

複数の列方向移動可能液滴を含む燃料液滴列火炎燃え広がり実験

日大生産工(院) ○瀬端 宏幸
山口大・理工 三上 真人

日大生産工 野村 浩司
宇宙航空研究開発機構 菊池 政雄

1. 緒言

液体燃料を霧状に微粒化して燃焼させる噴霧燃焼は、ディーゼル機関をはじめ、工業的に多く用いられている燃焼方式である。噴霧燃焼は、燃料の微粒化、蒸発、蒸気の拡散、点火、火炎の形成、および消炎など、多くの過程が同時に進行するため、詳細な燃焼機構の把握が困難である。

噴霧燃焼機構の解明を目的とした燃料液滴列を対象とする火炎燃え広がりに関する研究は、種々の条件において実験および数値解析が行われている。しかしながら、その多くが空間に固定された液滴列を対象としており、火炎燃え広がりが液滴の運動に及ぼす影響や液滴の運動が火炎燃え広がりに及ぼす影響を調べることができていない。著者らの一部は、燃料液滴の列方向の移動に着目した研究として、固定—固定—列方向移動可能液滴の3液滴列実験モデルを用いた火炎燃え広がり実験を正へプタンについて通常重力^[1]および微小重力^[2]環境で行ってきた。その結果、移動可能液滴に燃え広がりが起こるまでは先行して燃焼する液滴の点火の擾乱および火炎の既燃ガス流の影響を受けて移動可能液滴は火炎から遠ざかる方向に移動し、燃え広がりが起こった後は不均一な蒸発により発生する推力または既燃ガス流の斥力により移動可能液滴が火炎進行方向と逆向きに移動する場合と同じ方向に移動する場合があることを示した。

本研究では、移動可能液滴の相互干渉を調べることを目的とし、列方向に移動可能な液滴を複数個並べて燃え広がり実験ができる装置を開発した。本報では、移動可能液滴を含む液滴列の燃え広がり実験における液滴の列方向移動に及ぼす懸垂線の影響および通常・微小重力場での火炎燃え広がりが移動可能液滴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 実験装置

図1に本研究で用いる液滴列モデルの概念図を示

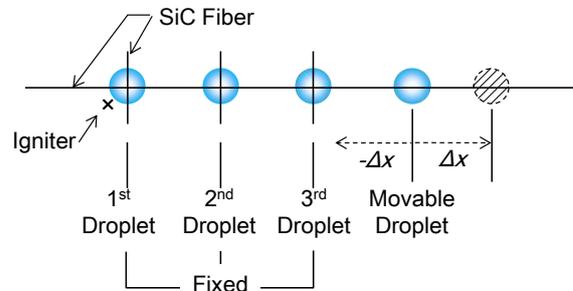


Fig.1 Experimental Model.

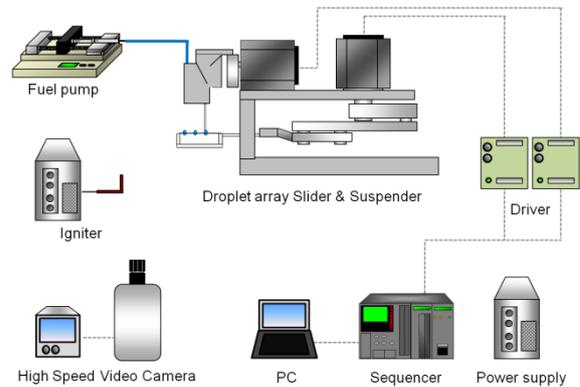


Fig.2 Schematic of the experimental apparatus.

