ディーゼル燃焼におけるすす生成と分解 特性(第1報)*

西田修身**・藤田浩嗣**
原野 亘***・難波篤志***

Characteristics of Soot Formation and Decomposition in Diesel Combustion (Part 1)

By Osami Nishida, Hirotugu Fugita, Wataru Harano and Atsushi Nanba.

It is fundamentally important to understand the properties of soot formation and decomposition in diesel combustion.

Those processes depend on the following factors such as the size and velocity distribution of drops, evaporating characteristics of spray, the properties of the fuel and its gaseous environment and the mechanism of the mixing processes.

The purpose of this study is to investigate the effects of the air temperature, air velocity and swirl ratio on soot formation due to a single shot injection of toluene in a combustion chamber under atmospheric pressure.

The results are as follow:

- (1) With further increase in intake air temperature(T_2 :K), it is considered to increase the soot formation because of shortening of ignition delay period.
- (2) As the air velocity and swirl ratio increase, the soot formation decreases.

1. ま え が き

ディーゼル機関から排出されるすす量を低減する方法を確立することは極めて重要なことである。燃焼によるすすの排出量は生成と分解によって律せられ、燃焼状態と共に議論する必要がある。

この件については、過去、定常燃焼^{1), 2)}、定容容器内燃焼³⁾並びに実機^{4), 5)}によるものが種々報告されている。しかしながら、容器内噴霧火炎や実機での測定結果は火炎構造と共に十分に検討されていないように思われる。特に、この種の燃焼は噴霧の微粒化特性、空気流の温度、流速および乱れ、スワール比、着火遅れ並びに燃焼室形状に大きく依存されるため、できるだけ簡単化した条件で実験をする必要がある。

本研究は一連の実験の手始めとして基礎的な立場から論ずることにした。まず大気圧下での燃焼室内で、空気の流速、温度、スワール比を幅広く変化させた状態で、一定量のトルエンを噴霧し、全体的な火炎の特性と共にすす排出量を測定した。

2. 実験装置および方法

図1は大幅な空気の予熱ができ、空気流速および旋回流を任意に設定できるように考慮した大気開放型の燃焼器である。空気を加熱するために、内径105mm、全長1000mmの予熱室①が装備されている。発熱体には直径14mm、長さ900mmの棒状シリコニット③(3.16kW)を設置した。断熱材として、厚さ5mmのコーティング材④を塗布したファイバーフラックス⑤で全体を内張りした。予熱室出口付近をマイクロヒータ⑥(外径1.6mm、長さ5000mm、 $R_0=11.0\Omega/m$)で加熱し温度を均一化した。燃焼室入口の空気温度の検出にはCA熱電対⑦を用いた。空気はシリコニットの電極の冷却を兼ねて、予熱室両端より供給し、燃焼室入口の空気流速は加熱による膨張を考慮して設定した⁶⁾。燃焼室は半径83mm、高さ120mmの円筒型で、周囲をパイレックスガラスで囲んだ。燃焼噴射弁(口径0.33mm、単口ホール形)は燃焼室入口から80mmの高さに設置し、燃料は燃焼室中心に向かって水平に噴霧される。旋回用空気の加熱は図2に示すように、複ら管形のシリコニットおよびマイクロヒータ(最大50L/N・minの空気を約900Kまで加熱可能)を使用し、燃焼室入口部で燃料噴射弁から50mm上流位置に平行に設置した。なお、旋回用空気噴出口径

* 原稿受付 平成1年3月8日

昭和63年秋期学術講演(昭和63年11月17日)

** 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

図1 燃 焼 器

図2 旋回流用空気供給器

は任意に変えられるようになっている。

燃料にはトルエン (C_7H_8) を使用し、噴射圧 21.0 MPa として、一回当たりの噴射量 2.87 cm^3 一定として実験を行った。燃焼により排出されるすす濃度は燃焼室入口から 430 mm 下流の位置で測定した。

すす濃度ならびに火炎の着火、発光強度および分光強度の測定装置の概略を図3に示す。発生したすす濃度は He-Ne レーザ (632.8 nm, 1.5 mW) を光源とした透過光強度をフォトマル (浜松-R 446) で測定し、すす数密度、重量濃度を求めた。入射光の断面は直径 30 mm の円形であり、燃焼室出口部を通過した透過光はレンズで集光され光ファイバーを通してフォトマルに導かれ

