

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における

懸垂方法が液滴挙動に及ぼす影響

日大生産(院) ○法華津 祥太 日大生産工 野村 浩司
 宇宙航空研究開発機構 菊池 政雄 山口大 三上 真人

1. 緒言

現在、化石燃料は一次エネルギーの約9割を生み出すエネルギー資源である。化石燃料は扱い易いが、燃焼の過程で排出される NO_x や CO_2 などによる環境汚染、人口増加や経済成長に伴うエネルギー消費増大による枯渇問題が懸念されている。そこで、有害排出ガスの削減や燃料消費率の低減に、工業的に広く用いられている燃焼方式である噴霧燃焼の機構解明が役立つと考えられる。噴霧燃焼は、微細な燃料液滴の燃焼が同時多発的に発生する燃焼現象であるため、個々の燃焼過程の詳細な把握は非常に困難である。噴霧の単純モデル化を行い、単一液滴燃焼、液滴列燃焼、液滴格子燃焼などの研究が進められている。しかしながら、その多くが空間に固定された液滴を対象としている。Nomuraらは、燃料液滴の列方向移動に着目した研究として、振り子の先端に液滴を懸垂することで液滴の列方向移動を可能にし、固定-固定-列方向移動可能液滴の正へプタン3液滴列の実験モデルを用い、火炎燃え広がり実験を通常重力¹⁾および微小重力環境²⁾で行った。本研究では新しい液滴列懸垂方法を使用して列方向移動可能液滴を含む液滴列火炎燃え広がり実験を行い、火炎燃え広がりと液滴挙動との関係を調べる。本報では、米国航空宇宙局(NASA)との共同研究として国際宇宙ステーション(ISS)で行う燃焼実験(FLEX-2J)の予備実験として、2個の固定液滴と1個または2個の列方向移動可能液滴からなる正へプタン液滴列を用いて通常重力環境において行った実験の結果を報告する。また、文献2の振り子式移動液滴懸垂方法と本報の一本線式移動可能液滴懸垂方法の結果を比較し、違いを調べた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。実験装置は、液滴列移動装置、液滴列生成装置、液滴列支持

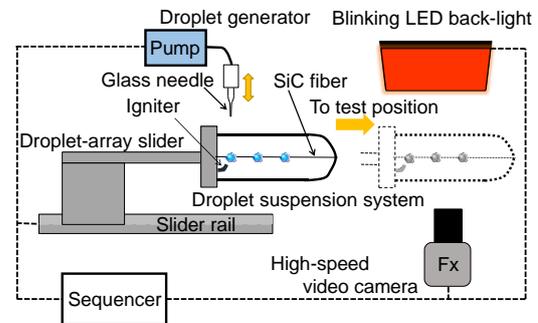


Fig.1 Schematic of the experimental apparatus.

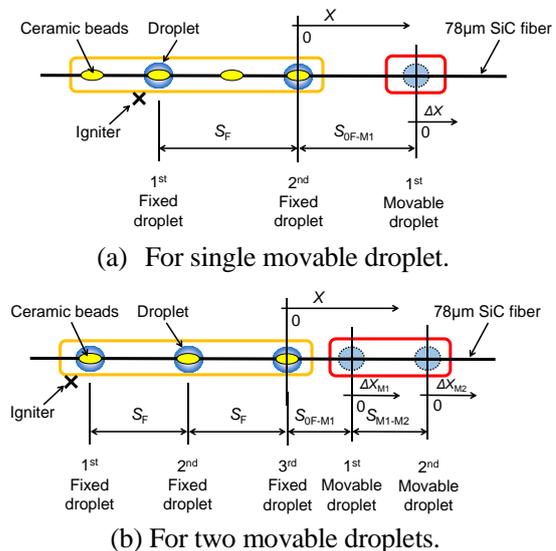


Fig.2 Experimental droplet array model.

