



気化器機関の燃焼に関する研究(1) :
長い燃焼行程を有する混合気の燃焼波測定の実験

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-05-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 赤木, 盈, 紺田, 功 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3156

気化器機関の燃焼に関する研究 (I)

長い燃焼行程を有する混合気の燃焼波測定の実験

赤木 盈・紺田 功

A Study of Combustion Phenomenons for Carburetor Engine (I)

Measurement of Deflagration Velocity of Mixture-gas
with a Long Flame-travel

Mitsuru Akagi and Isao Konda

Abstract

When the mixture-gas of fuel and air is ignited by electric spark on a carburetor engine, the flame propagates towards the unreacted parts with the velocity of 20-30 m/s. At this time it often causes an abnormal combustion, especially the compression ratio of the engine is rather high.

Such deflagration is called "Knocking". Among this may be found many kinds of abnormal combustions, which are called Detonation, Rumble, Thud, or Wildping.

When the Detonation happens, the deflagration velocity becomes extremely rapid. But it is unknown why this velocity increases from meters to thousands of meters. In this experiment we have measured the deflagration wave velocity which has a long flame travel, and have studied the relationship between the deflagration phenomenon and the pressure wave.

I 緒 言

オート機関において、予め燃料と空気とからなる混合気が気筒内に吸入され、圧縮の後電気火花にて点火爆発をする際、その燃焼状態は多くの因子により影響を受ける。その中でも圧縮比を上昇させるとノッキングと称する異常燃焼を起すことは既によく知られて居るところである。この異常燃焼もデトネーションの場合とワイルドピング、ランブル、サド等と区別されて居る。最近の報告¹⁾によれば、ランブル、サド等は実際機関における燃焼室壁上のデポジットにより生じられる一種のプレイグニッション現象であるといわれて居る。これに反してデトネーションは物理化学的な現象で、実際機関において起り得るか否か、また起るとすれば如何なる条件において起るかといふ本質については、なお不明な点が多く残されて居る。G. K. Adams²⁾は方程式を解くことにより爆発のデトネーションへの推移について報告して居るが、化学反応と火焰と圧縮が燃焼波の伝播に対して数 m/s から数 1000 m/s にまで加速する機構については明らかでない。

本実験では混合気燃焼の研究の一部として燃焼波の速度が長い火焰行程を有する燃焼管の中で如何なる条件で影響を受けるか、またその際の燃焼波と圧力波との関係につき、イオン波を測定することにより実験的に研究した。

II 燃焼波と圧力波

混合気を電気火花にて着火させた場合、火花エネルギーにより混合気がエキサイトされて着火しこれが核となって次第に隣接部分に拡がり燃焼波となって未燃部分に伝播するが、その際の発熱によりガスは膨脹し、圧力の上昇を生じてその未燃部のガスの音速で伝って行く。この場合の火焰面とは如何なる状態をもって定義するかという事は明らかではないが、一般に炭化水素燃料の燃焼の場合燃料分子の分解したラジカル等の中でイオナイズされたものが存在することは多くの文献の示すところである。そこで本研究ではイオナイズされたものが存在する部分をもって燃焼の生起とみなしてイオン波を測定することにより燃焼波と考えることとした。また先に生じた圧力波に対して、燃焼ガスが高温となればこの部分の圧力波速度は更に高速となって先の圧力波を追って行き、追いついた点からは圧力波の傾斜は非常に急峻なものとなり、高速で未燃部分に伝って行くようになる。この状態で衝撃波またはデトネーション波となり、質量流の法則から Hugoniot の式が立てられ、それよりデトネーション速度は

$$D = v_0/v_b \sqrt{k_b g R_b T_b} = C + \sqrt{k_b g R_b T_b} \quad (3)$$

この式において D : デトネーション速度 m/s

v : 比体積 m^3/kg

k : 比熱比 (概略としては 1.4)

