

狭い液滴間隔における燃料液滴列を燃え広がる火炎の先端挙動

日大生産工 〇菅沼 祐介 日大生産工(院) 橘田 聖
日大生産工 野村 浩司 日大生産工 氏家 康成

1 緒言

噴霧燃焼はガスタービンやディーゼルエンジンなどの幅広い内燃機関の燃焼器に用いられている液体燃料の燃焼方式である。燃料液滴を直線状に配置した液滴列の火炎燃え広がりに関する研究は、噴霧燃焼に特徴的な燃焼の発生機構を解明するための重要なアプローチであり、実験および数値解析が多くの研究者によって行われている[1]。過去に行われた実験では、燃料液滴の初期直径は0.8~1.0 mm程度を用いており、燃焼現象の時間的・空間的分解能を高くすることで計測を容易にしている。初期液滴直径が異なる条件の実験であっても、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、結果の比較を可能にしてきた[2]。実際の噴霧を構成する数 μm から数十 μm の燃料液滴が燃焼する場合、実験で用いる大きな燃料液滴が燃焼する場合と比べると、液滴が小さい場合の方が現象は高速となる。高速な現象においては、燃え広がり要する時間に占める化学反応時間の割合は大きくなる。そこで、過去に行われてきた液滴燃焼の知見を、実際の噴霧の燃焼現象に結びつけるためには、燃え広がり要する時間の中で化学反応時間が支配的になる液滴間隔や初期液滴直径などの条件を明らかにし、理論モデルを再構築する必要があると考える。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液滴列火炎燃え広がり実験を微小重力環境にて行った結果、火炎燃え広がり誘導時間が短い条件では、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]。比較的

液滴間隔が広い条件では、熱伝導や液滴の初期加熱など液滴直径による相似則が成立する時間が燃え広がり要する時間に対して支配的であると考えられる。本報では、相似則が成立しない無次元液滴間隔が狭い条件において火炎挙動を詳細に観察し、初期液滴直径と火炎燃え広がりを与える影響について調べ、燃え広がり支配要因を考察した結果を報告する。

2 実験方法および測定方法

図1に実験装置の概略を示す。実験装置は液滴列支持装置、燃料供給ポンプ、液滴列生成装置、液滴列移動装置、点火装置、光学観察装置、および制御装置から構成される。液滴列支持部には、液滴数と同数の懸垂線を等間隔に、液滴列と垂直方向に張った。懸垂線には直径14 μm のSiCファイバ(日本カーボン、ハイニカロン)を使用した。各ファイバの中心に微小のガラスビーズを設置することで液滴を懸垂させた。液

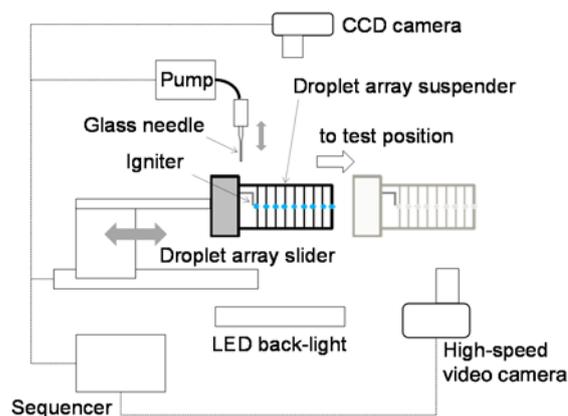


Fig.1 Experimental apparatus.

