

液滴の燃焼挙動と外部から印加された電界場の干渉効果に関する検討

日大生産工 ○今村 幸

1 まえがき

燃焼に電界が及ぼす影響は古くから知られており、これは火炎中に含まれるイオンや電子の効果によるものである^{1,2)}。また火炎中に含まれるすす粒子も、その多くが正に帯電していることが知られており、この特性を利用して電界を用いたすすの制御に関する検討も行われてきている。さて電界が燃焼に及ぼす影響としてよく知られているものの一つに、イオン風という現象がある。これは外部から電界を印加することによって、燃焼反応に伴って生成したイオンが電界に沿って移動することで生じるものである。イオンの数密度は、中性ガス分子の数密度に比べておよそ8桁程度小さく、このためイオン自体の移動がイオン風とし観察されているのではなく、イオンが周辺の中性ガス分子に衝突しつつ移動する際に、中性ガス分子に電界方向の運動量を与えるため巨視的には中性ガス分子の風として観測される。火炎中においては負電荷の担い手はほとんどが電子であると計測されており、電子の電気移動度がイオンに比べて3桁以上程度大きいため、中性ガス分子が受け取る運動量は正イオンの移動方向と同方向となる^{1,2)}。このように火炎に電界を印加すると流れが誘起され、その流れの効果によって燃焼現象に影響を及ぼすことがあり得る。著者らはこのような観点から、主として単一燃料液滴を対象として、直流電界が液滴燃焼に及ぼす影響について、微小重力環境を用いるなどして実験的に調べてきた³⁻⁶⁾。電界印加に起因する流れの効果として、火炎の変形や液滴の蒸発挙動の変化などについて報告してきた。他方でイオン風が生じるときには、イオンおよび電子が電界中を移動するため、それらの移動によって生じる電界の効果について見積もらなければ、外部電界が火炎に及ぼす影響については定量的に評価できないことも示してきた^{5,6)}。

火炎と外部電界が相互に影響することについては古くから検討されているが¹⁾、昨今の電界が燃焼現象に与える影響に関する研究においては、外部電界の変化についてはあまり考慮されず整理されている例も散見される。これは電界の変化を見積もる際の電荷密度の見積りや電界の測定が困難なことや、外部電界の変化に起因する影響が大きい場合について検討されていることが要因と思われるが、ある特定の実験装置について実験が行われていることもまた一因であると著者は考えている。一般に電界は極板間で一様として、電極間の印加電圧 V を電極間隔 L で除した値を用いて、実験結果が記述されることが多い。これに対して著者らが過去に示した検証結果^{5,6)}では、火炎の存在によって電界が変化することで、燃焼現象に与える影響が本質的には V^2/L^3 で整理されると結論づけることができた。固有の装置であれば電極間隔 L が一定であるから、 VL 、 V^2/L^3 のどちらで整理されても相違は少なく、これが電界の変化に関する検討が明確に記載されない要因と思われる。このように電界と燃焼の干渉効果については本来議論すべきものであるが、実験装置の特性などから陽に表出せず、議論されていないのではないかという推論が本研究の動機である。

以上のような背景から、直流電界で得られた知見、特にイオンや電子の移動に伴う電界の変化の考慮を踏まえて、交流電界を印加した場合の実験結果について検討を行ったものが本報告である。本報告では、微小重力環境を利用して行った交流電界場中における単一液滴の燃焼試験の結果について示し、外部電界と燃焼現象の干渉現象に着目して考察を行うとともに、異なる燃料における実験結果を比較することによって推察された事象について報告する。

Discussion on the Interaction Effect between Droplet Combustion Behavior and External Electric Field

Osamu IMAMURA

2 実験装置および条件

本報告におけるすべての実験は微小重力環境を利用して行われたものである。微小重力環境は、落下塔を用いて自由落下法によって得られたものであり、今回の試験において使用した落下塔における有効な微小重力環境の継続時間はおよそ1秒である。実験装置は図1に示すように、燃料供給系・熱面点火系・制御系・撮影系・バックライトなどからなる。液滴は鉛直に配置された懸垂線によって支持される。懸垂線は直径0.125mmの石英線の先端を球状に丸めたものを使用した。使用した燃料はエタノール、正オクタンおよびトルエンである。初期液滴径を $0.72 \pm 0.06\text{mm}$ とした。二台のCCDカメラは燃焼現象を直交二方向から観察できるようになっている。一方はバックライトを用いて液滴を観察するもので、他方はより大きな視野で火炎の直接像もしくはバックライト像を得るものである。電極は図1に示すように懸垂線の両脇に平行に配した二枚の金網を用いた。金網間隔は50mmである。本研究では、交流周波数 $f=3.5, 5, 7, 10\text{kHz}$ の交流電圧を印加して実験を行った。印加電圧 V_{pp} (peak to peak)は、3.5kHzでは、 $V_{pp}=0\sim 5\text{kV}$ 、5kHzでは $V_{pp}=0\sim 3\text{kV}$ 、7kHzでは $V_{pp}=0\sim 1.8\text{kV}$ 、10kHzでは $V_{pp}=0\sim 1.2\text{kV}$ である。また、雰囲気気体は室温、大気圧の空気である。実験においては、まず実験装置を針金を介してウインチで吊り下げ、モニターで確認しながら懸垂線の先に液滴を生成させる。液滴生成直後、落下筐体の落下直前に電圧を印加した。実験装置が落下を始め、微小重力状態に到達した直後、液滴を点火して燃焼の様子を観察した。実験結果はすべて2台のCCDカメラの画像から得られた。

