高過給ディーゼル機関の着火遅れに関する研究*

小堀 繁治^{*1}, 横須賀 篤^{*2}

Study on Ignition Delay in High Turbo-charged Diesel Engines

Shigeharu KOBORI^{*3} and Atsushi YOKOSUKA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ibaraki National College of Technology,
866 Nakane, Hitachinaka-shi, Ibaraki, 322-8508, Japan

Ignition delay of diesel fuel sprays is investigated experimentally using a rapid compression-expansion machine at operating conditions of high turbo-charged DI diesel engines. A comparison of experimental results with published data shows that higher cylinder pressure can shorten ignition delay under the high pressure injection. Since this results in effects of both higher cylinder pressure and higher charged oxygen amount, we tried to examine independently the effect of each factor on ignition delay shortening at higher surrounding air pressure. The results shows that an increase in charged oxygen amount at constant surrounding gas pressure results in a drastic decrease in ignition delay, and an increase in surrounding gas pressure at constant charged oxygen amount results in a slight increase in ignition delay below the gas temperature of 900 K.

Key Words: Diesel Engine, Internal Combustion Engine, Ignition, Combustion, Fuel Injection, Ignition Delay

1. まえがき

着火遅れはディーゼル燃焼を支配する重要な因子の一つであるため、古くは Wolfer⁽¹⁾, Levengood-Wu⁽²⁾, Lyn⁽³⁾, EI-wakie ら⁽⁴⁾によって研究が行われ、我が国では廣安ら⁽⁵⁾の定容燃焼容器や池上ら⁽⁶⁾の急速圧縮装置による研究が行われている。しかし、これらの研究では雰囲気圧力が 5MPa 以下、噴射圧力も 20MPa 程度という条件のため最新式ディーゼル機関に対して適用できるか不明である。特に最近の自動車用ディーゼル機関では高出力、高熱効率化の点から高過給化が進み、最高圧縮圧力は 10~15MPa、燃料噴射系も排出微粒子の低減等のために噴口径は 0.2mm 以下、最高燃料噴射圧力は 100~200MPa と高い水準に移行しつつある。このような状況下で燃焼を行うと、着火遅れは従来より短縮することが経験的に知られている。

そこで本研究では最新式の高過給ディーゼル機関の燃焼条件で着火遅れを体系的に調べることを目的とし、

燃料噴射圧力 100MPa、噴口径 0.2mm 一定の下で、雰囲気圧力を 4.2~16MPa、雰囲気温度 700~1500K まで変化させて実験を行った。また高過給時の着火遅れに与える影響因子に雰囲気圧力と充填酸素質量の増加があげられるが、各々の因子が着火遅れにどのような影響を与えるかを、圧力一定で充填酸素質量を変化させた場合、および充填酸素質量一定で窒素充填して圧力を変化させた場合についての着火遅れ測定を試みた。

2. 着火遅れの計測

2.1 実験装置 実験にはディーゼル機関の燃焼を単発で模擬できる急速圧縮膨張装置⁽⁷⁾を用い、その燃焼室は図 1 に示される様にボア 60mm、ストローク 96mm、最高圧縮比 16.1 である。燃焼室は直噴式ディーゼル機関の 1 本分の噴霧が占有する燃焼室形状を模擬しており、噴口出口からキャビティー内壁までの距離 28 mm、厚さ 11.5mm とした。燃焼室内壁は電気ヒーターにより加熱し 453K 一定とし、ノズルは冷却ジャケットで冷却し、ノズル先端温度は 353K 一定とした。本実験では急速圧縮後ピストンが上死点で静止している期間中に燃料噴射を行い、定容燃焼させた。

* 原稿受付 2002 年 8 月 9 日。

^{*1} 正員、茨城工業高等専門学校(〒312-8508 ひたちなか市中根 866)。^{*2} 学生員、茨城工業高等専門学校専攻科。

E-mail: kobori@mech.ibaraki-ct.ac.jp

Fig. 1 Cross section of the combustion chamber of the RCEM used for ignition delay experiment

Fig. 2 Definition of ignition delay

燃料噴射装置には 30～150MPa の圧力範囲で等圧噴射可能な単発の電子油圧制御の高圧ユニット燃料噴射装置⁽⁸⁾を用いた。噴射率形状は噴射圧によらず、ほぼ矩形とみなすことができる。燃料には標準燃料であるセタンとヘプタメチルノナン(HMN)の混合燃料を使用し、セタン価を 55 とした。

