

## 液滴間隔の広い条件における燃料液滴列燃焼挙動の観察

日大生産工(院) ○高橋 智

日大生産工 菅沼 祐介 日大生産工 野村浩司

### 1. 緒言

近年、人類の活動が地球環境に及ぼす影響が顕著になっている。その代表的な例が地球温暖化である。地球温暖化の原因としては、二酸化炭素やメタンといった温室効果ガスの排出増加であり、特に排出量の多い二酸化炭素が議論の対象となっている。この二酸化炭素の排出の主な要因は化石燃料を用いた発電や自動車、航空機などの内燃機関を用いた輸送機械である。これに対し、日本政府は2035年までに乗用車の100%電動化を目標としている。しかしながら、輸送機械の電動化は発電の脱炭素化を行わなければ根本的な解決とはならない。また、インフラ整備の観点からも、完全な電動化は難しく内燃機関はこれからも使用されることが考えられる。そこで本研究では航空機や大型自動車の内燃機関に採用されている噴霧燃焼という燃焼方式に着目をした。この噴霧燃焼は燃料の微粒化、熱伝達、蒸発、拡散、点火、火炎伝播といった現象が同時多発的に発生するため非常に複雑であり、液滴群燃焼のメカニズムは完全に解明されていない。そのため、より環境適合した内燃機関の開発を行うためには、現象を詳細に把握し燃焼シミュレーションの高度化を進める必要がある。また、e-fuelに代表されるカーボンニュートラル燃料の適応を見据えた場合、内燃機関の環境適合は急務である。噴霧燃焼の基礎研究として過去の研究ではこの群燃焼メカニズム解明を目的として最小構成単位である単一液滴や液滴を複数個並べた燃料液滴列を用いた実験が行われてきた<sup>1)</sup>、三上らは燃料液滴列を用いて燃え広がり速度に及ぼす周囲気体温度の影響を明らかにした<sup>1)</sup>。梅村は燃料液滴列の火炎伝播において、液滴間隔により火炎が伝わる様子の変化することを3つモードにわけて解説を行った<sup>2)</sup>。今まで行われてきた研究の多くは液滴の大きさを0.8 mm~1.0 mmとしており、これは実機における噴霧の液滴直径と比較して数十倍から百倍ほどと非常に大きい。液滴直径が異なる条件であっても、液滴間隔と燃え広がり速度を初期液滴直径で正規化することにより、実験結果から実機に

おける現象を推測できると考えられてきた。しかしながら、先行研究により、一定の条件下で火炎燃え広がり速度において液滴直径に対する相似則が成り立たないことが示された<sup>3)</sup>。そのためこれまでの研究による実験結果から実機での現象を推測することは困難であると示された。そこで本研究では液滴列燃焼実験を行い、初期液滴直径が火炎燃え広がり及ぼす影響について調べ、燃え広がり支配的要因について考察した。

### 2. 実験条件および実験手順

Fig.1に実験装置の概略を示す。実験装置は主に内部モジュール(液滴列生成装置、液滴列移動装置、液滴列支持装置、点火装置を含む)、圧力容器、カメラなどの光学機器、制御装置、無線LANインタフェース、電源系統で構成されている。液滴列生成装置は、燃料液滴を懸垂線上に生成するための装置である。燃料供給用ピエゾポンプ、テフロンチューブ、ステンレス管、液滴懸垂用ガラス針から構成されている。ガラス針は、先端がおよそ40  $\mu\text{m}$ でありステッピングモーターとカム機構を併用して上下移動させる。このガラス管の先端より燃料を吐出させ、懸垂線上に液滴を生成する。Fig.2に液滴列支持装置の概要を示す。液滴列支持装置は外径1.0 mm、内径0.8 mmのステンレス管を曲げて加工して作られたフレーム部とそのフレームを支えるH型のベース部から構成される。フレーム部には懸垂線として直径14  $\mu\text{m}$ のSiCファイバを等間隔で固定し、懸垂線の中心にガラスビーズを取り付ける。懸垂線を張る際には専用の治具を用いた手作業で行い、耐熱性無機接着剤を用いて固定する。点火装置は、直径0.29 mmの鉄クロム線に通電して発熱させ、第1液滴に点火する熱線点火方式を採用している。主な実験条件をTable.1に示す。燃料は正デカンを用いる。気圧は大気圧、室温(25 $\pm$ 5 $^{\circ}\text{C}$ )とし、実験はFig.3で示されている学内の小型落下塔(全高8.6 m、自由落下距離5.4 m、減速部0.9 m、微小重力時間は約1.1秒)を用いて行う。初期液滴直径  $d_0$  は、0.35, 0.7,

