急速圧縮燃焼装置内静止予混合気圧縮における 天然ガスの希薄燃焼特性*

片岡 克己^{*1}, 瀬川 大資^{*2}, 角田 敏一^{*2}
東野 耿二^{*3}, 廣岡 重正^{*4}

Characteristics of Natural Gas Lean Combustion through the Compression of Quiescent Charge in a Rapid Compression Combustor

Katsumi KATAOKA, Daisuke SEGAWA, Toshikazu KADOTA,
Kouji HIGASHINO and Shigemasa HIROOKA

In order to develop a natural gas fueled spark ignition engine with high thermal efficiency and clean exhaust gases, combustion characteristics of natural gas and air mixtures were examined using a rapid compression combustor. We concentrated on lean mixtures because of their potential for high efficiency and low pollutant emissions. To elucidate the effect of compression-induced physical aspects on the combustion process, the charge was kept quiescent before the start of the compression process. The results showed that an increased charge pressure increased the time required for combustion. A high compression ratio or piston speed tended to shorten the combustion time, but their effects were rather weak. An increased humidity in mixtures measurably increased the combustion time. The stratified charge, which was examined using the soap bubble method, markedly improved the combustion process of lean mixtures.

Key Words: Internal Combustion Engine, Spark Ignition Engine, Premixed Combustion, Natural Gas, Lean Mixture, Combustion Process, Rapid Compression Combustor

1. ま え が き

エンジンの性能や排ガス特性に影響の大きい燃焼過程の研究には定容燃焼器のほか、実機あるいは急速圧縮燃焼装置が用いられる。定容燃焼器は観察窓の装着が簡単にでき、燃焼過程の観察や計測には便利であるが、給気温度は基本的に容器壁と同じであり、実験範囲は限定される。また、実機では給気の状態が種々因子の複雑なからみあいによって変化し、各条件と燃焼過程の関係を特定することは容易でない。これに対し、急速圧縮燃焼装置では給気の初期条件を正確に設定してエンジンの圧縮・燃焼過程を模擬できるという利点があり、有効な研究手段の一つと考えられる。

急速1回圧縮を実現する方法としては、圧縮空気や油圧駆動などのほか各種方式が提案され、研究に用いられているが^{(1)~(6)}、本報では大学の研究室で手軽に取扱えること、安価・安全・省スペースに配慮し、油圧駆動方式を採用した結果、専有面積約3.5 m²というコンパクトな装置を構築することができた。

著者らは天然ガスエンジンの排気浄化と性能改善に関する技術的指針を得るための研究を進めてきた。前報では定容燃焼器を用いて気体燃料-空気混合気の燃焼に関する基礎的研究⁽⁷⁾を行ったのにつづき、本報では静止給気を急速圧縮・燃焼させることによって、主として圧縮過程に伴う物理的要因が天然ガス-空気予混合気の火炎伝ば燃焼に及ぼす影響の調査を目的とした。熱効率向上と排気浄化を希薄混合気運転によって行うとの前提のもとで、希薄領域の予混合気を対象に初期圧力、圧縮比、燃焼室形状、ピストン速度、湿度あるいは天然ガスへのプロパンやブタンの添加が燃焼過程に及ぼす影響、およびEGRの影響について調べた。

また、希薄混合気の緩慢な燃焼を促進する一方法として、混合気を濃淡に二層化した層状給気の効果についてシャボン玉法によって調べた。

2. 実験装置および実験方法

試作した急速圧縮燃焼装置の概略を図1に示す。装置はシリンダとピストンからなる燃焼器と油圧駆動装置で構成されている。油圧駆動装置は最高8.6 MPaの燃焼圧力に対してピストンを上死点に保持することができる。圧縮時間は最短24 ms(相当回転速度1250 rpm)までの範囲で調節可能である。

* 原稿受付 1996年6月17日。

^{*1} 正員、岡山理科大学工学部 (〒700 岡山市理大町1-1)。

^{*2} 正員、大阪府立大学工学部 (〒593 堺市学園町1-1)。

^{*3} 正員、大阪ガス(株) (〒550 大阪市西区千代崎3-2-95)。

^{*4} 学生員、大阪府立大学大学院。

Fig. 1 Experimental apparatus

図2は燃焼器の概略図である。燃焼器は内径80 mm、行程120 mm、行程容積603 cm³の仕様をもつ。ピストンは頭部と円筒状の胴部から構成されており、頭部を交換することによって燃焼室の形状を変化させることができる。図3は実験に用いた3種類の燃焼室形状を示す。I形は基準とした燃焼室形状で、ピストン頂面に浅いくぼみを設けたもの、II形は頂面が平らなもの、III形は比較的深いくぼみを設けたものである。ピストン頂部を交換することによって、圧縮比が変化しないよう配慮した。