Leading Edge Behavior of Flame spreading along a Fuel Droplet Array in Narrow Droplet Spacing

Yusuke SUGANUMA, Satoshi KITTA, Hiroshi HOMURA and Yasushige UJIIE

液間隔 S はファイバを張る間隔で変化させた。燃料供給ポンプはピエゾ素子によって駆動され、パルス制御により高精度に燃料の送り出し量を制御することが可能である。液滴列生成装置により、装置可動部に取り付けられた燃料吐出用極細ガラス管（先端外径 約 $40\ \mu\text{m}$ ）の先端を、液滴支持部のガラスビーズに移動させる。液滴を生成・懸垂した後、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だけ移動させる。この動作を液滴個数回繰り返し、液滴列を生成する。液滴列支持部を液滴列移動装置により実験位置まで移動させる。点火装置には、熱線点火方式を採用した。直径 $0.29\ \text{mm}$ の鉄クロム線に通電することで、第1液滴への点火を行った。現象の観察には高速度ビデオカメラ（ナック、Q1v, 撮影速度：4000 fps, 露光時間：オープン, 画像サイズ： $640 \times 480\ \text{pix}$, 解像度：最大 $60\ \text{pixel/mm}$ ）を用いた。液滴直径の確認は実験開始直前にCCDカメラ（センテック、STC-SBE132POE, 画像サイズ： $1280 \times 1024\ \text{pix}$, 解像度：最大 $130\ \text{pixel/mm}$ ）によって実施した。これらの装置の制御はシーケンサによって行った。

液滴の個数はすべての液滴間隔において10個とした。液滴列の初期液滴直径 d_0 は 0.3 , 0.6 , および $1.0\ \text{mm}$ の3条件で実施した。第3から第9液滴の初期液滴直径の精度は $\pm 5\%$ である。液滴間隔 S は 0.6 , 1.2 および $2.0\ \text{mm}$ の3条件で実施した。液滴間隔の精度は第3から第9液滴の範囲において、 $S < 1\ \text{mm}$ の条件では $\pm 10\%$ 以内であり、それ以外の条件については $\pm 5\%$ である。第1, 第2, および第10液滴については実験条件とした初期液滴直径に近い値となるように調整した。燃料には正デカンを用いた。雰囲気は大気圧, 室温 ($25 \pm 5^\circ\text{C}$) である。全ての実験は通常重力環境で実施した。通常重力実験では自然対流の影響が懸念される。しかしながら、本報が対象とした燃え広がり初期に生じる予混合火炎伝播については、形成された火炎形状から自然対流の影響は小さいと判断した。予混合火炎伝播速度は高速度カメラ画像より

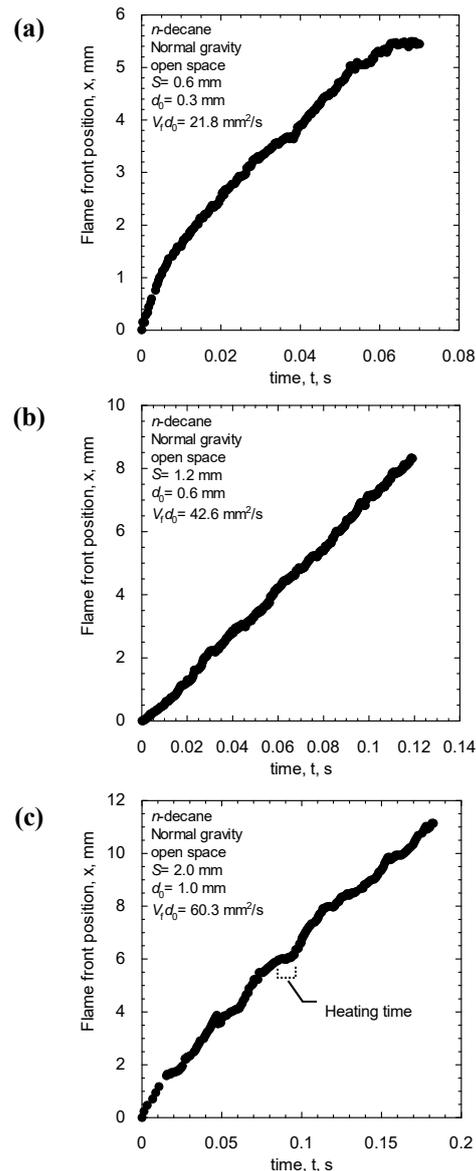


Fig.2 Time variation of flame front position.