R : ガス定数

T : 絶対温度

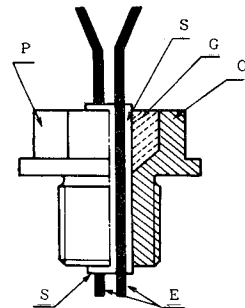
$0, b$: 未燃部および燃焼部を示す。

で表されるが、これによればデトネーション速度は燃焼ガスの音速と火焰の速度との和で示されることとなる。

III 実験装置と測定法

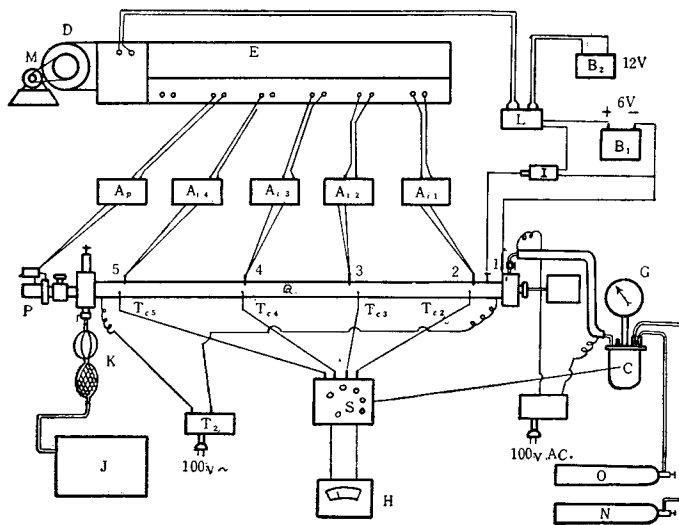
先へのべた如く本実験では燃焼波としてイオン波の測定を行なった。測定用イオンギャップとして第1図の如きプラグを製作した。絶縁体の接着剤としては東芝シリコンワニス TS 920 と信越化学 KR 280 を使用した。一般にはその極の中の一つはアースされて使用される場合が多いが、火花放電によるノイズのはいることを除くため、両極を本体より絶縁して用いることとした。印加電圧は 250 V とした場合炭化水素火焰ではイオン電流は、 $10 \sim 20 \mu\text{A}$ 程度であるので高速記録のため増幅器を通して電磁オッシログラフに入れて記録した。

燃焼装置として長い鋼管を使用し、この管内に混合気を入れ内部では流動の無い状態で測定した。実際の機関では吸入時の流動が残り、点火時にも相当の渦動がある点ではこの状態とは条件は異なる。さらにこの装置では管内の圧力を高くして長時間保つことは困難であった。そのため内部圧力は 1 kg/cm^2 とし、余分の酸素を加えることにより加圧の状態に対応せしめた⁴⁾。その余体の構造図を第2図に示した。



第1図

図中 Q が燃焼管で、内部混合気の不凝結温度として 120°C 程度に保つよう電熱器にて加熱し保温した。混合蒸発器 C に酸素を最初充満し、一定量の燃料を秤量して入れ、さらに酸素を加えて 2 kg/cm^2 まで加圧し、これに窒素を $0.5, 1, 1.5 \text{ kg/cm}^2$ と3種類に変化させたものを圧入して空燃比を変えた。中の燃料を蒸発させるために約 $160\sim 180^\circ\text{C}$ に加熱した。この温度は燃料の高温分解または緩慢酸化等による変質が殆んど無いと思われる温度である。ここで出来た混合ガスを燃焼管に導き放電着火せしめ、 i_2, i_3 等のイオンギャップを使用して Ai の増幅器を通してオッシロに記録した。オッシロのシャッターと点火を同期させるために、同期マグネットスイッチ L を点火系統配線に入れ、S, H により燃焼管の燃焼前後の温度計測を行なった。圧力の測定にはレーマン型インデケータを電気抵抗型に改造したピックアップを取りつけオッシロに記録した。第3図はその増幅回路を示す。



第2図

燃焼管の諸寸法は第4図に示す如きもので、全長 2 m 、内容積 760 cc 、混合蒸発器は 890 cc である。燃焼用空気としての酸素と窒素の比は、酸素の量を $80\%, 57\%, 44\%$ の3種類とした。