シリンダヘッドはシリンダ内に挿入されるピストン状の突起部をもち、スペーサを介してシリンダ端部に固定される。圧縮比はスペーサの厚さによって8~15の範囲で設定できる。シリンダヘッドには直径60 mmの観察窓を取付けることができる。ガスの給・排気孔、圧力計、温度計などの部品は燃焼室かんげきにあたるシリンダ周壁部分に取付けた。点火位置は今回の実験ではシリンダヘッドの中心とした。

シリンダ内の圧力経過はひずみゲージ式圧力変換器を用いて測定した。また、油圧駆動軸の端部にはスリット板とフォトインタラプタから成る位置検出器を取付け、ピストンの位置と運動を監視した。シリンダ内圧力とピストン位置信号は波形記憶装置を経て、パーソナルコンピュータに取り込み、記録・計算処理した。

本装置の圧縮過程の再現性を、空気を動作ガスとして検証した結果、圧縮時間の運転ごとの変動は測定精度未満であり、圧縮最高圧力のばらつきは初期圧力の

Fig. 2 Rapid compression combustor (RCC)

Fig. 3 Configuration of combustion chamber

設定誤差に依存するものの、最高圧力値の1%未満であった。

燃焼実験の手順は、まず、ピストンを下死点の位置に保持してシリンダ内を抜気し、その後、試料混合気を所定の条件で充てんする。給気導入時のガス流動を沈静化させるために約60 s放置の後、油圧装置を駆動して急速一回圧縮し、ピストンが上死点に到達してから所定の時間(10 ms)後に火花放電する。

供試燃料は都市ガス13A、圧縮初期温度 $T_i = 290$ Kのもとで、当量比 ϕ 、圧縮初期圧力 P_i 、圧縮比 ϵ 、燃焼室形状、ピストン速度(圧縮時間)、EGR比 ϕ (質量比)、湿度の各条件が燃焼過程に及ぼす影響について調べた。また、都市ガスに少量のプロパン、*n*-ブタンあるいはイソブタンを添加した混合燃料について燃焼過程を比較した。表1に基準の実験条件を示す。EGRの影響を調べる実験において、新混合気に混合する既燃ガスは、測定対象の混合気自身を前もって燃焼器内で燃焼させたガスである。なお、燃焼実験は同一条件で少なくとも5回繰返し、燃焼圧力線図において中央に位置する測定結果を代表値とした。

図4はシャボン玉法による層状給気燃焼実験のための燃焼室回りの構成を示す。この方法はシャボン玉の

Table 1 Base conditions

Mixture	City gas(13A) + dry air
Equivalence ratio	0.65
Initial temperature	290 K
Initial pressure	0.07 MPa
Combustion chamber	TYPE I
Compression ratio	11.9
Compression time	50 ms

Fig. 4 Combustion chamber for charge stratification

薄膜によって、点火ギャップ近傍混合気と周囲混合気の濃度差を点火時まで保持しようとするものである。その手順は、まず、シリンダ内に希薄混合気を充てんし、次にシリンジを用いてシャボン液とともに濃混合気を注入孔から注入する。濃混合気は徐々にステンレス細管をとおしてシリンダ内に導かれ、管の先端にシャボン玉を形成していく。シャボン玉は最終的に図4に示すようにシリンダヘッド内面に付着し、点火ギャップを包み込む位置に形成される。点火電極はシャボン玉作成後に押し込み、点火ギャップを形成後、ただちに点火する。なお、この方法を圧縮前に適用したかったが、その場合、注入混合気の体積が大きくなり、図4のような形状のシャボン玉を作ることができなかった。たとえできたとしても、それは圧縮行程中に壊れてしまうと考えられるので、ピストンを上死点に保持して一定容積のもとで実験することとした。

3. 実験結果および考察

図5は $\phi=0.65$ の静止予混合気を圧縮・点火燃焼した場合の火炎写真を、点火後の経過時間に対して示す。燃焼室にはI形を用い、シリンダヘッドに取付けた観察窓からI. I. 付 CCD カメラを用いて火炎像を撮影した。火炎は燃焼室中心(点火点)から円周部に向かって全方向にほぼ均等に伝ばしていることが確認され、圧縮過程によって給気内に偏心的な流動の生じていないことがわかる。

