

# 微小重力環境を用いた燃料液滴列燃え広がり及び

## 液滴移動の影響に関する研究

日大生産工（院）○瀬谷 昭範 日大生産工 野村 浩司  
日大生産工 氏家 康成 （株）ノーリツ 原 人志

### 1. 緒言

噴霧燃焼は、ガスタービン、ボイラ、ディーゼル機関などの燃焼器に広く用いられている燃焼方式である。化石燃料の枯渇問題および地球環境問題の解決が急務の課題となっている今日、噴霧燃焼の機構を解明することは、これらの燃焼器の性能向上に寄与し、燃料消費率の低減や有害排出ガス削減などに役立つと考えられる。噴霧燃焼は、燃料蒸発、拡散・混合、燃焼の過程が同時に進行するため、現象を直接解析することは非常に困難である。噴霧燃焼を解明するための基礎研究として、噴霧の最小単位である単一燃料液滴の蒸発・燃焼の研究が行われてきた<sup>1-2)</sup>。単一燃料液滴の研究で得られた知見を噴霧燃焼に拡張するためには、燃料液滴列の燃焼に関する研究が必要である。従来の燃料液滴列の燃え広がり実験において、他研究者は、燃料液滴を懸垂線で空間に固定して実験を行っていた<sup>3-5)</sup>。しかしながら、液滴を固定して行う実験では、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ない。そこで、微小重力実験を行う前提として、液滴の列方向移動が可能な実験装置を開発・製作した。通常重力場で予備実験を行った結果、列方向移動可能液滴は、先行して燃焼する液滴の影響を受けて、未燃側に変位することが確認された<sup>6)</sup>。小型落下塔を利用した微小重力実験に移行した際、実験装置落下開始時に発生する落下カプセルの微小振動が、移動可能液滴に初速度を与えてしまうことが問題となった。本報では、落下カプセルの振動が減衰するまで列方向移動可能液滴を保持する装置を開発し、その作動試験を行った結果を記述する。また、液滴保持装置を用いて微小重力実験を行い、火炎燃え広がりが液滴運動に及ぼす影響を調べた結果を報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

#### 2.1 実験装置本体

微小重力実験で使用する実験装置の概略を図1に示す。装置は、液滴列支持装置、燃料送り装置、点火装置、液滴生成装置、液滴保持装置、それらを制御するシーケンサからなる。これらの実験装置を落下カプセルに搭載し、微小重力時間1.1 sの小型落下塔で微小重力実験を行った。液滴列支持装置の懸垂線

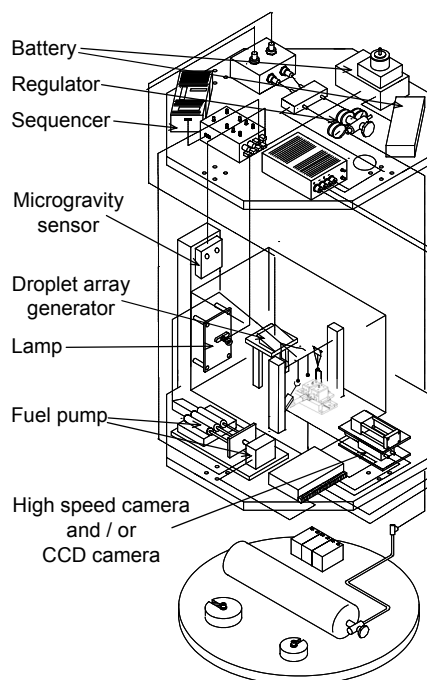


Fig.1 Schematic of the experimental apparatus.

