点を検出した。このパルスは計算の開始と終了の指令および回転数を数えるのに使われる。

5. 演算回路

前に述べたように、(1) (3) 式にしたがって図示馬力を計算するために必要な検出量は、シリンダ圧力、行程、回転速度と回転位置である。これらの量より図示馬力を求める演算回路のブロック線図を Fig. 9 に

(184)

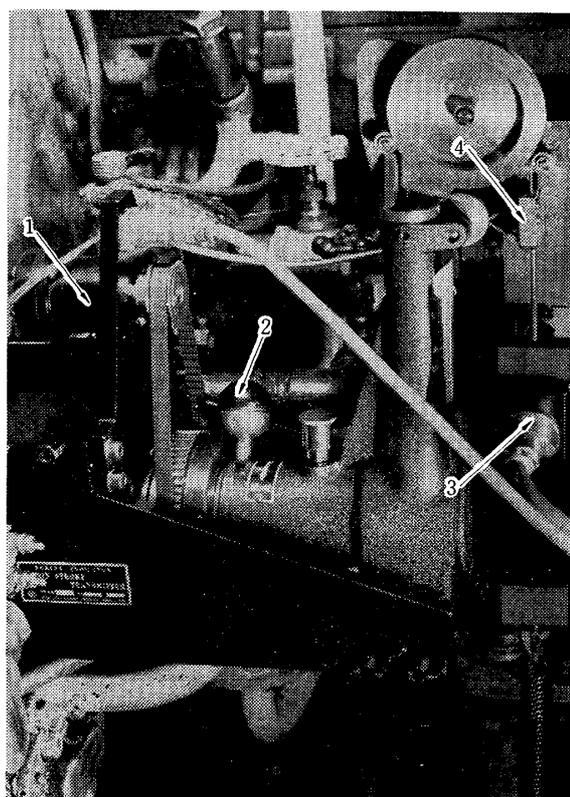


Fig. 8 Arrangement of the volume and speed transducer

- 1: Tachogenerator
- 2: Clutch handle
- 3: Two-coil inductance-ratio type displacement transducer
- 4: B.D.C. detector

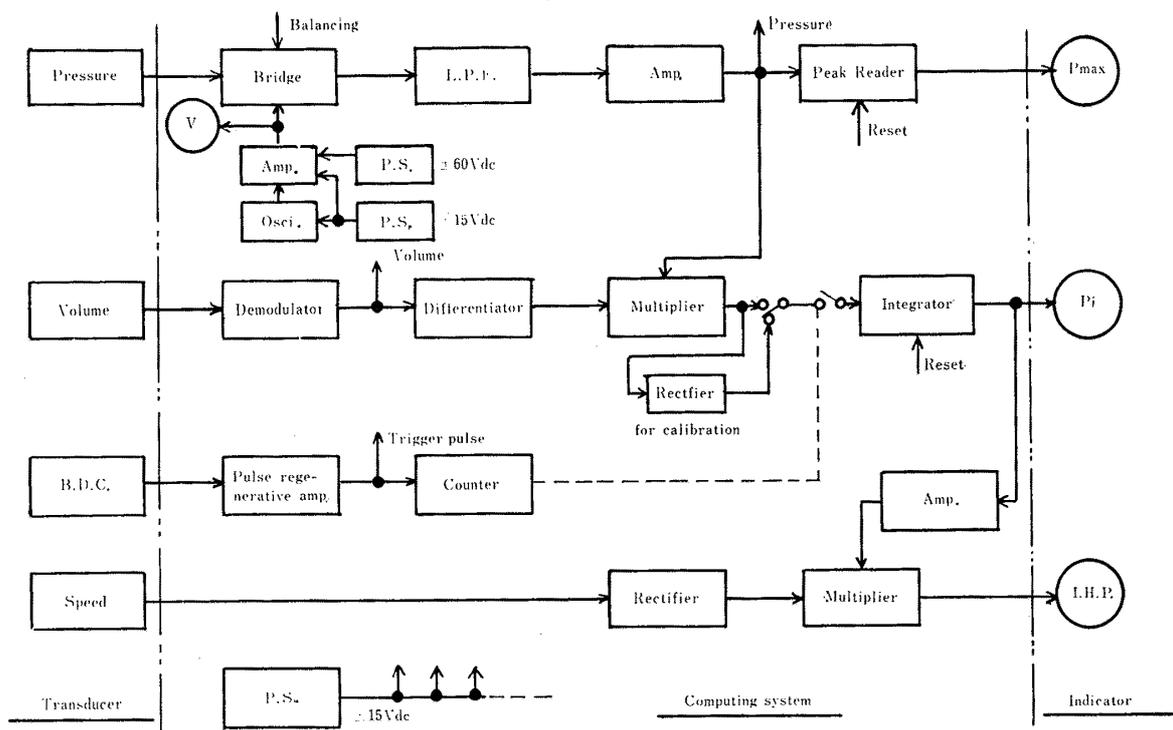


Fig. 9 System block diagram

示した。なお、この回路では図示馬力のほか、図示平均有効圧と最高圧力をメータで指示し、圧力時間線図と圧力体積線図をブラウン管上に表示できるようにした。

図において、磁気ひずみ式の圧力変換器により検出されたシリンダ圧力は、約40倍増幅されて乗算器に入り、可変インダクタンス式変位計により検出され微分された行程の時間微分値と掛算される。乗算器よりの出力は、プリセットカウンタに設定された機関の15サイクル分だけの信号を積分回路に入れて積分し、それを図示平均有効圧としてメータで指示する。また、この信号は一度増幅された後乗算器に入れられ、直流変換された回転速度計の出力と掛算され、図示馬力としてメータで指示される。このほか、シリンダ内に生じる最高圧力は、機関の監視を行なう場合に重要な量であるので、これの検出回路を付け、メータで指示した。また、シリンダ圧力をオシロスコープに入れ、時間または行程で掃引して、圧力時間線図または圧力行程線図を見ることができるようにした。

6. 校 正

6.1 インジケータの校正 Fig. 10 にゲージテストの油圧で行なった校正曲線を示した。また、Table

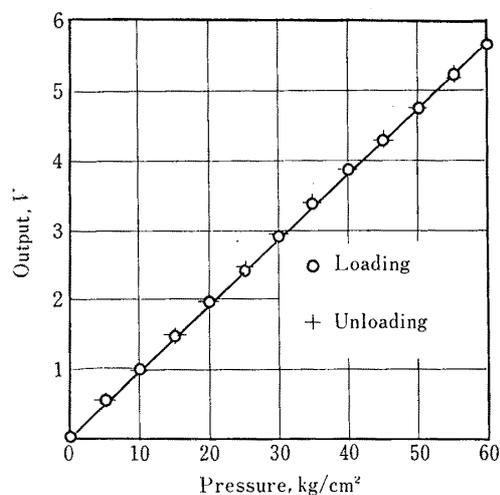


Fig. 10 Calibration curve of the magnetostrictive pressure indicator

1 はヒステリシスを明示するために、これを数値で示したものである。この出力は、Fig. 9におけるシリンダ圧力の取り出し点における電圧を、デジタル電圧計で読み取ったものである。また、この時のブリッジ回路は Fig. 3 に示したもので、電源電圧は 12 V、圧力が 60 kg/cm² (フェライトコアの圧縮応力は 70 kg/cm²) の時、ブリッジよりの直流出力が約 140 mV であった。

