高速度撮影によるディーゼル機関の燃焼 およびスート生成に関する研究*

塩 路 昌 宏^{*1}, 伊 藤 智^{*2}
山 根 浩 二^{*1}, 池 上 詢^{*1}

A Study of Diesel Combustion and Soot Formation as Observed by High-Speed Photography

Masahiro SHIOJI, Satoru ITO,
Koji YAMANE and Makoto Ikegami

The processes of combustion and the soot formation in a direct-injection diesel engine were studied experimentally at a low engine speed. Injection was performed by a specially designed injection system relying on the principle of fast hydraulic acceleration of a spool. High-speed photographs at an injection pressure up to 120 MPa show that luminosity fluctuations of flames become less over the combustion space as the injection pressure increases, due partly to the fact that combustion becomes rapid and partly to the leaner mixture formed. Soot clouds taken by using a laser-light sheet method at similar rates of heat release but different injection pressures show that soot clouds do not exist in the later part of combustion processes at a pressurized injection and a smaller nozzle diameter.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Combustion, Soot Formation, Pressurized Injection, Heat Release Rate, High-Speed Photograph, Laser-Light Sheet Method

1. ま え が き

ディーゼル機関の燃焼およびスート生成に関しては従来より多くの研究があり、最近では火炎の高速度撮影と併せてレーザシート法による燃焼室内特定断面のスート可視化観察が試みられている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかし、多様な運転条件における火炎およびスート粒子の挙動についての把握はまだ十分になされているとは言えない。そこで、本報告では実用上問題となる発進時の燃焼およびスート生成に注目し、とくにスート低減に有効とされる高圧噴射の作用について詳細に調べることを目的とする。そのため、機関回転数の低い条件で噴射圧力を変更することが必要であり、ここではスプール加速式高圧発生装置を用いて機関運転を行い、そのときに生じる火炎の変化を高速度写真により捉えたとともに、熱発生率経過と比較して燃焼およびスート生成過程について調べる。さらに、初期の熱発生が適度に抑えられる2つの噴射圧力とノズル噴孔径の条件で、直接写真と同時にレーザシート法による燃焼過程中的スート粒子の空間分布を観察する。それらの結果より、噴射圧力を高めるにしたがって輝度むらの少ない火炎が生じること、スート雲は燃焼後期に消失するこ

となどを立証する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験機関および光学系 実験には既報⁽⁴⁾と同様ループ掃気式二サイクル単シリンダ直接噴射式ディーゼル機関(シリンダ径 $\phi 110$, 行程 120 mm)を使用した。噴霧ならびに火炎の高速度撮影およびレーザシート法が実施できるように、燃焼室とシリンダヘッドを図1のように改造した。すなわち、シリンダヘッドに $\phi 70$ mmの強化ガラスを取り付け、これにより噴霧一本についての状況を観察できる。さらに、平ピストン上にリング形ガラスを装着してシート光の光路を設けるとともに、口径 63 mm, 深さ 14 mm, 上死点すきま 0.8 mmの深皿形燃焼室が形成される。また、シリンダヘッドとライナ間のスペーサに一辺 15 mm, 長さ 45 mmの直角プリズムを装着してあり、観察窓から導入したレーザシート光を燃焼室の高さ方向に移動できる。

図2に本実験における光学系を示す。シート光光源にはNd:YAGパルスレーザ(Spectra Physics DCR-11)を用い、第2高調波(波長 532 nm, ビーム径 6.4 mm)を選んで最大出力約 100 mJで作動した。レーザ光は平凸レンズ(焦点距離 $f = 500$ mm) および円筒レンズ($f = 25$ mm)により幅約 40 mm, 厚さ約 35 μ mのシー

* 平成5年7月14日 第11回内燃機関シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成6年5月30日。

