ISSN 2186-5647

3-13

初期液滴直径が火炎燃え広がり挙動に及ぼす影響

日大生産工(院)　○十文字　慎　　日大生産工　菅沼　祐介
日大生産工　野村　浩司

1.　緒言

近年一次エネルギに代わる再生可能エネルギが普及し始め,内燃機関においてもバイオマス燃料やe-fuel などの研究が進んでいる．各国が脱炭素社会の実現に向けて動いているが, インフラ設備や充電時間の観点, 再生可能エネルギも環境に左右されることからも内燃機関に頼らざるを得ない国や地域がほとんどである．今ある内燃機関の熱効率向上が必要不可欠であり, 内燃機関のメカニズムの解明の重要性は無視することができない．そこで，我々は液滴燃焼の現象を解明することが早期の解決策として有効であると考え、ディーゼル機関やガスタービンエンジンの燃焼器に使われている噴霧燃焼について着目した. 噴霧燃焼のメカニズムは様々な現象が同時に進行し, 解析が困難であるため, 噴霧燃焼を単純な形にモデル化した, 最小構成単位である単一燃料液滴や液滴を複数個並べた液滴列燃焼の実験が行われている．基礎研究として, 梅村らによる液滴列の火炎伝播モード[1)]，三上らによる燃え広がり速度に及ぼす周囲気体温度の影響[2)]が示されている．過去に行われた実験では, 燃料液滴列の初期液滴直径は時間的・空間的分解能の確保するため, 約0.8~1.0 mmの液滴直径が多く用いられてきた．実機の噴霧の液滴直径は数μmから十数μm程度であるが, 初期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で, 観察可能なサイズの液滴を用いた実験結果から実機における現象を推測することが可能であると考えられてきた．しかしながら，先行研究において初期液滴直径と液滴間隔をパラメータとした微小重力環境下での液滴列火炎燃え広がり実験では, 無次元液滴間隔が2及び3，無次元液滴間隔が3.75で初期液滴直径が0.48 mm以下の条件では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立しないことが示された[3)]．これによって, これまで得られた燃え広がりの実験の結果から実機における現象を推測することが困難であると示された．そこで，本研究では燃え広がりにおける初期液滴直径依存性を解明するために, 燃え広がり速度を示す数学モデル構築に取り組んできた．本報では，無次元液滴間隔が比較的狭い条件において, データのばらつきを抑えるために液滴間隔および初期液滴直径のデータの精度を向上させて, 液滴列燃焼実験を行い, 初期液滴直径が火炎燃え広がりに及ぼす影響について調べ, 燃え広がりの支配的要因について考察した.

2.　実験装置および実験方法

図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，直径1 mmの細管をプーラを用いて引き延ばされることによって製作し, 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．ガラス針の先端直径は約40 μmである．ガラス針先端は懸垂線に接触しないが, 懸垂線の中点に取り付けた液滴列の支持を目的とするガラスビーズの近傍に配置する. 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した後，ガラス管を後退させ，液滴列移動装置により液滴列支持部を液滴間隔分移動させる．この動作を液滴個数分だけ繰り返し，液滴列を生成する．図2に液滴列支持装置を示す．外径0.6 mm，　内径0.4 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（直径14 μmのSiCファイバ）を等間隔で固定し，懸垂線の中点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, 固定は耐熱性無機接着剤で固定する. 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．
燃料には正デカンを用いる．雰囲気は大気圧, 室温(25±5℃)とし，全ての実験を，大学内に設置した小型落下塔によって作り出された微小

