

燃料液滴列における火炎燃え広がり速度の周囲気体当量比依存特性

日大生産工(院) 菅沼 祐介 日大生産工 野村 浩司 日大生産工 氏家 康成
JAXA 菊池 政雄 JAXA 依田 眞一 山口大学 三上 真人

1. 緒言

噴霧燃焼は、液体燃料の微粒化、雰囲気気体からの燃料液滴への熱伝達とそれによる蒸発および蒸気の拡散、点火および火炎の形成などの過程に分けられる。これらの過程が同時に進行するため、現象が非常に複雑で、燃焼機構の詳細を把握することが難しい。

噴霧を構成する最小単位である単一液滴の研究では、多様な条件下で実験が行われてきた。液滴を直線状に配置した燃料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群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¹⁾および数値解析²⁾が盛んに行われている。さらに発展させた研究として、粒径分布幅の狭い均一分散噴霧中に形成された平面火炎を用いて、部分予蒸発噴霧流中の火炎における燃料液滴の干渉効果、燃焼速度、液滴の存在範囲などを調べる研究³⁾など、噴霧燃焼を解明することを目的として種々のアプローチがなされている。燃料液滴列や均一噴霧の燃焼実験は、噴霧燃焼の新たな知見を得る研究として重要であるが、両者の知見の間には隔たりがあり、同時に議論することは困難である。両者の間を補う研究が必要であると考え、本研究では、燃料液滴列の周囲を燃料蒸気 - 空気予混合気で満たし、燃焼実験を行った。本報では、液滴間隔および周囲気体の当量比が燃焼挙動に及ぼす影響について報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験モデル

図 1 に、本研究の対象となる燃料蒸気 - 空気予混合気中の液滴列の概念を示す。研究対象は、単純立方格子状に配列された 3 次元液滴マトリックスの一部を切り出した液滴列である。3 次元液滴マトリックスが燃焼している際の液滴間の物質移動・熱移動対称面を燃焼容器壁面で実現することにより、液滴列の実験結果を 3 次元に拡張して論議できるように工夫した。

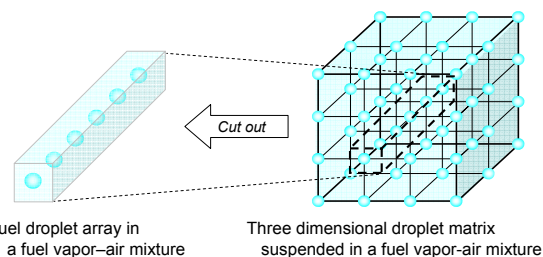


Fig. 1 Concept of a fuel droplet array in the work.

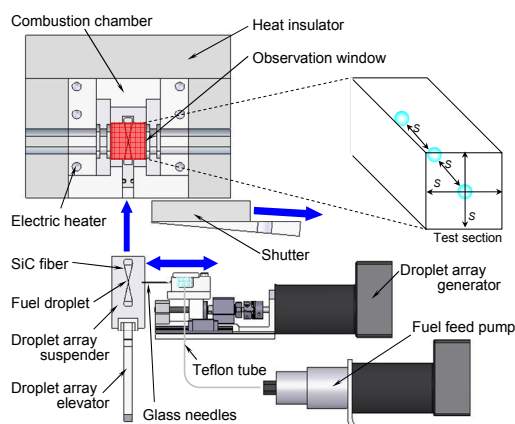


Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus.

