

「きぼう」の微小重力環境を利用した燃え広がり火炎と移動可能燃料液滴の干渉の観察

野村 浩司¹・菅沼 祐介¹・三上 真人²・菊池 政雄³

Observation of Interaction between a Spreading Flame and Movable Droplets using Microgravity Environment of “KIBO”

Hiroshi NOMURA¹, Yusuke SUGANUMA¹, Masato MIKAMI² and Masao KIKUCHI³

Abstract

In “KIBO” of the International Space Station, microgravity combustion experiments of a fuel droplet array were performed to investigate the interaction between flame-spread and droplet motion. The fuel droplet array consisted of 2-4 fixed droplets and movable droplets (up to 16 droplets) and was suspended on a straight SiC fiber, which enabled the movable droplets to move in the fiber direction. The initial droplet diameter of a droplet array was 1.0 mm for all tests. As a liquid fuel, n-decane was employed. The first fixed-droplet was ignited by a hot wire to initiate flame-spread along a fuel droplet array. Sequential direct images and backlit images of the spreading flame and the droplet array were taken alternatively during flame-spread. A movable droplet was accelerated by the spreading flame and moved away from the neighboring burning droplet. Termination of flame-spread due to droplet motion and droplet coalescence was observed. Flame spread behavior was categorized into four typical patterns. Parameters which determine flame-spread pattern was discussed.

Keyword(s): Flame spread, Droplet array, Droplet motion, Spray combustion, Microgravity experiment

Received 9 May 2019, accepted 3 July 2019, published 31 July 2019.

1. 緒言

化石燃料は、2017年時点で世界の一次エネルギーの約85%を占めるエネルギー資源である¹⁾。化石燃料の中でも石油は扱いが容易でエネルギー密度も高いので、熱エネルギー源として工業的に広く用いられている。特に、自動車や航空機、船舶などの移動体のエネルギー源として石油は欠かせない。一方で、人口増加や経済成長に伴う石油消費量増大により、石油の枯渇と地球の温暖化が懸念されている。どちらの問題に対しても、燃焼機関の燃料消費率低減は有効である。そこで、石油由来の燃料の燃焼に広く用いられている燃焼方式である噴霧燃焼に着目し、燃焼機関開発に有用な噴霧燃焼シミュレーションの高度化・高精度化に資することを目的とした実験的研究を行った。

噴霧燃焼は不均一な燃焼であり、微細な燃料液滴が多数

同時に、または時間差を伴って燃焼する現象なので、燃焼過程の詳細な把握が非常に困難である。そのため、噴霧を単純モデル化した単一液滴燃焼や、液滴列燃焼、液滴格子燃焼などの基礎研究が進められている。噴霧火炎の保炎安定性に大きな影響を及ぼす燃料液滴間火炎燃え広がり²⁻¹⁸⁾の基礎研究では、燃料液滴列が研究の対象となることが多い²⁻¹⁸⁾。噴霧中の液滴は自由に移動しながら燃焼する。しかしながら、これまでの多くの燃料液滴列燃焼研究では、空間に固定された液滴を対象としていたため、液滴の運動が火炎の燃え広がり²⁻¹⁸⁾に及ぼす影響、および燃え広がり火炎が移動可能な液滴の運動に及ぼす影響がほとんど調べられていない。著者らの一部は、燃料液滴列中の液滴の運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」の正ヘプタン3液滴列実験モデルを実験対象と

1 日本大学生産工学部 〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1

College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumi-cho, Narashino, Chiba 275-8575, Japan.

2 山口大学大学院創成科学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

Graduate School of Science and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611, Japan.

3 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 ISS 科学プロジェクト室 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan.

(E-mail: hiroshi.nomura@nihon-u.ac.jp)

する火炎燃え広がり実験を、通常重力環境¹⁶⁾および微小重力環境¹⁷⁾で行った。実験の結果から、固定液滴から移動可能液滴への燃え広がりについて知見を得た。揮発性の高い正ヘプタン液滴列の場合、燃え広がりが起こる前の移動可能液滴の運動は固定液滴の点火による膨張流により誘発され、移動量は小さいが、燃え広がり火炎から離れる方向に大きな速度で移動する。一方、燃え広がりが起こった後の運動は緩やかであるが、移動量が大きいことがわかった。しかしながら、振り子機構が複雑だったため、複数の列方向移動可能液滴を配置した実験を行うことができなかった。本研究では、移動可能液滴の懸垂方法を変更し、一本の懸垂線上に複数の列方向移動可能液滴を含む液滴列を配置する方法を採用した。小型落下塔を用いた予備実験により、新移動可能液滴懸垂システムにおいても、正ヘプタン液滴列は Ref. 17 で得られた結果と同じ挙動を示すことがわかった。ただし、懸垂線と液滴の間に抗力が働くため、液滴移動速度の絶対値は小さくなっていた。

本研究の目的は、複数の列方向移動可能液滴を含む燃料液滴列を燃え広がる火炎と移動可能液滴の相互干渉を観察し、数値シミュレーションの検証に資する実験データを取得することである。実験結果の考察と数値計算の検証が比較的容易な、自然対流の影響が排除された軸対称現象を実現するため、実験は微小重力環境で行った^{3, 5, 9, 15, 17, 18)}。本稿では、火炎および移動可能液滴の挙動の観察結果に的を絞って報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 液滴群燃焼実験装置

