

氏名	ぬのめよしお		
授与学位	布目佳央 博士(工学)		
学位授与年月日	平成16年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 航空宇宙工学専攻		
学位論文題目	燃料噴霧における火炎伝播速度とそのメカニズムに関する研究		
指導教官	東北大学教授 新岡 嵩		
論文審査委員	主査 東北大学教授 新岡 嵩	東北大学教授 升谷 五郎	
	東北大学教授 小林 秀昭	東北大学教授 齋藤 武雄	(環境科学研究科)

## 論文内容要旨

### 第1章 緒論

本論文の研究対象である噴霧燃焼は、実用燃焼器や工業炉などで一般に用いられている燃焼形態であり、今後の研究および技術開発には、噴霧燃焼の基本特性である火炎挙動や燃焼挙動を十分に理解しておくことが不可欠である。しかし噴霧燃焼は、燃焼現象の複雑さと系統的実験の困難さにより、その基本的な燃焼メカニズムは十分に解明されているとは言い難い。通常重力場においては、重力による液滴の沈降や、燃焼に伴う強い自然対流の影響も受けるため、燃焼現象は一層複雑になる。そこで、本研究では、微小重力場を利用することで、液滴の沈降と自然対流の影響を排除した実験を可能とし、雰囲気中に静止する理想的な噴霧の生成を実現させた。本研究は、噴霧燃焼の基礎的特性の一つである火炎伝播速度を測定し、火炎伝播の様子を観察する事により、噴霧の火炎伝播メカニズムを解明することを目的としている。燃料には、沸点の異なる2種類の炭化水素系燃料である n-decane と n-octane を用い、前者は燃料の予蒸発が無視できる高沸点燃料として、後者は予蒸発が無視できない低沸点燃料として実験を行い、両者の火炎伝播メカニズムの違いについて検討し、各々の火炎伝播モデルの考察を行う。

### 第2章 高沸点燃料噴霧の燃焼実験

噴霧の基礎特性の一つである火炎伝播速度を測定し、高沸点燃料噴霧の火炎伝播メカニズムを調べるために、微小重力場において n-decane 噴霧の火炎伝播実験を行った。微小重力場実験には、北海道上砂川町にある地下無重力実験センター(JAMIC)の落下坑を利用した。本実験装置は火炎伝播管、レーザー光散乱方式粒度分布測定装置(LDSA)、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。火炎伝播管は内径 62 mm、長さ 535 mm の円筒形の透明アクリル管で、上方は二流体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、下方は開放端になっている。噴霧は閉鎖端中央に取り

付けられた二流体噴射弁によって、この伝播管内に生成される。伝播管内に生成された噴霧の粒径分布および濃度の計測にはLDSA装置を用いた。そしてその計測終了後、イグナイタによって噴霧に点火し、火炎を閉鎖端へと伝播させ、その様子を CCD カメラによって記録した。

伝播する火炎の画像から火炎伝播速度を計測し、当量比一定の基での平均粒径と火炎伝播速度の関係を調べた。その結果、どの当量比においても、ある平均粒径で火炎伝播速度は最大を持つことが分かった。また図1に示すように、火炎伝播の詳細な観察を行い、沸点の高い燃料、すなわち予蒸発が無視できる系では、各々の液滴周りにエンベロープフレイム(envelope flame)が形成され、液滴から液滴へと飛び石的に伝播していく現象が確認できた。それゆえ、高沸点燃料噴霧の基本的な火炎伝播メカニズムは液滴から液滴へと火炎が燃え広がる現象であると言える。



図1 n-decane 噴霧の伝播する火炎の先端部

### 第3章 高沸点燃料噴霧の燃焼メカニズム

n-decane 噴霧の基本的な火炎伝播メカニズムは、液滴から液滴へと火炎が燃え広がる現象である事から、液滴列の燃え広がり理論によって説明できると考えられる。液滴列の燃焼において、火炎から液滴への熱輸送は火炎半径 ( $d_f/2$ ) と液滴間隔 ( $S$ ) に依存するため、火炎の燃え広がり速度は基本的に  $S/d_f$  によって決まる。事実、n-decane 液滴列の燃え広がり実験において、その燃え広がり速度は横軸に  $S/d_f$  を用いて整理した場合、一本の曲線上に乗り、 $S/d_f = 0.5$  で燃え広がり速度は最大となる。つまり液滴間隔と火炎半径が等しくなるとき、燃え広がり速度は概ね最大となる。そこで、本研究における n-decane 噴霧の火炎伝播速度がある平均粒径で最大値を持つ原因を液滴列の理論に基づいて考察した。

