含酸素燃料の燃料性状がディーゼル噴霧火炎内における
微粒子生成特性に与える影響*米 虫 祐 介^{*1}, 久 下 喬 弘^{*1}
千 田 二 郎^{*2}, 藤 本 元^{*2}Effects of Oxygenated Fuel on Soot Particle Formation
in a Diesel Spray FlameYusuke KOMEMUSHI, Takahiro KUGE,
Jiro SENDA^{*3} and Hajime FUJIMOTO^{*3} Graduate School of Mechanical Engineering, Doshisha University,
1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

Oxygenated fuels with different oxygen content and molecular structure were used, and effects of oxygenated fuel on soot volume fraction and soot particle sizes were investigated by Time-Resolved LII (Laser induced incandescence) in a diesel spray flame. Soot particle formation was measured in a constant volume combustion vessel that was able to simulate the diesel engine conditions. Fuels used in this study were *n*-heptane, four ethers that contain (—O—) bond in molecular structure; Dibutyl ether (DBE), Diethylene glycol dibutyl ether (DGB), Diethylene glycol diethyl ether (DGE), Diethylene glycol dimethyl ether (DGM), two esters that contain (—COO—) bond; Butyl acetate (BA), Ethyl acetate (EA). Oxygen content in oxygenated fuel changes from 12.3 wt-% to 36.4 wt-%. Soot volume fraction decreases in proportion to oxygen content in same molecular structured oxygenated fuel. Ether is more effective than ester in reducing soot volume fraction and suppressing the growth of soot particle diameter. And, by the application of oxygenated fuel, though soot volume fraction decreases, small soot particles are formed with high number density.

Key Words: Flame, Combustion, Diesel Engine, Oxygenated Fuel, Soot Formation, Laser-Induced Incandescence, Soot Volume Fraction, Soot Particle Diameter

1. 結 言

ディーゼル機関から排出される微粒子の低減また石油資源枯渇問題の観点から、代替燃料として燃料分子構造中に酸素原子を有する含酸素燃料の適用が検討されている。含酸素燃料は従来の噴霧内への空気導入に加え、燃料自身からの酸素供給により、噴霧内混合気濃度の希薄化が可能となる。このため、国内外を問わず多くの研究機関で含酸素燃料の微粒子低減効果に関する研究が行われ、含酸素燃料のすす抑制効果は実証されてきた⁽¹⁾。

しかし微粒子の新たな問題として、粒子径が 50nm 以下のナノ粒子の排出が懸念されている。また、ナノ粒子はこれまでの重量濃度規制に寄与しないため、大気中に多量に放出される可能性がある。このようなナ

ノ粒子の低減のためには、微粒子の重量濃度および粒子径・数密度にも着目し、排気行程だけでなく燃焼行程における微粒子生成特性を把握する必要がある。しかし、これまでの含酸素燃料に関する研究例の多くは燃料性状と排気特性の相関については明らかにしているものの⁽¹⁾、燃焼段階におけるすす生成特性については十分に把握しているとは言えない。

そこで本研究では、燃料中の酸素含有割合および分子構造の異なる含酸素燃料を適用し、レーザ誘起赤熱法(Laser induced incandescence:LII)により、燃料性状がディーゼル噴霧火炎内のすす体積濃度および粒子径に及ぼす影響を調べた。

2. レーザ誘起赤熱法の計測原理

2・1 計測原理 LII は高強度のレーザ光をすす粒子に照射しすすを瞬時に昇華温度付近まで加熱させ、その際にすすが放射する赤熱光(LII シグナル)を検出する計測法である。LII シグナルはすす体積濃度にほぼ比例することから、すす粒子濃度計測に用いられる。

レーザ光により熱せられたすす粒子は熱伝達、昇華

* 原稿受付 2006 年 3 月 27 日。

^{*1} 学生員、同志社大学大学院工学研究科(〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3)。^{*2} 正員、同志社大学工学部。

E-mail: jsenda@mail.doshisha.ac.jp

および熱放射などによる熱損失に起因して、時間経過とともに温度が低下しLIIシグナルも同様に減衰する。その際のLIIシグナル履歴は粒子径に依存し、大粒子径の粒子ほど減衰が緩慢となる²⁾。この減衰の差から粒子径を算出する手法がTime-Resolved LIIである。

