

微小重力環境で燃焼蒸気—空気予混合気中の燃料液滴列を燃え広がる 火炎先端の挙動の観察

日大生産工 (院) ○大窪 弾 日大生産工 野村 浩司

1. 緒言

噴霧燃焼は、ディーゼル機関やガスタービンなどに幅広く用いられている燃焼方式である。噴霧燃焼過程は、液体燃料の微粒化、雰囲気気体から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に分けられ、これらの過程が互いに影響しあいながら同時進行する複雑な現象である。ゆえに燃焼機構を詳細に把握することは難しく、完全な解明にはいまだ至っていない。燃焼機構解明の手法として、噴霧を単純モデル化した燃料液滴列の燃え広がり実験が、微小重力環境を利用して進められている。微小重力環境を利用することで自然対流を取り除くことができる。単純モデル化した燃料液滴列を用いた実験で得られた知見は、実機噴霧の燃焼や液滴群燃焼などの機構解析において実験的裏付けとして重要な役割を果たすと考えられる。菊池らは燃料液滴列の燃え広がりについての数値シミュレーション^[1]を行ってきた。数値シミュレーション結果と実験結果を相互に検証し、シミュレーションの高精度化を試みている。また火炎燃え広がりの際の熱的干渉機構の解明を目的とし、高橋ら^[2]は液滴列中に配置された2から4液滴を拡大撮影することで、液滴直径履歴から燃え広がる火炎と液滴列中液滴の熱的干渉について考察した。これまでは、火炎先端の挙動を観察するにあたり、懸垂線の発光から火炎の先端の位置を観察してきたが、新たに、懸垂線の発光を検出する画像解析ソフトを用いて懸垂線発光履歴と温度履歴を取得した。加えて、液滴間隔1.6 mmについて新たに微小重力実験を行い、過去に取得していた実験データに加え、幅広い液滴間隔での火炎挙動と液滴の点火挙動の関係について、周囲予混合気の気体当量比が燃料液滴列を燃え広げる火炎に及ぼす影響について考察する。

2. 実験装置および方法

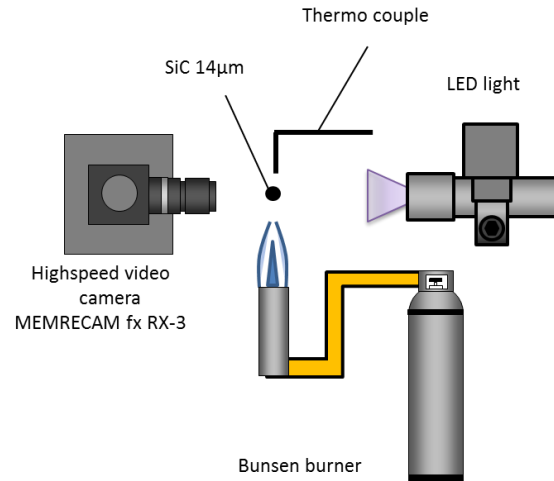


Fig.1 Experimental apparatus for validation of thin fiber pyrometer technique.

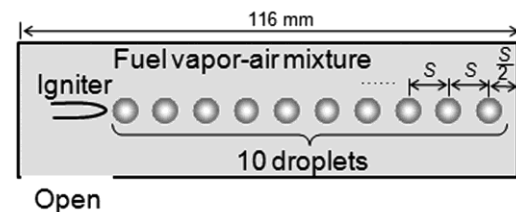


Fig.2 Droplet array.

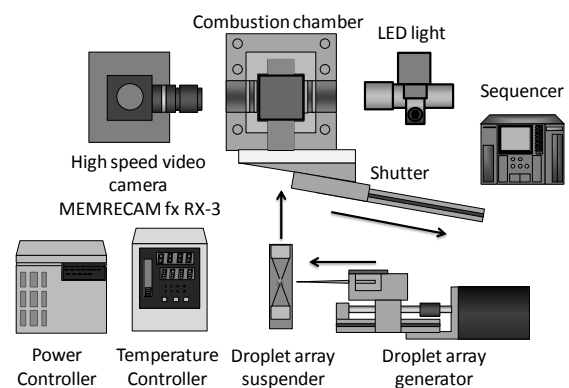


Fig.3 Experimental apparatus.

