室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

内燃機関の燃焼と排出ガスの改善に関する研究(第1報)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-07-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 林, 重信, 澤, 則弘 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3504

内燃機関の燃焼と排出ガスの改善に関する研究 (第1報)

林　重信・沢　則弘*

A Study on the Improvement of Combustion and Exhaust Gas in the Internal Combustion Engine (1st Report)

Shigenobu Hayashi and Norihiro Sawa

Abstract

To examine in detail the fundamental characteristic and construction of the combustion-flame propagation, the mechanism of the growth of carbon, the authors have experimentally taken the photograph of flame propagation and measured Hydrocarbon gas, Co gas, changing the various factors with constant volume combustion chamber and crankcase compressed two stroke cycle engine.

This paper presents the results obtained from the experiments as mentioned above.

I. 緒　　言

自動車用内燃機関の排出ガスが大気汚染に主要な役割を占めることが知られ，その浄化対策の一環として，燃焼やサイクル変動の改善，有害ガス生成機構の解明などに関する研究が活発化し，数多くの報告[1)]が見受けられるようになった。しかし，内燃機関のシリンダ内における現象はきわめて複雑であり，燃焼過程はもちろんのこと混合気の動き，混合気の生成過程，燃焼の性質や有害ガスの生成などに関しても未知の問題が多いようである。そこで，かかる燃焼問題の基礎的研究の一環として密閉容器内の静止したプロパン—空気混合気の燃焼を取り上げ，その基本的現象である燃焼速度，圧力線図および排出炭化水素量などに及ぼす諸因子の影響について若干検討したので報告する。

II. 燃焼状態の観察

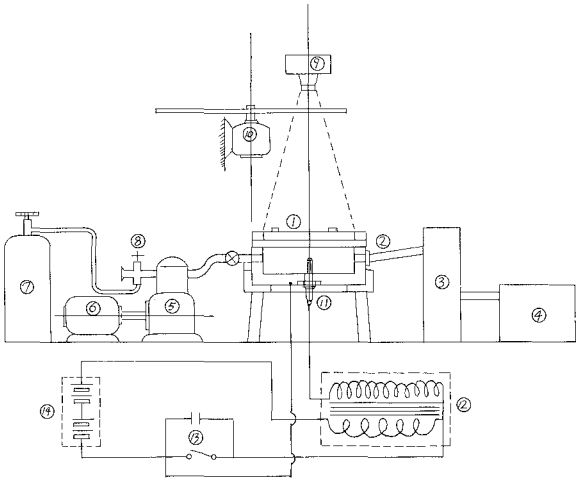
II-1 概説および実験方法

透明アクリル板を用いた鋳鉄製燃焼容器 No. 1, No. 2, および No. 3 (表-1 参照) にプロパン—空気混合気を封入し，市販の自動車用点火プラグの火花放電により混合気を燃焼させ，燃

* 茨城大学工学部教授

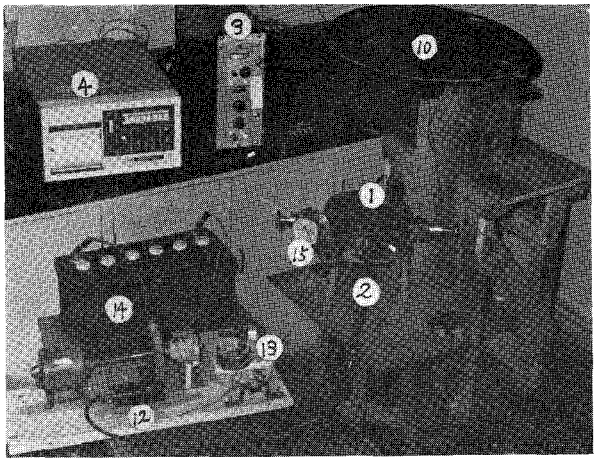
表—1　供試燃焼容器

番号	内径 (D) (cm)	高さ (L) (cm)	表面積 (S) (cm^2)	容積 (V) (cm^3)	S/V
1	25×10(矩) A	3	710	750	0.947
2	15×10(矩) B	3	450	450	1.0
3	16	2.5	527.5	502.4	1.05
4	8.1	8.1	309.0	417.2	0.741
5	8.1	4.0	204.7	206.01	0.994
6	5.3	18.8	356.9	414.55	0.861
7	5.3	14.0	277.1	308.71	0.898
8	5.3	8.47	185.0	186.8	0.99
9	5.3	5.3	132.3	116.87	1.132
10	3.52	24.6	490.3	414.3	1.183
11	2.78	69.5	618.6	421.6	1.468

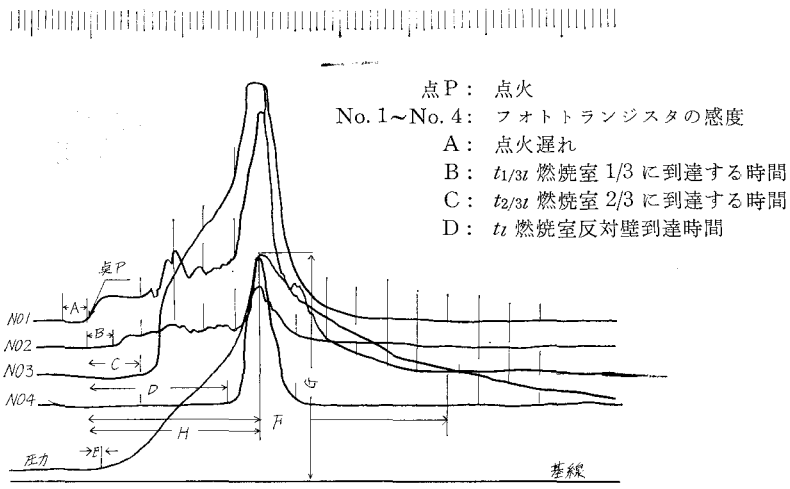


図—1(a)　実験装置系統図

① 密閉容器
② 圧力ピックアップ
③ 抵抗線動的歪測定器
④ オシログラフ
⑤ 圧縮機
⑥ モーター
⑦ LPG ボンベ
⑧ 混合器
⑨ カメラ
⑩ 回転円板とモーター
⑪ 点火プラグ
⑫ 点火コイル
⑬ 点火スイッチ
⑭ 蓄電池 (12 V)
⑮ ブルドン管圧力計



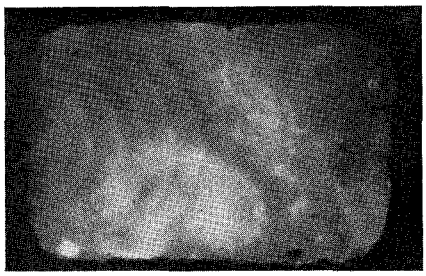
図—1(b)　実験装置写真



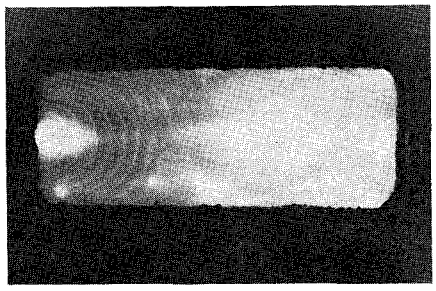
図—2　光　電　管　法

焼火炎面の変化状態を光電管法および写真撮影法（図-1 参照）で測定するとともに歪型示圧計で燃焼圧力の変動状態を記録し，主として燃焼速度，燃焼状態，燃焼圧力および火炎面の伝播状態などについて検討した。光電管法とは燃焼容器のアクリル板上に黒紙を貼り，点火プラグ先端の真上から火炎伝播方向に 4 個（等間隔）のスリットをあけて光電管をスリット上に設置し，火炎面光輝による光電起電力を点火マークや燃焼圧力とともにオシログラム上に同時記録した（図-2 参照）。また，写真撮影法は実験装置全体を暗室にセットし，燃焼容器 ① の上に写真機の焦点をあわせてシャッターを開放し，燃焼容器と写真機との間に設けたスリット円板を廻してシャッターとし ⑩，火炎伝播の状態（図-3 参照）を撮影した。（①，⑩ は 図-1 参照）。

とくに燃焼容器 No. 3 については容器内に金



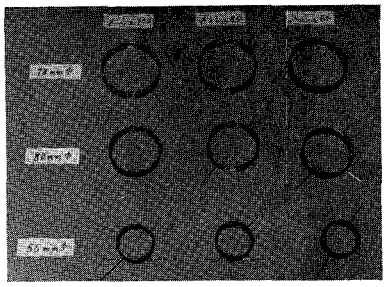
（a）



（b）

A/F 17
封入圧　1.0 kg/cm²
残　圧　1.15 kg/cm²

図—3　写　真　撮　影　法



図—4　金　網

表—2　金網の諸元

金網直径 ($d$cm)	5.6	8.0	9.8
γ_b/γ	0.35	0.5	0.61
重量比 (80メッシュ)	1.0	1.64	1.71
総面積比 (80メッシュ)	1.0	1.43	1.75

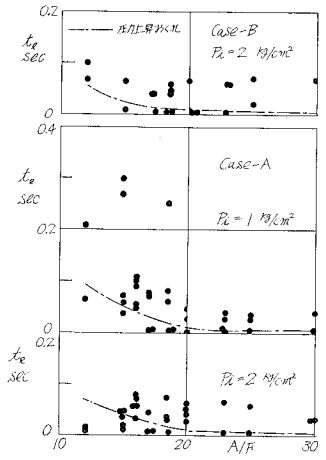
表—3　使用燃料組成

燃料成分	燃焼容器 No. 1 No. 2 用	No. 3 用
プロパン	72.7	72.7
イソブタン	13.4	13.0
プロピレン	4.2	0
正ブタン	2.6	11.3
ブチレン	3.4	1
理論空燃比	21.84	24.81