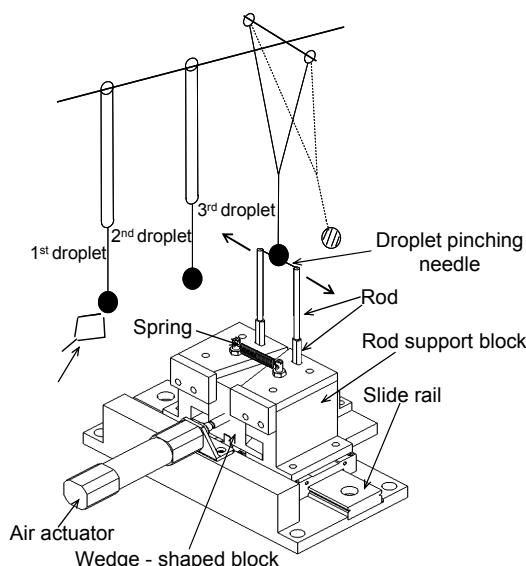


Fig.2 Droplet pinching device.

## Experimental study on effect of droplet movement on flame spread along a fuel droplet array at microgravity

Akinori SETANI, Hiroshi NOMURA, Yasushige Ujiie and Hitoshi HARA

には線径 $15\ \mu\text{m}$ のSiCファイバを使用した。燃料送り装置は、ステッピングモータによって駆動されるステージでマイクロシリンジを押すことにより、高度に燃料吐出量を制御できる。3本のマイクロシリンジを燃料送り装置に装着することで、3個の液滴を同時に生成した。液滴列は、3つの液滴で構成され、点火装置に近い方から第一懸垂液滴、第二懸垂液滴、第三懸垂液滴と呼ぶことにする。第一懸垂液滴は、火花点火による擾乱が現象に及ぼす影響を抑制するために使用した。第三懸垂液滴の列方向移動は、懸垂線をY字型の振り子にすることで可能にした。振り子の支持部には輪を設け、懸垂線が液滴の列方向移動を妨げる力を低減するように工夫した。振り子の全長を $30\ \text{mm}$ と長くすることで、振り子の周期を長くし、また鉛直方向の変位を少なくした。燃料液滴を懸垂線に付着しやすくするため、懸垂線先端に $300\sim 400\ \mu\text{m}$ のセラミックスの玉をつけた。点火装置には、電気火花点火方式を採用し、液滴に対する加熱の影響を少なくした。火花エネルギーは、点火に必要な最小のエネルギーとした。液滴生成装置は、エアスライドステージとそれを制御する流量調整弁およびレギュレータにより構成されている。現象の撮影には、液滴の輪郭と火炎の自発光を弱いバックライトを用いてCCDカメラ（露光時間:オープン、フレーム数:30fps）によって記録した。

## 2.2 液滴保持装置

本報で開発・作動試験を行った液滴保持装置の説明を以下に示す。2本の液滴保持針を同軸上に対向させ、両者の先端の間隔が約 $0.6\ \text{mm}$ となるように設置する。次に、下端が両液滴保持針の間に位置するようにY字型振り子懸垂線を設置する。振り子懸垂線下端と2本の液滴保持針先端に付着するように液滴を生成する。2本の液滴保持針を同時同速、反対方向に燃料液滴から引き抜く。その際、2本の液滴保持針が燃料液滴に与える影響が等しければ、解放された燃料液滴は、初期の位置に留まるはずである。この方法を実現するため、図2に示す液滴保持装置を開発した。液滴保持針には、線直径 $15\ \mu\text{m}$ のSiCファイバを使用した。液滴保持針は、燃料液滴の中心より若干上方で液滴を保持するように設置した。液滴保持針は、液滴保持針支持ロッド上部に取り付けた。ばねにより、2本のロッドは鉛直方向に上下する。2本のロッドは、下端がくさび形ロッド誘導台の斜面にバネによって押しつけられており、くさび形ロッド誘導台が前後すると、ロッドが上下する仕組みになっている。スライドラール上に設置された対向するロッド支持台の間隔は、エアアクチュエータで押し出されるくさび形ロッド誘導台により、押し広げられる。くさび形ロッド誘導台を引き戻す際には、ばねによって2つのロッド支持台が初期位置に戻る仕組みとなっている。

