

フェライトの磁気ひずみ効果を利用した圧力計と 内燃機関分野への応用

堀 保 広*

Pressure-Measuring Transducer utilizing the Magnetostriction Effect of Ferrite and its Application to the Field of the Internal Combustion Engine

by

Yasuhiro HORI

A new pressure transducer using a ferrite core for a detecting element and its applications to the measurements of indicated horsepower and fuel injection rate of Diesel engines are presented.

The properties of a ferrite core selected out of commercialized supersonic vibrators are investigated. The magnetic induction and the reversible permeability of the core change in proportional to compressive stress at a part of higher induction than the knee of the magnetization curve and the hysteresis of the respective change is not large. These stress sensitivities are hardly influenced by temperature. In order to help our understanding of those properties, the theoretical study based on the domain theory is done. An equation for materials having negative magnetostriction, which indicates the relation between magnetic induction changed by applying stresses and various fundamental constants of the materials is developed. The frequency-response of the detecting element is examined. The result shows that electro-magnetic losses are negligible and good frequency-response is obtained up to a frequency of 65 kHz, limited by mechanical resonance.

Pressure can be transduced into voltage by utilizing either the change of magnetic flux or the change of permeability. The transducers are classified by the transducing methods as follows: direct acting type, amplitude-modulation type, frequency-modulation type. General features of the transducers are itemized as follows: (1) Output is large. (2) Inner impedance is minimized. (3) Frequency-response is good. (4) Components are few and mechanically tough.

The direct acting type transducer is applied to a horsepower indicator for monitoring of a marine Diesel engine. The horsepower indicator indicates indicated horsepower, indicated mean effective pressure and the maximum cylinder pressure. If a cathode ray oscilloscope is used, this indicator can display a diagram of cylinder pressure vs time or cylinder pressure vs cylinder volume on it. The test of the horsepower indicator is carried out on the training ship "Ginga-Maru" for about 500 hours net. The test shows fairly good results except that the sensitivity of the pressure transducer falls nearly at the rate of 0.023 percent per hour, probably owing to combustion products piled up on the plunger

* 機関性能部 原稿受付 昭和53年4月27日

head of the pressure transducer and the plunger head is slightly corroded.

Zeuch reported a method, by which the fuel injection rate of a Diesel engine was obtained as the time derivative of the pressure rise in a pressure chamber during injection. The original injection rate meter is improved by using the direct acting type transducer instead of a piezo-quartz pressure transducer. The new injection rate meter is easy to handle and inexpensive. This measuring device is applied to measurement of the injection rates of the injection system designed for a medium-sized, high-supercharged and experimental engine. In particular, secondary injection observed there is shown in detail. As another application of the device, the injection rates of the large-sized and geared Diesel engine recently developed in our country are measured. The oscillating injection observed at lower speed range is theoretically investigated.

目 次

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 緒論 2. フェライトの磁気ひずみ効果と圧力測定への応用 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 まえがき 2.2 磁化に及ぼす圧縮の効果 <ul style="list-style-type: none"> 2.2.1 測定方法 2.2.2 測定結果 2.3 理論的考察 <ul style="list-style-type: none"> 2.3.1 単結晶の磁気ひずみ効果 2.3.2 多結晶の磁気ひずみ効果 2.4 温度の影響 2.5 動特性 <ul style="list-style-type: none"> 2.5.1 測定方法 2.5.2 測定結果 2.6 圧力—電圧変換の方法 2.7 実施例 <ul style="list-style-type: none"> 2.7.1 直動形変換器 2.7.2 振幅変調形変換器 2.8 まとめ 3. 図示馬力測定への応用 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 まえがき 3.2 図示馬力測定の原理 3.3 演算回路 3.4 ピストン変位, 回転速度, 下死点の検出 3.5 図示馬力と図示平均有効圧の校正 3.6 中形機関における実験 3.7 実船実験 <ul style="list-style-type: none"> 3.7.1 目的 3.7.2 実験船の主機と測定装置 3.7.3 実験結果 | <ul style="list-style-type: none"> 3.8 まとめ 4. 燃料噴射率測定への応用 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 まえがき 4.2 原理と構造 4.3 測定回路 4.4 検定 4.5 中形高出力実験機関への応用例 <ul style="list-style-type: none"> 4.5.1 実験装置 4.5.2 実験結果 4.5.3 考察 4.6 大形中速船用機関への応用例 <ul style="list-style-type: none"> 4.6.1 実験装置 4.6.2 実験結果 4.6.3 振動的な噴射の考察 4.7 まとめ 5. 結論 <ul style="list-style-type: none"> 5.1 成果 5.2 今後の課題 |
|--|---|

文献

1. 緒 論

工業分野での測定は、機器や設備の設計、あるいはそれらの効率的なまた安全な運転に必要な情報を得るための、最も基礎的な作業である。測定器の概念は、この目的に即応するための、電子工学を利用した情報処理装置の著しい進歩と共に、かつての単に指針の振れや記録紙上の波形を読み取るだけのものに代って、情報処理装置をも含めたものに拡大され複雑化した。しかし、ある量が測定できるかどうかは、測定系の最先端に位置する変換器に適当なものが得られるかどうかにかかっており、複雑化した測定系の中でそれが占

める重要性は、以前と変るところがない。技術革新が進んだ今日、各方面で、より高性能のあるいは全く新しい測定器が要求されることは前にも増して強く、それに対応するために、不断の努力とくに変換器を開発するための努力を欠かすことはできない。測定系の中で、変換器が最も多様性に富んでいるのは、実際にこの努力がなされている証左であろう。

変換器設計の成否は、それに利用される物理効果選択の適否とその効果を利用するための変換素子設計の巧拙に左右されるところが大きい。磁気ひずみ効果は、小林¹⁾、川原田²⁾によって、わが国では始めて、測定に利用された特色のある効果である。機械や構造物

を構成する鋼材の死荷重や残留応力を非破壊的に測定したり^{3)~11)}、鋼材の疲労度の早期検出をすることもできる興味深い効果であるが^{12)~19)}、力を電圧に変えて測定するのにも、広く利用されてきた。表 1.1 に、機械量を電気量に変えて測定するのに現用されている主な効果と、それらの特徴を示した。ひずみや変位に対する抵抗が小さい点で、金属細線と半導体の抵抗変化はひずみの計測に、可動鉄片によるインダクタンス変化と金属平行板の電気容量変化は変位の測定に適している。これらに対し、磁気ひずみ効果は、ピエゾ効果と共に、ほとんど変位を許さない点で、力の測定に適した効果である。

Table 1.1 Physical effects utilized for main mechano-electric transducers.

Effect	Main object*	Sensitivity* **	Merit*
1. Resistance change due to variable dimensions and variable resistivity of conductor	strain	2	easy to handle and small-sized.
2. Piezoresistance effect of semiconductor.	strain	100	high sensitivity.
3. Inductance change due to change of core position.	displacement	1 V/mm	stable and suitable for large displacement
4. Capacitance change due to change of air gap.	displacement	1 V/ μ	ultra-high sensitivity.
5. Piezoelectric effect of quartz or leadzirconate.	force	2.3×10^{-12} C/N 600×10^{-12} C/N	low temperature coefficient. large output.
6. Magnetostriction effect of metal or ferrite	force	2000 1000	large output. suitable for impact force.

* From ref. 44), except the item of piezoelectric effect.

** Values of no dimensions are given in gauge factor.

実際に、磁気ひずみ効果は、力量計として、積雪沈降圧²⁰⁾、進水時の船の発進力²¹⁾、貯水池における堆積物の量²²⁾、雪の落下衝撃力²²⁾、雪が付着した電線の張力²²⁾、線引き機械の張力²²⁾、航空機の操舵力²³⁾、圧延荷重の²⁴⁾測定に、トルク計として、自動車機関のトルクとトルク変動^{25) 26)}、電車および機関車の主電動機のトルク²⁷⁾、高速軸受試験機のトルク²⁸⁾、化学反応釜の攪拌トルク²⁹⁾、走行中の自動車のトルク³⁰⁾、船の推進軸のトルク^{31) 32)}、木工鉋の切削力²²⁾の測定に利用された。このほか、この測定法の特色を生かして、機械の一部である軟鋼の軸を被測定材として、非接触で伝達トルクを測定する方法も考案されている^{33)~35)}。また、圧力計として、ペンストック内の変動水圧²²⁾、模型船の水圧分布²²⁾、防波提に作用する波圧³⁶⁾、模型船の航

行により試験水槽内に生じた微小変動水圧³⁷⁾、立体土圧³⁸⁾、内燃機関の異常燃焼³⁹⁾の測定に使われた。力の測定以外にも、小形化された磁気ひずみ管を使って、航空機の飛行実験中の風向と加速度²³⁾、鉄道軌条の動的ひずみ⁴⁰⁾、走行中の自動車の板ばねの応力⁴¹⁾などの測定に利用された。これら磁気ひずみ式変換器の特徴の一つは、内部インピーダンスがきわめて低い点にあり、ピエゾ水晶変換器の場合のように、高級なチャージ・アンプを必要とせず、湿度や導線の長さに影響されることがない。したがって、出力の大きいこと、丈夫なことと相まって、取り扱い上の労力と経済的な負担が大幅に軽減され、現場での使用が容易である。交番磁化によって変調変換器として使えば、静的な力の測定が可能である点も、ピエゾ電気式変換器に比べ

て、すぐれている点にあげられる。

従来、磁気ひずみ素子の材料としては、ニッケル、ニッケル鉄合金、鉄アルミ合金、大容量のものでは、軟鋼など金属磁性体が用いられた。したがって、これを交番磁化して使う場合には、搬送波となるその交流周波数は、主としてうず電流損失のために制限され、数キロヘルツを越えることは困難で、測定できる現象の速さも、それによって制限された。直流磁化して使う場合でも、加えられる力の変化が速くなると、それによって生じる磁束の変化は、うず電流にさまたげられて、力の変化に比例しなくなる。金属薄板を積層して変換素子を作ることによって周波数限界を上げることが可能であるが、製作が面倒になる。これを解決するために、磁気ひずみ材料として、フェライトを使うことが考えられた。そのための研究では、 $M_n Z_n$ 系、 $N_i Z_n$ 系、 $C_o Z_n$ 系の三種類のフェライトが調べられた⁴²⁾。周波数変調形変換によって、 $N_i Z_u$ 系フェライトは、 100 kg/cm^2 の応力に対し約10%の周波数偏移を示し、その他の特性もすぐれていたもので、その材料を使って力量計が試作され、衝撃力が測定されている⁴³⁾⁴⁴⁾。

前述したように、磁気ひずみ効果を利用した変換器には、低内部インピーダンス、高出力、丈夫などの特徴があり、使用条件に左右されることの少ない利点がある。フェライトは、粉末冶金的方法で比較的簡単に製作され成形され得るので、それを使うことによって速い現象の測定が可能になれば、磁気ひずみ式変換器の応用できる分野は、さらに拡大されるであろう。著者は、まず自分達の研究に役立てるために、圧力計に利用し、内燃機関の分野への応用を意図した。内燃機関で使われる測定器には、すぐれた応答性と温度・湿度・振動などの苛酷な条件下での、きびしい安定性と耐久性が要求されるものが多い。そのために、絶えずより高性能の変換器の開発が望まれている。例えば、インジケータ開発の歴史は、過去200年近くにわたって、急激に変化するシリンダ内圧力を、激しい温度変化や強い振動さらに取り付け場所の制限など困難な条件下で、いかに正確に測定するかの苦心の歴史であり、今までに作られた変換器の種類は多いが、それでもなおすべての点で満足できるものは得られていない。

2. フェライトの磁気ひずみ効果と 圧力測定への応用

2.1 まえがき

(312)

フェライトは、一般に $MO \cdot Fe_2O_3$ という組成を持つ一群の鉄酸化物である。ここに、 M は二価の金属イオンで、 $M_n C_o N_i Z_u C_n F_e$ などである。 M として二種またはそれ以上の二価イオンを混入することにより固溶体を作ることができ、さまざまな磁化特性を実現することができる。フェライトについては多くの研究があるが、それらは高周波材料、永久磁石材料、非線形材料などに関するものが大部分であって、測定用材料としての研究は、前述の岩柳らの研究があるにすぎない。その研究では、 N_i 系フェライトなかでも $Ni_{0.8}Zn_{0.2} \cdot Fe_2O_4$ は、金属材料をしのご性質を持つことが報告されている。同じ N_i 系フェライトで、 $NiO C_uO Fe_2O_3$ を主原料とし、 $C_oO M_{no}$ の微量を添加して、圧縮成形後焼成された振動子が、超音波受波用として市販されている。選択性を重視して機械的共振を利用する超音波受波用と平坦な周波数特性が必要でそれを避ける測定用とでは、変換素子の使い方に違いがあるが、圧力を電圧に変換する点は同じであり、また成分的にも似ているので、受波用として開発された $N_i C_u$ 系フェライトの振動子が力の測定用としてもすぐれた性質を示すことを期待することができる。市販の振動子が力の測定に利用できれば、それによって節約できる労力と時間は大きい。そこで、市販品の中から、図2.1に示すような、形の最も小さい π 形100kHzの振動子を選んでその性質をしらべた。

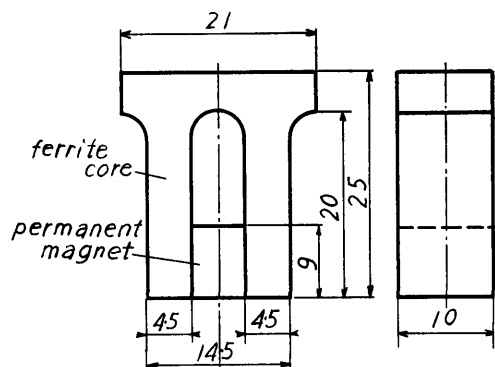


Fig. 2.1. Size of a specimen

本章で用いた主な記号と単位

記号	単位	意味
A_1	N/A	力係数
A_2	N/A	逆力係数
E	N/m^2	縦弾性係数
E_1, E_2	V	コイルの端子電圧

F	J	自由エネルギー
F_H	J	磁界のエネルギー
F_K	J	結晶磁気異方性エネルギー
F_o	J	外力のエネルギー
H	AT/m	磁界の強さ
I	A	電流
J	Wb	磁化の強さ
J_s	Wb	飽和磁化の強さ
K	J/m^3	結晶磁気異方性定数
L	$-, H$	ラグランジュの未定定数, またはインダクタンス
m	kg	振動子の等価質量
R	Ω	コイルの抵抗
r_o	$N \cdot s/m$	振動子の放射等価抵抗
r_1	$N \cdot s/m$	振動子の等価粘性抵抗
S	m^2	振動子の断面積
s	N/m	振動子の等価スチフネス
t	s	時間
Z_d	Ω	制動インピーダンス
Z_m	Ω	動インピーダンス
z	$N \cdot s/m$	機械的インピーダンス
α_i	—	自発磁化の方向余弦
β_i	—	磁界, 外力および観測方向の方向余弦
A	W/N	磁気ひずみ感度
A_μ	m^2/N	比可逆透磁率に関する磁気ひずみ感度
$\lambda_{100}, \lambda_{111}$	—	{100}および{111}方向の飽和磁気ひずみ
$\dot{\mu}$	—	比皮相複素透磁率
μ_r	—	比可逆透磁率
π_{ij}	N/m^2	応力のテンソル
σ	N/m^2	応力
ϕ	Wb	磁束

添字 $i, j=1, 2, 3$ であり, 本文中文字の上の \cdot はタイム・ベクトルであることを, また $-$ は多結晶体の値であることを示す。

2.2 磁化に及ぼす圧縮の効果

強磁性体の磁化状態は, 一定温度の下では, 磁界と応力によって変わる。一定応力を受けた強磁性体の磁化曲線が, 圧縮応力によってどのように変わるかをしらべた。

2.2.1 測定方法 図2.2に, 測定回路を示した。試料は, 2個の振動子のマグネットをはずし, 図示の

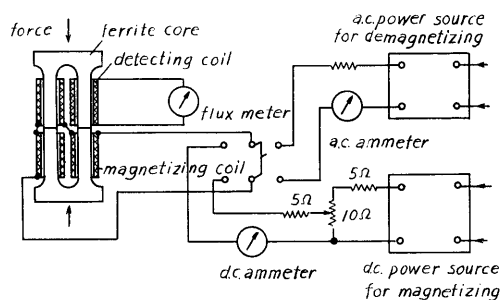


Fig. 2.2 Arrangement for measuring magnetization

ように, 向い合わせに接着して磁気閉回路を作り, 柱の部分に磁化コイルと検出コイルとを, それぞれ 370 回と 500 回巻いた。試料に一定の圧縮力を加えた状態で, 消磁状態から出発して, 磁化電流を徐々に増し, それに伴って増加する磁束を, 市販のエレクトロニック磁束計(横河電機製3254型)で測定した。

2.2.2 測定結果 図2.3に, 柱の部分の圧縮応力が 0, 50, 100 kg/cm^2 の場合の磁化曲線を示した。図では, 磁化の過程を, おおよそ磁界の強さが約 0 ~ 1.5 O_e での変化の初透磁率範囲, 1.5 ~ 6 O_e での変化の不連続磁化範囲, 6 O_e 以上での変化の回転磁化範囲の三つの段階にわけることができる。磁界の強さを増すと, 初透磁率範囲では, 磁化は自発磁化のわずかな容易磁化方向からの回転と磁壁のわずかな移動によって行われる。そのどちらが有効に働くは, 磁性体の

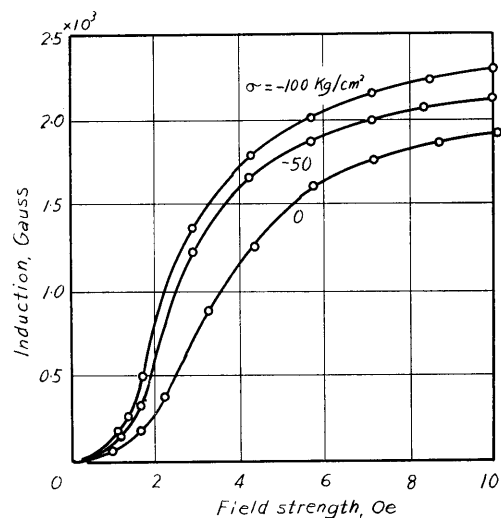


Fig. 2.3 Effect of compression on the magnetization curve

磁気異方性と物質の一様性すなわち空孔、転位、非磁性夾雑物などによって生じる内部応力の多少に関連しており、内部応力が小さいと磁壁の移動が容易になり、変化は大きくなる。ここでの変化は可逆的である。不連続磁化範囲では、磁化は主として磁界の方向に近い磁化容易方向への磁壁の不連続な移動によって行われる。ここでの変化は大きい、内部応力の存在によって磁壁の位置によるエネルギーにいくつかの極大極小点があるので、非可逆的である。回転磁化範囲では、自発磁化が磁化容易方向をはなれて磁界の方向に近づくことによって行われ、その変化は緩慢であるが可逆的である。

同じ図で、一定磁界での外力による磁束密度の変化をみると、不連続磁化範囲での変化は大きい非直線的である。磁界の強さを増して回転磁化範囲に入ると、変化は小さくなるが直線性が改善される。磁界による場合と同じように、応力による磁化の変化も自発磁化の回転と磁壁の移動によって行われるので、不連続磁化範囲での変化は非可逆的であり、回転磁化範囲での変化は可逆的である。測定の場合に使われる磁界の強さは、応力による変化の直線性、可逆性、磁化に要する電力の経済性を考慮して決定されるが、ここでは $10 O_e$ 近傍の磁界が適当と考えられる。これは、従来多くの磁気ひずみ式変換器において、磁化曲線の肩の少し上あたりを、最適磁界選択の目安としていたことと一致する。なお、数は少ないが、変化が直線的、可逆的であるので、初透磁率範囲の磁界を選んだ計器がある。

2.3 理論的考察

上述のように、磁化状態は外力によって変化する。この効果を理論的に考察し、材料の磁気的基本量がどのような形で関与しているかをしらべる。

2.3.1 単結晶の磁気ひずみ効果 フェライトはスピネル形の結晶構造を持つフェリ磁性体であるが、A, B 両副格子の磁気能率の差を考えれば、フェロ磁性体とまったく同様に扱うことができる。強磁性体を構成する各結晶粒は、さらに磁区と呼ばれる小さな領域に分れており、キュリー点以下の温度では、磁区内では、各原子に属するスピン磁気能率が同一方向をとり、飽和にまで磁化している。自発磁化と呼ばれる。このスピン間のポテンシャル・エネルギーは結晶軸に対して異方性を持ち、エネルギーの最も低い方向をとって安定している。磁化容易方向と呼ばれる方向である。このエネルギーは、スピン相互間の距離の関数でもある

(314)

ので、自発磁化の発生によってポテンシャル・エネルギーが変わると結晶格子にひずみが生じ、それは自発磁化の方向と共に変化する。磁気ひずみと呼ばれるものである。磁化の方向にのびる材料を正の磁気ひずみを持つ材料、ちぢむ材料を負の磁気ひずみを持つ材料と云う。この磁気ひずみの存在のために、自発磁化は外力に対しても異方性を持つ。結局、自発磁化は結晶軸と外力と磁界との間の三つの異方性エネルギーに拘束され、その和を最小にする方向をとって安定する。