ここで、ディーゼル燃焼場は高温高压であるため粒子径が既知のすす粒子を用いた検定実験が困難となる。そのため、本研究では各粒子径に対するLIIシグナルの時間履歴を数値計算により予測した。

Melton²⁾と同様に、すす粒子を単一球形粒子と仮定し、エネルギー保存式と質量保存式を数値的に解き、得られた粒子温度と粒子径の時間履歴からPlanckの放射則によりLIIシグナルの減衰履歴を算出した。エネルギー保存式は、次式で表わされる。

$$\frac{K_{abs}\pi d_p^2 q(t)}{4} - 2\pi d_p^2 \frac{K_a(T-T_0)}{d_p(1+GK_n)} - \frac{\Delta H_v}{W_s} \cdot \frac{dM}{dt} - \pi d_p^2 \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) - \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_s C_s \frac{dT}{dt} = 0 \quad (1)$$

各項は順に、レーザー吸収、周囲ガスへの熱伝達、蒸発による熱損失、熱放射、内部エネルギーの変化を表わす。ここで、 K_{abs} : 粒子の吸収係数[-], d_p : 粒径[m], $q(t)$: レーザの時系列分布(Gaussian分布, 半値幅: 7ns)[-], K_a : 周囲気体の熱伝導率[W・m⁻²・K⁻¹], T : 粒子温度[K], T_0 : 火炎温度[K], G : 幾何学因子[-], K_n : クヌーセン数[-], ΔH_v : すすの蒸発潜熱[J・kg⁻¹], W_s : 炭素の分子量[kg・mol⁻¹], M : 粒子質量[kg], ε : 放射率[-], σ : ステファン・ボルツマン定数[W・m⁻²・K⁻⁴], ρ_s : すすの密度[kg・m⁻³], C_s : 炭素の比熱[J・kg⁻¹・K⁻¹]である。粒子の吸収係数 K_{abs} はレイリ領域($\pi d_p/\lambda \ll 1$)では、

$$K_{abs} = \frac{4\pi d_p E}{\lambda} \quad (2)$$

と表わされる。ここで、 λ : レーザの波長[m], E : 屈折率[-]であり、Nd:YAG レーザの第二高調波 $\lambda=532$ [nm]を用いた場合 $E=0.176$ とした。また、周囲空気熱伝達率 K_a は次式で与えた。

$$K_a = 5.83 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{0.82} \quad (3)$$

次に、質量保存式は次式で表わされる。

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{2} \pi d_p^2 \rho_s \frac{dd_p}{dt} = \pi d_p^2 \rho_v \sqrt{\frac{RT}{2W_v}} \quad (4)$$

ここで、 ρ_v : 炭素蒸気密度[kg・m⁻³], R : 気体定数[J・K⁻¹・mol⁻¹], W_v : 炭素蒸気のモル重量[kg・mol⁻¹]である。

最終的にLIIシグナルはPlanckの放射則に基づき、次式より算出した。

$$S_{LII} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \zeta(\lambda) \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} N_p 4\pi d_p^2 \varepsilon d\lambda \quad (5)$$

ここで、 λ_1, λ_2 : 検出する波長の範囲[m], ζ : バンドパスフィルタの透過率およびイメージインテンシファイア(以下、II)の感度特性[-], c : 真空中の光速[m・s⁻¹], h : Planck定数[J・s], k : Boltzmann定数[J・K⁻¹]である。

2.2 シミュレーション結果 図1に上記の式から得られたLIIシグナルの時間履歴を示す。各粒子径に対するLIIシグナルは各々の最大値で正規化した。レーザー入射後15nsからLIIシグナルが粒子径に依存した減衰履歴をたどり、大粒子径のものほどLIIシグナルの減衰は緩慢になる。これより、Time-Resolved LIIで重要となる2つのLIIシグナル検出時期は、レーザー入射からの20ns間とレーザー入射後15nsからの20ns間とし、この2時期における各粒子径に対するLIIシグナルの比 r を求めた。図2に、粒子径とLIIシグナル比 r との関係を示す。この関係式により、2時期で得られた画像からLIIシグナル比 r を求め、粒子径を算出した。

Fig.1 LII signal decay for various particle sizes ($P_{amb}=5.5$ MPa, Laser fluence=0.67J・cm⁻², $T_f=2200$ K)

Fig.2 LII signal ratio r ($P_{amb}=5.5$ MPa, Laser fluence=0.67J・cm⁻², $T_f=2200$ K)

