励起発光マトリクス法による ディーゼル火炎内すす生成過程のレーザー分光計測*

相澤 哲哉^{*1}, 蒲生 将也^{*2}, 小酒 英範^{*1}

Laser Spectroscopy of Soot Formation Process in a Diesel Spray Flame via Excitation-Emission Matrix Technique

Tetsuya AIZAWA^{*3}, Masaya GAMOU and Hidenori KOSAKA

^{*3}Department of Mechano-Aerospace Systems Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

In order to investigate the early soot formation processes in diesel combustion, spectral analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formed in the early soot formation region in a diesel spray flame was conducted via a newly developed Excitation-Emission Matrix (EEM) technique using a multi-wavelength laser source. The experiments were conducted using an optically accessible constant volume combustion vessel under diesel-like conditions ($T_a=750$ to 1130 K and $P_a=2.0$ to 3.0 MPa). The PAHs formed in a diesel spray flame were excited by a coherent multi-wavelength "rainbow" laser light (mainly 266, 299, 342 and 398 nm, total 20 mJ) generated by converting the 4th harmonic (266 nm, 60 mJ) of a pulsed Nd:YAG laser using a Raman cell frequency converter filled with hydrogen (500 kPa). The laser-induced fluorescence (LIF) from the PAHs excited by the different laser wavelengths in the flame was simultaneously captured using a spectrometer and an ICCD camera as EEM images. The EEM measured in diesel spray flames at different ambient temperatures and oxygen concentrations revealed that at ambient temperature of 940 K and oxygen concentration of 21%, a wide varieties of PAHs are detected around the ignition timing in the central fuel rich region of diesel spray flame and the PAHs are converted to larger PAHs and soot particles as the combustion process progresses. In contrast, at lower ambient temperature of 750 K or lower oxygen concentrations down to 10%, the fluorescence from PAHs are detected in the central fuel rich region before ignition and the intensity and the spectral characteristics of the PAH fluorescence remain unchanged until they are finally converted to soot particles in the downstream regions.

Key Words: Diesel Spray Flame, Soot Formation, PAHs, Laser-Induced Fluorescence, Excitation-Emission Matrix, Multi-Wavelength Laser

1. 結 言

ディーゼル機関からのさらなる微粒子排出低減には、化学反応も含めたシリンダ内すす生成過程の詳細な理解が重要となる。シリンダ内でのすす生成・酸化過程についてはこれまでも様々な光学計測法を用いた数多くの研究例があるが、最近、著者らは特に初期すす生成過程に着目し、レーザー誘起蛍光法(LIF法)及びレーザー誘起赤熱法(LII法)を用いて、ディーゼル火炎内のすす前駆物質とすす粒子の同時2次元可視化及びレーザー誘起発光スペクトルの計測を行った^(1,2,3,4)。その結果、ディーゼル火炎内のすす前駆物質からと考えられるLIFが噴霧中心部の燃料過濃領域で観察され、すす粒子からのLIIがその周辺および下流域で観察され

ることを明らかにした。これによりディーゼル火炎におけるすす前駆物質の発生領域と時期、それがすす粒子に成長する領域と時期が捉えられた。しかし、すす前駆物質の同定とその多環化過程に関する情報は得られておらず、またすす生成に大きな影響を与える雰囲気や燃料、噴射条件などのパラメータがすす前駆物質の生成過程に与える影響も分かっていない。そこで本研究は、多波長レーザーを光源とする励起発光マトリクス(Excitation-Emission Matrix: EEM)法をディーゼル火炎へ適用し、すす前駆物質の生成過程を調査することを目的とする。本稿ではすす生成に大きな影響を与える雰囲気温度及び酸素濃度がすす前駆物質の生成過程に与える影響を調べる。