内部応力が問題になる初透磁率範囲や不連続磁化範囲での磁気ひずみ効果を理論的に求めることは困難であるが、それらを測定に利用することは少ない。そこで、簡単のために、つぎの仮定をおいて、解析する。

1. 不連続磁化範囲は小さい磁界で終り、終った磁界付近では、各結晶粒の自発磁化は磁界に最も近い磁化容易軸の近くにある。

2. ビラリ効果を考える。すなわち、外力は磁界と同方向に作用し、その方向の磁化の強さを観測する。

立方晶系の結晶では、図 2.4 に示すように、座標を結晶軸に関してとると、結晶磁気異方性エネルギー F_K 、自発磁化と磁界間のポテンシャル・エネルギー F_H 、自発磁化と外力間のポテンシャル・エネルギー F_σ は次式で与えられる⁴⁵⁾。

$$F_K = K \sum_{i \neq j} \alpha_i^2 \alpha_j^2 \quad (2.1)$$

$$F_H = -HJ_s \sum \alpha_i \beta_i \quad (2.2)$$

$$F_\sigma = -\frac{3}{2} \lambda_{100} \sum \alpha_i^2 \pi_{ii} - 3 \lambda_{111} \sum \alpha_i \alpha_j \pi_{ij} \quad (2.3)$$

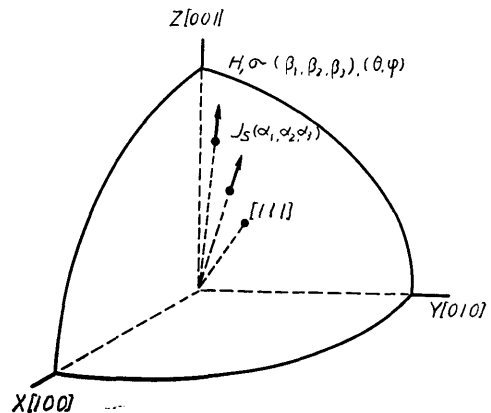


Fig. 2.4. Directions of spontaneous magnetization, magnetic field and stress in a domain, shown with respect to cubic crystal axes

ここで、 K は結晶磁気異方性定数、 H は磁界の強さ、 I_s は飽和磁化の強さ、 λ_{100} , λ_{111} は $[100]$, $[111]$ 方向の飽和磁気ひずみ、 α_i は自発磁化の方向余弦、 β_i は磁界、外力、観測方向の方向余弦、 π_{ij} は応力テンソル、 $i, j=1, 2, 3$ である。

磁界の方向に加えられた一軸応力を σ とすると、応力テンソルは次式で与えられる。

$$\pi_{ij} = \beta_i \beta_j \sigma \quad (2.4)$$

自由エネルギー F は次式で表わされ

$$F = F_K + F_\sigma + F_H \quad (2.5)$$

自発磁化の方向余弦の間には

$$\sum \alpha_i^2 = 1 \quad (2.6)$$

の関係があるから、自発磁化の方向余弦は、ラグランジュの未定定数によって、次式および (2.6) より求めることができる。

$$\partial \{F + L(\sum \alpha_i^2 - 1)\} / \partial \alpha_i = 0 \quad (2.7)$$

ここで、 L はラグランジュの未定定数である。

(2.6) (2.7) より得られた式は、 H_0 を一定磁界、 h をそれよりの変化分、すなわち

$$H = H_0 + h \quad (2.8)$$

とし、

$$\begin{aligned} \ell &\equiv (K+L)/K, \quad P \equiv (\lambda_{100} - \lambda_{111})/\lambda_{111}, \\ p &\equiv 3\lambda_{111}\sigma/2K, \quad Q \equiv H_0 I_s/2K, \\ q &\equiv h I_s/2K \end{aligned} \quad (2.9)$$

により無次元化され、つぎのように表わされる。

$$\alpha_{i0}^3 - \ell_0 \alpha_{i0} = -Q \beta_i \quad (2.10)$$

$$\sum \alpha_{i0}^2 = 1 \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} (3\alpha_{i0}^2 - \ell_0) \alpha_{i1} - \alpha_{i0} \ell_1 = & -\beta_i q - (\beta_i \sum \beta_j \alpha_{j0} \\ & + P \beta_i^2 \alpha_{i0}) p \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\sum \alpha_{i0} \alpha_{i1} = 0 \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} (3\alpha_{i0}^2 - \ell_0) \alpha_{i2} - \alpha_{i0} \ell_2 = & -3\alpha_{i0} \alpha_{i1}^2 \\ & + \ell_1 \alpha_{i1} - (\beta_i \sum \beta_j \alpha_{j1} + P \beta_i^2 \alpha_{i1}) p \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\sum (\alpha_{i1}^2 + 2\alpha_{i0} \alpha_{i2}) = 0 \quad (2.15)$$

上式は、ある一定磁界 Q の近傍で、応力と磁界の小さな変化 p, q があつたとき、自発磁化の方向余弦 α_i とラグランジュの未定定数 ℓ を与える。ただし、 α_i と ℓ は p と q のテーラ展開で、つぎのように表わされるとした。

$$\alpha_i = \alpha_{i0} + \alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \dots \quad (2.16)$$

$$\ell = \ell_0 + \ell_1 + \ell_2 + \dots$$

上式右辺の 1, 2, 3 項は、それぞれ p と q に関して定数、一次項、二次項である。

(2.10)~(2.15) の計算は複雑であるが、逐次近似に

よる数値解を得ることは可能である⁴⁶⁾。しかし、磁気的基本量との関係を知るためには、解を解析的な形で得ることが望ましい。そこで、簡単のために、低磁界でのものに限定して解を求めた。仮定 1 より、測定にはこの部分の磁界が使われる。また、 C_0 系を除く大多数のフェライトは負の磁気ひずみを持っているので、ここでは三回軸を磁化容易軸とした。

$Q \ll 1$ のとき、(2.10) (2.11) より

$$\alpha_{i0} \doteq 1/\sqrt{3} \quad (2.18)$$

$$\ell_0 = 1/3 \quad (2.19)$$

の近似解が得られる。これらを (2.12) (2.13) に代入して α_{i1} と ℓ_1 が得られ、それらと (2.14) (2.15) から α_{i2} と ℓ_2 が得られ、結局 α_i は次式から求められる。

$$\begin{aligned} \alpha_i = & (1/\sqrt{3}) + (0.500 \sum \beta_i - 1.50 \beta_i) q + \{0.289 \\ & (\sum \beta_i)^2 - 0.866 \beta_i \sum \beta_i + (0.288 - 0.866 \beta_i^2) \\ & P\} p + \{-0.650 (\sum \beta_i)^2 + 2.60 \beta_i \sum \beta_i \\ & - 1.95 \beta_i^2 + 1.50\} q^2 + \{-0.0722 (\sum \beta_i)^4 \\ & + 0.433 \beta_i (\sum \beta_i)^3 - 1.95 \beta_i^2 (\sum \beta_i)^2 + 1.30 \beta_i \\ & \sum \beta_i + 0.433 P \beta_i^2 (\sum \beta_i)^2 - 2.60 P \beta_i^3 \sum \beta_i \\ & + 1.30 P \beta_i \sum \beta_i^3 - 0.144 P (\sum \beta_i)^2 + 0.433 \\ & P \beta_i \sum \beta_i - 0.0650 P^2 \beta_i^4 + 0.433 P^2 \beta_i^2 \\ & - 0.0722 P^2\} p^2 + 2\{-0.500 (\sum \beta_i)^3 + 1.13 \beta_i \\ & (\sum \beta_i)^2 - 3.38 \beta_i^2 \sum \beta_i + 0.625 \beta_i + 1.13 \beta_i \\ & + 0.375 \beta_i^2 \sum \beta_i + 0.375 P \sum \beta_i^3 - 2.25 P \beta_i^3 \\ & - 0.500 P \sum \beta_i + 0.750 P \beta_i\} p q \end{aligned} \quad (2.20)$$

磁界方向の、無次元化された磁化の強さは

$$j = \sum \beta_i \alpha_i \quad (2.21)$$

すなわち、磁化の強さ J は

$$J = J_s \sum \beta_i \alpha_i \quad (2.22)$$

である。

2.3.2 多結晶の磁気ひずみ効果 多結晶の磁気ひずみ効果は、単結晶で得られた結果を、結晶軸に対してとり得る磁界の各方向について、平均して得られる。図 2.4 に示したように、磁界が第 1 象限内にあるときは、自発磁化は $[111]$ の近くにあり、両者の相対的な関係は磁界が他の象限にある場合にもこれと同じであるから、平均は単位球面の $1/8$ にあたる第 1 象限についてだけ行えばよい。

磁界の方向余弦は、単位球面上の極座標 (θ, ϕ) によって、つぎのように与えられる。

$$\beta_1 = \sin \theta \cos \phi \quad (2.23)$$

$$\beta_2 = \sin \theta \sin \phi \quad (2.24)$$

$$(315)$$

$$\beta_3 = \cos \theta \quad (2.25)$$

したがって、 j の平均値は

$$\begin{aligned} \bar{j} &= \frac{8}{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} j \sin \theta d\theta d\phi \\ &= 0.866 - 0.250q - (0.293 + 0.215P)p \\ &\quad + 2.43q^2 + (-0.0487 - 1.60P + 0.184P^2)p^2 \\ &\quad - 2(1.21 + 1.03P)pq \end{aligned} \quad (2.26)$$

あるいは、

$$\begin{aligned} \bar{J} &= 0.866J_s - 0.250 \frac{J_s^2}{2K} \cdot h - \left\{ 0.293 + 0.215 \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{\lambda_{100} - \lambda_{111}}{\lambda_{111}} \right) \right\} \frac{3\lambda_{111}J_s}{2K} \sigma + 2.43 \frac{J_s^3}{(2K)^2} h^2 \\ &\quad + \left\{ -0.0487 - 1.60 \left(\frac{\lambda_{100} - \lambda_{111}}{\lambda_{111}} \right) + 0.184 \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{\lambda_{100} - \lambda_{111}}{\lambda_{111}} \right)^2 \right\} \times \left(\frac{3\lambda_{111}}{2K} \right)^2 J_s \sigma^2 - 2 \left\{ 1.21 \right. \\ &\quad \left. + 1.03 \left(\frac{\lambda_{100} - \lambda_{111}}{\lambda_{111}} \right) \right\} \frac{J_s^2}{2K} \cdot \frac{3\lambda_{111}}{2K} h \sigma \end{aligned} \quad (2.27)$$

圧力-電圧変換は、磁束密度の変化かあるいは透磁率の変化かのいずれかを利用して行われる。前者での磁気ひずみ感度は

$$\bar{A} = - \left\{ 0.293 + 0.215 \left(\frac{\lambda_{100} - \lambda_{111}}{\lambda_{111}} \right) \right\} \frac{3\lambda_{111}J_s}{2K} \quad (2.28)$$

後の場合には、回転磁化範囲に入ると、可逆透磁率 $\bar{\mu}_r$ は微分透磁率にほとんど一致するので、

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_r &= -0.250 \frac{J_s^2}{2K} + 2.43 \frac{J_s^3}{(2K)^2} h \\ &\quad - 2 \left\{ 1.21 + 1.03 \left(\frac{\lambda_{100} - \lambda_{111}}{\lambda_{111}} \right) \right\} \frac{3\lambda_{111}J_s^2}{4K^2} \sigma \end{aligned} \quad (2.29)$$

その磁気ひずみ感度は

$$\bar{A}\mu = -2 \left\{ 1.21 + 1.03 \left(\frac{\lambda_{100} - \lambda_{111}}{\lambda_{111}} \right) \right\} \frac{3\lambda_{111}J_s^2}{4K^2} \quad (2.30)$$

で表わされる。可逆透磁率の変化は二次効果であるが、無荷重時の状態を基準としての変化であるから、その割合は小さくない。図 2.5 に、マグネットで 10 Oe のバイアス磁界を与えたときの圧縮応力によるインダクタンスの変化を示した。100kg/cm² の応力により、約 10% の変化が得られる。

磁気ひずみ効果を記述する式には、磁気ひずみの等方性を仮定した Bozorth の式⁴⁷⁾、一軸異方性を仮定した近角の式⁴⁸⁾、異方性を考慮した岩柳の式⁴⁹⁾がある。それらに共通することは、(2.27) 右辺の第 3 項と

(316)

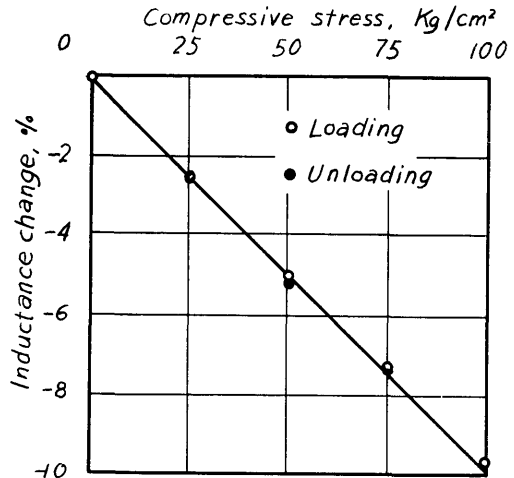


Fig. 2.5. Effect of compression on the inductance, or the reversible permeability of the specimen biased to the field-strength of about 10 Oersted, investigated with inductance bridge

同様に、いずれも三つの磁気的基本量が無次元量 $3\lambda_{111}/2K$ の形で関与していることである。(2.27) の特徴は、変数の二次項までを与えることであり、可逆透磁率の変化が計算できることである。

2.4 温度の影響

磁化状態は、温度によっても変化する。変換器にお

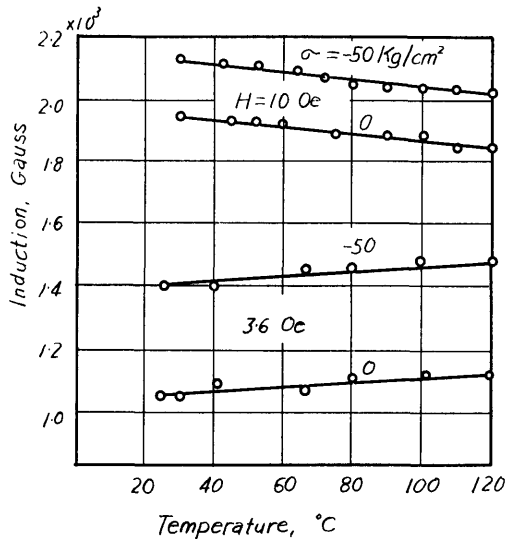


Fig. 2.6. Influence of temperature on magnetization

いて、それは零点移動と感度変化として現われるので、温度特性は測定器の精度と安定性を支配する重要な特性である。

図 2.6 は、一定磁界一定荷重下で、温度を変化させたときの磁束密度の変化を示したものである。図の上部に、磁界 $10 O_e$ での測定結果を示した。回転磁化範囲での特性である。直線近似した変化は、温度を上げると、無荷重時荷重時いずれの場合も、ほとんど平行して磁束密度が減少する。(2.27)によれば、この減少は右辺第 1 項の J_s の変化であり、荷重時の変化が無荷重時のそれにほとんど平行であるのは、第 3 項における λ_{111}/K の分子分母の変化が相殺していることによるとみられる。したがって、磁束の変化を利用する場合には、測定器としては、零点の補償だけですむ。図の下部に、磁界が $3.6 O_e$ の不連続磁化範囲での変化を示した。前の場合と反対に、温度の上昇によって、磁束密度は増加する。この場合は、磁化の機構が違うので (2.27) で説明することはできない。

可逆透磁率の変化を利用する場合には、温度変化による測定器の零点の変化は、(2.29) 右辺の第 1 項の J_s^2/K に支配される。 K の温度変化は、 J_s のその 10 乗に比例するので⁴⁹⁾、零点の変化は大きくなることが予想される。感度の変化は、第 2 項と第 1 項の比として λ_{111}/K に支配されるので、磁束の変化を利用する場合と同様に小さい。図 2.7 は測定結果で、同じ試料の柱にコイルを巻いて、交流ブリッジ回路のアクティブ・ゲージおよびダミ・ゲージとし、ゲージの温度を変えたときのブリッジ回路の出力を示したものである。図の曲線 A は、アクティブ・ゲージのみの温度を変えたときの零点の変化、B はダミ・ゲージのみ、C は両ゲージ同じように温度を変えた場合の変化である。縦軸の目盛りは、荷重応力 100 kg/cm^2 時の出力に対する割合いで示してある。温度補償しない場合、 1°C あたり 2.6 kg/cm^2 の応力に相当する変化があり、磁束変化の場合にはこの値が $0.31 \text{ kg/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ になるのに比べて、かなり大きい。ダミ・ゲージによる温度補償により、この値は $0.17 \text{ kg/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ まで下げられている。両ゲージのインダクタンスをよく合わせることで、さらに小さくすることは可能であろう。D は、アクティブ・ゲージに荷重を加え、両ゲージの温度を同じように変えたときの出力の変化を、E は C, D 両直線から得られる感度の変化であり、その値は 0.046 kg/cm^2 で小さい。これらは、理論式からの予想と一致する。

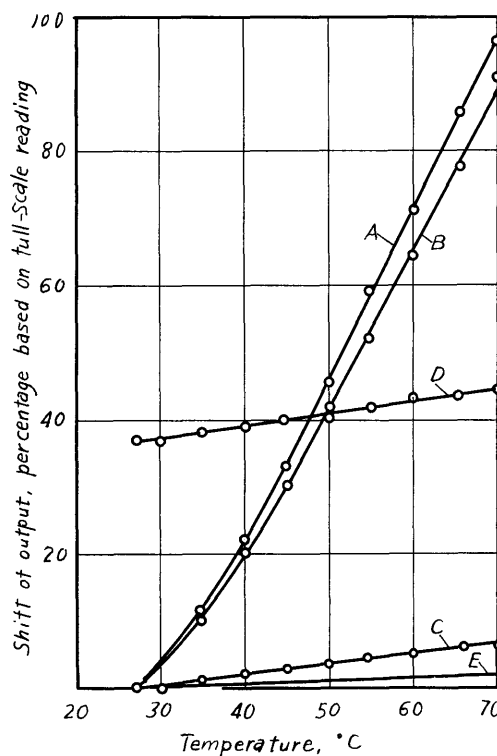


Fig. 2.7. Influence of temperature on inductance, investigated by the circuit shown by Fig. 2.15.

