

燃料分散系の燃焼ダイナミクス解明研究

宇宙開発事業団 菊池 政雄、依田 真一

1. はじめに

燃焼現象は、物質移動、熱移動、相変化、さらに化学反応が競合する非線形複合現象である。特に、常温から火炎温度に至る過程での化学反応速度の劇的な増加は他の化学反応では見られない特徴であり、反応場を支配する燃料蒸気の拡散場と温度場が現象の主な支配因子となっている。

このような燃焼現象に対し、重力は拡散場と温度場の形成・発達に自然対流を通して大きな影響を有している。誘起される微小な擾乱までを含め、自然対流が燃焼現象に及ぼしている効果を解析的に解くことは、その強い非線形性ゆえに限界がある。実際、これまで構築された理論の大半は自然対流の影響を無視したものとなっている。一方、単純化のための合理的な近似に基づいた理論あるいは仮説（モデル）を検証するためには、自然対流の存在が不都合となる。そこで、自然対流の影響を排除し、モデルを検証するための理想的な拡散場の実現手段として、微小重力環境が利用されている。また、微小重力環境の利用には、燃料液滴などの計測対象を空中に浮遊させ、高精度な計測を比較的長時間に渡って行うことが可能になる等のメリットもある。

微小重力環境を利用した燃焼現象の研究は、1950年代に世界に先駆けて我が国で初めて行われた。それ以来、我が国では主に噴霧燃焼機構の解明を究極目標とした多くの研究がこれまで行われている。それらの多くは噴霧の最小構成要素である単一の燃料液滴に着目した研究であるが、液滴間の干渉効果に着目した研究も行われており、いくつかの興味深い成果が得られている。しかしながら、従来の研究では特定の条件（雰囲気、燃料種類など）における実験データの取得のみに終わるケースもあり、燃焼現象の素過程を考慮したモデルの構築や、現象の本質の体系的な理解を行うより一層の努力が必要不可欠である。

以上のような背景と認識に基づき、宇宙開発事業団宇宙環境利用研究システムでは、宇宙環境利用の有効性を早期に示すための先導的研究の一つとして、「燃料分散系の燃焼ダイナミクス解明研究」を行っている。本稿では、本研究の目的と概要について紹介することにする。

2. 研究目的

本研究は、噴霧を単純化した系と考えられる、複数燃料液滴群からなる燃料分散系（図1参照）における燃焼メカニズム、特に火炎伝播メカニズムを解明し、モデルの構築を行うことを目的としている。噴霧燃焼過程においては、気相中に分散した多数の燃料液滴系を火炎が伝播することになる。そこでは、隣接する液滴が吸熱源となることによって火炎伝播を妨げたり、燃料蒸気の供給源となることによって逆に火炎伝播を促進したりする。このような液滴と火炎、あるいは複数の液滴間における干渉効果を明らかにすることにより、噴霧燃焼機構の解明に大きく寄与するものと考えられる。実際の噴霧における火炎伝播では、液滴径ならびに液滴間隔の不均一性（ばらつき）が存在するが、そのような系における火炎伝播メカニズムを理解するための前提として、均一径の液滴が規則的に配置された燃料分散系における火炎伝播メカニズムを解明することが、合理的なアプローチである。図1に示すように、本研究において想定する燃料分散系には、直線液滴列や多次元の液滴マトリクスがある。

