微小重力下における直流電界中での単一液滴燃焼時のすす挙動*

今村 宰^{*1}, 久保 康之^{*2}, 大坂 淳^{*2}
佐藤 順一^{*3}, 津江 光洋^{*4}, 河野 通方^{*5}

Sooting of Single Droplets Combustion in DC Electric Fields under Microgravity

Osamu IMAMURA^{*6}, Yasuyuki KUBO, Jun OSAKA,
Jun'ichi SATO, Mitsuhiro TSUE and Michikata KONO^{*6} Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

Sooting of single droplets combustion in direct current (DC) electric fields was investigated experimentally using microgravity conditions. The ambient gas was air at atmospheric pressure and room temperature, and toluene was used as a fuel. The distance between electrodes is 50 mm and applied electric voltages ranged between 0 and 6 kV. Soot concentration and flame luminosity, which corresponds to soot radiation, were measured. Soot concentration was estimated using full-field extinction technique. As the applied voltage increased, the amount of soot decreased and the luminosity increased. Considering the distribution of soot concentration and luminosity, we guess changes in soot concentration and luminosity were caused by the movement of soot and its precursor and ionic wind. When applied voltage is less than 2 kV the decrease in the amount of soot was outstanding, which can affect the burning rate constant.

Key Words: Liquid Fuel, Flame, Diffusion Combustion, Microgravity, DC Electric Field, Droplet, Soot

1. 緒 言

電界が燃焼に及ぼす影響は様々なものが知られているが、その中でも特にすすに及ぼされる影響はよく知られている^{(1)~(10)}。Weinberg ら⁽¹⁾⁽²⁾は、主に対向流拡散火炎を用いて電界がすす生成に及ぼす影響について調べ、すす粒子の大部分が正に帯電していることや、電界がすす生成過程に影響を与えることを示している。Kono ら⁽³⁾も同じく対向流拡散火炎に直流および交流電界を印加することによって、火炎輝度や排出されるすす量が複雑に変化していることを報告している。特に直流電界を印加した場合には顕著な輝度および放出されるすす量の減少を報告している。また、噴流拡散火炎を用いた研究も多く行われている^{(6)~(8)}。新居ら⁽⁸⁾は噴流拡散火炎に軸方向に直流電界を印加して、火炎温度の上昇およびすす量の減少を報告している。彼らは直流電界印加時のすす量の減少について、イオ

ン風による混合促進を一つのメカニズムとして推定している。さらに最近では微小重力環境を用いた実験も行われており、電界印加による球状拡散火炎の輝度の低減が報告されている⁽¹⁰⁾。

一方、すすは液滴燃焼においては燃焼速度定数などの燃焼特性に影響を与えると考えられており^{(12)~(14)}、液滴燃焼時に生成されるすすに関する研究は機関の高効率化などの観点から非常に重要であると思われる。著者らは過去に微小重力環境を用いて直流電界中で液滴燃料を燃焼させ、燃焼速度定数が増加することやその増分はすすの生成特性によって異なることを報告した⁽¹¹⁾。しかしながら、電界が液滴燃料の燃焼時のすすに及ぼす影響については有用な情報が得られていないため、電界が燃焼速度定数に及ぼす影響について十分な議論がなされなかった。

以上のような背景から、本研究は微小重力環境を用いて、直流電界が燃料液滴の燃焼時に生成するすすに及ぼす影響について調べたものである。微小重力環境を用いることによって自然対流の影響を取り除くことができ、電界の影響を明確にすることが可能である。生成されたすす量および火炎輝度の計測を行い、実験結果から電界が燃焼速度定数に及ぼす影響について考

* 原稿受付 2003年5月28日。

^{*1} 学生員、東京大学大学院新領域創成科学研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。^{*2} 東京大学大学院工学系研究科。^{*3} 正員、フェロー、石川島播磨重工業(株)(〒235-8501 横浜磯子区新中村1)。^{*4} 正員、東京大学大学院工学系研究科。^{*5} 正員、東京大学大学院新領域創成科学研究科。

E-mail: kk37202@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

Fig. 1 Experimental apparatus

察を行った。すす量の測定には透過光減衰法を用いた。液滴燃焼において電界がすす生成に及ぼす影響は、電界が燃焼速度定数に及ぼす影響を考察する上で必要なばかりではなく、液滴燃焼に及ぼすすの影響を考察する上でも重要と思われる。また本研究のような電界が液滴燃料の燃焼時に生成されるすすに及ぼす影響に関しては研究報告例がなく、理化学的な観点からも興味深い。