- A Zero shift due to the temperature change of the active gauge
- B Zero shift due to the temperature change of the dummy gauge
- C Zero shift in temperature compensation
- D Shift of output in load condition
- E Shift of sensitivity obtained from the curve C and the curve D

2.5 動特性

上述の磁化状態の変化は、磁界および外力が静的あるいは準静的に変化する場合の変化であった。従来、磁気ひずみを利用した変換素子では機械的共振点を高くとることができるが、金属材料が使われたために、電磁的損失によって動特性が損なわれた。フェライトを使用する眼目の一つは、この点の解決にある。これを確かめるために、周波数応答法によって、その動特性をしらべた。

2.5.1 測定方法 自発磁化と磁気ひずみとは、常に相伴って同時に変化するので⁴⁹⁾、磁化状態を変える

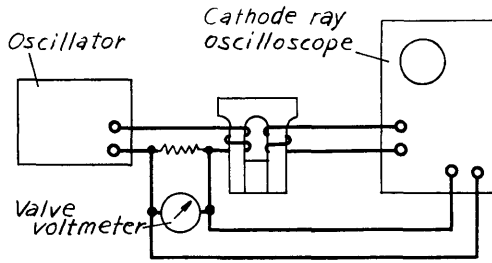


Fig. 2.8. Arrangement for measuring frequency-response

のに、外力によるか磁界によるかは同等である。ここでは、簡単のために、交番磁界を与えて、磁束の変化を測定した。図2.8に、測定回路を示した。試料の柱の一つに一次コイルを巻き、発振器よりこれに一定電

流を供給して交番磁界をつくる。試料内に生じた交番磁束によって、試料の他の柱に巻いた二次コイルに誘起する電圧の大きさと、その電圧と一次コイルの電流との位相差を、ブラウン管オシロスコープで測定する。

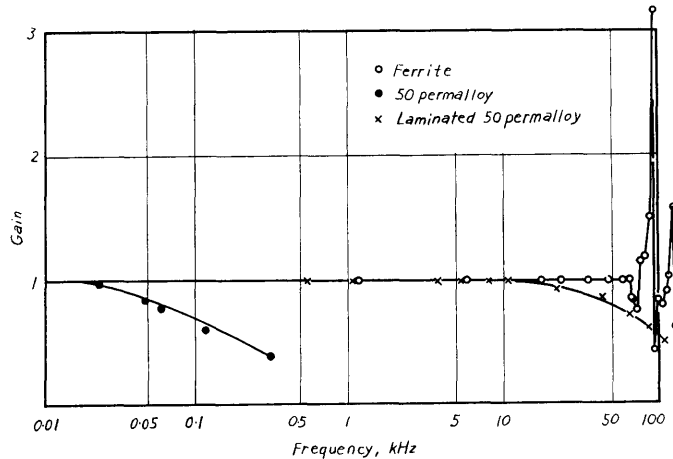
一次コイルの電流 \dot{I}_1 と二次コイルの電圧 \dot{E}_2 は、磁界 \dot{H} とそれによって生じた磁束 $\dot{\Phi}$ と、つぎの各式で示される関係で結ばれているので、一次コイルの交流角周波数 ω を変えて測定すれば、求める周波数特性が得られる。

$$\dot{\Phi} = -\dot{E}_2 / j\omega n_2 \quad (2.31)$$

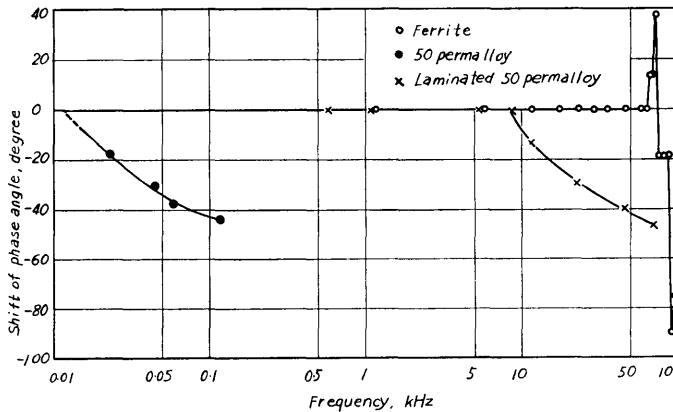
$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 n_2 / n_1 = (\dot{Z}_d + \dot{Z}_m) \dot{I}_1 n_2 / n_1 \quad (2.32)$$

$$\dot{H} = n_1 \dot{I}_1 \quad (2.33)$$

ここで、 n_1 および n_2 は一次および二次コイルの巻数である。また、 \dot{Z}_d はコイルのコアが無振動状態で



(a) Gain characteristic



(b) Phase characteristic

Fig. 2.9. Frequency-response curve

のインピーダンス、 \dot{Z}_m は振動によって生じたインピーダンスの増加分で、それぞれ次式で表わされる⁴⁹⁾。

$$\dot{Z}_a = \dot{R} + j\omega \dot{L} \quad (2.34)$$

$$\dot{Z}_m = \dot{A}_1 \dot{A}_2 / \dot{z} \quad (2.35)$$

ここで、 \dot{R} は一次コイルの銅損に相当する抵抗、 \dot{L} は一次コイルのインダクタンス、 \dot{A}_1 は一次コイルの単位電流により振動子端面に生じる機械的駆動力、 \dot{A}_2 は振動子端面の単位振動速度により一次コイルに誘起する電圧、 \dot{z} は振動子端面に単位の振動速度を与えるために必要な機械的駆動力である。

\dot{L} と \dot{Z} は、それぞれ次式で与えられる。

$$\dot{L} = n_1^2 S \dot{\mu} / \ell \quad (2.36)$$

$$\dot{Z} = r_a + r_1 + j\omega m + \frac{s}{j\omega} \quad (2.37)$$

ここで、 ℓ は試料の磁路長、 S は柱の断面積、 $\dot{\mu}$ は試料の断面における平均磁束密度と表面の磁界との比、 r_a は機械的負荷抵抗、 r_1 は等価粘性抵抗、 m は等価質量、 s は等価スチフネスである。等価とは、振動子各部の分布定数を振動子端面の集中定数に換算した値が等価であるの意味である。

動特性を悪くする原因は、周波数が高くなると共に次第に減少する $\dot{\mu}$ による \dot{Z}_a の低下と機械的共振周波数 $\omega_0 = \sqrt{s/m}$ の近傍での z の急激な減少による \dot{Z}_m の増加である。 ω_0 の近傍以外では、通常 \dot{Z}_m は小さな値であるので、 \dot{A}_1 と \dot{A}_2 は $\dot{\mu}$ に比例する量ではあるが、その影響は小さい。

2.5.2 測定結果 図 2.9(a)に、測定された周波数応答のゲイン特性を示した。100kHz 近くに鋭い共振点があり、約 65kHz まで平坦な特性が示されている。同図中の、同寸法のパーマロイ素子の特性では 0.02kHz までであるのに比べて、著しくすぐれている。同じパーマロイの素子であっても、0.45mm の板を積層してつくることにより、折点周波数を 11kHz まであげることができる。図 2.9(b)は位相特性である。これらの結果をみると、動特性は金属材料ではうず電流によって、フェライトでは機械的共振によって支配されることがわかる。

2.6 圧力-電圧変換の方法

圧力は、直流磁化された素子の磁束変化か、交番磁化された素子の透磁率の変化を利用して電圧に変換される。あとの場合では、磁化電流と同周期の搬送波が圧力で変調された形の出力が得られ、振幅変調することも周波数変調することも可能である。図 2.10に、これら変換の方法を示した。(a)では、一次コイルまたはマグネットで直流励磁された素子内の、受圧による磁束変化を、二次コイルで電圧に変える。この方法では、力は時間微分された形で測定される。内燃機関に関しては、シリンダ内圧力の上昇率、異常燃焼、ディーゼル機関の燃料噴射率の測定などの利用に興味を持つ。 (b)では、二次コイルを用いず、磁化コイルをインピーダンスとみなし、圧力による透磁率の変化を利用して、交流ブリッジで電圧に変える。小振幅の交番

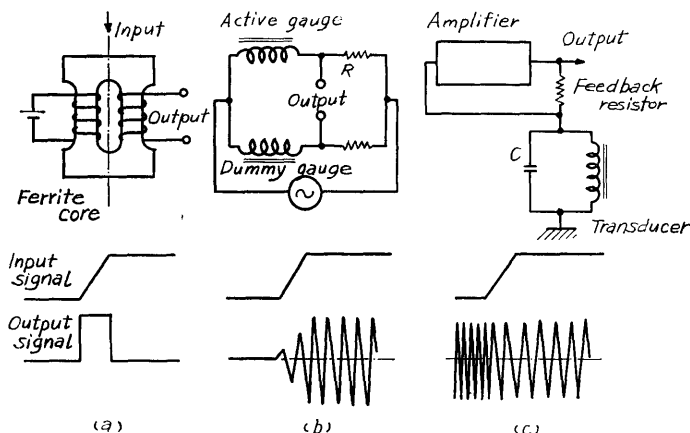


Fig. 2.10. Methods of force-to-voltage transducing

- (a) Direct acting method utilizing magnetic flux change
- (b) Amplitude modulation method utilizing permeability change
- (c) Frequency modulation method utilizing permeability change

磁界で、特性のよい回転磁化範囲の磁気ひずみ効果を利用するためには、直流バイアス磁界をかけて、可逆透磁率の変化を利用する。振幅変調された形の出力が得られる。通常、ダミ・ゲージにアクティブ・ゲージと同じものを使い、両ゲージを近くにおいて、温度補償をも兼ねて行わせる。最も一般的に利用される方法である。つぎの(c)の方法と共に、静的な力の測定が容易である利点がある。フェライトは高い周波数領域での使用が可能なので、圧力によって変化するインダクタンスを発振回路に組み込んで、周波数変調された形の出力を得ることができる。(c)に、その方法を示した。(b)の場合と同じ理由で、可逆透磁率の変化を利用する。デジタル量への変換が容易であること、遠隔測定ができるなどの利点がある。便宜的に、(a)の方法を利用した変換器を直動形変換器、(b)(c)の方法を利用したものを、振幅変調形および周波数変調形変換器と呼ぶことにする。

2.7 実施例

前述したように、磁束の変化を利用する方法と透磁率の変化を利用する方法と二つの変換方法があり、特徴においてもまた特性においても両者は同じではない。後者を振幅変調形変換器で代表させて、直動形と振幅変調形の二つの変換器を作り、その特性をしらべた。

2.7.1 直動形変換器

a) 構造 図2.11に、実施例として、内燃機関のシリンダ圧力測定のために設計された変換器の構造を示した。圧力はプランジャを経て、変換素子に伝えられる。変換素子は、図2.1で示した市販のフェライト振動子である。この素子の柱には、おのおの2,000回ずつ、0.05mmのポリウレタン線が巻かれ、それらの

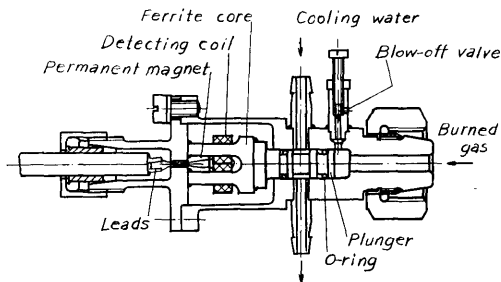


Fig. 2.11. Practical application of the direct acting method: transducer for measuring cylinder pressure of a marine Diesel engine

コイルは直列に接続されている。コイルのインダクタンスは 278 mH, 直流抵抗は 1.2 kΩ である。附属のマグネットにより、約 10 Oe の磁界が与えられている。プランジャ径は 10 mm で、70 kg/cm² の圧力において、コアの柱の応力は 61 kg/cm² になる。シリンダ圧力測定の場合、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。プランジャの気密は、耐熱性のふっ素ゴム Oリングで保たれる。計算によれば、70 kg/cm² の圧力において、コア頭部の変位は 0.3 μm であり、プランジャの変位は小さいので、Oリングの摩擦力は無視できると考えた。

b) 測定回路 変換器出力は、圧力の時間微分値に比例する電圧である。図 2.12 に、測定回路を示した。圧力は、積分後ローパス・フィルタを通した後メ

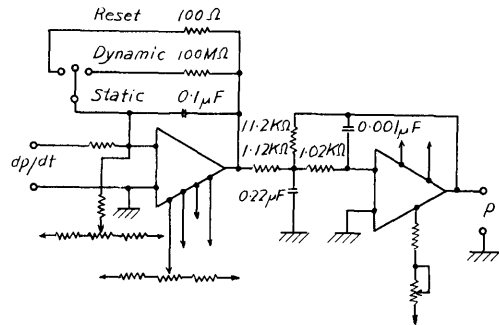


Fig. 2.12. Circuit for use with the direct acting type transducer

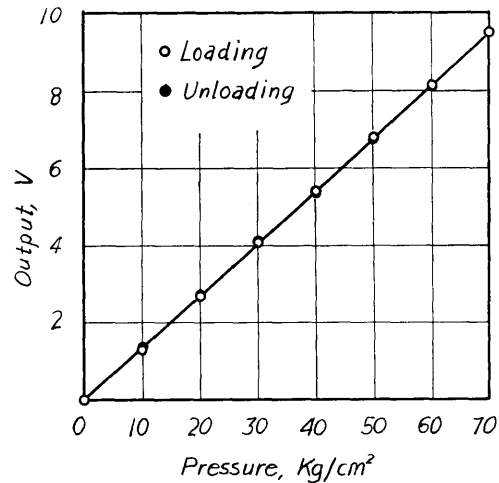


Fig. 2.13. Calibration curve of the direct acting type transducer

ータかオシロスコープで示される。積分器は、リセット、スタティック、ダイナミックの三つのモードを持ち、校正はスタティック・モードで行う。この場合、ドリフトは入力端子に付加したオフセット調整用抵抗で除かれる。恒温状態では、ドリフト量を、30分間で、フルスケール出力の1.5%程度にすることができる。シリンダ圧力測定の場合には、ダイナミック・モードに切り換えて行う。積分コンデンサの電荷は、高抵抗を通して漏えいさせてドリフトをふせぐ。漏えいの時定数を10秒にとった。ローパス・フィルタは1kHzの遮断周波数と20dbの電圧利得を持っている。

c) 校正 図2.13に、ゲージ・テストの油圧で行った校正結果を示した。非直線性は0.6%である。0.7%のヒステリシスがあるが、圧力を減少させたときの出力は、増加させたときの出力より、 40 kg/cm^2 まで

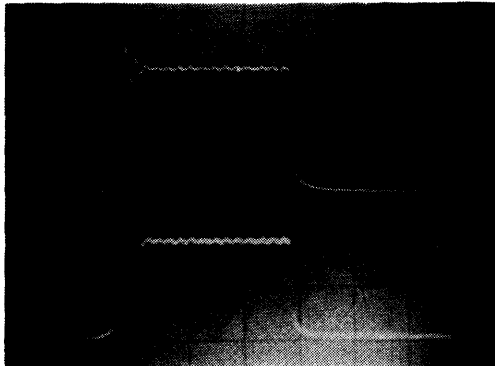


Fig. 2.14. Response of the direct acting type transducer (upper curve) and that of a piezoresistive pressure transducer to a pulse-type input. Sweep speed: 50 ms/div.

は大きく、それ以下では小さくて、全範囲を平均するとほとんど零になる。

d) 過渡応答 気密保持用Oリングの影響をしらべるために、矩形波状に変化する油圧を与えて応答をしらべた。図2.14は、市販のピエゾ抵抗式圧力変換器（豊田工機製、PMS-10-500H）の応答と比較して示した。立ち上りの上端に少しの違いがみられるほかはよく両者は一致しており、校正曲線においてヒステリシスが小さいこととあわせて、Oリングによる摩擦の影響は無視できると考える。

2.7.2 振幅変調形変換器

a) 構造 直動形変換器に使ったのと同じフェライト・コアの柱のおおのにおに、0.15mmのホルマル線を250回ずつ巻き、直列につないでアクチブおよびダミの両ゲージを作った。コイルのインダクタンスは3.5mHとなった。受圧、冷却のための構造は前述のものと同じとし、長さをのばした円筒の中に、両ゲージを一緒におさめた。

b) 測定回路 図2.15に、測定回路を示した。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⁵⁰⁾、その出力は搬送波を除くためのローパス・フィルタを通して外部に取り出される。電源回路に入れたコンデンサは、電源とブリッジ回路を直流的に遮断し、ブリッジ回路の接地点の選択を自由にするためのものである。

この回路は、構成部品数が少なく、また簡単なので、それだけ故障の心配も少ない。位相検波を行っているので、力の正負の区別ができる。零点調整が一つの抵抗でできるので、平衡がとり易いなどの利点を持っており、今までに多くの磁気ひずみ計器に使われてきた。

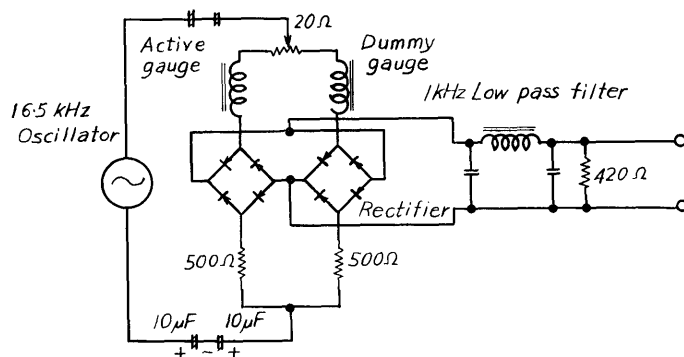


Fig. 2.15. Circuit for use with the amplitude modulation type transducer

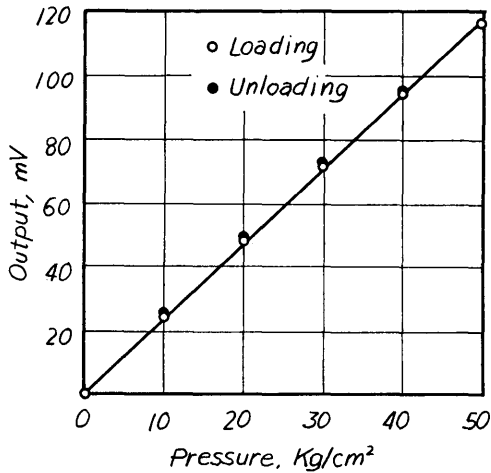


Fig. 2.16. Calibration curve of the amplitude-modulation type transducer

c) 校正 図2.16に、前述の場合と同様に、油圧による校正の結果を示した。プランジャ径が12mmにとってあるので、圧力 50 kg/cm² のときの柱の応力が 62.8 kg/cm² で、前の変換器での圧力 70 kg/cm² における応力の値に近い。非直線性は約 2%，ヒステリシスは 1.3% で、いずれも前の場合より大きい。

2.8 まとめ

磁気ひずみ効果を利用した、応答性のよい圧力—電圧変換素子として、フェライトを使うためにその特性をしらべた。従来の研究から、Ni系フェライトがすぐれた性質を持っていることが知られており、試料として NiCu系フェライトを基材として作られた市販の超音波振動子を選んだ。得られた結果はつぎのとおりである。

1. 不連続磁化範囲での磁気ひずみ効果は大きい。圧力による磁束の変化は直線的ではない。変化は小さくなるが、この非直線性は磁界の強さを増すと、次第に改善される。磁化電力の経済性をもあわせ考えると、磁化曲線の肩を越えたあたりに適当な磁界がある。この附近の磁界は回転磁化範囲に入っており、磁化の機構から考えても、また実験の示すところによっても、荷重を増減したときの変化のヒステリシスは小さい。ここでは、1 kg/cm² の圧縮応力の変化に対し 3.7 Gauss の磁束変化、-0.096% の可逆透磁率変化がある。

2. 簡単のために、磁界を回転磁化範囲の低い部分に限定して、そこでの磁気ひずみ効果を解析した。応力と磁界の強さに関する二次項までの式を得、磁気

異方性定数、飽和磁気ひずみ定数、飽和磁化の強さなどの磁気的基本量が、どのような形で関与しているかを明らかにした。

3. 上述の磁界においては、温度を 1℃ 上げると、磁束密度は 0.31 kg/cm² の応力による相当変化分だけ減少する。荷重を加えた状態での変化は、無荷重時のそれに、ほとんど平行して変化する。したがって、温度変化による感度の変化は、この場合はきわめて小さい。可逆透磁率の変化は、応力換算値 2.4 kg/cm² /℃ の変化に相当し、かなり大きい。感度の変化は、応力換算値 0.046 kg/cm² /℃ の変化に等しく小さい。

4. 周波数特性をしらべた。フェライト素子のゲイン特性は 65kHz まで平坦であり、パーマロイの同寸法素子では 20Hz までであるのに比べて、著しくすぐれている。応答周波数は、金属材料の素子ではうず電流によって制限され、フェライト素子では機械的共振によって制限される。

5. 圧力を電圧に変えるには、磁束の変化を利用する直動変換と、透磁率の変化を利用する変調変換との二つの方法がある。前者による出力は、入力を時間微分した形で得られる。後者では、入力により振幅または周波数変調された出力が得られる。直動形変換器の校正曲線の非直線性は 0.6%，ヒステリシスは 0.7% で、振幅変調形変換器のそれらが 2% と 1.3% であるのに比べてすぐれている。しかし、直動形変換器では圧力を得るのに積分操作が必要なので静的な力の測定は困難であるのに対し、振幅変調形変換器ではそれが可能である点ですぐれている。周波数変調形変換器は、A—D 変換が容易であること、遠隔測定ができることなどの点で興味深い。

3. 図示馬力測定への応用

3.1 まえがき

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。ディーゼル機関に関する多くの測定量の中でも、シリンダ圧力は運転状態に関する最も豊富な情報を持つ重要な量であるので、機関監視のためには、その測定は最も要望される場所である。しかし、前述したように、測定条件が苛酷であるために、いままでの研究^{51) 52)}ではまだ監視用としての計器は得られていない。船用機関においては、シリンダ圧力と同時に、図示馬力の値を必要とすることが多い。現在、それらは、主としてマイハークのインジケータによって得ら

れている。しかし、この機械的な方法では機関を離れて測定することはできないし、インジケータ線図の採取とそれから図示馬力を計算するのに多くの労力を必要とする。また、最近多くなった中速機関に対しては、応答性の不足が原因で、誤差が多くなることが指摘されている⁵³⁾。今までに考案された図示馬力計あるいは図示平均有効圧計の数は多いが⁵⁴⁾、それらは機関の研究段階で使用することを目的としたものが主で、長時間連続して使用することへの配慮は少ないようである。この種計器製作のあい路となるものは圧力計であり、既製各種の圧力計について行った耐久力試験では、精度と耐久性を同時に満足させるものは得られておらず⁵⁵⁾、実船で実験するまでに至った計器は、きわめてわずかのようである⁵⁶⁾*。前述したような特徴を持つフェライト変換素子は、大きさの制限がきびしくない、船用機関のシリンダ圧力計用としての適性を備えているように思われる。対象として船用機関を選び、図示馬力の遠隔指示装置を試作し、試験した。

本章で用いた主な記号と単位

記号	単位	意味
A	cm^2	ピストンの面積
i	—	機関の作動方法に関する定数
K_1	—	図示馬力の換算係数
K_2	—	図示平均有効圧の換算係数
N_i	PS	図示馬力
n	rpm	回転速度
p	kg/cm^2	圧力
p_i	kg/cm^2	図示平均有効圧
s	cm	行程
T	s	周期または時定数
t	s	時間
V_s	cm^3	行程体積
W_i	$\text{kg}\cdot\text{m}$	図示仕事
x	cm	ピストン変位

3.2 図示馬力測定の方法

図示馬力 N_i は次式によって求めることができる。

$$N_i = \frac{V_s}{4.5 \times 10^5 i} n \cdot p_i \quad (3.1)$$

ここで、 V_s は行程体積、 i は二サイクル機関では1、四サイクル機関では2の値をとる定数、 n は回転速度、 p_i は図示平均有効圧である。

* 後述の実船実験1ヶ月後に、一つの実験が行われている。

p_i は次式から求められる。

$$p_i = W_i / V_s \quad (3.2)$$

ここで、 W_i は図示仕事である。 W_i は1サイクル中にピストンのなす仕事で、図3.1に示すような足袋形インジケータ線図のかこむ面積で示される。この面積計算をするのに、横座標のシリンダ容積あるいはピストン行程について積分するのと、縦座標の圧力についてするのと二つの方法が考えられる。いずれの場合にも、電氣的に積分を実行するのに、ピストン行程や圧力について行うことには困難が伴うので、次式で示されるような、時間について積分する方法がとられる。

