

微小燃料液滴列の火炎燃え広がり挙動の解明

日大生産工 ○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

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郡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¹⁻³⁾。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、液滴間隔と火炎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⁴⁾。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、液滴間の燃え広がり要する時間に占める化学反応時間の割合は相対的に大きくなる。化学反応時間は液滴直径による正規化は適用できないため、液滴直径が小さい条件では液滴直径による正規化は成立しなくなると予想される。そこで、過去に得られ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。これまで、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、初期液滴直径が小さくかつ液滴間隔が狭い条件(火炎燃え広がり誘導時間が短い条件)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立しないことが示された⁵⁾。本報では、火炎燃え広がり誘

導時間を構成する特性時間のうち、予混合火炎伝播時間に注目して、火炎燃え広がり現象における液滴周りの予混合火炎伝播を観察し、初期液滴直径と液滴間隔が予混合火炎伝播速度に与える影響について調べた結果を報告する。

2 実験方法および方法

2. 1 実験装置

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SiCファイバ(直径14 μm)を等間隔に、液滴列と垂直方向に張った。各ファイバの midpoint 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。液滴間隔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の先端を、液滴支持部のガラスビーズ

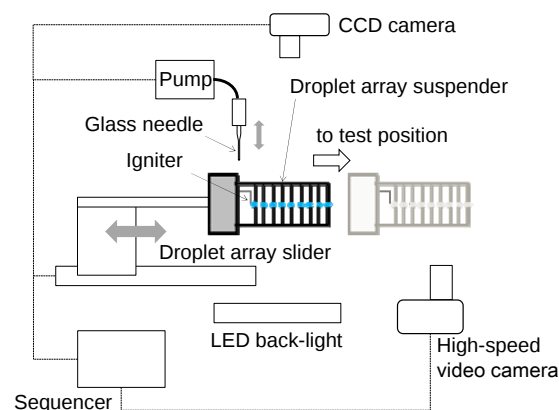


Fig.1 Experimental apparatus.

Elucidation of Flame Spread Behavior along a Small Size Fuel Droplet Array

Yusuke SUGANUMA, Satoshi KITTA, Hiroshi NOMURA and Yasushige UJIIE

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 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。現象の観察にはイメージ・インテンシファイア内蔵の高速度ビデオカメラ（撮影速度：3700 fps、露光時間：220 ns、画像サイズ：256×256 pix）を用いた。液滴直径の確認は実験開始直前にCCDカメラによって実施した。これらの装置の制御はシーケンサによって行った。

2. 2 実験条件

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, 0.4, および0.6 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±10 %である。初期液滴直径は、自作の画像解析プログラムを使用してバックリット法で撮影された液滴画像から求めた等価体積直径とした⁶⁾。液滴間隔 S は0.6, 1.2および2.4 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、 $S < 1$ mmの条件では±10 %以内であり、それ以外の条件については±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、室温である。現象の撮影に使用したカメラには耐G性が無いため、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 実験結果および考察

図2に $d_0 = 0.3$ mm, $S/d_0 = 2$ および4の予混合火炎伝播の連続写真を示す。無次元液滴間隔 $S/d_0 = 2$ の条件においては、予混合火炎の先端は閉じず、円筒状の予混合火炎が伝播した。予混合火炎の通過する位置は液滴を懸垂しているSiCファイバが火炎により熱せられて赤熱している位置からも推定が可能である⁷⁾。画像より懸垂線の輝度が閾値を超えた位置を火炎が通過している位置とすると、 $S/d_0 = 2$ の条件では燃え広がり直交方向に初期液滴直径の約3.5倍の直径の円筒状予混合火炎先端が通過したと考えられる。この推定位置は、火炎直接画像の外縁の少し液滴側であった。円筒状火炎の中心軸