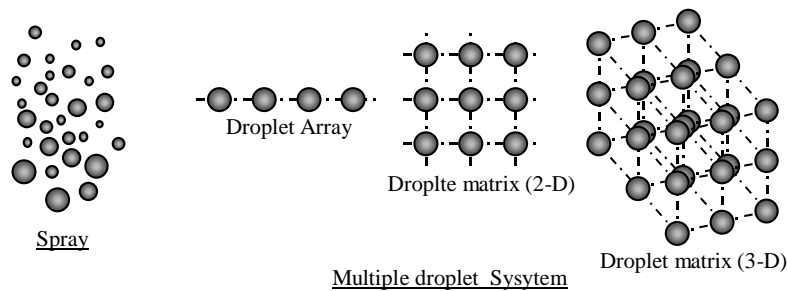


図1 噴霧と燃料分散系

複数燃料液滴群の燃焼機構に関しては、これまで準定常燃焼過程の基礎的な理解に留まっていた。このような燃料分散系における火炎伝播メカニズムを解明することによって、燃料分散系の時間・空間的に動的な燃焼挙動、言い換えれば燃焼ダイナミクスに関する体系的な理解を世界に先駆けて図ることが可能となる。一方、単一液滴の燃焼研究については、噴霧燃焼機構解明への相関が不十分であるとの批判を受けることも多かった。しかしながら、単一液滴燃焼に関する研究で得られた知見を基に複数液滴群の燃焼にモデルを拡張して行く本研究の方法論によって、単一液滴と噴霧の燃焼との間の大きなギャップを埋めることも可能になると考えられる。

さらに本研究の特徴として、実験的な検討に留まらず、理論検討や数値解析を組み合わせ合わせた横断的な研究を行っていることがあげられる。現象の本質を解明するためには、このような体系的な取り組みが必要不可欠である。そのため、本研究においてはそれぞれのタスクに応じた研究メンバーから構成される研究チームを構成し、研究を推進している。宇宙実験を目指す場合には言うまでもなく、地上実験を中心にする研究であっても、体系的な成果の創出を行うためには、このようなチーム研究方式は極めて有効な方法であり、積極的に採用されるべき研究推進手法と考える。本研究は平成12年度から本格的な研究を開始したが、平成14年度における研究チームメンバーは、NASDAのほか5つの大学の研究者から構成されている。

以下に、理論検討、数値解析、地上実験に関する研究の概要を述べる。

3. 理論検討

燃料分散系における従来の理論研究は、準定常仮説を適用可能な現象に限られ、液滴間の火炎伝播のような過渡的過程は十分な研究が行われていなかった。そのため、一般的な液滴配置における火炎伝播モデル構築の第一歩として、本研究では直線液滴列における火炎伝播モデルの構築を進めている。モデルは、微視的スケールにおける火炎伝播の過渡過程を記述するものである。単一液滴の準定常蒸発解に基づき、隣接する2液滴間の火炎伝播過程を考察し、特徴的な形態(モード)を識別した。これらのモードの概略図を図2に示す。

また、これらの火炎伝播モードがどのような条件で発現するかを予測する火炎伝播モードマップを作成した(図3参照)。このモードマップにおける横軸は無次元化された雰囲気温度、縦軸は無次元化された液滴間隔を示している。本マップの導出過程の詳細について本稿では省略するが、その考え方¹⁻³⁾に基づけば、マップは燃料種類に関係なく、大気圧雰囲気下において適用可能である。これまでの液滴列火炎伝播に関する研究においては、マクロなパラメータである火炎伝播速度に基づき論じられて来たが、燃料種類を含む異なる実験条件での結果を体系的に比較して論じるには、このような一般化されたモデルが必要不可欠である。

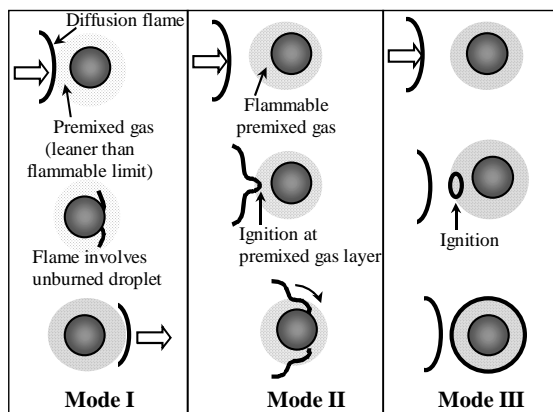


図2 火炎伝播モードの分類

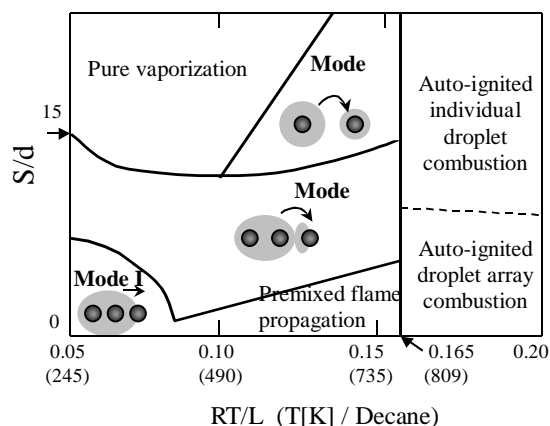


図3 火炎伝播モードマップ

図3によれば、液滴間隔が小さく、雰囲気温度が比較的高い場合には、液滴列の周囲に可燃混合気層が連続的に形成されるため、可燃混合気層の中を予混合火炎が伝播する連続的予混合火炎伝播が起こることになる。一方、液滴間隔は小さいものの雰囲気温度が比較的低い場合には、液滴周囲に十分な燃料蒸気層が形成されないため、拡大してきた拡散火炎が未燃液滴をそのまま飲み込む形態で火炎伝播が進行することになる（モード1）。拡散火炎に取り囲まれた後に未燃液滴の蒸発は活発になり、新たな燃料供給源として寄与するようになる。その結果、この液滴周囲に自立的な拡散火炎が形成・維持され、新たな火炎先端として同様のプロセスを繰り返すことになる。液滴間隔が広がると、未燃液滴周囲に形成された可燃混合気層に、拡大してきた拡散火炎が触れることによって着火が起こるようになる。着火した後、液滴周囲の可燃混合気層の中を予混合火炎が伝播し、その後に自立的な拡散火炎が形成される（モード2）。さらに液滴間隔が広がると、未燃液滴周囲に形成された可燃混合気が、隣接する火炎からの熱供給によって自着火し、飛び火のような形態で火炎が伝播するようになる（モード3）。液滴間隔が大きく、雰囲気温度も低いような場合には、火炎が伝播せず、液滴の蒸発のみが進むことが予測される。

4. 数値解析

理論検討における予測を検証するためには、数値解析と実験による方法がある。しかし、微小重力実験の回数は限定されたものであることを考えると、数値解析が非常に強力な手段となる。特に、ある特定のパラメータに着目して現象の詳細な観察を繰り返し行うことは、数値解析によってのみ可能となる。しかしながら、従来の微小重力利用燃焼研究において、数値解析が十分に活用されていたとは言い難い。液滴列に関しても、無限に続く液滴列の高温雰囲気における着火解析を行った例⁴⁾はあるが、有限個の液滴から構成される液滴列における非定常火炎伝播解析を行った例はない。

そこで本研究では、液滴列火炎伝播解析を行うための数値解析コードの開発を進めてきた。解析の詳細な内容については、他の文献⁵⁾を参照されたい。数値解析では、図4に示すように、気相中に配置された任意の数の液滴から構成される液滴列を扱う。列の左端の液滴近傍に設置した熱源により、液滴を着火させる。熱源は、着火後に除去し、隣接する未燃液滴への火炎伝播過程を調べた。解析領域は、液滴列の中心を貫く線を中心軸（Z軸）にとり、2次元軸対称領域とした。図5に計算格子の構成を示す。液滴の内部及び近傍の気相領域では球座標系に基づく格子とし、その他の気相部

では円筒座標系に基づく境界適合格子を用いた。これにより、複数の液滴を包含する解析領域を扱うことを可能にした。液滴は蒸発とともに球形を保ちながら縮小するものとした。球座標系領域の内部では、時間ステップ毎に縮小する液滴表面位置に合わせて格子の修正を行った。

