高分解能透過型電子顕微鏡を用いた ディーゼル噴霧火炎内すす粒子の観察* (バイオディーゼル噴霧火炎内すす粒子の性状)

山口 輝夫^{*1}, 近藤 克文^{*2}, 西貝 大樹^{*1}, 猪熊 洋希^{*1}, 高野 智識^{*2}, 相澤 哲哉^{*3}
Jean-Guillaume Nerva^{*4}, Caroline L. Genzale^{*5}, Lyle M. Pickett^{*6}

High-Resolution Transmission Electron Microscopy of Soot Particles in Diesel Spray Flame (Properties of Soot Sampled in Bio-Diesel Spray Flame)

Teruo YAMAGUCHI^{*1}, Katsufumi KONDO, Hiroki NISHIGAI, Hiroki IGUMA,
Satoshi TAKANO, Tetsuya AIZAWA, Jean-Guillaume NERVA,
Caroline L. GENZALE and Lyle M. PICKETT

^{*1} Meiji Univ. Graduate School of Science and Technology
1-1-1 Higashi-mita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8571 Japan

For better understanding of soot formation and oxidation processes in a bio-diesel spray flame, morphology, microstructure and size of soot particles directly sampled in a spray flame fuelled with soy-methyl ester were investigated using high-resolution transmission electron microscope (HRTEM). The soot samples were taken at different axial locations in the spray flame, 40, 50 and 70 mm from the injector nozzle, which correspond to soot formation, peak, and oxidation zones, respectively. The bio-diesel spray flame was achieved in a constant volume combustion chamber under a diesel-like high pressure and temperature condition (6.7 MPa, 1000 K). Density, diameter of primary particles and radius of gyration of soot aggregates directly sampled onto the TEM grids in the flame reached a peak at 50 mm from the injector nozzle and was lower or smaller at 40 and 70mm.

Key Words : Diesel Engine, Bio-Diesel Fuel, Diesel Spray Flame, HRTEM, Soot Aggregate, Morphology

1. 結 言

ディーゼル機関から排出される粒子状物質を極限まで低減するためには、すす粒子の性状や微細構造を詳細に理解する事は重要であり、このため、排気中のすす粒子については、高分解能透過型電子顕微鏡 (HRTEM) を用いた観察に関する研究がこれまでも数多く行われている^{(1)~(5)}。しかしながら、エンジンアウトでの微粒子低減にはディーゼル噴霧火炎内でのすす生成・酸化過程に関する詳細な理解が必要であり、そのためにはディーゼル噴霧火炎中から直接捕集されたすす粒子の性状を調べる事が重要である。排気中のすす粒子の観察と比較して、火炎内から直接捕集する手法には、火炎内 in-situ 光学計測結果との比較が可能である事や、排気中でのすす粒子の凝集や SOF/VOF 成分の凝結の影響を受けないといった利点もある。

著者らはこれまでに各種燃料を用いたディーゼル噴霧火炎中から直接捕集されたすす粒子の性状を TEM 観察し、燃料性状や火炎中での位置などがすす性状に与える影響を調査してきている^{(6), (7)}。本稿では、同条件での軽

* 原稿受付 2011 年 9 月 12 日

^{*1} 学生員, 明治大学大学院理工学研究科 (〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1)

^{*2} 明治大学大学院理工学研究科

^{*3} 正員, 明治大学理工学部

^{*4} CMT-Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia (Spain)

^{*5} Dept. of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology (USA)

^{*6} Combustion Research Facility, Sandia National Laboratories (USA)

E-mail: taizawa@isc.meiji.ac.jp

油を用いた場合との比較を念頭に、供試燃料として大豆由来メチルエステルバイオディーゼル燃料を用いた場合に火炎内から直接捕集されたすす粒子の TEM 観察結果について報告する。バイオディーゼル燃料由来の排気中のすす粒子は、従来軽油由来のすす粒子と比べて酸化速度や構造が大きく異なることが報告されているが^{(8)~(11)}、火炎中から直接捕集されたバイオディーゼル由来のすす粒子の性状及び生成・酸化過程に関する報告は見当たらない。本稿ではバイオディーゼル噴霧火炎中の異なる位置（すす生成領域、濃度ピーク領域、及び酸化領域）で捕集したすす粒子を HRTEM で撮影し、その撮影画像から要素すす粒径、すす凝集体の旋回半径、フラクタル次元などを解析した結果と、それらの統計的解析手法について報告する。

