非定常噴霧火炎の燃焼に及ぼす障害物による攪乱の影響*

元 永 浩^{*1}, 小 酒 英 範^{*2}, 神 本 武 征^{*2}Enhancement of Fuel-Air Mixing in Diesellike Flames via
Flame Impingement on a Turbulence-Generating Plate

Young-Ho WON, Hidenori KOSAKA and Takeyuki KAMIMOTO

Soot concentration is very high in the periphery near the head of an unsteady spray flame which is achieved in a quiescent atmosphere in a rapid compression machine. To reduce soot concentration in this region and enhance combustion, it was intended to improve fuel-air mixing in the flame head by letting the flame impinge on a turbulence-generating plate. Two types of turbulence-generating plates, one of the donut type and the other of the cross type, were tested. Soot concentration in the flame was imaged using the laser shadow technique. The overall soot concentration was remarkably reduced in the case in which the flame impinged on the cross type plate at 333 nozzle diameters from the nozzle exit.

Key Words: Combustion, Diesel Engine, Flame Impingement, Flame Temperature, Soot Visualization

1. まえがき

ディーゼル機関から排出されるすす粒子はその有害性のため社会的問題になり、排気規制が厳しく成りつつある。すすの排出を低減するためには燃焼室内でのすす生成機構を解明することが重要である。著者らのレーザシート光による2次元すす可視化法を用いた非定常噴霧火炎内のすすについての研究は、すす生成が活発な領域は火炎先端であることと、先端では混合が不十分なので生成されたすすが酸化されにくいことを明らかにしている⁽¹⁾。従ってこの領域ですす生成の抑制および酸化を促進するためには火炎の流動場に攪乱を与えることが有効と考えられる。攪乱法としては雰囲気中に流動を与える方法と火炎を平板⁽²⁾または障害物に衝突させる方法とがあるが、本研究では火炎を障害物に衝突させる方法を試みた。

2. 障害物

2. 1 形状および寸法 障害物は図1にその寸法

と形状を示すようにドーナツ形と十字形の2種類を用いた。障害物による火炎の熱損失の差をできるだけ小さくするため、両障害物の熱容量すなわち衝突部分の面積を同じにした。表1は両障害物の寸法を障害物の設置位置での噴霧の半径 r 、で無次元化した値を表す。ただし火炎の半径は非蒸発噴霧の半径と同一と仮定し、その噴霧角は 20° として算出した⁽³⁾。またノズルから障害物までの距離 X_0 はノズル噴口径 d_n で無次元化してある。

ドーナツ形障害物の中心を通過した火炎は自由噴霧火炎における先端渦と同じ方向の旋回流を発生し、自由火炎での先端渦⁽¹⁾が存在したままその流動を促進することが予想される。一方、十字形障害物は火炎中心で障害物に衝突して放射状に広がる流れと障害物を通過して火炎下流へ向かう流れとが干渉することによって複雑な流れ場を作り、大規模な渦構造が破壊されると予想される。

2. 2 障害物の設置位置 障害物の設置位置 X_0 は図2に示すように 50 mm ($X_0/d_n = 3.33$)と

* 平成4年7月14日 第10回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成4年5月13日。

*¹ 正員、東京工業大学大学院。

*² 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

表1 障害物寸法および設置位置の無次元値

Impinging distance X_c (mm)	X_c/d_n	Radius of spray r_s (mm)	Dimensions of impinging plates			
			Donut		Cross	
			r_i/r_s	r_o/r_s	$B/2r_s$	$W/2r_s$
50	333	9.1	0.66	1.1	0.27	1.1
80	533	14.5	0.41	0.68	0.17	0.68

図1 障害物の形状および寸法

80 mm ($X_c/d_n = 533$) であり、前者は火炎が障害物に到達した着後に着火が起きる位置、後者は初期燃焼が終わり熱発生率が再び拡散燃焼によって上がり始める直前の位置である。 X_c が50 mm ($X_c/d_n = 333$) では燃料液滴の蒸発は既に完了しているので液滴の障害物への衝突はない。

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置および条件 燃焼装置は燃焼室直径196 mm、行程560 mm、トップクリアランス40 mmの大型急速圧縮装置⁽⁴⁾と油圧制御式単発噴射装置⁽⁵⁾から構成されている。表2は実験条件を表す。ノズルは噴口径0.15 mmの単孔ホール形である。燃料は表に示す成分のノルマルパラフィン系の燃料を用いた。噴射圧力が障害物による攪乱に及ぼす影響を調べる目的で噴射量一定で噴射圧力を55, 85, 135 MPaの3通りに変化させた。

3.2 実験方法 燃焼室圧力の経過を半導体式圧力計(Toyota社製)で測定し、その圧力の変化から熱発生率を求めた⁽⁴⁾

火炎の発達の様子と火炎温度を測定する目的でシリ

表2 実験条件

Compression pressure	2.7 MPa
temperature	930 K
Nozzle type	single, hole type
orifice diameter	0.15 mm
Fuel	0-solvent $\left[\begin{array}{l} n-C_{12}H_{26}:22\% \\ n-C_{13}H_{28}:54\% \\ n-C_{14}H_{30}:22.4\% \end{array} \right]$
Injection fuel amount	12 mg
pressure	55, 85, 135 MPa
duration	3.5, 2.75, 2.3 ms

