

# レーザーを用いた燃料噴霧および火炎伝播測定

浜崎 豊宏\*

Toyohiro Hamasaki

大気汚染防止および地球温暖化抑制の観点から、NO<sub>x</sub>、PM、CO<sub>2</sub>等の大気汚染物質を低減することが社会的急務となっている。こういう状況下で、これまではエンジンの燃焼技術の改善（リーンバーン・成層燃焼等）および後処理システムによる対応がなされてきたが、更に低エミッション化を図るためには、燃料噴霧特性と燃焼特性との関係を明確にする必要がある。このような背景において、検査計測業界においてもこのようなニーズに対応できる計測技術の開発が急がれるところである。本稿では燃料噴霧時の液滴直径分布および燃焼火炎伝播速度の計測技術に関するこれまでの知見を紹介する。

キーワード：噴霧、燃焼、火炎伝播、シュリーレン撮影法、シャドウグラフ、レーザー散乱方式粒度分布測定装置

## 1. はじめに

火の利用は、たき火から照明、炊事、暖房などの直接的な利用にとどまらず、熱機関による動力利用へと飛躍的に発展してきた。石油など化石燃料の化学エネルギーは太陽光や風力などの自然エネルギーと比較して非常に高密度で使いやすく、現代生活においては、自動車、飛行機、火力発電など多くの分野で化石燃料の燃焼がエネルギー源として使われている。

しかしながら化石燃料の埋蔵量は有限であり、また燃やすことで地球温暖化や大気汚染の原因となるNO<sub>x</sub>やCO<sub>2</sub>を大量に発生させる。限りある資源を効率よく利用するためにも燃焼現象を解明することで、さらなる高効率エネルギー源としな

ければならない。

自動車や航空機で用いられるディーゼル機関やジェット機関などの燃焼は、液体燃料を空気流中に小さな滴として噴射し燃焼させる方法で噴霧燃焼と呼ばれる。噴霧燃焼の燃焼機構は非常に複雑で未だ解明されていない点が多い。噴霧燃焼を複雑にしている要因は、(1)噴霧中の複雑な流れ (2)燃料液滴と空気の相対速度 (3)液滴の偏在 (4)液滴径分布の幅広さなどが挙げられる。

ここで紹介する燃料噴霧特性および火炎伝播の測定は、予混合気中に分散させた燃料液滴が火炎伝播に及ぼす影響を調べることを目的とし用いた技術<sup>(1)</sup>である。また、最近ではデータ処理技術の発展に伴って噴霧直径の3次元的な分布の測定も可能となっているので紹介する。

\* 計測事業部 試験エンジニアリング部

## 2. 計測方法

### 2.1 火炎伝播測定法

#### (1) シュリーレン法およびシャドウグラフ法（影写真法）の原理

屈折光学系の光路の一部に、光を曲げたり、屈折したり、遮るものがあると、結像すべきスクリーン上では、暗（明）部となって結像することを利用したもの。燃焼や熱では密度の違いを表示することで、目では見ることのできない温度場をスクリーンに投影する方法である。

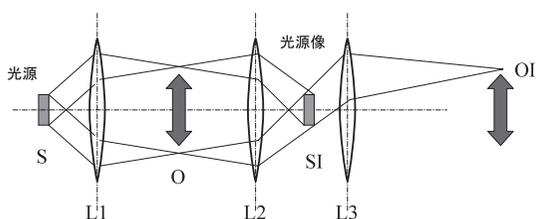


図1 シュリーレン光学系

まず図1に示すように光源はレンズL1の焦点上に置く。すると、点光源の場合はレンズL1とレンズL2の間は平行光線になり、有限の大きさの光源の場合は、レンズL2の焦点SIに光源のイメージが結像する。この時、測定部であるレンズL1とレンズL2の間に火炎などの密度差のある物体を置くと、この物体を通り抜けてきた光は屈折によって何も無い時の光源イメージに結像する場所からずれて光源を結像させることになる。