器、燃料供給ポンプ、点火装置、制御装置および現象撮影装置から構成されている。実験で使用する液滴モデルを図2に示す。懸垂線にはISS燃焼実験で使用するものと同じSiCファイバ(直径78 μm , Specialty Materials社製, SCS-9A)を使用する。表面処理を行うことで静止抗力を減少させて使用した。点火時の擾乱が移動可能液滴に及ぶのを抑制するため、図2(a)の懸垂線には固定液滴2個、図2(b)の懸垂線には固定液滴3個を生成し、それぞれに移動可能液滴を1

Effect of suspension pattern on droplet behavior in flame-spread experiments
 of a fuel droplet array movable in the array direction

Shota HOKETSU, Hiroshi NOMURA, Masao KIKUCHI and Masato MIKAMI

または2個生成する。固定液滴は、懸垂線上に紡錘状セラミックビーズを作製し、そのビーズを包含するように生成する。液滴列支持器は、単数移動可能液滴には昨年度まで正デカン液滴列燃焼実験に使用されていた固定液滴間隔が1.6 mmに設定されたものを使用する。4つのセラミックビーズのうち第2と第4ビーズを使用して実験を行った。よって、固定液滴間隔 S_F は3.2 mmである。また、複数移動可能液滴においてはFLEX-2Jで使用する固定液滴間隔 S_F が4.5 mmに設定されたものを使用する。図2(b)の懸垂線には移動可能液滴を初期位置に保持するためのアンカースポットが既に複数個作製していたため、使用する懸垂線を変更した。

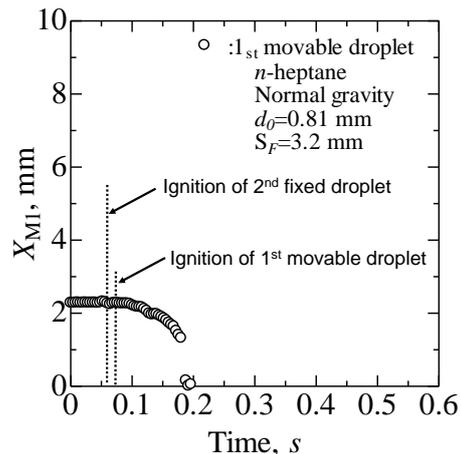
液滴列支持器は液滴列移動装置により軸方向へ移動させる。先端外直径約40 μm のガラス管を液滴生成装置により下降させ、先端から液体燃料を吐出して懸垂線上に液滴を生成・懸垂する。この操作を繰り返して液滴列を生成する。

現象撮影装置には、高速度ビデオカメラ(ナックイメージテクノロジー社製, MEMRECAM FX Rx-3, 撮影速度500 fps, 露光時間1998 μs)を用いる。バックライトはカメラと同期をとって点滅するようにし、点灯時に液滴のバックリット像を、消灯時に火炎を撮影した。実験は、室温・大気圧・通常重力環境で行う。初期液滴直径 d_0 は0.8 mm $\pm 5\%$ とし、第2固定液滴と移動可能液滴の初期中心間距離である初期固定-移動可能液滴間隔 S_{0F-M1} を2~8.5 mmの範囲で変化させ、実験を行った。初期移動-移動液滴間隔 S_{0M1-M2} は燃え広がると予想される位置に設置した。液滴直径 d は、自作の画像解析プログラムを使用してバックリット法で撮影された液滴画像から求めた等価体積直径とした。液滴の中心位置履歴も同じプログラムで計測した。ヘプタン液滴は蒸発が速いため、液滴列生成から燃焼開始までに大幅に液滴直径が変化する。この変化量を考慮し、予め大きな液滴を生成した。点火前の液滴列の蒸気層を準定常状態にするため、30 s以上点火位置で液滴列支持器を静止させた。その後、点火と同時に撮影を開始した。