## 2.3 初期条件

燃料には正ヘプタンを用いた。雰囲気気体は大気であり、温度は $300 \pm 3\ \text{K}$ とした。液滴初期直径は、 $0.8\ \text{mm} \pm 10\%$ とした。液滴直径 $d$ には、液滴を回転楕円体と仮定し、懸垂線直角方向長さ $a$ および懸垂線方

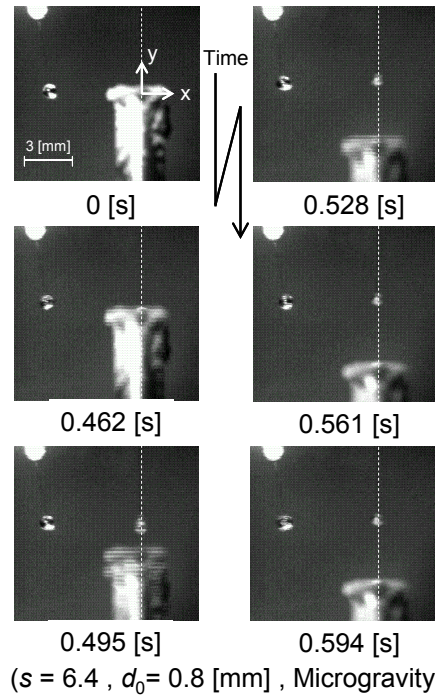


Fig.3 Sequential images of droplet behavior with droplet pinching device at microgravity.

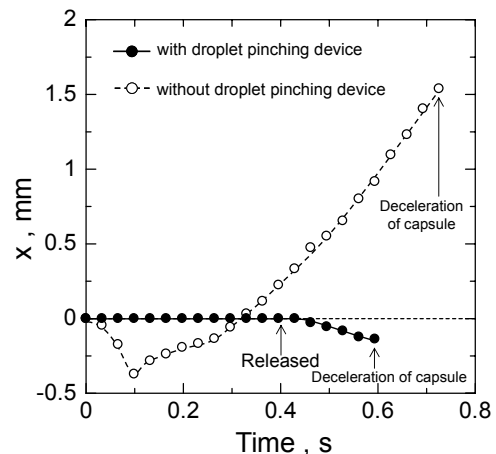


Fig.4 Temporal variations of  $x$ -position of the third droplet at microgravity.

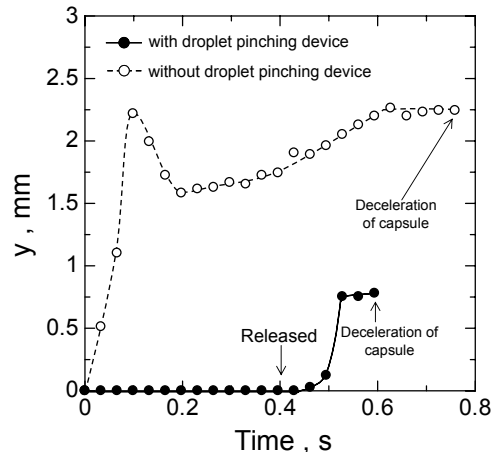


Fig.5 Temporal variations of  $y$ -position of the third droplet at microgravity.