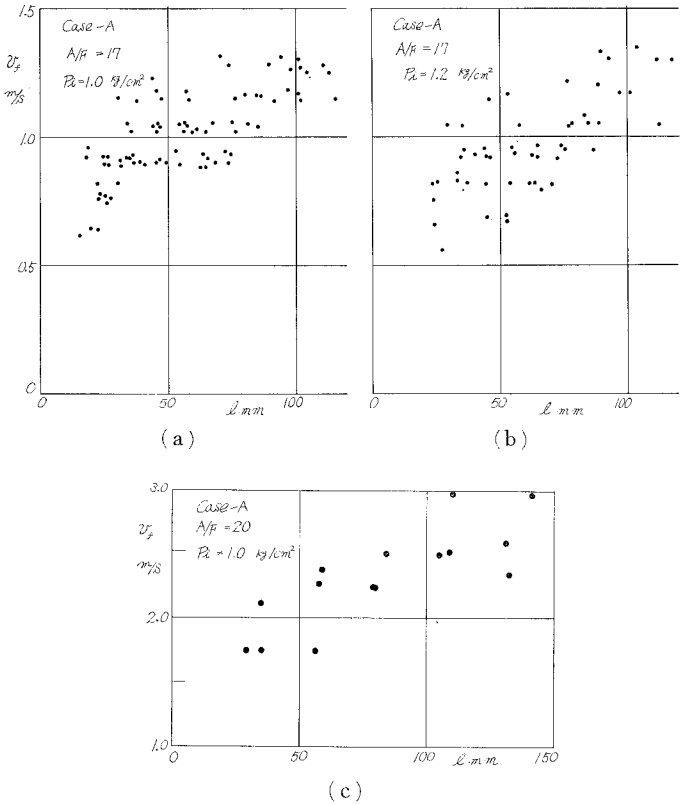
網（メッシュ：60, 80, 100；直径：56, 80, 98 mmϕ 計9個，図-4および表-2参照）を挿入し，火炎面が金網を通過するときに発生する火炎面の乱れが火炎伝播速度や圧力線図に及ぼす影響についても調べた。使用燃料は市販のL.P.G.で，その成分組成は表-3のとおりである。

II-2　実験結果および考察

内燃機関のサイクル変動の一因として点火遅れ時間 (t_i) の変動が考えられる。この関係を明確にする目的で，点火おくれ時間（ここでは，オシログラムでの火花放電マークと点火プラグ取り付け壁面上の光電管による起電力の発生時期との時間間隔）と空燃比 (A/F) との関係を求めると図-5となる。図によると点火遅れ時間 (t_i) は点火プラグ温度が低いため，かなり大きい値を示しているが，空燃比 (A/F) の影響をいちじるしく受け，過濃側から理論空燃比 (A/F=21.84または24.81) に近づくほど短縮する傾向をもっている。そのうえ，その値は一定容器内における燃焼にもかかわらず

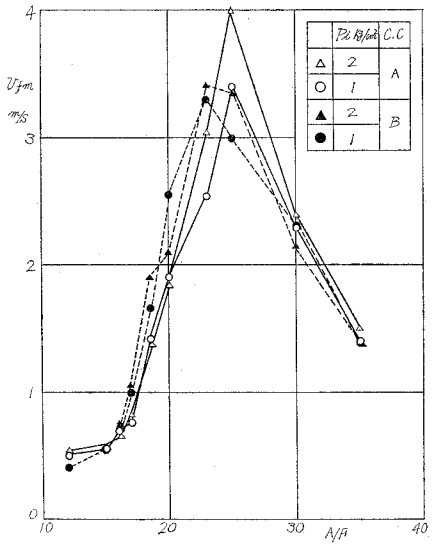


図—5　点火おくれと A/F



図—6　火炎伝播速度

いずれの場合もいちじるしく変動している。同図には燃焼圧力線図から，点火マークと圧力上昇開始までの時間間隔を求めてその平均値を一点鎖線で併記しているが，両者の間にはかなりよい近似が認められる。また，かかる点火遅れ期間に引き続いておこる火炎伝播期間中の火炎伝播速度は点火遅れの影響をほとんど受けないものと考えられてきたが，本実験では容器内での静止混合気の燃焼にもかかわらず，火炎面の乱れのため火炎伝播速度はいちじるしく変動し（図-6参照），未燃混合気の温度上昇を伴うので火炎伝播速度も順次増加することがわかる。なお，火炎伝播速度の変動は最近になって金[2]が指摘している。かかる平均値と空燃比（A/F）との関係は従来よく知られているように理論空燃比（$A/F=21.84, 24.81$）付近で最大となり（図-7参照），希薄になっても過濃になっても急速に低下する。



図—7　平均火炎伝播速度と A/F

このように空燃比（A/F）を変えた場合の燃焼状態は，カラー写真撮影によって次のことが観察された。

i) $A/F=12$ の場合；全体的に暗く，濃い橙色の小さな渦や濃淡にむらのある火炎であり，赤熱した遊離炭素が飛び交うのが見られ，煙の量が多く，消炎後壁面には多量の煤が付着する。

ii) $A/F=13$ の場合；全体的に薄い橙色に暗い紫色を呈し，濃淡にむらがあり灰色の煙が残る。煤の付着がある。

iii) $A/F=14.5$ の場合；黄橙色火炎にやや青味をおびた光が中心部に見られる。かすかにパッーという燃焼音が聞かれる。

iv) $A/F=16.5$ の場合；青白色火炎に黄味をおび，残光が強い。パッーという強い音を発し，煙はほとんど認められない。

v) $A/F=19.4$ の場合；強烈な青白色の閃光とパッーという鋭い音を発し，煙はほとんど見られない。

vi) $A/F=24.4$ の場合；濃淡は少々まだらであるが，橙色に白っぽい黄色の火炎で中心部に弱い残光が見られる。燃焼音はほとんど聞こえないが，燃焼直後に白っぽい煙が認められる。

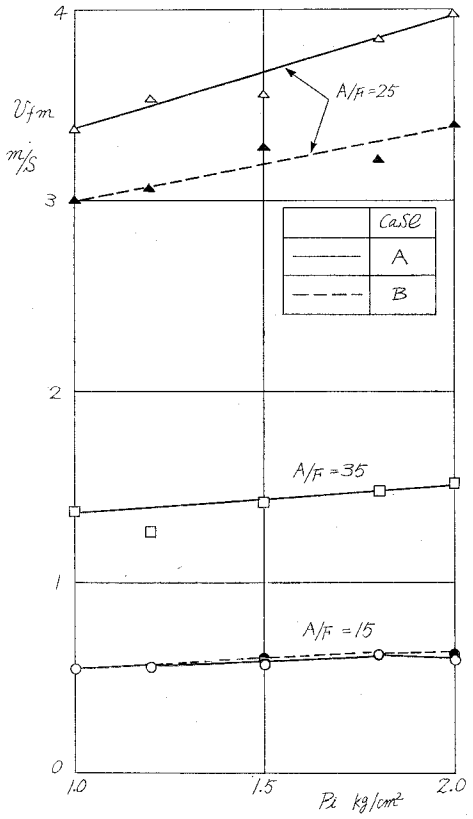
一般に火炎の色は不完全燃焼や遊離炭素の赤熱の影響を受けるので，空燃比（A/F）が，過濃→理論混合比→希薄になると，橙色→青白色→黄橙色と変わり，煙の色は白→透明→白→灰

色となる。また残光および燃焼音は理論混合比付近でもっとも強くなる。音の発生機構は明らかでないが，$dP/dt \geq 800\ \mathrm{kg/cm^2\,sec}$ の場合に聞こえた。

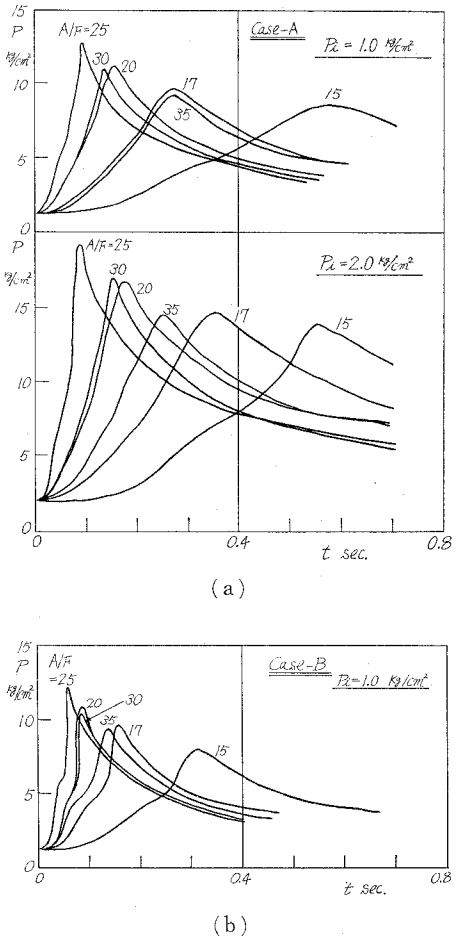
次に，燃焼容器の寸度および封入圧力 (P_i) の影響は図-8 に示すように，理論混合比付近においては認められ，更に容器寸度および封入圧力 (P_i) に比例して火炎伝播速度は増加する。また燃焼圧力線図は空燃比によって大幅に変化し（図-9 参照），理論空燃比に近づくほど最高圧力 (P_m) は高く，最高燃焼圧力に達するまでの時間 (t_m) は短くなる。したがって，P_m/t_m 曲線（図-10 参照）は火炎伝播速度 (v_{fm}) 曲線（図-7 参照）と近似する。同様に，封入圧力 (P_i) および燃焼容器の影響（図-11 参照）も図-8 と同一傾向を示している。（但し燃焼容器が異なると火炎伝播距離が違うので $A/F=25$ の場合，Case-A と Case-B の値の大小は逆になっている。

かかる圧力線図を詳細にみると，長尾氏[3] がガソリン噴射燃焼の圧力線図を分類したように 5 期間に区分されているもの，またその区分が明確でないものなどが見受けられる。

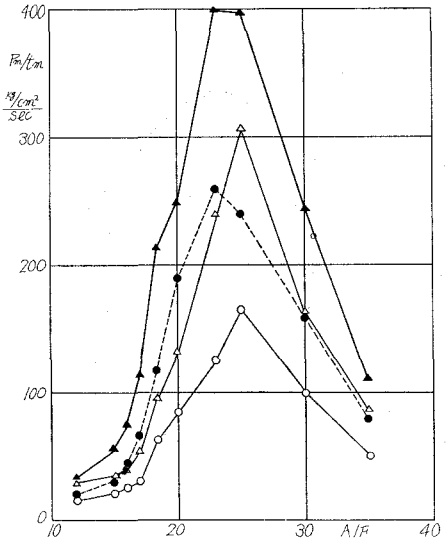
いま光電管方式による実験結果（たとえば図-2 参照）から圧力上昇遅れ，燃焼容器における点火プラグ位置からの距離 1/3 l, 2/3 l および l 点に火



