

# LIF・干渉画像法による噴霧流中の蒸気および液滴径・速度の同時計測

学籍番号 80121807 黒沢亮 指導教員 菱田公一

## 1. 緒言

多くの熱機関において採用されている噴霧拡散燃焼において、熱効率の向上・有害排出物の低減等、環境負荷の軽減のためには、蒸気の濃度分布、液滴径分布など噴霧流中の液滴および蒸気相の流動構造を非接触かつ高空間分解能で計測し、解明することが必要である。そこで本研究では、蒸気濃度分布計測にレーザ誘起蛍光法(以下 LIF 法)、液滴径および液滴速度の計測に干渉画像法(以下 ILIDS 法)を同時に用いる新たな気液二相同時計測手法の開発を行う。また計測された結果より蒸発を含む噴霧中の蒸気相および液滴の流動構造を明らかにする。

## 2. 計測原理

### 2.1 計測システムの概要

LIF 法および ILIDS 法を融合するにあたり両計測法に用いる 2 つのレーザ光源、および蛍光発光と散乱光を分離することが必要となる。そこで本研究では蛍光剤にアセトン、励起光源および液滴の照射光源に Nd:YAG レーザ(New wave Research, Gemini)を用いる。Nd:YAG レーザに関しては 2 種類の非線形素子を用いることによって、単一のレーザヘッドによる 2 波長(532nm: for ILIDS 50mJ/pulse, 266nm: for LIF 20mJ/pulse)同時発振を可能としている。また、ダブルパルスレーザを用いることにより、ILIDS 法にて液滴速度の計測を可能とした。蛍光剤として用いるアセトンは 445・480nm をピークとし蛍光発光する<sup>(1)</sup>。ILIDS 法に用いる散乱光の波長を 532nm とすることにより、蛍光発光と液滴からの散乱光の波長が異なる。この波長の違いを利用し、光学フィルタにて蛍光と散乱光を分離する。

### 2.2 LIF 法<sup>(2)</sup>

LIF 法を用いて噴霧流中の蒸気濃度分布計測を行うにあたり、LIF 画像内で液滴と蒸気を区別する必要がある。また、液滴の蛍光発光は非常に強く周辺にハレーションを生じる。そこで本研究では閾値を用いて液滴からの蛍光発光およびハレーションを除去し、蒸気のみを計測する。本研究ではアセ

トンの飽和蒸気濃度に相当する輝度値を閾値として用いた。

### 2.3 ILIDS 法

液滴からの散乱光が作る干渉縞によって液滴径を計測する ILIDS 法は Maeda *et al.*<sup>(3)</sup>によって改良され 6000~10000 個/cm<sup>3</sup> の高数密度場での計測が可能となった。さらに微小時間間隔の干渉画像において干渉縞の相互相関を取るることによって個々の液滴速度ベクトルの計測が達成され、本研究では液滴速度ベクトルおよび液滴径の計測に ILIDS 法を用いた。

## 3. 実験装置

実験装置の概略図を Fig.1(a)に示す。Nd:YAG レーザより発振された 2 波長を含むレーザ光は 2 枚のシリンドリカルミラーで反射することにより色収差の無い状態でシート状にされ測定領域に照射される。測定領域内の蛍光発光および液滴からの散乱光はフィルタによって分離され、それぞれ別々の CCD カメラにて撮影される。Figure 1(b)に本研究で用いる光学フィルタの透過率およびアセトンの蛍光発光スペクトルを示す。これより蛍光発光および液滴からの散乱光は相互に干渉することなく分離できることが確認できる。

噴霧ノズルには Delavan 社製一流体ノズル(typeB, 0.5GPH(0.41g/s), solid cone)を用い、0.2MPa の圧力でアセトンを連続噴霧する。なお、座標軸に関してはノズル下流方向を z 軸、半径方向を r 軸、ノズル孔を原点と定義する。両計測法の撮影領域は 10×10mm<sup>2</sup> であり、それぞれのカメラで同一グリッドを撮影することにより位置較正を行った。

## 4. 計測結果

### 4.1 噴霧内蒸気・液滴の同時計測

噴霧流中の瞬時蒸気濃度分布と液滴径・速度ベクトルを Fig.2 に示す。計測領域は z=30mm, r=8mm である。蒸気濃度分布において閾値によって除去された液滴は黒丸で示されている。Fig.2 より LIF 法で計測された液滴と ILIDS 法によって計測された液滴とが良好に一致していることが確認でき、同時計測が可能であることを示した。