図2 火炎の先端到達距離と熱発生率との関係 (噴射圧力 $P_{inj} = 85$ MPa)

ンダーヘッドに設けられたガラス窓を通じて7000 fpsの速度で火炎の高速度直接撮影を行った。火炎のネガカラーフィルムの画像解析による火炎温度の計算方法は安ら⁽⁶⁾の方法と同一である。フィルムの色濃度の分析はカラーCCD (Sony XC007) による赤画像と青画像を用いた。

すすの可視化は横田ら⁽⁷⁾と同様にAr⁺レーザ(波長514 nm, 出力1.5 W)を用いた高速度影写真を用いた。画像から得られた火炎の透過率 τ と火炎内のすす体積濃度 f_v との関係は次のようになる。

$$f_v = -\frac{\lambda}{6\pi I m \left(\frac{m^2-1}{m^2+2} \right)} \ln \tau \quad (1)$$

ここで λ はレーザの波長を、 m はすす粒子の複素屈折

図3 自由火炎と障害物によって攪乱された火炎の熱発生率の比較($X_c/d_n = 333$, $P_{inj} = 85\text{MPa}$)

図5 自由火炎と障害物によって攪乱された火炎の熱発生率の比較($X_c/d_n = 533$, $P_{inj} = 85\text{MPa}$)

図4 自由火炎と障害物によって攪乱された火炎の燃焼期間の比較($X_c/d_n = 333$)

率を、 Im は複素数の虚数部をそれぞれ表す。式(1)より透過率 τ の対数は光路全体のすす体積濃度 f に比例する。火炎の透過率は燃焼室前面ガラス窓に貼ったグレースケールを用いて算定した。透過率 τ と画像処理に用いたCCDカメラの出力 E の関係は次のようになる。

$$\log(E/E_b) = -\gamma \log \tau \quad \text{-----}(2)$$

ここで E_b は背景光出力、 γ はフィルムのガンマ値である。

4. 実験結果と考察

4.1 障害物による攪乱が熱発生率に及ぼす影響

図3に噴射圧力85MPaでの障害物がある場合とない場合の熱発生率の比較を示す。2種類の障害物ともその設置位置 X_c/d_n は333($X_c = 50\text{mm}$)であ

る。図3より衝突のない火炎に比べて障害物に衝突させた火炎の熱発生率は初期燃焼のみならず拡散燃焼期にも高くなり、燃えきりも早くなることが分かる。ドーナツ形と十字形障害物によって攪乱された火炎の熱発生率を比較すると十字形のほうが熱発生率の増加も大きく燃えきりも早い。図4に最終的に発生した総熱量の90%の熱量が発生した時刻すなわち燃焼期間の障害物の形状、噴射圧力による変化を示す。十字形に衝突した場合が燃焼期間が一番短くなる。また噴射圧力が高くなるにつれて燃焼期間が短縮するが、その効果は衝突のない自由火炎で一番大きい。

図5に障害物の設置位置 X_c/d_n が533($X_c = 80\text{mm}$)での熱発生率の結果を示す。噴射圧力は85MPaである。両障害物とも拡散燃焼のピーク値前後の熱発生率が衝突なしの火炎に比べて高くなっている。しかし両障害物による熱発生率の増加率は図3の障害物の設置位置 X_c/d_n が333の場合と異なってほぼ同程度である。 X_c/d_n が533の位置では噴射方向の運動量の半径方向分布が様に近づき、そのため、障害物の形状より断面積の方が攪乱に一次的な影響を及ぼすようになったものと考えられる。

4.2 障害物が火炎の温度分布に及ぼす影響

図6に噴射圧力85MPaで自由火炎と攪乱された火炎について2色法を用いて求めた温度分布の比較を示す。画像の中の横線は障害物を表す。まず火炎の発達の様子を見ると火炎が X_c/d_n が333で設置した十字形障害物に衝突した場合、火炎は半径方向に広がり下流にはあまり進まない。火炎がもつ運動量が十字形障害物の中心付近の領域に集中しているため、火炎の中心から半径方向に広がるガスの運動量が火炎周辺ガスの運動量より大きいと考えられる。一方、同位置に設置されたドーナツ形障害物は自由火炎に比

図6 自由火炎と攪乱された火炎の温度分布の比較 ($P_{inj} = 8.5 \text{ MPa}$)

べ先端到達距離を若干低下するが、火炎の形はほぼ同じである。図6の自由火炎の温度分布の特徴としては、火炎先端で温度が低く、火炎の最大幅周辺領域付近で一番温度が高い。この傾向は燃焼初期 ($t < 2.3 \text{ ms}$) に著しい。火炎が下流に進むにつれ火炎温度は高くなり、半径方向の温度差も小さくなる。