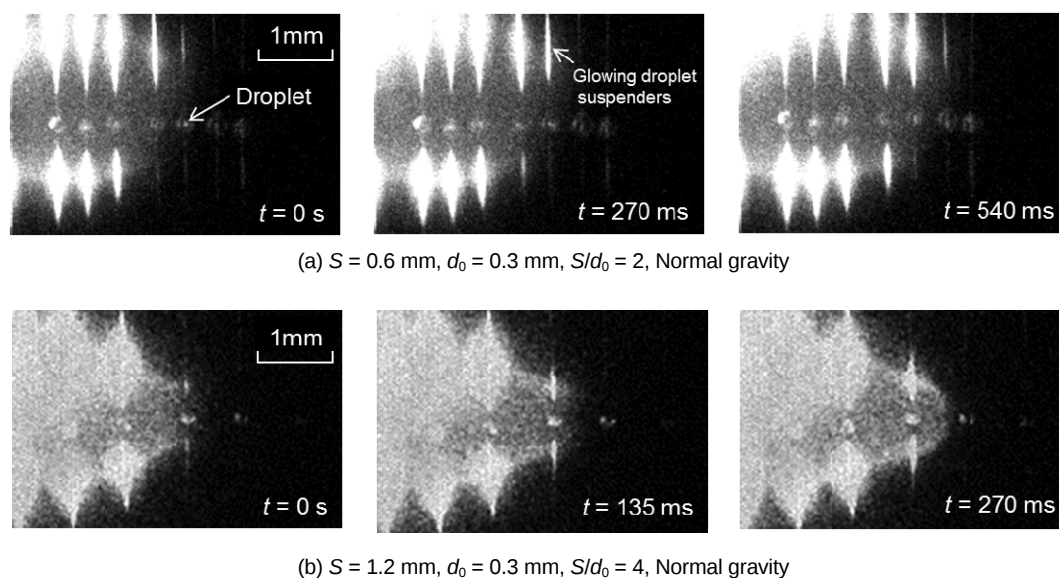


Fig.2 Sequential image of premixed-flame propagation around a droplet.

は液滴列中心軸とは一致しなかった。これは、自然対流の影響と考えられる。 $S/d_0 = 4$ の条件では、火炎により液滴の周囲に可燃性混合気形成され、混合気と温度の条件が成立した位置で点火する。その後、可燃性混合気に沿って予混合火炎が伝播して球状の拡散火炎が形成される。この条件においては、初期液滴直径の約2.2倍の直径で予混合火炎の先端が液滴中心を含む火炎燃え広がり方向と垂直な面を通過した。液滴間隔が狭い $S/d_0 = 2$ の条件の方が、予混合火炎が液滴から遠い位置を伝播することがわかった。

図3に予混合火炎伝播速度および予混合火炎伝播時間と無次元液滴間隔の関係を示す。予混合火炎伝播速度は、無次元液滴間隔の増大に伴って急激に増大し、その後緩やかに減少した。予混合火炎伝播時間は無次元液滴間隔の増大に伴って増大した。 $S/d_0 = 2$ の条件では、 $3 \leq S/d_0 \leq 8$ の条件と比較して予混合火炎伝播速度は約1/2になる。無次元液滴間隔が小さくなると、液滴の数密度が高いことから、予混合火炎の経路が液滴によって冷やされ、予混合火炎伝播速度が低下したと考えられる。 $3 \leq S/d_0 \leq 8$ の条件において、予混合火炎伝播速度は緩やかに減少するが、ほぼ同程度の値を示す。この条件においては、図2(b)に示されるように、未燃次液滴には球状の拡散火炎が形成される。このよう

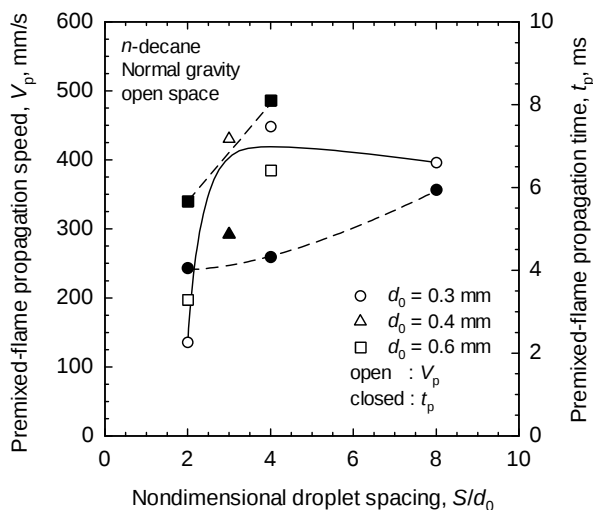


Fig.3 Premixed-flame propagation speed/time as function of nondimensional droplet spacing.

な場合、液滴の周囲に形成された可燃性混合気に沿って予混合火炎が伝播する速度は、無次元液滴間隔への依存性が少ないと考えられる。無次元液滴間隔の増大に伴って予混合火炎伝播速度が緩やかに減少するのは、未燃次液滴が火炎から遠いため、予混合火炎が伝播する経路の温度が、液滴間隔が狭い場合と比較して、低いことが原因と推察される。また、予混合火炎伝播速度は、初期液滴直径にあまり依存しないことがわかった。

火炎が次の未燃液滴に燃え広がるのに要する時間（燃え広がり誘導時間 τ_i ）は、火炎から未燃次液滴への高温域の熱伝導時間 t_c と未燃次液滴が可燃性混合気を形成するまでの時間（初期加熱時間 t_h ）、化学的点火遅れ時間 t_i 、予混合火炎伝播に要する時間 t_p の4つで構成されると仮定する。熱伝導時間や初期加熱時間は初期液滴直径の二乗に反比例する。一方で、予混合火炎伝播時間については図3で示したとおり、予混合火炎伝播速度に初期液滴直径依存性は無いと考えられるので無次元液滴間隔が同じであれば、予混合伝播時間は初期液滴直径に比例すると推測される。図3に示した $d_0 = 0.3$ と 0.6 mmの条件の予混合火炎伝播時間を比較すると、いずれの無次元液滴間隔の条件でも液滴直径の増大に伴って予混合火炎伝播時間は増大した。 $S/d_0 = 2$ の条件では、予混合火炎伝播時間