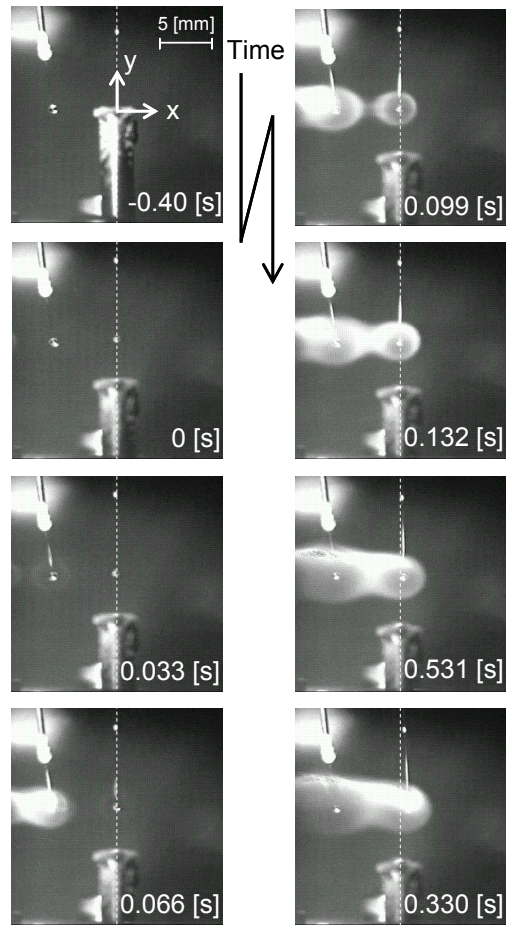
向長さ  $b$  から  $d = (a^2 b)^{1/3}$  で求められる等価液滴直径を用いた。液滴の初期位置は、第一懸垂液滴を点火した時刻における液滴の位置とした。液滴間隔は、第一および第二、第二および第三懸垂液滴の初期中心間距離の平均値を3つの液滴の平均初期直径  $d_0$  で除し、無次元液滴間隔  $s$  で表した。第三懸垂液滴の変位は、初期位置を基準にした変位で表した。ただし、変位の符号は、列方向 ( $x$  軸方向) に関しては、第三懸垂液滴が第二懸垂液滴から遠ざかる方向に初期位置から変位した場合を正とし、重力方向 ( $y$  軸方向) に関しては、初期位置から上向きに変位した場合を正とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 液滴保持装置の性能試験

図3の連続写真は、微小重力実験で観察された液滴保持装置を用いた場合の第三懸垂液滴の挙動である。図中左の液滴が第二懸垂液滴、右が第三懸垂液滴である。本作動試験では、点火は行っていない。図3中の白破線は、第三懸垂液滴が液滴保持装置から解放された直後の  $x$  軸方向位置を示している。図3の一枚目の画像において、写真中央のロッド上部奥に燃料液滴を見ることができる。液滴保持装置が作動開始した時刻は、0.40 s である。その後、時間の経過とともに、ロッドが下降するのがわかる。  $t = 0.60$  s では、微小重力環境が終わりに達している。第三懸垂液滴は、  $x$  軸方向にほとんど変位しないことがわかった。また、液滴保持装置が作動開始してから、第三懸垂液滴は  $y$  軸方向正の向きへ変位しているのがわかる。これは、液滴保持針の位置が液滴に対して、若干下過ぎたことが原因であると考えられる。そのため、微小重力環境になった後も燃料液滴を液滴保持針が  $y$  軸負方向に引っ張る力が残ってしまい、燃料液滴が液滴保持装置から解放された瞬間から、  $y$  軸方向正の向きに変位したと考えられる。今後、  $y$  軸方向への変位を抑制するため、第三懸垂液滴に対する液滴保持針の設置位置を調整しなければならない。

図4に、図3の連続写真から第三懸垂液滴の  $x$  軸方向変位を計測した結果を示す。液滴保持装置を用いなかった場合は、  $t = 0.10$  s までに、負方向へ 0.40 mm 変位することがわかる。ここで、  $t = 0 \sim 0.10$  s において、第三懸垂液滴の平均初速度を求めると、3.75 mm/s であった。その後、第三懸垂液滴は急激に移動の方向を変える。これは、振り子懸垂線の稼働支持部がその隙間の範囲で浮遊し、再び接触した衝撃によると考えられる。運動の方向を変えた後、第三懸垂液滴は  $t = 0.30 \sim 0.60$  s の間、ほぼ一定の速度で移動する。そのときの平均速度は 2.98 mm/s であった。また、第三懸垂液滴は、実験装置切り離し後 0.1 s の間に、初期位置から -0.37 mm 変位することがわかった。一方、液滴保持装置を用いた場合、液滴保持装置の作動開始時刻から 0.1 s 後の第三懸垂液滴の変位は、0.05 mm であった。また、液滴保持装置の作動開始時刻から落下カプセルの減速時刻までの  $t = 0.40 \sim 0.60$  s において、第三懸垂液滴の平均速度は、0.83 mm/s であった。図5は、第三懸垂液滴の  $y$  軸方向変位を示している。液滴保持装置を用いなかった場合、第三懸垂液滴は  $t = 0.099$  s において、2.25 mm



