



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-05-026

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

液滴間火炎伝播メカニズム研究

菊池政雄・山本 信・依田眞一

2006年 3月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

液滴間火炎伝播メカニズム研究

菊池 政雄*, 山本 信*, 依田 真一*

Research on Flame Spread Mechanism of Fuel Droplets

By

Masao KIKUCHI*, Shin YAMAMOTO*, and Shinichi YODA*

Abstract : This paper reports annual result of "Research on Flame Spread Mechanism of Fuel Droplets" in JFY17, performed by a combustion research team in ISS Science Project Office of JAXA. In this study, flame spread mechanism of fuel droplet array was investigated based on the past research results. The effects of ambient temperature, droplet interval, and pre-evaporation of droplets on flame spread behaviors and flame spread rate were investigated by microgravity experiments employing a drop shaft.

Key words : Combustion, Flame Spread, Fuel Droplet Array, Microgravity

概 要

本論文は、ISS科学プロジェクト室が実施した「液滴間火炎伝播メカニズム研究」に関する平成17年度の研究成果を纏めたものである。本研究では、昨年度までの研究成果を踏まえ、燃料液滴列の火炎燃え広がりメカニズムに関する研究を引き続き実施した。落下塔を利用した微小重力実験を中心とする研究により、火炎伝播挙動あるいは火炎伝播速度に与える雰囲気温度、液滴間隔、ならびに液滴の予蒸発などの影響について検討を行った。

1. はじめに

燃焼現象は物質移動、熱移動、相変化、さらに化学反応が関係する複雑な非線形現象であり、そのメカニズム解明が十分進んでいるとは言えない。地球温暖化や大気汚染等の環境問題の解決には、より高効率で環境負荷の少ない燃焼技術の開発が必要となるが、そのためには燃焼現象の本質的な解明が極めて重要である。

燃焼メカニズム解明のための研究手段として、レーザによる非接触計測および大型計算機による数値シミュレーションと並び、微小重力環境の利用が注目されている。微小重力環境下では、自然対流の抑制等により現象の

*宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部ISS科学プロジェクト室

*ISS Science Project Office, ISAS/JAXA

単純化，あるいは観察に関する時空間スケールの拡大等が可能になり，理論モデルあるいは数値シミュレーションとの比較が容易になる．燃焼研究の中でも，様々な燃焼機器で使用されている噴霧燃焼メカニズムの解明を目指した基礎研究は，微小重力環境を利用して特に多く行われている．ただし，これまでの研究の多くは噴霧を構成する単一液滴の燃焼あるいは数個の液滴の定常的な燃焼を対象としたものが多く，複数液滴間の火炎の伝播過程を対象とする体系的な研究は少ない．

このような背景に基づき，ISS科学プロジェクト室における「液滴間火炎伝播メカニズム研究」では，噴霧における火炎伝播メカニズムの解明を目指し，燃料液滴列を対象とする研究活動を行っている．本論文は，「液滴間火炎伝播メカニズム研究」の平成17年度の研究成果の概要を纏めたものである．昨年度までの研究成果の概要を第2章に示したうえで，今年度の研究成果を第3章に示す．第4章では，今年度の成果を総括するとともに，今後の課題を示した．

2. 昨年度までの研究成果

「液滴間火炎伝播メカニズム研究（以下，本研究）」では，宇宙開発事業団（NASDA）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研究」における研究成果ならびに方向性を継承して研究活動を進めてきた．NASDAにおける研究は，理論検討，数値シミュレーション，微小重力実験の連携による研究の推進を大きな特徴としており，液滴を直線上に等間隔配置した燃料液滴列（図2-1）の火炎伝播メカニズム解明が目的であった．

理論検討では液滴の準定常蒸発解ならびに非定常燃焼過程に基づく考察を行い，複数の特徴的な火炎伝播形態（モード）を識別するとともに，各モードの発現条件を無次元の液滴間隔と雰囲気温度により予測する火炎伝播モードマップ（図2-2）を作成した．各モードの詳細な説明はここでは省略するので，参考文献[1]を参照されたい．このモードマップは，詳細な化学反応などを無視して作成された簡易的な位置づけのものであり，数値シミュレーションならびに微小重力実験の条件を決める指針として活用した．数値シミュレーションでは，独自に開発した計算コードにより液滴列の火炎伝播過程に関する非定常解析を行った．数値解析手法等の詳細については，参考文献[2]を参照されたい．さらに，微小重力実験を実施して数値シミュレーション結果の検証ならびに理論検討との比較を進めた．本研究における微小重力実験は，岐阜県土岐市にある（株）日本無重量総合研究所（MGLAB）の4.5s落下塔を利用した．実験手法の概略を図2-3に示す．実験では，直径約14 μ mの極細SiCファイバの交点上にn-デカン液滴を生成・支持する．まずステッピングモータ#1で駆動される液滴生成用ステージが液滴列支持部の交点に近づく．このステージ上には直径約40 μ mの極細ガラス管が液滴間隔Sで接続された燃料溜り部がある．次に，ステッピングモータ2で駆動される燃料吐出ステージの移動によりシリンジ内の燃料が押し出される．シリンジと燃料溜り部はテフロンチューブで接続されており，吐出ステージの移動量に応じた量の燃料がガラス管先端から押し出される仕組みとなっている．押し出された燃料はSiCファイバ交点に付着する．最後に液滴生成ステージが後退し，液滴列の生成・支持が完了する．この後，モータ駆動の液滴列移動機構により液滴列支持部を燃焼容器の中に挿入する．燃焼容器は電熱線ヒータと開閉シャッタを有し，内部の空気は予め所定温度まで加熱保持されている．燃焼容器内に挿入された液滴列は，電熱線により一端の液滴に着火させ，火炎の燃え広がり過程を観察する．燃焼現象の観察は，直接像のほかOHラジカル自発光の観察も行った．実験の詳細な手法および結果については，参考文献[3]を参照されたい．

16年度までの研究では，火炎燃え広がり形態（モード）ならびに火炎伝播速度の雰囲気温度あるいは液滴間隔への依存性が数値シミュレーションと微小重力実験の両者において良く一致する結果が得られていた．また，図2-2に示した理論検討に基づく火炎伝播モードマップと実験結果の比較も進めてきた．さらに，液滴の予蒸発が火炎伝播に与える影響を解明するため，予備的な微小重力実験ならびに数値シミュレーションによる検討を行っ

た。その結果、液滴予蒸発に伴う特徴的な火炎形状の発現、火炎伝播速度の増加などが示唆された。これらについては、昨年度の研究成果報告[4]を参照されたい。

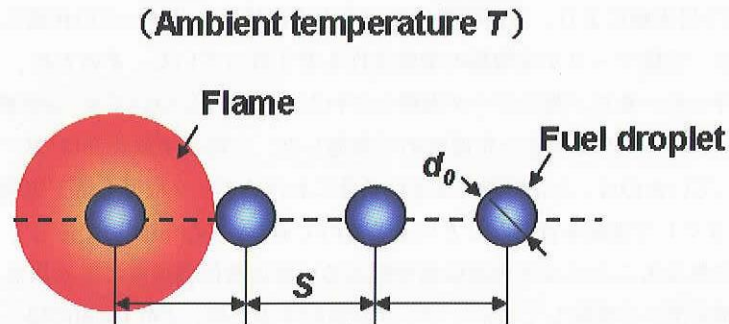


図2-1 燃料液滴列の模式図

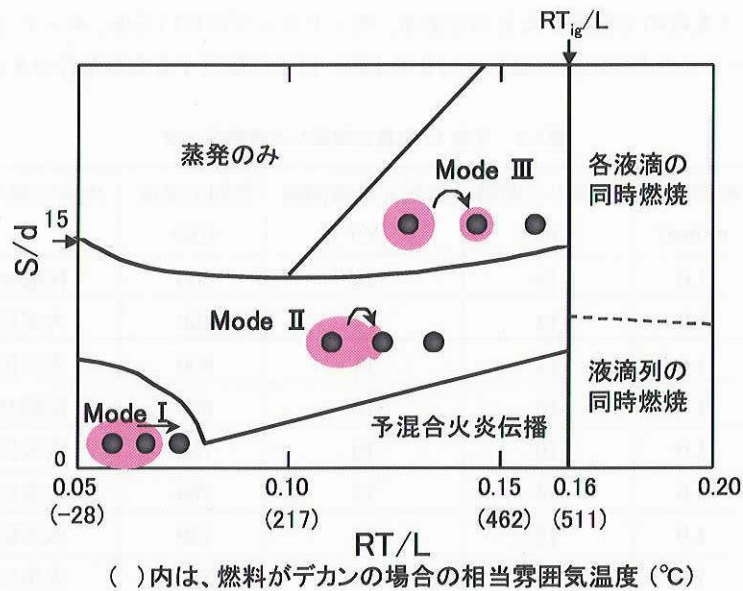
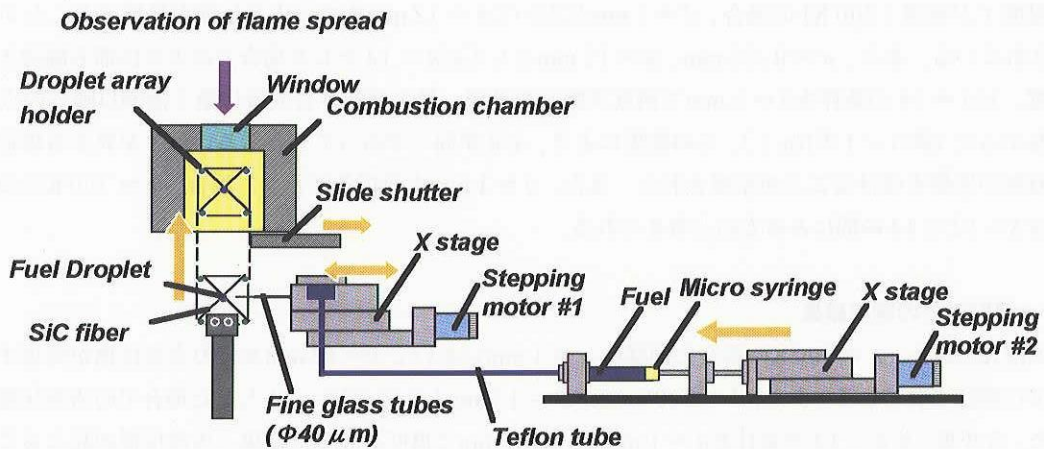


図2-2 理論検討に基づく火炎伝播モードマップ (S : 液滴中心間距離, d : 液滴直径, R : 一般ガス定数, T : 雰囲気温度, L : 燃料の蒸発潜熱)



