

燃料液滴列燃え広がり火炎により生じる 列方向移動可能液滴の運動

日大生産工(院) ○森田 英嗣
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

噴霧燃焼はディーゼル機関など工業的に幅広く使用されている液体燃料の燃焼方式の一つであるが、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、未だに完全な機構解明に至っていない。噴霧燃焼機構の解明を目的とし、燃料液滴列を対象とする火炎燃え広がりに関する実験および数値解析が、種々のモデルおよび条件において行われている。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、燃料液滴の列方向運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⁾環境で行った。振り子の先端に燃料液滴を懸垂することで、液滴の列方向移動を可能にした。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からの既燃ガス流の影響を受け、未燃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、液滴表面からの不均一な蒸発により発生する不均衡推力、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。

瀬端ら³⁾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。正へプタンを用いた移動可能液滴を含む液滴列の燃え広がり実験により、液滴の列方向移動に及ぼす懸垂線の影響を調べた。その結果、液滴と懸垂線の間に働く抗力および懸垂線を介しての火炎から液滴への熱流入が、液滴の運動に及ぼす影響は

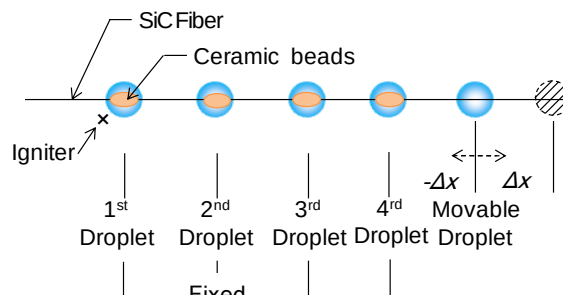


Fig.1 Experimental model.

小さいことを明らかにした。

本研究では、4個の固定液滴および複数の列方向移動可能液滴を直線状懸垂線に配置した液滴列モデルを用い、火炎燃え広がりが液滴運動に及ぼす影響を調べる。燃料には正デカンを用いる。本報では予備実験として、固定液滴4個および移動可能液滴1個または2個の液滴列を実験対象とした火炎燃え広がり実験の結果を報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に本研究で用いる液滴列モデルを示す。水平に張られた長さ 30 mm の直線状懸垂線に液滴を懸垂・配置することにより、液滴の列方向移動を可能にした。懸垂線には直径 $78 \mu\text{m} \pm 10\%$ の SiC ファイバ (Specialty Materials 社製 SCS-9A) を用いた。点火源の影響を排除するため、点火源に近い4つの液滴(第1液滴から第4液滴)は固定液滴とし、各固定液滴中心間距離が $1.6 \text{ mm} \pm 10\%$ 以内となるように配置した。固定液滴液滴間隔 S_F は固定液中心間距離の平均値とした。液滴の固定には、直線状懸垂線にセラミックスビーズを設置し、ビーズを包含するように液滴を生成する方法を用いた。第5液滴以降は直線状懸垂線に炭酸ガスレーザ光で作成した微小荒れスポットに生成した。振り子懸垂線を用いて液滴の列方向移動を可能にす

Motion of Droplets Movable in Array Direction Induced by Flame Spread along a Fuel Droplet Array

Hidetsugu MORITA, Hiroshi NOMURA, Masato MIKAMI and Masao KIKUCHI

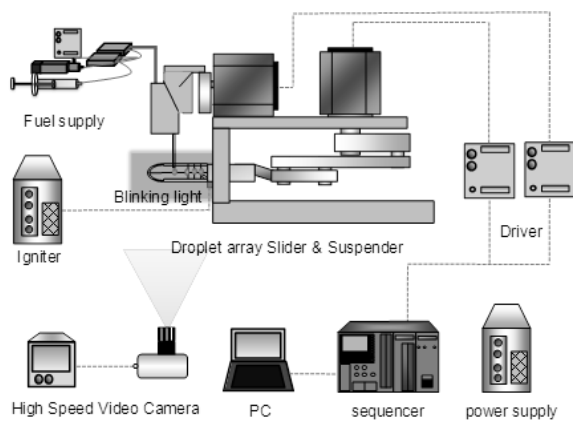


Fig.2 Schematic of the experimental apparatus.

