

燃料噴霧を単純化した液滴列を用いた  
火炎燃え広がりに関する実験的研究

菅沼 祐介

## 目次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 過去に行われた研究	2
1.2.1 液滴や噴霧の燃焼研究	2
1.2.2 燃料液滴列の燃え広がりモデル式を用いた検討	4
1.3 研究の目的	5
1.4 本論文の構成	6
第 2 章 実験装置	8
2.1 気体当量比依存性検証用装置	8
2.1.1 実験モデル	8
2.1.2 全体構成	8
2.1.3 燃焼容器	8
2.1.4 液滴列生成装置	9
2.1.5 液滴列移動装置	9
2.1.6 液滴列支持装置	10
2.1.7 点火装置	10
2.1.8 シャッタ	10
2.1.9 温度調節器	10
2.1.10 制御装置	10
2.1.11 予混合火炎伝播実験用観察装置	11
2.1.12 火炎燃え広がり挙動観察装置	11
2.1.13 液滴生成確認用観察装置	11
2.1.14 バックリット光源	12
2.1.15 電源	12
2.1.16 プログラム	12
2.2 雰囲気圧力および初期液滴直径依存性検証用装置	12
2.2.1 実験モデル	12
2.2.2 全体構成	13
2.2.3 高圧容器	13
2.2.4 内部モジュール	13
2.2.5 燃焼容器	13
2.2.6 液滴列支持装置	14

2.2.7	液滴列生成装置	14
2.2.8	液滴列移動装置	15
2.2.9	点火装置	15
2.2.10	燃料供給系	15
2.2.11	制御装置	16
2.2.12	ラダープログラム	16
2.2.13	圧力センサ	16
2.2.14	光学系	16
2.2.15	CCD カメラ	17
2.2.16	高速度カラービデオカメラ	17
2.2.17	無線 LAN インターフェース	17
2.2.18	電源系	18
2.2.19	高圧空気系	18
2.3	微小重力環境設備	18
2.3.1	小型落下塔	19
2.3.2	大型落下塔 (MGLAB)	20

### 第 3 章 燃え広がり及び及ぼす気体当量比の影響 (通常重力環境) ……42

3.1	緒言	42
3.2	実験条件および実験方法	42
3.2.1	等価液滴直径	42
3.2.2	初期液滴直径	42
3.2.3	液滴直径の自動計測	43
3.2.4	実験試料	43
3.2.5	当量比	43
3.2.6	火炎燃え広がりモード	45
3.3	実験結果および考察	46
3.3.1	予混合気中における単一液滴燃焼時の火炎直径	46
3.3.2	火炎燃え広がり及び及ぼす気体当量比の影響 (デカン)	46
3.3.3	火炎燃え広がり及び及ぼす気体当量比の影響 (エタノール)	48
3.3.4	燃え広がる液滴個数 / 燃え尽きる液滴個数	48
3.3.5	火炎伝播に及ぼす液滴列の影響 (デカン)	49
3.3.6	火炎伝播に及ぼす液滴列の影響 (エタノール)	49
3.3.7	火炎燃え広がり速度に及ぼす燃料揮発性の影響	50
3.3.8	燃え広がり及び火炎伝播の境界における火炎速度差	51
3.4	結言	52

## 第4章 燃え広がり及びぼす気体当量比の影響（微小重力環境） ……83

4.1 緒言	83
4.2 実験条件および実験方法	83
4.2.1 液滴膨張の定義	83
4.2.2 点火の定義	83
4.2.3 燃え広がり誘導時間の定義	83
4.2.4 燃え広がり速度の定義	84
4.2.5 点火誘導時間	84
4.2.6 点火誘導時間・燃え広がり誘導時間比	84
4.2.7 火炎速度	84
4.2.8 実験試料	85
4.3 実験結果および考察	85
4.3.1 等間隔モデル実験結果の液滴マトリックス燃焼への拡張	85
4.3.2 気体当量比が火炎燃え広がり及びぼす影響（列方向圧縮モデル）	86
4.3.3 火炎燃え広がり及びぼす自然対流の影響	87
4.3.4 燃え広がる液滴個数 / 燃え尽きる液滴個数	87
4.3.5 点火誘導時間	88
4.3.6 点火誘導時間と燃え広がり誘導時間比	88
4.3.7 液滴直径履歴と火炎半径履歴	89
4.3.8 初期火炎直径	90
4.3.9 対象液滴の未燃次液滴に燃え広がった瞬間の対象液滴の火炎半径	90
4.4 結言	91

## 第5章 燃え広がり及びぼす雰囲気圧力の影響 …… 113

5.1 緒言	113
5.2 実験条件および実験方法	113
5.2.1 点火時刻および火炎半径の測定	113
5.2.2 火炎燃え広がり速度の測定	113
5.2.3 実験方法	114
5.2.4 実験試料	114
5.3 実験結果および考察	114
5.3.1 火炎燃え広がり速度の算出手法の検討	115
5.3.2 雰囲気圧力が火炎燃え広がり及びぼす影響	115
5.3.3 雰囲気圧力が初期火炎半径に及びぼす影響	116
5.3.4 雰囲気圧力が火炎燃え広がり誘導時間に及びぼす影響	117

5.3.5	温度伝導率が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響	117
5.3.6	火炎燃え広がり速度の圧力依存性と燃え広がりモードの関係	118
5.3.7	雰囲気圧力が正規化火炎燃え広がり速度に及ぼす影響	119
5.4	結言	120
第 6 章	燃え広がり速度に及ぼす初期液滴直径の影響	142
6.1	緒言	142
6.2	実験条件および方法	142
6.2.1	火炎燃え広がり速度の測定	142
6.2.2	実験試料	142
6.3	実験結果および考察	143
6.3.1	燃え広がり速度に及ぼす初期液滴直径の影響	143
6.3.2	初期火炎直径に及ぼす初期液滴直径の影響	144
6.4	結言	144
第 7 章	総合考察	152
7.1	液滴列が気相伝播火炎に及ぼす影響のモデル計算	152
7.2	液滴列実験結果の大規模群燃焼への拡張	155
7.3	実験モデル式の構築	156
第 8 章	結論	171
参考文献		173
謝辞		177

# Experimental Study on Flame Spread along a Droplet Array as a Simplified Model of Fuel Spray

Yusuke Suganuma

Spray combustion is employed in various combustors such as diesel engines, gas turbines, industrial furnaces, and liquid-fuel rocket engines. An understanding of spray combustion mechanisms contributes to the improvement of combustor performance and the reduction of harmful gas emission, which causes environmental pollution. Spray combustion consists of very complex aerodynamic, thermodynamic, and chemical processes. Because it is very difficult to study these processes in detail, there are still unknown areas in the spray combustion mechanisms. The research of flame spread along a fuel droplet array is an important approach to clarifying the growth mechanism of group combustion of fuel droplets. Therefore, the studies of the droplet array combustion are conducted under various experimental conditions. In this paper, fuel droplet array combustion experiments were conducted under microgravity at various droplet spacings, initial droplet diameters, gas equivalent ratios, and ambient pressures. The flame spread behavior under each experimental condition was discussed. Finally, an experimental model equation was constructed.

This thesis consists of eight chapters including introduction and conclusion.

Chapter 1 describes the background of this research focusing on spray combustion and the importance and problems of droplet combustion in spray combustion. In addition, it described the past researches and the academic position of this thesis.

Chapter 2 describes the details of the droplet array combustion experiment apparatus. It also describes the two microgravity facilities (drop tower) used for the experiment.

Chapter 3 shows the results of droplet array combustion experiments in a fuel vapor-air mixture in normal gravity environment. By using two fuels with different volatility, interference between premixed flames and fuel droplet array was considered. It was found that when high volatile fuel were used, the fuel vapor was supplied from the droplets to the progressive premixed flames, and the flame propagation speed changed.

Chapter 4 shows the results of droplet array combustion experiments in a fuel vapor-air mixture in microgravity environment. The flame spread speed increased with increasing the gas equivalence ratio. It is considered that the time for the fuel vapor-air mixture is formed around the droplet decreases due to the increase in the gas equivalent ratio.

Chapter 5 shows the results of investigation of the effect of ambient pressure on flame spread along a fuel droplet array. The normalized flame spread speed decreases as the ambient pressure increased. For all ambient pressures, the normalized flame spread speed takes the maximum between 3 and 3.75 in the nondimensional droplet spacing. The dependence of the normalized flame spread speed on ambient pressure increases with the increase in the nondimensional droplet spacing.

Chapter 6 shows the results of investigation of the effect of initial droplet diameter on flame spread along a fuel droplet array. In the case of short flame spread induction times, which is the time for a flame to travel between two droplets, the normalized flame spread speed increases as the initial droplet diameter increased. It is considered to be due to the increase in chemical ignition delay and flame propagation time in the flame spread induction time.

In Chapter 7, total consideration was described. Based on the results of chapter 4, expansion of droplet array combustion to group combustion was discussed. The result can be seen as fundamental data on simplified droplet cloud combustion which is initiated by simultaneous ignition on the outer edge of the droplet cloud. An empirical model equation which expresses the dependence of flame spread speed on the ambient pressure, droplet spacing, and initial droplet diameter was proposed.

In chapter 8, conclusions of this study and future works are summarized.

# 第1章 緒論

## 1.1 研究の背景

現在、一次エネルギーとして最も多く利用されているのが石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料である。輸送や貯蔵が比較的容易であることや大量のエネルギーが取り出せることなどから使用量が急増している。これらの化石燃料は多くの諸問題を抱えながらも、現在までに我々の生活に計り知れない恩恵を与えてきた。例えば自動車、航空機などの移動手段のエネルギー源、冷暖房機やコンピュータなどの生活に潤いを与える家電製品である。特に、自動車については歴史が古く、長い年月を経て改良が加えられながら、移動手段として世界中の人々に利用されてきた。しかしながら、燃焼によって発生する硫酸化物や窒素酸化物は大気汚染や酸性雨の主な原因になっているほか、二酸化炭素は地球温暖化の一番の原因となっており、資源の有限性の観点からも、化石燃料の使用量削減や化石燃料に頼らない新エネルギーの開発が重要となってくる。そこで、地球環境問題と密接な関係を持つ自動車の低公害化を実現させるため、電気自動車、燃料電池自動車天然ガス自動車、バイオ燃料自動車など多くの低公害車の開発・実用化がされてきた。しかしながら、一部の低公害車は、実用化への多くの課題が残されていることや、認知不足のため、社会全体に普及するには時間が必要とされる。このように、エネルギー問題および地球環境問題の解決が急務となっている今日、有害排出ガスの削減や燃料消費率の低減に噴霧燃焼の機構解明が役立つと考えられる。液体燃料を霧化して燃焼させる噴霧燃焼は、ボイラや炉をはじめ、ディーゼル機関や液体燃料ロケット推進器、ガスタービンなどの燃焼器に広く用いられている燃焼方式である。燃焼の機構が明らかにされ、燃焼器の設計が理論的に行われるようになれば、開発期間の短縮や開発コストの低減など工業的にも大いに役立つと考えられる。しかしながら、噴霧燃焼は燃料微粒子、燃料蒸気および空気からなる極めて不均一な系で起こる現象である。噴霧燃焼を支配する重要な因子として、液滴直径や燃料組成、温度、ガス組成、圧力、液滴と周囲気体の相対運動などが挙げられる。また、蒸発・拡散・混合、それによって生じた混合気の燃焼が同時に進行し、かつ影響しあうため、燃焼現象を直接解析することは非常に困難である。したがって、従来それぞれの燃焼機器について個別に研究されることが多く、噴霧燃焼の一般的特性が把握されていないのが現状である。噴霧燃焼の機構解明のアプローチとして、二つの極端なモデルが考えられる。噴霧中の液滴の気化が極めて速やかで、かつ燃焼過程が比較的ゆっくり進行するような場合には、液滴の蒸発後に燃焼が開始すると考えられ、バーナ拡散火炎の燃焼に近いものとなり、数多くの研究が行われている。これとは逆に、噴霧中の液滴が比較的大きく、燃焼過程が比較的速みやかに進行する場合には、燃焼末期まで液相の粒子が残存して蒸発過程と燃焼過程とが平行して進行する状態になり、液

滴の蒸発速度がその燃焼速度を律する要因になると考えられる。この考えに基づき、噴霧燃焼の最小構成単位である単一燃料液滴や液滴を複数個並べた液滴列などを利用して液滴燃焼の研究が行なわれてきた。

## 1.2 過去に行われた研究

### 1.2.1 液滴や噴霧の燃焼研究

岡島らは、燃料液滴直径が1 mm程度と比較的大きな場合の液滴列の燃焼過程には、自然対流の影響が強く現れるため、この影響を受けない自由落下する燃焼容器中の無重力環境で液滴列の火炎燃え広がり実験を行った。比較的揮発性の高い燃料を用い、液滴間隔と火炎燃え広がり挙動の関係、高温ガス層が火炎燃え広がりに果たす役割について調べた<sup>1)</sup>。

小西らは、均一粒径の液滴流を任意の間隔で作る装置を用いて、液滴流の燃焼における干渉効果を調べた。火炎は液滴間隔によって単独燃焼と集団燃焼に分けることができ、単独燃焼状態では燃焼速度定数には変化が見られないのにたいして、集団燃焼状態では液滴間隔の減少による急激な低下が見られることを示した。干渉効果における最大の支配因子は個々の液滴の利用可能な酸素量および相対速度であることを示している<sup>2)</sup>。また、小西らは、2個および3個の水平懸垂液滴列と、2個の鉛直懸垂液滴について、通常重力環境で燃焼実験を行い、液滴流と同様に燃焼速度定数と液滴間隔の関係について調べた。その結果、液滴間の干渉効果について以下のようにまとめている。燃焼速度定数は液滴間隔の増加に伴って単調に増加したのち単一液滴の場合の値に漸近する、燃焼速度定数の低下が認められるのは一つの火炎が液滴列全体を包む集団燃焼状態にあるときである<sup>3)</sup>。

吉田らは、複数の燃料を用い微小重力環境で火炎燃え広がり実験を行った。その結果、周囲圧力と液滴間隔によって3種類の燃え広がり機構があることを示した。また、3つの火炎燃え広がり機構を調べるために、球対称熱伝導方程式を用いて温度分布を調べ、2液滴がほぼ同時に発火する燃え広がり機構についての考察を行った<sup>4)</sup>。

三上らは、通常重力および微小重力場において、水平配置された2液滴を用いて実験を行った。その結果、通常重力場では火炎間の酸素不足が微小重力場ほどはなはだしくないことを示した。二つの火炎が分離した形態で存在するとき、初期液滴間隔が小さいほど火炎に酸素を供給する自然対流の効果は強いことを示した。燃焼の初期を除くと、同じ無次元液滴直径に対する燃焼速度定数は、微小重力では初期液滴間隔の減少とともに単調減少するのに対し、通常重力場ではある初期液滴間隔において最大となることを示した<sup>5)</sup>。

これらをはじめとし、噴霧燃焼の基礎研究として液滴燃焼実験が種々の条件で行われた<sup>6-17)</sup>。また、実験と同様に液滴列燃焼の数値計算、理論検討が行われてきた。

鈴木らは、周囲雰囲気と等しい速度で上昇する液滴列が実験室座標系で静止した火炎を形成していると仮定して、燃焼している液滴の各々の燃焼速度定数が、他の液滴の存在によってどのような影響を受けるかを、雰囲気温度、液滴間隔などを変えて理論的に調べた。一列で移動しながら燃焼する場合の他に、多列の場合の燃焼速度定数、火炎形状、化学種分布などを示した。一つの液滴に注目すれば、液滴は液滴群の中心部に進むに従い、周囲の液滴の影響を強く受けるようになり、燃焼速度定数を低下させることを示した。燃焼速度定数はある最小値に達するが、液滴がさらに上昇すると次第に燃焼速度定数を増しながら燃焼を完了することを示した<sup>18)</sup>。

梅村は、微小重力環境における燃料液滴列の火炎燃え広がりについて詳細に考察を行った。第1報では、物理的考察に基づいて、各種パラメータ空間で現れる3つの火炎燃え広がりモードのマッピングを行った<sup>19)</sup>。第2報では、点火した液滴の周りに作られる拡散火炎の成長過程を解析し、液滴列の群燃焼火炎先端で起きる液滴間の火炎燃え広がり機構を明らかにし、火炎燃え広がり速度の理論式を導いた。解析結果は、微小重力実験で測定された火炎燃え広がり速度の液滴間隔に対する依存性を良く予測し、提案した火炎燃え広がり機構の妥当性を裏付けている。同じ雰囲気条件の下で燃焼する孤立液滴で達成される最大火炎直径と同程度の液滴間隔を持った液滴列で火炎燃え広がり速度が最大となり、最大値は主に液滴の加熱時間によって支配されている。液滴間隔の変化に伴う火炎燃え広がり機構の遷移についても論じている<sup>20)</sup>。第2報では、単一液滴燃焼の準定常計算を液滴列適用して燃え広がり速度の計算を行っている。本論文ではより実験結果から簡便な実験モデル式の構築を目標としており、梅村のアプローチの方法が異なる。第3報では、第1報で行った物理的考察をより詳細に行っている。群燃焼火炎先端の火炎燃え広がりの詳細を明らかにするためのモデルとして、移動平面拡散火炎場の中に置かれた液滴の着火過程を考え、数値計算を行った。初期の未燃液滴のまわりの可燃性混合気体の生成状態に対応して、第2報では分類した3つのモードが現れ、提案した火炎伝播燃え広がり速度式の妥当性が検証された<sup>21)</sup>。

菊池らは、燃料液滴列の火炎燃え広がりメカニズムについて、微小重力実験および数値解析による検討を行った。微小重力実験では、雰囲気温度や液滴間隔による燃え広がり挙動ならびに燃え広がり速度の変化を明らかにした。また、予蒸発液滴列の燃え広がり実験と数値解析により、液滴の予蒸発が燃え広がりを与える基礎的な影響を明らかにした。数値解析コードの様々な改良を行い、実験結果とより定量的に一致する結果が得られる見通しを得た<sup>22)</sup>。

液滴燃焼の研究が進む一方で、より実機の噴霧に近い研究も数多く行われている。

浜崎らは、部分予混合噴霧中の火炎伝播機構を把握するため、噴霧を単純化した均一分散・均一粒径の燃料液滴-蒸気-空気混合気の定容燃焼実験を行った。予混合気中に存在する燃料液滴が火炎伝播速度および最大燃焼圧力に及ぼす影響を調べた結果、燃料蒸気の一部を液化することにより、希薄領域全般で火炎伝播速度および最

大燃焼圧力が完全予混合気より増大することを明らかにし燃焼促進効果について考察を行った<sup>23)</sup>.

三上らは、揮発性の比較的低い燃料を用いた場合の予混合噴霧流の燃焼挙動について実験的研究を行った。燃料には正デカンを用い、噴霧流の総当量比を1より非常に大きく設定した。噴霧の平均液滴径を大きくするか、または、噴霧流の総当量比を小さくしていくと外部群火炎のみを伴う噴霧燃焼形態から内部火炎も伴う燃焼形態へと遷移した。実験結果は、内部火炎は微細液滴の蒸発により生成された可燃性混合気によって維持されている。また、予混合火炎の性質を有しており、液滴クラスタの通過により変形され、それにより振動を生じることを示唆した<sup>24)</sup>。

早崎らは、急速膨張式部分予蒸発噴霧バーナを用いて、PTV(Particle Tracking Velocimetry)により平面火炎の構造を観察し、火炎前縁の液滴速度を計測した。エタノールと空気を用い、急速減圧式凝縮法により予混合気中に燃料液滴を均一に分散させた。層流噴霧流中に斜めに保炎した平面火炎を観察した結果、液滴当量比0.2、平均液滴径7  $\mu\text{m}$ 、総当量比0.8-1.3、流れの伸長率30-100  $\text{s}^{-1}$ の噴霧流の場合、液滴の蒸発は火炎の予熱帯において完了することがわかった<sup>25)</sup>。

## 1.2.2 燃料液滴列の燃え広がりモデル式を用いた検討

燃料液滴列の火炎燃え広がり速度について、簡易的な数式モデルで表現する試みが多く、研究者により行われている。ある液滴から隣の液滴まで火炎が燃え広がる時間（以下、燃え広がり誘導時間）について、特性時間に分解して考察する。燃え広がり誘導時間 $\tau_f$ を以下の式のように分解して表す。

$$\tau_f = t_c + t_h + t_i + t_p \quad (1.1)$$

ここで、 $t_c$ は高温域の熱伝導時間、 $t_h$ は液滴の初期加熱時間（物理的点火遅れ時間）、 $t_i$ は化学的点火遅れ時間、 $t_p$ は液滴まわりの予混合気層内の火炎伝播時間である。このような特性時間を用いることでBrzustowskiらは液滴の燃え広がり機構の基本構造の考察を行った<sup>26)</sup>。三上らは高温環境で燃料液滴列火炎燃え広がり微小重力環実験実施し、火炎燃え広がり速度がある無次元液滴間隔が最大値をとることを示した<sup>27)</sup>。この傾向について特性時間を使って考察を行っている。Kobayashiらは高圧力環境で比較的狭い液滴間隔における火炎燃え広がり微小重力実験実施し、火炎燃え広がり速度の圧力依存性について明らかにし、圧力依存性と燃え広がり誘導時間に占める各特性時間の影響度について考察している<sup>28)</sup>。

### 1.3 研究の目的

前述のように、液滴を直線上に配置した燃料液滴列の火炎燃え広がりに関する研究は、噴霧燃焼に特徴的な群燃焼の発生機構を解明するための重要なアプローチであり、理論解析、数値解析および実験が行われている。さらに実機の噴霧に近いモデル噴霧を対象とした研究として、粒径分布幅の狭い部分予蒸発噴霧流を用いて、予混合気中に分散する燃料液滴が燃焼速度に及ぼす影響を調べる研究などが行われている。燃料液滴列や部分予蒸発噴霧の燃焼実験は、噴霧燃焼の新たな知見を得る研究として重要であるが、実際の燃焼器内の現象と液滴列燃焼研究の知見の間には隔たりがあり、同時に議論することは現状においては困難である。そこで両者の隔たりを補う研究が必要であると考えられる。

本論文では、噴霧燃焼の保炎に重要な役割を果たすと考えられる、火炎基部に起こる火炎燃え広がりや群燃焼機構の解明を目的として液滴燃焼実験を行う。図 1-1 に噴霧燃焼における液滴列燃焼の位置づけを示す。噴霧燃焼における液滴実験に用いる燃料液滴列モデルは実際の噴霧の複雑さを排除するため、1) 燃料液滴を一列に並べる、2) 液滴は空間的に固定し、静止雰囲気内で燃焼させる、3) 液滴直径は均一とする、4) 液滴間隔は均一とする。この燃料液滴列モデルを用いて燃焼実験を行う。本論文では液滴間隔のほか3つの条件を変えて実験を行い、その影響について調べた。一つ目は気体当量比である。噴霧燃焼では微粒化した液滴は蒸発しながら火炎面に進行し燃焼すると考えられる。液滴列の火炎燃え広がりでは予蒸発量を条件とした研究は一部であるものの、気体当量比をパラメータとした研究はない。そこで本論文では、燃料液滴の周囲を同一燃料の蒸気で満たし火炎燃え広がり実験を行った。二つ目は雰囲気圧力である。他研究者により狭い液滴間隔のみ燃え広がり実験は行われていた。本論文では狭い液滴間隔から燃え広がり限界に近い液滴間隔の範囲で燃え広がり実験を行った。三つ目は初期液滴直径である。実際の噴霧は数 $\mu\text{m}$  から数十 $\mu\text{m}$  の液滴が燃焼しているが、液滴燃焼実験では現象の空間的・時間的分解能を上げるために、直径約 1.0 mm 程度の粗大な液滴が用いられてきた。初期液滴直径で現象を正規化することで実験結果が実際の噴霧の現象を説明できると考えられてきたが、スケールが小さくなると化学反応など初期液滴直径の正規化に則らない現象が支配的になると予想される。本論文では初期液滴直径をパラメータとして実験を行った。これらの条件を変えて燃焼実験を行うことで燃え広がり現象に及ぼす初期条件の影響について考察を行う。その結果を用いて式 (1.1) を基礎とした燃料液滴列の火炎燃え広がり速度の実験モデル式を構築し、燃料液滴列の燃え広がり挙動に支配的な特性時間を推定可能とすること、また液滴列燃焼と実機の現象の間を補う知見を得ることを目的とする。図 1-1 に噴霧燃焼基礎研究における本論文で明らかにしようとする位置づけを示す概念を示す。

## 1.4 本論文の構成

本論文は全8章から構成される。

第1章では液滴燃焼研究が社会に対して果たす役割と、過去に行われた研究について述べ、本研究を行った動機と本論文の目的について述べた。

第2章では、液滴列燃焼実験に用いる実験装置について記述する。実験条件により装置の詳細が異なるため項を分けて詳細に説明をする。

第3章では、液滴列の周囲を液滴と同一の燃料の蒸気で満たした条件で、通常重力環境下で液滴列燃焼実験を行った結果を示す。通常重力実験では揮発性の異なる燃料種の実験を行い、液滴列が火炎伝播に及ぼす影響について考察を行う。

第4章では、第3章と同じく液滴列の周囲を液滴と同一の燃料の蒸気で満たした条件で、自然対流の影響を排除した微小重力環境下で液滴列燃焼実験を行った結果を示す。気体当量比が火炎燃え広がり及ぼす影響について考察を行う。

第5章では、雰囲気圧力を変えて燃え広がり実験を行った結果を示す。狭い液滴間隔から燃え広がり限界に近い液滴間隔の幅広いデータを取得して、液滴間隔が燃え広がり速度の圧力依存性におよぼす影響について考察を行う。

第6章では、初期液滴直径を変えて燃え広がり実験を行った結果を示す。初期液滴直径が1 mm程度の粗大な液滴を用いた液滴列燃焼実験では、燃え広がり速度に関する相似則が成立しないことが示されている。そこで、初期液滴直径が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響について考察を行う。

第7章では、液滴列燃焼実験結果を群燃焼への拡張について考察を行う。また第3章から6章で得られた結果を基に実験モデル式を構築する。実験結果から液滴間を火炎が進行するのに要する時間について各種特性時間に分割することで、いずれの特性時間が支配的か検討を行う。

第8章では、本論文によって得られた知見を結論として示すとともに、今後の課題について述べる。

## Stable Combustion

4

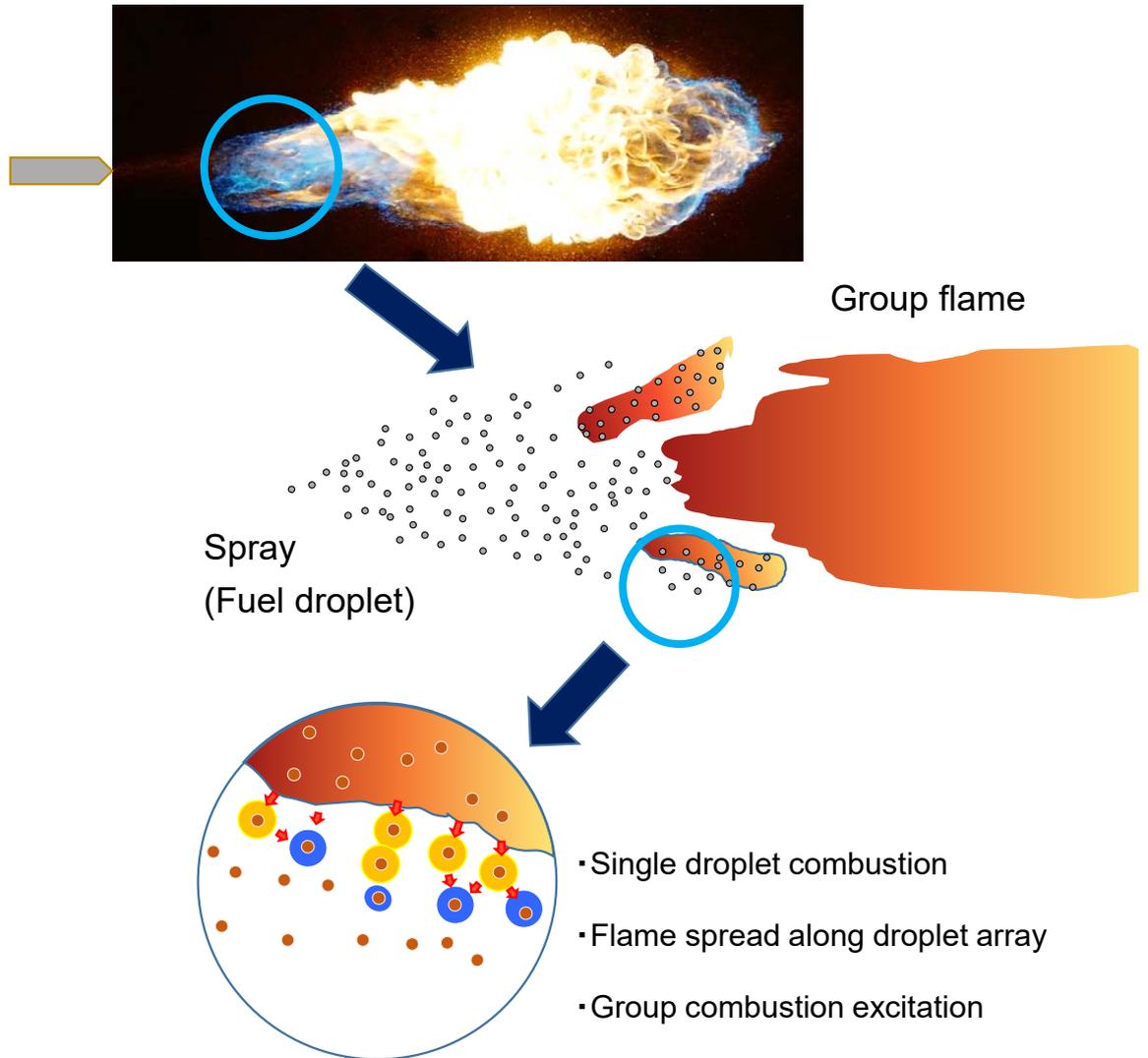


図 1-1 本論文の実験モデルの噴霧燃焼における位置付け

## 第2章 実験装置

### 2.1 気体当量比依存性検証用装置

燃料液滴列の周囲を燃料蒸気-空気予混合気で満たして燃え広がり実験を実施可能な実験装置を開発した。液滴列と同一燃料で予混合器を生成して燃え広がり実験を行った実験的研究は過去に無い。また、燃焼容器形状を工夫することで、液滴列の実験で得た知見を3次元へと拡張して議論することを可能にした。

#### 2.1.1 実験モデル

図 2-1 に、本研究の対象となる燃料蒸気 - 空気予混合気の液滴列の概念を示す。研究対象は単純立方格子状に配列された 3 次元液滴マトリックスの一部を切り出した液滴列である。部分予蒸発を模擬するため、燃料液滴列を燃料蒸気 - 空気予混合気で満たした燃焼容器に挿入し、燃焼実験を行った。3 次元液滴マトリックスが燃焼している際の液滴間の物質移動・熱移動対称面を燃焼容器壁面および観察窓ガラスで実現することにより、液滴列の実験結果を 3 次元に拡張して議論できるように工夫した。燃料液滴、蒸気、および空気が同時に存在する場で実験を行うため、液体当量比 $\phi_l$ 、気体当量比 $\phi_g$  および総当量比 $\phi_t$ <sup>24)</sup>が部分予蒸発の場合と同様に定義できるよう、燃焼容器を設計した。

#### 2.1.2 全体構成

図 2-2 に実験装置概略を示す。実験装置は燃焼容器、液滴列生成装置、液滴列移動装置、液滴列支持器、点火装置、シャッタ、温度調節器、制御装置および観察装置から構成されている。実験装置は岐阜県土岐市にある MGLAB の落下塔に搭載可能なサイズおよびインターフェースを有している。以下にそれぞれの装置の詳細を示す。

#### 2.1.3 燃焼容器

図 2-3 に燃焼容器の概略を示す。燃焼容器内部の実験空間は、液滴列が配置される。列方向の実験空間長さは 116mm で固定した。正方形断面寸法は変更可能であり、一辺  $l_{wh}$  が 25mm を使用した。燃焼容器内壁面には、火炎の熱損失を低減させるためセラミックス（住金セラミックス、ホットベール）を用いた。雰囲気気体である予混合気は、均一に加熱した燃焼容器内部に液体燃料を注入することで生成した。燃料蒸気-空気予混合気の気体当量比は、燃焼容器内の蒸気が飽和蒸気であることと

ダルトンの法則が成り立っていることを仮定し、燃料の飽和蒸気圧から計算した。燃焼容器は燃焼現象観測用に一對の長窓を有している。観察窓は、燃焼容器内の飽和蒸気が凝縮することを防ぐため、二重窓とした。燃焼容器下部は液滴列支持器が挿入されるスリットが設けられている。燃焼容器が加熱待機している間は、シャッタによってスリットを密閉する。容器組立時にはシリコーン液型 RTV (Room Temperature Vulcanizing) ゴム (信越シリコーン, KE45) により気密性を保っている。シリコーン液型 RTV ゴムはデカンで溶けるため、フッ素ゴム (ハルナ, パーフロソペイント) により表面コーティングすることで、デカンとの接触を避けている。容器内に水を入れ気密試験を行い、密が取れていることを確認している。燃焼実験中は、燃え広がる火炎の既燃側の燃焼容器端は開端とし、未燃側は、混合気流速を小さくするため、閉端とした。

## 2.1.4 液滴列生成装置

図 2-4 に液滴列生成装置の概略を示す。液滴列の生成は、燃料供給ポンプよりテフロンチューブを介して燃料溜め部に燃料が送られ、一列に並べられたガラス管先端より燃料を吐出する。燃料供給ポンプはマイクロニューラ型ギアポンプであり、サーボモータ (Faulhaber GmbH, MZR-2905) によって駆動される。これにより高精度に燃料の送り出し量を制御することが可能である。燃料溜め部に取り付けられたガラス管は、既製のガラス管 (ナリシゲ, G100) を、プーラー (ナリシゲ, PC-10) を用いて引き伸ばして製作する。先端外径は約  $40 \mu\text{m}$  である。液滴生成時はサーボモータによってスライダとボールねじを用いた機構を駆動し、ガラス管を前進させ、生成後は退避する。サーボモータはパーソナルコンピュータを接続することで、内部プログラムの書き換え・読み出しなどを行うことができる。DC 24 V 通電時に、書き込まれたプログラムの動作を一回だけ行う。

## 2.1.5 液滴列移動装置

図 2-5 に液滴列移動装置の概略を示す。燃焼容器内部は燃料蒸気 - 空気予混合気を生成するために温度制御が行われているため、あらかじめ燃焼容器外部で液滴列を生成し、移動機構により燃焼容器内部に液滴列を挿入した。通常重力実験時、移動装置はサーボモータ (Faulhaber GmbH, 3564K024BC) により駆動した。落下塔を使用した微小重力実験では制動時にモータの保持力が不足し、液滴列支持部が強制的に押し下げられる事象が発生した。そこで、より保持力が高いステッピングモータ (オリエンタルモーター, CRK544MBPB) を使用した。モータによる回転運動はギヤを介してスライダ・クランク機構に伝えられ、直線運動に変換される。約 0.5 s で液滴列を液滴列生成位置から燃焼実験位置に移動させることができる。

## 2.1.6 液滴列支持装置

図 2-6 に液滴列支持器の概略を示す。懸垂線には直径 14  $\mu\text{m}$  の SiC ファイバ（日本カーボン，Hi-Nicalon）を使用した。2 本の懸垂線を X 字型に交差させて張り，その交点に燃料液滴を生成した。交点は一直線上に配置されている。液滴間隔を変化させるため，X 字型懸垂線が液滴間隔と等間隔に設置された支持器を複数用意した。支持部には火炎の熱損失を低減させるため，燃焼容器内壁面と同一のセラミックス（住金セラミックス，ホットベール）を用いた。

## 2.1.7 点火装置

点火装置には，熱線点火方式を採用した。点火線は直径 0.35 mm の鉄クロム線を使用しており，通電させることで第一液滴への点火を行った。導線と鉄クロム線との間には，直径 0.6 mm および 1.6 mm のステンレス管を用いて伸縮式の三段構造としたことで，点火線と第一液滴の位置関係の調整を容易に行うことができる。

## 2.1.8 シャッタ

燃焼容器下部には液滴列支持器が挿入されるスリットが設けられており，予混合気生成待機時は，スリットをシャッタによって密閉している。シャッタはエアスライドテーブル（SMC，MXS6-40A）により前進させスリットを密閉し，後退でスリットは開放される。シャッタを斜め上に向かって前進させ，燃焼容器下部を押し付けるように閉めることで密閉度を上げている。シャッタの表面には耐熱性のあるテフロンシートを使用した。

## 2.1.9 温度調節器

燃焼容器内の温度調節を行うため，温度調節器（オムロン，E5AK）を用いた。温度変動を極力小さくするためアナログ温度制御を採用して単相電力調節器（オムロン，G3PX-EUN）を用いた。燃焼容器内部の温度計測には K 熱電対を用い，実験空間中央付近を計測した。

## 2.1.10 制御装置

実験装置の制御にはシーケンサを用いた。シーケンサは CPU ユニットを中心として，電源ユニット，拡張入力ユニット（キーエンス，KV-1000/KV-U7/KV-B16XA）

から構成される。シーケンサを用いてすべての機器を制御することで、一回のトリガ信号で複数、複雑な工程を行うことができる。パーソナルコンピュータを CPU ユニットへ接続することによって、内部プログラムの書き換え・読み出し、プログラムのリアルタイムモニタリングおよびトリガ信号出力などを行うことができる。各機器への信号はターミナルリレー（オムロン、G6B-4BND）を介して行った。

### 2.1.11 予混合火炎伝播実験用観察装置

予混合伝播火炎の撮影では高速度カメラ（nac, MEMRECAME Ci）にイメージ・インテンシファイア・レンズシステム（imco, ILS-3/1, Image Intensifier Lens System, 以下 ILS）を装着して現象の直接観察を行った。高速度カメラの撮影速度は 100～2000 fps であり、撮影は 1000 fps（400×280 pix）として実験を行った。露光時間はオープンに設定した。高速度カメラに録画した画像は、光磁気ディスク（Magneto-Optical disc, MO）に記録を行い、デジタル画像データとした。高速度カメラのみでの撮影では、予混合伝播火炎を撮影することができない。このため、ILS を高速度カメラに装着することによって光量を増幅し、現象の撮影を可能にした。ILS は過大な光に対する保護機能を有しており、過大な光が入った場合、自動的に安全な増幅率（ゲイン）に設定の変更が行われる。ILS の露光時間は 900  $\mu$ s とし、保護機能が動作しない範囲でゲインを設定した。撮影時は黒い布で周囲を覆い、他の光源が入らない状態とした。燃焼容器断熱材により、観察に必要な部分以外を覆うことでイグナイタの発光が ILS に直接入ることを防いだ。

### 2.1.12 火炎燃え広がり挙動観察装置

液滴の拡大撮影では耐衝撃用の高速度カメラ（nac, MEMRECAM Rx/FX3）を用いて現象の観察を行った。撮影速度は 250～500 fps（640×480 pix）とした。実験条件ごとの撮影速度、露光時間の設定は各章の実験条件を参照してほしい。露光時間は一部の実験では OPEN となっている。しかしながら露光時間を OPEN として撮影した場合、被写体ブレが発生し、特に微小重力実験のカプセル切離し時や点火時に液滴が動く際に、画像解析が困難となっていた。露光時間を変化させ撮影したところ、露光時間 1/1000 秒で被写体ブレが解消し、解析が容易になった。全景撮影用としてハイビジョン CCD ビデオカメラ（Panasonic, HDC-SD1, 1440×1080pix）を用いた。

### 2.1.13 液滴生成確認用観察装置

液滴列生成の確認には CCD カメラ（ソニー, XC-555）を用い、照明として LED ライトを用いた。撮影された画像は後述の画像転送装置から無線 LAN を介してリア

ルタイムで地上に転送される。

#### 2.1.14 バックリット光源

液滴の撮影にはバックリット法を用いた。バックリット光源には LED（日亜化学工業株式会社，NPSW500CS）を用いた。砲弾型 LED のためにバックリット光源として使用すると，輝度むらが生じた。拡散板や拡散キャップを用いた場合，輝度が大幅に落ちるため，砲弾部をやすりで平面状に加工した。

#### 2.1.15 電源

微小重力実験では，落下カプセルの支援装置より AC 100 V と DC 24 V が供給される。通常重力実験では，実験装置とは別に定電圧電源装置（高砂製作所，ZX-400L）を設け DC 24 V の供給を行った。

#### 2.1.16 プログラム

サーボモータのプログラムの作成には付属のソフトである Motion Manager 2 を使用した。シーケンサのプログラムにはラダー言語を使用した。ラダーの作成には付属のソフトである KV BUILDER を使用した。

### 2.2 雰囲気圧力および初期液滴直径依存性検証用装置

高圧力雰囲気条件下で燃料液滴列の燃焼実験を実施可能な実験装置を開発した。また，短時間微小重力環境を有効活用するために，短時間で実験が完了するよう液滴直径を 0.48 mm と従来の実験に対して約半分にした。そのため，装置の基本的な構成は 2.1 項の気体当量比検証用実験装置と同一であるが，実験条件に対応させて装置も大きく変更した。また，本実験装置の燃焼容器（光学セル）のみ取り外して初期液滴直径依存性検証用実験装置とした。

#### 2.2.1 実験モデル

雰囲気圧力依存性検証実験の実験モデルは気体当量比依存性のそれと同一であり，平面火炎に突入する液滴 3 次元マトリックスモデルから，その一部を切り出した 1 次元液滴列を想定している。3 次元マトリックスモデルの両端の面から一斉に点火が始まる条件を 1 次元液滴列に適応させている。そのため，本実験で用いている燃焼容器は燃え広がり方向の一方が開端，もう一方は閉端となっている。燃焼容器に 1 次

元液滴列を挿入し、燃焼実験を行った。燃焼容器内壁は、液滴間の熱移動、物質移動の繰り返し対称面と考えられるようにフラットで断熱性のあり、内部の観察が容易な石英ガラスを使用している。繰り返し対称面を考慮した燃焼容器を用いることで、1次元液滴列を3次元マトリックスに拡張して将来議論が可能になるように工夫している。

## 2.2.2 全体構成

図 2-7 に実験装置の概略を示す。実験装置は大きく分けて高圧容器、内部モジュール(燃焼容器、液滴列支持装置、液滴列生成装置、液滴列移動装置、点火装置)、制御装置、圧力センサ、光学系、無線 LAN インターフェース、電源系から構成される。実験は小型落下塔を用いて微小重力環境で行った。以下に各装置の詳細を示す。

## 2.2.3 高圧容器

図 2-8 に高圧容器の外観を示す。高圧容器は宇宙環境利用科学委員会ワーキンググループ活動で製作されたものであり、5.00 MPa(安全率 10)まで耐えることが可能である。内部は円筒状の空間になっており、内径は 100 mm、内部の奥行きは 220 mm である。内部モジュールが挿入可能であり、内部モジュールと一体となっているフランジ部を高圧容器に取り付けられた植え込みボルトとナットで機械的締結を行うことで容器内が密閉される。容器には 4 面に窓が設けられている。1 対に石英ガラスを用いた観察窓が設けられており、容器内部の観察が可能である。もう一対は目つぶしされている。

## 2.2.4 内部モジュール

図 2-9 に内部モジュールを示す。内部モジュールには燃焼容器、液滴列支持装置、液滴列生成装置、液滴列移動装置、点火装置、燃料供給系、熱電対が搭載されている。内部モジュールは機械的・電氣的インターフェースを合わせておけば入れ替えることが可能で、多様な条件で実施できるよう工夫されている。

## 2.2.5 燃焼容器

図 2-10 に燃焼容器を示す。燃焼容器内部の空間は正方形断面の矩形であり、液滴列支持部が配置される。列方向の実験空間長さ  $l_d$  は 35.7 mm である。正方形断面寸法は一辺  $l_{wh}$  が 15 mm である。燃焼容器壁面には、火炎の熱損失を低減させるために石英ガラスを用いた。燃焼容器を支える外枠にも熱損失の低減および燃焼容器外の

温度を伝えにくくするため、セラミック（フェローテックセラミックス社（旧 住金セラミックス・アンド・クオーツ株式会社）製，ホトベール）を用いた．燃焼容器には燃焼現象の観察用に一对の観察窓を設けている．観察窓は燃焼容器内の飽和蒸気が凝縮して結露することを防ぐため二重窓とした．燃焼容器側面には液滴列支持装置が挿入される開端が設けられている．燃焼実験中は燃え広がる火炎の既燃側の燃焼容器端は開端とし，未燃側は混合気流速を小さくするため，また液滴間の熱移動，物質移動の繰り返し対称面とするため閉端とした．

## 2.2.6 液滴列支持装置

図 2-11 に液滴列支持装置を示す．懸垂線液滴列支持装置は I 型懸垂線液滴列支持装置を作成した．I 型懸垂線液滴列支持装置は外直径 0.6 mm，内直径 0.4 mm のステンレス管を折り曲げて製作した懸垂線支持フレームを用いた．これらは懸垂線，支持フレーム，スライダ・クランクアーム接続部から構成される．懸垂線液滴列支持装置の閉口端側の部分を自由端とし，その端面に直径 78  $\mu\text{m}$  の SiC ファイバ(Specialty Materials, SCS-9A)を用いた．液滴の懸垂には直径 14  $\mu\text{m}$  の SiC ファイバ（日本カーボン，Hi-Nicalon）を支持枠にアロンセラミック C（東亜合成社製）を用いて接着させた．懸垂線の作成には自作の治具を用いた．懸垂線の midpoint である液滴が懸垂される部分には水ガラス（Aremco, Ceramabond, 569-T）を塗布し焼結させ，液滴の保持力を増加させている．懸垂線の両端には短い SiC ファイバを取り付けた．短い SiC ファイバのばね性を利用し，懸垂線を常に両端で引っ張ることで，火炎によって熱せられて懸垂線が伸びても伸びを吸収し，液滴間隔が変化するのを防いでいる．

## 2.2.7 液滴列生成装置

図 2-12 に液滴列生成装置の概略を示す．液滴列生成装置は燃料液滴を懸垂線上に生成させるための装置である．燃料供給用ピエゾポンプ，フロンチューブ，ステンレス管，燃料タンク，液滴を懸垂線に懸垂させるガラス針及びガラス針移動装置により構成されている．ピエゾポンプは内部のピエゾ素子にパルス電圧を印加し，振動させることで燃料を押し出している．ステンレス管とガラス針はエポキシ樹脂系接着剤（コニシ，クイック 5）で固定されている．ステンレス管とフロンチューブは針金を用いて固定されているガラス針はステップモータ（オリエンタルモーター，CSK523AP）の回転運動を往復運動に変換するカム機構によって移動させた．ガラス針先端は懸垂線に接触しないが極めて近傍になるように配置する．ガラス針はガラス管（ナリシゲ，G-100）をプーラ（ナリシゲ，PC-10）により引き伸ばして製作した．引き伸ばし方式には一度でガラス管を引き伸ばす一段引きを採用した．ガラス針の先端外直径は約 40  $\mu\text{m}$  である．極細のガラス針を用いることにより針と液

滴の付着力を抑制した。

## 2.2.8 液滴列移動装置

図 2-12 に液滴列移動装置の概略を示す。液滴列移動装置は液滴列支持装置をスライダ・クランク機構により移動させるための装置である。スライダ・クランク機構のロッド先端に液滴列支持装置を搭載し、燃焼容器内の実験位置までの移動や液滴列生成装置のガラス針鉛直方向への位置調整を行う。マイクロステップステッピングモータ（オリエンタルモーター，CRK523PMAPB）を用いることで液滴間隔に合わせた高精度な移動が可能であり，移動速度を調整することで液滴を脱落させずに連続して生成，移動させることが可能である。ステッピングモータは 1 パルスで  $0.09^\circ$  回転する設定を施した。そのため，2000 パルスで  $180^\circ$  回転し，スライダ・クランク機構は下死点から上死点まで移動する。移動距離は 60 mm である。パルス出力は絶対位置制御とした。絶対位置制御にすることにより，液滴の調整がしやすくなり，液滴生成失敗時の復帰が容易となる。下死点から上死点に移動する速度は 500 Hz とし，移動中の液滴を CCD カメラにより録画することで液滴の間隔，直径の計測を可能としている。上死点から下死点に移動する際の速度は 1000 Hz とした。

## 2.2.9 点火装置

図 2-13 に点火装置の概略を示す。点火装置には，熱面点火方式を採用した。点火線には直径 0.29 mm の鉄クロム線（ニラコ，651317）を用い，通電させることで第 1 液滴への点火を行った。鉄クロム線は外直径 0.6 mm，内直径 0.4 mm のステンレス管に挿入し，さらに外直径 1.2 mm，内直径 0.6 mm のステンレス管に挿入することで 3 段構造とした。これにより，点火線と第 1 液滴の間の距離を調整することが可能となり，一つの点火装置で様々な液滴間隔に対応できる。外直径 1.2 mm のステンレス管をベークライトで固定し，それを懸垂線液滴列支持装置のスライダ・クランクアーム接続部，液滴列移動装置のスライダ・クランク機構ロッド先端にボルト・ナットによる機械的締結で固定した。点火エネルギーの調整は PLC によって点火装置への通電時間を変化させることで行った。点火エネルギーが火炎燃え広がりに影響を与えないよう，点火装置への通電時間は点火が可能な最小限の時間に抑え，50 から 80 ms である。

## 2.2.10 燃料供給系

図 2-14 に燃料供給系の概略を示す。大窪らが実験を行っていた頃まで，液滴の生成にはステッピングモータにより作動するシリンジポンプと燃料の供給および吐出

を切り替えるシリンジポンプを使用していた[15]. そのため, 燃料供給系は大掛かりなものとなり, 実験装置外部に外付けする形をとっていた. 池山らは高圧実験のため, 燃料供給系を高圧容器内に挿入する内部モジュールへ統合を行った[16]. 燃料を送り出すポンプには耐薬品性ピエゾマイクロポンプ (高砂電気工業, APP-20KG) を用いた. それに伴い, PLC からの信号でピエゾポンプの駆動を行うため自作の制御装置も用いた. 回路図を図 2-10 に示す. ピエゾポンプの駆動にはマイクロポンプコントローラ (高砂電気工業, MPC-200A) を使用した. 燃料液滴生成の際のポンプ吐出量の調整はポンプの駆動時間を変化させて行った. ポンプ駆動時間の制御は PLC から自作のポンプ制御装置への信号入力時間を変化させて行った.

### 2.2.11 制御装置

実験装置の制御にはプログラマブル・ロジック・コントローラ(PLC, シーケンサ)を用いた. PLC は AC 電源ユニット, CPU ユニット, 拡張入出力ユニット, アナログ入力ユニットおよびイーサネットユニットで構成される. PLC を用いることで内部モジュール, 光学系, 圧力計の制御および記録が可能である. また, 一回の実行命令で複数の複雑な工程の作業を一度に行うことが可能である.

### 2.2.12 ラダープログラム

PLC にはラダープログラムを用いた. プログラムの作成にはラダープログラミングサポートソフトである KV STUDIO Ver.9 を用いた. また, タブレット PC と VT STUDIO Ver.7を用いて, タブレット PC でのタッチ操作とラダープログラムをリンクさせることで実験装置の操作性を向上させた.

### 2.2.13 圧力センサ

圧力センサはセンサヘッド (キーエンス, AP-13S) とアンプユニット (キーエンス, AP-V80) により構成されている. AP-13S の定格圧力範囲は 0~1 MPa(ゲージ圧)である. センサヘッドからの信号はアンプユニットを介して A/D 変換ユニットに入力される.