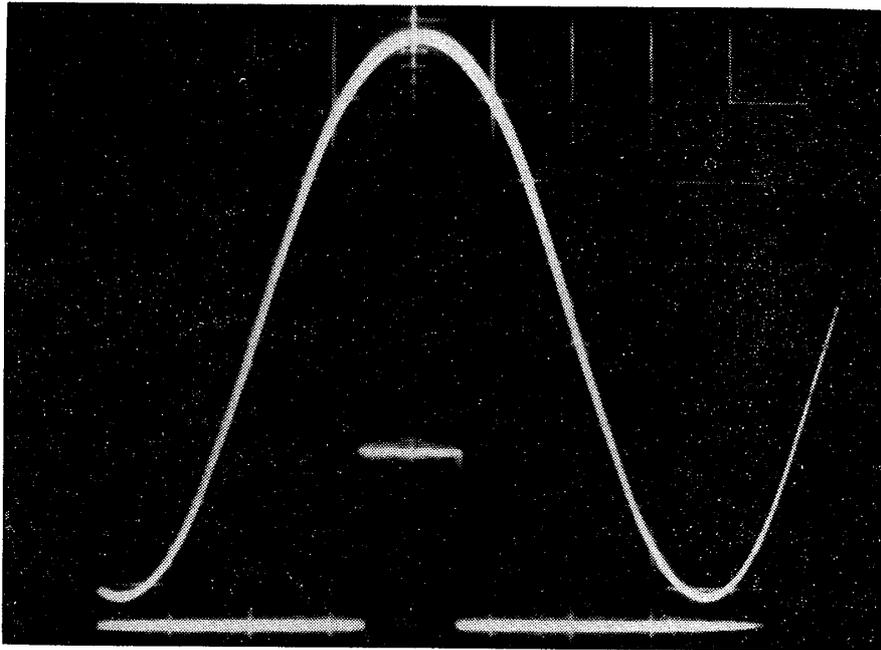


Fig. 11 Outputs of the volume transducer and the B.D.C. detector

Table 1 Calibration data of the magnetostrictive pressure indicator

圧力 kg/cm ²	メータの読み V		ヒステリシス	
	圧力増加	圧力減少	V	%*
0	0.02	0.02	0	0
10	0.98	1.05	0.07	1.27
20	1.92	1.98	0.06	1.09
30	2.86	2.93	0.07	1.27
40	3.78	3.83	0.05	0.91
50	4.67	4.70	0.03	0.55
60	5.55			

* 最大値に対する割合

校正曲線の非直線性は2%, ヒステリシスは全圧力範囲に平均すると, 最大値に対して0.85%である。図示平均有効圧を計算する場合に, この非直線性の影響はほとんどないが, ヒステリシスはインジケータ線図の面積を増し, その影響を無視できない。シリンダ内の最高圧力が60 kg/cm²のときには, 図示平均有効圧は, ヒステリシスにより, $60 \times 0.0085 = 0.51$ kg/cm²だけ大きく指示され, この量を補正する必要がある。ヒステリシスの量は, 近似的には, 加えられた最大圧力に比例して増減すると考えられる。したがって, シリンダ内の最高圧力に比例してヒステリシスによる補正量も変わる。しかし, ディーゼル機関においては,

(186)

最高圧力は負荷状態によって大きくは変わらないので, 補正值の変化は二次的な微量と考えられ, 多くの場合に, 一定値で補正できる。

6.2 行程検出装置の校正 Fig. 11は, Fig. 9における行程取り出し点の出力電圧波形を示したものである。Fig. 12は, 行程を与える式

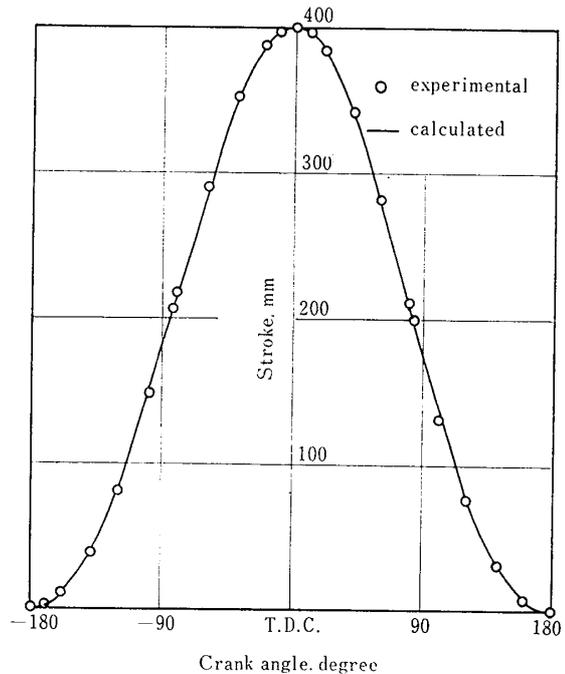


Fig. 12 Comparison of strokes determined from the output of the volume transducer and calculated by eq. (9)

$$x = R \left(1 - \cos \theta + \frac{1}{2\lambda} \sin^2 \theta \right) \text{ cm} \quad (9)$$

による計算値と検出値を比較して示したものである。

ただし、 R : クランク半径 cm

θ : クランク角

λ : 行程とクランク半径との比 4

両者はよく一致している。

ここで注意を要するのは、実機の行程とこの検出装置の出力との位相を正しく合わせることで、このためにはずみ車の上死点刻印を基準にし、上死点の前後での、行程の中間点の出力差が0.1V以下になるように検出装置を取り付けた。行程の出力電圧が7Vであるので、これは位相差を 0.85° 以下にしたことになる。

6.3 回転計の校正 Fig. 13 に校正曲線を示した。機関附属の交流発電機式の回転計で校正したものである。直流出力は、Fig. 9 における整流後の値である。

6.4 図示平均有効圧および図示馬力の校正 実際に機関を運転し、ファンボロのインジケータによって校正する方法が考えられる。しかし、このためにはその設備とインジケータ線図の採取およびこの線図より図示平均有効圧を求めるための労力を必要とする。したがって、ここでは Fig. 9 中に示す半波整流回路を使う簡便な方法を考えて、メータの目盛を定めた。

