LIIによるすす濃度定量測定法の開発*

(第1報, LIIの基本特性および信号減衰補正法の評価)

稲垣 和久^{*1}, 三浦 晋平^{*2}
中北 清己^{*1}, 渡部 哲^{*3}

The Development for Quantitative Measurement Method of Soot Concentration Using LII

(1st Report, Evaluations of Fundamental Characteristics of LII and Correction method for Signal Attenuation)

Kazuhisa INAGAKI, Shinpei MIURA,
Kiyomi NAKAKITA and Satoshi WATANABE

The main factors which prevent quantitative soot measurements using laser-induced incandescence (LII) are expected to be as follows: laser intensity reduction due to soot clouds, LII signal attenuation due to soot clouds lying between the observation points and a camera and uncertainty of a relation between the signals and soot concentrations. To investigate the effects of these factors and solve these problems, LII was applied to a premixed flat flame where soot concentrations were measured in advance by transmissive light extinction method combined with computed tomography. The following points are clarified. (1) The correction on the incident laser attenuation is not necessary by using sufficient laser power because the LII signal saturates over a critical laser intensity. (2) The soot concentration is obtained from the LII signal by the calibration. (3) The signal attenuation can be corrected by multi-layer measurement technique using Lambert-Beer's law. Consequently, a quantification has been realized with accuracy of $\pm 10\%$ in this work.

Key Words: Diesel Engine, Soot Concentration, Calibration, Quantification, Laser Diagnostic Technique, Premixed Flat Flame Burner

1. 緒 言

近年環境問題が高まるにつれ、ディーゼルエンジンに対して窒素酸化物(NO_x)や粒子状物質(PM)のよりいっそうの低減が求められている。このため、新燃焼室の深索や噴射系の改良が試みられているが、さらなる燃焼改善のためには筒内における NO_x や PM 生成の現象を詳細に把握することが必要不可欠である。

これに対して PM の主要な成分であるすすのエンジン筒内分布を評価するために、従来より散乱法、透過光減衰法、2色法などが適用^{(1)~(3)}されてきたが、いずれも定性的な測定にとどまっている。しかし排気規制が今後さらに厳しくなる状況下では、より詳細なすす生成過程の解明が必要になってくると考えられ、従来の定性的な評価に加えて定量的に空間分布を測定する技術の開発が急がれている。

一方、Dec ら⁽⁴⁾によって、ディーゼルエンジン筒内のすす分布計測にレーザ誘起赤熱法(Laser-Induced Incandescence, 以下 LII と称す)が適用された。LII

は、

- (1) 瞬時に断面像が得られる、
- (2) 信号強度がすすの体積濃度にほぼ比例する、
- (3) 燃料液滴の影響を受けない、
- (4) 壁面等からの散乱光の影響を受けない、

などの面で、他の計測法より有利であるため(表1)、近年いくつかの応用例が報告されている^{(5)~(8)}。

しかし、レーザ減衰の影響やカメラと計測面との間のすすによる信号減衰の影響を考慮しておらず、定量化に関する検討は不十分であると考えられる。

そこで著者らは LII がもつ前記の優れた特性に着目し、エンジン筒内におけるすす濃度の定量測定法の開発するうえで不可欠な LII の基本特性の調査や信号の

Table 1 Advantages and disadvantages of various soot measurement techniques

	LII	Mie	Extinction	2-color
Quantitativeness	○	×	○	○
Spatial Resolution	○	○	×	×
Noise	○	×	○	○
Laser Power	high	Medium	Medium	—

○ : Good × : Not Good

* 原稿受付 1997年1月31日。

^{*1} 正員、(株)豊田中央研究所 (〒480-11 愛知県愛知郡長久手町大字長湫横道 41-1)。

^{*2} トヨタ自動車(株) (〒410-11 裾野市御宿 1200)。

^{*3} 正員、トヨタ自動車(株)。

減衰補正方法の開発を行ったので報告する。

2. 検 討 項 目

レーザシートを測定対象場に照射し、計測断面の信号分布を、それと直角な方向から検出するような系を用いて定量測定を行う場合には、

- (a) レーザ減衰による信号強度の変化の推定
- (b) カメラに到達するまでの信号減衰の補正
- (c) 信号強度とすす濃度の関係の検定

を考慮する必要がある。

そこで本研究では、上記課題を考慮し、エンジン筒内でのすす濃度分布を高精度に測定する技術を開発するために、数値シミュレーションと定常バーナによる基礎実験を用いて、以下の検討を行った。