Observations of Leading Edge Behavior of a Flame Spreading along a Fuel Droplet Array in Fuel Vapor-Air Mixture at Microgravity

Dan OKUBO, Hiroshi NOMURA

2.1 温度検証実験

図 1 に火炎検出法の検証実験に使用した実験装置を示す。本研究で用いた火炎検出法は、SiC ファイバが火炎に熱せられて発する熱放射を高速度デジタルカメラで捕らえて数値化し、火炎検出を行う。装置は高速度カメラ、LED 光源、直径 14 μm の SiC ファイバ、K 種熱電対、ブンゼンバーナにより構成される。懸垂線は両端を水平に固定してあり、LED 光源は高速度カメラに対し懸垂線の背後に配置した。LED 光源から SiC ファイバまでの距離と SiC ファイバからカメラのレンズまでの距離は、火炎燃え広がり実験と同じ 90 mm に配置した。SiC ファイバを下方からブンゼンバーナで加熱し、温度を変化させて SiC ファイバの発光を撮影し、火炎検出信号が検出される SiC ファイバの温度を調べた。発光検出は、火炎燃え広がり実験において初期火炎が検出されるバックライト照射範囲の縁付近約 2.4 mm (300 pix) について行った。温度測定に用いた K 種熱電対は直径 1.2 mm のシーズ熱電対である。K 種熱電対は、SiC ファイバ発光画像の解析範囲に映り込まない位置かつ、発光検出部直上に設置した。SiC ファイバの発光検出には、自作の解析プログラムを用いた。SiC ファイバ発光部の青色輝度レベルと赤色輝度レベルの比が閾値を超えた場合、検出信号を出力する。実験に使用したブンゼンバーナは青炎であるので、輝炎が SiC ファイバに反射し、画像に映り込むことはないことを確認した。撮影には高速度カラービデオカメラ MEMRECAM fx RX-3 (撮影速度：500 fps, 画像サイズ：1280×1024 pix, 露光時間：オープン) を用い、LED 光源(日亜化学工業株式会社,NPSW500CS)によるバックリット法を用いた。表 1 に温度検証実験パラメータを示す。

2.2 落下実験

図 2 に、本研究で実験対象とした液滴列を示す。液滴列が挿入される燃焼容器は、一辺が l_{wh} の正方形断面であり、本実験では $l_{wh} = 25 \text{ mm}$ である。液滴列は正方断面の中心に配置した。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。等間隔に 10 個の燃料液滴を直線状に配置し、点火源側の端の第 1 液滴に点火することで火炎を燃え広がらせる。第 10 液滴は燃焼容器閉端より液滴間隔の 1/2 離れた位置に配置した。燃焼容器壁面には、火炎の熱損失を低減させるためセラミックスを用いた。容器側面には石英ガラス製の観察窓を備え、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。燃焼室の内面を熱・物質移動の対象境界面と考えると、本研究対象の液滴列は