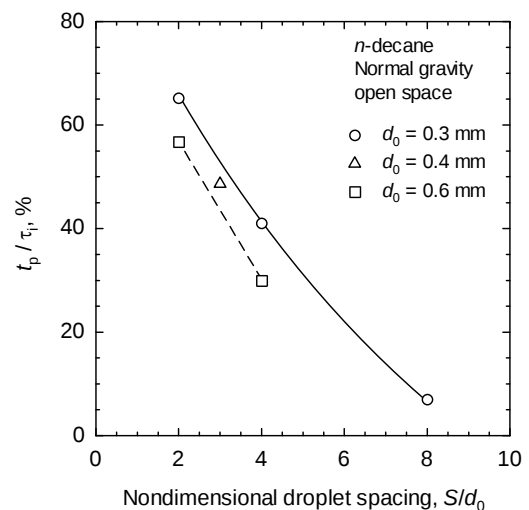


Fig.4 Ratio of premixed-flame propagation time in flame spread induction time as a function of nondimensional droplet spacing.

は初期液滴直径の一乗には比例しなかった。一方で $S/d_0 = 4$ の条件では、予混合火炎伝播時間は初期液滴直径のほぼ一乗には比例する結果となった。無次元液滴間隔の違いによる予混合火炎伝播時間と液滴直径の関係が異なるが、 $S/d_0 = 2$ の条件では結果のばらつきが大きいため、今後精査する計画である。図4に燃え広がり誘導時間に占める予混合火炎伝播時間の割合 t_p/τ_f を示す。無次元液滴間隔の増大に伴って t_p/τ_f は減少する。これは、液滴間隔の増大に伴って熱伝導時間や初期加熱時間が初期液滴直径の二乗に比例して増大したのに対して、予混合火炎伝播時間が初期直径の一乗に比例して増大したためと考えられる。ただし、 $S/d_0 = 2$ の条件では、予混合火炎伝播速度が小さいにもかかわらず、 t_p/τ_f が高い値を示していることから、火炎が未燃次液滴だけでなく、さらにその次の未燃液滴を加熱していることで、見かけの液滴加熱時間が短くなっている可能性が考えられる⁷⁾。燃え広がり誘導時間が短い条件では、予混合火炎伝播時間が支配的になることが示された。この場合は、初期液滴直径による相似則が成立しなくなると考えられる⁵⁾。 $S/d_0 = 4$ の条件において、 $d_0 = 0.3 \text{ mm}$ における t_p/τ_f は $d_0 = 0.6 \text{ mm}$ に対して11 point高い値であり、 $\tau_f - t_p$ で表すと、 $d_0 = 0.3 \text{ mm}$ の $\tau_f - t_p$ は $d_0 = 0.6 \text{ mm}$ の約1/3であった。 $\tau_f - t_p$ は熱伝導時間と初期加熱時間が支配的とすれば、両特性時間は相似則が成立することから、初期液滴直径が1/2であれば $\tau_f - t_p$ は1/4になるはずである。今回の実験では d_0 の減少に対し $\tau_f - t_p$ の減少が小さくなったことで化学的点火遅れ時間を考慮する必要が生じたと推測される。

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液滴列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。火炎燃え広がり初期に形成される液滴周りの予混合火炎について伝播速度を調べた結果、以下の知見を得た。

- 1) 無次元液滴間隔が2の条件では無次元液滴間隔が3から8の条件と比較して予混合火炎伝播速度は約1/2になる。
- 2) 予混合火炎伝播時間は、液滴間隔の増大に伴って増大する。
- 3) 初期液滴直径の違いが予混合火炎伝播に与える影響は、いずれの無次元液滴間隔においても小さい。
- 4) 燃え広がり誘導時間が短い条件において、初期液滴直径を代表寸法とする相似則が火炎燃え広がり速度について成立しなくなるのは、予混合火炎伝播時間が燃え広がり誘導時間占める割合が増すためと考えられる。

謝辞

本実験の一部は、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) T. A. Brzustowski, A. Sobiesiak, S. Wojcicki, Proc. Combust. Inst. 18 (1981), pp. 265-273.
- 2) S. Okajima, K. Abe, S. Yamaguchi, T. Kimoto, J. JSME B47 (1981), pp. 2058-2065.
- 3) K. Konishi, M. Kono, K. Iinuma, J. JSME B50 (1984), pp. 1382-1391.
- 4) M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yoda, Combust. Flame, 141 (2005) 241-252.
- 5) Y. Suganuma, N. Ikeyama, H. Nomura, Y. Ujiie, 6th ISTS, 2015-h-18 (2015).
- 6) H. Nomura, Y. Ujiie, H.J. Rath, J. Sato, M. Kono, Proc. Combust. Inst. 26 (1) (1997) pp. 1267-1273.
- 7) H. Nomura, H. Takahashi, Y. Suganuma, M. Kikuchi, Proc. Combust. Inst. 34 (2013) pp. 1593-1600.