2. 励起発光マトリクス(EEM)法

EEM法は、1970年代にChristianらによって考案された多波長励起蛍光分析の手法であり、測定装置及び

* 原稿受付 2007年4月12日。

^{*1} 正員、東京工業大学大学院理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

^{*2} 東京工業大学大学院理工学研究科。

E-mail: taizawa@ec.ctrl.titech.ac.jp

測定原理については参考文献(5)及び(6)に詳述されている。多波長励起した蛍光スペクトルをX軸に発光波長、Y軸に励起波長、Z軸に発光強度をとって3次元プロットしたものを励起発光マトリクス(EEM)と呼ぶ。サンプル中の複数の化学種はEEM上で蛍光が観測される位置、すなわち発光波長(X軸)と励起波長(Y軸)から同時に同定でき、各化学種の濃度はその蛍光強度から求められる。図1左図は本研究で得られたディーゼル噴霧火炎のEEM画像データの例、同右図はいくつかの代表的なPAHの常温・液相での吸収・蛍光波長域の文献値のEEM上に模式的に示したものである。様々な種類のPAHは図1右図のようにそれぞれ固有の吸収・蛍光波長を持つことが知られており、また一般に分子量の大きなPAHはより長波長域に吸収、蛍光波長を有することが知られている。これらの吸収・発光波長域及び蛍光強度の特徴を、EEM画像計測結果と文献値との比較、分析により抽出できれば、ディーゼル噴霧火炎中の複数のPAHを同時に同定、定量できる可能性もある。本研究ではこのEEM法を初めてディーゼル噴霧火炎に適用し、火炎内でのすす生成過程を調査する。

多波長励起光源はEEM計測に不可欠な要素である。従来、EEMの計測にはキセノンランプなどの光源が用いられてきているが、これらの光源ではシリンダ内すす生成過程といった非定常現象の瞬時計測に十分な光量は得られない。そこで本研究では高出力Nd:YAGパルスレーザーからのポンプレーザ光を、ラマンセルを用いてコヒーレントな多波長レーザ光に変換し、光源として用いた。ラマンセルは紫外ポンプレーザを真空紫外光に波長変換する手段として広く用いられてきているが、火炎を対象としたEEM計測用の多波長光源としての利用は本研究が初めてである。

3. 実験装置及び実験条件

図2に本研究でディーゼル噴霧火炎内すす生成過程のEEM計測に用いた実験装置の概略を示す。パルスNd:YAGレーザ(Continuum, Powerlight9010, 10Hz)の第4高波長(266nm, 60mJ)をラマンセルを用いて240nm~500nmに及ぶコヒーレントな多波長レーザ光に波長変換する。多波長レーザ光源の特性については参考文献(8)に詳述されている。本実験ではおもに266, 299, 342, 398nmの4波長をEEM測定用の励起光として用いた。図3に多波長レーザ光のパワースペクトルの例を示す。60°三角プリズムによりこの多波長レーザ光を分散させつつレーザ集光用のUVアクロマティックレンズ($f=100\text{mm}$)で定容燃焼器内のデ

Fig.1 Example EEM image measured in a diesel spray flame (left) and reference EEM map of representative PAHs (right)

Fig.2 Measurement setup for EEM in diesel spray flame

Fig.3 Example spectrum of multi-wavelength excitation laser generated by Raman cell

ィーゼル噴霧火炎中心軸上の焦点に集光する。焦点位置は各励起波長毎に1mm程度づつ異なり、複数の焦点が定容燃焼器内のディーゼル噴霧火炎の中心軸上に縦一列に並ぶ。レーザーパルスエネルギーは燃焼器入射前で全ての波長を合わせて約20mJである。異なる励起波長に対応する各焦点での火炎内PAHからの蛍光は、入射レーザと直角の方向から蛍光集光用のUVアクロマティックレンズ($f=100\text{mm}$, $F\#=2.1$)を用いて分光器(Solar-TII MS3504, 350mm, 150g/nm)の入射スリットに集光される。このとき入射スリット上の異なる縦位置にはそれぞれ異なる波長によって励起された蛍光が集光される。分光器出射ポートに設置されたICCDカメラ(Andor iStar DH734)により、異なる励起波