Observation of fuel droplet row combustion behavior under conditions with wide droplet spacing

Satoshi TAKAHASHI, Yusuke SUGANUMA and Hiroshi NOMURA

0.9 mmの3条件で実施し、液滴の個数は初期液滴直径  $d_0$  が0.35 mmの条件では10個、0.7 mm条件では6個、0.9 mmの条件では5個とした。これに伴い初期液滴直径は  $d_0$  が0.35mmの条件では第3液滴から第9液滴、0.7 mmの条件では第2液滴から第5液滴、0.9 mmの条件では第2液滴から第4液滴の平均値とした。初期液滴直径  $d_0$  および液滴間隔  $S$  の精度は $\pm 5\%$ である。液滴直径の計測は通常重力環境で行うため、液滴は重力により鉛直方向に伸びた回転楕円体となる。液滴の直径はこの回転楕円体の体積と等しい体積の球の直径とした。液滴直径の計測にはLEDバックライトとCCDカメラを用いる。Fig.4に液滴直径の解析方法を示す。CCDカメラの撮影速度は30 fpsとして液滴直径の計測誤差を抑えるため、画像背景の輝度を $170\pm 20$ とした。目標液滴の画像アドレス情報、画像上の目標液滴位置情報(X軸のピクセル、Y軸のピクセル)および画像の拡大率を自作の解析プログラムに組み込み液滴直径を計測した。液滴直径はデジタルデータに変換した画像を2ピクセルラインごとに分割し、各分割領域の輝度をX軸方向に平均して、その分割領域のY軸方向の輝度分布を得た。得られた輝度分布から、分割領域の雰囲気部平均輝度と液滴部平均輝度を1対2に内分する輝度を示す最もお互いに離れたピクセルの組みの位置を求め、これを液滴の輪郭位置とした。各分割領域において液滴の輪郭を求めた後、それらを最小二乗法によりY軸と平行な軸を持つ楕円に近似し、その軸周りに回転させた回転楕円の体積を求めた。得られた体積を等しい体積の球の直径を液滴直径と定義した。また点火時刻は、液滴を保持するSiCファイバの発光を高速カラービデオカメラを用いて撮影し数値化する。SiCファイバが赤熱した際、画像の懸垂線が赤熱した部分の赤色輝度レベルが増大し青色輝度レベルがあまり変化しないことを用いて点火時刻を定義した。SiCファイバが赤熱した際に画像上の対応した部分の輝度レベルが増大することを利用し、またSiCファイバが加熱されてから発光するまでの反応時間は約1 msとなることを考慮し高速カメラで撮影された連続画像の輝度レベルが連続的に閾値を超える最初の時刻の1コマ前の時刻を点火時刻とした。Fig.5に燃え広がり速度の定義を示す。点火時刻と液滴位置の関係から、各実験のプロットを最小2乗法で直線近似を行い、この直線の傾きを各実験の燃え広がり速度  $V_f$  とする。また、異なるスケールでの実験結果の比較・論議を可能にするため、燃え広がり速度  $V_f$  に各実験で得られた初期

液滴直径  $d_0$  を乗じた。正規化燃え広がり速度は  $V_f d_0$  を用いる。

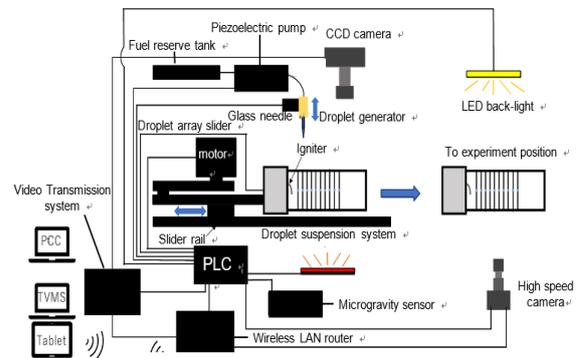


Fig.1 実験装置概要

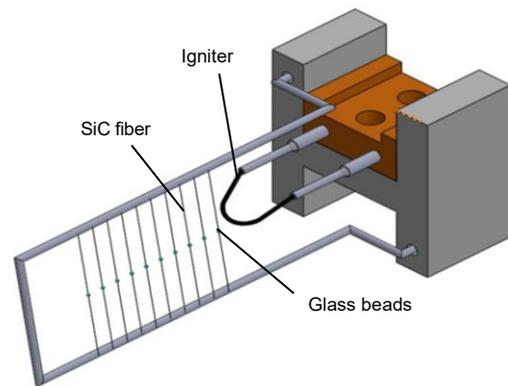


Fig.2 液滴列支持装置

Table.1 実験条件

Gravity	Microgravity		
$P_a$ [MPa]	0.1		
Fuel	<i>n</i> -decane		
Temperature[°C]	25 ± 5		
$S/d_0$	6		
$S$ [mm]	5.4	4.2	2.1
$d_0$ [mm]	0.9	0.7	0.35
Droplet number	5	6	10
$V_f$ Target droplets	2nd~4th	2nd~5th	3rd~9th



