

アルコール燃焼噴霧での粒径測定

Droplet Diameter Measurement at Alcohol Spray in Combustion

石間 経章, 小山 哲司, 上原 宏一, 小保方 富夫
 (Tsuneki ISHIMA) (Tetsuji KOYAMA) (Kouichi UEHARA) (Tomio OBOKATA)
 群馬大 (株) 司測研 東京電力 (株) 群馬大
 (Gunma Univ.) (Tsukasa Sokken) (TEPCO) (Gunma Univ.)

The present paper is described the simple correction method of the diameter error caused by the deviation of the droplet refractive index under the combustion condition. Ethanol spray characteristics in both combustion and non-combustion have been measured using a phase Doppler anemometer (PDA). The correction was made using two phase differences in Doppler signals obtained from two detector pairs which had different offset angles. Offset angles of PDA detector were set to 20° and 30° . In combustion, the mean velocity is higher and the corrected mean diameter is smaller than those in non-combustion condition. The corrected mean diameters with various correction methods were close to each other. However, these correction methods have a significant difference in the refractive indexes of the particle which are also estimated from themselves. The estimated particle refractive index including both the temperature of the air and arithmetic mean diameter is seemed to be suitable for evaluating the combustion spray flow. The result also indicates the possibility of droplet temperature measurement from the refractive index of droplets using the PDA.

Key Words: Spray combustion, Phase Doppler anemometer, Burner, Alcohol, Droplet size correction, Droplet temperature

1. 緒言

位相ドップラ流速計(PDA)は、レーザドップラ流速計(LDA)と同様に粒子運動によるドップラ遷移を利用し、単一の微粒子からのドップラ信号を異なる2点で観察すると、両者に位相差が生ずることを原理としている。著者等は現在までPDAにより低圧燃料噴霧⁽¹⁾⁽²⁾およびディーゼル噴霧⁽³⁾⁽⁴⁾における流速と粒径特性の評価を行ってきた。それらの研究では、大気中に液体燃料を噴霧し、平均流速と平均粒径の分布⁽¹⁾⁽²⁾、燃料温度の変化による燃料噴霧の性状変化⁽¹⁾、時間分割法および代表粒径による間欠噴霧の評価⁽²⁾⁽³⁾が行われた。これらの結果は、局所的かつ時系列で得られたデータであり、微粒化機構のより詳細な解析を可能としている。

一般のPDA計測では、測定対象の粒子または液滴が球形であり、液滴および周囲空気の屈折率は一定であると仮定している。したがって、PDA測定をエンジン内流れおよび燃焼場に応用する場合、液滴および空気の屈折率変化が粒径誤認の原因となることが考えられる。近年、液滴屈折率を、位相ドップラ法の延長として測定する方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾、および虹の原理によって求め

る方法⁽⁷⁾が提案されている。これらの研究では、空間中の液滴径だけでなく屈折率も得られるため、今後温度変化を伴う噴霧場への応用が期待される。

著者等は、アルコール燃焼噴霧のPDA測定において、液滴温度変化に伴う粒径遷移をPDAの受光角を変えた二つの実験により補正し、同時に液滴屈折率を推定する方法を試みた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本方式は、Naqwiら⁽⁵⁾およびBrennら⁽⁶⁾が複数のPDA受光系を多方向に設置し、個々の液滴からの信号を同時に取り込み、液滴の大きさと屈折率を推定した原理を用い、燃焼場が定常であるとして平均値を求めたものであり、現有のPDA装置で行えるという利点がある。本研究では、この簡易的な粒径補正法を提案し、実際のエタノール燃焼噴霧の噴霧流動特性を解析し、液滴温度変化を伴う流れ場での噴霧評価の可能性について検討する。既報⁽⁸⁾では、周囲空気の屈折率を一定とし粒径補正を行い、屈折率を推定したが、本報告では周囲空気の屈折率も可変とし粒径補正を行い、さらに粒径分布に基づいて液滴屈折率を推定する方法を試みる。