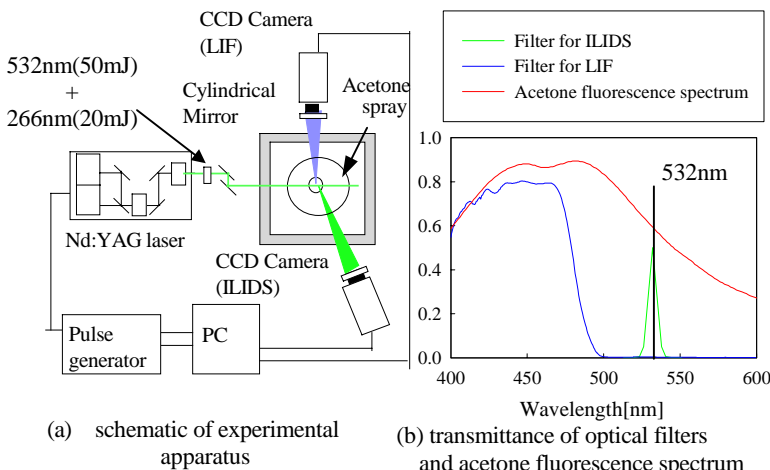


Figure 1 experimental setup

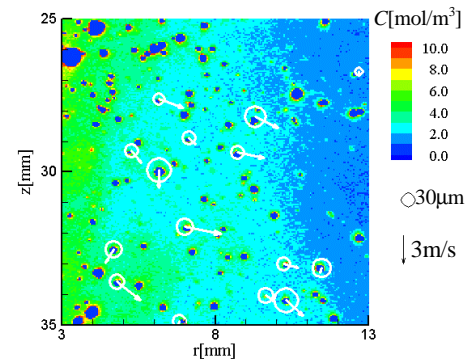


Figure 2 Instantaneous vapor concentration and droplet size and velocity at z=30mm, r=8mm

## 4.2 液滴の蒸発を含む噴霧流の質量流束

本計測法にて噴霧流中の蒸気、液滴の同時計測が可能なことより  $z=30, 50, 70\text{mm}$  の各  $z$  断面において蒸気、液滴の質量流束ならびに断面間の液滴の蒸発を算出し、噴霧流の質量流束比の変化を検討する。

質量流束算出にあたり液滴をそれぞれ  $\sim 25\mu\text{m}$ ,  $25\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ ,  $40\mu\text{m} \sim$  の階級に分類し、各階級の代表粒径を  $20\mu\text{m}$ ,  $32.5\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$  と定義し、解析を行う。なお、小径液滴は気流への追従性が高いことから本研究では  $25\mu\text{m}$  以下の小径液滴速度を蒸気速度と仮定し、Table 1 に示す算出条件で蒸気・液滴の質量流束ならびに液滴からの蒸発量を算出した。

Table 1 Analysis conditions

Averaged region	$5 \times 5\text{mm}^2$
Diffusion coefficient $D[\text{m}^2/\text{s}]$	$1.08 \times 10^{-5}$
Schmidt Number $Sc[-]$	0.56
Mass fraction at droplet surface $Y_s[-]$	0.242

蒸気質量流束は平均蒸気濃度と蒸気速度によって、液滴質量流束は各粒径クラスの液滴数密度・液滴速度によって各領域で算出した後、それらを積算することによって求めた(Fig.3 参照)。個々の液滴からの蒸発量  $m_d[\text{kg/s}]$  に関しては Ranz-Marshall の実験式より式(1)で示される。

$$m_d = 2\pi \left( \frac{d}{2} \right) \rho_f D (Y_s - Y_g) \left( 2 + 0.6 Sc^{1/3} Re_p^{1/2} \right) \quad (1)$$

式(1)より粒径クラス別に代表粒径の液滴1つが生成する蒸気量を算出した後、液滴数密度、液滴速度を用いて総蒸発量を積算した。なお、粒子レイノルズ数  $Re_p$  は、代表長さ、代表速度をそれぞれ液滴径、気流との速度差によって定義し、周囲流の質量分率  $Y_g[-]$  は平均蒸気濃度より算出した。

実験によって計測された各  $z$  断面における蒸気、液滴の質量流束ならびに算出された液滴からの蒸発量比を Fig.4 に示す。これより、 $z$  方向への質量流束比の変化が液滴の蒸発によってもたらされる過程を定量的に示した。

## 4.3 クラスターの認識

噴霧流中の液滴数密度は時空間的に一様でなく、数密度の高い領域(クラスター)が存在することが知られており、Fig.2 を詳細に見ると蒸気濃度・液滴数密度は一様でなく、蒸気濃度の高い塊(クラスター)が存在していることが確認できる。そこで蒸気濃度の高い塊をクラスターとし、平均蒸気濃度と比較することによってクラスターを抽出する。

