YAGレーザシート法による 拡散火炎中のすす濃度分布の測定*

西 田 修 身** 藤 田 浩 嗣*** 原 野 亘****
山 本 博 文***** 森 田 一 二 夫*****

Measurement of Soot Concentration in the Gaseous Diffusion Flame by YAG Laser Sheet Method

by Osami Hishida, Hirotsugu Fujita, Wataru Harano, Hirofumi Yamamoto, Katsuo Morita

The measurements of two-dimensional distribution of soot concentration are necessary for better understanding of the conditions of the soot formation and decomposition during the rapid combustion. The YAG laser sheet (50mm×0.5mm) of wavelength 532 nm (22mJ/pulse) was used as the light source for Mie's theory. The visualization of soot particles was realized by a ICCD camera via a high-speed gated image intensifier. The scattered light images in the C_3H_8 /Air diffusion flame were measured at various cross sections above the nozzle tip. Spatial distribution (maps) plots for the soot volume fraction were obtained in the flame from the inspectional data by the light attenuation techniques. The soot volume fraction lies within the limits of 10^{-7} and $10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, and have maxima at the near part of flame front.

Larger peak values are found in the vicinity of the burner port. Those experimental results agree approximately with the previous data obtained by the light attenuation techniques.

Key words : Soot concentration, YAG laser, 2-D Visualization, G. Mie's theory, Rapid combustion.

1. ま え が き

燃焼器から排出されるすすは大気汚染問題上極めて重要な物質であり、排出量の低減策を構築することが急務である。排出量は火炎内で生成・分解過程を経て決せられるため、火炎内でのすす粒子群の挙動を適確に把握することが重要である。

過去、直接サンプリング法¹⁾並びに光学的な手法²⁾によって、火炎中のすす濃度を空間的分解能を上げて正確に測定することが試みられてきた。しかしながら、上記測定法では時間的変化の著しい、非定常又は爆発火炎等への適用には十分対応できない状態である。

本研究では非定常燃焼場で、時間的・空間的分解能を十分上げて、火炎中の二次元的すす濃度分布を定量的に得ることを目標としている。高出力のYAGレーザシート光をパルス状で火炎内へ入射させ、種々の位置でのすす粒子群からの散乱光を1ショットで取り込み、瞬時に火炎断面のすす濃度分布の測定ができた。この測定法の非定常火炎への適用の可能性を試みた。

*原稿受付 平成6年9月2日
第53回学術講演会(平成6年5月18日)

**正会員 神戸商船大学教授
(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

***正会員 神戸商船大学助手
(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

****神戸商船大学技官
(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*****学生会員 神戸商船大学院生
(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*****K・K 東京インスツルメンツ

図1 同心円モデル

図2 すす粒子の光学定数

2. 測定原理

すす粒子に波長 λ の平行光線を入射すると光は粒子によって散乱、吸収される。粒子群からの散乱光を検出することによって、すす粒子の大きさや数密度の測定に関する研究が行われてきた^{2)~6)}。

本実験ではレーザー光線をシート状に広げ面での散乱光を受光するシート法によって、火炎の断面のすす濃度分布を画像表示した。同時に検定用データは透過光減衰法によって体積濃度表示にて定量化をおこなった。

透過法によるすす体積濃度はLambert-Beerの法則により、入射光強度と透過光強度の比より次の

ように表せる^{3)~6)}。

$$f_s = \frac{-\lambda}{6\pi \times I_m \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right\}} \times \frac{1}{L} \times \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

f_s : すす体積濃度 (cm^3/cm^3)

λ : 波長 (632.8nm)

L : 光路長 (mm)

I_0 : 入射光強度

I : 透過光強度

m : 複素屈折率

$I_m \{ \}$ は、 $\{ \}$ 内の虚数部を示す。

ここで

$$c = -\frac{6\pi}{\lambda} \times I_m \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right\}$$

とおくと

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = c \cdot f_s \cdot L = \{ f_{s,1} L_1 + f_{s,2} L_2 + f_{s,3} L_3 \cdots \} \cdot c$$

$$L_n = 2\ell n \quad (n=1, 2, 3 \cdots)$$

となり、実験では層流拡散火炎であるため、火炎断面に図1の様な同心円モデル^{7)~8)}を用い、円と円の間の領域は同一状態であるとし、火炎中のすす体積濃度は最外殻より逐次求めた。なお、円と円の間の隔は1mmである。

