

琉球大学学術リポジトリ

4 サイクル火花点火機関における運転条件による一酸化炭素濃の低減

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2013-05-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新里, 隆男, Shinzato, Takao メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/26234

4サイクル火花点火機関における 運転条件による一酸化炭素濃の低減

新 里 隆 男*

Exhaust Emission Abatement by Operating Condition Variations on 4-cycle Spark-Ignition Engine

Takao SHINZATO

Summary

EXHAUST PRODUCTS from motor vehicles particularly the hydrocarbons, oxides of nitrogen and carbon monoxides were major contributors to air pollution and the production of photochemical-smog.

In this paper, only the carbon monoxide was measured by non-dispersive infrared analyzers (NDIR), and to determine the effects of operating conditions for the carbon monoxide.

1. 諸 言

今日、自動車用内燃機関からの排気ガスによる大気汚染公害は大きな社会問題となっており、その防除対策が急がれている。

従来の自動車用機関というのは出力を少しでも高めようとすると同時に、燃料消費率をできるだけ下げること努力をはらってきた。これは自動車の機動性を向上するとともに、より経済性を高めることを意味する。

しかし、今や排気ガスを度外視しては機関の性能を論ずることができなくなったのは当然といえよう。

排気ガス中の有害成分としては、一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)、窒素酸化物(NO_x)等がある。COとHCを低減させるということは出力の向上または燃料消費率を下げるということにそのままつながり、熱力学的性能の向上と公害の低減とはうまく両立させることができるが、NO_xを減少させるには混合気をうすくし燃焼温度を下げるのがより効果的であるため、出力または燃費性能を下げて対策せざるを得なくなる。

上記三つの有害成分を測定し有機的に考察して、公害問題に対処すべきであるが、本実験においては、測

定器の都合上一酸化炭素のみについて着目し、C、F、R機関により点火時期、空燃比、圧縮比、吸気温度および混合気温度の五因子をそれぞれ変化させてCO濃度がどのように変化するかを調べた。

2. 記号および使用式

2.1 記 号

- B : 燃料消費量 (kg/hr)
- CA : クランク角度 (度)
- D : シリンダ内径 (m)
- Ig : 点火時期 (クランク角)
- n : 回転速度 (r. p. m)
- P : 圧力 (kg/cm²)
- Pmax : 最高圧力 (kg/cm²)
- Q : 吸入空気量 (m³/hr)
- Qg : 吸入空気量 (kg/hr)
- S : ピストン行程 (m)
- TDC : 上死点
 - ATDC : 上死点後
 - BTDC : 上死点前
- t : 燃料消費測定時間 (秒)
- Vc : すきま容積 (m³)
- Vs : 行程容積 (m³)

受付：1974年5月1日

*琉球大学理工学部機械工学科

v : 燃料消費測定量 (cc)

A/F : 空気-燃料比 (Kg/Kg)

$dp/d\theta$: 圧力上昇率 (Kg/cm/egd.)

γ_a : 空気比重量 (Kg/m³)

γ_f : 燃料比重量 (Kg/m³)

ϵ : 圧縮比

η_v : 体積効率

2.2 使用式

a) 圧縮比 ϵ

$$\epsilon = \frac{V_c + V_s}{V_c}$$

b) 燃料消費量 B

$$B = \frac{v \times \gamma_f}{t/3600 \times 1000} = \frac{25\gamma_f}{t/3600 \times 1000}$$

$$= \frac{90\gamma_f}{t}$$

c) 吸入空気量 Q_g

ラミネーターフローメータにより

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{\pi di^4}{128\mu l} (p_1 - p_2)$$

$$= K (p_1 - p_2)$$

従って

$$Q_g = \gamma_a Q$$

ここで、

d_i : 層流細管直径

l : 管長

μ : 粘性係数

$p_1 - p_2$: 管路両端の圧力差

n : 層流細管の数

K : 流量係数 $(= \sum_{i=1}^n \frac{\pi di^4}{128\mu l})$

d) 体積効率 η_v

$$\eta_v = \frac{Q_g}{60 \times i \times n \times V_s \times \gamma_a} \times 100$$

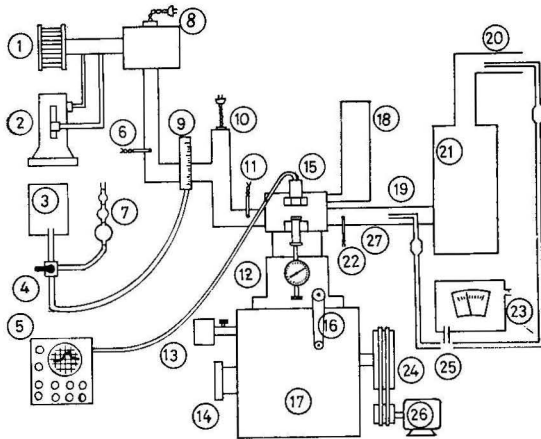
$$= \frac{Q_g}{16.4889 \times \gamma_a} \times 100$$

e) 空燃比

$$A/F = \frac{Q_g}{B}$$

3. 実験装置

Fig. 1 はその全体のスケッチ図である。以下主な装置の説明をする。



- | | | |
|----------------|---------------|--------------|
| ① 層流型流量計 | ⑩ 混合気加熱器 | ⑳ 排気採集点B |
| ② アスカニヤ型マンメーター | ⑪ 混合気温度測定用熱電対 | ㉑ 排気調圧タンク |
| ③ 燃料タンク | ⑫ マイクロメーター | ㉒ 排気温度測定用熱電対 |
| ④ 三方コック | ⑬ 点火断続器 | ㉓ 一酸化炭素濃度測定器 |
| ⑤ シンクロスコープ | ⑭ 点火時期指示盤 | ㉔ はずみ車 |
| ⑥ 吸気温度測定用熱電対 | ⑮ 圧力変換器 | ㉕ 採集排気入口 |
| ⑦ 測定ピュレット | ⑯ 圧縮比調整用ハンドル | ㉖ 電動機 |
| ⑧ 吸気加熱器 | ⑰ エンジン本体 | ㉗ 排気管 |
| ⑨ 油面計 | ⑱ 冷却液冷却器 | |
| | ㉚ 排気採集点A | |

Fig. 1 Experimental Apparatus.

3.1 供試機関

米国 WAUKESHA MOTOR 社製オクタン価測定用、可変圧縮比 C. F. R - 48 機関で次に示すと通りの諸元をもつ

ミリンダ数	1
内径×行程	8.25cm×11.43cm
行程容積	611.8cm ³
回転速度	900±9r. p. m
圧縮比	可変 (4~10)
冷却方法	液冷
点火時期	可変 (-40°CA~+40°CA)
吸気温度	可変 (最高125°F)
混合気温度	可変 (最高300°F)
潤滑油温度	可変 (最高135°F)
ク 圧力	30psi

3.2 一酸化炭素濃度計

堀場製作所製、非分散赤外線分析計 (NDIR) MEXA-200を使用した。
測定範囲は 0~12%である。

3.3 圧力変換器

共和電業の動ひずみ式 PE-100KJ を共試機関の

ミリンダヘッドに取りつけて、ミリンダ内の圧力をピックアップした。

3.4 圧力波形オシログラフ

岩通社のシンクロスコープ (デュアルビーム 4 現象 DC~15MHz) により p-t 線図をえがかせて写真撮影した。

3.5 その他の測定器

流入空気量は、ラミナフローメータで測定し、燃料流量は 25cc ビューレットでその量だけ消費する時間 (秒) を計測して求めた。クランク角度 (CA) のタイムマークは、上死点その前後 30° の時期を p-t 線図と同時に記録するようにした。

吸気温度および混合気温度の調節はニクロム線ヒータにより行ない、温度の検出は熱電対 (アルメルクロメル) で、ミルボルトメータに指示させた。

また排気ガスのサンプリング点は、消音器に入る前の点 (A) と排気管の最終端 (B) の二点とした。

4. 実験結果および考察

4.1 点火時期の影きよう

Fig. 2 は点火時期を上死点前 30° CA から上死点后 30° CA まで変えた時に CO 濃度および排気温度が

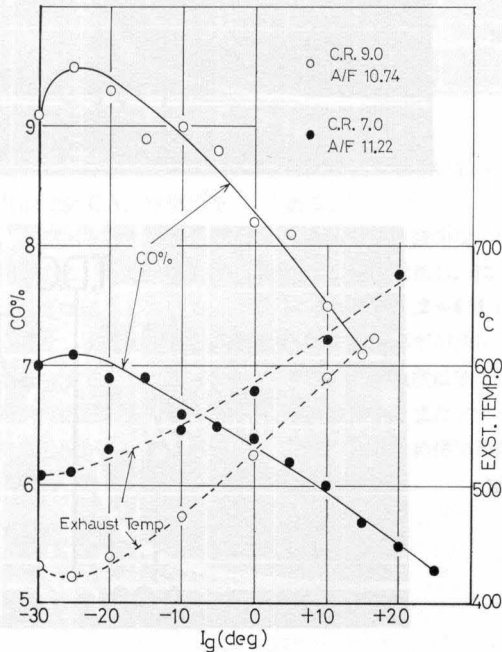


Fig. 2 CO concentration versus ignition timing.