Effects of Initial Droplet Diameter on Flame Spreading behavior

Shin JUMONJI, Yusuke SUGANUMA and Hiroshi NOMURA

重力環境下で行った．小型落下塔は，全高 8.6 m，自由落下距離 5.4 m，減速部 0.9 mであり，微小重力時間は約 1.1 秒である.図3に液滴直径解析画像を示す. 初期液滴直径d_0 は,0.35, 0.4, 0.48, 0.7, 0.9 mm の5条件で実施し，無次元液滴間隔液滴S/d_0は2とした．液滴の個数は，初期液滴直径d_0が0.4 mm 以下の条件では9 個，そのほかの条件では10 個とした．第3液滴から第9液滴の初期液滴直径および液滴間隔S の精度は±5%である．各実験の初期液滴直径d_0は，点火による影響による考慮から第1，第2 液滴を除外した，第3液滴から第9液滴の平均とした．CCDカメラとLEDバックライトを用いて，液滴のバックリット画像を取得し，自作の画像解析ソフトを用いて液滴直径を計測した．図4に高速度カラービデオカメラ（Phantom Miro3，撮影速度:2272 fps，露光時間 497.5 μ，画像サイズ 640×480 pix）で撮影した火炎伝播挙動を示す．液滴に沿って燃え広がる火炎によって加熱された懸垂線が発光する画像を取得し，点火時刻の計測を行った．液滴の点火時刻の解析には，Thin-Filament-Pyromentry(TFP)法を用いた．TFP法は，懸垂線の発光を数値化することにより点火時刻を求める方式であり，懸垂線の発光の検出には自作の解析プログラムを用いた．各液滴の位置情報を読み込ませて，懸垂線が赤熱した際に撮影された連続画像の輝度レベルが連続的に閾値を越える最初の時刻の 1 コマ前の時刻を点火時刻と定義した．プロットは3~4 回の実験の平均値であり，エラーバーは最大値と最小値を除いた値を示している．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とした．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を乗じて正規化し，正規化燃え広がり速度$V_f d_0$を用いる．

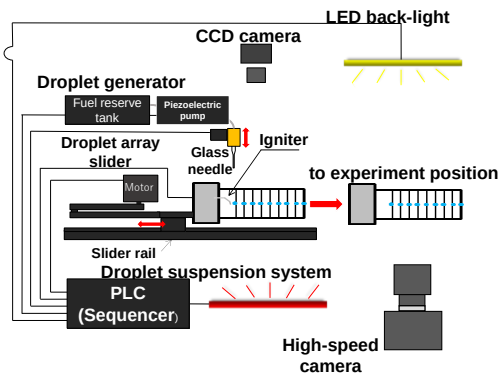

Fig.1 Experimental apparatus.

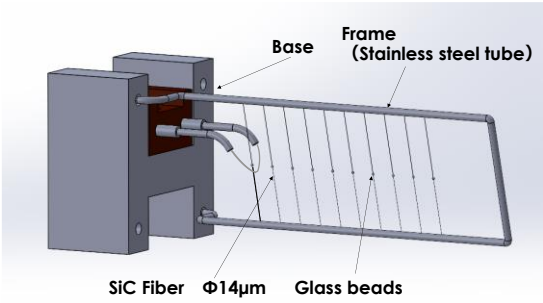

Fig.2 Droplet array holder.

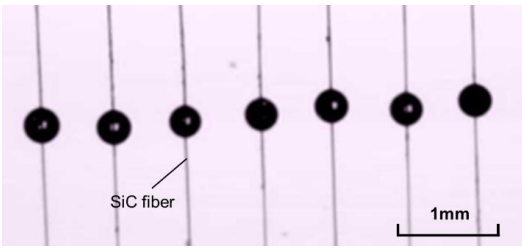

Fig.3 The image of droplet array.

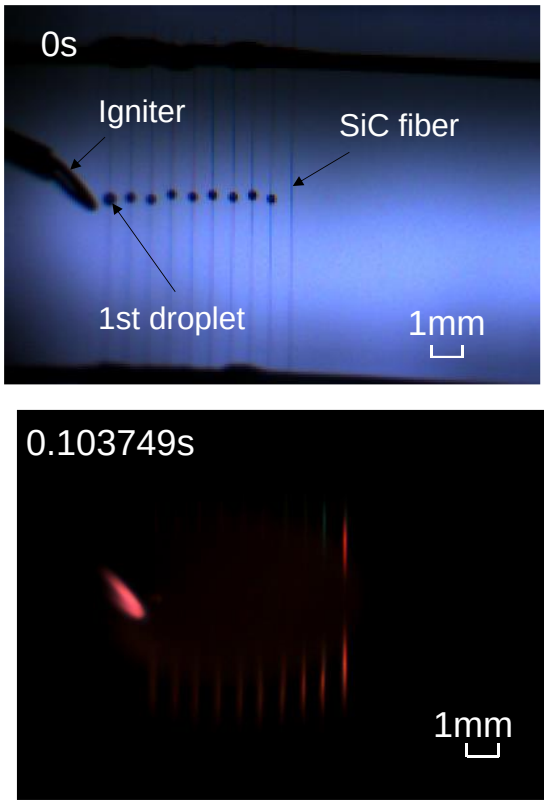

Fig.4 Flame spread behavior.