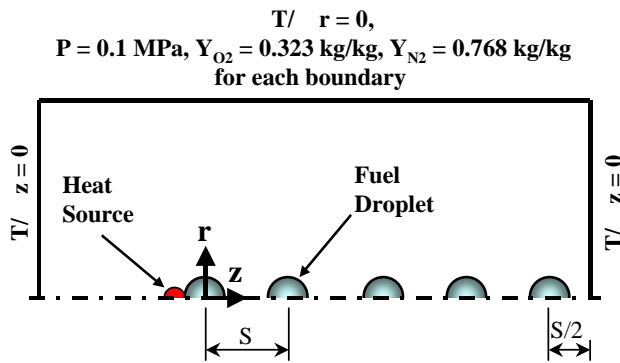


図4 解析モデル

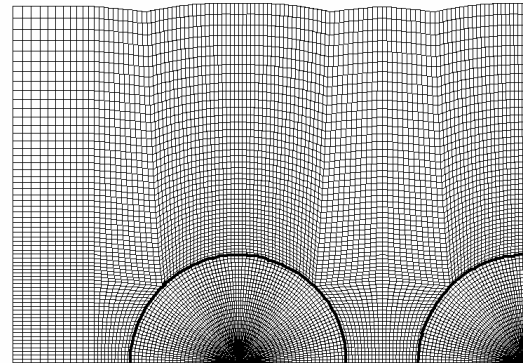


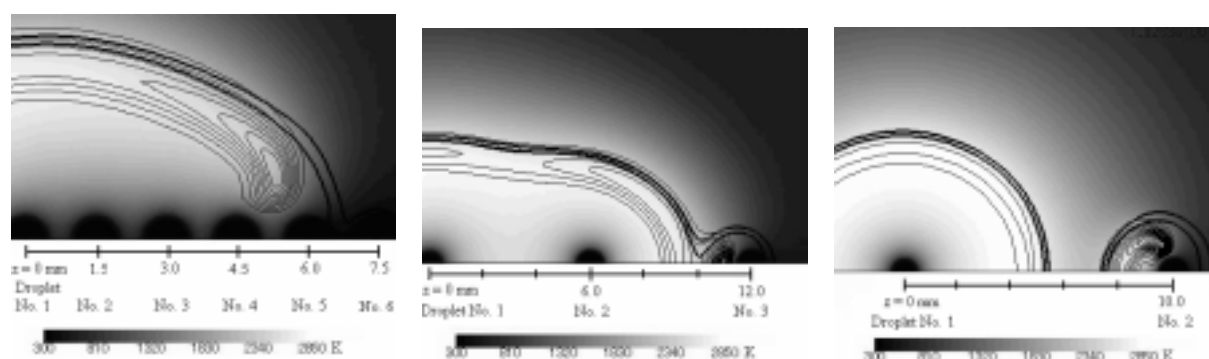
図5 計算格子

解くべき未知量は、気相部の流れ場、温度場、化学種毎の濃度場及び液滴内の温度場とした。輻射及び自然対流は無視した。本解析では液滴内部対流について扱うことも可能であるが、これまでの解析においては計算時間短縮のために省略している。化学反応は総括一段反応とし、反応項にはアレニウスの式を用いた。デカンの反応パラメータは、妥当な値の入手が困難だったため、ヘプタンにおける値を基点として、初期着火及び未燃液滴への火炎伝播ができるような値に調整し、活性化エネルギー $E = 1.25 \times 10^5 \text{ J/mol}$ 、頻度因子 $f = 2.1 \times 10^6 \text{ m/s/mol}$ を与えた。気相の熱物性値は、温度依存性を考慮した 0.1MPa における空気の物性値を用いた。拡散係数は、気相の化学種組成および温度依存性を考慮した多成分気体への拡散係数を用いた。

液滴の初期直径を 1mm、初期温度を 300K とし、雰囲気温度 573K の静止空気中に置かれた液滴列について、火炎伝播モードの液滴間隔への依存性を調べた。液滴間隔の違いは、火炎からの熱伝導による未燃液滴周りの可燃混合気の加熱時間、及び可燃混合気層の拡大に要する時間の違いとなって伝播モードを特徴付ける。

解析結果の一例を図 6 に示す。液滴間隔が狭い場合 ($S/d = 1.5$)、火炎先端は、液滴列の側面を一定距離を保ちながら直線状に進行する。可燃予混合気層は、常に火炎前方の未燃液滴までつながり、そこを火炎が進行する伝播様式となる。火炎が未燃液滴に至るとき、液滴間隔が狭いゆえ液滴間の気相区間は燃料蒸気で満たされ、かつ蒸発による冷却効果ゆえに比較的低温に保たれる。液滴間隔が広がると ($S/d = 6$)、未燃液滴との間の気相区間が広いため、蒸発した燃料蒸気に満たされることなく酸素が残留し、また蒸発による温度低下も液滴近傍に限られるため、火炎が回り込む余地が生じる。未燃液滴の左側は加熱され蒸発が盛んになり、火炎から未燃液滴への連続した可燃混合気層が形成される。次に火炎先端に接する領域で急激に反応速度が上昇する。これは、未燃液滴の可燃混合気層に引火したことを示している。火炎は、未燃液滴周りに形成された可燃混合気層を液滴表面に沿って進行し、やがて液滴を取り囲む。液滴間隔がさらに広い場合 ($S/d = 10$)、未燃液滴周りの可燃混合気層は、火炎先端に到達する前に着火する。ただし直後に両者は合体する。液滴間隔がより広がった場合には、飛び火する様式がより明確になる。これらの数値解析結果は、理論予測と良く一致してい

る。



(a) $S/d = 1.5$
予混合火炎伝播

(b) $S/d = 6.0$
モード 2

(c) $S/d = 10$
モード 3

図 6 数値解析結果

グレイの濃淡：温度分布

等値線（細）：反応速度

等値線（太）：当量比 = 1.0（内側）、 = 0.5（外側）

5 . 微小重力実験

理論検討と数値解析に加え、MGLABの落下塔を利用する短時間微小重力実験を平成13年度末から開始した。図7に落下実験用装置の外観を示す。実験装置は燃焼チャンバ、液滴列昇降装置、観察・計測用機器、制御機器などから構成されており、3段のベースプレート上に各機器が配置されている。燃焼チャンバ内部には昇温用の電熱線ヒータがあり、最高500程度までの高温雰囲気を形成することが可能である。また、観察用窓を上面に1個、側面に2個有するほか、下面には液滴列を挿入するための開閉用シャッタがある。液滴列の燃焼チャンバへの移動はステップモータとギアを用いた昇降機構により行われる。実験時には、常温で生成した燃料液滴列を高温の燃焼チャンバ内に移動させた後、液滴列の一端に電熱線により着火させて火炎伝播現象の直接観察及び光学計測を行う。

本研究では、新たな手法に基づく液滴列の生成技術も開発している⁶⁾。液滴列生成装置の概略を図8に示す。この装置は、同一径の複数液滴を同時に生成することによって、短時間のうちに液滴列を生成するものである。従来、複数本の石英線上に1つずつ液滴を形成・付着させる方法が利用されてきたが、そのような方法では液滴列生成時における蒸発の進行が無視できないため、使用できる燃料が揮発性の低いものに限定されていた。本研究において開発したこの新しい手法により、揮発性の高い燃料を用いることも可能になると考えられる。

液滴列の生成は、外形40 μm に引き伸ばしたガラス管の先端から燃料を押し出すことにより行われる。液滴生成部分にはテフロンチューブを介して燃料供給用マイクロシリンジが接続されており、シリンジ後部のプランジャをステップモータ制御の移動ステージで押すことによって燃料を押し出す。液滴の生成個数に対応して複数のガラス管が直線上に配置してあり、複数液滴を同時に生成することが可能である。液滴直径はステップモータの駆動パルス数によって制御され、そのばらつき誤差は規定直径の5%以内である。

本装置では、液滴の支持を図8に示すような極めて細い14 μm 径のSiCファイバ

をX字に交差させ、その交点に燃料の表面張力を利用して液滴を付着させている。図9は本液滴列生成機構によってSiCファイバ交点上に作られたn-デカン(C₁₀H₂₂)液滴の形状である。従来用いられてきた125μm石英フィラメント上に作られた液滴画像(右図)では、液滴径に比較して支持線径が大きく、液滴も回転楕円体形状をしている。一方でSiCファイバ交点上の液滴(左図)は表面張力の働きによってほぼ真球形状が保たれている。これにより微小重力環境中での現象の対称性が担保されると同時に、蒸発・燃焼時に支持材が与える熱的・物理的影響を最小限に抑えている。

