レーザーシート散乱法による非定常自由噴霧
火炎内のすす生成に関する研究*元 永浩*¹ 神本 武征*² 小林 治樹*² 小酒 英範*²A Study on Soot Formation in Unsteady Free Spray Flames by means of the
Laser Sheet Scattering Technique

Young-Ho WON, Takeyuki KAMIMOTO, Haruki KOBAYASHI and Hidenori KOSAKA

The two-dimensional distribution of soot particles in an unsteady free spray flame in a rapid compression machine was visualized using the laser sheet scattering technique. Scattered light from soot particles was taken by a CCD camera via a high-speed gated image intensifier. The scattered light image of a 40 mm x 50 mm cross section taken at 70 mm and 90 mm downstream from the nozzle tip showed that the soot concentration is the highest in the periphery of the flame tip region. The soot concentration in the center of the flame is low and homogeneous at the early stage of the combustion, but later it becomes uneven and higher. As the fuel injection pressure is increased from 55 MPa up to 134 MPa, the soot concentration is considerably reduced, but the unevenness of the soot distribution does not change much.

Key Words : Diesel Engine, Combustion, Unsteady Spray Flame, Soot Formation, Laser Sheet, 2-D Visualization, Ion Probe

1. まえがき

最近ディーゼル機関から排出される微粒子の低減が緊急な課題となっており、レーザーシュリーレン法による火炎内のすす可視化によれば火炎先端領域ですす濃度が高いこと、高圧噴射に伴ってすす濃度が低減することが明らかになった。⁽¹⁾しかし、レーザーシュリーレン法では光路全体のすす濃度の積分値しか測定できないため火炎の内部のすす濃度の把握が困難である。これらの問題を解決するには空間分解能の高いレーザーシート法や細い探針を火炎中に挿入する方法などが考えられる。

本論文では火炎内部のすす濃度分布を可視化するため薄いレーザーシート光⁽²⁾を大型急速圧縮装置の単発噴霧火炎に入射してすす粒子からの2次元散乱光写真を取り、火炎の不均構造およびすす生成、消滅過程について考察した。火炎内部の燃焼状態を把握する目的でイオン探針を火炎中心に挿入して反応とすす生成と

の関係を調べた。また噴射圧力がこれらに及ぼす影響についても調べたので報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 実験装置の概略を図1に示す。燃焼装置は燃焼室直径200mm、行程560mm、圧縮比14.7の大型急速圧縮装置⁽³⁾と噴射圧力が30から135MPaの範囲で制御可能な油圧制御式高圧単発噴射装置⁽⁴⁾から構成されている。

すす可視化には、光源としてパルス当たり出力170mJ、パルス幅10nsのNd:YAGレーザーの第2高調波(波長532nm)を用いた。レーザー光は焦点距離が40mm、250mm、1000mmの3枚の円筒レンズを用いて火炎の観察領域で高さ40mm、厚みほぼ0.2mmの薄いシート光にした。シート光の強度不均一やショット毎の強度の変動を補正する目的でビームスプリッタにより入射光を分岐してTVカメラ

* 平成2年4月1日 第67期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成2年6月12日。

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

図 1. すす可視化の実験装置

図 2. イオン探針実験装置

ラで入射光の縦方向の強度分布を同時に測定した。

散乱光画像はヘッドに設置されたガラス窓を通して入射光と直角の方向から撮影した。高温のすす粒子からの自発光の影響を除去するためレンズの前にバンドパスフィルタ（中心波長 532 nm, 半値幅 4 nm）を置くと共に高速シャッター付イメージインテンシファイアを設置しシャッター時間を 600 ns に設定した。イメージインテンシファイアの蛍光面に撮影された画像データは CCD カメラに撮ったのち画像処理系（512 × 512 pixels, 8 bit）に転送、処理される。同一光学系を用いて非蒸発噴霧内の液滴の 2 次元画像も撮影したが、その際は液滴からの散乱光はすす散乱光に比べて強いので CCD カメラのみで撮影を行った。

図 2 に陽イオン探針の実験装置の概略を示す。探針

表 1. 実験条件

Operating gas	Air
Compression pressure	2.7 MPa
Nozzle type	single hole
Nozzle diameter	φ 0.15 mm
Injection pressure	55, 85, 134 MPa
Fuel	n-tridecane
Injection amount	12 mg

には直径 0.1 mm の 13% Rh/Pt の細線を碍子管に挿入し、先端を耐熱性無機接着剤で気密したもので探針有効受感部長さは 1 mm である。27 V 直流電源のプラス側を接地し、探針に -27 V の電位を与え、火炎中の陽イオンによって流れる電流を 10 KΩ の抵抗を介して電圧に変換しデジタルオシロに収録した。探針の挿入位置はノズル出口より 60 mm あるいは 90 mm 下流側の火炎中心軸上である。

