

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

微小重力場における揮発性燃料噴霧の火炎伝播速度およびその伝播挙動
Flame Speed and Propagation Behavior of Volatile Fuel Spray in Microgravity布目 佳央^{1*}・吉永 健太郎¹・花井 宏尚²・小林 秀昭¹・新岡 嵩³NUNOME, Yoshio^{1*}, YOSHINAGA, Kentaro¹, HANAI, Hironao², KOBAYASHI, Hideaki¹ and NIIOKA, Takashi³¹ 東北大学流体科学研究所 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1
Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan² 千葉科学大学危機管理学部 〒288-0025 千葉県銚子市潮見町3
Faculty of Risk and Crisis Management, Chiba Institute of Science, 3 Shiomi-cho, Choshi, Chiba, 288-0025, Japan³ 秋田県立大学 〒015-0055 秋田県本荘市土谷字海老の口84-4
Akita Prefectural University, 84-4 Ebinoguchi, Tsuchiya, Honjo, Akita, 015-0055, Japan

2005年3月7日受付; 2005年6月2日受理 / Received 7 March, 2005; Accepted 2 June, 2005

Abstract : Flame propagation experiments of n-octane spray were performed in microgravity to investigate the flame propagation mechanism of volatile fuel sprays. The pre-vaporization occurred due to high volatility before ignition, and the equivalence ratio of fuel vapor and air mixture equaled or exceeded the lean flammability limit. Therefore, the flame could propagate through the n-octane vapor. n-decane spray mixed with small amounts of methane was also used as a fuel to simulate the flame propagation of volatile fuel sprays. The flame speed had a maximum around 6 vol.% of methane in n-decane spray. The aspect of flame propagation changed as the concentration of methane increased, and we could reasonably divide into three flame propagation regimes. In order to explore the effect of droplets in fuel vapor on distortion of the propagating flame front, the behavior of laminar flat flame passing through a suspended fuel droplet was experimentally observed. Results show that the propagating flame was transformed into a convex flame toward the unburned gas and the flame speed increased, when the flame passed through the droplet.

Key Words : Spray, Flame propagation, Flame speed, Microgravity, Pre-evaporation, Flame distortion

1. 緒言

噴霧燃焼は、液体燃料を応答良くかつ高負荷燃焼させることが可能であるという点から、工業的には広く用いられている。しかし、その燃焼現象は、粒径や粒径分布、相変化、液滴同士の衝突、液滴燃焼の相互干渉など数多くの因子が影響を及ぼすため、現象の把握が困難である。また、現象の複雑さに加え、実験の困難さも現象の把握を困難にする原因の一つとなっている。特に、通常重力場では噴霧の沈降が避けられず、雰囲気との相対速度の影響を考慮せざるを得ない。浮遊させるためには乱流場にしなければならぬ課題もある。また、燃焼によって発生する高温ガスの影響で自然対流が発生することもあり、基礎的現象把握が難しい。それ故に、これまでに数多くの研究が行われ、

噴霧の燃焼現象および燃焼特性に関する有効な知見[1-5]が増えているにもかかわらず、その基本的な燃焼メカニズムが十分に解明されているとは言い難い。一方で、噴霧の基本現象を解明する研究として、噴霧を構成する単一液滴や液滴列に関する研究[6-13]が広く行われ、多くの燃焼現象が明らかにされてきており、ひとつの研究分野として確立している。しかし、実際の噴霧の燃焼では噴霧中の液滴同士が相互に干渉しながら燃焼しており、これらの研究結果を噴霧の燃焼メカニズムに直接適用し、モデル化することが難しく、未だに大きな課題である。

近年、微小重力場を用いた研究[11-17]が広く行われるようになり、液滴や噴霧の燃焼現象解明に寄与するところが大きい。微小重力場では液滴の沈降や自然対流の影響を受けないため、現象を単純化することができる。また、これまでに通常重力場では実験が困難であった、空間に均一な静止噴霧の生成[15-17]や高圧下での懸垂液滴[13]を用いた実験などが実現した。例えば、Nunomeら[15]は、微小重

* Corresponding author. E-mail: nunome@flame.ifs.tohoku.ac.jp

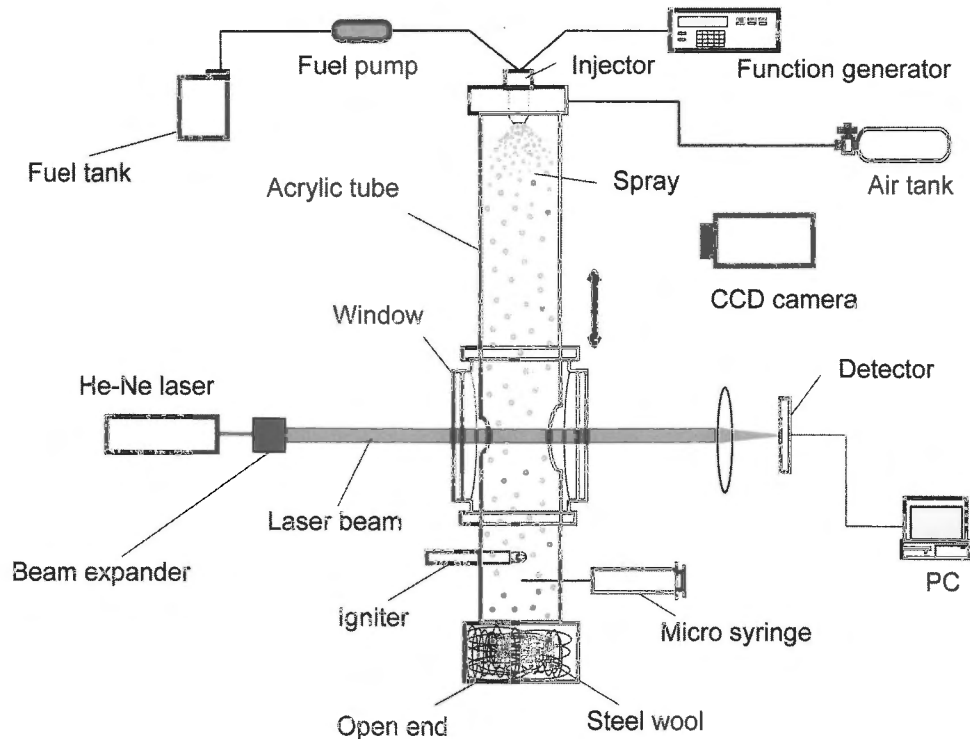


Fig.1 Schematic experimental setup for flame propagation in fuel spray.