Fig.3 学内小型落下塔

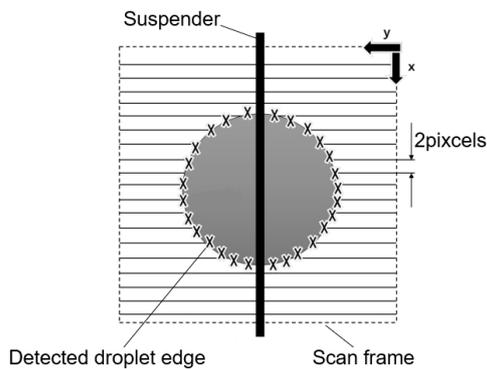


Fig.4 液滴直径解析

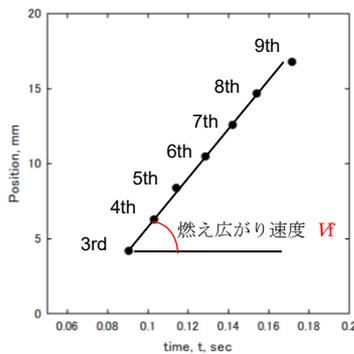


Fig.5 燃え広がり速度の定義

### 3. 実験方法および測定方法

Fig.6に高速度カメラで撮影された連続画像から、第3、5および第7液滴が点火した瞬間の画像を示す。図中の白丸は液滴位置を示す。液滴に沿って燃え広がる火炎によって懸垂線が発光していることが確認できる。また、Fig.7に通常重力環境と微小重力環境での燃焼の様子を示す。通常重力環境での実験では火炎が画像の上方向に伸びていることが確認できる。一方で微小重力環境では、燃え広がる火炎は上下対称な火炎となることがわかる。

高速度カメラの画像より得られた点火の時間履歴をFig.8, 9および10に示す。特に  $d_0 =$

0.9mmの条件において第1液滴と第2液滴間の傾きが第2液滴以降の傾きとの違いとばらつきが顕著に表れている。点火の影響を避けるため、燃え広がり速度の算出においては第2液滴以降の近似平均としている。

Fig.11 に無次元液滴間隔と正規化火炎燃え広がり速度の関係を示す。これまでは異なる液滴直径の結果であったとしても、無次元液滴間隔が同一であれば正規化火炎燃え広がり速度は一致するとされてきた。このため、正規化を行うことにより初期液滴直径の大きい微小重力場における実験結果から実機サイズの液滴直径の現象を推測することができる相似則が成り立つと考えられていた。しかしながら、先行研究において無次元液滴間隔が2および3で初期液滴直径が 0.48 mm まで小さくなると相似則が成り立たないことが示された。一方で、無次元液滴間隔が5の条件では初期液滴直径の大きさに関わらず相似則が成立していることも示された。本研究で無次元液滴間隔が6の条件においても、無次元液滴間隔が5の場合同様に成立することが明らかとなった。これは3条件ともに梅村によって示された火炎燃え広がりモードが3となっており、熱伝導時間が支配的となったことが原因と考えられる。

