電界印加火炎における PM 抑制*

田村 祐太^{*1}, 川田 智也^{*2}, 斉藤 正浩^{*3}, 古畑 朋彦^{*3}, 新井 雅隆^{*4}

Reduction of PM Emission from High-Voltage Applied Diffusion Flame

Yuta TAMURA^{*1}, Tomoya KAWATA, Masahiro SAITO, Tomohiko FURUHATA and Masataka ARAI^{*1}Department of Mechanical System Engineering, Gunma University
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Effect of non-uniformed electric field on PM emission from an acetylene diffusion flame was investigated experimentally. When a high voltage was applied to the flame, ionic wind blew from nozzle electrode toward ground electrode. The ionic wind increased with increasing the applied voltage. The velocity of ionic wind around the flame was measured by means of LDA (Laser Doppler Anemometer). Particle size distributions of PM emitted from two different types of flame were measured with SMPS (Scanning Mobility Particle Analyzer). As the applied voltage was increased, the flame length became short and fluctuation of the flame tip increased. In the case of "Open flame", the PM emission more than 90% was suppressed by applying the electric field intensity of 150 kV/m. Especially, the emission of relatively large particles (30~500nm) decreased by the promotion of the mixing of fuel and surrounding air, while the emission of PM smaller than 20nm increased with increasing the applied voltage.

Key Words : Flame, Diffusion Combustion, Combustion Products, PM, Electric Field, Ionic Wind, Particle Size Distribution

1. 緒 言

炭素質の粒子状物質 (Particulate Matter, 以下 PM と略記) は, 炭化水素系の燃料の燃焼過程から排出される. PM の中でも粒径が 100nm 以下の粒子はナノ PM と呼ばれ, 呼吸等で体内に取り込まれ呼吸器系や循環器系の臓器の疾患を引き起こすことが指摘されている. 燃焼に起因する PM を抑制するためには, 十分な酸素を供給すること, 燃料と空気の混合を均一の状態にして燃焼させることが必要となる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. 従来, PM を抑制するための様々な方法が検討されてきたが, 燃焼反応している火炎内ではイオンや自由電子が多く生成される⁽⁵⁾ことから, 電界やプラズマを用いた PM 抑制に関する研究も近年盛んに行われるようになった⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾.

Katzer ら⁽¹¹⁾は, メタンの層流予混合火炎の外側に種々の電極を配置して, 火炎中で生成するチタニア粒子の成長過程に及ぼす直流電界の影響を調べた. その結果, 一次粒径の変化は電界印加によって引き起こされる火炎温度分布の変化で良く相関された. 火炎直上で測定した場合, 針対針電極では火炎温度の低下により凝集粒径が 3 倍まで増加した. 平板対平板電極ではアグロメレート⁽¹²⁾の成長は遅く, 一次粒子の数は電界無印加の場合と比較してその変化はわずかであったと報告している. Maricq ら⁽¹²⁾は, フラットフレームバーナー上に形成するエチレン予混合火炎から排出される PM の粒径分布を DMA (Differential Mobility Analyzer) を用いて計測し, 当量比が粒径分布に及ぼす影響を調べた. 当量比を 2.44 から 1.84 に小さくした場合, 粒子個数濃度分布のピーク径は 30nm から 5nm と小粒径側にシフトし, かつ粒子個数濃度のピーク値も 3×10^{10} 個/cm³ から 1×10^{10} 個/cm³ に減少すると報告している. 筆者ら⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾は, アセチレン層流拡散火炎から排出する PM 抑制に関して, 印加電圧の極性, 電界強度, 電界の印加方式などの影響について調べてきた. その結果, 平等電界 (平板対平板電極) 内に火炎を設

* 原稿受付 2011 年 7 月 19 日

^{*1} 群馬大学大学院工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)^{*2} 群馬大学大学院工学研究科 (現 スズキ自動車(株))^{*3} 正員, 群馬大学大学院工学研究科^{*4} 正員, フェロー, 群馬大学大学院工学研究科