力場を用いて、空間に静止するほぼ均一な正デカン噴霧を生成し、揮発性の比較的低い燃料噴霧の火炎伝播メカニズムを液滴列の燃え拡がり理論[12]に基づく考察により説明している。

また、揮発性燃料に関して、Nomura ら[16, 17]は、急速減圧による温度降下を利用した均一燃料液滴群生成法を利用し、エタノール噴霧の火炎速度の測定および火炎構造の考察を微小重力場で行っている。その中で、燃料液滴 - 蒸気 - 空気混合気中を伝播する火炎は、火炎面がしわ状に変形し、その火炎速度は同じ当量比の予混合火炎の場合よりも速くなることを示している。同様の現象が、通常重力場における実験でも報告されている。例えば、Mizutani と Nakajima[3]はプロパン - 空気予混合バーナ火炎に少量の灯油噴霧を加えた場合に、燃焼速度が増加する事を示し、吉田ら[4]は少量の噴霧の存在により、火炎面に凹凸が生じることで火炎面積が増大し、火炎伝播速度が増加することを見だし、フラクタル解析により火炎面の凹凸を定量的に表現して火炎伝播速度との相関関係を明らかにした。しかしながら、その詳細な火炎伝播メカニズムについては、未だに十分な説明がなされているとは言い難い。

そこで、本研究では、揮発性の比較的高い正オクタンを燃料に用いて噴霧の火炎伝播実験を微小重力場において行い、揮発性の比較的高い燃料噴霧の基本的な火炎伝播メカニズムを解明することを目的とした。これまでの報告から、雰囲気中存在する混合気、あるいは燃料の蒸発により生成される可燃性混合気が燃料噴霧の火炎伝播に及ぼす影響が

大きいと考えられ、本報では、雰囲気中存在する可燃性混合気が存在する環境での噴霧の火炎伝播実験も行った。また、液滴周りに存在する可燃性混合気によって予混合火炎が形成された場合、その火炎が液滴を通過する時の火炎挙動についても調べた。

2. 微小重力場における燃料噴霧の火炎伝播実験

2.1. 実験装置および実験方法

図1に実験装置概略図を示す。本実験装置は火炎伝播管、レーザ光散乱方式粒度分布測定装置 (LDSA: Laser Droplet Size Analyzer, 東日コンピュータアプリケーションズ株式会社製, LDSA-2400A)、二流体噴射弁、CCDカメラおよびそれらの付属機器から構成されている。火炎伝播管は透明アクリル製で内径 62 mm、長さ 535 mm の円筒形で、伝播管の一端は燃料噴射弁の固定台によって密閉された閉鎖端となっており、その中央部に燃料噴射弁が取り付けられている。もう一端は開放端となっており、開放端近傍にはイグナイタを取り付ける。イグナイタにはニクロム線ヒータを利用した。着火は燃料噴射後、噴霧が十分に静止してから行った。噴霧の動きを観察することにより、微小重力場では噴霧生成後、約 5 秒で噴霧はほぼ火炎伝播管内に静止することが確認できた。

火炎伝播管中に生成された噴霧の粒径分布および濃度の測定には、LDSAを用いた。そのため、開放端から 240 mm の位置にレーザ計測用の穴が設けられている。LDSA

には 3 組の光学系が搭載されているため, 実験装置に火炎伝播管を 3 本搭載することにより, 一回の落下実験で 3 種類のデータを得ることが出来る。

微小重力場実験では, 揮発性の比較的高い正オクタン (標準沸点: 399 K, 298 K での飽和蒸気圧: 1.81 kPa) を燃料噴霧に用いた火炎伝播実験と, 雰囲気を所定の濃度のメタン/空気混合気で満たし, 燃料噴霧に揮発性の低い正デカン (標準沸点: 447 K, 298 K での飽和蒸気圧: 0.237 kPa) を用いた正デカン/メタン混合燃料噴霧の火炎伝播実験の 2 種類を行った。気体燃料としてのメタンは, 細胞状火炎を形成し易く不安定性が大きい, 輝炎になり難いため火炎が見やすく, 連続した液滴の中ではメタンのそのような性状は顕在化しないと考えられる。

噴霧の生成には, 自動車用二流体噴射弁を改良して用いた。微粒化用の二次流体は, 火炎伝播管内の気体成分が変わらないよう, 正オクタン噴霧の場合は空気, 正デカン噴霧の場合は伝播管内置換用のメタン/空気混合気と適宜使い分けた。

正オクタン噴霧の火炎伝播実験では, LDSA 計測の直前に正オクタン噴霧の蒸発量を測定するため, マイクロシリンジを用いて伝播管内のガスサンプリングを行い, その成分分析により, 蒸発量を求めた。一方, 正デカン/メタン混合燃料噴霧を用いた実験においては, 火炎伝播管の一方が開放端であるため, 実験開始直前に一定時間定圧で混合気を伝播管内に送り込むことにより管内のガスを完全に混合気に置換した。置換が完全に行われているかどうかについては, 伝播管開放端面を含む管内の数カ所でガスのサンプリングを行い, ガスクロマトグラフを用いて事前に確認した。

火炎伝播の様子は 2 台の CCD カメラによって記録した。1 台は火炎伝播速度の測定のために伝播管全体を撮影し, もう 1 台は火炎の様子を詳細に観察するために伝播管の一部を拡大撮影した。

本研究で利用した微小重力環境は, 株式会社地下無重力実験センター (略称 JAMIC, 北海道) の落下坑で得られる実験時間約 10 s, 微小重力レベル 10^{-5} G 以下の非常に良好な環境である。

2.2. 実験結果および考察

2.2.1. 正オクタン噴霧の火炎伝播

図 2 に当量比一定下での正オクタン噴霧の火炎伝播速度とザウタ平均粒径 (SMD) との関係を示す。データは比較的ばらつきが大きい, これまでの結果[15]から, 火炎伝播速度はある SMD で最大値を持つことが明らかになっており, 本研究においても, それぞれのデータから類推される曲線を共に示した。ここでの当量比は総当量比であり, 燃料噴射後, 点火までに予蒸発した分も含まれている。微小重力場実験により得られた正デカンの火炎伝播速度は 20 ~ 30 cm/s である[15]が, 正オクタンの火炎伝播速度は 50 ~ 200 cm/s と非常に速い。これは, 後述するように, 正デ

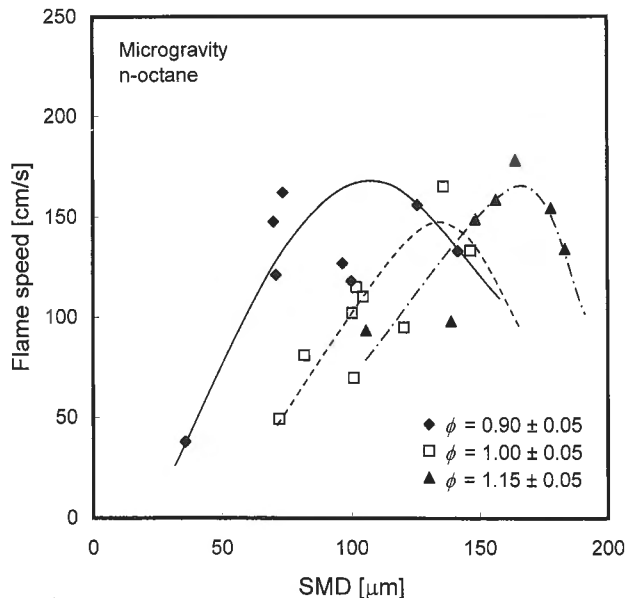


Fig.2 The variation of flame speed with SMD.