*¹ 正員, 京都大学工学部 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)。

*² 新日本製鐵(株) (〒299-11 君津市君津1)。

ト状にして、スペーサに取り付けてあるプリズムにより燃焼室内に導き、シリンダヘッド下面 5 mm の断面へ照射した。燃焼室内のスート粒子からの散乱光は、イメージンシファイヤ（浜松ホトニクス C4273）の蛍光面上に結像し、これを 35 mm カメラにより撮影した。そのさい、輝炎からの発光の影響を除くため、レーザ光の波長を透過する半幅幅 5 nm の非金属干渉フィルタ（透過率 80 %）を挿入するとともに、イメージンシファイヤの高速ゲート（約 100 ns）をレーザパルスと同期させた。レーザは指定クランク角時期に発光させ、流しカメラ装置（フィルム速度 18 cm/s）を用いて連続発火サイクルにおける散乱像を撮影した。さらに、火炎発達状況を高速カメラ（Nac E-10）により設定速度 5,000 fps で散乱像と同時に撮影し、両画像を比較することによりスート生成状況を調べた。

図1 可視化用実験機関

図2 レーザシート法のための光学系

上述の高速撮影のための燃焼室改造によって機関有効圧縮比が低下する。そこで、実験では給気を電気ヒータにより加熱し、さらにモータリング運転中にアルゴン79%－酸素21%混合気に切り換えて圧縮温度を高めた後発火運転を開始した。これにより、着火遅れが通常とほぼ同程度に保たれるとともに、すすによって窓ガラスが汚れる前に約5サイクルの状況を高速撮影することができる。ただし、アルゴン混合気の使用により火炎温度が上昇するので燃焼が通常と若干異なる可能性がある。

シリンダ内圧縮始めの酸素純度を四サイクル機関なみに保つため、燃料噴射は機関主軸の2回転に1度行った。燃料には、トリデカンを主成分とするパラフィン系燃料（日本石油ソルベント#0-M, セタン指数80, 比重0.757）を用いた。機関回転数は約950 rpmとし、スワールは掃気孔を部分的に閉じることによって発生して圧縮始めにおけるスワール比を2.0に設定した。

2.2 燃料噴射およびノズル 燃料噴射には通常のジャコ式噴射ポンプJK (Bosch PE2B100) と高圧噴射を行うためのスプール加速方式の電磁油圧駆動燃料噴射装置KD-3^⑤を用いた。高圧噴射装置は図3のように構成され、スプールおよびプランジャの急加速によって生じる圧力波をテーパ状の噴射管によって増圧し高圧を発生する。スプールの加速は、電磁パイロット弁およびシャトル弁を順に開弁して圧力室1と2の圧力均衡を崩すことによって行い、噴射時期および噴射量はそれぞれ電磁パイロット弁の開弁時期およびシャトル弁の制限揚程により調節する。本噴射装置では、縮小管内に発生した圧力波の増幅によって比較的低い油圧源圧力で75 MPa以上の高い噴射圧力が得られ、反射圧力波を利用して噴射を終了させるため圧力降下率の高い噴射となる。さらに、油圧源圧力を変化させることによって機関回転数に依存せずに噴射圧力を任意に変更できる。

噴射ノズルには5孔ノズル（ボッシュ DLL型、噴射

図3 スプール加速式高圧燃料噴射系の概略

図4 KD-3型高圧噴射系を用いた際の発火後連続5サイクルにおけるシリンダ内圧力 p および噴射管内圧力 p_p のクランク角 θ に対する経過

図5 種々の噴射圧力におけるシリンダ内圧力 p 、熱発生率 $\dot{q}$ 、噴射管内圧力 p_p および噴射弁ニードル揚程 h のクランク角 θ に対する経過