図6は圧縮燃焼過程の圧力線図 P および圧力線図

Fig. 5 Photographs of combustion in RCC

Fig. 6 Pressure records of combustion process in RCC

Fig. 7 Effect of equivalence ratio on combustion time

の解析から得られた燃焼質量率 α の経時変化を、種々の当量比について示す。燃焼質量率曲線は、燃焼過程の終盤になるほど燃焼質量率が高くなるという定容燃焼器内での燃焼過程と同じ形状を示している⁽⁷⁾。これらの測定結果をもとに点火から最高圧力到達までの所要時間 τ_{Pmax} を得て、燃焼時間の指標とした。

図7は当量比が τ_{Pmax} に及ぼす影響を示す。 τ_{Pmax}

Fig. 8 Effect of initial pressure on combustion time

Fig. 10 Effect of piston speed on combustion time

Fig. 9 Effect of compression ratio on combustion time

は $\phi=1.1$ で極小値を示し、混合気が希薄になるにつれて徐々に長くなり、 $\phi=0.7$ を超すと急激に長くなった。 $\phi \leq 0.5$ では火炎伝ばは起こらなかった。以下に $\phi=0.65$ の希薄混合気の燃焼過程に及ぼす諸条件の影響について示す。

図8は圧縮初期圧力 P_i が τ_{pmax} に及ぼす影響を示す。圧縮初期圧力が高くなるとともに τ_{pmax} は長くなるが、これは燃料の層流燃焼速度が圧力の上昇とともに低くなる⁽⁷⁾ ことによる。

図9は圧縮比 ϵ の影響を示す。圧縮比を高くすると τ_{pmax} は短縮される傾向がみられる。圧縮比を高くすれば圧縮終了時の圧力およびガス温度はともに上昇するが、圧力上昇は燃焼速度を減少させるのに対し、温度上昇は燃焼速度を増加させるので、 τ_{pmax} には相反する影響を及ぼす。圧縮比変更の燃焼過程に及ぼすもう一つの影響として、本実験では上死点かんげきを

小さくすることによって圧縮比を上げたが、これによる燃焼室形状の変化でガスの乱れが増加して τ_{pmax} を減少させたことが考えられる。

図10はピストン速度が τ_{pmax} に及ぼす影響を示す。ピストン速度を上昇させると τ_{pmax} はわずかに短縮されるものの、その変化は比較的小さい。実機においては回転速度を高くしても燃焼過程の完結に要するクランク回転角の増加はごくわずかである、すなわち、燃焼時間はピストン速度にほぼ比例して短縮されることは周知の事実である。本実験と実機との違いは、本実験では静止混合気を圧縮しているのに対し、実機では吸気の流入速度がピストン速度とともに変化することである。したがって実機においてピストン速度の上昇とともに燃焼時間が短縮されるのは、吸入行程で生成される混合気流動の増加によるものであることがわかる。

燃焼室形状の影響を図7(および図8, 9)でみると、 τ_{pmax} はピストン頂部にやや深くぼみをもつIII形、浅いくぼみをもつI形、頂面が平らなII形の順に長くなる。したがって点火位置に近い部分により多くの混合気が存在する燃焼室形状で τ_{pmax} は短くなるといえる。なお、本実験では上死点かんげきはIII形でも約10mmと大きいのでスキッシュの影響は小さいものと思われる。

図11は $\phi=0.65$ の希薄混合気の燃焼過程において湿度の変化が τ_{pmax} に及ぼす影響を示す。加湿範囲は絶対湿度12g/kgまでとし、これは圧縮初期状態の空気に対する相対湿度表示で68%に相当する。最大加湿時の混合気中の水蒸気量は質量比で1.14%、体積比で1.78%と微量であるが、 τ_{pmax} に及ぼす影響は比較的大きく現れた。これは元来 τ_{pmax} の長い希薄混合気

Fig. 11 Effect of humidity on combustion time

Fig. 13 Effect of EGR on combustion time

Fig. 12 Effect of additive fuel in 13A

にさらに不活性ガスが添加されたためと思われる。

図 12 には都市ガスにプロパンまたはブタンを添加した場合の τ_{pmax} に及ぼす影響について示す。添加燃料による燃焼時間短縮の効果はプロパンがもっとも大きく、次いで *n*-ブタン、イソブタンの順であり、この結果は都市ガスの主成分であるメタンにこれらの燃料を添加して行った、定容燃焼器内静止予混合気中の火炎伝ばの場合⁽⁷⁾と同様の傾向を示した。