3. 今年度の研究成果

3.1. 雰囲気温度と液滴間隔が火炎伝播に与える影響

平成16年度までの落下塔実験により、実験結果に基づく火炎伝播モードマップの作成に必要な実験データの大部分は取得されていたが、実験データが未取得の実験条件も若干残っていた。そのため、今年度の落下塔実験にて該当データの取得を行った。また、既にデータ取得していた S/d 条件についても、 d が標準の1 mmでないデータについては d が1 mmでのデータ取得を今年度改めて実施した。一部の実験条件について、 d が標準の1 mmでない場合のデータとなっていたのは、 S/d の値が大きい条件におけるデータ取得を落下実験時間内に確実に行うため、 d を1 mmよりも小さくして実験を行ったことによるものである。 S/d が同一であっても d が異なる場合には、液滴の初期加熱時間等が異なることにより火炎伝播挙動あるいは火炎伝播速度に差が出ることが予測される。そのため、このような不確定因子を排除してモードマップを検討するため、 d が1 mmの場合のデータを再度取得したものである。

今年度取得したデータを表3-1に示す。これらのうち、No.3, 5, 8については新規取得データであり、その他は d が1 mmでのデータを改めて取得したものである。モードマップにおいては、モード2と3の境界、あるいは燃え広がり限界（モード3の火炎伝播が起こる S/d の上限）付近に相当する実験条件が多い。

表3-1 平成17年度に取得した実験データ

No.	液滴直径 d (mm)	液滴中心間隔 S (mm)	無次元液滴間隔 S/d	雰囲気温度 T (K)	火炎伝播の有無
1	1.0	14	14	300	伝播せず
2	1.0	14	14	450	火炎伝播
3	1.0	14	14	600	火炎伝播
4	1.0	16	16	600	伝播せず
5	1.0	10	10	750	火炎伝播
6	1.0	14	14	750	火炎伝播
7	1.0	16	16	750	火炎伝播
8	1.0	18	18	750	火炎伝播

3.1.1. $T = 300$ Kでの実験結果

雰囲気温度 T が室温（300 K）の場合、 $d = 1$ mmにおいて $S = 12$ mmまでの火炎伝播が発現することがこれまでに確認されている。また、 $d = 0.86$ mm、 $S = 12$ mmとして $S/d = 14$ とした場合での火炎伝播も確認されていた。今年度、 $S/d = 14$ の条件を $d = 1$ mmで再度実験した結果、第1液滴の着火後に第2液滴以降への火炎伝播は起こらなかった（表3-1のNo.1）。この結果により、 S/d が同一であっても d あるいは S が異なる場合には火炎伝播の有無が影響を受けることが示唆された。また、 $d = 1$ mmを前提条件とした場合、 $T = 300$ Kでの燃え広がり限界は $S = 12$ と14の間にあるものと考えられる。

3.1.2. $T = 450$ Kでの実験結果

$T = 450$ Kの場合、 $T = 300$ Kの場合と同様に $d = 1$ mmにおいて $S = 12$ mmまでの火炎伝播が発現することがこれまでに確認されている。また、 $d = 0.86$ mm、 $S = 12$ mmとして $S/d = 14$ とした場合での火炎伝播も確認されていた。今年度、 $S/d = 14$ の条件を $d = 1$ mm、 $S = 14$ mmで再度実験した結果、火炎伝播が起こることが確

認された (表 3-1 の No. 2). 一方, $T = 500 \text{ K}$, $d = 1 \text{ mm}$, $S = 15 \text{ mm}$ の条件において火炎伝播が起こらないことが既に確認されている. 従って, 液滴周囲の可燃混合気層の形成がさらに進んでいない $T = 450 \text{ K}$ においても $S = 15 \text{ mm}$ での火炎伝播は起こらないと考えられる. これらにより, $d = 1 \text{ mm}$ を前提条件とした場合, $T = 450 \text{ K}$ での燃え広がり限界は $S = 14$ と 15 の間にあるものと考えられる.

3.1.3. $T = 600 \text{ K}$ での実験結果

$T = 600 \text{ K}$ の場合, $d = 1 \text{ mm}$ において $S = 12 \text{ mm}$ までの火炎伝播が発現することがこれまでに確認されている. しかし, $S = 14 \text{ mm}$ での実験データが未取得であったことから, 今年度新規にデータを取得した. その結果, 火炎伝播の発現が確認された (表 3-1 の No. 3). また, $S/d = 16$ については $d = 0.75 \text{ mm}$, $S = 12 \text{ mm}$ とした場合に火炎伝播が起こることが確認されていたが, 今年度 $d = 1 \text{ mm}$ として改めて実験を行った. その結果, 火炎伝播は発現しなかった (表 3-1 の No. 4). これらの結果により, $d = 1 \text{ mm}$ を前提条件とした場合, $T = 600 \text{ K}$ での燃え広がり限界は $S = 14$ と 16 の間にあるものと考えられる.

3.1.4. $T = 750 \text{ K}$ での実験結果

$T = 750 \text{ K}$ の場合, $d = 1 \text{ mm}$ において $S = 12 \text{ mm}$ までの火炎伝播が発現することがこれまでに確認されている. ただし, $S = 10 \text{ mm}$ での実験データが未取得であったことから, 今年度新規にデータを取得した (表 3-1 の No. 5). $S/d = 14$ および 16 については, $d = 0.86 \text{ mm}$ ならびに 0.75 mm におけるデータを取得済みであったが, 今年度 $d = 1 \text{ mm}$ として改めて実験を行った (表 3-1 の No. 6, 7). さらに, $S = 18 \text{ mm}$ におけるデータを新規に取得した (表 3-1 の No. 8). これらの結果, $S = 18 \text{ mm}$ までの全ての条件において火炎伝播が発現することが確認された. 従って, $T = 750 \text{ K}$ での燃え広がり限界は $S = 18$ 以上にあるものと考えられる.

ここで, $T = 750 \text{ K}$ における火炎伝播挙動を $S = 8$ から 18 までの実験条件について, 図 3-1 から 3-6 までにそれぞれ示す. これらは, 30 コマ/秒の DV カメラにより撮影されたものであり, 右端の第 1 液滴に着火した時刻を $t = 0 \text{ s}$ としている. 図 3-1 に示した $S = 8$ では, 火炎先端の直前で未燃液滴が着火するモード 2 の火炎伝播形態となっていることがわかる. (a) から (d) は, 第 3, 4, 5, 7 液滴がそれぞれ着火した直後の画像となっている. 左端の液滴まで火炎が燃え広がった後は, 全ての液滴を取り囲む火炎 (液滴群火炎) が形成されている. 群火炎は時間が経過するにつれて輝度を減少させていく. 図 3-2 に示した $S = 10$ では, 液滴列の移動時に第 4 液滴が脱落してしまったため, 第 3 液滴までの火炎伝播のみが観察されている. (b) では第 2 液滴, (c) では第 3 液滴が着火直後の画像となっているが, $S = 8$ と同様にモード 2 の火炎伝播形態となっている. 図 3-3 に示した $S = 12$ では, (a) の第 2 液滴の着火まではモード 2 の伝播形態となっているが, (b) の第 3 液滴の着火以降はモード 3 の火炎伝播形態となっている. このように, 火炎伝播中の伝播モードの遷移はこれまでも観察されており, 液滴の蒸発進行に伴う未燃液滴周囲の可燃混合気層の発達に影響しているものと考えられる. このような現象は, 図 3-4 に示した $S = 14$ においてより顕著になっている. 図 3-4 (c) では, 第 3 液滴が隣接する火炎とは明らかに分離した状態で着火していることが確認できる. さらに S が大きい図 3-5 ($S = 16$) あるいは図 3-6 ($S = 18$) においては, 第 2 液滴への着火から全ての火炎伝播期間を通じてモード 3 の火炎伝播が発現していることがわかる.

以上の結果に基づくと, $T = 750 \text{ K}$ においては $S = 10$ と 12 の間にモード 2 と 3 の境界があるものと考えられる. また, 燃え広がり限界は $S = 18$ 以上にあるものと考えられる.