ゲージテストにより、インジケータに一定圧力を与えておき、機関または電動機によって、行程の検出装

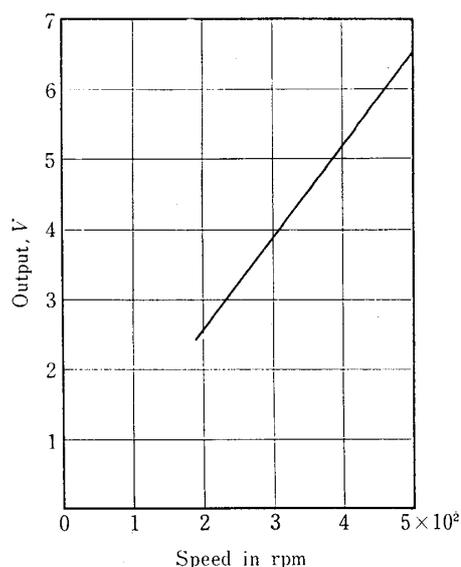


Fig. 13 Calibration curve of the speed transducer

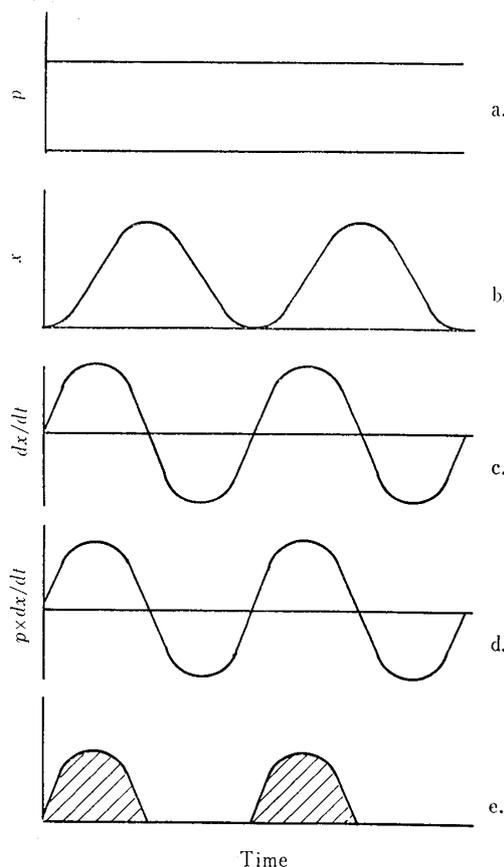


Fig. 14 Signal waveforms in the process of calibrating the IMEP indicator

置および回転計を一定速度で回転させる。したがって、乗算器の入力は Fig. 14 a に示すような圧力 p に相当する一定電圧と、c に示す行程の時間微分値である。また、出力は両者を掛算したものであり、d に示すような波形になる。これを半波整流し積分したものは、e に示す斜線を施した面積となり、これがメータで指示される。この面積は、1 回転で 1 サイクルが完了する機関の平均有効圧に相当し、その時の平均有効圧は p である。したがって、二サイクル機関の場合では、メータの指示値はそのまま機関の平均有効圧 p になり、1 サイクルが 2 回転で完了する四サイクル機関では、 $2p$ に相当する。

図示馬力の目盛は、この値にその時の回転速度を掛けた値として定められる。

7. 性能試験

実験用の中速機関に付け、研究用として一般的に使用されている抵抗線ひずみ計式のインジケータより得られるインジケータ線図およびこれより求められる図示平均有効圧を基準として、この遠隔指示装置の性能

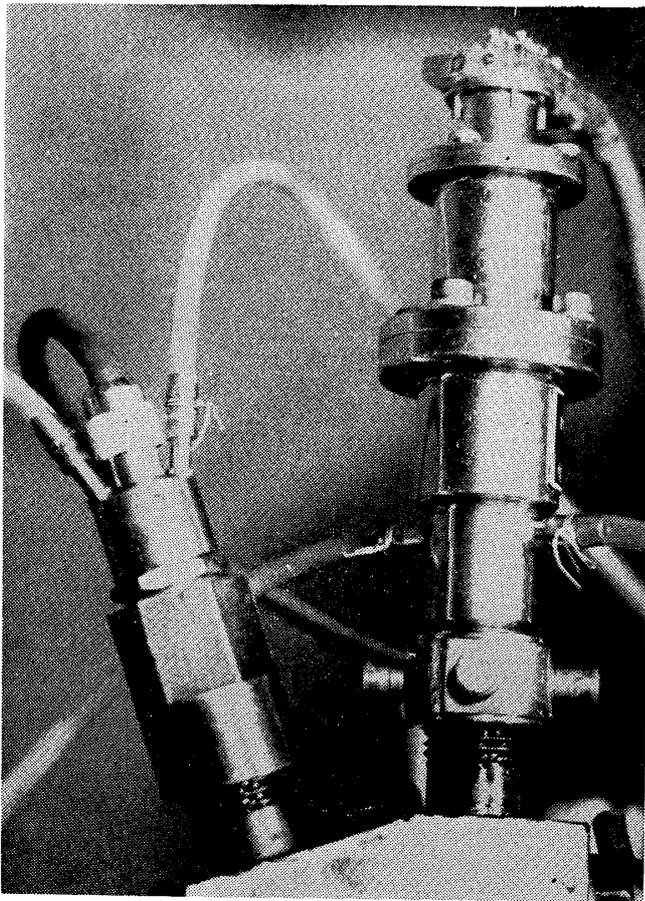


Fig. 15 Magnetostrictive (the right side) and wire strain gage type pressure indicators attached to the engine

Table 2 Principal items of the test engine

型式	四サイクル単筒機関
シリンダ径	275 mm
行程	400 mm
行程体積	23.7 l
軸馬力	80 PS
軸平均有効圧	6 kg/cm ²
連接棒の長さ/クランク半径	800 mm/200 mm

を評価しようと考えた。機関に取り付けたインジケータの写真を Fig. 15 に、また測定装置の写真を Fig. 16 に示した。また、実験機関の主要目を Table 2 に示した。

7.1 圧力時間および圧力行程線図 Fig. 17 a b c d に船用特性 1/4 2/4 3/4 4/4 負荷時の圧力時間線図を、抵抗線ひずみ計式インジケータによるものと比較して示した。上側の線が磁気ひずみ式インジケータによるものである。また、a' b' c' d' にそれぞれ燃焼部分を拡大して示した。Fig. 18 a b c d は各負荷時における圧力行程線図であり、両インジケータによる記録を重ね合わせて示した。上側に少しずれているのが磁気ひずみ式インジケータによるものである。このずれは低負荷ではわずかであるが、高負荷時には膨張行程において大きくなっていることが注意をひく。磁気ひずみ式インジケータの圧力出力電圧特性には 2%