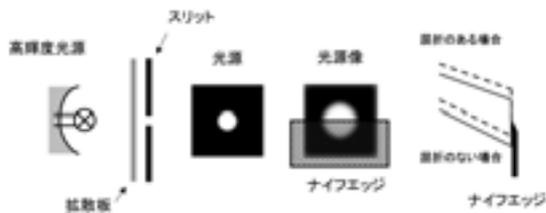


図2 光源イメージの結像点

何も無い時の光源イメージをちょうど半分隠すようにナイフエッジを設置しておけば、光源の半分の明るさで結像するが、屈折によって光路がずれるとずれた分だけの明暗を生じることになる。これによって、密度差をシャドウグラフ（影写真）よりも強いコントラストでスクリーンに表示することになる。シャドウグラフ法では、ナイフエッジおよびL2レンズが不要となりL3のレンズの焦点を合わせる面がシュリーレン法と異なる。

また原理的には、結像した明暗から屈折量を計算して、密度の差として計算可能であるが、計算するために用いる仮定が多過ぎるために、正確な密度の計算には向いていない。密度の正確な計測を行うためにはマッハツェンダー法を用いる。マッハツェンダーとはL. MachとL. Zehnderによって、1891年にはほぼ同時に考案され、その後プリズム型2光束系から、現在の平面ガラス配列で大きな視野を観測できるマッハツェンダー干渉計ができあがる。この干渉計はスプリッターによって二つに分けられた光路間の光路差にもとづく光の位相のずれを干渉縞の移動でとらえるもので、屈折率と距離の積として得られ、1縞は光路差が光の波長分生じたことを示している。干渉縞の移動量または等密度干渉縞の観測によって、密度分布、圧力、温度などの定量測定ができる。

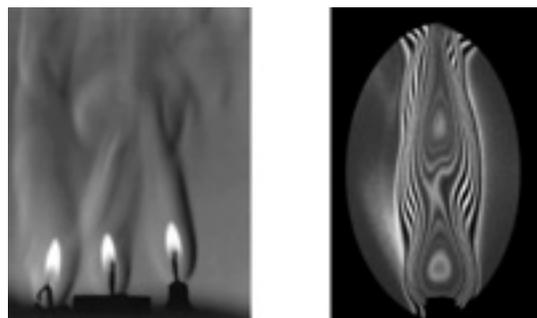


図3 写真のサンプル

## 2.2 燃料噴霧直径分布の測定

### (1) 液滴直径測定 の原理

粒子にレーザ光を照射すると、全方向に光が発せられる。この光を散乱光といい、その強さは、光が発せられる方向に一定の空間パターンを描く。これを光強度分布パターンといい、粒子の大きさによって様々な形になる。粒径による光強度分布パターンの違いを図4に示す。

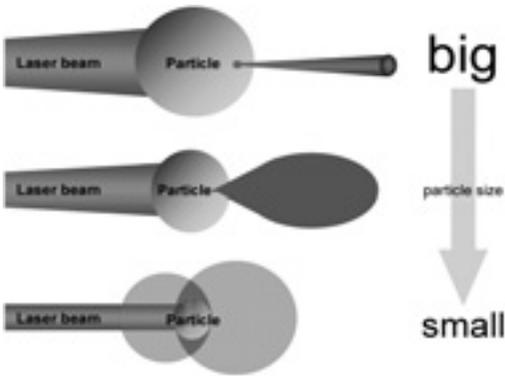


図4 粒径による光強度分布パターン

図4に示すように粒径が大きい場合、散乱光は前方に集中し、それ以外の方向は前方の光に比べ非常に弱くなる。径が大きくなるにつれ、散乱光はさらに前方に集中する。粒径が小さくなるにつれ、散乱光強度分布パターンは前方から、少し周囲に広がる。粒径が非常に小さい場合、上下、左右にも広がりが生じ、繭やひょうたんのような形になる。この散乱光強度分布パターンを測定することにより、粒径分布を計測することができる。これらは、すべて単一の粒子に対してのものであるが、実際の噴霧は様々な大きさの粒子の集まりであるため、散乱光強度分布パターンはそれぞれの散乱光の重ね合わせになる。このパターンを解析することによって、どれくらいの粒子がどれくらいの割合で存在するか（粒度分布）を、求めることができる。