3. 実験結果および考察

図5および図6に初期液滴直径0.35 mm, 0.9 mmの条件における点火時刻と液滴位置の関係を示す．各液滴の点火時刻は，一次関数で近似することができ，液滴列の燃え広がりに加減速は無く一定速度で燃え広がっていることが分かった．第1液滴の点火にばらつきがあるため，実験毎に燃え広がりが発生する時刻に差が生じるが，燃え広がり速度の定常性には影響が無いことがわかった．各実験のプロットを最小2乗法で直線近似を行い，その傾きから燃え広がり速度を求めた．図7に初期液滴直径と燃え広がり速度の関係を示す．液滴直径の増大に伴った，エラーバーの幅は小さくなった．初期液滴直径が小さい条件では，初期条件のわずかな差が実験データに影響を及ぼしているが，この条件範囲においては，先行研究よりもエラーバーの幅が狭い精度の良い実験データが得られた．初期液滴直径の減少に伴って燃え広がり速度は増大し，初期液滴直径が0.4 mmで最大値を取った後，燃え広がり速度は減少した．

図8に初期液滴直径と正規化火炎燃え広がり速度の関係を示す．初期液滴直径の増大に伴って正規化火炎燃え広がり速度は増大し，初期液滴直径が0.7 mm以上では，正規化火炎燃え広がりはほぼ一定の値を示した．初期液滴直径が0.7 mm以上では相似則が成立しているといえる．このとき，燃え広がり誘導時間は高温域の熱伝導時間，液滴の加熱時間といったフーリエ数で整理可能な特性時間が支配的であると考えられる．一方，初期液滴直径が0.48 mm以下の条件では，初期液滴直径の増大に伴って，正規化火炎燃え広がり速度は増大した．このとき，相似則は成り立っておらず，燃え広がり誘導時間のうち液滴の直径の2乗に比例しない特性をもつ要因が支配的になったと考えられる．

図9に初期液滴直径と燃え広がり誘導時間の関係を示す．ある液滴から隣の液滴まで火炎が燃え広がる時間を燃え広がり誘導時間τ_fとした．初期液滴直径の減少に伴って，燃え広がり現象は高速となり，誘導時間は短くなる．図8の正規化火炎燃え広がり速度とあわせて考えると，相似則が成立している部分では，燃え広がり誘導時間は比較的大きい値を示しているのに対して，燃え広がり誘導時間が10 msを境に短くなると，相似則が成立していない．燃え広がりの現象が高速になると，化学反応の時間および火炎伝播時間が無視できな

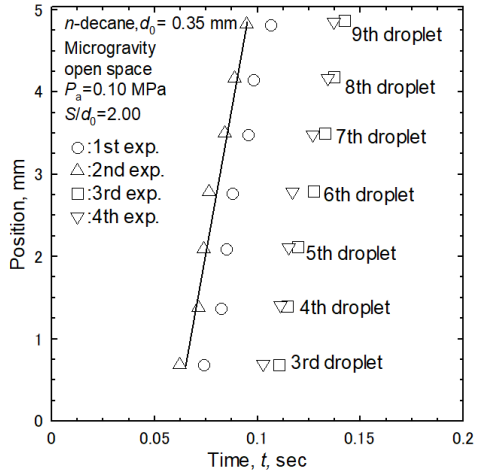

Fig.5 Relationship between droplet ignition time and droplet position (d_0 = 0.35 mm).

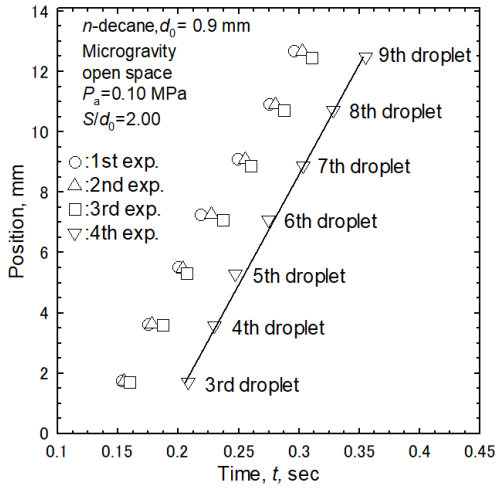

Fig.6 Relationship between droplet ignition time and droplet position (d_0 = 0.9 mm).

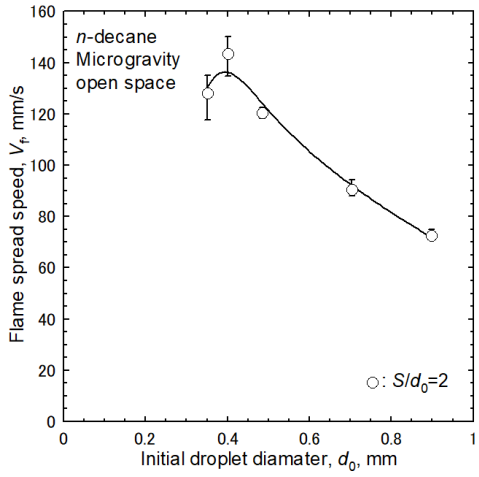

Fig.7 Relationship between initial droplet diameter and flame spread speed.