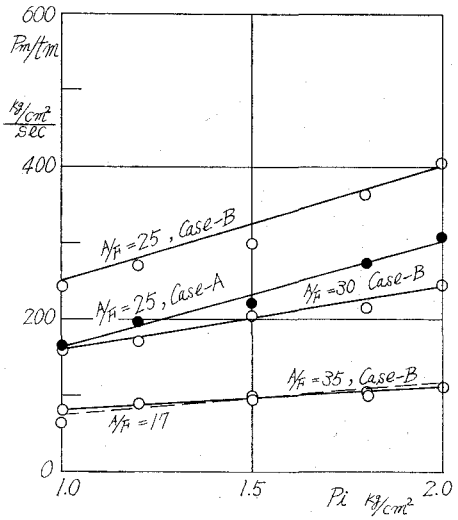
図—8　平均火炎伝播速度と P_i



図—9　圧力—時間線図

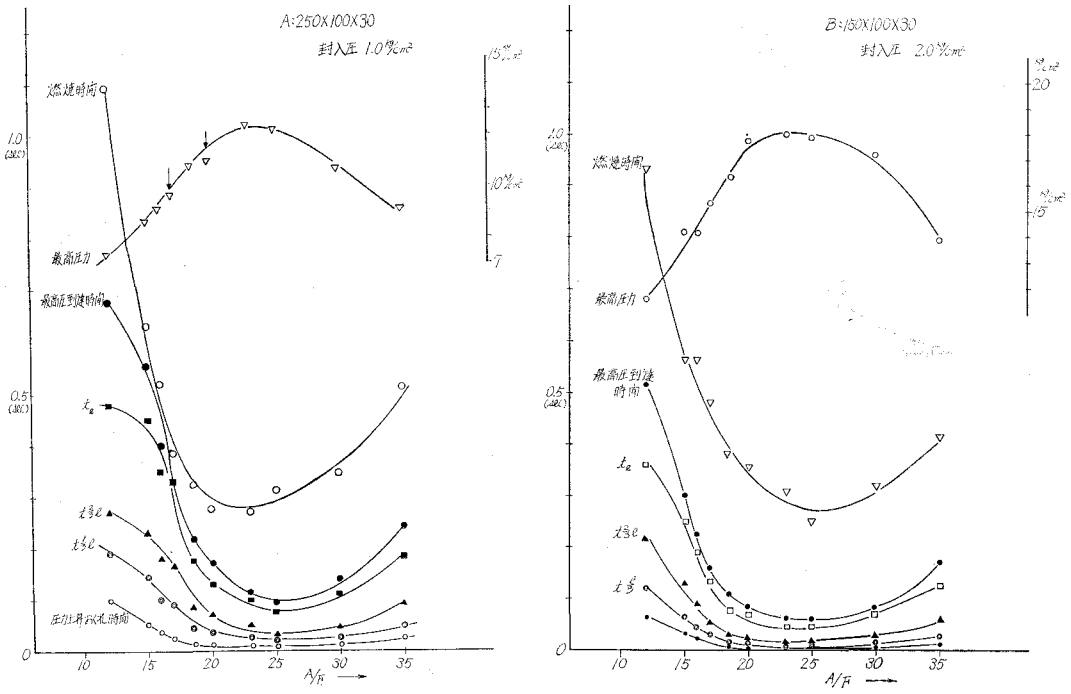


図—10　P_m/t_m と A/F



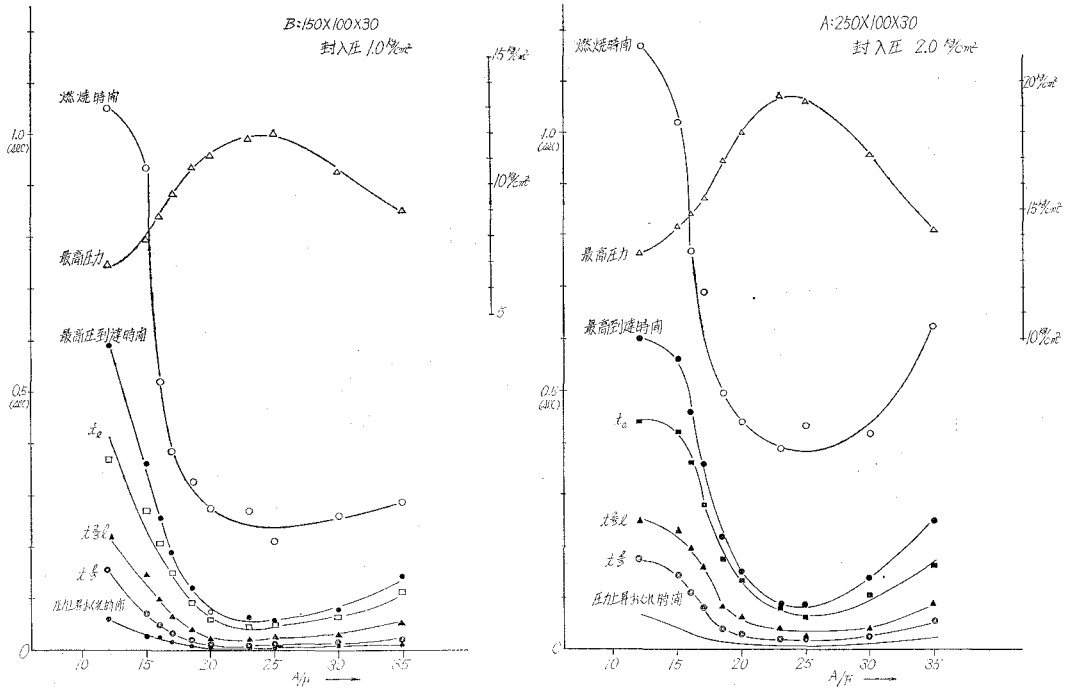
図—11　P_m/t_m と P_i

炎が到達するまでの時間，燃焼完了時間および燃焼最高圧力に達するまでの時間，最高圧力などを求め，空燃比（A/F）について纏めたのが図-12である。これらの図を比較すると，火炎伝



(a)　(b)

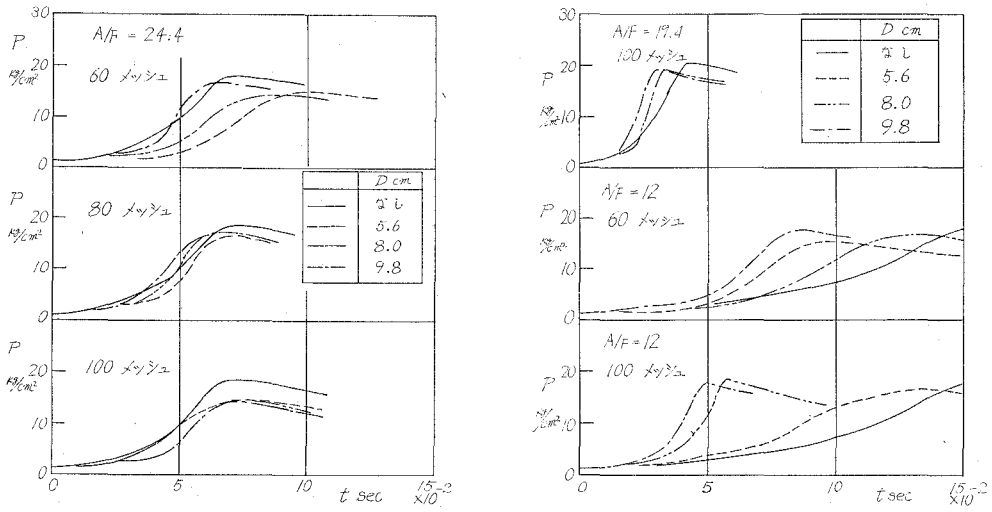
図—12　燃焼時間と A/F



(c)　　(d)

図—12　燃焼時間と A/F

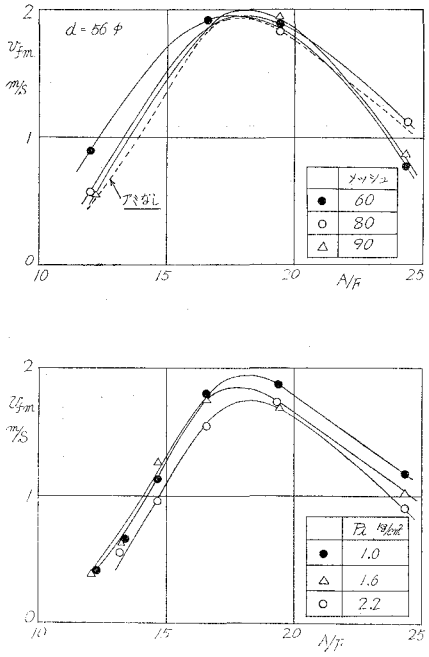
播速度は封入圧力 (P_i) によってあまり変わらないので，火炎が 1/3 l, 2/3 l および l 点に到達するまでの時間は $P_i = 1.0\ \mathrm{kg/cm^2}$ と $2.0\ \mathrm{kg/cm^2}$ の場合ではほとんど差異がない。しかし，両者の燃焼時間にはかなりの差が認められる (図-a と図-b の比較)。この両者の大小の関係は



(a)　　(b)

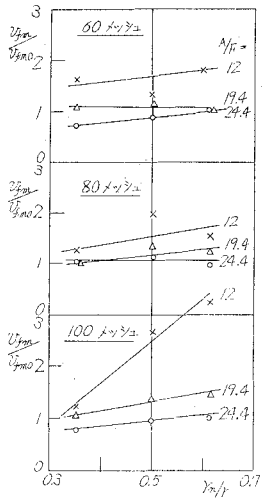
図—13　圧力—時間線図

Case-B の場合（図-c と図-d の比較）のように A/F の値によっても変わるようである。このことは，先に示した図-3 の火炎伝播写真の右半分の状態からも容易に推察されるように，燃焼期間の後半における燃焼状態が封入圧力および燃焼容器の寸度によって異なるためと考えられる。すなわち，火炎の進行につれて火炎面に乱れが生ずるが，その乱れの発生状態は上記の因子（封入圧力，燃焼容器寸度および形状）に支配され，更に後半の燃焼状態を左右するものと思われる。かかる乱れの火炎伝播状態に及ぼす影響を詳細に調べる目的で燃焼容器 No. 3 に各種類の金網（図-4 参照）を挿入し，歪計によって圧力変動を写真撮影法で火炎伝播速度を測定した。その代表的圧力線図を図-13 に，平均火炎伝播速度（＝容器の半径＋圧力上昇開始から最高圧力に到達するまでの時間）を図-14 に示す。図によると，空燃比が理論混合比に近い値（たとえば $A/F=24.4$）の場合には金網を入れても圧力線図はほとんど変わらないが，圧力上昇がかんまんになることさえある。



図—14　平均火炎伝播速度

これに対して，過濃空燃比（$A/F=12$）の場合には燃焼不良のため圧力上昇はきわめてかんまんであるが，金網を入れると燃焼の促進が行なわれ圧力上昇は急激になる。なお，圧力線図を詳細にみると，火炎が金網を通過したと思われるところで圧力上昇率（dP/dt）が減少し，その後再び増加している。また，実験範囲では金網径が大きいほど，その影響は大きく圧力上昇は急激になることがわかる。