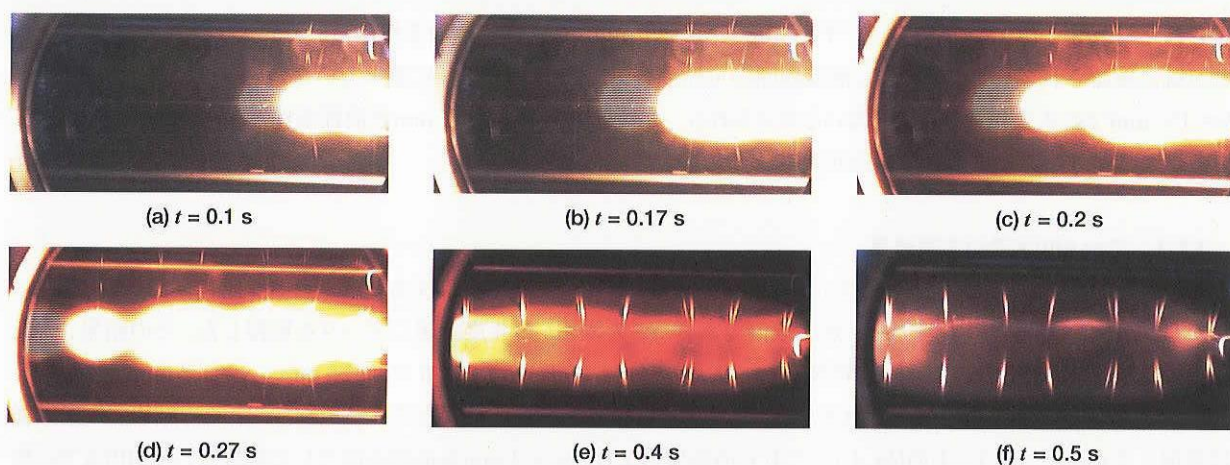


図3-1 $d = 1.0$ mm, $S = 8.0$ mm, $S/d = 8$, $T = 750$ K

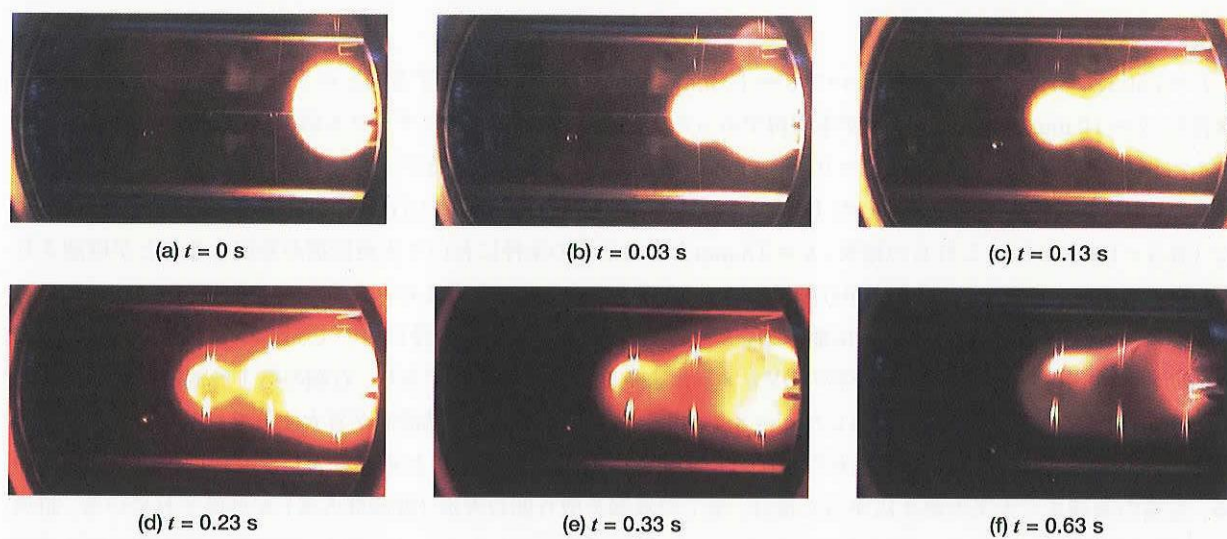


図3-2 $d = 1.0$ mm, $S = 10$ mm, $S/d = 10$, $T = 750$ K

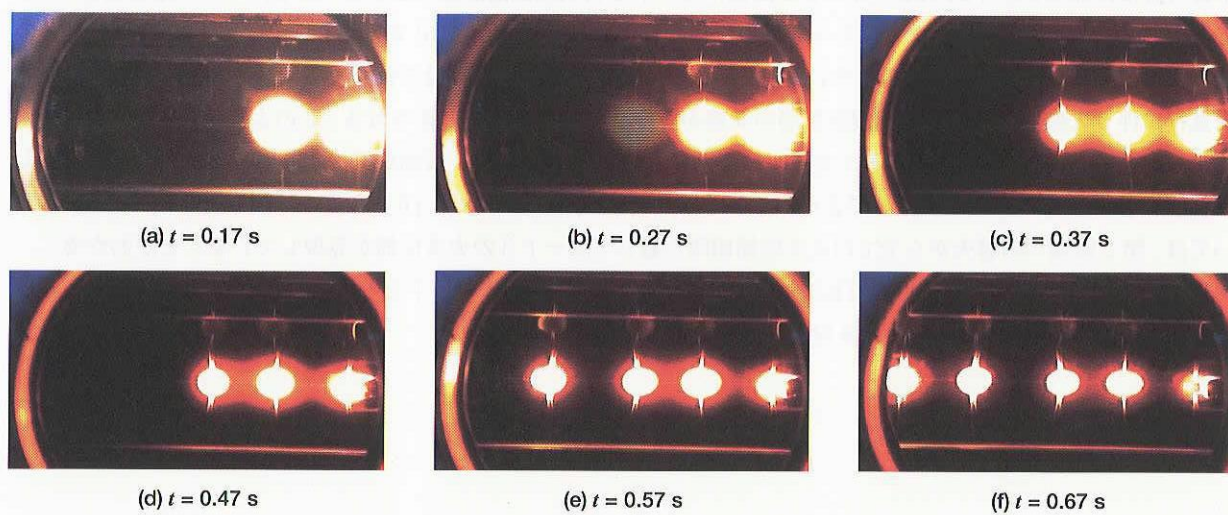


図3-3 $d = 1.0$ mm, $S = 12$ mm, $S/d = 12$, $T = 750$ K

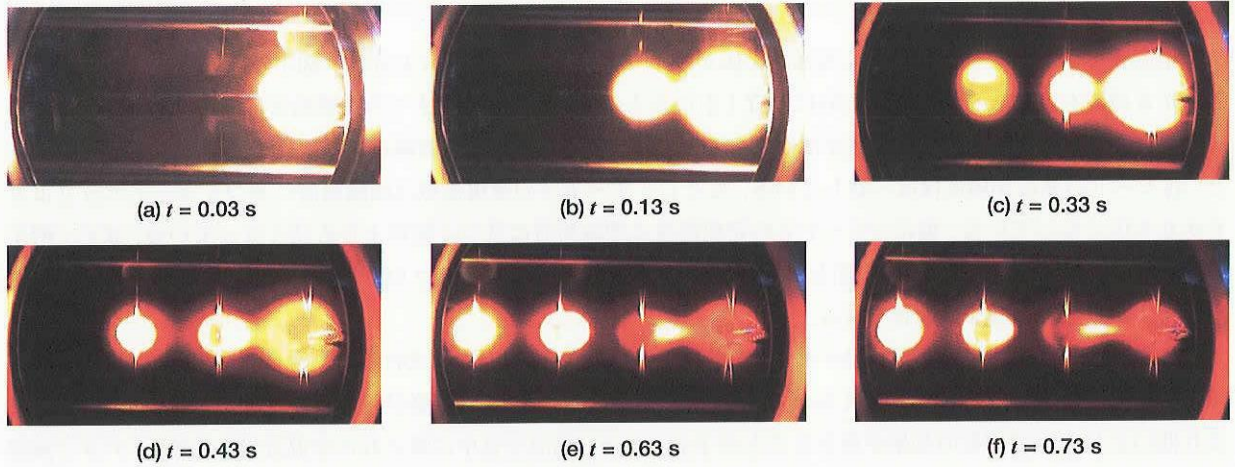


図3-4 $d = 1.0$ mm, $S = 14$ mm, $S/d = 14$, $T = 750$ K

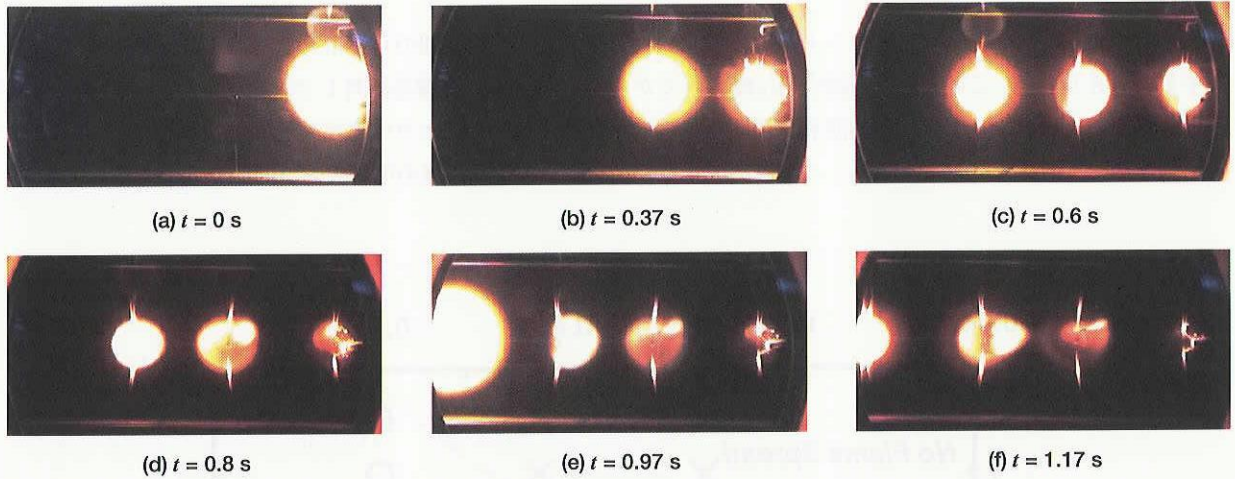


図3-5 $d = 1.0$ mm, $S = 16$ mm, $S/d = 16$, $T = 750$ K

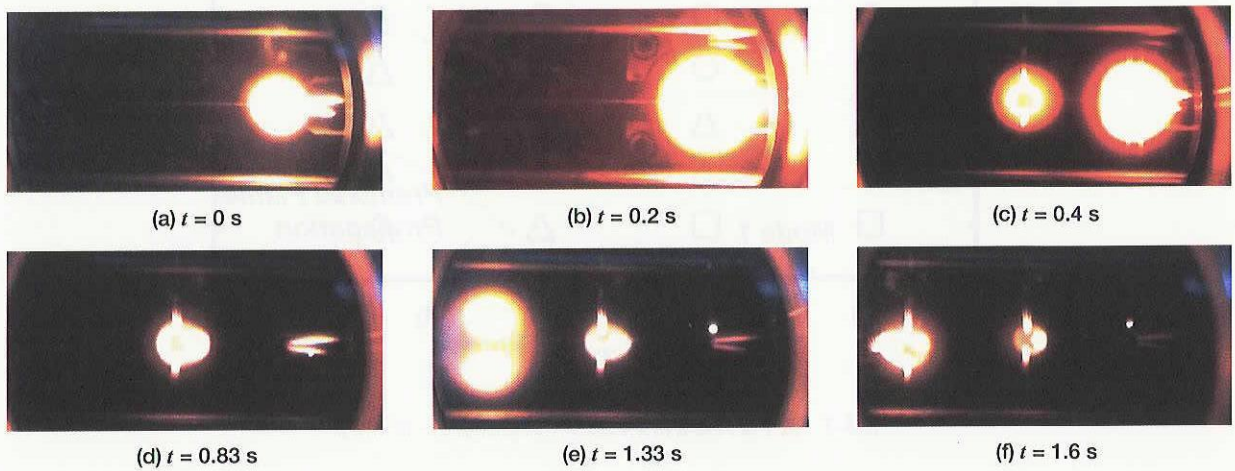


図3-6 $d = 1.0$ mm, $S = 18$ mm, $S/d = 18$, $T = 750$ K

3.1.5. 火炎伝播モードマップ

今年度までの実験データに基づく火炎燃え広がりモードマップを図3-7に示す。図中の破線は各モード間のおおまかな境界を識別しやすくするために便宜上引いたものである。昨年度までの実験結果に加え、今年度取得したデータにより、各モードの発現領域がほぼ明らかとなった。先に示した理論検討に基づくモードマップと比較すると、各モードの発現領域はほぼ一致している。ただし、モード3の発現領域は理論検討に基づくモードマップよりもかなり広がっている。逆に、モード2の発現領域は理論検討に基づく結果よりも狭くなっている。また、燃え広がり限界となる S/d の値は T の増加とともに大きくなっている。特に、 $T = 600\text{ K}$ から 750 K に増加したことに伴う燃え広がり限界の増加は顕著である。