る実験モデルに比較し、移動可能液滴の懸垂方法が非常に単純であるため、複数の列方向移動可能液滴を容易に配置することができる。

Fig. 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。液滴列支持部は、前述の直線状懸垂線を取り付けたステンレス管の枠である。この枠は直径 1 mm のステンレス管を U 字に曲げてフレーム状に加工したものを用いた。第 1 液滴と点火源の距離調整を容易にするため、点火源は液滴列支持部に取り付けた。燃え広がり実験時に懸垂線が熱膨張により若干延びるので、点火源側の懸垂線固定は半径方向のみの拘束とし、軸方向にはほぼ自由とした。液滴列支持部の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の吐出量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、先端外直径を約 40 μm とした。一つの液滴を懸垂線上に生成してから液滴列移動装置により液滴列支持部を列方向に移動させ、次の液滴を生成した。これを繰り返すことにより、液滴列を生成した。

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

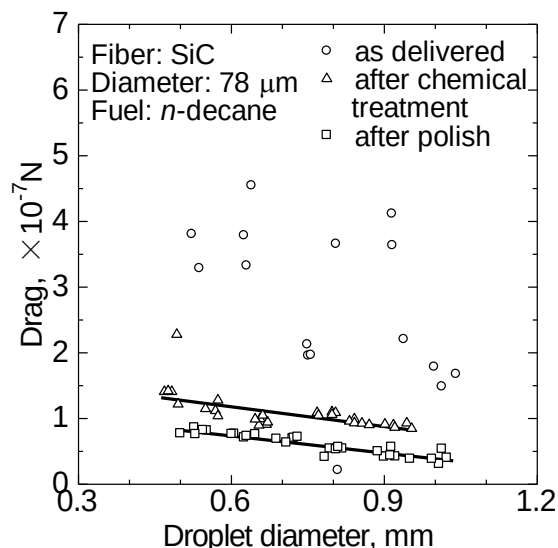


Fig. 3 Drag between droplet and SiC fiber.

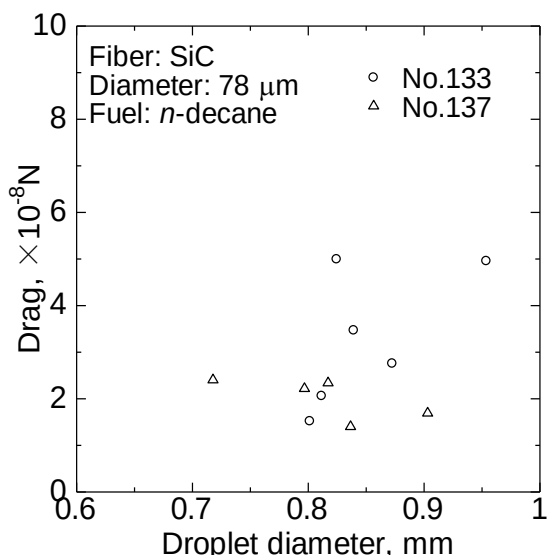


Fig. 4 Drag at anchor point.

生成位置から点火位置まで水平方向に移動させた。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 500 fps, 露光時間は 1998 μs とした。ブリンクバックライトは高速度カメラと同期することにより 2 こまに 1 回の周期で点滅し、点灯時に液滴の輪郭を、消灯時に火炎を撮影する。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。

実験は、室温・大気圧・通常重力環境で行った。初期固定ー移動可能液滴間隔 S_{0F-M1} は第 4 固定液滴と移動可能液滴の初期中心間距離とした。初期移動可能液滴間隔 S_{0M1-M2} は、第 1 と第 2 移動可能

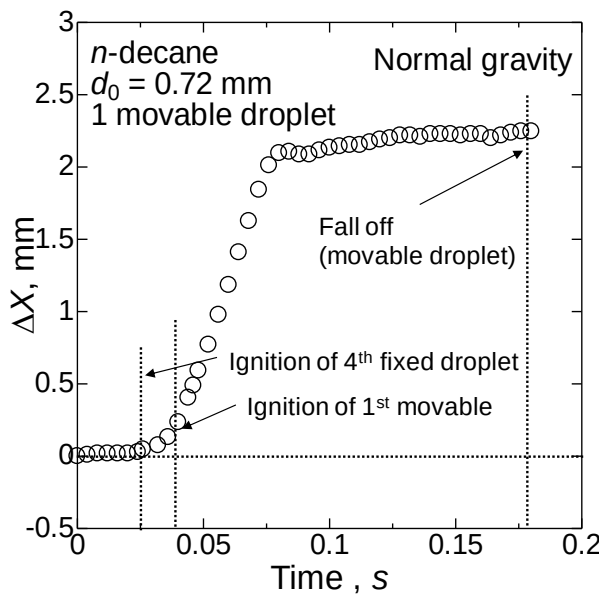
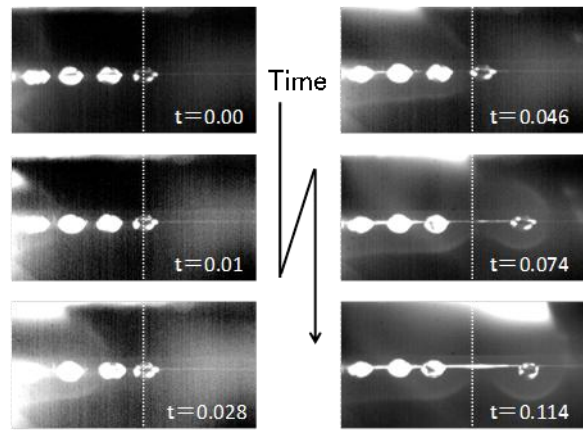


Fig. 5 Behavior of spreading flame and history of 1st movable droplet displacement for an array with four fixed droplets and single movable droplet. $S_F = 1.6$ mm, $S_{0F-M1} = 1.42$ mm.

