急速圧縮装置によるディーゼル噴霧の高温燃焼と 火炎中のすす生成・消滅に関する研究*

飯田 訓正^{*1}, 大橋 秀樹^{*2}

Study of High-Temperature Combustion of Diesel Fuel Spray and Formation and Oxidation of Soot in the Flame using a Rapid Compression Machine

Norimasa IIDA and Hideki OHHASHI

We investigated the effects of a high-temperature environment on diesel spray combustion and formation and oxidation of soot in the flame by eliminating the effects of wall temperature and boundary layer as much as possible using a rapid compression machine which has large combustion chamber. When gas temperature increased, short ignition delay and elongation of combustion was observed by analyzing the cylinder pressure diagram. However disappearance time of luminous flame did not change. Recombination of thermal dissociation must be considered as apparent heat release. Higher surrounding gas temperature results in increased soot formation time and extended low-density soot region in the flame, in spite of almost the same time histories of total amount of soot.

Key Words: Diesel Engine, Low Heat Rejection Engine, Soot Formation, Rapid Compression Machine, High-Temperature Combustion, Light Oil

1. はじめに

エネルギー資源の効率的な利用や環境問題への対応のため、近年セラミックス遮熱形機関が注目されてきている。遮熱形機関は、熱損失の低減と、排気エネルギーの回収により、熱効率の向上を狙うものである。

遮熱形エンジンでは、燃焼室壁面等の温度の上昇によって、上死点における雰囲気温度が200~300 K上昇し、燃焼に大きな影響を及ぼすことが知られている⁽¹⁾。一般に遮熱化に伴い「着火遅れの短縮」「予混合的燃焼の減少と拡散的燃焼の増加」、それに伴う「燃焼期間の長期化」が問題となることが報告されている⁽¹⁾。燃焼長期化の要因としては、(1)高温化による気体粘度の増加が、乱流混合速度を低下させ拡散燃焼時の燃焼率が低下するとする説⁽²⁾⁽³⁾や、(2)膨張行程や混合による燃焼室内の空間温度分布の均一化が燃焼室内ガス温度を低下させ、それによる熱解離ガスの再結合が見掛けの熱発生(燃焼率)として観察されるとする説⁽⁴⁾がある。遮熱形エンジンにおいては、(1)雰囲気温度、(2)燃焼室壁面の温度、(3)境界層の温度、(4)火炎の温度、(5)燃焼ガスの温度等、が同時に高温化する。高効率遮熱形エンジンの実現には“何が”“どれだけ高温か”を踏まえたうえでサイクル効率低減をもたらす燃焼期間の長期化を克服することが要求されている⁽⁵⁾。

本研究では、壁面温度および境界層の影響を極力除いた条件で、急速圧縮装置による比較燃焼実験を行い、雰囲気温度の高温化が噴霧燃焼およびすすの生成・消滅に及ぼす影響について検討した。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた急速圧縮装置および燃焼室形状を図1, 2に示す。本装置を用いてディーゼル機関の1回の圧縮行程を再現し、定容の高温高圧場を実現し、燃焼実験を行うことができる。本装置は直径φ145 mmのパンケーキ形燃焼室をもつ。燃焼室の厚みとして48 mmを確保し、燃焼室内に単発噴射された自由噴霧が側壁面への衝突の影響なしに燃焼できるようにしている。圧縮用ピストンのストロークは692 mm、圧縮比は14.57である。ピストンヘッド部およびシリンダヘッド部に石英製の窓を設け、レーザ透過光を利用した噴霧火炎の観察および光学的計測を可能としている。

* 平成5年7月15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5年12月9日。

^{*1} 正員、慶応義塾大学理工学部 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 慶応義塾大学大学院。

図1 急速圧縮装置

図2 燃焼室形状

燃焼室壁面にはリボンヒータと温度管理用の熱電対を設置し、80℃付近の一定温度に保った。

燃料として JIS 2 号軽油を用い、φ0.18 mm の単口ホールノズルから 20 mg の燃料を噴射圧 60 MPa、噴射期間 3.8 ms の条件で単発噴射させた。