X_c/d_n が333の温度分布を見ると、火炎温度が全般的に低くなる傾向がある。特に十字形の場合火炎温度がかなり低くなり、2450 K以上の温度領域はほとんどない。ドーナツ形の場合、燃焼中期 ($t = 2.3 \sim 2.8 \text{ ms}$) で2450～2600 Kの領域が火炎全領域に広がり、火炎先端で低い温度領域が自由火炎に比べて狭くなる。一方 X_c/d_n が533の場合は、衝突後火炎先端での温度が自由火炎に比べ高くなる傾向がある。障害物を通過した火炎の先端では2600 K以上の高温領域が観察される。

衝突位置 X_c/d_n が333では攪乱によって火炎温度が低下するが、 X_c/d_n が533では火炎温度が上昇する理由として次のことが考えられる。 X_c/d_n が333では攪乱による熱発生率の増加以上に空気導入率が改善され、当量分布の均一化によって温度が下がり、 X_c/d_n が533では局所的に濃い混合気と空気との混合が促進され、燃焼が活発になって温度が上

がると思われる。

4.3 障害物が火炎のすす分布に及ぼす影響

図7に噴射圧力8.5 MPaでの自由火炎と障害物によって攪乱された火炎の透過率 τ の対数分布の時間変化を示す。前節で示したように透過率 τ の対数はすす濃度に比例する。自由火炎のすす濃度分布は火炎幅が最大となる領域より下流ですす濃度が高い。この領域ではすす濃度は1以上になる。 X_c/d_n が333の場合、両障害物によるすす濃度分布を自由火炎と比べてみると、すす濃度が著しく減少することが分かる。特に十字形は低減効果が著しく、すす濃度0.75以上の領域はほとんどない。ドーナツ形による攪乱がすす濃度に及ぼす影響も熱発生率に及ぼす影響と異なって燃焼後期まですす低減効果が見られる。

X_c/d_n が533で両障害物によって攪乱された火炎のすす濃度分布を自由火炎と比べてみると、両火炎ともすす濃度が1以上の領域は障害物付近に限られているし、火炎先端のすす濃度はかなり減っている。混合促進によるすす酸化の促進が原因と考えられる。

図8に噴射圧力5.5 MPa、 X_c/d_n が333で両障害物による攪乱がすす濃度に及ぼす影響を示す。また自由火炎の噴射圧力を13.5 MPaに高圧化した場合のすす濃度分布を合わせて示す。図7の噴射圧力

図7 自由火炎と攪乱された火炎のすす濃度分布の比較 ($P_{inj} = 8.5\text{MPa}$)

図8 攪乱された火炎 ($P_{inj} = 55 \text{ MPa}$, $X_c/d_n = 333$) と噴射圧力135 MPaの自由火炎のすす濃度分布の比較

85 MPaのすす濃度分布と比較すると十字形の場合は同程度であるが、ドーナツ形の場合はすす低減効果が小さい。また噴射圧力55 MPaで十字形障害物により攪乱された火炎内のすす濃度は噴射圧力135 MPaの自由火炎のすす濃度より低いことは注目すべきである。

5. まとめ

大型急速圧縮装置内に実現した非定常自由噴霧火炎を障害物に衝突させ、火炎の構造を攪乱することによって燃焼改善およびすす生成抑制を図り、次のような結果を得た。

(1) 障害物の位置が噴口から50 mm ($X_c/d_n = 333$)で火炎中心を壁面に衝突させた十字形の攪乱効果がこの領域を通過させたドーナツ形より大きく、燃焼期間の短縮、すす低減効果が大きい。一方、噴口から80 mm ($X_c/d_n = 533$)で設置された障害物によるすすの低減は十字形とドーナツ形がほぼ同一水準である。

(2) 噴口から50 mm ($X_c/d_n = 333$)での攪乱は平均当量比を低下することによってすす生成を低減する。噴口から80 mm ($X_c/d_n = 533$)での攪乱

は、火炎先端領域内の当量比を均一化し、その領域の温度を自由火炎に比べて上昇させることによりすすの酸化を促進する。

(3) 十字形によって攪乱された火炎のすす濃度は噴射圧力の影響をあまり受けない。一方、自由火炎とドーナツ形によって攪乱された火炎では高圧噴射のほうがすす濃度の低減効果が大きい。

本研究に当たり、実験の協力を本学研究生である佐野貴司氏、李世文氏からいただいた。ここに記して感謝の意を表す。本研究は文部省科研費補助金重点領域研究「燃焼機構の解明と制御に関する基礎研究」の一部として実施された事を記す。また画像解析には東京工業大学機械工学科知能化機械設備を用いた。

文 献

- (1) 元 ほか2名, 機論B, 57-543, p3966, 1991
- (2) Kamimoto, T., et al., SAE Paper 821035, 1982
- (3) 小酒ほか2名, 機論B, 55-519, p3587, 1989
- (4) 小林ほか2名, 機論B, 48-426, p389, 1982
- (5) 神本ほか2名, 機論B, 53-487, p1117, 1987
- (6) 安 ほか3名, 機論B, 47-417, p896, 1981
- (7) 横田ほか2名, 機論B, 54-499, p741, 1988