Table 1 Experimental conditions

Surrounding conditions	
Ambient gas density: ρ_a	9.5 kg/m ³
Temperature: T_a	750, 940, 1130 K
Pressure: P_a	2.0, 2.5, 3.0 MPa
O ₂ concentration: X_{O_2}	10, 15, 21%
Injection conditions	
Nozzle	$\phi 0.14 \text{ mm} \times 1$
Fuel	0-solvent ($n\text{-C}_{11}\sim\text{C}_{15}$)
Injection pressure: ΔP_{in}	80 MPa
Injection amount: m_f	15 mg
Injection duration: τ_{in}	4.0 ms
Measurement conditions	
Excitation wavelength	266~398 nm
Detection wavelength	259~512 nm
Excitation Laser energy	20 mJ
Measurement location: z	40, 60, 75 mm
Measurement timing: t	0.6~4.0 ms after start of injection
ICCD gate width	200 ns
Spectrometer slit width	0.3 mm

長に対応する複数の蛍光スペクトルを1枚のEEM画像として同時に測定する。

定容燃焼器は容積560 cm³であり、噴霧軸と直行する断面の形状が一辺56 mmの正方形で3枚の光学計測用石英窓を備える。窓の内径は35 mmであり噴霧火炎の全体像を同時に観察することはできないが、噴孔から窓の中心までの距離をスパーサーにより変更することができ、噴霧火炎中の異なる位置での計測が可能である。この燃焼器では噴霧燃焼の直前にスパークプラグを用いてアセチレン・酸素・窒素の予混合気を燃焼させることにより高温高圧模擬空気を生成できる。燃料噴射装置は単発式コモンレール噴射装置を用いた。

表1に実験条件を示す。本稿では著者らの過去のディーゼル噴霧火炎の分光計測^(12,34)における雰囲気条件を参考に940 K(バシレ温度)、2.5 MPaを基準条件とし、すす生成に大きな影響を与える雰囲気温度及び酸素濃度をそれぞれ750~1130 K、21~10%の範囲で変化させ、このときのすす前駆物質の生成過程の変化を調べた。燃料は蛍光成分を殆ど含まない高純度n-パラフィンである0号ソルベントを用いた。

4. ディーゼル火炎内すす生成過程のEEM計測

4.1 雰囲気温度がすす生成過程に与える影響

雰囲気温度を750 K、940 K、1130 Kと変化させたときのディーゼル火炎内すす生成過程をEEM法により計測した。雰囲気酸素濃度は21%で一定とした。まず図4に異なる雰囲気温度における熱発生率波形を示す。雰囲気温度の低下により着火遅れは増大する。940 Kと