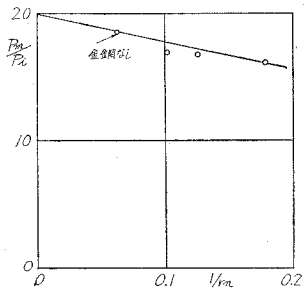


図—15　v_{fm}/v_{fm} と r_n/r

次に，金網を挿入しない場合の平均火炎伝播速度（v_{fm0}）と金網を挿入した場合の平均火炎速度（v_{fm}）との比を金網と燃焼容器との半径比（r_m/r）について表示すると図-15 となり，多くの場合 r_n/r に比例して v_{fm}/v_{fm0} は増加する。

このため燃焼最高圧力（P_m）と封入圧力（P_i）との比 P_m/P_i も同じ傾向をもたらす（図-16 参照）。

いま，均一混合気が定積燃焼する場合，燃焼の前後で比熱，ガス常数が変わらず，変化は断熱的で熱損失は無視できるものと考えると，圧力—時間線図から火炎伝播速度（v_f）および燃焼速度（v_b）は



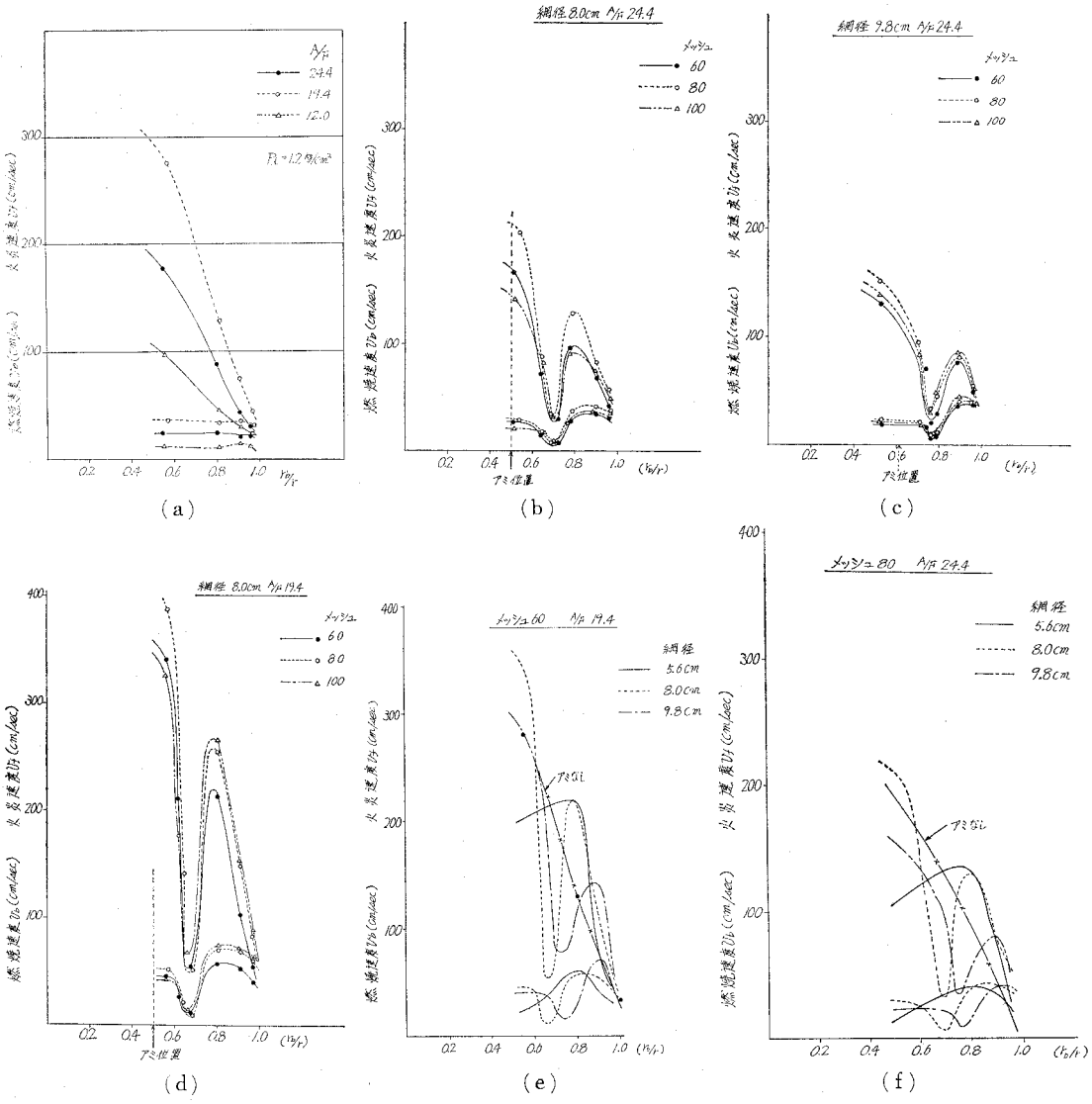
図—16　$P_m/P_i \sim 1/r_n$

$$v_f = \frac{V}{F}\left(\frac{P_1}{P}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \frac{1}{P_2 - P_1}\left[1 + \frac{1}{k}\left(\frac{P_2}{P} - 1\right)\right]\frac{dP}{dt} \quad (1)$$

$$v_f = \frac{V}{F}\left(\frac{P_1}{P}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \frac{1}{P_2 - P_1} \cdot \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

で与えられる。ここに F: 火炎面面積，V: 燃焼器体積，P: 圧力，k: 比熱比，添字1は燃焼前，2は燃焼後を示す。

したがって，V/F が簡単な形で表わされる容器では圧力—時間線図から火炎伝播速度 (v_f) および燃焼速度 (v_b) が容易に求



図—17　v_f, v_b と r_b/r

まる。この方法で求めた火炎伝播速度 (v_f) および燃焼速度 (v_b) を図-17に示す。図-17(a)に $P_i=1.2\ \mathrm{kg/cm^2}$ の場合における r_b/r と火炎伝播速度 (v_f) と燃焼速度 (v_b) を示しているが，図によると，火炎面が燃焼容器壁面に近づくと ($r_b/r \Rightarrow 1$) 火炎速度 (v_f) は急激に減速し，その減速度合は空燃比が理論値 ($A/F=21.84$) に近い $A/F=19.4$ の場合に最大で以下 $A/F=24.4$, 12 の順になっている。これに対して，燃焼速度 (v_b) は空燃比 (A/F) によって変わるが位置 (r_b/r) には関係なくほぼ一定値を示し壁面のごく近傍においてのみ僅かに減速される。

この燃焼速度 (v_b) が一定値となることをマラールール・シャトウリエの式

$$S_u=\frac{k}{\rho_u\cdot c_p}\cdot\frac{T_b-T_{ig}}{T_{ig}-T_u}\cdot\frac{1}{x_b}$$

で考えてみると，火炎面が壁面に近づくにつれて未燃ガス密度 (ρ_u) は増加する。一方，未燃ガス温度 (T_u) および燃焼ガス温度 (T_b) がともに増加するので $(T_b-T_{ig})/(T_{ig}-T_u)$ の値も増加する。したがって結果的には一定値をもたらしたものと考えられる。なお，$r_b/r<0.5$ における v_f, v_b は圧力時間線図の精度上割受した。

次に金網を入れた場合の実験結果（図-17(b)～(f)）によると，金網のメッシュ，網径，空燃比によって多少の相違はあるが，一般に火炎面が網を通過した後，v_f, v_b はともに一旦急激に減速し，その後再び急激な増速をし，金網なしの場合の v_f, v_b をかなり上まわる値を示している。その減速および増速の度合は，

i) 金網前の火炎伝播速度の大きいもの程激しい。すなわち理論空燃比に近い混合気のときもっとも急激な増速および減速する。

ii) メッシュが小さいと火炎面の乱れが助長される反面，金網での摩擦損失および熱損失が増加するので最適のメッシュが存在するものと考えられる。しかし，本実験範囲においてはメッシュが大きい程，網目通過後の増速が大きい様である。

iii) 網目を通過した後の燃焼速度 (v_b) の最大値はほとんどの場合，網径 $d=9.8$ cm のものが最高であり，火炎伝播速度 (v_f) の最大値は空燃比によって変わり，$A/F=24.4$ の場合 $d=5.6$ cm, $A/F=19.4$ の場合 $d=8.0$ cm, $A/F=12$ の場合 $d=8.0$ または 9.8 cm と過濃になるほど最適直径が大きくなっている。

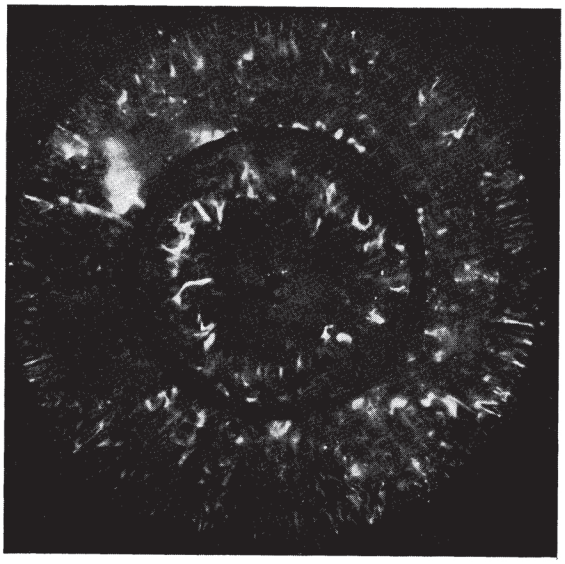
次に，金網を入れた場合の燃焼状態の特徴を写真から観察すると，

i) $A/F=12$ の場合（図-18(a)）；黄橙火炎で網の内外で乱れているが，とくに外側で激しく，しかも濃淡にむらが認められる。キュンと云う鋭い音を発し，その音は網径が大きいほど大きい。また，金網なしの場合に認められたような煙はほとんど残らない。

ii) $A/F=19.4$ の場合（図-18(b)）；輝度に濃淡が認められる強い青白火炎が放射状に生じ，とくに網の外側で激しい。燃焼音はあまり大きくなく，金網の内側に僅かながら煙がみられる程度である。

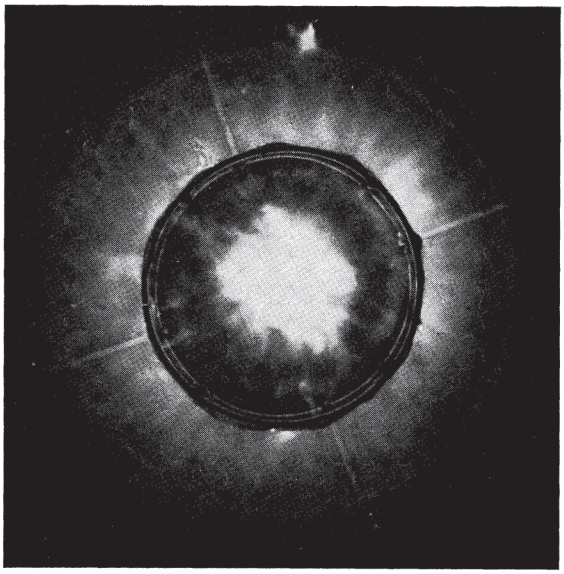
iii) $A/F=24.4$ の場合（図-18(c)）；白っぽい黄橙火炎で輝度弱く，金網の内外の中心付近に白っぽい煙が少々残る。燃焼音は $A/F=12$ の場合よりかなり弱い。