2. 位相ドップラ法および本粒径補正の測定原理

2.1 位相ドップラ法の測定原理⁽¹⁰⁾

位相ドップラ法(PDA)は、流体中に浮遊する微粒

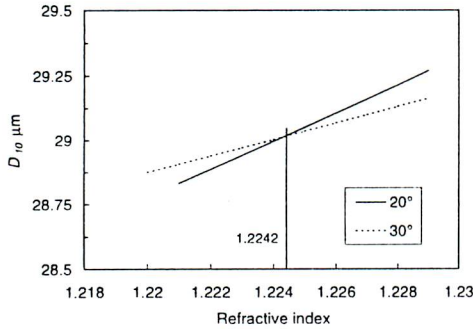


Fig. 1 Example of diameter correction method.

子の速度と粒径の測定法であり、2本のレーザー光によって形成される測定体積を通過する粒子からの散乱光を2点で観測したとき、信号の位相差が粒径と比例することを基礎としている。ここで、入射光軸からφ(偏角)だけ傾いた位置で、上下にψ(仰角)の角度で受光系を設置し、一次屈折光による散乱光を検出した場合、粒径dと位相差Φには次の関係がある。

$$d = \frac{1}{4b} \left| \frac{\lambda_0}{\pi n_c} \right| \Phi \quad (1)$$

$$b = \sqrt{1+n'^2} - \sqrt{2n' \sqrt{f_{+r}}} - \sqrt{1+n'^2} - \sqrt{2n' \sqrt{f_{-r}}} \quad (2)$$

$$: n' = n_d / n_c$$

$$f_{+r} = 1 + \sin(\theta/2) \sin \psi + \cos(\theta/2) \cos \psi \cos \phi \quad (2-1)$$

$$f_{-r} = 1 - \sin(\theta/2) \sin \psi + \cos(\theta/2) \cos \psi \cos \phi \quad (2-2)$$

ここで n_d , n_c は粒子と周囲流体の屈折率、 θ は入射光の交差全角である。

2.2 粒径補正方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾

式(1)において、粒径は粒子と周囲流体の屈折率および位相差Φの関数であるため、周囲流体の屈折率 n_c が既知の場合、未知数が d および n_d となりφを変えた二方向での位相差を検出すれば式(1), (2)から補正された単一液滴の粒径が液滴屈折率によらずに得られる。

本研究では位相差の情報は、直接粒径値として得られるため、二方向のφで得られた平均粒径または粒径分布が一致するように液滴の平均屈折率を変化させた。図1は、横軸の液滴屈折率を変化させた場合の平均粒径(縦軸)変化の一例である。粒径の屈折率変化は偏角に依存しているため、両偏角による粒径測定結果が一致する点がある。本研究では、一致した点の値を補正した平均粒径および平均液滴屈折率とした。すなわち、本推定法は2個づつ2組の受光系を同時に用いて一滴ごとに粒径・屈折率を求める方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾に対し、現象の再現性を期待し、1組の受光系を偏角を変えながら交互に使用し、平均的な粒径と屈折率を求めようとする簡便法である。

Table 1 Various diameter correction methods.

	Refractive index of air	Reference diameter
Method A	constant	D_{10}
Method B	variable	D_{10}
Method C	constant	diameter distribution
Method D	variable	diameter distribution

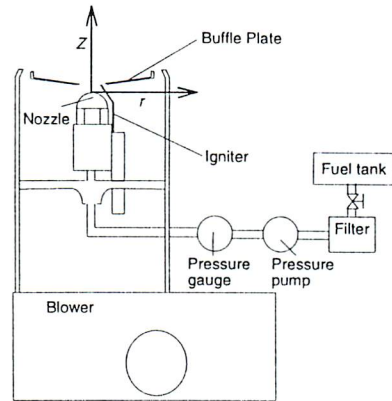


Fig.2. Experimental configuration.