3. 雰囲気気の高温化燃焼実験

3.1 実験条件 急速圧縮装置に供給する雰囲気気は圧力を大気圧、温度を 80℃ 一定に保った。

圧縮終了時の雰囲気気の高温化は、比熱比の大きいアルゴンを雰囲気気に混入して雰囲気気の比熱比を大きくすることで実現した⁽⁶⁾。雰囲気気中の酸素濃度を 21% 一定とするため、空気にアルゴンと酸素を同時に混入し、アルゴンを空気中の窒素と置き換える形で各設定雰囲気気を調製した。設定した実験条件の雰囲気気組成を図 3 に示す。先に述べた通り遮熱機関の上死点における雰囲気気温度は 200~300 K ほど通常の冷却機関に比べて上昇する⁽⁷⁾。そこで 200 K ほど高温な雰囲気気を実現するために、空気を基準として、アルゴンをそれぞれ濃度 14.53, 25.80, 34.66, 42.40% まで添加した。

図 4 に設定した各雰囲気気のアルゴン濃度と、圧縮終了時の雰囲気気温度の推算値、および量論比における断熱火炎温度の推算値との関係を示す。アルゴン濃度が増えるにつれ雰囲気気温度は高温化し、それに伴い火炎温度も上昇する。図 5 に各設定の圧縮終了時の雰囲気気温度の実測値 T_g と雰囲気気中のアルゴン濃度との関係

図3 雰囲気気の組成

図4 圧縮終了時の雰囲気気温度の推算値、および量論断熱火炎温度の推算値とアルゴン濃度との関係

図5 圧縮終了時の雰囲気気温度の実測値とアルゴン濃度

を示す。雰囲気気が空気の場合(以下、条件 A と呼ぶ)で $T_g = 890$ K となり、この条件にアルゴンを 42.40% まで添加する(以下、条件 B と呼ぶ)ことで、 $T_g = 1050$ K まで雰囲気気温度を上昇させることができた。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 指圧線図、着火遅れおよび燃焼期間 図 6 に X 軸に燃料噴射開始からの時間、 Y 軸に着火後の圧力上昇 ($= P_c - P_{inj}$) を表した指圧線図を示す。燃焼による圧力上昇分はほぼ同じであるが、燃焼開始後最高圧に達する時刻は雰囲気気温度が高温化した場合遅く、燃焼の長期化が見られる。

指圧線図より着火遅れと燃焼期間を定義した。図 7

に指圧線図解析のモデルを示す。燃焼室の圧力はピストン上死点に固定され定容となった後、放熱等により圧力が徐々に降下する。そこで圧力の降下速度は一定であると仮定して、燃料噴射開始から熱発生が認められるまでの期間を着火遅れ t_{id} とし、また圧力線図が燃料の噴射開始から圧力上昇が終了するまでの時間を t_{pmax} 、その圧力値の 50, 90% に達するまでの時間を t_{50} , t_{90} と定義した。空気過剰率が大きい条件での燃焼のため、燃焼期間中比熱はほぼ一定とみなされ、燃料の燃焼と圧力上昇がほぼ比例の関係にある。したがって、 t_{50} , t_{90} はそれぞれ燃料のほぼ 50, 90% が燃焼を終える時刻と見ることができる。

図 8 にその解析結果を示す。雰囲気温度が上昇するにしたがい着火遅れは短縮し、逆に燃焼期間は長期化する。従来的高温燃焼における研究結果と同じ傾向が

図 6 指圧線図

図 7 指圧線図モデル図

図 8 着火遅れおよび燃焼期間と雰囲気温度の関係

確認された。

3・2・2 輝炎の二次元投影面積 撮影された火炎のフィルム画像から輝炎の投影面積を求めた。条件 A, B について、その時間履歴を図 9 に示す。輝炎は火炎中のすすが発光している部分であり、その投影面積はすすの存在している範囲の目安となる。雰囲気温度が 1050 K と高い条件 B のほうが、早くから輝炎が観察され始めるが、両条件 A, B の輝炎投影面積が最大値をとる時刻はほぼ同じである。最大値については、条件 B のほうが大きな値をとる。雰囲気温度と輝炎投影面積の最大値の関係を図 10 に示した。雰囲気温度が高温化するにつれ輝炎投影面積の最大値は大きくなり、