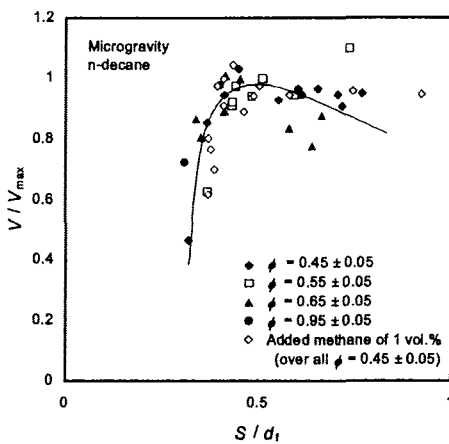


図2 平均液滴間距離と火炎伝播速度の無次元表示

そこで、図1のような拡大写真で確認できるエンベロープフレイムから火炎径を測定し、平均液滴間距離を実験の実験値を基に計算した。

その結果、平均液滴間距離と火炎半径が等しくなる平均粒径が存在し、その値は火炎伝播速度が最大となる平均粒径と概ね一致することが分かった。また図2に示すように、全ての火炎伝播速度の実験データを  $S/d_f$  で整理した場合、全実験データは概ね一本の曲線上に乗り、 $S/d_f = 0.5$  付近で最大となることが分かった。これは n-decane

液滴列の理論と同様の傾向であり，n-decane 噴霧の火炎伝播メカニズムは液滴から液滴へと火炎が燃え広がる液滴列の燃え拡がりによって説明できるという新しい知見を得た。

#### 第4章 低沸点燃料噴霧の燃焼実験

本章では，低沸点燃料噴霧の火炎伝播メカニズムを調べるために，微小重力場において n-octane 噴霧の火炎伝播実験を行った。実験装置は，第2章の n-decane 噴霧の燃焼実験で用いたものと同様である。

図3は，n-octane 噴霧の伝播する火炎の拡大写真である。n-octane 噴霧の火炎伝播は，n-decane 噴霧の火炎伝播とは大きく異なり，火炎が伝播する前に幾分か燃料が蒸発し，噴霧燃料が気液混相の状態が存在するため，火炎面で無数の凹凸，あるいは球状火炎を伴った予混合火炎に近い火炎伝播を持つ。そして，その火炎伝播速度は，n-decane 噴霧に比べて3～4倍大きいことが分かった。これは燃料の予蒸発によって雰囲気中に生成された予混合気は可燃下限濃度以上になるため，予混合火炎が十分に伝播し得る環境になっている事が大きな要因である。そして，予混合火炎は多数の液滴を通過して伝播するため，平面とならず，凹凸形状になる。それゆえ，火炎面積が増大し，火炎伝播速度が大きくなったと考えられる。



図3 n-octane 噴霧の伝播する火炎の先端部

そこで，雰囲気中に存在する蒸発燃料が噴霧の火炎伝播にどのような影響を及ぼすかを調べるために，n-decane/methane 混合燃料噴霧の火炎伝播実験を行った。当量比一定のもとで，雰囲気に加える methane 濃度を変化させ，その火炎伝播の様子を観察し，火炎伝播速度の測定を行った。その結果，methane 濃度を変化させた場合，概ね3つの火炎伝播形態をもつことが明らかになった。また，遷移領域においては予混合火炎が噴霧中を伝播するため，火炎面に無数の凹凸が生じ，その火炎伝播速度は n-octane 噴霧と同様に速くなる。そして，methane 濃度 6 vol.%付近で火炎伝播速度は最大値を持つことが分かった。

#### 第5章 液滴を通過する予混合火炎の火炎挙動

予混合火炎が液滴群を通過する時に起こる火炎形状変化が火炎伝播速度に及ぼす影響を調べるために，懸垂した単一液滴および二液滴列を通過する予混合火炎の火炎挙動を調べた。火炎伝播管に propane/air 混合気を当量比  $\phi = 0.60 \sim 0.85$  の範囲で充填し，火炎伝播管内に液滴を懸垂させる。液滴の懸垂には線径 14  $\mu\text{m}$  の SiC 細線を用いた。そして，懸垂する燃料液滴には n-decane, n-octane, および水を用いた。液滴を通過する火炎の様子をハイスピードビデオカメラで撮影し，その画像より火炎伝播