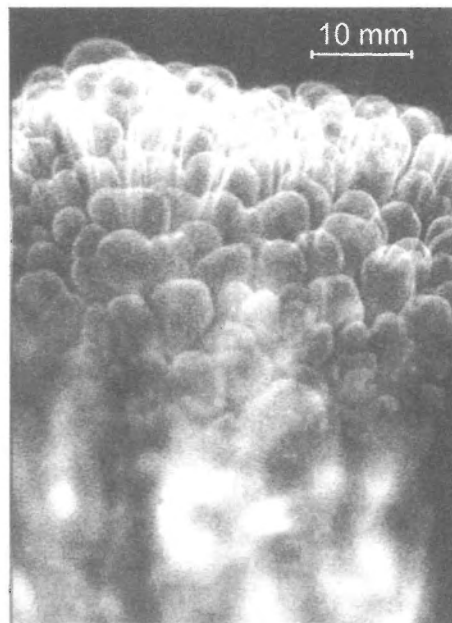


Fig.3 Photograph of the propagating flame front for n-octane spray in microgravity. (SMD = 183 μm, φ = 1.45)

カン噴霧にごく少量のメタンを加えた場合と同様の傾向であり, 燃料の予蒸発により雰囲気に混合気が形成されて火炎伝播速度に大きく影響を及ぼしていることが分かる。しかし, 図 3 の火炎先端部の拡大写真から, 火炎伝播の様子は正デカンと異なり[15], 火炎は液滴から液滴へと飛び石的に伝播していくのではなく, 火炎は依然として不均一ではあるが, 連続的に伝播していく様子が確認できた。さらに, 正デカンのときに見られた輝炎はあまり生じず, 火炎

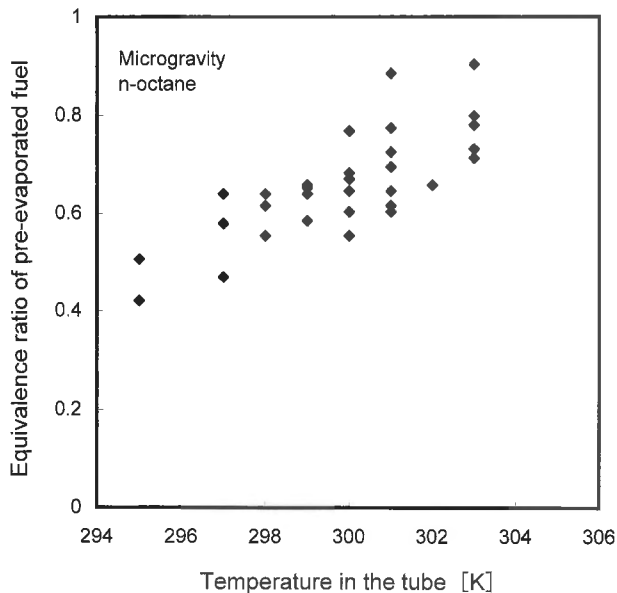


Fig.4 Relationship between the equivalence ratio of pre-evaporated fuel and the temperature in the flame propagation tube. (SMD = 33 ~ 188 μm)

先端部にブルーフレームが形成されている。着火直前の火炎伝播管内における蒸発した正オクタン濃度を測定した結果、図4に示すように、火炎伝播管内の温度に対して、その当量比はほぼ $\phi = 0.60 \sim 1.00$ の範囲であることが分かった。気体の正オクタンの可燃下限界濃度は当量比 $\phi = 0.60$ であり、本研究における正オクタン噴霧では予蒸発燃料のみでも十分に着火し、火炎は伝播し得る。従って、火炎は雰囲気の子蒸発燃料の存在によって、予混合火炎が噴霧中を伝播していると考えられる。しかし、図3から火炎先端部に正デカンと同様に無数のエンベロープフレームのような球状の火炎が存在し、互いに密接して伝播する様子が確認できた。そこで、図3より球状火炎の火炎径を測定し、レーザ計測によって得られた噴霧濃度および平均粒径から算出した平均液滴間距離との関係[15]を調べたところ、球状火炎の中に隣接した液滴が完全に取り込まれ、さらに先にある液滴近傍まで火炎が広がっていることが分かった。すなわち、一つの火炎の中にいくつもの液滴が存在するいわゆる群燃焼の形態[18]をとっていることになり、正デカンのように液滴から液滴へと火炎が燃え広がるという液滴列の理論に基づく考察からは火炎伝播特性を説明できない。次に、正オクタン噴霧の火炎伝播は予混合火炎が支配的な燃焼形態であると考えた場合、図3からも分かるように、火炎面は平面とはならないことから、予混合火炎は噴霧液滴の影響を受けて、凹凸に歪められて、伝播しているものと考えられる。そこで、以下にその考察を行った。

予混合火炎が噴霧液滴に近づくと、小さい粒径の噴霧液滴は火炎面の前方で完全に蒸発するため、局所的に濃度分布を形成する。従って、火炎は不均一な濃度分布を有する混合気中を伝播することになる。一方、大きい粒径の噴霧

液滴は完全に蒸発しないため、火炎に取り込まれ、火炎から熱を奪い、火炎に温度分布を与えることになる。これらの影響によって、火炎はしわ状層流火炎 (Wrinkled laminar flame) の様相を呈し、火炎面が凹凸に変形したものと思われる。その結果、火炎面積が増大し、火炎伝播速度が速くなったと考えられる。

以上の事を踏まえると、正デカン噴霧と正オクタン噴霧の火炎伝播を比較した場合、両者の火炎伝播メカニズムの違いは、噴霧燃料が蒸発し、着火前に十分な可燃性混合気を形成するかどうかが大きき要因である。従って、雰囲気中存在する予蒸発燃料が、噴霧の火炎伝播にどのような影響を与えるかを調べることで、揮発性の高い燃料噴霧の火炎伝播メカニズムを考察する上で、重要な課題である。そこで、雰囲気の子蒸発燃料と火炎伝播速度の関係を調べるため、火炎伝播管に予めメタン/空気混合気を充填し、その中に正デカン噴霧を生成することで、予蒸発を模擬した噴霧中の火炎伝播実験を行った。これにより、雰囲気の子蒸発燃料と噴霧濃度を制御して実験を行うことが出来る。

2.2.2. 正デカン/メタン混合燃料噴霧の火炎伝播

図5に噴霧と混合気の総当量比を $\phi = 0.90 \pm 0.05$, SMD を $100 \pm 7.5 \mu\text{m}$ で一定としたときの、雰囲気の子蒸発燃料濃度と火炎伝播速度の関係を示す。また、図中にはそれぞれのメタン濃度における伝播火炎の先端部の直接写真を示している。微小重力場という特殊な環境下での実験であるため取得データが少ないことから、参考までに総当量比が同じで平均粒径が異なるデータも白抜き点で一緒に示す。図中の括弧内の数字は SMD を示している。また、図中のメタン濃度 5 vol.% 上に示した破線は一般に知られているメタン/空気混合気の可燃下限界濃度である。すなわち、メタン濃度が 5 vol.% 以上の領域では、正デカン噴霧がなくても予混合気のみで火炎が伝播できる事を意味している。

