ディーゼル機関の着火遅れに及ぼす雰囲気条件, 噴射条件 および燃料性状の影響*

小堀 繁治^{*1}, 神本 武征^{*1}

Effects of Surrounding Gas Condition, Fuel Injection Condition and Fuel Properties on Ignition Delay in Diesel Engines

Shigeharu KOBORI and Takeyuki KAMIMOTO

Ignition delay of diesel fuel sprays is investigated experimentally using a rapid compression-expansion machine at operating conditions which are common in modern diesel engines. A comparison of experimental result with published data shows that higher injection pressure and smaller orifice diameter can shorten ignition delay respectively. In an attempt to make the physical ignition delay as short as possible, an experiment is conducted using injection nozzles with tiny orifices processed by a laser drilling. The result shows that ignition delay becomes short as the orifice diameter decreases, but it remains unchanged if the orifice diameter is smaller than 0.05 mm. It is also worth noting that there exists a temperature range around 790 K in which ignition delay remains almost constant being independent of the temperature. This trend is similar to that observed in shock tube studies concerning homogeneous mixture autoignition, implying that the ignition delay obtained with those nozzles is governed mainly by chemical ignition delay.

Key Words: Diesel Engine, Internal Combustion Engine, Ignition, Combustion, Fuel Injection, Ignition Delay, Rapid Compression-Expansion Machine

1. まえがき

着火遅れはディーゼル燃焼の性能を支配する重要な支配因子の一つであるため, 古くは Wolfer⁽¹⁾, Levengood-Wu⁽²⁾, Lyn⁽³⁾, El-wakil ら⁽⁴⁾によって研究が行われ, また我国では廣安ら⁽⁵⁾の定容燃焼器や池上ら⁽⁶⁾の急速圧縮装置による研究が行われている. これらの研究においては雰囲気圧力が 5MPa 以下, 燃料噴射圧力も 20MPa 程度という条件であるため, 得られた結果が最新型の機関に対して適応できるか不明である.

最近の自動車用ディーゼル機関では高出力, 高効率化等の点から高過給化が進み, 最高圧縮圧力は 10~15MPa, 燃料噴射系も微粒子低減対策等のため噴口径は 0.2mm 以下, 最高噴射圧力は 100~200MPa という高い水準に移行しつつある. このような条件において着火遅れは従来より短くなることが経験的に知られているが, 未だ体系的な研究例は見当たらない.

以上の様な観点から, 本研究では最新式ディーゼル機関の燃焼条件を含む様にして体系的に着火遅れを調べることを目的としている. すなわち燃料噴射圧力を 30MPa と 100MPa, 雰囲気圧力を 4.2MPa~12MPa, 雰囲気温度を 600K~1100K およびセタン価を 35~55 と広範囲に変化させて実験を行った.

また燃料噴射圧力 100 MPa のもとで噴口径を ϕ 0.025 mm まで小さくすることにより物理遅れを極限まで短縮し, 化学遅れの抽出を試みた.

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⁾を用いた. 急速圧縮膨張装置の燃焼室は図 1 に示されるようにボア ϕ 60 mm, 最大ストローク 100mm, 最高圧縮比 17.3 である. 燃焼室は直噴式ディーゼル機関の燃焼室形状を模擬し, ノズル噴口出口からキャビティー内壁までの距離を 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, ヘッド 2 箇所, ライナー 6 箇所およびピストン 1 箇所において表面から 1.5mm の位置で温度を常時 K 熱電対により

* 原稿受付 1998 年 6 月 2 日.

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部 (☎ 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1).