これは、落下実験時間の範囲内においては、未燃液滴の蒸発ならびに周囲における可燃混合気層の形成が $T = 600\text{ K}$ 以上において活発になるためと考えられる。ここで、高温空气中に未燃液滴が曝される時間がより長い場合には、より低い T において同様の効果が現れることが予測される。高温空气中に曝された室温近傍の未燃 n -デカン液滴は周囲空気からの加熱により液滴内部温度を上昇させ、表面温度が 330 K 程度に上昇してはじめて可燃混合気が表面近傍に形成される。更なる加熱により、未燃液滴の蒸発は活発になり、周囲の可燃混合気層が発達する。従って、可燃混合気層の発達度合いは雰囲気温度 T のみならず高温空氣に液滴が曝されてからの経過時間にも影響を受ける。

燃え広がり限界のみならず、各モード境界位置についても、未燃液滴周囲の可燃混合気層の形成状態が大きく影響すると考えられる。このため、高温空氣に曝されてからの経過時間の影響を除外して議論するためには、理論検討における前提条件でもある、未燃液滴の初期非定常加熱・蒸発期間が終わり準定常蒸発状態に移行してからの火炎伝播を観察することが必要となる。これを実現するためには、より長い微小重力実験時間が必要である。

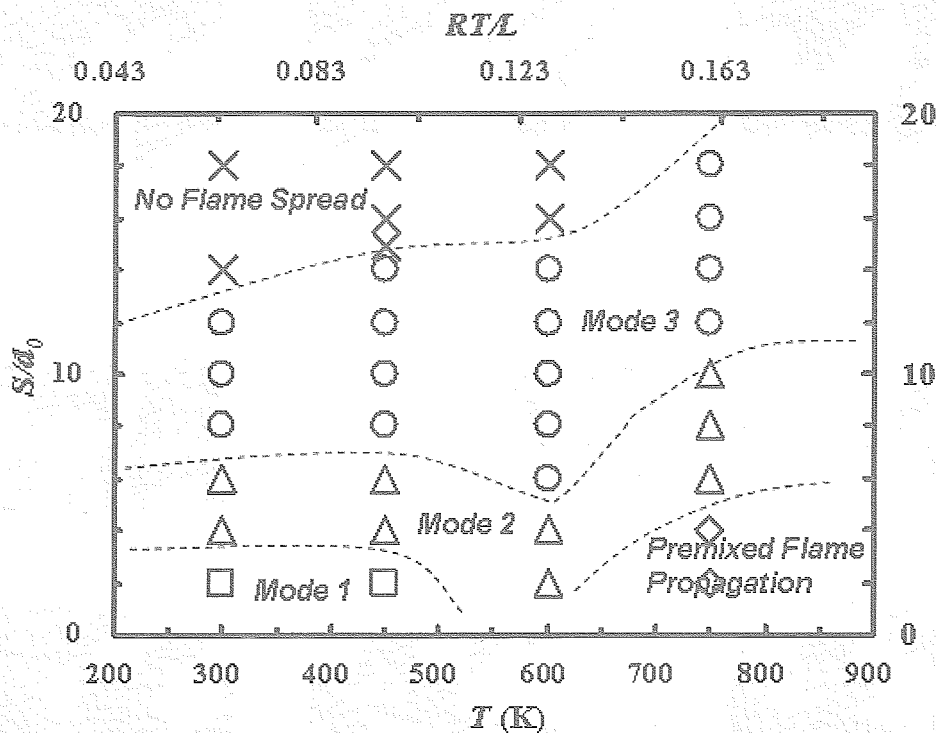


図3-7 微小重力実験結果に基づく火炎伝播モードマップ

3.1.6. 火炎燃え広がり速度

これまでの微小重力実験により得られた火炎燃え広がり速度 V_f の変化を図3-8に示す。横軸は無次元液滴間隔 S/d_0 、縦軸は燃え広がり速度 V_f に液滴直径 d_0 を乗じることで正規化した火炎燃え広がり速度である。なお、 $T=750\text{ K}$ における燃え広がり速度は他の T における値と比べて大きいため、結果を見やすくするために右軸のスケールに対応させている。

昨年度までに得られていた結果に加え特記すべきことはないが、 $T=750\text{ K}$ において S/d_0 が大きい場合のデータを $d=1\text{ mm}$ として再度取得したことにより、若干の変更が生じている。昨年度までのグラフでは、 $S/d_0=14$ 以上になっても燃え広がり速度が小さくならない傾向が見られたが、今年度取得したデータでは S/d_0 の増加に伴い燃え広がり速度が小さくなっている。

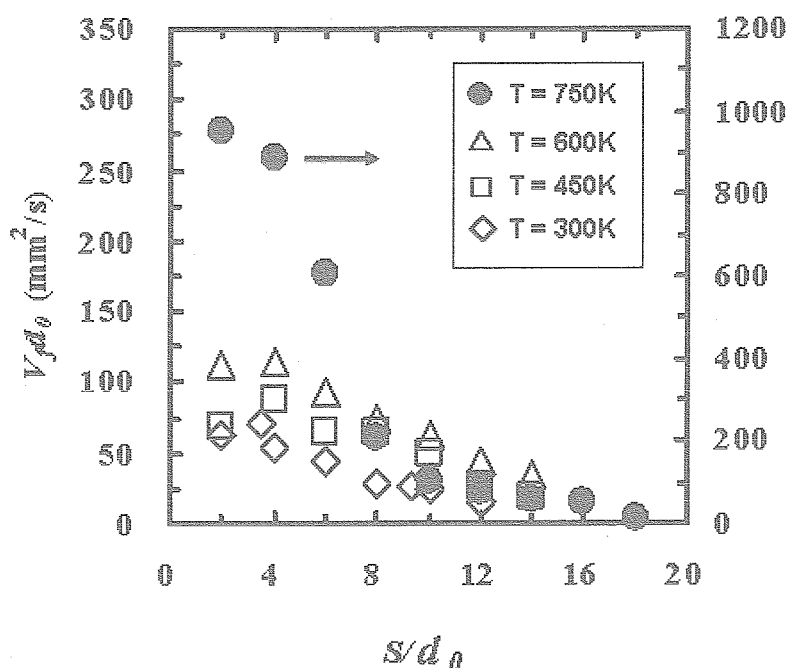


図3-8 微小重力実験における火炎燃え広がり速度

3.2. 液滴の予蒸発が火炎伝播に与える影響

3.1に示した微小重力実験ならびに対応する数値解析においては、液滴間の基本的な火炎伝播メカニズムを把握するため、火炎の燃え広がりに先立つ液滴の蒸発（予蒸発）はほとんど進んでいない状態を研究対象としていた。ここでは、予蒸発が液滴列の火炎伝播に与える影響に着目して行った微小重力実験結果について報告する。

今年度取得したデータを表3-2に示す。昨年度までは $d=1\text{ mm}$ で $S=12\text{ mm}$ の場合のデータを取得していたが、同じ着火待ち時間 t_w (s) でも隣接する液滴周囲の可燃混合気層の結合により、予蒸発の影響がより顕著になると考えられたより小さい S でデータ取得を行った。なお、雰囲気温度 T はすべての条件で 600 K とした。表3-2に示した実験条件のうち、 d が小さいNo.1～6までの条件が同一 t_w においては最も液滴の予蒸発が進行していると考えられる（液滴の熱容量が小さいため）。No.7～9とNo.10～12までの2種類の条件においては、同一 t_w では予蒸発の進行度に大きな差はないものと考えられるが、 S が広い後者のほうが蒸発時における液滴間干渉の影響が小さいため、予蒸発が若干進行しているものと考えられる。

表3-2 平成17年度に取得した実験データ

No.	液滴直径 d (mm)	液滴中心間隔 S (mm)	無次元液滴間隔 S/d	雰囲気温度 T (K)	着火待ち時間 t_w (s)
1	0.5	3	6	600	0.1
2	0.5	3	6	600	0.5
3	0.5	3	6	600	0.8
4	0.5	3	6	600	1.0
5	0.5	3	6	600	1.2
6	0.5	3	6	600	1.5
7	1.0	3	3	600	0.5
8	1.0	3	3	600	1.0
9	1.0	3	3	600	1.5
10	1.0	6	6	600	0.5
11	1.0	6	6	600	1.0
12	1.0	6	6	600	1.5

3.2.1. $d = 0.5$ mm, $S = 3$ mmでの実験結果

$d = 0.5$ mm, $S = 3$ mmにおいて t_w が異なる場合の火炎伝播挙動例を、図3-9から3-13にそれぞれ示す。図3-9は、これらの中で最も t_w が短い0.1 sの場合であるが、(a)から(c)の僅か2コマの間に液滴列を火炎が伝播している。このことから、火炎伝播速度が非常に大きいことがわかる。また、(b)においては燃え広がる火炎の先端部に、3液滴区間近くの長さに渡り青炎部が存在していることが確認できる。図3-10の(b)では、同様の青炎部が図3-9の場合よりも長い4液滴区間近くの長さに渡り輝炎の前方に存在している。また、火炎先端が液滴列の左端まで到達していることから、図3-9の場合よりも火炎伝播速度が大きいことが示唆される。さらに t_w の長い図3-11では、着火が確認された最初の画像である(a)で既に液滴列の大部分を火炎が伝播している。また、図3-9あるいは3-10の場合と比べ、液滴列中心軸に直交する方向の火炎径が特に火炎の後部(第一液滴側)において大きくなっている。これは、 t_w の増加に伴う未燃液滴周囲の可燃混合気層の発達により、拡散火炎面が形成される、燃料濃度が化学量論比となる位置が液滴中心から離れることによるものと考えられる。ただし、未燃液滴周囲に形成されていた可燃混合気が燃焼した後は、火炎径がやや小さくなることが(b)よりわかる。図3-12では、(a)における火炎先端位置は図3-11に比べ第1液滴により近いものとなっているが、青炎部の長さは図3-11よりも若干長い。最後に、 t_w が最も長い1.5 sである図3-13においては、(a)において液滴列の左端まで火炎が伝播しており、火炎伝播速度が非常に大きいことが示唆される。また、火炎後部においては輝炎の外縁が液滴列支持部の金属フレーム近くまで到達しており、火炎径が非常に大きくなっている。