2. 実験方法及び実験装置

2・1 すす粒子サンプリング

火炎内すす粒子直接サンプリングの為のディーゼル燃焼実験は米国サンディア国立研究所の定容燃焼器⁽¹²⁾で行った。装置概要を図 1 に示す。燃焼室は一辺が 108 mm の直方体でサファイア製光学窓が左右、下面、前面の 4 方に設置されており、上面燃焼室壁面中心から燃焼室中心へ向けてインジェクタが設置されている。火炎中のすす粒子を捕集するためのサンプラーはインジェクタと反対の壁面に固定した。光学窓を介して撮影した噴霧火炎とサンプラーを図 2 に示す。図 2 上図 (a) は噴射前の均一温度雰囲気中において、下図 (b) は噴射開始から 2380 μ s 後に撮影したものである。サンプラー先端に銅製でカーボンコーティングが施された直径 3 mm の TEM 観察用グリッドを保持し、バイオ燃料を用いた単発ディーゼル噴霧火炎に暴露する。噴霧のサンプラーへの衝突が噴霧及び捕集されるすす粒子に与える影響を最小限に抑えるために、サンプラーは噴霧軸に対して平行方向に設置されている。サンプラーに噴霧が衝突することで図 2 下図 (b) の下半分の領域における流れは大きく変化しているが、同図の上半分の領域のグリッド保持部より上流側ではサンプラーによる流れへの影響は見られず、捕集されるすす粒子に与える衝突の影響は小さいと考えられる。グリッド上には燃焼による熱からグリッドを保護するためのカバーが設置され、火炎中のすす粒子はカバーに開けられた直径 1 mm の穴を通り熱泳動によりグリッド表面に捕集される。ディーゼル燃焼の実験条件を表 1 に示す。本研究では供試燃料として大豆由来メチルエステルバイオディーゼル燃料を用いた。燃料組成については参考文献^{(13), (14)}で詳述している。インジェクタ先端からグリッド中心までの距離は、光学計測により確認されたそれぞれすす生成、濃度ピーク、酸化領域に相当⁽¹⁴⁾する 40, 50, 70 mm とし、各位置において 1 枚ずつグリッドサンプルを取得した。

Fig. 1 Constant volume combustion chamber

Fig. 2 Implementation of the soot sampler in the combustion chamber

Table 1 Experimental conditions

Surrounding conditions	
Density: ρ_a [kg/m ³]	22.8
Temperature: T_a [K]	1000
Pressure: P_a [MPa]	6.7
O2 concentration: X_{O_2} [%]	15
Injection conditions	
Nozzle	88 $\mu\text{m} \times 1$
Injection pressure: P_{inj} [MPa]	150
Injection duration: Δt_{inj} [ms]	6
Fuel	Soy-Methyl Ester
Sampling conditions	
Distance from orifice: z [mm]	40, 50 and 70
TEM grid type	Carbon coated copper

2・2 すず粒子微細構造の観察

バイオディーゼル噴霧火炎中から直接捕集したすす粒子サンプルは、明治大学理工学部の高分解能透過型電子顕微鏡 JEM-2100F（加速電圧 200 keV、点分解能 0.19 nm）及び高解像度 CCD カメラ Gatan Ultrascan 1000/FIRST LIGHT（撮影解像度 2048×2048, 14 μm ）を用いて観察した。噴霧火炎中のすす粒子の性状をできるだけ維持した状態で観察することを目的に、火炎に暴露したグリッドは乾燥、アルコールへの溶解分解等の前処理は行わず、そのまま電子顕微鏡に挿入し、室温で真空排気した後に、観察を行った。撮影倍率はグリッド上の多数のすす粒子の性状を統計的に把握するのに適した 2 万倍を基本とし、グリッド 1 枚につき、図 3 に示すようにグリッド上の 5 つの異なる位置でそれぞれ 5 枚ずつ、計 25 枚の画像を撮影した。

