

微小重力環境における列方向移動可能正へプタン液滴列火炎燃え広がり実験

日大生産(院) ○法華津 祥太 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 宇宙航空研究開発機構 菊池 政雄

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量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。本研究では一本の懸垂線の上に列方向移動可能液滴を含む液滴列を配置する手法を用いた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)で行われている燃焼実験(FLEX-2J)の結果の検証データの取得を目的として、3個の固定液滴と1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微小重力環境において火炎燃え広がり実験を行った結果を報告する。

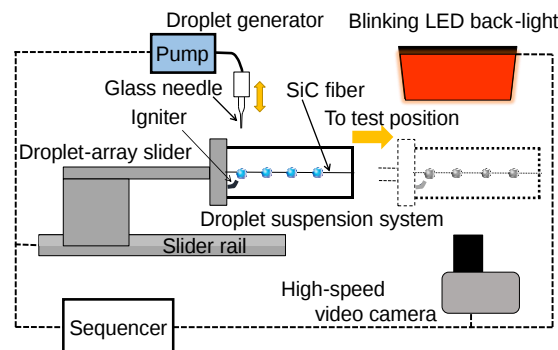


Fig.1 Schematic of the experimental apparatus.

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

液滴列移動装置、液滴列生成装置、液滴列支持器、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懸垂線表面全体の静止抗力を減少させて使用した。図2(a)に本実験で使用した懸垂線の概略を示す。点火時の擾乱が移動可能液滴に及ぶのを抑制するため、懸垂線には固定液滴3個を生成、その次に移動可能液滴を1個生成した。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。移動可能液滴は、実験開始時に所定の位置に保持する必要があるため、炭酸ガスレーザ(COHERENT社製, Diamond C-30)を使用して懸垂線表面に2つのエッチドスポットからなるアンカースポットを作製した。固定液滴間隔 S_F は3.2 mmである。また、比較対象として固定液滴列の燃え広がり

Flame Spread Experiments of n-heptane Movable Droplet in the Array Direction Under Microgravity

Shota HOKETSU, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA,
 Masato MIKAMI and Masao KIKUCHI

誘導時間を調べた。使用した懸垂線の概略を図2(b)に示す。固定液滴は、図2(a)と同じセラミックビーズを懸垂線に設置することにより実現した。固定液滴間隔 S_F は 3.75 mm および 7.5 mm の間隔に設定した。

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 $40\ \mu\text{m}$ 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。実験で使用する燃料には正ヘプタンを使用した。

現象撮影装置には、高速度カラービデオカメラ Phantom Miro3(AMETEK 社製, 撮影速度 2000fps, 露光時間 $498\ \mu\text{s}$)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。これにより、本実験における実質撮影速度は 1000fps である。

雰囲気は室温、大気圧とし、全ての実験は日本大学生産工学部敷地内にある小型落下塔（全高 8.6 m, 減速部 0.9 m, 微小重力時間 1.1 s, 重力レベル 10^{-4}G ）を用いて微小重力環境で実施した。初期液滴直径 d_0 は $0.8\ \text{mm} \pm 5\%$ とし、第3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} を変化させ、実験を行った。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。正ヘプタン液滴は蒸発が非常に速いため、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。また、点火前の液滴列の蒸気層を準定常状態にするため、30 s 間点火位置で液滴列支持器を静止させた。その後、実験装置に設置した微小重力検知スイッチの起動をトリガーとして液滴列に点火、同時に撮影を開始した。

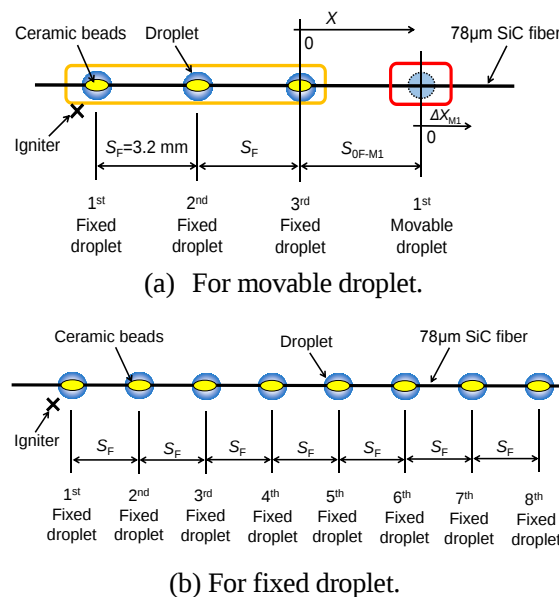


Fig.2 Experimental model of droplet array.