どのように変化するか、その関係を示した図である。一般に排出ガス中のCO濃度は点火時期にほとんど影きょうされない^{1), 2)}ということになっているが、本実験においては点火時期の影きょうを敏かんにするために混合気濃くしたのと、機関回転速度を一定にして実験したためにCO濃度に多少の変化がみられる(最大変化2%)。すなわち、炭化水素が分解して酸素と反応する際に、まず一次反応でCOとH₂が生成されるが酸素が不足しているので二次反応はしなまま排気管中へ排出されることになる。

圧縮比7および9のいずれの場合でも点火時期が上死点前25度でCO濃度が最大値を示しているのは、燃料は一応反応しているが点火時期が早すぎるために混合気の温度、圧力が低く二次反応が得られないまま排出されるからである。そのことは排気温度が低いことから推察される。上死点前25度よりも早くなるとCO

濃度が減少しているのは、未燃混合気のまま排出されるからである。

また逆に点火時期をおくらしていくとCO濃度が減少しているのは、二次反応量が増加したためと、一次反応量が減少したための二つの原因が考えられるが、上死点付近までは前者の影きょうであるが上死点を過ぎてからは後者の影きょうが大きいからである。

き圧縮比の影きょうについては次の節でも述べるが、同一点火時期で圧縮比を増すとCO濃度が増加しているのは一次反応量の差と思われる。特に圧縮比を上げてノックが起きるとシリンダ内のガス温度が急上昇し、いわゆる熱解離という現象³⁾でCO濃度が増加しているのである。点火時期を早くすると圧縮比の影きょうは大きく、おくらすと小さくなる傾向を示す。この場合のノック現象が起きたか否かはPhoto. 4.1~4.4の写真ではっきりする。

Photo. 4.1

CR. 7.0

A/F. 11.22

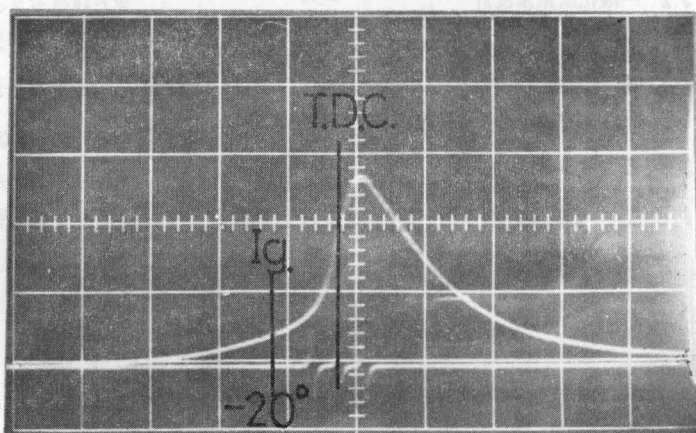
Pmax. 45.28kg/cm²dp/dθ. 4.79kg/cm²/deg.

Photo. 4.2

CR. 9.0

A/F. 11.24

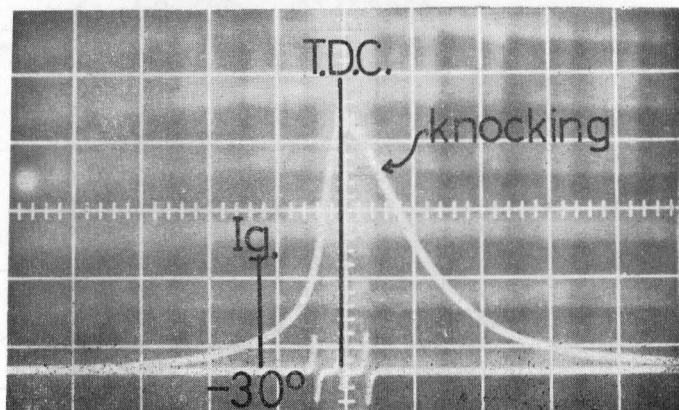
Pmax. 63.42kg/cm²dp/dθ. 6.69kg/cm²/deg.

Photo. 4.3

CR. 9.0

A/F. 11.24

Pmax. 62.90kg/cm²

dp/dθ. 5.90kg/cm²/deg.

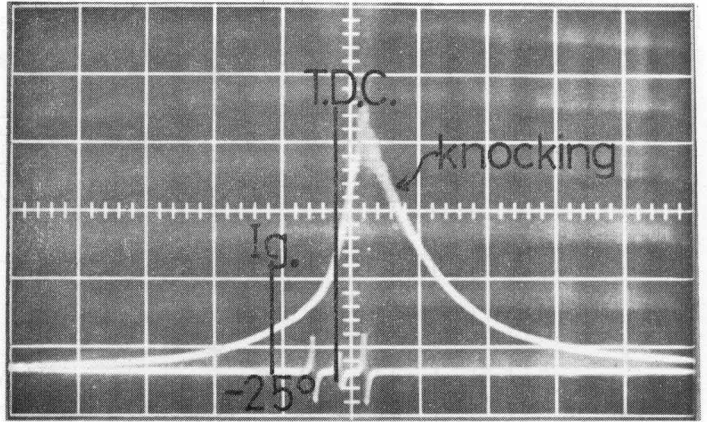


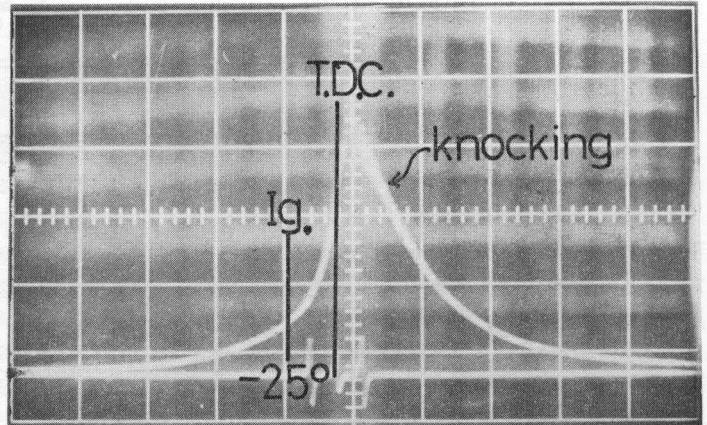
Photo. 4.4

CR. 9.0

A/F. 11.24

Pmax. 64.93kg/cm²

dp/dθ. 4.51kg/cm²/deg.



4.2 圧縮比による影きよう

Fig. 3 は点火時期を上死点前 25° CA, 空燃比を 12.27 (やゝ濃い) に設定し, 圧縮比を変えた場合の CO 濃度と排気温度を示した図である。圧縮比を上げていくと CO 濃度は増加し排気温度は減少している。圧縮比を上げるということは, ミリンダ内の圧力と温度は上昇し逆に残留ガスの量は減少する。したがって混合気の燃焼速度が増加し, 一次反応量が多くなり, CO 濃度が増す。低圧縮比で排気温度が高いのは燃焼

時間が長くなりいわゆる後燃えの現象が起きるからである。

もっとも特徴的なのは圧縮比 9 から 10 にかけて CO 濃度が急に増加し, 排気温度は急に低くなっているのは Photo. 4.2~4.4 のオシログラフにもみられるように圧力上昇率が急に上がるためノックが起きミリンダ内のガン温度は急上昇するため熱解離が起きて CO 濃度は増す。またノックが起きるとシリンダ壁への伝熱量が増すため排気温度は急に低下するのである。

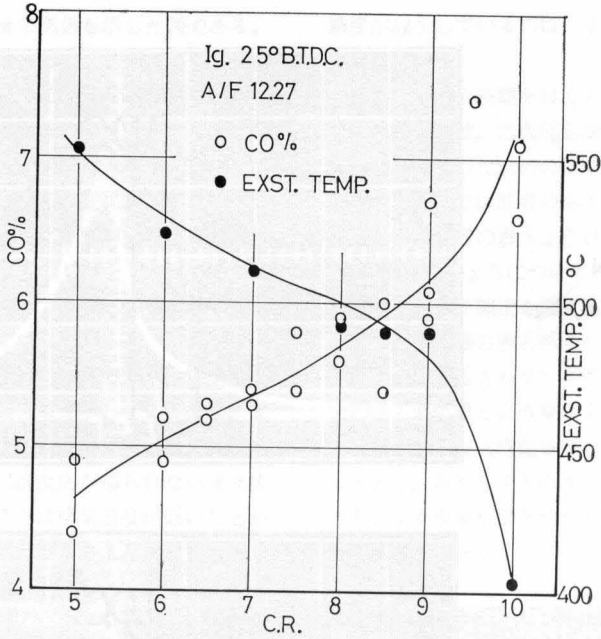


Fig. 3 CO concentration versus compression ratio.