着火遅れはストロークと初期圧力を調整し、上死点圧力一定の下で、雰囲気温度を変化させながら測定した。本研究では燃料噴射始めをレーザー光遮断法により測定した。即ちシリンダーヘッドに設けた直径 6mm の石英窓からレーザー光をノズル噴口直下に入射し、ピストン表面の反射鏡で反射させる。噴射開始時に噴霧先端がレーザー光を遮断すると、光電変換器の出力が変化するので、その変化から噴射始めを決定した。筒内圧力は圧電素子式圧力変換器(AVL, GU21C)で測定した。燃料噴射開始時の燃焼室内の温度は白金抵抗線温度計で測定した燃焼室中央部温度とした。

空気を用いると最高雰囲気温度は 1100K まで実現できるが、それ以上の温度条件では比熱比の高いアルゴン(Ar)–ヘリウム(He)–酸素(O₂)混合気を用いた。混合気は体積割合で Ar:He:O₂=53:26:21 と調整し、混合気分子量が空気の場合と等しくなるようにした。

2.2 着火遅れの定義 図 2 に筒内圧力の時間変化の拡大図を示す。燃料噴射は圧縮行程終了後、3～3.5ms に行う。高温高压の窒素中に燃料を噴射すると、

Fig. 3 Cylinder pressure histories at various air pressures with air temperature, T_m , as a parameter

燃料の吸熱により筒内圧力は直線的に減少する。着火遅れ τ_1 は噴射開始から筒内圧力が非燃焼時の圧力降下線①から離れるまでの時刻とし、 $\tau_1 + \tau_2$ は噴射開始から燃焼時の圧力と噴射前の熱損失による圧力降下線を延長した線②とが交差するまでの時刻と定義した。

3. 実験結果

3.1 雰囲気圧力の影響 雰囲気圧力が着火遅れに及ぼす影響を調べるため、燃料噴射圧力 $P_{inj}=100$ MPa 一定の下で噴射開始時の雰囲気圧力 P_a を 4.2, 10, 16 MPa と変化させて実験を行った。図 3 に P_a をパラメータとして、噴射開始時の雰囲気温度 T_m が変化した場合の筒内圧力の時間変化を示す。なお着火は全て噴射期間中に起きており、燃料の噴射期間、すなわち燃料噴射量に依存しない。いずれの実験条件においても筒内圧力は噴射後、約 0.1ms 経過した後以降に降下し始める。この現象の理由については不明だが、特徴として、雰囲気温度が高い程、圧力降下開始時刻が早く、そして圧力降下率が大きくなること、また雰囲気圧力には殆ど影響されないこと、等があげられる。その後、筒内圧力は極小値をとり、着火後急激に上昇する。

着火遅れに対する雰囲気圧力の影響を見ると、例えば $P_a=4.2$ MPa の $T_m=845$ K, $P_a=10$ MPa の $T_m=844$ K, 及び $P_a=16$ MPa の $T_m=835$ K の筒内圧力を比較すると、ほぼ等しい雰囲気温度にも関わらず、 P_a の上昇に伴い、着火遅れ τ_1 は短くなる。また τ_1 後の圧力上昇率は急激になっているので、 τ_2 も短くなっていることがわかる。

これらの筒内圧力データより着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ を測

Fig.4 Effect of surrounding air pressure on ignition delay, $\tau_1 + \tau_2$, using gas law temperature, T_a

Fig.5 Effect of surrounding air pressure on ignition delay, $\tau_1 + \tau_2$, using air temperature at the center of combustion chamber, T_m

Fig.6 Effect of surrounding air pressure on ignition delay, τ_1 , using air temperature, T_m

Fig.7 Effect of surrounding air pressure on ignition delay, τ_2 , using air temperature, T_m

定した。初めに雰囲気温度の定義が着火遅れの傾向に与える影響について調べた。以前、著者らが報告した結果⁹⁾では、燃料噴射時の雰囲気温度に筒内圧力を用いて気体の状態方程式から求めた温度 T_a を用いた。同様の方法で整理した結果を図4に示す。白金抵抗線温度計により測定した燃焼室中央部温度 T_m で整理した結果を図5に示す。何れも雰囲気圧力 P_a をパラメータとして、着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ をアレニウスプロットしたものである。両結果とも雰囲気圧力の上昇と共に $\tau_1 + \tau_2$ は短くなり、着火遅れは低温側と高温側で温度に対する傾きが変化している。 T_a で整理した場合、着火遅れの傾きは全温度領域で P_a の上昇と共に小さくなる。ま