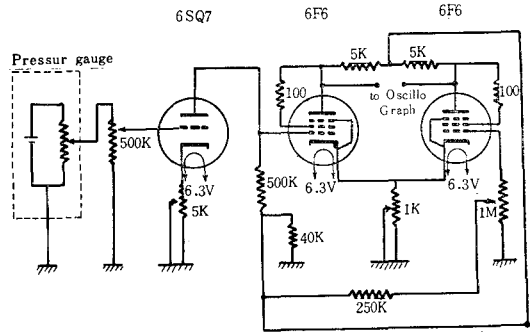
使用燃料は *i*-オクタンと *n*-ヘプタンで、諸性質は次の通りである。

i-オクタン (C_8H_{18}) 100 θ_z

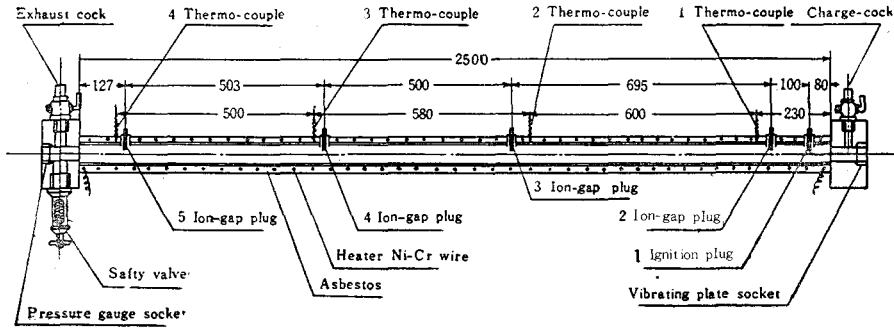
比重: 0.69 沸点: 98.4°C

n-ヘプタン (C_7H_{16}) 0 θ_z

比重: 0.68 沸点: 99.2°C



第3図



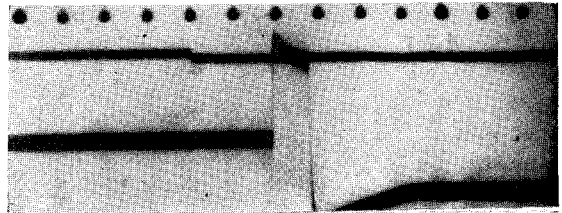
第4図 Combustion Pipe

III 予備検討

1. イオン電流

イオン電流についての検討のため使用燃料の火焰および他の火焰についてのイオン電流の状態の実験を行なった。

まづ *i*-オクタンの定常火焰上にイオンギャップを移動せしめて、オシログラフ上での波形を調べた。第5図がその一例である。移動速度と波形の振れ時間に対する検討を行ない充分測定に使用し得ることを確めた。つぎに火焰の各部におけるイオン電流の値をプロパンガスバーナー火焰につき μ アンメーターで測定した結果を第6図に示す。火焰の根元部分では中心部が大で上部に行くと中心より僅か外測部分にこれが現われる。混合気火焰のイオンに関する文献は多い⁶⁻⁷⁾。



第5図

2. 気化率の検討

混合器中での燃料の気化状態をチェックするために酸素、窒素、ならびに燃料蒸気を完全

ガスと見なして、オクタン、ヘプタンの蒸気圧曲線⁸⁾を利用して、完全ガスの式、ダルトンの分圧則を適用して計算を行なった。気化率を α として

$$p = p_0 + P_f$$

$$p_0 V = G_0 \cdot R_0 \cdot T$$

$$p_f V = \alpha \cdot G_f \cdot R_f \cdot T$$

ここにおいて、サフィックス g, f は空気燃料を示す。

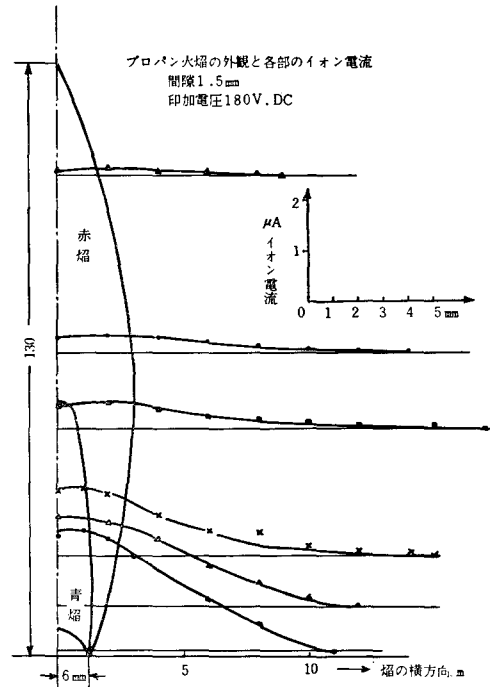
- p : 圧力 (kg/m²)
- V : 体積 (m³)
- R : ガス定数
- T : 温度
- α : 蒸発率 (原燃料に対し気化する部分の割合)

が成立するものとして

$$\alpha = \frac{(MR) \cdot mf/mg}{p/p_f - 1}$$

- m : 分子量
- (MR) : 混合比 (燃料と空気の)