火炎伝播速度はメタン濃度が 0 ~ 4 vol.% 付近においては緩やかに上昇するが、メタン濃度 4 vol.% 以降、上昇勾配が増加し、6 vol.% 付近で最大値をとった後、減少に転じた。総当量比 0.90 であるため、メタン濃度の増加に伴い噴霧濃度は減少する。従ってメタン濃度 9 vol.% では噴霧が存在せず、メタン/空気混合気中を火炎が伝播し、その火炎伝播速度は約 60 cm/s である。この様な、ある気体燃料割合で火炎伝播速度が最大値をとる現象は、灯油噴霧にプロパンを混合した吉田ら[4]の実験においても見られている。

メタン濃度 1 ~ 4 vol.% 付近で火炎伝播速度が上昇する傾向は、ごく少量のメタンを正デカン噴霧の雰囲気中に添加した場合と同様である[15]。すなわち雰囲気にメタンが加わった事により、可燃ガス濃度に達する時間が短縮されたために火炎伝播速度が速くなったと考えられる。メタン濃度 5 vol.% 以上になると、メタン/空気予混合火炎が形成されるため、予混合火炎が噴霧中を伝播する。そして噴霧の存在により火炎面は凹凸に変形し、火炎面積が増大することにより、火炎伝播速度は増加すると考えられる。実際

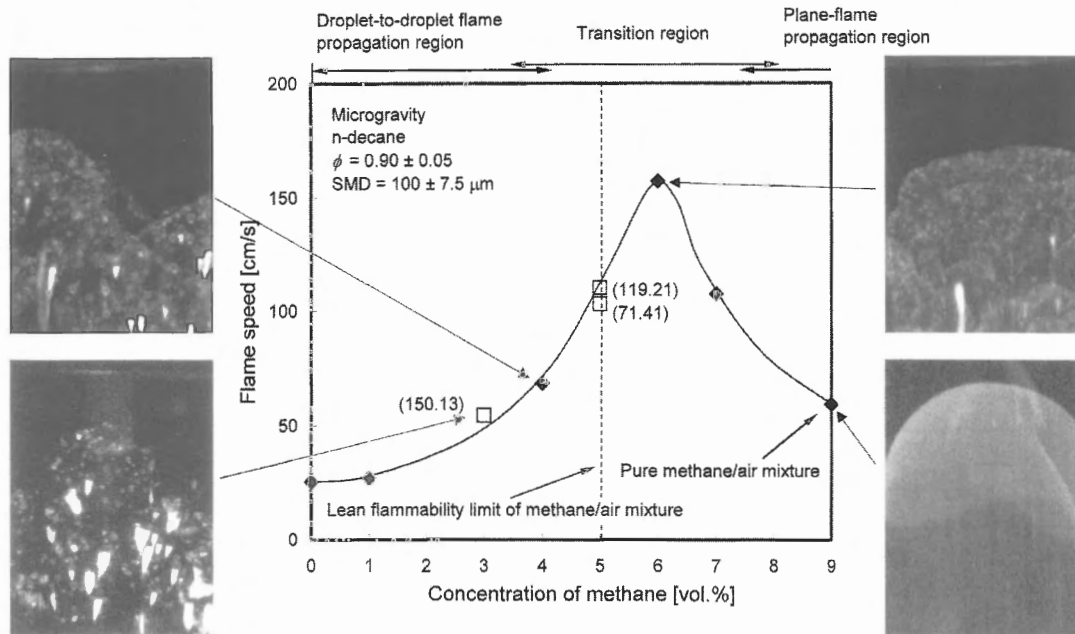


Fig.5 The variation of flame speed with the concentration of methane.

には、メタン濃度 4 vol.% 付近から伝播火炎前縁部にブルーフレームが形成されるのが確認できる。これは火炎の予熱帯内で、特に数 μm のオーダーの正デカン噴霧が蒸発し、予蒸発燃料濃度の上昇に寄与し、その結果、蒸発燃料濃度の総当量比が可燃範囲に入ったため、予混合火炎が形成されたと考えられる。メタン濃度が 6 vol.% 以上になると火炎伝播速度が減少傾向を示すのは、メタン濃度の増加に伴って、噴霧濃度が減少するため、予混合伝播火炎が液滴から受ける影響が次第に小さくなるからである。そして、最終的には滑らかな予混合火炎伝播そのものになり、火炎伝播速度が燃焼速度に相当する値まで減少したと考えられる。実際には、火炎が壁面の影響を受け、完全な平面状とはならないため、実際の燃焼速度より大きな値となっている。

以上のことから、本実験における正デカン/メタン混合燃料噴霧の火炎伝播の形態は図 5 の上部に示したように「飛び石的伝播領域」、「遷移領域」、「平面火炎伝播領域」の概ね 3 つの領域に分けることができる。ここで重要なのは「遷移領域」における噴霧の燃焼メカニズムである。そこで、予混合火炎が噴霧中を伝播するとき、火炎が歪む現象を以下のように考察した。

- ・液滴が蒸発し、液滴周りに気体燃料の高い濃度分布が形成されて予蒸発混合気との濃度の違いにより局所的に燃焼速度が増加する。そのため、火炎面に歪みが生じる。
- ・液滴の存在による熱損失効果、又、障害物としての作用により火炎を歪ませる。

本実験では予混合気濃度と噴霧濃度の制御を容易にするため、噴霧燃料に揮発性の低い正デカンを用いているため、液滴周りに濃度分布が形成されにくい。そのため、図 5 のように、火炎面には凹凸は見られるが、比較的になめらかな火炎面が形成されている。しかし、正オクタンのような揮発性の高い燃料では、正デカン/メタン混合燃料噴霧の場合と異なり、個々の噴霧液滴の蒸発によってのみ燃料と空気の混合気が形成されるため、液滴周りの混合気に濃度分布が存在し、図 3 の正オクタン噴霧に見られるような、より複雑な火炎面をもつ火炎が伝播すると考えられる。

これまでにも、火炎面積の増大が火炎伝播速度の上昇に寄与している事が報告されている[3, 4]が、火炎変形のメカニズムについては言及していない。予混合火炎による液滴の着火については、小林ら[6]が理論解析を行い、角田らや Segawa ら[7, 8]によって実験が行われている。その実験の中で、予混合火炎が液滴を通過するとき、燃料液滴の種類によっては未燃混合気側へ火炎が凸状に変形することが報告されている。そこで、このような火炎変形のメカニズムと火炎伝播速度への影響を解明するため、液滴を通過する予混合火炎の火炎挙動を調べる実験を行い、さらに考察を行った。

3. 液滴を通過する予混合火炎の伝播挙動

3.1. 実験装置および実験方法

図 6 に実験装置の概略図を示す。火炎伝播管は、内径 62 mm、長さ 543 mm の円筒型透明アクリル管を用いた。伝播管上端にはノズルおよびこれを塞ぐシャッターを設けた。また、上端近くにイグナイタとして、一对の放電電極