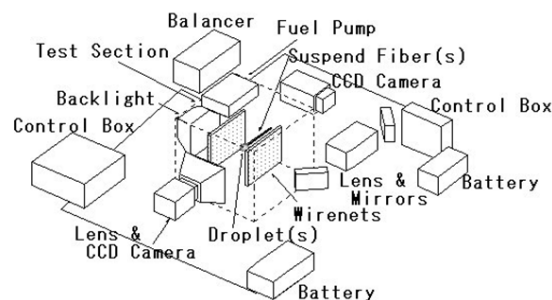


図1 実験装置概略図

(上：落下筐体内概要図
下：電界印加系概要図)

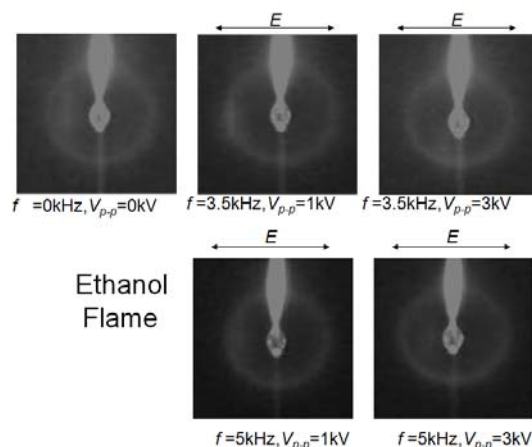


図2 エタノールの火炎写真

3 実験結果および考察

図2にエタノール燃料を用いた場合の火炎写真、図3にエタノール燃料を用いた場合の燃焼速度定数の印加電圧依存性を示す。ここで、燃焼速度定数は液滴径の二乗の時間変化の勾配で、液滴の蒸発挙動を評価するためのものである。なお図中では $V_{pp}=0\text{kV}$ の時の燃焼速度定数 K_0 で無次元化している。この図に示されるようにエタノール火炎においては、火炎変形、液滴の蒸発促進などの効果はほとんど観察されなかった。このことから直流電界の考察において有効であったイオン風の効果は、本実験結果の範囲においては有意ではないものと推測される。

次に図4および図5に正オクタンを燃料とした場合の火炎写真および燃焼速度定数の各周波数における印加電圧依存性を示す。図4の火炎直接写真においては顕著な火炎(輝炎)変形が確認されており、火炎が電界印加方向に引き伸ばされるように変形し、特に高電圧

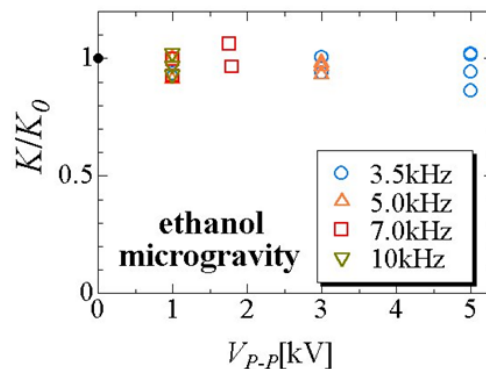


図3 燃焼速度定数の印加電圧依存性 (エタノール)

を印加した場合、火炎の両端からすすを放出しながら燃焼している様子が観察されている。しかしながら、各周波数に対しての顕著な違いは観察されなかった。他方で図5に示される蒸発挙動に及ぼす電界の影響であるが、電界の印加に伴いわずかであるが、燃焼速度定数が増加していることがわかる。しかしながらその増分は小さく、周波数、印加電圧に対する依存性も明確ではない。よって燃焼速度定数の観点からは、前述のエタノールの場合と同様にイオン風の影響が顕著でないことが見受けられる。それに対して火炎の変形については、エタノールの場合と現象が異なっているように見受けられる。この点について電子、イオン、すす粒子の移動度の観点から考察を行ってみる。第一に電子、イオン、すすの変位であるが、これらが交流電場の時間変動に追従すると仮定する。この場合、速度 v は移動度 μ を用いて以下のように記載できる。