本研究では簡単のために雰囲気圧力 P_{amb} 、火炎温度 T_0 をそれぞれ 5.5 MPa, 2200 K と固定してシミュレーションを行った。しかし、本計測手法は粒子の冷却速度に依存するため、実際の雰囲気圧力や火炎温度が異なる場合に計測される誤差を予測する必要がある。そこで、図 3 に 20, 50, 80 nm の粒子に対して、雰囲気条件が異なる場合に含まれる誤差割合を示す。次章に述べる実験条件では燃焼容器内の圧力履歴は 5.5 MPa - 5.7 MPa であり、この範囲内における誤差は非常に小さいことが分かる。また、すす生成の ϕ - T マップ⁽³⁾ を考慮しすす粒子が分布する温度域が 1900 K - 2400 K と仮定すると、誤差は ± 5 nm 程度となる。したがって、圧力および温度の影響は極端に大きなものではなく、本計測手法は噴霧火炎内部のすす粒子径分布の傾向を知る上で十分な情報を与えると判断した。

3. 実験装置、条件および方法

3.1 実験装置 実験装置には定容燃焼容器を用いた。容器の燃焼室容積は約 1140 cc であり、容器側面に設置した直径 80 mm の観測窓によりレーザ計測が可

能である。

3.2 実験条件 表 1 に実験条件を示す。雰囲気温度 $T_{amb}=1200$ K、密度 $\rho_{amb}=16.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ で一定とし、雰囲気酸素濃度を $X_{O_2}=21\%$ とする。また、燃料噴射差圧を $\Delta P_{inj}=70$ MPa とし、噴射ノズルには噴孔径 $d=0.2$ mm、噴孔長さ $l=0.8$ mm の単噴孔ホールノズルを用いた。燃料噴射量は、燃焼の総発熱量が同量になるように各燃料の噴射期間を変化させた。

供試燃料には、6 種の含酸素燃料と含酸素燃料との比較のため n-heptane を使用する。表 2 に各燃料の構造および物性値を示す。含酸素燃料は分子構造中にエー

Table 1 Experimental conditions

Ambient gas temperature	T_{amb} [K]	1200
Ambient gas density	ρ_{amb} [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	16.2
Ambient oxygen concentration	X_{O_2} [%]	21
Nozzle orifice diameter	d [mm]	0.2
Injection pressure drop	ΔP_{inj} [MPa]	70

Fig.3 Diameter error, Δd_p , as a function of ambient pressure(left), and flame temperature (right)

Table 2 Properties of the test fuels

Fuels (Code name)	Molecular structure	Oxygen content [wt-%]	Density [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	Boiling point [K]
n-heptane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$	0	680	371
Dibutyl ether (DBE)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	12.3	764	414
Diethylene glycol dibutyl ether (DGB)	$\text{C}_4\text{H}_9\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{OC}_4\text{H}_9$	22.0	885	529
Diethylene glycol diethyl ether (DGE)	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{OC}_2\text{H}_5$	29.6	909	462
Diethylene glycol dimethyl ether (DGM)	$\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{O}(\text{CH}_2)_2\text{OCH}_3$	35.8	940	435
Butyl acetate (BA)	$\text{CH}_3(\text{CO})\text{OC}_4\text{H}_9$	27.6	882	399
Ethyl acetate (EA)	$\text{CH}_3(\text{CO})\text{OC}_2\text{H}_5$	36.4	895	350

テル結合(-O-)を有する4種のエーテル系燃料, ジn-ブチルエーテル(DBE), ジエチレングリコールジブチルエーテル(DGB), ジエチレングリコールジエチルエーテル(DGE)およびジエチレングリコールジメチルエーテル(DGM)とエステル結合(-COO-)を有する2種のエステル系燃料, n-ブチルアセテート(BA), n-エチルアセテート(EA)を使用した。燃料の酸素含有割合 W_o/W_{fuel} は12.3-36.4wt-%と変化させた。

3.3 実験方法 ディーゼル噴霧気場を模擬するため, アセチレン, 酸素および窒素から成る可燃混合気を作成し, 定容燃焼容器内に充填する。次に, 充填した予混合気を火花点火し, 高温・高圧場を作成する。その後, 目的の圧力に到達した際, 燃料を単発噴射する。これよりディーゼル噴霧火炎を模擬することができる。