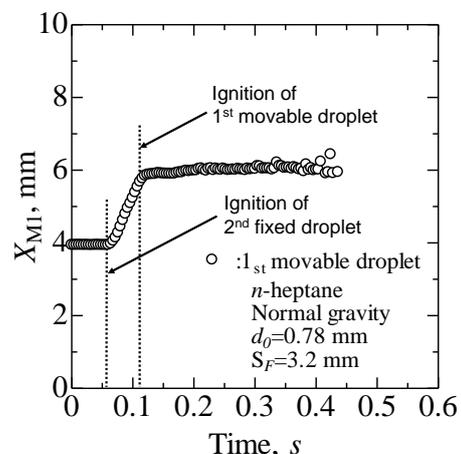
3. 実験結果および考察

3.1 単数移動可能液滴列火炎燃え広がり実験

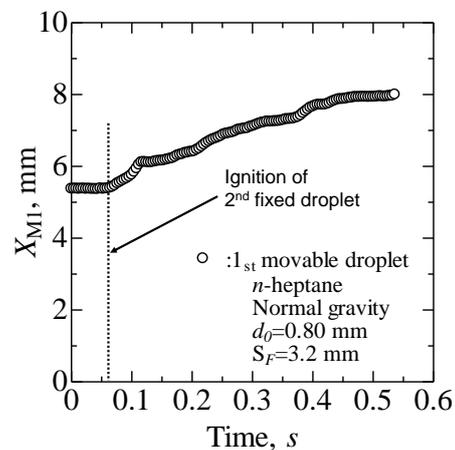
固定液滴間隔 S_F が3.2 mm, 初期固定-移動可能液滴間隔 S_{0F-M1} を変化させた条件での移動可能液滴の変位履歴をそれぞれ図3に示す。図3(a)は、初期固定-移動可能液滴間隔2.3 mm, 無次元液滴間隔2.8の移動履歴である。 $t=0.062$ sで第2固定液滴に点火後、 $t=0.070$ sで移動可能液滴に点火した。その後移動可能液滴は負方



(a) Flame-spread pattern 1.



(b) Flame-spread pattern 2.



(c) Flame-spread pattern 3.

Fig.3 Histories of movable droplet position.

向側へ移動し、 $t=0.184$ sで固定液滴と合体した。これは、液滴間隔が狭いことで移動可能液滴を群燃焼火炎がすぐに取り囲み、移動可能液滴の正方向側に火炎面が生じる。左右で酸素供給量の差が生じ、正方向側の反応が負方向側よりも活発となることで、液滴の蒸発によって発生する左への推力が大きくなり、液滴は負方向に移動したと考えられる。図3(b)は、初期固定-移

動可能液滴間隔 3.9 mm, 無次元液滴間隔 5.0 の移動履歴である. $t = 0.062$ s で第 2 固定液滴に点火後, 移動可能液滴は正方向へと移動を開始した. その後, 移動中に $t = 0.126$ s で移動可能液滴へ火炎が燃え広がった. 初期固定-移動可能液滴間隔が比較的広いことにより火炎が移動可能液滴をすぐに取り囲むことができず, 移動可能液滴の負方向側のみに火炎が存在することで液滴の負方向側が局所的に加熱されて蒸発が促進され, 液滴は正方向に移動したと考えられる. 図 3(c)は, 初期固定-移動可能液滴間隔 5.4 mm, 無次元液滴間隔 6.8 の移動履歴である. $t = 0.062$ s で第 2 固定液滴に点火後, 移動可能液滴は正方向へと移動を開始した. その後移動可能液滴には燃え広がらず, 正方向へと大きく移動を続けた. これは固定-移動可能液滴間隔が広いことで移動可能液滴に十分な熱量を与えることができずに加熱のみとなり, 燃え広がらなかったと考えられる.

3.2 通常重力環境における燃え広がり限界

初期固定-移動可能液滴間隔 S_{OF-M1} が, 移動可能液滴点火時の変位 ΔX_{ig} に及ぼす影響を調べた. 結果を図 4 に示す. 燃え広がりが起こった後, 正方向へ移動し続けたものは白丸, 負方向へ転じたものは二重白丸で示した. 無次元液滴間隔の増大に伴って, ΔX_{ig} は急激に増大し, 無次元液滴間隔 6.1 以上では燃え広がりが起こらなかった. 燃え広がり限界が微小重力環境の場合と比較して短くなったのは, 自然対流の影響であると考えられる. 移動可能液滴に燃え広がりが起こった全ての事例において, 移動可能液滴は正方向に移動して点火した. 固定液滴の火炎が移動可能液滴に近づいてくると, 移動可能液滴の固定液滴側が強く加熱されて蒸気の発生量が反対側よりも多くなると考えられる. これにより蒸発によって発生する推力に不均衡が生じ, 初期は液滴が固定液滴の火炎から逃げる方向(正の方向)に移動し始めると考えられる.