3.2.2. $d = 1.0$ mm, $S = 3$ mmでの実験結果

$d = 1.0$ mm, $S = 3$ mmにおいて t_w が異なる場合の火炎伝播挙動例を、図3-14から3-16にそれぞれ示す。 t_w が0.5 sである図3-14では、 $t = 0.1$ sである(d)で火炎先端が液滴列の左端に到達している。次に、 t_w が1.0 sである図3-15では、 $t = 0.03$ sである(b)で火炎先端が液滴列の左端に到達しており、火炎伝播速度の増加が示唆される。同様に、 t_w が1.5 sである図3-16でも、 $t = 0.03$ sである(b)で火炎先端が液滴列の左端に到達している。 t_w の増加に伴う火炎後部における初期火炎径の増加については、 $d = 0.5$ mm, $S = 3$ mmの場合とは異なる

り明確には確認できない。これは、 $d = 1.0 \text{ mm}$ の場合のほうが $d = 0.5 \text{ mm}$ の場合に比べて未燃液滴の熱容量が大きいために液滴の蒸発が活性化するまでの時間が長く、同一の t_w における液滴周囲の可燃混合気層が小さいためではないかと考えられる。

3.2.3. $d = 1.0 \text{ mm}$, $S = 6 \text{ mm}$ での実験結果

$d = 1.0 \text{ mm}$, $S = 6 \text{ mm}$ において t_w が異なる場合の火炎伝播挙動例を、図3-17から3-20にそれぞれ示す。 t_w が最も短い 0.1 s である図3-17では、モード2に近いモード3の火炎伝播形態となっており、(f)の $t = 0.43 \text{ s}$ にて火炎先端が液滴列の左端に到達している。それに対し、 t_w が 0.5 s である図3-18では同様の火炎伝播形態であるものの、(d)の $t = 0.1 \text{ s}$ で火炎先端が液滴列の左端に到達しており、火炎伝播速度の増加が示唆される。 t_w が 1.0 s である図3-19では、(b)において火炎先端に青炎部の存在が明確に確認される。また、(c)の $t = 0.07 \text{ s}$ にて火炎先端の伝播が完了しており、更なる火炎伝播速度の増加が示唆される。最も t_w が長い 1.7 s である図3-20では、 $t = 0.03 \text{ s}$ である(b)で火炎が液滴列の全区間を伝播している。

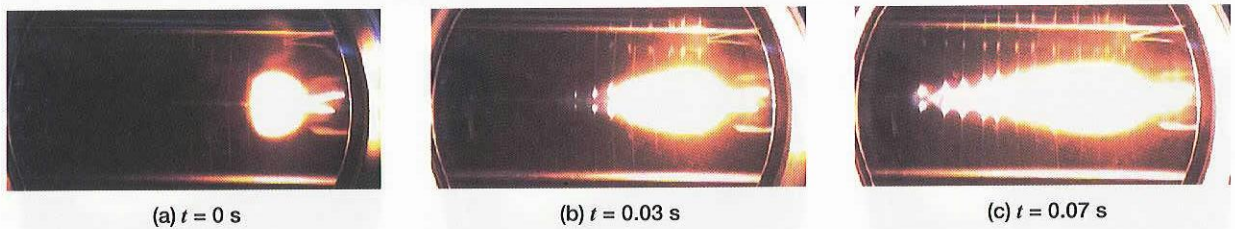


図3-9 $d = 0.5 \text{ mm}$, $S = 3.0 \text{ mm}$, $S/d = 6$, $T = 600 \text{ K}$, $t_w = 0.1 \text{ s}$

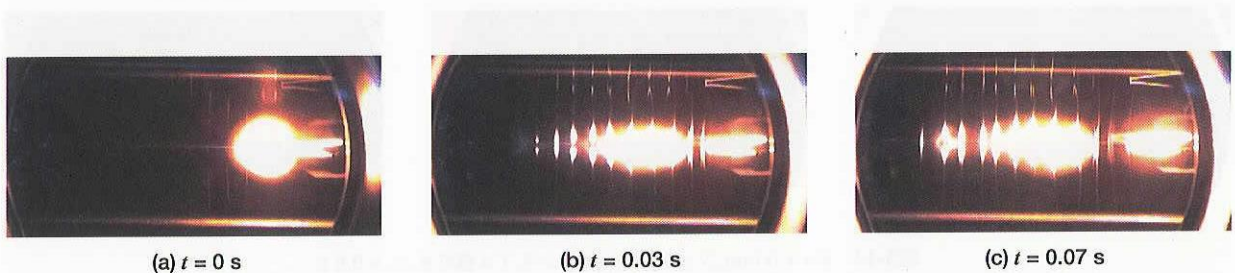


図3-10 $d = 0.5 \text{ mm}$, $S = 3.0 \text{ mm}$, $S/d = 6$, $T = 600 \text{ K}$, $t_w = 0.5 \text{ s}$

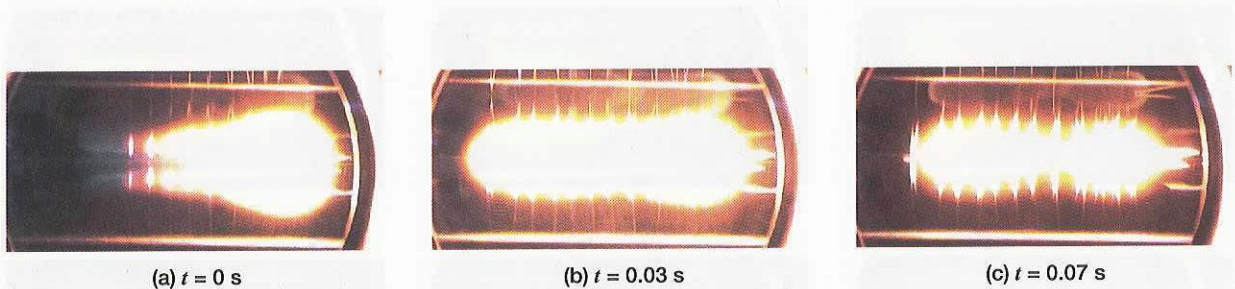


図3-11 $d = 0.5 \text{ mm}$, $S = 3 \text{ mm}$, $S/d = 6$, $T = 600 \text{ K}$, $t_w = 1.0 \text{ s}$