図4に本実験で用いた光学系を示す。パルス光源にはNd:YAG レーザの第2高調波($\lambda=532\text{nm}$)を用い, 3枚のシリンドリカルレンズにより, 高さ80mm, 厚さ約0.3mmのシート光を形成し, 燃焼容器内の噴霧中心

Fig.4 Optical measurement system for Time-Resolved LII

軸を含む断面を照射する。2時期のLIIシグナルはハーフミラーを介した2台のLI付きCCDカメラ(浜松フォトニクス:C4078-01)によって検出した。それぞれのLI付きCCDカメラには, ショートパスフィルタ(カットオフ波長450nm)と弾性散乱光除去のためノッチフィルタ(中心波長532nm, 半値幅3nm)を取り付けた。なお, 撮影時間はレーザー入射直後からの20ns間とレーザー入射後15nsからの20ns間とした。

4. 実験結果および考察

4.1 すす体積濃度および粒子径の二次元分布
噴霧気温度 $T_{amb}=1200\text{K}$, 密度 $\rho_{amb}=16.2\text{kg/m}^3$, 酸素濃度 $X_{O_2}=21\%$, 燃料噴射圧力 $\Delta P_{inj}=70\text{MPa}$ におけるn-heptaneおよびDGB, DGE, BAのすす体積濃度 f_v (上段), すす粒子径 d_p (下段)の時系列二次元分布画像を図5にそれぞれ示す。TASIは燃料噴射開始からの時間で, その下に示すTASI*は各燃料噴射期間で正規化した時間である。各 f_v 画像は各々の条件・時間での最大輝度を最大値とし, 画像内の数字は4燃料でLIIシグナルが最小のものを1とした際の較正倍率である。つまり, 数字が高いほどすす濃度が高い。また, すす濃度, 粒子径とともに画像の色が濃くなるほど濃度が高く, 粒子径が大きいことを示す。

すす体積濃度画像をみると, n-heptaneに比べ含酸素燃料の f_v 較正倍率が低いことから含酸素燃料の高いすす抑制効果が伺える。また, n-heptaneの f_v 画像では噴霧中心部からレーザー射出側のLIIシグナルが消滅している。この要因として, 高濃度のすす群によるレーザー強度減衰と, シート光とカメラの間に存在するすす群によるシグナル減衰が挙げられる。

次に, 粒子径画像をみると, n-heptaneは燃焼初期から150nm以上の粒子へと成長している。これは, すすの生成が顕著なため, すす粒子同士の凝集・合体が活発に行われたと考えられる。これに対し, 含酸素燃料

Fig.5 Images of soot volume fraction(f_v) and soot particle diameter(d_p) for (a)n-heptane, (b)DGB, (c)DGE and (d)BA

では、燃焼初期では微小粒子で占められ、150nm 以上の大粒子は拡散的燃焼中期以降で確認できるようになる。このように含酸素燃料においても、大粒径へのすす粒子の成長が行われる。しかし、燃料噴射終了時においても噴霧上流部では微小粒子が存在しており、n-heptane に比べ、粒子の成長が抑制されている。

4・2 燃料性状がすす体積濃度に及ぼす影響 燃料性状がすす体積濃度に及ぼす影響を調べるため、各 f_0 画像の LII シグナルを積算した面積積算 LII シグナル I_{LI} を用い、比較した。以下に式を示す。

$$I_{LI} = \sum_i I_i A_i \quad (6)$$

ここで、 I_i : ピクセル i の LII シグナル強度、 A_i : ピクセル面積[m²]、である。

図6に DBE, DGB, DGE および BA, EA の面積積算 LII シグナル I_{LI} の時間履歴を示す。なお、n-heptane では高濃度のすすによる LII シグナルの減衰で正確な比較が行えないため、DGM は LII シグナルが検出されなかったため、それぞれ省略した。

Fig.6 Temporal change in area integrated LII signal (I_{LI})

全ての燃料において拡散的燃焼が開始してからすすは生成される。火炎の成長に伴いすす体積濃度は燃料噴射終了時まで増加し、その後、緩やかに減少する。同種の分子構造を有する燃料間で比較すると、エーテル系燃料では DBE>DGB>DGE、エステル系燃料では BA>EA と酸素含有率の増加に伴い、すす濃度は減少する。これは、燃料が熱分解する際に、燃料内部酸素に起因して生成する酸化物がエチレンやアセチレンなどの低級不飽和炭化水素の生成を抑え、すす前駆物質である芳香族炭化水素を低減させるためと考えられる⁽⁴⁾。このため、酸素含有率が高くなるほど、すす前駆物質を抑制すると類推できる。