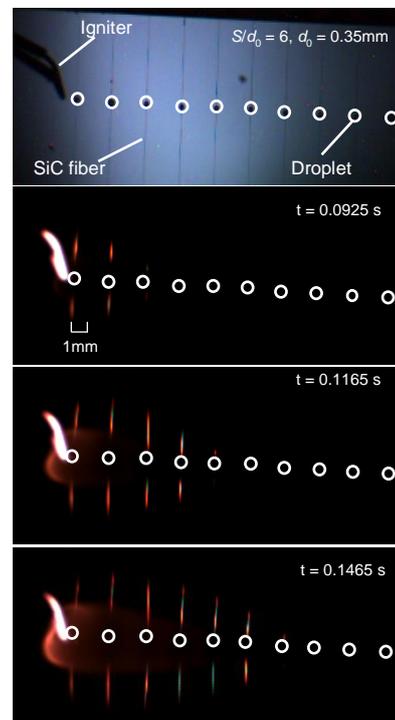


Fig.6 点火時刻と液滴位置の関係

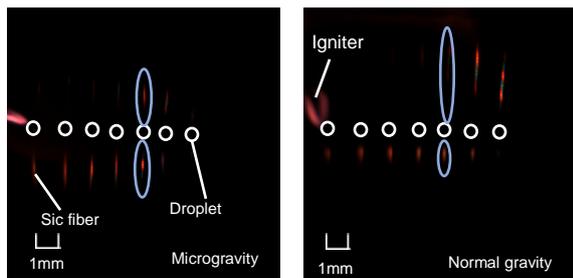


Fig.7 重力環境による火炎形成の違い

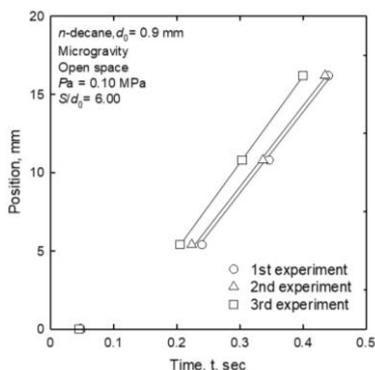


Fig.8 点火時刻と液滴位置の関係( $S/d_0 = 6$ ,  $d_0 = 0.9$  mm)

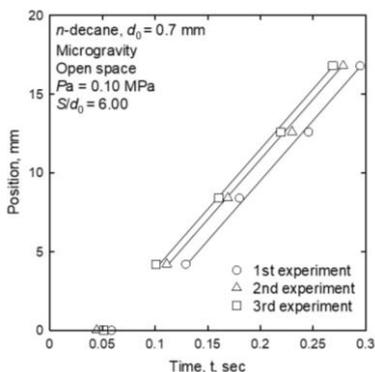


Fig.9 点火時刻と液滴位置の関係( $S/d_0 = 6$ ,  $d_0 = 0.7$  mm)

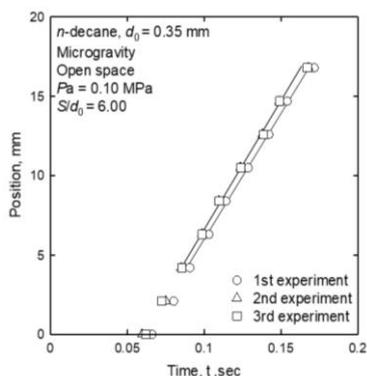


Fig.10 点火時刻と液滴位置の関係( $S/d_0 = 6$ ,  $d_0 = 0.35$  mm)

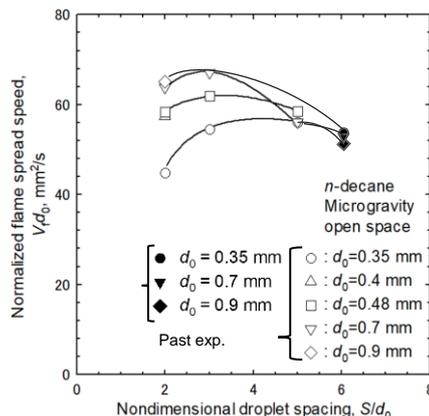


Fig.11 点火時刻と液滴位置の関係( $S/d_0 = 6$ ,  $d_0 = 0.9$  mm)

#### 4. まとめ

燃え広がり速度  $V_f$  を初期液滴直径  $d_0$  で正規化した場合、液滴直径の大小にかかわらず無次元液滴間隔が 6 の条件では正規化火炎燃え広がり速度  $V_f d_0$  が同等になり相似則が成立する。

#### 5. 参考文献

- 1) 三上 正人, 小島 直哉, 大八木 大史, 菊池 正雄, 若島 雄一郎, 依田 真一, 微小重力場における高温条件での燃料液滴列の燃え広がり挙動, 日本燃焼学会誌, Vol.46, No.135 (2004), Page.42-49
- 2) 梅村 章, 微小重力下での直線燃料液滴列に沿った火炎伝播, 日本機械学会論文集 (B編), 68 巻 672 号 254-260, (2002)
- 3) Yusuke Suganuma, Noriyuki Ikeyama, Hiroshi Nomura, Yasushige Ujiie, Droplet Array Combustion Experiments on Effect of Initial Droplet Diameter on Flame Spread Characteristic Tim, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 60, No. 3, pp. 127-131 (2017)