2. 実験装置および方法

2.1 実験施設および実験装置 微小重力環境はすべて東京大学工学部落下塔にて得られた。本落下塔の実験部は10mであり、約0.9sの微小重力環境を実現することができる。良質な微小重力環境を得るため、落下筐体(実験装置)を空気抵抗遮断用の外箱と同時に落下させることによって空気抵抗を極力排しており、得られる微小重力レベルは $10^{-4}g$ 以下である。また制御部にはスポンジが敷き詰められている。

落下筐体中央部には、燃焼容器が備え付けられており、その中心部には、燃料液滴を保持するための石英線がある。石英線は直径0.125mm、長さ40mmのファイバー状であり、先端は液滴を確実に保持するために直径0.32mm程度の球形に加工してある。石英線近傍

には、液滴を生成する燃料供給針、鉄クロム線を用いた熱面点火装置があり、石英線をはさむように平行に電極が配してある(図1)。電極間の間隔 L は、50mmであり、空気の流れを妨げないため、また撮影を容易にするために電極として金網を用いている。なお落下筐体には、3台のCCDカメラが搭載されている。1台は液滴後方からバックライトを照射することにより液滴像を確認する白黒CCDカメラ、もう一台は透過光減衰法によってすす濃度を観察する高速度カメラ、最後の1台はミラーを介して火炎(本稿では輝炎と同義である)を観察する3CCDカメラである。透過光減衰法を行うため落下筐体には、Nd:YAGレーザー(波長532nm)を搭載している。

2.2 実験方法および解析手法 まず通常重力下において、懸垂線先端に液滴を生成する。この状態で電極間に電圧を印加したのち、実験装置を自由落下させる。実験装置が微小重力状態に移行すると、制御系により液滴の点火が行われる。液滴の燃焼現象を上述の3台のCCDカメラを用いて観察、録画し、得られた画像データから実験結果を得た。

液滴像を観察するカメラからは、液滴径 d を得た。液滴径 d は、石英線に支持された液滴を回転楕円体とみなし、長径 a および短径 b から換算した($d \equiv (ab^2)^{1/3}$)。

高速度カメラからは火炎内のすす濃度に関する情報を得た。火炎後方からレーザー光(波長532nm)を照射し、干渉フィルターを介して撮影した。すす質量濃度 C [g/m^3]と吸光度 A には以下の関係式がある。

$$A = -\log \frac{I_{ext}}{I_{in}} = C \times l \times Q$$

ここで I_{in} 、 I_{ext} はそれぞれ試料部通過前後のレーザー強度、 l は試料部の長さ、 Q はすすの質量吸収係数である。 Q が一定であるとする A は光路方向に積算されたすす量を表わすことになるので、以下では吸光度 A を用いてすす量を評価する。

最後に3CCDカメラからは火炎の輝度情報を得た。しかしながらR(赤)およびG(緑)成分については火炎輝度が非常に強く計測不能となる場所も存在した。このため、火炎輝度の議論については、3CCDカメラからB(青)のみの信号を取り出して議論することとする。なお本実験において火炎を撮影した場合、各点の輝度R,G,Bは互いに比例関係にあり、その関係は電界の印加によって大きく変化しなかった。すなわち火炎色の大きな変化は認められなかった。

2.3 実験条件 本実験で用いた燃料はトルエンであり、雰囲気気体は大気圧室温の空気である。燃焼開始時の液滴径 d_0 は、 0.75 ± 0.07 mmの範囲内にあ

Fig. 2 Direct flame photographs (left) and absorbance distributions (right)

Fig. 3 Flame luminosity and absorbance plotted as a function of y ($V=2\text{kV}$, $x=-1\text{mm}$)

り、この範囲内においては微小重力環境下で全燃焼過程を観察することが可能である。印加電圧 V は $0\sim 6\text{ kV}$ の間で変化させた。電極間隔 L は 50mm であるから仮に一樣な電界が生じているとすれば、電界強度 $E(\equiv V/L)$ は 0 から 120kV/m の範囲内となる。

3. 実験結果および考察

3.1 すず分布 図2中の各行左側は火炎の直接写真、各行右側は吸光度すなわちすす濃度の分布を示している。全ての図において、右側に陽極が左側に陰

Fig. 4 An example of tomographic inversion

極がある。また各行右側の図において、すす分布の中心付近に黒く写っているものは液滴である。これらの図から過去の報告⁽¹¹⁾と同様に、電界の印加により輝炎が主に陰極方向に大きく引き伸ばされていることが確認される。また図からすす殻が変形し、すすが陰極方向に放出されているのがわかる。