- (1) レーザ強度と信号強度の関係の調査 [項目(a)関連]

- (2) 透過光減衰法に Computed Tomography (以下 CT と称す) を組合せて濃度分布を測定したバーナ火炎中のすす生成場に LII を適用して、信号強度とすす濃度との関係を検定 [項目(c)関連]

- (3) バーナ火炎中のすす生成場に対して、信号減衰のないカメラ側の面から奥に向かって LII 計測を順に行い、濃度への変換と Lambert-Beer の式による深層面の LII 信号の減衰補正を順次行う多層面計測法(4・3 節)の有効性を検証 [項目(b)関連]

3. 方 法

3・1 数値シミュレーション 本研究では定量化法の開発に不可欠な LII の基礎特性を把握するために、実験に加えて数値シミュレーションを適宜用いた。これらは Melton の手法⁽⁹⁾ によって、レーザ照射時の球形粒子のエネルギー保存則と連続の式を数值的に解くもので、今回は式(1)、(2)を用いて LII 信号スペクトルの時間履歴を予測する機能を追加した。なおすすの吸収係数の評価で必要になる Mie 散乱の計算には Wiscombe の手法を、すすの複素屈折率は短波長(200~300 nm)では Carter らの、長波長(300 nm~)では Lee らのものを使用した⁽¹⁰⁾。LII 計測では、輝炎との SN 比を向上させるために、通常に近紫外から紫外光を検出する。そこで本実験で用いる短波長バンドパスフィルタの透過率を考慮することによって、実際にカメラで検出される LII 信号強度を予測できるようにした。

$$dI_{D,\lambda,t} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \left\{ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k T(t)}\right) - 1 \right\}^{-1} d\lambda \frac{1}{4} Q_{abs} \times \pi D(t)^2 n_D dD \cdots \cdots (1)$$

$$I = \iint_{\lambda,t} c_{\lambda} dI dt \cdots \cdots (2)$$

I : 信号光

c : 光速

h : Planck 定数

λ : 信号光波長

k : Boltzmann 定数

T : 粒子温度

Q_{abs} : Mie 吸収係数

D : 粒子直径

c_{λ} : フィルタ透過率

n_D : 数密度分布

t : 時間

本節では、図1にシミュレーション結果の一例を示し、LII の発光現象を説明する。

図1(d)示される強度のレーザをすすに照射すると、すす粒子の温度は約4500 Kまで急上昇し[図1(c)]、赤熱光が放射されるようになる[図1(a)]。その後すす粒子径の減少によって[図1(b)]赤熱光は弱まり、照射レーザ強度が低下するにつれてすす温度は減少するため、次第に信号強度は弱まっていく。カメラで撮影される LII 像の明るさは、シャッタが開いている間に取り込まれた信号強度の積分値に相当する[300 MW/cm²の場合、図1(a)の斜線部]。また通常輝炎光の強度は、図1(a)の時刻 $t=0$ における LII 信号強度(すす初期温度を2400 Kに仮定)になる

Fig. 1 Examples of LII simulation

が, LII 信号のピーク値と比べるとかなり弱いため, カメラの撮影時間と時期を最適化することによって輝炎の影響は無視できると考えられる。

3・2 実験

3・2・1 バーナ エンジン筒内での定量測定法を確立するためには, LII 信号の検定や信号減衰の補正をする必要がある。本研究では図2, 3に示す予混合平面火炎バーナ(直径: 4.52 cm)によって形成された定常なすす生成場を対象にして, これらの検討を行った。

燃料にベンゼンを用いて, ハニカムヒータを内蔵した高温壁面を有する蒸発管内に EFI インジェクタで霧化・蒸発させ, 導入空気と均一に混合させた。燃料にベンゼンを用いることで, 体積分率で 10^{-6} 以上の高濃度すすを容易に形成することができた。またベンゼン火炎の周囲部から, 理論混合比のブタン火炎(blue flame)を形成することで, 周囲部からの火炎冷却を防ぎ, 水平面内のすす濃度分布の均一化を図った。バーナ火炎の安定化のためにバーナ出口にセラミックハニカムを設置し, 火炎中にドーナツリングを, 火炎背後に保炎金網をそれぞれ挿入した。

3・2・2 バーナ火炎中のすす濃度測定 本研究では, 図4に示される2波長光を用いた透過光減衰法に CT を組合せた方法によって, LII の測定場であるバーナ火炎中のすす濃度分布を測定した。CT は断層面を再構築するための測定系, 処理方法が複雑なため実用的ではないが, 今回のような定常かつ軸対称のすす濃度場の計測に対しては有効である。