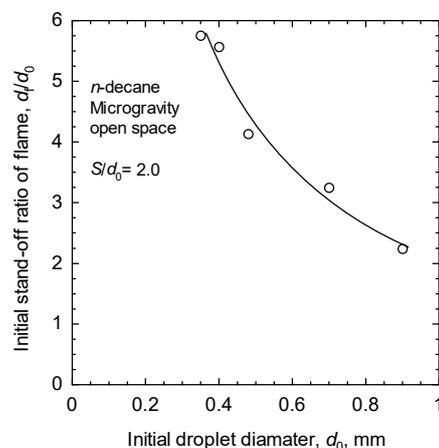


Fig.3 Initial stand-off ratio of flame as a function of initial droplet diameter. [3]

火炎先端位置の履歴を取得し、予混合火炎が進行する経路に沿って算出した。各条件における予混合火炎伝播速度は、3回の実験の平均値とした。

3 実験結果および検討

図2に燃え広がる火炎の先端位置の時間履歴を示す。初期液滴直径が異なる3つの結果を示した。初期液滴直径が1.0 mmの場合、火炎先端位置がステップ状に進行する現象が顕著に観察された。3つの実験条件はいずれも液滴間隔を初期液滴直径で除した無次元液滴間隔 Std_0 が2.0の条件である。この条件における火炎燃え広がり挙動は、拡大する群燃焼火炎が未燃次液滴に近接し、未燃次液滴の蒸発が活発となり可燃性混合気が形成し火炎が燃え広がる。ステップ状の火炎先端の進行は群火炎により未燃次液滴が加熱され、可燃性混合気を供給するまで時間を要したことで火炎が停滞したためであると考えられる。初期液滴直径が小さい場合は、この時間が非常に短くなるため、本実験の観察系が有する時間的、空間的分解能では観察できなかったと考えられる。現象を単純にして考えた場合可燃性混合気を供給するまでの要した時間 t_h は、室温の液滴を瞬間的に高温雰囲気中に晒し、可燃性混合気を供給可能な温度まで昇温するまでの時間と考えることができる。

$$t_h = \frac{[\text{加熱に必要な熱量}]}{[\text{単位時間に入る熱量}]} \quad (1)$$

$$t_h = \frac{\frac{1}{6}\pi d_0 \rho_f C_{pf} (T_{\phi=1.0} - T_0)}{\pi d_0^2 h \left(T_a - \frac{T_{\phi=1.0} - T_0}{2} \right)}$$

ここで、 ρ_f は燃料密度、 C_{pf} は燃料の定圧比熱、 $T_{\phi=1.0}$ は燃料であるデカンが当量比1.0の蒸気を供給する温度 (330.6 K)、 T_0 は液滴の初期温度 (室温=300 K)、 T_a は雰囲気温度 (2000 K)、 h は燃料達率である。また、熱伝達率は以下で表すことができる。

$$h = \frac{Nu \lambda_g}{d_0} \quad (2)$$

ここで Nu はヌッセルト数、 λ_g は雰囲気熱伝導率である。自然対流および強制対流が無い条件とすれば $Nu=2$ とおける。よって (1) および (2) 式より加熱時間 t_h は以下で示される。

$$t_h = \frac{\rho_f C_{pf} (T_{\phi=1.0} - T_0)}{6 \lambda_g (2T_a - T_{\phi=1.0} + T_0)} \quad (3)$$