4.3 空燃比による影きよう

本実験においては空燃比は燃料タンクの液面を上、下させることにより変化させた。Fig. 4 は圧縮比を 7.28, 点火時期を上死点前 22° CA と、圧縮比 6.15, 点火時期を上死点前 25° CA の二つの場合について調

べた結果である。いずれの場合でも理論混合比よりうすいと CO 濃度はほとんど零の値を示し、濃くしていくと直線的に増加していることがわかる。空燃比 1 に対して CO 濃度が約 27° 変化しているのは他の研究者の実験⁴⁾とも一致している。

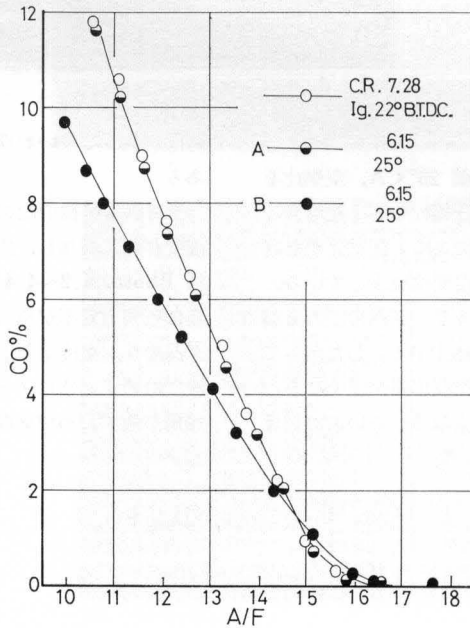


Fig. 4 CO concentration versus air fuel ratio.

4.4 吸気温度および混合気温度による影きよう

Fig. 5 は圧縮比 6.15, 点火時期上死点前 25°CA, 空燃比 12.1 という条件で, 吸入空気温度を変えてその影きようを見た図である。

吸気温度が高くなると CO 濃度はやゝ直線的に増加

する。吸気温度が高くなると空気の粘性が増すために体積効率が低下して酸素不足による CO 濃度の増加と, 燃料の気化がよくなり一次反応量が増えたことによる増加という二つの原因が考えられる。

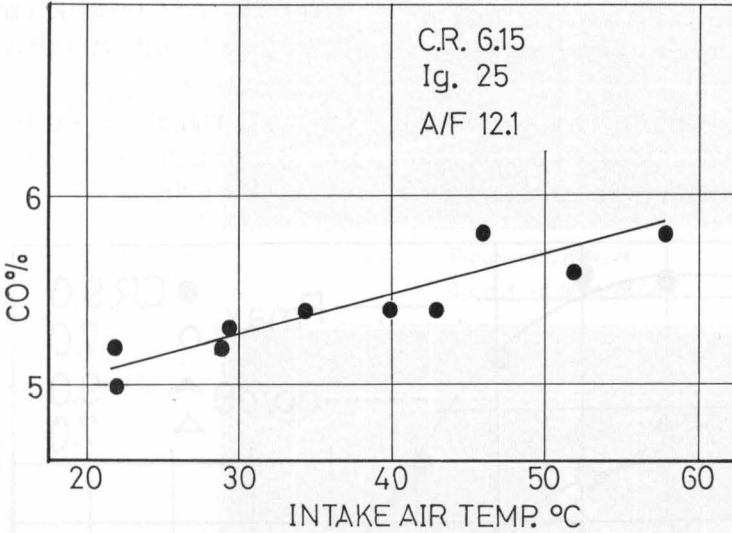


Fig. 5 CO concentration versus intake air temperature

Fig. 6 は運転条件は吸気温度の場合と同じで, 混合気温度の影きようを示したものである。吸気温度の場合と同様に CO 濃度は濃くなる傾向を示している。しかしその傾向はゆるやかで, 混合気温度が高くなると (80°C以上) CO 濃度にあまり変化がみられない。

この場合, 空燃比に, 12.1および12.3とやゝ濃いので吸気および混合気温度の変化によってある程度までは CO 濃度に変化がみられるが, 限界があるのは当然といえよう。

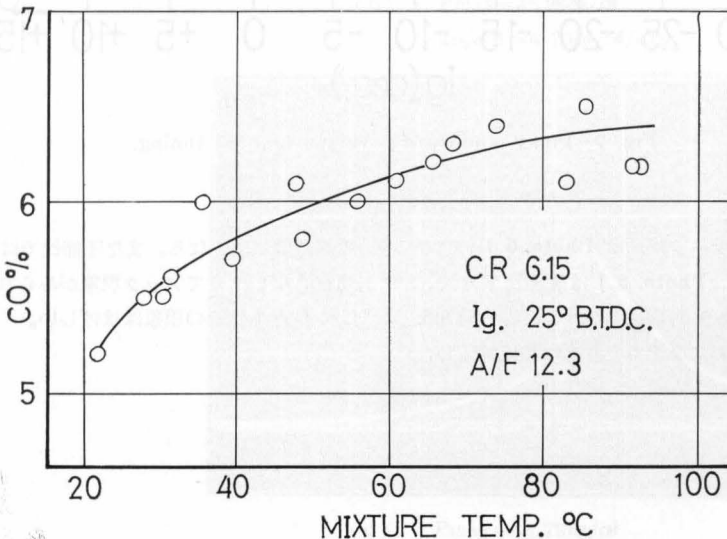


Fig. 6 CO concentration versus mixture temperature.

5. インジケータ線図

インジケータ線図から得られる知識はいろいろあるが、本実験では着火おくれ期間、圧力上昇率、燃焼最高圧力、ノックの発生、後燃えの期間等であり、それらをチェックすることによってCO濃度との関係を考察してみた。他の排気ガス中の組成、特にNO_xやHCも測定できたら、更にすゝんだ解析が得られたと思う。