ここで後の議論のために、図2中に示されるように座標軸を定義する。座標軸の原点は液滴中心であり、 x 軸は電界印加方向で陰極から陽極に向かう向きを正としている。図3は、印加電圧 $V=2\text{kV}$, $x=-1\text{mm}$ における吸光度の分布を火炎輝度とともに示したものである。この図に示されるように吸光度の分布は火炎輝度の分布内にほぼ収まっている。また図3から、輝度が大きな領域では吸光度がほぼ0であることから、実際に明るく輝いているすすは微量であると思われる。

図3において、吸光度は x 軸 ($y=0$) に関してほぼ対称な位置に極大値をもっている。このような傾向はほぼ全ての場所 (x) について確認されたため、図3に示されている極大値の位置 l_a とその値 M_a をすすの分布の代表値として用いることとする。液滴を懸垂している石英線の影響に起因する非対称性を考慮して、 l_a については極大値間の距離の半分とし、 M_a については2つの極大値の平均値として定義した。輝度分布に関しても l_i と M_i を同様に定義する。

ここで、透過光減衰法によって得られたすす分布は光路方向に積算された値であり、断面分布ではない。本研究で得られた実験データから断面分布を求めるには、すす分布が軸対称であると仮定し数学的な変換を行う必要である⁽¹³⁾。しかしながら、本研究における実験データは図3が示すように必ずしも対称性がよいわけではないため、積算値を用いて分布を見積もることとしたものである。なお図4は光路方向の積算値から断面分布を求めた例である。図4から、図3のよう

Fig. 5 Positions of absorbance maximum, l_a , plotted as a function of x

Fig. 6 Absorbance maxima, M_a , plotted as a function of x

Fig. 7 Flame mean absorbance vs. applied voltage

に急峻な極大値をもつ場合、その断面分布はやや外側で急峻な極大値をもつと予想できる。

図5および図6は、 l_a および M_a を x に関してプロットしたものである。図5において電界無印加時に l_a が

陰極側で大きな値をとっているのは、図2に示されるように点火の影響によりすす殻が変形していることによる。この変形を加味しても、図5から液滴近傍においては電界印加により l_a がわずかであるが減少していることがわかる。これはすす殻がつぶれるように変形していることに対応している(図2)。一方、図6から液滴近傍において電界印加により M_a は顕著に減少しており、 l_a の変化に比べ M_a は大きく変化していることがわかる。

図7にはすす量の電圧依存性を示す。すす量は吸光度 A を空間的に積算することで求め、輝炎内と輝炎外に分けて示している。なお液滴による吸光の影響を除去するため、 $|x| < 0.5$ の範囲は積算の対象外としている。輝炎内は $|x| < 4$ mm として定義しており、少なくとも電界無印加時の輝炎はこの範囲内に収まっている。この図から輝炎内のすす量は電界印加によって半分以上に減少していることがわかる。一方、輝炎外部のすす量は電界印加により増加している。しかしながら、その増分は輝炎内での減少分ほどは大きくなく、輝炎内外のすす量を加えると電界印加によってすす量が減少していることがわかる。なお図7において火炎内外のすす量を加えると、 $V=0$ kV に対して $V=2$ kV では4割程度のすす量の減少が見られる。

電界印加によるすす量の減少の要因として、帯電しているすすやその前駆体がクーロン力を受けて極板方向に移動し、熱分解領域での滞留時間が短くなることが考えられる。電界を印加していない場合すす粒子が高温域に移動できない主たる要因はサーモフレイシス(熱泳動)効果である。ここで、サーモフレイシス効果によるドリフト速度と電界によるドリフト速度を簡単に見積もり比較してみる。熱泳動速度 v_{Th} は以下の式で表わされる⁽¹⁵⁾。

$$v_{Th} = -K_T \frac{v}{T} \cdot \frac{dT}{dx}$$

ここで、 K_T は熱泳動係数で粒径が小さいほど大きく、その値は最大で0.54程度である⁽¹⁵⁾。 v, T はそれぞれ空気の動粘性係数および温度である。ヘプタン液滴の燃焼研究を参考に⁽¹⁶⁾、液滴燃焼における温度勾配を最大で350K/mmと見積ると、熱泳動速度は20mm/s程度となる。一方、電界によるドリフト速度はすすの移動度と電界強度の積であり、すすの移動度を 3.0×10^{-2} [cm²s⁻¹V⁻¹]と仮定すると⁽²⁾⁽⁴⁾、 $V=2$ kVにおける電界によるドリフト速度は120mm/s程度となる。よって電界の印加によって熱泳動の力に逆らって移動することは可能であると思われる。