る。変換された電気信号は S-N 比を上げるため、チョップの参照信号と共にロックインアンプに入力し、A/D 変換器を通してデータ処理し測定を行った。データのサンプリング間隔は各チャンネル 1 ms に設定した。すすの数密度 N_s (Particles/cm³) は次式によって計算した。

$$N_s = \frac{\ln(I_r/I_o)}{-(\pi \cdot \bar{D}_{32}/4) \cdot L \cdot \bar{Q}_{ext}}$$

ここで、 I_r : 透過光強度 (V)

I_o : 入射光強度 (V)

L : 光路長 (18 cm)

すすの光学定数に Dalzell-Sarofim⁷⁾ の値を用い、粒子径に対するすすの減衰係数 $\bar{Q}_{ext}$ ⁸⁾ を求めたものを図4に示す。電子顕微鏡撮影によって得た報告⁹⁾をもとに、すすの平均凝集体の体積平均粒子径 $\bar{D}_{32}$ を 150 nm と仮定し、この値に対する平均減衰係数 $\bar{Q}_{ext}$ を 1.0 として算出した。すす重量濃度はすすの真比重を 2.0 g/cm^3 として求めた。火炎の着火、発光強度および燃焼時間はフォトダイオード (浜松-S 1406) で測定

図3 すす濃度および火炎特性の光学的測定装置

図4 すす粒子径に対する減衰係数

した。また、火炎の分光強度の測定には種々の波長帯の干渉フィルター（最大透過率40%、半値巾13 nm）を通して測定した。

3. 実験結果および考察

燃焼室内の温度履歴は燃焼状態に大きな影響を及ぼし、さらに、すす生成・分解過程を支配する大きな要因である。図5は3条件における燃焼室内中心軸方向の温度分布を示した。燃焼室入口から100 mm 付近までは比較的高温度であるが、それ以降では500～550 K 一定であり、すすの分解効果が大きく期待できない。また、旋回を加えることによって上流で若干低下するが、300 mm 付近までは他の条件に比べ、高温度履歴を示す。

3.1 火炎の分光強度 火炎全体のスペクトルを調べるために、各実験条件下で分光測定を行った結果の一例を図6に示す。図は連続スペクトルに対する任意のスペクトルの強度比を各波長についてプロットしたもの

図5 燃焼室内の温度分布

図6 火炎の分光強度

である。旋回流なしで空気温度を50℃変えた結果によると、短波長域では低い温度の873 Kの場合の強度が923 Kの場合の値よりスペクトル強度が高くなるのに対して、長波長域では逆の現象を呈している。また、旋回流を与えると長波長域で高い強度を示す。ゆえに、温度が低い場合は青炎が、また温度が高い場合は黄橙炎が支配的になる傾向にある。

3.2 空気流速 (V_2) による影響 測定は全て火炎の発光強度とすす粒子通過に伴う透過光の減衰度を燃料ポンプ駆動時から記録する方法で行った。図7(a)(b)(c)は空気温度 ($T_2 = 873$ K) 一定、旋回流なしの状態での燃焼室入口(予熱室出口)の空気流速を0.44, 0.55 および0.66 m/sと変化させた場合の測定結果とすす濃度

変化を示したものである。図上段は透過光の減衰度と発光強度を電圧 (V: ボルト) 表示し、下段は実線ですす数密度 (N_s : Particles/cm³), と破線で累積すす重量濃度値 ($\int W_s dt$) をプロットした。また、図中Sは燃料噴射時を示し、発光強度の立ち上がりまでの時間を

図7 空気流速の影響

着火遅れ(τ :ms)とした。(以下、図の表示方法は全て同じである。)空気流速を大きくするほど減衰量は小さくなり、すす濃度は低下する。図8は測定値を整理したものであり、流速を横軸にとり、図(a)は着火遅れ時間、図(b)は燃焼時間(t_c :ms)と火炎からの最大発光強度(I_{max} :V)、および図(c)は排出される全すす重量濃度(W_s)をそれぞれプロットした。着火遅れは顕著な変化がみられなかったが、燃焼時間、最大発光強度およびすす排出量は流速の増加と共に減少する。これは、空気流速の増加により噴霧流内への空気の誘入が促進され予混合化が進み、予混合的な火炎が形成しやすいためすす排出量が減少していると考えられる。

3.3 空気温度(T_2)による影響

旋回流なしで、空気流速を0.55 m/s一定として、燃焼室入口空気温度 T_2 を823, 873 および923 Kと変えた場合の結果を図9, 10に示した。図9より、空気温度を上げると定性的に減衰量が大きくなり、すす排出量が増加する。図10の横軸は絶対温度の逆数($1000/T_2$:アレニウス型)で示した。空気温度が上がると着火遅れが著しく短くなり100℃上昇させると着火遅れは約1/3に短くなった¹⁰⁾ また、燃焼時間および火炎の最大発光強度は大きくなっている。さらに、すす重量濃度の結果においてもすす排出量が著しく増加している。これらのことから空気温度の上昇によって着火遅れが短くなり、拡散型の