これより α に対し 5.015 を得たので充分与えられた温度で気化して居ると見られる。



第 6 図

3. 空燃比の検討

使用燃料は *i*-オクタン, *n*-ヘプタンであるので、混合蒸気発器の容量と酸素、窒素の圧力の関係から完全ガスの法則を適用して、理論混合比に対して

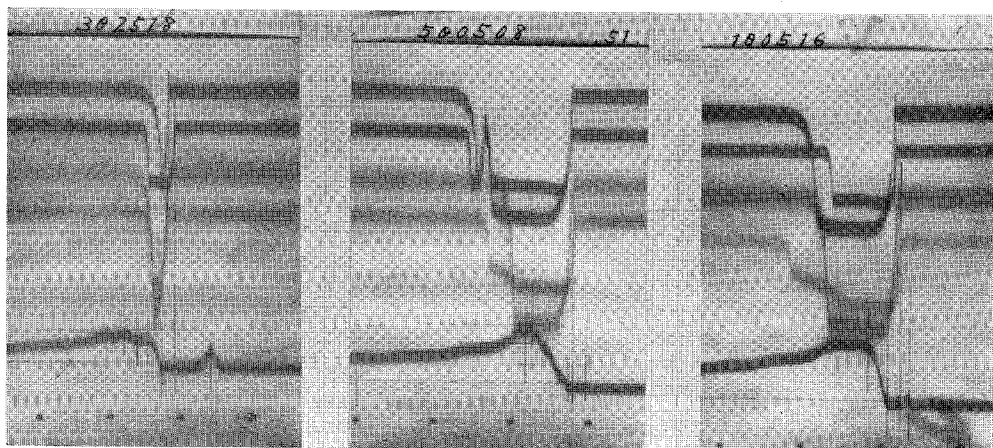
- i*-オクタンの場合: 容器に注入する量 0.76 cc
- n*-ヘプタンの場合: 0.78 cc

となり、マイクロシリンジにて各燃料を 0.4 cc より 1.8 cc まで変えることにより、空燃比を変化させて実験を行なった。

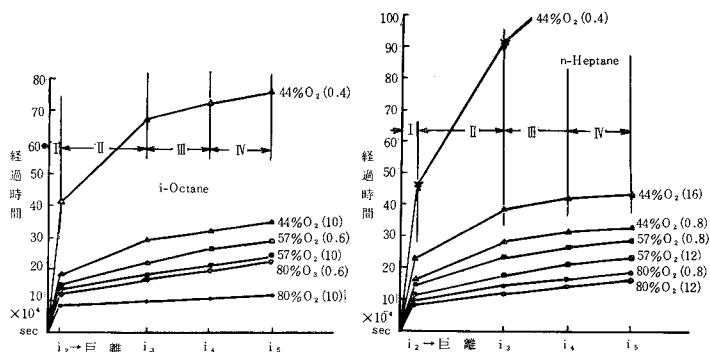
IV 測定結果と観察

1. 一方向に火焔が伝播する場合

この場合は点火栓を一端に付した場合で、本実験ではイグニッションプラグを i_1 の位置に置いた。その場合の記録例を第 7 図に示す。また各ギャップ位置と通過時間の関係をプロットすれば第 8 図となる。イ) はイソオクタン ロ) はノルマルヘプタン



第 7 図



第 8 図

この結果より $i_1 \sim i_2$ の中間は測定されて居ないので、その曲線は不明であるが $i_2 \sim i_3$ の線を延長して、時間軸と交る点の時間は混合気の着火遅れの点であると考えられる。放電による着火遅れの値については余りデータが無いが、稀薄混合比の方が着火遅れは大で酸素量の多い程少ない値をとると考えられ、最小でも 8×10^{-4} sec は存在するものと思われる。