格子状の三次元液滴マトリックスから火炎進行方向に一行を切り出した液滴列であると考えることができる。

図 3 に実験装置の概略を示す。装置は、燃焼容器、液滴列生成装置、液滴列支持装置、点火装置、制御装置および撮影装置より構成される。液滴列生成装置は引き伸ばしたガラス針による液滴列同時生成法^[3]を用いている。燃料パックより、テフロンチューブ、サーボモータにより駆動するマイクロアナログポンプを介して燃料溜め部に送られた燃料をガラス針先端から吐出する。ガラス針は液滴間隔に合わせて 10 本並列に配置した。サーボモータにより燃料吐出量を制御することにより、直径 0.8 mm の液滴を 10 個同時に生成した。液滴列支持部はセラミックス製のフレームであり、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した。X 字型ファイバの配置間隔を変更することで、液滴間隔を変更した。点火源は熱面点火方式を採用した電熱線であり、鉄クロム線(直径 0.29 mm)を加熱することで液滴への点火を行う。制御装置にはシーケンサを使用し、電熱線への通電時間、支持部移動モータ、および燃焼室加熱用シースヒータの制御を行った。また、液滴生成装置、シャッタおよび高速度カメラへのトリガ信号出力を行った。測温抵抗体で燃焼容器中央部の混合気温度を計測し、単相電力調節器によりシースヒータの出力を制御することで燃焼容器内空間を一定温度に保っている。燃料液滴列を火炎が燃え広がる間、液滴の拡大撮影を行い、液滴直径履歴および懸垂線の発光履歴を調べた。液滴拡大撮影装置には高速度カラービデオカメラ MEMRECAM fx RX-3 (撮影速度：500 fps, 画像サイズ：1280×1024 pix, 露光時間：オープン) を用いた。撮影には LED 光源によるバックリット法を用いた。液滴生成確認には CCD カメラ XC-555 を用いた。液滴列の初期液滴直径は、第 1, 第 2 および第 10 液滴を除く 7 個の液滴の平均初期直径とし、 d_0 と表記した。7 個の液滴が $0.8 \text{ mm} \pm 10\%$ の範囲で生成されるようにガラス針先端直径を調整し、 d_0 が 0.80 mm となるようにと出量を調整した。初期液滴直径は、液滴を短径 a および長径 b の回転楕円体とみなし、等価液滴直径 $d_0 = (a^2b)^{1/3}$ とした。生成される液滴の直径の再現性は確認されているので、実験ごとの初期直径の計測は行わなかった。燃え広がり火炎の液滴列垂直方向半径は、液滴と共に写っている懸垂線の火炎の熱による発光部か

ら求めた。懸垂線が赤熱しても、青色輝度レベルはあまり変化しないことを利用し、懸垂線画像の赤色輝度レベルと青色輝度レベルの比が連続的に閾値を越える最初の時刻を液滴の点火時刻とした。液滴中心から赤色輝度レベルと青色輝度レベルの比の重み付き赤熱部平均距離を火炎半径とした。火炎の液滴側の縁（IEF）と外側の縁（OEF）は、懸垂線の発光強度が閾値を連続的に超えている部分の内縁と外縁の液滴中心からの距離である。拡大撮影された液滴の直径計測には、自作の画像解析プログラムを使用した。詳細は文献 3 に記した。

実験条件をまとめて表 2 に示す。燃料には正デカン（ $C_{10}H_{22}$ ）を使用した。実験は、日本大学生産工学部の小型落下塔（2 重箱方式、微小重力時間約 1.1 秒）を利用した微小重力環境で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 温度検証実験

図 4 に懸垂線の発光が確認された画像の確率と温度履歴を示す。発光が確認された確率は、高速度カメラによって撮影された 50 フレームの画像の内、発光が確認された画像の数から導き出した。800K から 900K までは懸垂線の発光は検出されなかった。900K 付近から 1100K 付近にかけては、懸垂線発光が検出される確率が不安定に増加した。1100K より温度が高くなると懸垂線発光は確実に検出されることがわかった。このことから現在の発光検出プログラムでは 1100K 以上であれば発光は確実に検出されるが、1100K 未満でも検知される可能性があるため、今後懸垂線の発光を検知するプログラムの検出クライテリアを改善していく必要がある。しかしながら、火炎の温度は 1200 K を十分に超える温度なので、火炎に触れた懸垂線は 10 ms 程度で室温から 1100 K まで上昇すると推測されることから、初期火炎の発生時刻同定には大きな影響はないと考えられる。

3.2 落下実験

第 5 および第 6 液滴について火炎半径の履歴、第 6 液滴の直径履歴を図 5 に示す。横軸は第 5 液滴が点火した時刻を 0 とした経過時間である。第 5 液滴の点火後、火炎外縁が急速に拡大し、0.016 s で第 6 液滴は膨張を開始した。この時点で第 5 液滴の火炎は、燃え広がり火炎先端が半球形だと仮定すると、第 6 液滴に到達していない。この 0.016 s 間で、第 5 液滴の初期火炎からの熱が雰囲気気体を伝わり、第 6 液滴に到達したと考えられる。0.08 s 付近において第 6 液滴の膨張が最大となり、0.086 s で点火した。第 5、第 6 液滴の初期火炎半径は約 1.3 mm であった。また、第 6 液滴が点火した時刻における第 5 液滴

Table 1 Experimental conditions.