E-mail: arai@gunma-u.ac.jp

置した場合は、火炎中に存在する多量の正イオンが電界の作用により負極側に移動するときに火炎分子と衝突して、火炎が負極側に曲げられるように変形し、かつ火炎先端が広がって PM が酸化された。不平等電界（針対平板電極）内に火炎を設置した場合では、針電極から発生するイオン風によって燃料ガスへの空気導入が促進され PM の酸化が行われることがわかった。電界を印加したときの火炎先端部の火炎表面温度は電界無印加時に比較して $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 高くなった。また、PM 抑制率は電界強度で相関され、電界強度が平等電界の場合は 300kV/m 、不平等電界の場合は 200kV/m で PM 抑制率が 90% になることがわかった。

本研究では、新たな電界の印加方法として、電極を兼ねたノズルに高電圧を印加することで、ノズルから噴出する火炎自体に電界を与えて燃料と周囲空気の混合効果の促進を試みた。その結果、電界が集中する火炎先端部におけるイオン風が速くなり、電界強度が 150kV/m で PM 抑制率 90% となった。電界印加による PM 抑制に対してはイオン風が大きく関与するので、発生するイオン風が火炎周辺の流れ場や電界印加火炎から排出する PM の粒径分布に与える影響に着目した。さらに、 $\text{Air}/\text{C}_2\text{H}_2$ 系の同軸噴流火炎を用いた場合の PM 抑制特性と比較しながら考察を行った。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図 1 に示す。燃料は PM の排出量が比較的多いアセチレン (C_2H_2) を使用し、拡散火炎を形成した。アセチレン流量は、精密ニードルバルブと流量計で調整した。アセチレン流量と PM 排出量の関係を図 2 に示す。PM 排出量は吸引ポンプ直前にガラス繊維フィルターを設置して PM を捕集した後、精度 0.01mg の電子天秤 (A&D, GR-300) を用いて質量を計測した。燃料流量が少ないときは、火炎先端から排出される PM は極微量であり目視では確認できない。燃料流量を増加していくと、 $Q_f=18\text{mL/min}$ 付近で火炎先端から PM の排出が目視できるようになり、PM 排出量は急激に増加するようになる。本研究では、PM の排出が目視観察できない火炎先端が閉じた火炎を Closed flame, PM 排出量が多く目視が可能な火炎先端が開いた火炎を Open flame と称することにする。以後、アセチレン流量 $Q_f=12\text{mL/min}$ の場合を Closed flame, $Q_f=30\text{mL/min}$ を Open flame の代表流量とした。 $Q_f=12\text{mL/min}$ および 30mL/min の場合のアセチレン噴出速度は、ノズル断面基準の平均速度でそれぞれ $V_f=0.1\text{m/s}$ および $V_f=0.25\text{m/s}$ であった。

外乱による火炎への影響を防止するために、火炎周囲に脱着可能な石英ガラス製のカバーを取り付けた。装置出口に設置した吸引ポンプにより、カバーとノズル固定台の間の約 2mm の給気口から一定流量 (10L/min) の燃焼用空気がカバー内に供給される。本実験では、周囲空気を含む排ガスの全量サンプリングを行っているので、サンプリング流量はカバー内に供給される空気量と等しくなるように設定した。サンプリングバックに捕集された PM を含む排ガスを SMPS (TSI, Model 3034) に導入し、PM の粒径分布を計測した。

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Relation between PM emission and fuel flow rate

Fig. 3 Configuration of two kinds of nozzles

Fig. 4 LDA measurement of flow pattern around the nozzle

本実験で用いた二種類のノズルの形状を図3に示す. 図3(a)は電界印加火炎の実験に用いたノズル(外径2.2mm, 内径1.6mm, ステンレス製)で電極を兼ねている. これに直流高電圧供給装置(SPELLMAN, SL-150)により $E=0 \sim 15\text{kV}$ を印加した. 対極はリング型(外径76mm, 内径52mm, 真鍮製)の接地電極を使用し, 両電極間に不平等電界が形成される. 電極間直線距離を S , 電極間垂直距離を h とし, 電界強度は $F=E/S$ と定義した. 一方, 図3(b)は同軸噴流火炎の実験で用いた二重管ノズルであり, 内管には(a)と同寸法のノズルを使用し, 内管と外管(外径

5.0mm, 内径 4.2mm, ステンレス製)との間の環状部分から空気を流入した. 空気流量はニードルバルブで調整し, ノズル(内管)からの燃料噴出速度と環状部分からの空気噴出速度の比をパラメータとした.