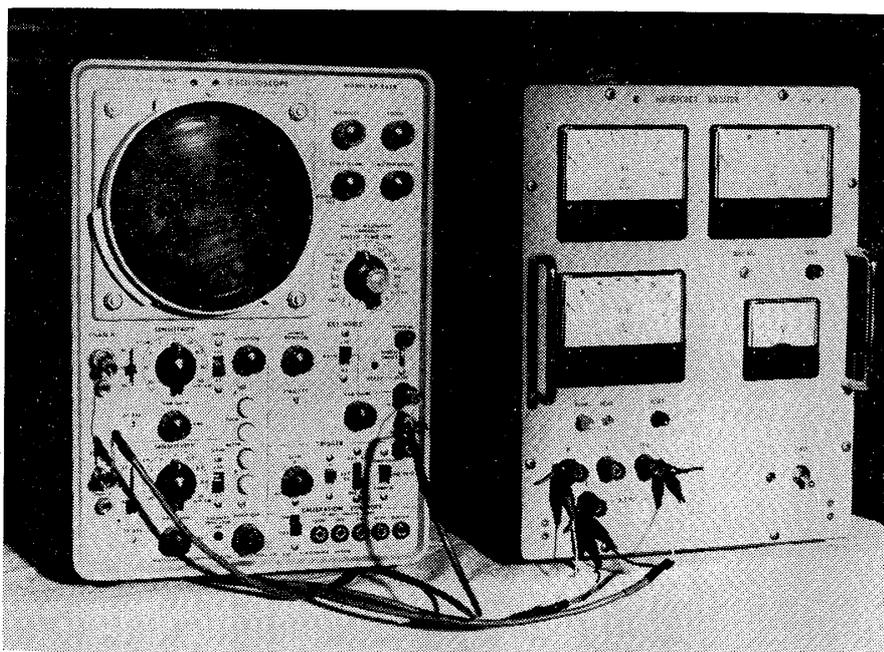


Fig. 16 Panel arrangement of the IHP measuring instrument

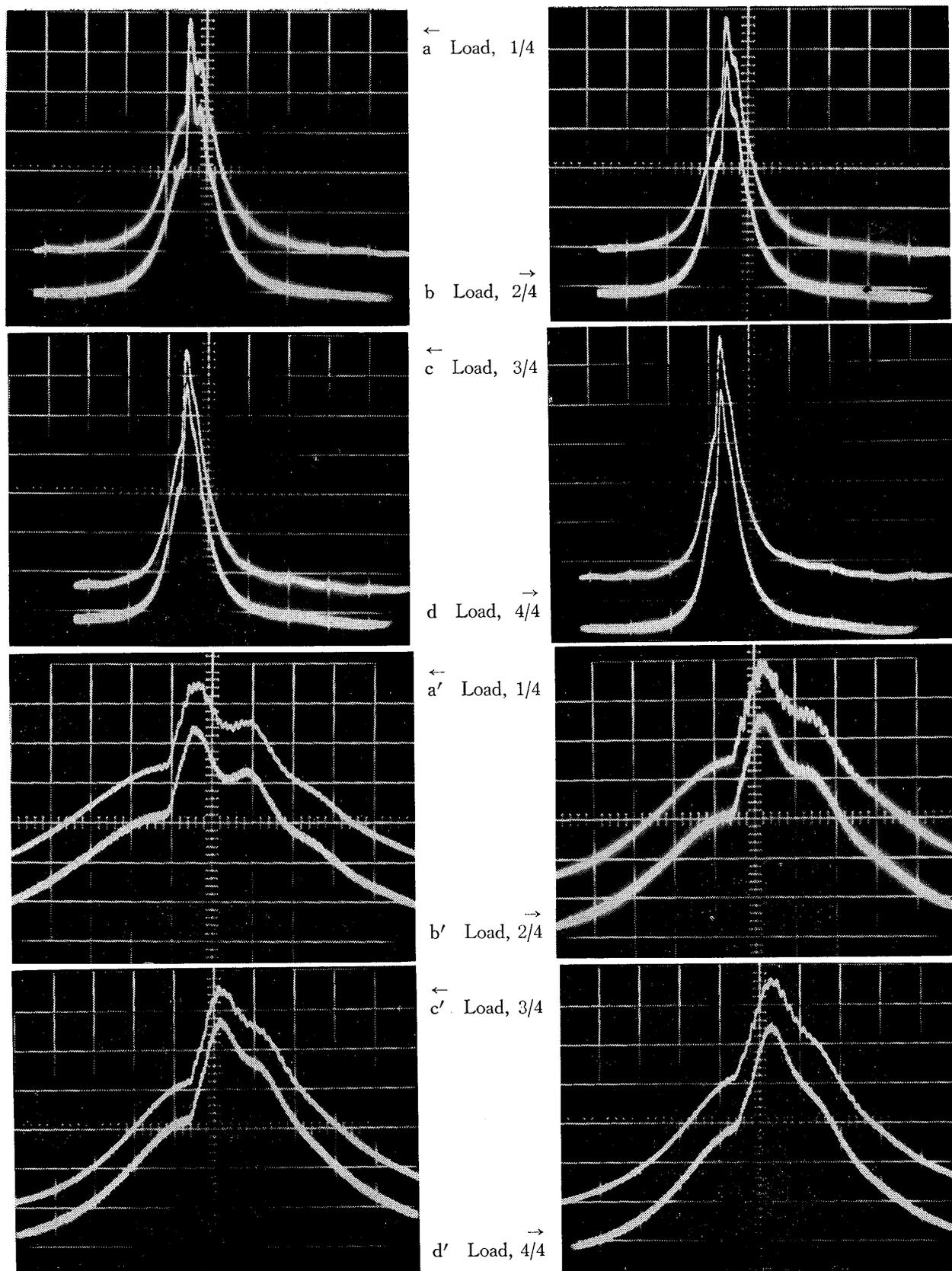


Fig. 17 Examples of pressure vs time diagram. Upside: with the magnetostrictive pressure indicator. Downside: with the wire strain gage type pressure indicator. a', b' c' and d' are enlargement of the combustion part shown in a, b, c, and d