分子構造が異なる DGE と BA を比較すると、酸素含有率が同程度であるにも拘わらず、BA のすす体積

濃度は DGE よりも高く、酸素含有率が BA よりも低い DGB とほぼ同量のすすを生成する。また、EA に対しても、酸素含有率が同程度の DGM では LII シグナルは検出されず、DGE とほぼ同量のすすを生成する。以上より、エーテル系燃料はエステル系燃料に比べ、すす抑制効果が高いといえる。これは、エーテル系燃料は熱分解反応の際に燃料中の酸素原子が一つの炭素原子と反応し CO となるのに対し、エステル系燃料は CO₂ として分解され一つの炭素原子に二つの酸素原子を消費する。したがって、エーテル系燃料の方がより効率的に炭素原子を内部から酸化させるため、エステル系燃料に比べすす前駆物質であるエチレンやアセチレンなどの低級不飽和炭化水素の生成を抑制すると考えられる。

ここで、一般的には燃料物性の違いはすす生成に影響を及ぼすと言われている。表 2 より DGB<DGE<DBE<BA<n-heptane<EA の順に蒸発特性が優れているため、噴霧内への空気導入量も増加すると考えられる。しかし、上述したように、すす生成量は酸素含有率や燃料の分子構造の影響が顕著に現れる結果となった。したがって、本実験条件においては燃料物性による影響は小さいと考えられる。

4・3 燃料性状がすす粒子径に及ぼす影響 粒子径の評価には、各 d_0 画像から算出した粒度分布を噴霧液滴の粒度分布関数として扱われている抜山・棚沢の分布関数⁽⁹⁾に適用し、比較した。なお、粒径が 150nm 以上の粒子は含んでいない。以下に抜山・棚沢の分布関数の式を示す。

$$\frac{dn}{n} = A x^\alpha \cdot \exp(-B x^\beta) \cdot dx \quad (7)$$

A , B は α , β により決定される定数である。図 7 に、実験値を分布関数に適用した一例を示す。横軸は粒子径であり、縦軸は画像内の各粒子径に対する頻度を表す。条件は n-heptane で燃料噴射開始後 2.0ms における

Fig.7 Nukiyama-Tanasawa's distribution function

結果であり、分布関数に $\alpha=5.9$, $\beta=0.45$ を代入し得られたものである。このとき、実験値と分布関数との適合性の指標となる決定係数 R^2 の値が0.9225と高い値を示していることから実験値と分布関数の適合性が良いことが分かる。

図8はn-heptaneおよび3種類の含酸素燃料DGB, DGE, BAの粒度分布を抜山-棚沢の分布関数に適用し、 $TASI^*=0.3, 1.0, 1.2$ で比較した結果を示す。なお、これらの条件においても、図6と同様に分布関数との高い適合性を確認している。いずれの燃料も、燃焼の進行とともに、分布関数の極大値が、大粒子径側かつ低頻度側へ移行する。これは、燃焼初期に生成したすす粒子は噴霧火炎の成長と同時に下流へ流される過程で高数密度の一次粒子が凝集・合体し、大粒子径化するため、大粒子径かつ低頻度になったと考えられる。燃料間で比較すると、n-heptaneに比べ含酸素燃料は小粒子径・高頻度の傾向をとる。エーテル系燃料のDGBとDGEに着目すると、DGBは時間の経過に伴い、大粒子径・低頻度へと粒子の成長が伺えるが、酸素含有率がDGBよりも高いDGEでは殆ど粒子の成長がみられず、燃料噴射終了後の $TASI^*=1.2$ においても30nm以下の微小な一次粒子が数多く存在している。これは、図6からも伺えるようにDGEは火炎内のすす体積濃度が低く、すす一次粒子の凝集・合体が起こりうる十分なすす濃度に達しなかったためと類推される。次に、エステル系燃料のBAは $TASI^*=1.0, 1.2$ では酸素含有率がBAよりも低いDGBと同程度まで粒子が成長しているが、燃焼初期の $TASI^*=0.3$ では、DGEと同様に微小な粒子が高頻度で存在している。これは、BAの着火遅れ期間が他の燃料に比べ長く、 $TASI^*=0.3$ は予混合的燃焼から拡散的燃焼に移行した時期であり、粒子生成が開始して間もないため、微小粒子が高頻度で存在していると考えられる。これに対し、 $TASI^*=1.0, 1.2$ ではDGBと同程度の粒子の成長がみられることから、BAのすす粒子の成長が顕著であると伺える。