本稿の移動可能液滴を含む燃料液滴列燃え広がり微小重力実験は、国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) の与圧部である「きぼう」に設置された多目的実験ラック (MSPR: Multi-purpose Small Payload Rack) を使用して行われた。実験装置本体である液滴群燃焼実験装置 (GCEM: Group Combustion Experiment Module) を燃焼実験チャンバ (CCE: Chamber for Combustion Experiment) に封入し、MSPR のワークボリュームに搭載した。実験の雰囲気気体として使用する空気は、MSPR の小規模実験エリアに搭載されたボンベから供給した。GCEM では、3つのテーマの実験が実施された¹⁹⁻²¹⁾。ここでは、本実験に関連する項目のみを説明する。GCEM, CCE および MSPR の詳細は、Ref. 22 を参照して頂きたい。

Figure 1 は液滴支持部と点火装置の概略である²⁰⁾。本稿の実験では、図中に Single Fiber と記載されている直径 78 μm の SiC ファイバが液滴列懸垂システムである。液滴

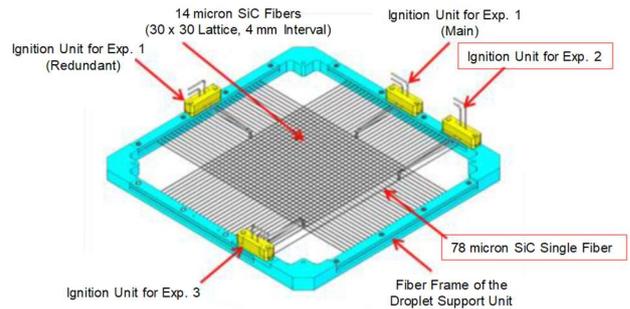


Fig. 1 Droplet support unit and ignition units²⁰⁾.

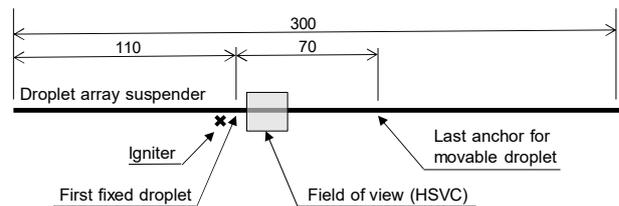


Fig. 2 Droplet array suspension system.

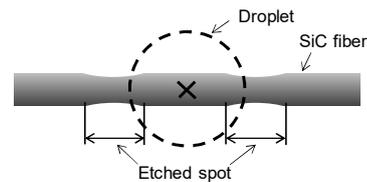


Fig. 3 Anchor point for a movable droplet

列懸垂システムは、図中の直径 14 μm の SiC ファイバ格子から面内方向に 10 mm、高さ方向に 2 mm 離れて設置されている。また、点火源として、図中に Ignition Unit for Exp. 2 と記載された電熱線式点火装置を使用した。液滴の生成には、三次元トラバース装置に設置された先端外直径約 70 μm のガラス管ニードルを使用した。

2.2 液滴列懸垂システム

Figure 2 に液滴列懸垂システムの全体を示す。液滴の運動を液滴列方向にのみ可能とするため、直線ファイバ上に液滴を生成する手法を用いた。直線ファイバには、全長 300 mm の SiC ファイバ (直径 78 μm , Specialty Materials 社製 SCS-9A) を加工して使用した。液滴列を懸垂する部分は、全長の内の 70 mm である。SiC ファイバは、購入したままでは液滴とファイバの間に作用する抗力が大きく、移動可能液滴の運動の妨げになる。そこで、まず濃度 0.5 mol/L、温度 60 $^{\circ}\text{C}$ の希塩酸に 2 時間浸し、その後に研磨フィルム (#10000) でファイバ表面を研磨した。研磨の度

合いを統一するため、懸垂された直径 1.0 mm の正デカン液滴に 0.1 μN の力がファイバ方向に作用するように研磨後のファイバを傾けて固定し、抗力検証試験を行った。直径 1.0 mm の正デカン液滴がファイバの端に懸垂された直後に動き出し、かつその後に液滴が止まらずにファイバの反対の端に到達したファイバを、懸垂線として採用した。

表面処理を施したファイバに液滴を懸垂すると、近傍の比較的安定した場所に移動してしまい、液滴を初期位置にとどめておくことが困難であった。そこで、Fig. 3 のように、移動可能液を初期位置で安定させるためのアンカ部を懸垂線に作成した。アンカ部は 2 つの若干ファイバが細い部分 (エッジド・スポット) で構成されている。エッジド・スポットは炭酸ガスレーザー光を集光して作成した。移動可能液滴は、2 つのエッジド・スポットに接触して静止する。アンカ部は、2 mm 間隔で 36 個 (内 4 個は固定液滴用セラミックビーズ作成に使用) 作成した。アンカ部を全て作成した後、ファイバ表面処理後の抗力検証試験と同じ試験を行い、懸垂線として使用できるファイバを選択した。