E-mail: kobori@ctrl.titech.ac.jp

Fig.1 Cross section of the combustion chamber of the rapid compression-expansion machine used for ignition delay experiment

モニターし、全ての位置で $453\text{K} \pm 2\text{K}$ の範囲に設定した。ノズルは冷却ジャケットにより冷却し、ノズル先端温度は 353K 一定とした。吸気供給側には吸気の予熱と予圧を行う蓄圧容器が連結されており、蓄圧容器内の気体温度および蓄圧容器から燃焼室までの吸気管温度も $453\text{K} \pm 2\text{K}$ の範囲に設定した。燃焼実験は新気を供給して、約5分後に行った。吸気供給系も燃焼室もすべて等しい温度に保っているため、充填気体の温度は一樣になったものとみなした。燃料噴射は急速圧縮後ピストンが上死点で静止した後に行い、定容燃焼させた。

燃料噴射装置には $30 \sim 150\text{MPa}$ の圧力範囲で等圧噴射可能な単発の電子油圧制御式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。

着火遅れは、上死点における雰囲気圧力一定のもとで雰囲気温度を変化させながら測定した。ストロークと初期圧力を調整することにより、上死点圧力一定で雰囲気温度を変化させた。

本研究では燃料噴射開始時期をレーザー光遮断法により測定した。すなわちシリンダーヘッドに設けた直径 6.0mm の石英窓からレーザービーム光をノズル噴口直下に入射し、ピストン表面に設けられた反射鏡で反射させる。噴射開始時にレーザー光が噴霧先端により遮断されることから噴射開始時期を決定した。筒内圧力は圧電素子式圧力変換器(AVL社製 GU21C, 30MPa 用)で測定した。雰囲気温度 T_a は燃料噴射開始時の測定筒内圧力を用いて気体の状態方程式から求めている。気体質量は初期圧力と初期温度から計算するが、その際、初期圧力はひずみゲージ式圧力変換器(共和電業 PHS-10KA, 1MPa 用)を用いて測定し、気体温度は壁温と等しいと仮定した。従って、 T_a の測定誤差は指圧計および熱電対の精度に依存し、誤差は 1% 程度と見積もられる。

雰囲気中に空気を用いると最高で雰囲気温度は 900K

Fig.2 Definition of ignition delay

までしか実現できないので、それより高温雰囲気条件では比熱比の高いアルゴン(Ar)–ヘリウム(He)–酸素(O_2)混合気を用いた。混合気の分子量は、Ar, He および O_2 の成分比を $\text{Ar:He:O}_2 = 53:26:21$ と調整することにより空気の分子量と等しくなるようにした。

2・2 着火遅れの定義 図2に時間に対するレーザー光の透過光出力および筒内圧力変化の拡大図を示す。燃料噴射は圧縮行程終了後、 $3\text{ms} \sim 3.5\text{ms}$ に行う。高温高压の雰囲気中に燃料を噴射すると、燃料の吸熱により筒内圧力は直線的に低下する。着火遅れ τ_1 は、燃料噴射開始時刻から筒内圧力が非燃焼時の圧力降下線(一点鎖線)より離れて上昇し始めるまでの時刻とした。着火遅れ τ_1 の時刻は目視で解析し、誤差は約 $\pm 15\mu\text{s}$ である。 $\tau_1 + \tau_2$ は、燃料噴射開始時刻から燃焼時の圧力と燃料噴射前の熱損失による圧力降下線を延長した線(点線)とが交差するまでの時刻と定義した。なお燃料噴霧はすべての条件において噴射期間中に着火している。

3. 実験結果

3・1 雰囲気圧力の影響 燃料にセタン($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$)とヘプタメチルノナン($\text{H.M.N.}, \text{CH}_3(\text{CHCH}_3)_7\text{CH}_3$)の混合燃料(セタン価55)を使用し、これを噴口径 0.2mm のノズルから圧力 100MPa で噴射する条件で雰囲気圧力の影響を調べた。すなわち雰囲気圧力を $4.2, 8, 12\text{MPa}$ と変化させた。図3に燃料噴射開始時の雰囲気温度 T_a を変化させた場合の筒内圧力の時間経過を各々の雰囲気圧力に対して示す。いずれの実験条件においても、圧力は燃料噴射後、 0.1ms 前後経過した後以降下し始め、降下した圧力は極小値をとった後、急激に上昇する。各々の雰囲気圧力において T_a が

Fig.3 Cylinder pressure diagrams at various ambient pressures with gas temperature, T_a , as a parameter