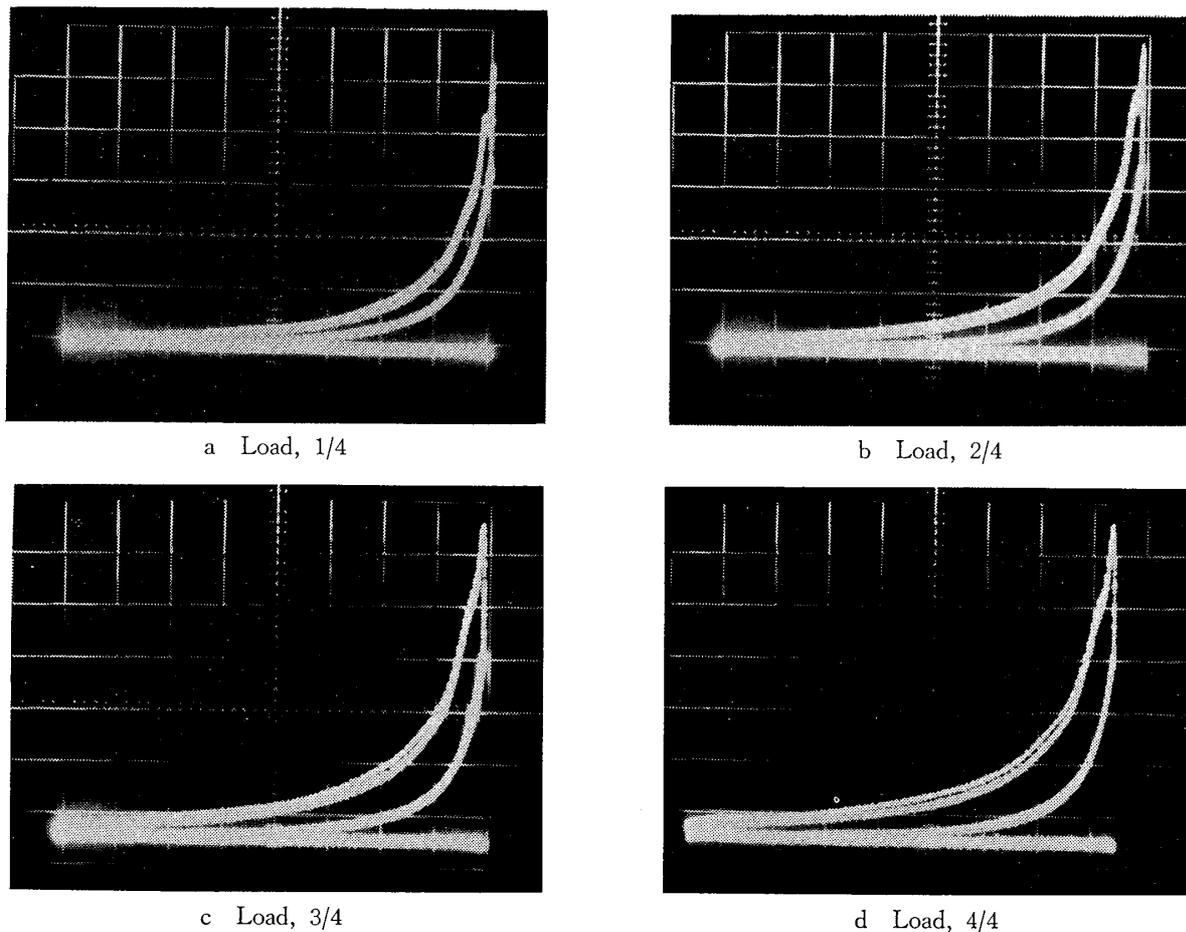


Fig. 18 Examples of pressure vs volume diagram

The diagram obtained with the magnetostrictive pressure indicator is imposed on that obtained with the wire strain gage type pressure indicator

の非直線性と約1%のヒステリシスがあるので、両インジケータの線図が一致しないのは当然であるが、この不一致の原因が非直線性とヒステリシスのみであるなら、不一致の程度は負荷状態によって、ほとんど変化しないはずである。そこで、磁気ひずみ式インジケータの示すシリンダ内の圧力変化曲線が、静的に得られた校正曲線に従っているかどうかを調べた。Fig. 19はファンボロインジケータの受圧部を利用した、このための検定装置である。受圧部の接触板の右側にはシリンダ圧力が、左側には圧縮空気ポンプより減圧調整弁を通して供給される基準圧力の空気が作用している。シリンダ圧力が基準圧力より低い場合には、接触板は基準圧力と弱いばねによって右側の座に押し付けられ、直流回路が閉じて電流が流れている。シリンダ圧力が上昇して基準圧力を越えると、接触板はシリンダ圧力により左側の座に押し付けられ、再び回路は閉じる。接触板が座を離れた瞬間、回路は開いて電流は

(190)

零となり、パルスが発生する。同じように、膨張行程中シリンダ圧力が低下する場合にもパルスは発生する。ばねの力は弱く、接触板の質量は小さいので、このパルスの発生時を、シリンダ圧力が基準圧力に等しくなったときとみなすことができる。このパルスとシリンダ内の燃焼波形をオシロスコープに入れ、パルス発生時のシリンダ圧力を校正曲線を使って読み取り、これをそのときの基準圧力と比較して、その精度を検討できる。なお、基準圧力を示す圧力計は、実験の前後にゲージテスタで検定した大型のブルドン管型圧力計であり、また直流回路に入れたトランスは、直流分を除き、パルスの波形を鋭くするためのものである。Fig. 20は測定例を示したものである。また、Fig. 21は基準圧力を変えて測定し、基準圧力と校正曲線にしたがって読み取ったパルス発生時のシリンダ圧力とを比較して示したものである。ポンペの容量に制限されて、 30 kg/cm^2 以上の圧力では実験を行なうことは