ノズル周辺の流速分布計測系を図 4 に示す. 後方散乱型のレーザドップラー流速計 (DANTEC DYNAMICS, FlowLite 1D, BSA F60, 以下 LDA と略記) を使用した. シード粒子には線香の煙を使用し, 火炎に乱れを与えないように, カバーとノズル固定台の間の約 2mm の給気口から静かに自然流入させながら火炎周辺の流れ計測を行った. ノズル先端を原点とし, z 軸方向に対して -10mm ~ +50mm, r 軸方向 -30mm ~ +30mm の範囲内を 5mm 間隔で計測した. 各測定点における z 軸および r 軸方向の速度成分を合成することで測定点における速度ベクトルを算出した.

3. 実験結果および考察

3・1 電圧-電流特性

本装置における電圧-電流特性を図 5 に示す. 図 5(a)は火炎なしの場合($Q_f = 0$ L/min), 図 5(b)は Closed flame ($Q_f = 12$ mL/min)の場合, 図 5(c)は Open flame ($Q_f = 30$ mL/min)の場合である.

火炎なしの場合(a)は, 電極間垂直距離 $h = 0$ mm ($S = 30$ mm)の場合は印加電圧を $E = 10$ kV 以上, $h = 25$ mm ($S = 40$ mm)の場合は印加電圧を $E = 13$ kV 以上に上昇させると電流値が急激に上昇し始め, ノズル先端部においてコロナ放電が発生しているのが確認された. 一方, $h = 50$ mm ($S = 60$ mm)および $h = 100$ mm ($S = 105$ mm)の場合では, 電流値の急激な上昇は見られず, ノズル先端部でのコロナ放電も生じなかった.

Fig. 5 Voltage-current characteristics

Closed flame の場合(b)では, (a)に比べて低い印加電圧で電流の上昇が見られるようになった. これは電極間に火炎が存在する場合は, 火炎は導電体であるため火炎先端と接地電極の距離は電極間距離より短くなり, 火炎先端部での電界強度は火炎なしの場合より高くなる. そのため火炎と接地電極間に存在する気体に絶縁破壊が生じやすくなり放出される電子も増加し電流が上昇したものと考えられる. また, 火炎が形成しているためコロナ放電は目視できないが, コロナ放電は生じていると考えられる.

次に, Open flame の場合(c)では, 印加電圧が低い状態では電流は緩やかに上昇するが, 印加電圧が高くなると電流値は急激に上昇した. Open flame の場合, 電界無印加では火炎先端から多量の PM が排出されるので不完全燃焼の状態であり, これに数 kV の電圧を印加すると火炎先端部が広がり始めて PM 排出量は減少する. 印加電圧が $E = 10$ kV 以上になると火炎先端部に尖った部分が現れるようになり, PM の排出は目視では観察できない. 火炎長さは印加電圧の上昇とともに短くなるが, Closed flame(b)に比べると相対的に長いので, 火炎と接地電極の距離も短くなる. 電極間距離 $h = 25$ mm 以下の場合では電流値は火炎長さに影響し, 印加電圧の上昇とともに電流値が増加した. これに対して, 電極間距離が $h = 50$ mm, 100 mm の場合では, 電界強度が比較的低いため電流値は火炎長さに依らずほぼ同程度であった.

3・2 火炎形状の変化

電界印加および同軸噴流における火炎形状の変化を図 6 に示す。図 6(a-1)は Closed flame に電界を印加, (a-2)は Open flame に電界を印加した場合, 図 6(b-1)は Closed flame に同軸空気噴流, (b-2)は Open flame に同軸空気噴流を与えた場合である。

Closed flame に電界を印加した場合(a-1), 印加電圧の上昇とともに火炎が短くなった。これは, 電界印加によって発生するイオン風に周囲の空気が巻き込まれて燃焼が促進したためと考えられる。また, 印加電圧が高くなると電界が集中する火炎先端部におけるイオン風が不安定になり, 火炎先端が揺れるようになった。電界無印加時 ($E=0\text{kV}$)では, 火炎表面付近に安定な火炎面が形成される(この状態を Closed flame と称している)。ここでの火炎面とは, 拡散火炎における燃料ガスと酸素との反応帯を意味しており, 目視観察できる火炎の表面(輪郭部分)付近に反応帯が形成されるものと想定して火炎面と称しているが, 厳密な意味での火炎面ではない。 $E=0\text{kV}$ の状態から電界を印加していくと電界が最も集中する火炎先端部において, 火炎内のイオンが火炎面を通過しながら対極に向かって移動するので, 火炎面が引き伸ばされて乱れを生じるため目視では不明瞭となる。