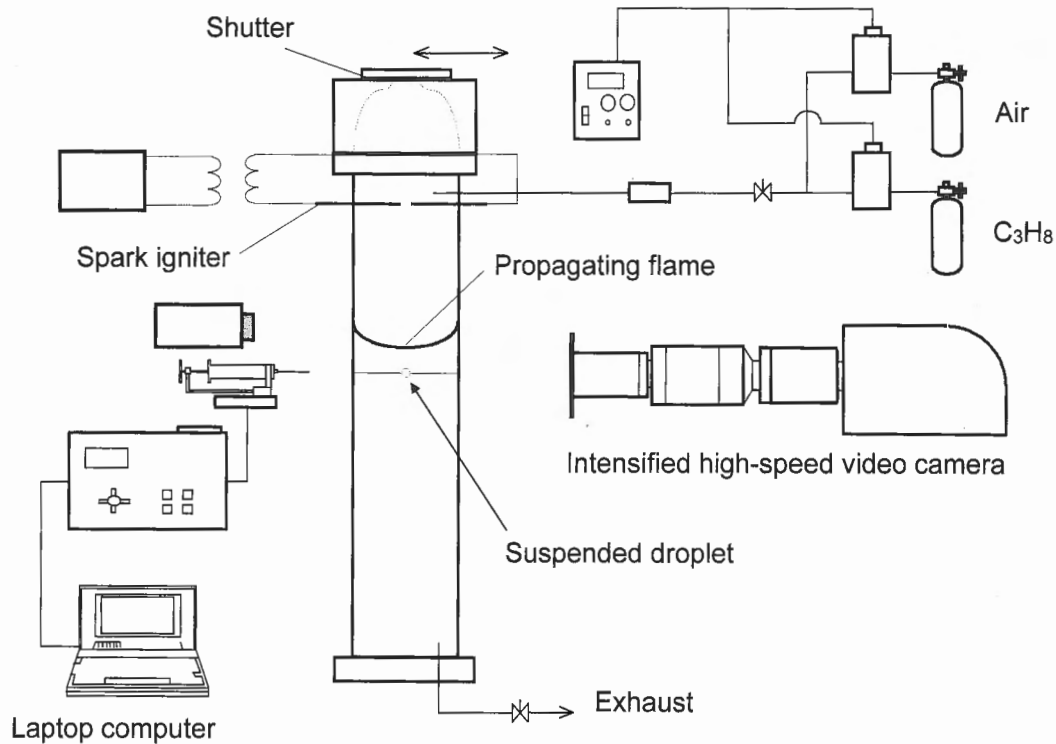


Fig.6 Schematic experimental setup for flame propagation passing through a droplet.

を設置した。実験は、まず密閉された伝播管内を所定の濃度の混合気で完全に置換し、液滴は伝播管中央部に設置した SiC fiber (線径 $14 \mu\text{m}$) に、マイクロシリンジによって懸垂した。液滴懸垂後、シャッターを開き、混合気を着火する。火炎伝播管内に形成された予混合火炎は伝播管上端から下端に向かって伝播し、懸垂液滴を通過する。その時の CH ラジカル自発光の高速度撮影および CCD カメラでの直接撮影を行い、液滴を通過する火炎の伝播挙動の観察、および火炎伝播速度の計測を行った。火炎伝播速度は、図 7 に示すように、高速度ビデオカメラで撮影した火炎の CH 発光の画像から火炎先端の位置を測定し、その相対時間と相対距離の関係から近似直線を求め、その傾きを火炎伝播速度とした。本実験では、2 種類の火炎伝播速度を定義した。伝播する予混合火炎が懸垂液滴に到達するまでの初期火炎伝播速度を V_0 とし、液滴を通過した後の火炎伝播速度を V_1 と定義した。そして、両者の比である V_1/V_0 を火炎伝播速度増加率と定義した。なお、実験に用いた混合気はプロパン/空気混合気であり、本節における当量比とはプロパン/空気混合気の濃度を指す。液滴には正オクタンを用いた。また、水と正デカン液滴としての実験も行い、正オクタン液滴と比較した。水液滴を懸垂液滴に用いた場合、液滴周りには液滴の燃料蒸気は存在せず、液滴周りの混合気濃度分布は変わらない。また、伝播する火炎に対して水液滴からの燃料供給もなく、かつ水液滴自身も着火することはない。つまり、伝播火炎が液滴から受ける影響は、水液滴に対する熱損失による効果と水液滴が障害物

として作用する効果が挙げられ、その条件下での火炎形状の変化を調べることができる。

3.2. 実験結果および考察

前節でも示したように、予混合火炎が液滴を通過するとき、火炎を変形させる要因として、液滴の蒸発によって形成される燃料蒸気の濃度分布による影響と、液滴が火炎伝播の妨げとなる、つまり障害物としての影響が考えられる。そこで、まず燃料の違いによる火炎の伝播挙動の比較を行った。図 8(a) ~ (c) に、それぞれ当量比 0.60 における正デカン液滴、正オクタン液滴および水液滴を通過する伝播火炎の様子を示す。この図から、正デカンおよび正オクタン液滴を通過する火炎では、液滴通過後、火炎は未燃混合気側へと凸状に変形しているのに対し、水を通過する火炎は僅かに既燃側へと凹状に変形するのが確認できるが、その後元に戻り、結果的に殆ど変形しないのが分かる。また、液滴を通過する前後の各々の火炎伝播速度を測定した結果、正デカン液滴と正オクタン液滴の場合は、液滴通過後に火炎変形とともに火炎伝播速度も上昇したが、水液滴についてはほとんど変化しなかった。つまり、本実験の場合、水液滴による火炎変形は僅かに確認できたが、火炎伝播速度に影響を与えるほどの効果がないことが分かった。これは単一液滴の場合であり、実際の噴霧では無数の液滴が存在するので、この火炎変形が火炎伝播速度に全く影響を与えないとは言い切れない。しかし、本実験で行う燃料液滴の実験結果を考察する上で、液滴の存在が火炎伝播速度