このように金網を入れた場合の燃焼火炎は金網通過後にかなり乱されるが，金網面での熱損失のため温度勾配が小さくなり，内側の輝度，残光は減少するようである。



封入圧 1.2 kg/cm²
A/F 12
メッシュ 80
網径 80 mm
100 コマ/sec

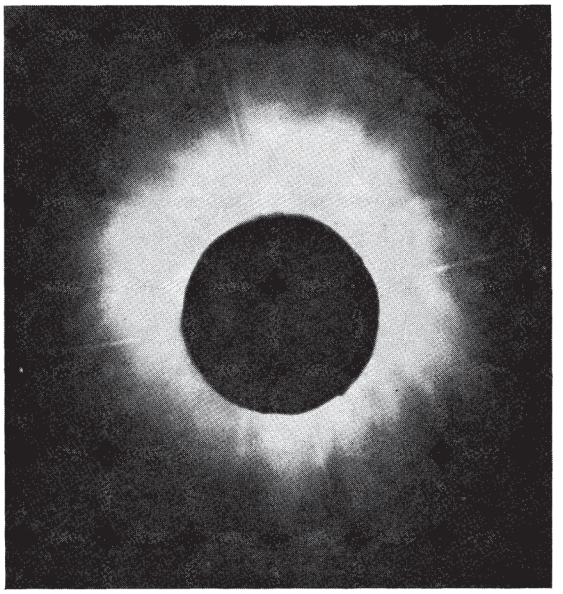
(b)



封入圧 1.2 kg/cm²
A/F 19.4
メッシュ 80
網径 80 mm
100 コマ/sec

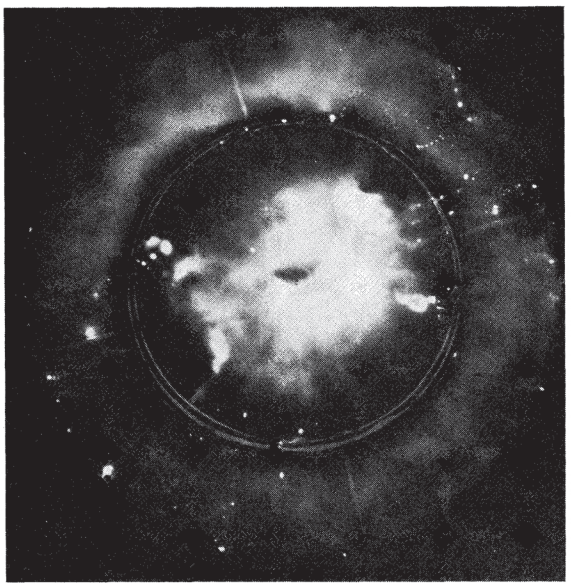
(a)

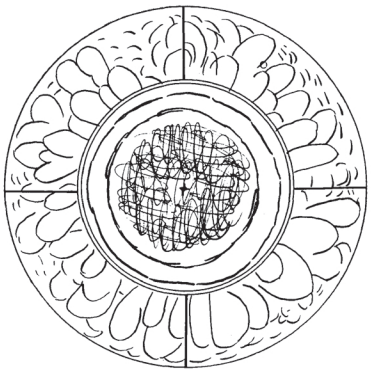
図—18 火炎写真



封入圧　1.2 kg/cm²
A/F　24.4
メッシュ　80
網　径　5.6 cm
100 コマ/sec

（c）





封入圧　1.2 kg/cm²
A/F　24.4
メッシュ　80
網　径　9.8 cm
100 コマ/sec

（d）

図—18　火　炎　写　真

II-3 要　　約

定積燃焼の圧力線図，写真による観察などについて述べてきたが，要約すると

i)　点火遅れおよび火炎伝播速度はいちじるしく変動し，火炎伝播速度は火炎の進行とと

もに増大する。

ii) 燃焼音の発生機構は明らかではないが $dP/dt \geq 800$ kg/cm^2·sec のとき聞かれる。

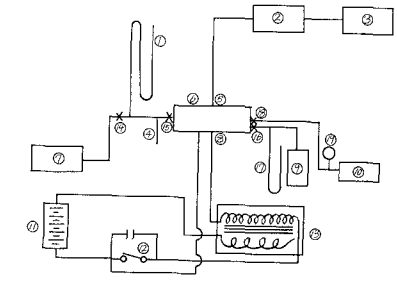
iii) 円筒形容器に金網を挿入して火炎面を乱した場合，燃焼速度 (v_b) および火炎伝播速度 (v_f) は火炎が金網を通過した直後一旦減速し，その後再び増速する。この火炎面の乱れによる火炎伝播速度 (v_f) の増加割合は過薄混合気よりも過濃混合気の方が顕著である。

iv) 容器内で火炎を乱す場合，燃焼期間前半よりも未燃ガス密度が高まった燃焼後期に乱す方が，火炎伝播速度および圧力上昇率の増加は著しい。

III. 炭化水素の発生

III-1 概説および実験方法

内燃機関の排出ガス中，炭化水素はスモッグの形成に大きな役割を占めると云われている。かかる炭化水素の生成は燃焼室壁面の消炎作用に基因し，矩形燃焼容器による消炎理論が実用機関にも適用できることを示した W. A. Daniel の実験結果や，かかる消炎理論の適用を否定し，未燃炭化水素の主要発生源は不完全燃焼であることを主張した D. A. Bowlus の報告などが見受けられる。筆者等も各種寸度の燃焼容器 (表-1 参照) を準備し，純プロパン (プロパン 98%，エタン 2%) を燃料とする燃焼実験を実施し，その燃焼ガス中から炭化水素をガスクロマトグラフィで分析計量し，空燃比，燃焼室寸度および封入圧力の影響を調べた。実験はまず図-19 において，真空ポンプ ⑦ を駆動し，燃焼容器 ⑥ と L.P.G. ボンベ ⑨ までの連結ゴム管を真空にし，その真空度 (P_0) をマノメーター ① で測定する。次に，コック ⑮ を閉じ L.P.G. ボンベのコック ⑯ を開いて L.P.G. を燃焼容器に送入しそのときの圧力 (P_1) をマノメーター ⑰ で読む。さらにコック ⑯ を閉じ空気圧縮機系統のコック ⑱ を開き，空気を圧送しそのときの圧力 (P_2) を水銀マノメーターまたはブルドン管圧力計 ⑲ で測定する。次に，コック ⑱ を閉じ混合気を燃焼させ，その燃焼ガスを抽出しガスクロマトグラフィに導入して分析した。なおガスクロマトグラフィには内径 3 mmϕ，長さ 2 m のカラムにスクアラン担体 C-22，固定相液体含浸量 20% を充填剤として用いた。定性に際しては低級炭化水素の相対保持時間により，定量の場合は，純プロパンを用いた予備実験からキャリアガス (窒素) の流速 30 m/min，カラム温度 70°C，試料室温度 100°C，レコーダーの紙送り速度 40 mm/min とし FID 検出



図—19　実験装置系統図

（水素圧力 0.6 kg/cm^2，空気圧力 2 kg/cm^2）として相対面積比較法を採用ピーク面積は半幅値法によって求めた。

なお，設定空燃比は次式から算出した。

$$\frac{A}{F}=\left(\frac{P}{P-P_0}-1\right)\cdot\frac{R_p}{R_a} \tag{3}$$

ここに，A：空気量，F：封入プロパン量，P_0, P_1, P_2：測定圧力，R_p, R_a：プロパンおよび空気のガス常数であり，供試純プロパンの理論空燃比は 20.5 である。

III-2　実験結果および考察

炭化水素の生成は，燃焼室壁面の消炎作用と火炎伝播面での不完全燃焼に基因するものと考えられる。いま，消炎作用が炭化水素の主要発生源と見做し，W. A. Daniel[4] が指摘したように消炎理論が成り立ち，しかも消炎領域では燃料の分解反応が起らないものと仮定すると，炭化水素の発生量 (G_l) と窒素 (G_N) の割合は

$$\frac{G_l}{G_N}\propto\left(\frac{F}{F+A}\right)\left(\frac{V_q}{V}\right)\left(\frac{T}{T_q}\right) \tag{4}$$

ここに，A/F：空燃比，V_q：消炎領域の体積，V：体積，T：燃焼ガス生成温度，T_q：消炎領域のガス温度で与えられる。しかし本実験に用いた円筒型燃焼容器においては，

$$\left.\begin{aligned}V_q&=q_d\cdot S=q_d\cdot\pi D\left(L+\frac{D}{2}\right)\\V&=\pi D^2\cdot\frac{L}{1}\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

したがって

$$\frac{G_l}{G_N}\propto\left(\frac{F}{F+A}\right)\cdot q_d\cdot\left(\frac{S}{V}\right)\left(\frac{T}{T_q}\right)=\left(\frac{F}{F+A}\right)\cdot q_d\cdot\left(\frac{4}{D}+\frac{2}{L}\right)\left(\frac{T}{T_q}\right) \tag{6}$$

ここに，q_d：消炎距離，S：表面積，L：燃焼室高さである。

また，Friedman[5] は空気過剰率 $\lambda=0.7\sim1.3$ のプロパン—空気混合気に対して，消炎距離 (q_d) を次式で与えている。

$$q_d\propto\frac{1}{(P_q)^\alpha}\cdot(T_q)^\beta \tag{7}$$

ここに，α, β は空燃比の関数で $\alpha=0.8\sim0.96$, $\beta=1.5\sim0.49$ の実験値を報告している。

したがって (6) および (7) 式から

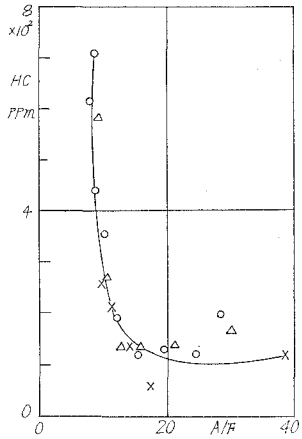
$$\frac{G_l}{G_N}=\left(\frac{F}{F+A}\right)\left(\frac{1}{P_q}\right)^\alpha\left(\frac{1}{T_q}\right)^{\beta+1}\cdot\left(\frac{4}{D}+\frac{2}{L}\right)(T) \tag{6'}$$