この他のすす減少のメカニズムとして過去の研究⁽⁸⁾⁽⁹⁾では、火炎に直流電界を印加した場合、イオン風

Fig. 8 Positions of luminosity maximum, l_i , plotted as a function of x

Fig. 9 Luminosity maxima, M_i , plotted as a function of x

によってすすの酸化が促進されることが指摘されており、本実験の範囲内においてもイオン風による酸化の影響が考えられる。また輝度内でのすす量の減少には、図7の結果からクーロン力によって単純にすすが火炎外に放出される効果も寄与していると思われる。

3.2 火炎輝度 3.1節と同様に、火炎輝度に関して図3中の極大値を用いて l_i と M_i を定義する。図8および図9は、 l_i および M_i を x に関してプロットしたものである。図8から、電界印加によって液滴近傍で l_i が減少していることがわかり、またそれは図2に対応している。この傾向は l_0 (図5) と同様である。ただし図5と比較するとその減少分は大きく、イオン風の影響が示唆される。一方、図9から M_i は x の値によらず電界の印加と共に増大しており、特に液滴から離れた場所における輝度上昇が顕著である。

次に、火炎全体での火炎輝度の平均を印加電圧に対してプロットしたものが図10である。この図から、電圧印加に伴い平均の火炎輝度が上昇していることがわかる。また、この図には火炎投影面積もあわせて示し

Fig. 10 Mean luminosity vs. applied voltage

ている。印加電圧に対して火炎投影面積に大きな変化は見られない。しかし、火炎形状が電界印加方向に対し概して軸対称であり火炎はその方向に引き伸ばされていることから、火炎体積はわずかながらであるが減少しているものと推測される。

火炎輝度はすすからの放射に依存すると思われ、その放射はすす温度とすすの量に依存するものと思われる。ゆえに、火炎輝度増加の要因として、すす温度の上昇あるいは高温域にあるすす量の増加という2つが考えられる。温度上昇に関しては、それに関する直接的な証拠は本研究においては得られていない。しかしながら過去の研究⁽⁸⁾⁽⁹⁾において、火炎に直流電界を印加した場合にはイオン風の役割が重要であることやイオン風に起因する火炎の温度上昇が指摘されている。本研究においても火炎の形状から陽極から陰極に向かうイオン風が生じているものと思われ、すす温度の上昇による影響は無視できないものと思われる。

次にすす量の増大についてであるが、3.1節から全体としてのすす量は減少しているのに、輝度上昇のメカニズムとして低温域に存在していたすすが電界の印加により高温域に移動した可能性が考えられる。図6からすす分布は陰極方向に移動しており、加えて図9から液滴陰極側で輝度上昇が確認されることから、これらの輝度上昇は高温部にすすが移動したことに起因するものが大きいと思われる。また図2から陽極に向かうすす粒子も確認されており、図9中で特に陽極側で輝度が極端に大きくなっているのは比較的大きなすす粒子が火炎帯を横切っているためと考えられる。

3.3 総括的考察 以上述べてきた実験結果は、印加電圧 $V = 2$ kV を境に様相が異なる。図7および図10において、すす量、火炎輝度ともに $V < 2$ kV で急激に変化している。 $V > 2$ kV に注目すると、火炎輝

度は単調に増加するのに対して、すす量は大きな変化が認められない。図5と図8、図6と図9をそれぞれ比較しても、 $V > 2$ kVにおいては、すす量の分布に多少ばらつきがあるものの電界がすすに与える影響は小さく、一方で火炎輝度は着実に電界の影響を受けていることがわかる。火炎輝度の上昇に関してはイオン風による温度上昇とすすの移動の二つの要因について考察したが、このような傾向から $V > 2$ kVにおいてはイオン風が火炎の輝度上昇に及ぼす影響の方が大きいように思われる。