実験は表1に示すように、周囲空気の屈折率を一定とする方法(Method A,C)、熱電対による燃焼温度測定値から周囲空気の屈折率を与える方法(Method B,D)の2系統と、算術平均粒径 D_{10} を一致させる方法(A,B)および粒径分布(代表値 10~20 点)を一致させる方法(C,D)の2系統の計4種類の方法を検討した。なお、算術平均粒径および粒径分布を入力すると所定の結果が得られるように自動処理させる。

3. 実験装置および方法

図2にアルコール噴霧燃焼実験装置の概略を示す。バーナはオリンピア工業社製 SL-1 型、ノズルは H 型ノズル(Hago 社製、60°中空円錐ノズル)であり、燃料流量は 0.4 g/s で使用した。噴霧燃料は、単一成分、物性値が明確、実験上の安全性などの理由からエタノールを用いた。エタノールは 0.66 MPa で噴霧され、空気はバーナ下方のプロアから供給される。空気出口には、バッフルプレートが設けられており、旋回流を形成する。噴射ノズル中心を原点とし、鉛直上方を z 軸、半径方向を r 軸とした。測定にはダンテック社製粒子解析器(Particle Dynamics Analyzer; PDA)を使用し、光源および送光系の設定(10mW He-Ne レーザ、入射光の交差全角θ:5.72°)の関係から受光系の偏角φは 20°および 30°とした。PDA による噴霧粒径測定では、検出器の電圧設定により平均粒径計測結果に差が生ずる

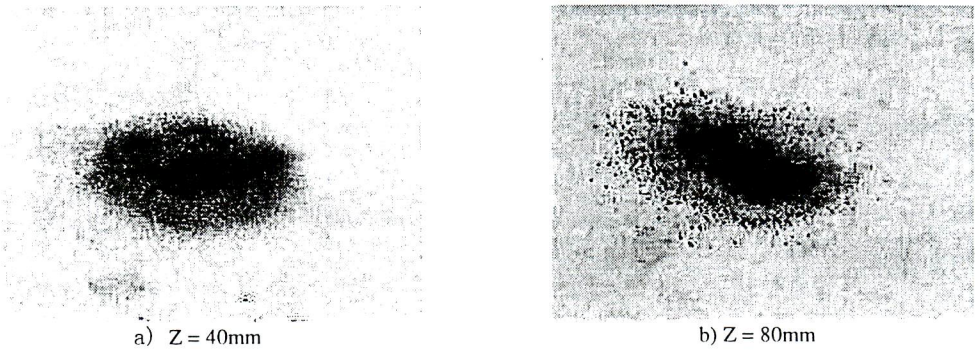


Fig. 3 Visualization of spray in combustion at Z = 40mm and Z = 80mm.

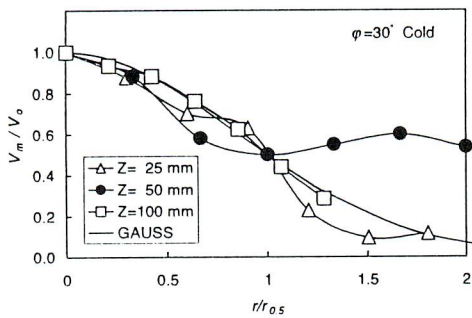


Fig.4 Mean velocity profiles for non-combustion spray with $\phi = 30^\circ$.

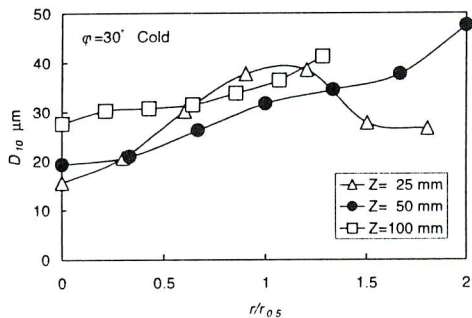


Fig. 5 Arithmetic mean diameter for non-combustion spray with $\phi = 30^\circ$.