(2) LDSA : Laser Diffraction Spray Analyzer (レー

ザ散乱方式粒度分布測定装置)

LDSAの概略を図5に示す。LDSAは光源であるHe-Neレーザとコリメータからなる発光部、受光レンズとセンサおよびセンサステージからなる受光部、測定データを収集、記憶する高速データ収集部から構成されている。

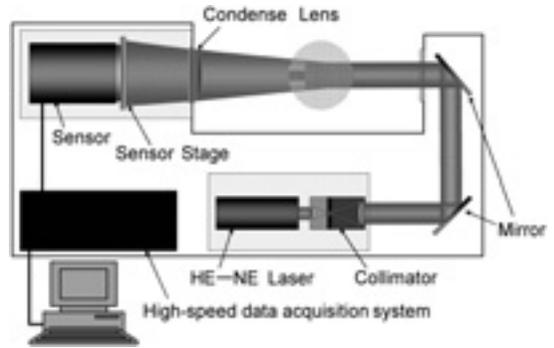


図5 LDSA概略図

光源から出たレーザビーム（He-Neレーザ）はコリメータにより少し太いビームへと変換され、ミラーにより反射されたビームは測定対象となる噴霧された粒子群に照射される。レーザビームが照射された粒子すべてから散乱光が発せられ、それらの光が重ね合わされた光強度分布パターンが発生する。前方散乱光の光強度分布パターンは受光レンズによって集光され、焦点距離の位置にある検出面に同心円状の回折・散乱像をあらわす。この回折・散乱像をセンサで検出し、測定したデータを高速データ収集部で収集し、PCに送ることで粒度分布を計算する。

### 3. 試験装置（日本大学生産工学部所有）

試験装置は、燃焼容器、温度制御装置および点火装置からなる噴霧生成・燃焼装置と光学計測装置、测温抵抗体、熱電対、圧力センサからなる計測装置に大別される。噴霧生成・燃焼装置を図6、計測システム構成図を図7に示す。

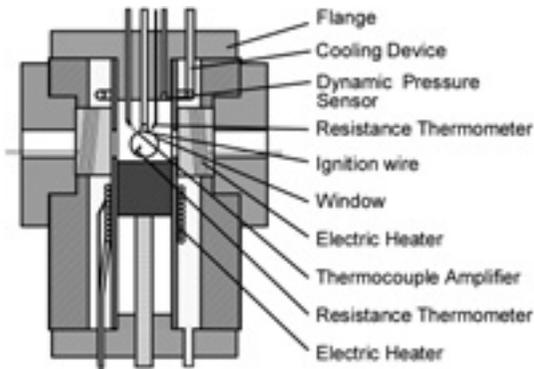


図6 噴霧生成・燃焼装置

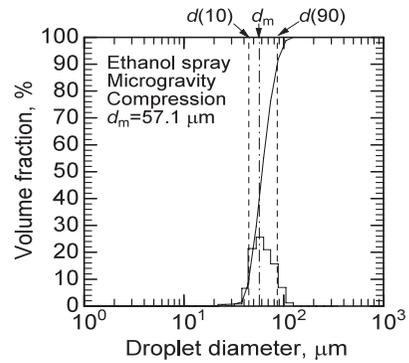


図8 LDSA計測結果

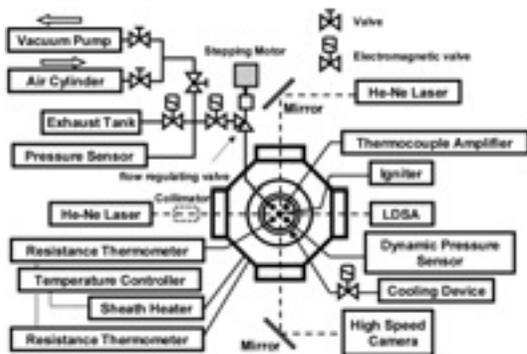
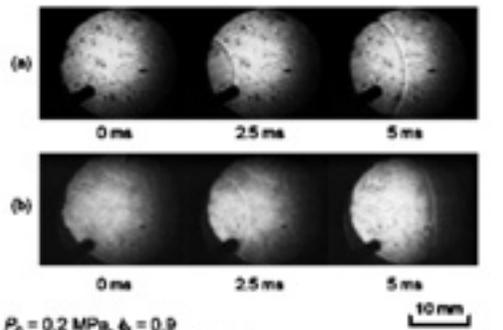