Figure 4 に、実験対象とした液滴列の概略を示す。液滴列は、4 個の固定液滴と最大 16 個の移動可能液滴で構成される。燃料には、実用燃料であるジェット燃料や灯油と揮発性が同等である直鎖飽和炭化水素として、正デカンを使用した。液滴初期直径は全て 1.00 ± 0.05 mm である。点火源から 4 個の液滴は固定液滴であり、アンカ部を利用して作成された紡錘形のセラミックビードを内包するように液滴を生成した。固定液滴を 4 個設置した理由は、落下塔での予備実験において、第 1 液滴の点火の擾乱により、近傍の移動可能液滴が大きく移動してしまうことがわかったからである。予備実験の結果、第 1 液滴から 6 mm 以上移動可能液滴を離しておけば、点火の擾乱の影響を受けないことがわかった。セラミックビードは AREMCO 社製 CERAMABOND569 を焼結させて作成した。液滴が燃焼している際にビードから気泡が発生するのを防止するために CERAMABOND569T で表面をコーティングした。液滴間隔 S は、隣り合う液滴の中心間距離とした。固定液滴間隔 S_F は、2 または 6 mm とした。液滴位置 x の座標原点は、最終固定液滴の中心とした。また、時刻 t の原点は、最終固定液滴が点火した時刻とした。液滴の点火時刻は、燃え広がり火炎先端がその液滴を追い越した時刻と定義した。

2.3 画像計測

光学観察装置は、液滴生成・燃焼挙動観察用デジタルビデオカメラ (VC)、液滴・火炎拡大観察用高速度デジタルビデオカメラ (HSVC)、および LED パネルバックライトから構成される。VC を用いて液滴列全体の観察を行った。

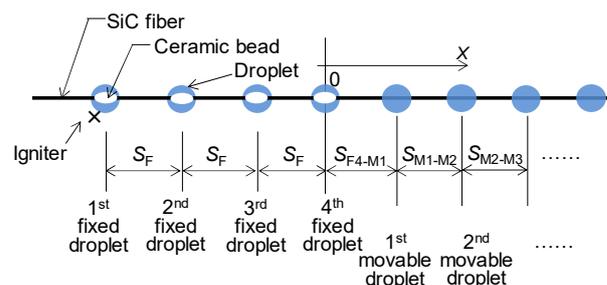


Fig. 4 Droplet array.

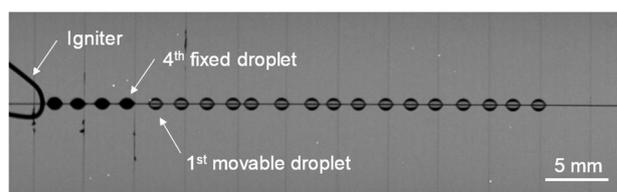


Fig. 5 Backlit image of droplet array recorded by still-mode VC.

液滴の初期直径を計測するための静止画像 (画像サイズ: 5616 x 3744 pix, 解像度: 24.1 pix/mm) を記録した後、液滴列を燃え広がる火炎と移動可能液滴の挙動を動画 (画像サイズ: 1920 x 1080 pix, 解像度: 8.32 pix/mm, コマ速度: 30 fps) で記録した。HSVC は、第 4 固定液滴用ビードから約 20 mm の部分 (Fig. 2 参照) の拡大撮影 (画像サイズ: 1280 x 508 pix, 解像度: 64.04 pix/mm, コマ速度: 1000 fps, 露光時間: 1 ms) に用いた。バックライトを 500 Hz で明滅させることにより、火炎の直接画像と液滴のバックリット画像を交互に撮影した。

実験終了後に画像データをダウンロードし、VC の静止バックリット画像から初期液滴直径と初期液滴間隔を、HSVC の動画から移動可能液滴と火炎先端の位置履歴を計測した。VC の静止バックリット画像の例を Fig. 5 に示す。初期液滴直径と初期液滴間隔の計測には、自作の画像計測プログラム²³⁾を用いた。計測アルゴリズムの詳細は Ref. 23 を参照して頂きたいが、異なる点は、解析を各ピクセルラインに対して行っている点と、ピクセルライン上で液滴の輪郭の条件を満たすピクセルの最もお互いに離れたピクセルの組みの位置を液滴の輪郭位置とした点である。懸垂線の輪郭位置を計測したデータを除外し、残った全ての液滴輪郭位置を最小 2 乗法により懸垂線と平行な軸をもつ楕円に近似した。得られた楕円を懸垂線と平行な軸回りに回転させた回転楕円体の体積を求め、これと等しい体積の球の直径を液滴直径 d とした。液滴中心位置は、楕円の中心とした。同一の自作プログラムを使用し、HSVC で撮影された液滴の連続バックリット画像から移動可能

液滴の位置履歴を求めた。移動可能液滴の速度は、前後それぞれ2つの位置データと合わせて合計5つの位置データを最小2乗法で直線近似し、その直線の傾きを中央の位置データの時刻の液滴速度とした。

火炎先端位置履歴は、バックライト消灯時のHSVC画像から取得した。燃え広がり火炎の先端は非常に輝度が低いため、第 n 番目の画像と第 $(n-1)$ 番目の画像の差をとることにより、移動する火炎を鮮明化して先端位置履歴を取得した。懸垂線と平行な、懸垂線から1 mm離れたピクセルライン (Fig. 6a 中の白い直線) を各差分画像から抽出し、時間経過の順に並べた結果が Fig. 6b の画像である。輝炎に先行する青炎先端と考えられる白の細い曲線と輝炎先端と考えられる白の太い曲線が見て取れる。白の細い線の位置、即ち元画像で輝度の増大幅が大きい部分の先端位置を火炎先端位置とした。