ため、非燃焼時においてそれぞれの偏角で電圧を最適化し、その設定のまま燃焼時の計測を行った。そのため、燃焼時の偏角による粒径の差は液滴および周囲空気の屈折率変化による平均粒径偏移の結果である。周囲空気の温度は、白金-白金ロジウム(13%)熱電対により測定し、この値から周囲空気の屈折率を求め、表1の補正法B.Dに使用した。

4. 実験結果および考察

4.1 流動場の可視化

流動場の可視化は、流れの全体の把握を容易にする。

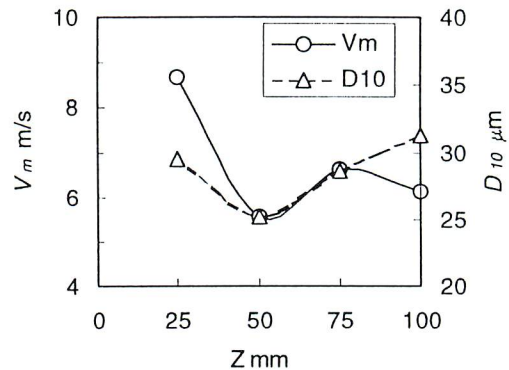


Fig. 6 Mean velocity and mean diameter at $r = 10\text{mm}$ for non-combustion.

図3に $Z = 40, 80\text{mm}$ での燃焼時火炎断面の可視化結果を示す。実験条件は PDA 測定時より空気流量が約2倍であるが、本質的な燃焼形態および流動様式に変化はない。この図から燃焼火炎中にも粒子の存在を確認し、PDAによる測定は可能と判断できる。

4.2 非燃焼時の結果

本節では受光系の偏角 $\phi = 30^\circ$ で測定した結果を示す。図4に噴霧粒子の平均流速 V_m を中心軸上速度 V_0 で、中心軸からの距離 r を軸方向速度の半値幅 $r_{0.5}$ で無次元化した流速の横方向分布を示す。本測定領域では、バップルプレートによる旋回流および再循環領域のため分布形状は円形噴流のような正規分布 (Gauss) とは多少ずれている。

図5に算術平均粒径 D_{10} の無次元横方向分布を示す。軸方向 $Z = 25\text{mm}$ では $r/r_{0.5} = 1$ 付近に極大値の存在が確認できる。 $Z = 50\text{mm}$ 以降では平均粒径はバーナ中心で最小値となり、中心軸から離れるとともに粒径が増大する傾向がある。 $Z = 25\text{mm}$ の噴霧外縁部で粒径が減少するのは、噴霧流を外向きに横切る再循環流のため小径液滴が噴霧外側に流されたためと考えられる。下流での粒径増加は、小径液滴の消失、合体などが原因であると思われる。

Table 2 Data rate of PDA measurement for both conditions at Z = 50mm.

r [mm]	In Non-combustion [kHz]	In combustion [kHz]
5	1.67	0.672
10	1.92	0.165
15	18.6	0.051
20	1.36	0.077
25	1.05	0.155
30	0.485	0.252

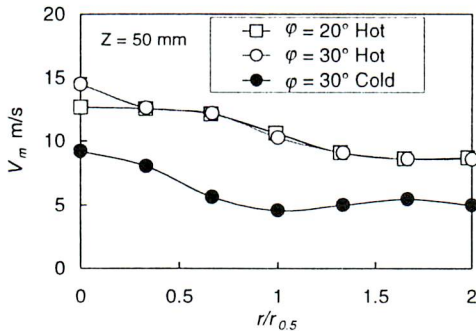


Fig. 7 Mean velocity of spray at Z = 50mm in combustion with both receiving angles.