Fig. 3 The five observation locations on the TEM grid

3. TEM 撮影画像の解析

噴霧火炎中から直接捕集したすす粒子の TEM 画像を 2 値化し、グリッド上に捕集されたすす粒子の濃度を示す指標として、すす粒子投影面積比を算出した。また MATLAB で作成された画像解析プログラムを用いて要素すす粒径 d_p 、凝集体旋回半径 R_g 、投影面積 A を解析し、これら解析結果と要素すす粒子断面積 $A_p = \pi d_p^2 / 4$ を用いて以下に示した式により、すす凝集特性を示すフラクタル次元 D_f を求めた⁽¹⁵⁾。

$$n = k_f \left(\frac{R_g}{d_p} \right)^{D_f} \quad (1)$$

$$n = \left(\frac{A}{A_p} \right)^\alpha \quad (2)$$

$$R_g^2 = \frac{1}{m} \sum r_i^2 \quad (3)$$

- n : 凝集体中の要素すす粒子の個数
 k_f : 係数
 R_g : すず凝集体の巡回半径 [nm]
 d_p : 平均要素すす粒径 [nm]
 D_f : フラクタル次元
 A : すず凝集体の投影面積 [nm²]
 A_p : 要素すす粒子の断面積 [nm²]
 α : 重量補正指数(=1.09)⁽¹⁶⁾
 m : すず凝集体像を構成するピクセルの数
 r_i : 凝集体像を形成する各ピクセルから、凝集体の図心までの距離 [nm]

4. 観察及び解析結果

4・1 すず粒子 TEM 画像及びすず投影面積比

バイオディーゼル噴霧火炎内から直接捕集したすす粒子の TEM 画像例を図 4 に示す。図 4 (a), (b), (c) はそれぞれすす生成、濃度ピーク、酸化領域に相当するインジェクタ先端から 40, 50, 70 mm で捕集したすす粒子を撮影したものである。図 4 から全ての画像に共通して、単独で存在する要素すす粒子と凝集体が混在する事が分かる。図 4 (b) より、インジェクタ先端から 50 mm の位置ですず粒子を捕集したグリッドではすす粒子とは異なる斑点状の影が全域で観察されている。現在のところ、これらはグリッド表面のカーボンコーティングが実験時の予混合燃焼及びディーゼル噴霧燃焼により損傷を受けたものと考えているが、今後さらに検討を要する。

Fig. 4 TEM images of soot particles directly sampled in bio-diesel spray flame at (a) 40 mm, (b) 50 mm and (c) 70 mm from the injector nozzle

2 値化した TEM 画像から算出したすす粒子投影面積比を図 5 に示す。2 値化のための閾値はすす粒子を抽出しグリッド表面の損傷による斑点をできる限り除外できるよう選択した。2 値化でわずかに残った損傷による斑点

の面積がすす粒子投影面積比に与える影響は無視できる程度であった。投影面積比はインジェクタ先端から 50 mm の位置でピークを示し、これよりも上流の 40 mm 及び下流の 70 mm の位置では小さくなっていることがわかる。インジェクタ先端からの距離に対する準定常噴霧火炎内すす濃度の変化を LII 法及び透過光減衰法により計測した結果⁽¹⁴⁾からは、50 mm の位置ですす濃度がピークを示す同様の傾向が確認されており、図 4 は概ね、火炎内のすす濃度の変化を反映しているものと推測される。