2.4 実験方法

実験は、地上からコマンドを送信して行った。空気ポンプから空気を供給し、GCEM内の雰囲気圧力を 100 ± 10 kPaに調整した。GCEM内温度が $25 \sim 30$ °Cの範囲で安定していることを確認してから、撮影装置を録画開始信号待ち状態にし、計測データの記録を開始した。液滴列懸垂線上に設定の配置・個数の液滴を生成した後、バックライトを点灯した状態で静止画モードのVCで液滴列を撮影した。この静止画像から液滴初期直径・初期間隔を実験後に計測した。液滴列と雰囲気気体を40秒間静置した後、点火用電熱線に通電して第1固定液滴を点火した。点火開始信号と同時にHSVCの録画を開始し、液滴列を燃え広がる火炎と移動可能液滴の挙動を記録した。燃焼終了後、録画およびデータ記録を終了し、懸垂線上のすす除去を窒素ガス噴流で行った。最後に、GCEM内の気体を排出し、実験を終了した。

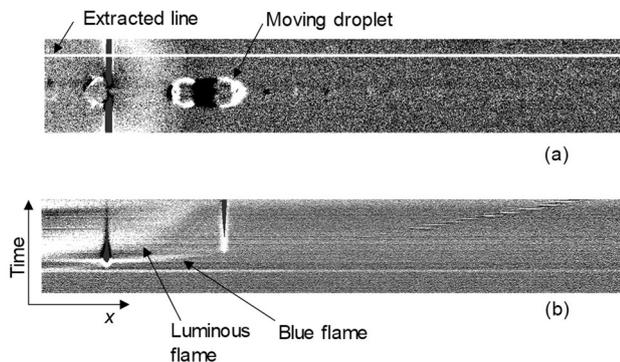


Fig. 6 Differential images of spreading flame.

3. 実験結果および考察

軌道上の液滴群燃焼実験装置を使用することにより、26回の微小重力実験を行うことができた。

3.1 等間隔移動可能液滴列の実験

Figure 7に、動画モードのVCで撮影された火炎および液滴列の直接画像の例を示す。初期状態では、固定液滴を含めてほぼ2 mmの等間隔で20個の液滴が配置された液滴列である。第4固定液滴に火炎が燃え広がってから0.067 s経過した画像であり、4つの固定液滴を囲む群火炎とその先端で群火炎から離れる方向 (画像の右方向) に移動する移動可能液滴が観察できる。第1移動可能液滴が第2移動可能液滴と合体し、合体した移動可能液滴が第3移動可能液滴に衝突した瞬間の画像である。露光時間が0.033 sと比較的長いために時間分解能が低い、移動する液滴が流し写真のように撮影されるため、露光時間内の液滴の移動量がわかる。赤熱した4本の縦線が映っているが、これらは画像奥行き方向に液滴列から2 mm離れて設置されている直径 $14 \mu\text{m}$ のSiCファイバであり、液滴列燃え広がり現象に影響を及ぼすことはないと考えている。

Figure 8は、Fig. 7と同一の液滴列をHSVCで拡大撮影した連続バックリット画像である。第4固定液滴から第

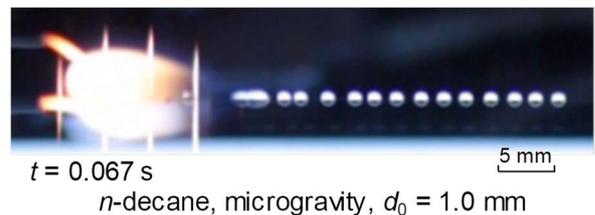


Fig. 7 Spreading flame and droplets.

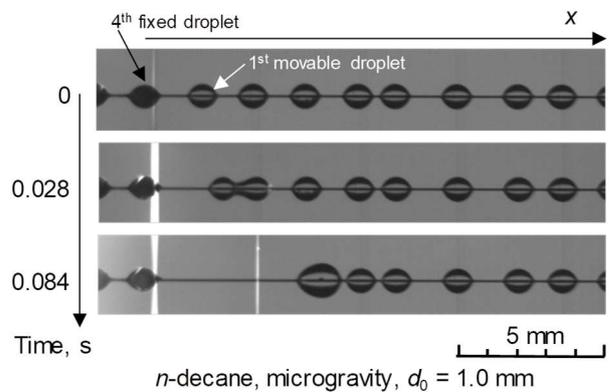


Fig. 8 Sequential backlit images of droplet array taken by HSVC.

8 移動可能液滴までが撮影されている。また、**Fig. 9** は HSVC の連続バックリット画像から得られた移動可能液滴の位置履歴と連続直接画像から得られた燃え広がり火炎先端位置履歴を示している。第 1 移動可能液滴は第 4 固定液滴に燃え広がりが起こる以前の -0.013 s から正方向に移動を開始している。これは、固定液滴を燃え広がる火炎によって火炎前方に生じた熱膨張流によって誘発された液滴の運動と考えられる¹⁶⁾。最終固定液滴が点火した後、第 1 移動可能液滴は速度を増して正方向に移動する。この液滴の加速は、移動可能液滴の火炎側半球が急激に火炎により加熱されたために、蒸発に起因する推力が反対側の半球と不均衡になり、起こったと考えられる¹⁷⁾。液滴運動の定量的な機構解明は、今後の課題とする。およそ 0.02 s で燃え広がり火炎先端が第 1 移動可能液滴に到達していることが **Fig. 9** からわかる。火炎が到達しているにもかかわらず移動可能液滴が点火しないのは、まだ液滴温度が点火に十分な温度に達していないからだと考えられる。その後、 0.028 s で第 1 移動可能液滴と第 2 移動可能液滴の合体が起こっている。この合体により移動可能液滴の温度が下がり、移動可能液滴から火炎先端への燃料蒸気供給量が減少したため、燃え広がり火炎の先端は徐々に第 1 移動可能液滴から離れ、 0.06 s 付近で伸張から後退に転じたと考えられる。その後、移動可能液滴は後続の移動可能液滴と合体を繰り返し、HSVC の視野外である第 16 移動可能液滴に到達して合体した。