本実験でのインジケータの写真はある一つのサイクルを撮ったもので、本来ならば数百サイクルのインジケータ線図を撮り統計処理を行なわなければ確実なデ

ータは得られない。

5.1 点火時期変化によるインジケータ線図

Fig. 7 は、点火時期と最高圧力および圧力上昇率との関係を表わしたものである。

最高圧力は、早い点火時期付近(30° BTDC)では一定を示しほとんど変化しないがそれよりおくらすと急に下降する傾向を示す。

このことは Fig. 2 で示したCO濃度とも深い関係がある。すなわち最高圧力が下がるとCO濃度もうすくなるという結果を得た。

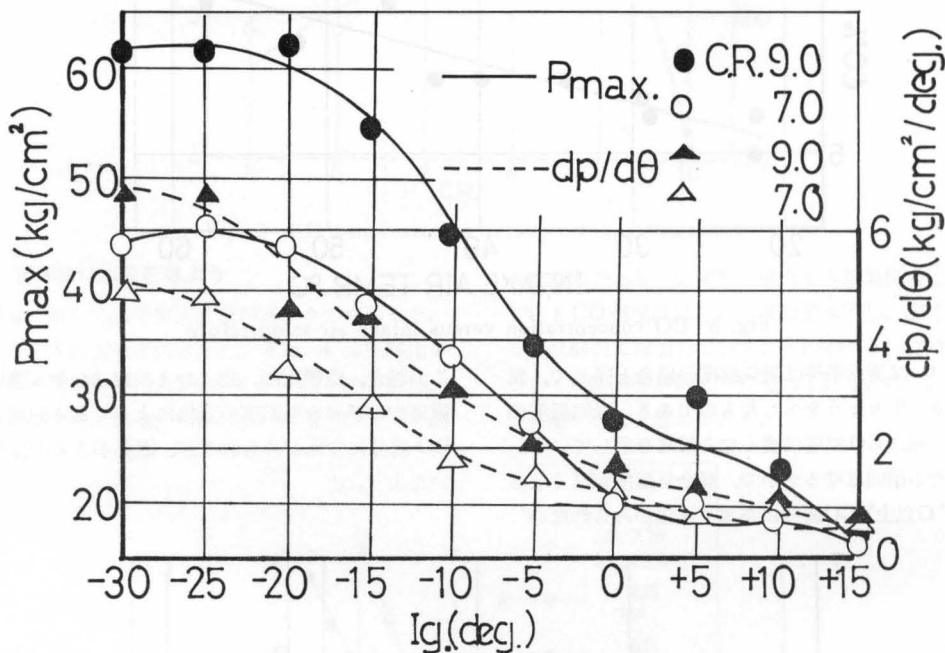
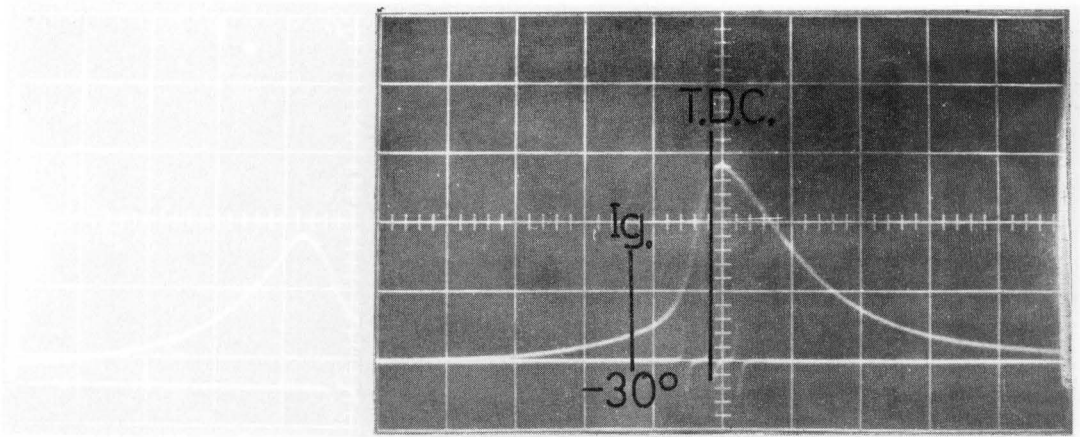


Fig. 7 Pmax. and $dp/d\theta$ versus ignition timing.

この場合のインジケータ線図は Photo. 5.1 および Photo. 5.2 に示す。Photo. 5.1 は圧縮比 7.0 で、Photo. 5.2 は圧縮比 9.0 の場合である。点火時期をおくらすと最高圧力および圧力上昇率は共に減少し、

後燃え量が多くなる。また圧縮比では、点火時期が上死点前 0°CA までノック現象がみられる。とくに 20°CA 付近ではその現象はげしい。



(a) $P_{max} = 43.79 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 4.92 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

Photo. 5.1

Indicator diagram in variable
 ignition timing.

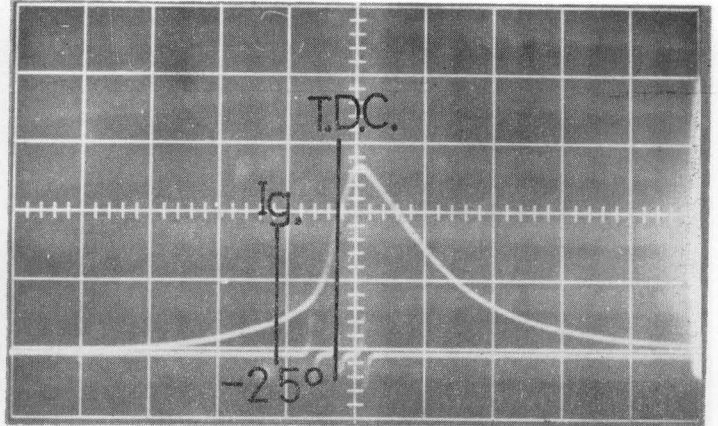
CR. 7.0

A/F. 11. 22

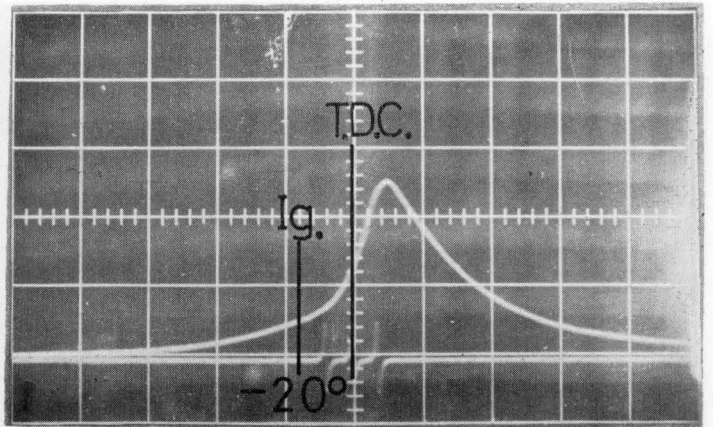
Scale:

Vertical $15.1 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$

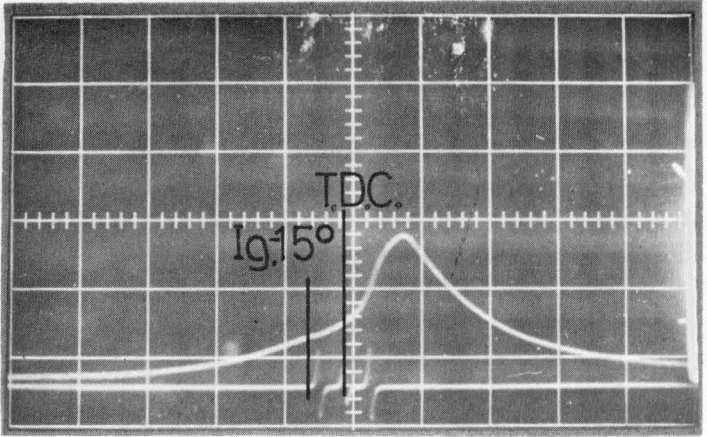
Horizontal. $24.4^\circ \text{CA}/\text{cm}$



(b) $P_{max} = 45.28 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 4.79 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

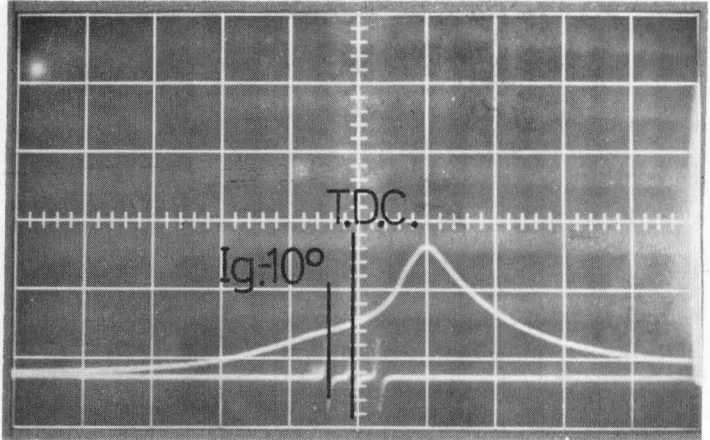


(c) $P_{max} = 43.79 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 3.38 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

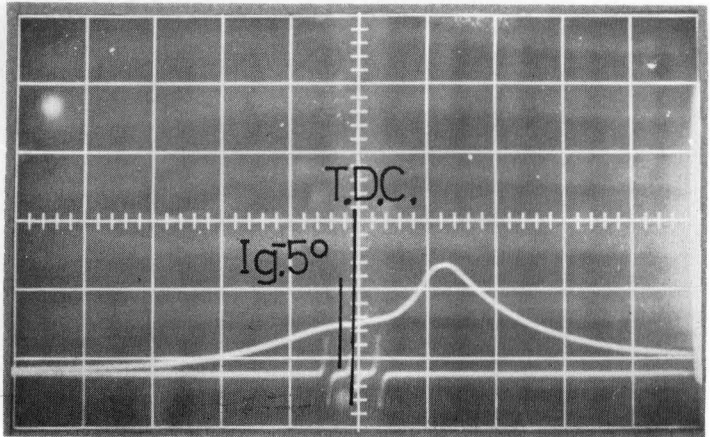


(d) $P_{max} = 37.75 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 2.75 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