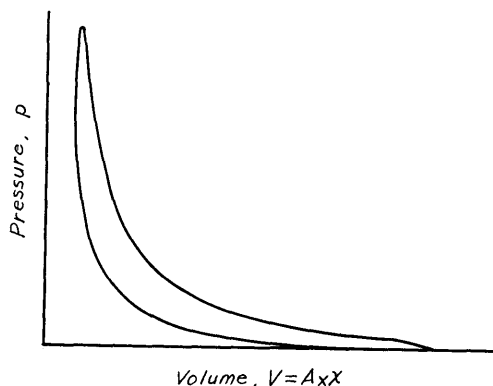


Fig. 3.1. Indicator diagram of a Diesel engine

$$W_i = \oint_V p dV = A \int_0^T p \frac{dx}{dt} dt \quad (3.3)$$

あるいは

$$W_i = \oint_p V dp = A \int_0^T x \frac{dp}{dt} dt \quad (3.4)$$

ここで、 A はピストンの面積、 x はピストンの変位、 p はシリンダ圧力、 V はシリンダ容積、 t は時間、 T は周期である。(3.3)の方法による計器については、振幅変調形変換器を用い、行程微分形図示馬力の遠隔指示装置と名付けて、すでに報告した⁵⁷⁾。ここで述べるのは、(3.4)の方法による、圧力微分形でも称すべき装置についてである。

3.3 演算回路

図示仕事を、(3.4)に従って計算する場合に、

$$\frac{n}{i} = \frac{60}{T} \quad (3.5)$$

の関係があるので、 s を行程とすると、図示馬力は次式によって得られる。

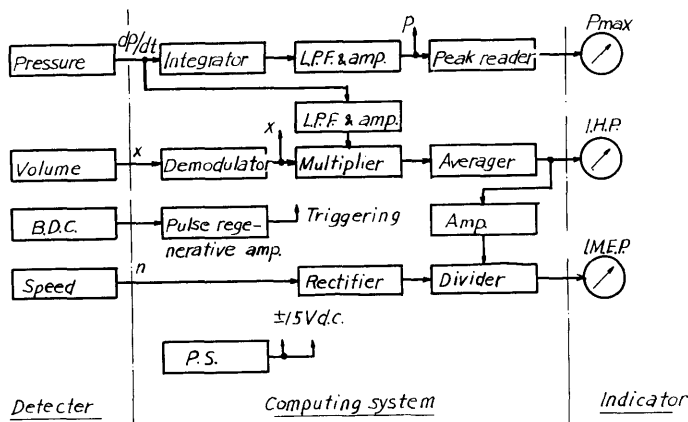


Fig. 3.2. Block diagram of the system for measuring indicated horsepower, indicated mean effective pressure and the maximum cylinder pressure

$$N_i = \frac{60 V_s}{4.5 \times 10^5} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T x \cdot \frac{dp}{dt} dt \quad (3.6)$$

すなわち、図示馬力はピストン変位と圧力の時間微分値との積を時間平均して得られる。圧力の時間微分値は、直動形変換器の出力をそのまま用いることができる。図示平均有効圧は、(3.1) が示すように、図示馬力を回転速度で割って求められる。これらの量とシリンダ内の最高圧力を求める演算回路のブロック線図を図 3.2 に示した。検出量は、計算に必要なシリンダ圧力の時間微分値、ピストン変位、回転速度とインジケータ線図の表示に必要なトリガ位置の下死点である。

圧力は積分して得られる値なので、測定されるのは最低圧に対する相対的な値である。この最高圧計で指示されるのも最高圧と最低圧との差である。したがって、真の最高圧はこれより吸込行程における負圧分だけ小さいが、両者の差は小さい。過給機関においては、これに過給圧を加えたものが最高圧となる。最高圧の測定は、接地電圧を基準として、正負のピーク電圧を別々に読みとり、それらの和をメータで指示することによってなされる。この回路のブロック線図を、図 3.3 に示した。このような方法をとったのは、図 2.12 で示した積分器のダイナミック・モードで測定した場合、圧力の最低圧点が次第に低下することによる。すなわち、同図において、積分器の入力 e_i と出力 e_0 との関係は次式で表わされる。

$$e_0 = \frac{R_L}{R_i} \cdot \frac{1}{1 + j\omega T} \cdot e_i \quad (3.7)$$

(324)

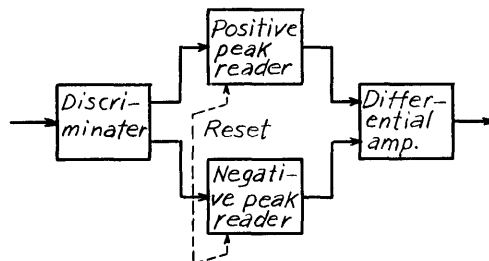


Fig. 3.3. Block diagram of the circuit for measuring the maximum cylinder pressure

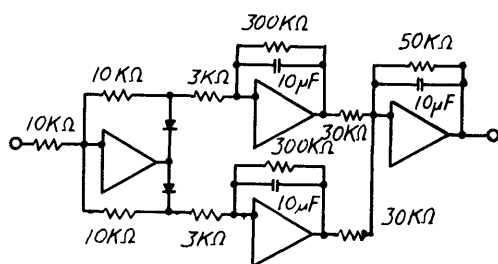
ここで、 R_L は漏えい抵抗、 R_i は入力抵抗、 T は時定数 $R_L C$ 、 C は積分コンデンサである。

$\omega T \gg 1$ のとき、積分が行われる。しかし、この回路は本質的には一次遅れ系であるので、最低圧時の電圧は接地電圧より次第に低下し、 T より十分大きな時間が経過して静定する。

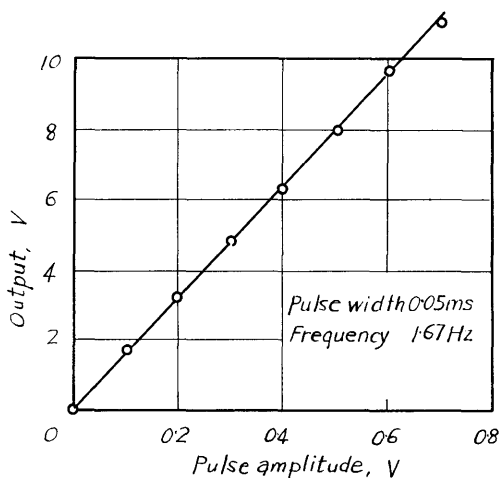
図 3.4 (a) は、図示馬力を計算するための平均化回路で、接地電圧を基準として、正負の電圧を別々に平均し、その和を再度平均している。同図 (b) (c) (d) はこの回路の試験結果で、(b) はパルス振幅と出力、(c) はパルス幅と出力、(d) は繰返し周波数と出力との関係を示したものである。入、出力間には直線関係が保たれており、平均化の機能がはたさされている。

3.4 ピストン変位、回転速度、下死点の検出

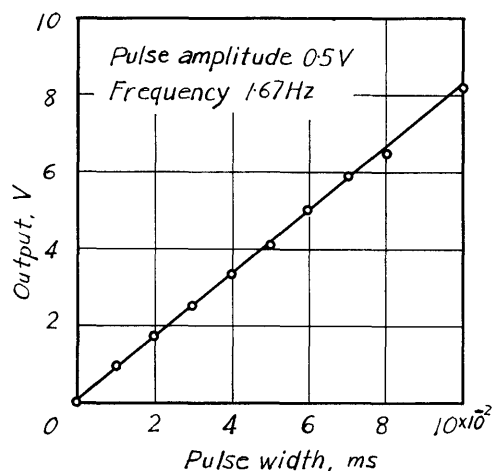
ピストン変位は、図 3.5 に示すような、市販のレデューシング・ギヤと呼ばれるクランク機構の模擬装置を使って検出される。レデューシング・ギヤは、オー



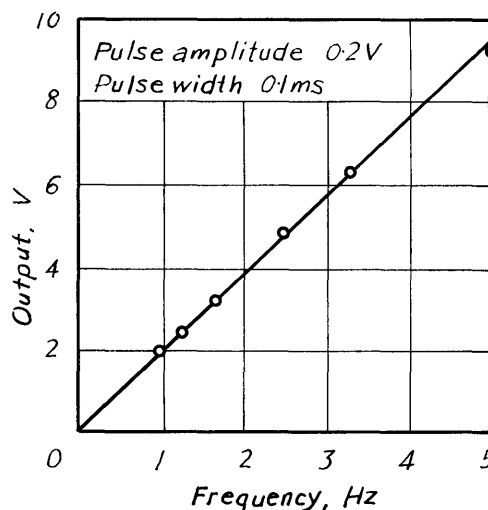
(a) Averaging circuit



(b) Output voltage vs pulse amplitude curve



(c) Output voltage vs pulse width curve



(d) Output voltage vs pulse repetition frequency curve

Fig. 3.4. Averaging circuit for obtaining indicated horsepower and its characteristics

ルダム継手により機関軸に直結して、機関の回転を最大変位 40mm のピストン変位に比例した直線運動とし、この変位を差動トランスで電圧に変える。回転速度と下死点は、レデューシング・ギヤに付属した交流発電機式回転計とリード・スイッチによって検出される。リード・スイッチよりの接点信号は、パルス化され、トリガ信号とされる。図 3.6 は、ピストン変位信号とトリガ・パルスである。このピストン変位信号は、ピストン変位とクランク角との関係を与える理論式による計算値ときわめてよく一致する⁵⁷⁾。注意を

要するのは、実機のピストン変位とこの検出装置からの出力との位相を正しく合わせることで、ここでは位相差を 0.85°C 以下とした。

3.5 図示馬力と図示平均有効圧の校正

校正は、実際に機関を運転して行わなければならないが、機械損失が既知の小形機関の軸馬力で校正し、換算によって大形機関の目盛りをすることは可能であり、この作業の労力を軽くすることができる。

図 3.7 は、ファンボロ・インジケータ線図より得た図示馬力と実測した軸馬力との関係を示したものであ

る。実験機関は、シリンダ径 165, 行程 220 の四サイクル機関である。一定回転速度では、図示馬力と軸馬力とは直線的関係にあり、この関係を求めておけば、軸馬力と回転速度から図示馬力を校正することは容易である。図 3.8(a)(b)は、軸馬力で校正したメータで読みとった図示馬力と図示平均有効圧を、ファンボロ・インジケータ線図より算出した値と比較したものである。また、(c)はメータで読みとった最高圧を、同じインジケータ線図より得た値と比較したものである。図示馬力と最高圧においては、かなり良い一致が示されている。

(3.6) において、ピストン変位の出力電圧を一定とすれば、図示馬力は行程体積に比例する。したがって、換算係数 K_1 は次式になる。

$$K_1 = V_s / V_{s0} \quad (3.8)$$

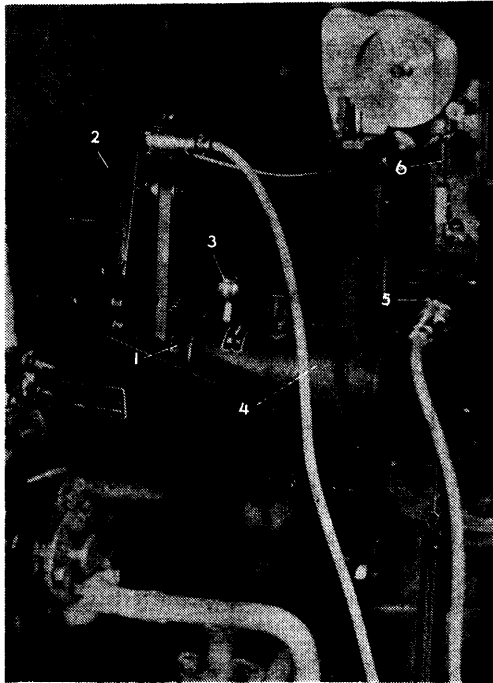


Fig. 3.5. Detectors of piston displacement, engine speed and bottom dead centre

- 1 Driving wheel coupled with a engine shaft
- 2 Tachogenerator
- 3 Clutch handle
- 4 Reducing gear
- 5 Differential transformer for detecting piston displacement
- 6 Reed switch for detecting b. d. c.

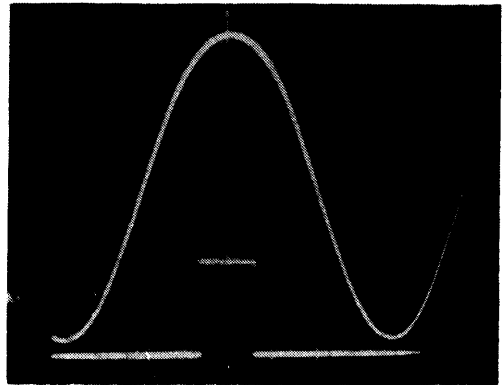


Fig. 3.6. Signal of piston displacement and a pulse for triggering

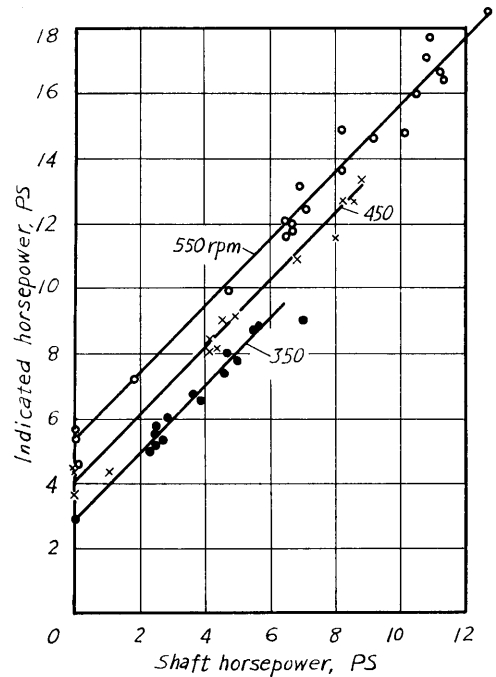


Fig. 3.7. Relation between indicated horsepower and shaft horsepower of the small-sized Diesel engine used for calibration. The curves show that the horsepower indicator can be calibrated by shaft horsepowers added constant mechanical losses at constant speed. The scale can be changed to that of another engine in proportional to the ratio of their cylinder volumes.

ただし、 V_{so} は校正に使った機関の行程体積である。図示馬力を回転速度で割って得られる量は、二サイクル機関では1サイクルあたり、四サイクル機関では1/2サイクルあたりの仕事量に比例する。したがって、図示平均有効圧の目盛りは、機関の作動方法によって、次式で換算される。

$$K_2 = i/i_0 \quad (3.9)$$

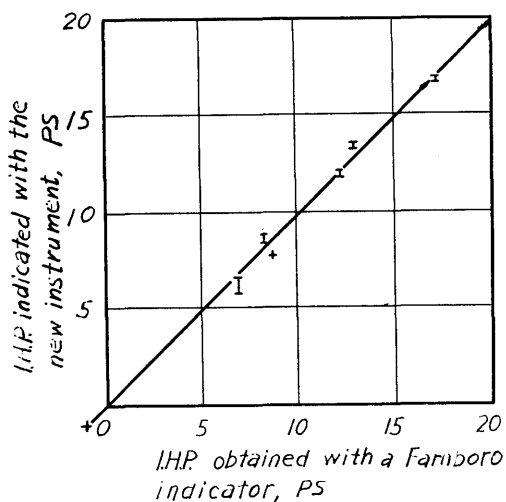
ただし、 K_2 は図示平均有効圧の換算係数、 i_0 は校正に使った機関の作動方法による定数である。

3.6 中形機関における実験

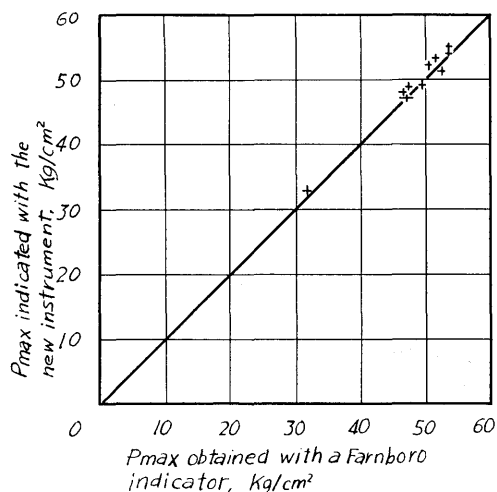
小形機関で校正された指示装置の目盛りを、シリンダ径 275、行程 400、回転数 500 rpm の中形四サイ

クル機関によって調べた。目盛りの換算は、 $K_1=5.05$ 、 $K_2=1$ によってなされる。この機関には、基準にすべきファンボロ・インジケータが備えられていないので、この装置によってとったインジケータ線図を市販の抵抗線ひずみ計式インジケータ（共和電業製、PE-100KE）および前に製作した振幅変調形変換器によって得たものと比較し、プラニメータによる面積測定によってそれらの線図から得られる図示平均有効圧と図示馬力が一致するかどうかを確認め、さらにそれらが正しくメータに指示されるかどうかを調べた。

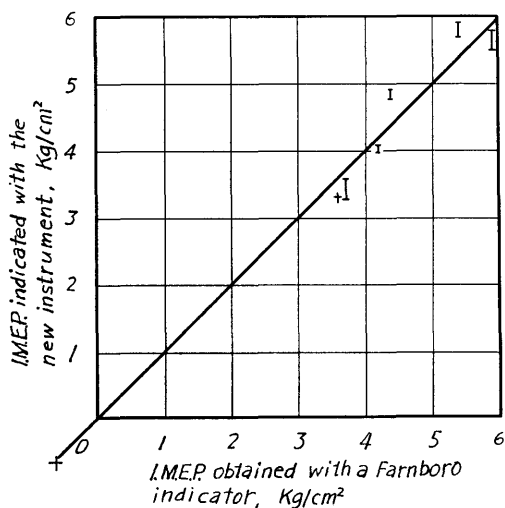
図 3.9(a)(b)に、振幅変調形変換器とこの指示装置の直動形変換器でとった山形および足袋形インジケータ



(a)



(c)



(b)

Fig.3.8. Verification of the scales of the horsepower indicator for (a) indicated horsepower, (b) indicated mean effective pressure and for (c) the maximum cylinder pressure

線図を、また同図(c)(d)に抵抗線ひずみ計式インジケータと振幅変調形変換器による両線図を、測定例として示した。足袋形線図は、重ね合わせて示されている。(b)(d)両図において、膨張行程で、振幅変調形変換器で記録された圧力が他のものより高く現われているのは、この変換器の校正曲線で示されたヒステリシスと非直線性によると思われる。

図3.10(a)(b)は、足袋形線図の面積から算出した図示馬力と図示平均有効圧を、振幅変調形変換器による値を横軸にとり、対応する直動形および抵抗線ひずみ計式変換器による値を縦軸にとって示したものである。振幅変調形変換器による測定値は、校正曲線のヒステ

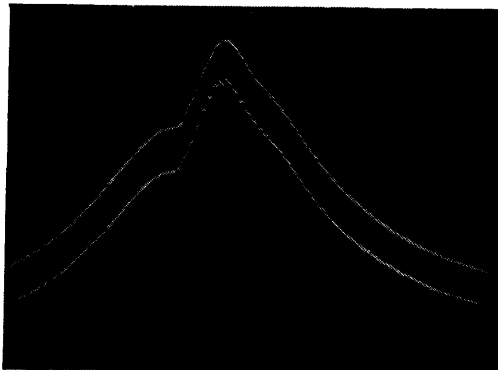
リシス誤差のために、常に大きくでるので、その補正*がなされている。三つの変換器による測定値は、かなりよく一致している。

図3.11(a)(b)は、メータの指示した図示馬力と図示平均有効圧を、インジケータ線図より求めた値と比較したものである。図示馬力では両測定値が比較的良好一致しているのに対し、図示平均有効圧では不十分であり、校正の際割り算回路の調整が十分でなかったようである。

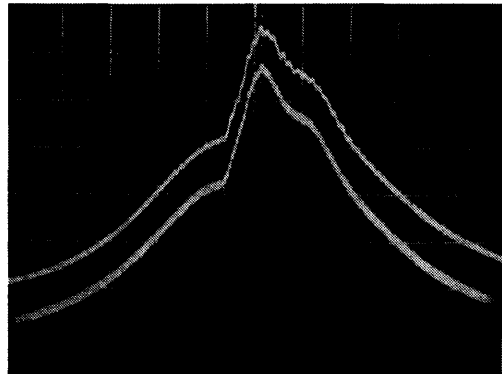
3.7 実船実験

3.7.1 目的 この装置の耐久性については、す

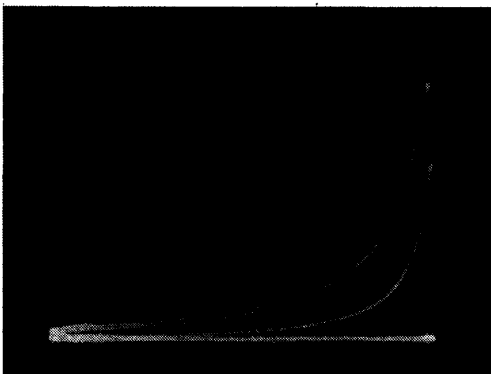
* 補正値とその根拠については 57) の P48 参照



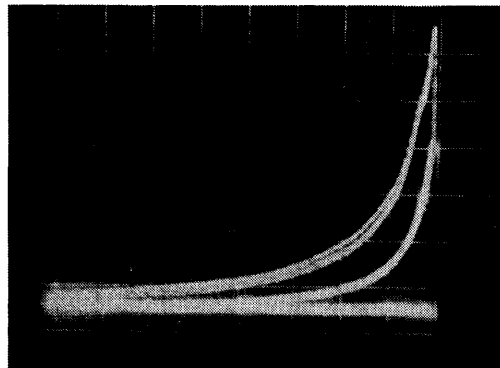
(a) Pressure-time diagrams obtained with the direct acting type transducer (upper curve) and the amplitude modulation type transducer