(a) 着火遅れ時間分布

(b) 燃焼時間と火炎の最大発光強度分布

(c) 全すす重量濃度分布

図8 空気流速の影響

火炎が形成され、燃焼初期においてすすの生成が著しいことがいえる。しかし、前述(図5)のように燃焼室の150 mm 後流においては温度がすす分解には寄与しないレベルまで著しく低下しているため、すす排出量は初期

燃焼のすす生成のみによって律せられる。逆に、低い温度の823 Kでは着火遅れは長くなり、噴霧と空気の混合が促進され予混合的な火炎を呈し、すす生成が抑制されている。このように空気温度変化による燃焼状態の差異

図9 空気温度の影響(旋回流なし)

は、着火遅れ時間の長短による混合気の形成状態に起因し、これは図6の火炎の分光分析結果からも結論づけられる。ゆえに本実験のような層流に近い流れ場のもとで後流の温度レベルが低い場合には空気温度を上げることによって、かえってすすの排出量が多くなる。

3.4 旋回流を加えた場合の空気温度による影響

乱れ場のもとで、空気温度の変化がすす生成におよぼす影響を調べた。図11, 12はスワール比(体積流量比 $S_{rv} = 0.15$ または噴出速度比 $S_{rs} = 50.0$)一定の旋回流をかけ、空気の温度を変えた場合の結果を示した。図11と前述の図9の比較において、旋回流を加えることによって減衰量は低下し、すす生成量も減少している。

(a) 着火遅れ時間分布

(b) 燃焼時間と火炎の最大発光強度分布

(c) 全すす重量濃度分布

図10 空気温度の影響(旋回流なし)

図12において旋回流を加えても温度変化による傾向は図10と同じである。しかし、温度変化に対する着火遅れの変化は小さくなり、高温の923 Kでは長くなっている。全体的に着火遅れは長くなり、噴霧流と空気の予混合化

が進行し、すす生成が抑制されている。すす重量濃度が温度の上昇と共に増加しているが、旋回流なしの図10(c)の場合と比べて全体的なレベルが著しく低下した。

3.5 スワール比による影響

図 11 一定の旋回流のもとでの空気温度の影響

(1) 流量比 (S_{rv}) による影響 図13, 14 は空気温度 873 K (600 °C) 一定のもとで体積流量比によるスワール比 ($S_r = S_{rv}$) を変えた場合の結果を示す. 図13 (a)(b)(c) は $S_r = 0.0, 0.33$ および 0.71 の場合の結果

である. スワール比を大きくすると減衰量は小さくなる. 図14 (a)から, スワール比に対して着火遅れは変わらず, 影響はなかった. 図(b)より, 旋回強度が大きくなると燃焼時間および火炎の最大発光強度が若干小さくなってい

(a) 着火遅れ時間分布

(b) 燃焼時間と火炎の最大発光強度分布

(c) 全すす重量濃度分布

図12 一定の旋回流のもとでの空気温度の影響

る。図(c)より、すす排出量は著しく低下している。 $S_{rv} = 0.71$ の場合には旋回流なしの場合に比すす排出量が1/50になっている。旋回流により燃焼用空気が噴霧内へ誘入されやすくなり予混合的な燃焼を起こし、すす生成を抑制しているためである。

(2) 速度比(S_{rs})による結果 図15, 16は空気温

度873 K(600℃)一定のもとで速度比によるスワール比(S_{rs})を変えた場合の結果を示す。図15(a)(b)(c)は $S_{rs} = 0.0, 50.0$ および100の測定結果である。スワール比を大きくすると極端に減衰量は減少する。図16(a)より、スワール比に対する着火遅れの差異は認められない。このようにスワール比を変えても着火遅れに大きな

図13 スワール比の影響(流量比表示, S_{rv})

影響が現れない理由として、全体の空気量を一定にしたこと、また、旋回流を加える幾何学的な点が考えられる。図(b)では、スワール比が大きくなると燃焼時間および火炎の最大発光強度が減少している。図(c)に示したすす重量濃度の結果においてはスワール比の増加に伴ってすす

排出量が大幅に減少している。 $S_{rs}=100$ の場合は旋回流なしの場合に比べてすす排出量が約1/100に低減されている。これは火炎の予混合化の促進と火炎の乱れの影響により、すすの生成が抑制され分解（酸化）が促進されるためである。