す。懸垂線には直径 14 μm 、長さ 17mm の SiC ファイバ(日本カーボン製 ハイニカロン)を水平かつ直線状に配置し、ファイバ上に液滴を支持する。点火源の影響を排除するため、点火源に近い3液滴(第1液滴から第3液滴)は固定液滴とした。固定液滴とする手法はセラミックス極小球をファイバ上に付着させ、その上に液滴生成する方法および SiC ファイバを十字状に張り、その交点に液滴を生成する方法を用いた。第4液滴以降は懸垂線上の何もない箇所に生成することで列方向に移動可能な液滴とした。図2に実験装置の概略を示す。装置は液滴列支持部、液滴列生成装置、液滴列移動装置、点火装置、燃料供給ポンプ、制御装置および現象撮影装置から構成される。液滴列支持部

Experiments on Flame Spread along a Fuel Droplet Array with Plural Droplets Movable in Array Direction

Hiroyuki SEBATA, Hiroshi NOMURA, Masato MIKAMI and Masao KIKUCHI

はステンレス管をフレーム状に加工したものを用いた。液滴支持部は、液滴列移動装置の可動部に取り付けられている。移動機構としてスライダ・クランク機構を採用した。マイクロステップのステッピングモータを用いることにより、液滴列生成後に支持部を移動させても液滴列配置が乱れないようにした。燃料は燃料供給ポンプからテフロンチューブおよびステンレス管を介して、液滴列生成装置に送られる。燃料供給ポンプにはシリンジポンプを用いた。マイクロシリンジから吐出される燃料は、あらかじめ設定したステッピングモータのステップ数で燃料液滴の直径を制御することができる。液滴列生成部にはガラス針が装着されており、先端から燃料を吐出する。ガラス針は、直径 1 mm のガラス管を引き伸ばすことにより製作し、先端外直径は約 40 μm とした。液滴は等間隔に配置した。初期液滴間隔は、固定液滴および移動可能液滴ともに、液滴生成時の液滴列移動装置送り量により設定値にした。液滴生成装置が燃焼実験の妨げにならないように、生成された液滴列は液滴列移動装置によって生成位置から点火位置まで水平方向に移動させ、生成位置と液滴列の間隔が 45 mm 以上になるようにした。点火源には熱面を採用した。直径 0.29 mm の鉄クロム線をループ状にして配置し、通電することで第 1 液滴への点火を行った。火炎燃え広がり現象の観察には高速度ビデオカメラを用いた。撮影速度は 250~1000 fps、露光時間は 900 μs とした。燃料液滴生成装置、液滴列移動装置、点火装置および高速度ビデオカメラの制御にはシーケンサを用いた。燃料には正デカンを用いた。実験は、室温・大気圧で行った。初期液滴間隔 S_0 は、各液滴の初期中心間距離の平均値とした。液滴直径には液滴の短径 a および長径 b を用いて $d_0 = (a^2b)^{1/3}$ より定義される等価液滴直径を用いた。初期液滴直径 d_0 には、生成した液滴の平均直径を用い、いずれかの液滴が平均値の $\pm 5\%$ の範囲を超えていた場合は、実験データを無効とした。通常重力実験では $d_0 = 0.6 \text{ mm} \pm 5\%$ で一定とした。列方向移動可能液滴の変位は、初期位置を基準にした変位を d_0 で除した無次元変位 Δx で表した。変位は、移動可能液滴が点火源から遠ざかる方向を正とし、近づく方向を負とする。

3. 実験結果および考察

3.1 懸垂線に対する液滴の抗力

本研究にて実現する列方向移動可能液滴は懸垂線上を移動するため、液滴と懸垂線の間で作用す

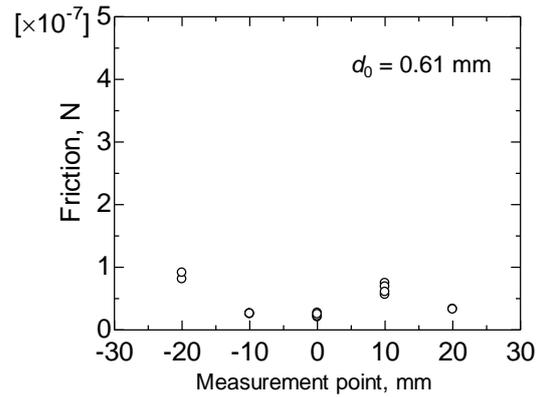


Fig.3 Drag force between suspender and droplet.

る抗力の影響を考慮する必要がある。基礎データとして、室温環境下において懸垂線の傾きを徐々に増大させ、液滴が動き出すときの抗力を調べた。抗力測定的手法として長さ 40 mm の範囲に測定位置を 5 ポイント定め、それぞれの位置に液滴を懸垂し、測定を行った。測定には、今後の宇宙実験で使用が予定されている直径 78 μm の SiC ファイバ (Specialty Materials 社製 SCS-9A) を用いた。このファイバには、表面に数 μm の凹凸があることが光学顕微鏡観察の結果からわかった。そのためファイバに表面処理を施し、その後に抗力の測定を行った。表面処理として、塩酸 (0.5 mol/l) に浸漬した。また、実験中ファイバが火炎によって加熱されることを考慮し、小型電気炉を用いて最高温度 800 $^{\circ}\text{C}$ でファイバを加熱処理した。図 3 に各測定ポイントの測定結果を示す。抗力は $0.5 \times 10^{-7} \text{ N}$ から $1.0 \times 10^{-7} \text{ N}$ 程度であることがわかった。この値は、液滴を移動させる力に対してほぼ同程度であると見積もられる。液滴温度が上昇すると、液滴と懸垂線の間で働く抗力は小さくなる。今後、燃焼している液滴の抗力も計測する必要がある。また、抗力が懸垂線実験部においてより均一かつ小さな値となる前処理手法の確立、およびファイバの個体差をなくす前処理手法の確立が必要もある。

3.2 マランゴニ対流の影響

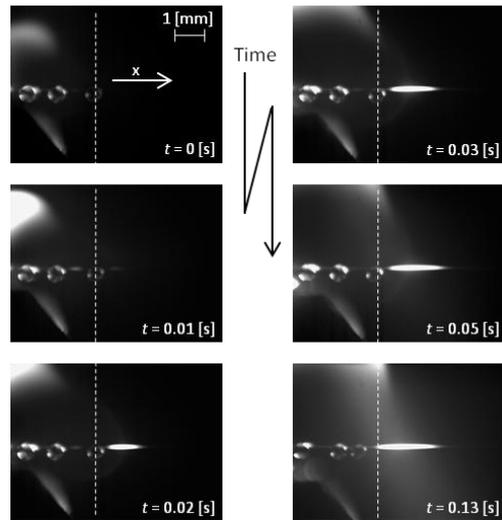
火炎の燃え広がりに伴い、移動可能液滴は火炎から非対称な加熱を受ける。非対称な加熱は、液滴内にマランゴニ対流を誘起する。液滴を懸垂線が貫いている本実験の場合、液滴の片側の懸垂線のみが火炎によって加熱されている状況では、熱が懸垂線を伝わり、液滴の内部に強いマランゴニ対流が発生する。以前の調査^[3]から、室温の液滴においてはマランゴニ対流により発生する液滴駆動力が、液滴と懸垂線の間抗力に比較して、充

分に小さいことがわかった。しかしながら、燃焼により液滴温度が沸点近傍まで上昇すると、液滴の懸垂線に対する抗力が低下するので、燃焼する液滴に及ぼすマランゴニ対流駆動力の影響を調べる必要がある。移動可能液滴の片側の懸垂線を極細ステンレス管(外径 0.4 mm, 内径 0.2 mm)で囲い、火炎が懸垂線に直接触れないようにし、液滴の燃焼挙動観察を行った。移動可能液滴をステンレス管端部から 1.5 mm の位置に配置し、点火・燃焼させた。液滴にエンベロープ火炎が形成された後、液滴の片側の懸垂線のみが赤熱している状況でも液滴は移動しないことがわかった。この結果より、燃焼する液滴の移動に及ぼすマランゴニ対流の影響は小さいことがわかった。液滴温度の上昇に伴って表面張力が低下するので、マランゴニ対流が弱くなったと推察される。今後は液滴内部の流動を可視化し、実験結果の検証を行う必要がある。

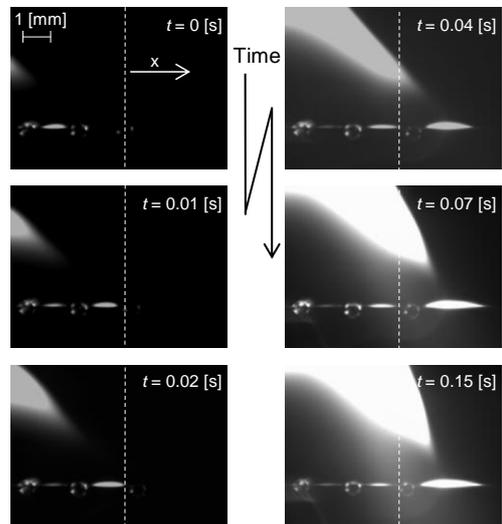
3.3 液滴列火炎燃え広がり実験

図 4 に、通常重力場における固定—固定—固定—列方向移動可能液滴を燃え広がる火炎の連続画像を示す。点火用電熱線からの発光を視野から除くため、第 1 液滴は画像には写っていない。図中の t は、第 2 液滴が点火してからの経過時間を示している。液滴の点火時刻の定義は、燃え広がり火炎が液滴の中心を含む懸垂線に垂直な面に達した時刻とした。図中の白い破線は、移動可能液滴の初期位置を示している。 $S_0 = 1.3 \text{ mm}$ の場合、 $t = 0.01 \text{ s}$ で移動可能液滴が点火しており、その時点で正方向に若干の変位が認められた。燃え広がり形態はモード 1 であった^[4]。群燃焼火炎が十分に発達した $t = 0.05 \text{ s}$ 以降では、移動可能液滴が負方向に移動し始め、燃え広がり進行とともに第 3 液滴と合体するまで移動し続けることがわかった。 $S_0 = 2.0 \text{ mm}$ の場合、燃え広がり形態はモード 2 であった。この条件では、第 2 液滴が点火した直後、移動可能液滴が正方向に大きく移動し始めることが見て取れる。 $t = 0.02 \text{ s}$ において移動可能液滴が点火し、 $t = 0.04 \text{ s}$ 以降負方向に移動する挙動が観察された。図 5 に列方向移動可能液滴の変位履歴を示す。液滴間隔が広い $S_0 = 2.0 \text{ mm}$ の場合、自身が点火するまでの移動可能液滴の正方向変位が顕著であった。これは、点火前の移動可能液滴が第 2 および 3 液滴を取り囲む火炎の外にあり、火炎側の液滴表面で局所的に活性化する蒸発による推力の不均衡および火炎の既燃ガス流が原因と考えられる。

図 6 に微小重力実験で得られた列方向移動可能液滴の移動変位の結果の一例を示す。無次元液滴



(a) $S_0 = 1.3 \text{ mm}$, $d_0 = 0.60 \text{ mm}$



(b) $S_0 = 2.0 \text{ mm}$, $d_0 = 0.60 \text{ mm}$

Fig.4 Sequential images of a spreading flame at normal gravity.

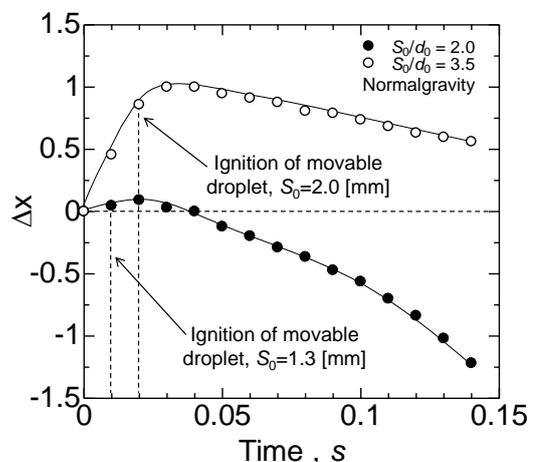


Fig.5 Temporal variations of dimensionless displacement of a movable droplet at normal gravity.

間隔 S_0/d_0 は 5.3 である。第 2 固定液滴が点火した後、列方向移動可能液滴は正方向に移動することがわかった。この時点では移動可能液滴は点火していないことから、第 2 および第 3 液滴の火炎から発生する既燃ガス流が移動可能液滴を動かしたと考えられる。その後、列方向移動可能液滴が点火すると、移動方向は負の向きに転じている。これは、第 2 液滴と第 3 液滴の間に火炎が存在しておらず、第 3 液滴が群燃焼火炎の閉じた側(第 3 液滴の正の側)から強く加熱されたため、蒸発により発生する推力の不均衡が起これ、負方向に移動したと考えられる。本実験においても、過去の結果^[1,2]と定性的に一致する結果が得られた。

図 7 に、固定液滴が 3 個、移動可能液滴が 3 個並んだ場合の燃え広がり連続写真を示す。無次元液滴間隔 S_0/d_0 は 5.4 である。すべての列方向移動可能液滴が、点火するまでに列方向正の向きに移動することがわかった。また、移動可能液滴は、自身が点火すると静止することもわかった。過去に行われた移動可能液滴を複数にした場合の火炎燃え広がり数値シミュレーションによると^[2]、ある液滴間隔においては、移動可能液滴が点火後に静止し、燃え広がりが進行する可能性が示されている。

4. 結言

列方向移動可能液滴を複数個配置できる液滴列燃焼実験装置を新たに開発した。実験結果に及ぼす懸垂線の影響を考察した。固定—固定—固定—列方向移動可能液滴による火炎燃え広がり通常重力・微小重力実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 液滴の懸垂線に対する静止抗力を測定した。実験にて使用可能な懸垂線の選定手法と抗力測定手法を確立できる見通しを得た。
- (2) 懸垂線の温度が移動可能液滴に対して非対称な条件においても、液滴内部に発生するマランゴニ対流は液滴の移動現象に影響を及ぼさないことがわかった。
- (3) 固定液滴と複数の移動可能液滴からなる液滴列の火炎燃え広がり微小重力実験に成功した。無次元液滴間隔 5.4 の条件において、未燃の移動可能液滴が列方向正の向きに順次移動しながら、自身が点火すると静止し、燃え広がりが進行する現象が観察された。

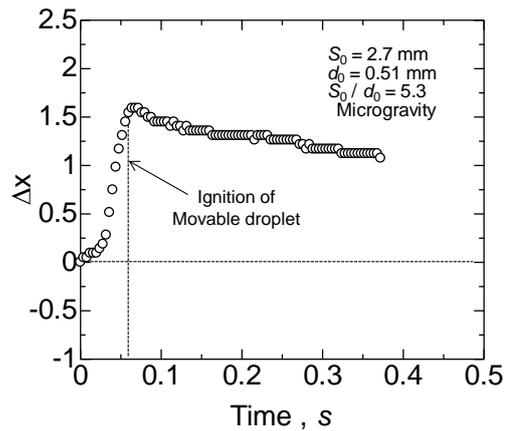


Fig.6 Temporal variations of movable droplet at microgravity.

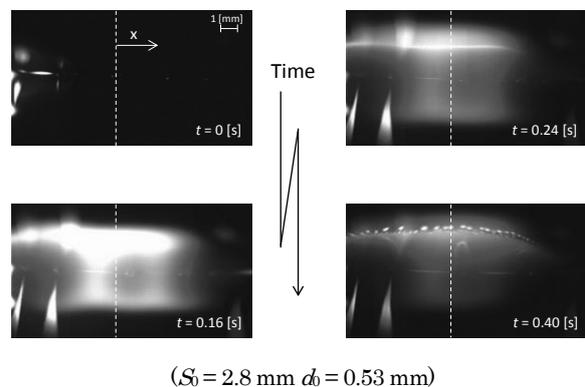


Fig.7 Flame spread behavior of droplet array with three moveable droplets (microgravity).

参考文献

1. Nomura, et. al., Proceedings of the Combustion Institute 30 1991-1999 (2005)
2. Nomura, et. al., Proceedings of the Combustion Institute 32 2163-2169 (2009)
3. 瀬端・他 3 名, 第 46 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.556-557 (2008)
4. 梅村, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.68, No.672 pp.2422-2428 (2008)