燃料液滴、蒸気、および空気が同時に存在する場合で実験を行うため、液体当量比、気体当量比および総当量比が均一部分予蒸発噴霧の場合と同様に定義できるように、燃焼容器を設計した。

2.2 実験装置構成

図 2 に実験装置の概略を示す。装置は、燃焼容器、液滴列支持器、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、制御装置および計測機器から構成される。実験空間は直方体であり、その中に燃料液滴列は水平に配置される。液滴列の列方向に垂直な実験空間断面は正方形であり、燃料液滴はその正方形断面の中心に懸垂する。実験空間断面の一边を液滴間隔と等しくすると、通常重力環境では燃え広がりが起こらなかった。そこで本実験では、液滴間隔に関係なく、実験空間の正方形断面の一边が 25 mm である燃焼容器を

Dependence of Flame Spread Speed along a Fuel Droplet Array on Ambient Gas Equivalence Ratio

Yusuke SUGANUMA, Hiroshi NOMURA, Yasushige UJIIE,
Masao KIKUCHI, Shinichi YODA and Masato MIKAMI

用いた．液滴列が配置される列方向の実験空間長さは 116 mm で固定した．液滴個数は液滴間隔に応じて異なる．燃焼容器壁面や液滴列支持部には，火炎の熱損失を低減させるため，セラミックスを用いた．予混合気は，均一に加熱した燃焼容器内部に液体燃料を注入することで生成した．燃料蒸気 - 空気予混合気の気体当量比は，液体燃料の蒸気圧を燃焼容器内温度で制御することによって，目的の値に設定した．本実験に用いた燃料であるデカンでは，気体当量比 0.1 の場合，燃焼容器内部温度は 294 K，1.5 の場合は 338 K である．観察窓は，燃焼容器内の飽和蒸気が凝縮することを防ぐため，二重窓とした．燃焼容器下部は液滴列支持器が挿入されるスリットが設けられている．燃焼容器が加熱待機している間は，シャッターによってスリットを密閉する．燃焼実験中は，燃え広がる火炎の既燃側の燃焼容器端は開端とし，未燃側は，未燃混合気流速を小さくするため，閉端とした．液滴列支持部は直径 14 μm の SiC ファイバを X 字型に交差させ，その交点に液滴を支持する．液滴間隔 S はファイバを張る間隔で変化させ，1.6，2.0 および 5.0 mm の 3 条件に対応する液滴列支持器を用意した．燃料供給ポンプはサーボモータによって駆動され，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．液滴列生成部は，燃料供給ポンプからテフロンチューブを介して燃料溜め部に送られた燃料を，一列に並べられたガラス管先端より吐出する．ガラス管は引き伸ばしにより製作し，先端外直径は約 40 μm である．初期液滴直径 d_0 を 0.8 mm とした場合， $\pm 5\%$ 以内の直径のばらつきで液滴列を生成することが可能である．燃焼容器内部は燃料蒸気 - 空気予混合気を生成するために温度制御が行われているため，液滴列は燃焼容器外部で生成する．液滴列は，スライダ・クランク機構を備えた液滴列移動装置により燃焼容器下部より挿入される．点火装置には，熱線点火方式を採用した．直径 0.29 mm のニクロム線を加熱することで第一液滴への点火を行った．火炎燃え広がり現象の詳細観察には，イメージ・インテンシファイア・レンズシステムを装着した高速ビデオカメラ（撮影速度：1000 fps，露光時間：オープン）を用い，全体観察には CCD カメラ（30 fps，露光時間：1/1000 s）を用いて記録を行った．火炎燃え広がり速度 V_s は点火の影響が存在する第 1 から第 2 液滴間の燃え広がりを除き，第 2 液滴以降の燃え広がり速度の平均値と定義した．火炎伝播速度 V_p は，第 5 液滴と第 10 液滴が存在する位置の平均値と定義し