図6に $r = 10\text{mm}$ の平均軸方向流速および算術平均粒径のZ軸方向変化を示す。 $r = 10\text{mm}$ では、バップルプレート直後に流速が大きな領域があり ($Z = 25\text{mm}$)、旋回流による再循環領域のため流速が急激に減少し、再循環領域から離れると流速がいったん回復し、さらにその後流速は減衰する。算術平均粒径は $Z = 50\text{mm}$ で、最小値となったあと、徐々に増加する。この傾向は、前述同様に再循環流により小径粒子が流された結果であると考えられる。

ここで、図4から図6は、偏角 $\phi = 30^\circ$ の結果であるがこれを偏角 $\phi = 20^\circ$ の結果と比較した場合、流速結果は $+11.3\% \sim -3.6\%$ 、粒径は $+7.8\% \sim -12.6\%$ の違いがあることが確認された。これらの差違は実測値にして約 0.18m/s 、 $1.27\mu\text{m}$ であり、一つの偏角で繰り返し測定を行った場合の不確かさ以内で一致しており、偶然的な誤差要因によるものと考えられる。

4.3 燃焼時の結果

表2に $Z = 50\text{mm}$ 、 $\phi = 30^\circ$ 非燃焼時および燃焼時のデータレートを示す。非燃焼時、 $r = 15\text{mm}$ 付近にエタノール液滴が多く存在しているが、燃焼時ではこの領域の液滴が著しく減少する。データレートが著しく減少した原因は、燃焼による燃料液滴の消失、密度変化による測定体積のゆらぎ、燃焼火炎によるバックグラウンドの光量増加およびその他の要因によるノイズレベルの増加等が考えられる。燃焼時は $Z = 15\text{mm}$ から噴霧中心方向、および噴霧外縁方向に向かってデータレートが大きくなる。外側の $Z = 30\text{mm}$ では非燃焼時の約 $1/2$ のデータレートがあり、液滴の燃焼が不十分

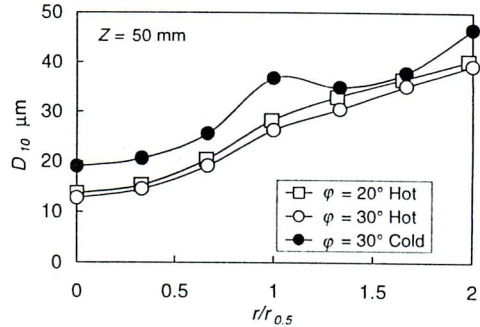


Fig. 8 Arithmetic mean diameter of spray at Z = 50mm in combustion with both receiving angles.

で、多くの未燃焼液滴が存在していることが分かる。図7に燃焼時の $Z = 50\text{mm}$ の平均流速分布を示す。図中には、 $\phi = 30^\circ$ と $\phi = 20^\circ$ の結果を示し、双方の値の比較のために横軸だけ無次元化してある。また、図中には、非燃焼時の $\phi = 30^\circ$ における結果も示してある。燃焼噴霧では非燃焼時と比較して中心軸上で約 4m/s の速度増加が確認された。速度の増加は、 $r = 10 \sim 15\text{mm}$ ($r/r_{0.5} = 0.7 \sim 1.0$) において $8.5 \sim 6\text{m/s}$ と著しい。平均流速 (V_m) 測定には、偏角はほとんど影響しない。これは、噴霧の PDA 測定ではフォトマル電圧により粒径バイアスを生じ、異なる流速結果となる例⁽¹⁾から、両偏角で測定した粒径範囲は同等であり、後述の算術平均粒径の差はバイアスの影響ではないことを示している。図8に算術平均粒径 (D_{10}) の横方向分布を示す。両偏角による平均粒径分布の傾向は同じであり、非燃焼時よりも平均粒径は $10\mu\text{m}$ 程度小さい。図7、図8の結果から、燃焼時には体積膨張により速度が増加して再循環流の構造が変化し、液滴径も減少することが分かる。ここで、両偏角による値の違いは平均流速が $+3.4\% \sim -13.3\%$ 、平均粒径が $+10.2\% \sim +2.5\%$ であり、前者の平均流速が非燃焼時と同程度なのにに対し、平均粒径の差は、常時 $\phi = 20^\circ$ の測定値が大きい。すなわち平均粒径の測定結果の差は液滴屈折率が変化したことによる粒径偏移と考えられる。