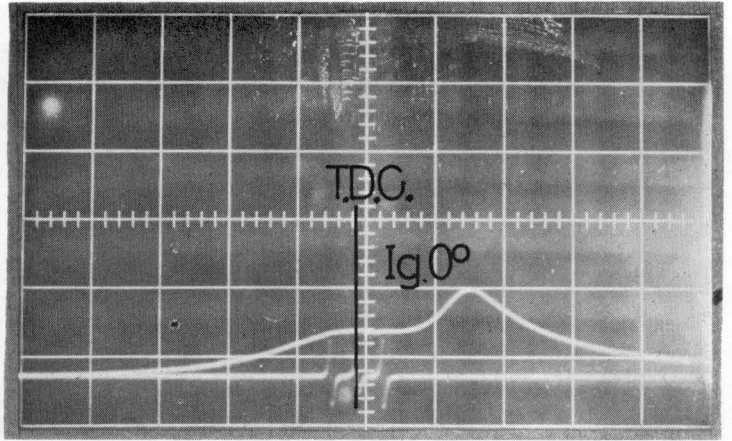
Photo. 5.1



(e) $P_{max} = 33.22 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 1.77 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

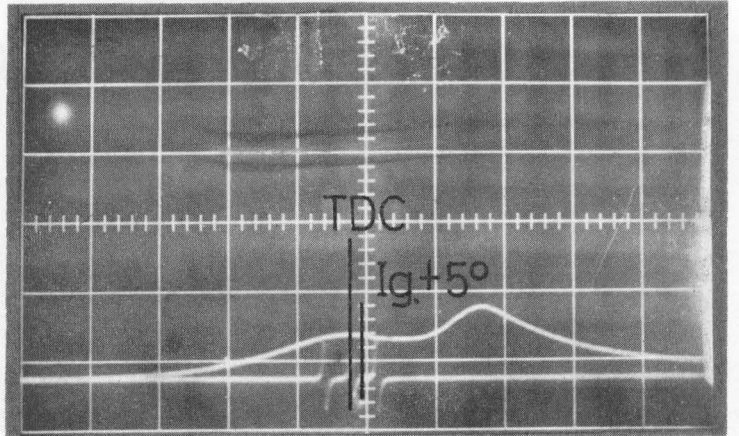


(f) $P_{max} = 27.18 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 1.47$

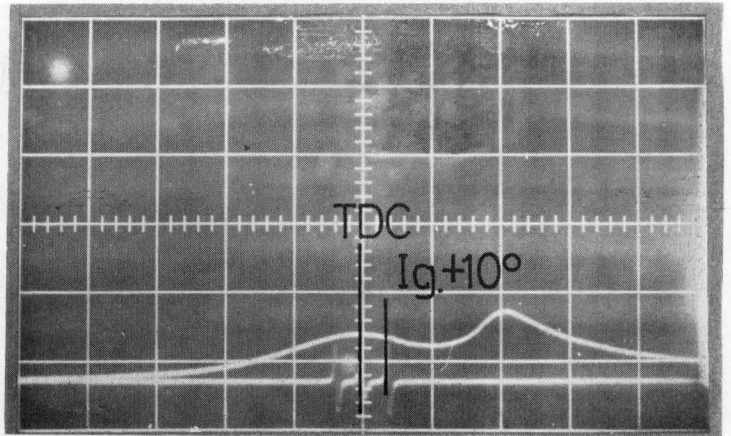


(g) $P_{max}=19.63\text{kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 1.02\text{kg/cm}^2/\text{deg.}$

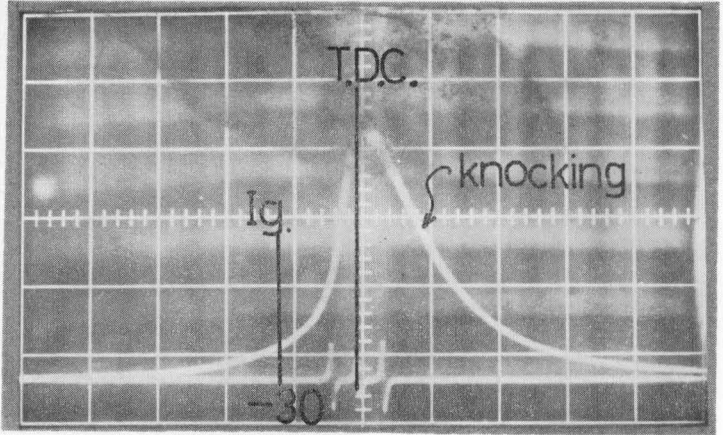
Photo. 5.1



(h) $P_{max}=18.50\text{kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 0.75\text{kg/cm}^2/\text{deg.}$



(i) $P_{max}=18.12\text{kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 1.0\text{kg/cm}^2/\text{deg.}$



(a) $P_{\max} = 63.42 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 6.69 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

Photo. 5.2

Indicator diagram in variable
 ignition timing,

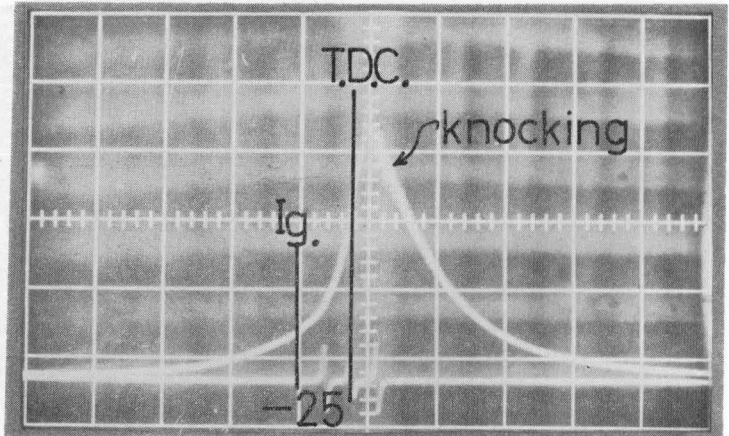
CR. 9.0

A/F. 11.24

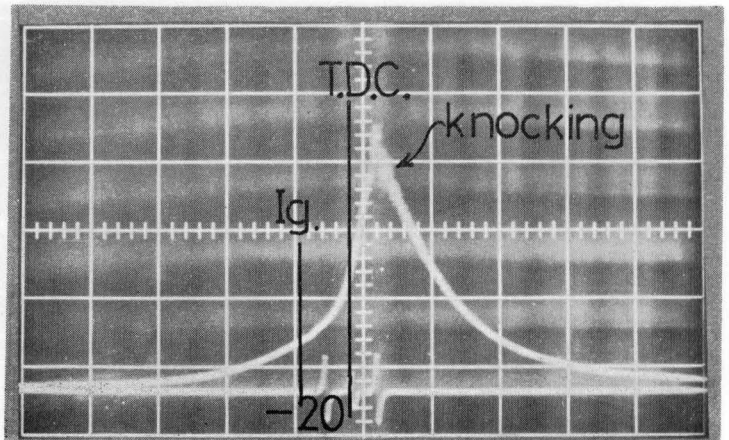
Scale:

Vertical $15.1 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$

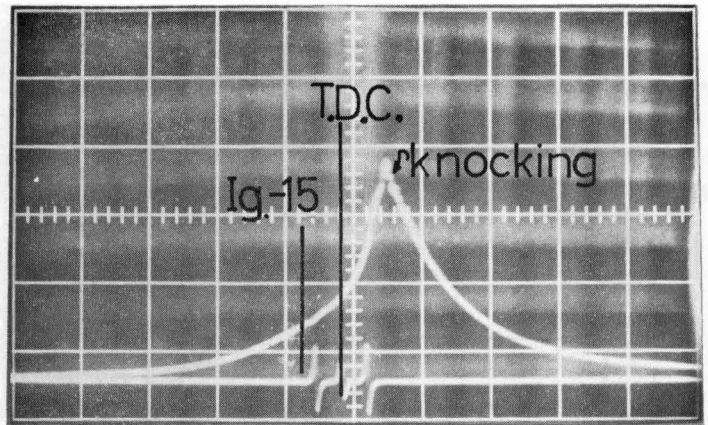
Horizontal 24.4°CA/cm



(b) $P_{\max} = 63.42 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 6.69 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

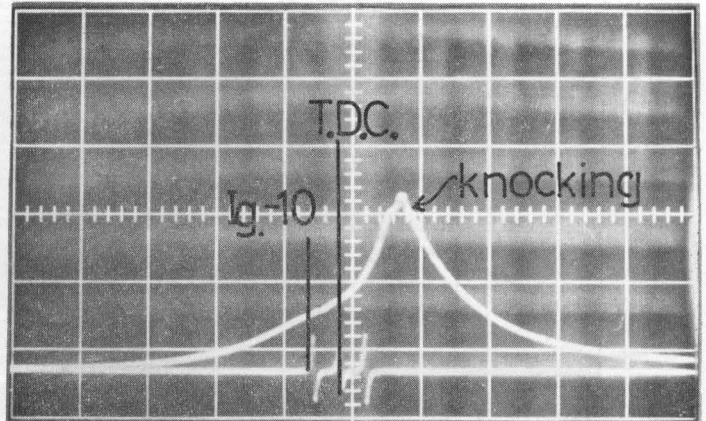


(c) $P_{\max} = 60.90 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 4.51 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

