

## 燃料液滴列火炎燃え広がり現象における液滴の点火挙動

日大生産工 ○菅沼 祐介 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。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<sup>1)</sup>。実際の噴霧を構成する数 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ 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。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<sup>2)</sup>。本研究では火炎燃え広がり誘導時間が短い、

無次元液滴間隔が狭い条件に着目し、相似則が成立しない要因を調査することとした。本報では、燃え広がる火炎前縁に生じる熱影響範囲を調べることを目的として、液滴直径履歴の詳細に観察し、初期液滴直径が熱影響範囲に与える影響について調べた結果を報告する。

### 2 実験装置および方法

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  $\mu\text{m}$ 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 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 piezo 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

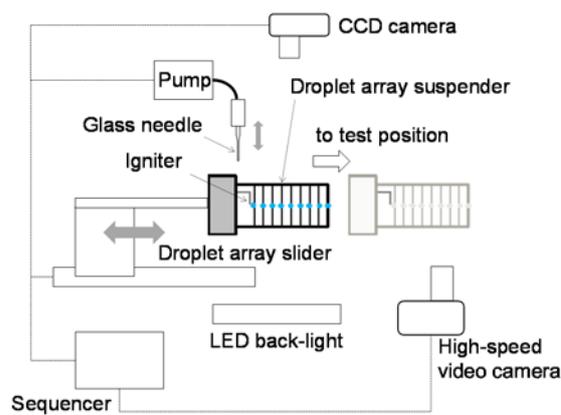


Fig.1 Experimental apparatus.

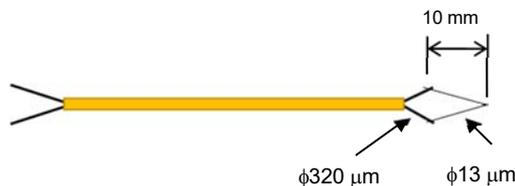


Fig.2 Schematic diagram of extra-fine thermocouple.

Ignition Behavior of Fuel Droplet of a Flame spreading  
along a Fuel Droplet Array

Yusuke SUGANUMA, Hiroshi HOMURA and Yasushige UJIIE

出用極細ガラス管の先端を、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。この動作を液滴回数繰り返して、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。液滴のバックリット画像の取得には高速度ビデオカメラ(ナック, Q1v, 撮影速度: 1000 fps, 露光時間: オープン, 画像サイズ: 640×480 pix)を用いた。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 mmの3条件で実施した。第2から第9液滴の初期液滴直径の精度は±5%である。液滴間隔 $S$ は0.6, 1.2および2.0 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。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、本報が対象とした狭い液滴間隔で、かつ燃え広がり初期においては火炎形状から自然対流の影響は小さいと判断した。高速度カメラで取得した画像から、自作のプログラムを用いて液滴の直径履歴を計算した。バックライトにより火炎先端位置を直接計測することができないため、液滴の点火時刻は懸垂線が発光を用いた。懸垂線の輝度が閾値を越えた時、液滴中心を火炎が通過したとして、液滴の点火時刻とした。

### 3 実験結果および検討

図3に高速度カメラで取得した液滴のバックリット画像を示す。これらの画像から液滴直径履歴および液滴点火時刻を取得した。図4に液滴直径の2乗の時間履歴を示す。図4(a)と(b)のいずれの条件も、液滴間隔 $S$ を初期液滴直径 $d_0$ で除した無次元液滴間隔 $\#d_0$ は2.0である。異なる液滴直径のデータと比較するため、グラ