Fig. 5 Projected area ratio of soot particles on TEM images

4・2 要素すす粒径

噴霧火炎中の異なる位置で捕集したすす粒子の要素すす粒径ヒストグラムを図 6 に示す。本研究では TEM 画像中の要素すす粒子のうち、形状を認識できるものについてのみ計測した。また形が円形でない物も多く存在するため、それぞれの要素すす粒子に対し 2 軸方向に計測を行った。インジェクタ先端から 40, 50, 70 mm の位置の TEM 画像における要素すす粒径の総計測数はそれぞれ 5236, 3900, 1357 である。すす濃度がピークを示すインジェクタ先端から 50 mm の位置よりも 40 mm の計測数が多いのは、単独で存在する要素すす粒子が多く、形状を認識し計測できる粒子が多かったためである。図 6 から、火炎中のどの位置で捕集したすす粒子についても、要素すす粒径は正規分布に似た分布を示すことが分かる。インジェクタ先端から 40, 50, 70 mm の位置で捕集したすす粒子の算術平均要素すす粒径はそれぞれ 14.9, 19.6, 16.7 nm であった。要素すす粒径も 50 mm の位置でピークを示している。この傾向はこれらの火炎中の位置がすす生成、濃度ピーク、酸化領域に相当することと矛盾しない。またこれらの値は、供試燃料として軽油を用いた場合のエンジン排気中すす粒子の TEM による計測値^{(17), (18)}と比べて僅かに小さいが、エンジンの運転条件によっては近い値となる場合も見受けられる⁽¹⁹⁾。

上述の要素すす粒子には、単独で存在する要素すす粒子と凝集体を形成する要素すす粒子の両方が含まれている。ここで、多数の粒子から構成される大きな凝集体の中の要素すす粒子に比べて、単独で存在する要素すす粒子や小さな凝集体内の要素すす粒子は判別及び計測が容易なため、これらの要素すす粒子に計測数の重みがつくことで、粒径分布や平均粒径が影響を受ける事が懸念される。この影響を調べるため、凝集体旋回半径と凝集体内平均要素すす粒径の関係を調べた。結果を図 7 に示す。破線は全凝集体の平均要素すす粒径を表している。凝集体が大きくなるに従い、要素すす粒径の計測数が増えるため凝集体毎の平均粒径のばらつきは小さくなるが、インジェクタ先端から 50, 70 mm の位置については、凝集体の大きさと凝集体毎の平均粒径との間に明らかな傾向の違いは見られない。すなわち、判別及び計測が容易な要素すす粒子に重みがつくことで、粒径分布や平均粒径は影響を受けていないと判断できる。一方、インジェクタ先端から 40 mm のすす生成領域では、旋回半径 50 nm 以上の比較的大きな凝集体の平均要素すす粒径は 20 nm 前後であるのに対して、グラフ左下の領域に分布する単独の要素すす粒子はまだ成長過程の途中にあり粒径が小さい。これらの粒子は数が非常に多いため、計測数の重みによって全凝集体での平均要素すす粒径が小さくなっていることがわかる。

Fig. 6 Diameter histogram of primary particles directly sampled in bio-diesel spray flame at (a) 40 mm, (b) 50 mm and (c) 70 mm from the injector nozzle

Fig. 7 Distribution of primary particle mean diameter within each aggregate gyration radius of the aggregates directly sampled in bio-diesel spray flame at (a) 40 mm, (b) 50 mm and (c) 70 mm from the injector nozzle.

4・3 すず凝集体旋回半径

噴霧火炎中の異なる位置で捕集したすす粒子について、すす凝集体の形状から解析した旋回半径のヒストグラムを図8に示す。インジェクタ先端から40, 50, 70 mmの位置についてそれぞれ得られた旋回半径のデータ数は962, 260, 173であった。このデータ数には単独で存在する要素すす粒子も全て凝集体として含まれており、40 mmの位置で得られたデータ数が突出して多いのは単独で存在する要素すす粒子が多かったからである。インジェクタ先端から40, 50, 70 mmの位置で得られた算術平均旋回半径はそれぞれ9.3, 28.2, 14.9 nmであり、火炎中の位置に対する旋回半径の変化の傾向は上述の火炎内すす濃度の変化と同様の傾向を示している。これらの値は、燃料組成、運転条件、捕集方法など多くの影響因子が含まれ直接比較は困難ではあるが、過去に報告されている軽油を燃料とするエンジン排気中すす凝集体のTEMを用いた計測値(50–130 nm)を大きく下回った^{(17)~(19)}。

インジェクタ先端から40 mmの位置では、データのほとんどが10 nm以下の範囲に分布しており、単独で存在する要素すす粒子が多い事が分かる。しかし、僅かに大きな凝集体も存在している。インジェクタ先端から50 mmの位置では、ピークは20 nm付近であるものの90 nm付近まで比較的広い範囲に旋回半径が分布し、噴霧火炎中の他の位置に比べ比較的大きな凝集体が多く存在する事が分かる。これは要素すす粒子自体の粒径が大きくなることに加え、40 mmの位置で観察された独立して存在する要素すす粒子が凝集し、下流の50 mmの位置に至るま

で大きな凝集体が形成される事を示している. インジェクタ先端から 70 mm の位置ではすす粒子の絶対量が少なく, 回転半径もほとんどが 15 nm 程度であり, 大きい凝集体も見られなかった.