2.2 測定方法 表 1 に実験条件を示す。実験は主に噴射圧力がすす生成に及ぼす影響を調べる目的でパラメータとして噴射圧力を 55, 85, 134 MPa の 3 通りに変化させた。撮影位置は図 6 に示すように噴口からレーザシート中心までの距離（Xc）が 70 mm と 90 mm の 2 箇所である。噴射開始時間に対するレーザ発光時間は遅延回路を用いて制御した。得られた散乱光強度はすす粒子の数密度と直径の両者に依存するが本研究では両者の分離は行わず散乱光強度の 2 次元画像による定性的観察のみ行った。非蒸発噴霧の可視化は雰囲気温度が常温、圧力が 0.8 MPa の窒素中の噴霧に対して行った。

2.3 光路中のすす粒子による入射光減衰が散乱光強度に及ぼす影響 入射レーザ光は火炎中を進む際に主にすす粒子による吸収によって減衰する。⁽⁵⁾ また散乱光も観測部とカメラの間に存在するすす粒子の吸収によって減衰する。これらの影響を検討するため光路中のすす粒子が直径 50 nm の球形で図 3 (A) のような軸対称分布をしていると仮定し、レイリー近似で平均すす数密度の変化による受光散乱光の強度分布を計算した。結果を図 3 (B) に示す。入射側から遠くなるにつれて散乱光強度は低くなり、その度合は粒子数密度 N に強く依存する。また図 3 (C) は散乱光がレーザシート入射断面の手前のすすによって吸収されることを考慮した計算結果である。

図3. すず濃度変化による受光散乱光の変化

A) 無次元すす濃度分布 (仮定)

B) 入射光の減衰のみ考慮した場合の散乱光強度分布

C) 手前のすすによる散乱光の減衰を考慮した場合の散乱光強度分布

図4. 入射光の減衰の影響を補正した画像

図4に比較的すす濃度が低い噴射圧134MPaの条件で得られた散乱光画像を示す。水平方向に平行な明暗のすじが見られるが、これはレーザシート光が急速圧縮装置燃焼室内の圧縮空気を通過する際に直線のレーザシート光が圧縮空気の不均一な密度勾配によってわずかに変形したためである。さて図4の原画像を見ると入射側の反対側の散乱光強度が低くなっている。この画像を図3で示したような考えに基づいてすす粒子による入射光の減衰の影響を補正してみた。補正計算では 1) 入射光の減衰の影響のみ考慮する、 2)

図5. 仮定した最低透過率 (τ_{min}) 変化による補正画像の変化

(A) 原画像 (B) $\tau_{min}=0.2$

(C) $\tau_{min}=0.1$ (D) $\tau_{min}=0.05$

図6. レーザシュリーレン法によるすす生成領域の可視化とレーザシート散乱法の適用領域

光路中のすす粒子直径が一定と仮定する。1) の仮定により散乱光画像上での i 点での出力 E_i は次のように表せる。

$$E_i = A \tau_i I_0 C_{sc} N_i \quad (1)$$

ここで A : 検出感度定数

 τ_i : 入射点から i 点までの入射光透過率

 I_0 : 入射光強度

 C_{sc} : 散乱断面積

 N_i : i 点でのすす粒子数密度

式(1)により入射光減衰を補正した画像出力値は E_i / τ_i になるので原画像を補正するには各点での τ_i を求める必要がある。 τ_i は次の式で表せる。

$$\tau_i = \exp \left(-C_{sc} \sum_{n=1}^{i-1} N_n \right) \quad (2)$$

図7. 2次元断面におけるすす散乱光強度分布 ($X_c = 70 \text{ mm}$) 図8. 2次元断面におけるすす散乱光強度分布 ($X_c = 90 \text{ mm}$)

図9. すず分布のスケッチ

図10. 陽イオン電流信号

2) の仮定によって散乱断面積と吸収断面積の比は一定であることと式(1), (2)により τ_i は次のようになる。

$$\tau_i = \exp \left\{ (-1/A') \sum_{n=1}^i E_n / \tau_n \right\} \quad \dots (3)$$

式(3)よりある一点での透過率が分かれば定数 A' が求まり、各点での減衰率が計算できる。本研究ではレーザシート光が通過する領域での最低透過率を10%と仮定したが、この仮定は図6のすす透過光写真から求めた最低透過率が10%前後であることによる。念のため仮定する最低透過率により補正した散乱光強度分布がどのように変わるかを調べた。結果を図5に示す。最低透過率が10%で左右の散乱光強度がほぼ等しくなり、10%以下でもあまり変化がない。図4の

図11. 陽イオン電流検出期間および平均イオン電流値

図12. 高速度火炎写真

右図はこのように補正を行った結果である。

3. 結果および考察

図6はレーザ透過光減衰法によるすす可視化写真であり、火炎先端の黒い影がすすの存在を示している。(6) 本実験では火炎の中心を通る断面内で写真中の平行な実線の範囲にレーザシート光を入射した。図7と図8は図6と同じ条件で X_c がそれぞれ70mmと90mmの所で撮った火炎中心断面でのすす可視化写真である。すす散乱光は噴射圧力の変化によらず次のような共通点をもっている。火炎先端でのすす分布は図9のような形で表されることが多い。斜線で表した領域はすす濃度が高い領域を示す。散乱光は先端周辺部である③と④の領域で強い。火炎中心軸上である①の領域の散乱光は初期には幅10mm程度で濃度は比較的均一であるが、時間経過によってもなると②の領域との