(c) Pressure-time diagrams obtained with the amplitude modulation type transducer (upper curve) and a strain-gauge type transducer



(b) Pressure-volume diagrams obtained with the same transducers as mentioned at (a)



(d) Pressure-volume diagrams obtained with the same transducers as mentioned at (c)

Fig. 3.9. Comparison of indicator diagrams obtained with three kind of transducers

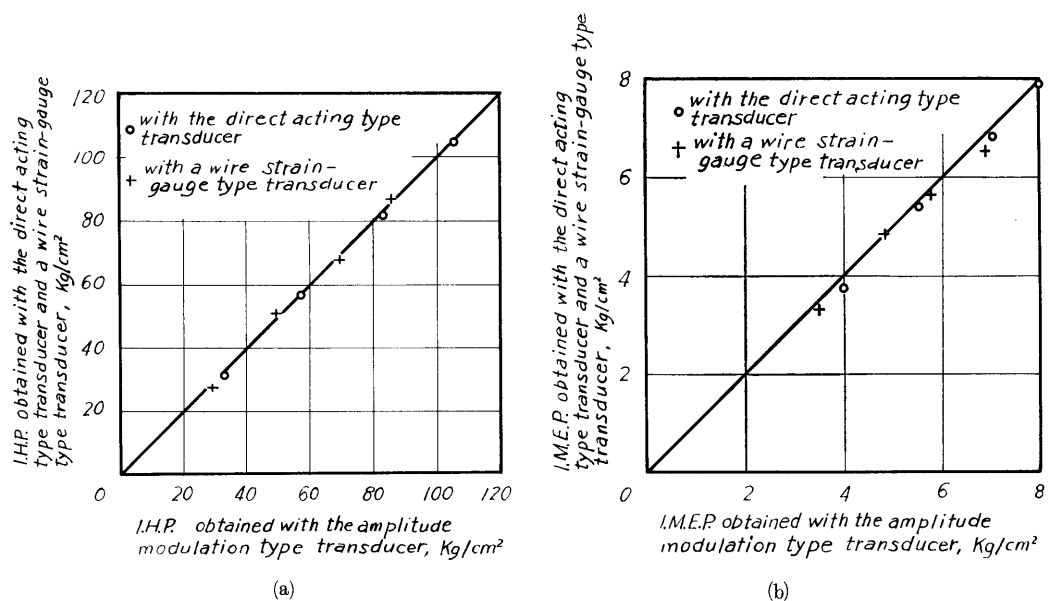


Fig. 3.10. Comparison of values calculated from areas of indicator diagrams obtained with the three kind of pressure transducers for (a) indicated horsepower and for (b) indicated mean effective pressure. The values with the amplitude modulation type transducers are values corrected the hysteresis error of the calibration curve.

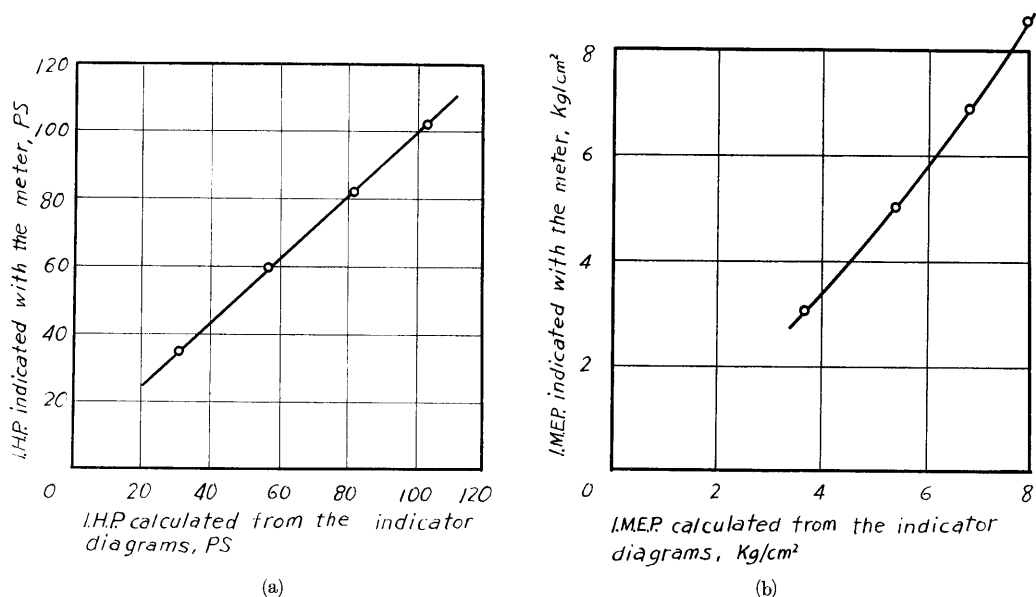


Fig. 3.11. Comparison of values indicated with the horsepower indicator and values calculated from indicator diagrams for (a) indicated horsepower and for (b) indicated mean effective pressure

で行った行程微分形指示装置の実験結果⁵⁷⁾から十分であると考えられたので、つぎの段階として、運輸省航海訓練所練習船銀河丸の最終航海に実験の場が与えられたのを好機として、実船実験に踏み切った。監視用計器として実用されるまでには、なお多くの難関が予想されるので、この実験によって直ちに実用性が証明されるとは考えないが、実用への一段階として、問題点を見出し、今後の開発を進める上での有益な資料が得られることを期待した。この時点では、まだ実船での図示馬力の常時測定の実例はないようであったので、ここで得られる資料は、この種の他の計器開発の上にも役立つであろうと考えた。

3.7.2 実験船の主機と測定装置 総屯数 3,191 の銀河丸の主機の主要目は、名称 三菱横浜MANG 6 Z 52/70、形式 ニサイクル 単動トランクピストン形、

シリンダ数 6、シリンダ径×行程 520×700mm、毎分回転数 200、定格出力 2100 BHP、最高圧力 55 kg/cm² (実測51.2)、使用燃料はB重油で、その第 6 シリンダの図示馬力を測定することとした。

図3.12は、機関室内のコントロール室に置かれた、装置本体である。右側のメータは最高圧、左側のは図示馬力を指示する。ブラウン管オシロスコープは、山形あるいは足袋形のインジケータ線図を表示する。図示平均有効圧の測定は、そのために必要な回転計をつけ調整をするだけの時間的余裕がなかったので省略した。

図3.13は、主機に取り付けられた圧力変換器である。これの冷却は、燃料噴射弁の冷却水を分岐させて行った。ピストン変位および下死点の検出は、マイハーク・インジケータ用に設けられた、ストローク 76

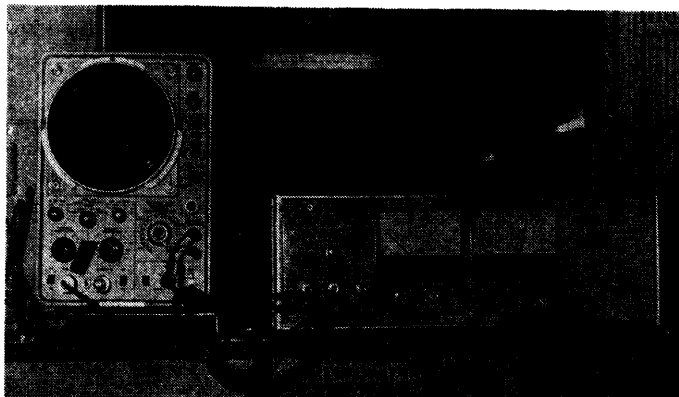


Fig. 3.12. Panel arrangement of the horsepower indicator tested on ship



Fig. 3.13. Pressure transducer attached to a marine engine

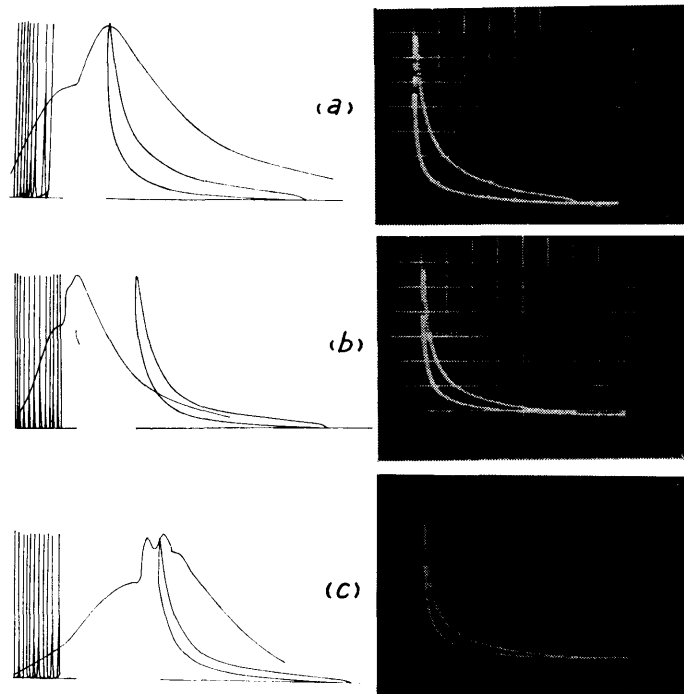


Fig. 3.14. Indicator diagrams displayed on the cathode ray oscilloscope of the horsepower indicator (right side) and those obtained with a Maihak indicator in following condition : (a) full speed, (b) Half speed, (c) Slow speed

mmのロッドの動きを利用して、差動トランスとリード・スイッチで行った。

3.7.3 実験結果 船は、昭和47年10月4日、東京港を出て、小樽—七尾—唐津—長崎—神戸—横浜—串本—鹿児島各港を経由し、11月29日東京に帰港した。その間、常時インジケータ・バルブを開放して測定状態としておき、4時間おき1日6回の測定を行った。また、比較のために、事情の許すかぎり一日一回、圧力変換器を付け替えて、マイハークのインジケータ線図をとった。そのほか、10月7日には船速を変えての測定をした。図3.14はそのときのインジケータ線図で、左側はマイハーク・インジケータによる最高圧、山形、足袋形線図、右側はこの指示装置による足袋形線図で、上からフル、ハーフ、スロー・スピードの運転状態である。図3.15は、その運転状態の測定結果である。図示馬力の指示は、機関に付属する回転計の指示と共に、船の揺れと同周期で変化するのが認められた。図では、それらの上下限を破線で、平均値を実線で示した。図示平均有効圧は、線図より算出した値を比較したものである。最高圧と図示馬力は、フル

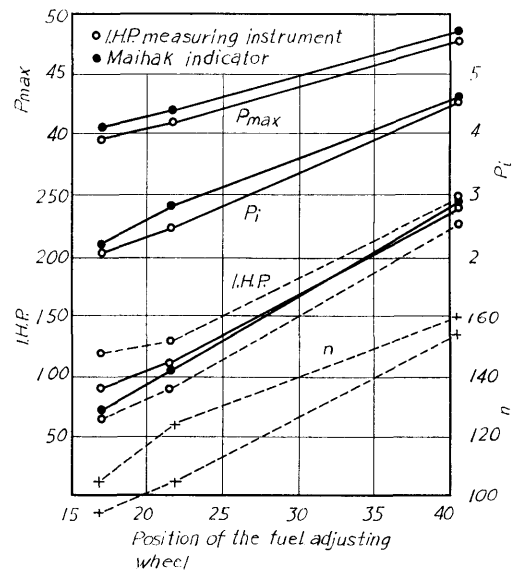


Fig. 3.15. Comparison of values measured with the horsepower indicator and with the Maihak indicator

・スピードの場合、それぞれフルスケールに対する割合1%と2%内で一致している。図3.16は、全航行期間中の測定結果である。この期間中の延べ運転時間は498時間、機関の総回転数は 4.5×10^6 であった。途中、10月15日から16日にかけて最高圧の指示の低下がやや大きいと思われたので、圧力変換器をはずして分解点検し、プランジャ頭部に付着したデポジットを除いた。これによって圧力は 43 kg/cm^2 からもとの 46 kg/cm^2 まで回復した。10月21日、低下が大きいように思われたので、再度分解点検した。このとき、図3.17(a)に示したように、プランジャ頭部の腐蝕とオリ

ングの損傷があり、吹き抜けがあったと認められたので、前のものとの感度差が -0.74% である予備の変換器と交換した。ここまでの使用時間は239時間、延べ回転数は 2.11×10^6 であった。これ以後、東京帰港まで、変換器に手を加えることなく連続測定をした。図3.17(b)は、帰港後分解したときの写真で、プランジャ頭部に少し腐蝕が認められるが、リングの損傷はなかった。図3.18は、マイハーク・インジケータによる測定値との差を示したもので、圧力変換器を交換した10月21日以降は、運転時間の増加と共に感度の低下が、かなり明らかに認められる。21日以降の運転時間

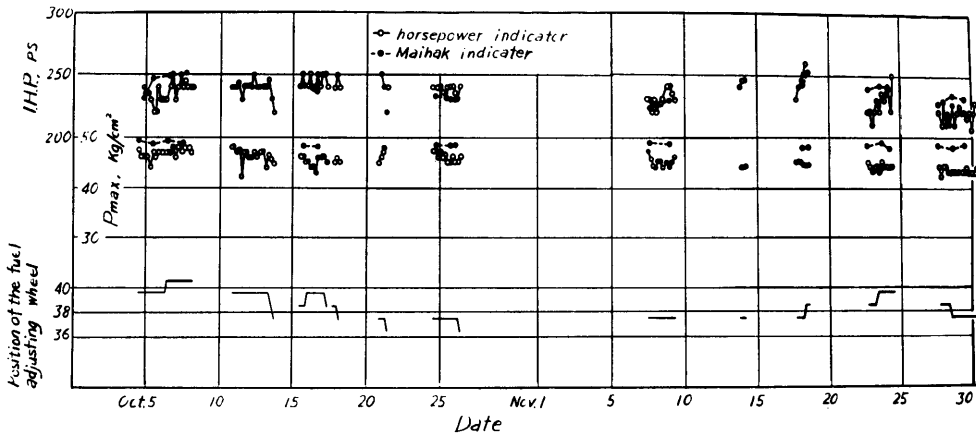


Fig. 3.16. Measuring results through a voyage

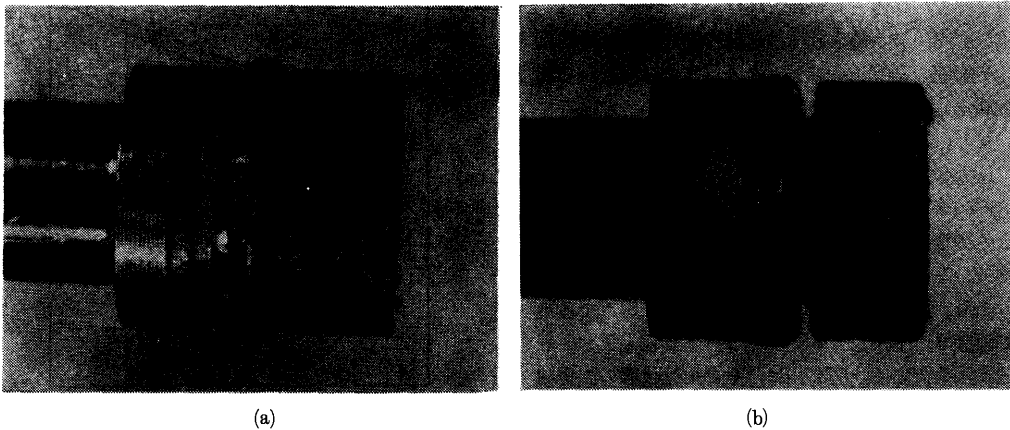


Fig. 3.17. (a) Plunger head of the pressure transducer after use of 239 hours, remaining trace of blow-by, and (b) the same part as shown by (a), of the substituted pressure transducer after use of 257 hours till the end of the test. In the latter case, slight corrossions are observed but trace of blow-by is not.

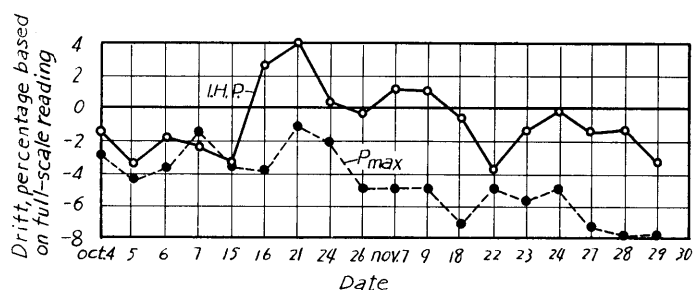


Fig. 3.18. Drift of values of indicated horsepower and the maximum cylinder pressure

は259時間、延べ回転数は 2.4×10^6 、この間の最高圧力の感度低下は約6%、図示馬力のそれは4%である。図3.19は、実験終了後、取りはずしたときの、圧力導入孔附近のデポジットの様子を示した写真で、プランジャ前面にも同様に堅く固化したものが付着しており、あらかじめ設けておいたブローオフ用の弁は役に立たなかった。感度低下の原因ははっきりしないが、プランジャ前面のデポジットはその主役の一つをなすものであろう。

交換した予備の変換器については、実船実験後、実験室において、船用小形四サイクル機関を使って、さらに 2×10^7 回転だけ追加運転したが、その間異常を認めなかった。

3.8 まとめ

1. フェライトの磁気ひずみ効果を利用した直動形の圧力変換器を、船用ディーゼル機関のシリンダ圧力の測定に応用して、監視用計器としての図示馬力の遠隔指示装置を試作した。この装置は、アナログ演算によって図示馬力と最高圧力をメータで指示し、山形あるいは足袋形インジケータ線図をブラウン管オシロスコープで表示するものである。

2. この装置を実船にのせて、延べ約500時間の常時計測をし、さらに実験室において 2×10^7 回転の追加運転をして、試験した。

3. その結果、フェライトは変換素子として、十分な耐久性と安定性を持っていること、簡単ではあるがこの回路で所要の演算ができることがわかった。しかし、なおつぎの点で問題があった。圧力変換器の受圧用プランジャの頭部が腐蝕することによってOリングが損傷し、吹き抜けのおそれがあること、またおそらくプランジャ頭部のデポジットのために、運転時間の増加と共に感度が低下することである。この実験では、感度低下は100時間あたり図示馬力が約1.5%、



Fig. 3.19. Deposits at the inlet opening of the pressure transducer. Accurate measurement may be attained by an adequate measure to deposits on the plunger head.