となり，未燃炭化水素の発生量 (G_l) に影響する因子として空燃比 (A/F)，燃焼器の表面積 (S) と体積 (V) の割合 (S/V) したがって，燃焼容器の寸度，消炎領域内のガス圧力 (P_q)，温度 (T_q)，

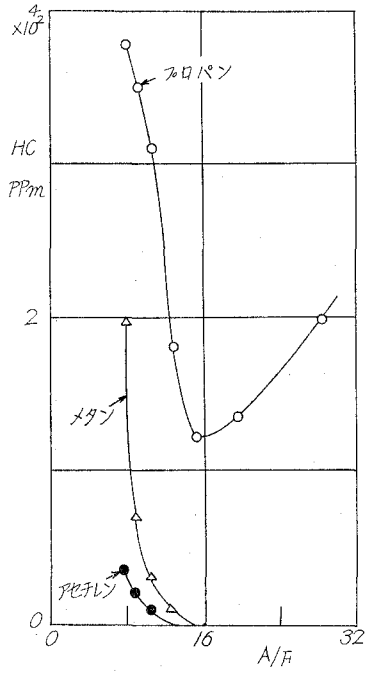
燃焼ガス温度 (T) などが挙げられる。

III-2-A　空燃比の影響

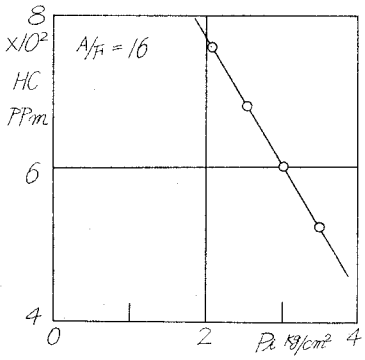
燃焼容器 No. 3 ($V=502.4$, $S/V=1.05$), 混合気の封入圧力 (P_i) 1.8 kg/cm^2 で，空燃比 (A/F) を広範に変えた場合の実験結果を図-20 に示す。図によると炭化水素の発生量は空燃比が過濃の状態から $A/F=16$ 付近までは急激に減少し，$A/F=16\sim20$ の範囲ではほぼ一定値 (約 120 ppm) となり，さらに理論空燃比 ($A/F=20.5$) よりも希薄になると再び増加する傾向が僅かながら認められる。これらは，ガソリン機関における排気ガス中の炭化水素量と空燃比との関係に類似しており，CO 濃度などと同様に空燃比に大きく左右されることがわかる。本実験では壁面温度および燃焼圧力が実用機関の場合よりもかなり低いにもかかわらず均一混合気の燃焼であるため，CFR 機関に純プロパンを用いた場合の実験値[6]，HC＝330～230 ppm ($A/F=14.8$, $\varepsilon=0$, $\theta_{sg}=10°\sim40°$) やガソリン機関の実験値[7] (約 400 ppm) などよりもかなり小さい値を示している。いま，実用機関の壁温度，圧力を考えると炭化水素は (7) 式からわかるようにさらに小さくなることが期待できる。しかし，実用機関におけるシリンダ内混合気の乱れは，燃焼初期の火炎の発達を阻害するので，火炎面が通過した後も反応が継続し消炎領域以外からの未燃炭化水素や分解炭化水素の発生をも伴うようになる。このため，混合気の均質化を計っただけでは期待通りの炭化水素軽減は難かしいようである。なお，消炎領域では分解反応は起らないと仮定してきたが，実験結果 (図-21) によると分解成分 (メタン，アセチレン) が分析計量されている。これらは空燃比が過濃のときに顕著であるが，理論空燃比に近づくと順次減少し，$A/F\geq12$ になると未反応成分は 120 ppm もあるが，分解成分はほとんど認められなくなる。このことは，過濃空燃比のような空気不足の状態においては燃焼反応の初期に熱分解を起して中間生成物の発生をきたし，そのまま燃焼反応が進行せずに排出されるが，希薄領域では，たとえ中間生成物が発生しても充分な空気によって反応が進行していくものと考えられ，消炎領域では中間生成物の発生はほとんどないものと考えるのが妥当のようである。



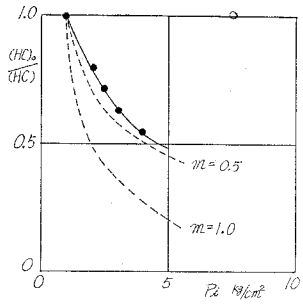
図—20　HC (ppm) と A/F



図—21　分解成分と A/F



図—22　発生炭化水素と P_i



図—23　$(HC)_0/(HC)$ と P_i

III-2-B　封入圧力の影響

混合気の封入圧力 (P_i) によって燃焼最高圧力 (P_m) および最高温度 (T_m) も変わる。すなわち

$$P_m = P_i\left(\frac{T_m}{T_i}\right)\cdot\delta = P_i\left(\frac{1+Q}{C_v}\right)\cdot\delta$$

ここに，δ：モル数の変化，Q：混合気 1 kg 当たりの発熱量である。いま，仮りに $P_q \fallingdotseq P_m$, $T_q \propto T_m$, $T \fallingdotseq T_m$ と近似すると，炭化水素の発生量 (G_l) は規準状態（添字 0）との比で示すと

$$\frac{(G_l/G_N)}{(G_l/G_N)_0} = \left\{\frac{P_{i0}(T_m/T_i)_0\,\delta_0}{P_i(T_m/T_i)\,\delta}\right\}^{\alpha} \fallingdotseq \left(\frac{P_{i0}}{P_i}\right)^{\alpha} \qquad (8)$$

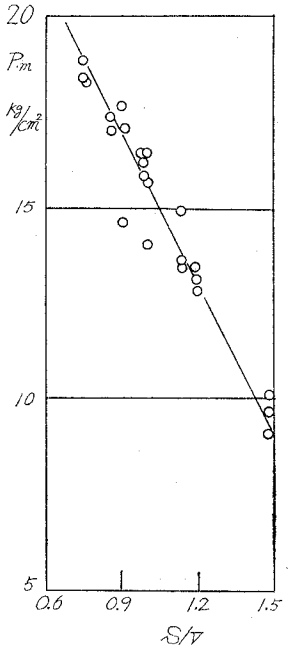
の関係が与えられる。しかし本実験では 図-22 および 図-23 に示すように $(G_l/G_N)/(G_l/G_N)_0 \fallingdotseq (P_{i0}/P_i)^{0.5}$ となっている。この指数 0.5 は Friedman の実験値 (0.8～0.9) よりも小さいが，これは必ずしも $(T_m/T_i)_0 = (T_m/T_i)$, $P_m \fallingdotseq P_q$, $P_m = P_i(1+Q/C_v)$, $T_m = T_{m0}$ とはならず，熱損失なども考慮する必要があるためであろう。いずれにしても，封入圧力 (P_i) をたかめることによって未燃炭化水素が減少するという現象を実用機関に適用すると圧縮比を高めることが望ましいと云う結論が導びかれよう。

III-2-C　S/V の影響

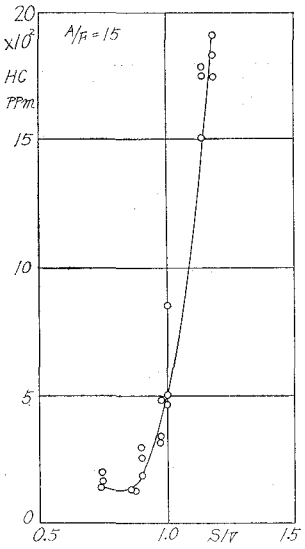
消炎領域における未燃炭化水素の発生量に対する燃焼室の表面積の影響は，燃焼ガス温度，消炎領域のガス温度がいずれの容器でも同じであると近似すると，

$$\frac{(G_l/G_N)}{(G_l/G_N)_0} = \frac{(S/V)}{(S/V)_0}\cdot\left(\frac{P_{q0}}{P_q}\right)^{\alpha} \qquad (9)$$

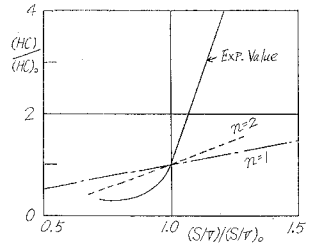
しかるに，本実験の結果（図-24 参照）によると $(P_q/P_{q0}) \propto (S/V)/$



図—24　P_m と S/V



図—25　発生炭化水素と S/V



図—26　$(HC)/(HC)_0$ と $(S/V)/(S/V)_0$

$(S/V)_0$ の関係がある。したがって未燃炭化水素の発生量と (S/V) との関係は，

$$\frac{(G_l/G_N)}{(G_l/G_N)_0} \doteqdot \left\{\frac{(S/V)}{(S/V)_0}\right\}^2 \tag{10}$$

で与えられる。しかるに，実験値は必ずしも計算値とは一致せず，(S/V) によって著しい影響を受ける（図–25 および 図–26 参照）。この理由としては，本実験が過濃空燃比 $(A/F=15)$ 領域におけるものであり，不完全燃焼の状態が更に (S/V) の影響を受けて，それが加味されたためであろう。

III–3　要　　約

以上，未燃炭化水素の発生量に及ぼす諸因子の影響について述べて来たが要約すると，

i)　排出炭化水素の生成は主として燃焼室壁面の消炎作用に基因するが，空燃比の過濃な場合には不完全燃焼による分解成分の発生が認められる。

ii)　炭化水素の発生量を主として左右するのは，空燃比と S/V である。S/V の影響は，消炎領域の増加のみならず，燃焼状態の変化をも伴うので計算結果よりかなり大きい影響を示す。

iii)　封入圧力をたかめると $(G_l/G_N)/(G_l/G_N)_0=(P_{i0}/P_N)^{0.5}$ の関係で炭化水素の発生量は減少する。

IV.　クランク室圧縮 2 サイクル機関の排出ガス特性（軽負荷運転）

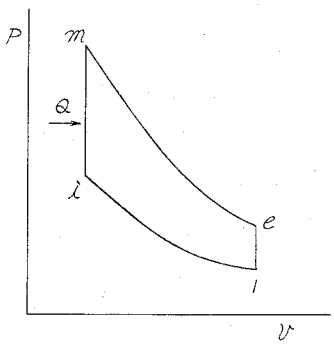
容器内燃焼による炭化水濃度を与える (6) 式を，オットーサイクル機関の理論サイクルに適用するに当たり，壁面の消炎領域では反応が行なわれず，消炎領域の温度 (T_q) はポリトロープ圧縮温度 (T_i) に，消炎領域の圧力 (P_q) は燃焼最高圧力 (P_m) に等しいものと仮定すると，

$$T_q = T_i = T_1 \cdot \varepsilon^{n-1}$$

$$P_i = P_1 \varepsilon^n$$

$$P_q = P_m = P_i\left(\frac{T_m}{T_i}\right)\left(\frac{1}{\delta}\right) = \frac{P_1}{T_1}\cdot\varepsilon\cdot T_m$$