固定液滴間隔を 2.0 mm で固定し、固定-移動可能液滴間隔および移動可能-移動可能液滴間隔が約 4 mm の条件と約 10 mm の条件で実験を行ったが、固定液滴の群火炎から移動可能液滴に燃え広がりは起こらなかった。固定液滴の群火炎が第 1 移動可能液滴に燃え広がる可能性がある条件は、今回使用した液滴列懸垂システムでは、固定-移動可能液滴間隔が 2 mm の条件のみであることがわかった。しかしながら、前述したように火炎が 4 個の移動可能液滴を燃え広がる間に第 1 移動可能液滴が正方向に移動を開始する。その結果、第 4 固定液滴が点火した時点で既に第 1 移動可能液滴が燃え広がり限界の固定-移動可能液滴間隔を超えてしまうことがわかった。火炎前方に生じる熱膨張流を小さくするため、6 回目の実験以降は、第 1 固定液滴用ビードと第 4 固定液滴用ビードにのみ固定液滴を生成し、固定液滴間隔を 6.0 mm とした。固定-移動可能液滴間隔は 2 mm とした。また、第 1 アンカ部に付着したすが除去できなくなってしまった 7 回目以降の実験では、第 1 アンカ部に生成した液滴を最終固定液滴と見なし、移動可能液滴は第 2 アンカ部以降のアンカ部に生成した。

3.2 移動可能液滴列の燃え広がり挙動

移動可能液滴の初期位置を様々に変化させ、移動可能液滴を燃え広がる火炎と移動可能液滴の運動を観察した。移動可能液滴列を燃え広がる火炎が観察された事象の中の二例を **Fig. 10** に示す。**Figure 10a** の液滴配列条件では、 0.02 s 付近で最終固定液滴の燃え広がり火炎先端が第 1 移動可能液滴に到達している。その後、 0.03 s 付近でわずかに火炎先端が第 1 移動可能液滴を先行するが、 0.0385 s で第 1 移動可能液滴が第 2 移動可能液滴と合体し、再び火炎先端は合体した液滴に付着するように進行した。しばらくこの状態が続き、 0.09 s 付近で合体した移動可能液滴が点火した。このように、点火した液滴（以下、液滴 A）から

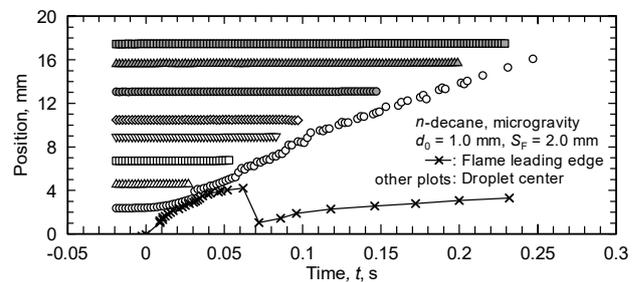


Fig. 9 Position histories of movable droplets and leading edge of spreading-flame for a droplet array of almost-even spacing.

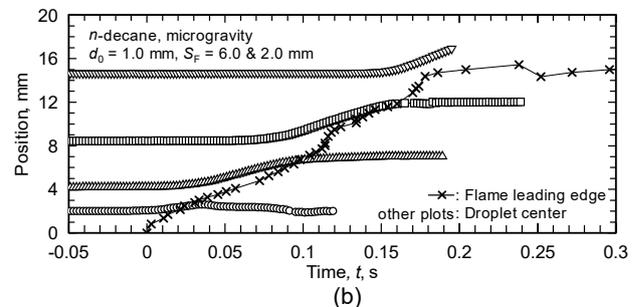
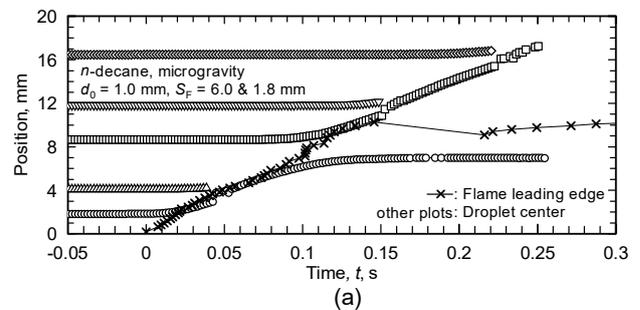


Fig. 10 Position histories of movable droplets and leading edge of spreading-flame.