た．燃料には適当な揮発性を有することから正デカンを用いた．液滴列の生成，液滴列の移動，点火，高速ビデオカメラの撮影開始は，シーケンサを用いて制御を行った．

3. 実験結果および考察

気相火炎伝播限界以下の気体当量比の雰囲気中に液滴列を挿入し，燃え広がり挙動の観察を行った．図 3 に気体当量比と火炎燃え広がり速度の関係を示す．どの条件においても気体当量比の増大に伴って火炎燃え広がり速度は増大した． $S = 1.6$ mm の条件では，拡大する拡散火炎が未燃次液滴に到達後，次液滴の蒸発が活性化し燃え広がりが進行する． $S = 2.0$ mm の条件では，拡散火炎が未燃次液滴の周囲に形成された可燃性混合気相に到達し，燃え広がりが進行する．文献 4 の分類に従えば，前者はモード 1，後者はモード 2 である．モード 1 の場合は，未燃次液滴の加熱時間が燃え広がり速度を，モード 2 の場合は，加熱時間と火炎と未燃次液滴間における熱伝達が燃え広がり速度を支配する⁴⁾．モード 1 の場合，気体当量比の増大により液滴の周囲に形成される可燃性混合気層が拡大する．これによって火炎体積が拡大して，未燃次液滴の加熱時間が短くなり，燃え広がり速度が増大したと考えられる．モード 2 の場合，気体当量比の増大に伴う火炎径増大により，火炎が未燃次液滴により近くに定在して未燃次液滴の加熱が促進され，火炎速度が増大したと考えられる． $S = 5.0$ mm の条件では，未燃次液滴に火炎が燃え広がる際，次液滴には既存の火炎とは独立したエンベロープ火炎が形成され，文献 4 で示されるモード 3 の燃え広がりであった．モード 3 の場合は，火炎と未燃次液滴間における熱伝達が燃え広がり速度を支配す

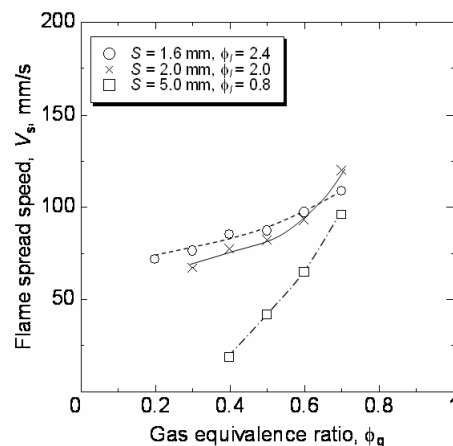


Fig. 3 Flame spread speed as a function of gas equivalence ratio.

るので、モード 2 と同様の理由で気体当量比の増大に伴って火炎速度が増大したと考えられる。また、 $S = 5.0 \text{ mm}$ においては、気体当量比が 0.2, 0.3 の条件では燃え広がりが起こらず、気体当量比が 0.4 以上の条件で燃え広がりが観察された。燃焼容器の外の開かれた空間（気体当量比は零）でも燃え広がりは観察されなかった。気体当量比が小さい条件では、火炎と未燃次液滴との距離が大きいため未燃次液滴の加熱が十分に行われず、燃え広がりが起こらなかったと考えられる。 $S = 1.6 \text{ mm}$ より $S = 2.0$ および 5.0 mm の条件の方が、気体当量比の増大に伴って火炎燃え広がり速度が急峻に増大している。これは、モード 2 および 3 の燃え広がりにおいて熱伝達時間が燃え広がりに要する時間に占める割合が大きいためと考えられる。しかしながら、この結果には自然対流の影響が含まれているため、微小重力環境を用いた実験で確認を行う必要がある。

気相の火炎伝播が起こる気体当量比が 0.8 から 1.5 の条件で実験を行い、液滴列の存在が火炎伝播に及ぼす影響を調べた。図 4 は $\phi_g = 1.1$ における火炎伝播挙動の連続写真であり、(a)は液滴列が無い場合、(b)は液滴列がある場合を示している。液滴列による伝播火炎形状の変化は観察されなかった^{5) 6)}。火炎前縁位置の履歴を高速ビデオカメラの画像より計測した。図 5 に気体当量比と火炎燃え広がり速度および火炎伝播速度の関係を示す。液滴の存在は火炎速度に影響を及ぼさなかった。燃料に用いたデカンの揮発性が低いいため、液滴から伝播火炎への燃料蒸気の供給が行われなかったためと考えられる。火炎速度は、気体当量比 1.1 付近で最大値を示した。液滴を伝っての火炎燃え広がりから気相火炎伝播へ移行する際の火炎速度に不連続的な差がみられた。これらの結果は、いずれの液滴間隔においても同じであった。伝播火炎形状については、 $S = 1.6 \text{ mm}$ の条件のみ、液滴列によるわずかな変形が確認された。しかしながら、前述のように、液滴列が存在する場合と存在しない場合の火炎速度に大きな差はなかった。