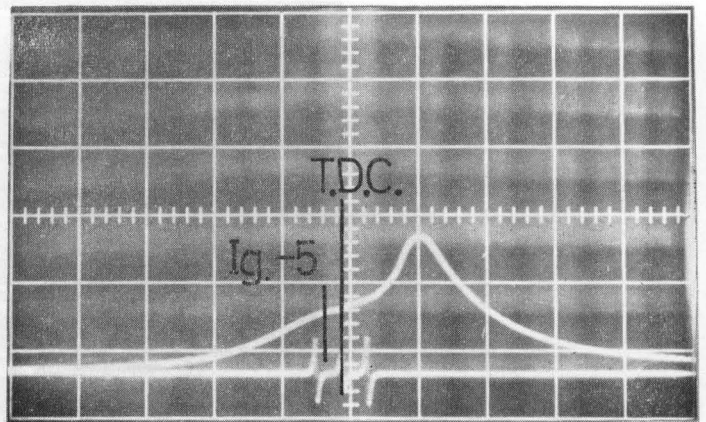


(d) $P_{max} = 54.36 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 4.51 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

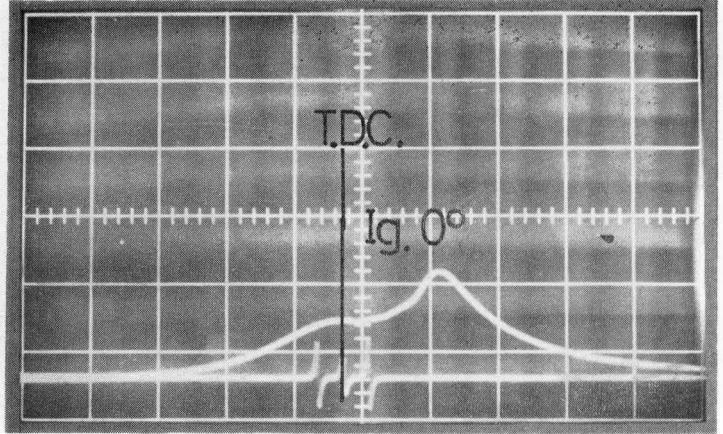
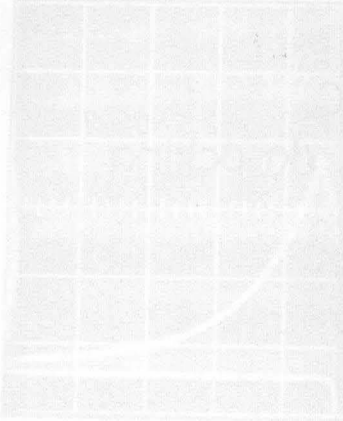
Photo. 5.2



(e) $P_{max} = 44.88 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 3.08 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

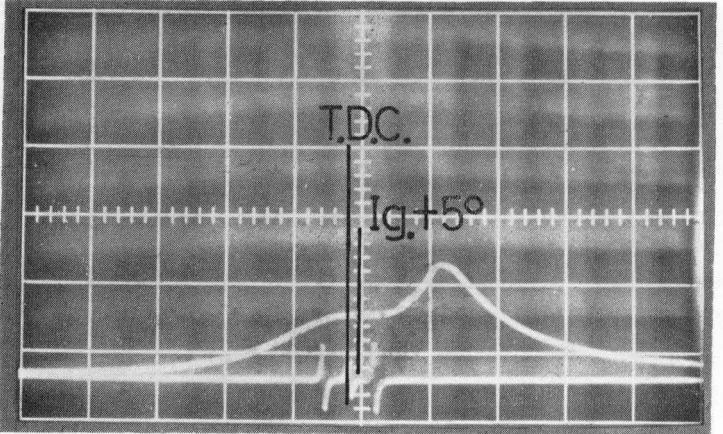
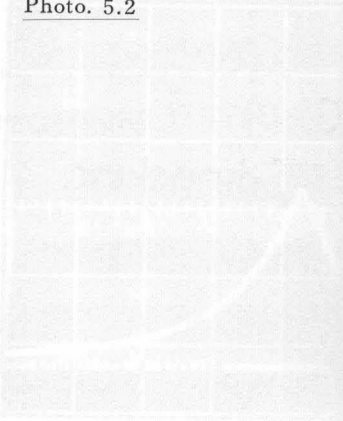


(f) $P_{max} = 34.05 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 2.14 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

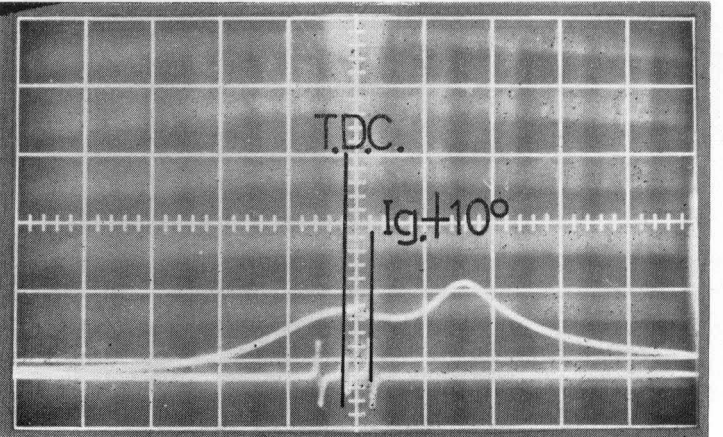
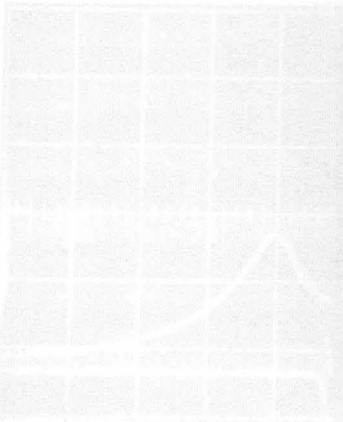


(g) $P_{max} = 27.09 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 1.63 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

Photo. 5.2



(h) $P_{max} = 29.41 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 1.19 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$



(i) $P_{max} = 23.22 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 0.85 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

5.2 空燃比変化によるインジケータ線図

Fig. 8 は空燃比の変化によって最高圧力と圧力上昇率がどのように変わるかを表わしたものである。

最高圧力は空燃比が13.5付近で最大値を示し、それより濃くなってもうすくなってもゆるやかに減少している。

圧力上昇率は空燃比が13付近とやや濃空燃比で最大値を示している。CO濃度との関係 (Fig. 4 と比較) は、空燃比を濃くすると最高圧力が下がりCO濃度が增加することを示しているこの場合のインジケータ線図の写真は Photo. 5.3 である。