4・4 すす体積濃度と粒子径分布の相関関係 図9にDGB, DGEおよびBAの $TASI^*=1.0$ における噴霧中心軸から半径方向のすす体積濃度および粒子径分布を示す。なお、分布は粒子径の成長過程を捉えるため、ノズルから50, 70および90mm下流部での分布を採用した。

まず、ノズルから50mm, 70mmでの各々のすす体積濃度分布をみると、3燃料とも噴霧中心部で高濃度となり、外縁部へいくにつれすす濃度が低下する。粒子径については、噴霧中心部で粒子径は小さく、噴霧外縁より2-3mm内側で粒子径が大となる傾向がみら

Fig.8 Temporal change in particle diameter distribution

れる。これは、噴霧中心部では外部酸素と接しないため、高当量比となり、高濃度のすすが生成し、外縁部ではOHラジカルなどによる燃料およびすすの酸化が起こるため、すす濃度が減少したと予測される。また、中心部で存在する高濃度のすす粒子は噴霧下流部へ流された後、噴霧先端部で生じる渦によって外縁部へ繰り返し流れ滞留する⁶⁾。この時、すす粒子の凝集・合体が活性化され、噴霧外縁部で大粒子径のすすが形成されたと考えられる。以上より、噴霧中心部では小粒子径のすすが高数密度で存在し、外縁部では大粒子径のすすが低数密度で存在すると考えられる。

ノズルから90mmでの分布に着目すると、DGB, BAは噴霧中心部においても150nm以上の粒子が存在する。DGEについては他の2燃料ほど粒子の成長はみられないが、ノズルから50mm, 70mmの位置では最大でも10nmであったのに対し、噴霧先端部では最大で約60nmの粒子へと成長している。これより、いずれの燃料においても噴霧先端部へ向かうほど粒子の成長が促進されていることがわかる。

5. 結言

- 1) 同種の分子構造を有する含酸素燃料間では酸素含有率の増加に比例し、すす抑制効果が高くなる。
- 2) エステル結合を有する燃料に比べ、エーテル結合を有する燃料がよりすす粒子の生成・成長を抑制する。
- 3) 燃料性状に拘わらず、燃焼初期で生成する微小なすす粒子は燃焼の進行に伴い成長し、小粒子径・高数密度から大粒子径・低数密度の粒度分布に移行する。

Fig.9 Radial profiles of soot volume fraction f_v and particle diameter d_p

- 4) 噴霧半径方向のすす濃度分布は噴霧中心部で高濃度となり外縁部で低濃度となる。一方、粒子径分布は噴霧中心部で小粒子径、外縁部で大粒子径となる。また、噴霧下流域へ向かうほど粒子は大粒子径となる。
- 5) 含酸素燃料の適用により、噴霧火炎内のすす濃度は低下するが、微小粒子の割合は高くなる。

謝 辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッションエネルギー変換システム(同志社大学)」の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Miyamoto, N., et al, Smokeless, Low NO_x , High Thermal Efficiency, and Low Noise Diesel Combustion with Oxygenated Agents as Main Fuel, SAE paper 980506, (1998).
- (2) Lynn A. Melton, Soot diagnostics based on laser heating, *Applied Optics*, Vol.23, No.13, (1984), pp. 2201-2208.
- (3) Kitamura, T., Ito, T., Senda, J. and Fujimoto, H., Mechanism of Smokeless Diesel Combustion with Oxygenated Fuels Based on the Dependence of Equivalence Ratio and Temperature on Soot Particle Formation, *Int. J. Engine Research*, 3-4,(2002), pp.223-248.
- (4) Kitamura, T., Ito, T., Senda, J. and Fujimoto, H., A Study on Soot Suppression Effects of Oxygenated Fuel Using a Detailed Chemical Kinetic Modeling (2nd Report), *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.32, No.2, (2001), pp.37-42.
- (5) Nukiyama, S., Representation of the Size of Sprayed Drops (The Second Report) (in Japanese), *Science of Machine*, Vol.15, No.6, (1963), pp.13-17.
- (6) John E. Dec, A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet imaging, SAE paper 970873, (1997).