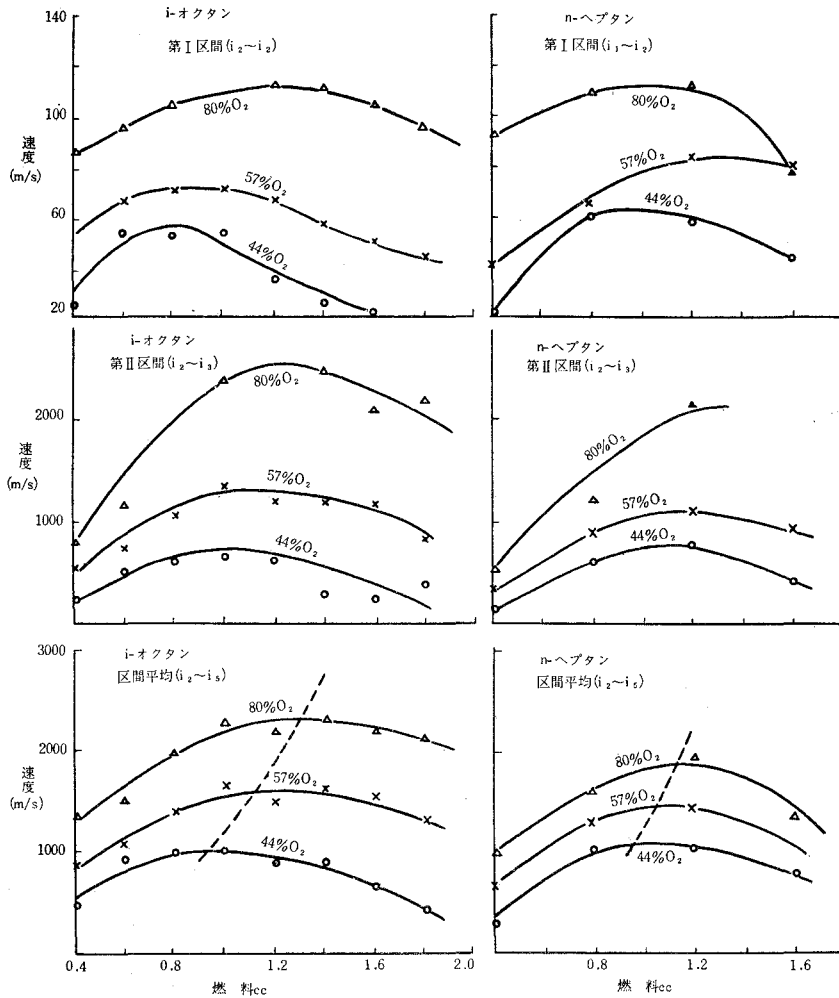
Rifkine または Rögner⁹⁾ は混合気の圧縮着火の遅れを求めて実験的に

$$\tau = ap^b e^{\frac{c}{T}}$$

の実験式を求めて居るが、彼の実験結果と比較すれば温度 800°F 以下の状態に近い値をとる。勿論火花着火の場合の着火遅れは熊谷氏¹⁰⁾の研究の如く、点火栓または点火系統の条件によっても異なる。

この曲線より、線傾斜が速度の逆数を表すが、火焰速度は或る距離進んだ後は何れの場合もほぼ一定となって居ることから、長い火焰行程では末端の方では大略一定となるものと思われる。

つぎに之を各間隙間の区間に分けて平均速度と燃料量との関係を曲線に表すと第9図となる。



第9図

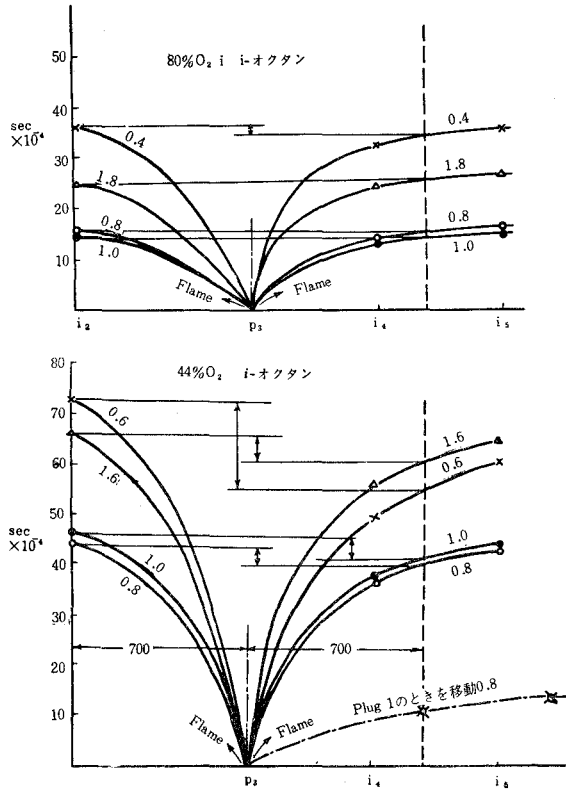
これより最初の 100 mm までの着火遅れを含めた平均速度は 20~60 m/s, 最高 110 m/s 程度で, 実際のガソリン機関の速度にはほぼ一致する。燃料の差による相異ははっきりと認め難い。最高速度は各区間とも空気中の酸素量の多い程リッチ側に表われるのは興味あることである。

第II区間に対しては酸素量が80%の場合は最高速度が両燃料共2600 m/sに達して居る。

第III区間では酸素量, 空燃比共少ない場合を除いてはその速度は一定して来る。しかも酸素量の多い場合が早く一定速度に達することが出来る。かかる速度は速度だけの点からはデトネーション速度の範囲である。