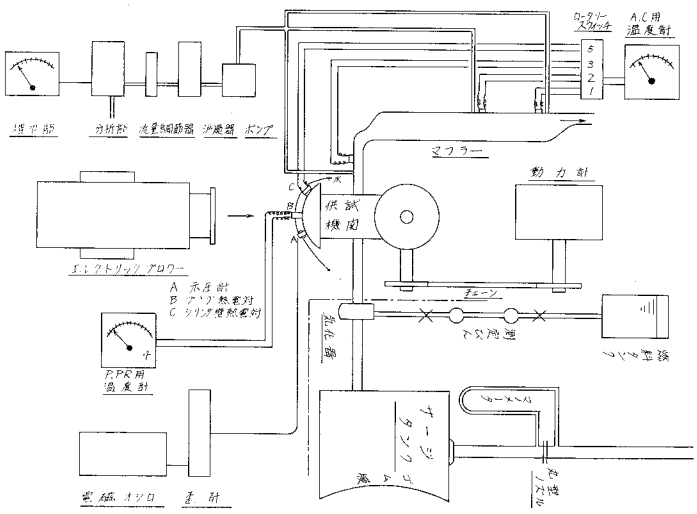
の関係が与えられるので，これを (6)′ 式に代入すれば，



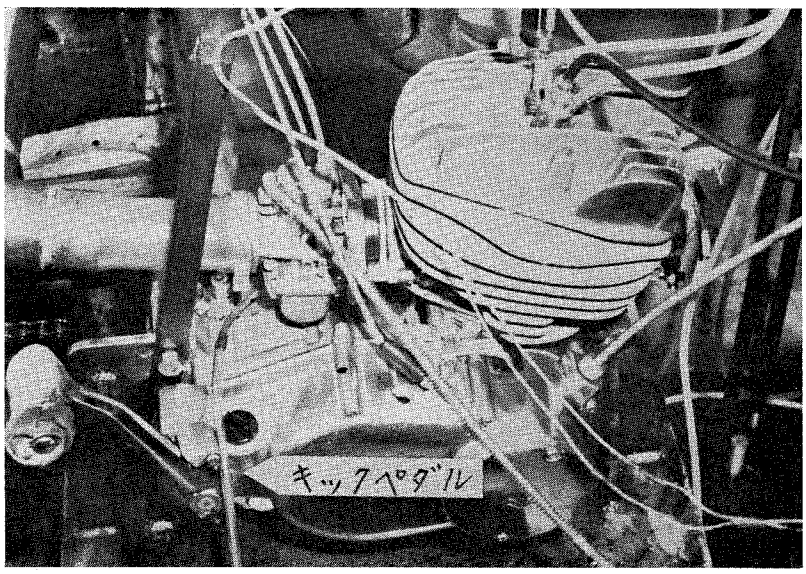
図—27　サイクル

$$\frac{G_I}{G_N} \propto \frac{F}{F+A}\Big)\cdot\left(\frac{S}{V}\right)\cdot\left(\frac{1}{P_1}\right)^{2+\beta}\cdot(T_1)^{2+\beta-\alpha}\cdot\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{(1+\beta)+(n-1)(\alpha-1)}\cdot\left(\frac{1}{T_m}\right)^{1+\beta} \tag{11}$$

の関係が導びかれる。上式から炭化水素に及ぼす諸因子，すなわち燃空比 $(F/F+A)$，吸込条件 $(P_1,\ T_1)$，圧力比 (ε)，機関寸度 $(S,\ V)$ および燃焼最高温度 (T_m) の影響を定性的に知ることができる。かかる予備的考察をもとにして，クランク室圧縮型2サイクルガソリン機関の運転条件を変えた場合の実験結果（排出炭化水素量）について検討を加えた。



(a)



(b)

図—28　実験装置

IV-1　実験装置および方法

実験装置は図-28 (a) および (b) に示すように，吸込空気量測定の丸型ノズルとサージタンク，給気管系，供試気化器および排気消音器からなり，シリンダヘッドには示圧計，熱電対付点火プラグおよびシリンダ壁温測定用熱電対が取り付けられている。また，排気消音器には三ヵ所から排出ガスを抽出し，赤外線分光分析計 (HC および CO) に導くとともに，温度をも測定した。なお，出力の吸収は渦流式電気動力計を用いた。また供試機関はクランク室圧縮型 2 サイクルガソリン機関であり，その諸元は表-4 のとおりである。

表—4　供試機関諸元表

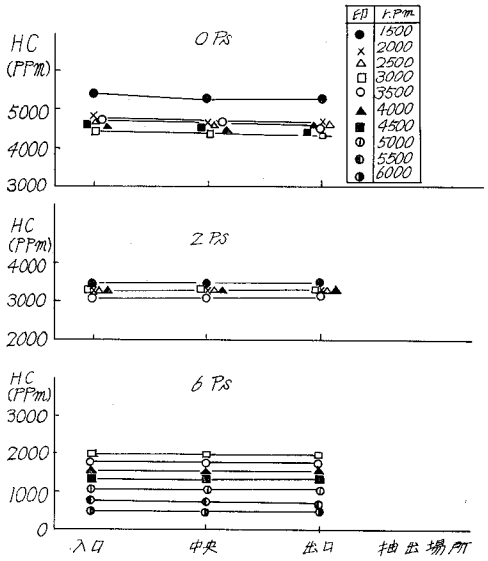
シリンダ径×行程	70 ϕ×60 mm
行程体積	246 cc
最大出力	18.5 ps/6000 rpm
最大トルク	2.36 kg·m/5000 rpm
圧縮比	6.6
点火時期	上死点前 21°
掃気方式	シュニー掃気

IV-2　実験結果および考察

IV-2-A　軽負荷運転時の排出炭化水素濃度 (HC) と運転条件の関係

i)　排出ガス採集 (抽出) 場所

機関の運転条件 (出力，回転数) とし，排気消音器の入口，中央および出口付近の三点から排出ガスを抽出し，分析の結果図-29 に示すように赤外線分光分析計による測定値はほとんど同じ値を示した。このように，本実験の排気系においては炭化水素の酸化反応が，もはや進行していないかのように見受けられるが，同分析計の特性を考慮するならば，正確にはガスクロマトグラフィによる分析を必要とするであろう。

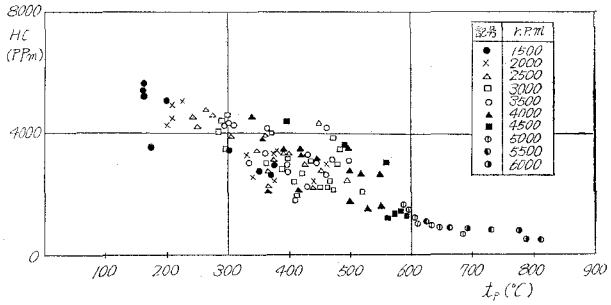


図—29　排気抽出場所の影響

ii)　燃焼ガス平均温度 (測温プラグによる)

炭化水素の発生量に対する燃焼最高温度の影響を知る必要があるが，その測定装置の準備がないため，比例関係にあると考えられる測温プラグによる燃焼ガス平均温度と炭化水素濃度との関係を求めたのが図-30 である。図によると (11) 式から導びかれる結論と定性的に一致し，燃焼ガス平均温度 (T_p) がたかくなるほど炭化水素濃度 (HC ppm) はほぼ直線的に減少している。いま，最高温度 (T_m) の代わりに燃焼ガス平均温度 (T_p) および実験値 t_p=200°C における炭化水素濃度 5200 ppm を基準とし，(11) 式から指数 β を求めてみると β の値は燃焼ガス平均温度 (T_p) の関数として表わされるが，その平均値は $\beta \fallingdotseq 0.5$ となり，Friedman の与えた空気過剰率 λ=1.3 に対する値 (β=0.49) と近似

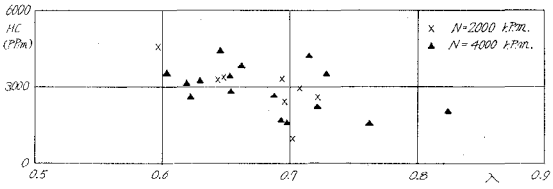
しているが過濃混合気としては小さい値を示している。なお，燃焼ガス平均温度 (T_p) が 500°C 以下になると，実験値は非常にばらついている。これは機関回転数および出力を一定として，空気過剰率を (λ) 変えた実験のため，不完全燃焼の発生をも伴ったためと思われる。



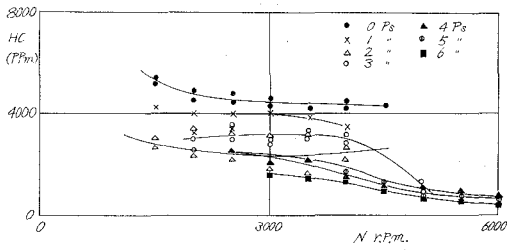
図—30　燃焼ガス平均温度と炭化水素濃度

iii)　空気過剰率 (λ)

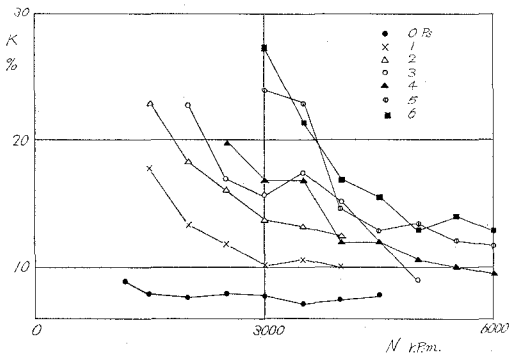
機関回転数を一定にして，空気過剰率 (λ) を1に近づけると燃焼ガス平均温度 (T_p) がたかくなり，消炎領域における炭化水素の発生が減少するとともに不完全燃焼による未燃炭化水素の生成も減少するので，その合計である排出炭化水素濃度も順次減少することになる（図-31 参照）。



図—31　空気過剰率 (λ) と炭化水素濃度



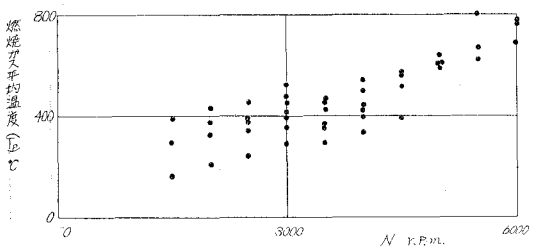
図—32　機関回転数と炭化水素濃度



図—33　給気比と機関回転数の関係

iv)　機関回転数 (N)