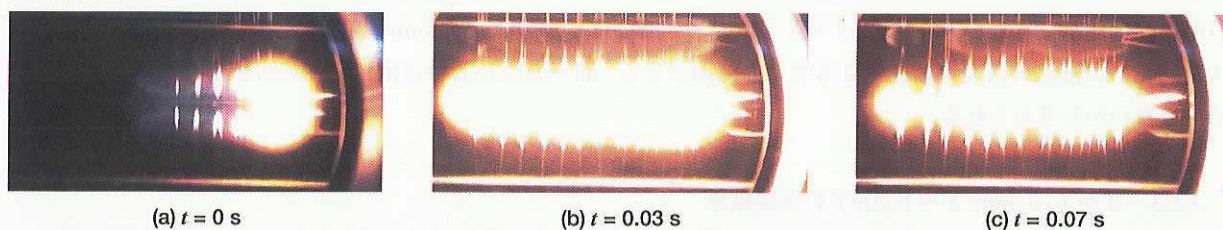


図3-12 $d = 0.5$ mm, $S = 3$ mm, $S/d = 6$, $T = 600$ K, $t_w = 1.2$ s

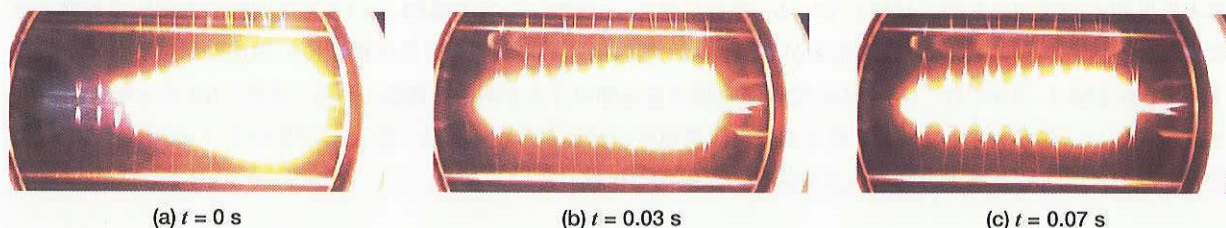


図3-13 $d = 0.5$ mm, $S = 3$ mm, $S/d = 6$, $T = 600$ K, $t_w = 1.5$ s

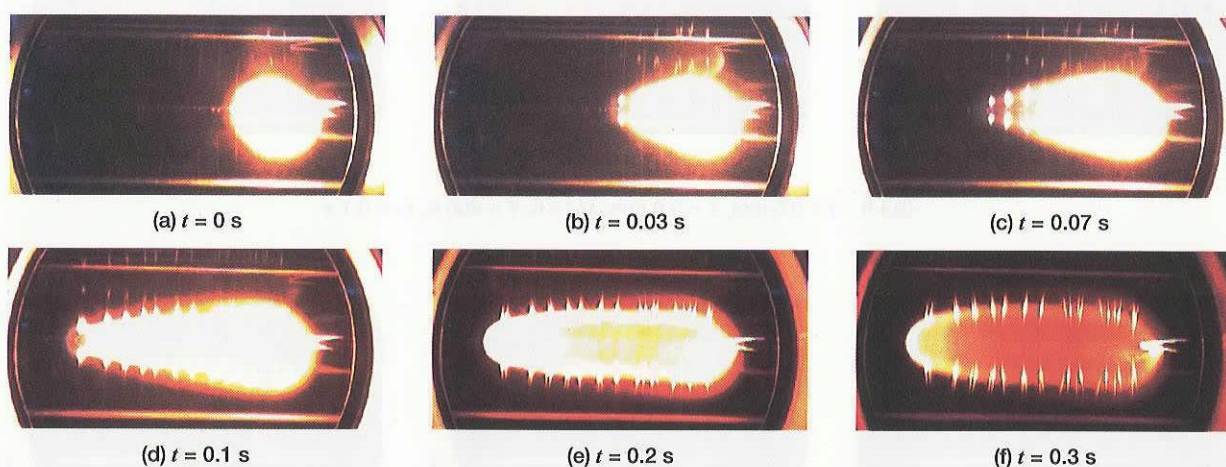


図3-14 $d = 1.0$ mm, $S = 3.0$ mm, $S/d = 3$, $T = 600$ K, $t_w = 0.5$ s

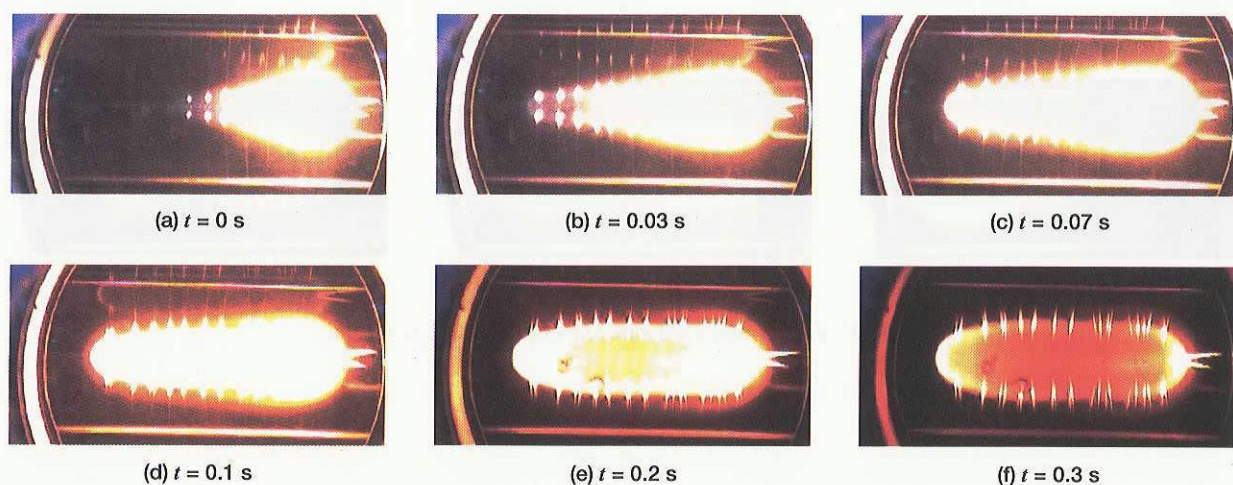


図3-15 $d = 1.0$ mm, $S = 3.0$ mm, $S/d = 3$, $T = 600$ K, $t_w = 1.0$ s

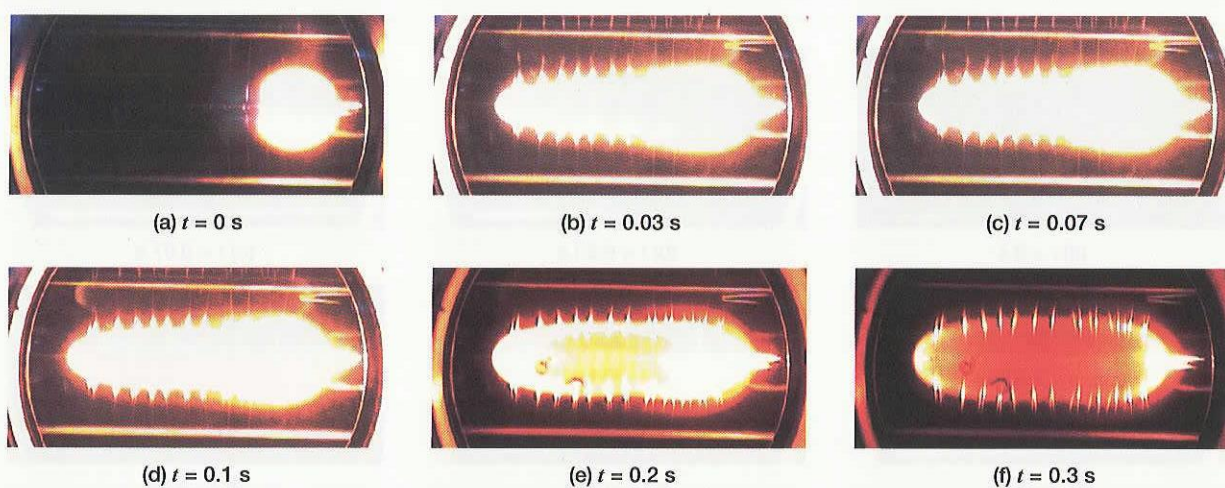


図3-16 $d = 1.0$ mm, $S = 3$ mm, $S/d = 3$, $T = 600$ K, $t_w = 1.5$ s

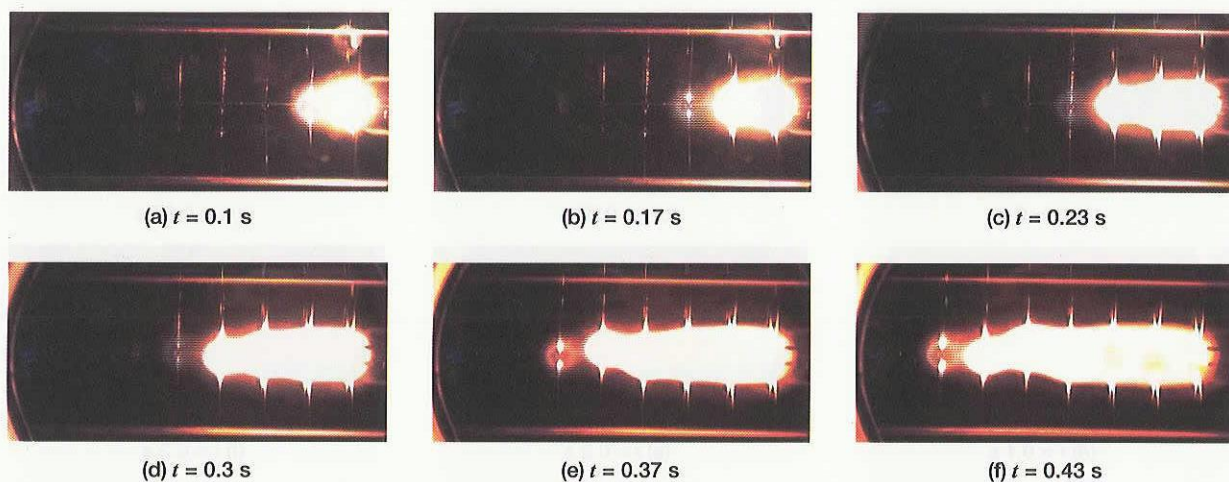


図3-17 $d = 1.0$ mm, $S = 6.0$ mm, $S/d = 6$, $T = 600$ K, $t_w = 0.1$ s

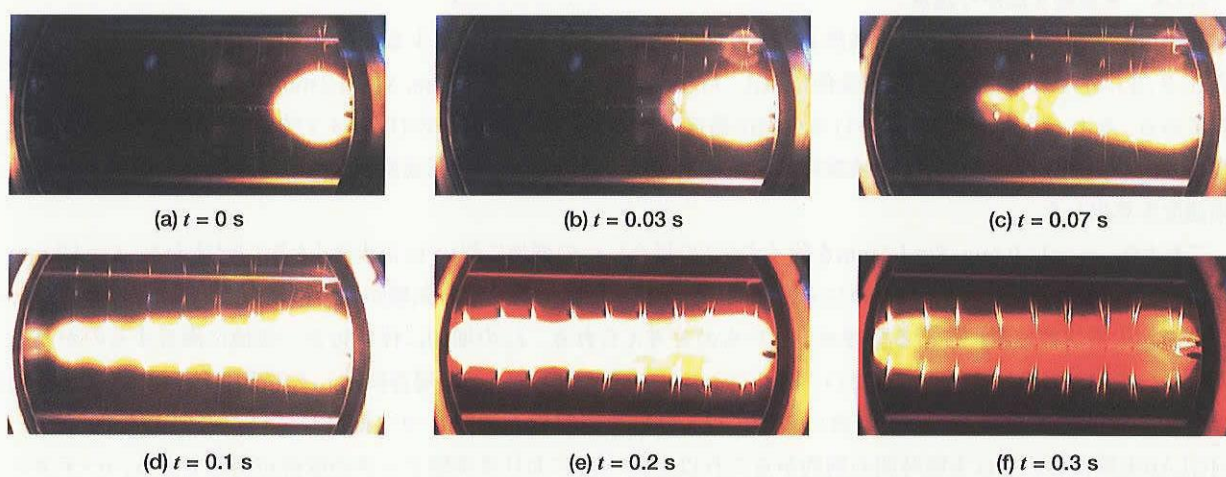


図3-18 $d = 1.0$ mm, $S = 6.0$ mm, $S/d = 6$, $T = 600$ K, $t_w = 0.5$ s

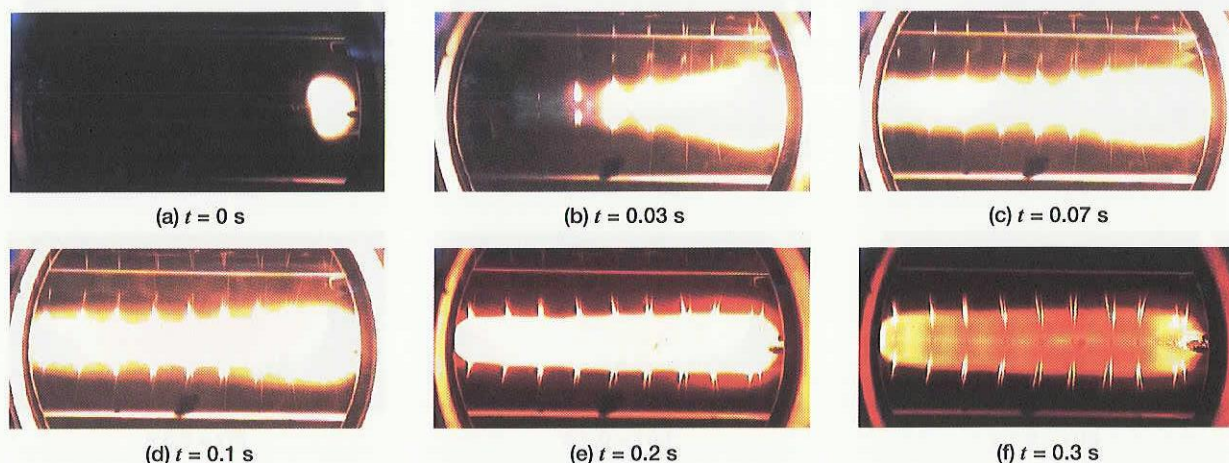


図3-19 $d = 1.0 \text{ mm}$, $S = 6.0 \text{ mm}$, $S/d = 6$, $T = 600 \text{ K}$, $t_w = 1.0 \text{ s}$