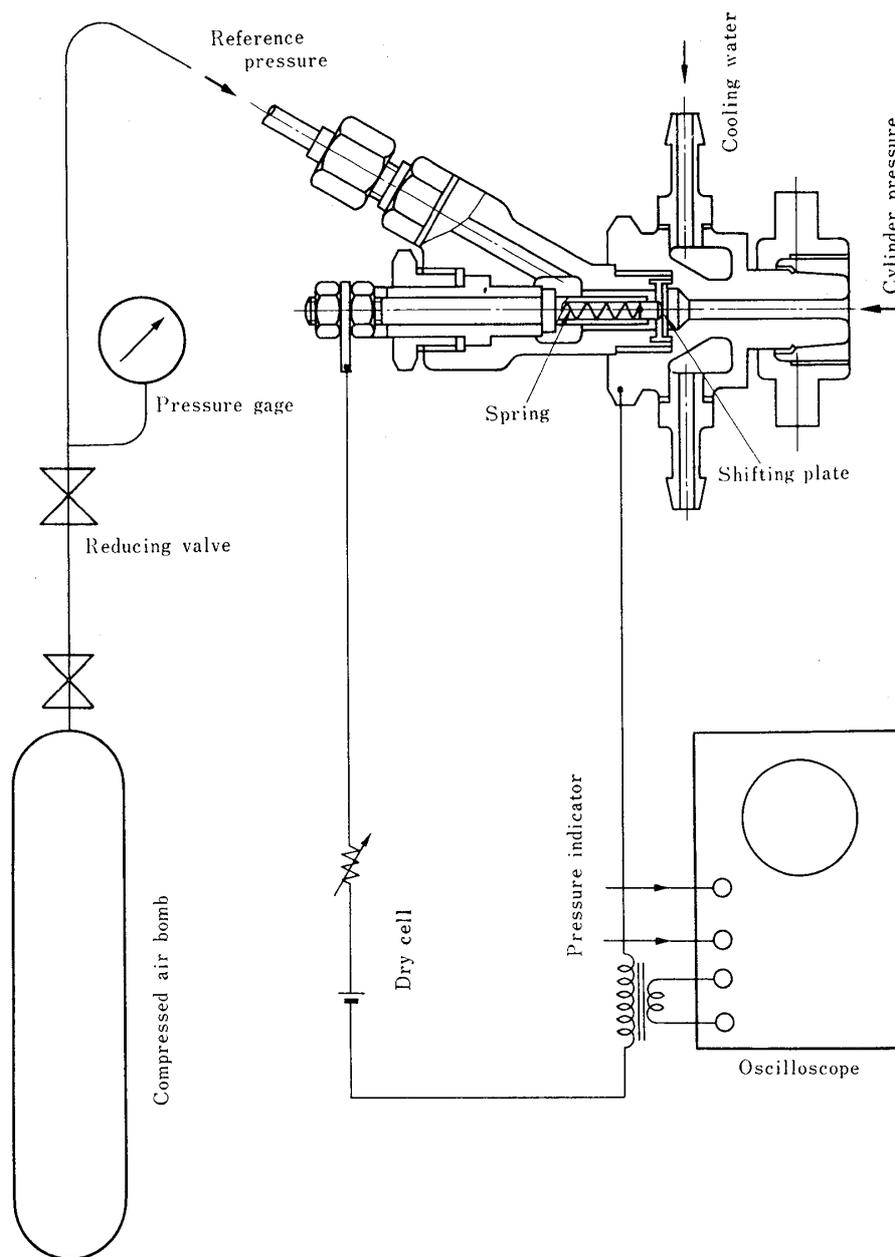


Fig. 19 Arrangement of the device for examination of cylinder pressure obtained with a pressure indicator

できなかったが、実験の範囲内では両者は良く一致しており、磁気ひずみ式インジケータの示すシリンダ内の圧力変化は、静的な校正曲線に忠実に従っていると言える。抵抗線ひずみ計式インジケータの示す値は、高負荷時に膨張行程でこれより低い値をとる。膨張行程で差の出る原因はよく分らないが、抵抗線ひずみ計式インジケータでは、受圧膜が加熱されると、そのゆるみによって零点が負側に移る傾向があり、⁷⁾ ここでもこれが原因となっていることが考えられる。そこで、この遠隔指示装置の示す図示平均有効圧、図示馬

力の値を検定するのに、抵抗線ひずみ計式インジケータより得られる値よりも、むしろ磁気ひずみ式インジケータにより得られる圧力行程線図の面積をプランメータで測定し、この面積より求めた図示平均有効圧をヒステリシスを考慮して補正を加え、これを基準として誤差を考えた方がよいと思われる。Table 3 に、磁気ひずみ式インジケータによる圧力行程線図より求めた各負荷時の図示平均有効圧およびこの補正值と抵抗線ひずみ計式インジケータより得られた値を比較して示した。

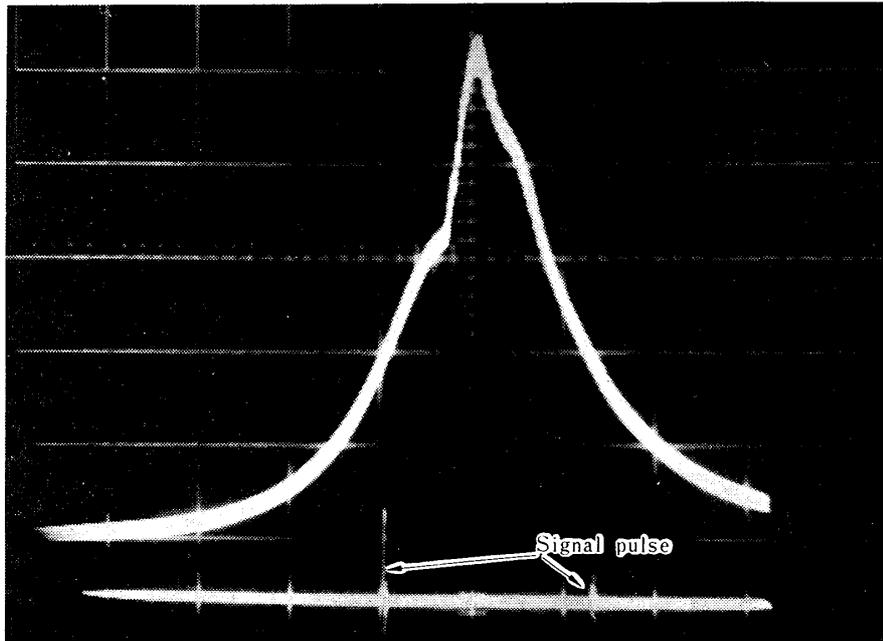


Fig. 20 Example of examination of cylinder pressure obtained with the magnetostrictive pressure indicator

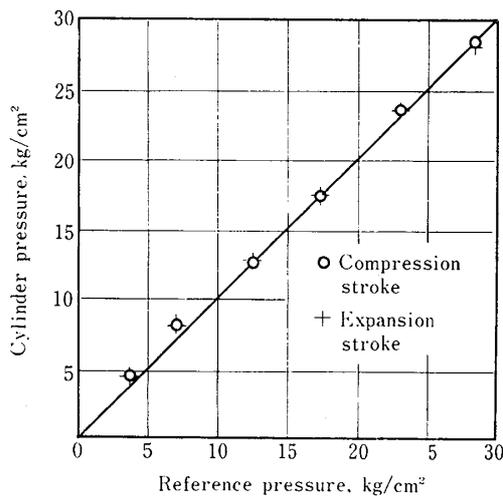


Fig. 21 Comparison of cylinder pressure obtained with the magnetostrictive pressure indicator with reference pressures

Table 3 Values of IMEP obtained from the indicator diagrams by handiwork

負荷	磁気ひずみ式 kg/cm ²	磁気ひずみ式補正 kg/cm ²	抵抗線ひずみ計式 kg/cm ²	両者の差 kg/cm ²
1/4	3.99	3.48	3.34	-0.14
2/4	5.29	4.78	4.85	+0.07
3/4	6.32	5.81	5.69	-0.12
4/4	7.40	6.89	6.56	-0.33