4.4 粒径補正

本研究で行った粒径補正の結果を図9に示す。補正された平均粒径分布は、両偏角で得られた未補正值と同様の傾向であるがその値は全体的に小さい。周囲空気の屈折率を考慮した補正法 (手法 B, D) の値は他の手法と比較して値が小さくなる。代表的な測定点での粒径補正の結果を表3に示す。なお、表3中で非燃焼および粒径補正を行っていない場合は $\phi = 30^\circ$ の値を示してある。粒径補正方法によらず、結果は実測値よりも小さい値となった。本粒径補正法では周囲空気の屈折率を変化させた場合とさせない場合、すなわち手法 A, C と手法 B, D の間に差がある。しかし、それらの差は互いに 6% 以内であり、未補正值からの変化の割合 (最大 20%) と比較して手法による値の変化が小さいことが分かる。ここで、空気の屈折率は $293\text{K}(20^\circ\text{C})$ で

Table 3 Results of mean diameter correction.

Experimental Condition	Correcting Method	$D_{10} \mu\text{m}$					
		$Z = 25 \text{ mm}$ $r = 10 \text{ mm}$		$Z = 50 \text{ mm}$ $r = 10 \text{ mm}$		$Z = 100 \text{ mm}$ $r = 10 \text{ mm}$	
non-combustion		29.5	100%	25.2	86%	31.2	106%
combustion	non-correct	29.5	100%	19.2	65%	16.1	55%
	Method A	25.6	87%	16.1	55%	14.2	48%
	Method B	23.9	81%	15.2	52%	13.2	45%
	Method C	25.1	85%	16.5	56%	14.7	50%
	Method D	23.4	80%	15.6	53%	13.7	47%

* base level

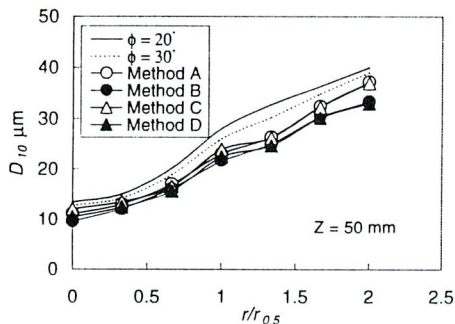


Fig. 9 Corrected diameter at Z = 50 mm in combustion.

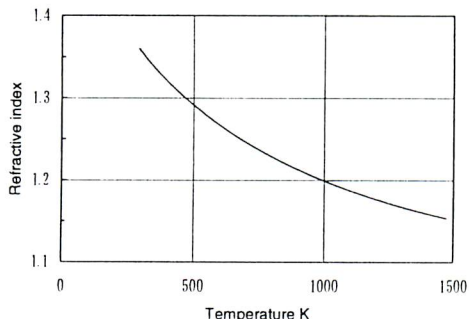


Fig. 10 Refractive index of ethanol.

1.26, 1273K (1000°C)で 1.06 であるため、周囲気体の屈折率により最大 16%程度補正粒径が異なる可能性がある。しかし、補正後の値はこれよりも小さな差であった。また、周囲気体の屈折率変化さらにはその時間的変化による揺らぎはデータレートの低下などの原因となるが本方式による粒径補正への影響は小さいようである。さらに、燃焼場での液滴は常に蒸発過程にあり、周囲流体は熱せられた空気と蒸発した燃料の混合気体であることが考えられる。このため、蒸発状態を時系列で観察しながら、混合気体の屈折率を求めて補正する等のさらなる補正が必要となると考えられるが、本論文中では言及しない。

本方式では図 1 に示したように補正した粒径とともに液滴屈折率が得られる。液体の屈折率は温度の関数なので、液滴温度の推定も可能となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図 10 に体積膨張率から求めたエタノール屈折率の温度依存性を示す。この図から液滴温度を推定した結果を図 11 に示す。手法 D の $r = 0\text{mm}$ および 30mm では粒径分

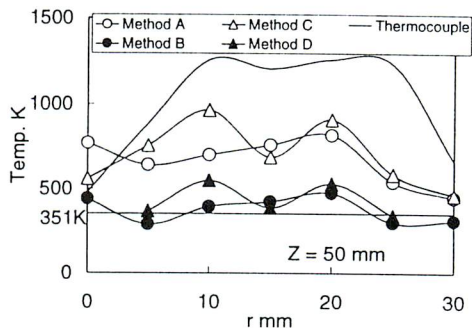


Fig. 11 Droplet temperature estimated from PDA at Z = 50mm in combustion.