### 2.2.14 光学系

図 2-15 に光学系の概略を示す. 撮影装置は液滴列生成部を観察するための CCD カメラ (Watec, WAT-535EX) およびバックライト (キーエンス, CA-DSR), 燃焼容器内の燃焼現象を観察するための高速度カラービデオカメラ (Vision Research,

Phantom Miro 3) および明滅バックライトから構成されている。明滅バックライトは実験内容に合わせて明滅と常時点灯を切り替えることができる。レンズは、液滴列生成部観察用 CCD カメラには工業用単焦点レンズ（タムロン社製，21HA）を，燃焼現象観察用高速度カラービデオカメラにはマクロズームレンズ（Computar, MLH-10X）とリヤコンバーターレンズ（VS Technology, SV-5.0XV）を用いた。それぞれのカメラの拡大率の測定はガラススケール（京葉光器社製，S-207）を用いて行った。

### 2.2.15 CCD カメラ

液滴の生成を観察するために CCD カメラを用いた。光源には LED バックライトを用いた。LED バックライトには可変抵抗を取り付け，輝度の調整を可能とした。CCD カメラからの映像信号は画像伝送装置（アイゼック，LAN-NTSC264+）を用いて無線 LAN ルータに送られる。画像伝送装置付属のソフトウェアである TVMS Ver.1.06.5503 を用いることによってパーソナルコンピュータ上でリアルタイム映像を見ることが可能であり，任意のタイミングでの録画(画像サイズ 720×480 pix, 30 fps, AVI 形式)も可能である。

### 2.2.16 高速度カラービデオカメラ

高速度カラービデオカメラ Phantom Miro 3 は耐衝撃設計がされており，100 G までの加速度に耐えることができる。最大 111,111 fps までの撮影速度で撮影が可能(画像サイズ 32×16 pix 時)であり，イメージセンサーは 800×600 pix, ISO 感度は 4800, 色深さは 12 bit である。実験時の撮影速度は過去の実験条件の液滴間隔と撮影速度の比から 2000 fps とした。露光時間はオープン(497.5  $\mu$ s)とし，画像サイズは 512×384 pix とした。撮影のトリガには Phantom Miro 3 に搭載されているトリガ入力に PLC から出力信号を微小重力検知と同時に出した。撮影した映像は無線 LAN インターフェースを経由してパーソナルコンピュータに転送した。高速度カラービデオカメラのモニタリング，操作，映像転送には付属のソフトウェアである PCC Ver. 2.8.761.0 を用いた。

### 2.2.17 無線 LAN インターフェース

無線 LAN を用いることで画像伝送装置に送られてきた映像や高速度カラービデオカメラの映像の表示，PLC の制御・ラダープログラムの転送などを実験装置の入った落下カプセルを吊り上げた状態でもワイヤレスで行うことが可能である。無線 LAN ルータには WHR-300HP（バッファロー）を用いた。

## 2.2.18 電源系

落下塔を利用した微小重力実験では実験装置を落下させるという特性上，商用電源を延長ケーブル等でそのまま供給することは困難である．そこで，実験装置に必要な AC100 V 電源を UPS(無停電電源装置，富士電機，DL5115-750JL)により供給した．地上での実験準備中は UPS を商用電源に接続し，実験装置への電源供給および内部バッテリーの充電を行う．微小重力実験時は UPS を商用電源から切り離し，内部バッテリーから実験装置へ電源供給を行う．UPS から出力された AC100 V はスイッチング電源(AC-DC コンバータ，表 2-32，表 2-33)を用いて DC24 V と DC12 V に変換し，AC アダプタを使用している装置を除く各装置に供給される．点火装置については瞬間的に大きな電流を必要とするため，27 A 出力のスイッチング電源(TDK ラムダ，HWS300-12)を単独で用いて UPS の AC100 V から DC12 V に変換し供給した．

## 2.2.19 高圧空気系

図 2-16 高圧空気系の概略を示す．給気はオイルフリーエアコンプレッサ(日立産機社製，0.2LE-8S)からの空気を取り入れている．高圧容器との間にフィルタコンビネーションユニット(日本ピスコ，UAM300-02-MD)を介し，圧縮空気に含まれる塵や水分を除去した．また，吸気系には高圧容器内の圧力を高めるための吸気口と別に燃焼容器内の掃気を行うための掃気口を設けた．掃気口は内部モジュールフランジ側から燃焼容器開端部へ直接ステンレス管を延ばしており，効果的に燃焼容器内の燃焼ガスを掃気できるように工夫されている．掃気系にはボールバルブ，ニードルバルブが取り付けられている．ニードルバルブの開度を調整し，液滴列を掃気口延長上へ移動させることで誤って懸垂された液滴を飛ばすことが可能である．排気は高圧容器から継手を介してステンレス管により行う．排気系にはボールバルブ，ニードルバルブが設けられており，ニードルバルブを用いることで，急激な高圧容器内の減圧を防ぎピエゾポンプ内の素子を損傷させずに排気が可能である．また，高圧容器には安全弁が取り付けられており，高圧容器内の圧力が圧力センサの耐圧を上回る場合には自動的に排気が行われるように設定されている．

## 2.3 微小重力環境設備

実機の噴霧の液滴は数 $\mu\text{m}$  から数十 $\mu\text{m}$  であるのに対して，液滴列燃焼実験では液滴直径 0.5~1.0 mm 程度を用いる．これは，現象の時間的・空間能を上げて観察を容易にするためである．しかしながら，液滴直径を大きくすると自然対流を誘起してしまい，実機の現象とは異なってしまふ．そこで，微小重力環境で実験を行う．こ

れにより，自然対流の影響を排除し，大きな液滴を用いても実機と同じ現象を観察することができる．本論文における微小重力実験は 2 か所の落下塔を使用して実施した．

### 2.3.1 小型落下塔

微小重力環境を実現するため，日本大学生産工学研究所にある小型落下塔を用いた．落下塔は自由落下法によって微小重力環境を実現させる装置である．自由落下法には真空中をカプセルが落下する方式と大気中を落下する方式の 2 方式がある．小型落下塔は大気中を落下する方式である

図 2-17 に小型落下塔の概略を示す．落下塔は，全高 8.6 m，自由落下距離 5.4 m，減速部 0.9 m であり，約 1.1 s の微小重力環境を実現できる．落下塔内部にある 2 本のガイドワイヤは鉛直に設置されており，昇降時および着地時のカプセルの回転を防ぐ．カプセルの昇降はウィンチによって行われる．ウィンチは落下塔脇に設置されており，ワイヤが，落下塔上部に取り付けられた 2 つの平滑車を介してカプセル切り離し装置に接続されている．また，落下塔上部にはカプセル切り離し装置を固定するためのガイドレールが設置されている．ガイドレールにはリミットスイッチが取り付けられており，カプセル切り離し装置がガイドレールに進入してリミットスイッチが作動すると，ウィンチは自動的に停止する．カプセルの落下衝撃を効率よく吸収するため，落下塔底部減速室内はスポンジマットおよびバランスボールにより構成され，スポンジマットは，エアーダンパ構造となるように配置する．

図 2-18 に落下カプセルの概略を示す．落下カプセルは外カプセルと内カプセルの二重構造となっており，実験装置は内カプセルに搭載されている．落下前，内カプセルは外カプセル内の上部に位置し，両者の底部には 150 mm の距離がある．カプセル落下中，外カプセルは空気抵抗を受けるため，自由落下より落下速度が遅くなり，両者は次第に接近し着地時に接触する．このような構造により実験装置が搭載されている内カプセルの対気速度はきわめて小さく，空気抵抗による微小重力環境の悪化を抑制できる．内カプセル内部の重力加速度は  $10^{-4} G_0$  程度である．外カプセルの構造材にはアルミニウム合金を用いた．直径 1.0 m，全長 1.4 m，質量約 100 kg であり，底部には落下時の空気抵抗を低減するため木製の円錐台が取り付けられている．内側底部には，内カプセル衝突時の衝撃を吸収するためのスポンジと，跳ね上がり防止のための 7 つの吸盤が設置してある．

装置が搭載されている内カプセルは，直径 0.8 m の天板，底板および四本の柱で組まれている．天板上には，AC 100 V 供給用端子 (Connector1, 4Pin)，シーケンサ用端子 (Connector2, 8Pin) がある．Connector1 と Connector2 は落下時に切り離される．

図 2-19 にカプセル切り離し装置の概略を示す．切り離し装置は，エアシリンダ，電磁コイル，ソレノイドバルブ，エアタンクからなる．カプセルの切り離しは，カ

プセルに取り付けてある吊り板から 2 本のピンを引き抜くことでカプセルを切り離す。カプセルの重量はピン A のみで支えており、ピン B は安全用のピンである。ピンの操作は落下塔脇のコントロールパネルで行う。コントロールパネルのスイッチ配置を図 2-20 に示す。パネル 1 にあるスイッチは安全装置に関するものである。SW1P と SW1S を「ON」にし、SW1R リセットボタンで安全装置を解除する。パネル 2 は切り離し装置の制御用スイッチであり、実験時は「RELEASE」側に、落下塔内で作業をするときなど通常は「SET」側にしておく。パネル 5 の SW5P は DC 5 V の電源装置のスイッチである。「ON」にすることで、パネル 1 へ電力が供給される。パネル 6 の二つのボタン (SW<sub>6B</sub>, SW<sub>6R</sub>) は落下カプセルを切り離すためのスイッチである。SW<sub>6B</sub> を押すと切り離し装置の電磁コイルが働き、ピン B が解除される。SW<sub>6R</sub> を押すことでソレノイドバルブが開き、エアシリンダが作動することでピン A が解除される。実験時は、SW<sub>6B</sub> を押しながら SW<sub>6R</sub> を押すことで、カプセルを切り離す。

### 2.3.2 大型落下塔 (MGLAB)

小型落下塔が発生させる微小重力時間よりも長い時間が必要となる実験条件の場合、岐阜県土岐市に所在する (株) 日本無重量総合研究所の無重量落下実験施設 (Micro-Gravity Laboratory of Japan, 以下 MGLAB) を利用した。この落下施設は、落下カプセルを真空中で 100 m 自由落下させることにより、落下カプセル内に良質で安定した微小重力環境を作り出すことができる。微小重力時間は、4.5 秒間である。落下塔には、落下実験を行うための真空チューブ、カプセル切離装置、回収装置、フリクシオンダンパおよび落下直前、直後のカプセルを支援するための支援装置が設置されている。真空チューブは、自由落下部と制動部で構成されており、全長は 150 m である。このうち自由落下部は 100 m であり、制動部は 50 m である。落下カプセルは、電磁石によって落下塔の頂部に吊り下げられた後、落下信号で落下が開始される。制動部では、円形型フリクシオンダンパにより、小さな衝撃力で、落下カプセルの制動を行うことができる。制動部に落下・静止したカプセルは、自動で把持され、引き上げ・回収される。

落下カプセルに設置されたシーケンサから本実験装置のシーケンサにトリガ信号を送ることにより、落下実験における各装置の操作を行った。実験装置の状態はコントロールルームで確認でき、状況に応じた制御を行うことができる。落下シャフト内を真空にし、制動装置などの準備が完了した後、落下カプセルのコネクタ分離を行う。コネクタ分離後、落下カプセルは電磁石のみで吊り下げられた状態となる。カプセルの落下は実験実施者の任意のタイミングで行うことができる。 $\mu\text{G}$  検知から制動 G 検知までの約 4.5 秒間の微小重力時間の間に液滴列の燃焼を終了させる。落下塔施設の制限として、制動 G 検知から 2 秒後に実験装置に供給されている落下

カプセルの内部電源が切断されてしまう。落下カプセル内に搭載されている施設側のバッテリーに DC24 V で作動する高速度カメラを直接接続することで、メモリに保存されている動画データを保持した。

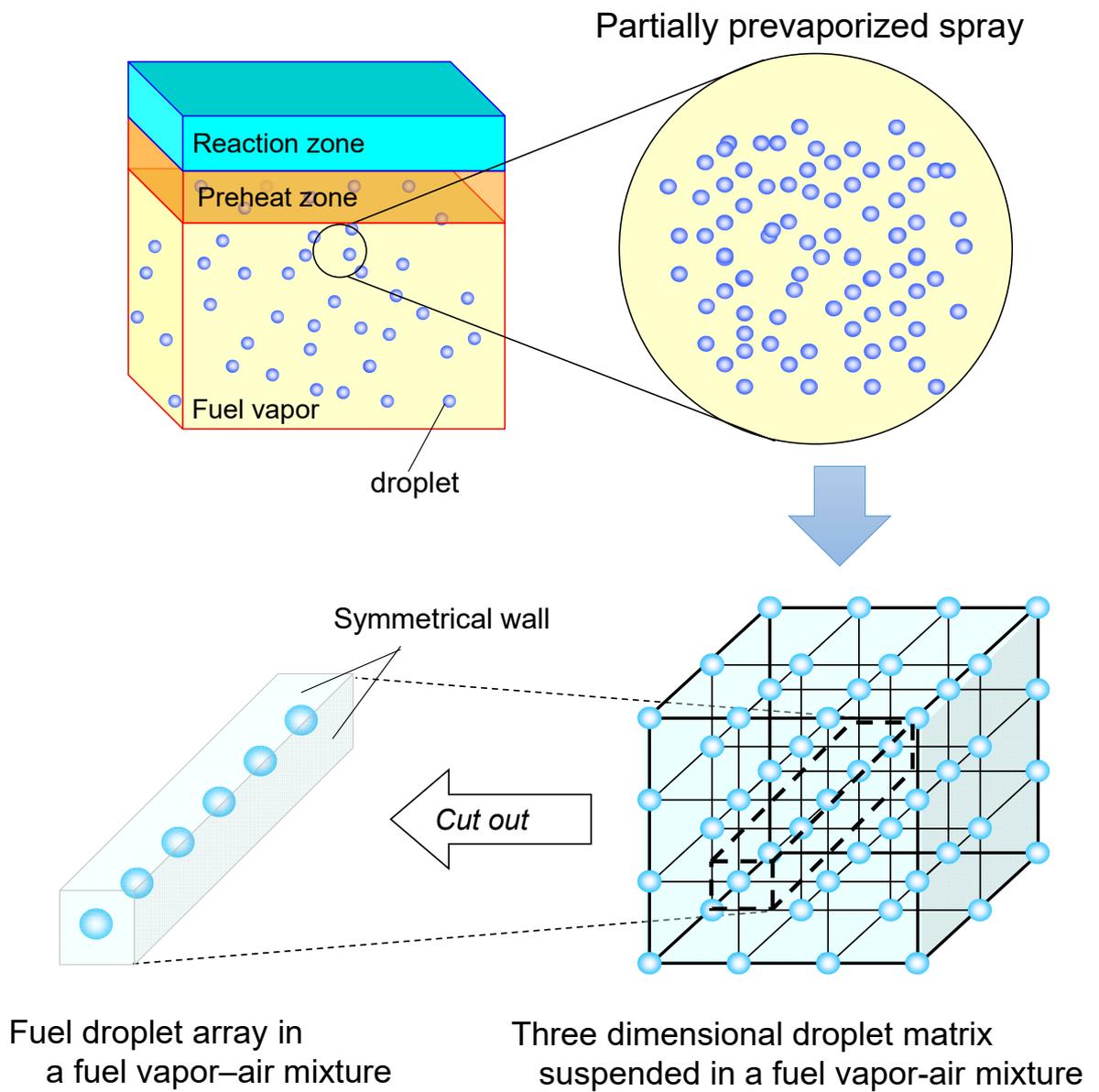


図 2-1 実験モデル

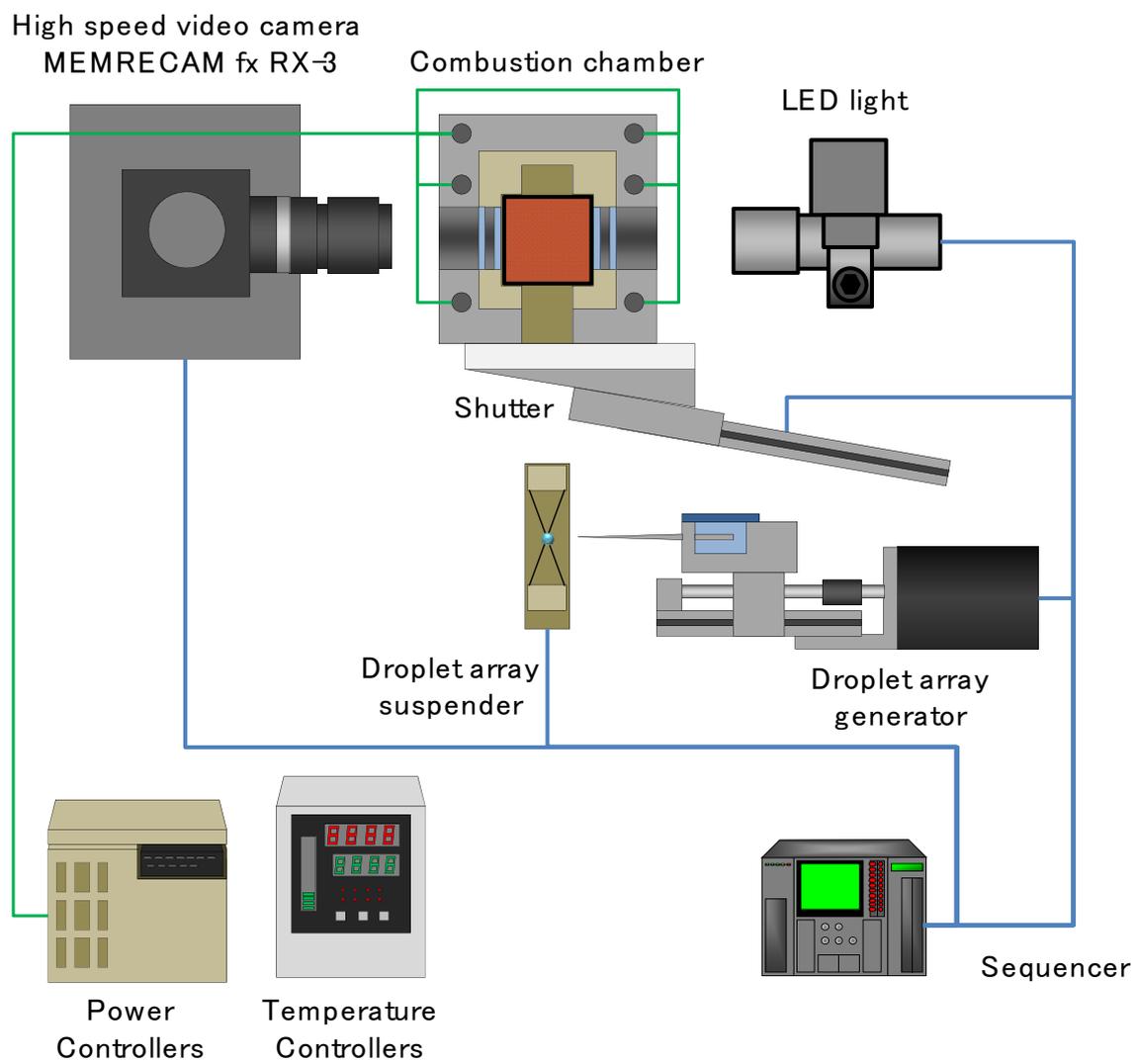


图 2-2 实验装置概略

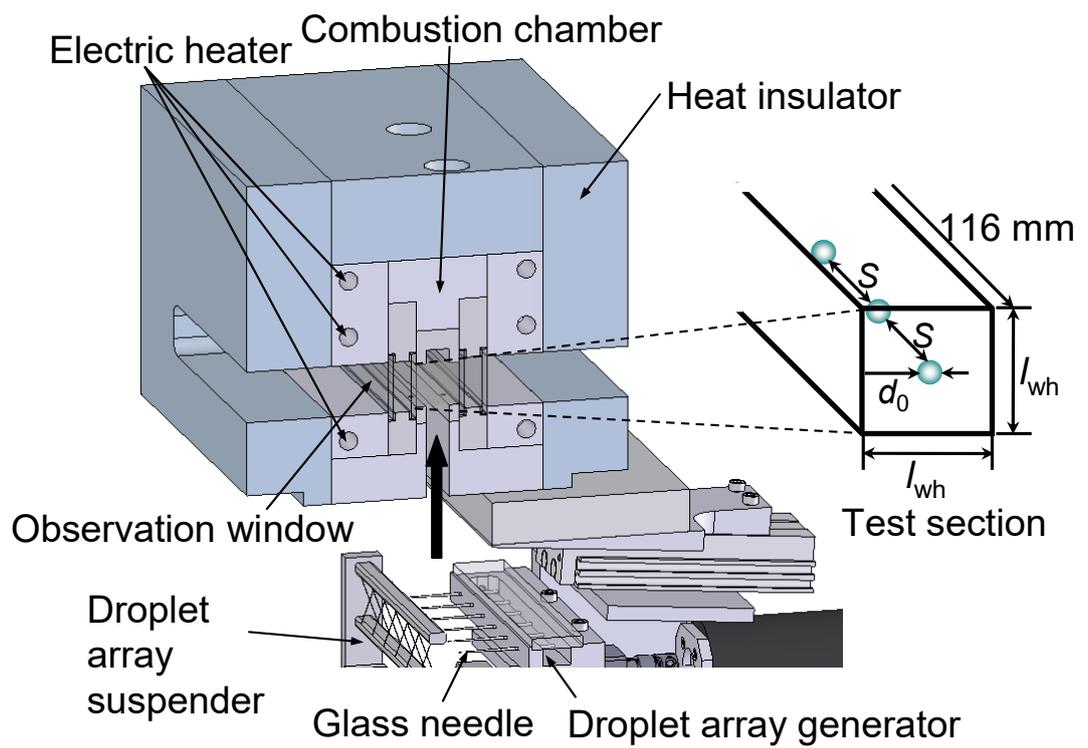


图 2-3 燃烧容器概略

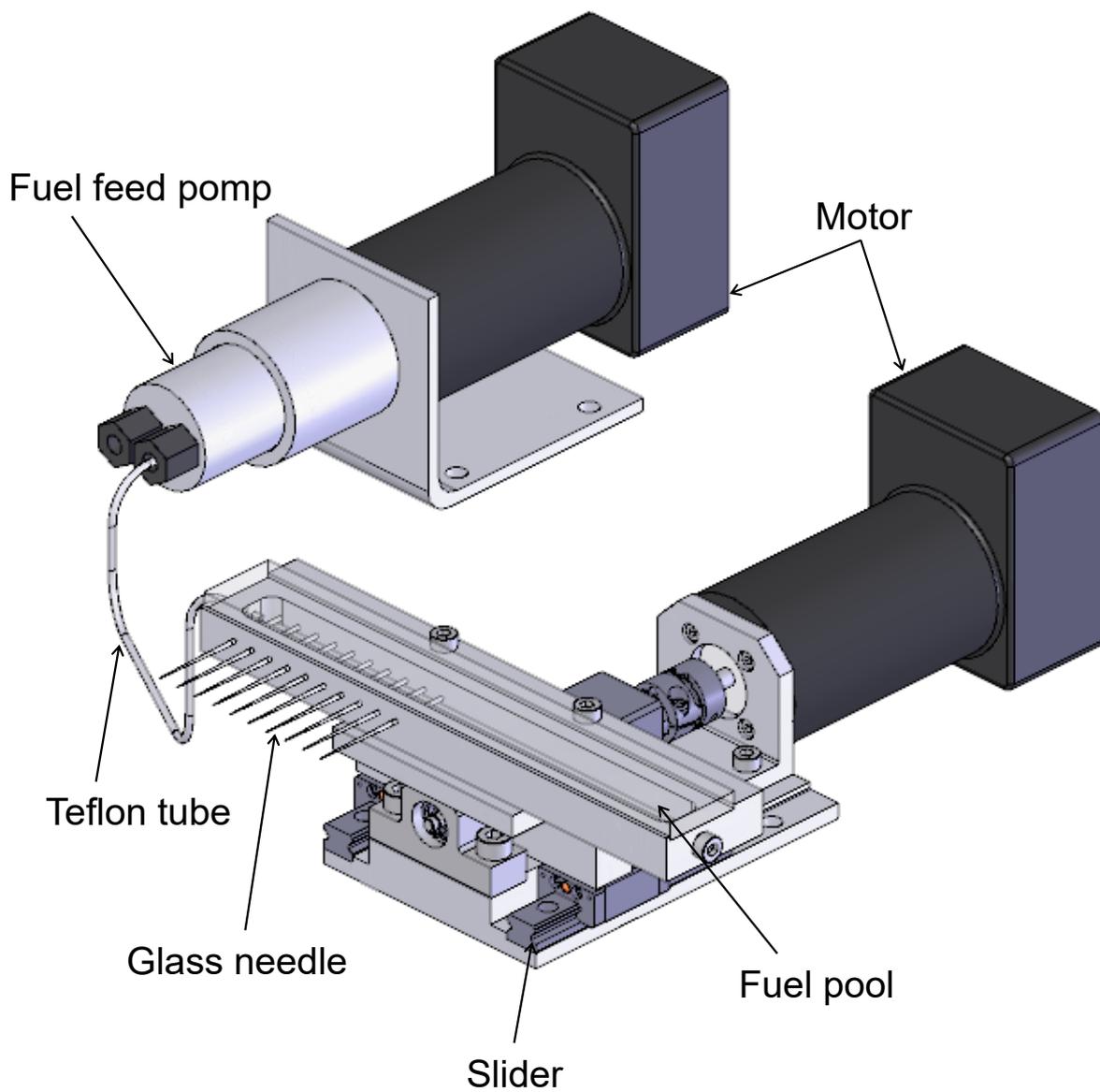


图 2-4 液滴生成装置

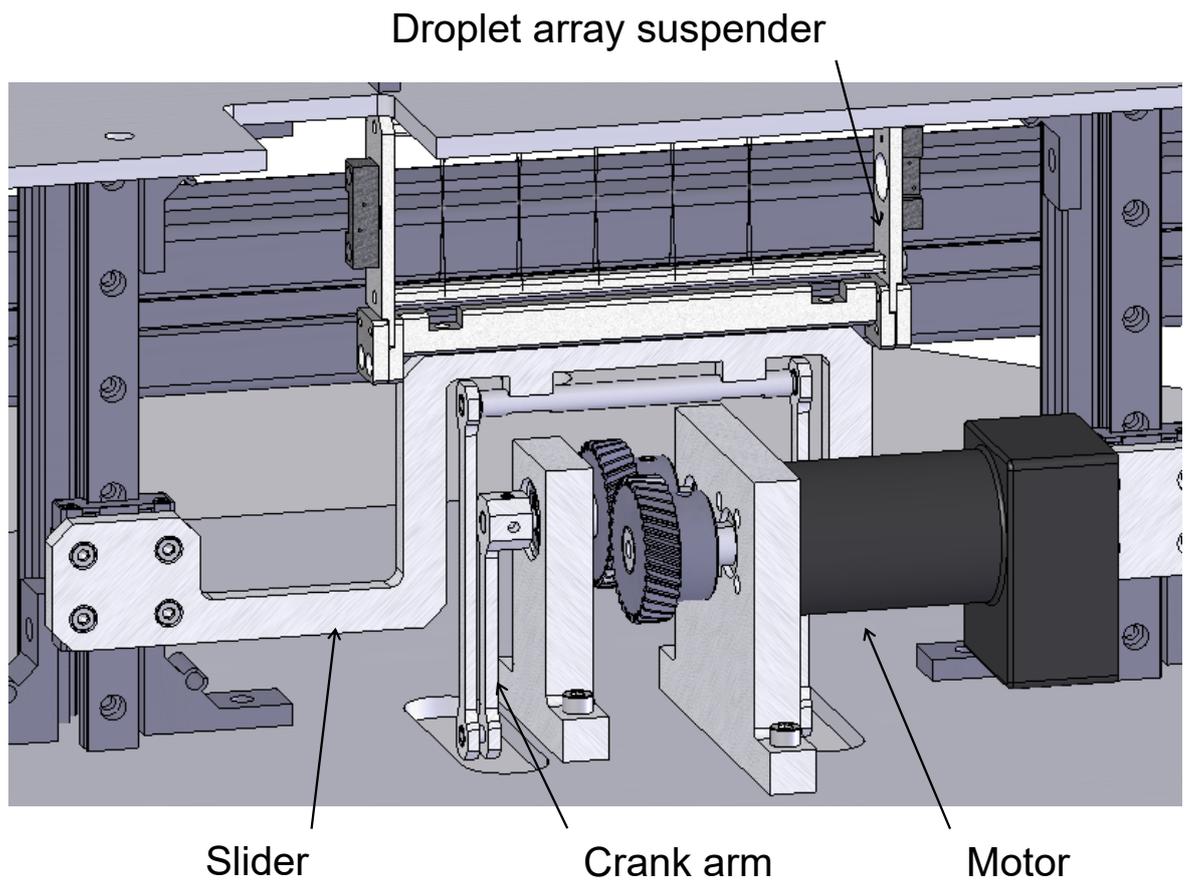


图 2-5 液滴列移动装置

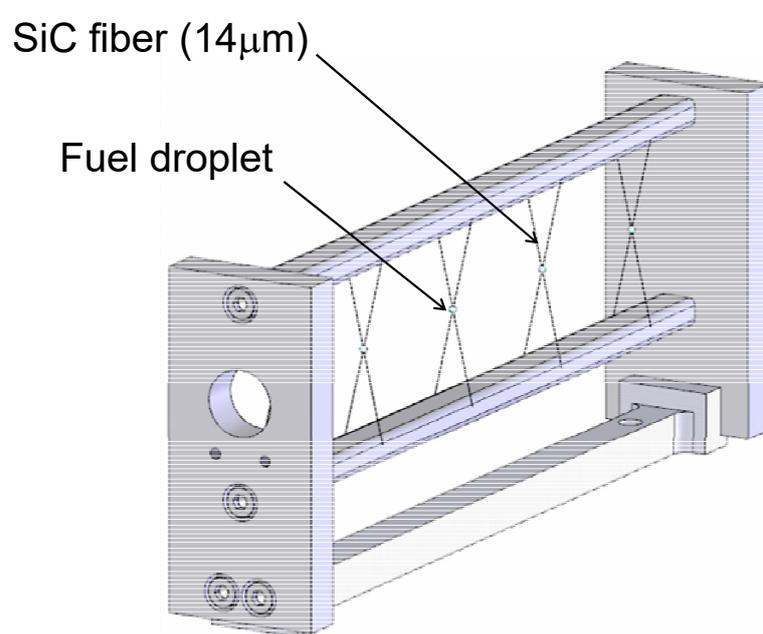


图 2-6 液滴列支持装置

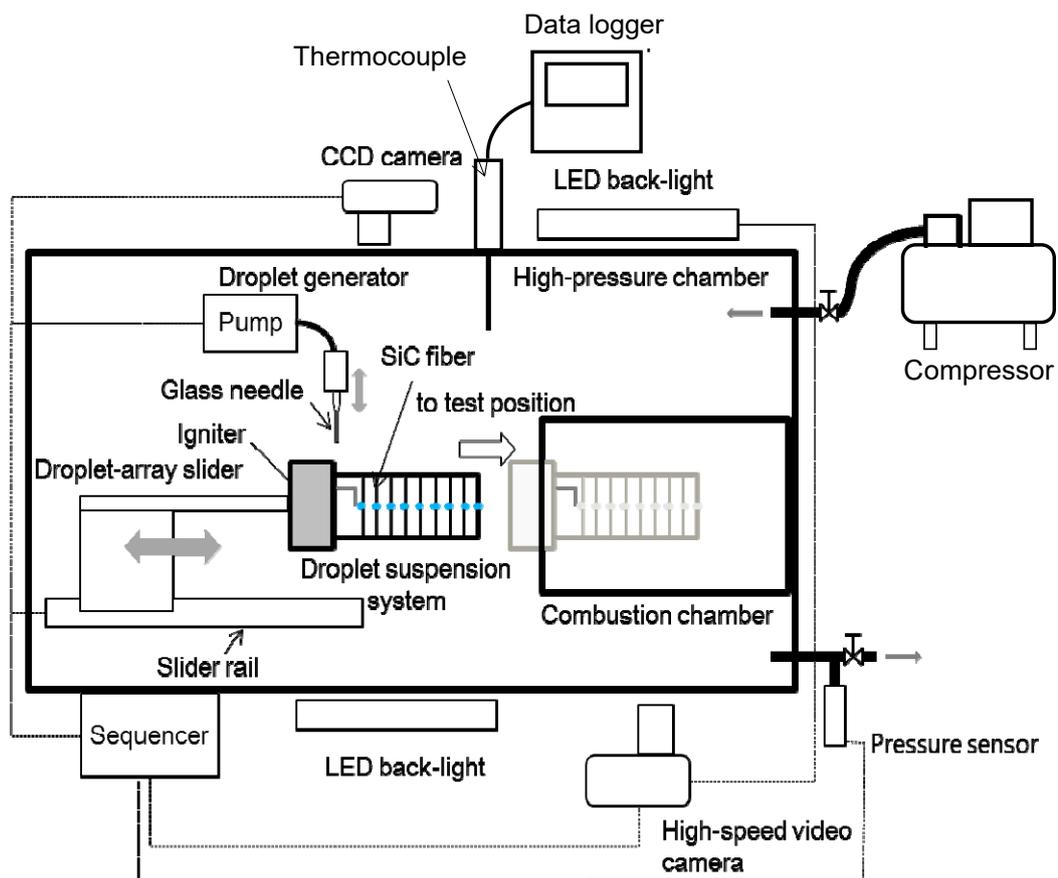


図 2-7 実験装置概略

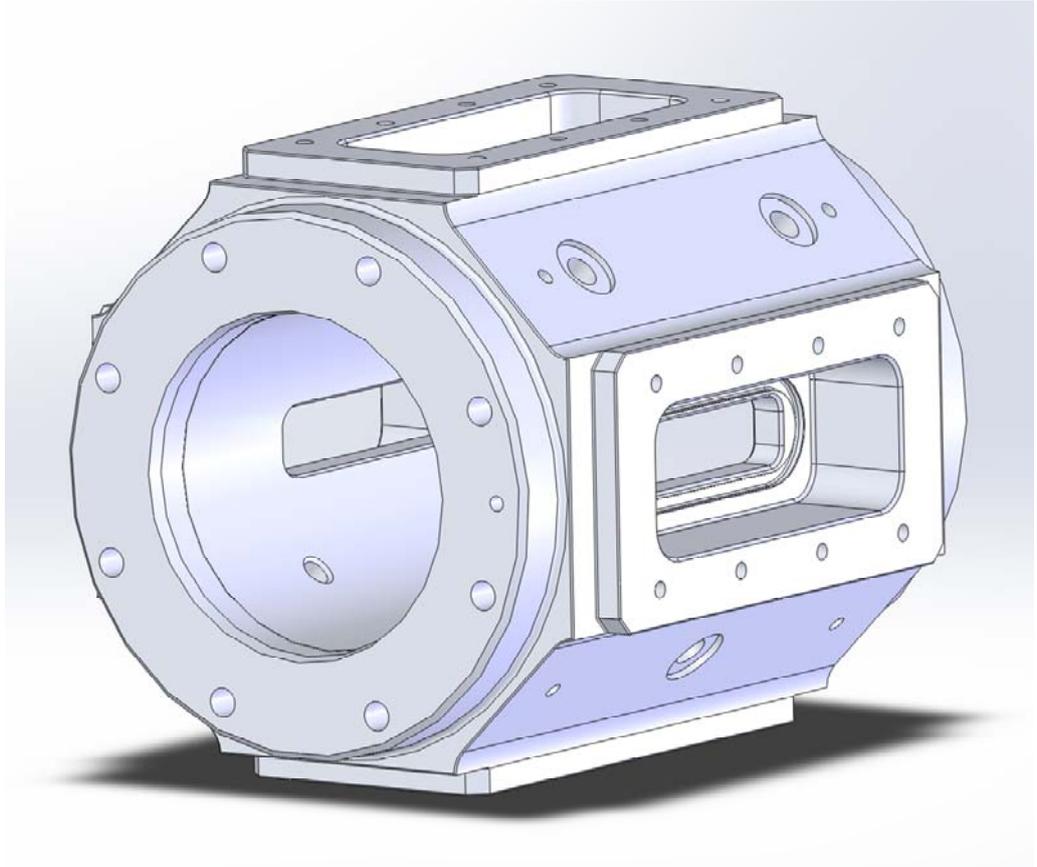


图 2-8 高压容器外觀

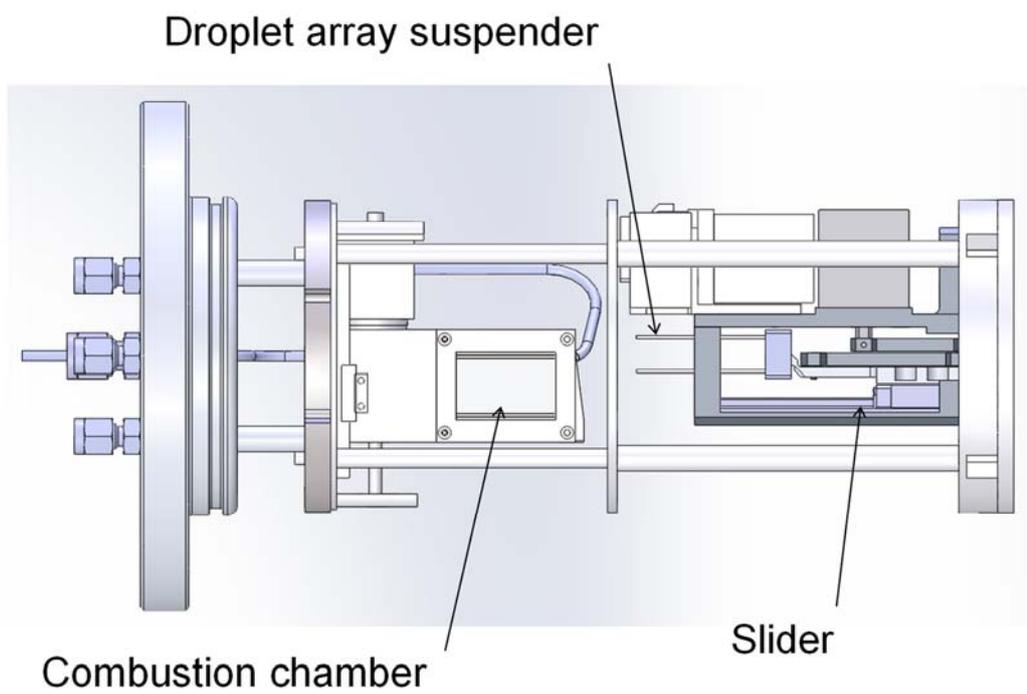


図 2-9 内部モジュール

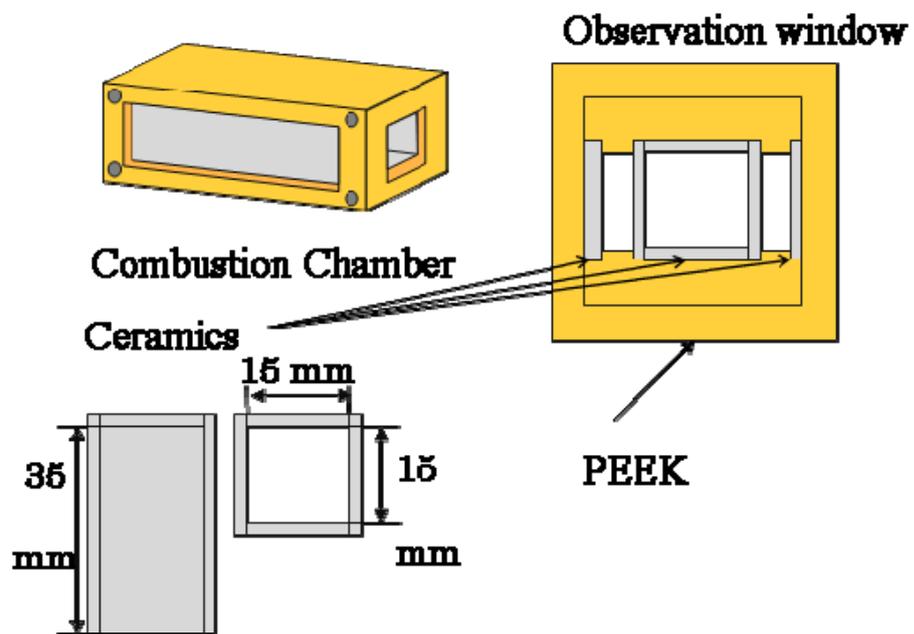


図 2-10 燃焼容器詳細

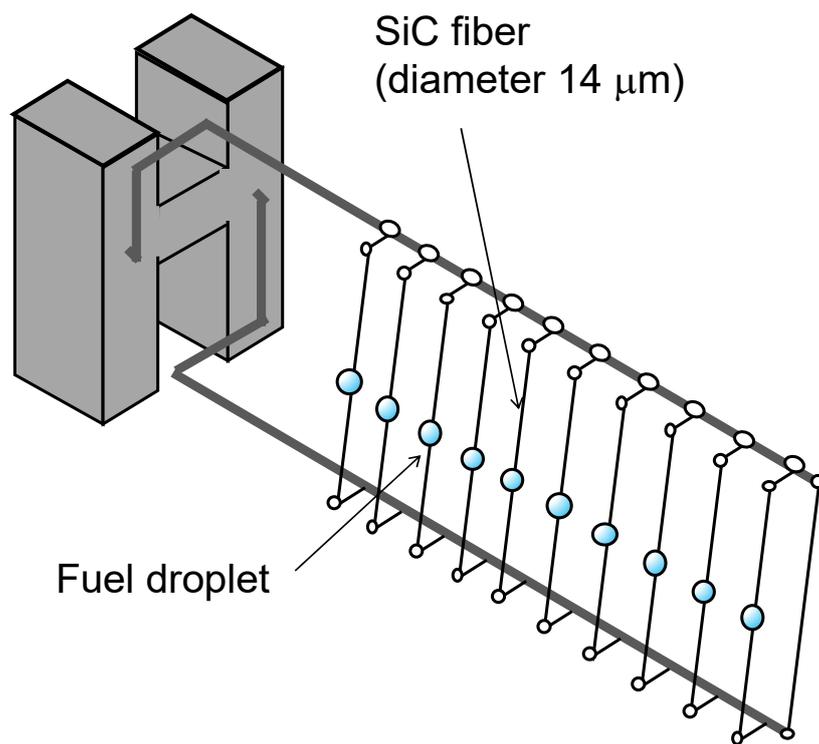


图 2-11 液滴列支持装置

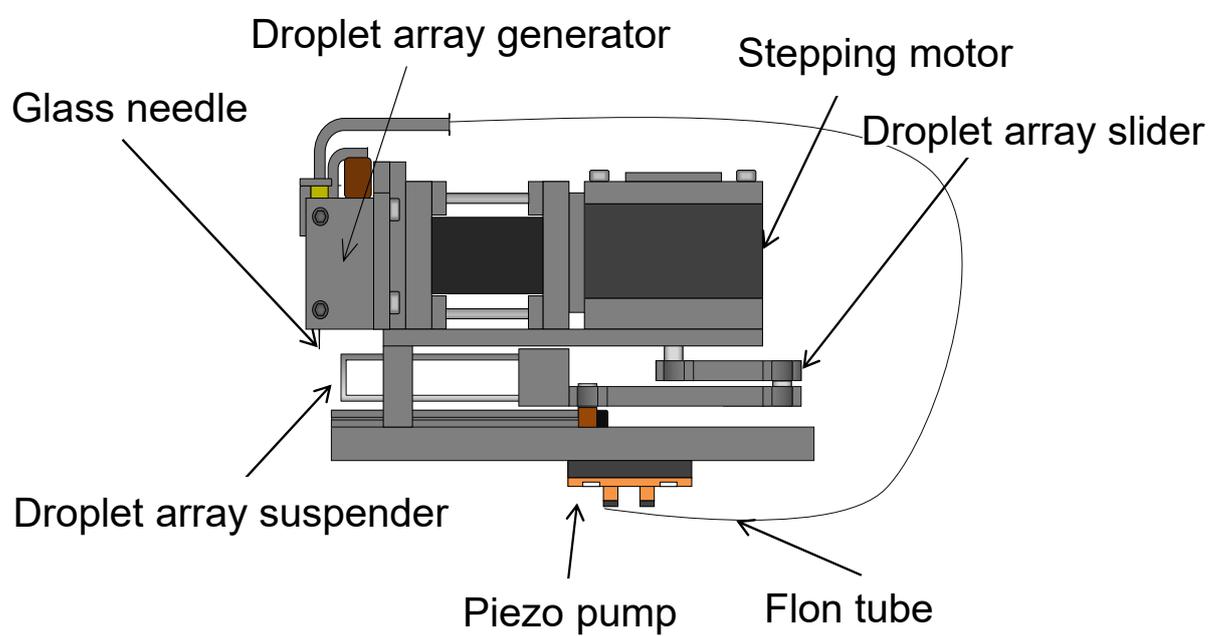


図 2-12 液滴列生成・移動装置

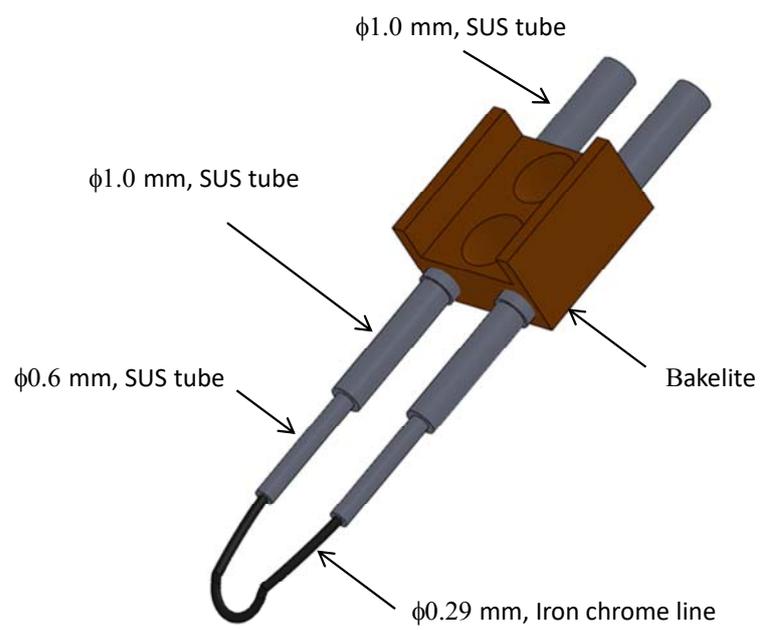


图 2-13 点火装置图

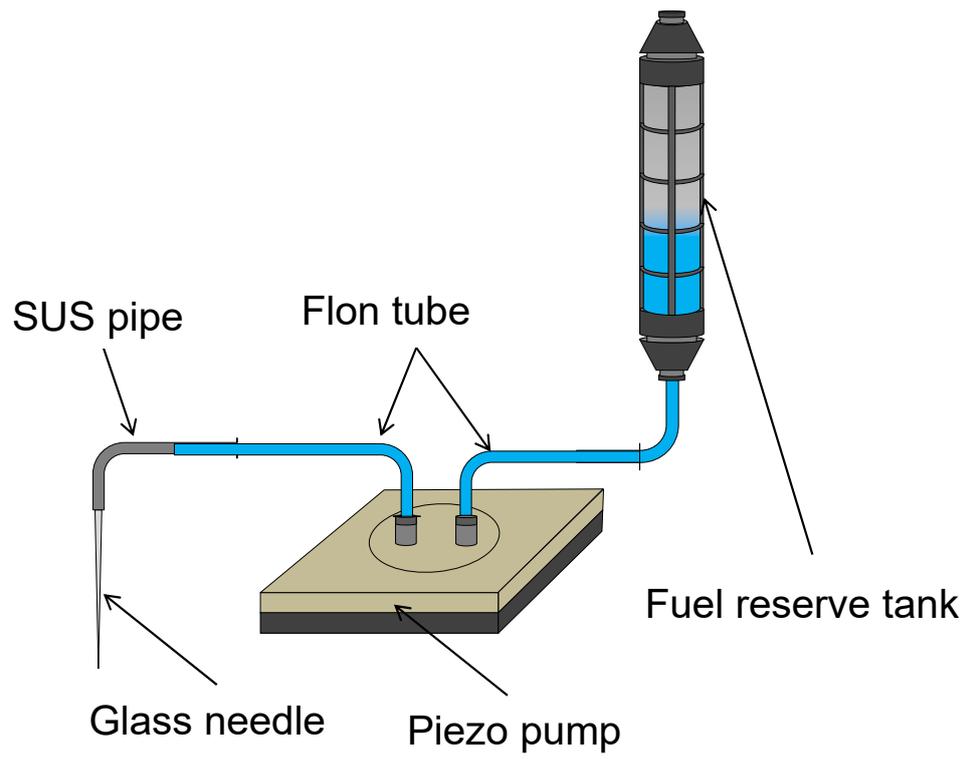


図 2-14 燃料供給系

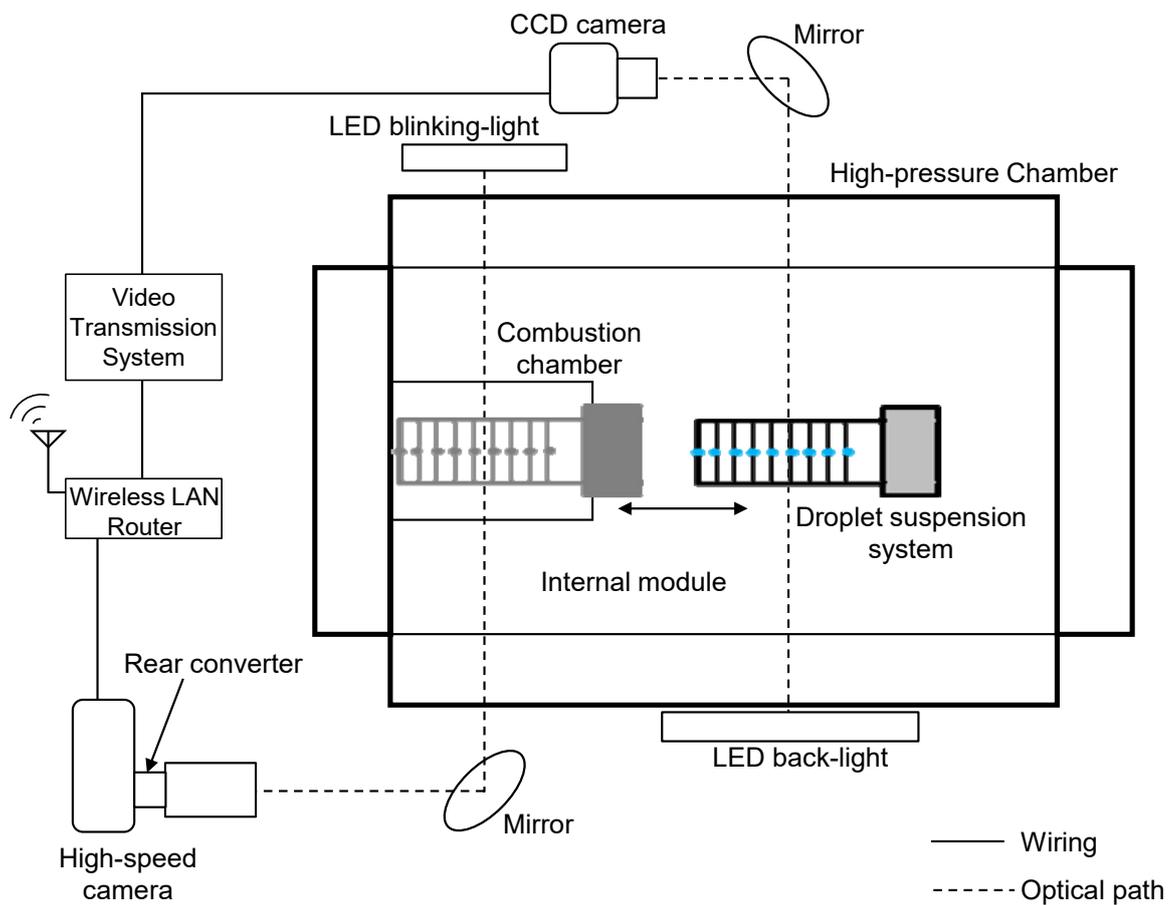


图 2-15 光学系概略

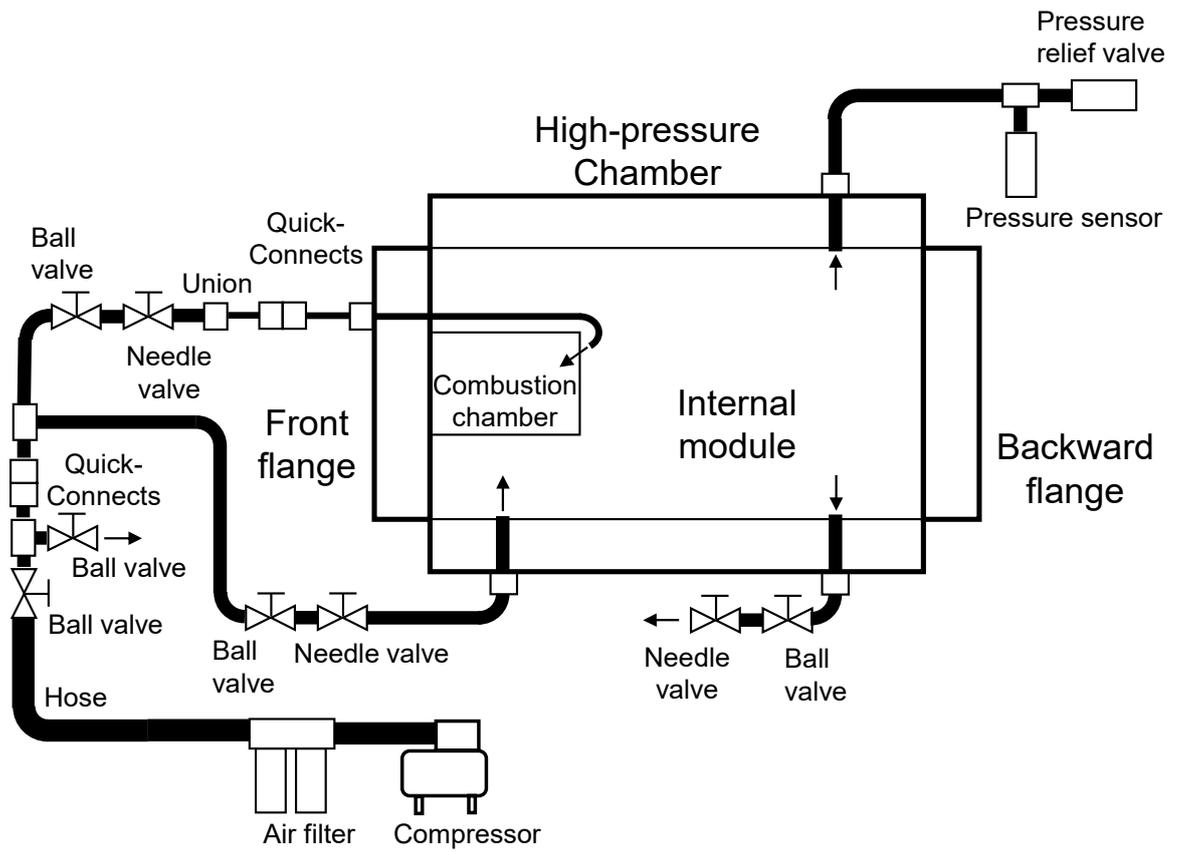


图 2-16 高压空气系概略

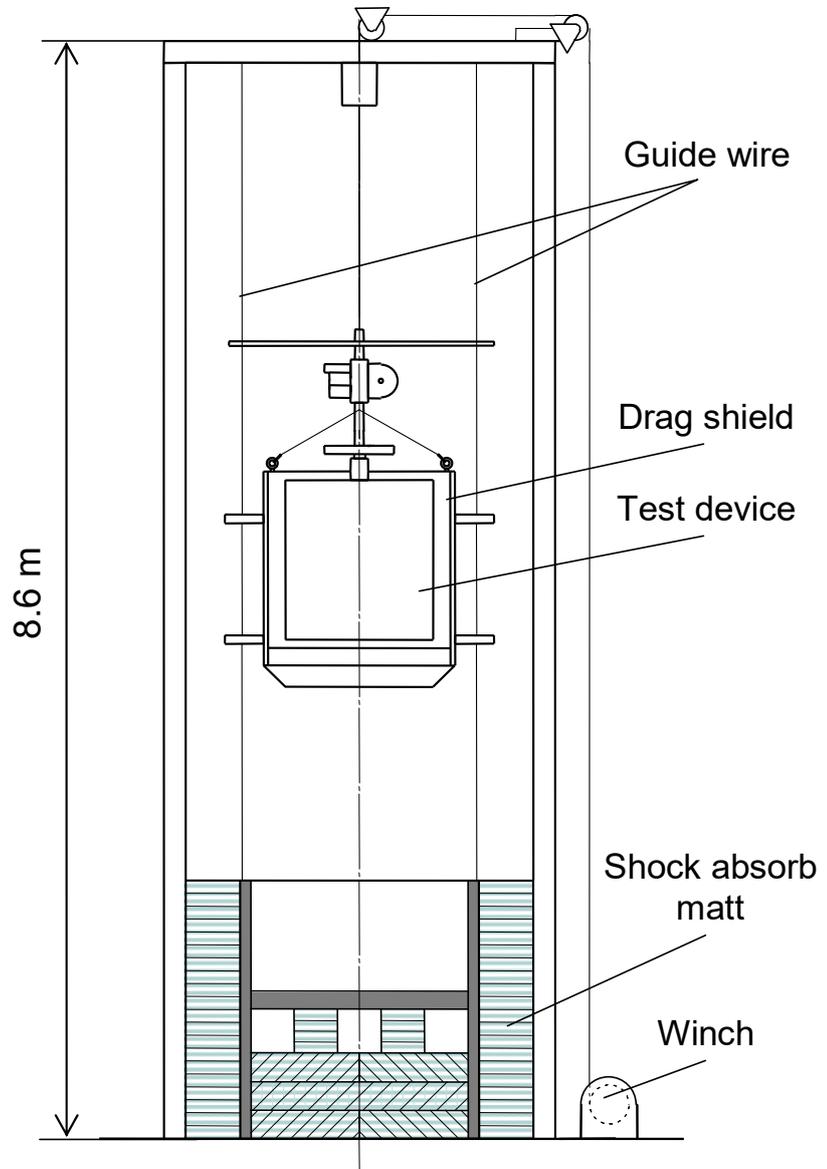


图 2-17 小型落下塔概略<sup>29)</sup>

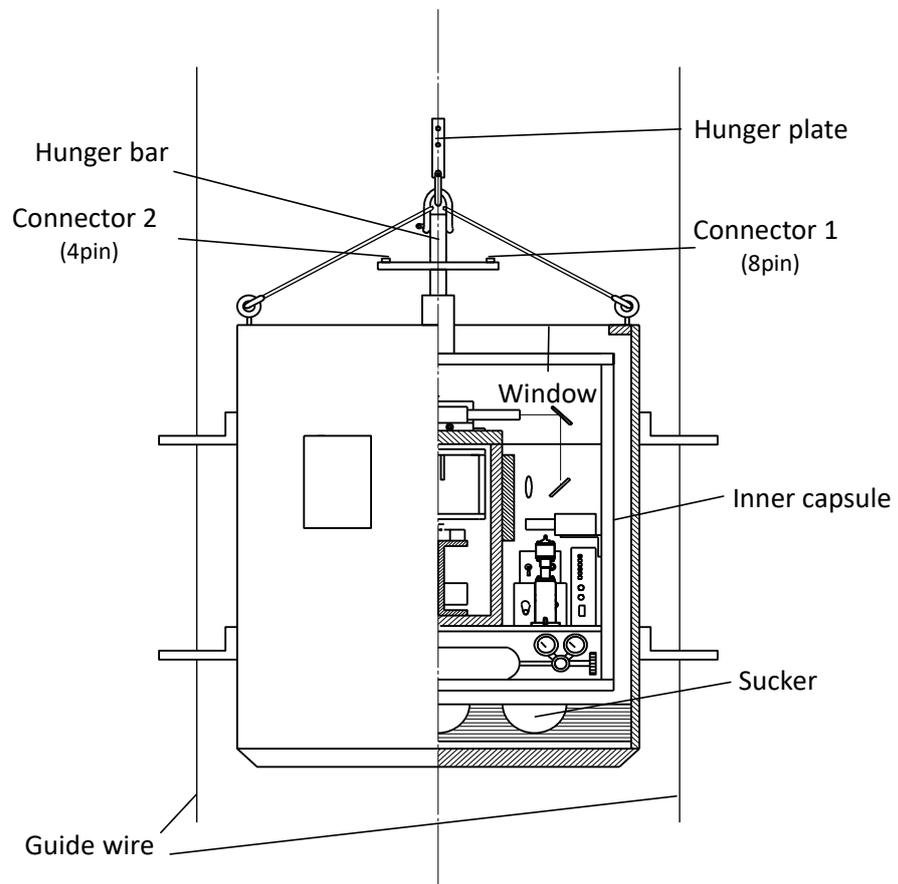


図 2-18 小型落下塔カプセル概略<sup>29)</sup>

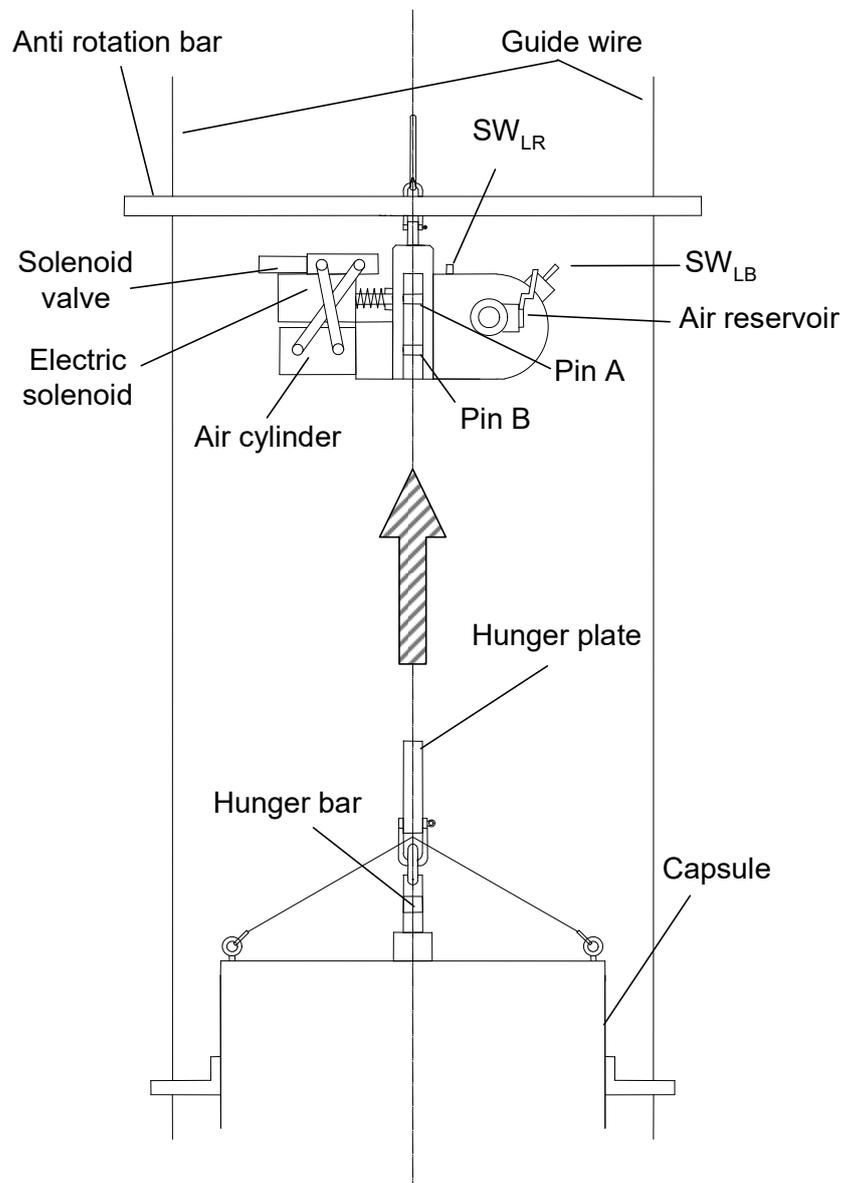


図 2-19 カプセル切り離し装置概略<sup>29)</sup>

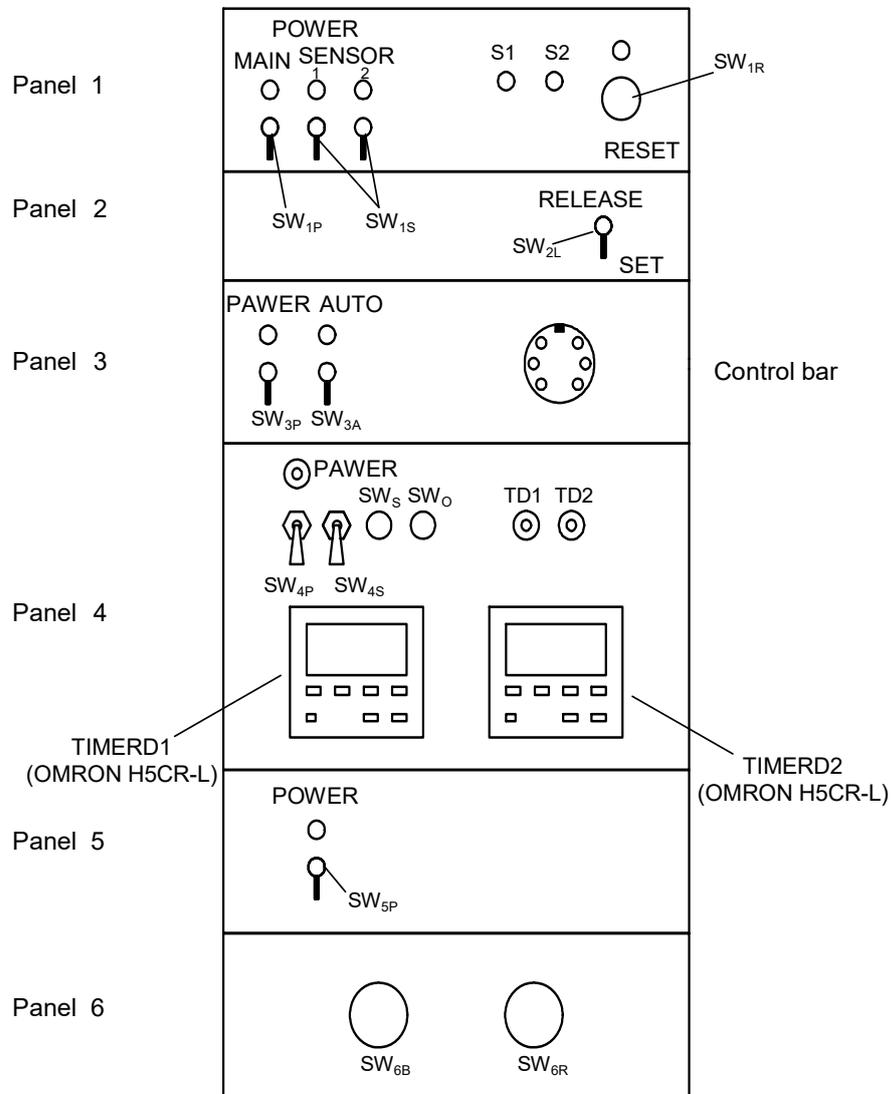


図 2-20 落下操作パネル<sup>29)</sup>

## 第3章 燃え広がりによぼす気体当量比の影響（通常重力環境）

### 3.1 緒言

噴霧燃焼では微粒化した液滴は蒸発しながら火炎面に進行し燃焼すると考えられる。液滴列の火炎燃え広がりでは予蒸発量を条件とした研究は一部であるものの、気体当量比をパラメータとした研究はない。燃料液滴列の周囲を燃料蒸気-空気予混合気で満たし、燃焼実験を行った結果を示す<sup>30,31)</sup>。また、燃焼容器形状を工夫することで、液滴列で得た知見を3次元へと拡張して議論することを可能にした。本章では、通常重力環境で実施した結果を示す。液滴列の火炎燃え広がりには自然対流の影響を受けるため、微小重力の予備実験として取り扱う。