図 9 輝炎投影面積の時間履歴

図 10 雰囲気温度と輝炎投影面積の最大値

図 11 雰囲気温度と輝炎の発生、消滅時刻の関係

すすの存在領域が広がっている。

さらに輝炎の発生時刻、輝炎の二次元投影面積が最大となる時刻、消滅時刻の雰囲気温度の高温化による影響を調べた。図 11 に結果を示す。輝炎の発生時刻は、雰囲気温度が高くなるにつれ早くなる。これに対して輝炎の消滅時刻は、雰囲気温度が高くなっても、変化は見られない。

さきに図 8 に示した指圧線図より解析した着火遅れ、および燃焼期間の雰囲気温度に対する変化と比べてみる。図 11 に示される高温化に伴う輝炎発生短縮化は、図 8 の着火遅れの短縮化とその傾きが同等である。着火時刻 t_d よりほぼ一律 2 ms 遅れて輝炎の発生が観察されるようになる。また、雰囲気温度の高温化に伴い $t_{p\max}$ の遅延化、すなわち燃焼の長期化が図 8 では示されるのに対して、火炎の直接写真より判断される輝炎の消滅時刻は長期化の傾向が見られない。すなわち燃焼室内のすすの消滅時刻は、雰囲気温度の高温化の影響をあまり受けないという結果が得られた。

雰囲気温度の高温化による熱発生の長期化には、前述の、(1) 気体粘度の増加により乱流拡散混合速度を低下させ、燃焼率を低下させる要因が挙げられているが、この場合同時にすすの酸化速度も低下し、すすの消滅時刻も遅くなることが予測される。しかし、すすの酸化速度は必ずしも低下していない。指圧線図から判断さ

れる、雰囲気温度の高温化に伴う熱発生の長期化は、(2) の燃焼ガスの高温化によって増加した熱解離ガスの再結合時の熱発生が要因となっていると考えられる。高温領域の燃焼生成ガスが低温領域のガスと混合し、燃焼室内ガスの均一化が進む。この過程で、高温領域の温度が低下し、熱解離の再結合反応が進行する。その結果、指圧線図から解析される見掛けの熱発生率において長期化が観測される。

3・2・3 火炎温度 火炎画像を 2 色法の手法を用いて解析した。図 12 に燃料噴射開始後 7 ms 経過後の二次元火炎温度分布画像を示す。左が雰囲気が空気の場合(条件 A)、右の画像が雰囲気にアルゴンを 42.4% 混入した場合(条件 B)のものである。火炎温度は 16 段階に階層化され、明度別に分けて表示される。明るい部分ほど高温を示している。雰囲気温度が高い条件 B のほうが、高温な火炎が形成された。また、双方の例とも火炎先端部は比較的低温な領域があり、その上流に高温な領域が見られる。画像より円すい形をした火炎の側面から火炎中に空気が取り込まれ乱流の渦が発生している様子が観察されるが、渦のスケールについては顕著な差異は認められない。

階層化された各火炎温度が火炎温度二次元分布画像において占める面積を求め、火炎温度のヒストグラムに時間履歴にした。図 13 に示す。火炎温度範囲の下限と上限のほぼ中間の温度が火炎中で最も広い領域を占めている。雰囲気温度が上昇した場合もこの傾向は変わらない。また全燃焼期間にわたっても同様である。同時刻 ($t=5.7$ ms) の火炎温度のヒストグラムを図 14 に比較して示す。雰囲気温度上昇に伴い、火炎温度のヒストグラムは相似形を保ちつつ高温側に移動している。すなわちヒストグラムの形状は雰囲気温度、時刻によらずほぼ同様で、図 14 において下限と上限のほぼ中間をピークとして左右対称の山形をなす。火炎温度の面積平均値を温度の比較のための指標として用いることができる。