最高圧が約2.3%であった。

4. したがって、計測時のみインジケータ・バルブを開くことにすれば、現在の装置でも実用性はある。しかし、常時計測するためには、受圧用プランジャの材料の選択とその頭部のデポジットの除去が、今後の問題として残った。

4. 燃料噴射率測定への応用

4.1 まえがき

ディーゼル機関のシリンダ内における熱発生率は、出力・効率・騒音などを決定し、排ガス成分にも影響するところが大きい。燃料噴射率は、空気流動・噴霧の空間的分布と共に、熱発生率を支配する最も重要な因子の一つであるから、適正な噴射率を持つ噴射系を設計して機関と組み合わせ、その性能を向上させるためには、噴射率の測定は不可欠のことである。しかし、噴射現象は速く、また測定によって乱され易いの

で、内燃機関測定の中でも難しいものの一つとされている。いままでに数多くの方法⁵⁸⁾が工夫されているが、現在実用されている方法は多くはない。実機の運転中の測定で現用されているのは圧力リフト法のみであるが、圧力をノズルの近くで測定しないと誤差が多くなり修正が必要である。噴射率を得るためには計算が必要なので、これは間接的な方法である。噴射系単体での測定には、圧力リフト法・モーメント法・回転円板法・長管法などが使われている。この中で、長管法はサイクル毎の噴射率の直視が可能な方法の一つである。

現在、大部分の噴射弁には、噴射の切れを良くするために自動弁が採用されており、そのために低回転時に不斉噴射が起るのを止めることができない。また、吐出弁の存在によって、高回転時に二次噴射を生じる。機関の運転範囲内では、これらの異常噴射を起させない配慮が必要で、正常噴射の限界を知るために、回転数とラック位置を変えての広範囲の噴射率の測定が必要である。それを迅速、正確に行うためには、圧力リフト法やモーメント法のように測定量間の演算を必要としたり、回転円板法のように多数回の平均量を求める方法よりも、長管法のようにサイクル毎の噴射率が直視できる方法が望ましい。ただ、長管法では、噴射ポンプの回転数が低くなって噴射時間が長くなった場合、管の終端からの反射波に影響されないためには管の長さを増すことが必要であり、噴射率が大きくなると管径を増さなければならない。したがって、その方法を船用中形、大形機関の噴射系へ応用することには困難が伴う。

圧力容器法⁵⁹⁾は、長管法と同様に、サイクル毎の噴射率を直視することができる方法である。この方法は、噴射量の多い低速の噴射系には、単に圧力容器の容積を増せばよく、応用の容易な方法と考えられる。

“Druckindikator” と呼ばれるその原計器では、容器内の圧力測定をピエゾ水晶変換器で検出し、その出力を微分して噴射率を得ている。内部インピーダンスの高い変換器からの小さい出力と微分回路でのその低下のために、測定には高度の技術を必要とし、高級なチャージ・アンプを使うので経済的な負担も大きい。ピエゾ水晶変換器の代わりに、直動形変換器を使えば、上述の欠点を解消することができるであろう。そこで、応用の対象として、噴射率計を選んだ。

本章で用いた主な記号と単位

記号	単位	意味
a	cm/s	音速
c	cm/V	オシロスコープの感度
E	V	電圧
F	kg/cm ²	圧力の前進波
f_0	cm ²	噴射弁の軸方向投影面積, $f_0=f_1+f_2$
f_1	cm ²	噴射圧力が作用する弁部分の軸方向投影面積
f_2	cm ²	弁とノズル間の油の圧力が作用する弁部分の軸方向投影面積
f_d	cm ²	ノズルの面積
$f_v(y)$	cm ²	弁部における油の通過面積
G	kg/cm ²	圧力の後退波
h	cm	図4.16中に記入
K	cm ² /s	ブラウン管上での、単位の振れあたりの噴射率
k	kg/cm	弁のばね定数
l	cm	噴射管の長さ
m	kg・s ² /cm	ばねの付着質量
n	—	コイルの巻数
P	kg	弁ばねの取付け荷重
p	kg/cm ²	圧力
p_0	kg/cm ²	噴射の脊圧
Q	cm ³ /s	流量
Q_p	cm ⁵ /kg・s	圧力に対する流量変化率
Q_v	cm ² /s	弁リフトに対する流量変化率
q	cm ²	噴射管の断面積
S	cm ²	プランジャの断面積
t	s	時間
V	cm ³	圧力容器、または噴射弁油留部の容積
ΔV	cm ³	噴射量
w	cm/s	流速
x	cm	噴射管に沿っての位置座標
y	cm	弁リフト
α	cm ² /kg	油の圧縮率
δ	cm	ブラウン管上の振れ
$\bar{\Delta}$	Wb/kg	磁気ひずみ感度
λ	—	固有値
μ_d	—	ノズルの流量係数
μ_v	—	弁の流量係数

θ kg·s/cm ばねの減衰係数
 ρ kg·s²/cm⁴ 油の密度

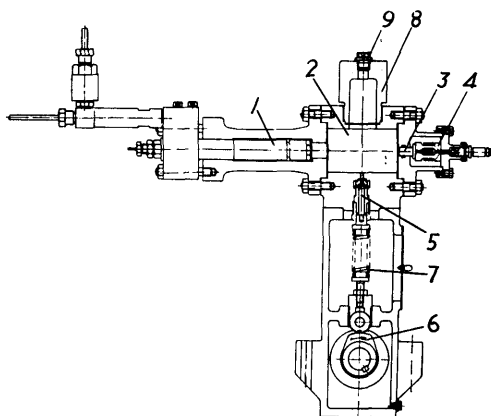


Fig. 4.1. Injection rate meter designed for a medium-size injection system

- 1 Injection valve
- 2 measuring chamber
- 3 Plunger
- 4 Ferrite core
- 5 Overflow valve
- 6 Cam
- 7 Coil spring
- 8 Volume-adjusting cylinder
- 9 Bolt for air-escape

4.2 原理と構造

図4.1に噴射率計の構造を示した。噴射弁1より燃料が ΔV だけ噴射されると、容積 V の密閉された測定室2内の油の圧力が上昇する。その上昇圧力 Δp は次式で与えられる。

$$\Delta p = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (4.1)$$

ここで、 α は油の圧縮率である。

このために、断面積が S であるプランジャ3を介して、フェライト素子4の受ける力は $S \cdot \Delta p$ だけ増加する。したがって、マグネットで磁化されている素子のコイル端子には、次式で与えられる電圧 E が誘起する。

$$E = -n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (4.2)$$

ここで、 n はコイルの巻数、 $\Delta \Phi$ は次式で与えられる微小時間内の、素子内の磁束変化、 Δt は微小時間である。

$$\Delta \Phi = \bar{A} \cdot S \cdot \Delta p \quad (4.3)$$

ここで、 \bar{A} は単位荷重あたりの磁束変化である。

ブラウン管オシロスコープで観測する場合、その感度を c とすると、ブラウン管上の振れ δ は次式で与えられる。ただし、途中の損失を無視した。

$$\delta = cE \quad (4.4)$$

噴射率は、(4.1)～(4.4)より、つぎの形で得られる。

$$\left| \frac{\Delta V}{\Delta t} \right| = \frac{V \cdot \alpha}{c \cdot n \cdot S \cdot \bar{A}} \delta \equiv K \delta \quad (4.5)$$

すなわち、噴射率はブラウン管上の振れに比例する量として得られ、 nS を大きく V を小さく設計すれば、計器感度を上げることができる。しかし、 1 kg/cm^2 の圧力変化に対して、 0.07% 程度の α の変化があるので⁶⁰⁾、 V をあまり小さくすることは許されない。Zeuchは $\Delta p \leq 30 \text{ kg/cm}^2$ が望ましいとしている。 α は、温度に対しても、 1°C あたり約 0.7% の変化をするので⁶⁰⁾、長時間の運転によって温度上昇が大きくなるときは、油の冷却が必要である。

測定が終り、つぎの噴射が行われる前に、前回の噴射燃料は測定室から排出しておかなければならない。5はあふれ弁で、噴射中は噴射ポンプと同軸のカム6で、ばね7を介して押えられている。噴射が終るとカムの圧力がゆるみ、噴射された油は外に出て、測定室の油の圧力はもとにもどる。ばねに取り付け荷重を与えて、噴射の脊圧を与えることができる。噴射の際に気泡が生じないためには、少くとも 10 kg/cm^2 程度の脊圧を与えることが必要であるが⁵⁹⁾、さらに高くして機関の圧縮圧力に近づけることが望ましい。この脊圧は、燃料の噴射と共に増加するので、シリンダ内の圧力経過に似た変化とすることができる。8はねじ込みの筒で、これを代えて測定室の容積を変えることができる。9は空気抜き用のボルトである。

4.3 測定回路

図4.2は、測定回路のブロック線図である。変換器よりの出力は、ローパス・フィルタを通してブラウン管オシロスコープで表示される。出力が大きいので、 5 mV/cm 程度の感度を持つ市販のオシロスコープがあれば、プリ・アンプを必要としない。像を安定させるためには、外部同期をかけることが望ましい。

噴射によって生じる変換器よりの出力は、固体のインパルス応答の波形であり、磁気ひずみ素子の固有振動による減衰波の中に、後述するような高い周波数成分を持つ波の重畳した信号が含まれている。図4.3は、フィルタの遮断周波数を10, 5, 2, 1と変えたとき

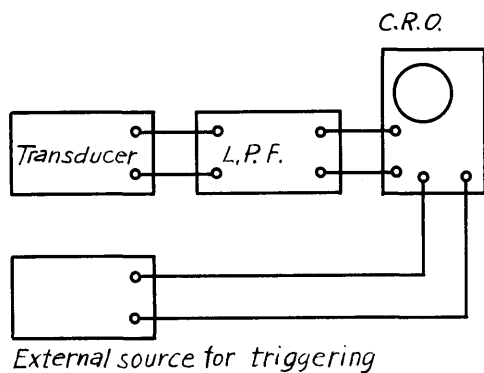


Fig. 4.2. Arrangement for measuring injection rate

の噴射率(上)と自動弁のリフトを示したものである。弁が上昇してストップにあたったとき、下降して座にあたったとき大きな変化が現われており、衝突による弁の振動も考えさせる。フィルタの遮断周波数が下がると、噴射率の立ち上がりが弁リフトのそれより遅れる。それは、5 kHz までではほとんど分らない程度であるが、1 kHz では約 0.4 ms になる。しかし、こ

れは位相のずれであって、噴射期間の差はほとんど認められない。フィルタは、36 dB/Oct. の減衰傾度を持つ市販の能動形フィルタ(NF回路製, FV-606T)を使った。

4.4 検定

燃料の噴射はきわめて短い時間内の現象であるので、入力としての噴射率の値を正確に知ることは困難で、入出力の関係を調べる通常の検定は行い難い。そこで、つぎのような方法をとって検定に代えた。

前述したように、この噴射率計は噴射量に比例して測定室内の圧力が上昇することとその圧力変化が磁気ひずみ式変換器によって微分されることを測定原理としている。噴射される燃料の噴射率の値を知ることは困難であるが、毎回の噴射量を実測することは容易である。そこで、燃料噴射による圧力変化が変換器によって正確に微分されるかどうか、(4.5)で示される、理論的に定められる、噴射率とオシログラム上の振れとの比例定数Kを使って、オシログラム上の噴射率曲線と時間軸とがかこむ面積より算定される毎回噴射量が、実測されたそれと一致するかどうかの二つを調べ

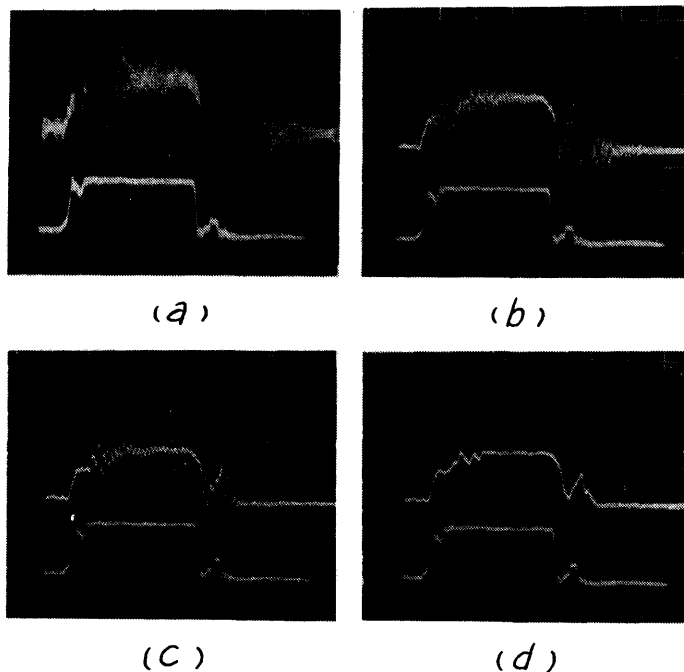


Fig. 4.3. Signals out of the pressure transducer, passed through a low-pass filter of various cutoff-frequencies: (a) 10 kHz, (b) 5 kHz, (c) 2 kHz, (d) 1 kHz

た。なお、算定と実測の両毎回噴射量が一致することは、各瞬間に噴射量に比例して測定室内の圧力が変化することの必要条件であって、十分条件とはなり得ないが、噴射率は噴射圧の平方根に比例して変化する量であるので、噴射圧の変化を測定し、それを噴射率の変化と対応させることによって、十分条件が満たされているかどうかを推量することができるであろう。

図 4.4 は、 2.09 cm^3 の燃料を噴射したときの、市販の抵抗線ひずみ計式圧力計で測定した測定室の圧力変化（上）と 1 kHz のローパス・フィルタを通した後の直動形変換器の出力のオシログラムである。圧力変化の経過をみると、最初脊圧として 48 kg/cm^2 の圧力が与えてあり、a で始まり b で終る噴射によって、圧力は 87 kg/cm^2 まで上昇する。噴射時間は 24 ms である。c ではカムの押えがゆるんで油の流出が始まり、振動しながら圧力が低下し、噴射開始時の値にもどる。噴射期間中の噴射率計の出力が噴射率を与え

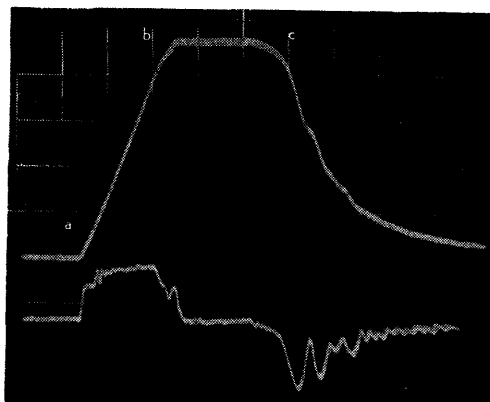


Fig. 4.4. Pressure change due to injection into the measuring chamber, measured with a strain-gauge pressure transducer (upper curve) and output of the injection rate meter

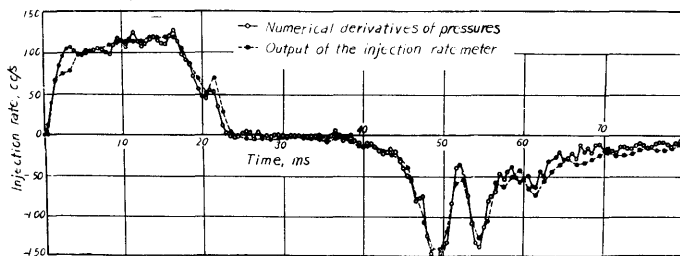


Fig. 4.5. Comparison of the signal out of the injection rate meter and numerical derivatives of the pressure change shown in Fig. 4.4.

る。図 4.5 に、圧力を数値微分して、噴射率計よりの出力と比較して示した。

サンプリング間隔の誤差のために、数値微分値には凸凹がみられるが、それを平均したものは磁気ひずみ式変換器の出力とかなりよく一致している。

図 4.6 は、図 4.4 の噴射率を、オシロスコープの感度と掃引速度を上げてとったものである。下側は、噴射弁入口で測定した噴射圧である。この噴射率曲線と時間軸のかこむ面積から計算した噴射量は 1.94 cm^3 で、あふれ弁よりの流出量を、一定時間メスシリンダに集積し、そのときの噴射ポンプの回転数から毎回噴射量として求めた前述の噴射量 2.09 cm^3 に近い値である。噴射率と噴射圧の変化の対応は悪くない。ここで、 K を計算するために使った数値は、 $V=610 \text{ cm}^3$, $n=520$, $S=1.54 \text{ cm}^2$, $c=200 \text{ cm/V}$, $\alpha=8.78 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kg}$, $\bar{A}=8.41 \times 10^{-9} \text{ Wb/kg}$ である。なお、 α は

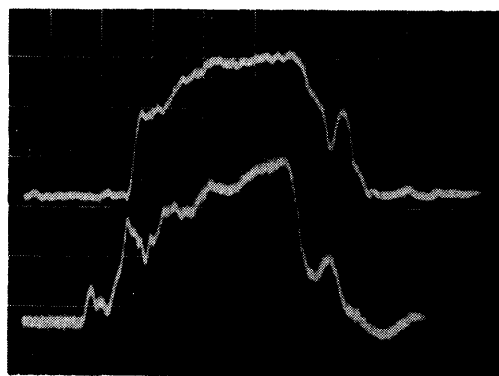


Fig. 4.6. Measuring example of injection rate (upper curve) and injection pressure at a speed of 200 rpm and an injection quantity of 2.09 cc . Vertical scale: injection rate 42.9 cc/s/div . Sweep speed: 5 ms/div .

容器の膨張をも含めた見掛けの圧縮率で、(4.1)式を使って実験的に得られた値である。噴射量と回転数を変えた実験で、上述のような方法で得られた値は、8%内の差で一致する。

4.5 中形高出力実験機関への応用例

中、大形機関の燃料噴射率の測定は、実際に機関を運転して、圧力リフト法でなされる程度で、噴射系の広い運転範囲全般にわたって行われることはないようである。それは、噴射ポンプの駆動に大きな動力を必要とし、装置の製作に費用がかかることもその原因であるが、小形機関における長管法のような簡単な測定法がないことが主たる原因であろう。試作した噴射率計を、高過給によって高出力を得るために製作された中形中速二サイクル機関の噴射率測定に応用し、その実用性を確かめると同時に、高出力化の研究に寄与したいと考えた。

4.5.1 実験装置 図 4.7 に、試験した噴射系の略図を示した。この噴射系は、主噴射の前に補助的な噴射をして、種々な形の噴射率が得られる。二つの噴射ポンプと一つの噴射弁を持つ特殊な設計の噴射系である。その主要な諸元は、つぎのようである。

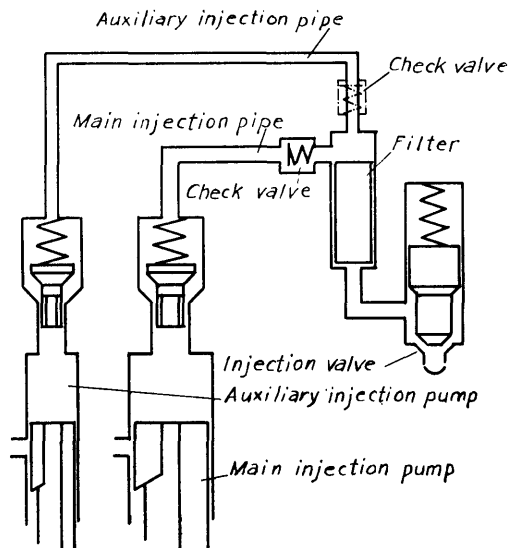


Fig. 4.7. Schematic diagram of the injection system for a medium-sized and experimental Diesel engine
 Injection pump: main PF1CD200A, auxiliary PF1CD130A
 Injection pipe: main 3.5×10×740mm auxiliary 3.0×8×740mm
 Nozzle: diameter 0.30mm, number 9

主噴射系
 噴射ポンプ：形式 PF1CD200A, カムリフト18mm, ラックストローク36mm, プランジヤ径20mm, 吐出弁吸いもどし量472mm³
 噴射管：外径10mm×内径3.5mm×長さ740mm
 噴射弁：形式 DL 140T, 噴口径 0.3mm, 噴口数 9, 開弁圧 280 kg/cm²
 補助噴射系
 噴射ポンプ：形式 PF1CD130A, カムリフト 18mm

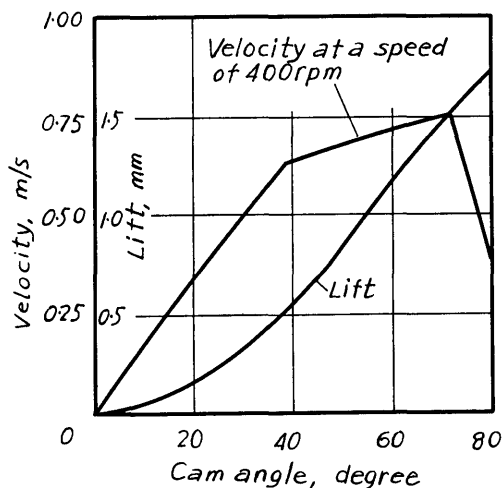


Fig. 4.8. Characteristic curve of the cam



Fig. 4.9. Test equipment for the injection rate meter
 1 Injection rate meter
 2 Injection system
 3 Reduction gear
 4 D.c. dynamometer

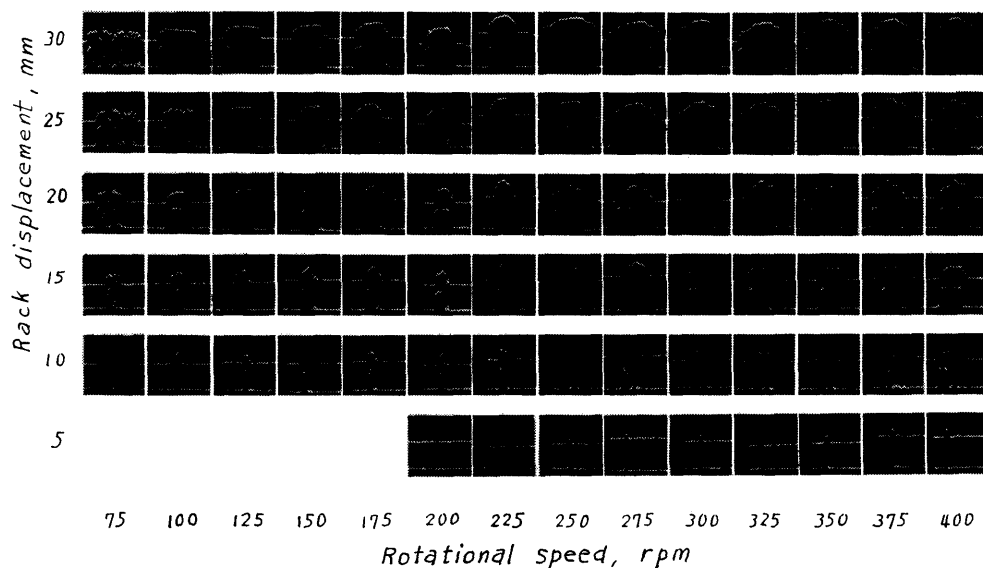


Fig. 4.10. Injection rates (upper curve) and valve lifts at various speeds and various injection quantities
 Sweep speed : 10 ms/div. at various speeds below 225 rpm and
 5 ms/div. at various speeds above 250 rpm