### 3.2 実験条件および実験方法

実験装置は2.1項の気体当量比依存性検証用の装置を使用した。通常重力実験では自然対流の影響を受けにくい予混合火炎伝播が生じる気体当量比も含めて、広い範囲で気体当量比を変えて実験を行った。表3-1に実験条件を示す。

#### 3.2.1 等価液滴直径

液滴直径の計測は通常重力環境で行う必要があるが、通常重力環境下では液滴は重力により鉛直方向に伸びた回転楕円体となる。液滴の直径の定義は、この回転楕円体の体積と等しい体積を持つ球の直径とした。

#### 3.2.2 初期液滴直径

液滴列を構成する10個の液滴全てについて、予め液滴直径を計測した。液滴の計測は高速度カメラ付属の画像解析ソフト「fx-link」で行った。絞りを全開にして光学系を調整した後、ターゲットマーカを撮影し、スケールを得る。各液滴を撮影し、X方向(懸垂線に対して垂直方向)、Y方向(懸垂線に対して平行の軸)それぞれの大きさを計測する。Y方向を回転軸として、等価液滴体積直径を算出する。

液滴直径のX方向の液滴直径を $a$ 、Y方向の液滴直径を $b$ とすると

$$d_0 = (a^2b)^{1/3} \quad (3.1)$$

として定義できる。

初期液滴直径 $d_0$ は液滴直径第3~9液滴の直径の平均とした。初期液滴直径は液滴

生成用のガラス針を交換する時に燃料ポンプの吐出量および、ガラス針の先端直径を調整することで、±10%以内に収まるよう生成した。生成される液滴の直径の再現性は確認している。

### 3.2.3 液滴直径の自動計測

液滴の拡大観察実験においては、液滴の時々刻々の直径を計測する。その場合には、前項の方法では非常に時間を要するため、自作のプログラムにより液滴直径を計測した。液滴直径の自動計測は図 3-1 に示すように、デジタルデータに変換した画像を 5 ピクセルラインごとに分割し、各分割領域の輝度を x 軸方向に平均してその分割領域の y 軸方向輝度分布を得た。得られた輝度分布から、分割領域の雰囲気部平均輝度と液滴部平均輝度を 1 対 2 に内分する輝度を示す最もお互いに離れたピクセルの組みの位置を求め、これを液滴の輪郭位置とした。各分割領域において液滴の輪郭を求めた後、それらを最小自乗法により y 軸と平行な軸をもつ楕円に近似し、その軸回りに回転させた回転楕円体の体積を求めた。得られた体積と等しい体積の球の直径を液滴直径  $d$  と定義した<sup>33)</sup>。本実験の液滴直径範囲では、液滴はほぼ球形であった。観察対象(第  $n$  液滴)の初期液滴直径は、過去に MGLAB で行われた実験では微小重力検知後 0.05 s 間の平均値を初期液滴直径  $d_0$  としている。小型落下塔では、カプセル切離しの際の衝撃および、微小重力環境への移行の際の液滴這い上がりのため、微小重力環境以降直後に液滴直径を計測するのは困難であった。そのため、落下 0.4 s 前から 0.35 s 前までに初期液滴直径を測定し、平均値を初期液滴直径  $d_0$  とした。

### 3.2.4 実験試料

燃料には適当な揮発性を有し、他研究者により燃え広がりなどの基礎的なデータが得られている点から、正デカン ( $C_{10}H_{22}$ , 鹿特級) とエタノール ( $CH_3CH_2OH$ , 特級) を使用した。

### 3.2.5 当量比

当量比は液体当量比 $\phi_l$ 、気体当量比 $\phi_g$  および総当量比 $\phi_t$ を用いた。液体当量比とは液体で存在する燃料のみで計算した当量比で、気体当量比は蒸気で存在する燃料のみで計算した当量比のことである。また総当量比は両者の和と定義した。本研究では、燃焼容器を飽和状態の燃料蒸気 - 空気予混合気で満たして常に実験を行ったので、液滴列挿入前の当量比が気体当量比となる。液体当量比は、液滴が単純立方格子状に無限に配置された場合の単位体積あたり燃料質量と空気質量から算出した。

以下に気体当量比を求める手順を示す。

燃料の蒸気分圧  $P_f$  [Pa] は対臨界値対応状態原理法を基礎とした実験式<sup>32)</sup>より、

$$P_f = P_{cr} \cdot \exp\left(\frac{V_{pa}T' + V_{pb}T'^{1.5} + V_{pc}T'^3 + V_{pd}T'^6}{1 - T'}\right) \quad (3.2)$$

となる。ただし、

$P_{cr}$  : 燃料の臨界圧力 [Pa]

$V_{pa}$ ,  $V_{pb}$ ,  $V_{pc}$ ,  $V_{pd}$  : 燃料の蒸気分圧係数 (表3-1参照)

$T' = 1 - T_c/T_{cr}$

$T_c$  : 混合気の温度 (燃焼容器内部温度) [K]

$T_{cr}$  : 燃料の臨界温度 [K]

燃料蒸気の分子数  $N_f$  [mol] は、

$$N_f = \left(\frac{P_f V}{RT_c}\right) \quad (R = 8.314: \text{一般ガス定数} [J/mol \cdot K]) \quad (3.3)$$

で表され、混合気圧力  $P$  [Pa] より空気の分子数  $N_{air}$  [mol] は、

$$N_{air} = \left(\frac{(P - P_f)V}{RT_c}\right) \quad (3.4)$$

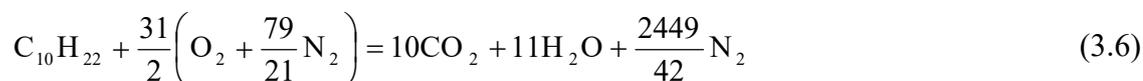
となる。気体当量比  $\phi_g$  は、

$$\phi_g = \left(\frac{N_f}{N_{air}}\right) \bigg/ \left(\frac{N_f}{N_{air}}\right)_{st} \quad (3.5)$$

で表される。

空気中の酸素モル分率が 21% であるから、空気の酸素 1 mol に対して窒素が 79/21 mol 混合されていることになる。燃料 1 mol に対する量論混合空気の mol 数を求めて

量論燃空比を求める。燃料としてデカンの場合、



より、

$$\left( \frac{N_f}{N_{air}} \right)_{st} = \frac{42}{3100} = 0.01354 \quad (3.7)$$

となり、式 (3.3)、(3.4) および (3.7) から式 (3.5) は次のように表される。

$$\phi_g = \left( \frac{P_f}{(P - P_f) \cdot 0.01354} \right) \quad (3.8)$$

表 3-2 に、計算に用いた定数および、燃焼容器内部温度 - 気体当量比をまとめた。実験を行った気体当量比範囲における燃焼容器内部温度の最高温度と最低温度の差は 40 K 程度であり、燃料の自発点火温度に比較して小さいので、本研究では初期混合気温度が化学反応速度に与える影響を無視した。また、初期混合気温度は自発点火温度より十分に低いので、予混合気生成待機中に化学反応は進行しないものとした。燃え広がり速度に大きな影響を及ぼす燃え広がり前の液滴の予蒸発は、燃焼容器内部が常に燃料蒸気で飽和状態であるため起こらない。

### 3.2.6 火炎燃え広がりモード

液滴間隔や雰囲気条件を変化させると、液滴列の燃え広がり挙動は大きく変化する。梅村によれば、液滴列の燃え広がり挙動は 3 つに分類される<sup>20)</sup>。これをベースにして、本研究用に修正したモードの定義を図 3-2 に示し、以下にそれぞれの燃え広がりモードの説明を示す。

予混合火炎伝播モード： 燃焼容器内部が希薄可燃限界以上の予混合気で満たされ、この予混合気を火炎が伝播する形態。

モード 1： 拡大する群燃焼拡散火炎が未燃次液滴を取り込み、未燃次液滴の蒸発が活性化し、通過した群燃焼拡散火炎に蒸気を供給して火炎を前進させる形態。

モード 2: 拡散火炎が未燃次液滴周囲に形成された可燃混合気層に達し, 可燃混合気層中を予混合火炎が伝播して火炎が燃え広がる形態. この場合, 火炎の先端は液滴の間で閉じる.

モード 3: 拡散火炎は未燃次液滴周囲の可燃混合気層には達せず, 未燃次液滴が火炎より加熱されて自発点火する形態. この場合, 未燃次液滴には既存の火炎とは独立した火炎が形成される.

燃え広がり起こらず: 液滴間隔が燃え広がり限界を超えているため, 液滴列燃え広がりが起こらない形態. 燃焼容器内部は飽和予混合気で満たされているので, 液滴は蒸発しない.

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 予混合気中における単一液滴燃焼時の火炎直径

初期液滴直径 1.0 mm の単一液滴を気相火炎伝播限界以下の気体当量比の雰囲気中で点火させ, 液滴直径および液滴の中心を通る水平方向の火炎直径の時間履歴を計測した. 周囲混合気の気体当量比を変化させて実験を行い, 液滴直径が 0.9, 0.8, 0.6 mm になったときの火炎直径を抽出した. 図 3-3 に液滴の中心を通る水平方向火炎直径と気体当量比の関係を示す. 縦軸は液滴直径で正規化して示した. 副変数として液滴直径を用いた.

液滴直径が大きい場合, 気体当量比の増大に伴い, 無次元火炎直径はわずかに増大する. 直径が小さくなるのに伴って, 無次元火炎直径は増大し, また, 気体当量比の影響が大きくなることがわかった. 実火炎直径が小さくなったことで自然対流が弱くなり, 気体当量比の影響が顕著になったと考えられる. 気体当量比の増大に伴って無次元火炎直径が増大するのは, 液滴から無限遠方の酸素濃度が低下したことで, 拡散火炎に対する燃料蒸気と酸素の供給が液滴からより遠い位置で平衡するためと考えられる.

#### 3.3.2 火炎燃え広がりに及ぼす気体当量比の影響 (デカン)

単純立方格子状に配列された 3 次元液滴マトリックスの一部を切り出した液滴列を研究対象にしている. 液滴間隔と実験空間の正方形断面の一辺を等しくすることで対称面を模擬し, 3 次元に拡張して議論することを可能にしている. しかしながら, この条件では燃え広がりが生じなかった. そこで, 適当な液体当量比の条件を得る

ために、液滴間隔に関係なく、実験空間の正方形断面の一辺が 25 mm である燃焼容器を用いた。以後すべての通常重力実験ではこの燃焼容器を用いた。実験空間の形状変更によって、火炎進行方向とそれ以外の 2 方向の間隔が異なる格子状に液滴が配置されるモデルとなり、初めのモデルを列方向に縮めた形態である。これは、部分予蒸発噴霧で形成された平面火炎において、反応帯に向かって減速しながら突入する液滴群のモデルであるとみなせる。以後このモデルを使用して実験を行った。気相火炎伝播限界以下の気体当量比の雰囲気中に液滴列を挿入し、液滴列火炎燃え広がり挙動の観察を行った。図 3-4 から図 3-6 に高速度カメラで撮影したデカン液滴列の火炎燃え広がり連続写真を示す。これらの画像から、火炎先端位置の時間履歴を計測する。各写真の条件に対応する火炎先端位置の時間履歴を図 3-7 から図 3-9 に示す。 $S = 1.6$  mm の条件では、ほぼ連続的に火炎が進行し、 $S = 2.0$  mm の条件では、液滴間で火炎が停滞する傾向が観察された。 $S = 5.0$  mm の条件では、 $S = 2.0$  mm の場合に現れた火炎の停滞が顕著になった。火炎燃え広がり速度を求めた結果を、気体当量比の関数として図 3-10 に示す。どの条件においても気体当量比の増大に伴って火炎燃え広がり速度は増大した。 $S = 1.6$  mm の条件では、連続写真からわかるように、拡大する群火炎が未燃次液滴を包み込んでおり、モード 1 の燃え広がり挙動が観察された。モード 1 の場合は、未燃次液滴の初期加熱時間が燃え広がり速度を支配すると考えられる<sup>13)</sup>。モード 1 の場合は、気体当量比の増大により、未燃次液滴の加熱時間が短くなり、燃え広がり速度が増大したと考えられる。加熱時間の短縮は、菊池らの数値シミュレーションによれば発熱領域の拡大によるものと考えられる。 $S = 2.0$  mm の条件では、燃え広がる前に既燃液滴と未燃次液滴との間で火炎先端が閉じており、モード 2 の燃え広がり挙動であった。モード 2 の場合は、加熱時間と火炎と未燃次液滴間における熱伝導が燃え広がり速度を支配するので気体当量比の増大に伴い未燃次液滴の加熱が促進され、燃え広がり速度が増大したと考えられる。 $S = 5.0$  mm の条件では、既存の火炎とは独立したエンベロープ火炎が形成され、モード 3 の燃え広がり挙動であった。モード 3 の場合は、火炎と未燃次液滴間における熱伝導が燃え広がり速度を支配するので、モード 2 の場合と同様、気体当量比の増大に伴う火炎直径の増大によって、火炎燃え広がり速度が増大したと考えられる。また、 $S = 5.0$  mm においては、気体当量比が 0.2, 0.3 の条件では燃え広がりが起こらず、気体当量比が 0.4 以上の条件で燃え広がりが観察された。燃焼容器の外の開かれた空間でも燃え広がりは観察されなかった。気体当量比が小さい条件では、火炎と未燃次液滴との距離が大きいため未燃次液滴の加熱が十分に行われず、燃え広がりが起こらなかったと考えられる。気体当量比が 0.7 の条件において、 $S = 1.6$  mm と 2.0 mm の燃え広がり速度を比較すると、 $S = 2.0$  mm のほうが大きくなった。気体当量比が低い条件では、 $S = 2.0$  mm の液滴列はモード 2 の燃え広がりが観察された。気体当量比の増大に伴って水平火炎直径が増大して、気体当量比が 0.7 では既燃液滴周囲に形成された火炎が未燃次液滴に触れるようになり、モード 1 に近い連続

的な燃え広がりが観察された。文献 13 において、モード 1 とモード 2 の境界で燃え広がり速度が最大値となることが示されており、 $S=2.0\text{ mm}$ 、 $\phi_g=0.7$  の条件でモードの遷移が起こり  $S=1.6\text{ mm}$  よりも燃え広がり速度が大きくなったと考えられる。 $S=1.6\text{ mm}$  より  $S=2.0$  および  $5.0\text{ mm}$  の条件のほうが、気体当量比の増大に伴って火炎燃え広がり速度が急峻に増大している。これは、モード 2 および 3 の燃え広がりにおいて熱伝導時間が燃え広がり要する時間に占める割合が大きいため、気体当量比増大による発熱領域拡大が燃え広がり速度に強く影響を及ぼしたと考えられる。

### 3.3.3 火炎燃え広がりに及ぼす気体当量比の影響（エタノール）

燃料にエタノールを用い、液滴間隔  $S=1.6\text{ mm}$  および  $5.0\text{ mm}$  の条件で火炎燃え広がりの実験を行った。図 3-11 に気体当量比と火炎燃え広がり速度の関係を示す。 $S=1.6\text{ mm}$  の条件では、初期液滴直径を  $0.32\text{ mm}$ （無次元液滴間隔  $S/d_0=5$ ）と  $0.8\text{ mm}$ （ $S/d_0=2$ ）の 2 つの条件で実験を行った。異なる液滴直径のデータを比較するため、縦軸は液滴直径で正規化した燃え広がり速度とした。燃料にエタノールを用いた場合、 $S=5.0\text{ mm}$ 、 $d_0=0.8\text{ mm}$  の条件では気体当量比を変化させても燃え広がりは起こらなかった。エタノールを用いた場合、デカンに比べて火炎直径が小さいので、火炎が燃え広がらなかったと考えられる。 $S=1.6\text{ mm}$  の条件では、デカン液滴列の場合と同様に、気体当量比の増大に伴って燃え広がり速度が増大した。 $S/d_0=2$  の条件ではモード 1 が観察された。 $S/d_0=5$  の条件ではモード 2 の燃え広がりが観察され、液滴直径が小さいため自然対流の影響をあまり受けず、液滴の周囲には球状の火炎が形成された。

### 3.3.4 燃え広がる液滴個数 / 燃え尽きる液滴個数

図 3-12 および図 3-13 に、火炎の進行により燃焼を開始した液滴の個数と燃え尽きた液滴の個数を気体当量比の関数として示す。 $S=1.6\text{ mm}$  の条件の場合、気相火炎伝播限界以下の気体当量比の雰囲気における液滴列燃焼の場合、常に第 9 液滴まで燃え広がった。気体当量比が低い場合、燃え広がりによって燃焼を開始した液滴はすべて燃え尽きる。気体当量比の増大に伴って、燃え尽きる液滴の個数は減少した。一度は第 9 液滴まで燃え広がるが、燃焼中に酸素が不足し途中で消炎し一部が燃え残ったと考えられる。最後の第 10 液滴は閉端面から  $0.8\text{ mm}$  の位置が存在しており、火炎の熱損失が大きいため第 10 液滴には燃え広がらないのではないかと考えた。そこで、第 9 および第 10 液滴を懸垂し点火線を用いて第 9 液滴に点火させて燃え広がるか検証した。閉端面と液滴の位置関係は変えず、上下左右の対称面が無い環境では燃え広がりが起こり、どちらの液滴も燃え尽きた。閉端面以外の対称面が無い環境では、十分に酸素の供給があり、燃え尽きたと考えられる。燃焼容器内で燃焼し

た場合は、酸素が不足していることが示唆される。気相火炎伝播が起こる条件では、気体当量比に依存せず、伝播火炎は燃焼室閉端に達し、すべての液滴が伝播火炎に包まれ、その後すべての液滴が燃え残る。気相火炎伝播が起こる条件では総当量比が 1 を超えているため、一度燃焼が始まっても、酸素不足により消炎していると考えられる。S=5.0 mm の条件の場合、気相火炎伝播限界以下の気体当量比の雰囲気における液滴列燃焼の場合、火炎の進行により燃焼を開始した液滴の個数は気体当量比の増大に伴って増大する。気体当量比が低い場合、長い時間火炎が定在するため、未燃液滴側の酸素を消費し、燃え広がりが抑制されたと考えられる。気体当量比が低い場合、燃え広がりにより燃焼を開始した液滴はすべて燃え尽きる。気体当量比が高くなると、火炎燃え広がりにより燃焼を開始する液滴が増えるため、燃焼している液滴付近の酸素が不足し、燃焼途中で消炎して一部の液滴が残る。気相火炎伝播が起こる条件では、S=1.6 mm の条件と同様に、すべての液滴が伝播火炎に包まれ、すべての液滴が燃え残った。

燃料にエタノールを用いた場合、S=1.6 mm、 $d_0=0.32$  および 0.8 mm で燃え広がりが観察された。いずれの条件においても最後の液滴まで燃え広がりが観察された。燃え広がった後は、燃料の揮発性が高いため燃え尽きて液滴がなくなったのか、火炎からの既燃ガスによって液滴が蒸発して消滅したのかの判断ができなかった。

### 3.3.5 火炎伝播に及ぼす液滴列の影響（デカン）

本実験で用いた燃焼容器で気相火炎伝播が起こる気体当量比 0.8 から 1.5 の条件で実験を行い、液滴列の存在が火炎伝播に及ぼす影響を調べた。図 3-14 および図 3-15 はデカンの $\phi_g=1.1$ における火炎伝播挙動の連続写真である。図 3-14 は液滴列が無い場合、図 3-15 は液滴列がある場合を示している。図 3-16 は図 3-14 の条件における火炎先端位置の時間履歴である。デカンを用いた場合、いずれの気体当量比においても液滴列による伝播火炎形状の変形は観察されなかった。この結果は、単一デカン液滴で伝播火炎と液滴の干渉を調べた小林らおよび角田らの結果と同じであった<sup>24,25)</sup>。伝播火炎が実験空間の閉端に達したあとに液滴の周囲には輝炎が観察された。これは、伝播火炎の既燃ガス流によって液滴から燃料蒸気が発生し、高温の既燃ガスにより燃料蒸気がすすに変化して黒体放射が観察されたと考えられる。

図 3-17 および図 3-18 に気体当量比と火炎伝播速度の関係を示す。液滴列の存在は火炎伝播速度に影響を及ぼさなかった。燃料に用いたデカンの揮発性が低いため、液滴から伝播火炎への燃料蒸気の供給が行われなかったためと考えられる。火炎伝播速度は、気体当量比 1.1 付近で最大値を示した。

### 3.3.6 火炎伝播に及ぼす液滴列の影響（エタノール）

図 3-19 および図 3-20 はエタノールの $\phi_g = 0.8$ における火炎伝播挙動の連続写真である。図 3-19 は液滴列が無い場合、図 3-20 は液滴列がある場合を示している。図 3-20 の 14 ms の画像より、液滴を伝播火炎が通過する直前に火炎面が凹に変形し、16 ms の画像では伝播火炎が通過して火炎背後で液滴が燃焼し始める様子が観察された。 $\phi_g = 1.0$  以下の条件では液滴列による火炎の変形が観察されたが、それ以上の気体当量比では、明確な火炎の変形は観察されなかった。

図 3-21 および図 3-22 に気体当量比と火炎伝播速度の関係を示す。 $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$  の条件では、多少の火炎の変形はあったが、液滴の存在は火炎伝播速度に影響を及ぼさなかった。 $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$  の条件においては、火炎の変形が確認できた $\phi_g = 1.0$  以下の条件において、液滴の存在により火炎伝播速度が大きくなる傾向が見られた。 $\phi_g = 1.0$  以上の条件では、液滴の存在は火炎伝播速度には影響を及ぼさなかった。 $\phi_g = 1.0$  以下の条件では火炎伝播速度が小さく、液滴寿命に対する伝播火炎が液滴を通過する時間が相対的に長いため、伝播火炎通過中に液滴からの蒸気供給が行われ、火炎伝播速度が増大したと考えられる。 $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$  ( $S/d_0 = 2$ ) の場合に液滴列が火炎伝播に及ぼす影響が観察されず、 $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$  ( $S/d_0 = 6.25$ ) の場合にその影響を観察された理由は、火炎燃え広がりの場合と同様、 $S = 1.6 \text{ mm}$  の場合、液滴列が燃料蒸気供給源としてだけでなく、ヒートシンクとして寄与している可能性が示唆される。この考察の検証を行うため、液滴間隔は変えずに液滴直径を小さくした $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.32 \text{ mm}$  ( $S/d_0 = 5$ ) の条件で実験を行った。図 3-23 に気体当量比と火炎伝播速度の関係を示す。どの気体当量比でも明確な火炎形状の変形は観察されなかったが、液滴の存在によって火炎伝播速度に影響を及ぼしていることがわかった。 $\phi_g = 1.1$  以下の条件では液滴の存在により火炎伝播速度は大きくなり、 $\phi_g = 1.3$  以上の条件では液滴の存在により火炎伝播速度は小さくなった。液滴間隔は変わっていないが、液滴が小さくなったことで、液滴寿命に対する伝播火炎が液滴を通過する時間が相対的に長くなったため、伝播火炎の通過中に液滴から蒸気供給が速やかに行われたと考えられる。 $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$  の条件では、過濃領域で伝播速度への液滴列の影響は観察されなかったが、 $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.32 \text{ mm}$  の条件では、液滴列の存在により総当量比が増大し伝播速度が減少する傾向がみられた。

### 3.3.7 火炎燃え広がり速度に及ぼす燃料揮発性の影響

図 3-24 に気体当量比と火炎燃え広がり速度の関係を示す。副変数を燃料種としたすべての気体当量比において燃え広がり速度はエタノールのほうが速い。液滴列生成時の環境温度は十分に低く、また実験空間も飽和蒸気で満たされているため液滴列の周囲に燃料蒸気層は形成されない。そのため、拡散火炎が未燃次液滴を通過したあと、次液滴の蒸発の活性までに要する時間がエタノールの方が短いため、燃え

広がり速度が大きくなったと考えられる。

### 3.3.8 燃え広がり と 火炎伝播の境界における火炎速度差

図 3-25 および図 3-26 に気体当量比と火炎燃え広がり速度および火炎伝播速度の関係を示す。燃料にデカンを用いた場合、液滴を伝っての火炎燃え広がりから気相火炎伝播へ移行する際の火炎速度に不連続的な増大がみられた。この傾向は、いずれの液滴間隔においても同じであった。燃料にエタノールを用いた場合、デカンの場合と同様に火炎速度に不連続的な増大がみられたが、その増大はデカン液滴列より小さい。この不連続性は、液滴の加熱に要する時間が原因であると考えられる。燃料の揮発性が高い場合、あるいは液滴直径が小さい場合、燃え広がる火炎が液滴を通過するのに要する時間に対して液滴の加熱に要する時間が相対的に小さくなるため、燃え広がり速度が大きくなり、燃え広がり速度は火炎伝播速度に連続的に接続すると考えられる。図 3-27 は初期液滴直径を 0.32 mm とした場合の結果である。予想通りに火炎速度の不連続的な増大幅は小さくなる結果が得られた。

本実験では、観察装置の制約上  $d_0 = 0.32 \text{ mm}$  の条件が限界であった。ここで、どの程度まで液滴直径を小さくすれば燃え広がり速度と火炎伝播速度が連続的に接続するか試算する。計算には式 (1.1) の液滴列燃え広がり速度のモデル解析の式を参考にした。燃え広がり速度は以下の式で表される。

$$V_s = \frac{S}{\tau_f} \quad (3.9)$$

無次元液滴間隔  $S/d_0$  が比較的大きい場合を考える。この場合、高温息の熱伝達時間  $t_c$  が燃え広がり誘導時間  $\tau$  の多くを占めるため、他の項は無視できると考えられる。よって、燃え広がり誘導時間は近似的に以下ようになる。

$$\tau_f \approx t_c \quad (3.10)$$

ここで  $t_c$  は熱伝導により液滴間隔  $S$  を移動する時間なので近似的に以下の式で表される。

$$t_c \approx \frac{S^2}{a} \quad (3.11)$$

ただし  $a$  は温度拡散係数である。よって正規化火炎燃え広がり速度は、

$$V_s d_0 \approx \left( \frac{S}{d_0} \right)^{-1} a \quad (3.12)$$

と表される。無次元液滴間隔を一定とした場合、初期液滴直径と燃え広がり速度は反比例の関係になる。実験値をこの式に代入する。\$S = 1.6\$ mm, \$d\_0 = 0.32\$ mm, \$\phi\_g = 0.7\$ の条件における燃え広がり速度は 221 mm/s である。\$\phi\_g = 0.8\$ の条件における火炎伝播速度は 486 mm/s である。\$S/d\_0 = 5\$ は変化させずに液滴直径を変化させた場合、初期液滴直径を半分にすると燃え広がり速度が火炎伝播速度とほぼ等しくなる。これより、\$S = 0.8\$ mm, \$d\_0 = 0.16\$ mm の条件で実験が行うことができれば、燃え広がり速度と火炎伝播速度が連続的になることが示唆された。

### 3.4 結言

3次元直交格子状に同一粒径の燃料液滴が配置された均一部分予蒸発噴霧を模擬する液滴列燃焼実験を行った。燃料蒸気 - 空気予混合気中の正デカンまたはエタノール液滴列を配置し、周囲雰囲気気体の気体当量比が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響と、燃料液滴列が気相火炎伝播速度に及ぼす影響を調べた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 通常重力環境で単一液滴の燃焼を行った場合、液滴直径が大きい場合、気体当量比の増大に伴い、無次元火炎直径はわずかに増大する。直径が小さくなるのに伴って、無次元火炎直径は増大し、また、気体当量比の影響が大きい。
- (2) 火炎伝播限界以下の気体当量比域において、火炎燃え広がり速度は気体当量比の増大に伴って増大する。液滴間隔 1.6 mm の液滴列の場合、エタノール液滴列の火炎燃え広がり速度は、どの気体当量比においてもデカン液滴よりも速かった。
- (3) 気体当量比の増大に伴って液滴を伝って火炎が燃え広がるモードから気相火炎伝播モードに遷移する際、火炎速度は不連続に増大する。
- (4) 正デカン液滴列は気相火炎伝播に影響を及ぼさない。
- (5) 希薄予混合気中のエタノール液滴列は、伝播火炎の形状を変化させ、液滴間隔 5.0 mm, 初期液滴直径 0.8 mm の条件では希薄当量比の範囲において伝播速度を増大させる傾向を示す。液滴間隔 1.6 mm, 初期液滴直径 0.32 mm の条件では、いずれの気体当量比の範囲において火炎伝播速度に変化があった。

- (6) 液滴間隔 5.0 mm のデカン液滴列において、微小重力環境における燃え広がり速度は、どの気体当量比においても通常重力環境の結果よりも速かった。
- (7) デカン液滴列において、気体当量比の増大に伴って、燃え広がる液滴個数は増大し、燃え尽きる液滴個数は減少する。
- (8) 自然対流が無視できる条件においては、大気圧の燃料蒸気 - 空気予混合気中に単純立方格子状に配置された正デカン液滴マトリックスの外縁の液滴が同時に点火した場合、気体当量比が火炎伝播限界以上の条件では気相火炎伝播が起こり、火炎はマトリックス中心まで進行するが、気体当量比が火炎伝播限界以下の条件では、液滴を伝っての火炎燃え広がりマトリックス内部に進行しないことが示唆された。実機では液滴分散の不均一性が燃え広がり大きな役割を果たしていると推定される。

表 3-1 液滴列燃焼実験の実験条件

$S/d_0$	2.0, 2.5, 6.25
Fuel	n-decane, Ethanol
Gas equivalence ratio, $\phi_g$	0.2 ~ 1.5
$l_{wh}$ [mm]	25
$l_d$ [mm]	116
$S$ [mm]	1.6, 2.0, 5.0 $\pm 5\%$
$d_0$ [mm]	0.8 $\pm 5\%$
Frame rate of High-speed camera [fps]	500, 1000
Gravity	Normal gravity
$P_a$ [MPa]	0.10 (Atmospheric pressure)

表 3-2 燃料の定数および気体当量比 <sup>32)</sup>

	n-decane	Ethanol
臨界圧力 $P_{cr}$ [MPa]	2.12	6.14
係数 $V_{pa}$	-8.56523	-8.51838
$V_{pb}$	1.97756	0.34163
$V_{pc}$	-5.81971	-5.73683
$V_{pd}$	-0.29982	8.32581
臨界温度 $T_{cr}$ [K]	617.7	513.9
気体当量比 $\phi_g = 0.1$	燃焼容器内部温度 $T_c = 293.6$ K	燃焼容器内部温度 $T_c = 261.7$ K
$\phi_g = 0.4$	314.6	281.0
$\phi_g = 0.7$	324.2	289.4
$\phi_g = 1.0$	330.6	295.0
$\phi_g = 1.3$	335.5	299.2
$\phi_g = 1.5$	338.2	301.5

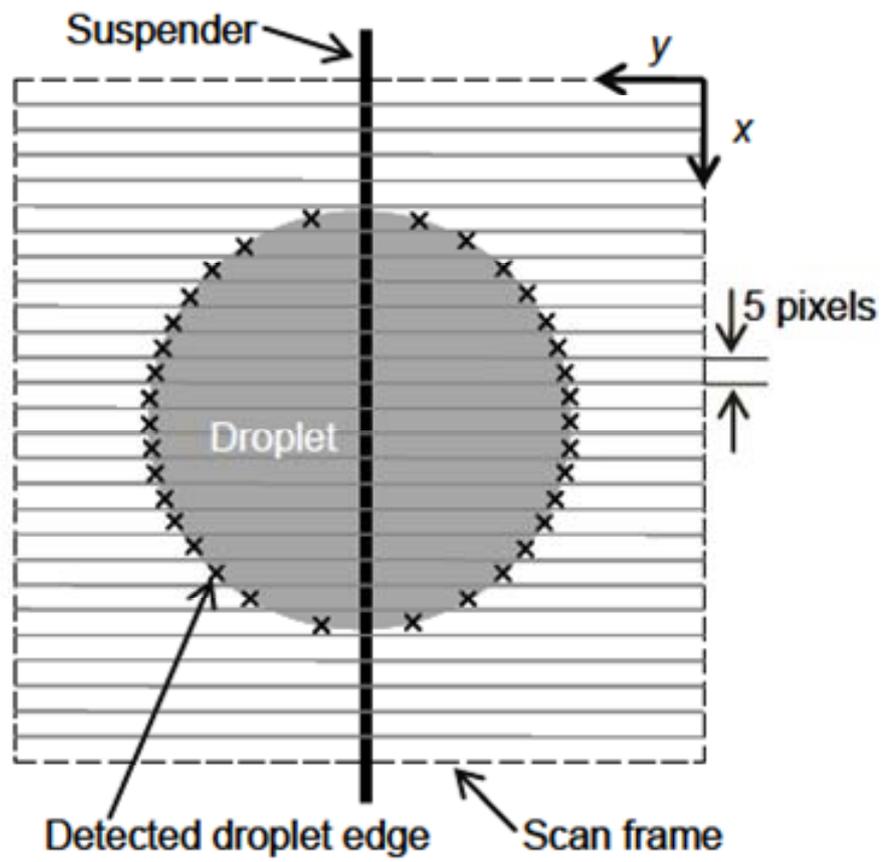


图 3-1 液滴直径解析手法

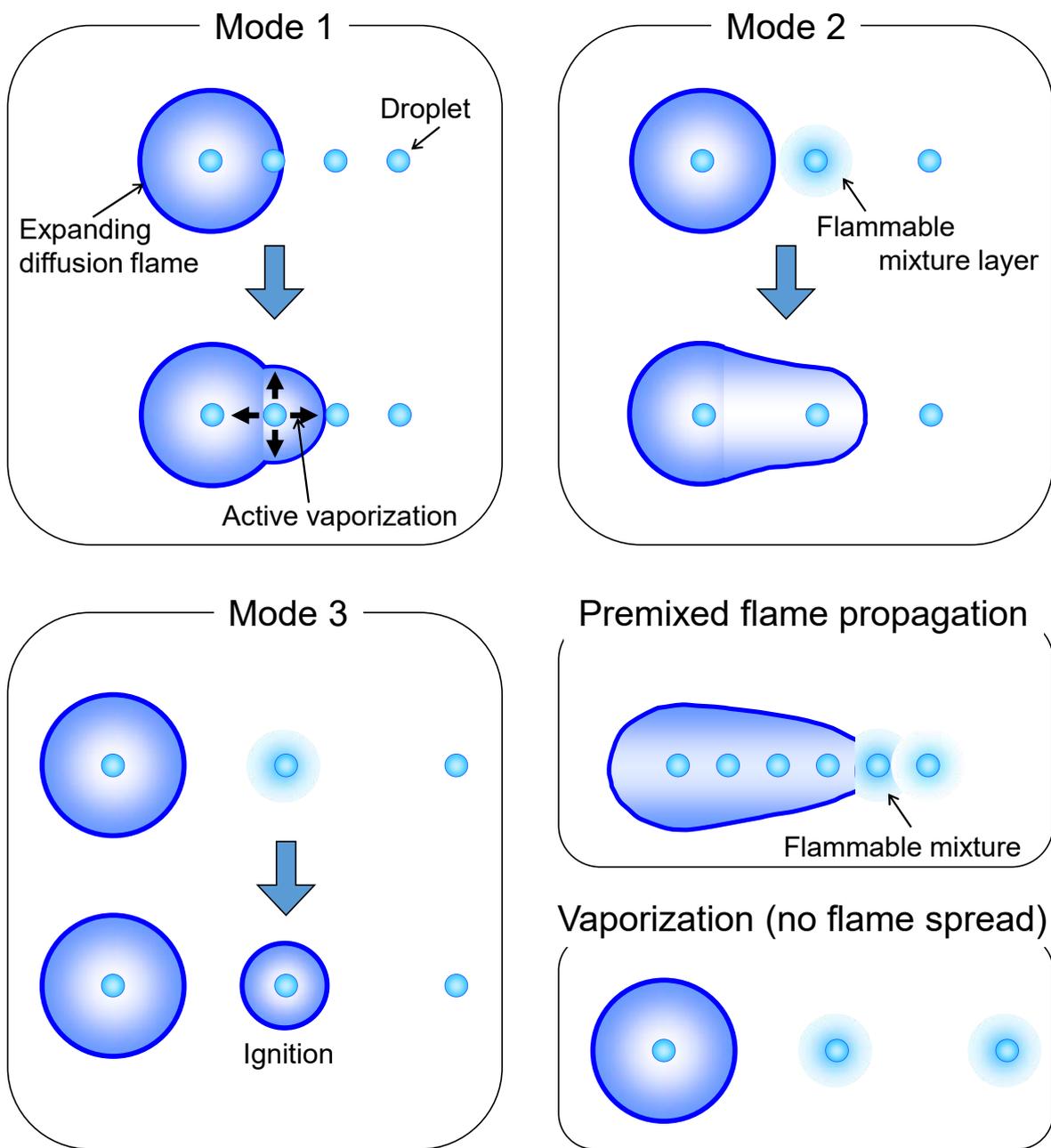


図 3-2 燃え広がりモードの定義

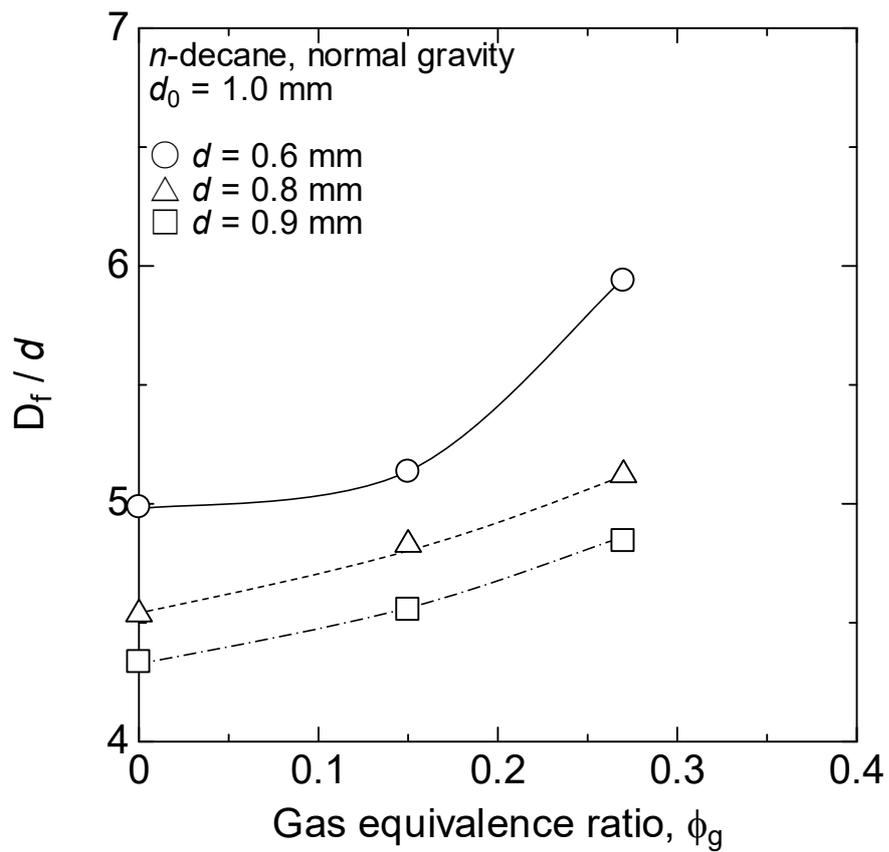


図 3-3 単一液滴燃焼における気体当量比と無次元火炎直径の関係 (デカン)

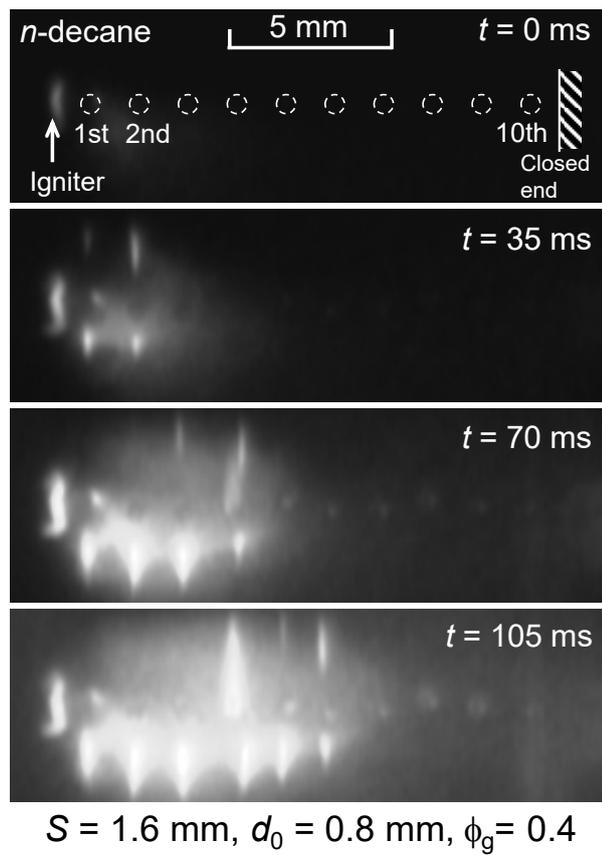


図 3-4 液滴列の燃え広がり挙動  
 (デカン,  $S = 1.6$  mm,  $d_0 = 0.8$  mm,  $\phi_g = 0.4$ )

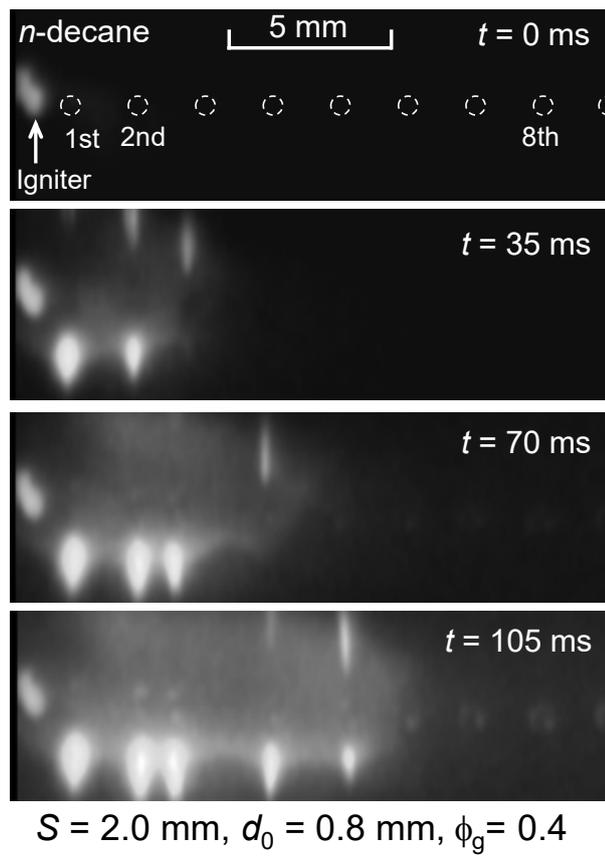


図 3-5 液滴列の燃え広がり挙動  
 (デカン,  $S = 2.0$  mm,  $d_0 = 0.8$  mm,  $\phi_g = 0.4$ )

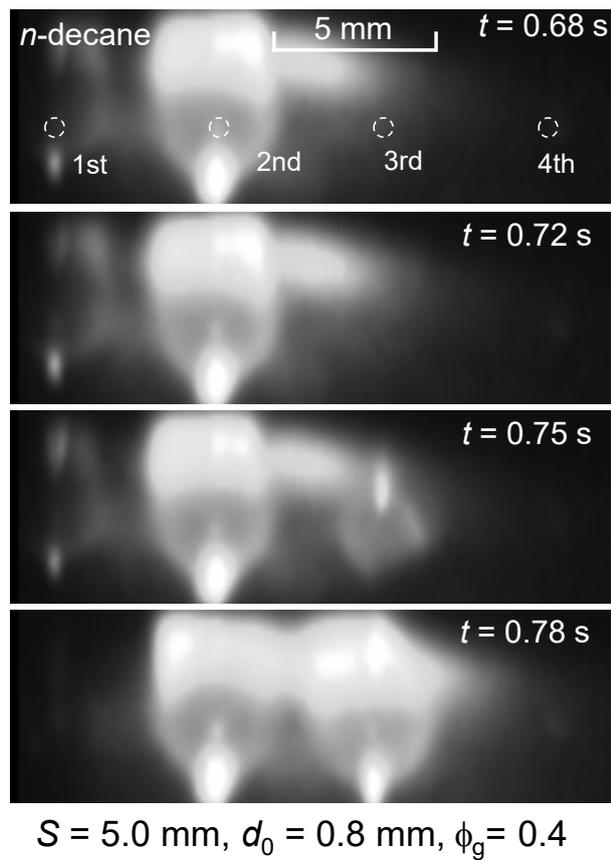


図 3-6 液滴列の燃え広がり挙動  
 (デカン,  $S = 5.0$  mm,  $d_0 = 0.8$  mm,  $\phi_g = 0.4$ )

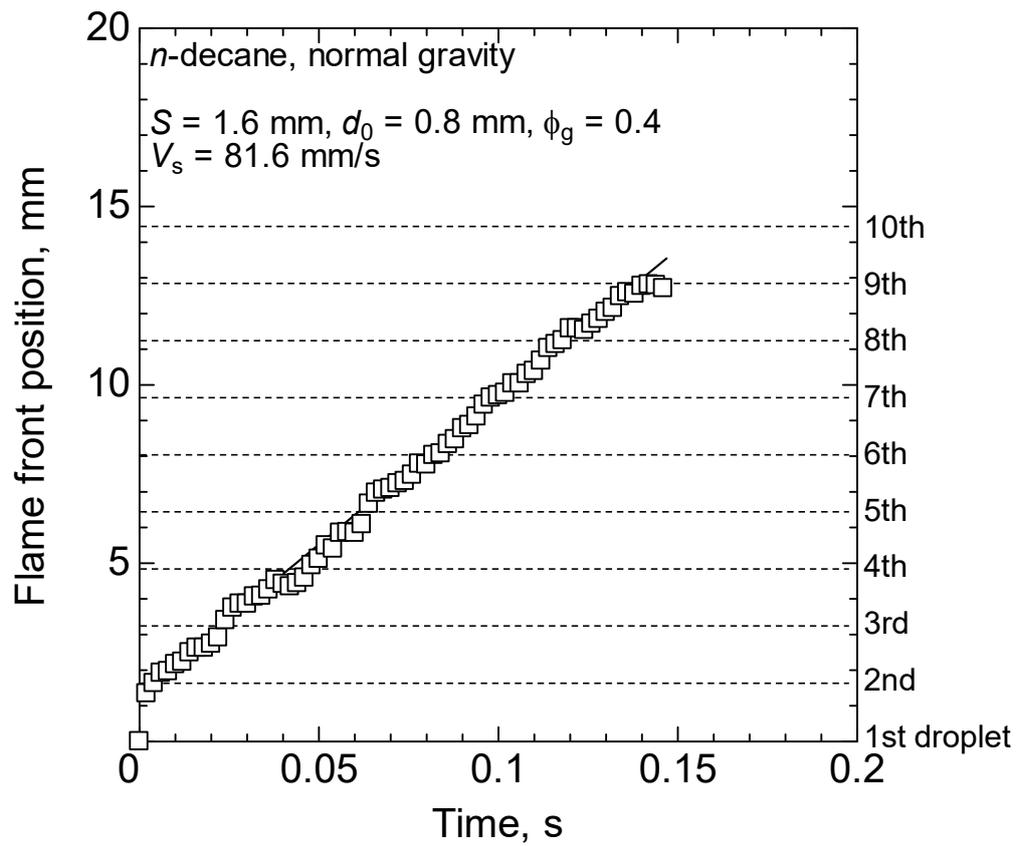


図 3-7 燃え広がり火炎先端位置の時間履歴

(デカン,  $S=1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0=0.8 \text{ mm}$ ,  $\phi_g=0.4$ )

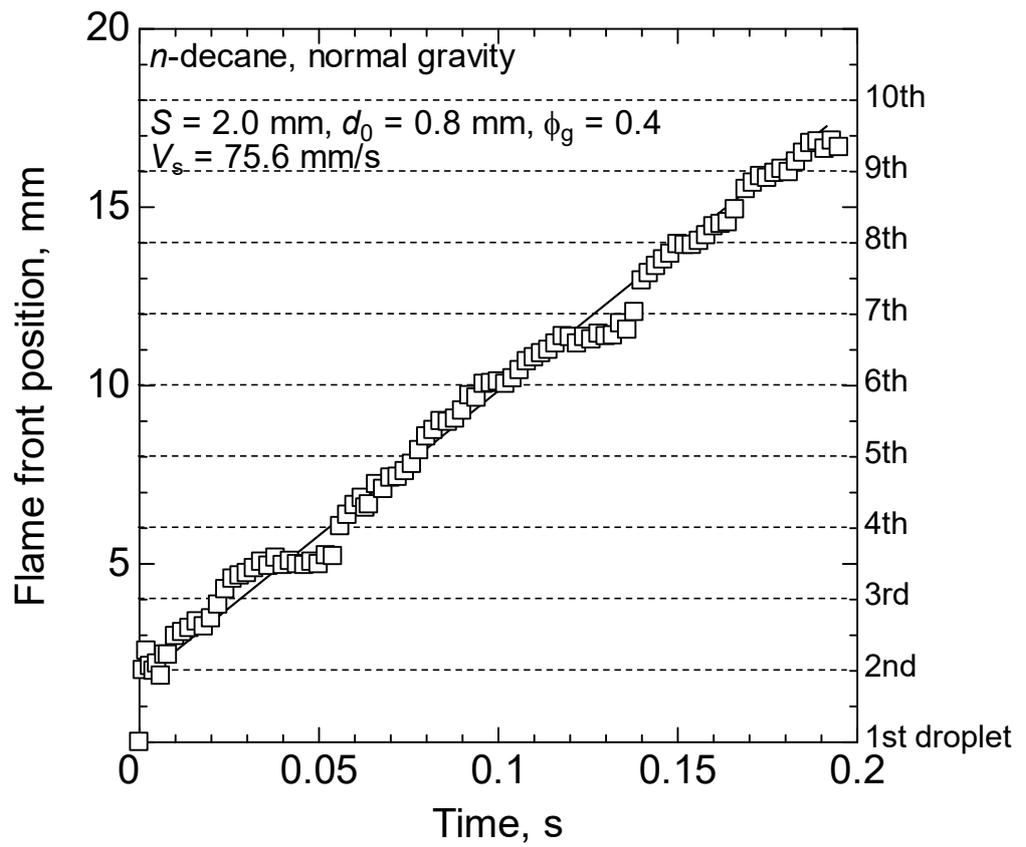


図 3-8 燃え広がり火炎先端位置の時間履歴

(デカン,  $S = 2.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 0.4$ )

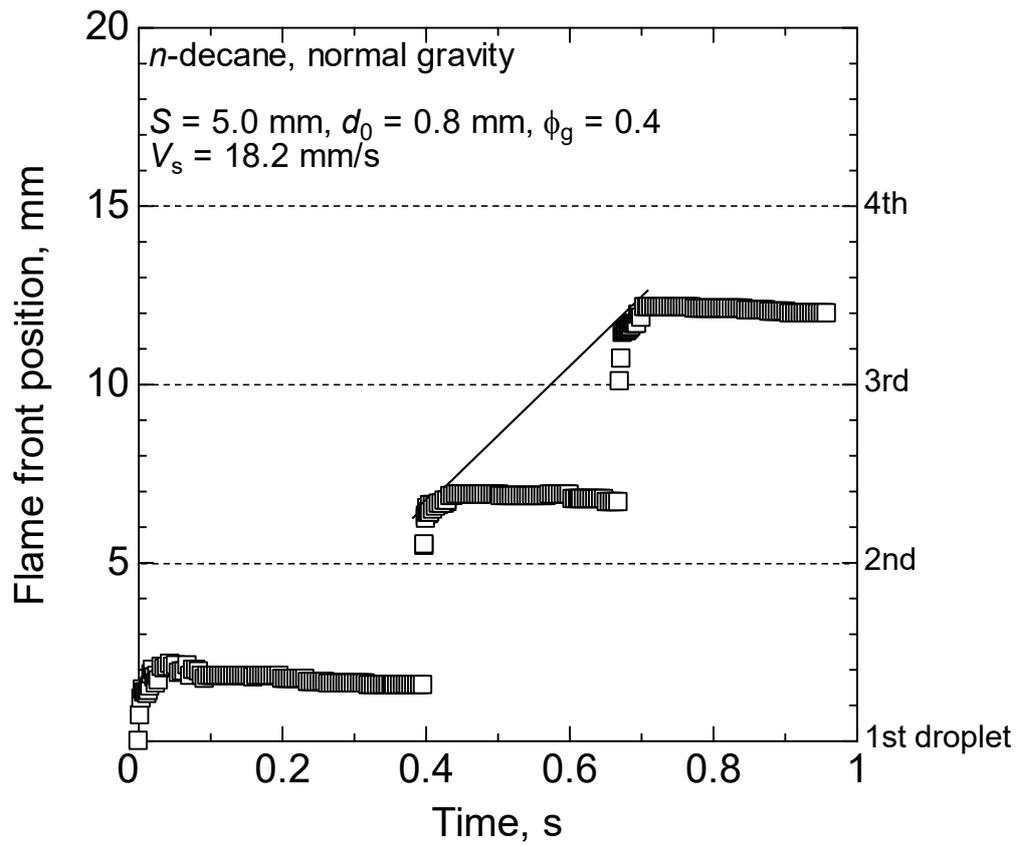


図 3-9 燃え広がり火炎先端位置の時間履歴

(デカン,  $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 0.4$ )

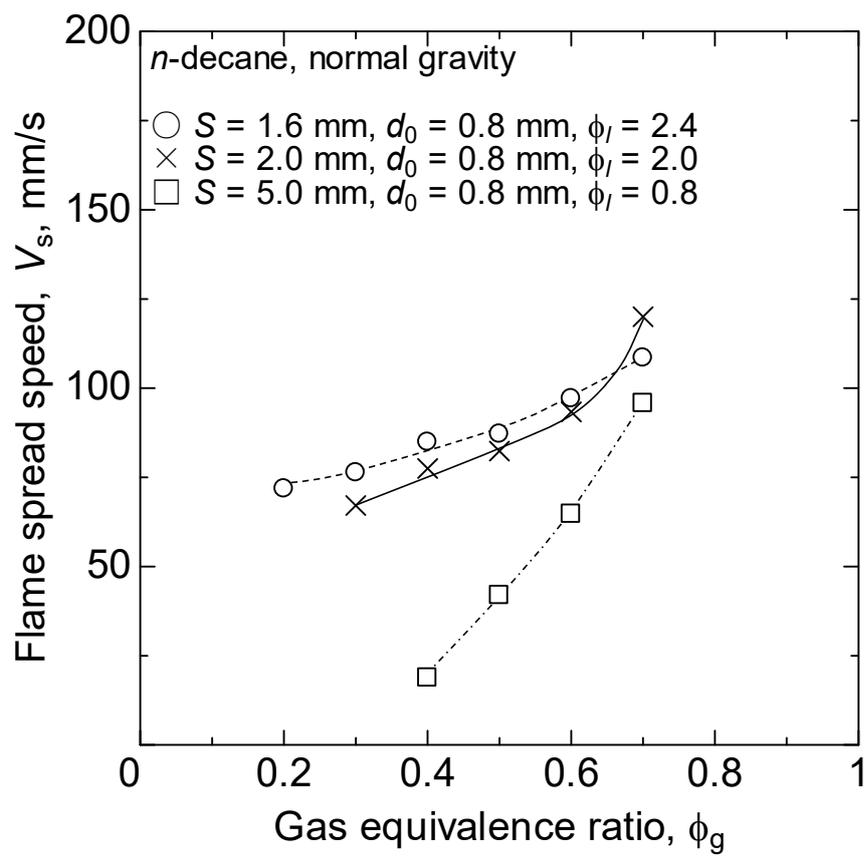


図 3-10 気体当量比と燃え広がり速度の関係 (デカン)