図 13 には理論濃度混合気において、EGR 比 ϕ が τ_{pmax} に及ぼす影響を示す。EGR 比の増加とともに τ_{pmax} は急激な増加を示している。これは燃焼速度が EGR 比にほぼ反比例して減少することに加えて火炎温度の低下によるガス膨張速度の低下の相乗効果によるものと考えられる。なお、定容燃焼器内での静止予混合気の燃焼過程ではメタンおよびプロパンのいずれの燃料においても、EGR 比が約 15% で τ_{pmax} は EGR

Fig. 14 Pressure records of stratified charge combustion

Fig. 15 Effect of volume ratio of rich to lean mixtures in stratified charge

比 0% の場合の 2 倍に達する⁽⁷⁾ のに対し、急速圧縮燃焼過程では EGR 比 20% でも 2 倍に達しなかった。

給気の層状化が希薄混合気の燃焼過程に及ぼす影響を、図 4 の方法で作成した二層化給気について調べた。図 14 は全体当量比を $\phi_t = 0.65$ に保ちながら、全

体積に対する点火用混合気(当量比 $\phi_p=1.0$)の体積率 V_p/V を変化させた場合の燃焼圧力線図を示す。層状給気の燃焼では均一混合気($V_p/V=0$)の場合に比べて、点火から短時間で急速な圧力上昇がみられ、初期燃焼過程が大幅に促進されることがわかる。

図 15 は点火用混合気の体積率が τ_{Pmax} に及ぼす影響を示す。体積率の増加に伴って τ_{Pmax} は短縮され、体積率が 11% の場合には均一混合気の場合の約 1/2 に短縮された。ただし、点火用混合気体積率の過度の増加は主混合気をより希薄化することになるので、エンドガス部分まで正常に火炎伝播が行われるかどうかは疑問である。今回の実験条件では体積率 8% 前後が適当かと思われる。なお、点火用混合気濃度 ϕ_p が 1.0 と 1.1 では τ_{Pmax} にほとんど差を生じなかった。

4. ま と め

天然ガスエンジンの排気浄化と性能改善に関する技術的指針を得ることを目標として、急速圧縮燃焼装置を用いて圧縮過程にかかわる物理的諸因子の燃焼過程に及ぼす影響について、都市ガス 13A を用いて実験的に調べた結果を以下に要約する。

当量比 $\phi=0.65$ の希薄混合気を静止状態から圧縮する燃焼過程において

- (1) 圧縮初期圧力が高くなると燃焼時間は長くなる。
- (2) 圧縮比が高くなると燃焼時間は短縮される。
- (3) ピストン速度の増加によって燃焼時間は短縮

されるが、その変化は実機で経験的に知られている変化に比べてかなり小さい。

(4) 点火位置近傍により多くの混合気が配置される燃焼室形状において燃焼時間は短縮される。

(5) 加湿は燃焼時間を長くする。

(6) 都市ガスにプロパンあるいはブタンを少量添加すれば燃焼時間は短縮される。

また、

(7) 理論当量比において EGR 比を増加するとともに燃焼時間は長くなり、その比率が 15% を超えると変化はより急激になる。

(8) 点火位置近傍に適正濃度の混合気を配して給気を層状化することによって希薄混合気の燃焼時間を大幅に短縮することができる。

本研究の遂行にあたり、大阪府立大学付属実験工場の皆様には装置製作にご協力をいただいた。また、大阪府立大学の学生であった溝淵剛史君の協力を得た。

ここに厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) 津田公一・ほか 3 名, 内燃機関, 16-204(1977), 9-15.
- (2) 志賀聖一・ほか 2 名, 機論, 51-465, B(1985), 1582-1590.
- (3) 村瀬英一・ほか 2 名, 内燃機関, 31-395(1992), 9-13.
- (4) 小笠原光信・ほか 4 名, 内燃機関, 15-180(1976), 9-15.
- (5) 神本武征・ほか 4 名, 機論, 55-512, B(1989), 1253-1257.
- (6) 和栗雄太郎・ほか 3 名, 機論, 54-501, B(1988), 1194-1201.
- (7) 片岡克己・ほか 3 名, 機論, 62-596, B(1996), 1638-1643.