角 140°)を用い、動的燃料噴射時期 θ_j を 8° BTDCとした。ジャーク式ポンプJKの場合ノズル径を 0.22 mm とし、開弁圧を 24.5 MPa に設定して、毎行程噴油量 $B = 43.7\text{ mg}$ (空気過剰率 $\lambda = 1.2$)の条件で運転した。また、高圧噴射KD-3では後述のように燃焼が衝撃的となるためノズル径を 0.16 mm まで小さくし、さらに、噴射圧力の急激な降下に伴う二次噴射を抑えるため開弁圧を 34.3 MPa とした。そのさい、KD-3の駆動はブラダ型アキュムレータ(中村工機M210-1、容積 1 L)に油圧を予め蓄えることによって行い、噴射量はできる限りJKに一致するように設定した。図4は、油圧源圧力を 20.6 MPa としたさいの噴射ノズル直前の噴射管内圧力 p_p およびシリンダ内圧力 p のクランク角経過を噴射開始から連続5サイクル分示す。 p_p の極大は最初 125 MPa に達しており、サイクルとともに徐々に低下するものの、高速度撮影を実施する6~7サイクルでは安定した噴射および燃焼が行われる。

3. 実験結果および考察

3.1 熱発生率経過 まず、種々の噴射圧力の条件における熱発生経過を調べた。図5に、発火運転開始後3~5サイクル目に得られたシリンダ内圧力 p 、熱発生率 $\dot{q}$ 、噴射管内圧力 p_p および噴射弁ニードル揚程 h のクランク角 θ に対する経過を示す。(a)はジャーク式噴射ポンプJKを用いた場合であり、 p_p は約 30 MPa とノズル開弁圧よりも若干高い値で、約 10° CA の噴射期間中ほぼ一定に保たれている。着火は噴射開始後 4.5° CA 経過した 3.5° BTDC で起こり、初期燃焼では圧力および熱発生率は急増するが、 1.5° BTDC で極大となった後減少する。また、噴射終了後は拡散燃焼となり熱発生は低い値を示し、 $\theta = 30^\circ\text{ ATDC}$ で熱発生はほぼ終了する。

これに対し、(b)~(d)はスプール加速式高圧燃料噴射系KD-3を用いた場合で、アキュムレータ内の油圧を変

図6 噴射圧力および噴孔径の関係を表す指数 α が各種噴霧特性量に対して及ぼす影響の

えることによって噴射管内ピーク圧力 p_j をそれぞれ 75 MPa, 100 MPa, 120 MPa と3種類変化させて試験を行った。JKの場合より噴射圧力をかなり高めたため、ノズル噴孔径を小さくしたにもかかわらず噴射期間はほとんど変わっていない。また、測定された噴射管内圧力および噴射期間から推定して、噴射量はJKの場合とさほど変わらないと考えられる。さらに、熱発生率経過によると、いずれの場合も着火遅れ期間は約 4° CA と JK の場合とほぼ等しいが、初期の熱発生は p_j とともに急激に増加する。とくに、(d)の $p_j = 120$ MPa では着火後極めて高い $\dot{q}$ となり、爆発的な燃焼ののち噴射終了と同時に熱発生は終了する。逆に低い噴射圧力ほど噴射終了後に緩慢な拡散燃焼が観察され、 $p_j = 75$ MPa ではジャック式ポンプで得られた結果とほぼ等しい熱発生経過となって $\theta = 25^\circ$ ATDC で熱発生は終了する。噴射圧力による燃焼状況の変化についてのこれまでの研究⁽⁶⁾では、高圧噴射によって燃焼期間は短縮するものの、図5(d)のように爆発的な燃焼は観察されていない。

この点に関して既報⁽⁷⁾の結果に基づいて考察する。既報では、噴射圧力を高めるさいの適正噴孔径について噴霧の運動量理論などにより理論的に解析している。すなわち、噴射圧力の変更度合を表す指数を α として、噴孔径 d_n および噴射圧力とシリンダ内圧力の差 Δp_j の関係を

$$d_n \Delta p_j^\alpha = \text{const.} \quad (1)$$

この関係が噴霧の空気エンタレインや燃料-空気の微視混合などの特性量 Ψ に対して及ぼす影響度 β を

$$\Psi \propto \Delta p_j^\beta \quad (2)$$

として表わしている。各種特性量の α に対する変化を図6に示す。この結果によれば、とくに α が 0.25 を境

図7 種々の噴射圧力 p_j に対する指数 α と噴孔径 d_n の関係

に噴射率 J_F と噴射期間 t_e が、また 0.5 を境に噴霧内に誘引される空気導入量 J_A および噴霧の到達距離 x が大きく増減することがわかる。このほか、噴孔数一定の条件では、ノズル噴孔径を減じて α の大きい条件ほど噴射圧力の増加によって噴霧内の平均空燃比 J_A/J_F および微視混合速度 ω が増加し、混合気は希薄化することがわかる。