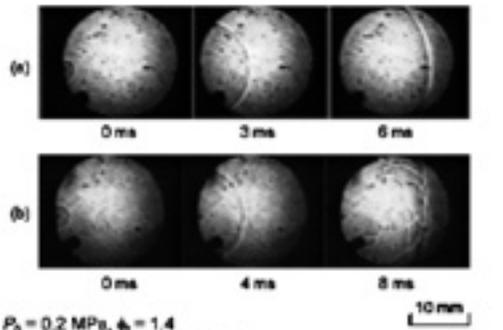
図7 計測システム構成図

燃焼容器内に高圧の混合気（空気-エタノール）を充填し、急速減圧することにより噴霧を生成する。急速減圧時の初期減圧速度を変化させることで、生成される噴霧の直径を変化させた。噴霧の平均液滴直径の計測はLDSAを用いる。測定した粒度分布の測定結果の例を図8に示す。粒度分布は横軸に粒径、縦軸に体積分率をとったグラフとして表す。

液滴直径の計測後に点火用電熱線に通電し着火する。火炎の伝播挙動はHe-Neレーザを光源としたシャドウグラフ（影写真）で撮影する。図9に混合気中を伝播する火炎の画像を示す。火炎伝播速度は高速度カメラで撮影した画像から、火炎半径の時間変化を測定することにより求める。



$P_0 = 0.2 \text{ MPa}$ ,  $\phi = 0.9$   
 (a) Ethanol vapor-air premixure  
 (b) Partially-prevaporized ethanol spray,  $\phi = 0.19$ ,  $d_m = 6.5 \mu\text{m}$



$P_0 = 0.2 \text{ MPa}$ ,  $\phi = 1.4$   
 (a) Ethanol vapor-air premixure  
 (b) Partially-prevaporized ethanol spray,  $\phi = 0.20$ ,  $d_m = 6.5 \mu\text{m}$

図9 混合気中を伝播する火炎

火炎半径測定方法を図10に示す。火炎半径は、点火用電熱線を中心に燃焼室の水平方向を0 degとして、-30 degから30 degの範囲で、15 degおきに5方向測定しその平均値とした。測定した火炎半径の時間変化を多項式で近似し、その時間微分値を火炎の移動速度とする。

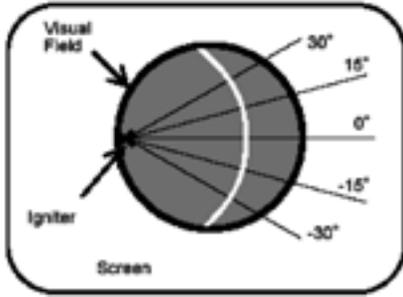


図10 火炎半径測定方法

図11は、火炎半径の時間変化の例を、燃料蒸気-空気予混合気と部分予蒸発噴霧について示した例である。時刻の原点は点火用電熱線を加熱開始した時刻である。火炎は自立火炎が成立するまでの遅れ時間を経た後、加速しながら伝播し、伝播速度が一定の期間を経た後、燃焼室壁の影響を受けて減速することがわかる。

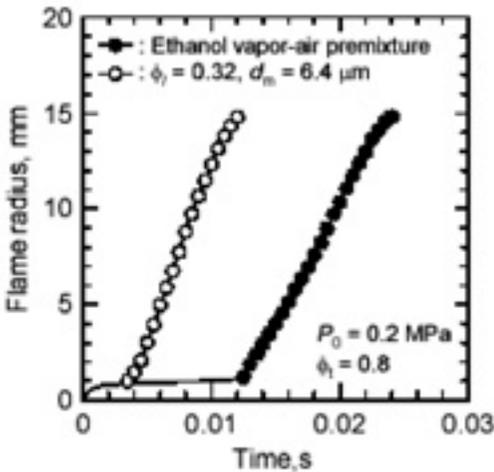


図11 火炎半径の時間変化

図12に予混合（噴霧なし）と部分予混合（噴霧あり）の火炎伝播速度を比較した図を示す。詳しい説明は省略するが、燃料蒸気の一部を液化することにより希薄領域において火炎伝播速度およ