$S = 5.0 \text{ mm}$ の条件について、火炎の進行により燃焼を開始した液滴の個数と燃焼途中で消滅して燃え残った液滴の個数を気体当量比の関数として図 6 に示す。前述のように、気体当量比が 0.4 以下の場合には、燃え広がりにより燃焼を開始した液滴の個数は気体当量比の増大に伴って増大した。気体当量比が低い場合、長い時間火炎が定在するため、未燃液

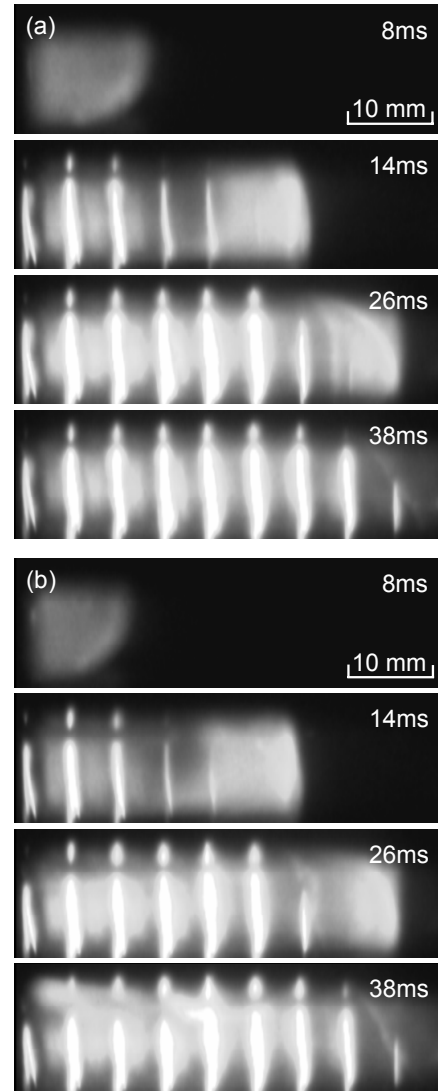


Fig. 4 Sequential images of flame spread behaviors.
(a) without droplet array, $\phi_g = 1.1$
(b) with droplet array, $S = 5 \text{ mm}$, $d_0 = 0.8 \text{ mm}$,
 $\phi_g = 1.1$, $\phi_l = 0.8$

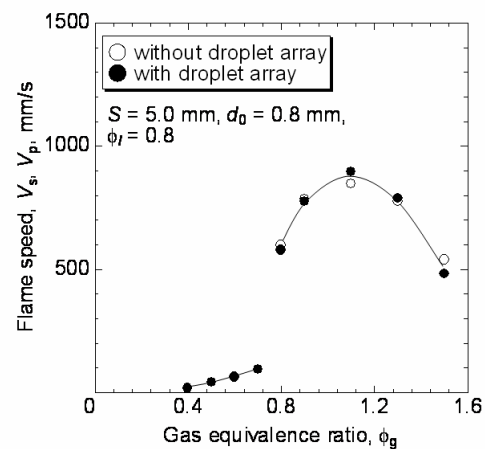


Fig. 5 Flame speed of premixture as a function of gas equivalence ratio.