くなると考えられる. 菅沼らは燃え広がり誘導時間τ_fを式(1)の通りに分解して表した[4].

$$\tau_f = t_c + t_h + t_i + t_p \qquad (1)$$

燃え広がり誘導時間τ_f は，高温域の熱伝導時間t_c，液滴の初期加熱時間t_h，化学的点火遅れ時間t_i, 液滴まわりの予混合気層内の火炎伝播時間t_pから構成される．初期液滴直径が0.48 mm以上の場合，高温域の熱伝導時間t_c，液滴の初期加熱時間t_hといった液滴の直径の2乗に比例する特性を持つ部分が支配的になったと考えられる．一方，初期液滴直径が0.48 mm以下の場合，液滴まわりの予混合気層内の火炎伝播時間t_pや，化学的点火遅れ時間t_iといった初期液滴直径の二乗に比例する特性を持たない特性時間が，燃え広がり誘導時間に占める割合が増えたことにより，相似則が成立しなくなったと考えられる.

4. 結言

1. 先行研究よりもエラーバーの幅が狭い精度の良い実験データが得られた.
2. 初期液滴直径の減少に伴って燃え広がり速度は増大し，初期液滴直径が0.4 mmで最大値を取った後，燃え広がり速度は減少した.
3. 正規化火炎燃え広がり速度から，初期液滴直径が 0.48 mm 以下の条件では,相似則が成立しない. 燃え広がり誘導時間のうち液滴の直径の2乗に比例しない特性をもつ要因が支配的になったと考えられる.
4. 無次元液滴が2の条件では，燃え広がり誘導時間が10 msを下回ると,相似則が成立しなくなる.

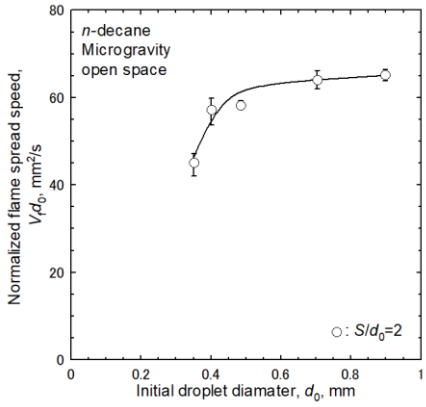

Fig.8 Relationship between initial droplets diameter and normalized flame spread speed.

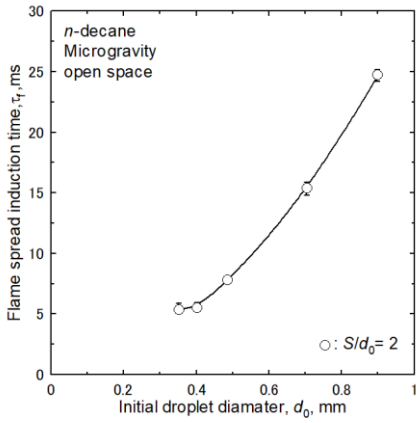

Fig.9 Relationship between initial droplets diameter and flame spread induction time

参考文献

1） 梅村 章，微小重力下での直線燃料液滴列に沿った火炎伝ぱ，日本機械学会論文集(B 編)，68 巻 672 号 254-260，2002 年
2） 三上 真人，小嶋 直哉，大八木 大史，菊池 政雄，若嶋 勇一郎，依田 眞一，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
3） 菅沼 祐介，燃料噴霧を単純化した液滴列を用いた火炎燃え広がりに関する実験的研究，日本大学大学院生産工学研究科 2017 年度博士論文
4） 菅沼 祐介，橘田 聖，野村 浩司，氏家 康成, 微小重力環境における燃料液滴列火炎燃え広がり速度に及ぼす雰囲気圧力の影響，日本機械学会論文集, Vol.83, No.855（2017）
5） 池山 典孝，燃料液滴列の火炎燃え広がりに及ぼす雰囲気圧力と当量比の影響，日本大学大学院生産工学研究科 2014 年度修士論文
6） 金 豊, 微小重力環境を用いた雰囲気圧力が燃料液滴列燃え広がり火炎に及ぼす影響に関する研究, 日本大学大学院生産工学研究科 2018 年度修士論文