Open flame に電界を印加した場合(a-2)でも, Closed flame と同様に印加電圧の上昇とともに火炎が短くなり, 火炎先端が揺らぐようになった。特に, 火炎先端に注目すると Closed flame の場合と異なり, 火炎先端に尖った部分が現われリング電極に向かって広がるような火炎形状が現われた。これも Closed flame の場合と同様に, 帯電粒子が電界により対極へと引き寄せられるためと考えられる。

次に, Closed flame に同軸空気噴流を与えた場合(b-1)は, 空気の噴出速度を増加すると燃焼促進効果により火炎が短くなった。空気の噴出速度を増加すると火炎先端が不安定となり多少揺らぐようになったが, 火炎先端部に火炎面は形成されている。Open flame に同軸空気噴流を与えた場合(b-2)は, 空気の噴出速度を増加させると燃焼が促進するため火炎が短くなった。 $V_a/V_f=8.0$ での火炎長さは, (a-2)の $E=15\text{kV}$ のときの火炎長さとほぼ同程度であるが, そのときの火炎先端部は不安定となり揺らぐようになるが, 電界印加火炎に見られるような火炎先端が広がる現象は起こらなかった。

Fig. 6 Variations of flame shape for high-voltage applied flame and coaxial diffusion flame

3・3 ノズル周辺の流れ場の測定

電界印加によって発生するイオン風に伴う火炎周囲の流れ場の変化を調べるために, LDA を用いて電極間および火炎周囲の流れ場を計測した. 電極間垂直距離 $h=25\text{mm}$ の条件において, イオン風によるノズル周辺の流れ場を各測定点における速度ベクトルで表示したものを図7に示す. 図7(a)は燃料を噴出ししない場合 ($Q_f=0\text{ mL/min}$), 図7(b)は空気のみを噴出した場合 ($Q_a=30\text{ mL/min}$), 図7(c)は Closed flame ($Q_f=12\text{ mL/min}$) の場合, 図7(d)は Open flame ($Q_f=30\text{ mL/min}$) の場合である.

Fig. 7 Flow patterns around the nozzle electrode ($h=25\text{mm}$)

燃料を噴出せずに両電極間に電界を印加した場合(a)は、 $E=10\text{kV}$ 以下では流れは生じなかったが、 $E=15\text{kV}$ ではノズル電極先端からリング電極(接地電極)の中央部に向かう平均速度 $V=1.5\text{m/s}$ のイオン風が発生し、この流れに巻き込まれるように周囲から電界が集中するノズル先端に向かって $V=0.3\text{m/s}$ の同伴流が現れた。この同伴流も、コロナ放電により発生するイオン風に起因していると考えられる。

次に、空気のみを噴出した場合(b)は、ノズルからの空気噴出速度はノズル断面基準で $V_a=0.25\text{m/s}$ であるが、ノズル噴出直後に減速してしまうために LDA による計測は不可能であった。空気のみを噴出した状態で電圧を印加すると、 $E=10\text{kV}$ までは流れは生じないが、 $E=15\text{kV}$ になるとノズル先端からリング中央部に向かう $V=1\text{m/s}$ の流れとともに $V=0.2\text{m/s}$ 程度の同伴流が現れた。このことから、この流れは空気噴流によるものではなく、電界印加によるイオン風に起因する。しかし、(a)と比べてイオン風および同伴流は遅くなっており、これはノズル先端付近で発生したイオンの移動がノズルから噴出している空気流によって妨げられるために流速が低下したものと考えられる。