2. 火焰が二方向に分れて伝播する場合

燃焼室の中間で着火せしめて、そこから両側に分れて火焰が伝播する場合の実験として点火栓を i_3 に位置した。この場合も火焰行程は左右対称でなく i_5 の方に向って長い場合の実験結果を第 10 図に示した。その結果から i_3 を中心として i_2 までの距離と同じ距離にある位置と比較すると、図中縦の矢印の長さ丈の差がある。

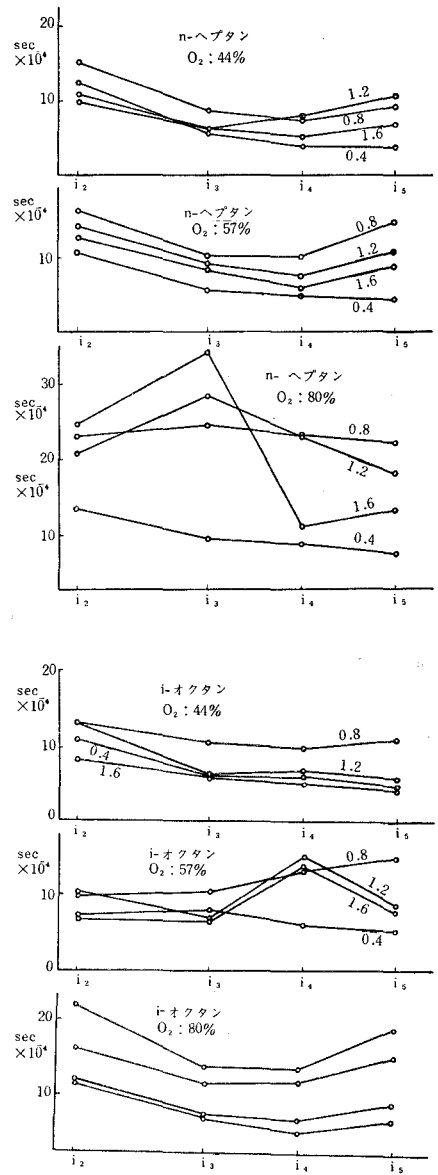


第 10 図

その差も稀薄混合比において大きく、理論比よりわづか濃い所では差が小さい。さらに濃厚になるとまた差が出て来る。空気中の酸素量の多い場合も同様の傾向と思われるが、少ない時よりもその差は非常に少ないことが分る。図中右側下の点線は参考のため i_3 にて点火したものを同図に入れて見たものである。

3. イオン電流保持時間

一点におけるイオンギャップにイオン電流が通



第 11 図

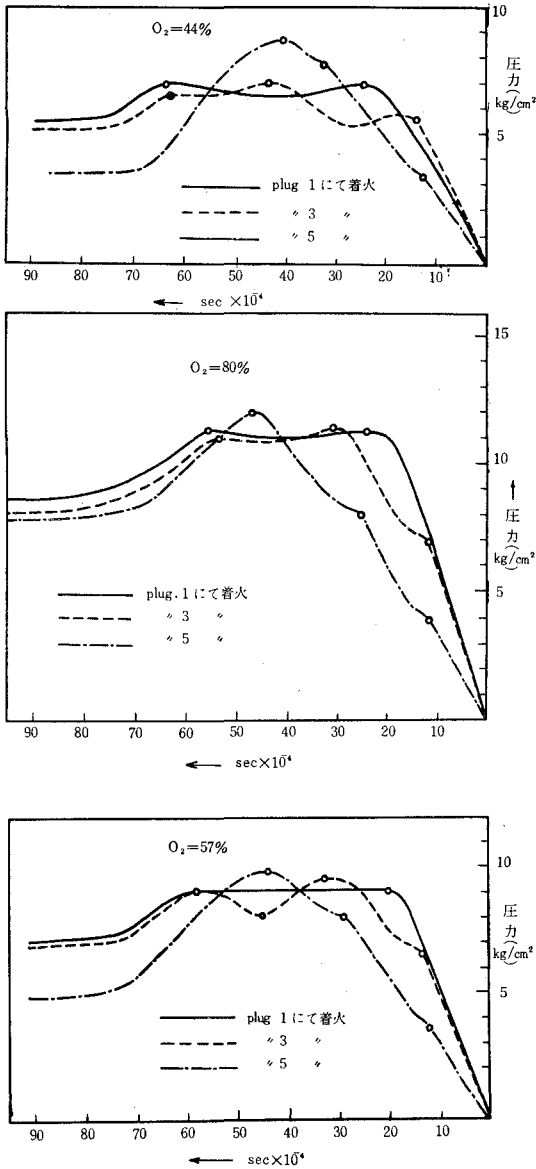
電し、液形のふれが出来て元の状態に戻るまでの時間を便宜上イオン電流保持時間と名づけ、その期間中イオンが滞溜して居るものと考え反応時間とする。その結果を各酸素量、両燃料につき各イオンギャップ位置につき図示したのが第11図である。線が重るので半数の燃料比のものについてののみ記した。