Temperature [K]	840K~1150K
Frame rate [fps]	500
Resolution [pix]	1280 x 1024
Number of frames	50

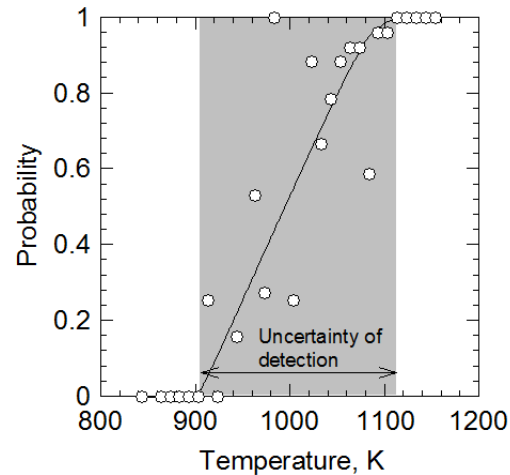


Fig.4 Probability of emission detection

Table 2 Experimental conditions.

S/d_0	2	3	3.75	6.25
ϕ_g	0~0.7			
Fuel	n-decane			
l_{wh} (mm)	25			
l_d (mm)	116			
S (mm)	$1.6 \pm 10\%$	$2.4 \pm 10\%$	$3 \pm 5\%$	$5 \pm 5\%$
$d_{0(3-9)}$ [mm]	$0.8 \pm 10\%$			$0.8 \pm 5\%$
$d_{0(1,2,9)}$ [mm]	about 0.8			
Observation droplets	4 th ~7 th droplets	5 th ~7 th droplets		5 th and 6 th droplets
Number of experiments	2	2	2	2
Frame rate of video camera (fps)	500			
Video image resolution [pix]	1280 x 1024			
Gravity	Microgravity (Nihon Univ.)			

の火炎半径は 2.4 mm だった。

図 6 に初期火炎半径を初期液滴直径で除した無次元初期火炎半径を気体当量比の関数として示す。無次元液滴間隔 S/d_0 が 3 から 6.25 までの範囲では、いずれの気体当量比においても無次元初期火炎半径は約 1.7 であり、気体当量比の増大に伴い、わずかに増大した。 S/d_0 が 2 の場合、気体当量比が 0 から 0.4 までは無次元初期火炎半径は約 1.7 をとるが、それ以降、気体当量比の増大が顕著になり、気体当量比が 0.7 の条件では無次元火炎半径が約 2.4 まで増加することがわかった。

図7に第6液滴に火炎が燃え広がった瞬間の第5液滴の無次元火炎半径を気体当量比の関数として示す。未燃次液滴に燃え広がりが起こる瞬間の無次元火炎半径は、無次元液滴間隔 S/d_0 が3から6.25までの条件では気体当量比の影響をほとんど受けず、約3.5の値を示した。 S/d_0 が2の場合、気体当量比が0から0.4までの条件では無次元火炎半径は約2をとるが、図4と同様に気体当量比が0.4より大きい場合、無次元火炎半径は増大が顕著になり、2.5から3の間に存在する。