$$v = \mu E \quad (1)$$

電界強度 E は、例えば角速度 ω を用いて $E = E_0 \cos \omega t$ のように記載できるから、式(1)中の変位 x は

$$x = (\mu/\omega) E_0 \sin \omega t \quad (2)$$

となる。今、 $E_0 = 5\text{kV}/50\text{mm}$ 、 $f = 3.5\text{kHz}$ の場合について検討する。移動度については文献¹⁾を用い、すすの移動度を $\mu = 10^{-6}\text{m}^2/\text{sV}$ と仮定すると $x_0 = \mu E_0/\omega = 5 \times 10^{-6}\text{m}$ となる。この変位は火炎面よりも十分に小さいと考えられる。すなわち、図4において観察されたような火炎からのすす粒子の放出は、周期的な電場の変動に追従して移動しているすす粒子を観察しているわけではない。イオンについては $\mu = 10^{-3}\text{m}^2/\text{sV}$ とすると、 $x_0 = 5 \times 10^{-3}\text{m}$ であり、これも電極間隔に比較すれば十分に小さい距離である。電子については $\mu = 0.35\text{m}^2/\text{sV}$ を仮定すると $x_0 = 1.6\text{m}$ であり、これが唯一電極間隔より大きな変位を有する。これから直流電界時^{5,6)}に得られた知見、すなわち電子、イオンの移動による電界の変化を本研究の範囲において考慮するにあたっては、電子の移動のみを考えればよいこととなる。電子の移動を考慮すると、電子は陽極側に速やかに移動すると考えられるから、火炎からの電子の移動、供給のない火炎より陰極側では電位の勾配が生じるが、火炎より陽極側では火炎からの電子の移動、供給が生じ、電位の勾配がほぼ0となる状況が成立していると予測される。すなわち時間的に積分すれば、火炎から陰極に向かって下がるような電位分布が生じていると予測され、この電位分布によってすす粒子や正イオンが電極方向に向かって放出されるように移動するものと推測される。このように理解すると図4にて観察された左右対称の火炎形状が説明可能である。また流れ場については、交流場