これより、決定的なことはいえないが保持時間は一般に*i*-オクタンが*n*-ヘプタンよりもやや短く、酸素濃度に関しては濃度が高い程永いといえる。位置的には両端の方が中間よりも

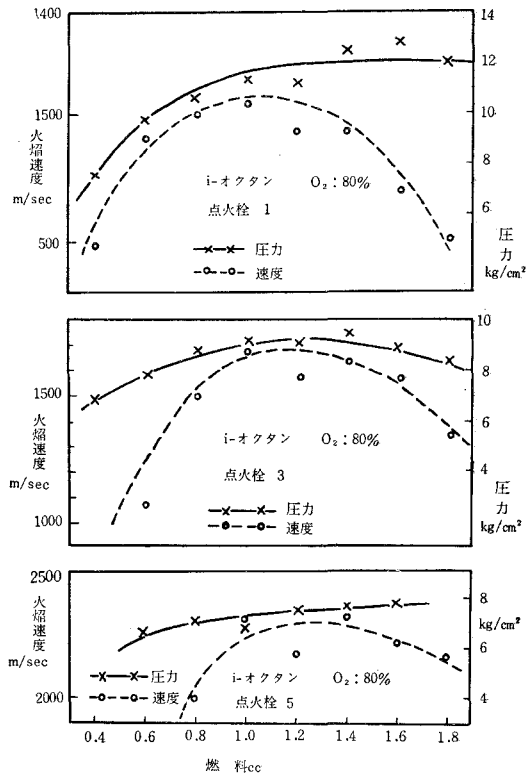
大きい傾向がうかがえる。特に点火端側が大きい。燃料混合比については理論量あたりが大きく、リーン、リッチ側で少ない傾向を持って居るが、平均して保持時間は $10 \sim 20 \times 10^{-4}$ secらしい。

4. 圧力波について

燃焼管の管端に付したインヂケーターにより圧力の上昇の状態を測定した。各酸素濃



第12図



第13図

度に対し同一点を起点として拡大して示したのが第 12 図である。点火栓を付ける位置を変え i_1, i_3, i_5 における場合を順次示して居る。

点火栓 1 で着火した場合は火焰行程の一番長い状態であるが、圧力上昇は立ちあがり点からスムーズに上昇し、約 20×10^{-4} sec で最高となり以後 40×10^{-4} sec 程度その圧力を保持し、漸減し管内平均圧力に落ちつく。

点火栓 3 では圧力の立ちあがりから最高までに 1 点小さい山が出来る。さらに点火栓 5 ではこの点が 2 個現われて居る。

燃料比に対し平均火焰速度と最高圧力との関係は第 13 図の如くである。火焰速度が最大になるまでは圧力は燃料比の増加につれて増大し、理論比よりわずかりッチ側で最高の値を示し、以後はほぼ一定となり、オーバーリッチで少し低下する。

点火してから末端において火焰の到達と圧力の立ちあがり、および最高圧力の表われるまでの時間は第 1 表の如くである。

第 1 表

着 火	酸 素 (%)	火焰が終端に達する時間 10^{-4} sec	圧力立ち上りの時間 10^{-4} sec	左 の 差	最高圧力の表れるまでの時間	火 焰 と 左 と の 差
プラグ 1	80	16	21	5	40	24
	57	25	31	6	51	36
	45	41	47	6	65	24
プラグ 3	80	16	22	6	34	18
	57	29	35	6	47	18
	45	45	55	6	65	20

この表にて、 i_5 のギャップと圧力ピックアップの位置にわずかずれがあるが、燃焼波と圧力波との平均の差は 5×10^{-4} sec、最高圧の表われるまでの差は点火栓 1 の時 24×10^{-4} sec、点火栓 3 の時は 18×10^{-4} sec 程度と思われる。

V 考 察

本実験ではイオン電流の存在をもって燃焼波としたが、燃焼関係のイオン化に関してイオン電流は極間への印加電圧、燃料の種類等により電流密度に差があるが Engel¹³⁾ によれば、アルカリ塩を添加することにより増大することをのべて居るが、このような添加物のために燃焼機構に変化をあたえる可能性もあるので加えなかった。