( $s = 8.0$ ,  $d_0 = 0.8$  [mm], Microgravity)

Fig.6 Sequential images of droplet flame spread behavior at microgravity.

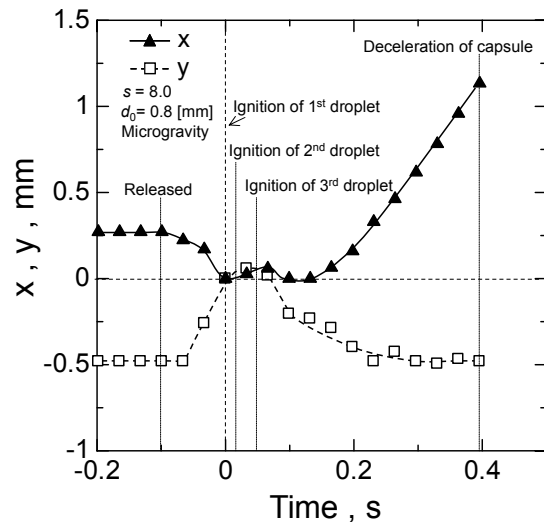


Fig.7 Temporal variations of  $x$  and  $y$  position of the third droplet at microgravity.

の変位を示すことがわかる。一方、液滴保持装置を用いた場合の実験では、 $y$  軸方向への最大変位が  $0.75 \text{ mm}$  であった。図4および図5から、液滴保持装置を用いることで、落下カプセル切り離しの際の擾乱による第三懸垂液滴の  $x$  軸方向および  $y$  軸方向変位を抑制できることがわかった。ただし、 $y$  軸方向の変位に関しては、満足できる結果ではなかったため、今後更に液滴保持装置および振り子懸垂線の改良を行う予定である。

### 3.2 微小重力環境下における移動懸垂液滴挙動

液滴保持装置を用いて液滴列火炎燃え広がり微小重力実験を行った。図6の連続写真は、第二および第三懸垂液滴間の燃え広がり挙動を示している。初期無次元液滴間隔は、 $8.0$  である。通常重力環境では、 $s = 8.0$  の条件で第三懸垂液滴に燃え広がり起こらないことが確認されている<sup>6)</sup>。第一懸垂液滴が点火した時刻を時刻の原点とした。微小重力場の開始時刻は  $-0.40 \text{ s}$  であり、液滴保持装置が作動開始した時刻は、 $-0.10 \text{ s}$  である。 $t = 0.033 \text{ s}$  において、第二懸垂液滴が点火し、 $t = 0.066 \text{ s}$  において、第三懸垂液滴に燃え広がり完了しているのがわかる。その後、第三懸垂液滴は球状火炎を伴いながら、 $x$  軸方向正の向きに移動している。