Fig.4 Heat release rate of diesel spray flame at different ambient temperatures

1130 Kの違いは明確ではないが、噴射期間中の熱発生率は1130 Kのほうがやや高い。750 Kでは着火遅れは増大し、予混合燃焼による熱発生ピークが明確に観察される。

図5に基準条件(雰囲気温度940 K、雰囲気圧力2.5 MPa)においてディーゼル噴霧火炎内で測定されたEEM画像を、同じ実験条件での高速度レーザー撮影と併せて示す。以下に示すEEM画像は全て、噴霧燃焼の現象のばらつきとSN比改善のため、10回の燃焼実験で得られた画像を積算したものである。励起レーザー光を入射しない場合の背景光は無視できるレベルであった。燃焼容器内の圧力上昇により検出した着火遅れは0.8 msであり、EEM計測タイミングは着火前(0.6 ms)、着火直後(1.0 ms)、着火後(2.0 ms)に相当する。ここで各画像中で、斜めに並んでいるスポット状の光はそれぞれ異なる励起波長の焦点からの散乱光。縦筋状の光は光学窓表面や燃焼器内壁からの散乱光である。これに対し、各スポットの右側に見られる横筋状の光が、それぞれ異なる励起波長により励起された火炎内生成物からの励起発光である。これらの励起発光は励起レーザー波長によらず観察されており、また発光波長域が広く振動バンド等によるスペクトル構造が見られないなど、分子量が大きく内部エネルギー自由度の大きなPAHに典型的な特徴を示している。また、この励起発光は酸素を含まない高温高圧雰囲気中に噴射された非燃焼蒸発噴霧中で観察されなかったため、本実験で使用した燃料に最初から含まれる微量の芳香族不純物等によるものではないことが確認されている。よってこれらの励起発光は噴霧火炎内で生成したPAHからの蛍光と考えられる。

図5より、PAHからの蛍光は着火前の $t=0.6$ msですでに観察されていることが分かる。計測タイミングが着火前、着火時、着火後と進むに従い、全体が火炎内

Fig.5 EEM images and high-speed laser shadowgraph of diesel spray flame at $T_a=940K$

Fig.6 EEM images and high-speed laser shadowgraph of diesel spray flame at $T_a=750K$

PAH からの蛍光強度は大きくなると共に、蛍光波長が 400nm 以下の領域から次第に長波長側へ広がっていく様子が観察される。時間経過後の下流域に相当する $z=60\text{mm}$, $t=2.0\text{ms}$ に至ると、これらのブロードな LIF 光に比べて非常に明るい光($z=60\text{mm}$, $t=2.0\text{ms}$ の EEM 画像の表示輝度レンジはその他の画像の 10 倍)が EEM 画像の右端部(長波長域)に観察されるようになる。この光は噴霧火炎中のすす粒子によるレーザー誘起赤熱光(LII 光)である。LII 光はすべての励起波長においても 400nm 以上の全く同じ波長域に発光が観察されるという特徴を持つ。これは LII 光が火炎内 PAH の LIF 光とは異なるすす粒子の輻射光であり、発光波長に励起波長依存性がないためであるが、図 5 の $z=60\text{mm}$, $t=2.0\text{ms}$ の画像右端の光はこの LII 光の特徴を明確に示す。

図 6 に、雰囲気温度を基準条件の 940K よりも低い 750K としたときのディーゼル噴霧火炎内で測定された EEM 画像と高速度レーザー撮影写真を示す。着火遅れは 1.9ms である。レーザー撮影写真では分かりにくいがこの条件では噴射終了間際に下流で僅かにすすが生成される。図 6 より、 $z=40\text{mm}$, $t=1.0\text{ms}$ の画像では主に 400nm 以下の短波長側の領域で蛍光が観察されていることがわかる。これは着火前の噴霧内での反応により生成された環数及び分子量の小さい PAH による蛍光と考えられる。これに対し、同じ場所での着火後にあたる $z=40\text{mm}$, $t=2.0\text{ms}$ の画像、及びより下流の $z=60\text{mm}$ での着火前後($t=1.0\text{ms}$ 及び 2.0ms)の画像を見てみると、広い波長域で蛍光が観察されており、PAH の多環化が進行していることがわかる。さらに時間が経過した後の下流域にあたる $z=75\text{mm}$, $t=2.8\text{ms}$ では、雰囲気温度 940K の図 5 の場合と同様に、すす粒子による LII 光が観察されている。すす粒子による LII 光が観察され始めるタイミングは基準条件の雰囲気温度 940K の場合よりも遅く、着火前にあたる $z=60\text{mm}$, $t=1.0\text{ms}$ から LII 光が観察されるようになるまでの間は PAH による非常にブロードな PAH からの蛍光が観察され続ける。

雰囲気温度を基準条件の 940K よりも高い 1130K とした場合についても同様に EEM 画像の計測を行った。着火遅れは 0.55ms であった。実験の結果、着火前の段階ですでに噴霧内で様々な種類の PAH が生成されていること、着火とはほぼ同時にすす粒子が生成していることがわかった。