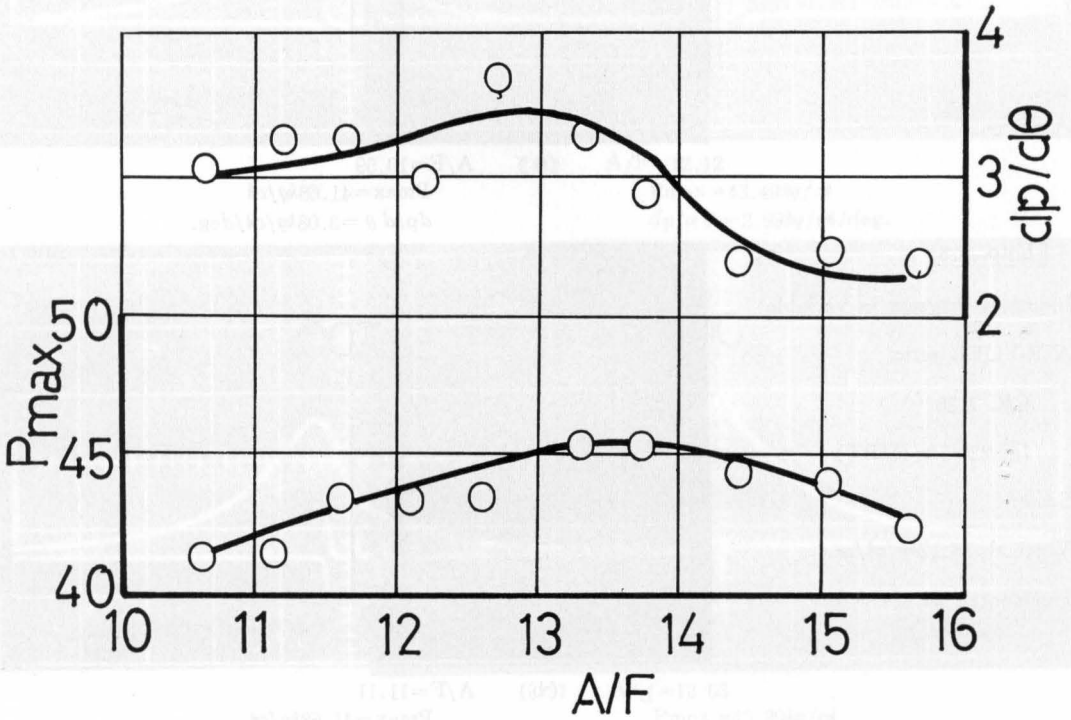
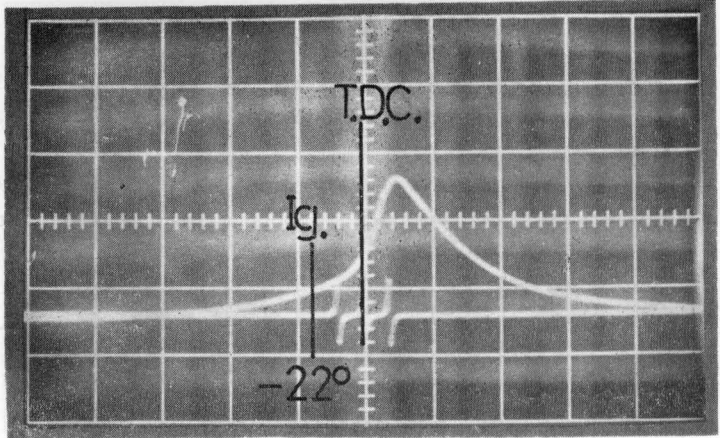


Fig. 8 Pmax and $dp/d\theta$ versus air-fuel ratio.



(a) $A/F=10.59$
 $P_{max}=41.68 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 3.08 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

Photo. 5.3

Indicator-diagram in variable
 AIR-FUEL ratio.

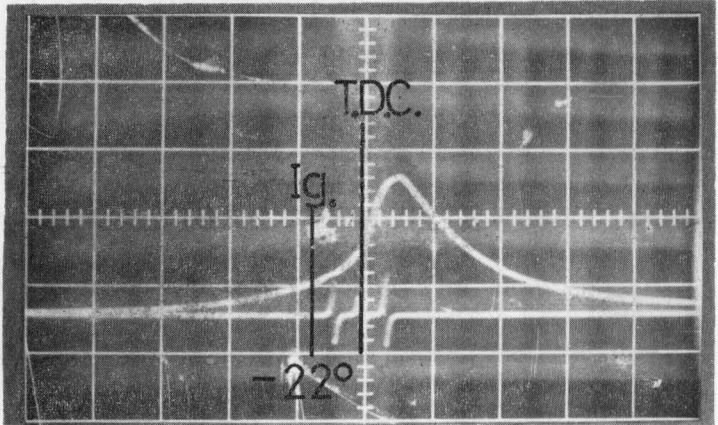
CR. 7.28

Ig. $22^\circ \text{ CA (MBT)}$

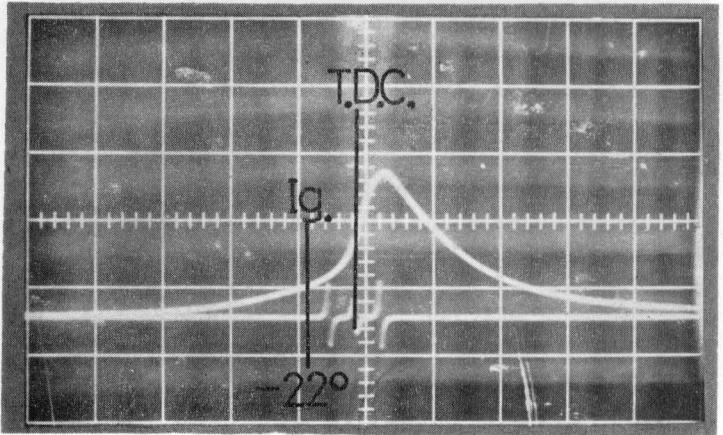
Scale:

Vertical. $18.12 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$

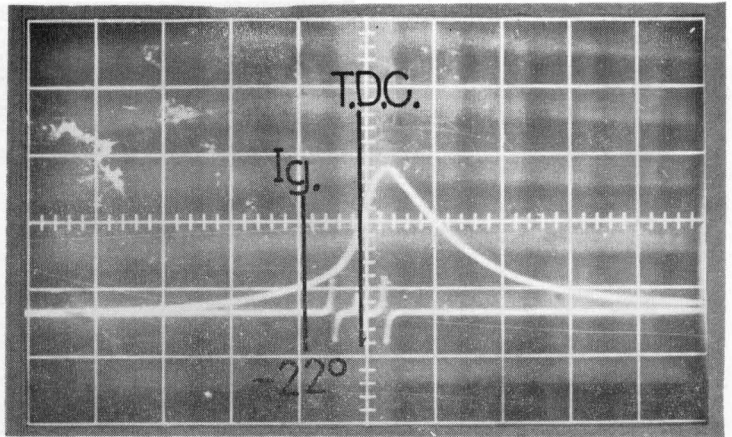
Horizontal. 24.4° CA/cm



(b) $A/F=11.11$
 $P_{max}=41.68 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 3.27 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

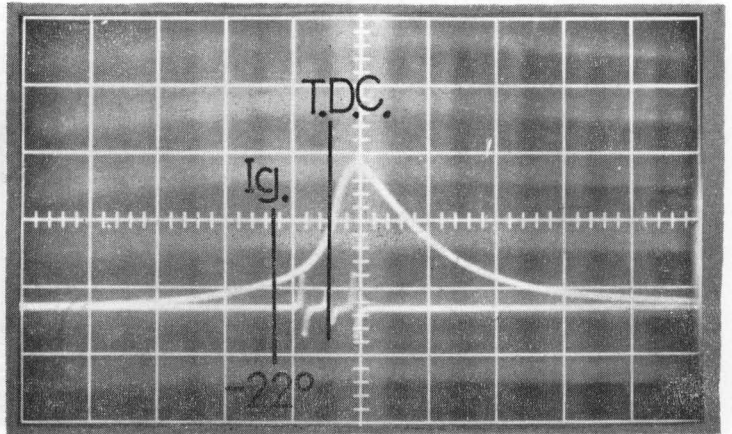


(c) $A/F=11.01$
 $P_{max}=43.49 \text{ kg/cm}^2$
 $dp/d\theta = 3.27 \text{ kg/cm}^2/\text{deg.}$

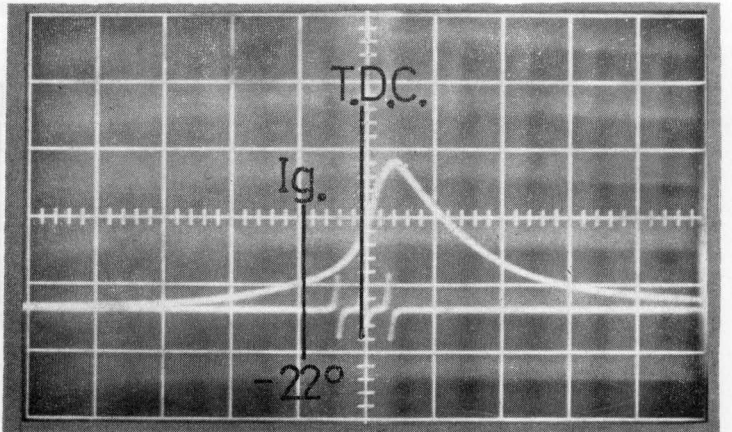


(d) $A/F=12.12$
 $P_{max}=43.49\text{kg/cm}^2$
 $dp/d\theta=2.99\text{kg/cm}^2/\text{deg.}$