(a) 着火遅れ時間分布

(b) 燃焼時間と火炎の最大発光強度分布

(c) 全すす重量濃度分布

図14 スワール比の影響（流量比表示， S_{rv} ）

4. ま と め

大気圧下で、燃焼用空気の流れ、温度並びにスワール比を種々変えた場で、一定量のトルエンによる噴霧燃焼

において、全体的な火炎の観察と、すす排出量を測定した。実験結果を要約すると次のようなことがいえる。

(1) 空気温度を上げると黄橙色の火炎を呈し、着火遅れは短くなり、すす生成は促進される。しかし、低い温度

図 15 スワール比の影響 (速度比表示, S_{rs})

(a) 着火遅れ時間分布

(b) 燃焼時間と火炎の最大発光強度分布

(c) 全すす重量濃度分布

図 16 スワール比の影響 (速度比表示, S_{rs})

レベルでは着火遅れは長くなり, 主に青炎を呈し, 燃焼時間は短くなり, すず生成は抑制される。

(2) 空気流速を上げると噴霧流内への空気の誘入が促進され, すずの生成が抑制される。

(3) スワール比を大きくするとすずの生成が抑制され, 分解(酸化)が促進されるため, 最終的な排出量は著しく低減できる。

実験に用いた装置の一部は日本機械学会 RC-86 高性能化ディーゼル機関の排出物質低減に関する分科会(主査: 松岡 信)の助成金を受けた。また, 三井造船株式会社並びにヤンマーディーゼル株式会社からご援助をいただいた。ここに謝意を表します。

記 号

$\bar{D}_{32}$	: すず凝集体の体面積平均粒子径 (nm)
$\bar{Q}_{ext}$	: すず粒子の平均減衰係数
m	: すず粒子の光学定数
k	: すず粒子の吸収係数
L_c	: 燃焼室の軸方向距離 (mm)
T_2	: 燃焼室入口空気温度 (K)
P_j	: 燃料噴射圧力 (MPa)
v_2	: 主流方向の燃焼室入口空気流量 (cm^3/s)
v_{s2}	: スワール器出口空気流量 (cm^3/s)
V	: すず粒子による透過光の減衰強度と火炎の発光強度 (voltage)
V_2	: 主流方向の燃焼室入口空気速度 (m/s)
V_{s2}	: スワール器出口空気速度 (m/s)
S_{rv}	: 噴出体積表示によるスワール比 ($= v_{s2} / v_2$)
S_{rs}	: 噴出速度表示によるスワール比 ($= V_{s2} / V_2$)
I	: 火炎全体の連続スペクトルの強度 (V)
I_λ	: 波長 λ での火炎強度 (V)
I_{max}	: 火炎の最大発光強度 (V)
τ	: 着火遅れ時間 (ms)
t_c	: 燃焼時間 (ms)

N_s : すず粒子の数密度 (Particles/ cm^3)

W_s : 排出された全すず重量濃度 (g/m^3)

$\int W_s dt$: 排出されるすずの累積重量濃度

文 献

- (1) 西田修身, 学位論文(大阪大学), (1984年)。
- (2) 新井・ほか3名, 機論, 46-405 (昭55-5), 991。
- (3) 中西・ほか2名, 機論 (B編), 49-437 (昭58-1), 255。
- (4) 山根・ほか3名, 機論 (B編), 54-498 (昭63-2), 518。
- (5) 石谷・ほか2名, 機論 (B編), 54-507 (昭63-11), 3295。
- (6) Nishida, O. and Mukohara, S., Combustion and Flame, 47-3 (1982), 269。
- (7) Dalzell, W.H. and Sarofim, A.F., Transaction of the ASME, 91-1 (1969-2), 100。
- (8) 西田・向原, 神戸商船大学紀要, 第II類第30号 (昭57-7), 23。
- (9) 西田・向原, 舶機誌, 18-5 (昭58-5), 41。
- (10) Freeman, G. and Lefebvre, A.H., Combustion and Flame, 58-2 (1984), 152。

〔質 疑 応 答〕

質問者 新井雅隆 広島大学

〔質問〕 すずの測定を行った場所と火炎との位置関係をお教え願います。

〔回答〕 すず濃度の測定位置は燃料噴射弁の位置より350mm下流部です。火炎は円筒型燃焼室内で形成され, すず測定位置では燃焼が完了し, すず粒子のみが通過している。

さらに, すべてのすず粒子を測定するために, 円筒型燃焼室出口から測定部までは2次元のベルマウス型排気口とした。