以上の雰囲気温度を変化させたときの計測結果を図 7 にまとめて示す。図 7 は雰囲気温度がすす生成に与える影響を俯瞰できるように、EEM 法及びレーザー撮影写真により噴霧火炎中で観測されたすす生成過程を、分子量の小さな PAH、分子量の大きな PAH、すす粒

Fig.7 Soot formation process in a diesel spray flame at different ambient temperatures

子の 3 段階に分けて概念的に示したものであり、限られた測定点におけるデータからそれ以外の時間及び領域でのすす生成過程を補間及び推測して示している。雰囲気温度を 750~1130K の範囲で変化させると、雰囲気温度の低下に伴い PAH が多環化及びすすに転化する領域と時期はより下流へ移り遅くなる。雰囲気温度 1130K の場合には、着火とはほぼ同時にすす粒子が生成する。雰囲気温度 940K の場合には、着火と同時に噴霧中で様々な種類の PAH が同時に観察され、これらの PAH は燃焼の進行とともに分子量の大きい PAH やすす粒子に転化してゆく。雰囲気温度 750K においては、着火前から分子量の小さな PAH の生成及び PAH の多環化が観察され、分子量の大きい PAH は拡散燃焼期に入り下流域ですす粒子に転化するまで火炎中に存在し続ける。

4.2 雰囲気酸素濃度がすす生成過程に与える影響

次に雰囲気温度を基準条件の 940K で一定とし、雰囲気酸素濃度を変化させたときの噴霧火炎の EEM 計測を行った。図 8 に異なる雰囲気酸素濃度における熱発生率波形を示す。雰囲気酸素濃度の低下により着火遅れ及び燃焼期間は増大するが、図 4 の雰囲気温度が

Fig.8 Heat release rate of diesel spray flame at different ambient oxygen concentrations

 Fig.9 EEM images and high-speed laser shadowgraph of diesel spray flame at $O_2=15\%$

 Fig.10 EEM images and high-speed laser shadowgraph of diesel spray flame at $O_2=10\%$

750K の場合に見られたような予混合燃焼による明確なピークは見られない。

図 9 に雰囲気酸素濃度を 15% としたときのディーゼル噴霧火炎内で測定された EEM 画像と高速度レーザー影写真を示す。着火遅れは 1.1ms である。図 9 より、着火前の $t=1.0\text{ms}$ の段階ですでに様々な種類の PAH に相当する広い波長域で蛍光が観察されていることがわかる。これらの蛍光は着火前後から着火後の $t=2.0\text{ms}$ 以降に至るまで観察され続け、透過光写真で活発なすす生成が確認できる $t=2.8\text{ms}$, $z=75\text{mm}$ に至ると、PAH の LIF 光にすす粒子の LII 光が重畳していると考えられる明るい発光が観察されるようになる。これらの結果は、雰囲気酸素濃度 15% の場合、着火前から様々な種類の PAH が観察され、これらの PAH は拡散燃焼期に入り下流域ですす粒子に転化するまで火炎中に存在し続けることを示している。

図 10 は雰囲気酸素濃度を 10% のときのディーゼル噴霧火炎内で測定された EEM 画像と高速度レーザー影写真である。雰囲気温度は 940K、着火遅れは 2.9ms である。レーザー影写真から分かるように、この雰囲気酸素濃度 10% の条件ではすす粒子の生成は確認されない。雰囲気酸素濃度 21%(図 5) や 15%(図 9) の場合と比べると、図 10 では蛍光が全体に 400nm 以下の短波長側で観察されている。400nm 以下の領域で観察されるこれらの蛍光は、着火前に生成された分子量の小さな PAH によるものと考えられる。 $t=2.8\text{ms}$ は着火とほぼ同時、 $t=4.0\text{ms}$ は着火後に相当するが、これらの蛍光波長域は時間の経過や噴霧火炎中の上流、下流による大きな変化は見られない。これらの結果は、雰囲気酸素濃度 10% 条件下のディーゼル噴霧火炎内では、着火前に生成された分子量の小さな PAH が拡散燃焼期に入っても分子量の大きな PAH に成長せず、またすす粒子へも転化しないことを示していると考えられる。