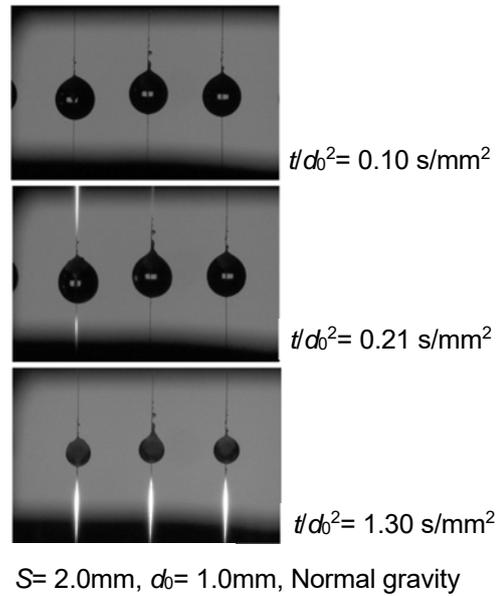


Fig.3 Sequential image of flame spreading

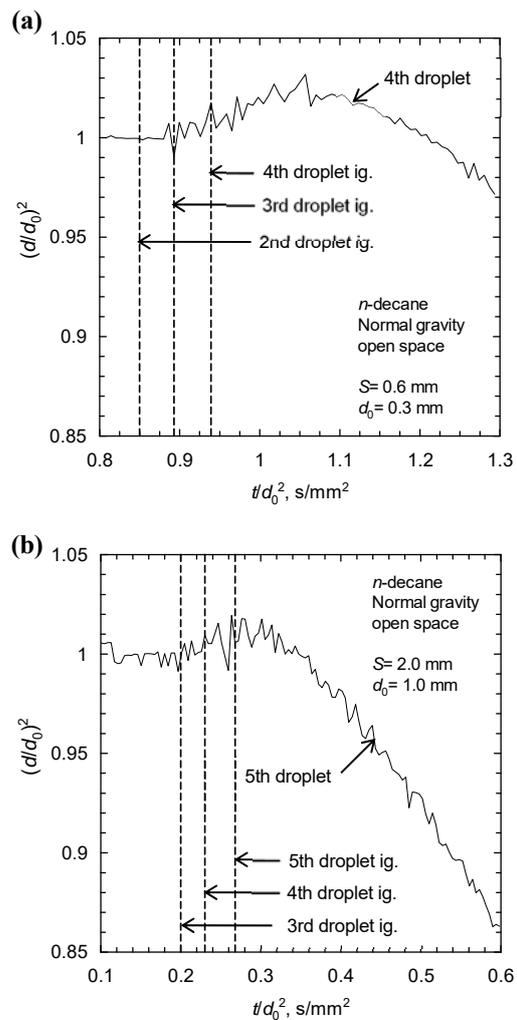


Fig.4 Temporal variation of the squared nondimensional droplet diameter.

フの縦軸，横軸いずれもの値も初期液滴直径の2乗で除した。図中には液滴の点火時刻も併せて示した。隣り合う液滴の点火時刻差が燃え広がり要する時間（燃え広がり誘導時間）である，液滴間隔を燃え広がり誘導時間で除した値が燃え広がり速度である。図4 (a) , (b) の条件において，それぞれの燃え広がり速度  $V$  は  $86 \text{ mm/s}$  と  $57 \text{ mm/s}$  であった。これらの値は微小重力環境で実施した先行研究<sup>2</sup>とほぼ一致した。異なる液滴直径の結果であるため，両者を比較するため燃え広がり速度に初期液滴直径を掛けた正規化燃え広がり速度  $V/d_0$  では，それぞれ  $26 \text{ mm}^2/\text{s}$  と  $57 \text{ mm}^2/\text{s}$  であり，前述のとおりこの条件では相似則が成立しない。液滴の直径履歴は，燃え広がる火炎の接近とともに液滴直径は増大し，無次元液滴直径が約1.02まで達したのちに減少に転じた。図4 (a) の条件では，一つ前の液滴である第3液滴の点火時刻付近で第4液滴の直径の増大が開始した。燃え広がる火炎の熱影響範囲を無次元液滴間隔  $S/d_0$  で示せば，おおよそ2である。一方，図4 (b) の条件では，二つ前の液滴である第3液滴の点火直後に第5液滴の直径が増大した。微小重力環境， $S=1.6\text{mm}$ ， $d_0=0.8\text{mm}$  の条件で直径履歴を計測した先行研究においても，二つ前の液滴点火時に液滴直径が増大する結果が得られている<sup>3</sup>。無次元液滴間隔  $S/d_0=2.0$  の条件において，初期液滴直径の増大に伴って熱影響範囲が増大した。これは，火炎温度が影響していると考えられる。初期液滴直径の増大に伴い，燃え広がり初期に形成される火炎直径は減少する。火炎直径の減少により火炎温度は増大すると考えられるため，熱影響範囲も増大すると考えられる。初期液滴直径が増大に伴い熱影響範囲が増大することで，より前方の液滴を加熱することが可能となる。

図5に高速度カメラで取得した燃焼中の液滴列のバックリット画像連続画像を示す。図中の時間はイグナイタの通電時を0 sとして経過時間を示している。熱電対の測温接点は第5液滴の中心付近に設置した。熱電対は測定している液滴に火炎が燃え広がるまでは，変形することなく液滴内部の温度を計測することができた。液滴が火炎に包まれると， $13 \mu\text{m}$  の熱電対素線が火炎によって加熱されて変形し，ほとんどの場合は溶損してしまった。図6にバックリット画

像を解析して取得した第4，第5液滴直径履歴と第5液滴内部の温度履歴を示す。第4液滴が点火した時刻は0.367 sであり，そのときの第5液滴の内部温度は296.0 Kであった。この時点では液滴の加熱は開始されていないことがわかった。第5液滴の温度は0.38 sあたりから徐々に上昇し始めた。ほぼ同時に液滴直径の増大も開始しており，火炎からの加熱により液滴が熱膨張していることが確認できた。第5液滴の点火した時刻は0.463 sであり，その時の温度は326.3 Kであった。燃料に使用した正デカンの沸点は447.3 Kであることから，液滴の点火は沸点の約73%で生じていることがわかった。本研究では，燃え広がり現象を簡易的なモデルを用いて表すことを試みている。その際，液滴が火炎により加熱され，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て以下の式で表している。

$$t_h = \frac{[\text{可燃性混合気を供給するのに必要な熱量}]}{[\text{単位時間に雰囲気から液滴に入る熱量}]} \quad (1)$$

$$t_h \propto \frac{\frac{1}{6} \pi d_0 \rho_f C_{pf} (T_b - T_0)}{\pi d_0^2 h \left( T_e - \frac{T_b - T_0}{2} \right)} \quad (2)$$