次に図 8 に示した凝集体回転半径の個数分布を質量分布に換算したものを図 9 に示す. この質量分布は各凝集体の平均要素すす粒径, 式 (2) に示した式で近似的に求められる各凝集体内要素すす粒子数, 及びすすの密度 $\rho=2.0 \text{ g/cm}^3$ ^{(20), (21)} から算出した. 回転半径の質量分布は図 8 に示した個数分布とは大きく異なる傾向を示している. インジェクタ先端から 40, 50, 70 mm の位置で捕集されたすす粒子の質量換算平均回転半径はそれぞれ 98.8 nm, 85.4 nm, 24.3 nm であり, 上述の個数換算平均値に比べると大きな値になっているが, 以前として前述した過去に報告されている排気中すす凝集体の値を下回っている^{(17), (18)}. 40, 50 mm の位置で捕集されたすす粒子については, 数個に過ぎない大きな凝集体が質量的には大きな割合を占めることが分かる. また, すす酸化領域に相当する 70 mm の位置で捕集されたすす粒子の中には大きな凝集体は存在せず, すす粒子の絶対量も少ない.

Fig. 8 Histogram of gyration radius of soot aggregates directly sampled in bio-diesel spray flame at (a) 40 mm, (b) 50 mm and (c) 70 mm from the injector nozzle.

Fig. 9 R_g -mass distribution of soot aggregates directly sampled in bio-diesel spray flame at (a) 40 mm, (b) 50 mm and (c) 70 mm from the injector nozzle.

4・4 フラクタル次元

すす凝集体の構造の指標であるフラクタル次元を算出するために作成した, 回転半径対要素すす粒径比と凝集体内要素すす粒子数の対数表示グラフを図 10 に示す. 凝集特性を求める為に, 数個の要素すす粒子から形成される小さな凝集体や独立した要素すす粒子は, フラクタル次元算出には用いなかった. 近似直線の傾きが凝集体の

フラクタル次元を表す。凝集体を形成する粒子数 $n > 3$ のデータを用いて算出した、インジェクタ先端から 40, 50, 70 mm の位置で捕集したすす粒子のフラクタル次元はそれぞれ, 1.68, 1.69, 1.66 となり, 位置による有意な違いは見られなかった。このことから凝集体の構造は火炎中の位置によってほとんど変化していないことが分かる。

Fig. 10 Logarithmic plots of R_g/d_p for soot in bio-diesel spray flame at (a) 40 mm, (b) 50 mm and (c) 70 mm. Each open circle represents a measured soot aggregate. The slope of the linear regression line represents the fractal dimension D_f .

以上で述べた, 噴霧火炎中の異なる位置におけるすす投影面積比, 要素すす粒径, すす凝集体旋回半径, 及びフラクタル次元の解析結果は, インジェクタ先端から 40, 50, 70 mm の位置がそれぞれ火炎中のすす生成, 濃度ピーク, 酸化領域に相当するという光学計測の結果⁽¹⁴⁾と矛盾しない。すなわち, 本稿で述べた手法はディーゼル噴霧火炎中でのすす粒子の成長及び酸化過程を調査するための方法として妥当であると考えられる。また, 本手法が排気中すす粒子の観察に比べて, 火炎内 in-situ 光学計測結果との比較が可能で, 排気中での凝集や SOF/VOF