速度を計測した。その結果、予混合火炎は燃料液滴通過後、未燃混合気側へ凸状に変形し、火炎伝播速度は増加した。一方、水液滴を通過する火炎では火炎形状変化は起こらず、火炎伝播速度も液滴を通過する前後で変化しなかった。燃料液滴の場合、液滴は時間とともに蒸発し、液滴周りに燃料蒸気層が形成されるため、火炎は変形し、火炎伝播速度は増加する。また、火炎が液滴を通過すると、液滴周りにエンベロープフレイムが形成される。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と歪むと考えられる。この現象は当量比が大きくなるにつれて、現れにくくなる。また、火炎が液滴を通過する前後の火炎伝播速度の比である増加率は、当量比が大きくなるにつれて、単調に減少し、その値は1に近づく。当量比 $\phi < 1.0$ の範囲では、当量比が大きくなると火炎伝播速度も大きくなることから、横軸を火炎伝播速度で整理した場合、火炎伝播速度の増加とともに火炎伝播速度の増加率は単調に減少した。従って、無数の液滴を通過する噴霧の火炎伝播においては、はじめ火炎伝播速度は増加するが、火炎伝播速度の増加に伴い、その増加率は次第に減少し、1に近づくので、火炎伝播速度はある一定値に収束すると考えられる。

## 第6章 結論

噴霧の火炎伝播メカニズムを解明するため、微小重力場を用いて実験を行った。そして、噴霧の火炎伝播速度を計測し、また伝播する火炎の観察を行い、以下の知見を得た。

1. 高沸点燃料である n-decane 噴霧の火炎伝播速度は、当量比一定の場合、ある平均粒径において最大となり、その火炎伝播は個々の液滴周りにエンベロープフレイムが形成され、液滴から液滴へと飛び石的に伝播するメカニズムをもつ。
2. n-decane 噴霧の火炎伝播速度の全データを平均液滴間距離と火炎径の比である  $S / d_f$  で整理した場合、全てのデータが一本の曲線上に乗り、 $S / d_f = 0.5$  付近で最大値をもつ。つまり、n-decane 噴霧の火炎伝播メカニズムは液滴列の燃え拡がりの理論によって説明できると思われる。
3. 低沸点燃料である n-octane 噴霧の火炎伝播は n-decane 噴霧とは異なり、しわ状層流火炎のような伝播形態を持つ。そして、その火炎伝播速度は、n-decane 噴霧に比べて、3倍程度速くなる。
4. 当量比一定のもとで、methane 濃度を変化させた場合、n-decane/methane 混合燃料噴霧の火炎伝播は概ね3つの火炎伝播領域に分類でき、その火炎伝播速度はmethane 濃度6 vol.%付近で、最大となる。
5. 予混合火炎が液滴を通過するとき、火炎は未燃混合気側へ凸状に変形し、火炎伝播速度は増加する。この現象は、当量比、あるいは液滴に突入する火炎伝播速度が大きくなるにつれて現れにくくなる。

# 論文審査結果の要旨

燃料噴霧の火炎伝播速度は噴霧燃焼の基本特性の一つであり、その特性を把握することは噴霧の火炎伝播メカニズムを解明し、噴霧の火炎伝播モデルを構築する上で極めて重要である。本論文は、微小重力場を用いて、空間に均一に分散させた静止噴霧を生成し、燃料噴霧の基本的な火炎伝播メカニズムに関する実験的研究結果をまとめたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では、微小重力場において高沸点燃料噴霧の燃焼実験を行い、当量比一定の条件下で、噴霧の火炎伝播速度がある平均粒径で最大値をもつことが明らかにされている。また、火炎伝播の観察を行い、火炎が液滴から液滴へと飛び石的に伝播する様子が観察されている。微小重力場における、このような実験結果はこれまでに例がなく、本実験は、高沸点燃料噴霧の火炎伝播に関する研究に大きな進展を与える。

第 3 章では、高沸点燃料噴霧の火炎伝播メカニズムについての考察を行い、そのメカニズムが液滴列の燃え拡がりの理論から説明できることを明らかにしている。その中で、火炎半径と平均液滴間距離が高沸点燃料噴霧の火炎伝播速度を支配する重要な因子であることを実験および計算の両面から明らかにしている。これらは、高沸点燃料噴霧の火炎伝播モデルを構築する上で重要な知見である。

第 4 章では、微小重力場において低沸点燃料噴霧の燃焼実験を行い、燃料の蒸発により形成される可燃性混合気が噴霧の火炎伝播に及ぼす影響を明らかにしている。そして、高沸点燃料噴霧との違いを明確にし、噴霧の火炎伝播を系統立てて説明している。これらは新しい知見であり、重要な成果である。

第 5 章では、予混合火炎が液滴を通過するときの火炎挙動を観察し、火炎が未燃混合気側へ凸状に変形し、火炎面積を増大させて火炎伝播速度が上昇することを示している。このとき液滴を通過する前の火炎伝播速度が重要な因子であることを明らかにしている。これらは低沸点燃料噴霧の火炎伝播メカニズムを解明する上で重要な結果と知見である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、燃料噴霧の火炎伝播メカニズムを解明し、燃料の揮発性の違いによる火炎伝播メカニズムの違いおよび基本現象を支配する因子を明らかにしたもので、航空宇宙工学及び燃焼工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。