3.3 複数移動可能液滴列火炎燃え広がり実験

固定液滴間隔 S_F が 4.5 mm, 初期固定-移動可能液滴間隔 S_{OF-M1} が 2.9 mm, 初期移動-移動可能液滴間隔 S_{OM1-M2} が 4.3 mm における移動可能液滴の変位履歴を図 5 に示す. $t = 0.098$ s で第 3 固定液滴が点火後, 第 1 移動可能液滴は正方向へ移動を開始したが, $t = 0.118$ s において第 1 移動可能液滴に燃え広がったことで第 1 移動可能液滴は急停止した. 第 2 移動可能液滴は第 3 固定液滴から 7.3 mm に位置していたので第 3 固定液滴点火時には移動しなかったが, 第 1 移動可能液滴に燃え広がったことで第 2 移動可能

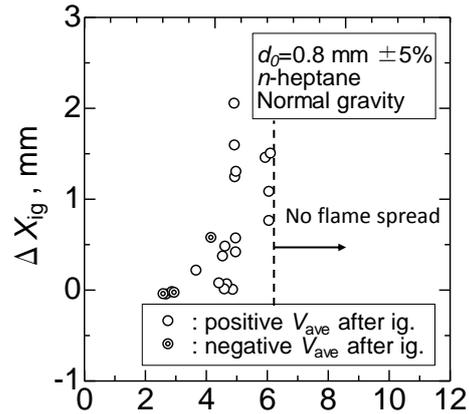


Fig.4 Movable droplet displacement at ignition.

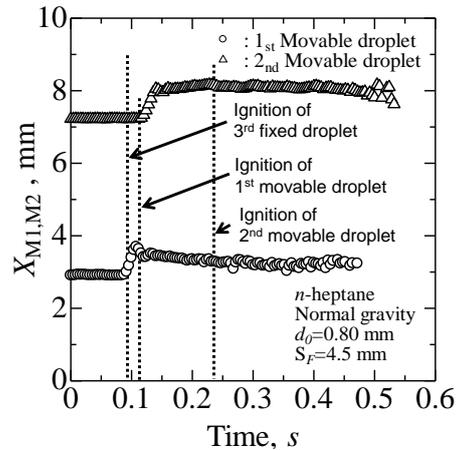


Fig.5 Histories of two movable droplets position.

液滴は群燃焼火炎によって加熱され, 正方向へ移動を開始した. 移動したことによって $t = 0.164$ s での固定-第 2 移動可能液滴間隔は 10.0 mm, 移動-移動可能液滴間隔は 5.8 mm となった. 第 2 移動可能液滴は加熱によって徐々に正方向へ移動したが, 移動-移動可能液滴間隔は群燃焼火炎が第 2 移動可能液滴の蒸気層に引火したことによって燃え広がったと考えられる.

複数移動可能液滴を用いた実験の移動液滴同士の燃え広がり, 第 1 移動可能液滴点火時の位置と第 2 移動可能液滴の位置が関係するため, 今後初期固定-移動液滴間隔を 4.0 mm, 初期移動-移動液滴間隔を変化させ, 複数移動可能液滴を用いた燃焼実験を行う.

3.4 懸垂方法の差異による影響

単数移動可能液滴列火炎燃え広がり実験における無次元固定-移動可能液滴間隔と燃え広がり後液滴平均移動速度 V_{ave} の関係を図 6 に示す. 燃え広がり後液滴平均移動速度は, 燃え広がりが起きた場合は移動可能液滴の点火後 20~80 ms までの平均移動速度とした. 参考データとして, 燃え広がりが起こらなかった場合は, 液滴が移動を開始した時刻から移動が停止

するまでの期間の前半期の平均移動速度とした。燃え広がりが起こった場合は白丸，起こらなかった場合は黒丸で示した。この結果を，白三角で示した微小重力環境における振り子機構を用いた移動可能液滴の火炎燃え広がり実験結果^[2]と比較した。移動可能液滴に燃え広がりが起こった結果のみに注目すると，無次元固定-移動可能液滴間隔の増大に伴って燃え広がり後液滴平均移動速度は負の値から正の値に増大しており，微小重力環境の結果と傾向は一致した。