液滴の中心間距離である。液滴直径には液滴の短径 a および長径 b を用いて $d = (a^2b)^{1/3}$ 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、第1液滴を除く全液滴の平均初期直径を用い、平均値算出に用いたいずれかの液滴が平均値の±5%の範囲を超えていた場合は、実験データを無効とした。初期液滴直径は 0.75 mm ± 5% で一定とした。移動液滴の変位は、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。

2.2 懸垂線の表面処理方法

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る抗力の影響を将来考慮する必要がある。未処理の懸垂線は、液滴の運動を妨げる抗力が大きい。繊維製造時やその後の取り扱いにおいて表面にできた傷、付着した汚れおよび表面のコーティング

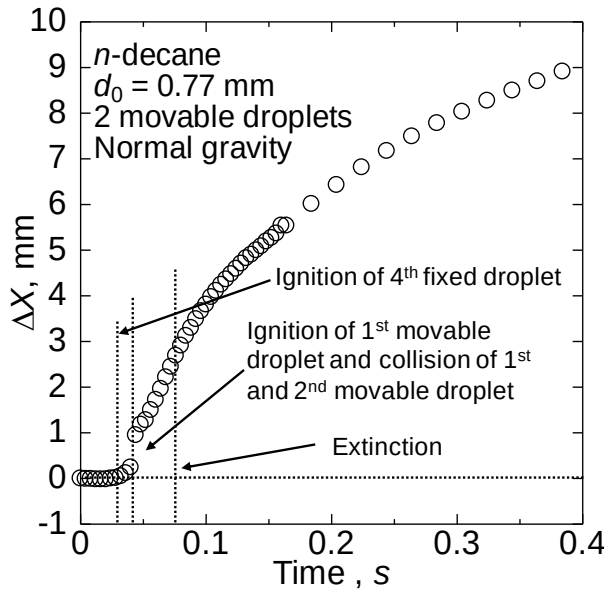
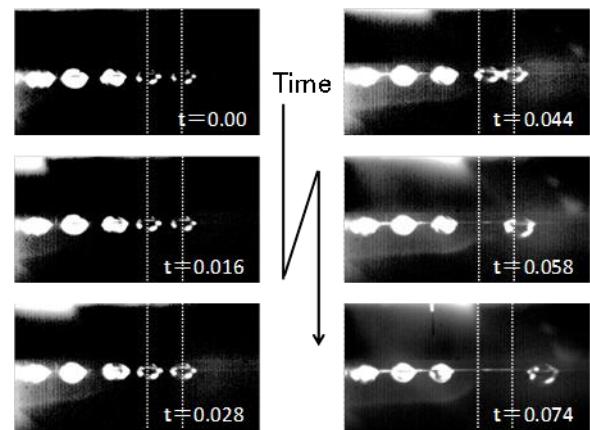


Fig. 6 Behavior of spreading flame and history of 1st movable droplet displacement for an array with four fixed droplets and two movable droplets. $S_F = 1.6$ mm, $S_{0F-M1} = 1.43$ mm, $S_{0M1-M2} = 1.45$ mm.

の剥がれなどが原因だと推察される。これら抗力を大きくする原因となる要素を排除するため、懸垂線表面に化学的および物理的处理を施した。化学的表面処理においては、未処理の懸垂線を 60°C の塩酸 0.5 mol/l に 2 時間、浸漬する。化学的表面処理後、懸垂線の静止抗力を測定し、静止抗力の最大値が 1.0 最大値⁷ N より大きい場合には物理的表面処理を施した。物理的表面処理では、懸垂線表面を精密仕上げ用研磨フィルム #10000 番（住友スリーエム株式会社）で研磨を施した。研磨後、懸垂線をエタノールでふき、再度静止抗力を測定した。