以上の雰囲気酸素濃度を変化させたときの計測結果を前節と同様に図 11 にまとめて示す。雰囲気酸素濃度を 21%~10% の範囲で変化させると、雰囲気酸素濃度の低下に伴い PAH が多環化及びすすに転化する領域と時期は下流へ移り遅くなる。雰囲気酸素濃度 21% の場合、着火と同時に噴霧中で様々な種類の PAH が同時に観察され、これらの PAH は燃焼の進行とともに分子量の大きい PAH やすす粒子に転化してゆく。雰囲気酸素濃度 15% の場合、着火前から様々な種類の PAH が観察され、これらの PAH は拡散燃焼期に入り下流域ですす粒子に転化するまで火炎中に存在し続ける。雰囲気酸素濃度 10% の場合には、着火前に生成された分子量の小さい PAH が拡散燃焼期に入っても分子量の

Fig.11 Soot formation process in a diesel spray flame at different ambient oxygen concentrations

大きな PAH に成長せず、すす粒子へ転化しない。

以上の 4.1 及び 4.2 節の実験結果は、雰囲気温度や雰囲気酸素濃度の低下に伴い、噴霧火炎中の PAH の多環化及びすす粒子への転化が遅延あるいは停滞することを示している。ディーゼル燃焼におけるすす生成は、温度と当量比の 2 つのパラメータにより強く支配されることが知られているが^(9,10)、今回の実験においても、パラメータとしての雰囲気温度及び酸素濃度が低下するに従い、火炎内すす生成領域の温度が低下し、また着火の遅延に伴い噴霧内への空気導入量が増加することで当量比が低下し、これらの影響によりすす生成反応の進行が抑制されたと推測できる。しかしながら、本実験で計測されているのは生成物である PAH 及びすす粒子のみであり、反応を論じるのに不可欠な各条件でのすす生成領域の温度及び当量比(反応物の濃度)は計測されていない。雰囲気温度及び酸素濃度がすす生成に与える影響はそれぞれ熱的及び化学的な影響のいずれによるものか、また PAH 及びすす粒子の生成と酸化のバランスが温度及び酸素濃度によってどのような影響を受けるのかも現段階では不明である。これらについて調査するため、現在、ディーゼル火炎内すす生成領域の温度及び当量比の計測、高温高圧場でのディーゼルスす粒子の酸化速度計測のための準備を進めている。さらに、芳香族を多く含む軽油、芳香族を含まない合成燃料、特定の芳香族成分をドープした燃料を用いた場合のすす生成過程の比較も行う必要があると考えている。