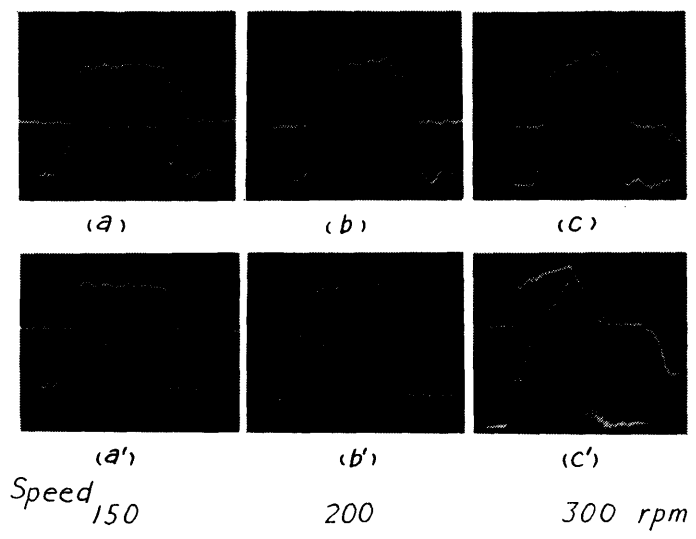


Fig. 4.11. Injection rates accompanied with secondary injection caused by pressure accumulated in the auxiliary injection pipe (upper side) and injection rates restored to the normal condition by the check valve attached to the pipe, as shown with chaine line in Fig. 4.7.
 Upper curve : Injection rate
 Lower curve : Injection pressure

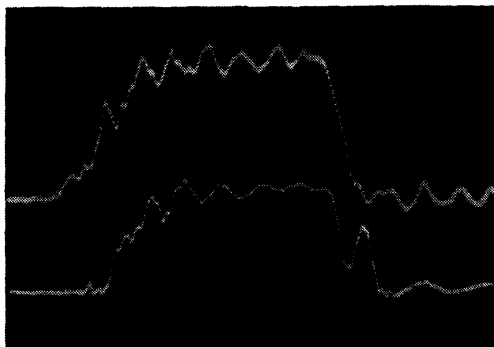


Fig. 4.12. Comparison of injection pressures measured at the valve side (lower curve) and the pump side of the injection pipe

ラックストローク36mm, プランジヤ径13mm, 吐出弁吸いもどし量 204mm³

噴射管：外径8mm×内径3mm×長さ740mm

噴射ポンプのカム特性を, 図4.8に示した。基準回転数は400rpmである。図4.9は実験装置で, 1は噴射率計, 2は噴射系, 3は減速比7.5の減速機, 4は駆動用の50PSの直流電気動力計である。駆動力に余裕があるので, はずみ車はつけなかった。噴射率

計は, 図4.1に示した構造を持ち, 4.4節のKの計算に使った諸元を持つものである。ローパス・フィルタの遮断周波数を1kHzとした。

4.5.2 実験結果 図4.10に, ラック位置および回転速度を変えて測定した結果を, 縦方向にラック位置, 横方向に回転速度を変えて並べた。これによって, 噴射系の特性を概観することができる。上の線が噴射率で, その下に参考として市販の可変インダクタンス式の変位計を使って, 自動弁のリフトを記録した。ラック位置を25mmに固定して, 回転速度を変えてながめると, 75rpmでは断続噴射をしており, 100rpmでは弁は弁座とストoppaの間で振動しており噴射も振動的である。これら低回転での噴射は不斉で, 異ったパターンが交互に現われることが多い。125rpmではほぼ正常な噴射がなされているが, 150rpmでは二次噴射が生じている。175rpm以上では, 弁の開閉は一回で, 弁の動きだけをみると正常噴射のようにみえるが, 順を追ってながめると噴射率は二次噴射が強くて主噴射の部分につながったものであることがわかる。このために, 速度の増加と共にカム・アングルで表わした噴射期間は大幅に延び, この装置と組み合わせる機関の最高速度400rpmのときには42°にもなっている。この値は設計値の24.5°に比べてか

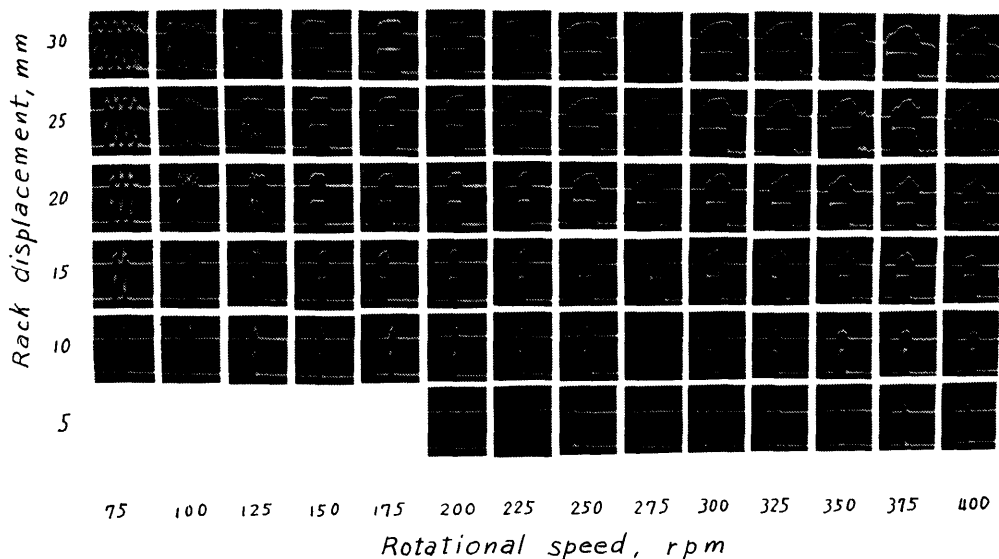


Fig. 4.13. Injection rates (upper curve) and valve lifts at various speeds and various injection quantities

Sweep speed: 10 ms/div. at various speeds below 225 rpm and 5 ms/div. at various speeds above 250 rpm

なり大きい。このように噴射期間の長い、あと噴射の多い噴射は機関の性能低下をもたらすであろう。低速機関の場合であるが、このようなあと噴射によって燃焼が悪化する例がある⁶¹⁾。

400 rpm の機関で使用する噴射系において、低い 150 rpm で二次噴射が起こるのは異常なことであるので、その原因を調べた。図4.11(a)(b)(c)に、ラック位置 25mm、回転速度 150, 200, 300 rpm の場合の噴射率(上)と噴射圧を示した。(a)において、閉弁過程の圧力をみると、圧力が下がって一度噴射が終わったあとに再び回復して、それが二次噴射の原因となっている。図4.12は、噴射管のポンプ端(上)とノズル端の噴射圧を示したもので、閉弁過程での圧力の回復はノズル端での現象であり、補助噴射管中に蓄積された圧

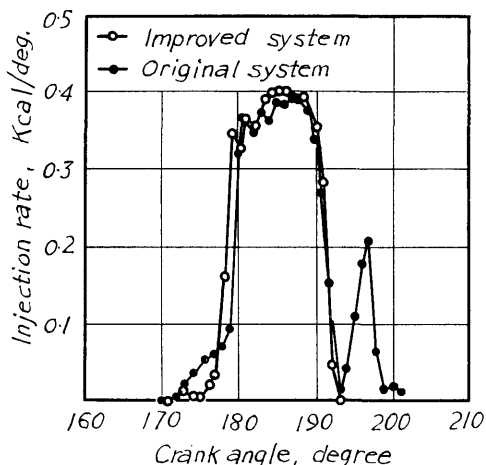


Fig. 4.14. Injection rates actually occurred in the Diesel engine, measured by pressure-lift method

Table 4.1 Comparison of running performances of the Diesel engine operated by the injection rates as shown by Fig. 4.14.

		Injection rate with secondary injection	Normal injection rate
speed	rpm	364	364
brake horsepower	PS	116	114
maximum cylinder pressure	kg/cm ²	66.5	72
specific fuel consumption	g/PS·h	164	158
exhaust gas temperature	°C	335	310
smoke concentration*	—	2.7	1.7
brake mean effective pressure	kg/cm ²	8.68	8.55
delivery pressure	kg/cm ²	1.61	1.58

* Bosch Index

力の放出にその原因のあることが考えられる。図4.11(b)(c)では、速度の増大と共に強くなったこの放出圧力によって圧力降下がゆるやかになり、噴射の延びが起きていることが示されている。そこで、その救済策として、図4.7中に鎖線で示したように、補助噴射管の、主噴射管と合流する場所に逆上弁を設けて、両系統の相互干渉を除いた。それによって改善された噴射率が、図4.11(a')(b')(c')である。前の場合に比べて、

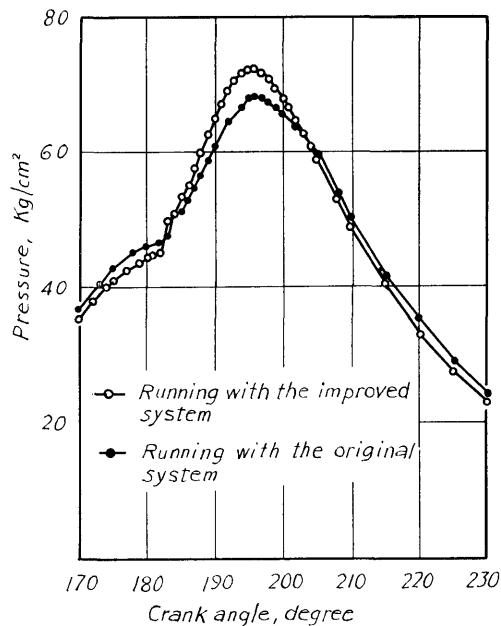


Fig. 4.15. Comparison of cylinder pressures, when the Diesel engine is operated by the injection rates as shown by Fig. 4.14.

圧力が一気に降下しており、噴射の終りがきれいである。ただ、300 rpm では、降下始めの圧力が高いために、それが十分落ちきらない間に吐出弁が閉鎖し、わずかではあるがあと噴射が生じている。図4.13は、図4.10に対応する改善された噴射特性を示したもので、全般に噴射の終りがきれいであることと、ラック位置10mmにおいては断続噴射がなくなっていることが注目される。

逆止弁を付けたことによって改善された噴射率によって、実機の性能はどの程度変わるか、一例として、ある運転状態での測定結果をつぎに示した。図4.14は噴射率、図4.15はインジケータ線図、表4.1は運転性能を比較して示したものである。197°C A付近にピークを持つあと噴射部分がなくなったことにより、燃料消費率が3.7%、排気温度が20°C、排気煙濃度がボッシュ・インデックスで1だけ下がっている。

4.6 大形中速船用機関への応用

さきに、わが国で、1シリンダあたり1500PSの出力を持つ超高速船用の高出力ギヤード・ディーゼル機関が開発されたが、その開発段階で、基礎研究の一つとして、その燃料噴射率の測定をした。第2の応用例として、その結果を述べる。

4.6.1 実験装置 図4.16に、噴射系の略図を示した。噴射ポンプは、吐出弁を持たない。その主要諸元は、つぎのとおりである。

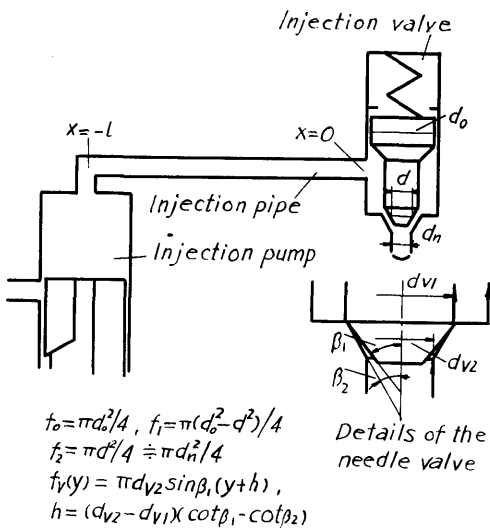


Fig. 4.16. Schematic diagram of the injection system for a large-size and medium-speed Diesel engine

噴射ポンプ：形式 ボッシュ形，カムリフト46mm
 プランジャ径50mm
 噴射管：外径40mm×内径13.5mm×長さ1000mm
 噴射弁：噴口径 1.09mm，噴口数 8，開弁圧 400

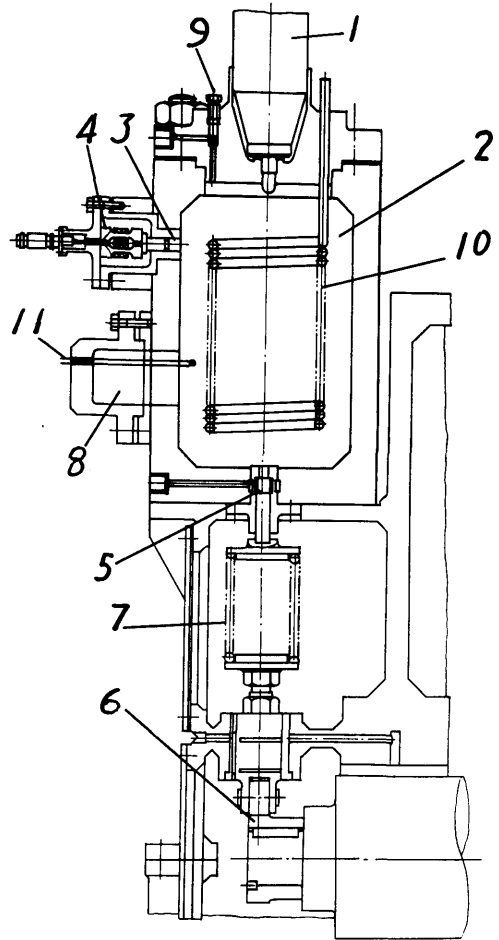


Fig. 4.17. Injection-rate meter designed for the injection system as shown by Fig. 4.16.

- 1 Injection valve
- 2 Measuring chamber
- 3 Plunger
- 4 Ferrite core
- 5 Overflow valve
- 6 Cam
- 7 Coil spring
- 8 Volume-adjusting cylinder
- 9 Bolt for air-escape
- 10 Cooling pipe
- 11 Thermolectric couple

kg/cm²

図4.17に、噴射率計の構造を示した。測定室の容積は 9,300 cm³ で、ストロークあたりの最大噴射量約 25 cm³ において、圧力変化を 35 kg/cm² とするように設計されている。噴射によって、測定室内の油温が著しく上昇する。蛇管10は、その温度を一定に保つための冷却管である。熱電対温度計11はその監視用である。その他の構造は、前述のものと同じである。

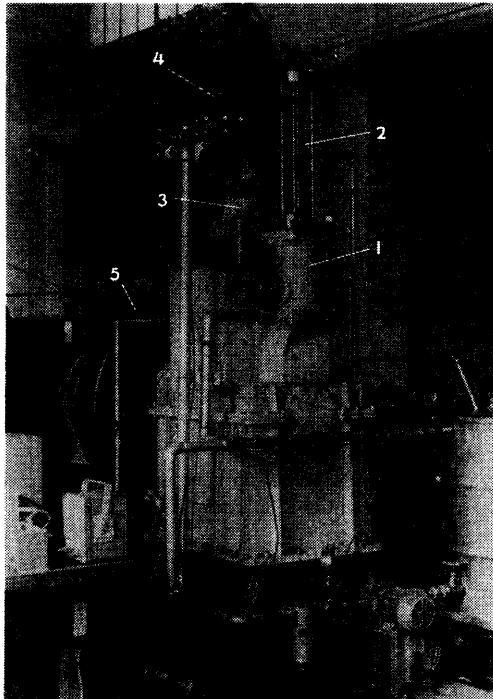


Fig. 4.18. Test equipment for the injection rate meter

- 1 injection rate meter
- 2 Injection valve
- 3 Injection pump
- 4 Injection pipe
- 5 Fly wheel

図4.18に、実験装置を示した。駆動用動力は、直流電気動力計から、減速比1/10の減速機、慣性モーメント 830 kgm² のはずみ車を経て、噴射ポンプに伝えられる。所要動力は、約 50 PS である。

4.6.2 実験結果 図4.19に、ラック位置を一定にし、回転速度を変えたときの噴射率(上)を示した。185 rpm の場合が、機関の最大出力時の噴射率である。下は、弁リフトである。流量と弁リフト、弁リフ

トとそのオシログラム上の振れの二つの非直線的な関係が重なって、流量と弁リフトのオシログラム上の振れとは、図4.20に示すような形で結ばれている。噴射率と弁リフトとの対応には、これを留意する必要がある。

185 rpm より 108 rpm まで、弁リフトは終始ストップにあたっており、正常噴射であることが示されている。この範囲の噴射率に重畳した波の周期約2.2 ms は、圧力波が噴射管を往復するに要する時間にほぼ等しい。この機関の船用特性 1/5 負荷時の噴射ポンプの速度が 108 rpm である。この速度範囲の、ラック位置を変えての全転範囲で、正常噴射が行われることを確認した。

速度を下げると、80 rpm では弁はストップに達しないで、約 125Hz の比較的長い周期の波に、小さい振幅の約 400Hz の短い周期の波が重なって現われ、異常噴射の傾向が示される。さらに速度を下げると、二つの波の振幅が大きくなり、50 rpm では短周期の波が発散するようになる。

4.6.3 振動的な噴射の考察 図4.3に示したように、変換器よりの出力には高い周波数成分の波が含まれており、それらをローパス・フィルタで除いた。

しかし、前項で示したように、フィルタを通過した信号の中には、なおいくつかの波が含まれており、それらが何であるかは検討を必要とする。図4.19における低回転領域での噴射率は、図4.20で示した流量と弁リフトとの非直線的な関係を考慮してながめると、弁リフトとは定量的にもかなりよく対応していて、実際にそのような噴射が行われていることは確かである。そこで、この振動的な噴射をさらに詳しく考察した。

この現象を噴射管内の非定常流現象としてとらえ、圧力波 p と速度波 w の伝ばを、流体抵抗を無視して、次式で表わす。

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{a^2 \rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (4.7)$$

ここで、 t は時間、 x は噴射管に沿っての位置座標、 a は油の音速、 ρ は油の密度である。

管端での境界条件を、つぎのように置く。

ポンプ側では、常に一定速度で油が流入する。すなわち、

$$w = w_0 \quad (4.8)$$

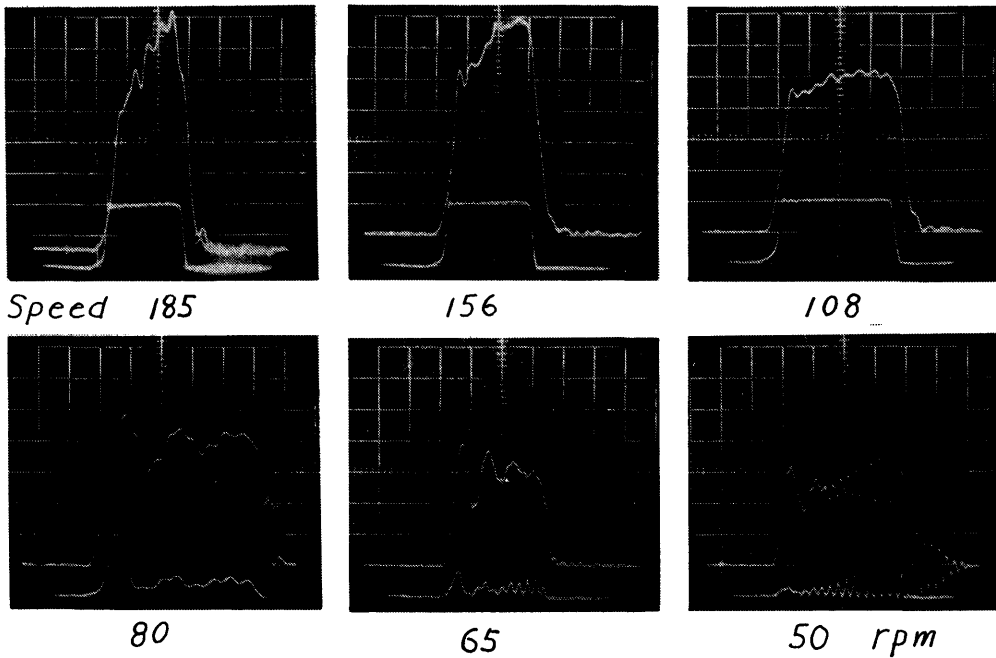


Fig. 4.19. Injection rates (upper curve) and valve lifts at various speeds and an injection quantity of about 27 cc/stroke.
 Vertical scale: Injection rate 0.29 cc/ms/div.
 Sweep speed: 10 ms/div. at various speeds below 65 rpm and 5 ms/div. at various speeds above 80 rpm

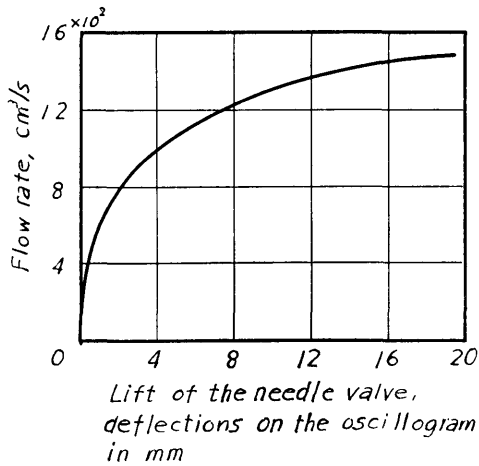


Fig. 4.20. Relation between flow rate and needle valve

ノズル側では、自動弁の運動方程式として

$$m\ddot{y} + \theta\dot{y} + ky + P = p f_1 + p_n f_2 \quad (4.9)$$

ここで、 m はばねの付着質量、 θ はばねの減衰係

(344)