1000Kを越えると着火遅れは短縮されるが、着火後の筒内圧力上昇割合は緩慢になる傾向がある。

着火遅れに対する雰囲気圧力の影響を観察すると、例えば図3の $P_a=4.2\text{MPa}$ の場合の $T_a=880\text{K}$ の圧力線図と $P_a=12\text{MPa}$ の場合の $T_a=883\text{K}$ の圧力線図では、等しい雰囲気温度でも雰囲気圧力が高い場合は、圧力が着火遅れ τ_1 の後に急激に上昇する傾向がある。すなわち τ_2 が短くなる。

図4は測定した着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ を雰囲気圧力をパラメーターとしてアレニウスプロットしたものである。白抜き印が空気の場合であり、黒印が Ar-He-O₂ 混合気の場合である。なお噴霧の壁面衝突の時刻を知るため、直径 $\phi 60\text{mm}$ 、厚さ 12.3mm のパンケーキ型燃焼室を用いて、高速度写真撮影により非蒸発噴霧の先端到達距離を調べた。得られた噴霧先端到達距離の実験値をもとに準定常理論⁽⁹⁾により各条件の先端到達距離を算出し、先端到達距離が 28mm に達する時刻を得た。その結果を図4に点線で示す。

温度に対する着火遅れの傾きをみると温度依存性は、低温側で大きい。また温度に対する着火遅れの傾きが変化する点は、雰囲気圧力の上昇と共に低温側に移動する。

雰囲気圧力の増加に伴い着火遅れが短縮する理由については、雰囲気圧力が高くなると噴霧の微粒化特性は悪くなるが、噴霧内の酸素濃度が高くなり⁽¹⁰⁾、化学遅れが短縮するためと推測できる。

Fig.4 Effect of cylinder pressure on ignition delay, $\tau_1 + \tau_2$

Fig.5 Effect of cylinder pressure on ignition delay, τ_1

図5に着火遅れ τ_1 を筒内圧力をパラメーターとして示す。 $\tau_1 + \tau_2$ と τ_1 を比較すると全体的に τ_1 の方が短くなるが、筒内圧が高くなるにつれて $\tau_1 + \tau_2$ と τ_1 の差が小さくなる。これは図3の圧力線図より筒内圧が高くなると τ_1 後の圧力上昇割合が高くなるためである。

3・2 燃料噴射圧力の影響 同図には池上らの着火遅れの測定結果⁽⁶⁾を合わせて示してある。このデータは今回得られた雰囲気圧力 $P_a=4.2\text{MPa}$ のデータと

Table 1 Test nozzles

①	$\phi 0.2 \times 1$	$\phi 0.14 \times 2$	$\phi 0.1 \times 4$
			$\phi 0.1 \times 2$
②	$\phi 0.1 \times 1$	$\phi 0.05 \times 4$	$\phi 0.025 \times 16$

Table 2 Arrangement of nozzle orifices

No. of orifice	1	2	4
$\Delta \theta$	—	72°	30°

Fig. 6 Nozzle specification ($\phi 0.025\text{mm} \times 16$)

比較して3倍以上長くなっている。この差の理由の一つとして池上らの実験の燃料噴射圧力が14MPaであるのに対して、今回の実験では100MPaであることが考えられる。これを調べるため、雰囲気圧力4.2MPaで燃料噴射圧力30MPaとした場合の着火遅れを測定し、その結果を▽印で示す。燃料噴射圧力が下がると着火遅れは明らかに長くなるが、これだけでは両データ間の大きな差を説明することができない。噴霧の衝突距離、燃焼室壁面の温度分布、燃焼室内混合気の温度分布および噴射率形状なども着火遅れに大きな影響を及ぼすものと考えられる。

3・3 噴口径の影響 ノズル噴口径の影響を調べるため表1に示す7種類のノズルを用意した。シリーズ①および②はそれぞれ噴口総断面積が等しいが、シリーズ②の噴口総断面積はシリーズ①の1/4である。着火遅れに対する噴射率の影響が予想されるので、噴射率の影響を調べるため、噴口径0.1mmで噴口数を1, 2, 4と変化したシリーズ③を追加した。ノズル噴口数と噴口配置の関係は表2と図6に示す。燃料噴射圧力は100MPa、燃料には上述したセタンとH.M.N.の混合燃料(セタン価55)を使用した。

図7および図8に表1のシリーズ①および②の実験結果を示す。雰囲気温度 T_a が720K以下では噴口径が

Fig. 7 Effect of nozzle orifice diameter on ignition delay, $\tau_1 + \tau_2$ Fig. 8 Effect of nozzle orifice diameter on ignition delay, τ_1

小さくなると着火遅れが短くなる傾向があるが、その影響は小さい。原因として雰囲気温度が低い条件では着火遅れは主として化学遅れに支配されるため、混合気形成の遅れ、つまり物理遅れの差が明確に現れなかったと考えられる。

雰囲気温度 T_a が850K以上の条件では、噴口径が小さくなると明らかに着火遅れが短縮する傾向があり、特に高温になる程その傾向が強い。高い雰囲気温度域では化学的着火遅れ時間が短くなるので、全着火遅れ

Fig.9 A comparison of $\tau_1 + \tau_2$ between diesel fuel spray and homogeneous fuel-air mixture

中で物理遅れが占める割合が大きいと考えられる。準定常噴霧理論⁽⁹⁾を用いて、一定噴射圧力のもとで噴口径を小さくすると、噴口径が小さくなるほど噴霧内の平均当量比は早く減少する⁽¹¹⁾。これが高雰囲気温度において噴口径を小さくすると着火遅れが短縮する主な理由と考えられる。

図7および図8を観察すると噴口径を0.05mmから0.025mmにしてもこれ以上着火遅れは短くならない。この場合、雰囲気温度 T_a が720K~850Kの範囲で、温度が上昇しても、着火遅れが短くならない現象が観察される。この現象は次のように説明されている^{(12),(13)}、この温度範囲以下ではアルキル過酸化基 ROO が反応性の高い ROOH となるので、活発な連鎖分岐により多くの OH を生成し、着火に至る。しかし T_a が720K~850Kの温度範囲ではアルキル過酸化基 ROO は R と O_2 になり、更にオレフィンと HO_2 になる。 HO_2 は OH と比べて連鎖分岐の度合いが低く、この温度範囲では温度が高くなるほど HO_2 が多く生成される。そのため系全体の反応性が低くなるので、温度が上がっても着火遅れは短くならない。

3・4 化学遅れとの比較 噴口径が0.05mmと0.025mmの場合の着火遅れの現象を考察するために Pfahl ら⁽¹⁴⁾が行った衝撃波管による炭化水素系燃料の均一予混合気に対する着火遅れ、すなわち化学遅れとの比較を行った。そのためには、本実験における燃焼室内のキャビティー中心部付近の燃料噴射時の気体温度を知る必要があるため、直径15 μ mの白金抵抗線温度計(時定数0.8ms)で気体温度を実測した。その温度を T_m で表す。

図9に雰囲気圧力が等しい場合の着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$

Fig.10 A comparison of τ_1 between diesel fuel spray and homogeneous fuel-air mixture

を温度 T_m に対してプロットして両者の比較を示す。図10には τ_1 に関する比較を示す。Pfahl らのデータは当量比 $\phi=1$ のデータであり、 τ_1 は冷炎発生までの時刻、 τ_{DDT} は熱炎発生までの時刻を表している。Pfahl らは燃料にセタン価56のn-ヘプタンを使用しているが、3・5節で述べるようにセタン価が等しければ燃料組成が異なっても着火遅れはほぼ等しいので Pfahl らの結果との比較を行った。なお燃焼室中心温度 T_m は平均雰囲気温度 T_a より100~150K高く、このことは燃焼室周辺部の温度は中心部より相当低いことを示している。

図9および図10を見ると小噴口径ノズルからの噴霧の着火遅れと均一予混合気の着火遅れ(以下化学遅れと記す)とは概して近い値を示している。また図9で $T_m=880$ K~1000Kの範囲で、両データ共に温度を変えても着火遅れが変わらない現象が観察される。このことから小噴口径ノズルからの噴霧では物理遅れが極めて短くなり、その結果、着火遅れが化学遅れに近い値になったものと考えられる。

温度 T_m が880Kより低温の範囲では図9の $\tau_1 + \tau_2$ も図10の τ_1 も噴霧の着火遅れが化学遅れより長くなっている。 $T_m < 880$ Kの条件では着火遅れが長いため図4から分かるように噴霧は壁面に衝突した後、温度の低い燃焼室のキャビティー周辺部で着火すると考えられる。また着火遅れが長いので噴霧内の当量比が全体に低くなった状態で着火する。化学遅れは当量比が低いほど長くなる傾向がある。この2つの理由により雰囲気温度が低い条件で噴霧の着火遅れが量論比における化学遅れにより長くなったものと考えられる。

$T_m > 880$ Kの領域では噴霧の着火遅れと化学遅れは

Fig.11 Time history of cylinder pressures in the case of a nozzle diameter of $\phi 0.025\text{mm}$ with T_a as a parameter

交差しており、これに関してはよく説明できない。

$T_m > 1000\text{K}$ では噴霧の着火遅れが再び化学遅れより長くなっており、これについては次の3点が理由として考えられる。1)着火遅れが短いため着火は噴口近傍、つまり燃焼室周辺で生じる。2)着火遅れが短いため着火は比較的燃料過濃な状態、すなわち蒸発により温度低下した状態で発生する。3)高温条件下では化学遅れに対して物理遅れが無視できなくなる可能性がある。

着火現象をより詳しく調べるために $\phi 0.025\text{mm} \times 16$ のノズルを用いた場合の筒内圧の時間変化を調べた。その結果を図11に示す。この図は燃焼時の圧力から非燃焼時の圧力降下線を差し引いたものである。これによると $T_m = 806\text{K}$ の場合と $T_m = 1197\text{K}$ の場合を除いて、圧力は最初緩やかに上昇し、その後急激に上昇する。特に $T_m = 867\text{K}$ と 912K の場合に顕著である。噴霧の場合は連続的に燃料が供給されており、その着火現象は予混合気の場合とは異なる。しかし図11に観察される2段階的な圧力上昇は、図12に示すように順次噴射される燃料要素による2段階的な圧力上昇が準定常的に重ね合わせられた結果と考え、一応説明はつく。着火直後の圧力上昇が広い温度範囲で2段になることは Pfahl らの予混合気の実験においても観察されている。

3・5 セタン価およびセタン価向上剤の影響 燃料について表3に示す5種類の燃料を準備した。基準燃料は *n*-ヘキサデカン(セタン)、デカリンおよび1-メチルナフタレン(1-M.N.)の混合燃料である。軽油中の直鎖成分、シクロ成分および芳香族成分をそれぞれセタン、デカリンおよび1-M.N.で代表させた。計算セタン価は35, 45, 55である。またセタン価向上剤の影響を調べるために2-エチルヘキシル硝酸塩(2-E.H.N.)

Fig.12 Schematic of two-stage ignition for diesel spray

Table.3 Test fuels

1	233cm ³ :Cetane 300cm ³ :Decalin 467cm ³ :1-M.N.	← Calculated C.N.=35
2	233cm ³ :Cetane 300cm ³ :Decalin 467cm ³ :1-M.N. +4cm ³ :2-E.H.N.	← Calculated C.N.=45
3	333cm ³ :Cetane 300cm ³ :Decalin 367cm ³ :1-M.N.	
4	333cm ³ :Cetane 300cm ³ :Decalin 367cm ³ :1-M.N. +4cm ³ :2-E.H.N.	← Calculated C.N.=55→
5	433cm ³ :Cetane 300cm ³ :Decalin 267cm ³ :1-M.N.	