図 12 2 色法による火炎温度解析画像

図 13 火炎温度ヒストグラムの時間履歴

各階層の中央値 T_i とその占める面積 A_i の積の総和 $\sum A_i T_i$ を、総面積 $\sum A_i$ で除した値 ($\sum A_i T_i / \sum A_i$) で面積平均火炎温度を定義し、火炎温度の代表値として用い比較をした。図 15 に条件 A, B それぞれの面積平均火炎温度を示す。雰囲気温度 160 K の上昇で面積

図 14 火炎温度ヒストグラム

図 15 面積平均火炎温度の時間履歴

図 16 2色法による KL 値解析画像

図 17 KL 値の面積積分量の時間履歴

平均火炎温度は 120 K ほど上昇している。

3・2・4 KL 値 KL 値は、火炎中のすす粒子数密度にほぼ比例する吸収係数 K (Beer の法則) と、すす領域の光学的厚み L の積であり、光路上に存在するすすの総粒子数を示す指標となる。図 16 に KL 値の画像解析例を示す。左が雰囲気が空気の場合(条件 A)、右が雰囲気にアルゴンを 42.4% 混入した場合(条件 B)で、いずれも燃料噴射開始後 7 ms 経過後の様子である。色が明るい部分ほどすす濃度が濃い領域を示している。条件 A の火炎では、すす濃度の濃い領域は火炎前方に位置し、火炎後方ではすすがほぼなくなりかけている。これに対し雰囲気を高温化した条件 B の火炎では、すす濃度の濃い部分が噴流の上流方向に移動する。前述の火炎温度画像と合せて見ると、条件 A の火炎では、火炎温度が高い領域と、すす濃度が高い領域はほぼ一致するのに対し、条件 B の火炎では、この関係が逆転して、火炎温度の高温な領域ですす濃度が低く、低温の領域ですす濃度が高い傾向が観測された。

図 17 に KL の面積積分値のグラフを、条件 A, B それぞれについて示す。面積積分値は KL 値を 0.09 ごとに階層化し、各階層の中央値 (KL_i) とその専有面積 A_i の積の総和 $\sum A_i (KL_i)$ を算出したものである。この値は、燃焼室内のすすの総粒子数を代表する。雰

図 18 KL 値のヒストグラムの時間履歴

囲気を高温化するとすすの発生時期は早くなる。しかし、すすの消滅する時刻はほぼ同じである。燃焼後半における、火炎中の全すす量の履歴は雰囲気温度の高温化の影響は受けていない。図18にKL値のヒストグラムの時間履歴を示す。ヒストグラムの時間履歴は階層化された各KL値の占める領域をZ軸に取り、その時間履歴を表したものである。火炎中のすすは燃焼期間全域にわたって、すす濃度の低い部分ほど火炎中の多くの領域を占めている様子がわかる。また雰囲気温度が低い燃焼では火炎中のすす濃度の濃い領域が多く、雰囲気温度の高温化により火炎中のすす濃度は薄くなり、すすの存在領域は広がることになる。

4. 雰囲気温度を固定したまま 火炎温度を高温化した比較実験

雰囲気を高温化すると、火炎温度も同時に高温化する。そこですす生成・酸化に及ぼす雰囲気温度の高温化の効果と火炎温度の高温化の効果を考察する目的で、圧縮後雰囲気温度を雰囲気が空気の場合と同じ温度($T_g=890\text{ K}$)に保ったまま、火炎温度のみを高温化させる雰囲気を設定した。雰囲気を高温化し、それによって火炎温度が高温化した場合との比較を行う。図19に設定した雰囲気条件の組成を示す。圧縮終了時の