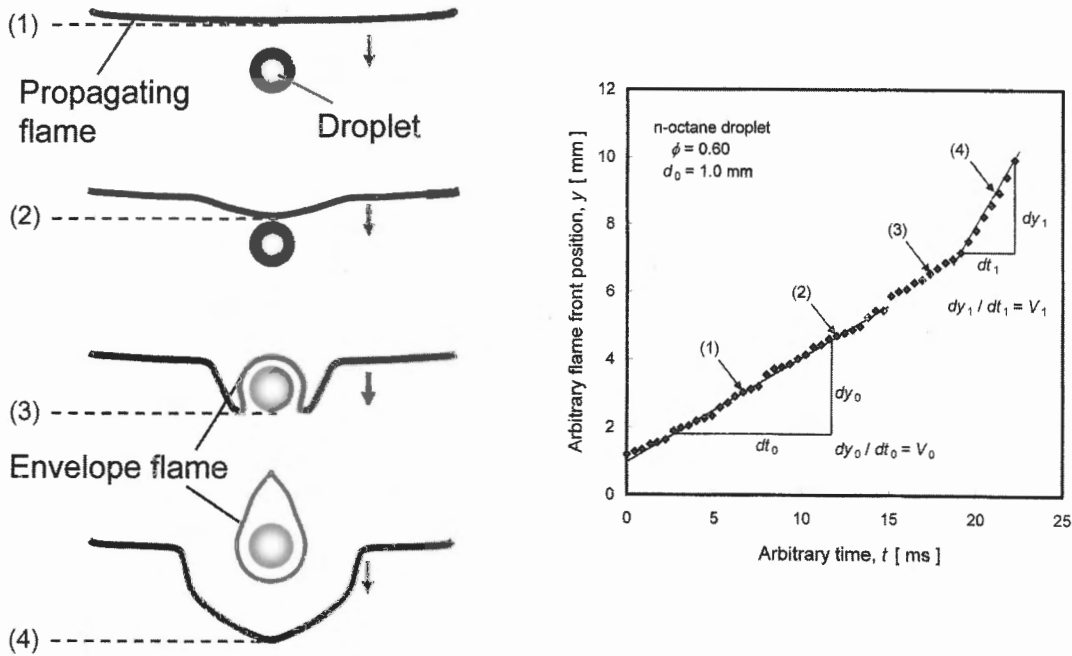


Fig.7 Measurement points of the flame front position and the relationship between the elapsed time and the flame front position.

に与える影響は無視できるほど小さいと考えられる。

次に、正デカン液滴と正オクタン液滴とを比較した場合、火炎は液滴を通過した後に、未燃混合気側へと凸状に変形し、火炎伝播速度が上昇する。その割合は正オクタン液滴の場合の方がより顕著に現れ、火炎伝播速度の増加率も大きい。燃料液滴の場合、火炎が液滴に到達すると、液滴は蒸発し、燃料蒸気が液滴のまわりに生成される。この燃料蒸気によって、火炎伝播速度は増加すると考えられる。また、火炎が液滴を通過すると、液滴周りにエンベロップフレームが形成される。この火炎形成によりガス膨張が生じ、火炎を押し下げるので、火炎が未燃混合気側へさらに歪むと考えられる。ただ、正デカン液滴と正オクタン液滴とでは、揮発性が異なるため、より揮発性の高い正オクタン液滴の場合の方が、液滴周りに燃料蒸気層を形成し易いため、現象がより顕著に現れたと考えられる。しかし、基本的にはどちらも同じような伝播挙動を示すことが実験により明らかになった。そこで本研究では、特に正オクタンについての実験結果についてまとめることにする。

図 9(a) ~ (c) に、それぞれ当量比 0.60, 0.70, 0.80 における正オクタン液滴を通過する伝播火炎の様子を示す。液滴を通過する前後の火炎の観察から、液滴通過後の火炎形状は、液滴を通過する前に比べ、火炎面が、未燃混合気側へ凸状に変形しているのがはっきり確認できる。この変形の割合は正デカン液滴よりも顕著に現れるが、当量比が大きくなるにつれて変形の割合が減少する傾向は、正デカン液滴の場合も同じであった。

本論文には示していないが、液滴の近傍をさらに拡大して撮影した画像から、液滴に近づく伝播火炎は、液滴へ到

達する直前に僅かではあるが液滴側 (未燃混合気側) に変形し始めることが分かった。この傾向は当量比 0.70 および 0.80 では確認できない。つまり、当量比が大きい場合、液滴を通過する前の初期火炎伝播速度 (V_0) が速いため、火炎変形が確認できなかったと考えられる。一方、正デカン液滴の場合には当量比に関係なく、この現象は確認できなかった。

当量比 0.60 における正オクタン液滴を通過する伝播火炎に関して、液滴に到達した火炎は、その後、液滴を迂回して包み込むようにして伝播し、これと同時に液滴周りにはエンベロップフレームが形成されていく。液滴周りで起こるこれらの現象は、液滴から離れた場所で伝播している部分 (火炎変形が起きていない部分) よりも、火炎伝播速度が速くなることに起因し、火炎は未燃混合気側へと凸状に変形していく。このような火炎変形が起こる理由は、正オクタンが揮発性の比較的高い燃料であるため、常温でも蒸発しやすく、予混合火炎が液滴を通過する前に、正オクタン液滴の蒸発により液滴周りに燃料濃度が量論混合比に近い領域 (以後、高濃度場と称する) が形成されることにあると考えられる。さらに伝播火炎が液滴に近づくにつれて、液滴は加熱され、更に蒸発し、液滴周りの燃料濃度は雰囲気よりも高くなる。その結果、液滴近傍を通過する火炎の燃焼速度が部分的に上昇し、火炎が凸状に変形すると考えられる。しかし、火炎が液滴を包み込むようにして伝播する現象は当量比が大きくなるにつれて、観察できなくなり、それとともに、火炎が変形を開始する位置も次第に未燃混合気側へと移動していく。

火炎は、最初に液滴と接した部分から、ちょうど液滴の

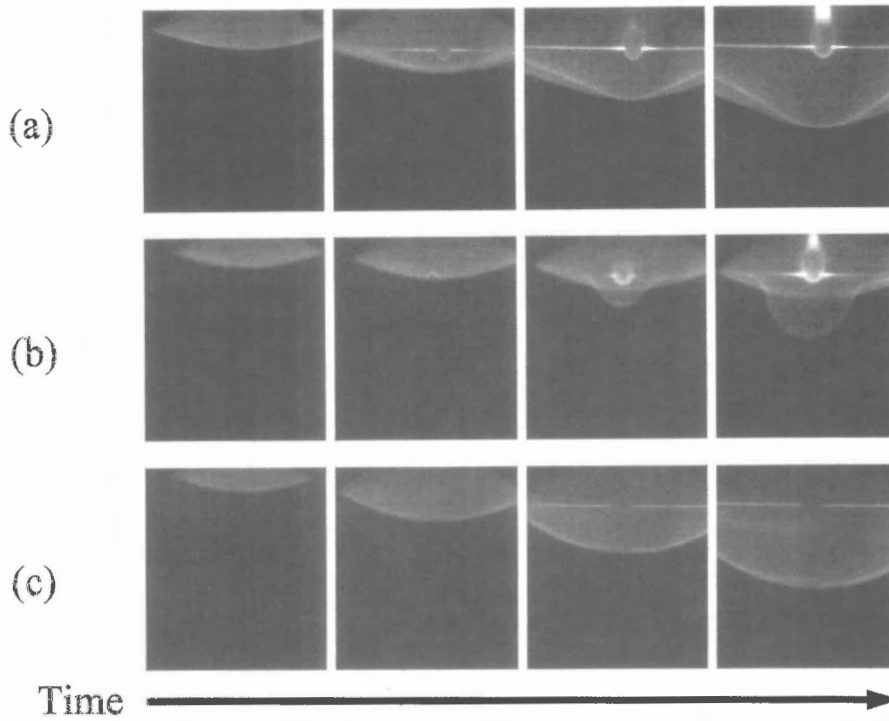


Fig.8 Photographs of the propagation behavior of premixed flame passing through a single droplet; (a) n-decane ($\Delta t = 14.2$ ms); (b) n-octane ($\Delta t = 8.9$ ms); (c) water ($\Delta t = 17.8$ ms). The initial droplet diameter is 1 mm, the equivalence ratio of the mixture is 0.60 and Δt is time interval.