図2は光源波長に対するすすの屈折率と吸収係数を温度変化に対して示した⁹⁾。図より使用光源波長(λ) 632.8nmに対して、1000K, 1600Kでほとんど変化がない。ゆえに、すす粒子の複素屈折率は、 $m=1.90-i0.48$ として用いた。

3. 実験装置および方法

図3はレーザーシート法の光学系及び制御系概略¹⁰⁾である。光源にはYAGレーザーの第二高調波(532nm, 22mJ/Pulse)を用い、図4に示すように、三枚のシリンドリカルレンズにて幅50mm, 厚さ0.5mmのレーザーシートを形成し、測定対象火炎の垂直断面及び水平断面に入射させ、それぞれのすすからの散乱像を光学フィルタ(530nm)を通してイメージインテンシファイア付きCCDカメラにより撮影した。垂直断面についてはレーザーシートに対して直角方向から水平断面についてはバーナ鉛直上に45度傾斜した鏡を通して撮影した。

さらに、予備実験の結果、入射レーザシート光（50 mm×0.5 mm）内でのレーザ光強度にばらつきはなかった。

図5はパルスレーザと計測部制御系のタイミング

図3 YAGレーザシート法光学系システム

図4 レーザシート光

チャート図である。レーザは、10Hzの間隔で発振され、約6 msの発光時間を有している。受光部であるICCDのゲート時間はレーザ発振と同期させ火炎からの発光の影響をなくするため100 μ sに設定し、1ショットのデータを取り込み画像処理をおこなった。また火炎の直接像は露光時間0.1 sで撮影した。

図6は光減衰法によるすす体積濃度を測定する全体装置の概略^{4), 5)}である。光源にはHe-Neレーザ（632.8nm, 5 mW）を用い、光線はチョップにより500Hzに明滅され、ハーフミラにより強度の等しい2本の光線に分離する。直進光は、 ϕ 1 mmのピンホールにて ϕ 1 mmに縮小され、火炎内を通過した透過光となり、暗箱内に設置された干渉板を経て、フォトダイオードにて受光し、電気信号に変換し、ロックインアンプに導きレコーダで記録した。

図5 制御系タイミングチャート

図6 すす粒子測定用の光学系

図7 バーナ部の詳細

オシロスコープは、主にチョッパによる参照信号と測定信号との同期状態の確認のために用いた。また、測定精度を上げるために周囲を暗幕でおおった。

図7は実験に使用したバーナの詳細である。燃料は内径10mm、肉厚1.5mmのステンレス管により上向きに流出され、層流拡散火炎を形成させた。周囲流の空気は燃料と同軸に流した。Wire Meshは、周囲流を整流させるために設けた。バーナは、任意の位置での測定を可能とするために三次元移動台に取り付けた。

4. 実験結果および考察

4.1 散乱法による結果

測定火炎は C_3H_8 流量 $0.2 L_N/min$ 、空気流量 $50 L_N/min$ の上向き層流拡散火炎である。火炎全体の長さは約60mmである。図8において(a)図は火炎軸に沿った縦断面、(b)図はノズルからのそれぞれの高さ位置での横断面のすすからの散乱光強度分布を示す。ノズル出口(Lc)25mmから40mm付近までの、火炎面近傍で著しい散乱光強度を呈する。特に30mm前後

図8 火炎中のすす散乱像

図9(a) 水平断面の散乱光強度分布

ですす生成の著しいことがいえる。それ以後の後流においては流れに沿って、分解が顕著である。図9(a)~(d)はノズル出口から、25mm、35mm、40mmおよび45mm位置での火炎軸に対して水平横断面でのすすからの散乱光強度分布を示す。図より、25mm位置では火炎面の $R=2.7mm$ 近傍での極めて狭い領域ですすの生成が顕著である。すす生成領域が狭いが、35mm位置ではピーク値の強度が最も高く、火炎内でのすす生成も活発である。さらに後流の40mmではすす粒