(3)式より静止雰囲気であれば加熱に必要な熱量と単位時間に入る熱量から加熱時間は液滴直径の2乗に比例する。初期液滴直径が1.0 mmの場合、室温 (300 K) の液滴を2000 Kの雰囲気中 (空気) に晒し、当量比1.0を供給可能な温度 (330.6 K) まで上昇させるのに要する時間は、(3)式に適切な物性値を入れて計算すると21.2 msであった。図2(c)の条件で火炎先端位置が停滞している時間は最大で7 ms程度であり、単純な熱の授受の計算とは大きく異なる。これは、計算では液滴回りの流れを考慮していないことも挙げられるが、群火炎が未燃次液滴だけでなく、さらに次の未燃液滴まで予熱していることも要因の一つであると考えられる[4]。火炎燃え広がり速度はプロットの傾きより算出した。初期液滴直径が増大するに従い火炎燃え広がり速度と初期液滴直径の積である正規化火炎燃え広がり速度 $V_i d_0$ は増大した。これは微小重力環境における実験と定量的にもほぼ一致した[3]。この条件は初期液滴直径による正規化が成立しない条件といえる。図3に初期液滴直径と初期火炎直径比 d_i/d_0 の関係を示す。これは、本報の実験装置とほぼ同一の装置を用いて得た微小重力環境における実験結果である[3]。火炎直径は懸垂線に用いたSiCファイバが火炎により加熱され発光する様子をカメラで撮影して、発光強度分布の中心を火炎位置とすることで求めた。初期液滴直径の増大に伴って初期火炎直径比は減少した。初期火炎が形成される距離が液滴中心から増大することは、液滴の周囲に形成された可燃性混合気

が点火可能な温度域まで拡散するまでの時間が增大することを意味する。混合気の正規化拡散特性時間 t_d は以下で示される。

$$t_d = \frac{\left(\frac{d_f}{2d_0}\right)^2}{D} \quad (4)$$

ここで D は燃料蒸気の拡散係数である。実験で得られた火炎直径を入れて計算すると、拡散係数は一定値と考えられるため、 d_f/d_0 の減少に伴って正規化拡散特性時間は減少する。図3の結果と合わせて考えると、これは初期液滴直径の増大に伴って燃え広がり要する時間(燃え広がり誘導時間)に占める可燃性混合気の拡散に要する時間が短くなっていると考えられる。無次元液滴間隔が広い条件では、高温域の熱伝導や液滴の初期加熱が燃え広がり誘導時間に対して支配的であるため、火炎燃え広がりにおける初期液滴直径の相似則が成立するが、 $S^*d_0=2.0$ の条件では、燃え広がり誘導時間に占める相似則が当てはまらない燃料蒸気の拡散時間の割合が増えたことが、燃え広がり相似則が成立しない要因の一つであると考えられる。燃料蒸気の拡散時間が相似則に則らないのは、初期火炎が成立する位置が、化学反応速度に依存するためだと考えられる。

4 結言

液滴間隔、および初期液滴直径をパラメータとして火炎燃え広がり実験を行った。燃料には正デカンを用いた。雰囲気は大気圧、室温とし、通常重力環境で実施した。狭い無次元液滴間隔における火炎先端挙動を調べた結果、以下の知見を得た。

- 1) 液滴直径が大きい条件で、火炎先端位置が停滞しステップ状に進む挙動が観察された。
- 2) 初期液滴直径の増大に伴って正規化拡散特性時間は増大する。
- 3) $S^*d_0=2.0$ の条件で火炎燃え広がり速度の初期液滴直径による相似則が成立しないのは、燃

え広がり誘導時間に対し、相似則に則らない可燃性混合気の拡散時間の割合が増えたことが要因の一つと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、生産工学部若手研究者支援研究費の支援により行った。ここに付記し感謝の意を表す。

「参考文献」

- 1) Y. Nunome, S. Kato, K. Murata, H. Kobayashi, T. Niioka, “Flame Propagation of n-Decane Spray in Microgravity”, Proc. Combust. Inst., 29 (2002) 2621-2626.
- 2) M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yoda, “Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays using a new droplet-generation technique”, Combust. Flame, 141 (2005) 241-252.
- 3) Y. Suganuma, N. Ikeyama, H. Nomura, Y. Ujiie, “Droplet Array Combustion Experiments on Effect of Initial Droplet Diameter on Flame Spread Characteristic Time”, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-h-18 (2015).
- 4) H. Nomura, H. Takahashi, Y. Suganuma, M. Kikuchi, “Droplet ignition behavior in the vicinity of the leading edge of a flame spreading along a fuel droplet array in fuel-vapor/air mixture”, Proc. Combust. Inst., 34 (2013) 1593-1600.