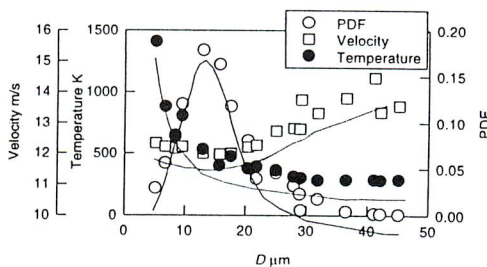


Fig. 12 Spray characteristics at Z = 50mm, r = 10mm.

布の一致度が十分でなく、液滴屈折率は求めることができなかった。周囲空気の屈折率を変化させない手法 A, C ではエタノール蒸発温度の 351K より高い液滴温度が示され、周囲空気の屈折率を考慮に入れた粒径補正では蒸発温度付近の温度が得られている。これらの結果から、本実験範囲では実験領域全域で、液滴屈折率が得られる手法 B が妥当と思われる。

測定点 $Z = 50 \text{ mm}$, $r = 10\text{mm}$ での粒径に対する個数頻度、速度および温度分布を図 12 に示す。このように、PDA 測定から、燃焼噴霧における各粒径での速度と温度が得られた。この図では、粒径によらず同程度の速度の液滴が存在し、またみかけ上で小径粒子の温度が高い結果となった。図 11 で液滴温度が蒸発温度よりも大きくなるのは小径粒子の屈折率推定法に問題があるためと思われる。大径粒子温度はほぼエタノールの蒸発温度から周囲空気温度の間であり、燃焼場で

の PDA 測定では小径粒子の直径に大きな誤差を含む可能性があることが予想される。アルコールは蒸発した後には燃焼するため、液滴は空気ではなくエタノール蒸気に囲まれる可能性がある。蒸発により粒径は小さくなるため、この状態は小径粒子側でより顕著となる。また、PDA による小径粒子の精密な粒径測定には、仰角を大きくし受光器のアパチャ径を大きくする必要はあるが⁽⁵⁾、本研究中ではこれらの措置は行っておらず、その結果小径粒子径測定の誤差要因となったと考えられる。その他の誤差要因は、エタノール液滴が球形であることやその中で屈折率が一定と仮定したことなどが挙げられる。

本方式はガソリンなどの複合燃料に対しても適用できると思われる。しかし、複合燃料では低沸点成分から蒸発するので温度に対する屈折率変化が一義的に決まらない可能性があるため、本研究で示したような液滴温度分布を求めるには注意が必要である。さらに、前述の小径粒子側での測定誤差も同様に含んでいることを考慮しなくてはならない。

本方式の基礎となった Naqwi ら⁽⁶⁾および Brenn ら⁽⁶⁾の方法は、個々の粒子について位相差を同時に検出して液滴屈折率を求めている。本方式では、粒径が一致するように液滴屈折率を修正しており、2方向からの同時計測ではない。さらに、小径粒子での誤差を多く含む可能性がある。本方式により液滴屈折率の変化による粒径偏移は簡易的に補正が可能であると考えられるが、多方向の偏角による同時計測法との比較、検定により精度を向上させる必要がある。

5. 結言

エタノール燃焼噴霧の流速と粒径分布を位相ドップラ流速計により測定した。また、液滴温度による屈折率変化に基づく粒径偏移に対し、受光系の偏角を変更した実験による簡易的な補正方法を示すとともに、液滴温度の推定を行い、以下の結論を得た。

1. 可視化実験からパツフルプレートによる旋回流および再循環流が観察され、燃焼時においても PDA 測定が可能なだけの微粒子が存在することが確認された。
2. PDA 測定によっても旋回流および再循環流が確認された。非燃焼時と比較して燃焼時は、平均流速の増大および平均粒径の減少が観察された。