Fig. 2 Premixed flat flame burner

Fig. 3 Photograph of premixed flat flame

Nd: YAG レーザから第1, 2高調波(532, 1064 nm)の混在したレーザビームをすす生成場に照射し, 2波長の透過光をプリズムで分離した後, フォトダイオードでそれぞれの信号強度を検出した。このときボックスカー積分器を用いて, パルスレーザの発光時間みの信号を検出積分することによって SN 比を向上させた。この積分信号を A-D 変換した後, コンピュータに取り込み, 透過率を算出した。CT のためにバーナをレーザ光軸に対して垂直に移動させる(光学系は固定)ことによって, 各ラインでの透過率を計測した。なお本研究ではすす濃度分布は軸対称であるため, 回転方向移動は省略した。各ラインでの透過率データから, 2波長それぞれ CT 処理(重畳積分法, Shep-Logan のフィルタ関数)を行い, 各点での減衰係数を求めた。各点での2波長の減衰係数の比からすす粒子径を決定した後, すす数密度を算出した。このようにして得られたすす粒子径と数密度から, 体積濃度の分布を再構築し, LII 定量測定の検討に用いた。

3・2・3 バーナ火炎中の LII 測定 LII の測定系と座標系を図5に示す。光源には Nd: YAG レーザ

Fig. 4 2-color transmissive light extinction method with CT

Fig. 5 LII measurement system

の第2高調波(532 nm)を用いた。円筒レンズ、凸レンズ、スリットによって幅の狭いレーザーシートを形成し、空間的に均一な強度分布をもつレーザー光を測定対象面に照射した。またバンドパスフィルタを用いてレーザーの散乱光を除去し、通常の輝炎に対するSN比がよくなる短波長側の信号光をCCDカメラで検出した。3・1節の検討に従って、撮影時間はレーザーパルスの発光時間と同程度の20 nsにし、撮影時期の最大の信号強度が得られるように設定した。

本測定系で得られたバーナ中心断面におけるLII像の一例を図6に示す。この場合の透過光減衰法による平均すす体積濃度 $\bar{f}_v$ は 1.0×10^{-6} であった。レーザーシートに沿って帯状のLII信号が検出されることがわかる。

4. 検討結果

4・1 レーザ強度と信号強度の関係 バーナ火炎中に形成されたすす生成場の中心断面にレーザーを照射した場合における、散乱光とLII信号分布を図7に示す。なお、すすからの散乱光は図5の測定系で、励起光のみを透過するフィルタを用いることによって測定した。軸対称のすす濃度場であるにもかかわらず、レーザー減衰の影響で散乱光は射出側(右側)ほど小さくなるが、LIIではこの影響が少ないことがわかる。

次にレーザー強度を変化させたときのバーナ中心断面におけるLII信号強度分布を計測した。図8, 9に、それぞれ入射レーザー強度が 137 MW/cm^2 以下の場合とそれ以上の場合の結果を示す。レーザー強度が 137

Fig. 6 Example of LII image in a flat flame (laser intensity: 246 MW/cm^2)

Fig. 7 Images of LII and Mie Scattering in center plane (laser intensity: 210 MW/cm^2)

MW/cm^2 以下では(図8), レーザ強度を増加させるにつれて全領域でLII信号が強くなるが, その変化の割合は次第に小さくなることがわかる。またいずれのレーザー強度でもレーザー減衰の影響で, LII信号強度はレーザー射出側(図右側)ほど低下する傾向にある。一方レーザー強度が 137 MW/cm^2 以上になると(図9), 入射側ではレーザー強度の増加によって信号が弱くなり, レーザ減衰が大きな射出側では, この傾向が逆転することがわかる。これはレーザー強度があるレベル以上になると, LII信号が弱くなることを示している。

レーザー強度と信号強度の関係を明確にするために, レーザの減衰が無視できるレーザー入射直後の位置(図

Fig. 8 Effects of laser intensity ($\leq 137 \text{ MW/cm}^2$) on LII signal distributions

Fig. 9 Effects of laser intensity ($\geq 137 \text{ MW/cm}^2$) on LII signal distributions