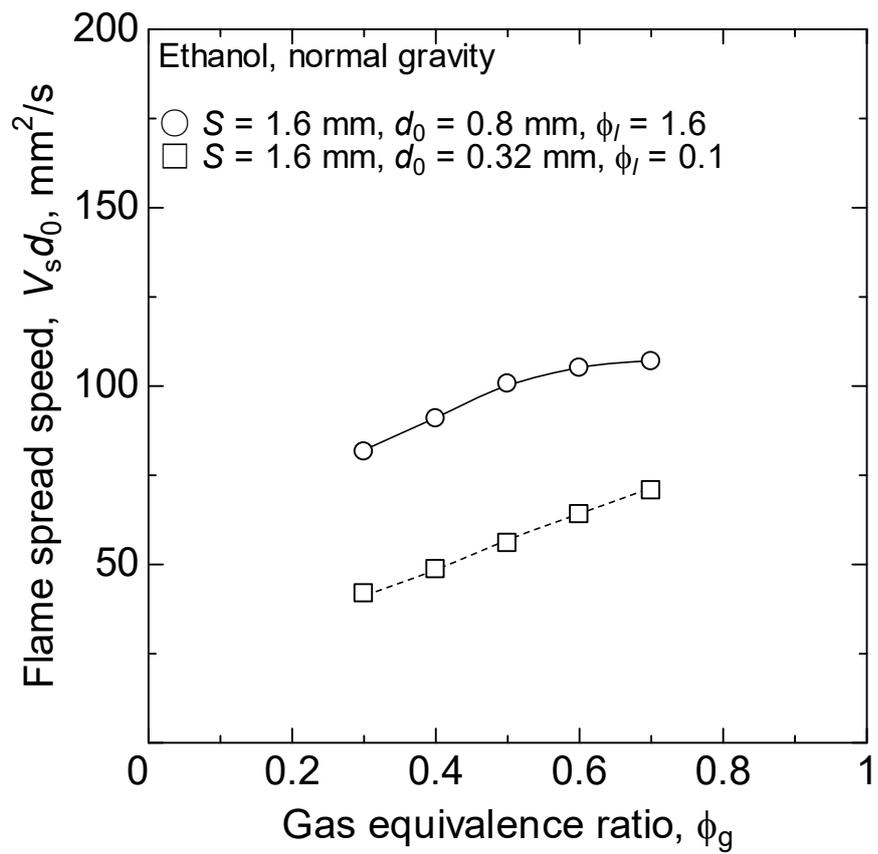


図 3-11 気体当量比と燃え広がり速度の関係 (エタノール)

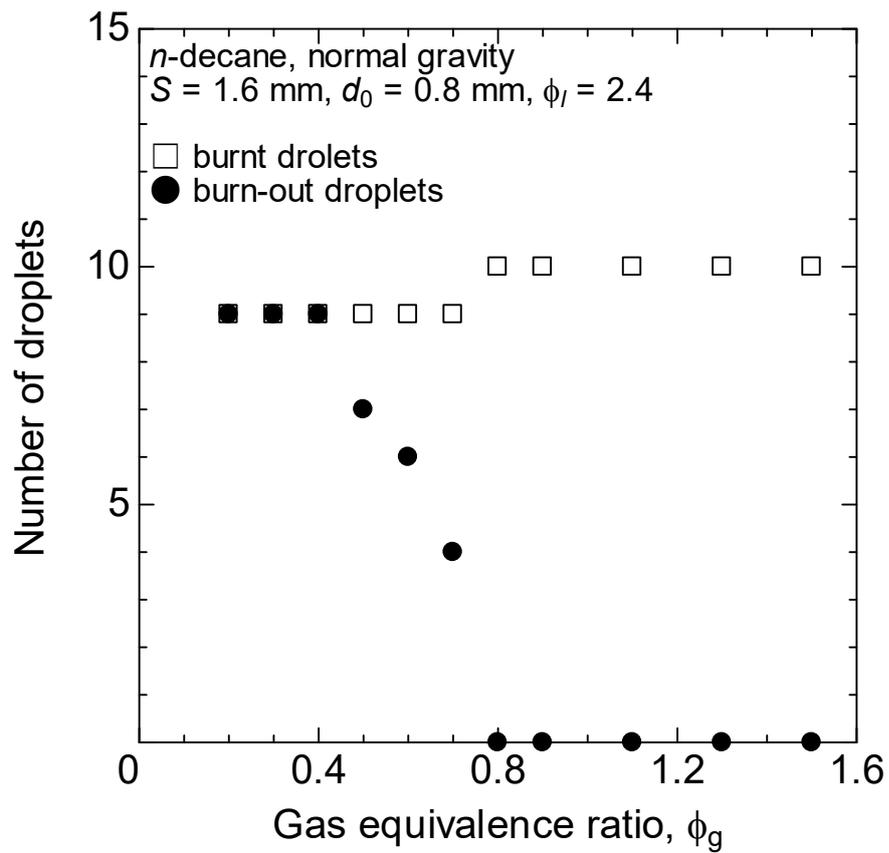


図 3-12 燃え広がる液滴と燃え尽きる液滴個数の気体当量比依存性

(デカン,  $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )

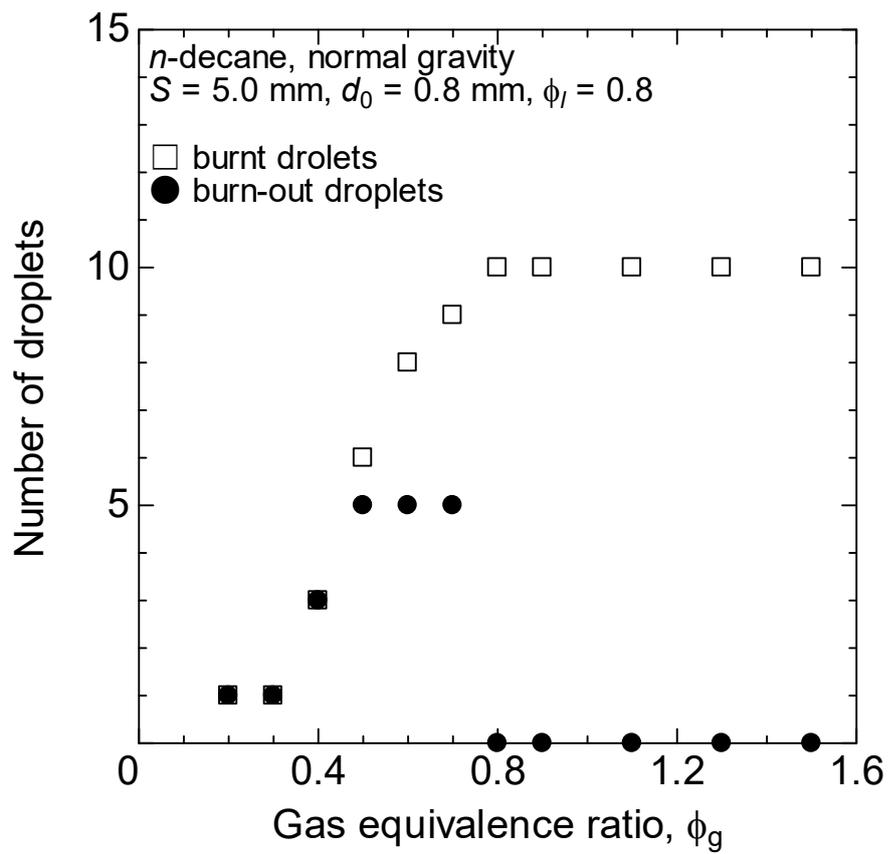
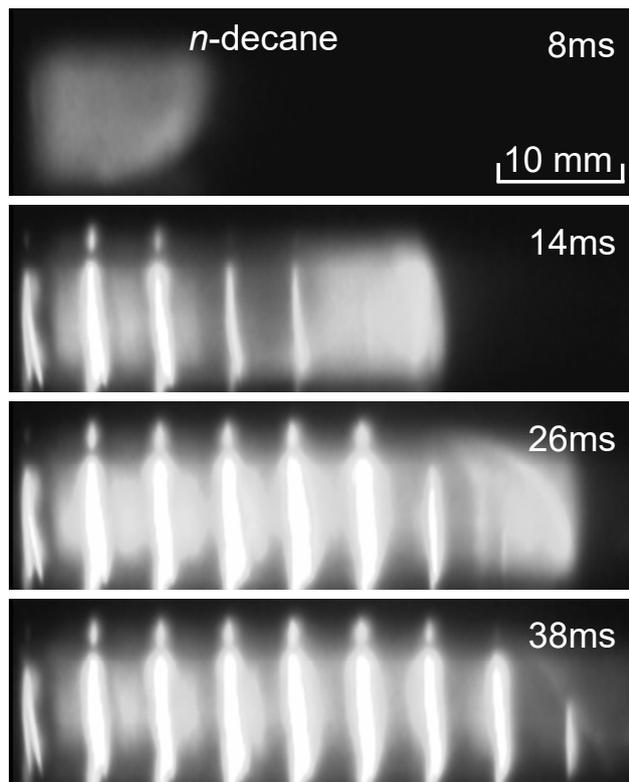


図 3-13 燃え広がる液滴と燃え尽きる液滴個数の気体当量比依存性

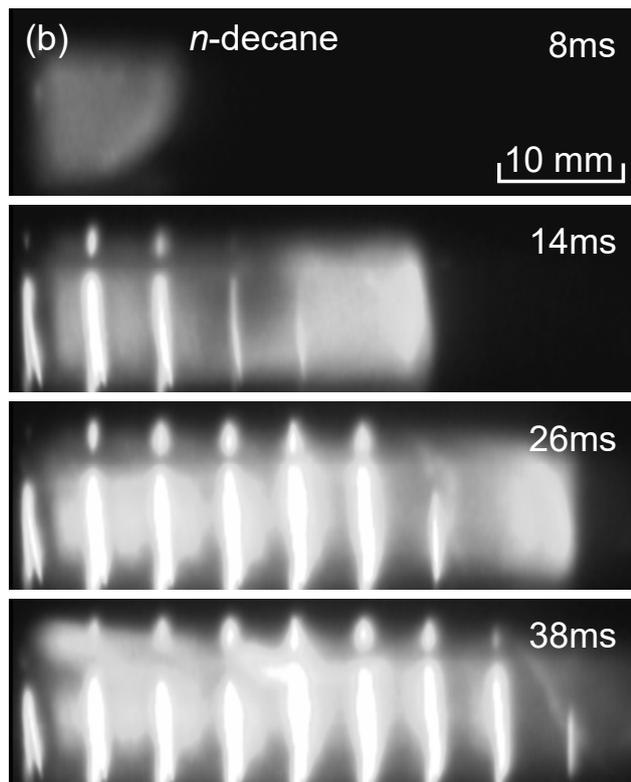
(エタノール,  $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )



(a) Without droplet array,  $\phi_g = 1.1$

図 3-14 火炎伝播挙動

(デカン,  $\phi_g = 1.1$ , 液滴無し)



(b) With droplet array,  
 $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 1.1$

図 3-15 火炎伝播挙動

(デカン,  $\phi_g = 1.1$ , 液滴有り)

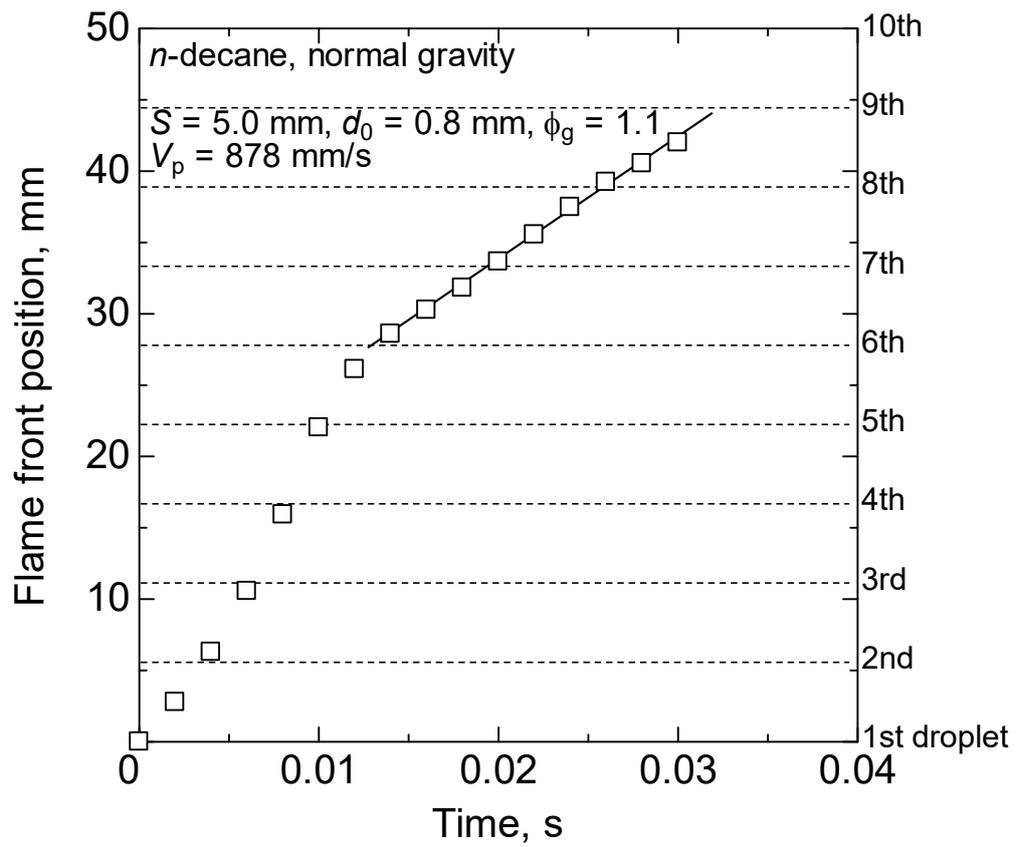


図 3-16 伝播火炎先端位置の時間履歴

(デカン,  $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )

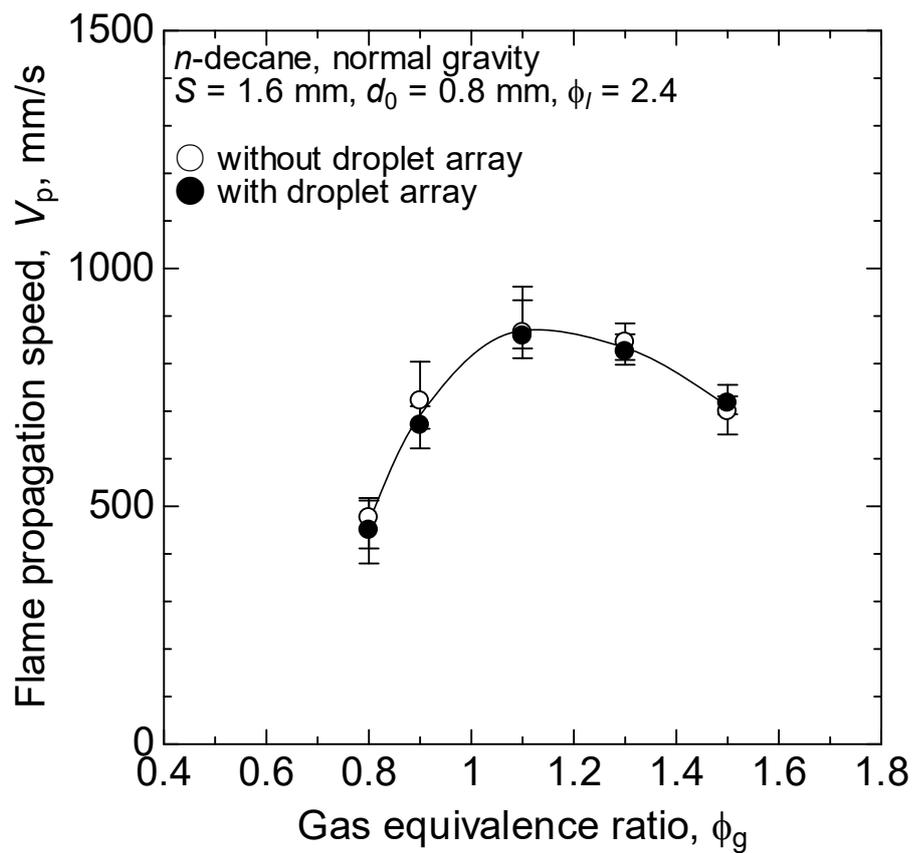


図 3-17 気体当量比と火炎伝播速度の関係

(デカン,  $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )

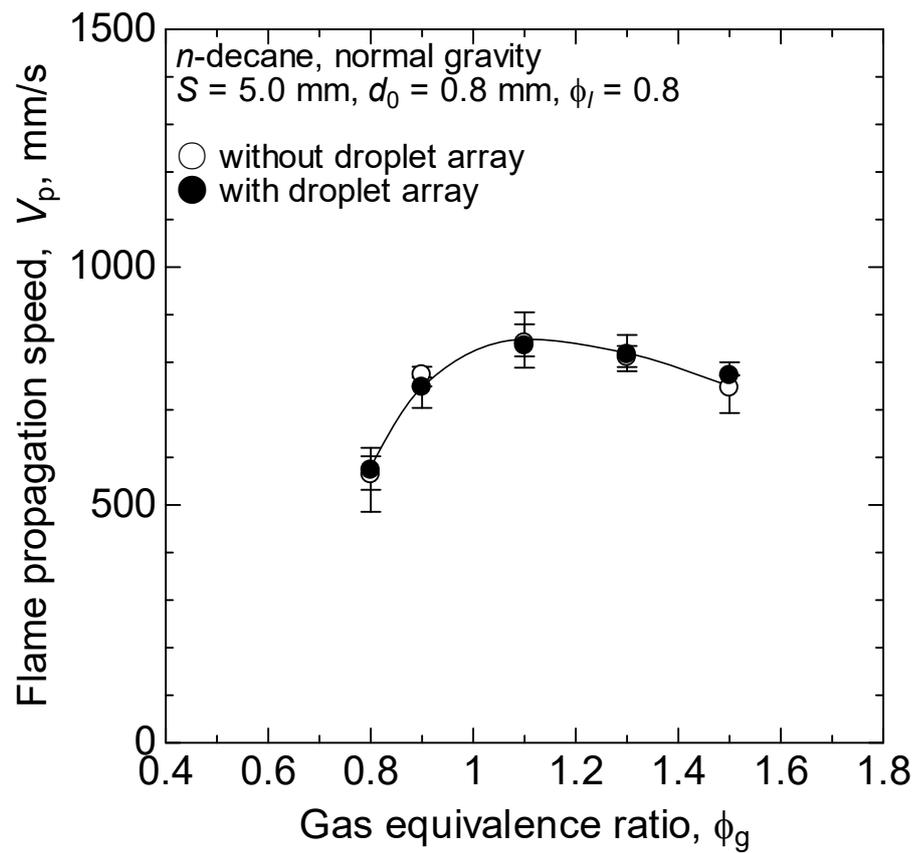
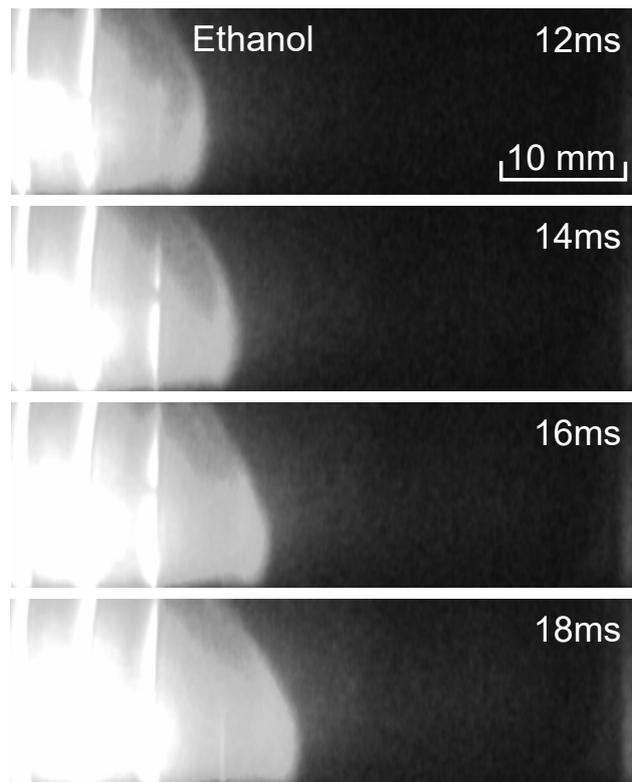


図 3-18 気体当量比と火炎伝播速度の関係

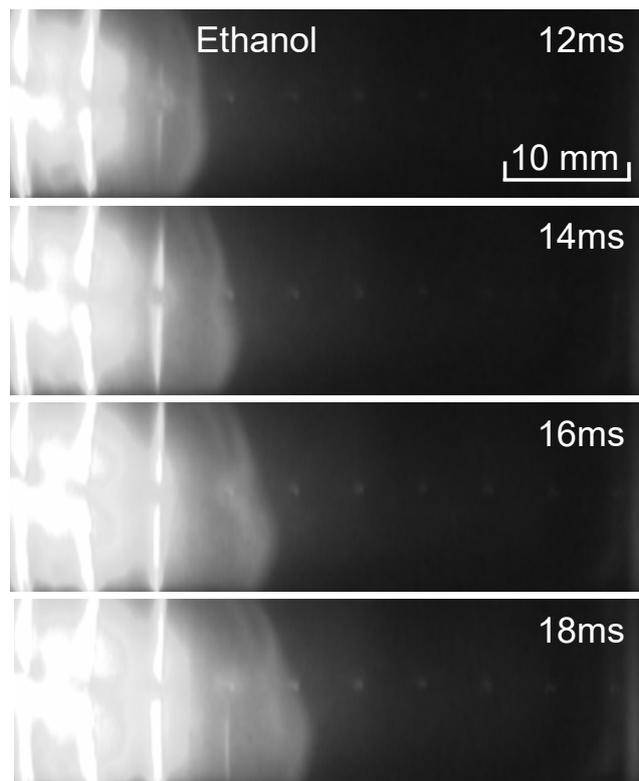
(デカン,  $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )



(a) Without droplet array,  $\phi_g = 0.8$

図 3-19 火炎伝播挙動

(エタノール,  $\phi_g = 0.8$ , 液滴無し)



(b) With droplet array,  
 $S = 5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 0.8$

図 3-20 火炎伝播挙動

(エタノール,  $\phi_g = 0.8$ , 液滴有り)

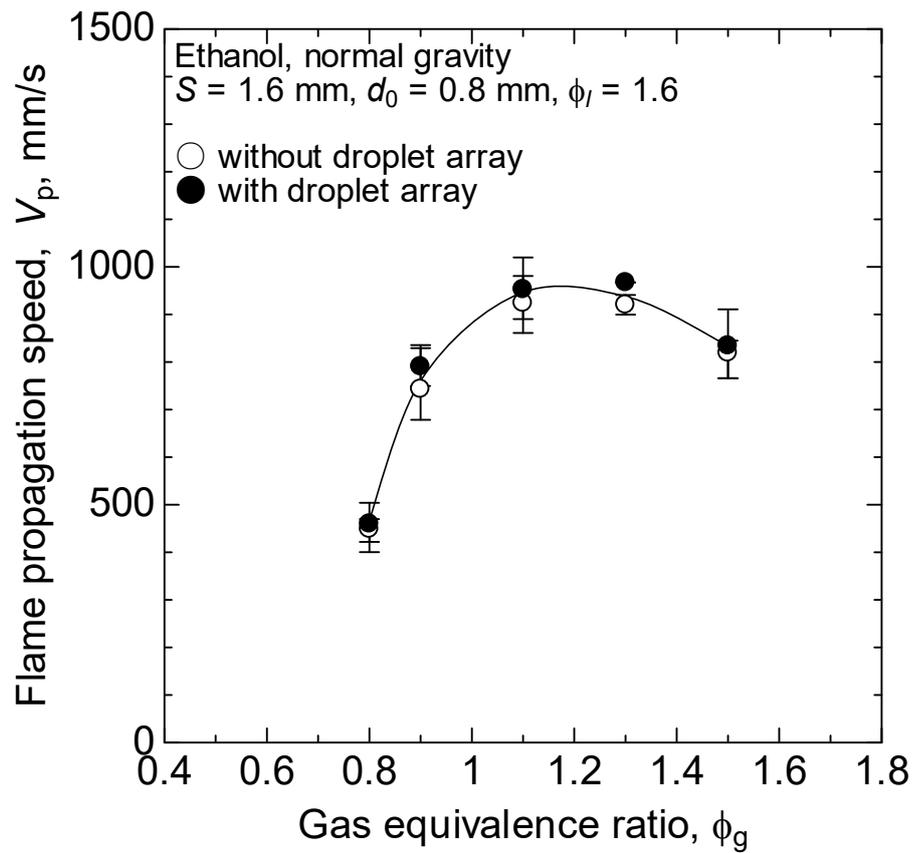


図 3-21 気体当量比と火炎伝播速度の関係

(エタノール,  $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )

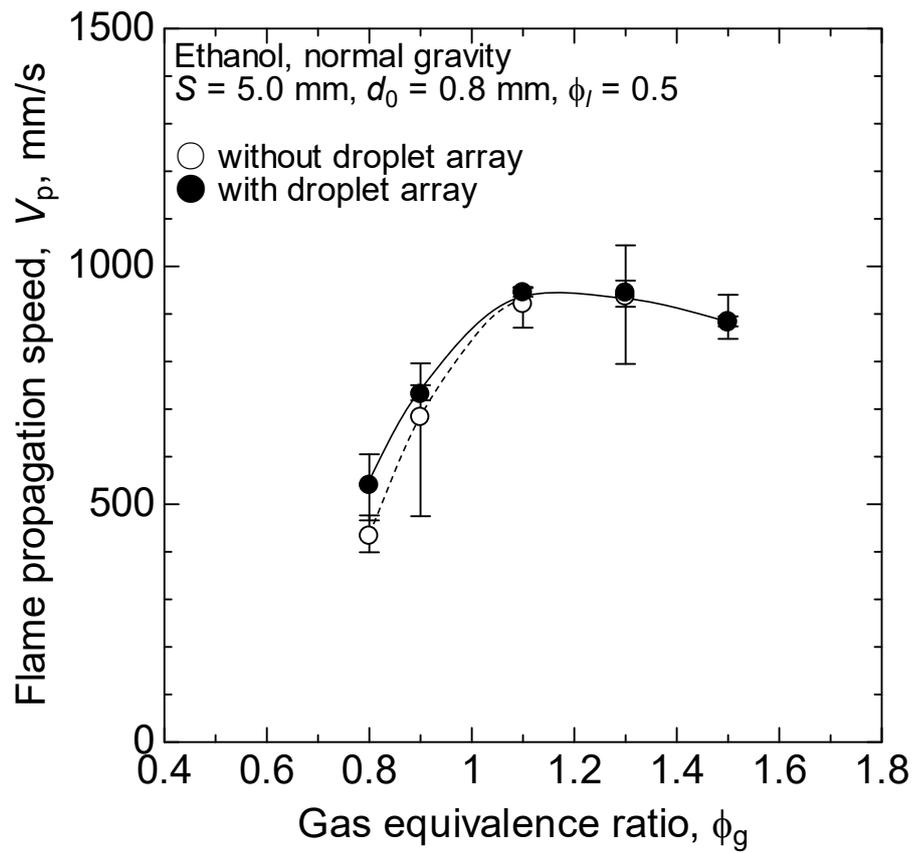


図 3-22 気体当量比と火炎伝播速度の関係

(エタノール,  $S=5.0 \text{ mm}$ ,  $d_0=0.8 \text{ mm}$ )

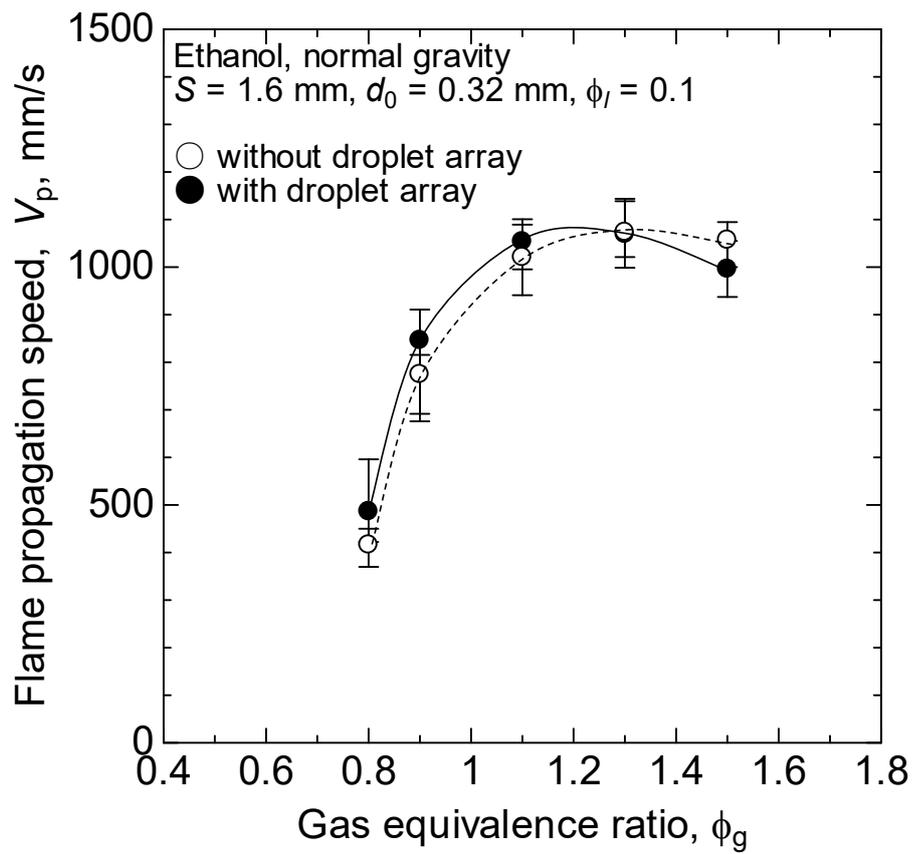


図 3-23 気体当量比と火炎伝播速度の関係

(エタノール,  $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.32 \text{ mm}$ )

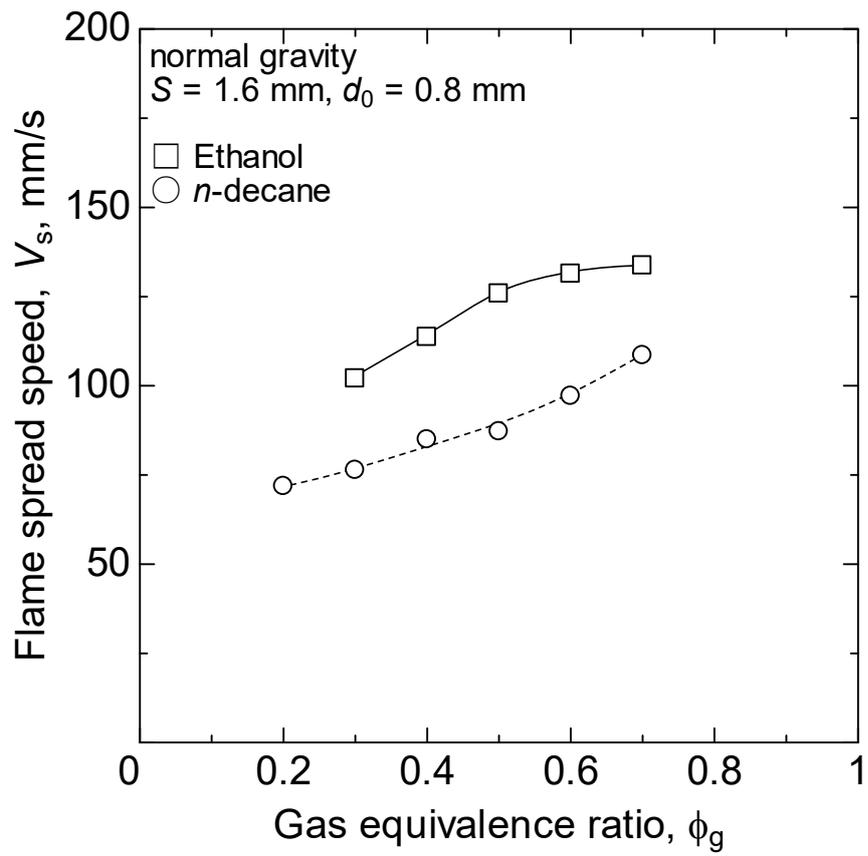


図 3-24 火炎燃え広がり速度に及ぼす気体当量比および燃料揮発性の影響

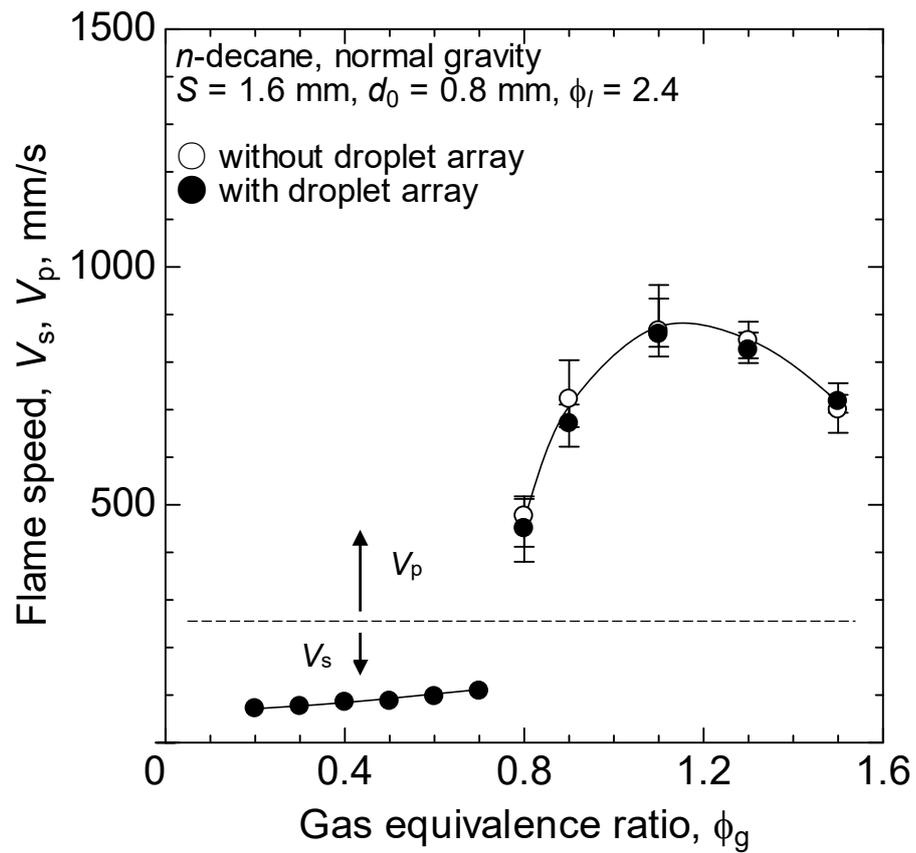


図 3-25 気体当量比と火炎速度の関係

(デカン,  $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )

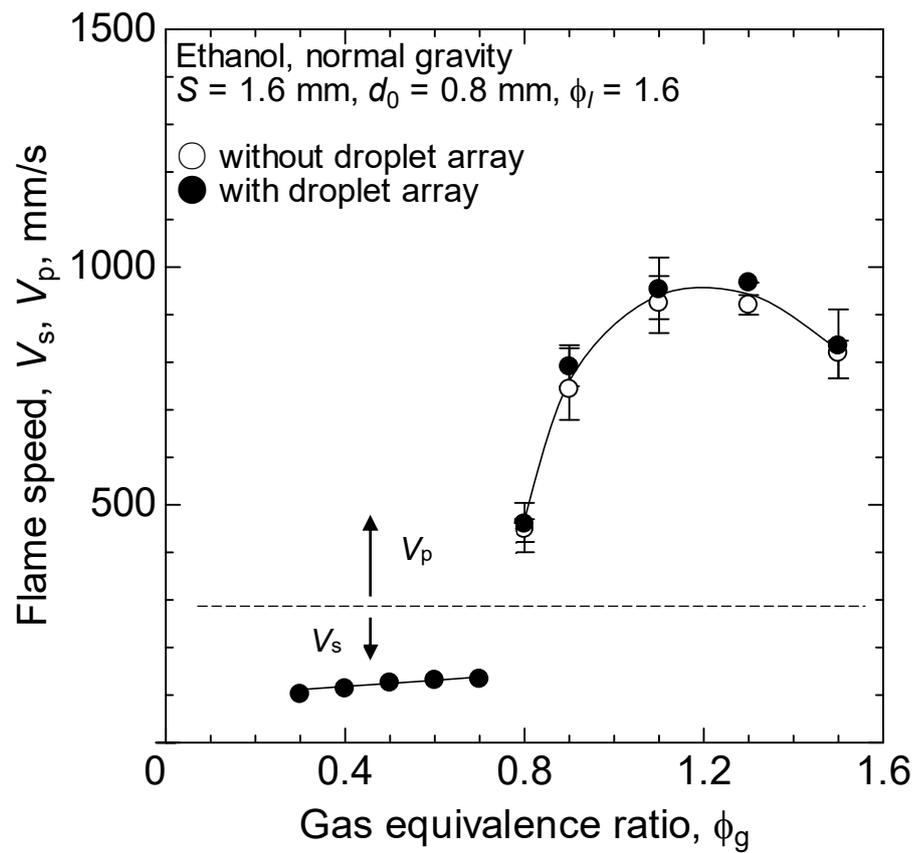


図 3-26 気体当量比と火炎速度の関係

(エタノール,  $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )

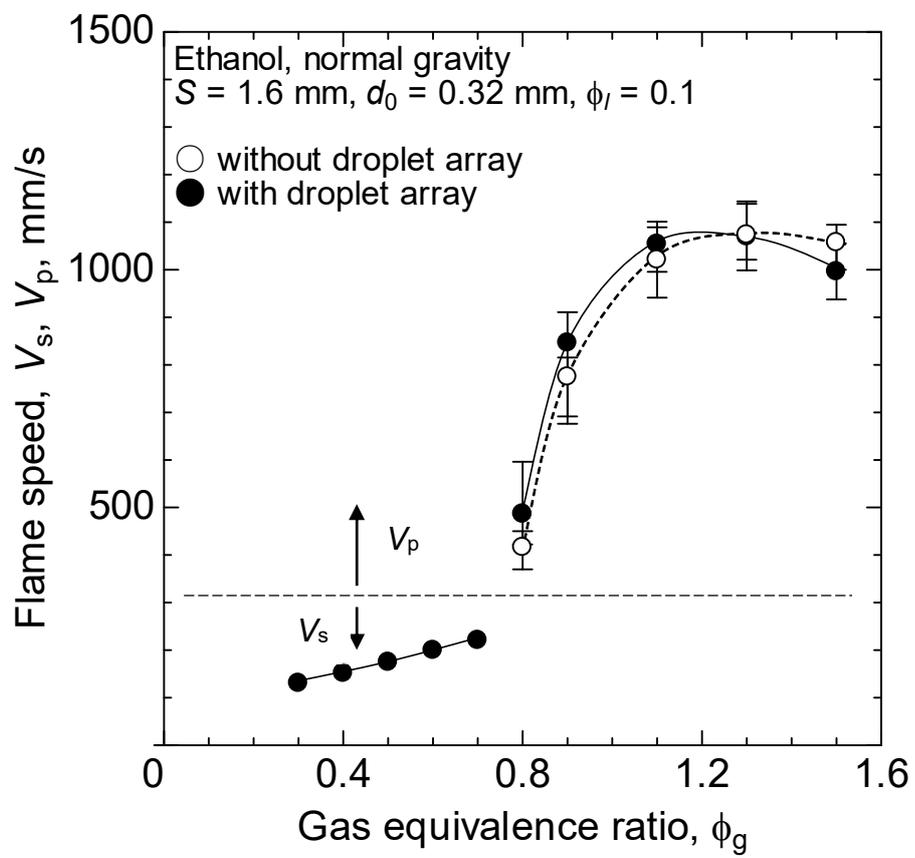


図 3-27 気体当量比と火炎速度の関係

(エタノール,  $S = 1.6 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.32 \text{ mm}$ )

## 第4章 燃え広がり及び気体当量比の影響（微小重力環境）

### 4.1 緒言

第3章において、通常重力環境で予備実験を行い、気相当量比が燃え広がり及び影響の考察を行った。本章では、自然対流の影響を排除した微小重力環境下で実験を実施した結果を示す<sup>30,34-37</sup>。気体当量比を増大させることで、初期加熱時間が短縮される。混合気の温度伝導率は空気と大きく変わらないため、気体当量比は熱伝導時間に影響を及ぼさないと考えていたが、通常重力実験の結果からは異なる結果が得られた。数値シミュレーションによれば発熱領域の拡大であることが示されている。そこで、燃え広がり速度のほか、拡大観察による火炎直径の計測を行った。

### 4.2 実験条件および実験方法

実験装置は2.1項の気体当量比依存性検証用の装置を使用した。実験は気体当量比が火炎燃え広がり及び影響を調べるため、火炎伝播が生じない範囲の気体当量比で実施した。また、幅広い無次元液滴間隔の条件で実験を行った。表4-1に実験条件を示す。

#### 4.2.1 液滴膨張の定義

膨張開始時刻は液滴直径の2乗履歴において、微小重力検知から0.1sまでの期間の傾きを閾値とし、その期間の傾きの最大値を最初に超えた時刻とした。

#### 4.2.2 点火の定義

液滴の点火は液滴を支持している懸垂線の発光を高速度カメラに捕え、数値化することにより求めた。懸垂線の発光検出には、自作の解析プログラムを用いた。懸垂線が赤熱すると、赤色輝度レベルは増大するが、青色輝度レベルはあまり変化しないことを利用し、高速度カメラから得られた懸垂線連続画像の赤色輝度レベルと青色輝度レベルの比が連続的に閾値を越える最初の時刻の1コマ前の時刻を液滴の点火時刻とした。

#### 4.2.3 燃え広がり誘導時間の定義

燃え広がり誘導時間 $\tau_f$ は、対象の液滴の点火時刻から1個前の液滴の点火時刻を引いて求め、対象の液滴の1個前の液滴の初期直径の2乗で正規化した。

#### 4.2.4 燃え広がり速度の定義

燃え広がり速度は、点火誘導時間を液滴間隔  $S_{n-1\sim n}$  で除して算出した。液滴間隔は前述の画像解析ソフトにより液滴中心座標間の距離を計測して求めた。

対象となる第  $n$  液滴の 1 個前の液滴の初期液滴直径  $d_{0(n-1)}$  で正規化した。

$$V_s d_{0(n-1)} = \frac{S_{(n-1)\sim n} / d_{0(n-1)}}{\tau_f / d_{0(n-1)}^2} \quad (4.1)$$

#### 4.2.5 点火誘導時間

直径 2 乗履歴より、対象とする液滴が燃え広がり火炎から熱的影響を受けて熱膨張を開始した時刻と点火した時刻を求め、それらの時刻の差を点火誘導時間  $\tau_i$  として求めた。

#### 4.2.6 点火誘導時間・燃え広がり誘導時間比

正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比として求めた。

$$\tau_{\text{ratio}} = \frac{\tau_i / d_{0n}^2}{\tau_f / d_{0(n-1)}^2} \quad (4.2)$$

#### 4.2.7 火炎速度

液滴列燃焼実験において、気体当量比によって火炎進行の挙動が異なる。本研究では、火炎燃え広がり と 火炎伝播 に大きく分けて議論をおこなった。両者の火炎前縁の平均移動速度を総称して火炎速度とした。以下にそれぞれの燃焼挙動と火炎速度の算出方法を示す。

##### (1) 火炎燃え広がり速度

気相火炎伝播限界以下の気体当量比雰囲気中における、液滴を沿った火炎の進行を火炎燃え広がりとした。本研究で用いた燃焼容器では気体当量比が 0.8 以上で気相

火炎伝播が起こるため、気体当量比 0.7 以下における液滴列燃焼は燃え広がりとなる。火炎燃え広がり速度  $V_s$  は、点火の影響が存在する第 1 液滴から第 2 液滴間の燃え広がりを除き、第 2 液滴以降の火炎前縁の平均移動速度と定義した。

## (2) 火炎伝播速度

気体当量比 0.7 を越えると予混合火炎伝播のことを火炎伝播とした。火炎伝播の場合、閉端から点火位置までの距離が火炎伝播速度に影響を及ぼすことがわかった。そこで、火炎伝播実験においては、液滴列の長さにかかわらず、閉端から 46.5 mm の位置に点火線を配置し、火炎伝播を起こさせた。火炎伝播速度  $V_p$  の計測位置は液滴列長さによって計測位置を変えた。液滴間隔が 1.6 mm の場合は、第 1 液滴と第 7 液滴が懸垂される位置の間（閉端から 5.6 ~ 15.2 mm）、液滴間隔が 5.0 mm の場合は、第 5 液滴から第 9 液滴が懸垂される位置の間（閉端から 12.5 ~ 32.5 mm）における火炎前縁の平均移動速度を火炎伝播速度と定義した。

## 4.2.8 実験試料

燃料には適当な揮発性を有し、他研究者により燃え広がり基礎的なデータが得られている点から、正デカン ( $C_{10}H_{22}$ , 鹿特級) を使用した。

## 4.3 実験結果および考察

### 4.3.1 等間隔モデル実験結果の液滴マトリックス燃焼への拡張

液滴間隔と実験空間の正方形断面の一辺が等しい条件で燃え広がり実験を行った。  $S = 8.0$  mm,  $d_0 = 1.0$  mm の条件の場合、気体当量比を 0.1 から 0.5 に変化させても、燃え広がり起こらなかった。この条件は、 $\phi_l = 9.3$ ,  $\phi_t = 9.4 - 9.8$ ,  $d_0 = 1.0$  mm の条件の部分予蒸発噴霧に相当する。三上らの行った微小重力実験によれば、雰囲気温度 300 K の条件では  $S/d_0 = 14$  が燃え広がり限界距離である<sup>9)</sup>。本実験では、対称性を考慮した実験空間形状であるため、燃焼室内における酸素不足が燃え広がりを抑制したと考えられる。  $S = 15$  mm,  $d_0 = 1.0$  mm の条件の場合も、気体当量比を 0.1 から 0.5 に変化させても、燃え広がり起こらなかった。この条件は、 $\phi_l = 1.4$ ,  $\phi_t = 1.5 - 1.9$ ,  $d_0 = 1.0$  mm の条件の部分予蒸発噴霧に相当する。これは、火炎と未燃次液滴との間隔が広く、火炎から未燃次液滴への熱伝達が十分に行われなためであると考えられる。図 4-1 に点火した第 1 の燃焼挙動の連続写真を示す。液滴の周囲に形成された球状火炎は点火後すぐに輝炎が消え、弱い青炎だけになった。これは、酸素の拡散濃度が低下したことで、火炎温度が減少していると推察される。気体当量比の増大に伴って、火炎直径が増大し燃え広がり限界距離が伸びると予想されたが、拡散速度の低下がマイナスの効果となり予想とは反した結果となった。気体当量比

を火炎伝播限界以上にすると、気相火炎伝播が起こり、燃焼室閉端まで火炎が伝播した。このことから、大気圧の燃料蒸気 - 空気予混合気中に単純立方格子状に配置された正デカン液滴マトリックス外縁の液滴が同時に点火した場合を推察すると、気体当量比が火炎伝播限界以上の場合、気相火炎伝播が起こり、火炎はマトリックス中心まで進行するが、気体当量比が火炎伝播限界以下の場合、液滴を伝っての火炎燃え広がりにはマトリックス内部に進行しないことが示唆される。

### 4.3.2 気体当量比が火炎燃え広がり及び影響（列方向圧縮モデル）

通常重力実験と同様に、一辺が 25 mm の燃焼容器を用いて火炎燃え広がりの実験をいった。図 4-2 に、燃え広がり連続写真を示す。未燃次液滴に点火直後は球状の火炎が形成されるが、すぐに未燃側から既燃側へと流される涙型の火炎となった。液滴燃焼による周囲気体の体積膨張が実験空間の閉端側から開端側へと流れを形成している。また、図 4-3 に示すように、流れの中心付近にはすすが線状になって流れていく様子も観察された。通常重力環境では、自然対流により発生したすすは上方に次々と流されていくが、微小重力環境では現象が軸対象であるため、液滴の周囲で形成されたすすが前述の閉端側から開端側へ向かう流れに沿って線状に観察されたと考えられる。

図 4-4 に、副変数を無次元液滴間隔とした場合の、初期液滴直径で正規化した火炎燃え広がり速度と気体当量比の関係を示す。気体当量比の増大に伴い、火炎燃え広がり速度は全ての無次元液滴間隔において増大した。菊池らによる予混合気中での液滴列燃え広がり数値解析結果によれば、モード 1 の燃え広がり起こる液滴間隔が密な  $S/d_0 = 2$  の場合、周囲気体当量比が高くなるのに伴って群燃焼火炎先端外縁に予混合燃焼領域が発生・拡大し、火炎先端での発熱が増大すると考えられる。これにより、未燃次液滴からの蒸発が活発になり、短時間で液滴間に連続した可燃燃混合気層を形成するため、燃え広がり速度が増大すると考えられる。モード 2 および 3 が起こる液滴間隔が大きい場合は、火炎から未燃次液滴に熱が移動し、未燃次液滴周囲に可燃混合気層が形成されることにより、液滴間を火炎が燃え広がる。気体当量比の増大に伴って発達する火炎外縁の予混合燃焼領域が、未燃次液滴の蒸発を促進すると考えられる。さらに、可燃混合気層形成に必要な未燃次液滴からの蒸発量が、気体当量比の増大に伴って減少する。これにより、初期加熱時間が短縮し、燃え広がり速度が増大すると考えられる。気体当量比が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響を無次元液滴間隔で比較するため、各無次元液滴間隔の  $\phi_g = 0.2$  における火炎燃え広がり速度で各気体当量比の火炎燃え広がり速度を除いた燃え広がり速度比と気体当量比の関係を図 4-5 に示す。無次元液滴間隔の増大に伴い、気体当量比を増大させた時の速度比の増大率が大きくなる。つまり、間隔の増大に伴い燃え広がり速度の気体当量比への依存性が大きくなっていることを示している。図 4-6 エ

ラー！参照元が見つかりません。に正規化した火炎燃え広がり速度と無次元液滴間隔との関係を示す。火炎燃え広がり速度の最大値は、いずれの気体当量比においても無次元液滴間隔が3から4の間で発生した。 $S/d_0$ が3.0, 3.75, 5.0, および10,  $\phi_g=0.7$  の条件において、燃え広がり火炎の前方に予混合伝播火炎が発生したと考えられる現象が起こった。先行する予混合伝播火炎をカメラで記録することはできなかった。この時の火炎燃え広がり速度を、図 4-6 正規化火炎燃え広がり速度と無次元液滴間隔の関係に黒塗りのプロットで示す。燃え広がり火炎に先行する予混合伝播火炎は、これらの条件においてのみ燃え広がり途中で発生した。液滴間隔が密である場合には、液滴に熱を奪われるため発生が抑制されたと推察される。現象が発生した場合、予混合伝播火炎により加熱された液滴が自発点火することで、見かけ上の火炎燃え広がり速度は増大する。また、予混合伝播火炎が発生した範囲において、間隔の増大に伴い火炎燃え広がり速度は増大した。液滴間隔が増大するのに伴って、予混合伝播火炎が速くなり後続の燃え広がり火炎の速度も増大したためと考えられる。以上から、無次元液滴間隔がさらに広い条件で予混合伝播火炎が発生した場合、より速い見かけ上の火炎燃え広がり速度が計測されると予想される。また、燃え広がり限界を超える液滴間隔において自立可能な予混合伝播火炎が発生した場合、予混合伝播火炎により液滴が次々と点火されるため、見かけ上の燃え広がり現象が観察されると推察される。

### 4.3.3 火炎燃え広がり及び自然対流の影響

$S/d_0=2.0$  および  $3.75$  の条件における、初期液滴直径で正規化した火炎燃え広がり速度と気体当量比の関係に及ぼす重力の影響を調べた結果を、図 4-7 および図 4-8 に示す。燃え広がりモード1が発生する液滴間隔が短い  $S/d_0=2.0$  の場合、通常・微小どちらの重力環境においても火炎燃え広がり速度はほぼ同じ値になった。これに対し、燃え広がりモード2が発生する  $S/d_0=3.75$  の場合、自然対流の影響を受けない微小重力環境における火炎燃え広がり速度の方が、通常重力環境の場合より速くなった。過去の実験から、より間隔が長い  $S/d_0=6.25$  の条件においても火炎燃え広がり速度は微小重力環境の方が速いことから、モード1が発生する場合のみ、火炎燃え広がり速度に与える自然対流の影響が少ないと考えられる。

### 4.3.4 燃え広がる液滴個数 / 燃え尽きる液滴個数

$S=5.0$  および  $8.0$  mm,  $d_0=0.8$  mm の条件において、すべての液滴が燃え広がりによって燃焼が開始した。気体当量比を変化させても燃え広がる液滴の個数に変化は無かった。燃焼開始後、液滴は次液滴の火炎によって加熱され、燃え尽きたのか蒸発したのか判別ができなかった。

### 4.3.5 点火誘導時間

点火誘導時間は、膨張を開始した時刻を液滴が熱的干渉を受け始めた時刻とし、燃え広がる火炎から対象の液滴が熱的干渉を受け始めてから点火に至るまでに要する時間として定義している。図 4-9 に対象となる液滴の初期液滴直径の 2 乗で正規化した点火誘導時間と無次元液滴間隔との関係を示す。無次元液滴間隔  $S/d_0$  が 2 から 3 までの範囲では正規化点火誘導時間は減少し、その後、無次元液滴間隔が増大するに伴い、正規化点火誘導時間は増加していることがわかる。図 4-10 に正規化点火誘導時間と燃え広がり誘導時間比を示す。正規化点火誘導時間と正規化燃え広がり誘導時間比については次節で詳細に述べる。 $S/d_0$  が 2 の条件では対象液滴は少なくとも 2 個前およびそれ以前の液滴が点火した後に加熱が開始されているが、 $S/d_0 = 3$  の条件では 1 個前の液滴が点火した後に加熱が開始されていることがわかる。したがって、対象液滴より以前の液滴が点火した後に対象液滴が熱的影響を受けるまでの間に存在する液滴の個数が点火誘導時間に影響を与えていると考えられる。つまり、対象液滴より以前の液滴が点火した後に対象液滴が熱的影響を受けるまでの間に存在する液滴が燃え広がる火炎のヒートシンクの役割を果たすため、液滴の個数が多い  $S/d_0 = 2$  の条件の方が点火誘導時間が大きくなったと考えられる。また、気体当量比の増大に伴って点火誘導時間が減少する傾向がみられた。

### 4.3.6 点火誘導時間と燃え広がり誘導時間比

正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比を求めた。正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比は、対象液滴の何個前の液滴が点火した時点から対象液滴の加熱が開始されているかの指標であり、式 4.2 で表される。図 4-10 に正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比を無次元液滴間隔の関数として表す。燃え広がり誘導時間は対象液滴の 1 個前の液滴が点火してから対象液滴が点火するまでに要する時間として定義した。正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比は、対象液滴の何個前の液滴が点火した時点から対象液滴の加熱が開始されているかの指標である。 $S/d_0$  が 6.25 までの範囲では無次元液滴間隔の増大に伴って正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比は減少していきことがわかった。 $S/d_0$  が 2, 3 および 3.75 の場合、時間誘導比が 1 より大きいことから、隣接する未燃次液滴が点火する以前から未燃液滴は火炎の熱的影響を受けていることがわかる。一方、 $S/d_0$  が 6.25 および 12.75 の場合、ほぼ隣接する液滴の点火時刻から熱的影響を受けることがわかる。 $S/d_0$  が 6.25 の場合は、正規化燃え広がり誘導時間に占める火炎から液滴への熱伝導時間が顕著になったため、正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比が 1 に近い値を示したと考えられる。 $S/d_0$  が 12.25

の場合は、図 4-9 からわかるように、無次元液滴間隔の増大に伴い、点火誘導時間も著しく増大している。化学的点火誘導時間が非常に長くなるため、正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比が 1 に近い値を示したと考察される。

#### 4.3.7 液滴直径履歴と火炎半径履歴

本論文では自作の解析プログラムを用いて燃え広がる火炎による懸垂線の発光を解析し、火炎の先端位置の推定を行った。

図 4-11 に拡大撮影した第 5 および第 6 液滴の画像を示す。無次元液滴間隔  $S/d_0$  は 6.25、気体当量比は 0.2 である。画像の中に火炎は確認できないが、液滴の下側懸垂線が発光している様子（画像中の白矢印）が見て取れる。第 5、および第 6 液滴について、火炎半径を初期液滴直径で除した無次元火炎半径の履歴と第 6 液滴の直径履歴を図 4-12 に示す。横軸は第 5 液滴が点火した時刻を 0 とした経過時間である。OEF, SODF, IEF はそれぞれ第 5 および第 6 液滴についての火炎外縁、火炎半径、火炎内縁を示している。第 5 液滴の点火後、火炎外縁が急速に拡大し、点火後 0.016 s で第 6 液滴は膨張を開始した。この時点で第 5 液滴の火炎は、燃え広がり火炎先端が半球形だと仮定すると、火炎外縁は約 4 mm であることから、第 6 液滴に到達していない。この 0.016 s 間で、第 5 液滴の初期火炎からの熱が雰囲気気体を伝わり、第 6 液滴に到達したと考えられる。第 5 液滴の点火後 0.08 s 付近において第 6 液滴の膨張が最大となり、0.086 s で点火した。これは、第 5 液滴の火炎が第 6 液滴の火炎に影響を及ぼした結果だと考えられる。第 6 液滴の点火時刻に第 5 液滴の火炎半径履歴に第 6 液滴の影響だと思われる段階的な増大が観察された。第 6 液滴の火炎半径履歴にも、第 7 液滴の点火の影響と考えられる火炎半径の段階的増大が見て取れる。図 4-13 から図 4-17 にそれぞれの液滴間隔における無次元火炎半径の履歴と液滴の直径履歴を示す。液滴間隔が 1.6 mm および 2.4 mm, 3 mm の条件では、観察対象液滴が 4 つまたは 3 つであるため、第 5、第 6、第 7 液滴の液滴直径の履歴を記載した。第 6 および第 7 液滴の点火時刻における第 5、第 6 液滴の火炎半径の段階的増大が確認できる。また、第 6 液滴の液滴膨張は第 5 液滴の点火前から開始されていることがわかる。図 4-13 において、 $S/d_0 = 2$  の条件では第 4、第 5、第 6、第 7 液滴は液滴が点火する時刻よりも前に膨張を開始した。 $S/d_0 = 2$  は液滴間隔が狭く、イグナイタとの距離も短い。そのため、第 4 液滴は前の液滴の火炎の熱の影響とイグナイタの熱の影響を受け、点火する時刻よりもはるかに早く加熱が開始されたと考えられる。点火源が離れるにつれ、イグナイタの影響が無くなり、液滴の加熱が開始される時間が遅くなっていったと考えられる。また、第 4 液滴の初期火炎半径よりも第 5 液滴の初期火炎半径が大きくなり、第 6 液滴の初期火炎半径よりも第 7 液滴の初期火炎半径が大きくなっているように、偶数番の液滴と奇数番の液滴の初期火炎半径が交互に振動しているような現象が確認された。図 4-14 でもこのような初期火炎半径が交互

に増大する現象が確認されたが、図 4-15 から図 4-17 までの液滴間隔が大きくなるような条件では確認されなかった。図 4-14 で液滴直径の履歴に着目する。この条件では第 6, 第 7 液滴は一度急激に膨張した後に縮小し、その後緩やかに縮小していった。その後点火した。モード 1 であるこの条件では、対象液滴は燃え広がる火炎に取り込まれてから点火するため、燃え広がる火炎が対象液滴表面を加熱しながら通過し、液滴が膨張したと考えられる。図 4-16 においてモード 2 に分類される  $S/d_0=5$  の条件では、モード 1 のような急激な液滴の膨張は確認されなかった。これは対象液滴の 1 つ前の液滴に燃え広がる火炎が対象液滴に到達していないためだと考えられる。またこのとき、燃え広がる火炎からの熱伝導によって液滴が膨張すると考えられる。図 4-17 においてモード 3 に分類される  $S/d_0=12.75$  の条件では、液滴の膨張はさらに緩やかになった。また、火炎半径が他の液滴間隔に比べ小さくなった。