数、 k はばね定数、 P はばねの取付け荷重、 f_1 は噴射圧力が作用する弁部分の軸方向投影面積、 f_2 は弁とノズル間の油の圧力が作用する弁部分の軸方向投影面積、 P_n は弁とノズル間にある油の圧力、 y は弁リフトで、 \dot{y} 、 \ddot{y} は時間に関するその一次および二次の微分である。

弁およびノズルにおける流れに対しては、定常流で成立する式が使えるものとして、

$$p - p_n = \frac{\rho Q^2}{2\{\mu_v f_v(y)\}^2} \quad (4.10)$$

$$p_n - p_g = \frac{\rho Q^2}{2(\mu_a f_a)^2} \quad (4.11)$$

ここで、 p_g は噴射の脊圧、 Q は流量、 μ_v は弁の流量係数、 μ_a はノズルの流量係数、 $f_v(y)$ は弁部における油の通過面積、 f_a はノズルの面積である。

また、弁まわりの油留部における連続の式として

$$Q = q_w - \frac{V}{E} \dot{p} - f_o \dot{y} \quad (4.12)$$

が成立する。

ここで、 q は噴射管の断面積、 E は油の弾性率、 V は油留部の容積、 f_0 は弁の軸方向投影面積である。

y p w Q などは、それぞれ定常状態とる一定値 y_0 p_0 w_0 Q_0 とそれよりの変化分 y_1 p_1 w_1 Q_1 の和として表わされ、その変化分はきわめて小さいとする。すなわち、

$$y = y_0 + y_1 \quad (4.13)$$

$$p = p_0 + p_1 \quad (4.14)$$

$$w = w_0 + w_1 \quad (4.15)$$

$$Q = Q_0 + Q_1 \quad (4.16)$$

(4.6) より (4.16) までの式から、 ℓ を噴射管長とすると、 λ を固有値とする、つぎの方程式が得られる⁶²⁾。

$$\begin{aligned} & \left(Q_p + \frac{V}{E} \lambda \right) \left\{ m \lambda^2 + \theta \lambda + k - \frac{\rho f_2 Q_0 Q_y}{(\mu_a f_a)^2} \right\} \left(e^{\frac{2\ell}{a} \lambda} + 1 \right) \\ & + (Q_y + f_0 \lambda) \left\{ f_1 + \frac{\rho f_2 Q_0 Q_p}{(\mu_a f_a)^2} \right\} \left(e^{\frac{2\ell}{a} \lambda} + 1 \right) \\ & + \frac{q}{a \rho} \left\{ m \lambda^2 + \theta \lambda + k - \frac{\rho f_2 Q_0 Q_y}{(\mu_a f_a)^2} \right\} \left(e^{\frac{2\ell}{a} \lambda} - 1 \right) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

ここで、 $Q_p \equiv \partial Q / \partial p$ 、 $Q_y \equiv \partial Q / \partial y$ で、(4.10) と (4.11) より、つぎの式で与えられる量である。

$$Q_p = \sqrt{\frac{2}{\rho}} / 2 \sqrt{p_0 - p_g} \left[\frac{1}{\{\mu_v f_v(y_0)\}^2} + \frac{1}{(\mu_a f_a)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

$$Q_y = \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_0 - p_g} / \{\mu_v f_v(y_0)\}^2 (y_0 + h) \left[\frac{1}{\{\mu_v f_v(y_0)\}^2} + \frac{1}{(\mu_a f_a)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (4.19)$$

ここで、 h は図4.16の中で示した定数である。

噴射ポンプの回転数が与えられると Q_0 が定まり、(4.10) (4.11) から p_0 y_0 が求められる。この運転状態における Q_p と Q_y は (4.18) (4.19) から得られる。固有値は、これら Q_0 p_0 y_0 Q_p Q_y と噴射系に関する定数を使って、数値解法によって (4.17) より得られる。表4.2は計算結果で、(4.17) の根の中で、周波数の低い二つを示した。計算に使った噴射系に関する諸定数は、つぎのとおりである。

Table 4.2 Proper values obtained from eq. (4.17).

n rpm	50	65	80	108	156	185
Q_0 cc/s	740	890	996	1430	1630	1730
p_0 kg/cm ²	434	443	450	504	583	654
y_0 cm	0.044	0.048	0.065	0.120	0.150	0.150
λ_1	-9.06 + 1250i (199Hz)	-12.5 + 1250i (199Hz)	-15.6 + 1250i (199Hz)	-89.5 + 1400i (223Hz)		
λ_2	406 + 2970i (473Hz)	347 + 2890i (460Hz)	270 + 2860i (455Hz)	-50.6 + 2680i (426Hz)	-129 + 2480i (395Hz)	-138 + 2480i (395Hz)

$a = 1.35 \times 10^5$ cm/s, $E = 1.67 \times 10^4$ kg/cm²,
 $f_0 = 1.13$ cm², $f_1 = 0.972$ cm², $f_2 = 0.159$ cm²,
 $f_v(y) = 0.725(y + 6.40 \times 10^{-3})$ cm², $h = 6.40 \times 10^{-3}$ cm,
 $k = 1.15 \times 10^3$ kg/cm, $\ell = 1.71 \times 10^2$ cm,
 $m = 4.17 \times 10^{-4}$ kg·s²/cm, $P = 343$ kg, $p_g = 30$ kg/cm²,
 $q = 0.479$ cm², $V = 1.95$ cm³, $\mu_a = 0.7$, $\mu_v = 0.9$,
 $\theta = 0$, $\rho = 9.38 \times 10^{-7}$ kg·s/cm⁴

ℓ は噴射管端より噴射ポンプ吐出口まで、および弁までの長さが加えられており、 q は噴射弁内通路の断面積がとられている。また、噴射ポンプ各回転数に対する Q_0 は、図4.19の噴射率曲線と時間軸がかこむ面積を時間平均して求めた値をとった。

50 rpm の場合をみると、199Hzの減衰波と473Hzの

発散波が現われることが示されており、これらは測定された125Hzと400Hzの波に相当するものであろう。噴射ポンプの回転数を上げると、199Hzの波の減衰率は大きく、473Hzの波の発散率は小さくなることが示されており、実験での傾向と一致する。弁がストップまで押し上げられる回転数は108rpmの近くにあり、それ以上の回転数では弁はストップに固定されて振動せず、管の往復波のみが存在する*。

* (4.17)において $k \rightarrow \infty$ の場合であり、それは

$$\left(Q_p + \frac{V}{E} \lambda \right) \left(e^{\frac{2\ell}{a} \lambda} + 1 \right) + \frac{q}{a \rho} \left(e^{\frac{2\ell}{a} \lambda} - 1 \right) = 0 \quad (1)$$

(345)

と表わされる。 V が小さく無視できるときは、これは次式と同等である。

$$e^{\frac{2l}{a} R_e \lambda} \cos \frac{2l}{a} I_m \lambda = 1 - \frac{2Q_p}{\frac{q}{a\rho} + Q_p} \quad (2)$$

および

$$\sin \frac{2l}{a} I_m \lambda = 0 \quad (3)$$

この解の虚数部は

$$1 - \frac{2Q_p}{\frac{q}{a\rho} + Q_p} > 0 \text{ のとき } I_m \lambda = \frac{2na\pi}{2l} \quad (4)$$

$$1 - \frac{2Q_p}{\frac{q}{a\rho} + Q_p} < 0 \text{ のとき } I_m \lambda = \frac{(2n+1)a\pi}{2l} \quad (5)$$

ただし、 $n=0, 1, 2, 3, \dots$ である。

また、実数部は(4)あるいは(5)を(2)に代入して得られる。

まとめ

1. ピエゾ水晶変換器の代りに磁気ひずみ式直動形変換器を使い、“Druckindikator”と呼ばれる噴射率計を改良した。チャージ・アンプと微分回路を使う必要がなく、新しい変換器の内部インピーダンスが低いこととその出力が大きいくことによって、経済上および測定技術上の負担を軽くし、実用を容易にした。

2. 主、補助二つの噴射ポンプと一つの噴射弁を持つ、中形高出力実験機関の噴射率の測定に応用した。補助噴射管内に蓄積される圧力によって、低い回転数よりあと噴射が起きることを見出し、逆止弁によって主・補助両噴射系の相互干渉をなくし、噴射率の改善をはかった。

3. 超高速船用ギヤードディーゼル機関の噴射率の測定に応用した。予定の運転範囲内では正常噴射が行われることを確認すると共に、低回転時に起きる異常噴射を詳しく観測し、理論的考察を加えた。

5. 結 論

磁気ひずみ効果は、ほとんど変位を許さない点で、力の測定に適した効果であり、それを圧力-電圧変換に利用した場合、変換出力が大きい、内部インピーダンスが小さい、機械的強度と固有振動数を大きくとることができるなどの長所があり、実際に工業の広い分野で利用されてきた。しかし、従来変換素子として金

属材料が使われていたもので、主としてうず電流損失のために、高い周波数領域で使うことは困難で、測定のできる現象の速さも制限された。この欠点を除くために、酸化物磁性材料であるフェライトを使うことを考え、その特性をしらべ、圧力変換器を製作し、それを船用ディーゼル機関の図示馬力と燃料噴射率の測定に応用した。この研究によって、つぎのような結果が得られた。

5.1 成 果

1) フェライトの特性の実験的考察 公称周波数100kHz π 形の、超音波振動子として市販されている $Ni-Cu$ 系フェライトを試料として、磁化特性・温度特性、周波数特性をしらべた。磁界の強さを増して回転磁化範囲に入ると、応力による磁束変化の大きさは減少するが、変化の非直線性とヒステリシスも小さくなり、測定に適した特性が得られる。すなわち、10 Oeの磁界では、1 kg/cm²の圧縮応力に対し、3.7 Gaussだけ磁束が増加し、非直線性とヒステリシスは1%を越えない。可逆透磁率は0.096%だけ減少し、非直線性とヒステリシスは2%と1.3%である。同じ磁界で、1°Cの温度上昇に対する磁束変化は、応力0.31 kg/cm²による変化と同じである。可逆透磁率の変化は2.4 kg/cm²の変化と同じである。また、温度による応力感度の変化は、磁束・可逆透磁率いずれの場合も小さくて無視できる。この試料では、65kHzまで平坦な周波数特性が得られた。フェライトは、うず電流損失がほとんどないので、機械的共振によって制限されるまでの広い範囲で平坦な周波数特性を持つ。以上の結果から、圧力-電圧変換材料として、フェライトは速い現象の測定をも可能とするすぐれた材料であることがわかった。

2) 磁気ひずみ効果の理論的考察 通常の測定では、磁化電力の経済性をも考慮に入れて、回転磁化範囲での低い磁界が選ばれる。簡単のために、磁界をこの低磁界に限定して、磁界と応力の関数としての磁化の強さに、結晶磁気異方性定数、飽和磁気ひずみ定数、飽和磁化の強さなどの磁気的基本量がどのように、関与しているかを明らかにした。

3) 圧力計の製作 圧力を電圧に変えるのに、素子を直流磁化して磁束の変化を利用する直動変換、交番磁化して変調変換をする方法がある。変調変換は、振幅変調するか周波数変調するかによって、さらに二つの方法にわけられる。直動形圧力変換器は、非直線性とヒステリシスの小さい点ですぐれている。圧力変

化を時間微分した形の出力が得られるので、ディーゼル機関の燃料噴射率やシリンダ内の圧力上昇率の測定への利用に興味を持てる。積分して力の測定にも利用できるが、緩慢な変化のものには、出力が小さくなるので不利である。変調形変換器は、変調変換なので、出力が大きいことと静的な力の測定ができる点がすぐれている。直動形のものに比べて、非直線性とヒステリシスの大きい点がおとるが、バイアス磁界を大きくすることによって改善することが可能であろう。

4) 船用ディーゼル機関の図示馬力測定への応用

直動形圧力変換器を使い、図示馬力の遠隔指示装置を試作した。実船において、延べ約500時間にわたる、インジケータ・バルブを開放したままの、前例のない方法で実験を行い、フェライト変換素子の耐久性と安定性を確認することができた。しかし、この実験の中途約240時間で、圧力変換器の受圧用プランジャ頭部の腐蝕とそのためが生じた、わずかのOリングの損傷があり、予備の変換器と交換したこと、燃焼生成物の推積が主な原因と考えられる感度低下があったことにより、受圧機構の改良の必要を認めた。

5) 船用ディーゼル機関の燃料噴射率測定への応用

原計器のピエゾ水晶変換器の代わりに直動形圧力変換器を使って、圧力容器法の改良をはかった。この改良によって、計器の費用と測定技術上の負担を大幅に軽くすることができた。この計器を中形中速機関の噴射率の測定に応用し、特異な現象として、補助噴射管に蓄積された圧力によって、低い回転数からあと噴射が起きることを見出し、その改善をはかった。また、超高速船用ギヤードディーゼル機関の噴射率の測定に応用し、機関の使用運転範囲内で正常な噴射が行われることを確認すると共に、低回転時観測された異常噴射の理論的考察を行った。

5.2 今後の課題

1) 材料の研究 磁気ひずみ効果を利用する測定器は、感度と磁化電力の経済性を考えて、比較的低い磁界で使われることが多いので、校正曲線の非直線性とヒステリシスはいずれも1%程度が限度であり、また同じ成分と考えられる材料であっても、特性にばらつきのあることが多い。これらが、この測定器の多くの長所を減殺し、商品化をためらわせて、普及をさまたげているようである。

従来、測定用磁気ひずみ材料は、他の目的のために作られた市販の金属材料の中から、測定条件に応じて選ばれるのが普通であった。測定用として作られた材

料が使われたのは、わずかに周波数変調形力量計⁴⁴⁾での、実験室的につくられたフェライトの例があるにすぎない。可逆透磁率の変化を利用した、その力量計では、非直線性とヒステリシスが共に0.5%以下、零点の移動は補償によって0.01%/°C以下、感度の温度係数は0.5%/°Cの特性が得られている。かつて、炭素含有量を異にする鋼材のベルトハイム効果を調べたとき、S50Cが他とは著しく違ってすぐれた特性を示したことを経験した⁸⁵⁾。原因はわからないが炭素以外の微量成分と組織が影響しているのであろう。フェライトにおいても、微量な金属酸化物の添加で、磁気的性質を変えることができる。フェライトは、粉末冶金的方法で、簡単に成分の違った材料をつくることのできるため、希望する特性を持つ材料をさがす困難は比較的少ないであろう。また、製造の条件を揃え易いことが、製品のばらつきを少なくすることにつながるであろう。この測定器の一般化は、フェライト材料の研究によって前進するであろう。

2) 小形化の研究 磁気ひずみ素子では、磁化や検出にコイルが使われるので、その制約を受けて、ピエゾ素子のように小さくして、使うことはできない。しかし、応用できる対象を少しでも多くするためには、その小形化は材料の研究と共に、重要な課題である。一つの解決策として、周波数変調形変換器の開発が考えられる。マグネットによって強いバイアス磁界を与え20MHz程度の中心周波数を使えば、必要なコイルの巻数は少なく済む。この変換方法には、遠隔測定が可能であることや、デジタル変換が容易であるなどの利点があるので、興味ある測定器が得られるであろう。

筆をおくに当り、終始実験に協力していただいた辻歌男主任研究官、図示馬力の指示装置の製作ならびにその校正に手を煩わした長野計器製作所、その実船実験を担当していただいた航海訓練所練習船銀河丸の方々、噴射率計の製作をしていただいた阪神内燃機工業株式会社および三井造船株式会社に、厚くお礼を申し上げたい。また、岩柳順二共通工学部長には有益な助言をいただいたり、同氏の研究から教えられる所が多かった。心から感謝の意を表したい。磁気ひずみ効果研究の端緒を作っていたいただいたのは、故藤田駿運輸技術研究所次長であり、指導していただいたのは安積健次郎電子航法研究所長であった。謹んで感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 小林, 奥村, 島村: 東京帝大航研報告, 3—40 (1928), 409
- 2) 川原田, 周東: 早稲田電気工学会雑誌, 21—1 (1940), 3
- 3) 安積, 岩柳, 吉永: 機械学会誌, 68—554(1965), 314
- 4) 川田, 三沢: 機械学会前刷集, 141 (1965), 63
- 5) J. Iwayanagi, S. Abuku: Proc. 10th Japan Congr. Test Mater., 1967, 47
- 6) J. Iwayanagi, S. Abuku: Proc. 11th Japan Congr. Mater. Res., 1968, 116
- 7) S. Abuku: Papers S. R. I., No 40 (1972)
- 8) 岩柳, 安福, 滝沢: 非破壊検査, 23—3 (1974)
- 9) 岩柳, 安福, 滝沢: 非破壊検査, 23—4 (1974)
- 10) 岩柳: 船舶技研報告, 12—2 (1975)
- 11) 吉永, 滝沢, 吉井, 熊谷, 山田: 機械学会論文集 365 (1977), 65
- 12) 津田: 金属学会誌, 11—9 (1947)
- 13) 津田: 金属学会誌, 15—10 (1951), 457
- 14) 永井: 東京学芸大報告, 第1輯 (1949), 37
- 15) 永井: 応用物理, 20—5 (1951), 177
- 16) 吉永, 吉井: 機械学会論文集, 369 (1977), 1547
- 17) 清田, 機械学会前刷集, 37 (1961), 83
- 18) 清田, 機械学会前刷集, 16 (1959), 17
- 19) 清田, 緒方: 機械学会前刷集, 141 (1965), 169
- 20) 安積, 岩柳, 堀: 運輸技研報告, 1—7~8 (1951), 7
- 21) 安積, 岩柳, 堀: 運輸技研報告, 1—2 (1951), 41
- 22) 安積, 岩柳, 堀, 藤井, 幸尾, 前田: 運輸技研報告, 4—11 (1954), 1
- 23) 幸尾: 航空宇宙技研報告, TR-64 (1964)
- 24) O. Dahle: ISA J., 6—8 (1959), 32
- 25) T. Kobayashi, K. Shimamura, T. Koyama: 東京帝大航研報告, 4—50 (1929), 425
- 26) 森: 機械学会誌, 37—206 (1934), 343
- 27) 吉田, 藤田: 鉄道業務研究資料, 12—12 (1955), 23
- 28) 青木, 田村: 機械学会誌, 57—426 (1954), 479
- 29) 安積: 磁わい計測とその応用, オーム社, 1962, 124
- 30) 堀, 安積: 機械学会誌, 58—435 (1955), 305
- 31) 木下, 岡田, 齊藤: 日立造船技報, 12—5(1951), 18
- 32) 木下, 岡田, 齊藤: 日立造船技報, 13—1(1952), 6
- 33) R. M. Huey: Rev. Sci. Instr., 30—7 (1959), 633
- 34) O. Dahle: ASEA J., 33 (1960), 3
- 35) 堀: 非破壊検査, 15—5 (1966), 186
- 36) 堀: 機械学会60周年記念東京講演会前刷, 第3室 (1957), 33
- 37) 堀: 機械学会東京秋季講演会前刷, 第3室 (1956), 81
- 38) 安積, 市原, 堀, 大津留: 運輸技研報告, 9—6 (1959), 1
- 39) H. Steinbrenner, E. Alpert, H. J. Florus: MTZ, 23—2 (1962), 39
- 40) 安積, 土屋: 運輸技研報告, 1—1 (1950), 1
- 41) 安積, 前田: 運輸技研報告, 2—5 (1952), 1
- 42) 岩柳: 運輸技研報告, 9—11 (1959), 1
- 43) 岩柳, 安福: 運輸技研報告, 11—5 (1961), 1
- 44) 岩柳, 安福: 応用物理, 34—7 (1965), 492
- 45) 村川: 強磁性材料, 産業図書, 1948, 19, 38
- 46) 岩柳: 船舶技研報告, 12—2 (1975), 10, 77, 9
- 47) R. M. Bozorth, H. J. Williams: Rev. Mod. Phys., 17—1 (1945), 72
- 48) 近角, 強磁性体の物理, 裳華房, 1966, 309, 108
- 49) 菊池, 磁歪振動と超音波, コロナ社, 1952, 201, 75
- 50) 疋田, 奥平, 河原, 本多, 君塚: 中央航研い報, 2—10 (1943), 323
- 51) 赤堀, 中田: 機械学会前刷集, No.110 (1964-4), 65
- 52) 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
- 53) 布施, 堀, 柴田: 内燃機関, 4—3 (1965), 9
- 54) 東野: 自動車技術会内燃機関計測法講習会教材, 1965—3, 1
- 55) 造船研究協会, SR106 デーゼルプラント分科会: 中間報告, 1966—11
- 56) 西山, 島本, 前川, 大谷: 船用機関学会第15回講演会前刷, 1973—5, 1
- 57) 堀, 辻: 船舶技研報告, 8—4 (1971), 179
- 58) 藤平: 自動車技術会内燃機関計測法講習会教材, 1965—3, 72
- 59) W. Zeuch: MTZ, 22—9 (1961), 344
- 60) E. W. Huber, W. Shaffitz: MTZ, 27-2 (1966), 36
- 61) G. Held: MTZ, 27-12 (1966), 482
- 62) 堀, 辻: 船用機関学会誌, 11—3 (1976), 225