移動可能液滴を初期位置に静止させるため、炭酸ガスレーザを用いて表面処理後の懸垂線表面に微小荒れスポットを作った。表面処理後の懸垂線に、 3.65 W の炭酸ガスレーザ光を焦点距離 95.25

mm のジंकセレンレンズで集光し、15 s 間照射した。

3. 実験結果および考察

3.1 懸垂線の表面処理

処理を終了するごとに静止抗力を測定した結果を Fig. 3 に示す。化学的処理および物理的処理をおこなうことで懸垂線抗力の抗力およびそのばらつきを抑えることが可能であることがわかる。微小荒れスポットの静止抗力を調べた結果を Fig. 4 に示す。微小荒れスポットが静止抗力を大幅に増大させることはないことが確認された。

3.2 火炎燃え広がり実験

Fig. 5 に 1 つの移動可能液滴を含む燃料液滴列を燃え広がる火炎の連続画像と移動可能液滴の変位履歴を示す。点火用電熱線からの強い発光を高速ビデオカメラの視野から除くため、第 1 液滴は視野に入れていない。グラフの横軸は、第 2 固定液滴が点火した時刻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、列方向移動可能液滴の初期位置を示している。 $t = 0.046$ s で移動可能液滴が正方向に移動しながら点火し、その後減速して停止した。火炎燃え広がり形態⁴⁾はモード 1 であった。

Fig. 6 に、2 つの移動可能液滴を含む燃料液滴列の火炎燃え広がり連続画像と第 1 移動可能液滴変位履歴を示す。 $t = 0.028$ s で第 4 固定液滴が点火し、第 1 移動可能液滴は正方向に移動を始めた。 $t = 0.044$ s において、モード 1 の燃え広がり形態で第 1 移動可能液滴が点火、同時に第 2 移動可能液滴と合体し始めている。その後、 $t = 0.074$ s において合体した移動可能液滴のエンベロップ火炎が消失した。これは、合体により液滴温度が急激に降下したことが原因と考えられる。合体した移動可能液滴はそのまま正方向へ移動を続けた。

Fig. 5 と 6 の移動履歴の比較を行ったグラフが Fig. 7 である。 $t = 0.04$ s まで第 1 移動可能液滴の変位履歴は同一だが、複数移動可能液滴列において第 2 移動可能液滴との合体が起こった $t = 0.044$ s から変位履歴が異なっている。移動可能液滴が単数の液滴列の場合、同じ条件の実験を 3 回行ったが、全て移動可能液滴に燃え広がりが起こった。移動可能液滴が 2 個の液滴列の実験は、初期条件をそろえることができず、1 回しか行えなかったが、移動可能液滴同士の合体による液滴温度の降下、および合体により群燃焼火炎から離れる方向

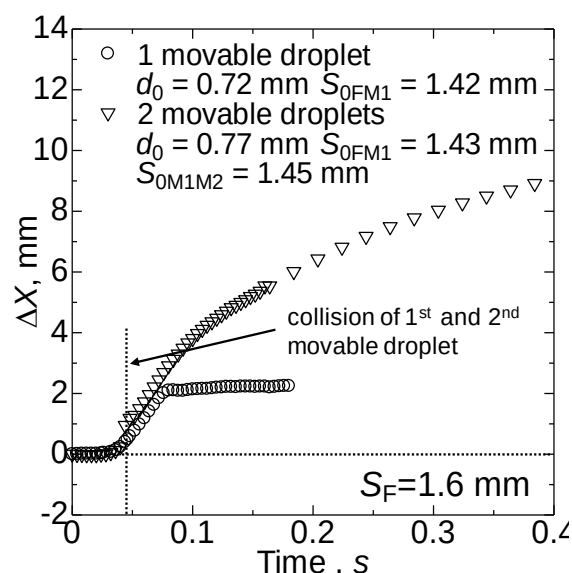


Fig. 7 Comparison of displacement histories of 1st movable droplet between fuel droplet arrays with single and two movable droplets.

に急激に移動可能液滴が移動したことが原因で、移動可能液滴に燃え広がりが起きなかったと推察される。

4. 結言

通常重力環境下で単数または 2 個の移動可能液滴を含む液滴列火炎燃え広がり基礎実験を行った。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 実験に使用する懸垂線の表面処理方法を確立した。
- (2) 移動可能液滴の初期位置を安定させ、かつ液滴と懸垂線の間で働く抗力を増大させない懸垂線表面処理方法を確立した。
- (3) 2 個の移動可能液滴を含む燃料液滴列の火炎燃え広がり挙動を観察することに成功した。移動可能液滴の合体により、一度燃え広がった火炎が消失する事例を見いだした。

参考文献

1. Nomura, et. al., Proceedings of the Combustion Institute, 30 (2005), 1991-1999.
2. Nomura, et. al., Proceedings of the Combustion Institute, 32 (2009), 2163-2169.
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. 梅村章, 日本機械学会論文集 B 編, 68 (2002), 2422-2428.