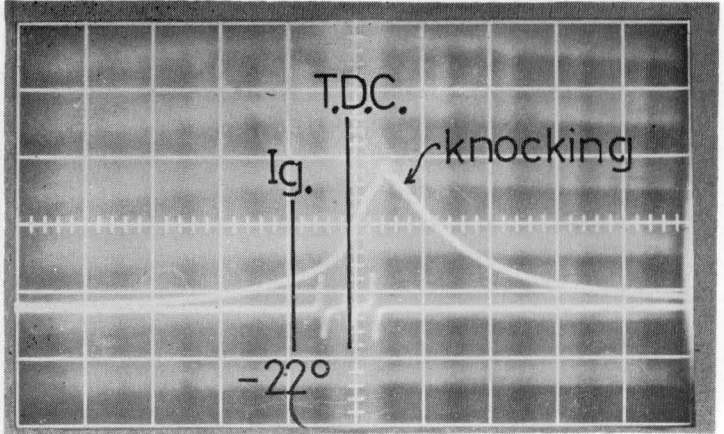
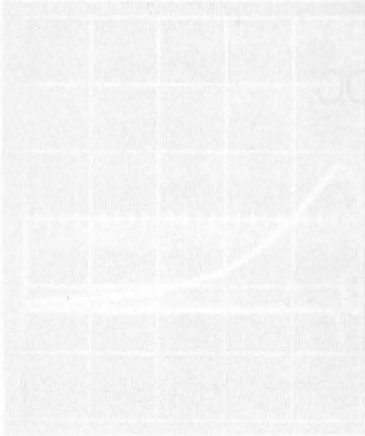
Photo. 5.3



(e) $A/F=12.63$
 $P_{max}=43.39\text{kg/cm}^2$
 $dp/d\theta=3.73\text{kg/m}^2/\text{deg.}$

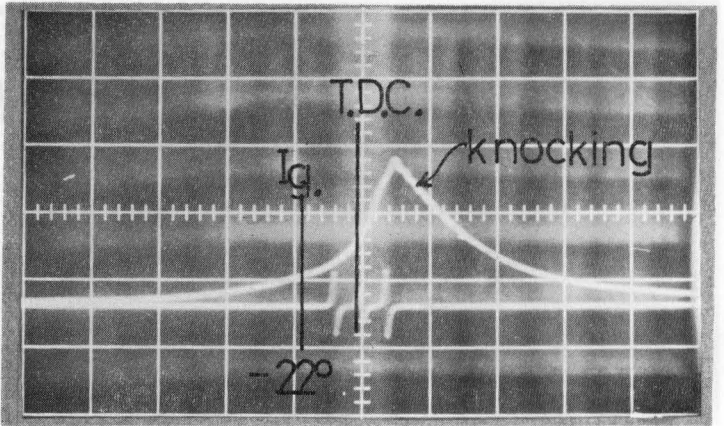


(f) $A/F=13.28$
 $P_{max}=45.31\text{kg/m}^2$
 $dp/d\theta=3.27\text{kg/m}^2/\text{deg.}$

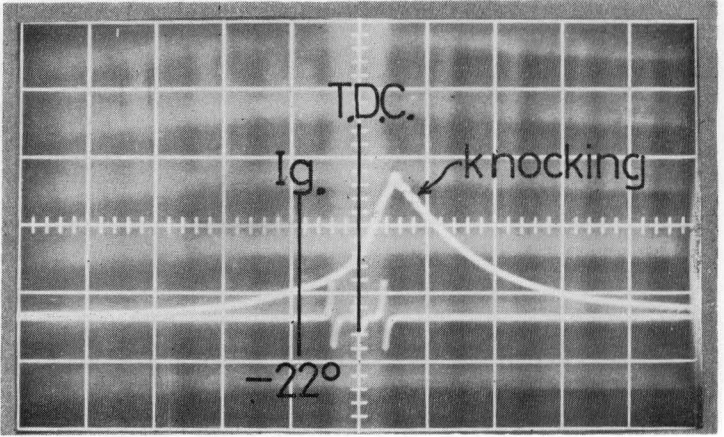
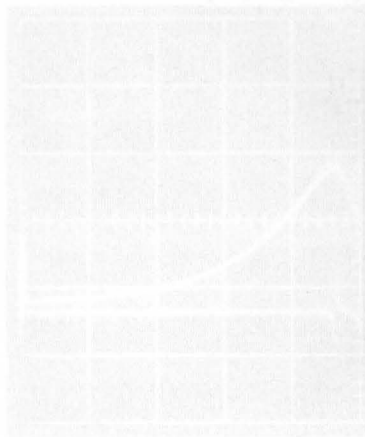


(g) $A/F=13.14$
 $P_{max}=45.31\text{kg}/\text{m}^2$
 $dp/d\theta = 2.90\text{kg}/\text{m}^2/\text{deg}.$

Photo. 5.3



(h) $A/F=14.43$
 $P_{max}=44.38\text{kg}/\text{m}^2$
 $dp/d\theta = 2.41\text{kg}/\text{m}^2/\text{deg}.$



(i) $A/F=15.05$
 $P_{max}=44.38\text{kg}/\text{m}^2$
 $dp/d\theta = 2.48\text{kg}/\text{m}^2/\text{deg}.$

6. 結 言

火花点火機関において定速運転で点火時期, 圧縮比, 空燃比, 吸入空気温度および混合気温度によってCO濃度がどのように変化するかをまとめてみると次のようになる。

- 1) 回転速度が変動する場合には, 点火時期によって, CO濃度は変化しないことが知られているが, 機関が定速運転の場合と濃混合気の状態では変化がみられる。本実験で, 点火時期 20°CA に対して約1%変化する。
- 2) 濃混合気の場合, 圧縮比を上げていくとCO濃度は増加する。とくにノック現象が起こるような圧縮比では急にCO濃度は増す。圧縮比が3に対して1%変化する。

- 3) 空燃比が理論値をすぎて濃くなると直線的にCO濃度は増す。
- 4) 吸気温度および混合気温度を高くするとCO濃度はやゝ増す。

最後に本実験に協力してくれた。昭和48年度卒業生, 宮里和芳君, 玉元優昭君の両君に謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) 平井好美他3名, 自動車技術, **25**, 62 (1971)
- 2) 小早川隆他1名, 内燃機関, **19**, 105 (1972—12)
- 3) 長尾不二夫, 内燃機関講義(上), 養賢堂(昭和42. 1)
- 4) 小早川隆他1名, 内燃機関, **19**, 105 (1972—12)

Abstract is provided for the vertical forces created by standing waves on submerged spherical objects. The experimental results of the study on the vertical wave forces due to the standing waves are herein presented. Some theoretical and experimental studies for the wave forces on the objects have been published and explained. It can be assumed that the Component of the wave force along the axis and across the axis is the hydrostatic resistance which is proportional to the square of the fluid velocity, and the other is proportional to the velocity of the fluid. In this paper, especially, using the data results obtained from the experiments, the theoretical results of the study for the hydrostatic resistance are discussed.

この研究は、水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力について、実験的および理論的研究を行ったものである。水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力については、従来から多くの研究が行われてきたが、その多くは、物体の形状や波の長さに依存する力に注目している。一方、物体の形状や波の長さに依存しない力についても、興味をもち、本研究では、水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力について、実験的および理論的研究を行った。実験の結果、物体の形状や波の長さに依存する力と、物体の形状や波の長さに依存しない力とが存在することが明らかになった。理論的研究では、水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力について、理論的に検討した。その結果、物体の形状や波の長さに依存する力と、物体の形状や波の長さに依存しない力とが存在することが明らかになった。

この研究結果について、Hansen 博士に integral の研究については、お礼申し上げます。また、実験の場では、お礼申し上げます。また、実験の場では、お礼申し上げます。また、実験の場では、お礼申し上げます。

昭和48年4月30日
琉球大学理工学部工学系

この研究は、水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力について、実験的および理論的研究を行ったものである。水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力については、従来から多くの研究が行われてきたが、その多くは、物体の形状や波の長さに依存する力に注目している。一方、物体の形状や波の長さに依存しない力についても、興味をもち、本研究では、水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力について、実験的および理論的研究を行った。実験の結果、物体の形状や波の長さに依存する力と、物体の形状や波の長さに依存しない力とが存在することが明らかになった。理論的研究では、水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力について、理論的に検討した。その結果、物体の形状や波の長さに依存する力と、物体の形状や波の長さに依存しない力とが存在することが明らかになった。

- 1) 理論的研究
 - (1-1) 波動方程式
 - (1-1-1) 基本式
- 図で-1式をまずに水中に浮遊する球形物体に作用する定常波の垂直力について、理論的に検討した。その結果、物体の形状や波の長さに依存する力と、物体の形状や波の長さに依存しない力とが存在することが明らかになった。