#### 4.3.8 初期火炎直径

図 4-18 に初期火炎半径を初期液滴直径で除した無次元初期火炎半径を気体当量比の関数として示す。無次元液滴間隔  $S/d_0$  が 3 から 12.75 までの範囲では、いずれの気体当量比においても無次元初期火炎半径は約 1.7 であり、気体当量比の増大に伴ってわずかに増大する傾向を示した。 $S/d_0$  が 2 の場合、気体当量比が 0 から 0.4 までは無次元初期火炎半径は約 1.5 であるが、それ以降、気体当量比の増大に伴い、無次元火炎半径が約 2 まで増加した。気体当量比の増大に伴って酸素濃度と蒸気濃度のつり合い点が液滴から離れることで火炎半径が増大するためだと考えられる。

#### 4.3.9 対象液滴の未燃次液滴に燃え広がった瞬間の対象液滴の火炎半径

図 4-19 に第 6 液滴に火炎が燃え広がった瞬間の第 5 液滴の無次元火炎半径を気体当量比の関数として示す。未燃次液滴に燃え広がりが起こる瞬間の無次元火炎半径は、無次元液滴間隔  $S/d_0$  が 2, 3 の条件では無次元火炎半径がそれぞれ約 2 と 3 を示した。このときの燃え広がりには梅村らによって分類されたモード 1 に対応する。 $S/d_0$  が 2 および 3 の条件では、第 5 液滴の火炎が第 6 液滴を取り込むようにして燃え広がる。燃え広がる火炎は燃え広がり方向に進行しようとするが、気体当量比の増大に伴って、第 6 液滴が点火する前に第 5 液滴周囲の可燃性混合気が形成される時間が短くなり、燃え広がり方向よりもそれに対して縦方向に膨らんだ火炎に取り込まれると推察される。そのため、気体当量比の増大に伴って無次元火炎半径が増大したと推察される。 $S/d_0$  が 2 と 3 の条件では、液滴間隔の狭い 2 の方がその影響を大きく受けたと考えられる。また、現在の火炎検知プログラムは対象液滴を支持している懸垂線の発光を対象液滴の発光として検知しているため、 $S/d_0$  が 2 と 3 の条件では、対象液滴の 1 つ前の火炎の熱による発光の可能性がある。しかしながら、図 4-14 にある

ように、対象液滴に火炎が燃え広がった時刻に、対象液滴の 1 つ前の液滴の火炎半径が階段状に増大することから、懸垂線の発光はその液滴の火炎によるものだと考えられる。  $S/d_0$  が 3.75 から 8 までの条件では気体当量比の影響をほとんど受けず、約 3.5 の値を示した。  $S/d_0$  が 3.75 はモード 1 と 2 の遷移点であるが、今回得られた結果から、第 5 液滴の火炎先端は第 6 液滴に触れるくらいに増大しているが、第 6 液滴の可燃性混合気層に火炎が燃え広がったと考えられ、モード 2 に分類される。  $S/d_0$  が 6.25 はモード 2 と 3 の遷移点であるが、無次元火炎半径が約 3.5 であることから、火炎先端が第 6 液滴に到達する前に第 6 液滴が加熱され、自己着火したと考えられ、モード 3 に分類される。  $S/d_0$  が 12.75 の条件もモード 3 と考えられる。無次元火炎半径が  $S/d_0$  が 6.25 の条件よりも小さいのはバックライトシステムの問題に起因すると考えられるため、定量的な評価は行わないものとする。

#### 4.4 結言

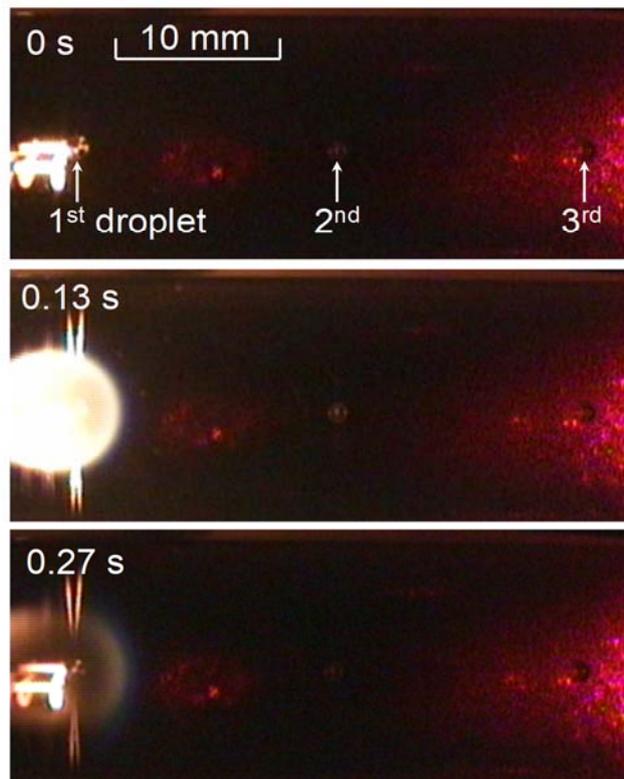
3次元直交格子状に同一粒径の燃料液滴が配置された均一部分予蒸発噴霧を模擬する液滴列燃焼実験を行った。燃料蒸気 - 空気予混合気中の正デカン液滴列を配置し、周囲雰囲気気体の気体当量比が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響と、燃料液滴列が気相火炎伝播速度に及ぼす影響を調べた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 未燃次液滴の点火により、火炎半径が段階的に増大する。
- (2)  $S/d_0 = 6.25$  の条件で液滴の点火開始時刻は液滴の膨張がピークを迎える時刻が一致する。
- (3)  $S/d_0 = 5$  以下の条件では、液滴の点火は前の液滴が点火するよりも早く膨張する。
- (4) 無次元初期火炎半径は約 1.7 であり、気体当量比の増大に伴いわずかに増大する傾向がみられる。
- (5) 第 6 液滴に火炎が燃え広がった瞬間の第 5 液滴の無次元火炎半径は、無次元液滴間隔が 2 と 3 の条件ではそれぞれ約 2 と 3 をとる。無次元液滴間隔が 3.75 から 8 までは気体当量比の影響をほとんど受けず約 3.5 の値を示す。
- (6) 正規化点火誘導時間は気体当量比の影響をほとんど受けず、燃え広がりモード 1 からモード 2 の遷移点付近である無次元液滴間隔 3 で極小値をとる。
- (7) 正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比に気体当量比は顕著な影響を及ぼさない。
- (8) 無次元液滴間隔が 3.75 以下の場合、隣接する未燃次液滴が点火する以前から未燃液滴は火炎の熱的影響を受ける。



表 4-1 実験条件

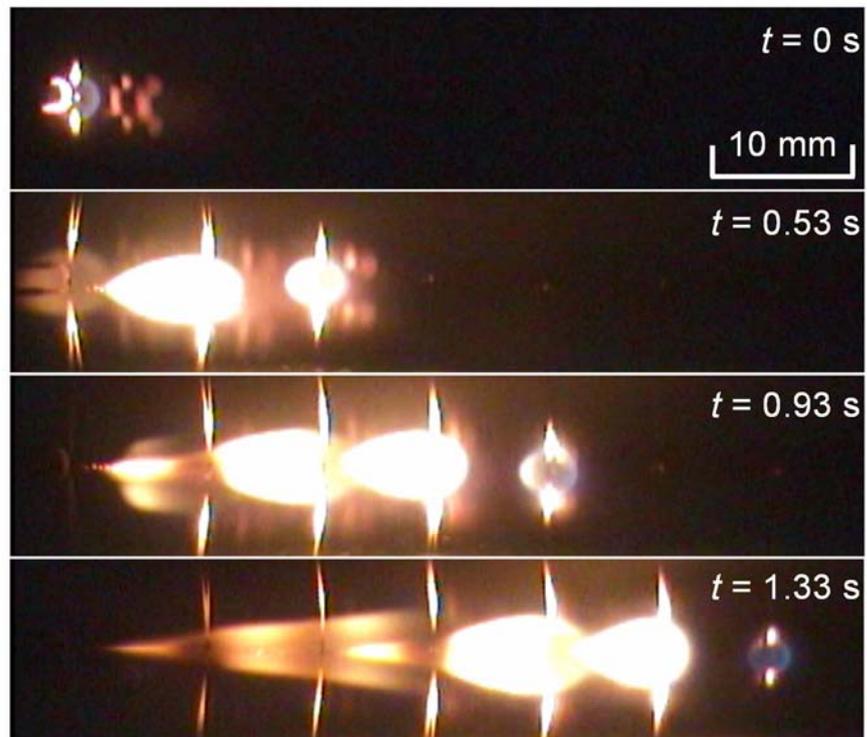
$S/d_0$	2.0, 3.0 , 3.75, 5.0, 6.25, 10.0, 12.75
Fuel	n-decane
Gas equivalence ratio, $\phi_g$	0.2 ~ 0.7
$l_{wh}$ [mm]	25
$l_d$ [mm]	116
$S$ [mm]	1.6, 2.4, 3.0, 4.0, 5.0, 8.0, 10.2 $\pm 5\%$
$d_0$ [mm]	0.8 $\pm 5\%$
Frame rate of High-speed camera [fps]	500, 1000
Gravity	Microgravity (4.5s, 1.1s)
$P_a$ [MPa]	0.10 (Atmospheric pressure)



*n*-decane, microgravity  
 $S = 15 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 1.0 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 0.5$

図 4-1 微小重力環境における火炎燃え広がり

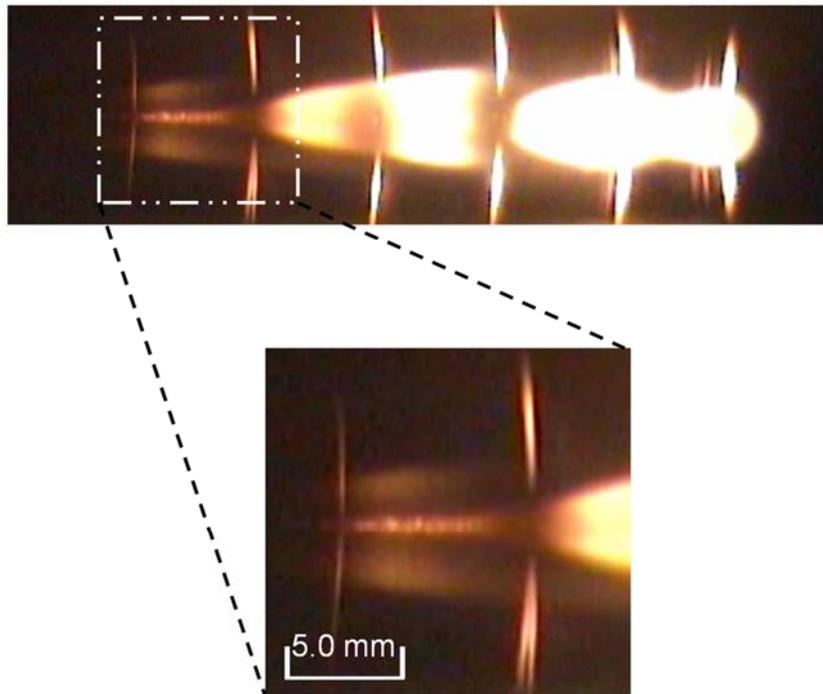
( $S = 15 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 1.0 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 0.5$ )



*n*-decane, microgravity  
 $S = 8.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 0.3$

図 4-2 微小重力環境における火炎燃え広がり

( $S = 8.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 0.3$ )



*n*-decane, microgravity  
 $S = 8.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $\phi_g = 0.3$

図 4-3 火炎燃え広がり後流におけるすすの発生

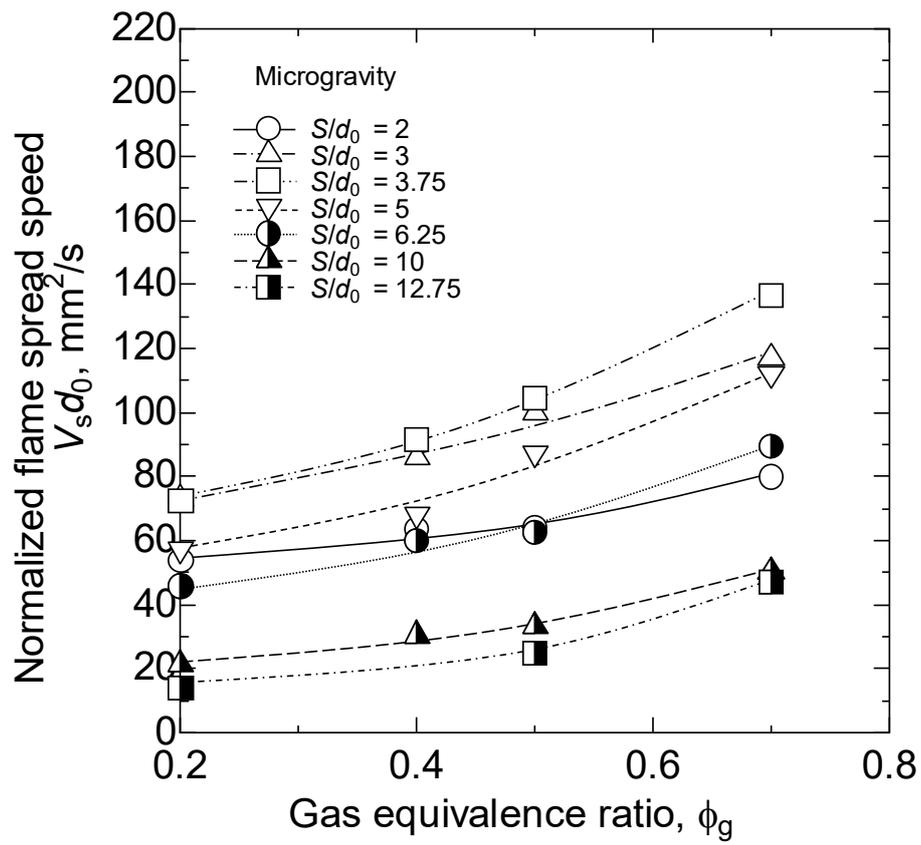


図 4-4 正規化火炎燃え広がり速度と気体当量比の関係

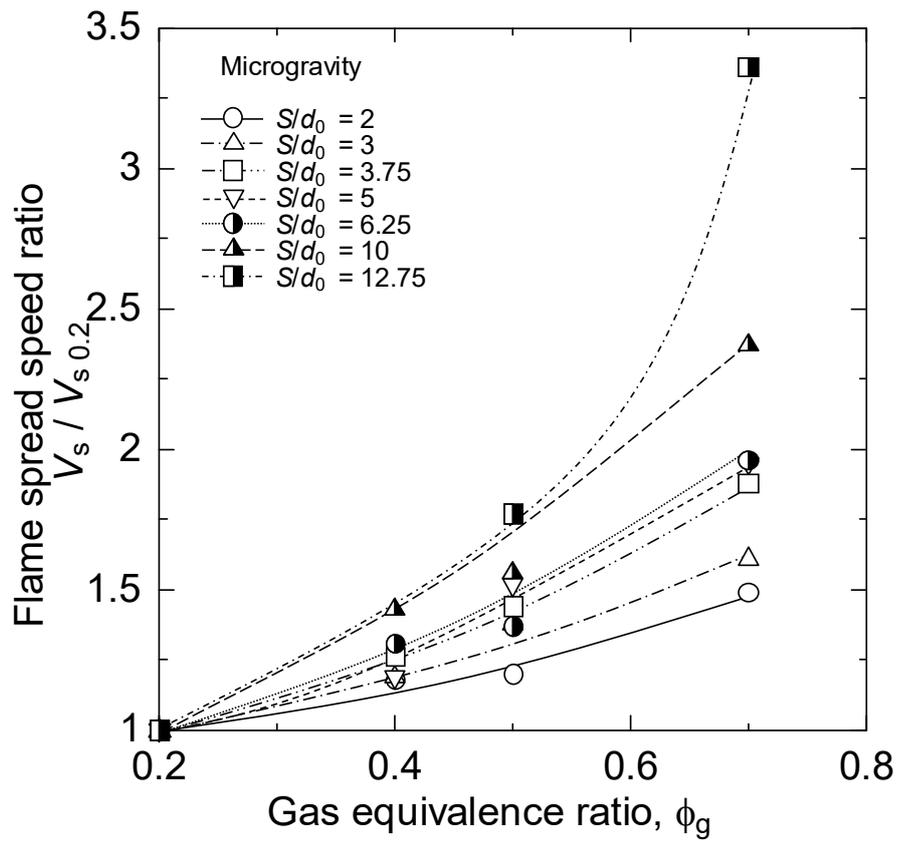


図 4-5 燃え広がり速度比と気体当量比の関係

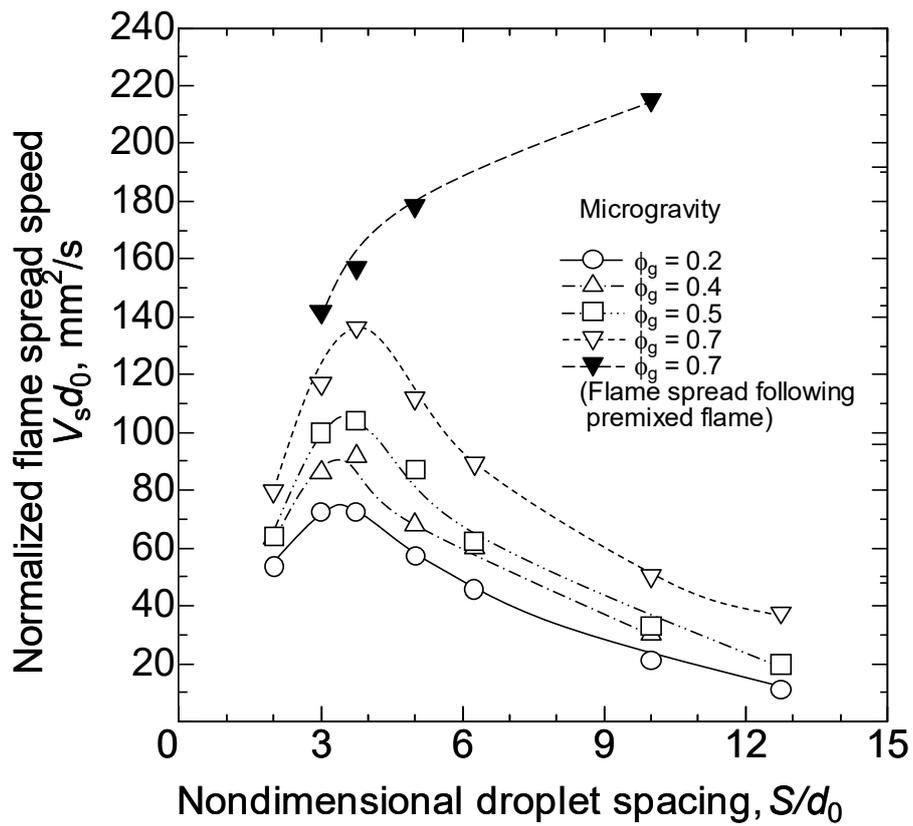


図 4-6 正規化火炎燃え広がり速度と無次元液滴間隔の関係

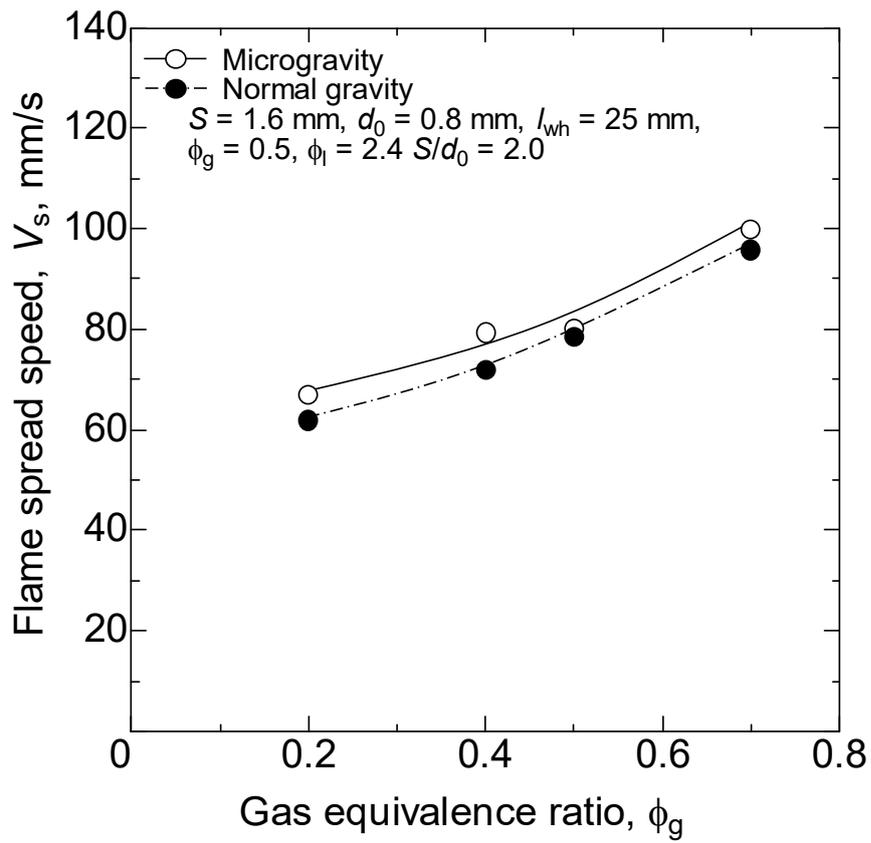


図 4-7 気体当量比と火炎燃え広がり速度の関係に与える重力の影響

( $S = 1.6 \text{ mm}, d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )

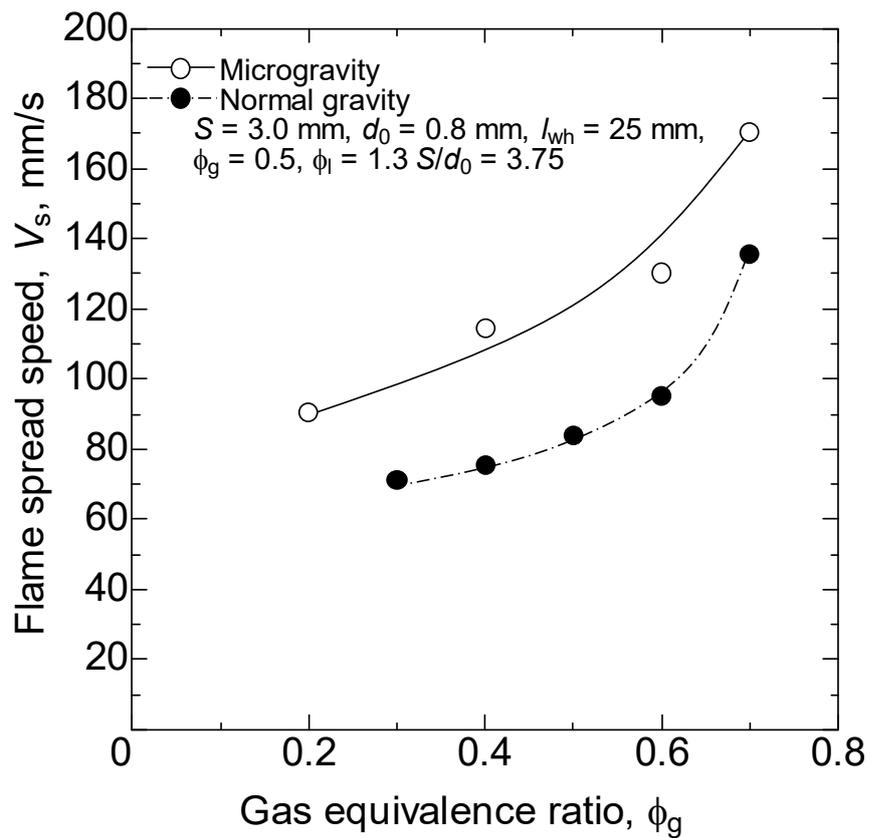


図 4-8 気体当量比と火炎燃え広がり速度の関係に与える重力の影響

( $S = 3.0 \text{ mm}, d_0 = 0.8 \text{ mm}$ )

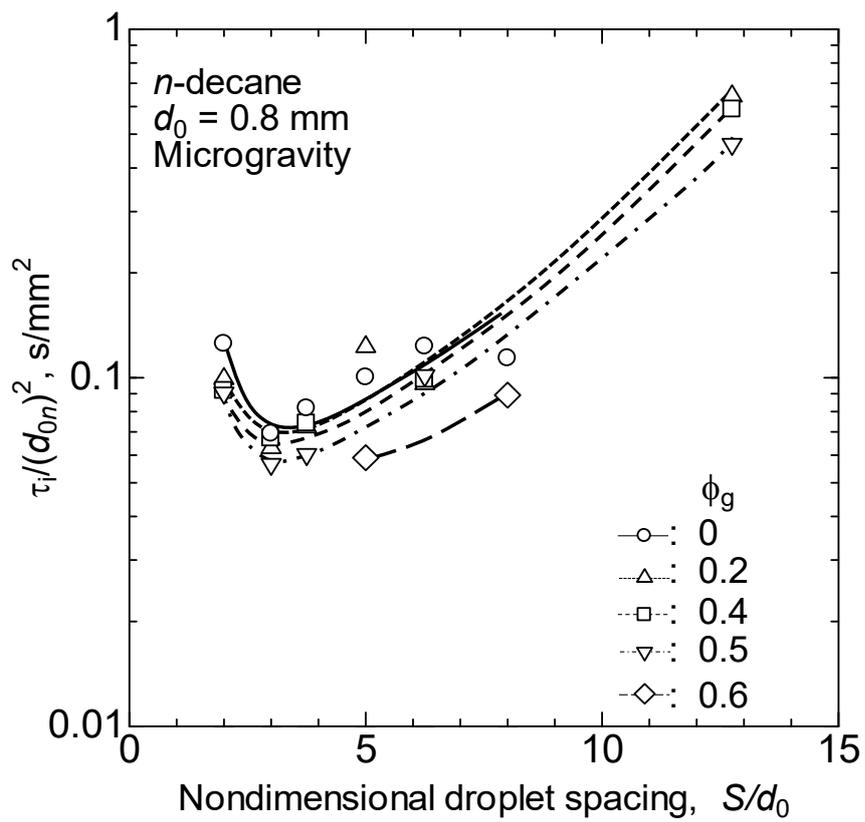


図 4-9 点火誘導時間と無次元液滴間隔の関係

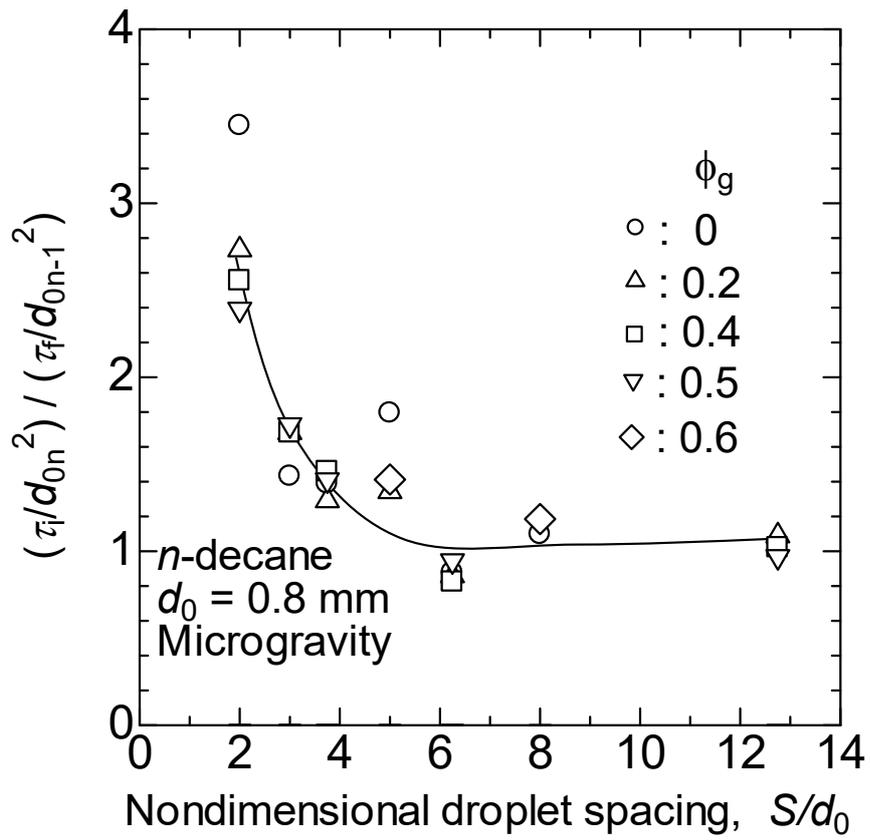
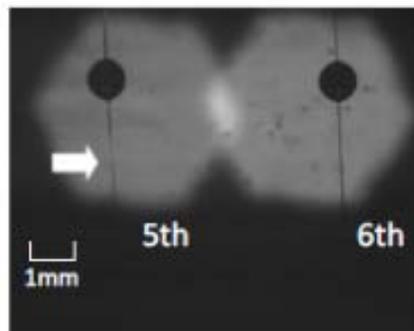
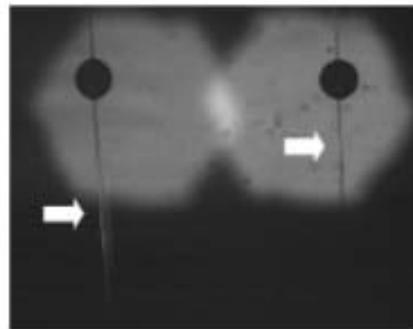


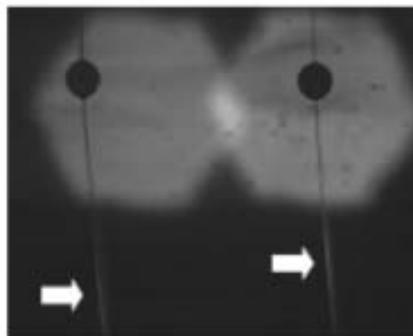
図 4-10 正規化燃え広がり誘導時間と正規化点火誘導時間の比と無次元液滴間隔との関係



0.580 s



0.666 s



0.906s

図 4-11 燃え広がり挙動連続画像

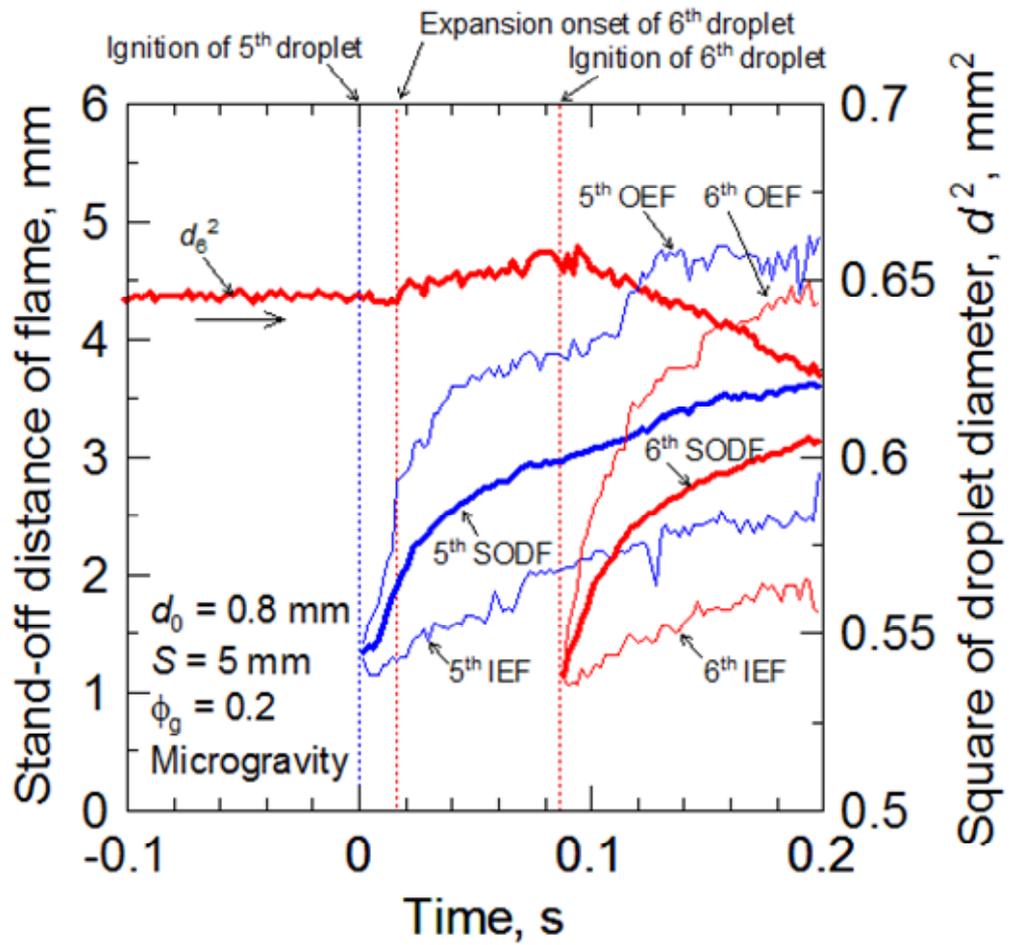


図 4-12 液滴直径履歴 と火炎半径履歴 と火炎半液滴直径履歴 ( $S/d_0 = 6.25$ )

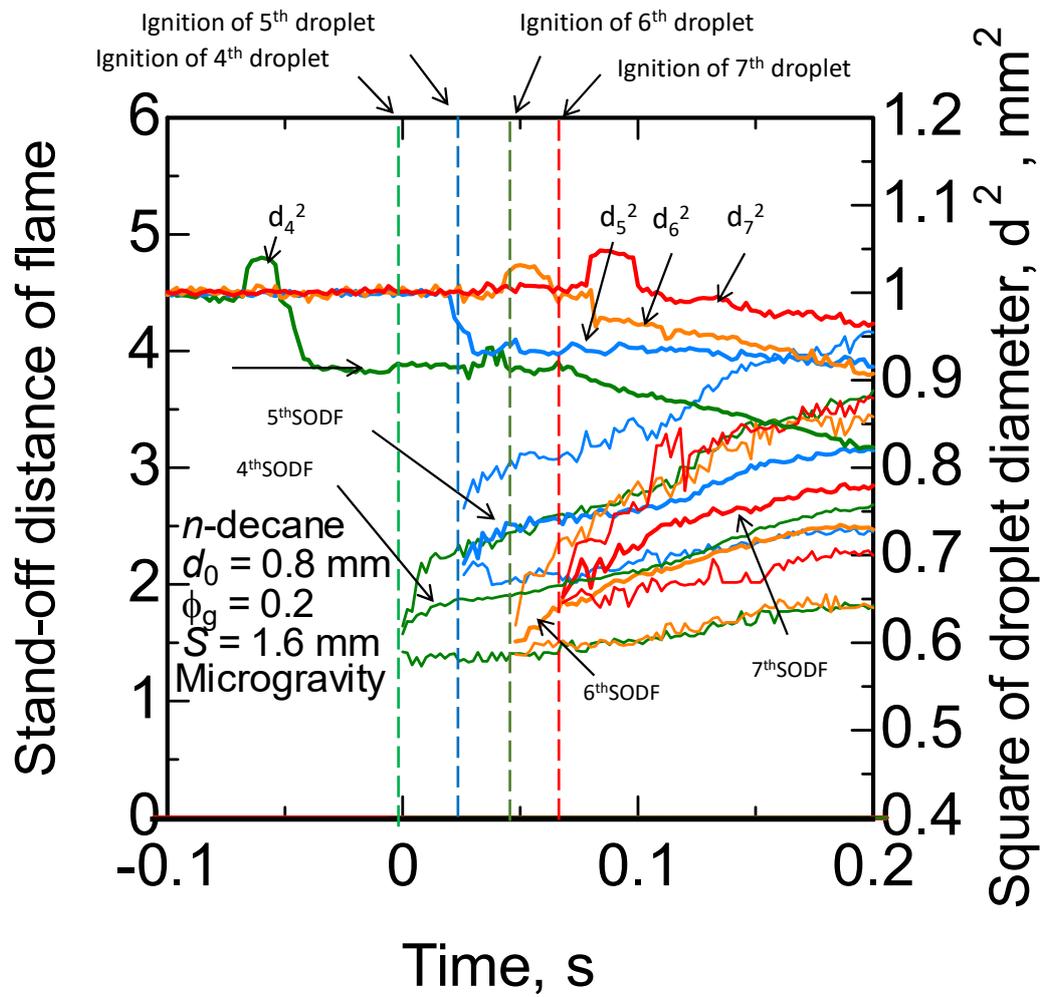


図 4-13 液滴直径履歴 と火炎半液滴直径履歴 と火炎半径履歴( $S/d_0=2$ )

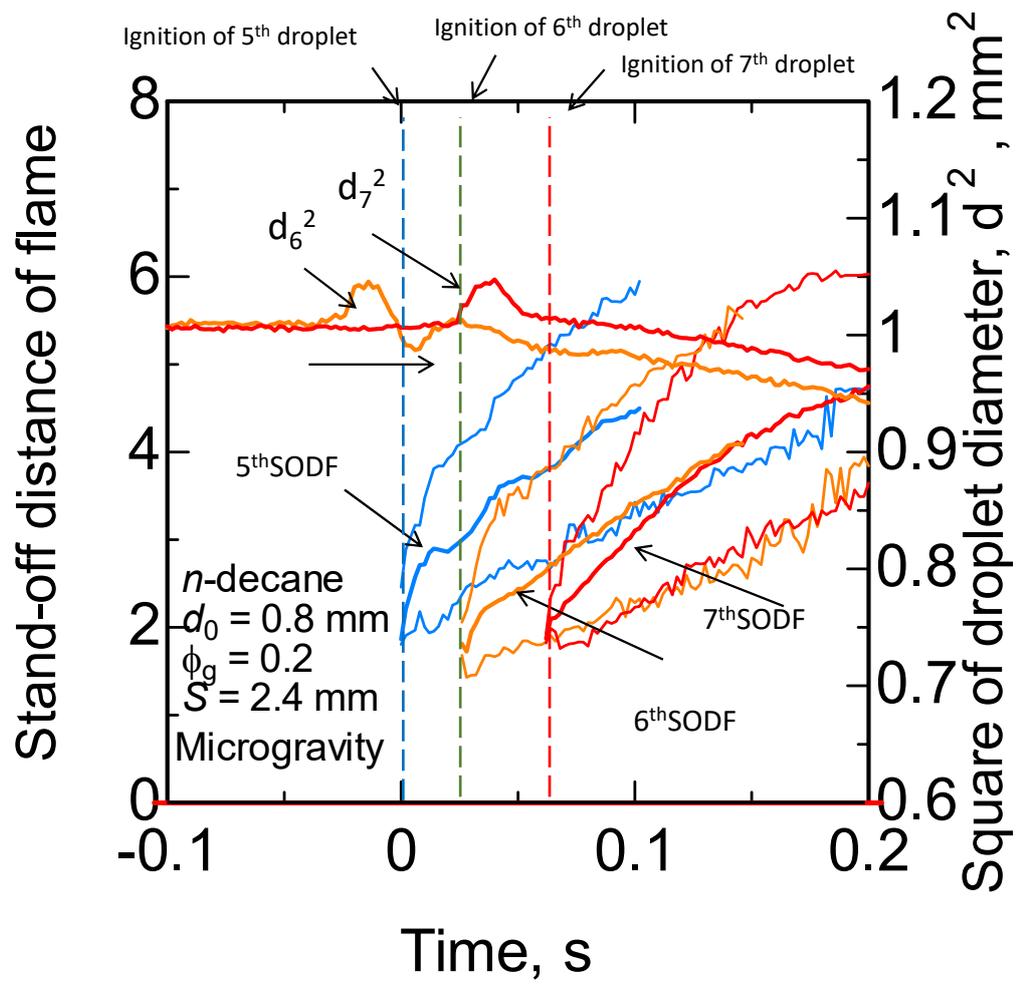


図 4-14 液滴直径履歴 と火炎半径履歴と液滴直径履歴 ( $S/d_0=3$ )

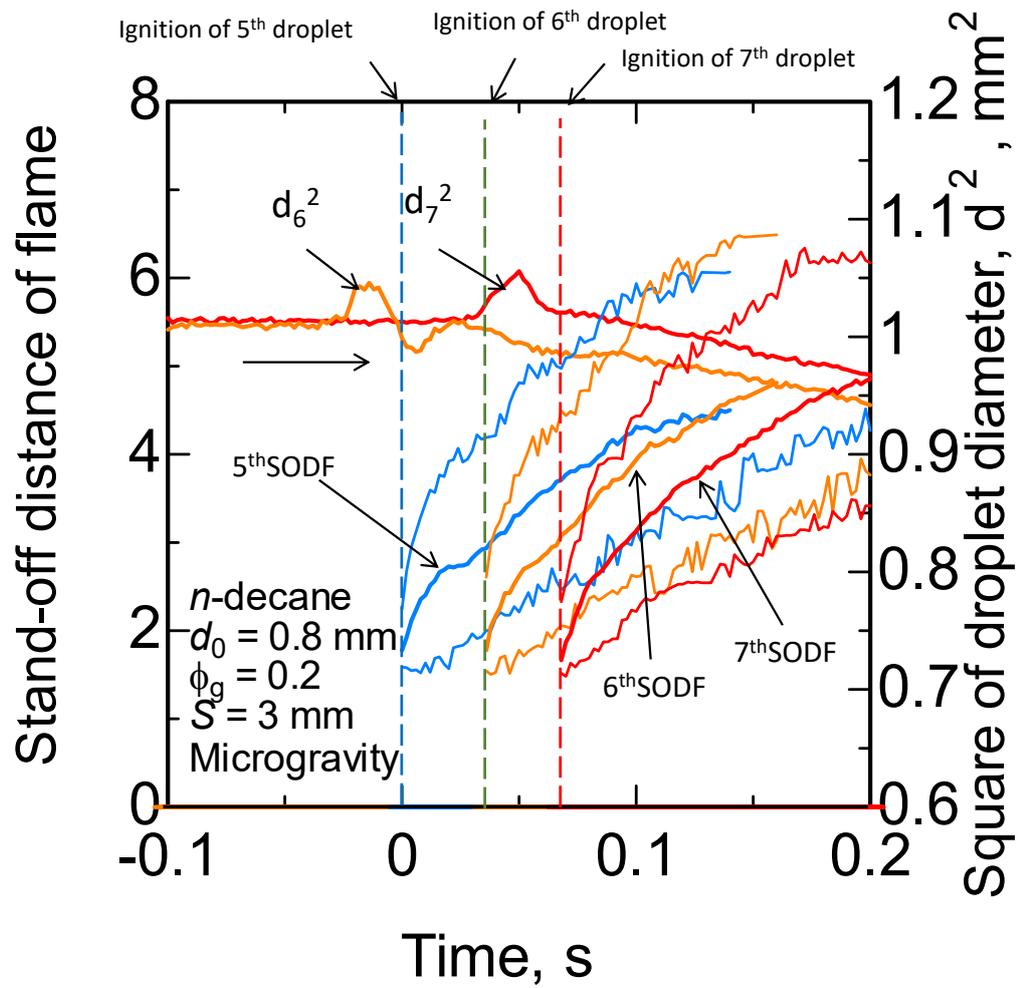


図 4-15 液滴直径履歴 と火炎半液滴直径履歴 と火炎半径履歴( $S/d_0 = 3.25$ )

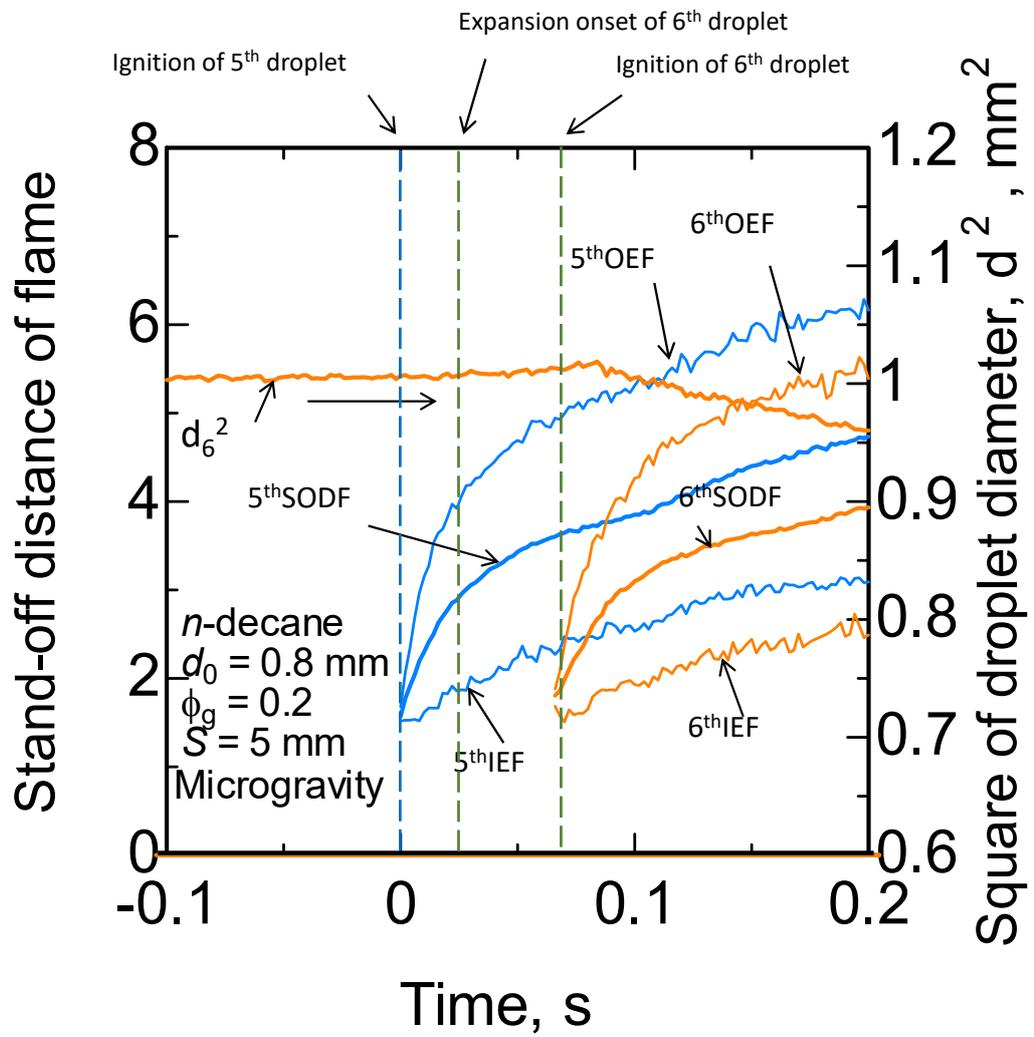


図 4-16 液滴直径履歴 と火炎半径履歴と液滴直径履歴 ( $S/d_0=5$ )

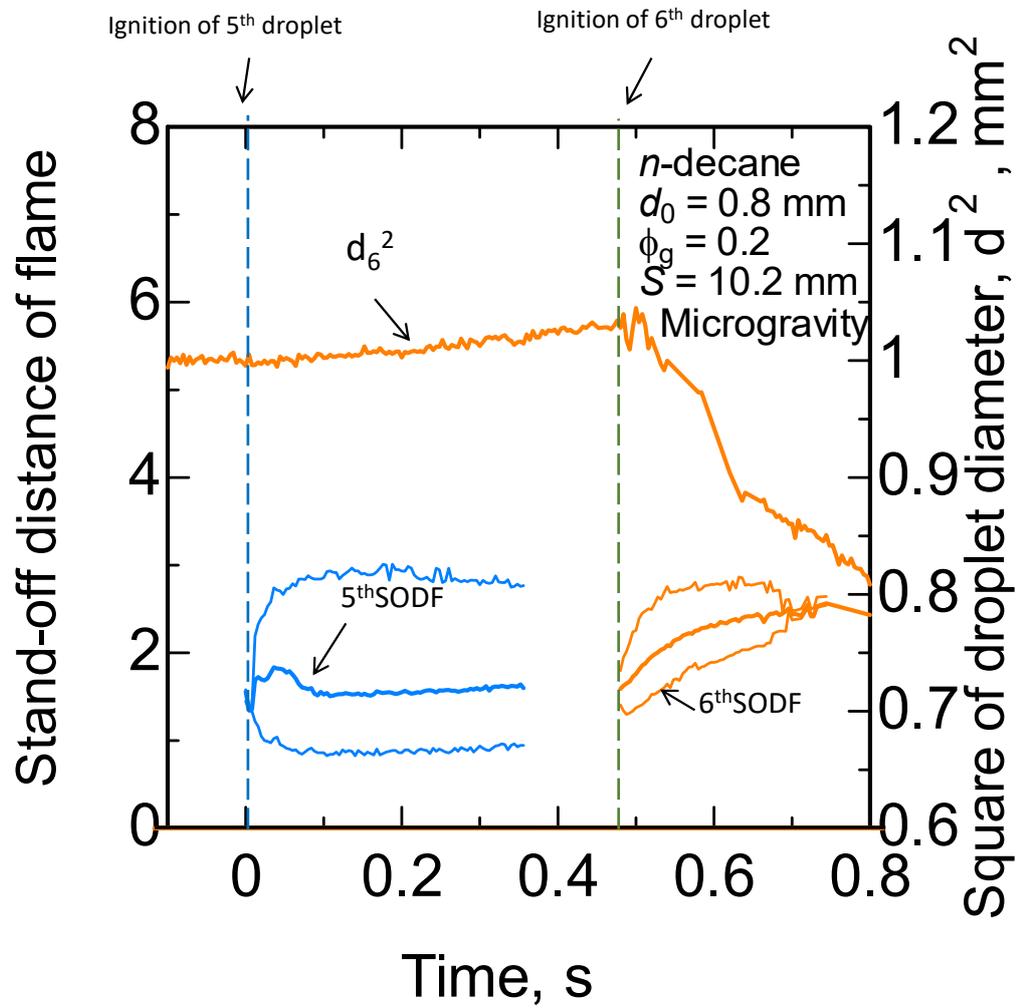


図 4-17 液滴直径履歴 と 火炎半液滴直径履歴 と 火炎半径履歴( $S/d_0=12.75$ )

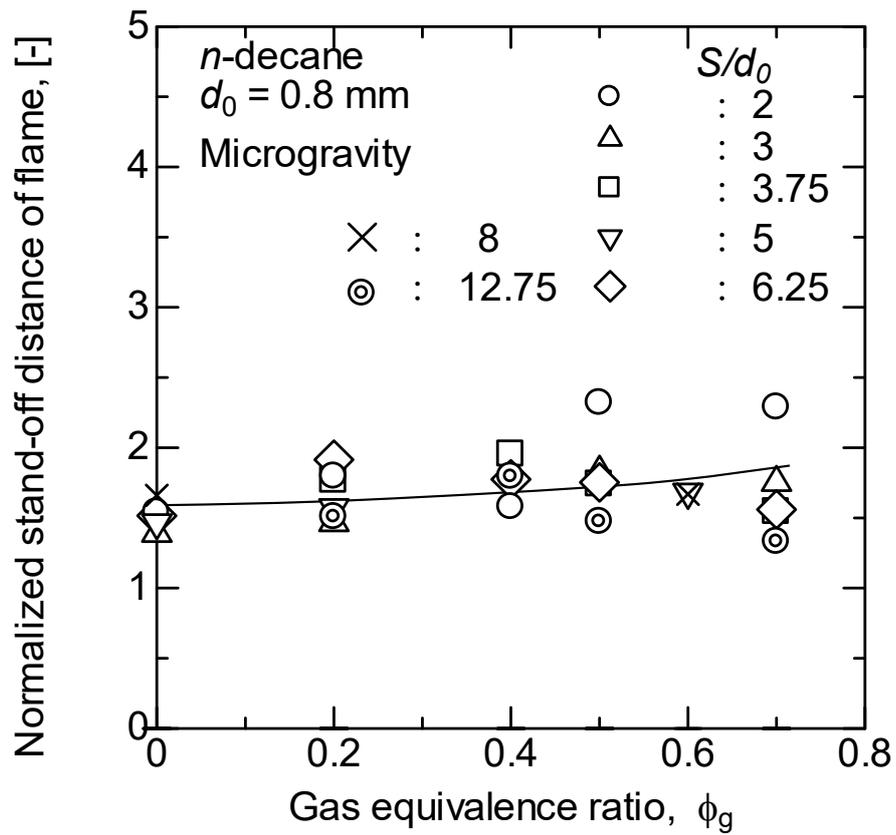


図 4-18 気体当量比と初期火炎直径の関係

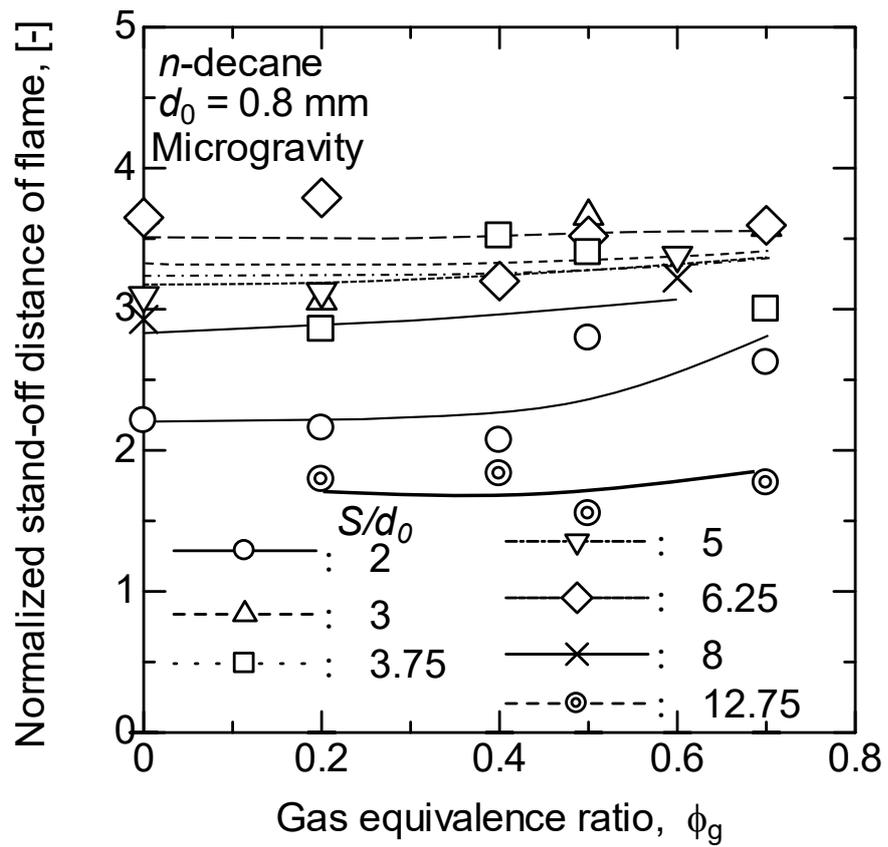


図 4-19 第 6 液滴に火炎が燃え広がった瞬間の第 5 液滴の無次元火炎直径

## 第5章 燃え広がりには及ぼす雰囲気圧力の影響

### 5.1 緒言

本章では燃え広がりには及ぼす雰囲気圧力の影響について述べる<sup>38-40)</sup>。実験装置の構成は第2章とほぼ同一であるが、小型落下塔を有効活用するため、初期液滴直径を小さくし、短時間微小重力時間内に様々な実験が行うことができるように変更した。また、雰囲気圧力を変更するために高压容器を搭載した。雰囲気圧力を増大させることで温度伝導率が減少する。これにより、燃え広がり誘導時間の一つの特性時間である熱伝導時間と雰囲気圧力の関係を明らかにできると考えた。

### 5.2 実験条件および実験方法

実験装置は2.2項の雰囲気圧力依存性用の装置を使用した。液滴直径の計測手法などは第3章と同一であるため割愛する。実験装置の変更により点火時刻や火炎半径、火炎燃え広がり速度の計測方法が異なるため、以降に示す。

#### 5.2.1 点火時刻および火炎半径の測定

液滴の点火は液滴を支持している SiC ファイバの発光を高速度カラービデオカメラで撮影し、数値化することにより求めた<sup>34)</sup>。懸垂線の発光検出には自作の解析プログラムを用いた。池山らは懸垂線が赤熱した際の赤色輝度レベルと青色輝度レベルの比を用いて点火時刻を定義したが、懸垂線の赤熱が緑色に映ってしまったため、本実験では高速度カラービデオカメラで撮影された映像をコマ単位の画像に変換し、グレースケールとして解析プログラムに読み込ませた。懸垂線が赤熱した際、画像の懸垂線が赤熱した部分の輝度レベルが増大することを利用し、高速度カラービデオカメラで撮影された懸垂線連続画像輝度レベルが連続的に閾値を越える最初の時刻の1コマ前の時刻を液滴の点火時刻とした。初期火炎半径  $R_{SOD0}$  の測定を行った液滴番号  $N$  は無次元液滴間隔 2.00~7.50 では第6液滴、無次元液滴間隔 9.00 では第5液滴、無次元液滴間隔 10.0 では第4液滴、無次元液滴間隔 12.5 では第3液滴である。  $N$  番目の液滴点火時の  $N-1$  番目の液滴の火炎半径  $R_{SODs}$  の測定を行った際の、  $N-1$  番目の液滴は無次元液滴間隔 2.00~7.50 では第5液滴、無次元液滴間隔 9.00 では第4液滴、無次元液滴間隔 10.0 では第3液滴、無次元液滴間隔 12.5 では第2液滴である。

#### 5.2.2 火炎燃え広がり速度の測定

液滴列の各液滴の点火時刻と懸垂線画像の液滴列方向の座標から、各液滴間で火炎が燃え広がる速度を求めた。液滴間隔が 0.96~3.60 mm の条件で、火炎燃え広がり速度は点火の影響が存在する第 1 液滴および第 2 液滴と、閉口側である第 9 および第 10 液滴を除いた、第 3 液滴から第 8 液滴までの平均燃え広がり速度とした。液滴間隔が 4.32 mm の条件では第 3 液滴から第 7 液滴、液滴間隔が 4.80 mm の条件では第 2 液滴から第 5 液滴、液滴間隔が 6.00 mm の条件では第 2 液滴から第 4 液滴までの平均燃え広がり速度とした。