イオン波の速度は同じ燃料比でも酸素の多い場合は早く定常速度に達する。定常状態になってからの速度は本実験の場合で約 2500 m/s 程度になることは明らかのように考えられる。デトネーション発生の場合火焰面に衝撃波の発生することが多く報告されて居るが、本実験で

衝撃波と思われる強い波形は得られなかった。ただ3~4回インゲーターが吹き飛ぶ現象があったが、この場合の圧力波形は記録されなかったので確然ということは出来ない。圧力波に先んじてイオン波が来て居る事実は圧力波に先んじてガスがイオナイズされて居ると考えられ一種の連鎖反応の速度が可成の高速なためであろうか。このことに関しては目下光波、圧力波、イオン波の関連性につき実験中である。

非対称な火焰長を有する中心点火の場合は、イオン波の速度は末端ガスの長い方に向って早い。特に酸素濃度が少ない程その差は大きい。この事実に関して圧力波により管端の短い方が早く圧縮され、その側の分子の運動が焰進行に逆方向になるためではないかと考えられる。長い火焰長を有する場合両波が一点に重なる処がありそうに考えられる。これに関し計算と実験とより研究する予定である。

イオン電流保持時間については点火栓部は着火遅れと火焰生長遅れのため永くなり、末端においては圧縮波の到来による分子密度の滞溜によるものであろう。いづれにしても完全に反応し終るまでの時間は $1\sim 2\times 10^{-3}$ secを必要とするようだ。圧力波と保持時間との関係を見ると、最高圧力の表われる点と一致して居る。このことから当然ではあるが燃焼により反応が完結した点で最高圧力が表われることがよく分る。

圧力波形について点火位置で小さい山が表われる事は、圧力波の管内における反対方向へのものの反射波であろう。後日これらの計算につき報告したい。イオン波と圧力の立ちあがりまでの時間遅れはほぼ一定で 6×10^{-4} sec程度あるようだ。ただしこれは管の長さの大小で差を生ずるかも知れない。

VI 結 論

本実験で比較的長い火焰行程を有する燃焼管で、2種の燃料につき燃焼波の測定を行なった。その結果として

1. 兩種燃料のオクタン価は差が大きい、このような燃焼波速度には大きな差は認められなかった。
2. 平均燃焼速度は*i*-オクタンの方がやや早い。末端の方の速度は兩者ほぼ同じであるので、初期の着火遅れは*n*-ヘプタンが大きい。
3. 燃焼行程が長いと速度は大となり、最高速度は約2600 m/sにおよぶ。従って實際機関では気筒径の大きい場合に特に問題となるだろう。
4. イオン波と圧力波の間には燃焼の完結ということに関して深い関係がある。
5. 混合気の燃焼の反応速度は $1\sim 2\times 10^{-3}$ sec程度と思われる。

本実験で得られた確実な結論は少ないが、非常に早い反応である爆発現象であるので、その本質の実験的解明には多くの困難があった。多くの燃焼反応に対する物理数学的解法がある

が、可成多くの仮定のため実際と一致し難い点が多かった。さらに一歩ずつ深く研究して行く予定である。最後に本実験に種々御忠告教示頂いた大賀憲二先生、北大黒岩先生ならびに終始活動して頂いた小松製作所の久保田、東洋工業の竹林、不二越鋼材の福井の諸氏に深謝致します。

(昭和36年5月1日受理)

文 献

- 1) Starkman, E. S.: SAE Transaction **68**, 93 (1960)
- 2) Adams, G. K. and Pack, C.: Seventh Symposium on Combustion 812 (1960)
- 3) 長尾不二夫: 内燃機関学 182 (昭和35年3月)
- 4) 赤木 盈: 広島大学工学部研究報告 **5**, No. 2, 123 (1956)
- 5) Poncelet, J. et al.: Seventh Symposium (International) on Combustion 256 (1960)
- 6) 田中宗信・他: 機械試験所報告 **14**, No. 4 July (1960)
- 7) 齋間 厚: 日本機械学会第36期総会講演会前刷 **5** (1960)
- 8) Handbook of Chemistry and Physics 39 th Edition (1958)
- 9) 柘植盛男: 内燃機関ハンドブック 53 (1960) (朝倉書店)
- 10) 熊谷清一郎: 機械の研究 **3**, No. 8, 469 (1951)
- 11) Engel, von A.: Ionized Gases, Clarendon Press Oxford, 5 (1955)