図19 雰囲気温度を固定したまま、火炎温度を高温化した比較実験の雰囲気設定条件

図20 雰囲気温度固定で火炎温度を高温化する設定と、雰囲気温度の高温化により火炎温度を高温化する設定の圧縮終了時の雰囲気温度と酸素濃度との関係

雰囲気温度を変えずに、火炎温度のみを上昇させるため、雰囲気中の酸素濃度を増加させる手法を用いた。図20に各設定の雰囲気中の酸素濃度と、雰囲気組成から推算される圧縮終了時の雰囲気温度との関係を示す。また、図21に酸素濃度と量論混合比における断熱火炎温度の推算値との関係を示す。雰囲気温度を上げずに火炎温度のみを高温化する場合(図21中の○)では、酸素濃度増加にしたがい、圧縮終了時の温度は変化しないが、火炎温度は高温化する。酸素濃度を25%まで増やした設定を条件Iとし、この設定での量論断熱火炎温度とほぼ等しい量論断熱火炎温度を実現するように、アルゴンと酸素を雰囲気に混入して、雰囲気温度を高温化した設定(酸素濃度21%, アルゴン濃度25%)を条件IIと呼び、以下この二つについて比較する。

IとIIの条件について、面積平均火炎温度を比較した。図22に結果を示す。両者はほぼ同じ火炎温度を実現できていることが確認される。

4・1 雰囲気高温化が燃焼期間に与える影響 条件I, IIの圧縮終了時の雰囲気温度の実測値は、条件Iで $T_g=890\text{ K}$, 条件IIで $T_g=970\text{ K}$ となった。両条件の火炎温度は図22に示すようにほぼ同一である。この二つの条件を比較することで、雰囲気温度の高温化

図21 雰囲気温度固定で火炎温度を高温化する設定と、雰囲気温度の高温化により火炎温度を高温化する設定の量論断熱火炎温度の推算値と酸素濃度の関係

図22 条件I, IIの面積平均火炎温度の比較

図 23 雰囲気温度固定のまま、火炎温度を高温化していった実験の着火遅れと燃焼期間

図 24 雰囲気温度の高温化によって、火炎温度を高温化していった実験の着火遅れと燃焼期間

図 25 雰囲気温度固定のまま、火炎温度を高温化していった実験の輝炎の発生、消滅時刻

図 26 KL 値の面積積分値の時間履歴

が燃焼期間に与える影響について考察する。

断熱火炎温度と着火遅れおよび燃焼期間の関係について、図 23 に雰囲気温度を固定し酸素富化により火炎温度を高温化した場合、図 24 に雰囲気温度高温化によって火炎温度を高温化した場合を示す。

条件 I の雰囲気温度は空気の場合と同じで、酸素濃度の増加分着火遅れが短縮されるので、結果として条件 I と条件 II の着火遅れはほぼ等しい。しかし、条件 I では雰囲気温度が低いため、着火遅れの間に燃料が蒸発し混合気を形成する量は条件 II にくらべ少なく、予混合的燃焼量は少ない。燃焼期間に関しては、条件 I において、着火から圧力上昇が見られなくなるまでの時間 ($t_{p\max} - t_{id}$) は火炎温度が高温化しても変わらないが、着火遅れが短くなっているため、 $t_{p\max}$ は早くなっている。条件 II においては、前述のように $t_{p\max}$ の遅延化が見られた。

指圧線図による解析では、同じ着火遅れ、同じ火炎温度であっても雰囲気温度が高温であると(条件 II)、燃焼期間は長期化するという結果が見られる。しかし条件 I では酸素濃度が濃い雰囲気条件を設定しており、これが条件 I での燃焼期間を短縮させたという効果も考えられる。今後の検討が必要とされる。

4・2 火炎温度が燃焼期間に与える影響 図 25 に雰囲気温度を固定したまま酸素富化によって火炎温度を高温化した場合の、輝炎の発生時刻、輝炎領域が最大値を取る時刻、輝炎の消滅時刻と断熱火炎温度との関係を示す。輝炎の発生が観察されてから消滅するまでの時間は、火炎温度が上昇するに伴い短縮している。これに対し、図 23 の指圧線図による解析では燃焼期間 ($t_{p\max} - t_{id}$) はあまり変化していない。輝炎の消滅時刻の早期化の要因として、火炎温度の上昇、あるいは酸素濃度の上昇によるすすの酸化促進が考えられるが、図 11 において雰囲気温度高温化により、火炎温度を高温化した場合は、輝炎の消滅時刻の早期化は見られない。酸素濃度の上昇がすす酸化促進の要因となっていると思われる。