Closed flame の場合(c)では、 $E=5\text{kV}$ のとき火炎上部において $V=0.6\text{m/s}$ 程度のわずかな流れと同伴流 $V=0.2\text{m/s}$ が発生した。このことから、電極間に火炎が存在すると絶縁破壊が起こりやすくなり、(a)と比べて低い印加電圧でイオン風が発生するようになると考えられる。 $E=10\text{kV}$ 、 15kV と高くなるにつれてイオン風も速くなり、それぞれ $V=1.0\text{m/s}$ 、 1.2m/s 、同伴流もそれぞれ $V=0.5\text{m/s}$ 、 0.7m/s と増加した。

さらに、Open flame の場合(d)は、 $E=0\text{kV}$ でも火炎上部に燃焼ガスによる流れが生じるが、火炎周囲の流速は 0.1m/s 以下であり、熱対流による周囲空気の巻き込みは弱い。 $E=5\text{kV}$ で $V=0.6\text{m/s}$ 程度のイオン風と $V=0.3\text{m/s}$ 程度の同伴流が発生し、さらに印加電圧を上昇すると $E=10\text{kV}$ でイオン風 1.2m/s 、同伴流 0.6m/s 、 $E=15\text{kV}$ でイオン風 1.8m/s 、同伴流 0.8m/s に増加した。以上述べたように、イオン風は火炎の有無によって大きく変化するが、火炎による熱対流などの影響に比べて強い流れを引き起こしていることがわかった。

3・4 PM 排出量

Open flame ($Q_f=30\text{mL/min}$)において、電界印加火炎と同軸噴流火炎の場合の PM 排出量を比較したものを図 8 に示す。図 8(a)は PM 排出量と印加電圧の関係である。縦軸は電界印加時の PM 排出量 M_g を電界無印加時の PM 排出量 M_{g0} で無次元化した値で表示した。印加電圧 E が高く、電極間垂直距離 h が短いほど PM 排出量は減少した。これは電極間垂直距離が短いと絶縁破壊が生じやすく、低い印加電圧でもイオン風が発生して燃焼が促進したためと考えられる。(a)の結果を電界強度($F=E/S$ [kV/m])で整理したものが図 8(b)であり、電界強度と PM 排出量の関係は一本の曲線で相関されることがわかる。一方、図 8(c)の同軸噴流火炎の場合は、 $\text{Air}/\text{C}_2\text{H}_2$ の噴出速度比の増加に伴って火炎への空気の拡散が促進し PM 排出量は減少した。

Fig. 8 Comparison of PM emissions for high-voltage applied flame and coaxial diffusion flame ($Q_f=30\text{mL/min}$)

これに対して、Closed flame ($Q_f=12\text{mL/min}$)の場合は、PM 排出量は非常に微量であるため、その定量的な計測は行わなかったが、数回の長時間サンプリング(1.5 時間)を行った結果、リング電極の表面に極微量の PM が付着するのが目視観察された。これは火炎内で生成した PM の一次粒子が電界により帯電し、それが凝集せずにそのまま火炎外へ放出してリング電極に引き寄せられ付着したものと考えられる。このことと、Closed flame の場合は印加電圧を高めたときに火炎先端がわずかに尖って火炎面が乱れる現象(図 6(a-1), $E=15\text{kV}$ を参照)を考え合わせると、Closed flame では印加電圧の上昇によりわずかに PM 排出量が増加することが推測される。

イオン風による PM 低減効果を評価するために、PM 低減率 50%におけるイオン風流速と同軸空気噴流の速度の比較を行った。図 8(a)より、電界印加により PM 低減率を 50%にするためには、電極間直線距離 $h=25\text{mm}$ のとき $E=3\text{kV}$ の印加電圧が必要となる。イオン風流速は $E=5\text{kV}$ で平均 0.6m/s であることを考慮すると、 $E=3\text{kV}$ では約 0.3m/s 程度であると推測される。一方、同軸空気噴流により PM 低減率を 50%にするための速度比は $V_a/V_f \approx 2$ となり、このときの空気の噴出速度は $V_a=0.5\text{m/s}$ に相当するので、イオン風による PM 低減の場合の流速に比べて約 1.7 倍流速が速くなっている。このことから、電界印加により発生するイオン風が空気導入による燃焼促進効果を高め PM 抑制に対して有効であると考えられる。

3・5 PM 粒径分布

電界印加火炎および同軸噴流火炎から排出される PM 粒径分布を図 9 に示す。図 9(a-1)は Closed flame に電界印加、図 9(a-2)は Open flame に電界印加した場合、図 9(b-1)は Closed flame に同軸噴流を、図 9(b-2)は Open flame に同軸噴流を与えた場合である。図の縦軸は単位体積あたりの粒子個数濃度、横軸は電気移動度径である。