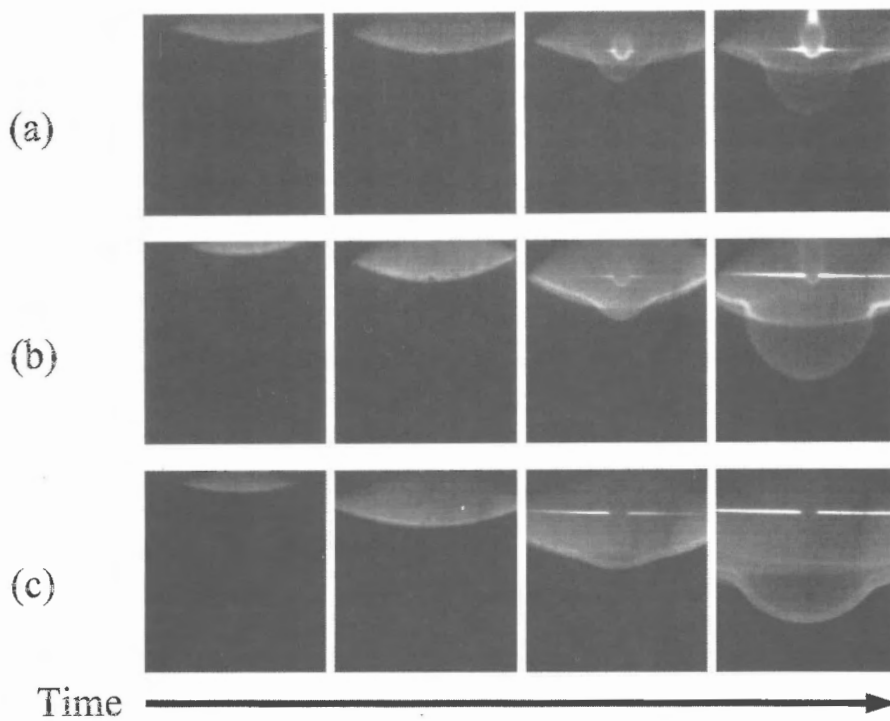


Fig.9 Photographs of the propagation behavior of premixed flame passing through the single n-octane droplet for the equivalence ratio; (a) $\phi = 0.60$ ($\Delta t = 8.9$ ms); (b) $\phi = 0.70$ ($\Delta t = 8.9$ ms); (c) $\phi = 0.80$ ($\Delta t = 8.0$ ms). The initial droplet diameter is 1 mm and Δt is time interval.

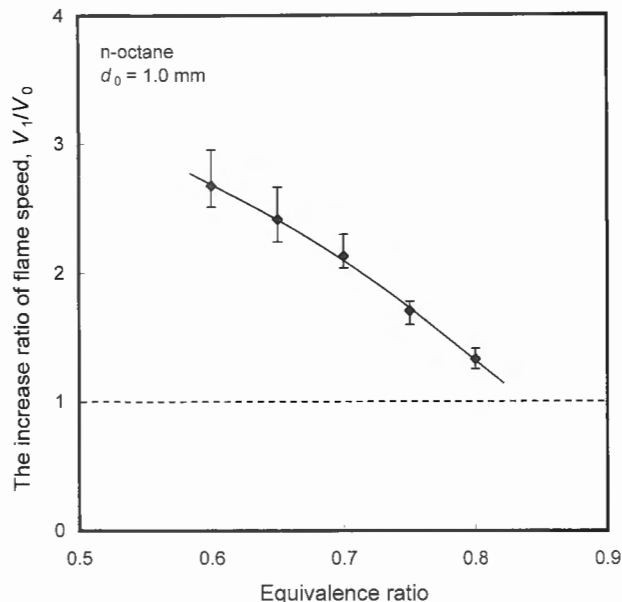


Fig.10 Effects of equivalence ratio on the increase ratio of flame speed.

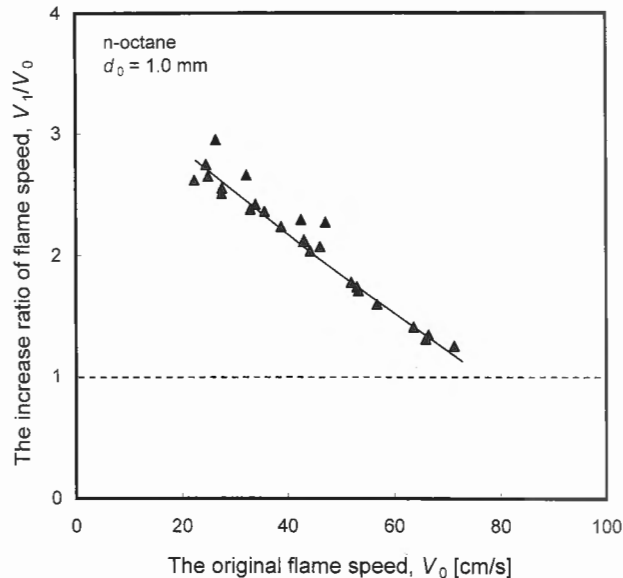


Fig.11 Effects of original flame speed on the increase ratio of flame speed.

中心を基準にして点対称の方向へと凸状に変形していく。液滴の蒸発によって、液滴周りには同心円状に濃度分布が形成されると仮定すると、火炎は液滴まわりの高濃度場に沿って伝播すると考えられる。従って、火炎は液滴に到達した後、液滴周りの燃料蒸気層に沿って伝播して液滴のちょうど裏側で合流し、結果的に凸状に変形すると考えられる。正デカン液滴においても、基本的には同様のことが起こっているはずである。しかし、正デカンは揮発性の低い燃料であるため、火炎が液滴に到達するまでに液滴の蒸発はほとんど起こらない。そのため、正オクタンほどの火炎変形が起こらなかったと考えられる。

また、液滴径を大きくした場合、初期液滴径の増加に伴い、火炎伝播速度増加率は増大する傾向を示すことも確認できた。液滴径が大きくなると、液滴周りに存在する燃料蒸気層がより広範囲に広がり、伝播火炎がその領域を通過する時間も長くなる。その分、伝播火炎が液滴およびその周りの燃料蒸気層から受ける影響も大きくなると考えられる。つまり、液滴周りにおいて、局所的に燃焼速度が増大し、火炎が先行して伝播する部分の火炎伝播速度と、これらの影響を受けない部分の火炎伝播速度の差が大きくなり、変形が助長される。このため、火炎表面積は増大し、液滴通過後の火炎伝播速度はより大きくなると考えられる。

図 10 に、初期液滴径を一定にしたときの当量比と火炎伝播速度増加率 (V_1/V_0) の関係を示す。当量比の増大とともに、増加率は単調に減少し、やがて増加率は 1 ($V_1 = V_0$) に近づく。当量比が大きくなると初期火炎伝播速度も速くなる。つまり、初期火炎伝播速度が遅い場合、火炎は液滴に対してゆっくり近づいていくため、液滴が火炎から受ける影響はより大きくなると考えられる。液滴の蒸発もより進行するので、火炎に及ぼす影響も大きくなる。また、当