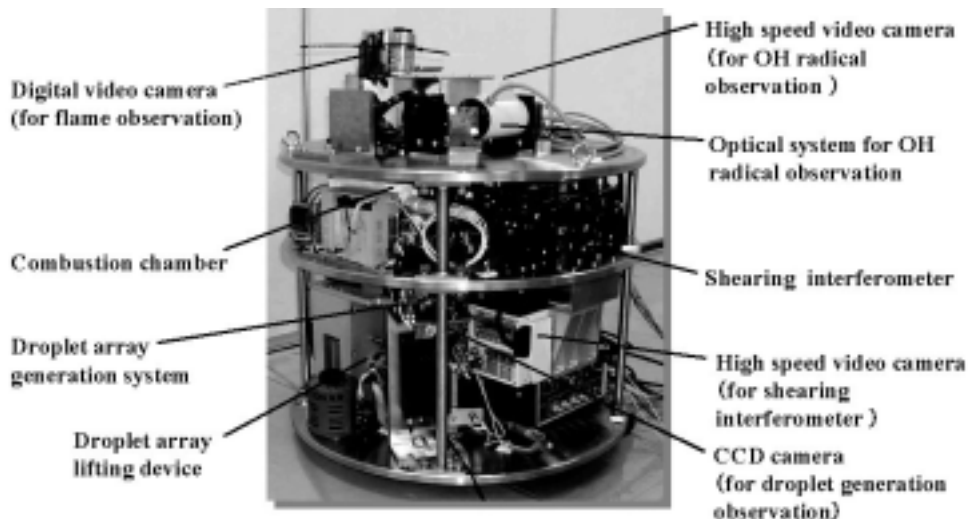


図7 落下実験用装置外観

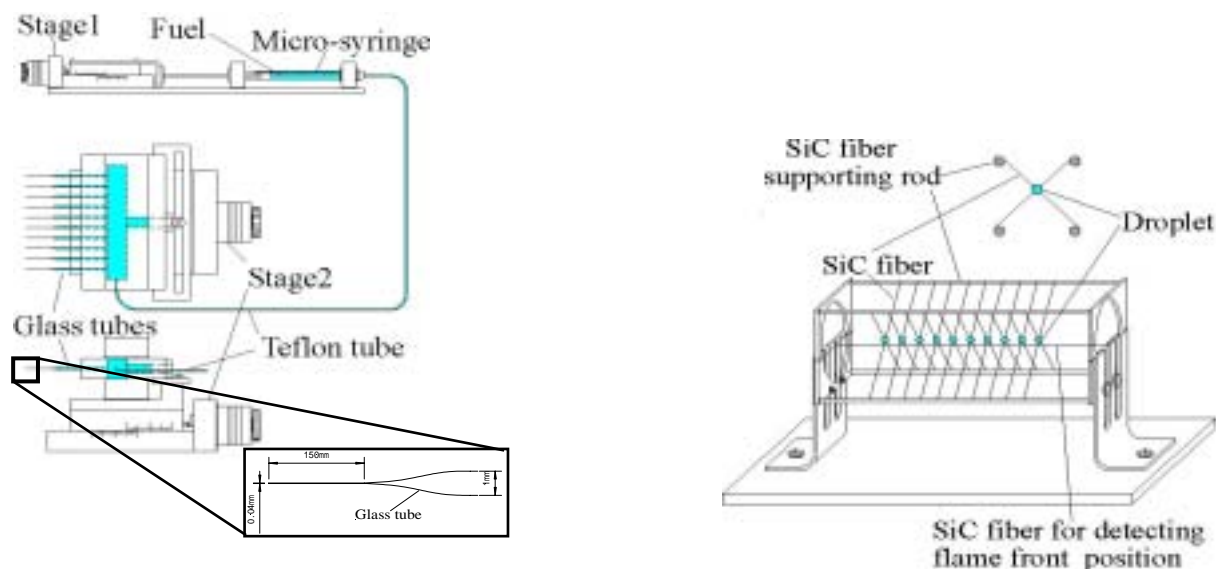


図8 液滴列生成装置と支持方法の概略

理論解析による予測に対して、落下実験での実際の現象観察によって実証を行った。実験パラメータは液滴間隔 S と液滴直径 d 、雰囲気温度 T であり、これらを変えることによってモードマップ上での実験点を変化させている。図10に示す直接可視画像は微小重力実験結果の一例であり、上段の図に対して1/30秒経過後の画像を下段に並べている。これらは微小重力環境を利用することで各モードに対応づけられた、世界で初めての火炎伝播画像であり、見事に異なるモードの火炎伝播の様子を捉えること

ができた。

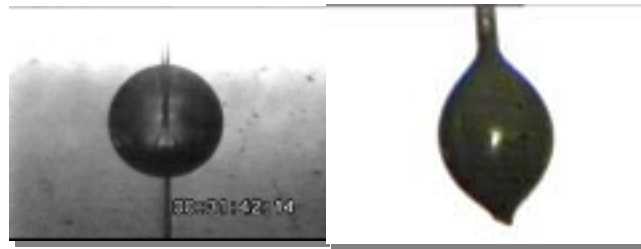


図9 14 μm SiCファイバ(左)および 125 μm 石英フィラメント上(右)の生成液滴形状

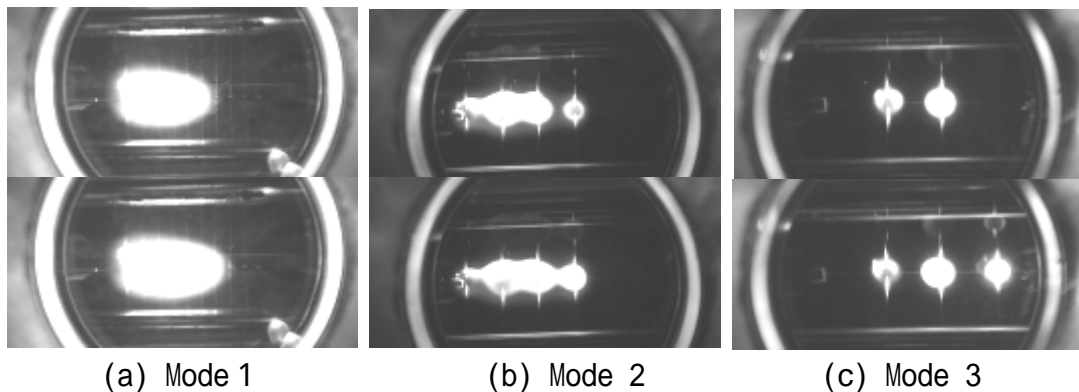


図10 微小重力実験における火炎伝播映像

(a)は、図の左側から拡大する拡散火炎に、短い間隔で並べられた液滴が次々に取り込まれてゆくモード1の火炎伝播過程である。取り込まれた後に液滴が蒸発を活性化させて火炎拡大の駆動力となる。(b)、(c)はそれぞれモード2と3に対応した時系列画像である。ともに、既燃液滴周りの拡散火炎の接近に伴い未燃液滴の蒸発が活性化、周囲の可燃混合気が着火したのちに拡散火炎を形成する点は共通であるが、その火炎が干渉効果等によって群燃焼形態に入るかどうかはモード2、3の最大の違いである。実際、(c)のモード3は完全に独立な球形火炎が並ぶ形を取る。現在、OHラジカルの高速度撮影画像等、複数の観察手段によって得られた燃焼画像データを組み合わせ、より詳細な現象解析を進めているところである。

6. まとめ

理論検討、数値解析、微小重力実験による横断的研究により、液滴列の火炎伝播現象について、多くの成果が得られつつある。今後、火炎伝播モデルの高度化、数値解析の精緻化、本格的な実験データの取得と解析などを進めると共に、多次元液滴マトリクスへの展開にも着手し、燃料分散系の燃焼ダイナミクスの体系的な解明を図ってゆきたい。

謝辞

本稿に述べた研究成果は、著者らに加え、研究チームメンバーである梅村 章教授(名古屋大学)、塚本 達郎助教授(東京商船大学)、三上 真人助教授(山口大学)、野村 浩司助教授(日本大学)、榎本 啓士講師(金沢大学)との協力に基づくものである。また、数値解析においては東北大学流体科学研究所のスーパーコンピュータを使用させて頂いた。新岡 嵩教授をはじめとする関係各位に謝意を表します。

参考文献

1. 梅村, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.68, No.672, pp.2423-2428 (2002).
2. 梅村, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.68, No.672, pp.2429-2436 (2002).
3. 梅村, 内田, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.68, No.673, pp.2636-2642 (2002).
4. Goto, M., Ju, Y. and Niioka, T., Proc. Combust. Inst. 27:1959-1966 (1998).
5. Kikuchi, M., Arai, T., Yoda, S., Tsukamoto, T., Umemura, A., Uchida, M., Kakei, M., and Niioka, T., Proc. Combust. Inst. 29:in print (2002).
6. 板野, 三上, 小嶋, 菊池, 若嶋, 依田, 第 40 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.147-148 (2002).