4. 結言

噴霧燃焼の基礎研究として、懸垂線をバーナで加熱し、懸垂線の発光履歴と温度履歴を調べた。また、燃料蒸気-空気予混合気中液滴列中に配置された複数の液滴を拡大撮影し火炎燃え広がり実験を行った。液滴間隔、気体当量比を変化させ火炎燃え広がりを観察した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 使用した火炎検出法では、懸垂線が 1100 K 以上の温度になると確実に検出信号を発する。
- (2) 液滴の点火開始時刻は液滴の膨張がピークを迎える時刻が一致することがわかった。
- (3) 無次元初期火炎半径は約 1.7 であり、気体当量比の増大に伴わずかに増大する傾向がみられる。 S/d_0 が 2 の条件では気体当量比が 0.4 より大きくなるとその増大傾向は顕著になり、気体当量比が 0.7 の条件で約 2.4 の値をとる。
- (4) 第6液滴に火炎が燃え広がった瞬間の第5液滴の無次元火炎半径は、 S/d_0 が 2 の場合は、気体当量比が 0.4 より大きくなると約 2.5 から 3 の値をとるが、それ以外の液滴間隔では気体当量比の影響をほとんど受けず、約 3.5 の値を示すことがわかった。

参考文献

- 1) 菊池政雄, 宇宙航空開発機構研究開発報告, JAXA-RR-06-038, 1-19, (2007).
- 2) 高橋・他4名, 第47回燃焼シンポジウム講演論文集, 492-493 (2009).
- 3) H. Nomura et al., Proc. Combust. Inst. (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2012.05.049>.

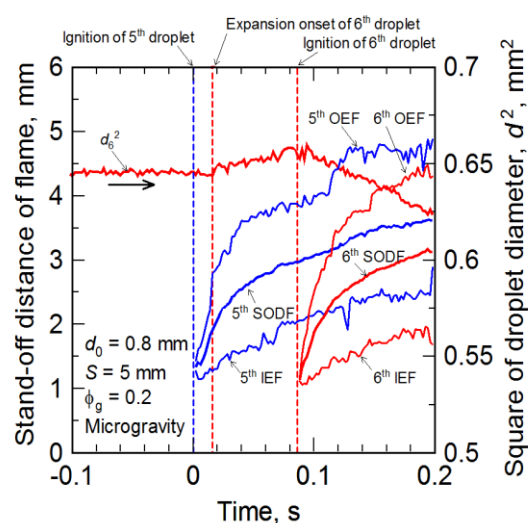


Fig.5 Stand-off distance of flame and Droplet diameter history.

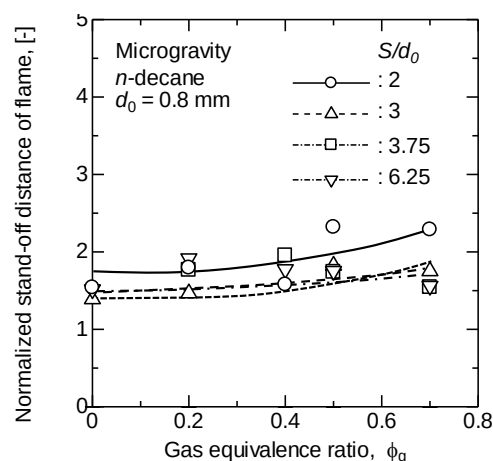


Fig.6 Initial stand-off distance of flame as a function of gas equivalence ratio.

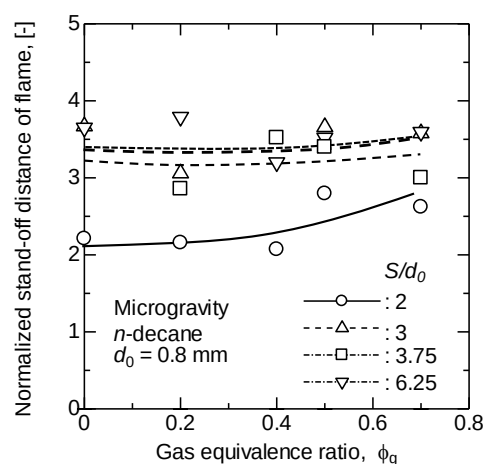


Fig.7 Stand-off distance of flame of 5th droplet at the ignition of 6th droplet as a function of gas equivalence ratio.