Fig. 10 Effect of laser intensity on LII signal at $y = -1.7 \text{ cm}$

8, 9 中の $y = -1.7$ cm) において, 入射レーザー強度に対する LII 信号強度をプロットした結果を図 10 に示す。これによると LII 信号は最初レーザー強度の増加とともに強くなるが, レーザ強度があるレベル以上では変化が緩慢になることがわかった。これはすす粒子蒸発に伴う表面積の減少による信号低減効果と, 温度上昇による信号増大効果が平衡するためであると考えられる。さらにレーザー強度を増大させると前者の効果が勝り, 信号は次第に低下するようになる。このため 90 MW/cm^2 から 210 MW/cm^2 では信号強度の変化は 10% 以内になることがわかった。したがって, レーザ減衰による信号の変化は, レーザ強度がこの飽和領域内にある限り最大で 10% になり, この誤差は事実上無視できると考えられる。そこで本研究のこれ以降の LII 実験では, レーザの入射強度を飽和領域の上限値付近に設定し, レーザ減衰の影響を考慮しなかった。

なお今回用いたすす生成場は, すすの厚みが 4 cm 以上でかつ比較的高濃度であったため, レーザ強度を最適値にしてもレーザー出射側においてこの飽和特性の下限値以下になる領域が生じたため, レーザ減衰の影響を受ける場合があった。

次に, 3・1 節で示した数値シミュレーションを用いて, この飽和特性に与えるレーザー波長の影響を調べた結果を図 11 に示す。

図 11 から 1064 nm (Nd: YAG レーザの第 1 高調波) では, 飽和するために必要となるレーザーエネルギーレベルは上昇するが, 飽和領域は拡大され, 248 nm (KrF エキシマレーザ) では, 信号のピーク後の減衰が早く, 飽和領域が縮小されることがわかる。これらの傾向の差異は, すす粒子のレーザーエネルギー吸収率がレーザー波長によって異なることに起因する。操作性や必要十分な飽和領域の大きさを考慮すると, 励起波長は可視光の 532 nm が最適であると考えられる。

4・2 すす濃度と信号強度の関係 エンジン筒内

Fig. 11 Effect of laser intensity on LII signal with variety of laser wavelength (simulation)

のすす濃度を定量測定するためには, LII 信号とすす濃度の関係を検討しておく必要がある。そこで 3・2・2 項の CT 法からあらかじめ濃度が既知となっているバーナ火炎中のすす生成場に LII を適用することによって, これらの関係を求めた。当量比を種々変化させることによって, 平均すす体積濃度の異なるすす生成場を形成し, バーナの中心断面 ($x=0$) での LII 信号強度分布を測定した結果を図 12 に示す。このときいずれの濃度においても, 粒子径はほとんど変化せず, 直径が約 80 nm になった。図 12 から平均すす体積濃度 $\bar{f}_v$ が増加するにつれて, LII 信号は全体的に強くなることがわかる。

次にバーナの中心点 ($x=0, y=0$) における信号強度とすす体積濃度の関係を図 13 に示す。カメラに到達するまでの LII 信号の減衰に対しては, すす濃度分布の軸対称性と Lambert-Beer の法則を利用することによって, $X=0$ 面でのレーザー光 (532 nm) の透過率から式 (3) を用いて補正した。

$$I_0 = \frac{I'}{\exp \left\{ \frac{\bar{Q}_{LII}}{2Q_{532}} \ln(\tau_{532}) \right\}} \quad (3)$$

$$\bar{Q}_{LII} = \frac{\int_{\lambda} c_{\lambda} Q_{\lambda} dI_{\lambda}}{\int_{\lambda} c_{\lambda} dI_{\lambda}} \quad (4)$$

Fig. 12 Effects of soot concentrations on LII signal distribution (laser intensity: 246 MW/cm^2)

Fig. 13 Calibrated result

I_0 : 減衰補正後の信号強度
 I' : 減衰補正前の信号強度
 $\bar{Q}_{LII}$: LII 信号の重み付き平均効率因子
 Q_{532} : レーザ光の効率因子
 τ_{532} : レーザ光の透過率
 λ : 波長
 c_λ : フィルタ透過率
 I_λ : 単色信号強度

D : 粒子径
 Q_{ext} : 効率因子
 l : 光路 (x 方向)
 f_v : すす体積分率
 上付き添字
 n : 補正後
 o : 補正前
 下付き添字
 i : 計測面番号 ($0 \sim I$)

効率因子 Q は、Mie の理論から計算した。また LII 信号は単波長ではないため、数値シミュレーションで予測される LII 信号のスペクトル I_λ を用いて、式 (4) の重み付き平均処理を施した効率因子で評価した。

図 13 に示すように、式 (4) で求められた LII 信号強度はすす体積濃度にほぼ比例することがわかる。この関係から LII 信号をすす濃度に変換することが可能になり、エンジン筒内での定量計測を可能にするデータを得ることができた。