量比が大きくなるにつれて、液滴周りの混合気の濃度分布が伝播火炎の局所的な燃焼速度の上昇に与える影響が小さくなるのが考えられる。気体燃料の燃焼速度は、量論混合比付近で最大となる。従って、伝播火炎は液滴周りの量論混合比に近い部分で速くなると考えられる。つまり、液滴を通過することによる火炎伝播速度の上昇は、初期の火炎伝播速度に依存すると言える。そこで、図 10 の横軸を初期火炎伝播速度で改めて整理したものを図 11 に示す。この場合も同様に、初期火炎伝播速度 (V_0) が大きくなるにつれて、増加率は単調に減少し、やがて 1 に近づく。このことから当量比、すなわち初期火炎伝播速度が、増加率を支配する重要なパラメータであると言える。これらの考察から、図 5 のメタン濃度 4 vol.% 以上での火炎伝播機構は基本的に上記と同様の原理により、火炎伝播速度が大きく上昇したと考えられる。しかし、メタン濃度の増大に伴って噴霧濃度は減少するので、火炎が液滴から受ける影響は次第に小さくなり、メタン濃度 6 vol.% 付近で火炎伝播速度が減少に転じたと考えられる。

本研究では単一液滴を用いて実験を行ったが、複数の液滴または噴霧液滴群中を火炎が通過する場合、液滴から受ける影響はさらに複雑になると思われる。しかし、火炎が次々に液滴を通過すると、火炎伝播速度は大きくなるが、図 11 に示すように増加率は次第に減少する傾向があるため、火炎伝播速度は次第に抑えられてある一定値に近づくと思察される。

4. 結言

本研究では、微小重力場を用いて正オクタン燃料噴霧および正デカン/メタン混合燃料噴霧の火炎伝播速度を測定

し、その火炎伝播メカニズムについて考察を行った。また、予混合火炎が液滴を通過する時の伝播挙動を観察することにより、液滴が伝播挙動および火炎伝播速度に及ぼす影響を調べた。当量比が一定の場合、正オクタン噴霧の火炎伝播速度は正デカン噴霧と同様にある平均粒径で最大値をもつが、実験を行った全粒径範囲で、正デカン噴霧の火炎伝播速度よりも3倍程度速くなった。またその火炎伝播の様子は正デカン噴霧の火炎伝播のように、液滴から液滴へと飛び石的に燃え広がる拡散燃焼とは異なり、しわ状層流火炎のような火炎伝播形態をもつことが分かった。これは液滴の蒸発による濃度、および温度場の不均一性により、燃焼速度が局所的に変化して起こると考えられる。

また、正デカン/メタン混合燃料噴霧の火炎伝播において、総当量比一定のもとで雰囲気メタン濃度を0~9 vol.%の範囲で変化させた場合、メタン濃度6 vol.%付近で最大値をもつことが分かった。伝播する火炎の観察から、メタン濃度が、4 vol.%未満の領域では、正デカン噴霧と同様に火炎は飛び石的な火炎伝播をし、4 vol.%以上では、予混合火炎が形成され噴霧液滴群の影響を受けながら伝播した。しかし、メタン濃度の増加とともに噴霧液滴群が減少しその影響を受けなくなるため、最終的には平面予混合火炎伝播へと遷移する。従って、正デカン/メタン混合燃料噴霧の火炎伝播では、概ね3つの火炎伝播領域に分類できる。

予混合火炎が燃料液滴を通過する現象を観察した結果、伝播する火炎は未燃混合気側に凸状に変形し、その火炎伝播速度は増加したが、火炎伝播速度増加率は当量比が大きくなるにつれて減少した。つまり、初期火炎伝播速度の増加に対して、増加率は減少することから、液滴を通過する時の初期火炎伝播速度が重要なパラメータであると言える。従って、噴霧のような無数の液滴の中を予混合火炎が通過する場合、燃料液滴の存在により時間と共に火炎伝播速度は増大するが、火炎伝播速度が大きくなるにつれて、火炎伝播速度増加率は1に近づくので、最終的には火炎伝播速度はある一定の値に収束すると考えられる。

謝辞

本研究は、「微小重力環境を利用した燃料多様化技術の研究開発」の一環として、宇宙環境利用推進センター(JSUP)が、新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)の委託を受けて行われた。微小重力場実験においては当時東北大学大学院の学生であった鈴木素生君、および同大学の長谷川進技官の協力を得た。ここに謝意を表す。

References

1. Burgoyne, J. H. and Cohen, L., *Proc. R. Soc. London*, A225: 375-392 (1954).
2. Ogasawara, M. and Mizutani, Y., *JSME Trans. B* (in Japanese) 31-226: 1002-1025 (1965).
3. Mizutani, Y. and Nakajima, A., *Combust. Flame* 20: 343-350 (1973).
4. Yoshida, H., Arai, M., Hiroyasu, H. and Yokotani, M., *JSME Trans. B* (in Japanese) 57-539: 250-254 (1991).
5. Hayashi, S., Ohtani, T., Iinuma, K. and Kumagai, S., *Proc. Combust. Inst.* 18: 361-367 (1981).
6. Kobayashi, K., Ju, Y. and Niioka, T., *JSME Trans. B* (in Japanese) 64-623: 190-196 (1998).
7. Kadota, T., Kohama, R., Segawa, D. and Tsue, M., *JSME Trans. B* (in Japanese) 65-631: 303-309 (1999).
8. Segawa, D., Kadota, T., Kohama, R. and Enomoto, H., *Proc. Combust. Inst.* 28: 961-968(2000).
9. Reichenbach, R., Squires, D. and Penner, S. S., *Proc. Combust. Inst.* 8: 1068-1073 (1960).
10. Umemura, A., *JSME Trans. B* (in Japanese) 68-672: 2422-2428 (2002).
11. Brzustowski, T. A., Sobiesiak, A. and Wojciki, S., *Proc. Combust. Inst.* 18: 265-273 (1981).
12. Kato, S., Mizuno, H., Kobayashi, H. and Niioka, T., *JSME Int. J., Series B*, 41: 322-330 (1998).
13. Kobayashi, H., Park, J., Iwahashi, T. and Niioka, T., *Proc. Combust. Inst.* 29: 2603-2610 (2002).
14. Ballal, D.R. and Lefebvre, A.H., *Proc. Combust. Inst.* 18: 321-328 (1980).
15. Nunome, Y., kato, S., Maruta, K., Kobayashi, H. and Niioka, T., *Proc. Combust. Inst.* 29: 2621-2626 (2002).
16. Nomura, H., Izawa, K., Ujiie, Y., Sato, J., Marutani, Y., Kono, M. and Kawasaki, M., *Proc. Combust. Inst.* 27: 2667-2674(1998).
17. Nomura, H., Koyama, M., Miyamoto, M., Ujiie, Y., Sato, J., Kono, M. and Yoda, S., *Proc. Combust. Inst.* 28: 999-1005 (2000).
18. Chiu, H. H., Kim, H. Y. and Croke, E. J., *Proc. Combust. Inst.* 19: 971-980 (1982).