成分の凝結の影響を受けない点で優れている事は前述のとおりである。しかしながら、これらの解析結果から火炎内すす粒子の生成・酸化過程をより定量的に議論するにあたっては、本研究における火炎内すす粒子の捕集のプロセスや、TEM 画像解析プロセスの影響についてさらに検討する必要がある。具体的には、火炎中の異なる位置による温度や流れの条件の違いがグリッド上へのすす捕集プロセスに与える影響や、一度捕集されたすす粒子が火炎中でさらに酸化されないかといった点、また、複雑な3次元形状を持つすす凝集体の透過像から要素すす粒径の形状を認識及び計測する画像解析プロセスの信頼性などについて、今後さらに検討する必要がある。その上で、本研究による火炎内すす粒子のTEM 観察結果と、レーザー計測によって得られた噴霧火炎内すす質量濃度、粒径、個数密度などの2次元分布計測結果^{(14), (22)~(25)}との比較や、燃料組成、噴射、雰囲気条件等が火炎内すす粒子の性状や微細構造に与える影響^{(9)~(11)}の調査を進め、火炎内すす粒子の生成、酸化過程の詳細を明らかにしていきたいと考えている。

5. 結 論

バイオディーゼル噴霧火炎中の異なる位置で直接捕集したすす粒子を高分解能透過型電子顕微鏡 (HRTEM) で観察し、要素すす粒径、すす凝集体旋回半径、フラクタル次元などを解析した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 噴霧火炎内から直接すす粒子を捕集したグリッド上には、単独で存在する要素すす粒子とすす凝集体が混在して観察された。
- (2) TEM 撮影画像から得られたすす粒子の投影面積比、要素すす粒径、及びすす凝集体旋回半径は、インジェクタ先端から 50 mm の位置でピークを示し、これよりも上流の 40 mm 及び下流の 70 mm の位置では小さくなるという火炎内すす濃度の変化に似た傾向を示した。
- (3) すす凝集体のフラクタル次元には、噴霧火炎内の位置による大きな違いは見られなかった。

本研究の実施にあたり、HRTEM によるすす粒子観察の機会を提供して頂いた明治大学理工学部物理学科吉村英恭氏に感謝申し上げる。

文 献

- (1) Kuo Tian, Kevin A. Thomson, Fengshan Liu, David R. Snelling, Gregory J. Smallwood, Dashan Wang, "Determination of the Morphology of Soot Aggregates using the Relative Optical Density Method for the Analysis of TEM Images", *Combustion and Flame*, Vol. 144, (2006), pp. 782-791.
- (2) A. B. Palotas, L. C. Rainey, C. J. Feldermann, A. F. Sarofim and J. B. V. Sandre, "Soot Morphology: An Application of Image Analysis in High-Resolution Transmission Electron Microscopy", *Microscopy Research and Technique*, Vol. 33, (1996), pp. 266-278.
- (3) T. Ishiguro, Y. Takatori and K. Akihama, "Microstructure of Diesel Soot Particles Probed by Electron Microscopy: First Observation of Inner Core and Outer Shell", *Combustion and Flame*, Vol. 108, (1997), pp. 231-234.
- (4) J. Song, M. Alam, A. L. Boehman and U. Kim, "Examination of the Oxidation Behavior of Biodiesel Soot", *Combustion and Flame*, Vol. 146, (2006), pp. 589-604.
- (5) R. L. Vander Wal, A. Yezerets, N. W. Currier, D. H. Kim and C. M. Wang, "HRTEM Study of Diesel Soot Collected from Diesel Particulate Filters", *Carbon*, Vol. 45, (2007), pp. 70-77.
- (6) S. Kook and L. M. Pickett, "Soot Volume Fraction and Morphology of Conventional and Surrogate Jet Fuel Sprays at 1000-K and 6.7-MPa Ambient Conditions", *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 33, issue 2, (2011), pp. 2911-2918.
- (7) K. Kondo, T. Yamaguchi, H. Nishigai, S. Takano and T. Aizawa, "High-Resolution Transmission Electron Microscopy of Soot Directly Sampled at Different Axial Locations in Diesel Spray Flame", *Proceedings of 10th Internal Conference on Engines & Vehicles*, SAE 2011-24-0068, (2011).