4・3 信号減衰補正方法 エンジン筒内のすす濃度計測では、カメラから遠い深層面ほど、すすによる信号の減衰量が大きいため、すす濃度が過少に評価されると考えられる。そこで図 14 に示すような多層面計測による信号減衰補正法の有効性をバーナ火炎中のすす生成場を用いて検証した。この計測法の手順を以下に示す。

(1) カメラ側のすす雲端面 ($i=0$) から測定面 ($i=I$) まで、 x 方向に 3 mm 間隔でレーザシートを移動させ、各断面での LII 信号分布を計測する。

(2) 図 13 の検定結果を用いて、すべての計測断面の LII 信号分布をすすの体積濃度分布に変換する。

(3) 離散化した Lambert-Beer の式 [式 (5)] を用いて、カメラ側の $i=1$ 面から深層面に向かって、順次減衰補正を行い、最終的に I 面での真のすす濃度分布を算出する。

$$f_{v,i}^n = \frac{f_{v,i}^o}{\prod_{k=0}^{i-1} f_{v,k}^n \exp \left\{ \int_{i-1}^i -\frac{3Q_{ext}}{D} f_v(l) dl \right\}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 14 Multi-layer LII method

ただし式 (5) の積分項中の $f_v(l)$ は、 $i-1$ から i 面までの間ですす濃度が線形に変化すると仮定し、式 (6) に示す算術平均で定義した。その結果、式 (5) の右辺に未知数である i 面でのすす濃度 $f_{v,i}^n$ が現れるため、繰返し計算を用いてこれを解いた。

$$f_v(l) = \frac{f_{v,i-1}^n + f_{v,i}^n}{2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、式 (5) 中のすすの粒子径は通常の LII では測定できないため、今回は透過光減衰法によって計測した値を用いた。

図 15 に比較の基準とする CT による濃度分布を、図 16, 17 にそれぞれ信号の減衰補正前と後の LII による濃度分布を示す。また図 18 にレーザ照射方向に垂直なバーナ中心断面 ($y=0$ 面) での断面層分布を示す。図 16, 18 に示すようにカメラから遠い断面 ($x \rightarrow 0$) ほど、計測面とカメラとの間のすす雲が厚く LII 信号の減衰が大きくなるため、すす濃度は過少に評価されることがわかる。しかし今回提案した補正方法によって、図 17, 18 に示すように LII によるすす濃度の全体的な空間分布は、CT の結果と比較的よく対応するようになった。

図 19 にバーナ中心軸を通るレーザ照射面上のすす濃度分布 (信号減衰補正後) を示す。図 19 から LII では CT に比べて右側ほどすす濃度が過少に評価されている。これは、(1) 今回用いたすす生成場では、すす雲が厚いために、LII 信号が飽和するレーザ強度を用いてもなおレーザ減衰の影響を若干受ける、(2) すす粒子が有限の大きさをもつため、粒子背後の局所的な領域でレーザ強度が飽和領域以下になる、ことが原因であると考えられる。

以上から本計測では、レーザ入射側のバーナ左端から 2 cm の範囲では $\pm 10\%$ の精度で、またバーナ全領域においても -20% から $+10\%$ の精度で定量化が可能になった。今回よりすす領域が狭い場合やすす濃度が低い場合では、レーザ減衰の影響や信号減衰の影響がより小さくなるために、いっそう高い精度で定量化が可能になることが推察される。

Fig. 15 Soot concentration by laser extinction method with CT

Fig. 16 Soot concentration by LII without correction

Fig. 17 Soot concentration by LII with correction

Fig. 18 Soot concentration in center plane ($y=0$) perpendicular to laser sheet by LII and CT Fig. 20 Effect of soot diameter on Q_{ext}/D Fig. 19 Soot concentration in center plane ($x=0$) by LII and CT

Fig. 21 Effect of soot diameter on signal intensity in constant soot volume fraction (simulation)

5. 定量化精度に及ぼす粒子径の影響

4章では透過光減衰法によってすす粒子径がわかっている場合の定量化方法を示した。ところで式(5)に示すように、(1)信号の減衰補正には粒子径が必要である。また、(2)Meltonの簡略化した理論解析⁹⁾によると、LII信号(波長400 nmの場合)は粒子径の3.39乗に比例し、完全にはすすの体積濃度に比例しない。したがって、今回バーナによって形成したすす生