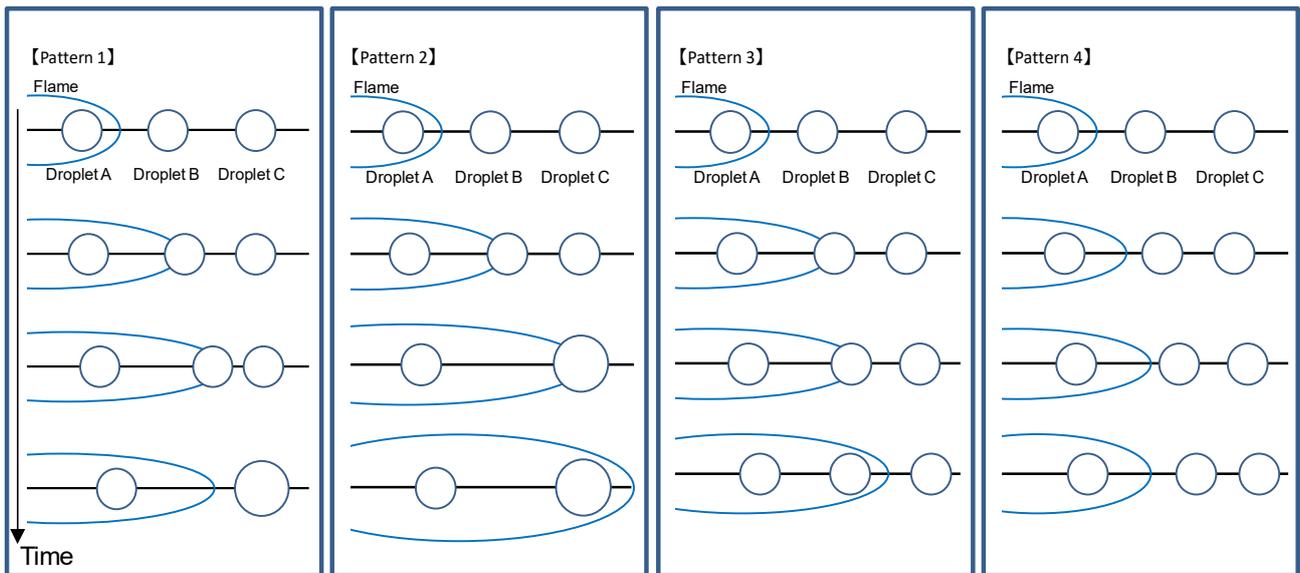


Fig. 11 Flame spread behaviors.

未燃移動可能液滴（以下、液滴 B）への燃え広がりがさらに次の未燃移動可能液滴（以下、液滴 C）と合体した後に起こる燃え広がり挙動を Pattern 2 と呼ぶことにする。点火した合体移動可能液滴はその後も燃え広がり火炎とともに正方向に移動を続け、その火炎先端が 0.12 s 付近で第 3 移動可能液滴に到達している。第 3 移動可能液滴は燃え広がり火炎先端を伴って正方向に移動し、第 4 移動可能液滴と合体した。第 3 と第 4 移動可能液滴が合体した液滴は、その後点火することなく第 5 移動可能液滴と合体し、HSVC の視野外に移動した。このように、液滴 A から液滴 B への燃え広がりが、液滴 B と液滴 C の合体により阻害される燃え広がり挙動を Pattern 1 と呼ぶことにする。

Figure 10b の液滴配列条件では、最終固定液滴から燃え広がり火炎先端が、Fig. 10a の場合と同様、0.02 s 付近で第 1 移動可能液滴に到達した。その後、0.03 s 付近で第 1 移動可能液滴が点火し、移動速度が減少してほぼ静止した。第 1 移動可能液滴に燃え広がった火炎の先端は正方向に伸張を続けた。このように液滴 A から液滴 B に燃え広がりが起こり、その後に液滴 B がほぼ静止する燃え広がり挙動を Pattern 3 と呼ぶことにする。第 2 移動可能液滴から第 3 移動可能液滴への燃え広がり挙動も Pattern 3 であった。第 3 移動可能液滴まで燃え広がった火炎の先端は、0.18 s 付近で第 4 移動可能液滴に最も近づくが、この時点で第 4 移動可能液滴は正方向に速度を持っているため、火炎先端は第 4 移動可能液滴に到達せず、第 3 移動可能液滴ほぼその位置にとどまった。このように液滴 A から液滴 B に燃え広がりが起こらずに、液滴 B が火炎から遠ざかる燃え広

がり挙動を Pattern 4 と呼ぶことにする。

移動可能液滴に燃え広がりが起こった全事象を、隣り合う 3 個の液滴に着目して調べた結果、燃え広がり挙動は前述の 4 つの Pattern に大別できることがわかった。これら 4 つの燃え広がり挙動を模式的に示したのが Fig. 11 である。Pattern 1 と 4 の燃え広がりが起こった場合、燃え広がり現象は終了するので、燃え広がり現象が継続する場合は、Pattern 2 と 3 の組み合わせ、もしくはどちらかの挙動が連続して起こっていると考えられるが、全燃え広がり事象の中に Pattern 2 で燃え広がった火炎がそれ以後も燃え広がった事象は無かった。4 つの燃え広がりパターン の定義を簡潔に記すと以下の通りである。

- Pattern 1: 液滴 A の火炎が液滴 B に到達するが、液滴 B が点火する前に液滴 C と合体し、燃え広がりが終了する。
- Pattern 2: 液滴 A の火炎が液滴 B に到達し、液滴 B が火炎を伴ったまま液滴 C と合体する。その後、合体液滴が点火する。
- Pattern 3: 液滴 A の火炎が液滴 B に到達し、液滴 B が単独で点火する。
- Pattern 4: 液滴 A の火炎が液滴 B に到達せず、燃え広がりが終了する。

炎燃え広がりの挙動は、液滴 A が点火した時点での液滴 A、B および C の状態で決定されると考え、挙動に大きな影響を与えると考えられる 3 つの状態変数を選んで燃え

広がり挙動のマッピングを行った。選んだ状態変数は、液滴 A 点火時の液滴 A と B の相対速度 ΔV_{AB_igA} 、液滴 A 点火時の液滴 A と B の間隔 S_{AB_igA} を液滴 A の直径 d_{A_igA} で除した無次元液滴間隔、および液滴 A 点火時の液滴 B と C の間隔を液滴 A の直径で除した無次元液滴間隔である。一つ目と二つ目の変数で燃え広がり挙動をマッピングした結果を Fig. 12 に、二つ目と三つ目の変数で燃え広がり挙動をマッピングした結果を Fig. 13 に示す。Figure 12 の縦軸は、液滴 A と B の間隔が増大する場合を正の値とした。図より、液滴 A と B の相対速度がほぼ 0 かそれ以下の条件でのみ燃え広がりが起こっている (Pattern 2 および 3) ことがわかる。また、液滴 A と B が近づく速度が増大すると、燃え広がりが起こる液滴 A と B の間隔が若干増大している。燃え広がりが起こった事象の包絡線を引いてみると、図中の曲線ようになる。曲線の左側に、燃え広がり起こらない Pattern 1 の事象も含まれているが、これは液滴 B と C の間隔が狭いからであることが Fig. 13 からわかる。4 つの燃え広がりパターンが現れる条件の特徴をまとめると以下の通りである。

- Pattern 1: 液滴 A と B の間隔が狭く、かつ液滴 B と C の間隔が液滴 A と B の間隔より狭い条件で現れる。
- Pattern 2: 液滴 A と B の間隔と液滴 B と C の間隔が同程度に狭く、かつ液滴 A と B の相対速度が小さい条件で現れる。
- Pattern 3: 液滴 A と B の間隔が狭く、かつ液滴 B と C の間隔が液滴 A と B の間隔より広い条件で現れる。液滴 A と B の相対速度はほぼ 0 か負の値であり、液滴 A と B が近づく速度が増大すると燃え広がることのできる液滴 A と B の間隔が増大する傾向がある。
- Pattern 4: 液滴 A と B の間隔が広い条件で現れる。

本実験では、移動可能液滴は懸垂線上を移動するため、懸垂線と液滴の間に抗力が働く。特に液滴温度が低い場合は、液滴速度や移動量が自由液滴の場合とは定量的に異なってしまう。しかしながら、燃え広がり火炎と移動可能液滴の干渉挙動は定性的に変化しないと考えている。将来的には、移動可能液滴と懸垂線の間抗力を定量的に見積もり、液滴運動を生じさせる力の発生機構を明らかにし、自由液滴と燃え広がり火炎の干渉挙動を予測できるようにしたい。

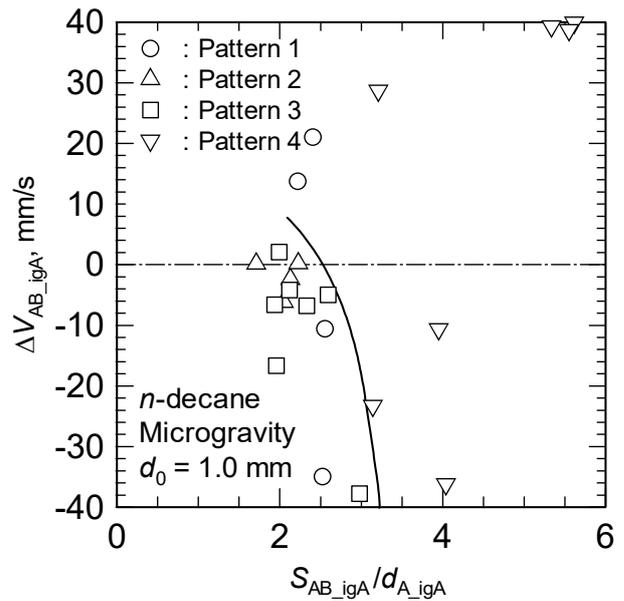


Fig. 12 Flame spread pattern map as a function of the nondimensional droplet spacing and relative velocity between the Droplets A and B at the ignition of the Droplet A.

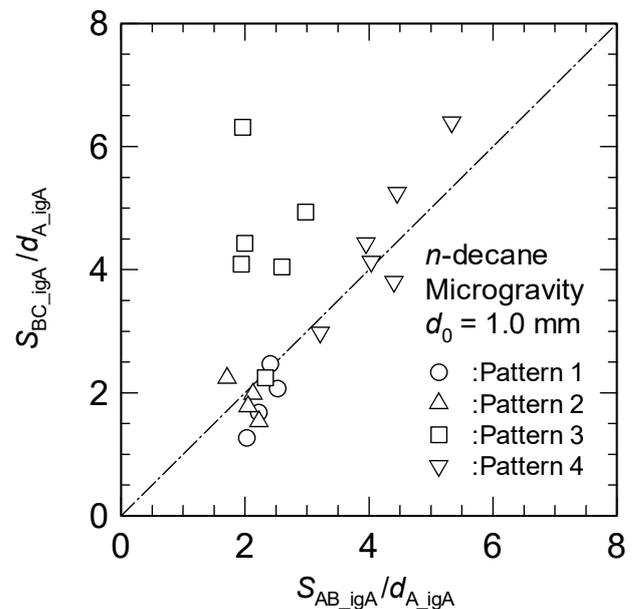


Fig. 13 Flame spread pattern map as a function of the nondimensional droplet spacing between the Droplets A and B, and the nondimensional droplet spacing between the Droplets B and C at the ignition of the Droplet A.

4. 結言

列方向に移動可能な液滴を含む正デカン液滴列を燃え広がる火炎と列中の移動可能液滴の干渉を、「きぼう」の微小重力環境を使用して観察した。以下に、得られた知見を列挙する。

- (1) 火炎の燃え広がりによって移動可能液滴の運動が誘発される現象、および移動可能液滴の移動や合体により火炎燃え広がりが継続しない現象が観察され、燃え広がり火炎と移動可能液滴の運動の干渉が明らかになった。
- (2) 移動可能液滴は、一つ前の液滴に燃え広がりが起こる以前に、火炎から遠ざかる方向に移動を開始する。
- (3) 燃え広がり火炎先端位置履歴と移動可能液滴位置履歴から、液滴間隔が狭い条件では燃え広がり火炎先端位置と未燃次移動可能液滴位置がほぼ一致した状態で燃え広がり方向に移動し、その後未燃次移動可能液滴が点火して燃え広がりが進行することがわかった。火炎先端と未燃次移動可能液滴が離れた状態で未燃次移動可能液滴が点火する事象は観察されなかった。
- (4) 固定液滴-移動可能液滴間隔および移動可能-移動可能液滴間隔をほぼ等しく設定した条件では、固定液滴から移動可能液滴に燃え広がりが起こらなかった。
- (5) 火炎の燃え広がり挙動を3つの連続する液滴に着目して分類すると、4つのパターンに大別されることがわかった。

謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構の「きぼう」船内実験室第2期利用テーマ「ランダム分散液滴群の燃え広がり群燃焼発現メカニズムの解明 (Group Combustion)」の一環として行われた。本実験の実現には、日本大学大学院生産工学研究科に在籍していた瀬端宏幸氏、森田英嗣氏、須藤久美子氏、法華津祥太氏、平賀翔季氏、そして中谷裕貴氏の協力が不可欠でした。特に、須藤久美子氏には実験装置のキーとなる部品である懸垂線の製作を担当して頂きました。ここに感謝の意を表します。また、実験装置開発・製作、実験運用計画作成・検討等において多くのご協力とご支援を頂いた㈱IHI 検査計測の久康之氏、山本信氏、花房直氏、野倉正樹氏、㈱AES の福山誠二郎氏、(一財)日

本宇宙フォーラムの桜井直子氏、島岡太郎氏、(株)有人宇宙システムの水野哲朗氏、曾根武彦氏、熊谷亮一氏に、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) BP Statistical Review of World Energy, 2018.
- 2) E.M. Twardus and T.A. Brzustowski: *Combust Science and Technology*, **17** (1978) 215.
- 3) T.A. Brzustowski, A. Sobiesiak and S. Wojcicki: *Proc. Combust. Inst.*, **18** (1981) 265.
- 4) K. Konishi, M. Kono and K. Iinuma: *J. of JSME*, **B50** (1984) 1382 (in Japanese).
- 5) S. Yosida, H. Hara and S. Okajima: *J. of JSME*, **B55** (1989) 1241 (in Japanese).
- 6) A. Umemura and T. Ohtake: *J. of JSME*, **B55** (1989) 1705 (in Japanese).
- 7) M. Queiroz and S.C. Yao: *Combust. Flame*, **82** (1990) 346.
- 8) N. Roth, A. Karl, K. Anders and A. Frohn: *Proc. Combust. Inst.*, **26** (1997) 1697.
- 9) H. Kobayashi, J. Park, T. Iwahashi and T. Niioka: *Proc. Combust. Inst.*, **29** (2003) 2603.
- 10) M. Kikuchi, T. Arai, S. Yoda, T. Tsukamoto, A. Umemura, M. Uchida, M. Kakei and T. Niioka: *Proc. Combust. Inst.*, **29** (2003) 2611.
- 11) T. Kadota, R. Kohama, D. Segawa and M. Tsue: *Journal of JSME*, **65**(1999) 1115 (in Japanese).
- 12) A. Umemura: *J. of JSME*, **B68** (2002) 2422 (in Japanese).
- 13) A. Umemura: *J. of JSME*, **B68** (2002) 2429 (in Japanese).
- 14) A. Umemura and M. Uchida: *J. of JSME*, **B68** (2002) 2636 (in Japanese).
- 15) M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima and S. Yoda: *Combust. Flame*, **141** (2005) 241.
- 16) H. Nomura, M. Takahashi, Y. Ujiie and H. Hara: *Proc. Combust. Inst.*, **30** (2005) 1991.
- 17) H. Nomura, Y. Suganuma, A. Setani, M. Takahashi, M. Mikami and H. Hara: *Proc. Combust. Inst.*, **32** (2009) 2163.
- 18) H. Nomura, H. Iwasaki, Y. Suganuma, M. Mikami and M. Kikuchi: *Proc. Combust. Inst.*, **33** (2011) 2013.
- 19) M. Mikami: *J. of the Combust. Society of Japan*, **56** (2014) 101 (in Japanese).
- 20) M. Mikami, H. Nomura, Y. Suganuma, M. Kikuchi, T. Suzuki and M. Nokura: *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, **35** (2018) 350202.
- 21) Y. Yoshida, N. Sano, T. Seo, M. Mikami, O. Moriue, Y. Kan and M. Kikuchi: *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, **35** (2018) 350203.
- 22) M. Kikuchi and Y. Kan: *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, **31** (2014) 78 (in Japanese).
- 23) H. Nomura, T. Murakoshi, Y. Suganuma, Y. Ujiie, N. Hashimoto and H. Nishida: *Proc. Combust. Inst.*, **36** (2017) 2425.