### 5.2.3 実験方法

表 5-1 に実験条件を示す。初期液滴直径  $d_0$  は 0.48 mm とし、 $\pm 5\%$  以内の精度に収まるように調節した。液滴間隔  $S$  は 0.96~6.00 mm とし、0.96 mm のみ  $\pm 10\%$  以内、それ以外の条件においては  $\pm 5\%$  以内の精度に収まるように懸垂線液滴列支持装置を製作した。液滴間隔を初期液滴直径で除した値を無次元液滴間隔  $S/d_0$  と定義し、無次元液滴間隔は 2.00~12.5 である。液滴個数は無次元液滴間隔 2.00 から 7.50 までは 10 個とし、無次元液滴間隔 9.00 以上では燃焼容器内に 10 個の液滴全てが収まらなくなるため個数を減らし、無次元液滴間隔 9.00 では 8 個、無次元液滴間隔 10.0 から 12.5 では 6 個とした。雰囲気圧力  $P_a$  は絶対圧で 0.10~0.60 MPa と変化させた。雰囲気温度は室温とした。各実験の前後に高圧容器内の温度を測定し、実験後については室温の測定も行った。火炎燃え広がり速度  $V_f$  については、他者の実験結果と比較できるように正規化火炎燃え広がり速度  $V_f/d_0$  を用いて評価した。実験はすべて I 型懸垂線液滴列支持装置を用いた。火炎半径および火炎燃え広がり速度の測定を行った実験の全条件を表 3-2 に示す。

### 5.2.4 実験試料

燃料には適当な揮発性を有し、他研究者により燃え広がり基礎的なデータが得られている点から、正デカン ( $C_{10}H_{22}$ , 鹿特級) を使用した。

## 5.3 実験結果および考察

日本大学生産工学研究所の小型落下塔を用いて高圧微小重力環境での燃料液滴火炎燃え広がり実験を行い、雰囲気圧力と液滴間隔が火炎燃え広がり及び影響について調べた。池山らによって行われた研究よりもより広い液滴間隔、より高い圧力での実験を行った。実験はすべて I 型懸垂線液滴列支持装置を用いて燃焼容器内で行った。図 5-1 に無次元液滴間隔 2.00 雰囲気圧力 0.60 MPa の火炎燃え広がり挙動

を、図 5-2 に無次元液滴間隔 5.00 雰囲気圧力 0.40 MPa における火炎燃え広がり挙動を、図 5-3 に無次元液滴間隔 6.25 雰囲気圧力 0.30 MPa の火炎燃え広がり挙動を、図 5-4 に無次元液滴間隔 12.5 雰囲気圧力 0.10 MPa の火炎燃え広がり挙動をそれぞれ示す。時刻は実験装置が微小重力状態を検知し、高速度カラービデオカメラの撮影トリガが入った瞬間を 0 としている。微小重力環境で実験を行っているため、火炎は上下対称となっていることがわかる。

### 5.3.1 火炎燃え広がり速度の算出手法の検討

実験装置の小型化によって、実験の時間スケールが短縮されたため、幅広い液滴間隔での実験が行えるようになった。本実験において液滴間隔の広い条件では燃焼容器内に 10 個の液滴全てが収まらなくなるため、液滴の個数を減らして実験を行った。液滴の個数が少なくなったことにより、燃え広がり速度の算出に点火源に近い液滴と燃焼容器閉端側に近い液滴を加えているため、点火源および燃焼容器閉端部壁面による擾乱が火炎燃え広がりの定常性に影響を与えているかどうかを検証する必要が生じた。そこで、液滴間隔の広い条件と狭い条件、雰囲気圧力が高い条件と低い条件における点火時刻と液滴位置の関係を調べ、燃え広がり定常性の検証を行った。無次元液滴間隔 2.00 雰囲気圧力 0.10 MPa における点火時刻と液滴位置の関係を図 5-5 に、無次元液滴間隔 2.00 雰囲気圧力 0.60 MPa における点火時刻と液滴位置の関係を図 5-6 に、無次元液滴間隔 9.00 雰囲気圧力 0.20 MPa における点火時刻と液滴位置の関係を図 5-7 に、無次元液滴間隔 12.5 雰囲気圧力 0.10 MPa における点火時刻と液滴位置の関係を図 5-8 にそれぞれ示す。これらのグラフより、無次元液滴間隔が狭い条件でも広い条件でも、雰囲気圧力が低い条件でも高い条件でもグラフはほぼ直線となり、火炎は定常的に燃え広がっていると考えられる。また、それぞれの条件においてグラフの傾きは 3 回の実験でほとんど変わらないことから、微小重力実験のばらつきが少なく、精度の良い結果が得られたと考えられる。これにより、液滴間隔が広い条件において燃え広がり速度を算出するための液滴個数が少なくなっても解析に問題はないと判断した。

### 5.3.2 雰囲気圧力が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響

図 5-9 に雰囲気圧力が正規化火炎燃え広がり速度に及ぼす影響について調べた結果を示す。縦軸は火炎燃え広がり速度に初期液滴直径を乗じた値である正規化火炎燃え広がり速度とした。正規化・無次元化することで異なるスケールでも議論を行えるようにした。プロットは 3 回の実験の平均値であり、エラーバーは最大値と最

小値を示している。無次元液滴間隔 12.5 については学内小型落下塔の微小重力時間の制限により、0.10 MPa のみでの実験とした。無次元液滴間隔 12.5 を除いた全ての無次元液滴間隔において、雰囲気圧力が增大すると正規化火炎燃え広がり速度は減少した。雰囲気圧力が增大すると正規化火炎燃え広がり速度は減少している。雰囲気圧力の増大に伴って空気密度が増大することにより既燃液滴と未燃液滴間に存在する空気の温度伝導率が減少するため、正規化火炎燃え広がり速度が減少したと考えられる。

火炎燃え広がり速度の圧力依存性を詳細に調べるため、正規化火炎燃え広がり速度を同一無次元液滴間隔の大気圧における正規化火炎燃え広がり速度によって無次元化した燃え広がり速度比（以下、速度比と記述）に及ぼす雰囲気圧力の影響について調べた。結果を図 5-16 に示す。雰囲気圧力が增大すると火炎燃え広がり速度が減少し、無次元液滴間隔が増大すると火炎燃え広がり速度の圧力依存性が大きくなることがわかった。無次元液滴間隔が大きいほど既燃液滴から未燃液滴への熱輸送が遅くなるためであると推察される。

### 5.3.3 雰囲気圧力が初期火炎半径に及ぼす影響

図 5-10 に雰囲気圧力が初期火炎半径に及ぼす影響について調べた結果を示す。本実験において高速度カラービデオカメラで撮影された映像では、燃え広がる火炎の青炎の様子が鮮明ではないため、懸垂線の発光から火炎挙動の推察を行った。懸垂線が最初に赤熱した部分を重み付け平均し、液滴点火時の液滴の中心から懸垂線の赤熱位置までの距離を初期火炎半径  $R_{SO D_0}$  とした。本実験では代表値として  $N$  番目の液滴の初期火炎半径を用いた。 $N$  は無次元液滴間隔 2.00 から 7.50 までは第 6 液滴のものを、無次元液滴間隔 9.00 では第 5 液滴のものを、無次元液滴間隔 10.0 では第 4 液滴のものを、無次元液滴間隔 12.5 では第 3 液滴のものをを用いた。雰囲気圧力が增大すると初期火炎半径は減少する傾向にあることがわかる。この傾向は Sato らの実験結果とも整合する<sup>41)</sup>。雰囲気圧力の上昇に伴い、物質拡散は減少するが熱伝導は大きくなる。この相互作用により雰囲気圧力の増大に伴い初期火炎半径が減少したと考えられる。

図 5-11 に雰囲気圧力が  $N-1$  番目の液滴の初期火炎半径に及ぼす影響について調べた結果を示す。雰囲気圧力が增大すると  $N-1$  番目の液滴の初期火炎半径は減少した。無次元液滴間隔 2.00, 3.00, 9.00, 10.0 は雰囲気圧力が增大すると  $N-1$  番目の液滴の初期火炎半径は大きく減少した。無次元液滴間隔 3.75 から 7.50 では、雰囲気圧力が増大しても  $N-1$  番目の液滴の初期火炎半径はあまり減少しなかった。

図 5-12 に  $N$  番目の液滴の初期火炎と未燃液滴表面の間隔を初期液滴直径で除した燃え広がり火炎と液滴表面の無次元間隔を示す。ただし燃え広がり火炎の先端は半球形だと仮定した。縦軸の値が負の領域は既燃液滴の初期火炎が未燃液滴に接

触する。縦軸の値が正の場合は既燃液滴の初期火炎が未燃液滴に接触しない。無次元液滴間隔 2.00 と 3.00 を除き、圧力が增大しても燃え広がり火炎と液滴表面の無次元間隔はほとんど変化しなかった。無次元液滴 2.00 と 3.00 は雰囲気圧力が增大すると 0.20 MPa までは燃え広がり火炎と液滴表面の無次元間隔が増大するが、さらに圧力が增大すると燃え広がり火炎と液滴表面の無次元間隔はほとんど変化しなくなった。無次元液滴間隔 3.00 は雰囲気圧力が低いときは既燃液滴の初期火炎が未燃液滴に接触しているが、雰囲気圧力が增大すると既燃液滴の初期火炎が未燃液滴に接触しなくなる。

図 5-13 に  $N$  番目の液滴の初期火炎半径  $R_{sOD0}$  と同時刻の  $N-1$  番目の液滴の火炎半径  $R_{sODs}$  の和を液滴間隔から減じ、初期液滴直径で除した値を求めた結果を示す。図 3-12 も燃え広がり火炎を半球形と仮定している。縦軸の値が負の場合は  $N$  番目の液滴の初期火炎と  $N-1$  番目の液滴の火炎が接触する状態となる。縦軸の値が正の場合は  $N$  番目の液滴の初期火炎と  $N-1$  番目の液滴の火炎が接触しない状態となる。無次元液滴間隔 12.5 については  $N-1$  番目の液滴の火炎半径を取得することができなかつたため結果を得ることができなかつた。無次元液滴間隔が 2.00, 3.00, 9.00, 10.0 では雰囲気圧力が增大すると縦軸の値が増大する。無次元液滴間隔 2.00 と 3.00 では雰囲気圧力が 0.30 MPa より増大すると縦軸の値はほとんど増大しなくなる。無次元液滴間隔 3.75, 5.00, 6.25, 7.50 では雰囲気圧力が增大しても縦軸の値はほとんど変化しなかつた。

### 5.3.4 雰囲気圧力が火炎燃え広がり誘導時間に及ぼす影響

図 5-14 に雰囲気圧力が火炎燃え広がり誘導時間に及ぼす影響について調べた結果を示す。火炎燃え広がり誘導時間  $\tau_f$  は液滴間隔  $S$  を火炎燃え広がり速度  $V_f$  で除した値と定義した。無次元液滴間隔が 2.00 から 5.00 では雰囲気圧力が增大しても火炎燃え広がり誘導時間はほとんど増大しなかつた。無次元液滴間隔が 6.25 以上では雰囲気圧力が增大すると火炎燃え広がり誘導時間は増大した。また、無次元液滴間隔が増大すると火炎燃え広がり誘導時間の雰囲気圧力の増大に伴った傾きは大きいものとなった。誘導時間の圧力依存性が無次元液滴間隔の違いにより大きく異なるのは、誘導時間に占める特性時間の割合が無次元液滴間隔により異なるためと推測される。

### 5.3.5 温度伝導率が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響

図 5-15 に温度伝導率が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響について調べた結果を示す。縦軸は正規化火炎燃え広がり速度  $V_{ido}$  を空気の温度伝導率  $\alpha$  で除した無次元火炎燃え広がり速度である。温度伝導率  $\alpha$  の定義は次のとおりである。

$$\alpha = \lambda / (\rho C_p) \quad (5.1)$$

ここで、 $\lambda$  は熱伝導率、 $\rho$  は密度、 $C_p$  は比熱である。  $\lambda$  と  $C_p$  は圧力にあまり依存しないため、 $\lambda$  に  $0.0257 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  を、 $C$  に  $1.006 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  の値を用いた。 空気の温度は室温( $293 \text{ K}$ )で計算を行った。 空気の密度  $\rho[\text{kg/m}^3]$  は以下の式で計算を行った。

$$\rho = \rho_0 \times 273.2 / T_1 \times P_1 / 101.3 \quad (5.2)$$

ここで、 $\rho_0$  は基準状態の空気の密度であり、 $1.293[\text{kg/m}^3]$  とした。  $T_1$  は空気の温度であり、 $293 \text{ K}$  とした。  $P_1$  は空気の圧力であり、実験条件の絶対雰囲気圧力 $[\text{kPa}]$ とした。

温度伝導率  $\alpha$  で無次元化を行っても、異なる雰囲気圧力の結果が一つの曲線には収束しなかった。 燃え広がり誘導時間中のすべての特性時間が温度伝導率  $\alpha$  以外の圧力依存のパラメータを有していることを示している。 一方、無次元液滴間隔が大きい場合は、一つの曲線に収束する傾向がみられることから、この無次元液滴範囲では誘導時間を熱伝導が支配していると考えられる。

### 5.3.6 火炎燃え広がり速度の圧力依存性と燃え広がりモードの関係

図 5-16 の縦横両軸を対数化したものを図 5-17 に示す。 プロットを結んだ線はおおよそ直線となった。 そこで、図 5-17 の線の傾きを求めるために、縦軸に図 5-17 の傾きを、横軸に無次元液滴間隔をとったグラフを図 5-18 に示す。 無次元液滴間隔が増大すると図 5-17 の傾きが  $-1$  へと近づいている、すなわち速度比が雰囲気圧力に反比例するようになることがわかる。 温度伝導率  $\alpha$  は圧力に反比例するため無次元液滴間隔が大きい条件では速度比は温度伝導率に比例すると考えられる。 図 5-19 に温度伝導率  $\alpha$  と速度比の関係を示す。 速度比が温度伝導率の  $n$  ( $0 < n < 1$ ) 乗に比例して増大していることがわかり、無次元液滴間隔が増大すると  $n$  は増大して  $1$  に近づくことがわかる。 無次元液滴間隔が狭くなっても速度比が温度伝導率の  $n$  乗におおよそ比例する理由は現在不明である。 プロットを結んだ線はおおよそ 3 つのグループに分けることができる。 そこでこの 3 つのグループは火炎燃え広がりモードと関係しているのではないかという仮説を立てた。 この仮説の証明を証明するために  $N$  番目の液滴の初期火炎と未燃液滴表面の間隔を初期液滴直径で除した燃え広がり火炎と液滴表面の無次元間隔を示した図 5-12 を用いる。 縦軸の値が負の場合は既燃液滴の初期火炎が未燃液滴に接触するため、火炎燃え広がりモードは  $1$  であると考えられる。 一方で縦軸の値が正の場合は既燃液滴の初期火炎が未燃液滴に接触しないため、火炎燃え広がりモードは  $2$  または  $3$  であると考えられる。 図 5-12 の火炎燃え広がりモードと梅村らが提唱する火炎燃え広がりモードは若干異なり、この考察では

図 5-12 の縦軸が 0 を若干上回る部分で火炎が閉じていると考えられる。図 5-12 だけでは火炎燃え広がりモード 2 と 3 の区別を行うことができない。火炎燃え広がりモード 2 と 3 の区別を行うために図 5-13 を用いる。図 5-13 では、縦軸の値が負の場合は N 番目の液滴の初期火炎と N-1 番目の液滴の火炎が接触する状態となるため、火炎燃え広がりモードは 2 であると考えられる。一方で縦軸の値が正の場合は N 番目の液滴の初期火炎と N-1 番目の液滴の火炎が接触しない状態となるため、火炎燃え広がりモードは 3 であると考えられる。図 5-12 および図 5-13 より、無次元液滴間隔 2.00 は火炎燃え広がりモード 1 であると考えられる。無次元液滴間隔 3.00 では雰囲気圧力が增大すると火炎燃え広がりモードは 1 から 2 へと遷移すると考えられる。無次元液滴間隔 3.75 および 5.00 は火炎燃え広がりモード 2 であると考えられる。無次元液滴間隔 6.25 から 10.0 は火炎燃え広がりモード 3 であると考えられる。無次元液滴間隔 12.5 については N-1 番目の液滴の火炎半径を取得できなかったため、判別はできないが、グラフの傾向から火炎燃え広がりモード 3 であると考えられる。図 5-12 および図 5-13 より判別した火炎燃え広がりモードを図 5-17 に当てはめてみると、3 つのグループは火炎燃え広がりモードの区別と一致していることがわかる。また、図 5-12 で無次元液滴間隔 3.00 は雰囲気圧力が增大すると火炎燃え広がりモードが 1 から 2 へと遷移しているが、図 5-17 を見てもグループの間を跨っていることがみてとれる。また、火炎燃え広がり速度の圧力依存性は火炎燃え広がりモードによって異なることがわかった。火炎燃え広がりモード 1 が火炎燃え広がり速度の圧力依存性が最も小さく、モード 3 が最も大きく、モード 2 はその中間であると考えられる。

### 5.3.7 雰囲気圧力が正規化火炎燃え広がり速度に及ぼす影響

図 5-20 に無次元液滴間隔が正規化火炎燃え広がり速度に及ぼす影響について調べた結果を示す。無次元液滴間隔 2.00 から 3.75 付近までは、無次元液滴間隔が増大すると正規化火炎燃え広がり速度は増大した。無次元液滴間隔 3.75 付近で正規化火炎燃え広がり速度は最大となった。無次元液滴間隔 3.75 付近から 12.5 では無次元液滴間隔が増大すると正規化火炎燃え広がり速度は減少した。無次元液滴間隔と正規化火炎燃え広がり速度の関係には火炎と液滴の相対位置が関与していると考えられる。無次元液滴間隔が 2 から 3.75 付近では、図 5-12 の燃え広がり火炎と液滴表面の無次元間隔が 0 を下回る部分であり、未燃液滴及び未燃液滴から発生する燃料蒸気により既燃液滴の火炎先端が強く冷却されてしまい、液滴間隔が狭いほど火炎先端の温度が減少して未燃液滴への加熱に時間を要すようになり、燃え広がり速度が減少したと考えられる。無次元液滴間隔が 3.75 付近の条件は、図 5-12 の燃え広がり火炎と液滴表面の無次元間隔が 0 より若干大きい領域であり、燃え広がり火炎は閉じている状態となって火炎が未燃液滴蒸気層と接触している状態となり、火炎面か

ら未燃液滴への熱輸送が最大となり、火炎が未燃液滴を加熱するのに要する時間が最小となったため、燃え広がり速度が最大と考えられる。無次元液滴間隔が 3.75 以上では、火炎と未燃液滴が遠ざかるため、火炎から未燃液滴への熱輸送、主として熱伝導に要する時間が増大し、未燃液滴への点火に時間がかかるようになり、燃え広がり速度が減少したと考えられる。

## 5.4 結言

雰囲気圧力と液滴間隔が火炎の燃え広がり及び影響について調べるため、日本大学生産工学研究所にある小型落下塔を用いて高圧微小重力環境にて燃料液滴列の火炎燃え広がり実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 初期液滴直径を小さくしたことで、学内小型落下塔の約 1.1 s の微小中重力時間を有効に活用し、幅広い条件における実験が可能となった。
- (2) 無次元液滴間隔が 12.5 の条件において、液滴個数が 6 個でも定常的な火炎燃え広がりを観察することができた。
- (3) 雰囲気圧力に依らず、無次元液滴間隔が 3 から 3.75 の範囲で正規化火炎燃え広がり速度は最大となった。
- (4) 雰囲気圧力が増大すると正規化火炎燃え広がり速度は減少した。
- (5) 速度比は雰囲気圧力の  $n$  ( $0 < n < 1$ ) 乗におおよそ反比例し、無次元液滴間隔の増大に伴って  $n$  は減少し、1 に近づく。
- (6) 燃え広がり速度に及ぼす圧力の影響の度合いは、火炎燃え広がりモードに対応した 3 つのグループに大別され、モード 1 が雰囲気圧力の影響が最も小さく、モード 3 が最も大きい。

表 5-1 実験条件

$S/d_0$	2.00	3.00	3.75	5.00	6.25	7.50	9.00	10.0	12.5	
Fuel	<i>n</i> -decane									
$l_{wh}$ [mm]	15									
$l_d$ [mm]	35.7									
$S$ [mm]	0.96	1.44	1.80	2.40	3.00	3.60	4.32	4.80	6.00	
Error of $S$ [%]	±10	±5								
Droplet suspender type	I-type									
$d_0$ [mm]	0.48 ±5 %									
Frame rate of High-speed camera [fps]	2000									
Video image resolution [pix]	512×384									
Gravity	Microgravity (About 1.1 sec)									
$P_a$ [MPa]	0.10 - 0.60					0.10 - 0.30	0.10 - 0.20	0.10 - 0.15	0.10	
Droplet number	10						8	6		
$V_f$ Target droplets	3 <sup>rd</sup> - 8 <sup>th</sup>						3 <sup>rd</sup> - 7 <sup>th</sup>	2 <sup>nd</sup> - 5 <sup>th</sup>	2 <sup>nd</sup> - 4 <sup>th</sup>	
$R_{SOD0}$ Target droplet	6 <sup>th</sup>						5 <sup>th</sup>	4 <sup>th</sup>	3 <sup>rd</sup>	
$R_{SODs}$ Target droplet	5 <sup>th</sup>						4 <sup>th</sup>	3 <sup>rd</sup>	2 <sup>nd</sup>	

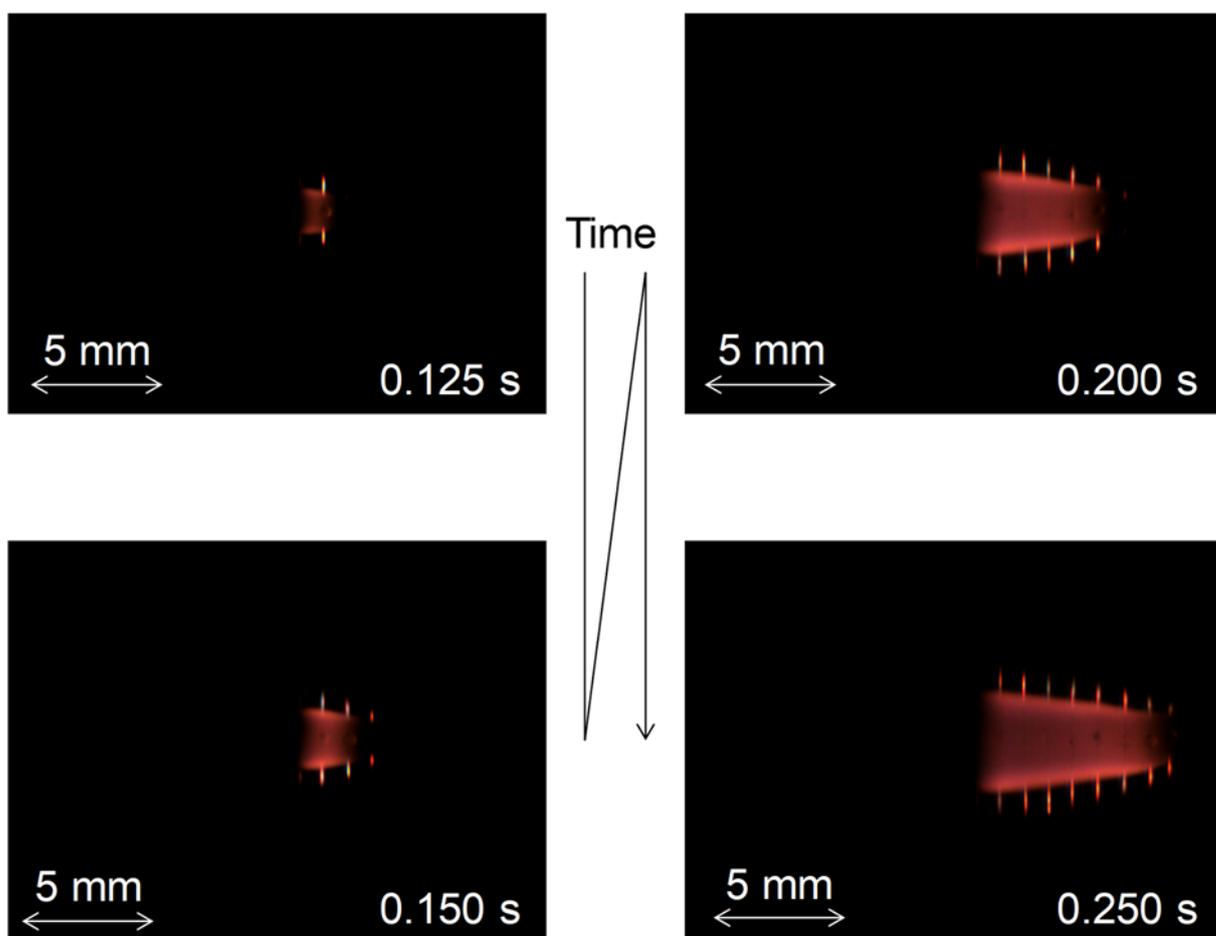


図 5-1 火炎燃え広がり挙動( $S/d_0=2.00$ ,  $P_a=0.60$  MPa)

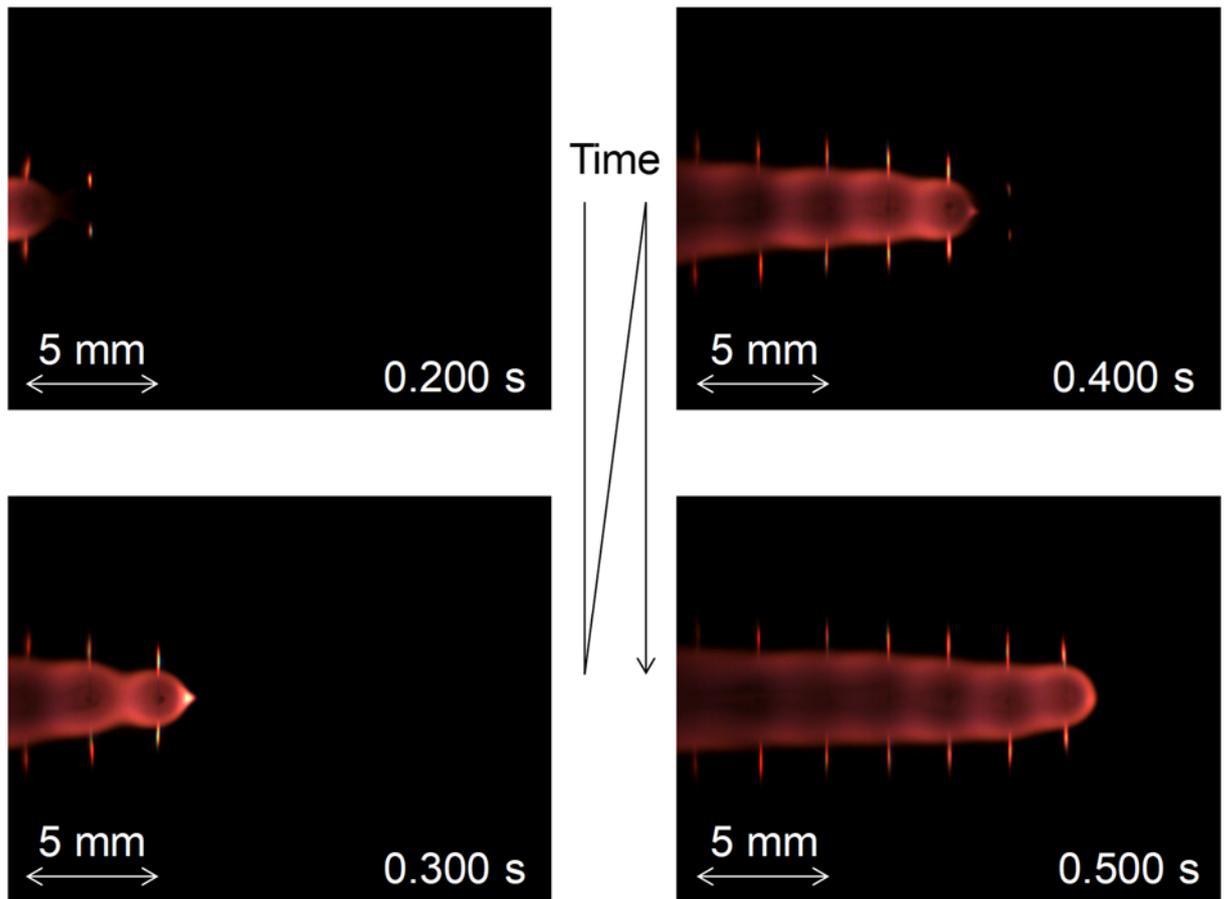


図 5-2 火炎燃え広がり挙動( $S/d_0=5.00$ ,  $P_a=0.40$  MPa)

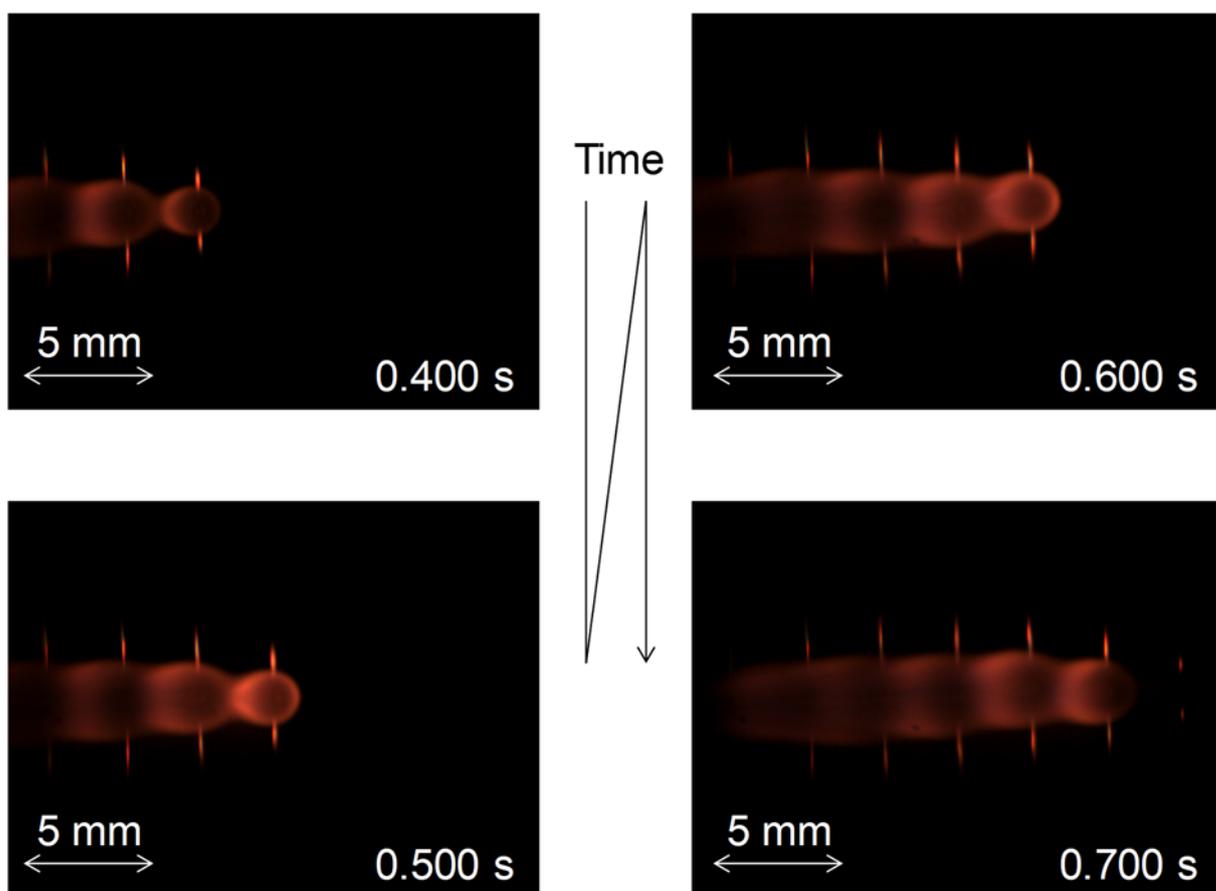


図 5-3 火炎燃え広がり挙動( $S/d_0=6.25$ ,  $P_a=0.30$  MPa)

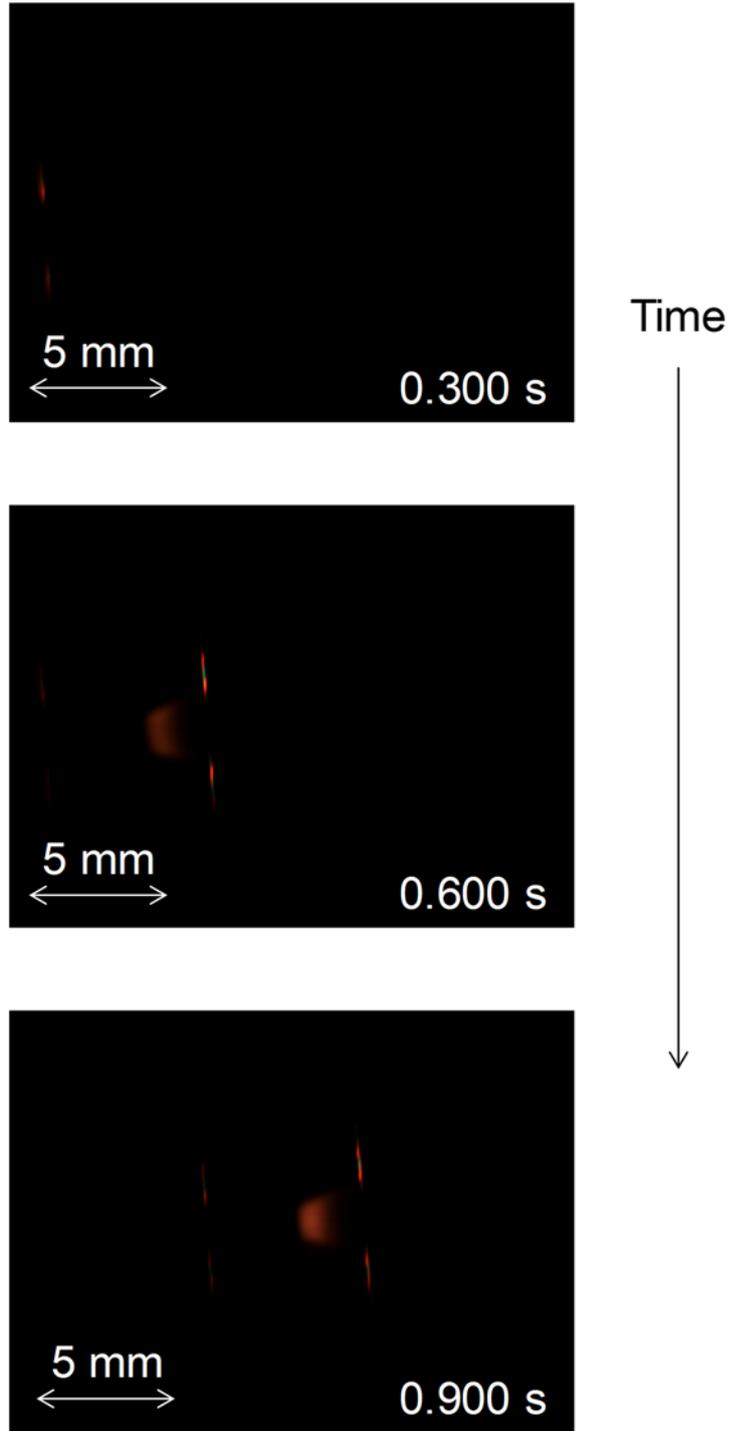


図 5-4 火炎燃え広がり挙動( $S/d_0=12.5$ ,  $P_a=0.10$  MPa)

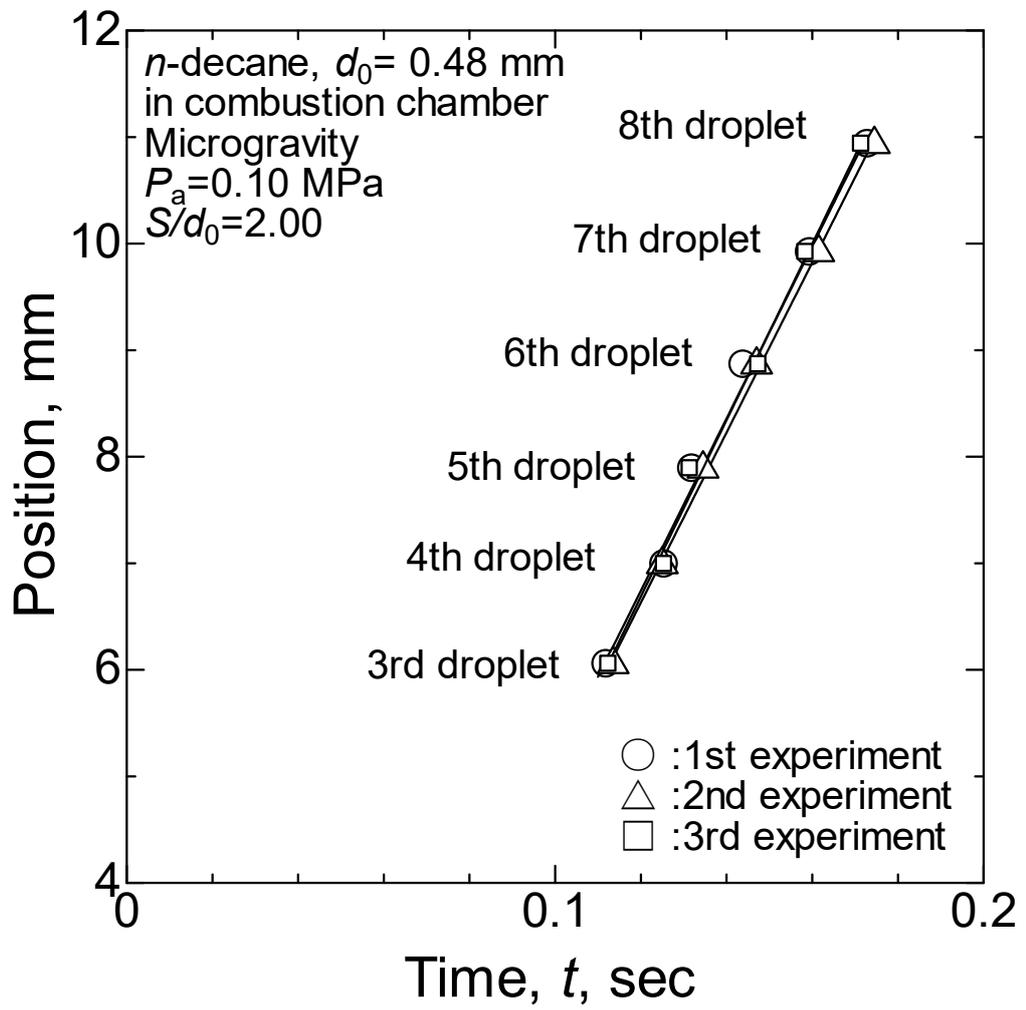


図 5-5 点火時刻と液滴位置の関係( $S/d_0 = 2.00$ ,  $P_a = 0.10$  MPa)

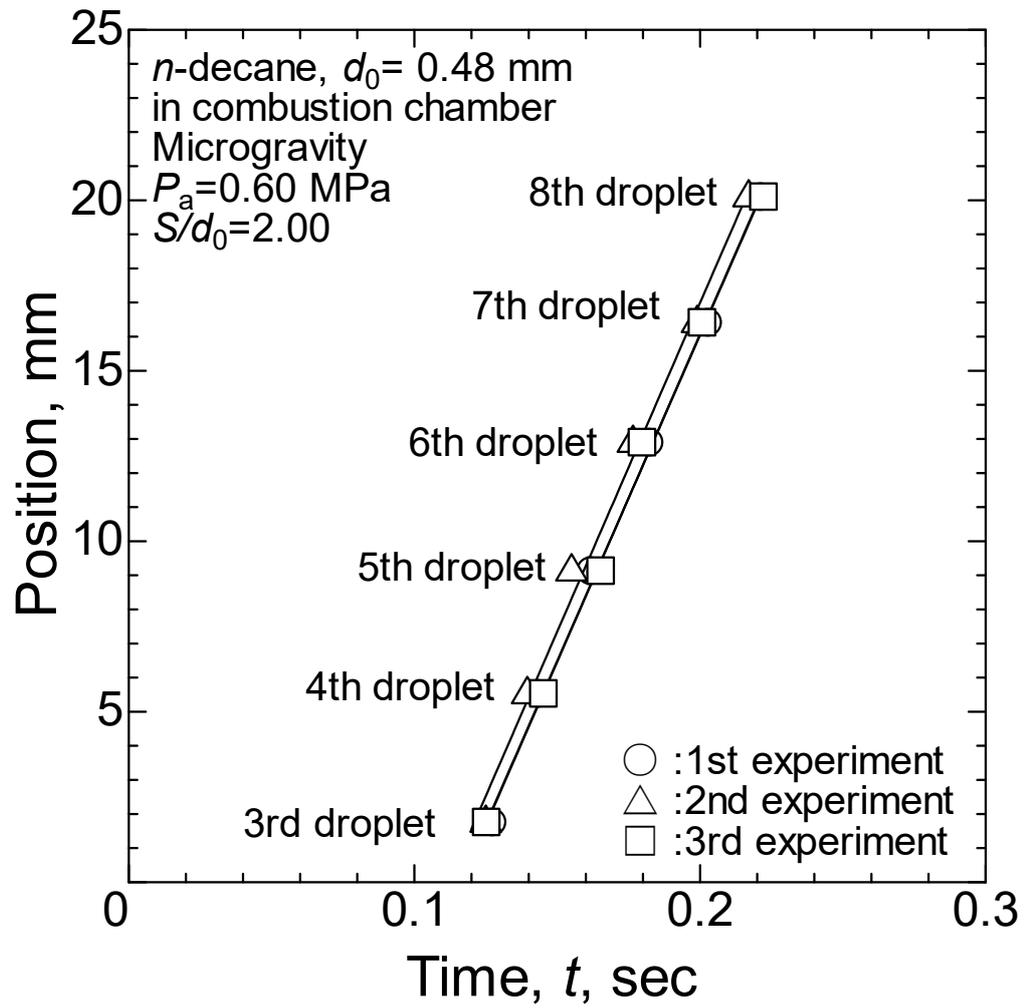


図 5-6 点火時刻と液滴位置の関係( $S/d_0 = 2.00$ ,  $P_a = 0.60$  MPa)

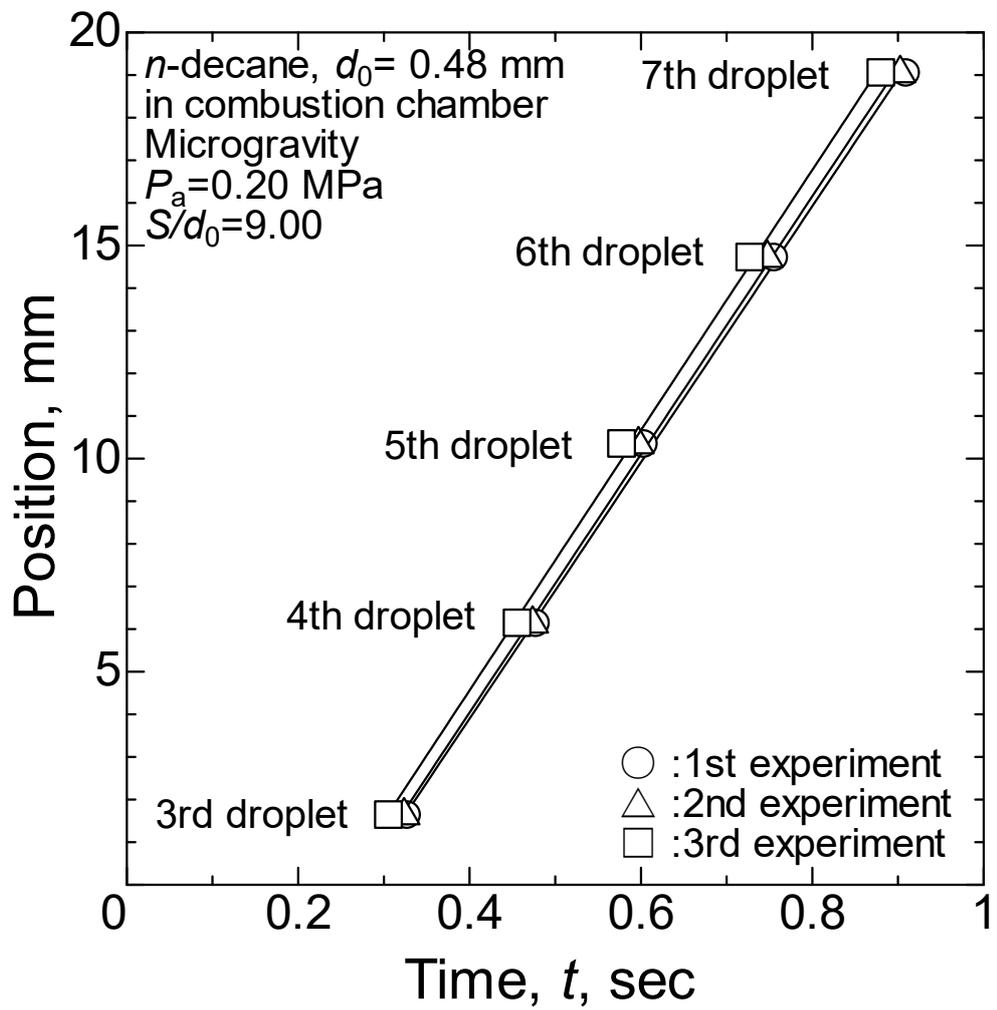


図 5-7 点火時刻と液滴位置の関係( $S/d_0 = 9.00$ ,  $P_a = 0.20$  MPa)

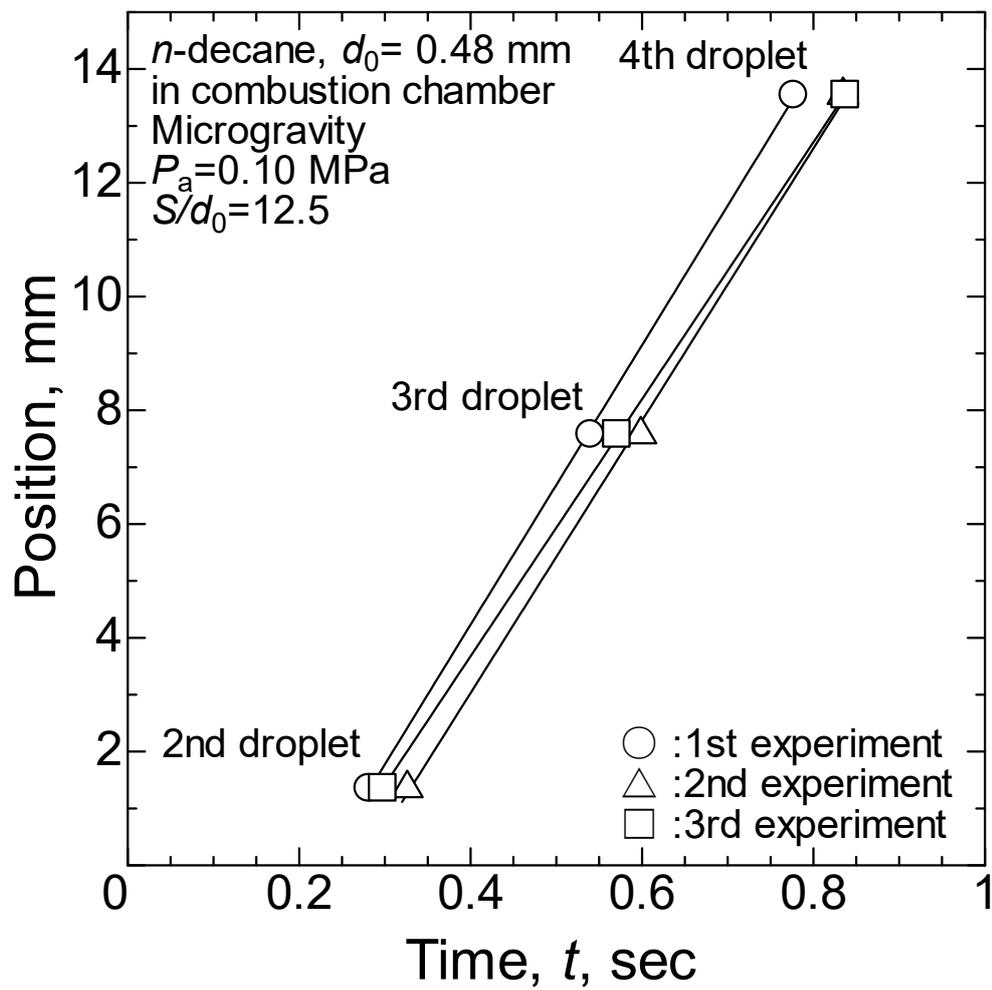


図 5-8 点火時刻と液滴位置の関係( $S/d_0 = 12.5$ ,  $P_a = 0.10$  MPa)

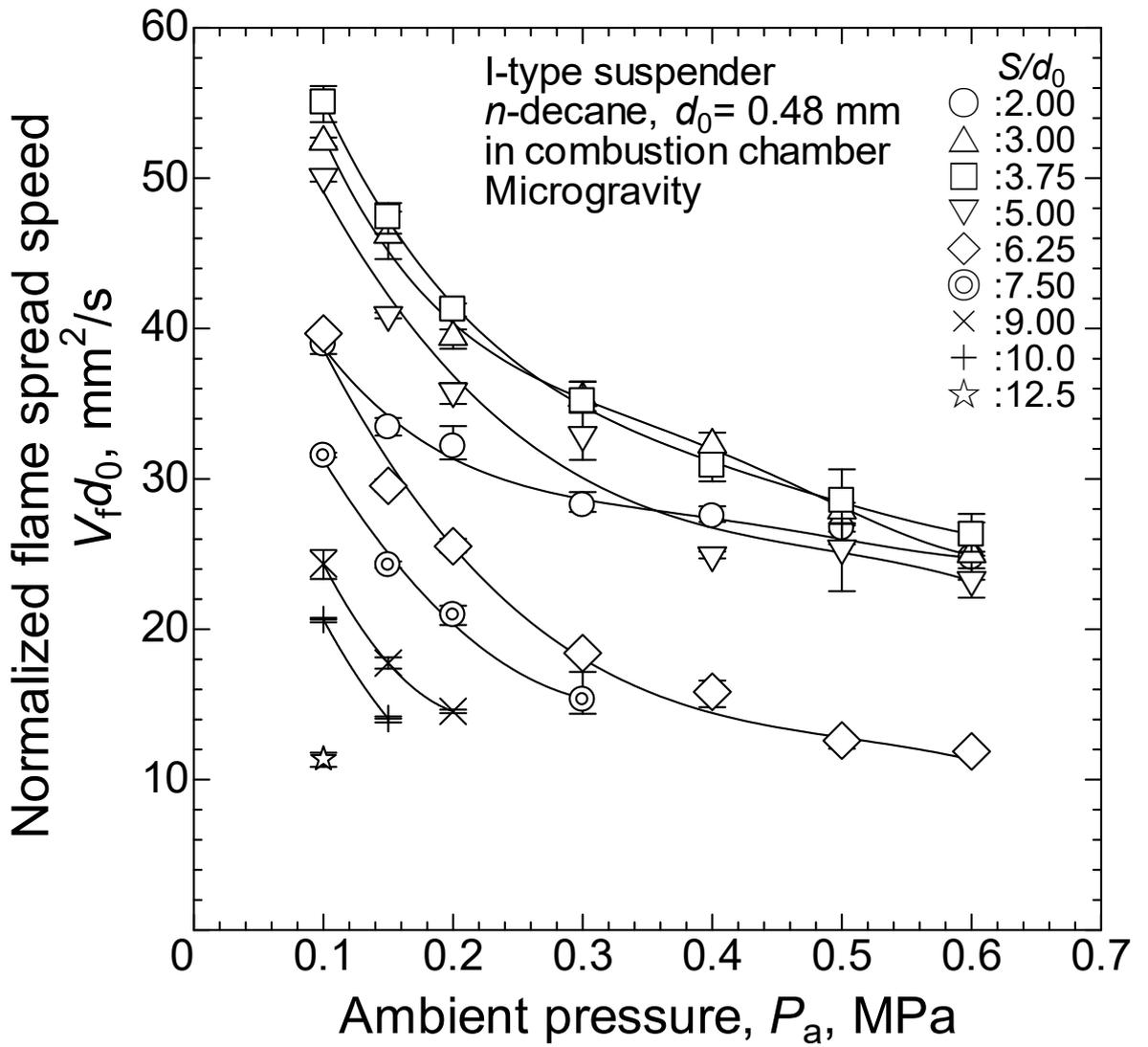


図 5-9 雰囲気圧力が正規化火炎燃え広がり速度に及ぼす影響

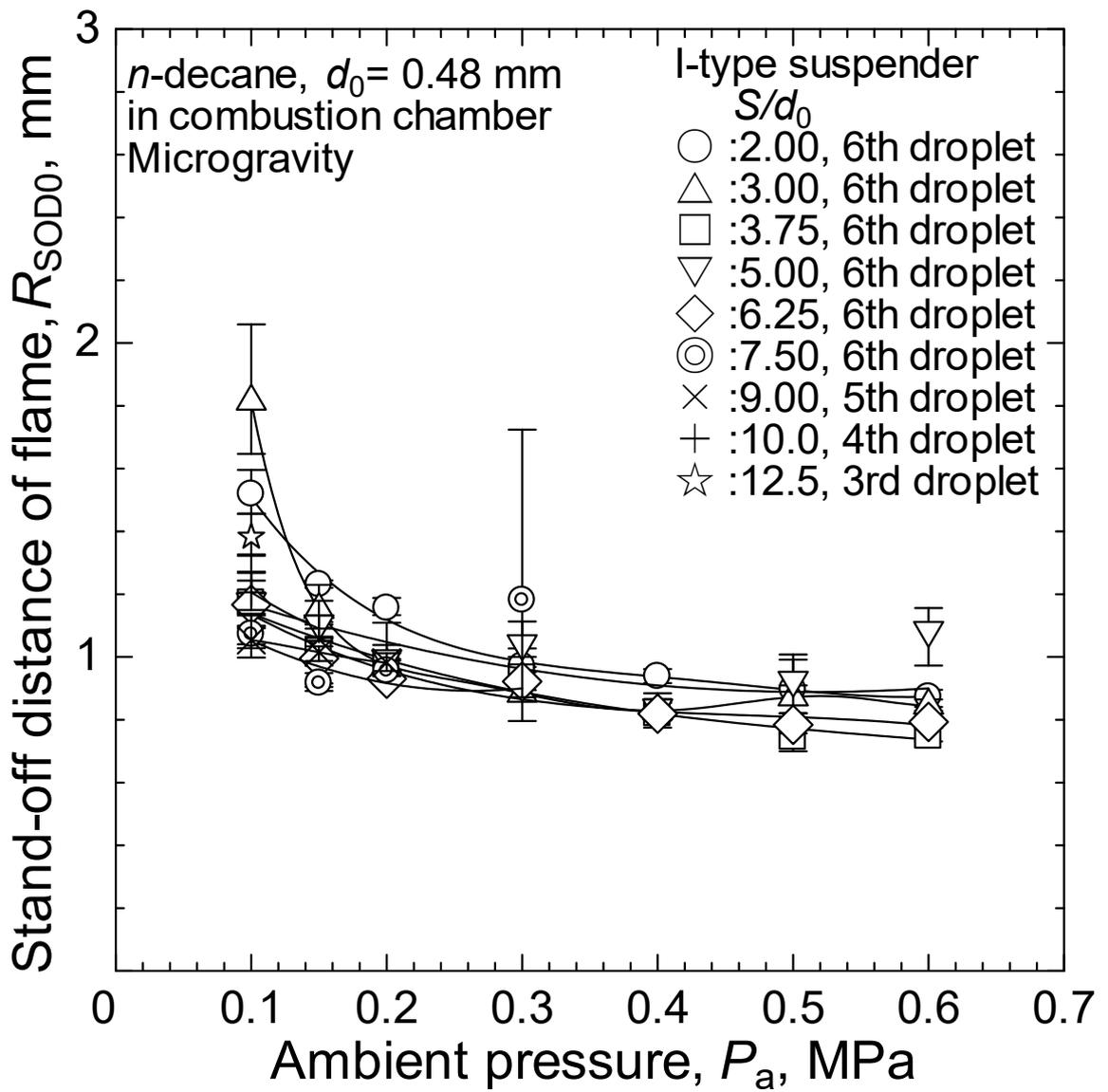


図 5-10 雰囲気圧力が初期火炎半径に及ぼす影響

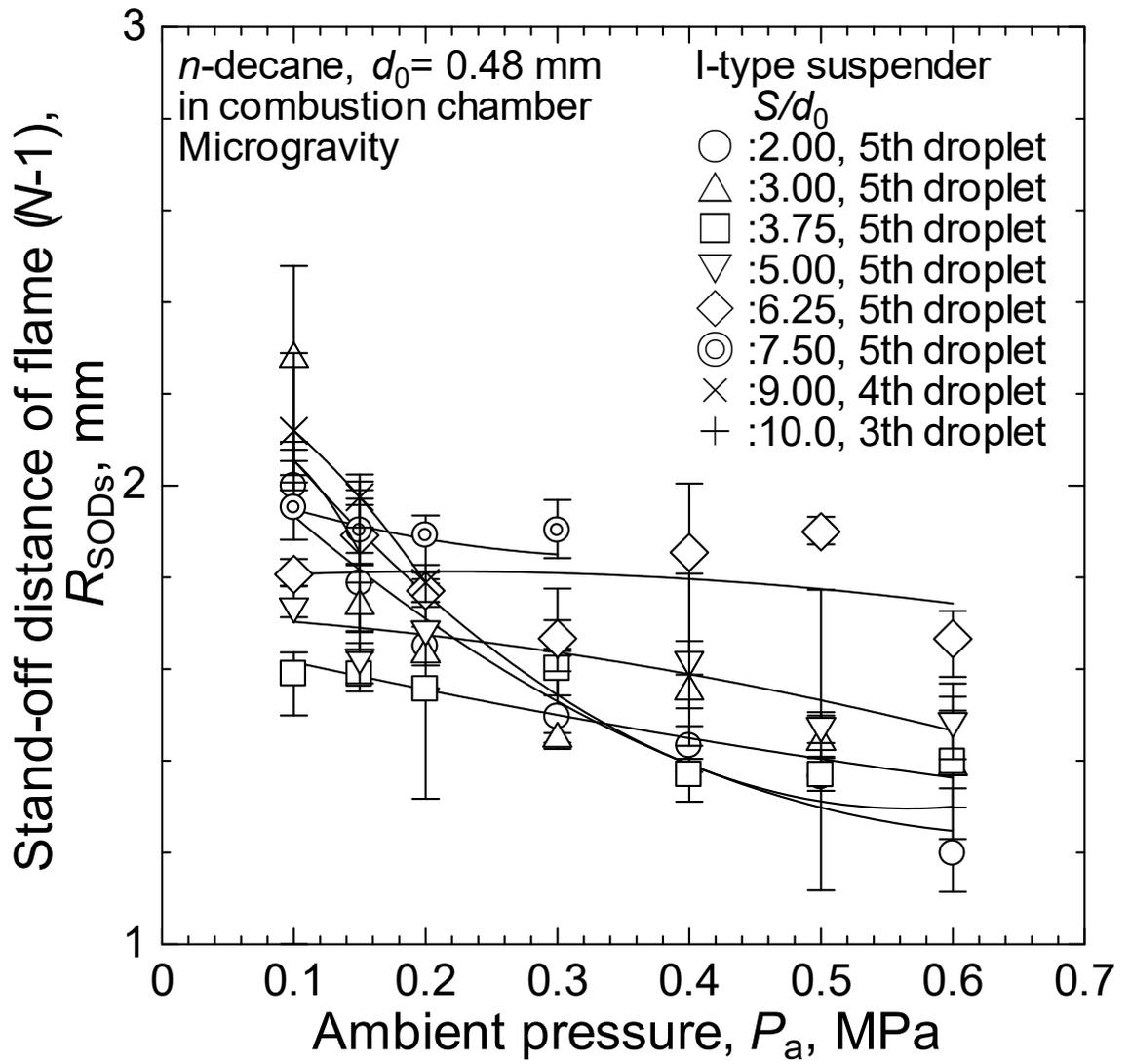


図 5-11 雰囲気圧力が  $N-1$  番目の液滴の火炎半径 ( $N$  番目液滴点火時) に及ぼす影響

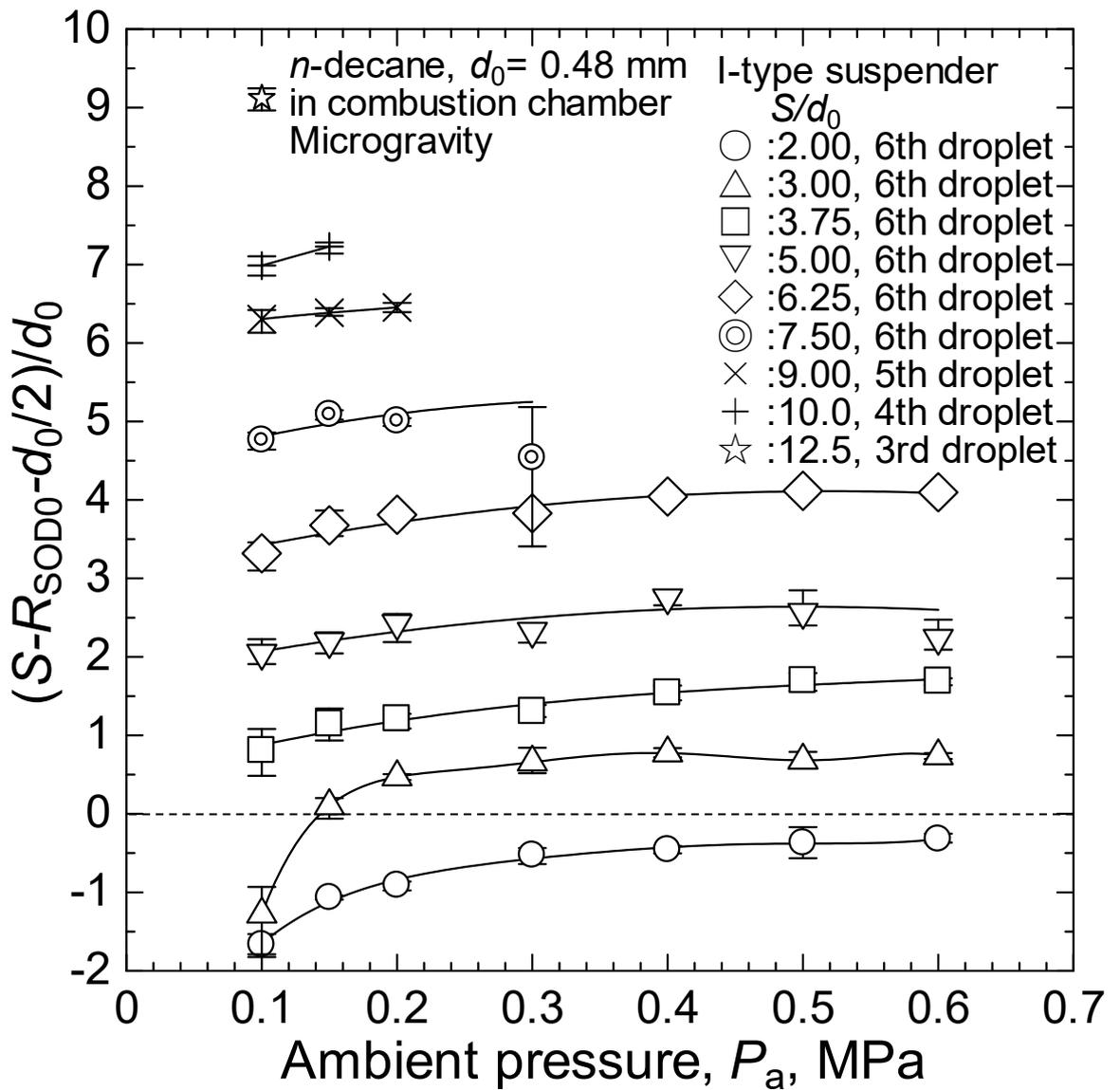


図 5-12  $N$  番目の液滴の初期火炎と未燃次液滴表面の間隔を初期液滴直径で除した燃え広がり火炎と液滴表面の無次元間隔

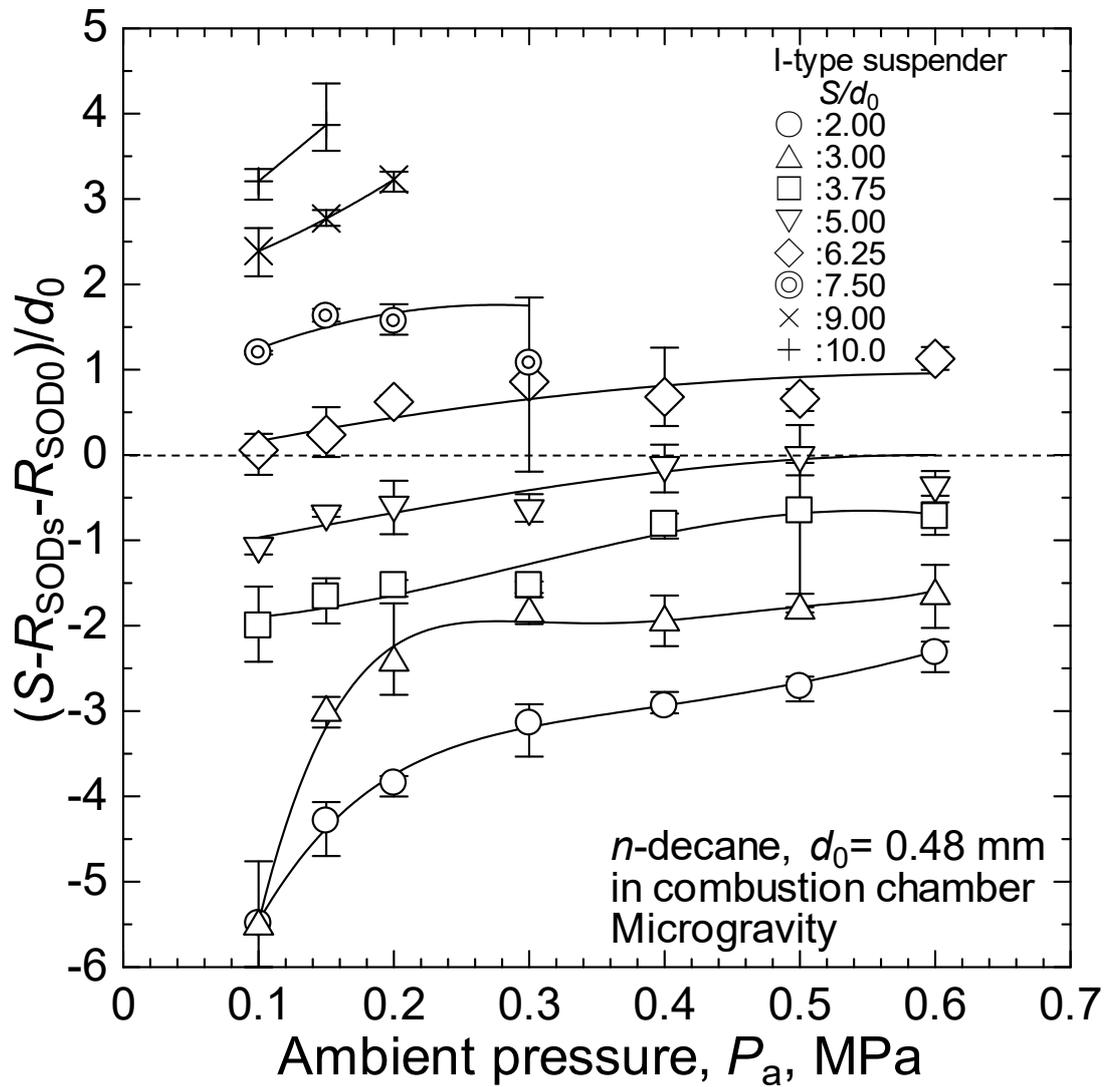


図 5-13  $N$  番目の液滴の初期火炎半径  $R_{SOD0}$  と同時刻の  $N-1$  番目の液滴の火炎半径  $R_{SODs}$  の和を液滴間隔から減じて初期液滴直径で除した無次元火炎間隔

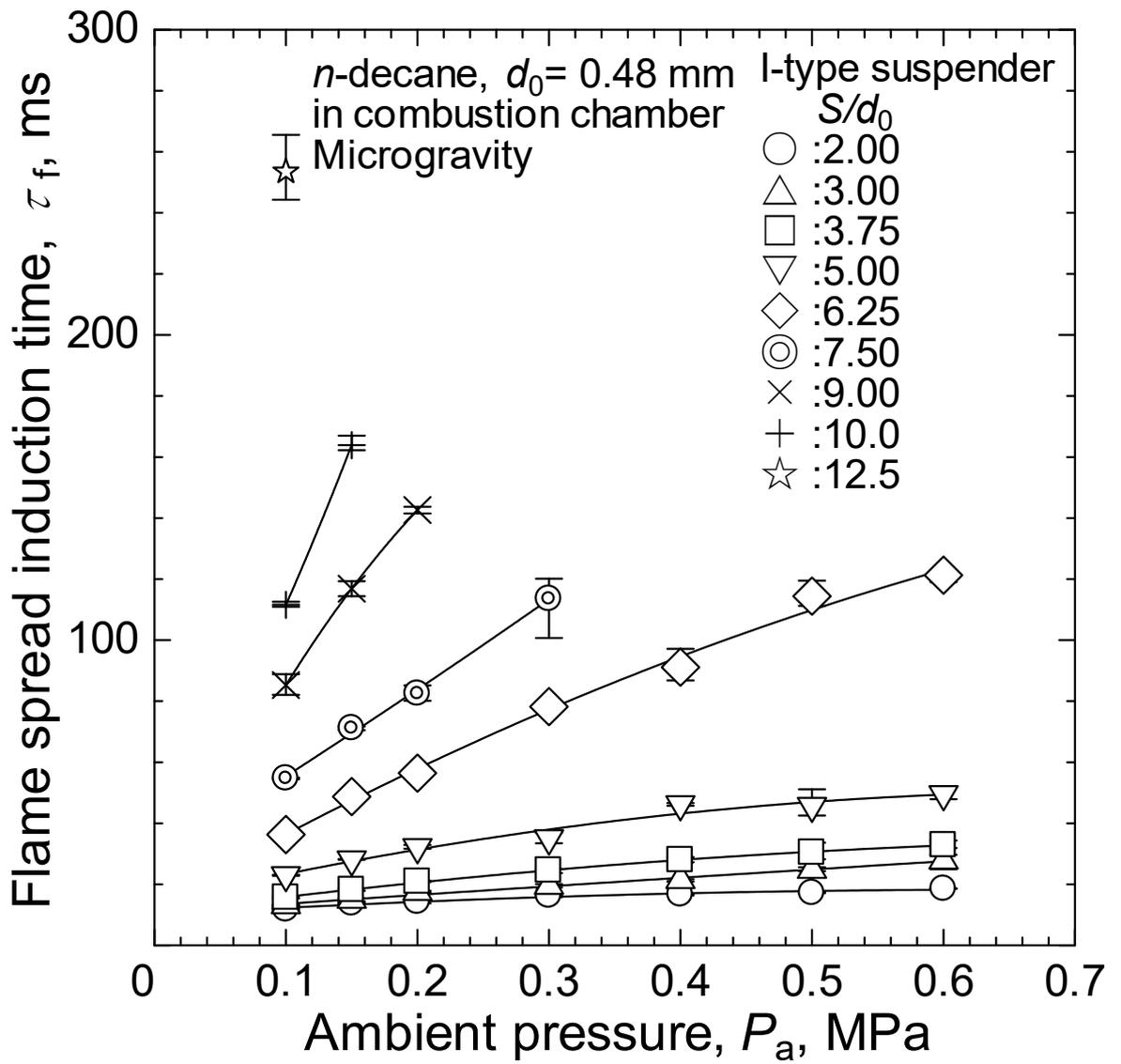


図 5-14 雰囲気圧力が火炎燃え広がり誘導時間に及ぼす影響

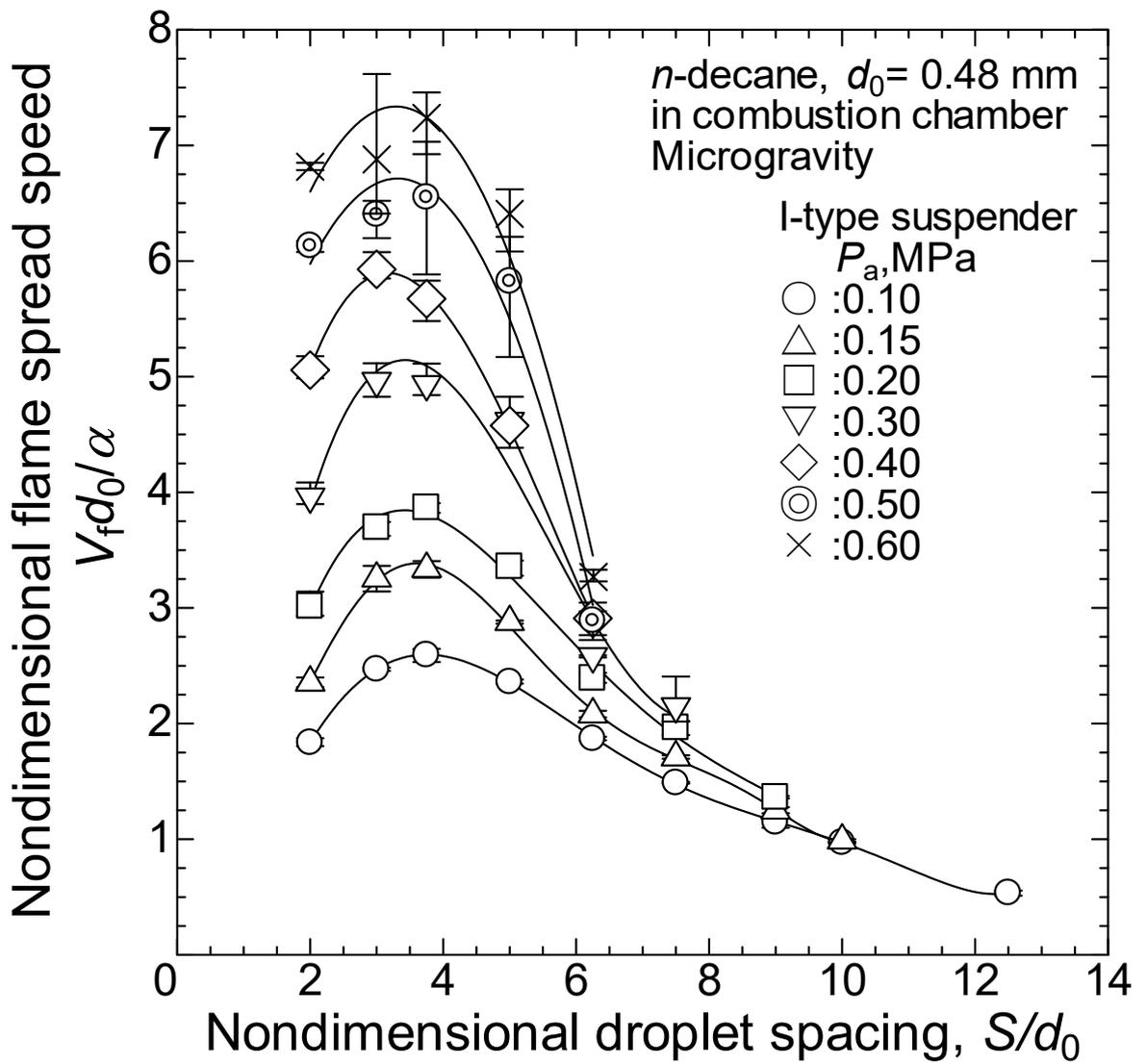


図 5-15 無次元液滴間隔が無次元火炎燃え広がり速度に及ぼす影響

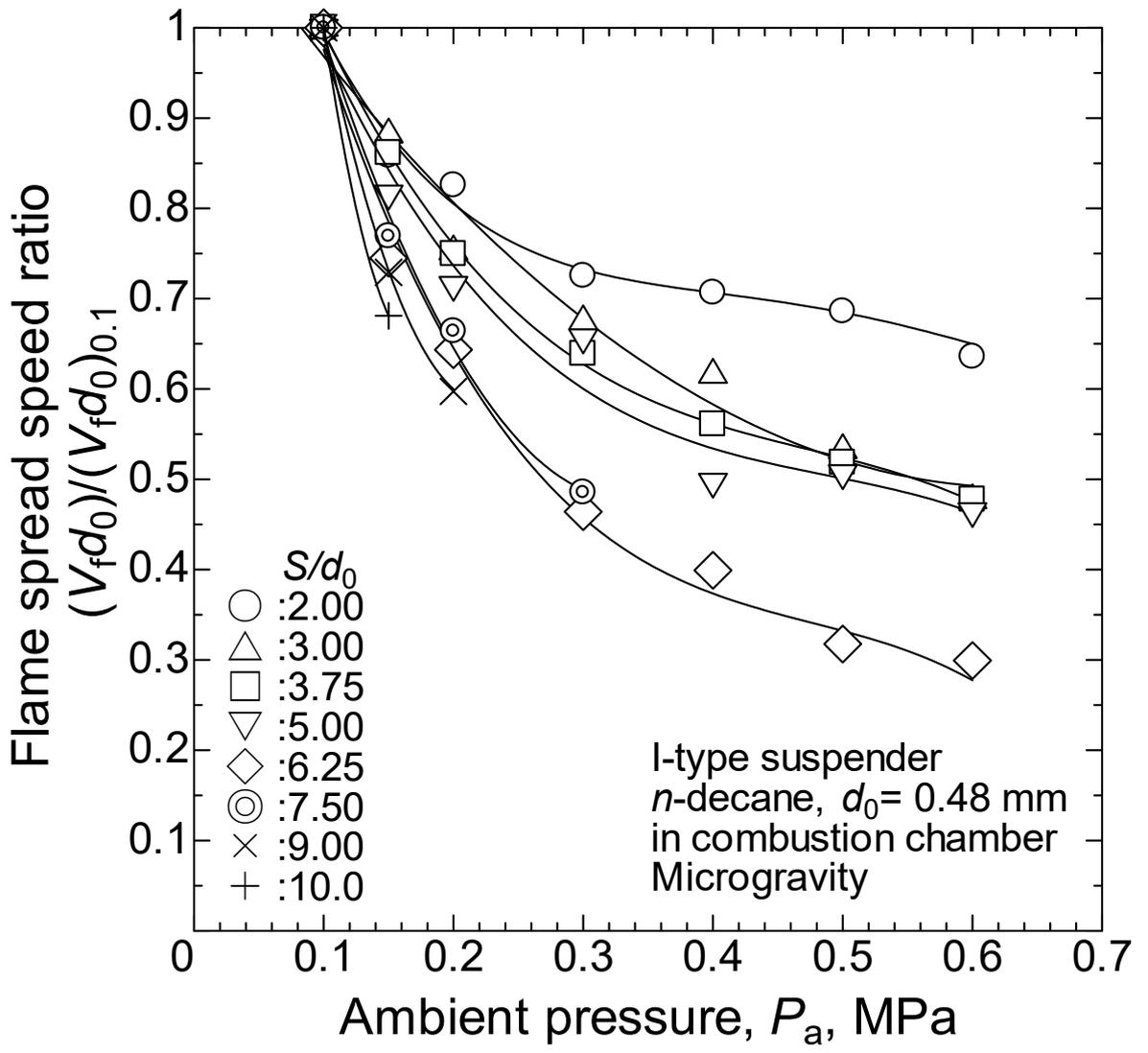


図 5-16 燃え広がり速度比の雰囲気圧力依存性

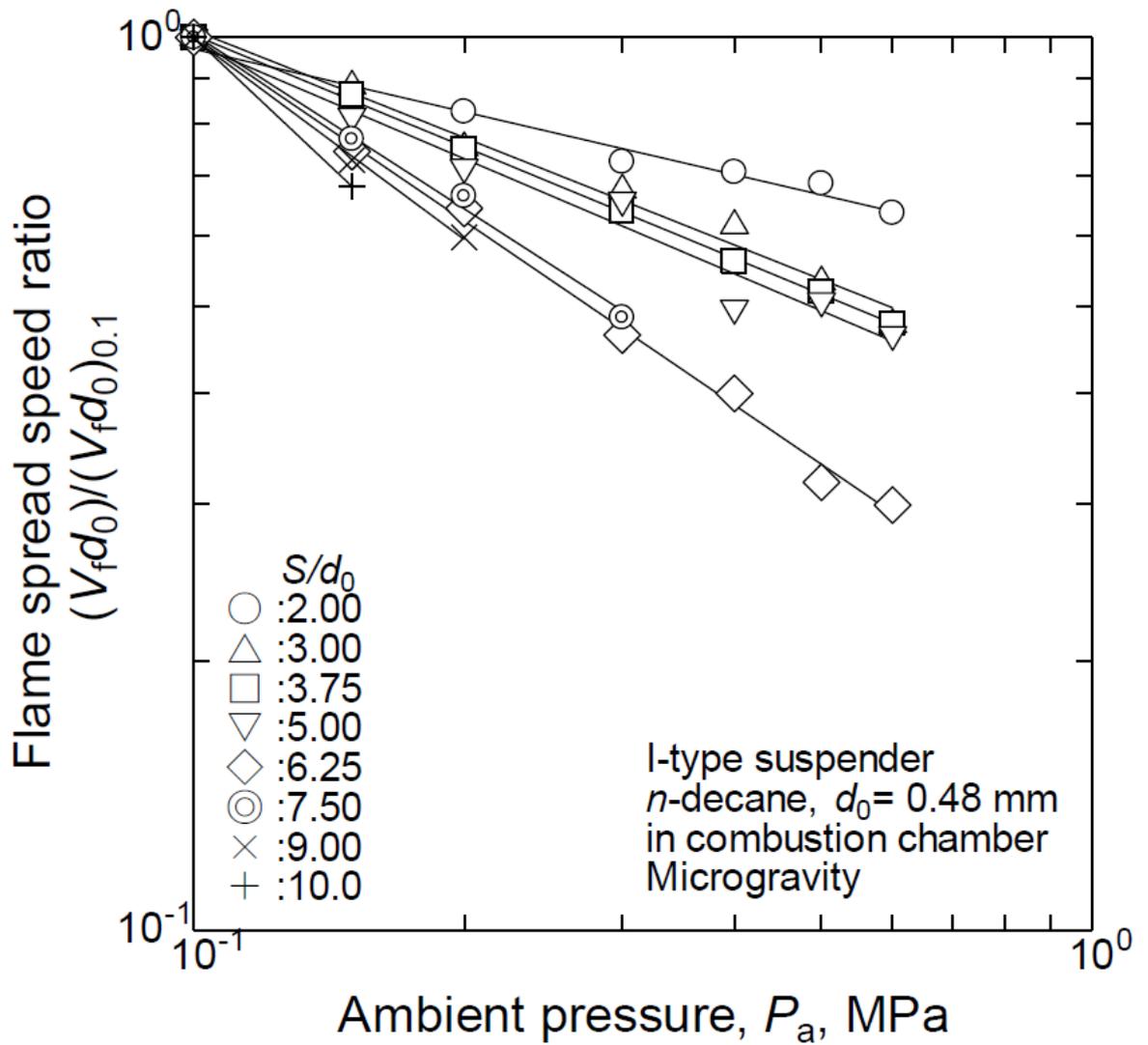


図 5-17 燃え広がり速度比の雰囲気圧力依存性(両軸対数)

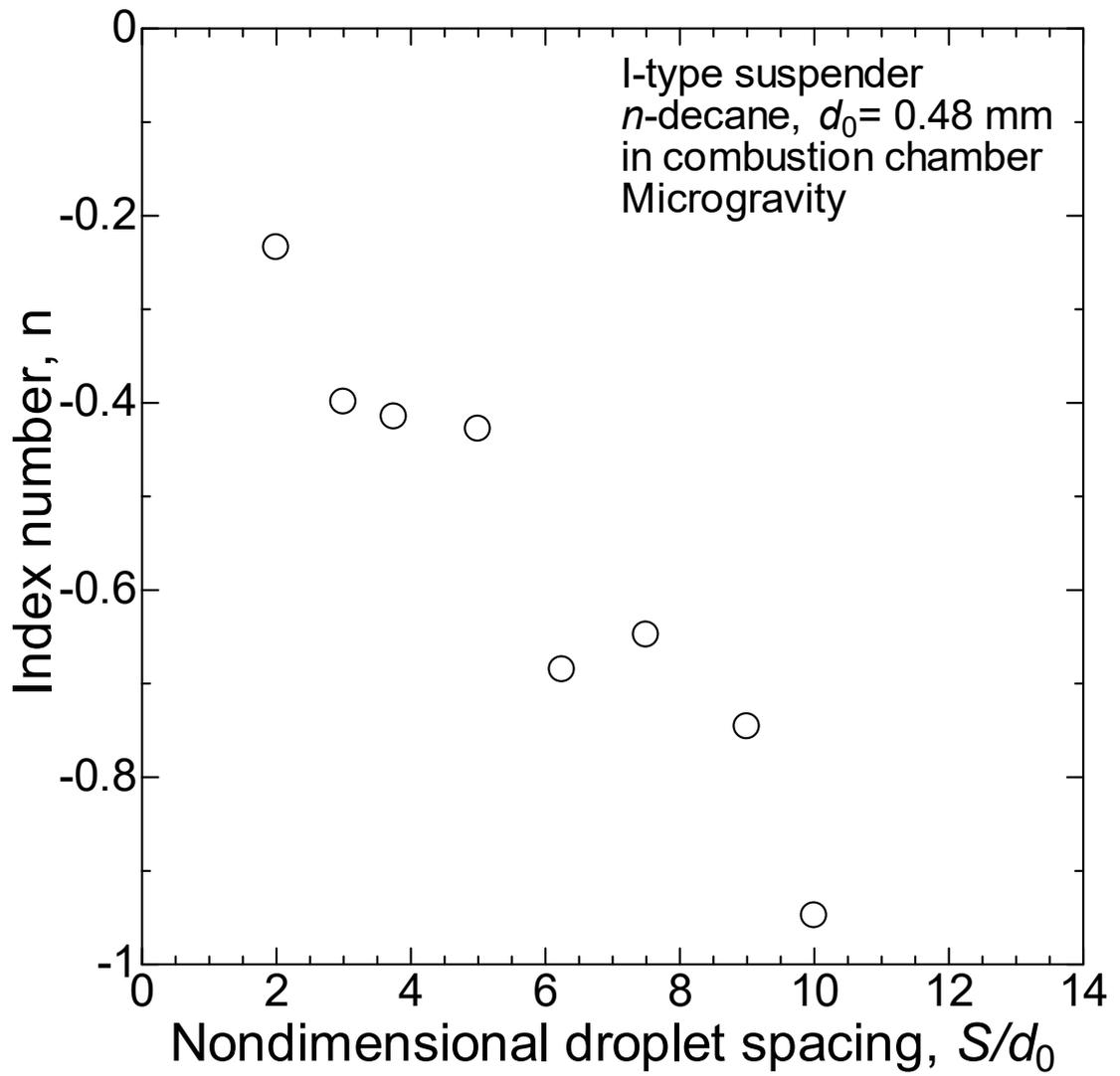


図 5-18 燃え広がり速度比の雰囲気圧力依存性指数

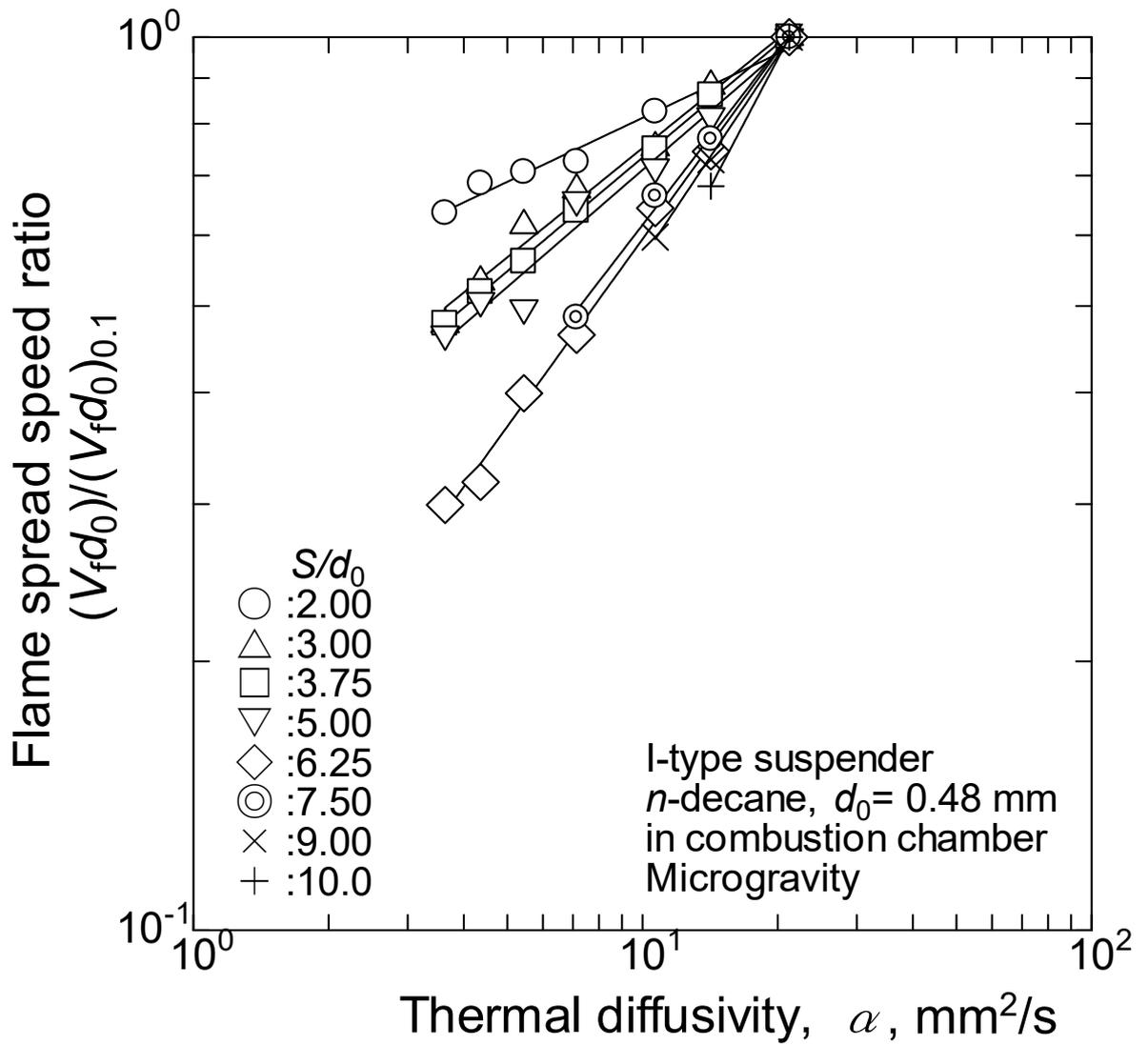


図 5-19 燃え広がり速度比の温度伝導率依存性

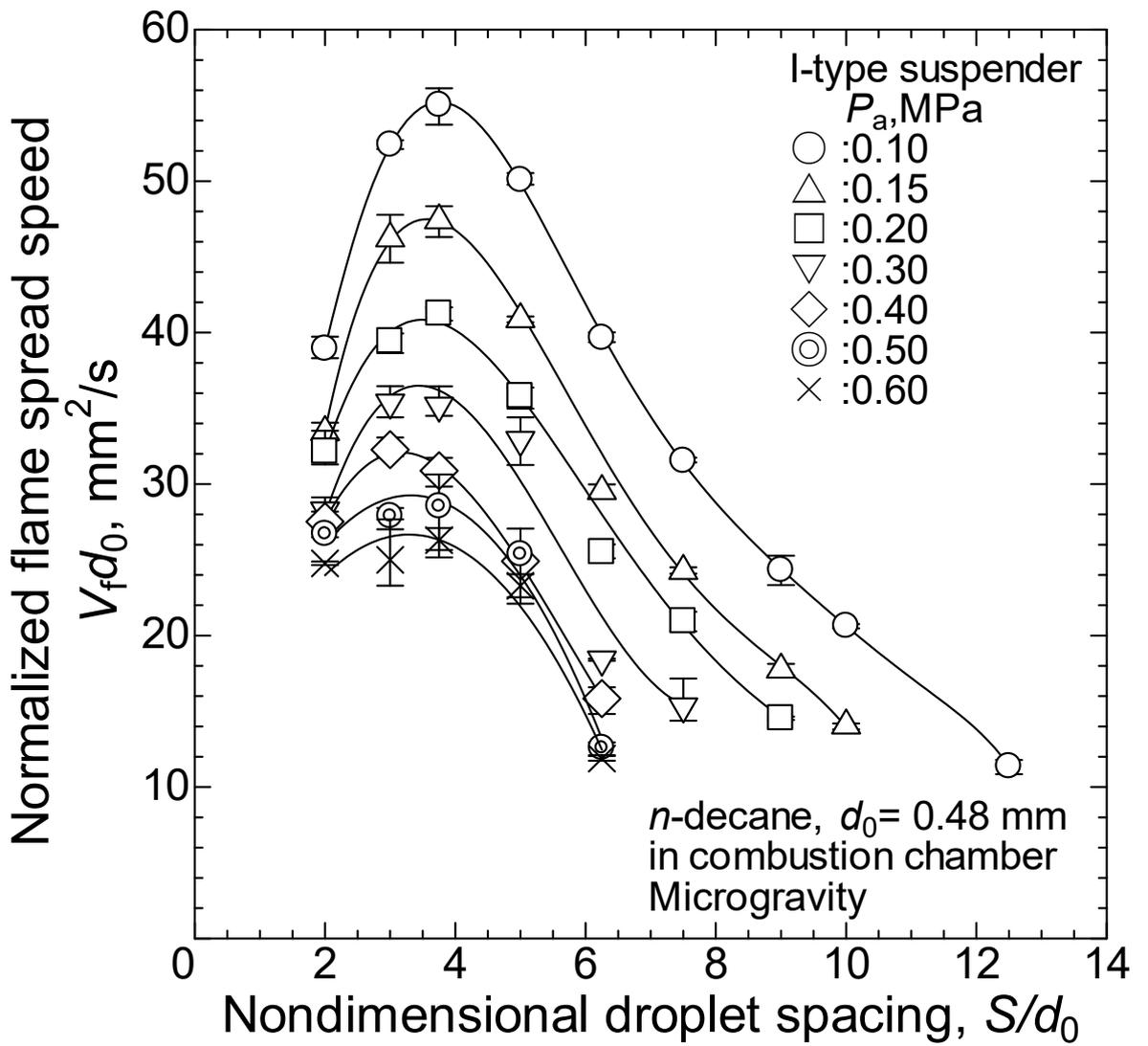


図 5-20 無次元液滴間隔が正規化火炎燃え広がり速度に及ぼす影響

## 第6章 燃え広がりには及ぼす初期液滴直径の影響

### 6.1 緒言

本章では燃え広がりには及ぼす初期液滴直径の影響について述べる<sup>39,42)</sup>。これまで燃料液滴を用いた実験では、時間的・空間的分解能を確保するため、直径1 mm程度が多く用いられてきた。一方実機噴霧の液滴サイズは数 $\mu\text{m}$ である。両者の隔たりは初期液滴直径で正規化することで埋められるとされてきたが、火炎直径でさえ準定常理論とは一致せず、また数値解析を用いた液滴燃焼シミュレーションでも、液滴直径が小さくなると初期液滴直径で現象を正規化できないことが示されている。本研究では、高感度・高時間分解能のカメラを用いることで初期液滴直径を可能な限り小さい条件で火炎燃え広がり実験を行うことで、初期液滴直径依存性を明らかにする試みを行った。他研究者が小さな液滴直径を用いた実験が行われなかったのは、単に高性能なカメラの有無だけではなく、実験精度を十分に確保することが難しいためと考えられる。本研究では、液滴直径および液滴間隔を従来と同じ精度で準備する方法を確立して実験を重ねた。

### 6.2 実験条件および方法

実験装置は2.2項の初期液滴直径依存性用の装置を使用した。無次元液滴間隔は、2, 3.75, 6.25, で固定した。全ての無次元液滴間隔固定実験において、初期液滴直径は、0.35, 0.4, 0.48, 0.7, 0.9 mm とし、0.35 mm のみ $\pm 10\%$ 、それ以外の条件においては $\pm 5\%$ 以内に収まるように調節した。本実験のみ火炎燃え広がり速度の計測には点火の影響による考慮から、第1液滴から2 mm以上離れた液滴から第9液滴までの平均燃え広がり速度を火炎燃え広がり速度とした。全ての実験は室温および大気圧下で行った。重力環境は微小重力環境とした。実験は燃焼容器を外して行った。

#### 6.2.1 火炎燃え広がり速度の測定

液滴列の各液滴の点火時刻と懸垂線画像の液滴列方向の座標から、各液滴間で火炎が燃え広がる速度を求めた。火炎燃え広がり速度は、点火の影響が存在する第1液滴および第2液滴と、閉端側である第10液滴を除いた、第3液滴から第9液滴までの平均燃え広がり速度とした。

#### 6.2.2 実験試料

燃料には適当な揮発性を有し、他研究者により燃え広がり基礎的なデータが得

られている点から，正デカン（ $C_{10}H_{22}$ ，鹿特級）を使用した。

## 6.3 実験結果および考察

### 6.3.1 燃え広がり速度に及ぼす初期液滴直径の影響

図 6-1 に実験により得られた正規化火炎燃え広がり速度と無次元液滴間隔の関係を示す。従来，異なる液滴直径の結果であったとしても，同一無次元液滴間隔であれば火炎燃え広がり速度を初期液滴直径で正規化した，正規化火炎燃え広がり速度は一致すると考えられてきた。これにより，液滴列実験の結果から実機サイズの液滴直径の現象を推定できるとされてきた。図 6-1 によれば，初期液滴直径が 0.7 と 0.9 mm は，正規化火炎燃え広がり速度がほぼ一致しているが，初期液滴直径が 0.48 mm まで小さくなると，正規化火炎燃え広がり速度は同じ値とならないことがわかった。ただし，無次元液滴間隔が広い 6.0 の条件ではいずれの初期液滴直径でも，正規化火炎燃え広がり速度は一致した。また，初期液滴直径の増大にともなって，正規化火炎燃え広がり速度が最大値となる無次元液滴間隔は減少した。図 6-2 に火炎燃え広がり速度と初期液滴直径の関係を示す。副変数として無次元液滴間隔を表している。無次元液滴間隔 2 および 6.25 の条件において，液滴直径の増大に伴って燃え広がり速度は単調に減少した。無次元液滴間隔 6.25 のほうが燃え広がり速度の初期液滴直径依存性が高い傾向を示した。無次元液滴間隔が 3 および 3.75 の条件では，初期液滴直径が 0.4 から 0.48 mm で燃え広がり速度が最大となった。

図 6-3 に正規化火炎燃え広がり速度と初期液滴直径の関係を示す。無次元液滴間隔が 3.75 で初期液滴直径が 0.48 mm 以上，および無次元液滴間隔が 6.25 の条件では正規化火炎燃え広がり速度は燃え広がり速度は一定の値を示した。これらの条件では相似則が成立していると言える。このとき，燃え広がり誘導時間は高温域の熱伝導や液滴の初期加熱時間といったフーリエ数で整理可能な特性時間が支配的であると考えられる。一方，無次元液滴間隔が 2，および無次元液滴間隔が 3.75 で初期液滴直径が 0.48 mm 以下の条件では，初期液滴直径の増大に伴い正規化火炎燃え広がり速度も増大した。この条件では相似則が成立していない。これらの条件では，燃え広がり誘導時間のうち液滴直径の 2 乗に反比例しない特性を持つ要因が支配的になっていると考えられる。

図 6-4 に初期液滴直径と燃え広がり誘導時間の関係を示す。初期液滴直径の減少に伴い，燃え広がり現象は高速となり誘導時間は短くなる。図 6-2 と合わせて考えると燃え広がり誘導時間が約 20 ms を下回る条件では，相似則が成立していない。粗大な液滴の場合であれば，熱の移動および液滴の加熱時間にのみ着目してきたが，現象が高速になると化学反応の時間を無視できなくなると考えられる。化学的点火遅れや火炎伝播時間は液滴直径の二乗に反比例する特性を持たないために相似則が

成立しなくなると考えられる。

図 6-5 に正規化火炎燃え広がり速度の初期液滴直径依存性の有無を表したパターンマップを示す。正規化火炎燃え広がり速度の初期液滴直径依存性は大きく 2 つのパターンに分類できる。一つのパターンは初期液滴直径の増大に伴って、正規化火炎燃え広がり速度が増大する場合である（パターン 1）。無次元液滴間隔 2 はこのパターン 1 に該当する。もう一方のパターンは、初期液滴直径が増大しても正規化火炎燃え広がり速度はおおむね一定の場合である（パターン 2）。無次元液滴間隔 6.25 はこのパターン 2 に該当する。パターンマップより初期液滴直径が大きい場合、正規化火炎燃え広がり速度はほぼ一定であることから、正規化火炎燃え広がり速度は初期液滴直径に対して独立していると考えられる。一方で、無次元液滴間隔が狭い、もしくは液滴直径が小さい場合は相似則が成立しないことが示された。

### 6.3.2 初期火炎直径に及ぼす初期液滴直径の影響

図 6-6 に初期液滴直径と初期火炎直径比  $d_i/d_0$  の関係を示す。初期液滴直径の増大に伴って初期火炎直径比は減少した。初期火炎の形成位置は流れの特性時間（燃料蒸気の流速）と化学反応時間によって決定されることが考えられる。両特性時間の比はダムケラー数として表される。初期火炎が形成される距離が液滴中心から増大することは、液滴の周囲に形成された可燃性混合気が点火可能な温度域まで拡散するまでの時間が増大することを意味する。混合気の初期火炎が形成される位置まで拡散する時間を検討する。混合気の正規化拡散特性時間  $t_d$  は  $(d_i/2d_0)^2/D$  と表せる。ここで  $D$  は燃料蒸気の拡散係数である。実験で得られた火炎直径を入れて計算すると、拡散係数は一定値と考えられるため、 $d_i/d_0$  の減少に伴って正規化拡散特性時間は減少する。図 6-4 の結果と合わせて考えると、これは初期液滴直径の増大に伴って燃え広がり要する時間（燃え広がり誘導時間）に占める可燃性混合気の拡散に要する時間が短くなっていると考えられる。無次元液滴間隔が広い条件では、高温域の熱伝導や液滴の初期加熱が燃え広がり誘導時間に対して支配的であるため、火炎燃え広がりにおける初期液滴直径の相似則が成立するが、無次元液滴間隔が狭い条件では、燃え広がり誘導時間に占める相似則が当てはまらない燃料蒸気の拡散時間の割合が増えたことが、燃え広がり相似則が成立しない要因の一つであると考えられる。燃料蒸気の拡散時間が相似則に則らないのは、初期火炎が成立する位置が、化学反応速度に依存するためだと考えられる。

## 6.4 結言

液滴間隔、および初期液滴直径をパラメータとして火炎燃え広がり実験を行った。燃料には正デカンを用いた。雰囲気は大気圧、室温とし、微小重力環境で実験を実

施した。火炎燃え広がり速度および初期火炎直径を調べた結果、以下の知見を得た。

- (1) 無次元液滴間隔 2 および 6.25 の条件において、液滴直径の増大に伴って燃え広がり速度は単調に減少した。また、無次元液滴間隔 6.25 の燃え広がり速度のほうが無次元液滴間隔 2 のそれよりも初期液滴直径依存性が高い傾向を示した。
- (2) 無次元液滴間隔が 3 および 3.75 の条件では、初期液滴直径が 0.4 から 0.48 mm で燃え広がり速度が最大となった。
- (3) 無次元液滴間隔が 3.75 で初期液滴直径が 0.48 mm 以上、および無次元液滴間隔が 6.25 の条件では正規化火炎燃え広がり速度は一定の値を示した。
- (4) 燃え広がり誘導時間が約 20 ms を下回る条件では、相似則が成立していない。粗大な液滴の場合であれば、熱の移動および液滴の加熱時間にのみ着目してきたが、現象が高速になると化学反応の時間を無視できなくなると考えられる。
- (5) 初期液滴直径の増大に伴って初期火炎直径比は減少した。
- (6) 初期液滴直径が大きく、かつ無次元液滴間隔が広い条件では、高温域の熱伝導や液滴の初期加熱が燃え広がり誘導時間対して支配的であるため、火炎燃え広がり速度を初期液滴直径で正規化した相似則が成立する。しかしながら、初期液滴直径が小さく、無次元液滴間隔が狭い条件では、相似則は成立しない。これは、燃え広がり誘導時間において燃料蒸気の拡散時間の割合が増えたことが、一つの要因であると考えられる。

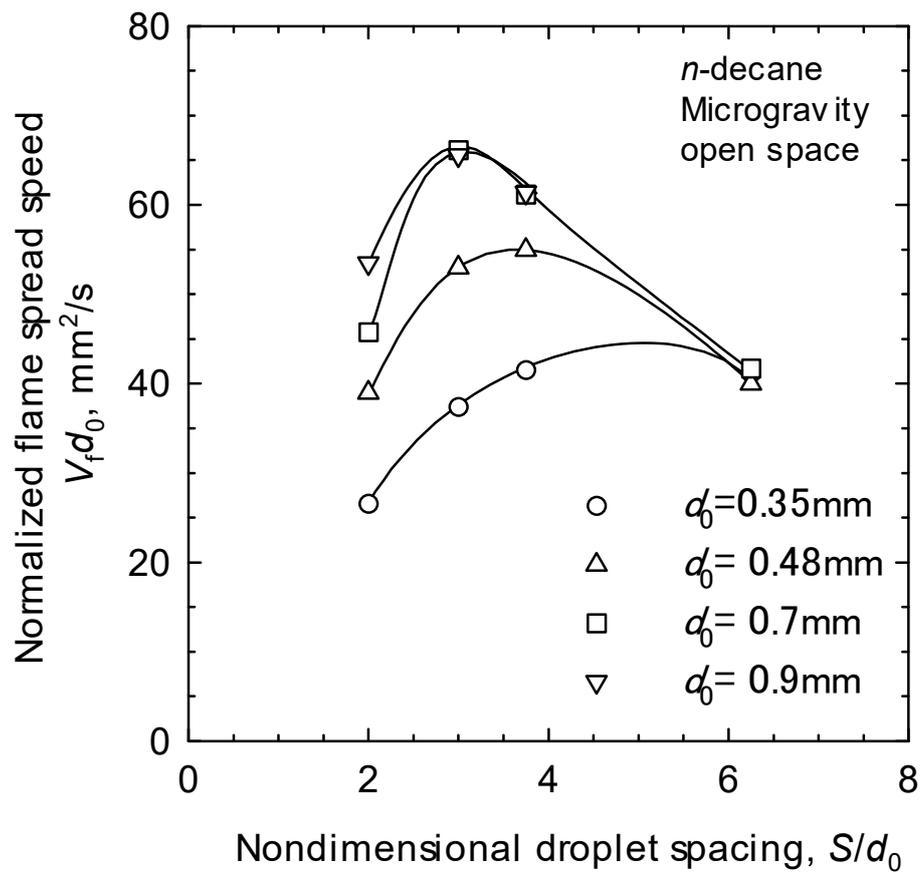


図 6-1 正規化火炎燃え広がり速度と無次元液滴間隔の関係

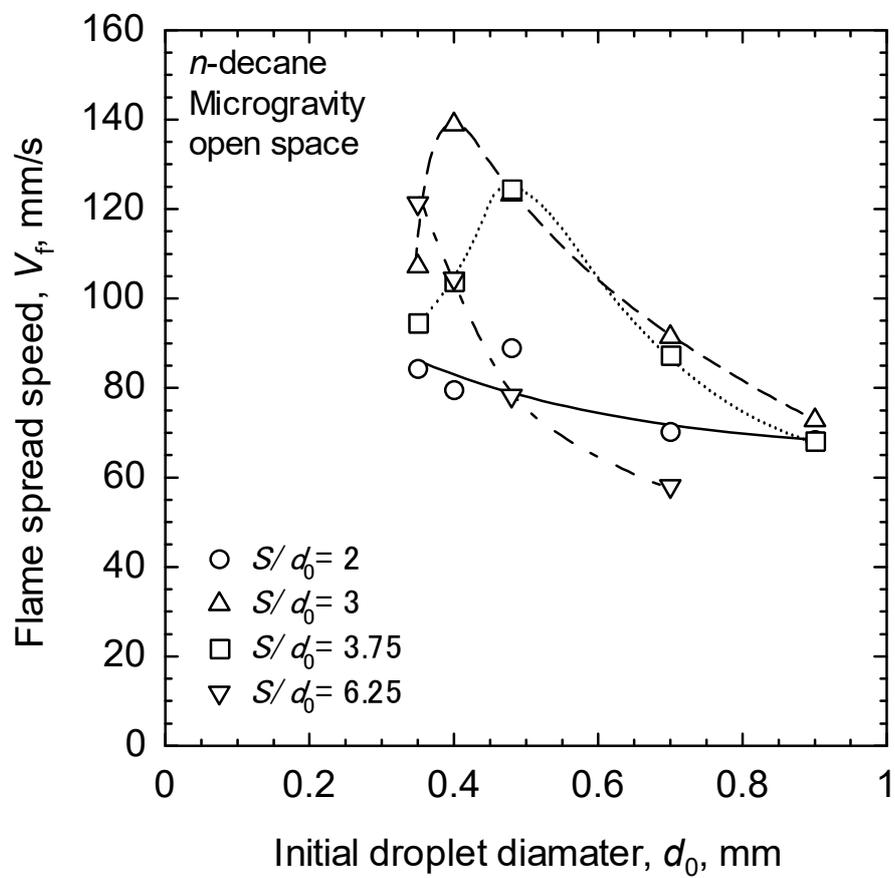


図 6-2 燃え広がり速度と初期液滴直径の関係

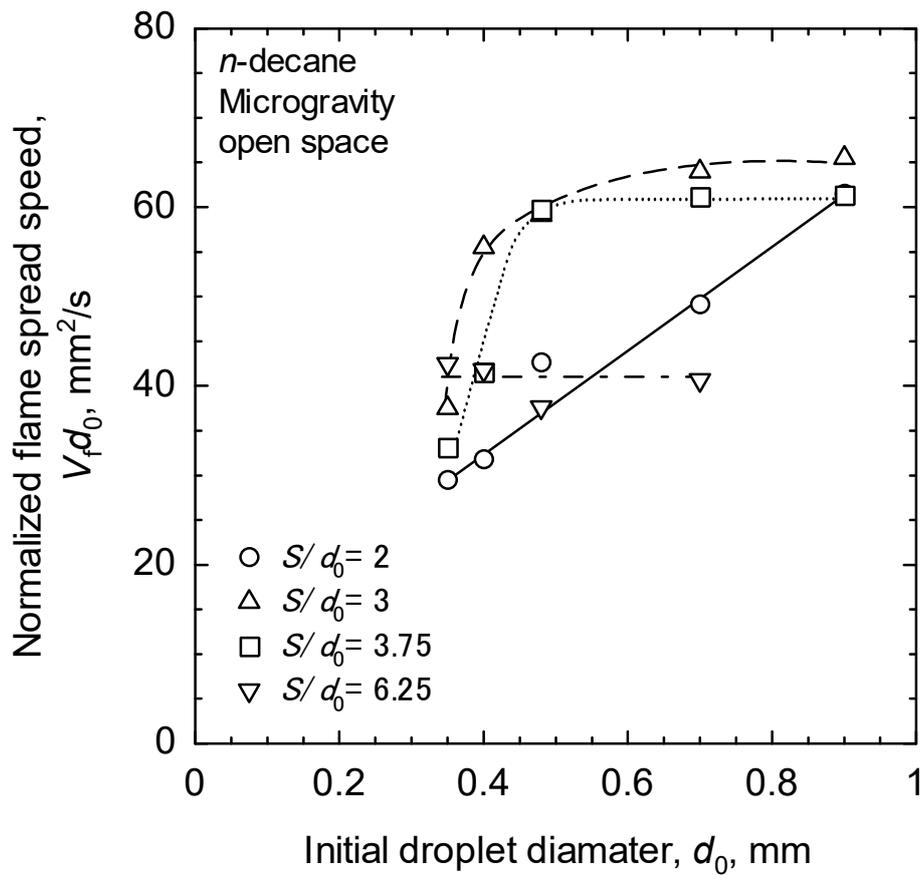


図 6-3 正規化火炎燃え広がり速度と初期液滴直径の関係

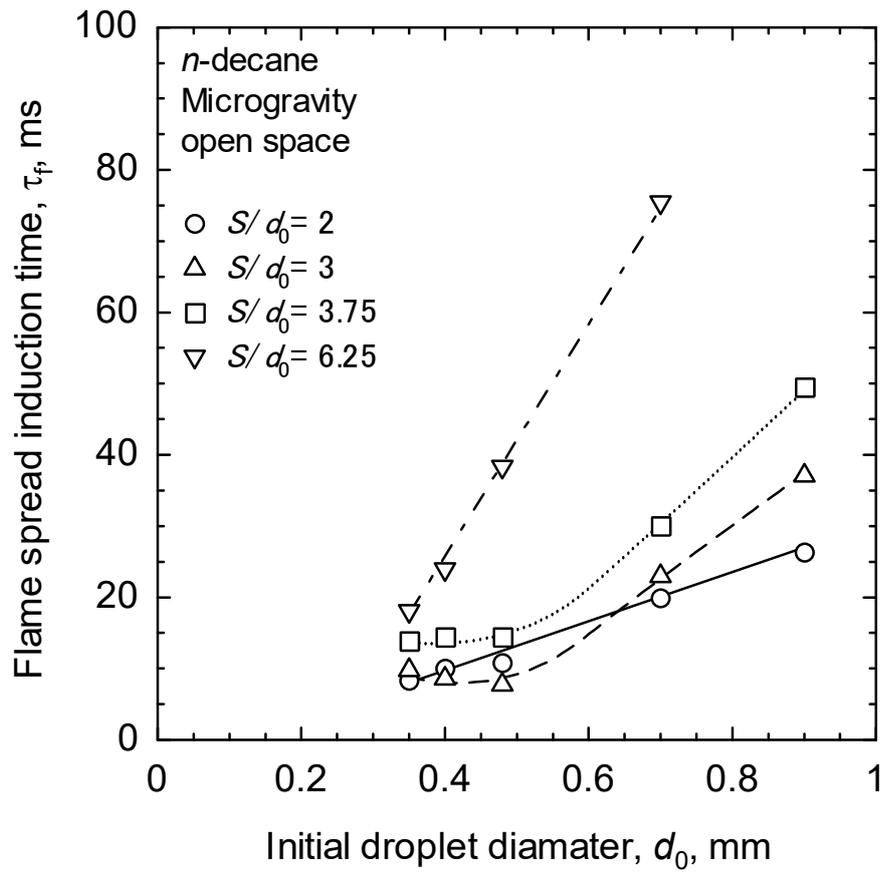


図 6-4 燃え広がり誘導時間と初期液滴直径の関係

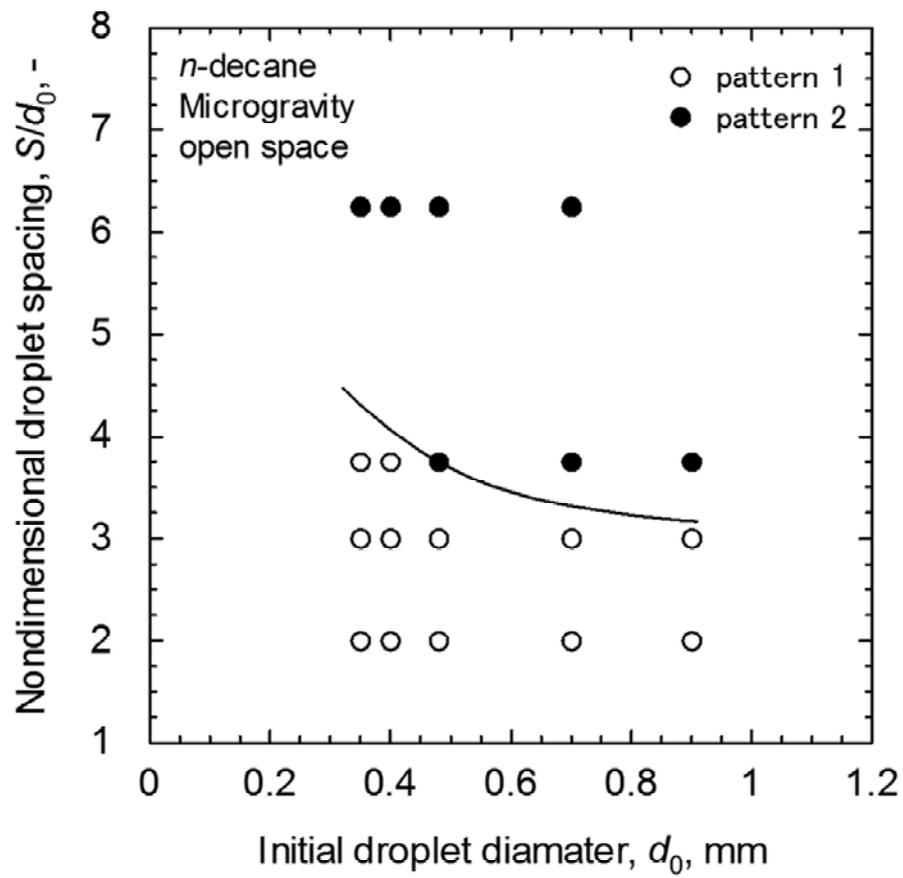


図 6-5 正規化火炎燃え広がり速度の初期液滴直径依存性のマップ

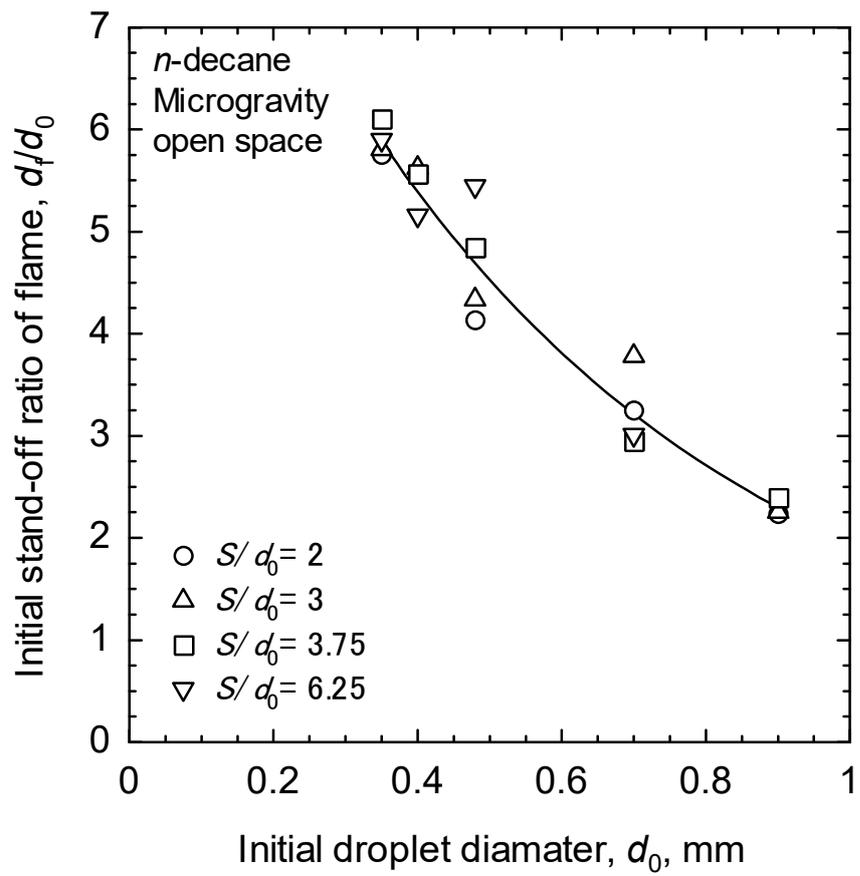


図 6-6 初期火炎直径比と初期液滴直径の関係

## 第7章 総合考察

### 7.1 液滴列が気相伝播火炎に及ぼす影響のモデル計算

第3では液滴間隔，液滴直径，燃料種を変化させて液滴列の存在が気相伝播火炎に及ぼす影響を調べた．その結果，液滴間隔，液滴直径，燃料種のいずれの条件も伝播火炎に影響を及ぼすパラメータであることがわかった．液滴列による伝播火炎への影響をモデル解析によって考察を行う．実験結果より，燃料の揮発性が高いほど伝播火炎への影響は大きい，液滴が小さいほど液滴寿命に対する伝播火炎が液滴を通過する時間が相対的に長くなり伝播火炎への影響は大きくなる．このことから，伝播火炎と液滴が熱的に干渉する時間と液滴の初期加熱期間の比をとることで，伝播火炎に燃料蒸気を供給しているかどうかを検証した．

$$\begin{aligned} \text{液滴が及ぼす伝播火炎への影響} &= \frac{\text{液滴と伝播火炎が熱的に干渉する時間}}{\text{液滴が蒸気を供給する時間}} \\ &= \frac{\text{火炎帯が液滴を通過する時間}}{\text{液滴の初期加熱期間}} \end{aligned} \quad (3.13)$$

火炎帯が液滴を通過する時間 $\tau_p$ は，

$$\tau_p = \frac{(a\delta + d_0)}{V_p} \quad (3.14)$$

ただし，予熱帯厚み $\delta$ は以下の式で表される．

$$\delta = \frac{\alpha}{S_L} = \frac{\lambda_g}{S_L \rho_g C_{pg}} \quad (3.15)$$

液滴の初期加熱期間 $\tau_i$ は，加熱に必要な熱量と単位時間に入る熱量から計算を行う．

$$\tau_i = \frac{\frac{1}{6} \pi d_0^3 \rho_f C_{pf} (bT_b - T_0)}{\pi d_0^2 h \left( T_a - \frac{bT_b + T_0}{2} \right)} \quad (3.16)$$

ただし、熱伝達率  $h$  は液滴直径に依存するため、ヌッセルト数  $Nu$  の定義式を用いて以下の式で表される。

$$h = \frac{Nu \lambda_g}{d_0} \quad (3.17)$$

自然対流および強制対流が無い条件において、 $Nu = 2$  となる。以上の式より熱的干渉時間と初期加熱時間の特性時間比  $e$  は、

$$e = \frac{\left( a \frac{\lambda_g}{\rho_g C_{pg} S_L} + d_0 \right) V_p}{\frac{1}{6} \pi d_0^3 \rho_f C_{pf} (bT_b - T_0)} \cdot \frac{\pi d_0^2 \frac{2\lambda_g}{d_0} \left( T_a - \frac{bT_b + T_0}{2} \right)}{1} \quad (3.18)$$

と表される。ただし、

$d_0$ : 液滴直径, mm  
 $\lambda$ : 熱伝導率, J/mm $\cdot$ s $\cdot$ K  
 $\rho$ : 密度, g/mm $^3$   
 $C_p$ : 比熱, J/g $\cdot$ K  
 $S_L$ : 燃焼速度, mm/s  
 $V_p$ : 火炎伝播速度, mm/s  
 $T_b$ : 燃料の沸点, K  
 $T_0$ : 液滴の初期温度, K  
 $T_a$ : 雰囲気温度, K  
 $a$ : 熱的干渉範囲補正係数  
 $b$ : 初期加熱最終到達温度補正係数  
 添え字  
 $g$ : 空気  
 $f$ : 燃料

これに実験条件の値を代入して計算を行った結果を表 7-1 に示す. 熱的影響範囲を伝播火炎の予熱帯厚みのみとした場合, 伝播火炎が通過直後に液滴に火炎が形成された場合などは, 正しく評価できないため, 熱的影響範囲を補正する係数  $a$  を設けた. 計算では, 伝播火炎が通過後, 液滴周囲に形成される火炎が, 伝播火炎の火炎帯と干渉する範囲までを熱的干渉範囲とした. 液滴に初期加熱期間終了後の液滴温度を燃料の沸点として計算を行った場合, 実験値とは大きく異なる計算結果となった. そのため, 式中に初期加熱採取到達温度補正係数  $b$  を導入した. 野村らの液滴蒸発実験<sup>43)</sup>における液滴内部温度の計測によれば, 初期加熱期間終了後の液滴内部の温度は燃料の沸点の約 85%であった. この結果より  $b = 0.85$  とし,  $bT_b$  における燃料の物性値を計算し用いた. 雰囲気温度は, 断熱火炎温度と気体当量比 0.8 における混合気温度の平均値として空気の物性値を計算して用いた.