4・3 雰囲気温度が火炎中のすす生成・消滅に与える影響 図 26 に KL 値の面積積分値の時間履歴を示す。条件 I、II とともにほぼ同じ時刻からすすが観察されるが、燃焼前期における、KL 値の面積積分値の増加の傾きは条件 I のほうがゆるやかで、ピーク値も小さくなっている。両条件とも、ほぼ同じ時刻でピークを

迎え減少に移る。減少の傾きは両条件ともほぼ同じであるが、条件Ⅰのピーク値が小さいため、すすも早い時期に消滅する。着火遅れ、火炎温度が同一の実験であるため、燃焼前期、条件Ⅰで KL 値面積積分値の増加の傾きが緩やかで、ピーク値も小さいのは、条件Ⅰにおいて(1)雰囲気中の酸素濃度が大きく、すすの生成が抑えられているため、(2)雰囲気温度が低く、燃料の蒸発とそれに続く熱分解反応が抑えられたため、あるいは条件Ⅱにおいて、(3)雰囲気温度の高温化による粘性係数の増加により燃料と空気との混合が悪化し、すすの生成が促進されたため等の要因が考えられる。しかし、図 17 に示すように雰囲気温度が高温化しても KL 値面積積分値のピーク値は変化しない。酸素濃度の増加がすす生成を抑制していると考えられる。

5. ま と め

急速圧縮装置で実現した高温・高圧の静止雰囲気中にディーゼル噴霧を噴射し、高温雰囲気が自由噴霧の燃焼および火炎中のすすの生成・消滅に与える影響を観察し、以下のような結果を得た。

(1) 雰囲気の高温化に伴い着火遅れは短縮する。これは指圧線図の解析および高速度直接写真による火炎観察で同じ結果を得た。

燃焼期間は雰囲気の高温化に伴い、燃焼室の指圧線図解析によると増大が認められる。しかし、高速度直接写真の解析により、輝炎の消滅時刻はほとんど変化しないことが明らかにされた。雰囲気の高温化に伴う熱発生期間の長期化の要因として、増加した熱解離ガ

スの再結合時の熱発生が考えられる。

(2) 雰囲気の高温化に伴い、火炎中のすすは早期に発生する。しかし、雰囲気を高温化しても、燃焼後期に火炎中に存在するすすの総量の最大値およびその履歴には著しい変化は見られない。すすの消滅時刻は、雰囲気温度の影響を受けずほぼ一定となる。

(3) 雰囲気を高温化した場合、火炎中のすす存在領域の目安となる輝炎投影面積の最高値は大きくなる。また、火炎中のすすは薄い濃度で広い領域に分布する傾向が認められる。

(4) 圧縮終了時の雰囲気温度が低い燃焼では、火炎先端部より少し上流の火炎温度の高い領域ですす濃度が高く、雰囲気温度の高い燃焼では、火炎の上流側の比較的低温の低い領域ですす濃度が高い。

本研究の実験に際し、慶応義塾大学理工学部学生大久保修君の協力をいただいた。本研究の一部は研究分科会 RC107 の活動による。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) Suzuki, T., ほか 3 名, *SAE Paper*, No. 861187 (1986).
- (2) 魯・小堀・神本・土屋, 機論, 57-534, B, (1991), 740-743.
- (3) 魯・小堀・神本・榎本, 機論, 57-540, B, (1991), 2833-2838.
- (4) 飯田, 「セラミック・2 サイクル・メタノールエンジン」プロジェクト研究報告書, 神奈川科学技術アカデミー, (1993).
- (5) 飯田, '93 セラミックエンジン特別シンポジウム講論集, 応用技術出版, (1993), 113-144.
- (6) Iida, N., *SAE Paper/Trans.*, No. 930603 (1993).
- (7) 佐々木・関山・河村, 第 10 回内燃機関合同シンポジウム講論集, (1992), 37.