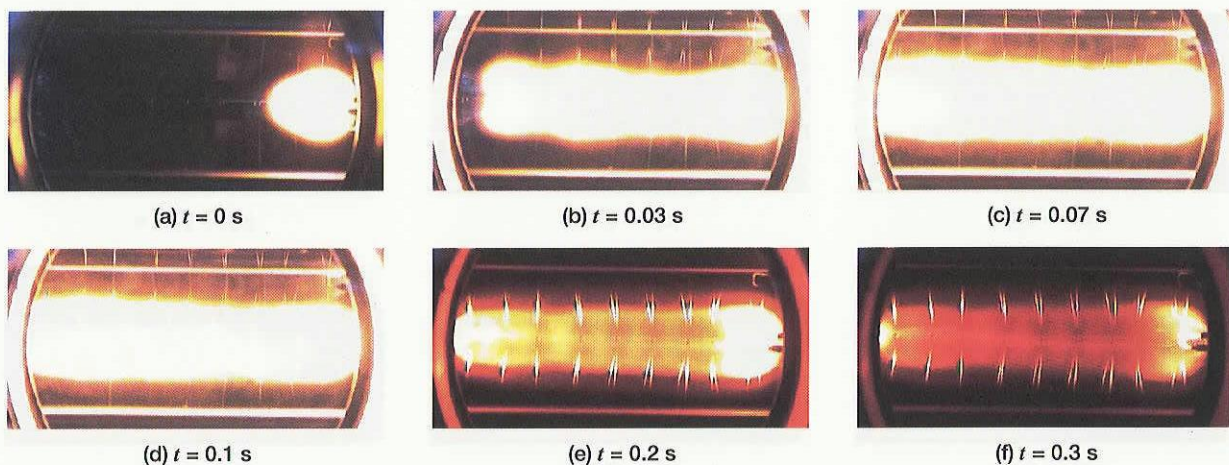


図3-20 $d = 1.0 \text{ mm}$, $S = 6.0 \text{ mm}$, $S/d = 6$, $T = 600 \text{ K}$, $t_w = 1.7 \text{ s}$

3.2.4. 火炎燃え広がり速度

微小重力実験により得られた火炎燃え広がり速度 V_f の着火待ち時間 t_w による変化を図 3-21 に示す。3.2.1 から 3.2.3 に示した 3 種類の液滴列条件に加え、昨年度実施した $d_0 = 1.0 \text{ mm}$, $S = 12 \text{ mm}$ における結果も併せて示してある。なお、予蒸発液滴列における火炎伝播速度は大きく、秒 30 コマの DV カメラ映像では精度の良い火炎伝播速度の算出が困難なことから、実験時に装置に搭載した秒 500 コマの高速度ビデオカメラ映像に基づき火炎伝播速度を算出した。

これより、 $d_0 = 1.0 \text{ mm}$, $S = 12 \text{ mm}$ を除くすべての場合に t_w の増加に伴い V_f が大きくなることがわかる。 $S = 12 \text{ mm}$ の場合には、液滴間隔が大きいため未燃液滴周囲に形成される可燃混合気層が互いに結合することが無いため、予蒸発が火炎伝播速度に与える影響が小さいものと考えられる。 t_w の増加に伴い V_f が一定値に漸近するのかどうかについては、明確には判断できない。特に、 $d_0 = 1.0 \text{ mm}$, $S = 3 \text{ mm}$ の場合には t_w の増加に伴い V_f が増加し続けているようにも見られる。この点については、今後数値解析も活用しつつ検討していく必要がある。一方、MGLAB 実験においては実験時間の制約からこれ以上長い t_w における実験データの取得が困難である。n-デカンのように揮発性が低い燃料を用いて十分に制御された予蒸発場の形成を行い、且つ観察・計測が容易な大きさの液

滴を用いるには、1回の実験に数十秒程度の微小重力時間が必要である。このため、小型ロケット等を利用したより長時間の微小重力実験による実験データ取得が期待される。

なお、 $d_0 = 0.5 \text{ mm}$, $S = 3 \text{ mm}$ の場合については、 $t_w = 0.1 \text{ s}$ および 1.5 s において2回のデータ取得を行ったが、 V_f には比較的大きな差が確認された。このような誤差の要因として未燃液滴の初期温度のばらつきが考えられる。実験時には液滴温度の制御は特に行っておらず、MGLABにおける実験準備室あるいは落下カプセル内の雰囲気温度に応じた温度となっている。この温度は季節変化が大きいため、生成された液滴列の初期温度に一定のばらつき誤差がある。そのため、液滴初期温度が可燃混合気層の発達度にも影響を与え、最終的に V_f にも影響を与えている可能性がある。この点について検討を行い、必要な対処策を施したうえで再度実験を行いたいと考えている。

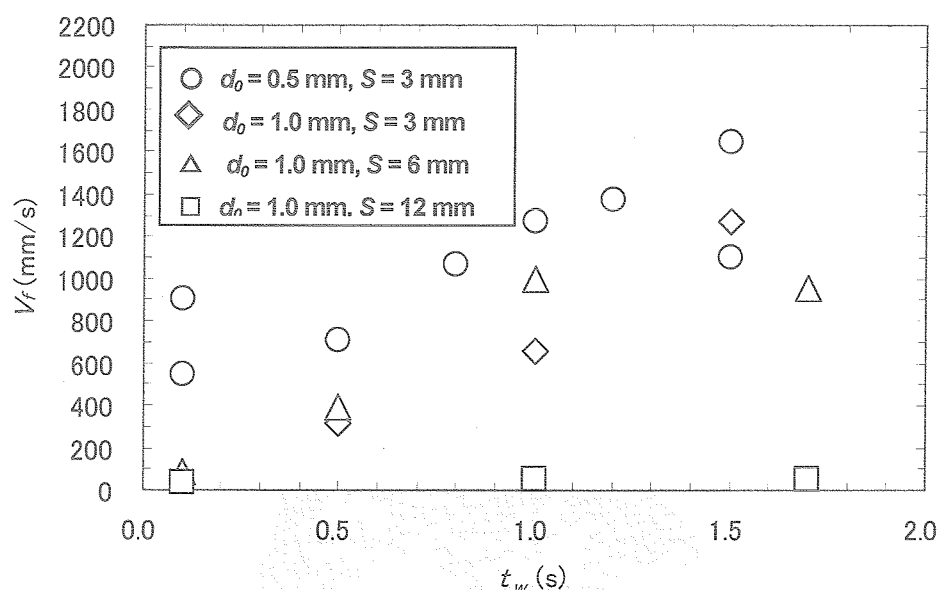


図3-21 火炎燃え広がり速度の t_w による変化 ($T = 600 \text{ K}$)

3.3. 液滴群燃焼数値シミュレーションプログラムの開発

3.3.1. 開発目的

本研究では、液滴列の火炎燃え広がりメカニズムを解明するため、液滴列火炎伝播シミュレーションプログラム（以下、「液滴列プログラム」という）を独自に開発し研究を行ってきた。しかし、実際の噴霧燃焼では、燃料液滴は不均一に分散している。噴霧燃焼機構を解明するためには、液滴列だけではなく、図3-22に示すような液滴分散モデルについて研究を行い、群燃焼火炎の発現過程等について解明する必要がある。

しかし、液滴列プログラムの計算対象は等間隔、直線配置された液滴の燃焼現象であり、2次元あるいは3次元マトリクスのような液滴分散モデルを取扱うことができない。このため、様々な液滴分散モデルの取扱いを可能とするため、液滴列プログラムをベースとして液滴群燃焼数値シミュレーションプログラム（以下、「液滴群プログラム」という）の開発を行った。

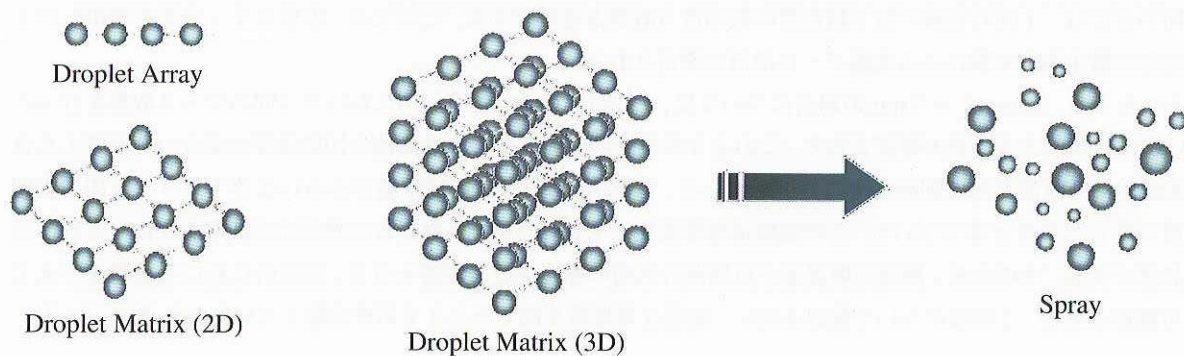


図3-22 液滴分散モデルと噴霧の模式図

3.3.2. プログラムの概要

液滴群プログラムは3次元空間中に分散した燃料液滴を取扱うため3次元で現象を取扱う必要があり、計算量が膨大となる。このため、液滴群プログラムはスーパーコンピュータで計算を行うことを前提に開発を行った。また、計算高速化のためプログラムをベクトル化ならびに並列化処理した。利用するスーパーコンピュータはJAXA宇宙科学研究本部相模原キャンパスのスーパーコンピュータ（NEC SX-6）である。液滴群プログラムでは、液滴周囲に球座標系格子を生成し、球座標格子を図3-23に示すように背景格子（Descartes座標系）の中に埋め込んで計算するオーバーセット法を用いている。オーバーセット法により、複数の液滴を任意の位置関係で配置することが可能となった。表3-3に液滴群プログラムの機能一覧を示す。

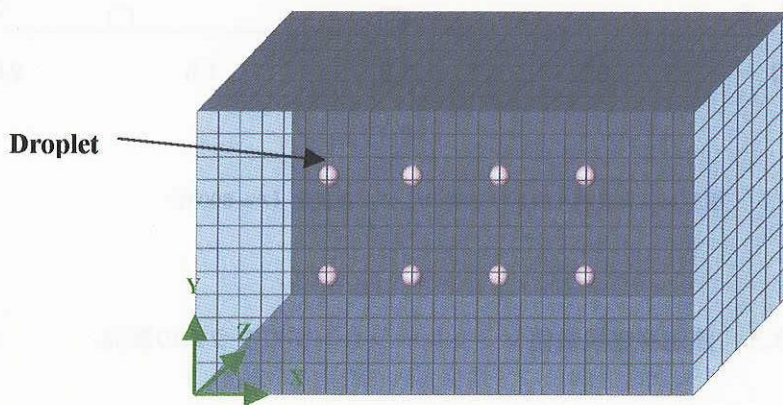


図3-23 解析モデル

表3-4 解析機能一覧

項 目		内 容
流れ場の状態		密度変化を伴う多成分低Mach数流れ
座標系		3次元Descartes座標系および球座標系
基礎方程式		<ul style="list-style-type: none"> ・混合気体の質量保存方程式 ・混合気体の運動量保存方程式 ・混合気体のエネルギー方程式 ・化学種の質量保存方程式
境界条件	流速	流入境界、自由流出境界
	温度	Dirichlet境界またはNeumann境界
	濃度	Dirichlet境界またはNeumann境界
離散化		有限差分法
時間積分		<ul style="list-style-type: none"> ・SIMPLE法 ・SMAC法。
移流項スキーム		1次風上差分
行列解法		<ul style="list-style-type: none"> ・ICCG法 ・Bi-CGSTAB法
化学反応		総括反応モデル 素反応モデル
オーバーセット法		背景格子(3次元Descartes座標系)内に球座標系格子をimbedさせる
並列化		並列処理はMPI(Message Passing Interface standard)で記述

