

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

微小重力場における n デカン直線液滴列火炎伝播過程の OH ラジカル観察

Hydroxyl Radical Imaging Measurement of Flame Propagation Process on n-Decane Linear Droplet Array under Microgravity

若嶋 勇一郎^{1*}・菊池 政雄²・依田 眞一²・大八木 大史³・三上 真人⁴WAKASHIMA, Yuichiro^{1*}, KIKUCHI, Masao², YODA, Shinichi², OYAGI, Hiroshi³, and MIKAMI, Masato⁴

1 独立行政法人産業技術総合研究所超臨界流体研究センター 〒983-8551 仙台市宮城野区苦竹4-2-1
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4-2-1 Nigatake, Miyaginoku, Sendai 983-8551, Japan

2 独立行政法人宇宙航空研究開発機構ISS科学プロジェクト室 〒305-8505 つくば市千現2-1-1
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

3 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1
Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan

4 山口大学工学部 〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1
Faculty of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan

2004年8月26日受付; 2004年12月28日受理 / Received 26 August, 2004; Accepted 28 December, 2004

Abstract : A series of microgravity experiments were performed at MGLAB drop-shaft facility in Japan, in order to investigate the flame propagation process of an n-Decane linear droplet array in stagnant atmospheric air. In the experiments, all droplets in an array were simultaneously generated on the cross-point of X-shaped two SiC fibers. One end droplet of the array was ignited by a hot wire to initiate the flame spreading along the array. Direct images of the propagating flame were recorded by normal speed (30fps) digital video camcorder and hydroxyl [OH*] radical self-emission intensity distributions on the projection plane were observed and recorded with high speed (500fps) video camera. In this paper, time-resolved flame propagating mechanisms between the neighboring droplets were discussed. The observed [OH*] radical images precisely describe the flame propagating mechanisms and the switching process from premixed combustion of evaporated fuel to diffusive combustion around the droplet.

Key Words : Linear Droplet Array, Flame Propagation, OH Radical Imaging, Microgravity

1. 緒言

種々の燃焼機関で用いられている乱流噴霧燃焼現象の解明を目的として、その基本的要素過程と考えられる液滴(群)の蒸発・燃焼過程について多くの理論解析的、実験的研究が行われてきている[1-6]。実験的研究における微小重力環境の利用は、(1)現象を複雑化させる自然対流を排して液滴を中心にした現象の対称性を担保できる。(2)実際には微細かつ高速の現象の時空間観察スケールを適当な大きさまで拡大可能である。(3)液滴の配置を固定して正確な実験初期条件の規定が可能である。といった利点を持ち、Kumagai, Isodaら[7]が単一液滴の微小重力燃焼実験を初め

て行って以来、単一あるいは比較的小数の液滴群の様々な雰囲気条件における蒸発・燃焼状態を調べた微小重力実験が行われ、多くの知見が蓄積されてきている。

これらの微小重力実験[8,9]では、理論解析で導入されている準定常近似に対応して、単一液滴や近接した複数液滴の準定常的な燃焼過程が主な観察対象となってきた。そのため比較的良好に現象の観察と理解がすすんでいると考えられるが、未燃蒸発状態の噴霧が着火後に群燃焼状態へ移り変わってゆく非定常な過程に関する知見を必ずしも十分に与えるものではない。そこで、実用噴霧燃焼機関で重要な保炎のメカニズムや、未燃液滴群が火炎伝播過程を経て群燃焼状態へ至る過程を解明するためには液滴間の火炎伝播過程の詳しい実験観察が必要と考えられる。

これまでに、液滴群を空間に固定配置して強制着火させ、液滴間の火炎伝播観察を行った例はいくつかある[10-

* Corresponding author. E-mail: y.wakashima@aist.go.jp

14,19,20]. 所与の雰囲気条件下で, ある相対的位置関係を持つ噴霧中の既燃-未燃液滴間に起きうる火炎伝播過程を調べるためには火炎伝播メカニズムに含まれる要素過程が欠くことなく含まれている必要があり, それに最も適して, かつ, 簡潔な液滴配列は直線状液滴列であると考えられる. そのため, 過去の研究例には直線状液滴列を取り扱ったものが多い. Bruzstowski ら[10], Okajima ら[11]はそれぞれ微小重力実験を行って比較的揮発性の高いオクタン, ヘプタン等の直線液滴列の燃え広がり過程を観察している. これらの実験ではシュリーレン等の光学撮影手法により燃焼液滴周囲に広がる高温雰囲気の密度変化を観察し, 未燃液滴がこれら高温領域に取り込まれる過程について考察を与えている.

近年, Kato ら[12], Park ら[14]は低揮発性燃料である n デカン, n ヘキサデカンを用いて, その液滴列に沿った火炎伝播過程を OH ラジカル画像によって観察している. 彼らは通常重力下, 微小重力環境下で室温での実験を行って火炎伝播速度がある液滴間隔で最大値を示すことを明らかにしている. また, Nunome ら[15]は微小重力環境で n デカン噴霧の火炎伝播実験を行い, 噴霧を構成する液滴間の平均間隔が観察された火炎直径のちょうど半分になる状況で燃え広がり速度が最大になることを見出している.

以上の研究では実験観察が主であり, 非定常的な伝播過程を理論的に調べたものはなかったが, 近年, 低揮発性燃料液滴を対象にした Umemura による理論解析が行われた[16-18]. これによれば, 液滴間の火炎伝播過程は 2 つの無次元パラメータとして表される液滴間距離と雰囲気の温度条件とによってその伝播形態が変化してゆくことが明らかにされ, パラメータ平面上における火炎伝播形態の発現マップ(伝播モードマップ)を描くことが可能となった.

筆者らの研究グループでは, この理論解析によって導出された液滴間火炎伝播過程の現象モデルと伝播モードマップの検証を行う目的で, 日本無重量総合研究所 (MGLAB) の 4.5 s 落下施設を利用して観察実験を行ってきた[19,20]. 観察の一環として, 直接可視映像のほかに, OH ラジカルの自発光 (中心波長 $\lambda = 308 \text{ nm}$) 分布を高速度カメラとイメージ・インテンシファイア (以下 I.I.) を用いて撮影を行った. OH ラジカルの自発光領域の空間分布は液滴の着火, 火炎伝播の過程において燃焼反応帯を示す有用な指標になると考えられるからである. 本報では, 既報[19,20]に引き続いて, この比較的高い時間分解能で取得した撮影結果について考察を行う.

2. 液滴列火炎伝播実験

2.1. 実験の概要

本研究で行われた一連の微小重力燃焼実験については既に Mikami らの報告[19,20]がなされているので, ここでは主要な事柄についてのみ述べる.

本実験の目的は, 大気圧静止空気を雰囲気としてその温

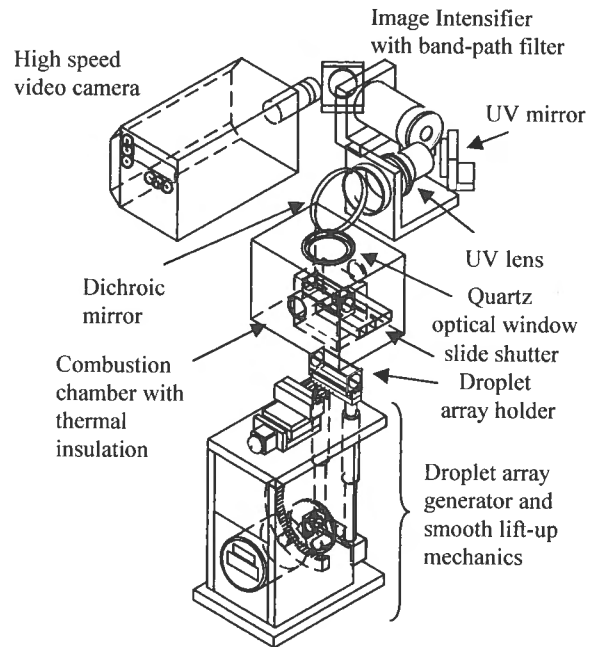


Fig. 1 Core experiment apparatus for droplet array generation, lifting up and observation

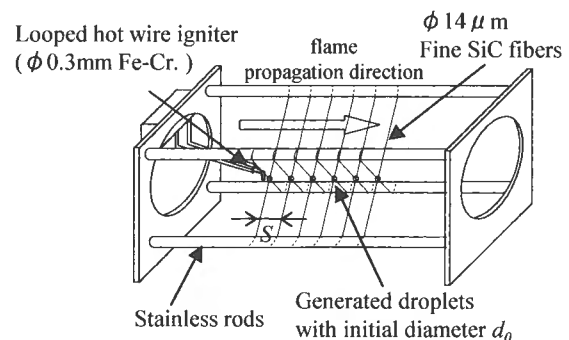


Fig. 2 Schematic of droplet array holder

度を変化させ, 異なる幾何配置を持つ直線状燃料液滴列に発現する火炎伝播形態を明らかにすることである. 実験では, 雰囲気温度条件を 300 K (室温) から自着火温度に近い高温条件領域まで変化させ, また, 液滴列の幾何配置条件を表すパラメータとして液滴間隔と液滴初期直径で規定される無次元液滴間隔を変化させることで実験条件の設定を行っている. 燃料化学種としては低揮発性燃料である n デカン (試薬特級, 和光純薬) を用いた.

2.2. 燃焼実験装置および OH ラジカル観察方法

図 1 に実験装置主要部分と OH ラジカル観察系の概要を示す. 落下実験において微小重力環境になると, 内部空気温度が調節されている燃焼チャンバ下面のシャッターが開き, 液滴列生成装置によって図 2 に示す支持フレーム上に生成された液滴列がギア・クランク・スライド機構によって持ち上げられて燃焼チャンバ内へ投入される. フレーム

の移動が停止してから 0.1 秒の後、一端の液滴をタイマーで通電時間を定めて電熱線着火することにより火炎伝播させる。生成液滴列がシャッター面を通過してから強制着火されるまでに高温雰囲気さらされている時間はおよそ 0.4~0.5 秒である。

外部を断熱材で被覆した燃焼室の上面には、高温条件時の断熱性を考慮して 2 重の石英ガラス窓が設けられており、ラジカル自発光域を含む紫外光はダイクロイックミラーによって特注紫外光レンズに導かれる。また、同じ窓を利用して燃焼室直上から火炎伝播の直接可視画像をデジタルビデオカムコーダ (Sony, DCR-PC9) により 30 fps 通常ビデオ映像として撮影している。

ダイクロイックミラーによって取り出された紫外光は紫外レンズ、紫外反射ミラー、バンドパスフィルタ (日本真空光学製, FWHM10 nm) を通過して I.I. (浜松ホトニクス, C6653 MOD) に導入される。I.I. 蛍光面の画像は高速度カメラ (NAC, MEMRECAM Ci-4, 500fps, シャッタースピード 1/1500 s) によって記録される。実験後、高速度カメラ上のメモリに保存された画像は横方向 572 ピクセル、高さ方向 432 ピクセル、輝度 256 階調のモノクロデジタルイメージ (非圧縮 TIFF ファイル) として出力され、観察視野範囲は固定である。

紫外光に対する紫外レンズのフォーカス調整は、地上実験では伝播が極めて短時間に終わり、かつ自然対流が発生するために作業が試行錯誤的となつて、適切な調整を行うことができない。そこで、火炎帯中に OH ラジカルが比較的多く含まれていると考えられるエタノール火炎を、実験時に予想される火炎位置に想定火炎サイズ (直径 8~10 mm 程度) を合わせて置き、実際に I.I. 蛍光面に映る画像を見て調整を行っている。

本実験で取り入れられた液滴列同時生成手法に関しては Mikami らの別報[19]にて詳細に報告されているので以下に要点のみを述べる。本実験では雰囲気温度条件と液滴列の幾何配置条件の 2 つを規定する無次元量を実験パラメータとして用いている。そこで、液滴列は厳密に間隔 S と初期液滴直径 d_0 が制御でき、かつ均一寸法で生成できる方法が望ましい。また、液滴間火炎伝播が未燃液滴の加熱蒸発・着火過程の繰り返しで起きるものと考えれば、液滴支持の手段はその過程に対して物理的・熱的な影響が最小となるような手法が望ましいと考えられる。本実験では、4 本のステンレス支柱に対して X 字に張った直径 14 μm SiC ファイバ (日本カーボン Hi-Nicalon) の接触交点上に、外径を 30~40 μm 程度に細く引き伸ばし、内径をそろえたガラス管列から燃料を供給して液滴を付着生成する方法をとった。ここで、4 本のステンレス棒を含む常温の金属製液滴列支持フレームを燃焼チャンバ内の高温雰囲気中に投入した場合の熱的影響については、本実験後に汎用熱流体解析ソフトウェア STAR-CD (CD-Adapco 社) を用いた熱解析を行い、投入後すぐに火炎伝播させた場合にはほぼ無視できることを確認してある。

液滴間隔 S は SiC ファイバを支柱に張る間隔によって定めることができ、液滴直径 d_0 はガラス管からの燃料の供給量によって規定できる。燃料の供給は、燃料が充填されているマイクロシリンジのプランジャを押すステッピングモータ・ステージの移動量 (パルス信号数) によって制御できる。また、ガラス管を複数本並べて、同時に液滴を SiC ファイバ交点上に付着させることにより極めて短時間で液滴列が生成可能である。生成された液滴は、SiC ファイバ表面と液体燃料との濡れ性と濡れ面積が適度に抑えられているため、大きさにもよるが、通常重力、微小重力環境のどちらにおいても表面張力によってほぼ真球形状を保っていることが確認されている。

3. 実験結果と考察

これまでにわれわれが行った落下実験によって、直線液滴列の火炎伝播の様子が液滴の幾何配置条件と雰囲気温度条件に依存して変化し、梅村による理論解析結果[16,17]と類似して、大別すると 3 種類の伝播形態に加えて火炎伝播が起きない純蒸発形態の 4 つのモードが現れることが明らかになっている。具体的な火炎伝播のモードの考察については既報[20]を参照されたい。

図 3 に、液滴間に火炎伝播が起きる実験条件での伝播形態の代表的な例 (30 fps 直接画像) を示す。雰囲気温度条件は 300 K であり、火炎は液滴列に沿って左から右側へ伝播している。図中には強制着火された第 1 液滴の着火時刻を原点にした時刻を示している。

図 3(a) は、液滴間隔が狭い場合 ($S/d_0 = 2$) に既燃側から拡大する群燃焼拡散火炎が未燃液滴を取り込み、その液滴の蒸発活性化が拡散火炎を継続的に拡大させるモード 1 に対応する直接画像である。図 3(b) はそれよりやや液滴間隔が広い場合 ($S/d_0 = 6$) におきるモード 2 に対応した画像であり、既燃液滴から加熱されてできる未燃液滴周囲の可燃混合気層が着火、結合して群燃焼火炎をつくる過程を示している。図 3(c) は、さらに液滴間隔が広い場合 ($S/d_0 = 12$) に未燃液滴周囲の可燃混合気層が着火して個々の液滴周囲に分離した拡散火炎を形成するモード 3 の画像である。液滴間隔が広く、燃焼液滴が自身の燃焼寿命以内に未燃液滴を着火させ得ない場合は火炎伝播の起きない純蒸発モードとなる。これらのモードの境界は雰囲気温度条件あるいは液滴の揮発性によって変動すると考えられる。図には火炎にさらされて赤熱した SiC ファイバが映っている。ファイバの赤熱発光は自身の温度がおおよそ 1200 K を超えたあたりから始まるので温度場のひとつの目安となる (Ikegami [21])。

3.1. ラジカル自発光観察による燃え広がりの過程

図 3 に示した火炎伝播過程の直接画像に対比させて、代表的な火炎伝播形態の OH ラジカル画像を図 4(a) - (c) に示す。温度条件が常温 (300 K) の実験は、 S/d_0 値が 2 から 15 の範囲で行っており、図の条件は火炎伝播が起きた条件

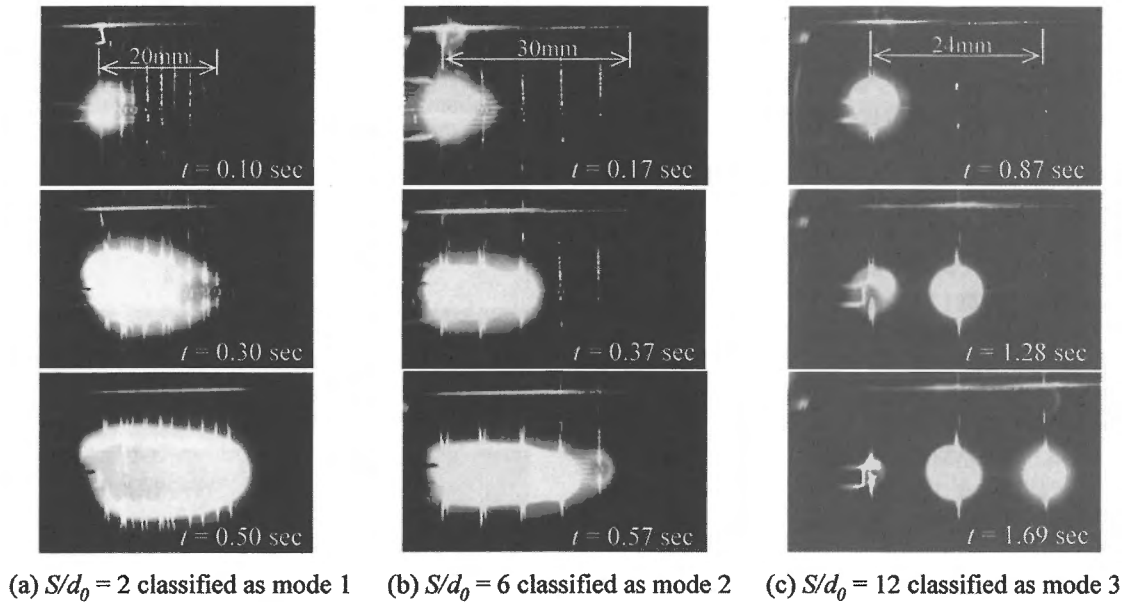


Fig. 3 Video camera images of typical flame propagation modes at various droplet spacings ($T = 300 \text{ K}$)

($S/d_0 < 14$)のうち, 初期液滴直径 d_0 をすべて 1 mm として液滴間隔 S を $S = 2, 6, 12 \text{ mm}$ と変えたものである. 雰囲気温度が低いので低揮発性のデカンでは雰囲気からの加熱による予蒸発量は少なく, クラジウス・クラベイロン関係式が成り立っているものとして求めた液滴表面での当量比 ϕ は希薄可燃限界 ($\phi \approx 0.5$ 程度) よりもさらに小さくなっている. このため, 液滴の予蒸発が火炎伝播に与える影響は少ないと考えられる. 図中の時刻は, 画像中の適当な未燃液滴の一つを選び, それが着火した時間を $t^* = 0 \text{ ms}$ と置いたものである.

図 4(a) は $S/d_0 = 2$ 条件の 40 ms おきの時系列画像である. 図 3(a) の直接画像は図 4(a) の OH ラジカル画像に対応しており, 伝播後の液滴列は拡散燃焼状態となっている. 両者を比較すればちょうど輝炎の外縁がもっとも OH の自発光強度が強い構造となっている. したがって, 前節で述べた観察系を用いて拡散火炎帯での OH ラジカルの定性的分布は比較的良好に捉えられていると考えられる. 2 ms おきの画像データによれば $S/d_0 = 2$ の条件では図の左から右側に向かう自発光域はほぼ一定の速度で連続的に拡大する様子を示している. モード 1 が現れる液滴間隔が狭い場合は, 伝播してくる拡散火炎によって可燃予混合気を作る時間余裕はほとんど無く, わずかに液滴周囲に作られた予混合気を消費してすぐに小さい拡散火炎を作る. そのため, 伝播火炎の前縁部分は図 4(a) のように未燃液滴を頂点とする三角形に近い楕円形状になり, 群燃焼状態に入ってから拡散火炎が拡大すると考えられる.

図 4(b) は $S/d_0 = 6$ の場合の既燃液滴から未燃液滴側への火炎伝播の時系列画像である. Marchese ら [22] によれば, 大気圧下でヘプタン単一液滴火炎の最大直径は初期液滴直径の $7 - 8$ 倍程度であり, 初期火炎が拡大して最大直径に

達したのち火炎は縮小し始めることが実験と数値シミュレーションによって示されている. われわれの実験結果でも, 燃え広がり先端で着火した液滴のおよその火炎寸法の拡大過程は単一液滴火炎の拡大過程と類似している. したがって, 液滴間隔がある程度大きくなると未燃液滴の位置まで火炎が到達せず, 周囲雰囲気を媒体とした未燃液滴への熱伝達が行われて蒸発が活性化する過程が現れるようになる. 蒸気濃度と Stefan 流は液滴表面温度上昇の程度によって定まるため, 液滴の加熱が進めばより濃度の高い可燃予混合気ができる. その混合気が着火し, 予混合燃焼を行った場合には多くの OH ラジカルが発生すると考えられる. 図 4(a) に対比して図 4(b) を見れば, 既燃液滴の拡散火炎が液滴間のある位置に達すると, 未燃液滴周りに図中の他の部分より輝度が明らかに高い自発光領域が形成されている. この輝度の高い領域が, 燃料蒸気が予混合燃焼を起こしている領域と考えられる. その後, この領域は液滴周囲をすみやかにとりかこんで拡散火炎領域と同じような輝度値分布に次第に近づく.

液滴間隔がさらに大きくなると, このような予混合火炎と拡散火炎の切り替りの過程はより明確に観察できるようになる. 図 4(c) は, $S/d_0 = 12$ で得られた着火と予混合気層内の火炎伝播から拡散火炎形成にいたる 2 ms 間隔の時系列画像であり, モード 3 の火炎伝播形態である. 左側にすでに拡散燃焼状態となっている液滴があり, それを熱源として右側にある未燃液滴の蒸発が進み, ついには液滴周囲に形成された可燃予混合気層内部で着火が起きる. 実験では, 着火は液滴中心を結ぶ直線上で必ず起きている. 10 ms 程度の時間で予混合火炎が液滴を包みこむようにして伝播し, その予混合火炎のわずかな伝播時間内で一定の大きさを持つ初期拡散火炎が形成されていることがわかる.

図4(c)では、予混合火炎と拡散火炎では静止雰囲気中において前者のみが伝播性を持つことから、液滴表面に沿って伝播する予混合火炎(燃料蒸気の濃度勾配が存在しており、燃焼速度が最も大きくなる当量比の等高線に沿うように伝播していると考えられる)と、そのあとに現れて液滴を中心に球対称的に拡大する拡散火炎との両者の判別は比較的容易である。加えて予混合火炎の場合は拡散火炎と比較して自発光強度が高いので輝度が高く映っている。図の予混合火炎の伝播速度を概算した結果は、アルカン系炭化水素予混合火炎の伝播速度と同程度となった。

液滴周りに予混合火炎が伝播した後にできる初期拡散火炎の形成については次のように考えられる。まず、予混合火炎伝播の結果、火炎伝播によって急激に発生する燃焼熱が液滴のごく近傍に分布するようになる。この燃焼熱が、予混合気着火する直前に達成されている液滴周囲温度場を変化させ、液滴表面温度は短時間のうちにそれまでの蒸発過程における到達温度からさらに沸点近くまで上昇し、その分蒸気濃度および Stefan 流を増大させる。液滴近傍温度の上昇に加えて、可燃予混合気の燃焼は液滴周囲の酸素を急激に消費するため、初期拡散火炎の大きさは予混合火炎伝播後の蒸発量の増大と周囲酸素濃度場のバランスによって決定されると考えられる。

図4(c)において、時刻 $t^* = 4 \text{ ms}$ から 10 ms の画像を細かく見ると、予混合火炎が伝播している段階では、初期拡散火炎の外側に予混合火炎を示す反応帯が残っている。また、拡散火炎の形成直後には、伝播した予混合火炎が液滴表面近くから離れ、拡散火炎との2重構造が映っている。このことから類推すれば、いわゆるトリプルフレイムによく類似した火炎構造によって液滴周囲の濃度勾配を持つ予混合気消費され、拡散燃焼状態に切り替わっていることが示唆される。この過程については、Kikuchiら[23]が行った同じデカン液滴列を用いた火炎伝播シミュレーションにおいても、予蒸発量が多い場合に現れるトリプルフレイム様の火炎構造が再現されている。なお、予混合火炎の伝播と加熱は液滴から見れば軸対称的に起きるために液滴表面温度の不均一が生じ、マランゴニ対流の誘起が想定されるが、ここではその議論を行うことはできない。

3.2. 750 K 高温雰囲気条件における予混合火炎伝播モードの発現

前節で述べた 300 K (常温) での実験では、列を構成するデカン液滴は主に火炎からの加熱によってのみ蒸発を活性化させている。一方で雰囲気温度が高い場合には、燃焼室に投入された液滴列は火炎の伝播前に予混合気を作ることができる。Mikami らの既報[20]では、通常速度のビデオ画像を用いて雰囲気条件が 600 K の範囲までの実験結果について考察されている。それによると雰囲気加熱による液滴蒸発が無視できる常温での伝播実験結果と比較すれば、雰囲気温度 600 K 条件では、火炎伝播が限界となる液滴間隔とモード3の発現領域がより拡大し、 $Sl/d_0 = 2$ でモード1

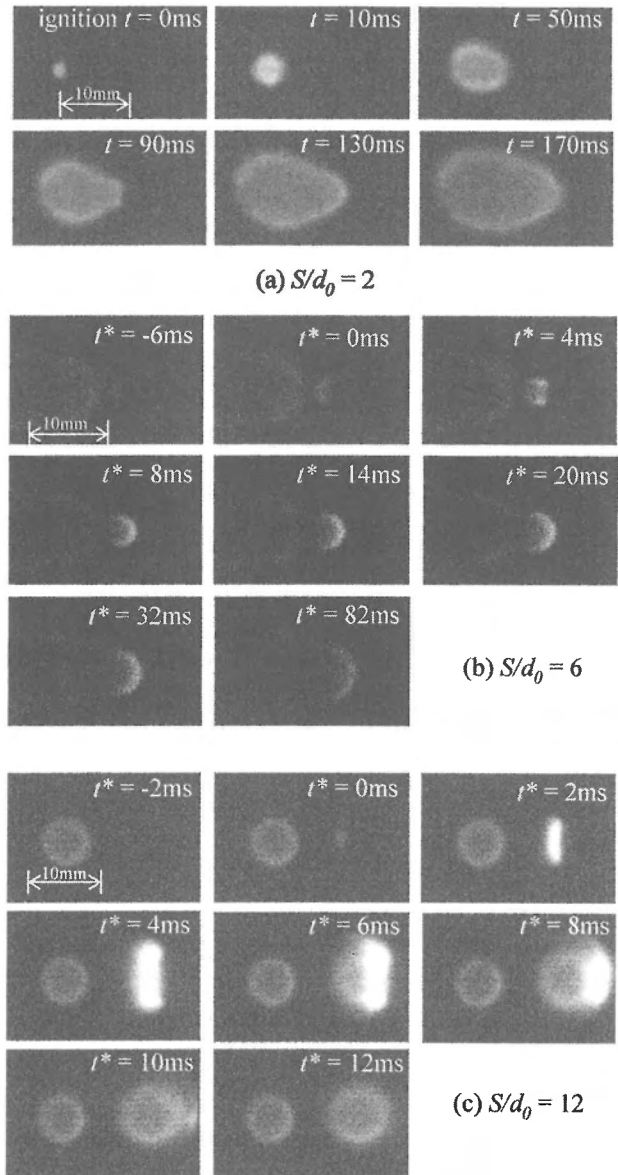


Fig.4 OH radical images of typical flame propagation modes at $T = 300 \text{ K}$

は出現しないことが報告されている。ただし、高速伝播であるため火炎伝播速度を評価することによってモードの判別を行っている。

ここで、 $Sl/d_0 = 2$ 条件での伝播過程について改めて OH ラジカル画像を用いてモード判別を行っておく。図5の画像は、 $d_0 = 1 \text{ mm}$ 液滴を用いた $Sl/d_0 = 2$, 600 K 条件での 2 ms おきの実験画像である。既燃側拡散火炎から加熱されて未燃液滴側に作られた予混合気着火、液滴周囲の予混合気を消費して、直後に一体化して拡散火炎となる(輝度の高い領域が消える)。液滴列全体への燃え広がりに要した時間はおよそ 16 ms である。予混合火炎は液滴列に沿って伝播、拡大する拡散火炎の先端領域に固定されて周期的に出現しており、Umemura による定義に従えばモード2の形態であると判別される。一方、モード1と判別されてい

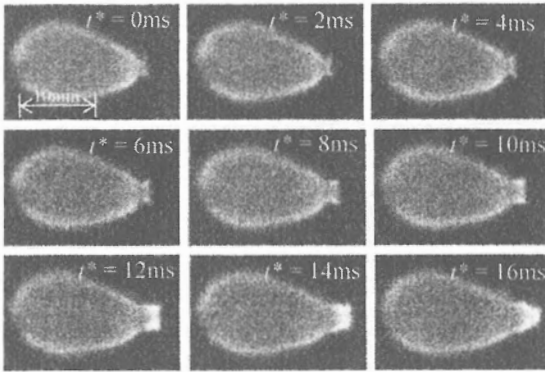


Fig.5 OH radical images at $S/d_0 = 2, T = 600 \text{ K}$ (Classified as Mode 2)

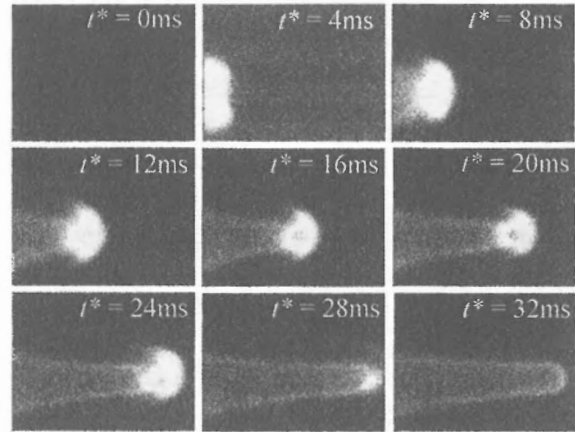


Fig.6 OH radical images at $S/d_0 = 2, T = 750 \text{ K}$

る図 4(a) には輝度の高い予混合火炎領域はほとんど映っていない。

一方, Umemura による理論解析[16]では, 高温雰囲気条件下で液滴間隔 S/d_0 が小さい場合には, 雰囲気から加熱されてきた可燃混合気層が結合し, その領域に予混合火炎が伝播すること(予混合火炎伝播モード)が予測されている。既報での 600 K の雰囲気温度範囲までは, この予混合火炎が可燃混合気層を高速伝播する形態は捉えられていなかった。そこで, 新たに液滴初期直径 $d_0=1 \text{ mm}$, 液滴間隔 $S/d_0 = 2, 4, 6$, 雰囲気温度 750 K での追加実験を行った。本節ではその結果について示す。この条件では通常撮影速度のデジタルビデオカムコーダでは可視火炎を捉えられない可能性があったため, OH 画像撮影用とは別個に高速度カメラ (NAC, MEMRECAM RX-2) を実験装置に搭載して 500 fps で直接可視画像を撮影した。

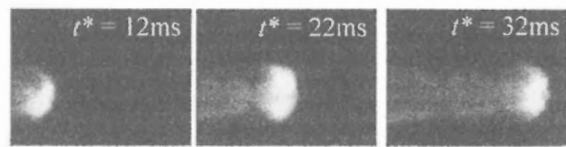


Fig.7 OH radical images at $S/d_0 = 4, T = 750 \text{ K}$

3.2.1. 火炎伝播挙動

図 6 に 750 K, $S/d_0 = 2$ での OH ラジカル時系列画像を示す。第 1 液滴近傍でラジカル発光が開始された時刻を $t^* = 0 \text{ ms}$ とすると, 最初に輝度が高い領域が広く現れ, その領域が液滴列に沿って伝播していることがわかる。 $t^* = 8$ から 24 ms の画像には, 伝播火炎の先端が図 4(c) と同様にトリプルフレームに類似した構造となっており, 高輝度領域が伝播した後に拡散燃焼状態に移行することがわかる。 $t^* = 32 \text{ ms}$ ですべての液滴 (12 液滴を生成) に対して伝播が完了するが, この間のすべての画像フレームに常に輝度の高い予混合火炎帯が捉えられていることにより, この条件で予混合火炎伝播が起きていることがわかる。500 fps 高速度カメラによる直接画像には, この伝播する予混合火炎帯は, 輝度先端を先導する形で高速伝播する青炎として映っている。図 7 の $S/d_0 = 4$ の場合も同様の過程を示したが, 液滴間隔が広がったため結合拡散火炎に凹凸が見られる。このような図 6, 7 における予混合火炎の伝播の様子は, 750 K の高温雰囲気加熱によって液滴間で結合した可燃予混合気層が形成されていることを示していると考えられる。一方で, 図 8 に示す $S/d_0 = 6$ 条件では, 拡散火炎から離れて未燃液滴周りの予混合気が着火, 拡散燃焼状態に入り, 時間

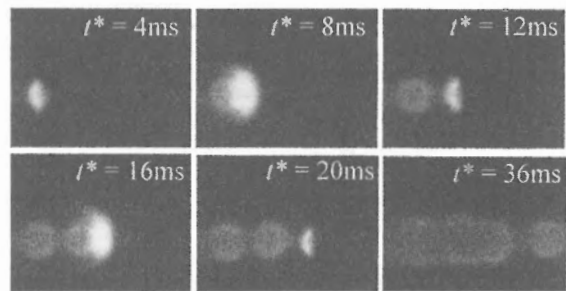


Fig.8 OH radical images at $S/d_0 = 6, T = 750 \text{ K}$

が経過して結合火炎になるという, モード 3 にやや近いモード 2 の形態が観察された。このことから, 図 8 では可燃予混合気層は形成されるが結合はしておらず, 中間の非可燃性領域を通じた熱伝達によって次液滴の可燃混合気層が着火する過程を示していると考えられる。図の特徴から, 600 K 温度条件では $S/d_0 = 2$ でモード 2 となるが, 750 K 条件では $S/d_0 = 2, 4$ で予混合火炎伝播モードとなり, $S/d_0 = 4, 6$ の間にモード 2 との境界が存在すると考えられる。本実験では, すべての実験で液滴列が強制着火前に高温雰囲気にさらされている時間を極力そろえているが, 強制着火までの待ち時間が変化した場合は液滴の加熱蒸発がさらに進むので, これらの条件ですべて予混合火炎伝播モードになる可能性がある。このことから, 液滴列の予蒸発状態が火炎伝播過程を変える重要な要因の一つであることが示唆される。

3.2.2. 火炎伝播速度

図 9 に, 火炎伝播の中心軸上で画像から読み取った OH 自発光領域の先端位置の時間変化を示す。各実験条件で,

撮影領域内に発光が最初に現れた時刻とその位置を基点として図の横軸に時間 [ms] をとり、縦軸に距離 [mm] をとっている。\$S/d_0 = 2, 4\$ での発光域の広がり是比较的滑らかであるが、それらと比較するとモード 2 の伝播過程となっていることに対応して \$S/d_0 = 6\$ の条件では周期的な変動がより大きくなっていることがわかる。強制着火の影響を除くため、第 1 液滴に近い部分を除いた平均の勾配から求めた伝播速度 \$V_f\$ は、\$S/d_0 = 2 : 895\$ mm/s, \$S/d_0 = 4 : 783\$ mm/s, \$S/d_0 = 6 : 636\$ mm/s と算出される。図 10 は、他の雰囲気温度条件 (300 K, 450 K, 600 K) で得られた伝播速度 (既報 [19,20]) との比較である。横軸に無次元液滴間隔 \$S/d_0\$ を、縦軸に火炎伝播速度と初期液滴直径との積 \$V_f d_0\$ を取った。750 K 温度条件での火炎伝播速度 \$V_f\$ は、他の雰囲気温度条件と比較すれば数倍大きく、一般的な炭化水素予混合火炎の層流燃焼速度 (400 mm/s 程度) よりも大きな伝播速度となっている。

このように極めて速い空間的な燃え広がりが現れる理由は、予混合気の燃焼による急激な発熱が熱膨張流を発生させ、液滴列の軸方向の伝播に対して特に寄与しているためと考えられる。実際、これら \$V_f\$ の値は次式で見積もられる層状静止予混合気内の火炎伝播速度[24]、

$$V_f = (\rho_u / \rho_b)^{1/2} S_L \quad (1)$$

と同じオーダーとなっている。ここで \$\rho_u\$ および \$\rho_b\$ はそれぞれ未燃予混合気密度と既燃予混合気密度であり、\$S_L\$ は層流燃焼速度である。

伝播速度の \$S/d_0\$ 値への依存性を見ると、雰囲気温度が 600 K 以下の場合と 750 K の場合では火炎伝播の様子の変化に合わせてその依存性も異なっている。Park ら [14]、Mikami らの既報[20]で報告されている直径 1 mm 程度の液滴列火炎伝播速度 \$V_f\$ は、\$S/d_0 = 2\$ から 4 の間で極大値を持ち、高々 100 mm/s である。一方で 750 K 温度条件では伝播速度は \$S/d_0\$ の増大に対して単調に減少する結果となっている。600 K 以下の条件については Mikami らが既報[19]で考察を与えており、雰囲気温度にあまり依存せず、小さい \$S/d_0\$ では液滴の加熱時間が伝播過程を律速し (\$S/d_0\$ に対して比例的)、大きな \$S/d_0\$ 条件では液滴間に広がる雰囲気での熱伝達過程が律速要因 (\$S/d_0\$ に対して逆比例的) となって、その切り替わりの境界である \$S/d_0 = 3 - 4\$ 付近で極大の伝播速度が実現されることが説明されている。伝播速度に対する雰囲気温度の影響については、火炎伝播前の予混合気層の形成過程と熱伝導係数の温度依存性の寄与が考えられている。

一方、750 K 温度条件で伝播速度が \$S/d_0\$ に対して単調に減少している実験結果については、次のように考えられる。まず、火炎伝播前に液滴列が十分に加熱されて可燃性予混合気層が一体化して形成された場合には、予混合火炎伝播モードが現れる。予混合火炎の伝播は雰囲気における熱伝導過程や液滴内部加熱等とは異なる時間スケールの現象で

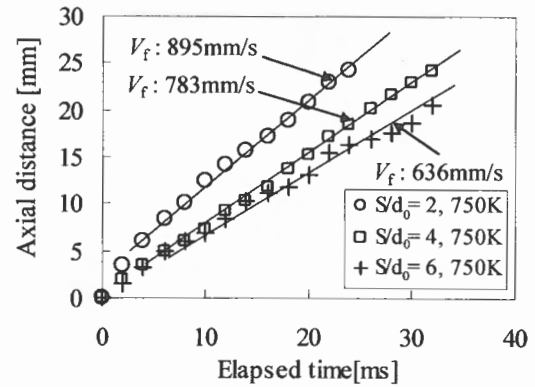


Fig.9 Temporal change in flame front position at $T = 750$ K

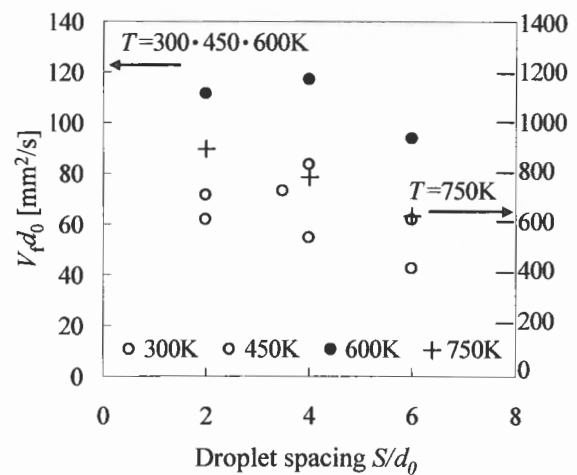


Fig.10 Flame propagating speed $V_f d_0$ at different ambient air temperature T

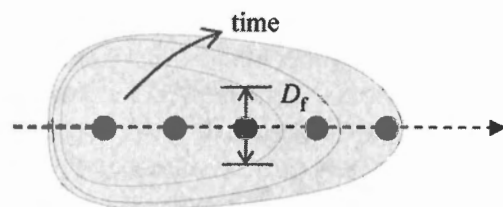
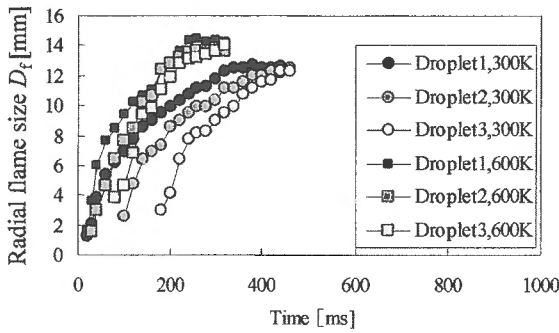
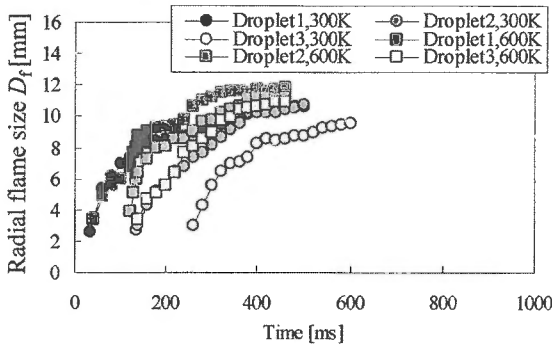


Fig.11 Diffusion flame size toward radial direction

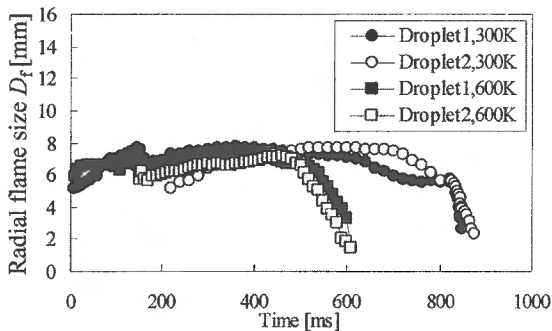
あるので、液滴の存在にあまり影響されない。そこで火炎伝播速度が式 (1) に従うものとして未燃予混合気密度 \$\rho_u\$ と層流燃焼速度 \$S_L\$ の温度および当量比依存性を評価することで説明できるように思われる。ただし、液滴予蒸発によってこれらの条件が定まるメカニズムは複雑である。吸熱源となる 3 個以上の液滴から構成される液滴列を高温雰囲気投入した場合の形成温度分布は、強制着火前のわずかな待ち時間では遠方温度場の影響を受けない。液滴近傍の高温雰囲気との熱交換を行った結果、液滴列周囲に予混合気層が形成されるが、\$S/d_0\$ 値が小さいほど単位体積あたりの雰囲気を持つ熱量に対して液滴同士が熱を奪い合う干渉蒸発過程となっているので、液滴近傍の濃度場および温度



(a) $S/d_0 = 2$



(b) $S/d_0 = 6$



(c) $S/d_0 = 12$

Fig.12 Comparison of radial flame size D_f at different ambient $T = 300$ K \cdot 600 K

場を理論的に予測することは簡単ではない。より詳しく予混合気層の形成過程を見て液滴列近傍の火炎伝播直前の状態と伝播過程とを関連づけるためには、今後数値シミュレーションなどによって定量的に調べる必要があると考えられる。

液滴間隔がより広がった $S/d_0 = 6$ の実験結果 (図 8) を見ると、火炎伝播前に可燃予混合気層は結合していないと考えられる。大気圧下では気液密度比のオーダーは 10^3 であり、Stefan 流の輸送効果を考えたとしてもデカン蒸気層の広がりは高々液滴直径の 10 倍程度と予想される。可燃性混合気層の大きさはそれよりもさらに小さくなる。静止雰囲気中で液滴周りに分布する予混合気層の大きさは雰囲気圧力によって定まる気液密度比によって上限を持つため、液滴間隔が広がると、液滴間の燃え広がりには予混合火炎の伝

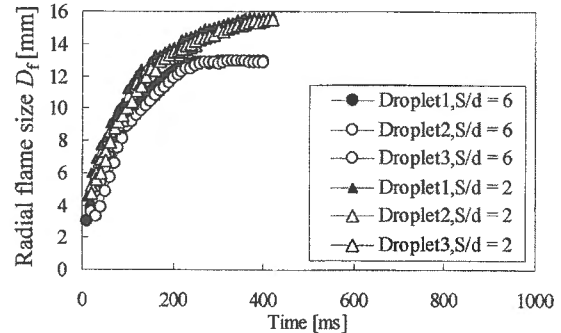


Fig.13 Temporal change in radial flame size at $T = 750$ K

播過程に加えて、可燃予混合気層には含まれた非可燃性領域における熱伝導過程が加わるようになる。その過程に要する時間は、個々の液滴が雰囲気からの加熱のみで自着火を起こさない限り、液滴間隔がさらに広がるに応じて長くなり、伝播速度の決定において支配的になると考えられる。ただし、本実験での $S/d_0 = 6$ の場合には既燃-未燃液滴間に存在する非可燃性領域は可燃性混合気層から比べれば薄いものとなっており、軸方向の燃え広がり距離を考えればその大部分は液滴周りの予混合火炎伝播が支配的であると考えられる。そのため、伝播形態が異なるにもかかわらず、予混合伝播モードと同程度の高速な伝播となっていると考えられる。

さらに高速な火炎伝播過程が観察される可能性としては、雰囲気がデカンの自着火域内の高温であるので[25]、接近してくる火炎からのわずかの加熱やラジカルの供給をきっかけとして、未燃液滴周りの予混合気層が次々に飛び火様に自着火を起こし、見かけ上の火炎伝播速度を拡大する可能性がある。しかしながら今回の実験ではそのような現象を捉えることはできなかった。

3.3. 伝播過程と拡散燃焼過程との関連付け

これまでの実験から、雰囲気の温度・幾何的配置条件によって、拡散火炎が連続的に拡大する形態や予混合火炎伝播的な形態など多様な伝播の形態が現れることがわかってきている。本節では伝播過程に続いて液滴列が移行する拡散燃焼状態について考察する。ここでは火炎伝播後に拡大する拡散火炎寸法の拡大過程に着目して液滴列の中心軸方向 (伝播方向) に対して鉛直方向の火炎寸法 D_f を画像から計測した。図 11 にその模式図を示す。OH ラジカル画像に映っている液滴個数は実験条件である S/d_0 の値によって異なるので、画像中の 2 ないし 3 個の液滴を選び、その液滴位置でのラジカル発光領域の寸法の時間変化を追跡した。

図 12 は、同一の S/d_0 条件 ($d_0 = 1$ mm) において異なる雰囲気温度 $T = 300$ K, 600 K における火炎寸法 D_f の時間変化を調べたものである。図の横軸には注目する液滴周囲に拡散火炎が全周的に形成された時刻を基点にした時間 [ms] をとっている。図 12(a) は液滴間隔が密な条件 ($S/d_0 = 2$) であり、300 K 温度条件ではモード 1、600 K 温度条件ではモ

ード2の伝播形態となっている。300 K 温度条件と比較すれば600 K 条件ではより急速な拡大過程となっていることがわかる。また、最終的に到達する最大火炎寸法も300 K 条件で12 mm 程度、600 K 条件で14 mm 程度とより大きくなっている。図12(b)に示すグラフは、より液滴間隔が広がった場合($Sl/d_0 = 6$)であり、火炎の拡大過程は(a)の場合より緩やかになっていることがわかる。初期に液滴周囲にできる拡散火炎径は3-4 mm 程度であり、最大火炎サイズは300 K 条件で10 mm 程度、600 K 条件で12 mm 程度となっている。図12(c)の条件では、液滴間隔が広いモード3の火炎伝播により液滴はそれぞれ独立した球形火炎を形成している。初期に予混合火炎伝播によって液滴周囲に6 mm 程度の拡散火炎を作るが、その後わずかに拡大して最大寸法(7-8 mm 程度)に達する。その後火炎は縮小に転じ、最終的に初期液滴直径よりわずかに大きい程度まで小さくなって消炎にいたっている。図12(a),(b)では最大火炎直径に達したのちに輻射熱損失が大きくなって、そのままの大きさを保って消炎に至っている。

図13に、750 K 条件の実験結果について同様に調べた場合($Sl/d_0 = 2, 6$)を示す。予混合火炎の高速伝播が起きたのち、図12(b)と同様に直径3-4 mm 程度の初期拡散火炎が現れる。 $Sl/d_0 = 2$ 条件でのグラフの勾配は図12(a)のより低い温度条件と比較して大きくなっており、かつ最大火炎寸法も大きくなっている。また、初期の火炎拡大過程が $Sl/d_0 = 2$ および6で大きく変わらないことは、モードによらず最初の高速の予混合火炎伝播が液滴列周囲の酸素を急速に消費して、その後液滴列が既燃ガスによる加熱を受けて蒸発量を急速拡大する過程が共通しているためであると考えられる。

以上の実験結果では、拡散火炎の半径方向の最大到達寸法は準定常解の存在する単一液滴の知見とは異なって、液滴間隔が小さいほど、雰囲気温度が高いほど大きくなる結果となった。

これらの図の特徴から、火炎伝播後の拡散火炎の拡大過程は燃焼液滴列周囲に存在する酸素の消費の度合いに依存していると予想される。すなわち、雰囲気および火炎からの加熱によって予混合気層の形成が行われる場合(モード2, モード3, 予混合火炎伝播モード)、可燃予混合気を消費する予混合火炎伝播は短い時間スケールで起き、液滴表面温度と燃料蒸発量を上昇・増大させる。雰囲気が高温であるほど燃料の予蒸発量が増大し、予混合火炎伝播時により多くの酸素が消費されることになる。初期拡散火炎の大きさは伝播後の液滴列周囲酸素濃度場と液滴表面で増大した蒸発量とのバランスによって定まると考えられる。

初期拡散火炎が形成された後(もしくはモード1)の火炎の拡大過程は、液滴間隔が密であるほど競合的な酸素の消費過程となって、拡散火炎は蒸発量に見合った量の酸素を求めて急激に面積を拡大させると考えられる。伝播速度の大きさは単位時間あたりに拡散燃焼状態となる液滴数を定める。液滴間隔が広く、液滴同士が物理的に競合する度合

いが少ない場合は、最大火炎径の大きさやそこから消炎にいたる過程は単一液滴火炎のそれと同様なものになると考えられる。ただし、液滴同士が対向している領域では干渉度が高くなって干渉燃焼状態に入る可能性がある。また、図12(c)の例のように予蒸発量が多ければ初期拡散火炎寸法と最大火炎寸法がほぼ同じになる場合が存在すると考えられる。

4. まとめ

本報では、温度が制御された大気圧静止空気中での直線状燃料液滴列の火炎伝播過程を詳しく観察する目的で行った微小重力実験において、その一環として行った燃焼反応帯を示すOHラジカル自発光画像撮影の結果について報告した。実験では、雰囲気および火炎の加熱による可燃混合気層が未燃液滴周囲に形成され、その中を予混合火炎が伝播したのちに拡散燃焼状態に移行する過程が観察された。十分に発達した可燃予混合気層に着火した場合はトリプルフレームに類似した構造が観察される。その初期拡散火炎の大きさは、予混合火炎によって消費された周囲酸素濃度場と、予混合気の燃焼熱によって拡大した液滴蒸発量によって定められると考えられる。

また、デカン液滴の自着火域である雰囲気温度750 Kで実験を行い、液滴間隔が狭い場合は液滴間が可燃混合気層によって結ばれ、予混合火炎伝播が起きていることが本実験で初めて観察された。

火炎伝播後に観察される拡散火炎の拡大過程は、液滴間隔と雰囲気温度によって異なる様子を示した。液滴間隔が密であれば、結合拡散火炎が液滴列に対して軸対称的に分布するため、燃焼液滴は競合的に酸素を消費して拡散火炎の拡大は急速である。一方で、液滴間隔が広い場合には競合の度合いが小さく、単一液滴火炎の拡大過程に近い形態を示す。なお、本実験では初期雰囲気による液滴内部加熱と伝播火炎による加熱蒸発が同時に進んでおり、これらの過程を分離して観察を行うためにはより長時間の微小重力環境が必要と考えられる。

謝辞

本研究は、宇宙開発事業団宇宙環境利用研究システム準備研究「燃料分散系の燃焼ダイナミクス解明研究」の一環として行ったものである。東京海洋大学 塚本達郎助教授、日本大学 野村浩司助教授、金沢大学 榎本啓士助教授には、研究チームメンバーとして貴重な助言をいただいた。ここに記して関係各位に謝意を表します。

References

1. Chiu, H. H., Kim, H. Y., and Croke, E. J., *Proc. Combust. Inst.* 19: 971-980 (1982).

2. Brzustowski, T. A., Twardus, E. M., Woicicki, S., and Sobiesiak, A., *AIAA J.* 17: 1234-1242 (1979).
3. Labowski, M., *Combust. Sci. Technol.* 22: 217-226 (1980).
4. Umemura, A., Ogawa, A., and Oshima, N., *Combust. Flame* 41: 45-55 (1981).
5. Chiu, H. H., *Prog. Energy Combust. Sci.* 26: 381-416 (2000).
6. Chiu, H. H., and Chigier, N., eds., "Mechanics and Combustion of Droplets and Sprays", Begell-house, New York (1995).
7. Kumagai, S., and Isoda, H., *Proc. Combust. Inst.* 6: 726- 731 (1957).
8. Law, C. K., and Faeth, G. M., *Prog. Energy Combust. Sci.* 20: 65-113 (1994).
9. Ross, H. D., ed., "Microgravity Combustion: Fire in Free Fall" chapter 4, Academic press, London (2001).
10. Brzustowski, T. A., Sobiesiak, A., and Woicicki, S., *Proc. Combust. Inst.* 18: 265-273 (1980).
11. Okajima, S., Kimoto, T., Abe, K., and Yamaguchi, S., *JSME Trans. B* (in Japanese) 47: 2058-2065 (1981).
12. Kato, S., Mizuno, H., Kobayashi, H., and Niioka, T., *JSME Int. J. Series B* 41: 322-330 (1998).
13. Yashima, S. Hara, H., and Okajima, S., *JSME Trans. B* (in Japanese) 55: 1241- 1247 (1989).
14. Park, J., Kobayashi, H., and Niioka, T., *Int. J. Energy Res.* 23: 813-826 (1999).
15. Nunome, Y., Kato, S., Maruta, K., Kobayashi, H. and Niioka, T., *Proc. Combust. Inst.* 29: 2621-2626 (2002).
16. Umemura, A., *JSME Trans. B* (in Japanese) 68: 2422-2428 (2002).
17. Umemura, A., *JSME Trans. B* (in Japanese) 68: 2429-2936 (2002).
18. Umemura, A., and Uchida M., *JSME Trans. B* (in Japanese) 68: 2636-2642 (2002).
19. Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Kikuchi, M., Wakashima, Y., and Yoda, S., *J. Combust. Soc. Japan* (in Japanese) 45: 238-247 (2003).
20. Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Kikuchi, M., Wakashima, Y., and Yoda, S., *J. Combust. Soc. Japan* (in Japanese) 46: 42-49 (2004).
21. Ikegami, M., Ideka, K., Dietrich, D. L., Honma, S., Hagaishi, H., Takeda, S., Kitano, K., and Sakuraya, T., *Proc.1998 Drop Tower Days*, paper 12-B-13 (1998).
22. Marchese, A. J., Dryer, F. L. and Nayagam, V., *Combust. Flame* 116: 432-459 (1999).
23. Kikuchi, M., Wakashima, Y., Yamamoto, S., Yoda, S. and Mikami, M., *Proc. 41 st Japanese Symp. on Combust.* (in Japanese) 239-240 (2003).
24. Hirano, T., *Combustion Science -combustion phenomena and their control-* (in Japanese), 64-65, Kaibundo, Tokyo, 1986.
25. Bolik, T., Konig, J., Eigenbrod, Ch. and Rath, .H. J., *Proc. 10th Int. Sym. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Papers on CD-ROM*, (2000).