ここで， $\rho_f$  は燃料密度， $C_{pf}$  は燃料の定圧比熱， $T_b$  は燃料である正デカンの沸点 ( $447.3 \text{ K}$ )， $T_0$  は液滴の初期温度 (室温= $300 \text{ K}$ )， $T_e$  は雰囲気温度， $h$  は熱伝達率である。従来は液滴は沸点まで加熱されると十分な可燃性混合気を供給するとしていたが，今回の実験結果によれば，想定よりもかなり低い温度で初期加熱時間が完了していると考えられる。大気圧環境における正デカンの蒸気圧を計算すると， $326 \text{ K}$  は液滴表面に当量比0.8の混合気を形成する温度であり，初期火炎形成位置に可燃性混合気を供給できると考えられる。 $T_e$  に今回取得した温度を入れて初期加熱時間を計算した場合，実験結果とオーダーは整合するようになった。液滴温度を直接計測することで，モデル計算に用いるパラメータを修正することが出来た。今後は，液滴間隔および液滴直径を変えて実験を行うことで，液滴列燃焼の簡易モデルの構築を行う計画である。

#### 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.

(1) 無次元液滴間隔2.0の条件における液滴直径履歴を調べた結果,  $S=0.6\text{mm}$ ,  $d_0=0.3\text{mm}$ では, 一つ前の液滴の点火時刻付近で液滴直径の増大が開始し,  $S=2.0\text{mm}$ ,  $d_0=1.0\text{mm}$ では, 二つ前の液滴の点火直後に液滴直径の増大が開始した.

(2) 初期液滴直径の増大に伴って熱影響範囲が増大した. 火炎温度の増大とともに, 熱影響範囲も増大したと考えられる.

(3) 初期液滴直径の増大に伴い熱影響範囲が増大することが, 狭い液滴間隔において相似則が成立しない要因の一つであると考えられる.

(4) 液滴列の燃え広がりにおいて, 点火時の温度は沸点の約73%で生じた.

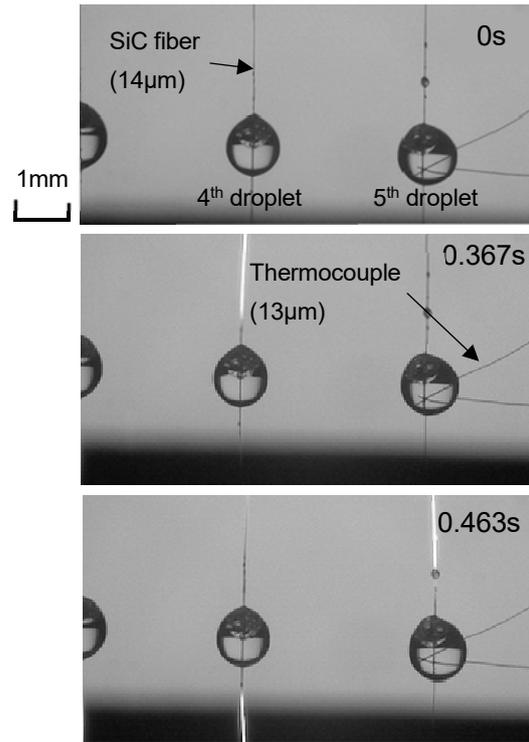


Fig.5 Backlit image of droplet array  
(Normal gravity,  $S=3.0\text{mm}$ ,  $d_0=1.0\text{mm}$ )

#### 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) 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.
- 2) Y. Suganuma, N. Ikeyama, H. Nomura, Y. Ujiie, Droplet array combustion experiments on effect of initial droplet diameter on flame spread characteristic time, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol. 60, No. 3 (2017), pp. 127-131.
- 3) 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.

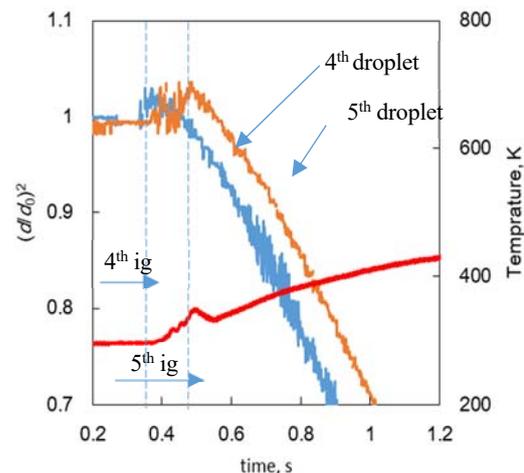


Fig.6 Thermal variation of the squared nondimensional droplet diameter and temporal variation of 5th droplet temperature.

(Normal gravity,  $S=3.0\text{mm}$ ,  $d_0=1.0\text{mm}$ )