図 9 (b) 水平断面の散乱光強度分布

図 9 (c) 水平断面の散乱光強度分布

図 9 (d) 水平断面の散乱光強度分布

図10 透過法によるすす体積濃度

子の拡散と分解作用が進むため、緩慢なくう型分布を呈する。さらに後流の45mmではつり鐘状の分布へと移行する。

尚、任意の位置での水平断面の散乱光強度値と垂直断面の同位置での強度値はよい一致を示した。

4.2 透過法による結果

図10は図6の手法^{4), 5)}によって、同一火炎についてノズル出口から、25mm, 35mm, 40mmおよび45mm位置での火炎軸に対して半径方向について、すす体積濃度分布 (f_s : cm^3/cm^3) を測定した結果である。図より、すべての位置での分布は鞍型を示し、 $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ に分布する。ノズルから25mm, 35mm位置では鋭い鞍型分布となり、半径3~4mm付近の火炎面でピークを示す。しかし、後流域の40, 45mm位置では、緩慢な分布へと移行し、ピーク値位置は中心部に近づく。

4.3 シート法によるすす濃度分布

前述の図8に示したところの相対的すす濃度分布を定量表示する必要がある。そこで図9で最も高濃度値を示すところの $L_c = 35\text{mm}$ のピーク値を検定値として採用した。図11はシート法による散乱カウント数からすす体積濃度を示した。図より、すべての

図11 シート法によるすす体積濃度

分布は鞍型を呈し、 $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ に分布しており、図10に非常に類似している。しかしながら、図10にくらべ、全般に分布形状は鋭く、各々のピーク値位置は若干中心部に近づいている。

以上のことにより、両者の誤差は、透過法による場合、Abel関数を用いているため、誤差が集積されやすいためである。

5. ま と め

ガス拡散火炎について、透過法によって求めた検定用結果により、2次元的にすす濃度分布をシート法によって求めることができた、とくに、時間的分解能を上げて、2次元的にすす濃度分布を議論するためにはシート法は有効な手段であり、非定常燃焼場での測定に十分適用できることが可能となった。

- 1) Nishida, O., and Mukohara, S., Characteristics of Soot Formation and Decomposition in Turbulent Diffusion Flames, Combustion and Flame, Vol.47, No. 3 (1982-Sept.), P.269~279.
- 2) Nishida, O., and Mukohara, S., Optical Measurements of Soot Particles in a Laminar Diffusion Flame, Combustion Science and Technology, Vol.35, (1983-June), P.157~173.
- 3) Kent, J. H., and Wagner, H. Gg., Why'Do Diffusion Flames Emit Smoke?, Combustion Science and Technology, Vol.41, No. 5 & 6 (1984), P.245~269.
- 4) 西田・原野・山本, OI (Oxygen Index) がすす生成・分解におよぼす影響について, 日本船用機関学会第51回(春季)学術講演会論文集, (1993年5月), P.16~20.
- 5) 西田・原野・山本, OI (Oxygen Index) がすす生成・分解におよぼす影響について, 内燃機関, 第32巻, 第11号(1993年11月), P.73~79.
- 6) 西田ら, YAGレーザーシート法による拡散火炎中のすす濃度分布の測定, 日本船用機関学会第53回(春季)学術講演会論文集, (1994年5月), P.44~46.
- 7) 西田, 向原, レーザ光散乱法と透過法によるすす粒子の測定(理論的考察), 神戸商船大学紀要, 第二類第30号(昭57年7月), P.23~34.
- 8) 西田, 向原, 層流拡散火炎中でのすす粒子の光学的測定, 日本機化学会論文集(B編), 49巻441号(昭58年5月), P.1068~1077.
- 9) S. C. Lee & C. L. Tien, Optical Constants of Soot in Hydrocarbon Flames, 18th, Sympo. (Int.), (1981), P.1159.
- 10) Kermit C. Smyth, Joel E. Harrington, Erik L. Johnsson and William M. Pitts, Greatly Enhanced Soot Scattering in Flickering CH₄/Air Diffusion flames, Combustion and Flame, 29 (1993), P.229~239.