1-M.N.:1-Methylnaphthalene, 2-E.H.N.:2-ethylhexyl nitrate

をセタン価35および45の燃料1000 cm³に4cm³加え、それぞれセタン価45および55とした。これらの燃料を噴口径0.2mm、噴射圧力100MPaで雰囲気圧力 $P_a = 4.2\text{MPa}$ の雰囲気中に噴射した。

3・5・1 セタン価の影響 セタン価向上剤を加えない計算セタン価35(No.1), 45(No.3)および55(No.5)の燃料で測定した着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ を図13に示す。セタン価が着火遅れに及ぼす影響を観察すると、 T_a が740K以上の高温領域では着火遅れに対するセタン価の影響はほとんどないが、 T_a が740K以下の低温領域ではセタン価の増加に伴い着火遅れが短縮する。

直噴式ディーゼル機関を用いた実験によると⁽¹⁵⁾、基準燃料にセタン価向上剤(2-E.H.N.)を加えてセタン価を43.9~64.1に変化させた場合、高負荷域ではセタン価を20.2上昇させても着火遅れは約0.15msしか短縮しないが、低負荷では約0.3ms短縮した。高温条件でセタン価の影響が小さく、低温条件でその影響が大きいというこの結果は本実験の結果と一致する。

3・5・2 セタン価向上剤の影響 セタン価向上剤を加えないセタン価55(No.5)の燃料とセタン価45の燃料にセタン価向上剤を加え、セタン価55とした燃料(No.4)に対する着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ とセタン価45

Fig.13 Effect of cetane number on ignition delay, $\tau_1 + \tau_2$

(No.3)の燃料に対する着火遅れ $\tau_1 + \tau_2$ をまとめて図14に示す. 図よりセタン価45の燃料にセタン価向上剤を混入させると低温領域で着火遅れが短くなっている. セタン価の等しいNo.4とNo.5の両燃料の着火遅れの差をみると両者の間にほとんど差は見られない. 同様の傾向がセタン価45の場合でも得られた. 以上の結果からセタン価が等しければセタン価向上剤の有無に関係なく, 燃料噴霧の着火特性は等しいと言える.

4. まとめ

小形急速圧縮膨張装置を用いて雰囲気条件, 噴射条件および燃料組成を変化させて燃料噴霧の着火遅れを測定した結果, 以下の結論を得た.

1. 燃料噴射圧力および雰囲気圧力を上昇させると着火遅れは短縮する.
2. 噴口径を小さくすると着火遅れは短くなるが, 噴口径が $\phi 0.05\text{mm}$ 以下になると着火遅れはほぼ一定となる. この場合の着火遅れと温度の関係は, 衝撃波管による予混合気の着火遅れの結果と定性的により一致を示す.
3. $T_a > 740\text{K}$ では着火遅れに対するセタン価の影響はほとんどないが, $T_a < 740\text{K}$ ではセタン価の増加に伴い着火遅れが短縮する.
4. セタン価向上剤の有無に関わらずセタン価が等しければほぼ同等の着火遅れが得られる.

Fig.14 Effect of cetane improver on ignition delay, $\tau_1 + \tau_2$

本研究を行うに当たり当時学部学生であった太田宏一君, 中村一成君, 大沼健太郎君および斎藤文一君達の協力を得た. 以上を記して謝意を示す.

参考文献

1. Wolfer, H.H., VDI Forschungsh., 9-392 (1938), 15
2. J.C. Livengood and P.C. Wu, Fifth Symp. (Int.), Comb., (1955), Reinhold, 347
3. Lyn, W.-T. and Valdmanis, E., Proc. Inst. Mech. Eng. 181, Pt. 2A., No.1 (1966-67), 34
4. M.M. EI Wakil, et al, SAE Trans., Vol.64 (1956), 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, B(昭62), 712
7. 神本・他4名, 機論, 55-512, B(平元), 531
8. 神本・他2名, 機論, 53-487, B(昭62), 1117
9. 和栗・他3名, 機論, 25-156 (昭34), 820
10. 山根・他2名, 機論, 59-580, B(平4), 1955
11. 小堀・他2名, 機論, 62-594, B(平8), 814
12. S.W. Benson, Proc. 21th Symp. (Int.) Combust., (1986), 703
13. J.F. Griffiths, Prog. Energy Combust. Sci., Vol.21, (1995), 25
14. U. Pfahl, et al, SAE Paper 970892, (1997)
15. Li, X., et al., SAE Paper No. 962116, (1996)