本実験におけるJKの条件の噴射ピーク圧力 $p_j = 30$ MPa, $d_n = 0.22$ mm を基準とした場合、式(1)から α は p_j と d_n に対して図7のように変化する。図5(b)の場合には $\alpha = 0.331$ となり、(c)(d)では 0.25 以下となる。図6の結果を適用すると(b)の場合には α が 0.25 より大きいため、噴射率 J_F が減少することがわかる。加えて、(c)(d)の場合より噴霧内の平均空燃比が増加する。このことによって初期の急激な熱発生が抑えられ、そのために熱発生率経過がJKの場合とほぼ等しくなったものと思われる。一方、(c)(d)の場合には α が 0.25 より小さく噴射圧力とともに J_F が高くなり、さらに J_A および x が増加する。このために着火遅れ期間中に可燃混合気が大量に形成され、初期の燃焼が予混合気の状態で起き衝撃的な燃焼となったと推察できる。また、燃焼室およびスワール条件を変えずに噴射圧力を高くしたことも燃焼が衝撃的となった原因と考えられる。このことは、とくに発進時など低速で燃料を増加する場合には、パイロット噴射などによって初期の噴射率を下げる必要があることを示唆している⁽⁸⁾。

3.2 高速度写真 つぎに、火炎の高速度写真を観察することにより、噴射圧力による燃焼状況の変化を調べた。図8は図5の燃焼サイクルに対応する直接火炎像を示す。(a)のJKの場合の火炎は、 $\dot{q}$ が急増し始める 3.5° BTDC で噴霧先端境界付近に生じ、急激な熱発

(a) $p_i = 30$ MPa (b) $p_i = 75$ MPa (c) $p_i = 100$ MPa (d) $p_i = 120$ MPa図8 4種類の噴射ピーク圧力 p_i における高速度直接撮影による火炎像のクランク角経過

図9 2種類の噴射ピーク圧力 p_j における高速度直接撮影による火炎像(DP)およびレーザシート法によるスート散乱像(LS)のクランク角経過とそのクランク角におけるピストン位置とレーザ光の入射位置[撮影断面 $\delta = 5\text{ mm}$]

生とともに燃焼室凹み内に急速に広がると同時にすきま部へ噴出する。その後火炎の発達は緩慢となり、 10° ATDC で極大となった後輝度は徐々に低下する。すきま部では熱発生がほぼ終了する $\theta = 27.3^\circ\text{ ATDC}$ においてほぼ火炎は消失するが、燃焼室凹み内には 58.5° ATDC まで輝炎が認められる。

噴射圧力 p_j を高めた条件(b)～(d)について見ると、 p_j が高いほど燃料の霧化が促進するため噴霧は細くかつ短く観察される。着火後、火炎は急速に広がり、シリンダ内圧力のピーク後の $5\sim 7^\circ\text{ ATDC}$ で最も大きい面積となる。このときJKの場合と比べて凹み内での火炎の発光は強くかつ輝度むらは少なく、逆にすきま部では p_j が高いほど輝度は低い。これらの条件では噴霧の貫徹力がJKより増加するにも拘らずすきま部に輝炎がさほど観察されないことから、乱流混合が促進していると考えられる。さらに、 10° ATDC 以降火炎は急速に消失し、 40° ATDC にはいずれの p_j でも火炎の発光は認められない。