なお、蒸気濃度分布において、液滴からの蛍光発

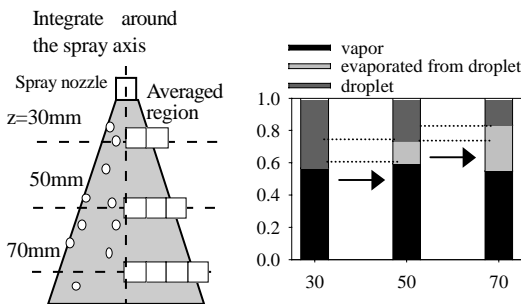


Figure 3 Mass flux calculation region

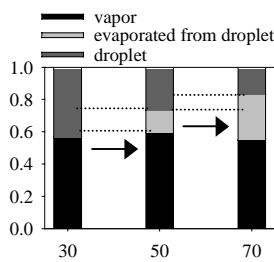


Figure 4 Mass flux ratio conversion of vapor and droplet

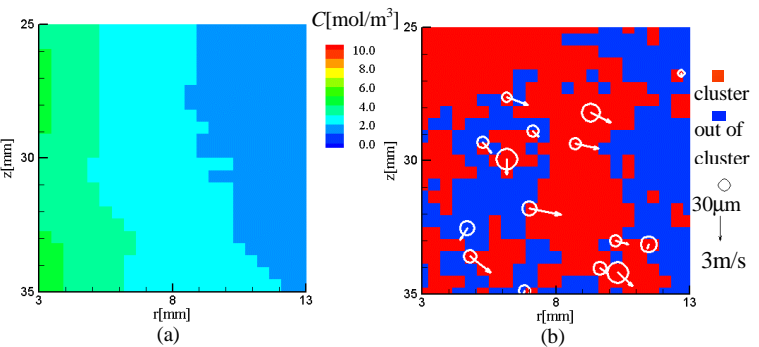


Figure 5 Cluster extraction process

(a); averaged vapor concentration distribution  
(b); cluster distribution of Fig.2

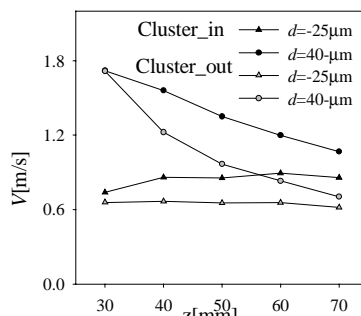


Figure 6 Comparison of downstream velocity  $V$  classified by droplet diameter

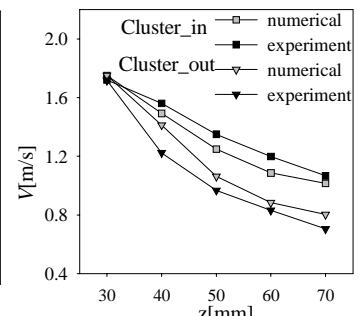


Figure 7 Comparison of  $60\mu\text{m}$  droplet downstream velocity  $V$  between numerical and experimental result

光およびハレーションを閾値によって除去するため、同時に蒸気濃度データも欠落する。そこで蒸気濃度分布を空間平均した後、複数の蒸気濃度分布(約 700 枚; 測定時間約 7 分)を平均することによって液滴の蛍光発光およびハレーションを除去し、平均蒸気濃度分布を算出する。瞬時蒸気濃度も同様に空間平均し、平均蒸気濃度分布と比較して 15% 以上高い領域をクラスターと認識した(Fig.5)。ここで噴霧外縁に相当する  $r=8\text{mm}$  の領域に着目し、 $z$  方向への変化を測定した。

## 4.4 クラスター内・外の液滴速度

ILIDS 法によって計測された液滴をクラスター内・外に存在する液滴に分類した後、噴霧軸方向速度  $V[\text{m/s}]$  に着目し解析した結果を Fig.6 に示す。これよりクラスター内に存在する液滴はクラスター外の液滴に比べて速い速度を持っていることが分かる。これはクラスター領域内は蒸気濃度が高く、また液滴の蒸発から蒸気が供給されることから周囲気流の速度が速くなるためと考えられる。周囲流速度は  $25\mu\text{m}$  以下の液滴速度より、クラスター内が  $0.8\text{m/s}$ 、クラスター外が  $0.6\text{m/s}$  であると仮定し、 $60\mu\text{m}$  の液滴の減衰過程を算出した。算出した結果と実験結果と Fig.7 にて比較した結果、良好な一致を確認した。

## 5. 結論

噴霧中蒸気濃度計測を LIF 法、液滴径・速度計測に ILIDS 法を用いる新たな同時計測手法の開発を行った結果、これらの同時計測が可能となった。計測値より噴霧流質量流束の構成比率において、液滴からの蒸発によって蒸気の割合が上昇することを定量的に確認した。また、瞬時蒸気濃度分布よりクラスターを抽出した結果、周囲気流速度の違いから噴霧軸方向速度が異なることを示した。

## 参考文献

- (1) A.Lozano et al, Experiments in Fluids, **13**(1992), 369
- (2) S.Yamamoto et al., Thermal sci. and eng., **9-4**(2001), 85
- (3) M.Maeda et al., Experiments in Fluids., **33**(2002), 125