図 13. 非蒸発噴霧断面可視化写真

境界から強い散乱光が現れ①の部分は②の部分と分離するのがよく観測される。さらに時間が経過すると、この境界の半径方向の全域にわたって強い散乱光の小塊が観測される。噴射圧力を高くするにつれてこれらの空間分布スケールはあまり変わらないが散乱光強度は低く、濃度もより均一になる。以上の結果から噴射圧力を高くすることによって導入空気量の増加⁽¹⁾と共に乱れが強くなって混合が促進され、すす生成量が減少すると考えられる。

以上のすす散乱光強度分布特性を陽イオン電流の測定、火炎の高速度撮影、非蒸発噴霧の2次元断面写真の結果と比較して考察する。

図10は各条件で3回の測定結果を重ねて表したイオン電流波形である。輝炎におけるイオン電流は主として火炎内の H_3O^+ イオンと荷電すす粒子によると考えられる。⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 電流値の高い部分では単位体積当たり反応帯面積の増加、ガス温度の増加の他にすす濃度の増加が考えられる。イオン電流信号を図7、8の写真と対比してみると、写真上のすす散乱光の観測される領域が測定点(60mm又は90mm)に到達するとイオン電流が立ち上がり、通過し終わるとイオン電流が停止する。電流値が検出される期間は2ms程度であり、火炎速度を考慮すると空間的に30~40mmの長さに相当し、すす濃度の高い部分はイオン電流の観測される領域とほぼ一致している。図11に噴射圧力に対するイオン検出期間および平均イオン電流値を示す。平均イオン電流値は噴射圧力の増加に対して増加する傾向が見られる。すす生成の減少にもかかわらずイオン電流が増加したのは、高圧噴射に伴う混合促進による燃焼ガス温度の上昇がイオン電流に寄与する割合が大きいためと考えられる。イオン電流に及ぼす陽イオンと荷電すす粒子の影響については今後検討を要する。

図12はネガカラーフィルムを用いて撮影した直接火炎写真である。噴射圧力の高いほうがすす濃度が低下して輝度が低くなり、また不均一が減る。燃焼初期

には火炎最先端で暗い領域が観測されるが、この領域はレーザシート法によるとすす散乱光の強い領域③に相当する。火炎表面が雰囲気に触れて温度が低下してすすが多量に生成された可能性がある。燃焼初期を除いてはすす濃度が高い火炎周辺部で輝度が高い。

次にすす生成領域における燃料濃度分布の不均一性を調べるため非蒸発噴霧の2次元断面を撮影してみた。図13に非蒸発噴霧の2次元断面写真を示す。液滴数密度分布は不均一であり、先端部に数密度の高い部分がみられる。これらの不均一な構造はすすの散乱光強度分布と似た構造のように見える。火炎内の燃料濃度の不均一がすす散乱光強度分布と密接な関係がある可能性がある。

以上の実験結果から火炎先端周辺部ですす濃度が高い理由として火炎先端で周りの空気が火炎に巻き込まれる過程で生じる燃料濃度の不均一さや火炎周辺部の低温の空気による火炎の冷却などが考えられる。

4. まとめ

非定常濃噴霧火炎について、噴射圧力が火炎構造およびすす生成に及ぼす影響をレーザシート法と陽イオン検出法で調べ、次のような結果を得た。

- (1) 火炎先端部の周辺部で幅が数mm位の帯状領域で強いすす散乱光が観測される。
- (2) すす濃度の高い領域は陽イオン電流値が高い領域とほぼ一致する。また高圧噴射になるほど平均イオン電流値が高くなり、すす生成量は減る。

本研究に当たり、本学大学院生横田治之君、学部生伊東秀洋君からご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。なお本研究の研究費の一部は文部省科学研究費重点領域研究「燃焼機構の解明と制御に関する基礎研究」の補助による。

参考文献

- (1) Kamimoto et al., SAE Paper 871610, 1987
- (2) zur Loye et al., SAE Paper 870454, 1987
- (3) Kamimoto et al., SAE Paper 811004, 1981
- (4) 神本 他2名, 機論53-487, B, 1117, 1987
- (5) Chang et al., Proceedings of COMODIA, Tokyo, Japan, pp149-157, 1985
- (6) 横田 他3名, 第8回内燃機関合同シンポジウム講演論文集, pp1-6, 1990
- (7) Ahlheim et al., Comb. and Flame, 36, p117, 1979
- (8) Delfau et al., Comb. Sci. & Tech., 20, p165, 1979