5. 結 論

励起発光マトリクス(EEM)法をディーゼル噴霧火炎に初めて適用し、雰囲気温度及び雰囲気酸素濃度が火炎内すす生成過程に及ぼす影響を調査した。実験は定

容燃焼器内での予混合気の燃焼により生成される高温高圧模擬空气中で、燃料及び噴射条件一定のもとで行った。以下に得られた知見をまとめる。

1. 雰囲気酸素濃度 21%一定の条件下で、雰囲気温度を 750~1130K の範囲で変化させると、雰囲気温度の低下に伴い噴霧火炎中の PAH が多環化及びすすに転化する領域と時期はより下流へ移り遅くなる。雰囲気温度 1130K の場合には、着火と同時にすす粒子が生成する。雰囲気温度 940K の場合には、着火と同時に噴霧中で様々な種類の PAH が同時に観察され、これらの PAH は燃焼の進行とともに分子量の大きい PAH やすす粒子に転化してゆく。雰囲気温度 750K においては、着火前から分子量の小さな PAH の生成及び PAH の多環化が観察され、分子量の大きい PAH は拡散燃焼期に入り下流域ですす粒子に転化するまで火炎中に存在し続ける。
2. 雰囲気温度 940K 一定の条件下で、雰囲気酸素濃度を 21%~10% の範囲で変化させると、雰囲気酸素濃度の減少に伴い噴霧火炎中の PAH が多環化及びすすに転化する領域と時期は下流へ移り遅くなる。雰囲気酸素濃度 21% の場合、着火と同時に噴霧中で様々な種類の PAH が同時に観察され、これらの PAH は燃焼の進行とともに分子量の大きい PAH やすす粒子に転化してゆく。雰囲気酸素濃度 15% の場合、着火前から様々な種類の PAH が観察され、これらの PAH は拡散燃焼期に入り下流域ですす粒子に転化するまで火炎中に存在し続ける。雰囲気酸素濃度 10% の場合、着火前に生成された分子量の小さな PAH が拡散燃焼期に入っても分子量の大きな PAH に成長せず、すす粒子へ転化しない。

実験に協力頂いた東京工業大学学部生(当時の洲崎大輔君)に感謝する。本研究は日本自動車技術研究所(JARI)委託研究として行われたものである。ここに記して関係各位に感謝する。

文 献

- 1 Aizawa, T., Kosaka, H. and Matsui, Y., 2-D Imaging of Soot Formation Process in a Transient Spray Flame by Laser-induced Fluorescence and Incandescence Techniques, Trans. JSME, 69-680(B), 2003, pp.981-987.
- 2 Kosaka, H., Aizawa, T. and Kamimoto, T., Two-dimensional Imaging of Ignition and Soot Formation Processes in a Diesel Flame, Intl. J. Engine Research 6(1), 2005, pp.21-42.

- 3 Aizawa, T., Kosaka, H. and Matsui, Y., Laser Spectroscopy of Early Soot Formation Process in a Transient Spray Flame (Imaging and Spectral Measurements of Laser-induced Emission at Two Different Excitation Wavelengths), Trans. JSME, 71-706(B), 2005, pp.1708-1714.
- 4 Aizawa, T., and Kosaka, H., Investigation of the Early Soot Formation Process in a Transient Spray Flame via Spectral Measurements of Laser-induced Emissions, Int. J. Engine Research 7(2), 2006, pp.93-101.
- 5 Johnson, D.W., Callis, J.B., Christian, G.D., Rapid Scanning Fluorescence Spectroscopy, Anal. Chem. 49, 1977, pp.747A-757A.
- 6 Aizawa, T., Kosaka, H. and Matsui, Y., Measurements of Excitation-Emission Matrix of PAHs in a Flame Using a Multi-Wavelength Laser Source, Trans. JSME, 70-690(B), 2004, pp.496-502.
- 7 Beriman, I., Handbook of Fluorescence Spectra of Aromatic Molecules, 2nd edition, Academic Press, New York, 1971.
- 8 Aizawa, T., Imaichi, K., Kosaka, H., Matsui, Y., Measurement of Excitation-Emission Matrix of Shock-heated PAHs using a Multi-wavelength Laser Source, Proc. of 2003 SAE/JSME Fuels and Lubricants Meeting (2003-5), Paper No. SAE 2003-01-1785 / JSME 20030147.
- 9 Kamimoto, T., Bae, M., High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines, SAE Paper No.880423, 1988.
- 10 Sasaki, S., Ito, T., Iguchi, S., Inagaki, K., Akihami, K., Takatori, Y., Yoshizaki, K., Goto, M., Smokeless Low-Temperature Diesel Combustion Concept (First, Second and Third Report), Trans. JSAE, 34(1), 2003, pp.65-82.