7.2 メータの指示した図示平均有効圧および図示馬力 遠隔指示装置のメータで指示された図示平均有効圧および図示馬力を、圧力行程線図より得られた図示平均有効圧および (1) 式に機関定数を入れた次式

$$N_i = 0.0264 n p_i \quad (1')$$

によって求めた図示馬力と比較して、それぞれ Table 4 および Table 5 に示した。

Table 4 Accuracy of the readings of IMEP

負荷	圧力行程線図より求めた値 kg/cm ²	メータで指示された値 kg/cm ²	誤差* %
1/4	3.48	3.2	-4.0
2/4	4.78	4.6	-2.6
3/4	5.81	5.7	-1.6
4/4	6.89	6.9	-0.15

Table 5 Accuracy of the readings of IHP

負荷	圧力行程線図より求めた値 PS	メータで指示された値 PS	誤差* %
1/4	29.0	26	-3.3
2/4	48.8	47	-2.0
3/4	69.5	70	+0.6
4/4	91.0	91	0

* 最大値に対する割合

図示平均有効圧がインジケータの校正曲線のヒステリシスにより常に一定値だけ過大であるために、(1')式からわかるように、図示馬力の指示目盛は、回転速度に比例する補正をされなければならない。しかし、これは実行上困難なことであるので、ここでは回転速度の変化による補正量の変化は、二次の微小量として、一定値で補正を行なった。しかし、この機関の運転範

囲は1/4 負荷時の 316 rpm より 4/4 負荷時の 500 rpm までであり、一定値で補正を行なったことによる誤差は 1.7% を越えない。

7.3 最高圧力 Table 6 にメータで指示したシリンダ内の最高圧力と、同時に測定したヘソニのインジケータの指示値とを比較して示した。

7.4 インジケータの零点移動 前に述べた温度

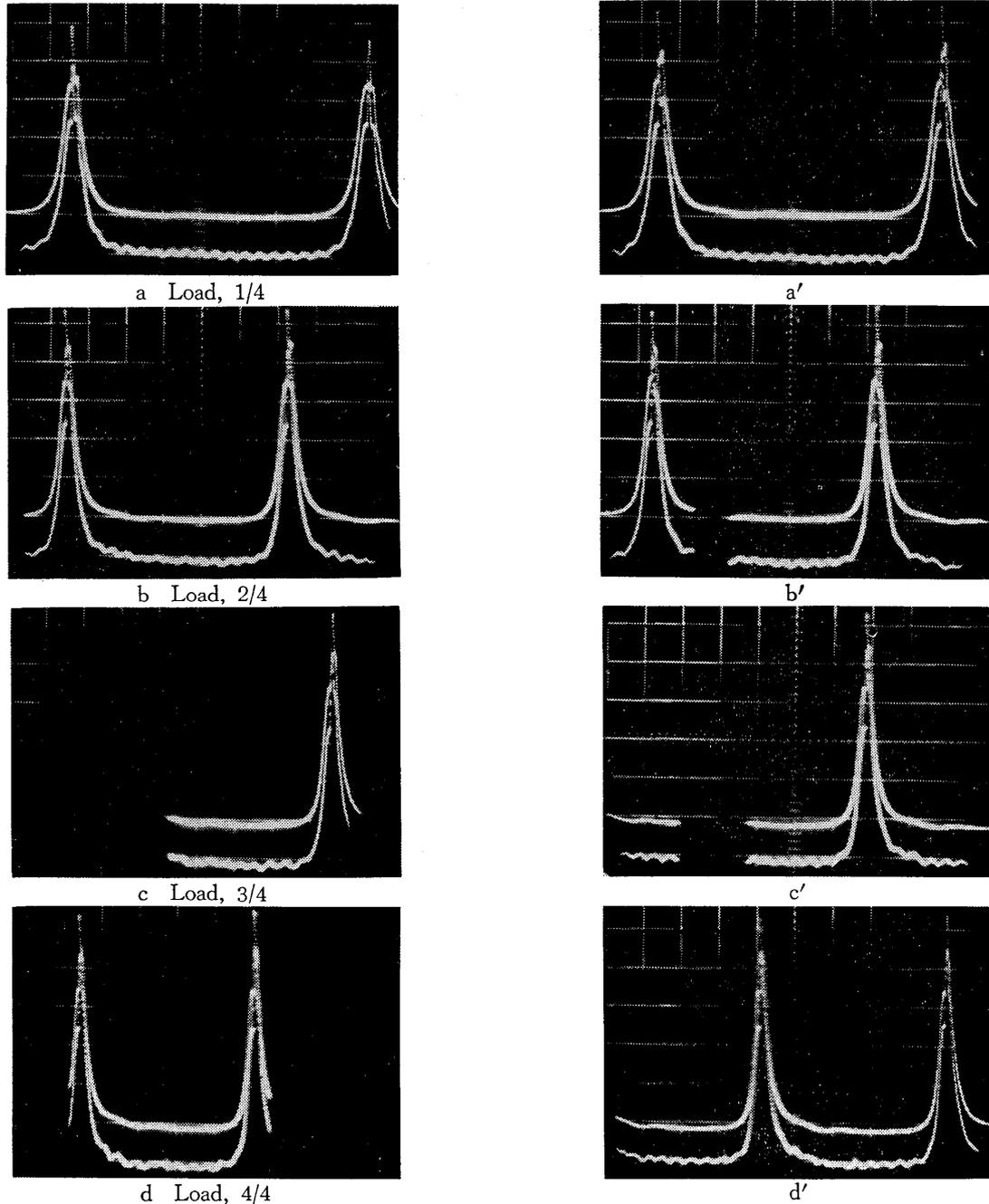


Fig. 22 Shift in zero point in running test
 upside: with the wire strain gage type pressure indicator
 downside: with the magnetostrictive pressure indicator
 a, b, c, d: immediately after load shift
 a', b', c', d': in 10 minutes after load shift