成場での検定結果を異なる粒子径をもつすす生成場に適用した場合には誤差を生じる。そこで次に粒子径が定量化の精度に及ぼす上記(1)、(2)の影響度を考察する。

最初に(1)の影響をみるために、Lambert-Beerの式(5)に現れる Q_{ext}/D の粒子径依存性を調べた結果(信号光波長370 nmの場合)を図20に示す。

粒子径 D とともに Q_{ext} は増加する傾向があるため、図20に示すようにそれらの比である Q_{ext}/D の変化は小さい。仮にすす体積分率が 10^{-6} で、光路距離 l が2 cmの場合に、Lambert-Beerの式から透過率

を算出すると、粒子径が80~200 nmまでの範囲では、その変化は2割以内であった。

次に(2)の影響をより正確に見積もるために数値シミュレーションによってすす粒子径がLII信号強度に及ぼす影響を調べた。すす体積濃度が一定の条件下、すす粒子径と数密度を同時に変化させた場合のLII信号や散乱光強度の変化を図21に示す。Mie散乱光強度はすす粒子径に大きく依存するが、LIIでは粒子直径が70~250 nmの範囲であれば、信号の変化は2割以内であることがわかった。

以上の議論から、粒子径の変化に比べてそれが定量測定結果に与える影響は比較的小さい。したがって、粒子径がわからない場合でも、ある精度の範囲内でのすす濃度の推定は可能であると考えられる。しかし、高精度な定量化を目指すためには、上記に示したすす粒子径の依存性を考慮する必要があることは明白である。そのため今後は、原理的には可能であると予測される、LIIを用いたすす粒子径の測定法(2色LII)⁽¹⁰⁾を実験的に検証する。

6. ま と め

検定を含めたLIIによるすす濃度の定量化方法を検討した結果、以下のことがわかった。

(1) レーザ強度が90 MW/cm²から210 MW/cm²までの範囲では、信号の変化が10%以内である。

(2) (1)の性質を利用すると、LII信号が飽和するレーザ強度が維持されている限り、レーザ強度による信号の変化は無視できる。

(3) レーザ波長が長くなると、(1)の飽和領域は拡大する。

(4) LII信号からのすす濃度変換(検定結果を利用)とLambert-Beerの式による深層面のLII信号の減衰補正を順次行う多層面計測によって、すす粒子径

がわかっている場合には±10%以内の精度で、すす濃度の測定が可能である。

(5) Lambert-Beerの式から信号光(波長:370 nm)の透過率を算出すると、粒子径が80~200 nmまでの範囲では、その変化は2割以内であると考えられる。(ただし、すす体積分率:10⁻⁶, 光路距離:2 cmの場合)

(6) LIIでは粒子直径が70~250 nmの範囲であれば、これによる信号の変化は2割以内であると考えられる。

(7) (5), (6)より粒子径の変化に比べてそれが定量測定結果に与える影響は比較的小さいため、粒子径がわからない場合でも、ある精度の範囲内でのすす濃度の推定は可能である。

(8) (5), (6)の粒子径依存性を考慮し、より高精度な定量化を行うためには、粒子径の測定が必要になる。

文 献

- (1) Shioji, M., Yamane, K., Sakakibara, N. and Ikegami, M., *Proc. COMODIA-90*, Kyoto, Japan, (1990), 613-618.
- (2) Nakakita, K., Nagaoka, M., Fujikawa, T. and Ohsawa, K., *SAE Paper*, No. 902081(1990).
- (3) 中北清己・河村清美・大沢克幸・高橋岳志・渡部哲, 自動車技術会論文集, 9300305, 24-1(1993), 5-9.
- (4) Dec, J. E., zur Loye, A. O. and Siebers, D. L., *SAE Paper*, No. 910224(1991).
- (5) Young-Ho Won, Kamimoto, T. and Kosaka, H., *SAE Paper*, No. 920114(1992).
- (6) Pinson, J. A., Mitchell, D. L., Santoro, R. J. and Litzinger, T. A., *SAE Paper*, No. 932650(1993).
- (7) Quay, B., Lee, T.-W., NI, T. and Santoro, R. J., *Combust. Flame*, 97(1994), 384-392.
- (8) 中川洋・遠藤浩之・出口祥啓, 第33回燃焼シンポジウム講演論文集, (1995), 430-432.
- (9) Melton, L. A., *Appl. Opt.*, 23-13(1984), 2201-2208.
- (10) 三浦晋平・渡部哲・稲垣和久・中北清己, 機講論 No. 940-10(1994), 873-875.