3.3 すき散乱像 燃焼室内のスート生成状況の変

化をレーザシート法によって調べた。そのさい、 $p_j = 100\text{ MPa}$ を越える高圧噴射では熱発生率 $\dot{q}$ が過大となるため、ここでは燃焼開始から終了時まで熱発生率経過が類似する $p_j = 30\text{ MPa}$ および 75 MPa における火炎を比較して、噴射圧力の作用について検討した。

図9は、レーザ照射断面の位置 δ をシリンダヘッド下面 5 mm に固定し、種々のクランク角 θ において得られたスート散乱像LSとそれと同時に撮影した直接火炎像DPをあわせて示した結果である。なお、ここに示した各クランク角のスート散乱像は発火運転中の連続した異なったサイクルにおける結果である。このようになった理由は、パルスレーザ光の発光間隔に最高 10 Hz の制約があるためである。

図において、着火前の $\theta = 5^\circ\text{ BTDC}$ において観察される噴霧断面像および着火後 10° ATDC までに燃焼室凹み内に観察されるスート散乱像には、噴射圧力による差はさほど認められない。しかし、ピストン頂面がレーザ照射断面の下になる 20° ATDC 以降のスート散乱像の分布は(a)の $p_j = 30\text{ MPa}$ の場合と(b)の $p_j = 75\text{ MPa}$

の場合とで大きく相違している。(a)ではスートがすきま部へ流れ込み、その後再燃焼せずに複雑に入り組んだ形となって 60° ATDC でもひも状のスート雲が観察されるのに対して、(b)では $\theta=20^\circ$ ATDC 以後のクランク角においてはスート散乱像は観察されない。この理由には、(b)の噴射量が(a)より少なく、そのために(b)の燃焼後期にスート散乱像が観察されないことが考えられる。しかし、既報⁽³⁾のスート可視化結果では、 $p_i=30$ MPa の条件で噴油量を 20% 程度減らしても観察されるスート散乱像のクランク角経過にはほとんど影響しなかった。このことから、(b)の結果は噴射圧力を高めノズル径を小さくしたことにより乱れが強化され、さらにスケールも小さくなったために、混合気の希薄化および均一化が促進したこと、加えて、一旦生成されたスートの燃焼中後期における酸化が促進したため、クランク角後期においてレーザシート光により可視化されるスート雲が消失したと推察される。

4. ま と め

以上、直接噴射式ディーゼル機関の燃焼およびスート生成に関し、低速時における噴射圧力による変化を熱発生率経過および高速度撮影により調べた。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 噴射圧力が高く爆発的な燃焼になる条件では、燃焼室くぼみ内における輝炎の発光は強くかつ輝度のむらが少ない。
- (2) 噴射圧力を高めるにしたがってすきま部における火炎の輝度は低下し、 10° ATDC以降消炎が急速に進む。
- (3) レーザシート法によって可視化されるスート雲は、通常の噴射圧力条件では拡散燃焼期からクランク角後期まで鮮明に観察されるのに対し、噴射圧力が高く小噴孔径の条件では燃焼中期のみ観察され、 20° ATDC 以後は認められない。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金試験研究 B [課題番号 04555048] により行われた。また、実験に際し、本学学生佐々木孝司氏、竹内勝彦氏に多大のご協力を頂いた。ここに深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) Shioji, M., Yamane, K., Sakakibara, N. and Ikegami, M., *COMODIA* 90, (1990), 613.
- (2) Espey, C. and Deck, J. E., *SAE Paper*, No.930972 (1993), 1.
- (3) 塩路・島倉・山根・池上, 機論, 60-579, B(1994).
- (4) 塩路・山根・伊藤・山田・池上, 自動車技術会学術講演会(秋期) 前刷集 924, Vol.3, (1992), 41.
- (5) 池上・山根・竹内・朱, 機論, 59-559, B(1993), 872.
- (6) Shundoh, S., Kakegawa, T., Tsujimura, K. and Kobayashi, S., *SAE Paper*, No. 910489 (1991), 1.
- (7) 池上・山根, 機論, 59-598, B(1993), 4046.
- (8) 春藤・小森・辻村, 第10回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, (1992), 199.