機関出力を一定とし，機関回転数を変えた実験結果（図-32 参照）によると，機関出力が高出力の場合ほど，炭化水素濃度が機関回転数の増加に伴って順次低下する傾向が認められる。これは池上氏[8]の混合比と負荷を一定にして機関回転数を変化させた場合の実験結果と逆の傾向を示している。その理由として，回転速度の増大につれて反応に許される時間が短くなるため消炎距離が増加することによると考えているが，本実験においては，機関回転数とともに給気比が急速に低下している（図-33 参照）。このため，2サイクル機関の部分負荷運転の場合には八田氏の実験的研究にも見られるように，熱的にはきびしい条件下におかれるようになる。このため図-34 のように燃焼ガス平均温度が機関回転数に比例して

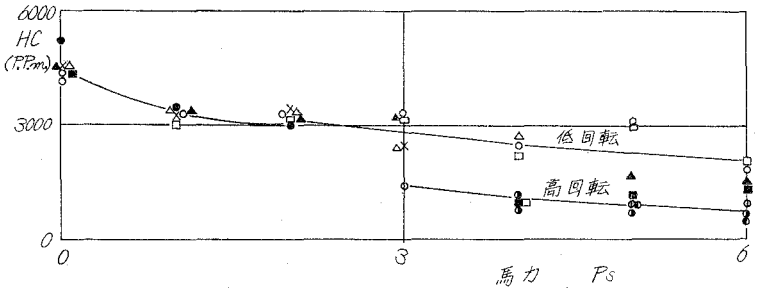


図—34　機関回転数と燃焼ガス平均温度

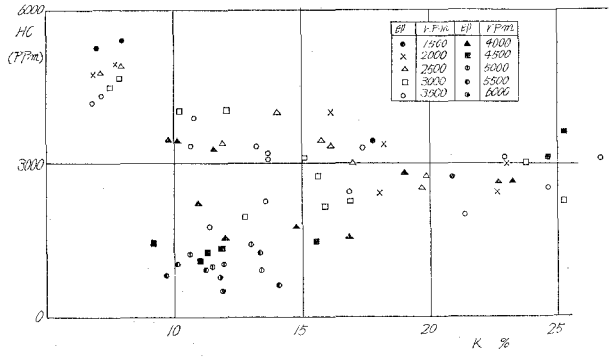
増加する。したがって，(11) 式から導びかれるように温度 (T_m) の影響が大きく左右したためと考えられる。

v)　機関出力 (負荷)

機関回転数を一定とし，負荷を変えた実験結果を 図-35 に示す。図によると，低回転域と高回転域とでは炭化水素濃度が違うが，いずれの場合も出力の増加に伴って順次低下している。この場合，発生熱量の増加，したがって燃焼平均ガス温度 (T_p) が上昇するためにかかる結果が得られたものと考えられる。なお，機関回転数を一定にして，給気比を増加させた場合には，負荷を変えた場合と同じことを意味するので，実験結果も同じ傾向を示す (図-36 参照)。



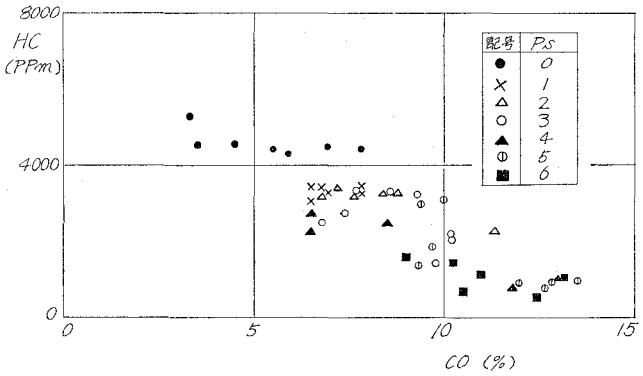
図—35　機関出力と炭化水素濃度



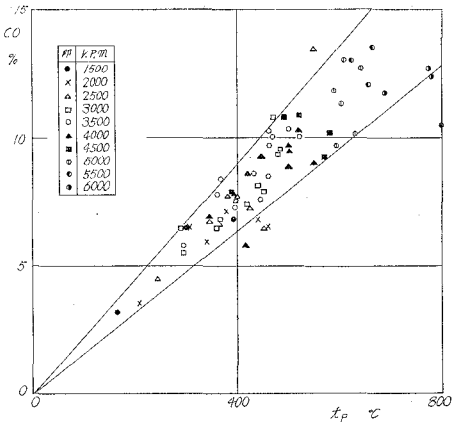
図—36　給気比と炭化水素濃度

vi)　炭化水素濃度と一酸化炭素濃度

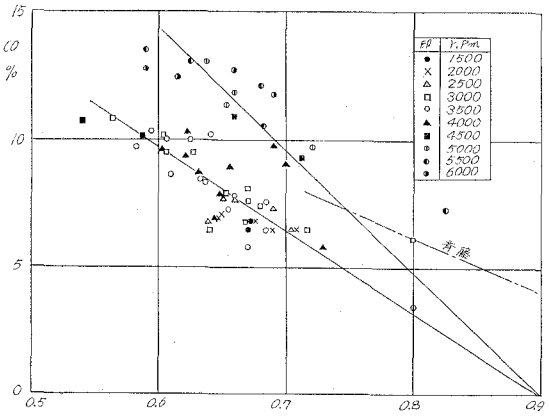
機関出力を一定にし，機関回転数や給気比などを変えた実験結果を，炭化水素濃度と一酸化炭素濃度とで纏めてみると，図-37 に示すように炭化水素の軽減は一酸化炭素の増加を意味することになる。しかし，個々の条件について詳細にみると，炭化水素濃度はほとんど変わらな



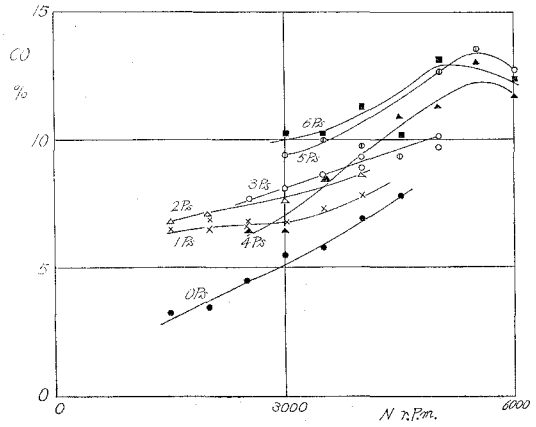
図—37　炭化水素濃度と一酸化炭素濃度の関係



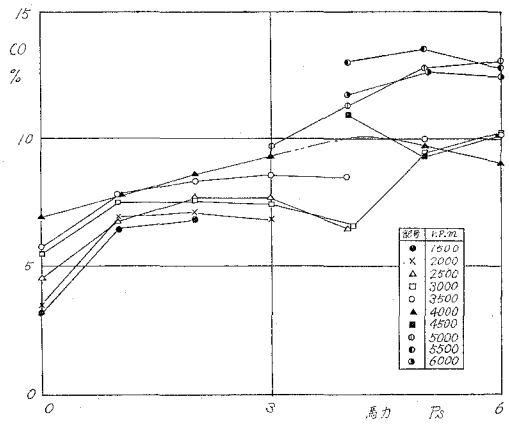
図—38　燃焼室ガス平均温度と CO 濃度



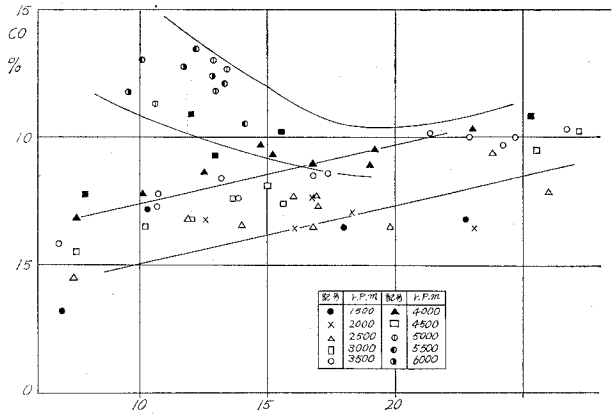
図—39　空気過剰率と CO 濃度



図—40　機関回転数と CO 濃度



図—41　機関出力と CO 濃度



図—42　給気比と CO 濃度

いにもかかわらず一酸化炭素が増加する場合もある。次に排出ガス中の炭化水素の測定とともに，一酸化炭素の量も測定したので参考資料として実験結果のみを列挙しておく（図-38～42)。

IV-3　要　　約

以上，クランク室圧縮2サイクルガソリン機関の軽負荷運転時における排出ガス中の炭化水素濃度に及ぼす運転条件の影響について述べてきたが，要約すると

i)　模型実験から得られた結論は実用機関にも適用できる。すなわち，炭化水素濃度に影響する因子は主として空燃比，機関寸度，圧縮比，燃焼最高温度等が挙げられる。とくに，燃焼最高温度と比例関係にあると推察される燃焼ガス平均温度と炭化水素濃度との関係は，定性的に計算結果とよく符合する。

ii)　機関回転数および機関出力を増加させると，燃焼平均ガス温度が上昇するので炭化水素濃度は減少する。

iii)　空気過剰率 (λ) を $\lambda=1$ に近づけるほど炭化水素濃度は減少する。

iv)　炭化水素濃度を軽減するような条件においては一酸化炭素濃度が逆に増加する。

V.　結　　言

内燃機関の燃焼および排出ガスの改善に関する基礎実験および機関実験を開始したばかりであり，不十分ではあるが，いままでに得られた資料を纒めてみた。このことによって，今後の公害対策および機関出力の向上と排出ガス浄化への指針が与えられたようである。

終わりにのぞみ，日頃御指導，御鞭撻を賜わっている東京大学浅沼強教授，玉川大学赤木盈教授，北海道大学深沢正一教授，村山正助教授，供試機関を貸与くだされた鈴木自動車 K.K. 研究部福西課長，実験を担当された本学福島和俊教官，早川友吉技官ならびに卒業研究生信夫聡一郎，樋渡健司，前野雅明，若林聡男，田中道則，内藤治朗，湯浅国高の諸氏に深甚なる謝意を表します。

(昭和45年5月20日受理)

文　　献

1) 自動車用機関の燃焼の研究・補助事業報告書: 自動車技術会, 昭44-5.
2) 金: 自動車技術会, 補助事業報告書, 昭45-5.
3) 長尾・他: 機械学会論文集, Vol. 12, No. 42, p. 132, 昭21-10.
4) W. A. Daniel: 6th symposium on combustion, 886 (1957).
5) Friedman: J. Appl. Phys., 21, 791 (1950).
6) Friedman: J. Appl. Phys., 21, 791 (1950).
7) 自動車と大気汚染に関する調査報告書: 自動車技術会, 昭43-8.
8) 池上: 機械学会関西支部第45期定時総会講演会論文集, No. 704-6, 昭45-3.