Closed flame の場合(a-1)は、電界無印加($E=0\text{ kV}$)では火炎が小さく火炎先端まで火炎面が存在するので完全燃焼に近い拡散火炎を形成し、 20nm 以下の粒子個数濃度が高い分布となった。この Closed flame に $E=5, 10, 15\text{kV}$ と印加電圧を上昇していくと、 50nm 以下の粒子個数濃度が減少し、逆に比較的大きな $50\sim 500\text{nm}$ の粒子個数濃度が増加していくことがわかる。これは、電界印加によって火炎先端部の火炎面が乱れて表面温度が低下し、そこで PM が凝集し酸化が抑制されたためと考えられる。

Open flame の場合(a-2)は、 $E=0\text{ kV}$ では不完全燃焼のため凝集した PM が火炎先端から多量に排出されて、 $30\sim 500\text{nm}$ の粒径範囲にわたって粒子個数濃度は高くなった。印加電圧の上昇につれてイオン風も速くなり、燃料と空気の混合が促進されて $30\sim 500\text{nm}$ の粒子個数濃度は大幅に減少した。また、 $E=10\text{kV}$ 以上の場合、 30nm 以下の粒子個数濃度が増加していく傾向を示すが、これはイオン風が速くなることで火炎基部が予混合燃焼に近い状態になるのではないかと推測される。

以上で述べたように、印加電圧の上昇につれて粒子個数濃度分布のピークが小粒径側にシフトしていく傾向は、Maricq ら⁽¹²⁾が報告しているように、予混合燃焼において当量比を小さくする、すなわち燃料と空気の混合が促進されるほど粒子個数濃度分布のピーク径が小粒径側にシフトしていく結果と類似している。このことから、拡散火炎においても燃料と空気の混合促進によってピーク径が小粒径側にシフトするものと考えられる。

次に、Closed flame に同軸空気噴流を与えた場合(b-1)、空気の噴出速度を増加しても火炎先端の火炎面は乱れずに形成されており、電界印加火炎の場合と同様に 30nm 以下にピークを有する粒度分布となった。また、 $30\sim 500\text{nm}$ の粒子個数濃度がわずかに減少したのは、 V_a/V_f の増加とともに火炎が短くなり燃料と空気の混合による PM の酸化が促進されたためである。

Open flame に同軸空気噴流を与えた場合(b-2)においても電界印加火炎の場合と同様に、空気の噴出速度が増加するにつれて、 $30\sim 500\text{nm}$ の粒子個数濃度が高い分布から 30nm 以下の粒子個数濃度が高い分布へとシフトしていくことがわかる。つまり、多量の PM を排出する Open flame の場合には、電界によるイオン風あるいは同軸空気噴流によって燃料と空気の混合促進効果が高められるので、火炎から排出される PM 抑制に対しては同様な傾向を示したと考えられる。

4. 結 論

電極を兼ねたノズルから噴出するアセチレン拡散火炎に電界を印加し、PM の排出量や粒径分布に及ぼす印加電圧の影響を調べ、同軸噴流火炎の場合と比較した結果、以下のような結論が得られた。

Fig. 9 PM size distribution for high-voltage applied flame and coaxial diffusion flame

1. ノズルから噴出する火炎に電界を印加することにより、ノズル電極から対極のリング電極の中央部へ向かうイオン風が発生する。また、印加電圧の上昇につれてイオン風の流速が速くなり火炎は短くなった。
2. イオン風の強さは火炎の有無によって大きく変化するが、火炎自体の大きさの影響は小さい。
3. PM 排出量の多い Open flame に電界を印加した場合は、印加電圧の上昇とともに PM 排出量が顕著に減少し、電界強度 $F=150\text{kV/m}$ 以上で PM 抑制率が 90%を越えた。これはイオン風による燃料と周囲空気の混合促進効果が大きくなるためである。
4. Open flame の場合は、電界印加および同軸噴流のいずれにおいても、イオン風や空気噴流の増加に伴って燃料と空気の混合が促進され、比較的大粒径の $30\sim 500\text{nm}$ の粒子個数濃度が大幅に減少し、逆に 30nm 以下の粒子個数濃度が増加していく傾向を示した。一方、Closed flame の場合は、電界印加火炎では印加電圧を