- (8) A. L. Boehman, J. Song and M. Alam, "Impact of Biodiesel Blending on Diesel Soot and the Regeneration of Particulate Filters", *Energy & Fuels*, Vol. 19, (2005), pp. 1857-1864.
- (9) R. L. Vander Wal and C. J. Mueller, "Initial Investigation of Effects of Fuel Oxygenation on Nanostructure of Soot from a Direct-Injection Diesel Engine", *Energy & Fuels*, Vol. 20, (2006), pp. 2364-2369.
- (10) Kuen Yahliu, A. L. Boehman and Octavio Armas, "Emission from Different Alternative Diesel Fuels Operating with Single and Split Fuel Injection", *Fuel*, Vol. 89, No. 2 (2010), pp. 423-437.
- (11) Octavio Armas, Kuen Yahliu and A. L. Boehman, "Effect of Alternative Fuels on Exhaust Emissions during Diesel Engine Operation with Matched Combustion Phasing", *Fuel*, Vol. 89, No. 2 (2010), pp. 438-456.
- (12) "Engine Combustion Network experimental data archive", <http://www.ca.sandia.gov/ECN/> (参照日 2011 年 12 月 10 日)
- (13) C. L. Genzale, L. M. Pickett and S. Kook, "Liquid Fuel Penetration of Diesel and Biodiesel Sprays at Late-Cycle Post-Injection Conditions", *SAE Technical Paper*, No. 2010-01-0610 (2010), pp. 479-495.
- (14) 西貝大樹, 山口輝夫, 近藤克文, 相澤哲哉, J.-G. Nerva, C. L. Genzale, S. Kook and L. M. Pickett, "高分解能透過型電子顕微鏡を用いたディーゼル噴霧火炎内すす粒子の観察 (1) -US2 号軽油及びバイオディーゼル燃料由来のすす粒子の性状-", 第 22 回内燃機関シンポジウム講演論文集, No. 66, pp. 387-392.
- (15) K. O. Lee, C. M. Megaridis and R. A. Dobbins, "Soot Formation Effects of Oxygen Concentration in the Oxidizer Stream of Laminar Coannular Nonpremixed Methane/Air Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 121, (2000), pp. 323-333.
- (16) C. M. Megaridis and R. A. Dobbins, "Morphological Description of Flame-Generated Materials", *Combustion Science and Technology*, Vol. 71, (1990), pp. 95-109.
- (17) K. O. Lee, R. Cole, R. Sekar, M. Y. Choi, J. S. Kang, C. S. Bae and H. D. Shin, "Morphological Investigation of the Microstructure, Dimensions, and Fractal Geometry", *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 29, (2002), pp. 647-653.
- (18) J. Zhu, K. O. Lee, A. Yozgatligli and M. Y. Choi, "Effects of Engine Operating Conditions on Morphology, Microstructure, and Fractal Geometry of Light-Duty Diesel Engine Particulates", *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 30, (2005), pp. 2781-2789.
- (19) K. O. Lee, J. Zhu and J. Song, "Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate Matter Morphology and NO_x Emissions", *International Journal of Engine Research*, Vol. 9, No. 2, (2008), pp. 165-175.
- (20) J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals* (1988), p. 631, p. 645 and p. 646, McGraw-Hill.
- (21) H. Bockhorn, *Soot Formation in Combustion – Mechanisms and Models* (1994), p. 177 and p. 427, Springer-Verlag.
- (22) H. Kosaka, T. Nishigaki, T. Kamimoto and S. Harada, "A Study on Soot Formation and Oxidation in an Unsteady Spray Flame via Laser Induced Incandescence and Scattering Technique", *SAE Technical Paper*, No. 952451 (1995), pp. 11-20.
- (23) J. E. Dec, "A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging", *SAE Technical Paper*, No. 97-0873, (1997).
- (24) T. Ito, T. Hosaka, M. Ueda, J. Senda and H. Fujimoto, "Detailed Kinetic Modeling and Laser Diagnostics of Soot Formation Process in Diesel Jet Flame", *SAE Technical Paper*, No. 2004-01-1398, (2004).
- (25) H. Kosaka, T. Aizawa and T. Kamimoto, "Two-Dimensional Imaging of Ignition and Soot Formation Processes in a Diesel Flame", *International Journal of Engine Research*, Vol. 6, No. 1, (2005), pp. 21-42.