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位置履歴をそれぞれ図3に示す。移動可能液滴へ火炎が燃え広がった場合は白丸、燃え広がらなかった場合は黒丸とした。図3(a)は、初期固定-移動可能液滴間隔 4.6 mm, 初期無次元固定-移動可能液滴間隔 5.8 の移動履歴である。 $t = 0.049\ \text{s}$ で第2固定液滴に点火後、 $t = 0.059\ \text{s}$ で移動可能液滴に点火した。その後、徐々に負方向へと移動を開始した。移動可能液滴は正方向へ変位を続け、 $t = 0.090\ \text{s}$ において移動を停止した。固定液滴の群燃焼火炎によって移動可能液滴の負方向側が局所的に加熱されることで蒸発が促進され、移動可能液滴は正方向へと移動したと考えられる。また、初期固定-移動可能液滴間隔が比較的狭いことにより、固定液滴が形成する群燃焼火炎が移動可能液滴に燃え広がった。これにより移動可能液滴の正方向側の蒸発が活発となることで、負方向側へと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 8.0 mm, 初期無次元固定-移動可能液滴間隔 10.0 の移動履歴である。 $t = 0.045\ \text{s}$ で第3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 $t = 0.190$ s で移動可能液滴へ火炎が燃え広がり、移動を停止した。その後約 0.37 mm 負方向へ移動し、静止した。第3固定液滴と移動後の移動可能液滴との距離が遠いため、固定液滴の周囲に形成された群燃焼火炎によって移動可能液滴の負方向側が加熱されて、移動可能液滴が大きく移動したと考えられる。点火後、移動可能液滴は単独でエンベロップ火炎を形成した。そのことにより、液滴の左右での蒸発量のアンバランスが解消したため、懸垂線と液滴の間で働く抗力で静止したと考えられる。その後、群燃焼火炎と移動可能液滴の火炎が合体したことで移動可能液滴周辺の負方向側の加熱が弱まり、負方向移動が起こったと考えられる。図 3(c)は、初期固定-移動可能液滴間隔 13.7 mm、初期無次元固定-移動可能液滴間隔 17.4 の移動履歴である。 $t = 0.051$ s で第3固定液滴に点火後、固定液滴の群燃焼火炎の影響を受けることなく移動可能液滴は初期位置に静止した。しかし、 $t = 0.259$ s から移動可能液滴は正方向へと移動を開始し、撮影視野外へと移動を続けた。固定-移動可能液滴間隔が非常に広いため、群燃焼火炎からの熱が移動可能液滴に到達するまでに時間を要したと考えられる。

このように液滴を動かすような高温空気が移動可能液滴に到達するのに時間を要する場合は、気相の温度分布が距離に反比例して減少するのに対して、懸垂線の温度分布は直線的に減少するため、懸垂線が液滴を加熱する影響が顕在化する可能性がある。

3.2 微小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_{0F-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。白丸は火炎が燃え広がった結果、黒丸は火炎が燃え広がらなかった結果である。点火しない場合は変位を 0 mm とし、参考として表記した。この結果より、初期無次元液滴間隔の増大に伴い点火時の移動可能液滴の変位は増大した。これは、液滴間隔の増大に伴い未燃次液滴が点火するまでの時間が増大する