た着火遅れの傾きが変化する温度は低温側に移動する傾向がある。一方、 T_m で整理した場合、着火遅れの傾きは高温側で P_a によらず、ほぼ一定で、低温側では P_a の上昇と共に僅かに小さくなる。着火遅れの傾きが変化する温度についても P_a によらず約900K一定である。Pfahl¹⁰⁾らの衝撃波管を用いた予混合気の着火遅れの測定結果より多少圧力や当量比にも影響されるが、炭化水素系燃料において高温酸化反応が開始される温度が900K以上であることを考えるならば、着火遅れを雰囲気温度 T_m で整理した結果の方が、着火遅れ現象を論じるのに都合がよい。従って、本論では代表温度に燃焼室中央部温度 T_m を用いることにした。

雰囲気圧力 P_a をパラメータとした場合の着火遅れ

Fig.8 Cylinder pressure histories at various gas pressures with air temperature, T_m , as a parameter, in the case of the constant charged oxygen amount

τ_1 と τ_2 を図6および図7に示す。 P_a が上昇すると τ_1 , τ_2 共に全温度域で同じ割合で減少する。また $\tau_1 + \tau_2$ と τ_1 を比較すると全体的に τ_1 は短くなるが、着火遅れの全体的な傾向は類似である。しかし τ_2 は何れの P_a において、温度の逆数の増加と共にほぼ直線的に増加する。以上の結果から着火遅れの全体的な傾向は τ_1 に大きく依存することが分かった。

3・2 雰囲気圧力の影響(充填酸素質量一定) 過給では圧力と充填酸素質量の増加が同時に生じる。そこで着火遅れに対する両者の影響を独立に調べる試みを行った。初めに充填酸素質量一定で窒素添加し、雰囲気圧力を4.2から10MPaまで上昇させた場合の着火遅れを測定した。この実験では上死点での充填酸素質量を等しくするため、酸素の体積割合が8.7%の混合気を用いた。筒内圧の時間履歴を図8に示す。充填酸素質量が $P_a = 4.2$ MPa相当で窒素充填した $P_a = 10$ MPa($O_2: 8.7\%$)の圧力履歴は $P_a = 4.2$ MPa(Air)の圧力履歴に近い傾向を示し、また充填ガス量が $P_a = 10$ MPa(Air)と等しいにも関わらず、燃料の吸熱による圧力低下率も $P_a = 4.2$ MPa(Air)の場合とほぼ同じである。

図9および図10にはその時の着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ と τ_1 を示す。 $P_a = 10$ MPa($O_2: 8.7\%$)の着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$, および τ_1 は明らかに $P_a = 4.2$ MPa(Air)の着火遅れに近い傾向を示すが、 $T_m = 900$ K以下の温度領域では若干着火遅れが長くなる傾向がある。この原因として雰囲気圧

Fig.9 Effect of surrounding gas pressure on ignition delay, $\tau_1 + \tau_2$, under the constant charged oxygen amount

Fig.10 Effect of surrounding gas pressure on ignition delay, τ_1 , under the constant charged oxygen amount

力の上昇に伴い、微粒化特性や先端到達距離が減少して空気導入率が悪化したこと等も考えられる⁽¹¹⁾が、過剰な不活性ガスが、特に化学遅れが支配的である温度領域で、着火を遅らせていると思われる。

3・3 充填酸素質量の影響(雰囲気圧力一定) 最後に着火遅れに及ぼす充填酸素質量の影響を調べるため、雰囲気圧力 $P_a = 4.2$ MPaとし、 $P_a = 10$ MPa相当の充填酸素質量で着火遅れを測定した。混合ガスの酸素の体積割合は52%である。この時の筒内圧力の時間履歴を図11に示す。 $P_a = 4.2$ MPa($O_2: 52\%$)の圧力は $P_a = 10$ MPa(Air)の圧力経過に類似であり、燃料の吸熱による圧力低下率も類似している。

着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ を図12, τ_1 を図13に示す。着火遅

Fig.11 Cylinder pressure histories at various charged oxygen amount with gas temperature, T_m , as a parameter, in the case of constant surrounding gas pressure

れ $\tau_1 + \tau_2$ と τ_1 は共に $P_a = 10\text{MPa (Air)}$ の着火遅れより短くなっている。この理由は前節と同じく、不活性ガスの窒素は着火遅れを長くする作用があるので、この場合、充填酸素質量の増加と窒素質量の減少があいまって、 $P_a = 10\text{MPa (Air)}$ の場合の着火遅れより短縮したと考えられる。

3.4 着火遅れの実験式 着火遅れの関係式には次式で表されるアレニウスの式を適用するのが一般的

$$\tau_{id} = A \cdot P_a^{-n} \exp\left(\frac{E}{RT_m}\right)$$

である⁽¹²⁾。ここで τ_{id} は着火遅れ、 P_a は雰囲気圧力、 E はみかけの活性化エネルギー、 A と n は定数である。今回、空気を用いた場合のみを対象として、実験式の提案を行う。 AP_a^{-n} と雰囲気圧力 P_a の関係を求めるため、図5の着火遅れデータ $\tau_1 + \tau_2$ を最小二乗近似し、得られた近似直線より求めた AP_a^{-n} を雰囲気圧力 P_a に対してプロットしたのが図14である。着火遅れの傾きは高温域と低温域で異なるので、両図には各々の結果を個別に示してある。 E/R についても同様の手法で計算を行い、得られた結果が図15である。両図より AP_a^{-n} および E/R は雰囲気圧力 P_a と比例関係なので AP_a^{-n} と E/R を P_a の一次関数として求め、その結果を表1に示す。但し、表中の P_a および式中の T_m の単位はMPa, Kである。また表1の値を用い、アレニウスの式から計算した着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ および τ_1 を図16と図17に示す。同図には空気を用いた場合の実験値を

Fig.12 Effect of charged oxygen amount on ignition delay, $\tau_1 + \tau_2$, under constant surrounding gas pressure

Fig.13 Effect of charged oxygen amount on ignition delay, τ_1 , under constant surrounding gas pressure

破線で表しているが、計算された $\tau_1 + \tau_2$ および τ_1 は実験値とよい一致を示していることが分かる。

4. まとめ

小型急速圧縮膨張装置を用いて、高過給ディーゼル機関の運転条件で着火遅れを測定した。また過給時の着火遅れの短縮に対する雰囲気圧力、および充填酸素質量の影響を独立に調べ、以下の結論を得た。

1. 空気を用いて、雰囲気圧力を4.2MPaから16MPaまで上昇させたところ、着火遅れは減少し続けた。
2. 充填酸素質量を空気4.2MPa相当に維持したまま窒素量の調整によって雰囲気圧力を10MPaまで

Fig. 14 AP_a^n in the Arrhenius expression as function of surrounding air pressure

Fig. 15 E/R in the Arrhenius expression as function of surrounding air pressure

Table 1 Values of AP_a^n and E/R

	$\tau_1 + \tau_2$	
	AP_a^n	E/R
Low temp.	$(-3.73 + 3.98P_a) \times 10^{-6}$	$(10.9 - 0.207P_a) \times 10^3$
High temp.	$(25.2 - 1.13P_a) \times 10^{-3}$	3.21×10^3
	τ_1	
Low temp.	$(1.40 + 0.602P_a) \times 10^{-6}$	$(11.7 - 0.189P_a) \times 10^3$
High temp.	$(16.5 - 0.770P_a) \times 10^{-3}$	3.29×10^3

上昇させたが、着火遅れは空気の場合の 4.2MPa と比較して、高温領域でほぼ同じ、低温領域で多少長くなる傾向があった。

3. 雰囲気圧力 4.2MPa 一定で充填酸素質量を 10MPa 相当の条件まで増加させたところ、着火遅れは空気をういた 10MPa の着火遅れより短くなった。
4. 一連の実験で温度に対して着火遅れの傾きが変化する温度は約 900K であった。
5. ディーゼル噴霧の着火遅れに対して実験式を提案した。

本研究を行うに当たり、研究費の一部を日本機械学会研究分科会 RC176「エンジンの燃焼モデリングに関する調査研究分科会」から補助を受けたことを付記する。最後に本研究に協力された本科生渡辺正樹君に深く感謝致します。

参考文献

1. Wolfer, H.H., VDI Forschungsh.
2. J.C.Livengood and P.C.Wu, Fifth Symp.(Int.), Comb., (1995), Reinhold, p.347.
3. Lyn, W-T. and Valdmanis, E., Proc. Inst. Mech. Eng. 181, Pt. 2A, No.1 (1966-67), 34.
4. E.M.EI Wakie, et al, SAE Trans., Vol.64(1956), p.712.
5. 廣安・他 2 名, 機論, 46-403, B(昭 55), 531.
6. 池上・三輪, 他, 機論, 53-485, p.712.
7. 神本・他 4 名, 機論, 55-512, B(平 1), 531.
8. 神本・他 2 名, 機論, 53-487, B(昭 62), 1117.
9. 小堀・神本, 機論, 65-631, B(平 11), 1152.
10. U. Pfahl, et al, SAE Paper 970892.
11. 山根・他 2 名, 機論 59-580, B(平 4).
12. Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, (1998), 371-470, McGraw-Hill.

Fig. 16 Comparison of ignition delays measured with calculated by empirical expression ($\tau_1 + \tau_2$)

Fig. 17 Comparison of ignition delays measured with calculated by empirical expression (τ_1)