上昇していくと火炎先端部における火炎面が乱れるため局所的に火炎表面温度が低下し、PM の酸化が十分に行われず 30~500nm の粒子個数濃度がわずかに増加したと考えられる。同軸噴流火炎では空気噴流を増加しても火炎先端の火炎面は安定して形成された。また、空気噴流の増加により火炎表面温度が上昇し PM の酸化が促進され、30~500nm の粒子個数濃度がわずかに減少したと推測される。

5. 電界印加の上昇あるいは同軸噴流火炎における空気噴出速度の上昇に伴って 30nm 以下の粒子個数濃度が高くなる理由については、現段階では不明であり今後の課題である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、群馬大学工学部卒業研究生 津久井正樹氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Stanmore, B.R., Brilhac, J.F. and Gilot, P., "The oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models", *Carbon*, Vol. 39 (2001), pp. 2247-2268.
- (2) Sako, T., Furuhashi, T. and ARAI, M., "Nano-size PM Emission from Laminar Diffusion Flame of Diesel Fuel", *Society of Automotive Engineers International*, No.2007-01-1942 (2007), pp. 1516-1527.
- (3) Shahad, H.A.K. and Mohammed, Y.K.A., "Investigation of soot formation and temperature field in laminar diffusion flames of LPG-air mixture", *Energy Conversion and Management*, Vol. 41 (2000), pp. 1897-1916.
- (4) Harris S.J. and Weiner, A.M., "Surface Growth of Soot Particles in Premixed Ethylene/Air Flames", *Combustion Science and Technology*, Vol. 31 (1983), pp. 155-167.
- (5) 金原寿郎, "気体の燃焼物理", (1985), pp. 217-251, 裳華房.
- (6) Boom, J.D.B.J.V.D., Konnov, A.A., Verhasselt, A.M.H.H., Kornilov, V. N., Goey, L.P.H.D. and Nijmeijer, H., "The effect of a DC electric field on the laminar burning velocity of premixed methane/air flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32 (2009), pp. 1237-1244.
- (7) Kim, M. K., Ryu, S. K., Won, S.H. and Chung, S.H., "Electric field effect on liftoff and blowoff of nonpremixed laminar jet flame in a coflow", *Combustion and Flame*, Vol. 157 (2010), pp. 17-24.
- (8) Sakhrie, A., Lins, G., Dinkelacker, F., Hammer, T., Leipertz, A. and Branston, D.W., "The influence of pressure on the control of premixed turbulent flames using an electric field", *Combustion and Flame*, Vol. 143 (2005), pp. 313-322.
- (9) Wong, Y., Nathan, G.J., Alwahabi, Z.T., King, K.D., Ho, K. and Yao, Q., "Effect of a uniform electric field on soot in laminar premixed ethylene/air flame", *Combustion and Flame*, Vol. 157 (2010), pp. 1308-1315.
- (10) Belhi, M., Domingo, P. and Vervisch, P., "Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flame stability", *Combustion and Flame*, Vol. 157 (2010), pp. 2286-2297.
- (11) Katzer, M., Weber, A.P. and Kasper, G., "The effect of electrical field on growth of titania particles formed in a CH₄-O₂ diffusion flame", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 32 (2001), pp. 1045-1067.
- (12) Maricq, M.M., Harris, S. J. and Sente, J. J., "Soot size distributions in rich premixed ethylene flames", *Combustion and Flame*, Vol. 132 (2003), pp. 328-342.
- (13) 新居利洋, 斉藤正浩, 新井雅隆, "静電場によるアセチレン拡散火炎のすす排出の抑制", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 64, No. 627 (1998), pp. 3881-3887.
- (14) Saito, M., Arai, T. and Arai, M., "Control of Soot Emission from Diffusion Flames by Applying an Electric Field", *Combustion and Flame*, Vol. 119 (1999), pp. 356-366.
- (15) 新居利洋, 斉藤正浩, 新井雅隆, "イオン風を伴う電界中における拡散火炎の挙動", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 66, No. 641 (2000), pp. 256-262.