滴側の酸素を消費し、燃え広がりが抑制されたと考えられる。気体当量比が 0.4 の場合、燃え広がりにより燃焼を開始した液滴はすべて燃え尽きた。気体当量比が増大すると、燃え広がりにより燃焼を開始する液滴数が増えるため、燃焼している液滴付近の酸素が不足し、燃焼途中で消炎して一部の液滴が燃え残ったと考えられる。気相火炎伝播が起こる条件では、気相当量比に依存せず、伝播火炎は燃焼室閉端に達し、すべての液滴が伝播火炎に包まれ、その後すべての液滴が燃え残った。気相火炎伝播が起こる条件の総当量比は 1 を超えているため、一度液滴の燃焼が始まっても、酸素不足により消炎していると考えられる。 $S = 1.6 \text{ mm}$ の条件では、気相火炎伝播限界以下の予混合気中における液滴列燃焼の場合、火炎の進行により燃焼を開始した液滴の個数は気体当量比の変化にかかわらず一定であった。火炎が燃え広がるのに要する時間が液滴の燃焼寿命に比して十分に短いため、気体当量比の増大による酸素濃度減少の影響を受けず、火炎が燃え広がったと考えられる。燃え残る液滴個数については、気相当量比が低い場合は、燃え広がりにより燃焼を開始した液滴はすべて燃え尽き、気体当量比の増大に伴って燃え残る液滴個数が増大した。気相の火炎伝播が起こる条件においては、すべての液滴が伝播火炎に包まれ、その後すべての液滴が燃え残った。

4. 結言

3 次元直交格子状に同一粒径の燃料液滴が配置された均一部分予蒸発噴霧を模擬する液滴列燃焼実験を行った。燃料蒸気 - 空気予混合気中に正デカン液滴列を配置し、周囲雰囲気気体当量比を変化させて実験を行い、その影響を調べた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 火炎伝播限界以下の気体当量比域において、火炎燃え広がり速度は気体当量比の増大に伴って増大する。
- (2) 気相当量比の増大に伴って液滴を伝って火炎が燃え広がるモードから気相火炎伝播モードに遷移する際、火炎速度は不連続に増大する
- (3) 正デカン液滴列は気相火炎伝播に影響を及ぼさない
- (4) 火炎伝播限界以下の気体当量比において、火炎の進行により燃焼を開始する液滴の個数は気体当量比の増大に伴って、一定もしくは増大する。

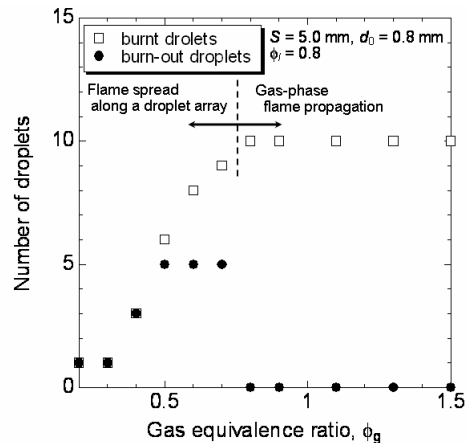


Fig. 6 The numbers of droplets ignited by propagating / spreading flame and burn-out droplets as a function of gas equivalence ratio.

- (5) 本実験の液滴間隔および液滴直径の範囲においては、気相火炎伝播が起こる場合、気体当量比に依存せず、すべての液滴は伝播火炎に包まれ、その後すべての液滴が燃え残る。

謝辞

本研究は、(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Y. Wakashima, M. Kikuchi, S. Yoda, H. Oyagi, M. Mikami, Journal of the Combustion society of Japan, Vol. 47 No. 139 (2005) pp.48-57.
- 2) M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yoda, M. Mikami, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30 (2005) pp. 2001-2009.
- 3) M. Hayasaki, I. Kawasumi, H. Nomura, Y. Ujiie, Proceedings of the 24th International Symposium on Space Technology and Science, 2004-h-17.
- 4) M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yoda, Journal of the Combustion society of Japan, Vol. 46 No. 135 (2004) pp. 42-29.
- 5) D. Segawa, T. Kadota, R. Kohama, H. Enomoto, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28 (2000) pp. 961-968.
- 6) Y. Nunome, K. Yoshinaga, H. Hanai, H. Kobayashi, T. Niioka, Journal of the Combustion society of Japan, Vol. 47 No. 141 (2005) pp. 227-236