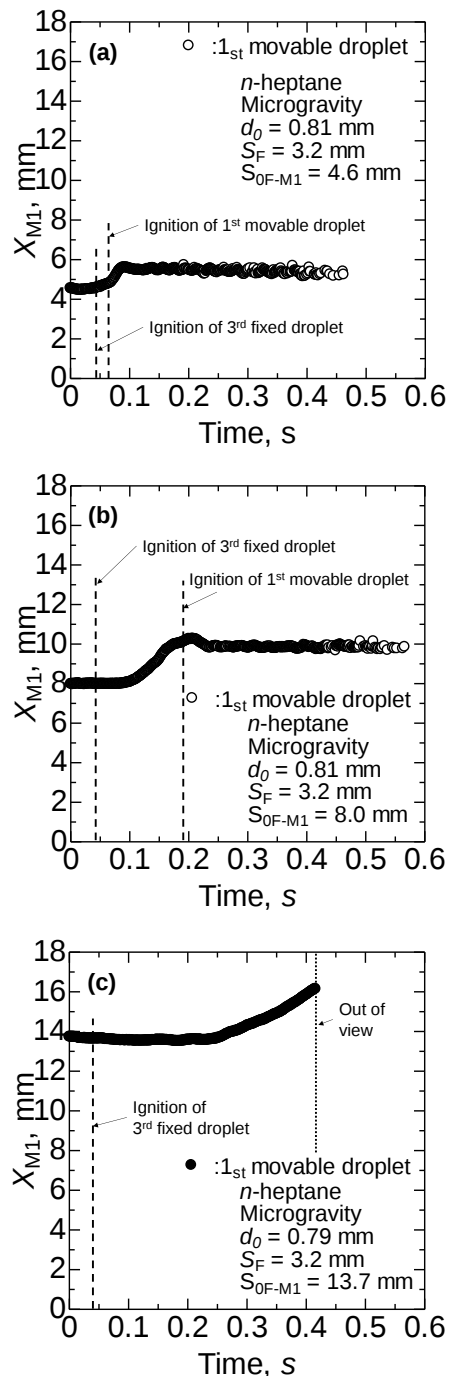


Fig.3 Histories of movable droplet position.

ため、その間に正方向への変位が増大すると考えられる。また、微小重力環境においては自然対流の影響を抑制することができるため、対流の影響を排除した燃え広がり限界を得ることができた。初期無次元固定-移動可能液滴間隔が 10 から 17 の間に燃え広がり限界が存在することがわかった。

3.2 正規化燃え広がり誘導時間

火炎が未燃次液滴へ燃え広がり要する時間

で定義される燃え広がり誘導時間を初期液滴直径の2乗で除した正規化火炎燃え広がり誘導時間と初期無次元固定一移動可能液滴間隔の関係を図5に示す。移動可能液滴は白丸、固定液滴は黒丸で示した。正規化燃え広がり誘導時間は初期無次元固定一移動可能液滴間隔の増大に伴って増大した。これは、固定一移動可能液滴間隔が広がったことで高温域の熱伝導時間、および初期加熱時間が増大したためであると考えられる。初期無次元固定一移動可能液滴間隔が狭い場合は、固定一固定液滴間の正規化燃え広がり誘導時間と固定一移動可能液滴間のそれとはおおよそ一致した。これは、固定一移動可能液滴間隔が狭い場合は、点火時の移動可能液滴変位が小さいからであると推察される。

4. 結言

国際宇宙ステーションで行う移動可能液滴列の燃え広がり実験の結果の検証データの取得を目的とし、小型落下塔を用いた微小重力環境で行った。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に固定し、固定一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。

- (1) 微小重力環境における単数移動可能液滴列火炎燃え広がり実験においても、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初期無次元固定一移動可能液滴間隔の限界は10と17の間である。
- (3) 正規化燃え広がり誘導時間は初期無次元固定一移動可能液滴間隔の増大に伴って指数関数的に増大する。初期無次元液固定一移動可能液滴間隔が狭い範囲では、固定一固定液滴間の正規化燃え広がり誘導時間と固定一移動可能液滴間のそれとはほぼ一致した。

「参考文献」

- 1) Hiroshi Nomura, Masashi Takahashi, Yasushige Ujiie and Hiroshi Hara., "Observation of droplet motion during flame

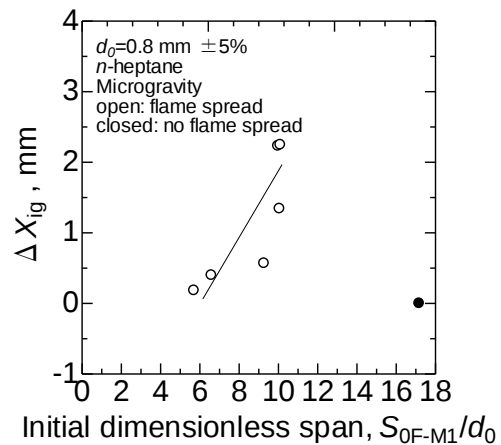


Fig.4 Displacement of a movable droplet at ignition.

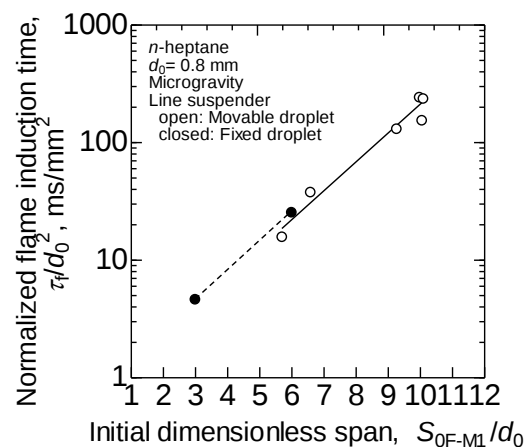


Fig.5 Relationship between normalized flame induction time and initial dimensionless span.

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.