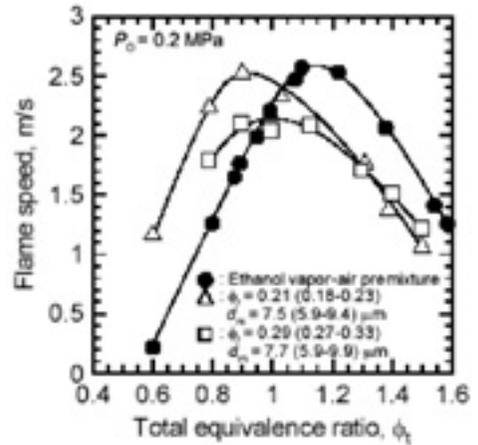


図12 計測結果

び最大燃焼圧力は同一当量比の予混合気より増大する。希薄領域全般で燃焼促進効果が認められた。

#### 4. 最新の噴霧流径分布計測

##### (1) レーザ回折噴霧構造解析装置 (LDCT-2000A)

この装置は、宇宙航空研究開発機構が設計・開発を行い東日コンピュータアプリケーションズ株式会社で販売している。垂直下方に噴射された噴霧のある断面においてレーザ回折・散乱粒子径分布測定装置のレーザビームを水平方向と回転方向にトラバースすることによりCT用粒度分布データを取得し、それから噴霧濃度及び粒度分布の2次元データを作成する。この2次元データから任意の画素での粒度分布および、SMD<sup>\*1</sup>、D10、D50、D90の値を求め、また各パラメータのCT画像を表示できる。

##### ①LDCT-2000A 仕様

粒径測定方式：レーザ光散乱方式

使用レーザ：波長633 nm

出力2 mW

ビーム径2.4 mm

使用レンズ：f = 300 mm

粒径測定範囲：1.4 ~ 1,000 μm

②散乱光データサンプリング方法

連続噴霧：トラバース自動測定

(0.2 ms 間隔 100 回積算)

間欠噴霧：トラバース自動-外部トリガ連続積算 (遅延)

最高 0.2 ms 間隔で最大 100 回測定、  
時系列 CT 測定が可能

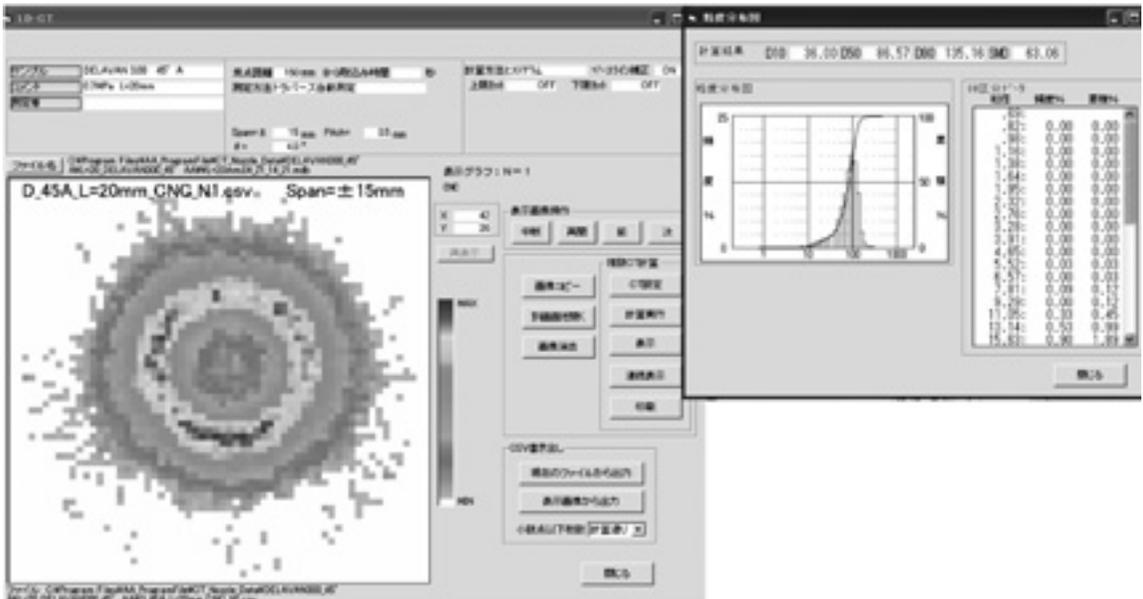


図 13 レーザ回折噴霧構造解析装置 (LDCT-2000A)