無次元固定-移動可能液滴間隔が 2.5~3.0 の範囲では，移動可能液滴が燃え広がった群燃焼火炎に取り囲まれ，移動可能液滴の正方向側に火炎が形成される。このとき，液滴の負方向側には火炎が無いため正方向側との燃料の蒸発に差が生じ，液滴は負方向へ移動したと考えられる。無次元固定-移動可能液滴間隔が 4.0~5.0 の範囲において，燃え広がり後液滴平均移動速度は振り子機構の実験結果とほぼ一致している。無次元固定-移動可能液滴間隔が 6.0 付近では，梅村の分類³⁾のモード 2 で火炎が燃え広がるため，固定液滴の群燃焼火炎と移動可能液滴の火炎の間に空間が生じ，自然対流が間を通過する。これによりエジェクタ効果が生じ，移動可能液滴に負方向の力が働くことによって微小重力実験の結果より小さな値を示したと考えられる。液滴間隔が広い条件では，移動可能液滴の燃え広がり誘導時間が長く，火炎が自然対流の影響を受けている様子が観察された。

振り子機構の実験装置では重力による振り子の復元力が働くために行うことができない通常重力環境での予備実験を，本報の実験装置では実施することができた。今後，短時間微小重力実験を行ってデータを取得する予定である。自然対流の影響が少ない液滴間隔が狭い条件において，振り子機構の実験装置を用いて得られた微小重力実験の結果よりも本報で得られた移動速度の方が絶対値が小さくなったことから，懸垂方法の違いによって液滴内で発生するマランゴニ対流が液滴運動に及ぼす影響は小さく，懸垂線と移動可能液滴の間に作用する抗力の影響が大きいことが示唆された。

4. 結言

軌道上で行う移動可能液滴列の燃え広がり実験の予備実験を通常重力環境で行った。燃料には正ヘプタンを用い，初期液滴直径を 0.8 mm，固定液滴間隔を 3.2 mm または 4.5 mm に固定し，固定-移動可能液滴間隔および移動-移動可能液滴間隔を変化させて火炎燃え広がりが液滴挙動に及ぼす影響を調べた。得られた知見を示す。

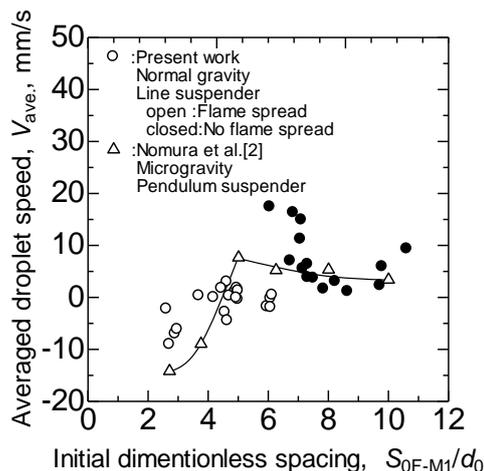


Fig.6 Relationship between the averaged droplet speed after ignition and the initial dimensionless span.

- (1) 単数移動可能液滴列火炎燃え広がり実験において，液滴挙動は大きく 3 パターンに分類できる。
- (2) 燃え広がりが起こる無次元固定-移動可能液滴間隔の限界は，6.1 であった。
- (3) 点火時の移動可能液滴の変位は，無次元固定-移動可能液滴間隔の増大に伴って，急激に増大した。
- (4) 無次元固定-移動可能液滴間隔が 5.0 以下の範囲では，無次元固定-移動可能液滴間隔の増大に伴って燃え広がり後液滴平均移動速度は負の値から正の値に増大した。
- (5) 一本線式において，移動液滴の運動に対して液滴内マランゴニ対流の影響より液滴と懸垂線間の抗力の影響の方が大きい。

「参考文献」

- 1) Hiroshi Nomura, Masashi Takahashi, Yasushige Ujiie and Hiroshi Hara., "Observation of droplet motion during flame spread on three-fuel-droplet array with a pendulum suspender", Proc. Combust. Inst. 30. (2005) p.1991-1999.
- 2) Hiroshi Nomura, Yusuke Suganuma, Akinori Setani, Masashi Takahashi, Masato Mikami and Hiroshi Hara., "Microgravity experiments on droplet motion during flame spreading along three-fuel-droplet array", Proc. Combust. Inst. 32. (2005) p.2163-2169.
- 3) 梅村章，微小重力下での直線燃料液滴列に沿った火炎伝ば(第 1 報，液滴間火炎伝ば様式マップの作成)，日本機械学会論文集 B 編(2002) p. 2422-2428.