$x$  軸方向変位および  $y$  軸方向変位の履歴を図7に示す。 $x$  軸方向変位について得られた結果を以下に示す。液滴保持装置の作動開始時刻から第一懸垂液滴が点火した時刻までの  $-0.10 \sim 0 \text{ s}$  において、第三懸垂液滴は  $-1.02 \text{ mm/s}$  の平均初速度で変位した。第一懸垂液滴の燃え広がりが完了した後、第三懸垂液滴の移動は正の方向に転じることがわかった。第二懸垂液滴へ燃え広がりが完了し、第三懸垂液滴に燃え広がりが起こると、第三懸垂液滴の移動は急激に負の方向に転じた。その後、第三懸垂液滴の火炎が成長すると、再び第三懸垂液滴は正方向に移動し始める。第三懸垂液滴の移動速度がほぼ一定となる  $t = 0.20 \sim 0.40 \text{ s}$  において、平均速度は、 $4.29 \text{ mm/s}$  であった。また、 $y$  軸方向の最大変位は、 $t = 0.033 \text{ s}$  において、 $0.50 \text{ mm}$  であった。

$t = -0.10 \sim 0 \text{ s}$  において、第三懸垂液滴が負の方向へ移動したのは、落下カプセル切り離しの際の振動が原因と考えられる。 $t = 0 \sim 0.066 \text{ s}$  において、第三懸垂液滴が正方向に移動したのは、第一および第二懸垂液滴の既燃ガス流が原因と考えられる<sup>6)</sup>。第三懸垂液滴に燃え広がりが起こると、移動方向が急激に負の方向へ転じたのは、第三懸垂液滴周囲の予蒸発予混合気層を伝ばしてきた火炎が、第三懸垂液滴の第二懸垂液滴と反対側で衝突し、火炎が正方向に強い噴き出しを発生したことが原因であると推察される。 $t = 0.20 \sim 0.40 \text{ s}$  において、第三懸垂液滴が正方向へ等速運動するのは、第一および第二懸垂液滴の既燃ガス流と第三懸垂液滴の既燃ガス流の間に生じる斥力が原因と考えられる。

### 4. まとめ

落下塔を用いて実現させた微小重力環境において、液滴保持装置の作動試験を行った。液滴保持装置を用いて第三懸垂液滴を列方向移動可能にした3液滴列の燃え広がり微小重力実験を行った。液滴間隔を  $6.3 \text{ mm}$ 、初期液滴直径を  $0.8 \text{ mm}$ 、燃料を正へプタンとして実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 列方向移動可能懸垂液滴に、落下カプセル切り離しの際の擾乱が初速度を与えてしまう問題を、液滴保持装置により解決した。
- (2) 液滴保持装置を用いることで、有効なデータの取得確率の向上がみられ、落下実験回数を減少させることができた。
- (3) 液滴保持装置を用いなかった場合の、液滴列方向に変位する平均初速度は、 $3.75 \text{ mm/s}$  であったが、液滴保持装置を用いて実験を行った結果、平均初速度は  $0.83 \sim 1.02 \text{ mm/s}$  に減少した。
- (4) 第一および第二懸垂液滴を火炎が燃え広がる間では、第三懸垂液滴は第二懸垂液滴から遠ざかる方向に力を受ける。第三懸垂液滴を火炎が取り囲んだ瞬間、第三懸垂液滴は第二懸垂液滴に近づく向きに力を受ける。第三懸垂液滴を取り囲む火炎が発達してくると、第三懸垂液滴は第二懸垂液滴から遠ざかる方向に力を受ける。その後、第三懸垂液滴はほぼ一定速度 ( $4.29 \text{ mm/s}$ ) で第二懸垂液滴から遠ざかる。

### 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) Forman A. Williams, Combustion Theory, (1985).
- 2) Kenneth K. Kuo, Principles of Combustion, (1986).
- 3) 加藤伸一郎・小林秀昭・新岡 崇, 第 35 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp. 624-626 (1997).
- 4) 吉田茂徳・原 人志・岡島 敏, 機論 B, Vol. 55, pp. 1241-1245 (1989).
- 5) 三上真人・大八木大史・小嶋直哉・菊池正雄・若嶋雄一郎・依田真一, 日本燃焼学会誌, Vol. 46, No.135, pp.42-49 (2004).
- 6) Nomura, H., Takahashi, M., Ujiie, Y., Hara, H., The Proc. Comb. Inst., Vol. 30, pp.1991-1999(2004).