3. 2つの受光偏角による粒径測定の結果から、液滴屈折率が未知の場合でも粒径が推定できることが示された。
4. 補正した平均粒径は未補正の値より 20%程度小さくなる。粒径補正方法による違いは小さいが、周囲空気の屈折率を考慮に入れた場合は入れない場合より最大6%程度小さい。
5. 粒径補正を行う際に同時に得られる液滴屈折率から、液滴温度の推定を行った。その結果、粒径補正の方法により推定した液滴温度に顕著な差が現れた。エタノールの蒸発温度を考えた場合、周囲空気の屈折率および算術平均粒径を使用した補正方式(手法 B)が最も妥当な値を与えると思われる。

最後に、本研究を行うにあたり松下インターテクノ(株)より御協力頂いた。また、岩谷直治記念財団より援助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Obokata, T., ほか 5 名, ASME FED Vol.229, (1995), 319.
- (2) 石間ほか 5 名, 機論, 61-585, B(1995), 1935.
- (3) 隆武強ほか 2 名, 機論, 60-576, B(1994), 2917.
- (4) 細谷・小保方, 機論, 59-565, B(1993), 297.
- (5) Naqwi, A. and Menon, R., 7th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (1994), 24.1.1.
- (6) Brenn, G., ほか 4 名, 7th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (1994), 21.1.1.
- (7) Sanker, S.V. ほか 3 名, 7th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (1994), 12.3.1.
- (8) 小山ほか 3 名, 第 73 期日本機会学会全国大会 Vol. III, (1995), 258.
- (9) 石間ほか 3 名, 第 4 回微粒化シンポジウム(1995), 214.
- (10) Durst, F. and Zare, M., Proc. of LDA-Symposium, Copenhagen, 1975, (1967), 403.
- (11) 小保方, 第 4 回微粒化フォーラムテキスト(1996), 59.



石間 経章
群馬大学工学部
機械システム工学科 助手
376-8515 桐生市天神町 1-5-1
Tel / Fax : 0277-30-1531
e-mail : ishima@me.gunma-u.ac.jp

略歴：1994年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程機械工学専攻修了。1994年群馬大学工学部助手。学生時代より現在までレーザドップラ流速計、位相ドップラ流速計、粒子画像処理流速計を使用し、燃料噴霧、シリンダ内流れ、固液・固気二相流の実験的解析を行っている。



小山 哲司
株式会社 司測研 技術部
158-0087 世田谷区玉堤 1-19-4
Tel : 03-3703-4391
Fax : 03-3705-0756
e-mail : koyama@sokken.co.jp

略歴：1995年群馬大学工学部機械システム工学科卒業。同年(株)司測研入社。在学時はレーザドップラ流速計(LDA)、及び位相ドップラ流速計(PDA)を用いて噴霧流の計測と評価の研究。現在は自動車用計測機器を主体とした計測制御システムアプリケーションの開発と製作。



上原 宏一
東京電力株式会社
奥利根工務所 制御G
379-1711 群馬県利根郡水上町
網子 367-2
Tel : 0278-72-6830
e-mail :
T1131259@pmail.tepco.co.jp

略歴：1997年群馬大学大学院工学研究科博士前期課程機械システム工学専攻修了。PDA法により、エアアシスト噴霧を解析した。1997年東京電力(株)奥利根工務所勤務後は玉原、八木沢発電所等5水力発電所の監視制御を行っている。



小保方 富夫
群馬大学工学部
機械システム工学科 教授
376-8515 桐生市天神町 1-5-1
Tel / Fax : 0277-30-1531
e-mail : tobo@me.gunma-u.ac.jp

略歴：1969年東海大学第二工学部機械工学科卒業。東京大学宇宙航空研究所原動機部技官、助手、群馬大学工業短期大学部講師、助教授、群馬大学工学部助教授、教授。流れの可視化・計測とシミュレーション、エンジン及び熱・流体機器におけるレーザ計測に関する研究に従事。