※1 液滴の平均径は算術平均やザウター平均と呼ばれるいくつかの計算方法があり、スプレーを利用する目的により使い分けされる。スプレーノズル分野ではほとんどの場合ザウター平均径が使用され、その計算式は【ザウター平均 =  $\Sigma di^3 \cdot ni / \Sigma di^2 \cdot ni$ 】で、計測した液滴の体積の総和と表面積の総和の比を求めた式である。従って、ザウター平均径のことを体面積平均とも呼び、通常、記号は D32 または SMD を使用する。

CNC (濃度) の CT 画像表示および、指定局所の粒径分布

CNC (濃度) の CT 画像を表示する。また、測定平面の画素ごとの粒度分布を CT データ処理により算出することにより、任意の指定局所の粒度分布と SMD※1, D10, D50, D90 などの値 (絶対値) を表示する。



## SMD の2次元の表示画面

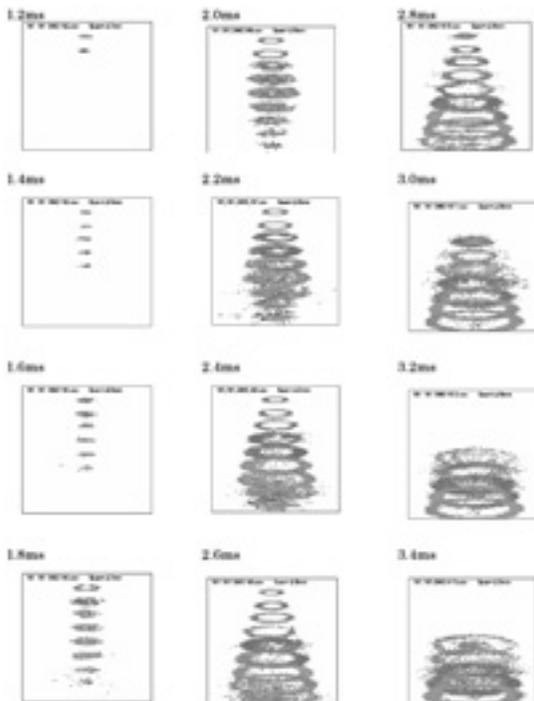
測定平面の画素ごと粒度分布とD10,D50,D90などの値からSMDなどの2次元図が表示できる。



筒内噴射燃料インジェクタ噴霧の時系列3次元表示 (SMD)

測定条件

- (1) 測定面L = 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm、45 mm、50 mm



- (2) X方向：スパン±15 mm～±40 mm  
間隔 1.0 mm

$\theta$  軸：移動間隔 4.5° 移動回数 40回

- (3) サンプリング方法

外部トリガ連続積算 (遅延)

測定回数 25回 測定間隔 0.2 ms

## 5. おわりに

燃料噴霧時の液滴直径と火炎伝播とは密接な関係があり、ガソリンおよびディーゼルエンジンのインジェクタ評価やガスタービンエンジンの燃料ノズルの評価など、特に様々な条件における液滴直径の正確な計測技術は高効率エンジンの開発過程において不可欠な技術となって行くと予想される。本稿では燃料噴霧状態を解明するための基本的な技術知見を紹介するに止まったが、今後は実機条件における計測ノウハウの蓄積を行い、当社の新たな計測技術メニューとして定着するよう発展させて行く考えである。

## 参考文献

- (1) 浜崎 豊宏：予混合気中に分散させた燃料液滴の燃焼促進効果 日本機械学会論文集 2004年9月号 (第70巻第697号) B編 PP. 2441-2448