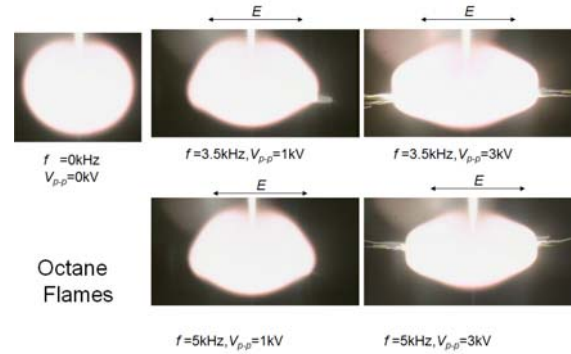


図4 正オクタンの火炎写真

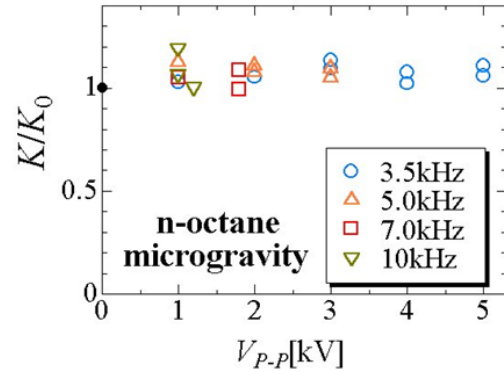


図5 燃焼速度定数の印加電圧依存性（正オクタン）

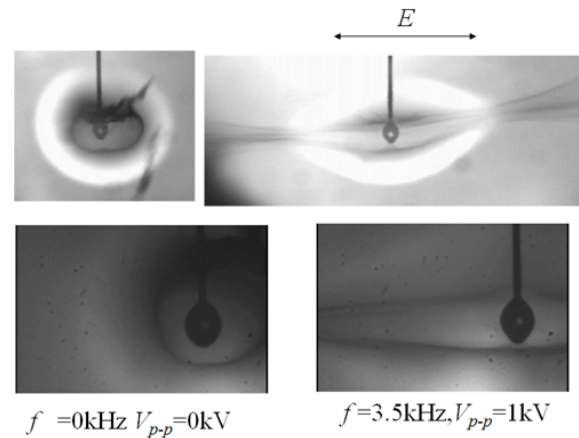


図6 トルエンのバックライト写真

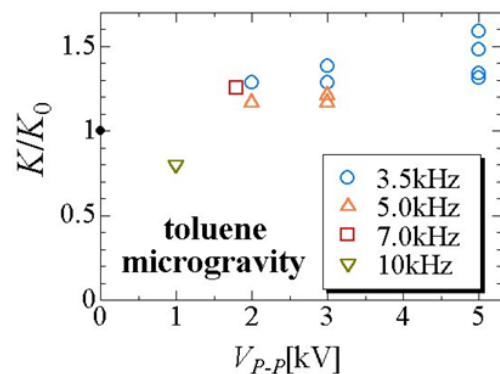


図7 燃焼速度定数の印加電圧依存性（トルエン）

ではあるものの音響場のような流れ場には生じていないことが予測され、それゆえ蒸発挙動に及ぼす影響が微小であったと推測される。

図6にはトルエン火炎の影写真を示している。燃料としてトルエンを用いるとすすを多く生成し、微小重力環境下における試験ではすす殻を観察することができる。電界の印加によって、すす殻の一部は崩壊し、すす粒子が両方の電極に向かって火炎の外部に放出されている様子が確認される。このようなすす粒子の放出は正オクタン火炎の場合と同様である。図7にはトルエン液滴を用いた場合の、電界が燃焼速度定数に及ぼす影響について示してある。この図に示されるように、トルエン燃料の場合、電界印加における燃焼速度定数の増加量は、正オクタンの場合に比べて非常に大きい。これはすす殻に起因する影響であると予測される。一般にすす殻は、液滴への熱および質量の輸送を妨げるとされ、またすすが存在することで放射熱損失が大きくなるとされる⁷⁻⁹⁾。電界の印加によって火炎中に存在するすすの量が減少することによって、熱および質量の輸送が促進されるとともに放射熱損失が低減したことが、トルエン液滴の場合の燃焼速度定数の増加が顕著に確認されたことの要因であると予測される。

4 まとめ

微小重力環境利用して、交流電界場が単一燃料液滴の燃焼に及ぼす影響について実験的に調べ、火炎の存在による電界の変化の効果と生成するすすの効果について考察を行った。エタノール火炎においては火炎変形、燃焼速度定数に及ぼす有意な電界の影響は観察されなかった。正オクタンについては、火炎形状は電界の印加によって電界方向に左右対称に大きく変形するものの、液滴の蒸発挙動に及ぼされる影響については微小であった。これらの結果を元に、すす粒子、イオン、電子の変位について見積もりを行ったところ、電子の変位のみが電極間隔よりも大きく、電子の移動によって印加電界が変化することを考慮すると、これらの実験結果を解釈することが可能であることを指摘することができた。またすす殻を有するトルエン液滴の場合、電界の印加によるすす殻の崩壊と蒸発挙動の変化が観察され、蒸発挙動の変化は電界の印加による火炎内のすす量低減と関連があるものと考察された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京大学本学大学院生の植田毅氏（当時）、久保康之氏（当時）にご協力いただいた。記して謝意を表する。

「参考文献」

- 1) Lawton, J. and Weinberg, F. J.: *Electrical Aspects of Combustion*, Claredon Press Oxford, 1969.
- 2) Bradley, D.: *The Effects of Electric Fields on Combustion Process in Advanced Combustion Methods*, Academic Press Inc., 1986, pp.331-394.
- 3) Ueda, T., Imamura, O., Okai, K., Tsue, M., Kono, M., and Sato, J.: *Combustion Behavior of Single Droplets for Sooting and Non-Sooting Fuels in DC Electric Fields under Microgravity*, *Proc. Combust. Instit.*, 29 (2002) pp.2595-2601
- 4) Imamura, O., Kubo, Y., Osaka, J., Sato, J., Tsue, M., and Kono, M.: *Observation of sooting behavior in Single Droplets Combustion in Direct Current Electric Fields under Microgravity*, *Microgravity Sci. Tech. XVII* (2005) pp.13-17.
- 5) Imamura, O., Chen, B., Nishida, S., Yamashita, K., Tsue, M., and Kono, M.: *Combustion of Ethanol Fuel Droplet in Vertical Direct Current Electric Field*, *Proc. Combust. Instit.*, 33 (2010) pp.2005-2011.
- 6) Imamura, O., Yamashita, K., Nishida, S., Tsue, M., and Kono, M.: *Two Droplets Combustion of n-Octane in Direct Current Electric Field under Microgravity*, *Combust. Sci. Tech.* 183 (2011) pp.755-763
- 7) Lee, K., Manzello, S.L., and Choi, M.Y.: *The Effects of Initial Diameter on Sooting and Burning Behavior of Isolated Droplets under Microgravity Conditions*, *Combust. Sci. Tech.* 132 (1998) pp.139-156.
- 8) Choi, M.Y. and Lee, K. -O., *Investigation of Sooting in Microgravity Droplet Combustion*, *Proc. Combust. Inst.* 26 (1996) pp.1243-1249.
- 9) Manzello, S.L., Choi, M.Y., Kazakov, A., Dryer, F., Dobashi, R., and Hirano, T.: *The Burning of Large n-heptane Droplets in Microgravity*, *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) pp.1079-1086.