$V < 2$ kVの領域については、図7からすすの減少が顕著である。液滴燃焼において火炎中のすすは燃焼速度定数に影響を及ぼすことが指摘されているため^{(12)~(14)}、燃焼速度定数に与える影響について考察する。著者らは過去に同様の実験装置を用いて、直流電界がトルエン燃料の燃焼速度定数に与える影響について実験的に調べた⁽¹¹⁾。その結果、トルエンの燃焼速度定数は、電界無印加時の燃焼速度定数を K_0 とすると、 $V = 2$ kVで $K/K_0 = 1.3$ 、 $V = 6$ kVで $K/K_0 = 1.5$ 程度であった。このように燃焼速度定数は $V < 2$ kVの領域で大きく増加しており、 $V < 2$ kVにおける燃焼速度定数の増分はすすの減少と大きく関わっているものと考えられる。過去の研究報告例では、すすが存在するとそのすすからの放射熱損失によって燃焼速度定数が減少するという計算結果が得られている⁽¹⁴⁾。本研究においては輝度の上昇が確認されており電界印加によって放射熱損失が増大していることになるが、燃焼速度定数はそれに反して増加している。すなわち、本研究での燃焼速度定数の増加の要因はすすの減少による放射熱損失の低減ではない。燃焼速度定数の増加の要因としてイオン風による対流の効果や、すす殻による質量および熱の輸送を妨げる効果⁽¹²⁾などが考えられる。本研究で用いたトルエンのようなすすを大量に生成する燃料については、電界印加によってすす殻による質量および熱の輸送を妨げる効果が低減されたと考えるのが妥当であろうと思われる。

4. 結 論

本研究では、微小重力環境を利用して直流電界中でトルエン液滴を燃焼させ、電界が燃焼時に生成するすすおよび火炎輝度に及ぼす影響について調べた。その結果、明らかとなった事項は以下のとおりである。

1. 電界印加により生成されるすす量の減少が観察され、輝炎内においてはすす量は半分以下に減少した。これは電界印加によるすすおよびその前駆体の滞留時間の変化とイオン風による影響が主要因であると考え

られる。

2. 電界印加により、火炎輝度の上昇が観察された。これは低温域に存在していたすすが電界の印加によって高温域に移動したこと、およびイオン風に起因するすす温度上昇が主たる要因と考えられる。

3.すすを大量に生成する液滴燃料の燃焼においては、電界印加によるすすの減少は燃焼速度定数に大きな影響を及ぼすと考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、「微小重力環境を利用した燃料多様化対応燃焼技術の研究開発」の一環として、(財)宇宙環境利用推進センター(JSUP)が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。また本研究を進めるにあたり、本学工学部の内海正文技官、岩田梯次技官、学部学生の宿谷弘樹君にご協力いただいた。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Place, E. R., and Weinberg F. J., "Proc. Combust. Inst.", 11(1967), pp.245-255
- (2) Mayo, P. J., and Weinberg F. J., "Proc. R. Soc. Lond. A", 319(1970), pp.351-371
- (3) Kono, M., Iinuma, K., and Kumagai, S., "Proc. Combust. Inst.", 18(1981), pp.1167-1174
- (4) Kono, M., Carleton, F. B., Jones, A. R., and Weinberg, F. J., "Combust. and Flame", 78(1989), pp.357-364
- (5) Xie, L., Kishi, T., and Kono, M., "Proc. Combust. Inst.", 24(1992), pp.1059-1066
- (6) 水谷幸夫, 中原正季, "機論(B)", 49(1983), pp.1530-1538
- (7) 田中秀憲, 上原貢, 斎間厚, "機論(B)", 60(1994), pp.1168-1175
- (8) 新居利洋, 斉藤正浩, 新井雅隆, "機論(B)", 64(1998), pp.3881-3887
- (9) 新居利洋, 斉藤正浩, 新井雅隆, "機論(B)", 66(2000), pp.256-262
- (10) Yuan, Z., Hegde, U., and Faeth, G. M., "Combust. and Flame", 124(2001), pp.712-716
- (11) Ueda, T., Imamura, O., Okai, K., Tsue, M., Kono, M., and Sato, J. "Proc. Combust. Inst.", 29(2002), pp.2595-2601
- (12) Jackson, G. S., and Avedisian, C. T., "Proc. R. Soc. Lond. A", 446(1994), pp.255-276
- (13) Lee, K., Manzello, S. L., and Choi, M. Y., "Combust. Sci. and Tech.", 132(1998), pp.139-156
- (14) Manzello, S. L., and Choi, M. Y., Kazakov, A., Dryer, F. L., Dobashi, R., and Hirano, T., "Proc. Combust. Inst.", 28(2000), pp.1079-1086
- (15) 奥山喜久夫, 増田弘昭, 諸岡成治, 微粒子工学, オーム社, (1992) pp.106-107
- (16) Mikami, M., Niwa, M., Kato, H., Sato, J., and Kono, M., "Proc. Combust. Inst.", 25(1994), pp.439-446