3.3.3. 予備計算結果

液滴群プログラムを開発後、計算結果の妥当性を確認するため、液滴列の火炎燃え広がり計算を行い、各計算パラメータの見直しも含めてプログラムの検証を行っている。図3-25にシミュレーション結果を示す。カラーマップは温度(K)を示しており、1800～2000 Kの領域が火炎領域である。解析体系、解析条件は図3-24および表3-4にそれぞれ示す。但し解析結果については、可視化ソフトの性能上3次元表示できないため、 $Z=0$ のX-Y断面の結果を記載している。

微小重力実験では、本条件においてモード2の火炎伝播が観察されている。火炎伝播モード2とは、未燃液滴周囲に可燃混合気層が形成され、拡大してきた拡散火炎がこの可燃混合気層に触れることにより着火する伝播形態である。着火後、液滴周囲の可燃混合気層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。シミュレーション結果においても火炎伝播モード2を示しており、実験結果と一致している。但し、火炎伝播速度については解析結果の方が若干速くなっている。この点については今後さらに検討を加える予定である。

プログラムの検証計算に目処がついた後、2次元液滴マトリクスにおける火炎伝播計算を来年度以降本格的に行っていきたいと考えている。

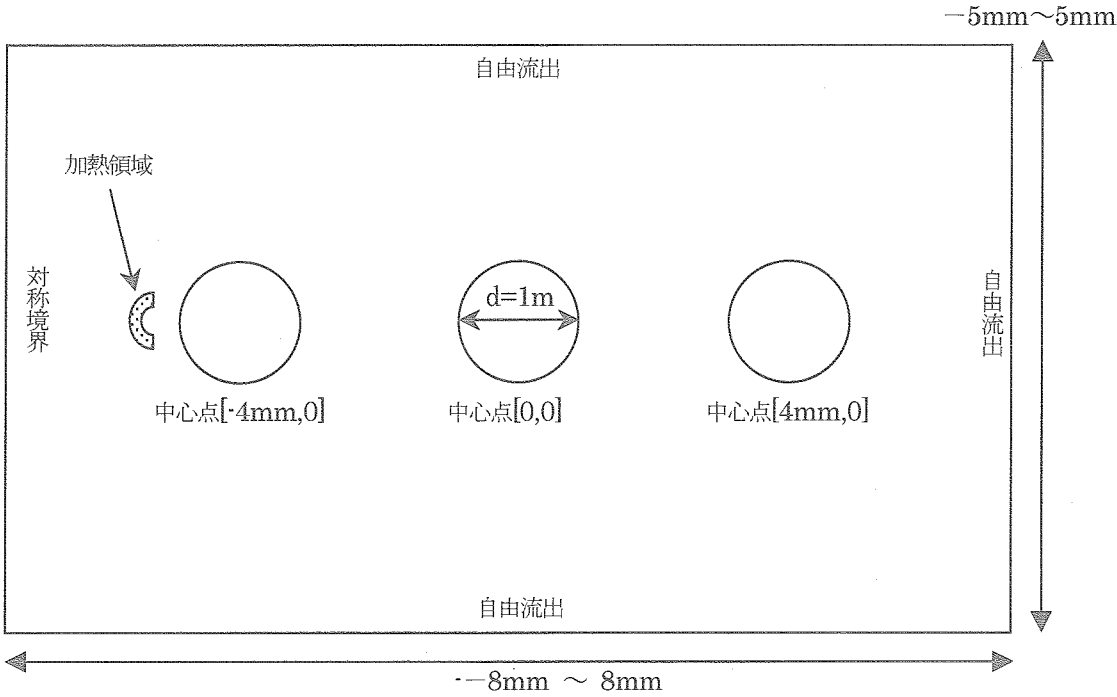


図3-24 解析体系および境界条件

表3-4 計算条件

項目	内容
計算領域	背景格子：[-8mm,8mm]×[-8mm,8mm]×[-8mm,8mm] 球座標系格子：半径1.5mm
液滴配置	・液滴個数：3個 ・液滴中心位置 第1液滴：(-4mm,0mm,0mm) 第2液滴：(0mm,0mm,0mm) 第3液滴：(4mm,0mm,0mm)
化学種成分	5成分（酸素，窒素，n-デカン，二酸化炭素，水）
初期値	・雰囲気ガス 流速：静止 温度：300K，圧力：101325Pa 質量分率：O ₂ =0.2315，N ₂ =0.7685，その他ゼロ。 ・液滴 半径：0.5mm 温度：300K
化学反応モデル	アレニウス型1段総括反応
その他	重力：無重力場，マランゴニ対流：なし，輻射損失計算：あり

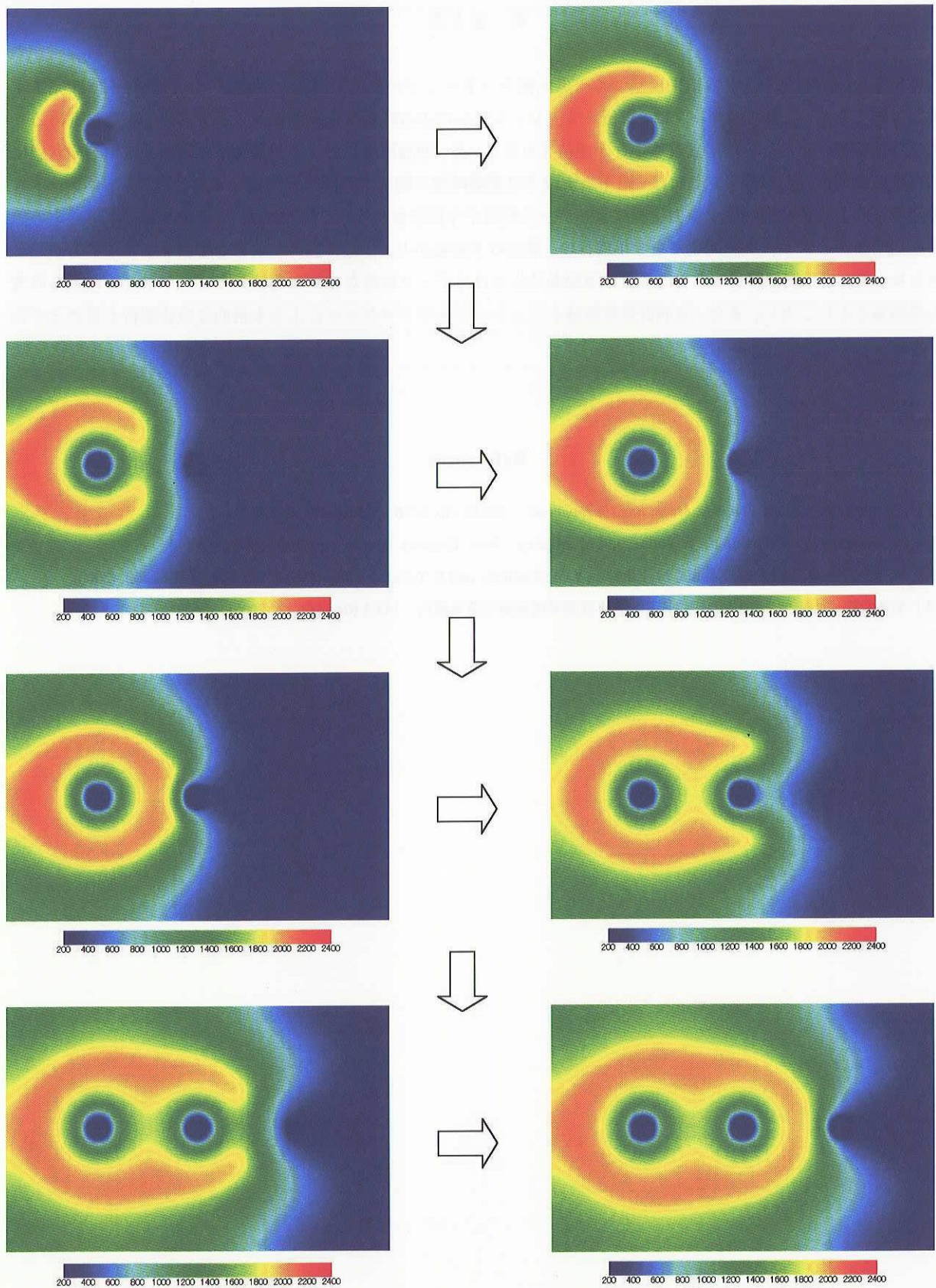


図3-25 シミュレーション結果

4. まとめ

今年度の研究により、実験結果に基づく火炎伝播モードマップの作成に必要な実験データの取得をほぼ完了することができた。これらのデータは、数値シミュレーションによる詳細な火炎伝播メカニズム研究を今後進めるうえでの基準データとして活用されることが期待される。一方、理論検討における前提条件である準定常蒸発状態における液滴列の火炎伝播に関しては、落下塔実験では実験時間の制約から観察が困難であるため、小型ロケット等を利用したより長時間の微小重力実験によるデータ取得が今後望まれる。これに向け、準定常蒸発に至る途中の過程を初期条件とする火炎伝播観察を今年度行い、液滴の予蒸発が火炎伝播に極めて大きな影響を与えることが明らかとなった。来年度以降は、さらに多数の実験条件におけるデータ取得ならびに数値シミュレーションによる研究を進めることにしたい。また、液滴群燃焼数値シミュレーションプログラムによる本格的な数値解析も進める予定である。

References

- [1] A. Umemura, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. (in Japanese)*, Vol. 68, No. 672B, 2422-2428, (2002).
- [2] M. Kikuchi, Y. Wakashima, S. Yoda, and M. Mikami, *Proc. Combust. Inst.* 30, pp. 2001-2009, (2005).
- [3] M. Mikami, H. Oyagi, N. Kojima, M. Kikuchi, Y. Wakashima, and S. Yoda, *Combust. Flame*, Vol. 141, pp. 241-252, (2005).
- [4] 菊池政雄, 山本信, 依田眞一, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-04-052, (2005).

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-026

発行 平成 18 年 3 月 10 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL:<http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株) フジプランズ

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency