

燃え広がり火炎が誘起する液滴運動に及ぼす固定-移動可能液滴間隔の影響

日大生産工(院) ○平賀 翔季 日大生産工 野村 浩司 日大生産工 菅沼 祐介
 山口大 三上 真人 JAXA 菊池 政雄 NASA DIETRICH Daniel

1 緒言

噴霧燃焼は工業的に広く用いられているが、液滴直径の不均一性、ランダムな相対運動、液滴分布の不均一性など、現象が複雑なため、完全には解明されていない。このため、種々の噴霧燃焼研究が行われている。噴霧を単純化した単一液滴、液滴列、液滴格子などの実験モデルを用いて噴霧燃焼の基礎研究が行われているが、その多くは空間に固定された液滴を用いており、火炎燃え広がりと液滴運動の相互作用についての報告が見られなかった。そこで、Nomuraら[1]は直径78 μm のSiCファイバを軸方向に用い、ファイバ上に直接液滴を生成した、固定-固定-列方向移動可能液滴の正へプタン3液滴列モデルにて、火炎燃え広がり実験を通常重力環境下で行った。しかしながら、移動可能液滴をファイバに直接生成していることから、マランゴニ対流や熱的影響が液滴挙動に及ぼす影響を検討する必要があった。

本報では、移動可能液滴を2本の細いファイバの間に生成することで、大幅にファイバが液滴に及ぼす熱的影響を減少させ、さらにマランゴニ対流が液滴挙動に及ぼす影響を抑制した、新たな実験装置を開発した。この装置を用いて火炎燃え広がり微小重力実験を行ったのでその結果を報告する。得られた実験結果は参考文献[1]の実験の考察に利用する予定である。

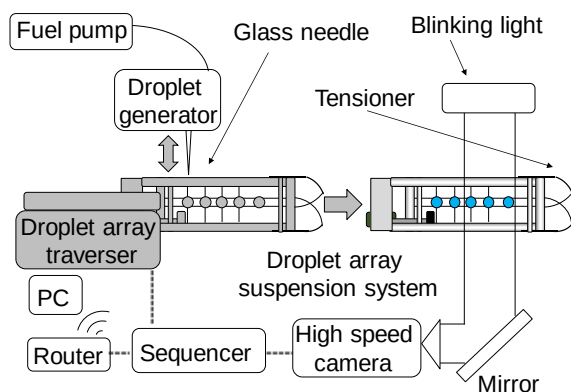


Fig. 1 Experimental apparatus.

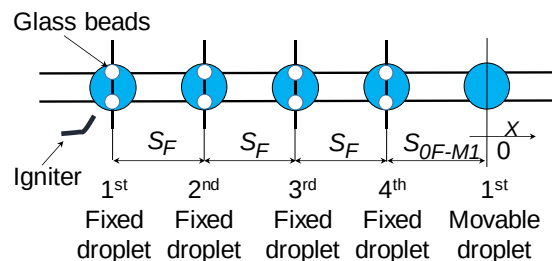


Fig. 2 Experimental model.

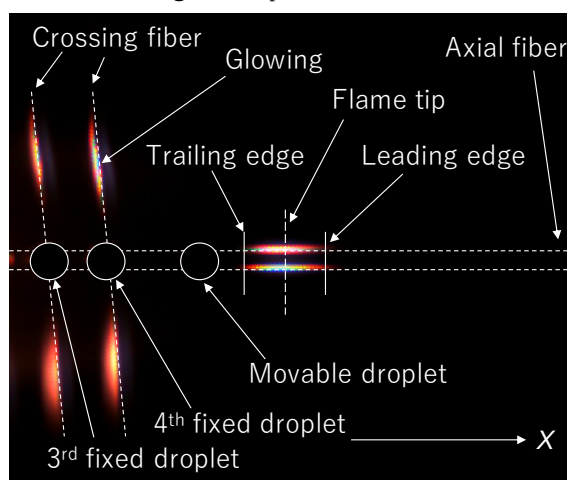


Fig. 3 Image of glowing fibers.

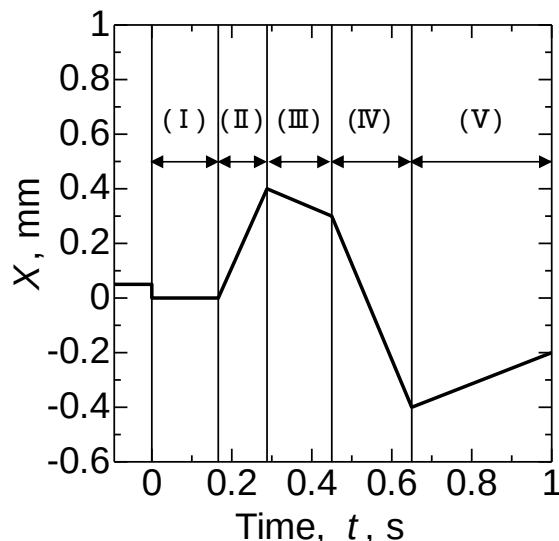


Fig. 4 Example of position history.

Effect of spacing between fixed and movable droplets on droplet motion induced by flame spreading along a fuel droplet array

Shoki HIRAGA, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA, Masato MIKAMI,
 Masao KIKUCHI and Daniel DIETRICH

2 実験装置および方法

実験装置概略を図1に示す。実験装置は実験モジュール、現象観察装置、制御装置からなる。実験モジュールは液滴列支持器、液滴列生成、液滴列移動装置、点火装置、燃料供給系から構成される。現象観察装置は、プリンキングライト、ミラー、高速度ビデオカメラ (Vision Research Inc. Phantom Miro 3) からなる。燃烧する液滴の直接画像とバックリット画像は交互に記録される。制御装置はシーケンサおよびI/Oユニットからなる。液滴列生成装置の先端には直径40 μm のガラス針が設置されており、ステッピングモータにより前・後進する。液滴列移動装置は高精度ステッピングモータにより駆動される。点火装置は直径約0.29 mmの鉄クロム線を使用した。PCはシーケンサと無線でつながっており、PCを介してシーケンサを操作し、液滴列生成装置、液滴列移動装置、現象観察装置、点火装置を制御する。液滴列支持器はH型のアルミブロックに外径1 mmのステンレスパイプで製作した箱型フレームが取り付けられた構造となっている。ファイバには直径8.5 μm のSiCファイバ(宇部興産社製 チラノ繊維 TY-S1H16PX)を使用した。軸方向に張られた2本のファイバとそれに直交する1本のファイバが作る2つの交点の間に生成された液滴が固定液滴となる。固定液滴は第1固定液滴点火時の擾乱が移動可能液滴に及ぼす影響を抑制するために使用している。移動可能液滴は2本の軸方向ファイバの間に生成される。軸方向ファイバには、1.6°傾ければ直径0.6 mmの液滴が重力で移動することを確認したものを使用した。2本の軸方向ファイバの先端にはSiCファイバで製作したテンショナが接続されており、常に張力がかかった状態で固定されている。これによって火炎燃え広がり時の軸方向ファイバの熱膨張によるたわみを抑制している。実験で使用する液滴列モデルを図2に示す。固定液滴は4個、移動可能液滴は1個とした。固定-固定液滴間隔 S_F は $1.4 \text{ mm} \pm 5\%$ 、初期固定-移動可能液滴間隔 S_{OF-M1} は $1.8 \sim 8.0 \text{ mm}$ 、初期液滴直径を $0.7 \text{ mm} \pm 5\%$ とした。連続写真から測定された移動可能液滴の中心位置を X とし、 X の原点は μg センサが作動した時刻から第3固定液滴が点火する直前の時刻までの移動可能液滴の平均位置とした。第3、第4固定液滴点火時刻は、固定液滴保持ファイバが発光した時刻とし、移動可能液滴の点火時刻は移動可能液滴の正方向側で軸方向ファイバが発光した時刻とした。ファイバの発光の様子を図3に示す。軸方

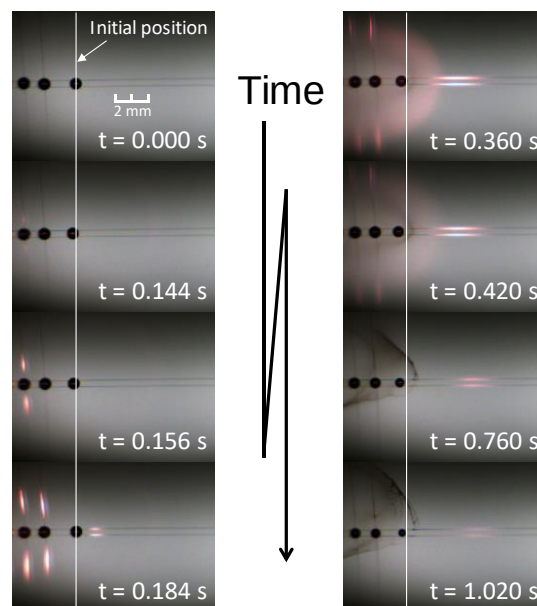
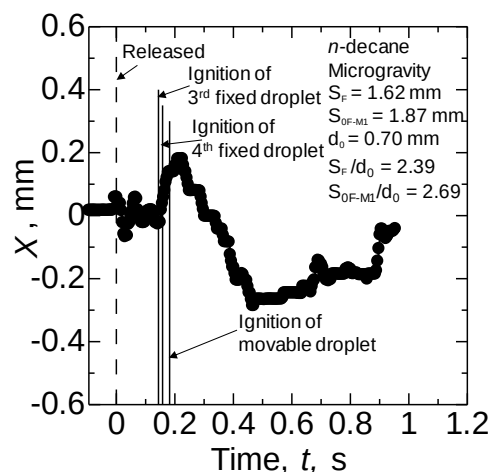
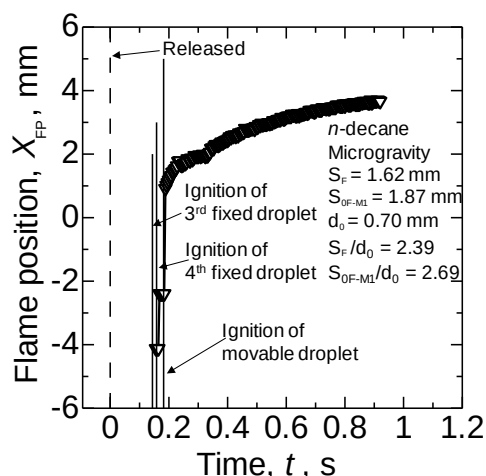


Fig. 5 Sequential images of flame spread and droplet motion.



(a) Droplet center position



(b) Flame position

Fig. 6 Histories of center position of movable droplet and flame position.

向ファイバの発光部の前縁位置と後縁位置の2分の1の位置を火炎先端と定義した。

実験は微小重力環境で行った。微小重力環境の実現には学内の小型落下塔(微小重力時間約1.1 s)を使用した。実験装置はドラッグシールドがある落下カプセルに取り付けられている。液滴列生成のために、液滴列移動量、ガラス針降下量、燃料吐出量などのパラメータを微小重力実験前に調整する。燃料は正デカンを使用した。パラメータ調整後、液滴列支持器を液滴列移動装置で移動させ、ガラス針を降下させ、燃料を吐出して液滴を生成する。これを自動的に5回行い、燃料液滴列を生成する。燃料液滴列生成完了後、液滴列支持器を実験位置まで移動させる。蒸気層準安定化させるために、液滴列を実験部に移動させてから30 s後に実験を開始した。実験装置が微小重力になったことを μg センサで検知し、点火と撮影を開始した。高速度ビデオカメラ(撮影速度: 250 fps, 露光時間2000 μs)で撮影した動画から、自作のプログラムを用いて液滴中心位置履歴と液滴直径を計測する。得られた液滴中心位置履歴の簡略モデルを図4に示す。液滴の運動は図4のように(I)~(V)の区間に分けられることがわかった。(II)区間(第4固定液滴点火時刻から移動可能液滴点火時刻まで)の変位履歴を最小二乗法で直線近似して求めた平均速度を正方向平均移動速度 v_{pa} 、移動可能液滴点火後の移動変位のピークを中央とする前後5データの平均値を最大変位 $\Delta X_{\max}$ とした。また、正規化火炎燃え広がり速度は、移動可能液滴点火時の第4固定液滴からの距離と、それぞれの点火時刻の差から算出した。今回、燃え広がり火炎が誘起する液滴運動に着目していることから、定量的な詳細解析は(II)の区間までとする。

3 実験結果および考察

3. 1 $S_{0FM1}/d_0 = 2.5 \sim 3$ の場合

火炎燃え広がりと液滴運動の連続写真を図5に、また、移動可能液滴の移動履歴と火炎先端履歴を図6に示す。時刻の原点は μg センサが作動した時刻とした。微小重力環境になった直後、落下時のカプセルの振動によって移動可能液滴は振動して約0.05 mm移動した。 $t = 0.144$ sで第3固定液滴が点火すると、移動可能液滴は正方向へ移動した。これは、固定液滴が形成する群燃焼火炎の熱が移動可能液滴まで伝わり、移動可能液滴の負方向側が局所的に加熱されたことによって蒸発にアンバランスが生じ、正方向への推力が生じたためと考えられる。移動可能液滴は、 $t = 0.182$ sで点火した。正方向平均

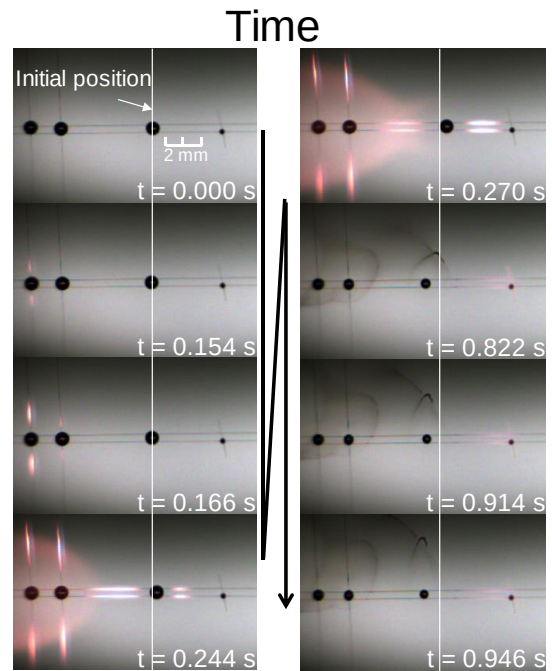
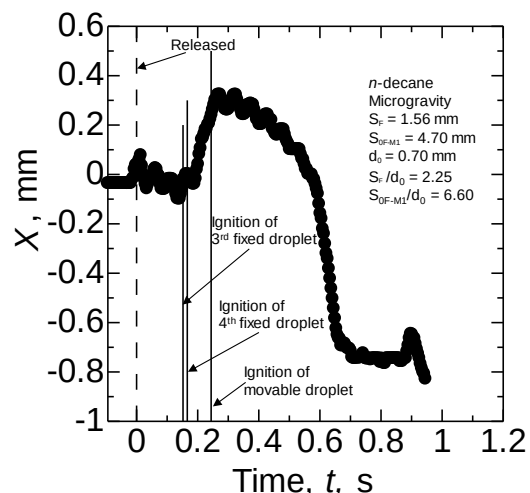
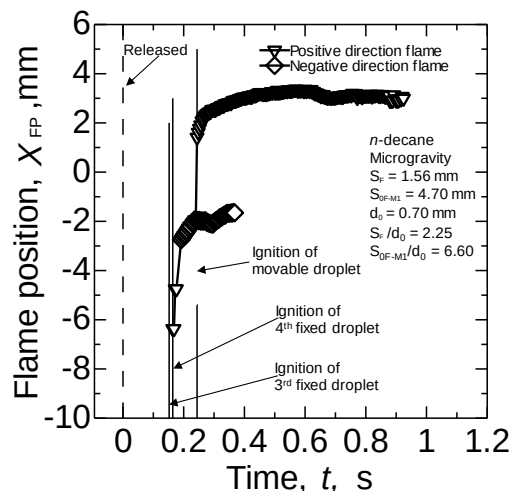


Fig. 7 Sequential images of flame spread and droplet motion.



(b) Droplet center position



(b) Flame position

Fig. 8 Histories of center position of movable droplet and flame position.

移動速度 v_{pa} は4.47mm/sであった。また、最大変位 ΔX_{max} は約0.17 mm, 正規化火炎燃え広がり速度は57.6 mm²/sであった。移動可能液滴が群燃焼火炎に包まれた後、移動可能液滴は負方向への移動に変化した。これは、移動可能液滴の正方向側が群燃焼火炎によって加熱され、蒸発のアンバランスによって負方向推力が誘発されたと考えられる。ここまで、移動履歴はRef. 1と定性的に同じ結果である。約0.2 sの負方向の移動の後、移動可能液滴は再び正方向への移動に変化した。これは、群燃焼火炎が移動可能液滴から遠距離に存在することから、第4固定液滴と移動可能液滴の蒸気が衝突することで発生する斥力が支配的になったからだと考えられる。

同一条件の実験を3回行い、再現性を確認することができた。3回の実験での正方向平均移動速度の平均速度は4.74mm/s, 最大変位の平均変位は0.19 mm, 平均正規化火炎燃え広がり速度は58.2 mm²/sだった。

3. 2 $S_{0F-M1}/d_0 = 6.5 \sim 7.0$ の場合

火炎燃え広がりと液滴挙動の連続写真を図7に、移動可能液滴の移動履歴と火炎先端履歴を図8に示す。実験開始後すぐ、落下時の擾乱によって移動可能液滴は振動して約0.05 mm移動した。 $t = 0.152$ sで第3固定液滴が点火すると、移動可能液滴は正方向へ移動し、移動可能液滴は、 $t = 0.244$ sで点火した。正方向平均移動速度 v_p は3.83mm/sであった。また、最大変位 ΔX_{max} は約0.32 mm, 正規化火炎燃え広がり速度は45.4 mm²/sであった。移動可能液滴が群燃焼火炎に包まれた後、緩やかに負方向へ移動した。これは、移動可能液滴への火炎燃え広がり後も移動可能液滴の負方向側に火炎が存在することから、負方向側でも蒸発が活発でありためと考えられる。約0.2 s間の緩やかな負方向移動の後、移動可能液滴は急激に負方向へ移動した。負方向火炎が消滅したことにより、正方向側の蒸発が支配的になったためと考えられる。その後、移動可能液滴は停滞した。固定液滴との距離が短くなったことから、蒸気の衝突による斥力によって停滞したと考えられる。

3. 3 液滴間隔と正方向平均移動速度の関係

図9に初期無次元固定-移動可能液滴間隔 S_{0F-M1}/d_0 と移動可能液滴の区間(II)における平均移動速度の関係を示す。 S_{0F-M1}/d_0 が狭い範囲、広い範囲で大きな値をとり、中間の範囲で最小値をとることがわかった。 S_{0F-M1}/d_0 が狭い領域では、第4固定液滴点火前に既に移動可能液滴が群燃焼換えによって加熱されて移動を開始しているため、蒸発推力の発生時間が長くなり、

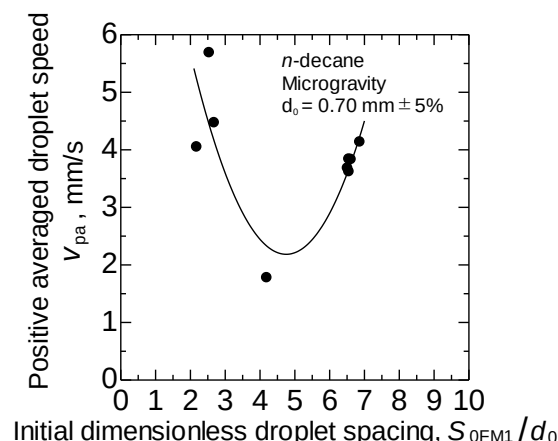


Fig. 9 The average of the movable droplet speed

平均移動速度が増大したと考えられる。 S_{0F-M1}/d_0 の増大に伴って群燃焼火炎の影響が次第に小さくなり、さらに S_{0F-M1}/d_0 が大きくなると火炎燃え広がり時間に時間を要するようになり、液滴の加熱時間が増大するため、平均移動速度が増大したと考えられる。

現状ではデータ数が少ないため、今後、さらに実験回数を重ね、火炎燃え広がりと液滴挙動の相互関係を明らかにしていく。

4 結言

2本の細いファイバの間に移動可能液滴を生成し、マランゴニ対流が移動可能液滴の運動に及ぼす影響を排除した新たな実験装置を開発し、微小重力環境で火炎燃え広がり実験を行った。以下に得られた結果を列挙する。

- (1) 火炎燃え広がり移動可能液滴の運動を誘発する。
- (2) 初期固定-移動可能液滴間隔を変化させると、移動可能液滴の運動履歴が変化する。
- (3) 第4固定液滴の点火時刻から移動可能液滴の点火時刻までの移動可能液滴の平均速度は、初期無次元固定-移動可能液滴間隔の増大に伴って減少し、無次元液滴間隔4付近で最小値をとった後、増大する。

「参考文献」

- 1) 法華津祥太, 野村浩司, 三上真人, 菊池政雄, "宇宙実験に向けた列方向移動可能な正ヘプタン液滴列の火炎燃え広がり実験", 第52回燃焼シンポジウム, (2014), p.464.