Table 6 Accuracy of the readings of the maximum cylinder pressure

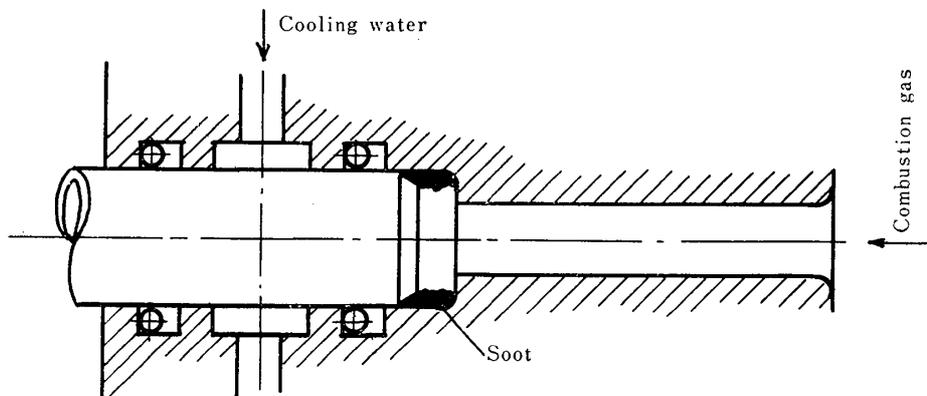
負荷	メータの指示 kg/cm ²	ヘンニのインジケータの指示 kg/cm ²	両者の差 %
1/4	53	53	0
2/4	58	58	0
3/4	60	61	-1.6
4/4	60	61	-1.6

特性によれば、インジケータの測定用ゲージと補償用ゲージとの間に1°Cの温度差を生じるとフルスケールの約2%、両ゲージの温度が同じように10°C変化すると1.5%の零点の移動が起こる。圧力の零点移動は平均有効圧や馬力の指示には影響しないが、最高圧力の指示にはそのまま誤差となって表われる。そこで、1/4 2/4 3/4 4/4 負荷の運転を10分ずつ連続して行ない、負荷を変えた前後および一定負荷で運転中に、零点がどの程度動くかブラウン管上で観測した。その場合、ブラウン管のビーム自身の移動も予想されるので、同時に抵抗線ひずみ計式インジケータの出力も入れて、それとの相対的な動きにも注意を払った。Fig. 22はその記録である。上が抵抗線ひずみ計式インジケータ、下が磁気ひずみ式インジケータによる記録である。また、図のa b c dは負荷を変えた直後、a' b' c' d'が10分後の記録である。これによれば、零点は全負荷運転終了直前抵抗線ひずみ計式インジケータでは約4%、磁気ひずみ式インジケータではその $\frac{1}{2}$ 程度負側に動いているのがみとめられる。

8. 耐久性試験

装置の耐久性で最も問題になるのは、高温と高圧、さらに強い振動を受けるインジケータである。磁気ひずみ効果を利用した変換器は、応力を低くとることが

でき、なおかつ出力の大きいことが特徴である。ここに使用したフェライトコアの応力は、シリンダ圧力60 kg/cm²のときに70 kg/cm²であり、これは圧縮強さの1/14以下の値で強度的には十分安全である。また、受圧機構はダイヤフラムを持たず、直接プランジャで圧力を受けるので、この部分が破損することは考えられない。しかし、プランジャ部の気密を保つためにOリングが使用されている。これは耐熱性であり、また水で冷却されているが、一部燃焼ガスに触れるので、この部分の変質が考えられる。そこで、実験用二サイクル機関に取り付け、最高圧力約80 kg/cm²をかけて、耐久性の試験を行なった。一定負荷の運転をし、オシロスコープで燃焼波形を、またメータで最高圧力の指示を観察した。1.4×10⁶回転で感度が低下し始めたので、変換器を分解して調べた。プランジャ頭部にFig. 23に示すようにカーボンが付着、固化しており、これが感度低下の原因と考えられたので、これを除いて実験を続けた。感度はカーボンの除去によって回復した。さらに、1.0×10⁶回転で前同様感度が低下し、カーボンの除去によって回復した。この試験は、他の目的のために運転された機関に便乗して行なったもので、運転時の発煙が多く、ボッシュのスマークナンバで8の状態であった。このような燃焼は異常であって、通常の運転状態においては、カーボンの付着による感度低下の時期はもっと先に延ばされると思われる。しかし、プランジャ前面の空間の形状や大きさを増して、カーボン堆積による感度への影響を少なくし、また、一定時期に、堆積したカーボンを簡単に除去する工夫が必要と思われる。現在までのところ、黄銅製のプランジャ頭部の燃焼ガスに触れる部分に、腐食のあとがみとめられるので、この部分の耐食メッキが必要であるほかは異常なく、懸念されたOリングの変質はみとめられない。現在まだ試験を継続中の段階であるが、

**Fig. 23** Soot piled up in front of the plunger

変換器が破損するまでの時間は、相当に長いことが予想される。

9. 結 言

磁気ひずみ効果を利用したインジケータを使用し、船用ディーゼル機関の図示馬力の遠隔指示装置を製作した。この装置は、図示平均有効圧、図示馬力を約3%、またシリンダ内最高圧力を2%の精度で、メータで指示することができる。また、オシロスコープを使用して、圧力時間線図、圧力行程線図を表示することができる。耐久性試験は約 2.5×10^6 回転までしか行っていないが、耐用限度はこれよりはるか先にあると考えられる。

今後改良すべき点としては、インジケータ受圧部のプランジャ前面に付着するカーボンによって感度が低下するので、一定時期に堆積したカーボンを除去する簡単な方法を工夫する必要がある。また、インジケータ圧力出力電圧特性にヒステリシスがあるために、得られる図示平均有効圧および馬力には補正が必要である。この補正は一定値で行なうことが可能で簡単であるが精度をよくするためには、ヒステリシスのもっと小さい、補正を必要としない磁気ひずみ素子を得ることが必要である。現在、図示平均有効圧および馬力を計算するのに、カウンタを使用し、15サイクルの平均値を求める方法をとっている。しかし、時としてカウ

ントミスによると思われる低い測定値が得られることがあり、またリセットしてカウントする操作は煩わしくもあるので、これらの量を常時メータで指示することが望ましい。これらの改良すべき点は、つぎに製作を予定している圧力微分型の指示装置において実行したい。

最後に、この装置の製作は長野計器製作所の手を煩わし、演算回路の設計については同社の技術に負うところが多かった。感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 布施 肇, 堀 達, 柴田和孝, マイハック指圧計の許容範囲について, 内燃機関, 4巻3号, 昭40-3, p. 9~26
- 2) 赤堀 昇, 中田正美, シリンダ出力計, 機械学会前刷集 No. 110, 1964-4, p. 65~68
- 3) 日本船用機器開発協会, 船用ディーゼル主補機関の指示馬力遠隔指示装置の試作事業報告書, 1968-3
- 4) 東野一郎, p_i メータ, 内燃機関計測法講習会教材, 昭40-2, p. 1~13, 自動車技術会
- 5) 岩柳順二, 磁わい計器材料としてのフェライトの研究, 運輸技研報告, 9巻11号, 1959-12
- 6) 岩柳順二, 安福精一, 周波数変調型磁わい変換器の研究, 運輸技研報告, 11巻5号, 1961-5
- 7) 稲見信雄, 渡辺和夫, エンジン指圧計の耐久性について, 船舶技研講演概要, 1967-11, p. 163~166