デカン液滴  $d_0 = 0.8$  mm の場合,  $e = 0.172$  であった. 実験においては, 液滴の存在は伝播火炎に影響を及ぼさなかった. モデル計算においても, 熱的干渉時間中は液滴の加熱が行われるのみであり, 蒸気の供給はほぼ無かったことを示唆している. エタノール液滴  $d_0 = 0.32$  mm の場合,  $e = 1.33$  であった.  $e$  が 1 を超えているため, 熱的干渉時間中に初期加熱が完了し, 液滴が点火していると考えられる. 本実験の条件の中では, この条件が伝播火炎に及ぼす液滴の影響が顕著に現れていた. エタノール液滴  $d_0 = 0.8$  mm の場合,  $e = 0.533$  であった. 実験においては, 希薄予混合火炎伝播のみ液滴の存在により伝播速度が増大する傾向を示した. 計算結果からは熱的干渉時間中に初期加熱期間は終了していない結果となった. しかしながら, 初期加熱期間が終了するまでは, まったく燃料蒸気を供給しないのではないため, 実験

結果と比較してもおおむね妥当な計算結果であると考えられる。浜崎らの行った部分予蒸発噴霧の定容燃焼実験<sup>21)</sup>の条件で計算を行う。浜崎らは、10  $\mu\text{m}$  程度のエタノール液滴を予混合気中に分散させて実験を行っている。この条件において、液滴は予熱帯通過中に初期加熱および蒸発が完了する計算結果が得られた。実験結果と比較しても計算で正しく現象を表している。以上のように、簡単なモデル計算により伝播火炎に液滴の存在が影響を及ぼすか示すことができた。しかしながら、本計算では燃料種および液滴直径のみの検討であり、液滴間隔については議論していない。さらに発展させて噴霧を用いた実験と本実験結果を比較検討するためには、多様な条件で検証を行い、時間だけではなく熱的に整理する必要があると考える。

## 7.2 液滴列実験結果の大規模群燃焼への拡張

第4章では液滴間隔と実験空間正方形断面の一辺を等しくしたモデルを用いた微小重力実験結果を得た。この結果が、Chiuらが提唱する群燃焼形態のモードマップ<sup>44)</sup>のうち、どの群燃焼形態に属するかを検討した。これによれば、等間隔モデルの実験結果は外殻燃焼または外部群燃焼に相当するとしている。本研究では、液滴間隔を可変とし実験空間正方形断面の一辺を等しくした微小重力環境での液滴列燃焼が実験結果を、群燃焼形態に拡張し検討した。図7-1は、第10液滴に点火した時の群燃焼火炎の様子を無次元液滴間隔と気体当量比の関係で示したものである。図中の「○」のプロットは第10液滴に火炎到達時、第2液滴～第10液滴を覆う群火炎が存在する。総当量比が2.1を超えているため、第10液滴まで燃焼広がった火炎は酸素不足となり、酸素の供給がある第1液滴側にのみ火炎が残り、液滴の燃焼残りも顕著となる。このような燃焼が発生する場合を、群燃焼モード1と定義する。

「△」のプロットは、総当量比が1.0から2.0の範囲における燃焼形態であり、第10液滴到達時に群燃焼モード1の場合と同程度の群火炎が存在するが、消炎時は第1液滴側からと第10液滴側の両方向から火炎が縮小する場合である。また、両側から縮小してきた群火炎の最終的な消失位置は、総当量比が高い方が酸素不足が顕著になるため、第1液滴に近い側となる。このような場合を、群燃焼モード2と定義する。

「□」のプロットは、総当量比が0.6から1.2の範囲における燃焼形態であり、第10液滴到達時に第8液滴～第10液滴に単滴火炎が存在し、第1液滴側の火炎から順に消炎していく場合である。このような場合、群燃焼モード3と定義する。また、図中に示した総当量比 $\phi_t = 0.5, 1.1, 2.0$ の等値線から、総当量比が1.1を超えた範囲では、液滴は完全に燃焼せず燃焼残りとなる。この結果を、液滴列から球形液滴群へと発展させて考える。各群燃焼モードの模式図を図7-2に示す。外縁すべての液滴に同時に点火した場合、群燃焼モード1では火炎が液滴群内部に進行した後に液滴群外縁のみを残して消炎する。液滴の燃焼残りが顕著であることから、液滴群最内部では液滴の蒸発がほとんど起こっていないと考えられ、外殻燃焼に相当する燃焼形態

になると考えられる。群燃焼モード 2 では、火炎は液滴群内部に進行した後に液滴群外縁と中心の両方から消滅することから、単滴燃焼が存在せずに蒸発液滴のみが存在するような内部群燃焼になると考えられる。群燃焼モード 3 では、単滴火炎の不連続な燃え広がりが液滴群内部まで進行し、その後も単滴火炎が存在することから、単滴燃焼に相当する燃焼形態となると考えられる。

### 7.3 実験モデル式の構築

燃料液滴列燃え広がり現象を簡易的なモデルを用いて考察する。第 5 章では火炎燃え広がり速度の圧力依存性を詳細に調べるため、正規化火炎燃え広がり速度を同一無次元液滴間隔の雰囲気圧力 0.10 MPa における正規化火炎燃え広がり速度によって無次元化した燃え広がり速度比に及ぼす雰囲気圧力の影響について調べた。雰囲気圧力の増大に伴って火炎燃え広がり速度は減少し、無次元液滴間隔の増大に伴って燃え広がり速度の圧力依存性が増大することがわかった。図 5-17 において縦軸、横軸とも対数としており、各無次元液滴間隔のプロットを結んだ線はおおむね直線となった。よって、ある雰囲気圧力  $P_a$  における燃え広がり速度は、以下のように書き表せる。

$$V_f d_0 \approx (V_f d_0)_{P_a=P_0} \cdot (P_a/P_0)^n \quad (7.1)$$

ここで、 $P_0$  は基準とした圧力 0.10 MPa、指数  $n$  は燃え広がり速度の圧力依存性の大きさを表す数値となる。図 5-17 から各無次元液滴間隔におけるプロット近似線の勾配を算出し圧力依存度とした。結果を図 5-18 に示す。無次元液滴間隔の増大に伴い、指数は-0.2 付近から減少して-1 に近づいた。

ある液滴から隣の液滴まで火炎が燃え広がる時間（以下、燃え広がり誘導時間）について、特性時間に分解して考察する。燃え広がり誘導時間  $\tau_f$  を式 (1.1) のように分解して表されると考える。無次元液滴間隔が広い場合は、拡散火炎により形成された高温域が未燃次液滴に伝わるまでの熱伝導時間が燃え広がり誘導時間対して支配的になると考えられる。熱伝導時間  $t_c$  は熱伝導により液滴が存在しない空間  $S-d_0$  を熱が移動する時間と定義すると、近似的に以下の式で表される。

$$t_c \approx \frac{(S-d_0)^2}{\alpha} \quad (7.2)$$

燃え広がり火炎先端では、熱は球状に伝わりとモデル化した方が実際の現象に近いと考えられるが、ここでは平面状に熱が伝わりと簡易的に考えた。この熱伝導時

間について Mikami らは、液滴周りに形成される拡散火炎直径も考慮して熱伝導距離を与えている<sup>27)</sup>。本論文では燃え広がり速度の圧力依存性を単純な、モデルで表現することに主眼を置き、燃え広がり直後の初期火炎直径があまり圧力の影響を受けていなかったことを踏まえて火炎直径は考慮しない簡易モデルとした。液滴が可燃性混合気を形成するのに十分な温度の範囲（熱影響範囲）が火炎よりも前方に存在し、その熱影響範囲は火炎と一定の間隔を保って進行していると単純化すれば、熱影響範囲の進行速度と燃え広がり火炎の進行速度は等しいので、液滴が存在しない空間を熱影響範囲が移動する時間を熱伝導時間とした。この熱影響範囲は Nomura らにより火炎前縁から液滴直径の 5 倍程度の距離まで及んでいることが実験的に示されており<sup>34)</sup>、液滴間隔が狭い場合、1つ、もしくは2つ前の液滴に火炎が燃え広がった時点から液滴の加熱が始まることを意味している。液滴間隔が広い場合は、火炎が1つの液滴にとどまる時間が長くなるため、火炎と熱影響範囲前縁の距離が変化してしまう。よって、本熱伝導時間では現象を正しく記述できないことが懸念される。

温度伝導率は以下で表され、 $\lambda$ は熱伝導率、 $\rho$ は密度、 $C_p$ は定圧比熱である。

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (7.3)$$

理想気体を仮定すれば、密度は圧力に比例する。

$$\rho \propto P_a \quad (7.4)$$

熱伝導率と定圧比熱の圧力依存性は小さいため、圧力に対して一定値とみなせば、温度伝導率は圧力の-1乗に比例する。液滴表面から未燃次液滴表面までの熱伝導時間が以下で表せるとする。

$$t_c \propto \left[ \frac{(S - d_0)^2}{\alpha} \right]_{P_a=P_0} \cdot \left( \frac{P_a}{P_0} \right) \quad (7.5)$$

これは、熱伝導時間が支配的だと考えられる無次元液滴間隔が広い場合の燃え広がり速度の  $n$  が、-1 に近づくことと合致する。一方、無次元液滴間が狭い場合の燃え広がりには、拡大する群燃焼火炎が未燃液滴に到達し、未燃次液滴を加熱する（モード1）形態で火炎が進行する。火炎と液滴の距離が非常に近いため、燃え広がり誘導時間に対して初期加熱時間  $t_h$  が支配的になると考えられる。初期加熱時間を単純

化すると以下のように記述できる.

$$t_h \propto \frac{\frac{1}{6}\pi d_0^3 \rho_f C_{pf} (T_b - T_0)}{\pi d_0^2 h (T_e - \frac{T_b + T_0}{2})} = \frac{d_0 \rho_f C_{pf} (T_b - T_0)}{6h (T_e - \frac{T_b + T_0}{2})} \quad (7.6)$$

ここで,  $h$  は熱伝達率,  $T_e$  は液滴周囲温度,  $T_b$  は燃料の沸点,  $T_0$  は燃料の初期温度である. デカンの標準状態の沸点は 447 K であり, 沸点は圧力依存性をもつ. 雰囲気圧力と沸点の関係は, **Wagner** の近似式により求めた<sup>45)</sup>. 沸点以外の値は圧力依存性が無いと単純化し, 燃料および雰囲気の物性には室温における値を代入した<sup>45)</sup>.  $t_h$  と圧力との関係を  $T_e = 2000$  K,  $T_0 = 300$  K として計算すると,  $t_h$  の圧力依存性は圧力の指数関数で近似でき, 以下のように表すことができることがわかった.

$$t_h \propto \left[ \frac{d_0 \rho_f C_{pf} (T_b - T_0)}{6h (T_e - \frac{T_b + T_0}{2})} \right]_{P_a=P_0} \cdot \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{0.271} \quad (7.7)$$

本実験において無次元液滴間隔が 2.0 の条件での圧力依存性の指数  $n$  は -0.234 であり, 沸点の圧力依存性から求めた指数と概ね一致する.  $t_h$  を正確に見積もるには各物性値を液滴周囲温度に合わせた値を使用する必要があるが, 本計算においては  $t_h$  の圧力依存性に着目して基準圧力  $P_0$  における  $t_h$  との比をとるので, 室温の値を用いた.  $T_e$  は液滴間隔に依存して変化するが, ここでは一定の値を用いた. 仮に  $T_e = 1500$  K とした場合を計算すると雰囲気圧力の指数は 0.275 であり,  $T_e = 2000$  K の場合のそれと比べると 2% 程度の差である. このことから, 比較的液滴間隔が近い範囲では, 液滴周囲温度に対する雰囲気圧力の指数の感度は小さいと考えられる.

式 (1.1) 中の, 液滴まわりの予混合気層内の火炎伝播時間  $t_p$  と化学的点火遅れ時間  $t_i$  は,  $t_h$  と  $t_c$  を概算し足し合わせた値が燃え広がり誘導時間の実測値にほぼ一致することから, 本実験条件範囲内では支配要因とはならないと考えられる. よって,  $t_i$  と  $t_p$  が式 (1.1) 中で無視できると仮定し, 燃え広がり速度の圧力依存性を表す実験モデル式を構築する.  $t_c$  と  $t_h$  を正確に推定することは困難であるため, 比例係数  $a$  と  $b$  を用いて燃え広がり速度比を表せば以下の通りである.

$$\frac{V_f d_0}{(V_f d_0)_{P_a=P_0}} = \frac{(t_c + t_h)_{P_a=P_0}}{t_c + t_h}$$

$$= \frac{a \left[ \frac{(S - d_0)^2}{\alpha} \right]_{P_a=P_0} + b \left[ \frac{d_0 \rho_f C_{pf} (T_b - T_0)}{6h(T_a - \frac{T_b + T_0}{2})} \right]_{P_a=P_0}}{a \left[ \frac{(S - d_0)^2}{\alpha} \right]_{P_a=P_0} \cdot \left( \frac{P_a}{P_0} \right) + b \left[ \frac{d_0 \rho_f C_{pf} (T_b - T_0)}{6h(T_a - \frac{T_b + T_0}{2})} \right]_{P_a=P_0} \cdot \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{0.271}} \quad (7.8)$$

本式中の  $P_a$  にも  $S$  にも依存しないとした変数はまとめて未知定数  $A$  に含めると、正規化燃え広がり速度は、

$$V_f d_0 = \frac{A(S - d_0)^2 + 1}{A(S - d_0)^2 \left( \frac{P_a}{P_0} \right) + \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{0.271}} (V_f d_0)_{P_a=P_0} \quad (7.9)$$

と表すことができる。これにより、基準圧力  $P_0$  の正規化火炎燃え広がり速度から雰囲気圧力  $P_a$  の正規化火炎燃え広がり速度を予測することができる。基準圧力を 0.10 MPa とし、式 (7.9) の未知定数  $A$  を、図 5-20 の  $P_a$  が 0.10 MPa 以外のすべての実験値を用いて、実験値と計算結果の誤差比率の絶対値の総和が最小になるように決定すると、

$$A = 8.01 \times 10^{-2} \quad (7.10)$$

となった。結果を黒の実線で図 7-3 に示す。実験結果とモデル式から求めた値の誤差の絶対値の平均は 5.42%、最大は 17.2%であった。大気圧の正規化燃え広がり速度から加圧雰囲気のそれを導いているため、燃え広がり速度の無次元液滴間隔依存性が大気圧の結果と大きく異なる加圧雰囲気については誤差が大きくなったが、低い圧力条件においては良好な結果が得られた。現状のモデル式では、大気圧雰囲気の燃え広がり速度を実験で取得する必要がある。各特性時間を液滴間隔の関数で表し、燃え広がり速度を求めるモデル式を構築することが今後の課題である。

得られたモデル式を用いて、正規化火炎燃え広がり速度が最大となる無次元液滴間隔について考察する。本モデルにおいては、式 (7.5) および (7.7) が示すとおり、

$t_c$  は液滴間隔の増大に伴って増大し、 $t_h$  は液滴間隔に依存せず一定の値とした。得られたモデル式で雰囲気圧力が 0.10 MPa の場合の  $t_c$  と  $t_h$  を計算すると、無次元液滴間隔が 2.0, 3.75 および 10 の場合、燃え広がり誘導時間に占める  $t_c$  の割合は、それぞれ 2%, 12% および 60% である。すなわち、液滴間隔が狭い場合は  $t_c$  をほとんど無視することができるが、液滴間隔が広くなると  $t_c$  が支配的になる。また、雰囲気圧力の増大に伴って、 $t_c$  と  $t_h$  の比は雰囲気圧力の 0.729 乗で増大することが式 (7.5) および (7.7) からわかる。無次元液滴間隔の増大に伴って燃え広がり誘導時間に占める  $t_c$  の割合が大きくなるので、雰囲気圧力に対する燃え広がり速度の増大率は、無次元液滴間隔の増大に伴って増大する。正規化火炎燃え広がり速度は燃え広がり誘導時間に反比例するので、雰囲気圧力に対する正規化火炎燃え広がり速度の減少率は、無次元液滴間隔の増大に伴って大きくなる。よって最大正規化火炎燃え広がり速度を示す無次元液滴間隔は、雰囲気圧力の増大に伴って、減少するはずである。図 5-20 を詳細に見ると、正規化火炎燃え広がり速度が最大となる無次元液滴間隔は、雰囲気圧力の増大に伴って若干減少しているようにも捉えることができる。

式 (7.9) により、任意の雰囲気圧力における燃え広がり速度を求めることを可能としたが、大気圧における実験結果が必須となってしまふ。そこで式 (7.7) において、初期火炎直径を考慮することで火炎面から未燃次液滴までの距離に応じた周囲温度を与えるように修正を行う。これにより、初期加熱時間においても液滴間隔の依存性を表すことが可能となる。修正した式を以下に示す。

$$t_h = \frac{d_0 \rho_f C_{pf} (T_b - T_0)}{6h \left( \frac{T_a r_{f0}}{S} - \frac{T_b + T_0}{2} \right)} \quad (7.11)$$

初期火炎直径については実験結果を用いる。図 5-10 の結果において、気体当量比の増大に伴って、わずかながら無次元火炎直径は増大する傾向を示したが、モデル計算において無次元火炎直径は気体当量比によらず一定の値とした。また、図 5-10 で示されるように、雰囲気圧力の増大に伴って、火炎直径は減少する。大きな変化が生じている無次元液滴間隔が狭い領域では、火炎が燃え広がり進行方向と直交方向に拡大していることを考慮して、計算において無次元火炎直径は雰囲気気によらず一定の値とした。火炎直径の初期液滴直径依存性については図 6-6 に従い、モデル式に適用することとした。火炎直径はダムケラー数と初期液滴直径の関数となっていることから、初期加熱時間に火炎直径の要素を取り込むことで、燃え広がり速度に対する液滴直径の相似則が成立しないことを表すことができると考える。また 6.3.2 項で考察のとおり、液滴直径が小さい場合は拡散時間を考慮する必要がある。拡散時間は以下の式により表す。

$$t_d = \frac{(r_{f0} - \frac{d_0}{2})^2}{D} \quad (7.12)$$

熱伝導時間は式 (7.5) を用い、これらの式から燃え広がり誘導時間を計算する。実験結果とモデル式計算結果の差ができるだけ小さくなるよう、各特性時間に係数 (X,Y,Z) を掛けた。

$$\tau_f = Xt_c + Yt_h + Zt_d \quad (7.13)$$

モデル式を用いた計算結果を図 7-4, 図 7-5, および図 7-6 に示す。圧力依存性について、各特性時間の係数は固定して計算した。大気圧実験結果に基づいたモデル式で示した通り、実験結果とモデル式はよく一致した。初期液滴直径依存性について、各特性時間の係数は液滴直径ごとに異なる数値を入れることで実験結果と実験モデル式を一致させることができた。気体当量比依存性についても、各特性時間の係数は液滴直径ごとに異なる数値を入れることで実験結果と実験モデル式を近づけることができたが、燃え広がり速度の最大値を適切に表現することができなかった。図 7-7 と図 7-8 に燃え広がり誘導時間に対する各特性時間の支配割合を示す。各特性時間を色分けして示している。図 7-7 において、液滴間隔が狭い場合は火炎と未燃次液滴の距離が短いため、熱伝達時間はほとんど無く初期加熱時間が支配的である。一方液滴間隔が広い場合は熱伝達時間が支配的であり、雰囲気圧力の増大に伴って熱伝導時間も増大した。図 7-8 では、燃え広がり速度に関する初期液滴直径の相似則について議論するため縦軸は初期液滴直径で正規化した。無次元液滴間隔が 6.25 と比較的広い場合、正規化火炎燃え広がり誘導時間がほぼ一定の値となったため、相似則が成立した。ただし、各特性時間の支配割合を見ると、液滴直径が小さい場合は拡散時間が増大していることがわかった。無次元液滴間隔が 2.0 の場合はいずれの液滴直径においても液滴直径の増大に伴って正規化燃え広がり誘導時間は減少していないため、相似則は成立していない。

表 7-1 伝播火炎に及ぼす液滴列の影響度

Fuel	<i>n</i> -decane	Ethanol	Ethanol
液滴直径 [mm]	0.8	0.8	0.32
熱的干渉時間 [s]	0.012	0.012	0.0048
初期加熱期間 [s]	0.0696	0.0224	0.00359
<i>e</i>	0.172	0.533	1.33

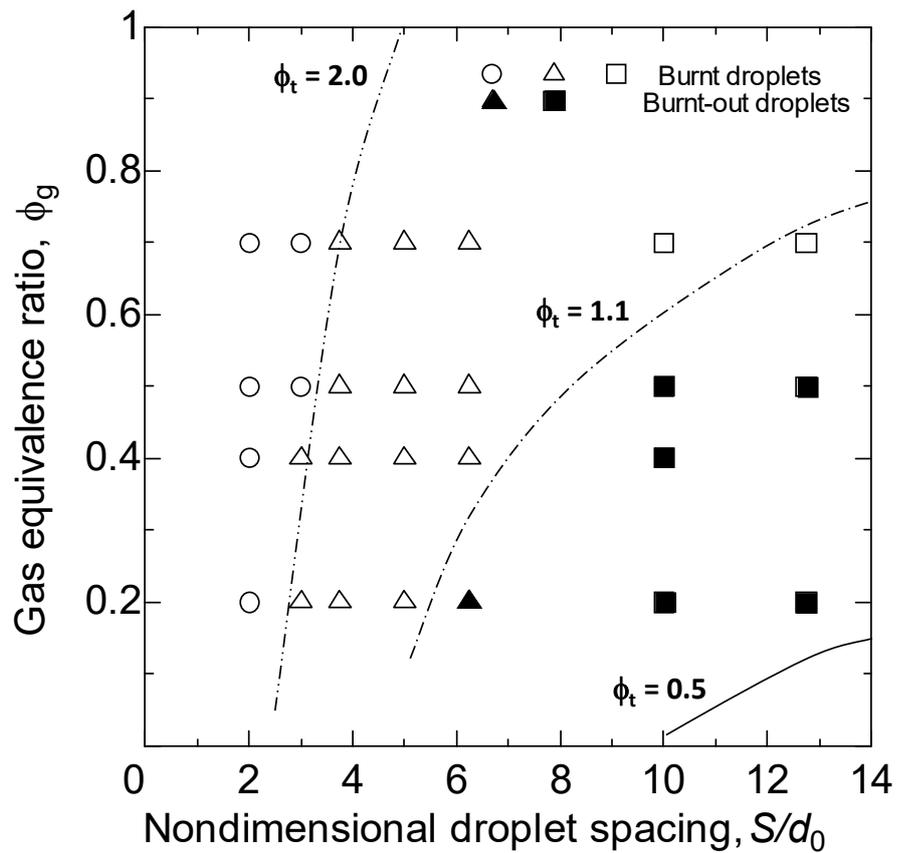


図 7-1 気体当量比と無次元液滴間隔の違いによる群燃焼形態の変化

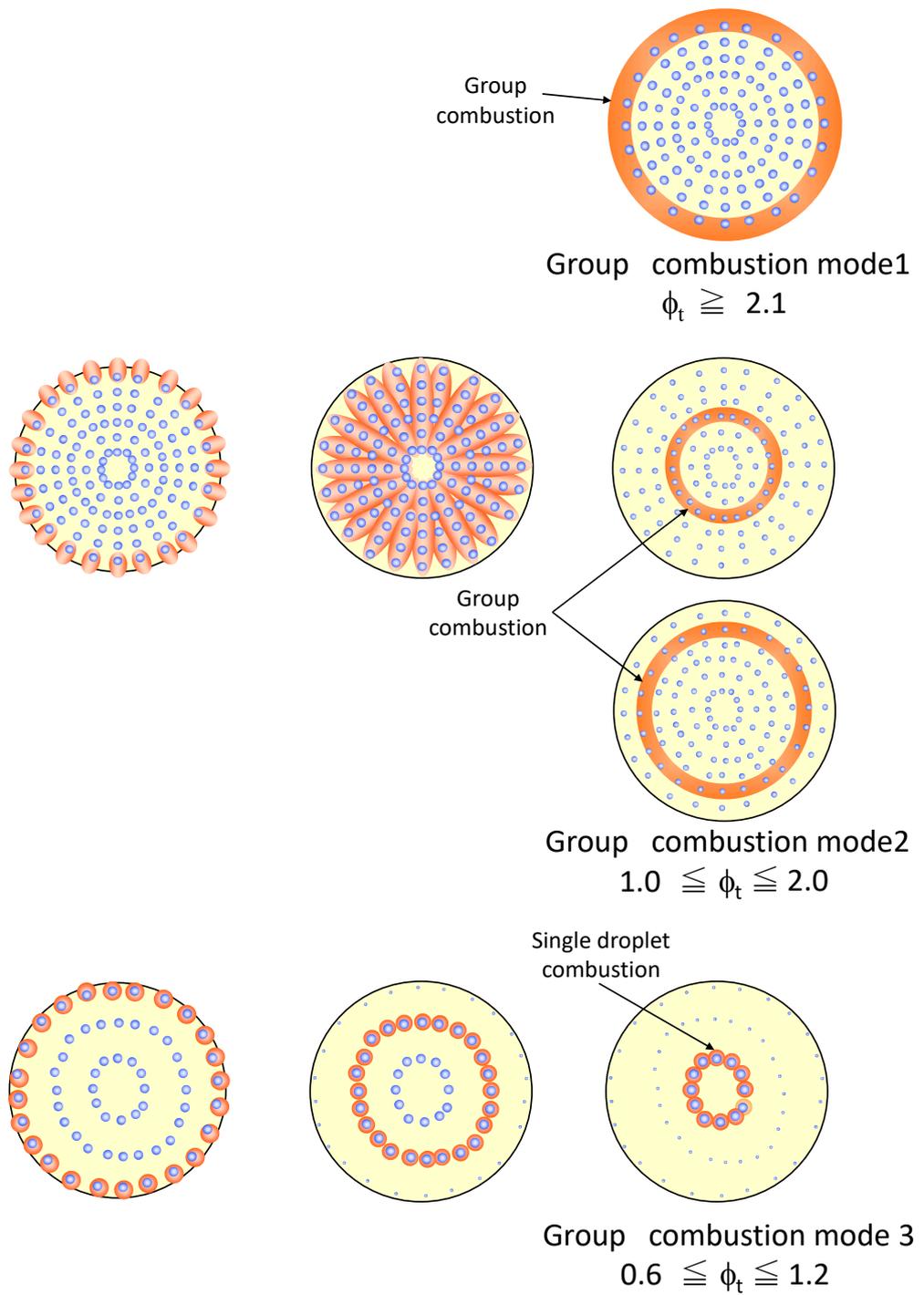


図 7-2 群燃焼モードの模式図

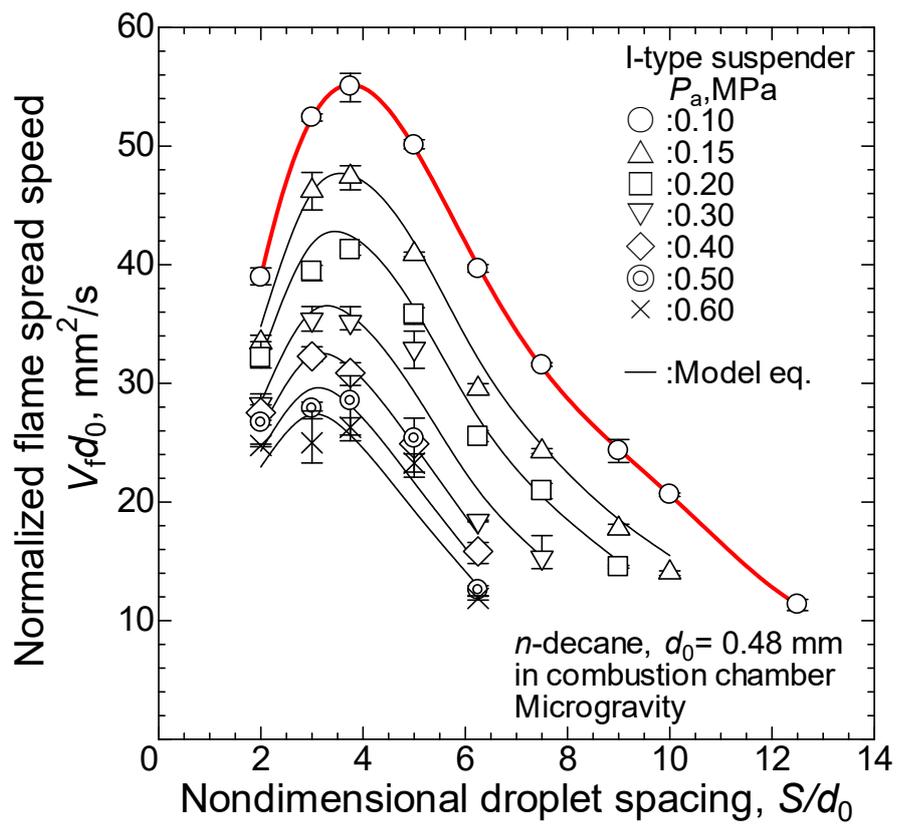


図 7-3 大気圧の実験結果に基づいたモデル式と実験結果の比較

(雰囲気圧力依存性)

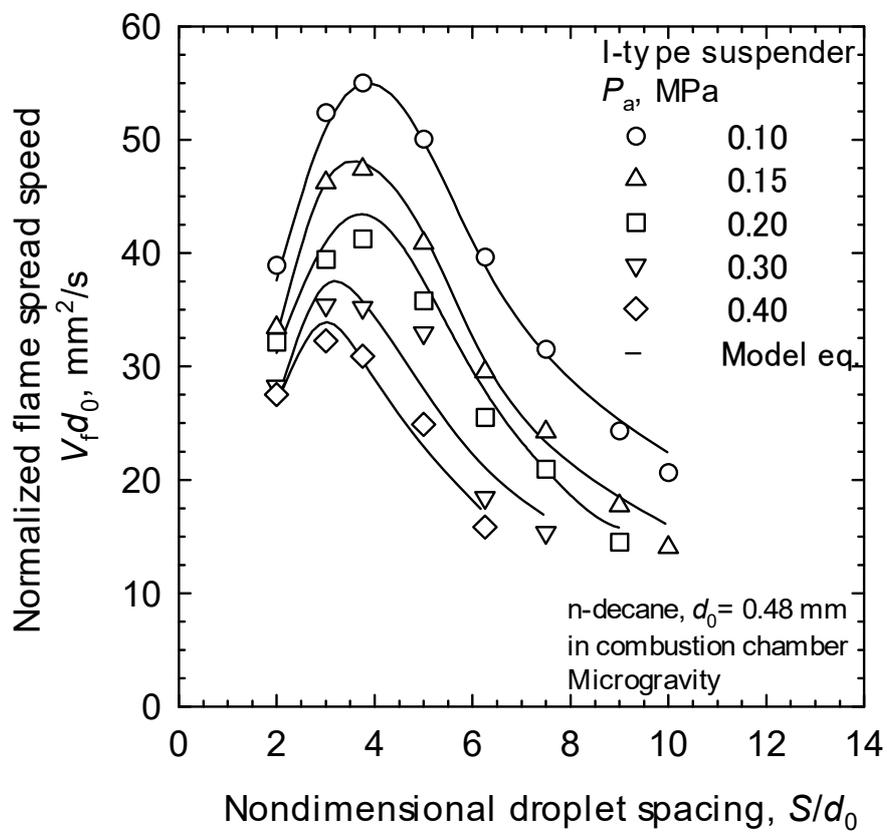


図 7-4 モデル式と実験結果の比較 (雰囲気圧力依存性)

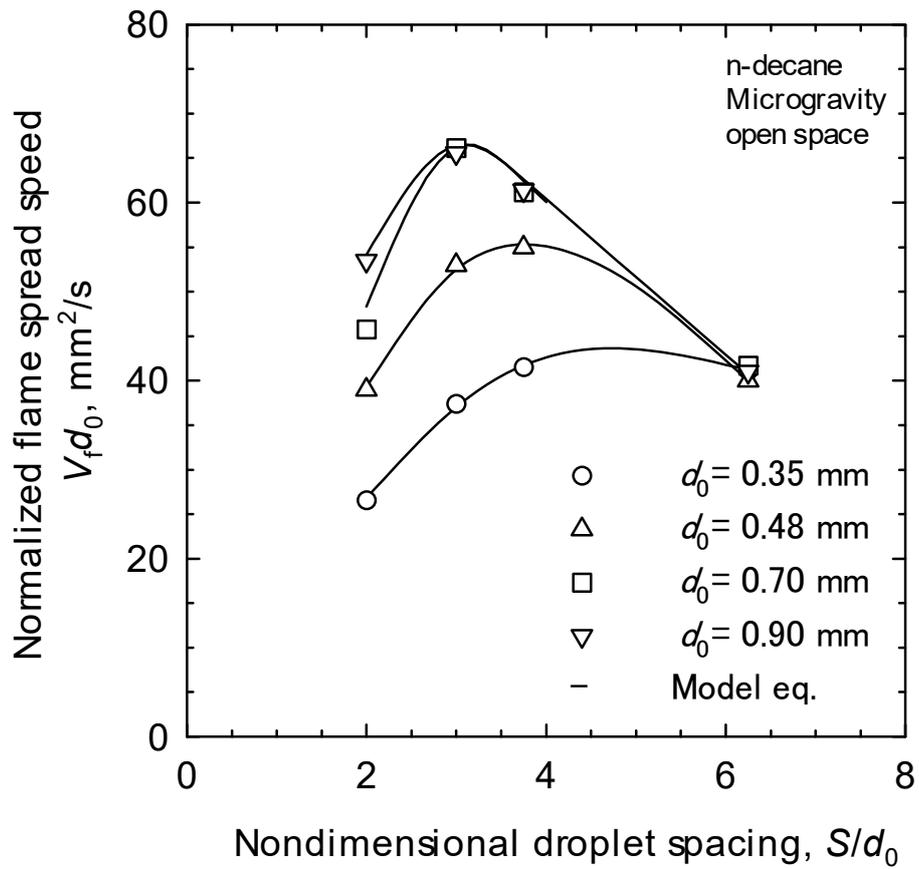


図 7-5 モデル式と実験結果の比較 (初期液滴直径依存性)

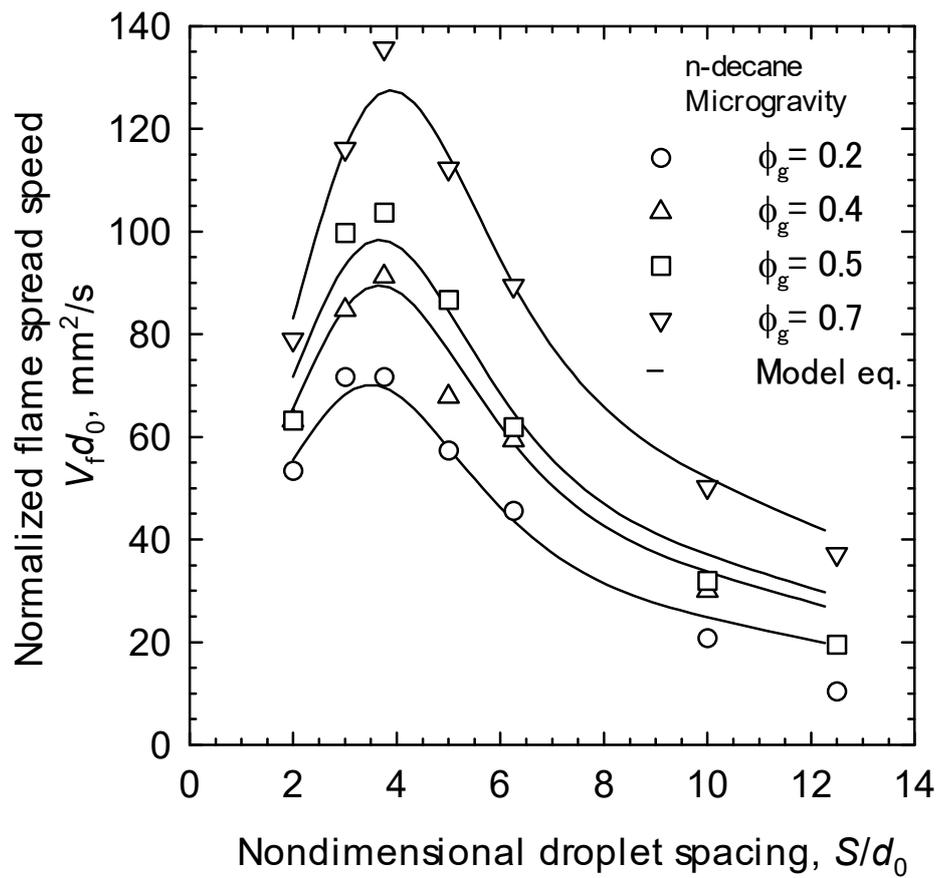


図 7-6 モデル式と実験結果の比較 (気体当量比依存性)

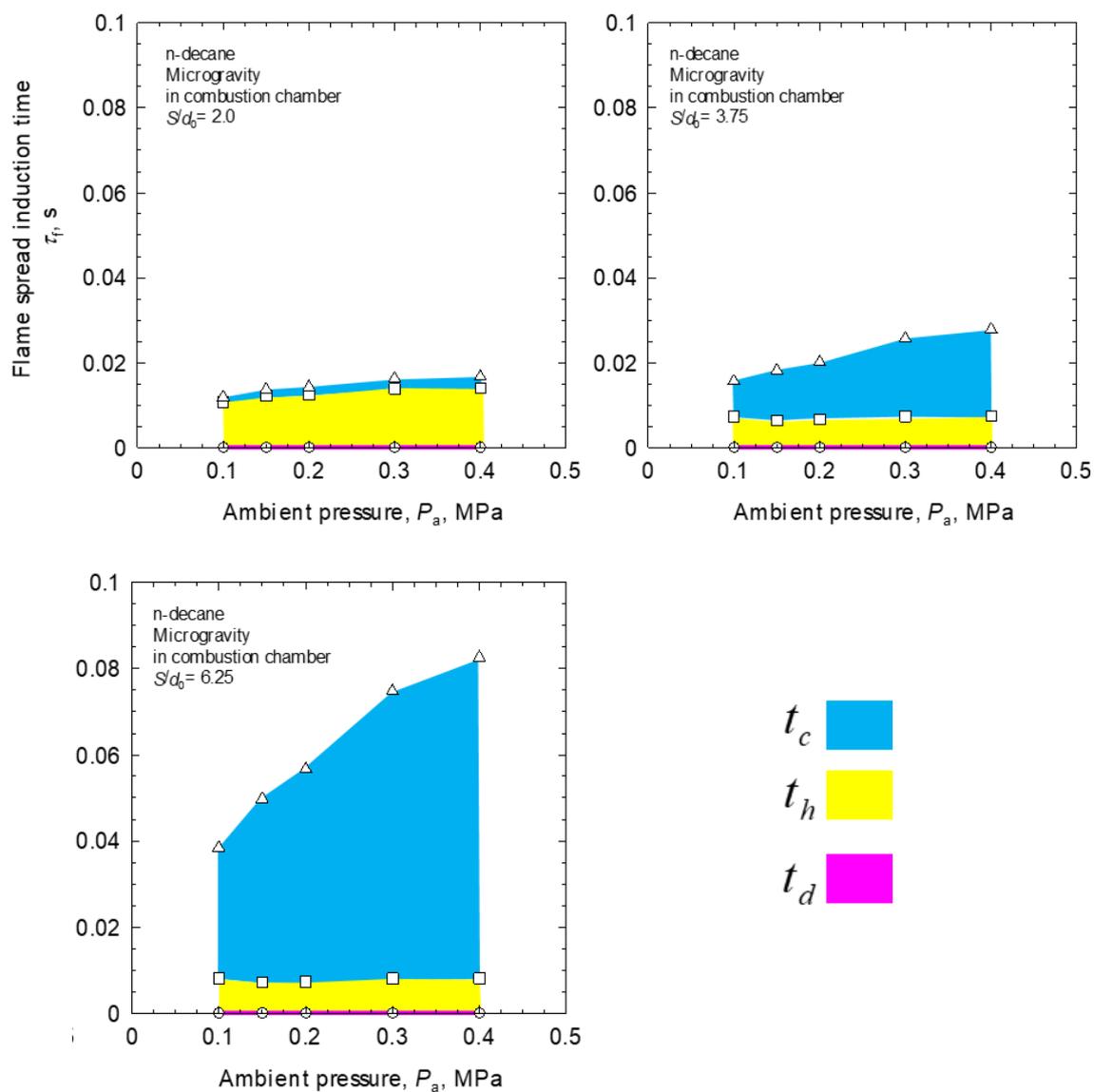


図 7-7 燃え広がり誘導時間に対する特性時間の支配割合

(雰囲気気圧力依存性)

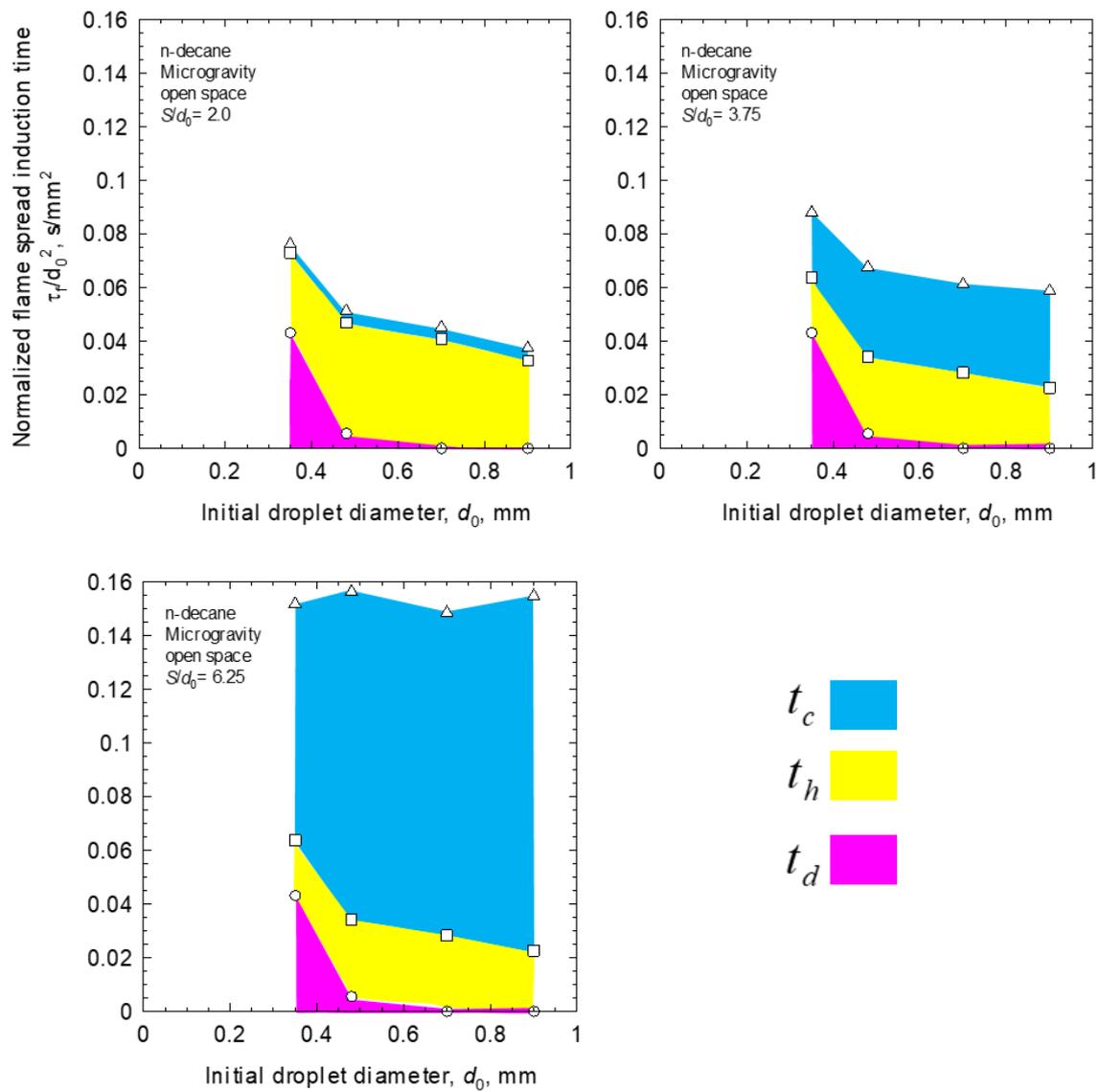


図 7-8 正規化燃え広がり誘導時間に対する特性時間の支配割合  
(初期液滴直径依存性)

## 第8章 結論

燃料噴霧をモデル化した燃料液滴列を用いて燃え広がり実験を行った。燃料蒸気濃度、雰囲気圧力、初期液滴直径、液滴間隔を変えて燃え広がり現象を観察することで以下の結論が得られた。

気体当量比の増大に伴って、すべての無次元液滴間隔で燃え広がり速度は増大する。これは、気体当量比の増大により液滴の周囲に可燃性混合気が形成されるまでの時間（初期加熱時間）が減少するためと考えられる。また、気体当量比の増大に伴い発熱領域が拡大したことが一つの要因であると推定される。自然対流が無視できる条件においては、大気圧の燃料蒸気 - 空気予混合気中に単純立方格子状に配置された正デカン液滴マトリックスの外縁の液滴が同時に点火した場合、気体当量比が火炎伝播限界以上の条件では気相火炎伝播が起こり、火炎はマトリックス中心まで進行するが、気体当量比が火炎伝播限界以下の条件では、液滴を伝っての火炎燃え広がりにはマトリックス内部に進行しないことが示唆された。実機では液滴分散の不均一性が燃え広がりには大きな役割を果たしていると推定される。

雰囲気圧力の増大に伴って、すべての無次元液滴間隔で燃え広がり速度は減少する。これは、圧力の増大により密度が増大し熱伝導が抑制されたことと、燃料の沸点が増大したことで可燃性混合気の形成までの時間が増大したことによると考えられる。無次元液滴間隔の増大に伴い燃え広がり速度の圧力依存度は増大した。燃え広がりを支配する特性時間の割合は無次元液滴間隔により異なる。無次元液滴間隔が広い場合は圧力依存性の高い高温域の熱伝導が支配的となるため、前述傾向が表れたと考えられる。圧力依存度は燃え広がりモードによって大きくグループ分けできる結果が得られた。これも燃え広がりモードにより燃え広がりを支配する特性時間の割合が大きく異なることが要因と考えられるが、燃え広がりモードで明確にグループ分けがなされるのは、より詳細に燃え広がり特性時間の検証が必要である。

初期液滴直径を変えて燃え広がり実験を行った結果、燃え広がり誘導時間が約 20 ms を下回る条件では、相似則が成立しなかった。粗大な液滴の場合は、火炎から得未燃液滴への熱の移動および液滴の初期加熱時間にのみ着目してきたが、液滴直径が小さくなり現象が高速になると化学反応の時間を無視できなくなると考えられる。初期液滴直径の増大に伴って初期火炎直径比は減少した。無次元液滴間隔が広い条件では、高温域の熱伝導や液滴の初期加熱が燃え広がり誘導時間に対して支配的であるため、火炎燃え広がりにおける初期液滴直径の相似則が成立するが、無次元液滴間隔が狭い条件では、燃え広がり誘導時間に占める相似則が当てはまらない燃料蒸気の拡散時間の割合が増えたことが、燃え広がりの相似則が成立しない要因の一つであると考えられる。

揮発性の異なる燃料を用いて液滴列燃焼実験を行った。液滴の存在が気相火炎伝播速度に及ぼす影響を調べ結果、燃料の揮発性や初期液滴直径により異なる傾向を示した。この実験結果のモデル計算を行い、部分予蒸発噴霧の燃焼と液滴列燃焼を結びつける知見を得た。燃焼容器内壁を熱・物資の繰り返し対称面とみなせるような実験を行った結果、液滴列燃焼実験の結果を群燃焼モデルに拡張して考察を行うことができた。また、等間隔に液滴が分散するような液滴群があった場合、外周に一度に点火させた場合は、内部に火炎が燃え広がらないという結果を得た。気体当量比、雰囲気圧力、初期液滴直径、液滴間隔を変えて実験を行った結果を踏まえて、実験モデル式の構築を行った。燃え広がり速度の圧力依存性に関して実験モデル式を構築し、大気圧の燃え広がり速度を用いて、加圧雰囲気の燃え広がり速度を表すことができた。さらに、火炎直径を式に取り入れることで、ベースとなる実験結果を必要としない実験モデル式を得た。現状のモデル式では、計算の際に燃え広がりに要する時間を支配する特性時間にフィッティング係数を掛ける必要があるものの、本実験条件の範囲では実験モデル式の結果と実験結果は良好な一致を示した。

現状のモデル式により適切な物性値を用いることでフィッティング係数を不要な実験モデル式を構築することが可能であると考えられる。ただし、実験条件によっては化学反応を考慮しなければならないことが判明しており、実機の液滴サイズの現象を簡単な実験モデル式で現象を表すためには、化学反応による影響を表すための特性時間の工夫や、ストークス数による整理など、より一層の現象の理解と適切なモデル式の構築が今後の課題である。

## 参考文献

1. 岡島 敏, 安部 和利, 山口 修次, 木本 哲郎, 無重力状態下での燃料液滴列火炎伝ばに関する実験的研究, 機論 B, Vol.47, No.422 (1981), Page.2058-2065.
2. 小西 克ゆき, 河野 通方, 飯沼 一男, 燃料液滴流の燃焼における干渉効果, 機論 B, Vol.50, No.453 (1984), Page.1382-1391.
3. 小西 克ゆき, 河野 通方, 飯沼 一男, 燃料液滴列の燃焼における干渉効果, 機論 B, Vol.51, No.467 (1985), Page.2218-2224.
4. 吉田 茂徳, 岡島敏, 原 人志, 無重力下での高圧雰囲気中における燃料液滴列の火炎伝ば, 機論 B, Vol.55, No.512 (1989), Page.1241-1247.
5. 三上 真人, 河野 通方, 加藤 秀輝, 佐藤 順一, 燃料液滴の干渉燃焼に及ぼす重力の影響, 機論 B, Vol.61, No.582 (1995), Page.731-737.
6. 大八木 大史, 森上 修, 三上 真人, 小嶋 直哉, 菊池 政雄, 微小重力場における燃料液滴列の燃え広がり及び燃料揮発性の影響, 機論 B, Vol.71, No.711 (2005), Page.2769-2775.
7. NAGATA H, KUDO I, ITO K, NAKAMURA S, TAKESHITA Y, Interactive Combustion of Two-dimensionally Arranged Quasi-droplet Clusters under Microgravity, Combustion and Flame, Vol.129 (2002), Page.392-400.
8. OKAI K, TSUE M, KONO M, SATO J, DIETRICH D L, WILLIAMS F A, An experimental study of microgravity combustion of a droplet near a wall, Combustion and Flame, Vol.133 No.1/2 (2003), Page.169-172.
9. MIKAMI Masato, OYAGI Hiroshi, KOJIMA Naoya, KIKUCHI Masao, WAKASHIMA Yuichiro, YODA Shinichi, Microgravity Experiments on Flame Spread along Fuel-Droplet Arrays using a New Droplet-Generation Technique, Combustion and Flame, Vol.141, No.3 (2005), Page.241-252.
10. NUNOME Y, KATO S, MURURA K, KOBAYASHI H, NIIOKA T, Flame Propagation of n-Decane Spray in Microgravity, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29 (2002), Page.2621-2626.
11. NOMURA H, TAKAHASHI M, UJIIE Y, HARA H, Observation of of Droplet Motion During Flame Spread on Three-Fuel-Droplet Array with a Pendulum Suspender, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.30 (2005), Page.1991-1999.
12. 三上 真人, 小嶋 直哉, 大八木 大史, 菊池 政雄, 若嶋 勇一郎, 依田 眞一, 微小重力場における高温条件での燃料液滴列の燃え広がり挙動, 日本燃焼学会誌, Vol.46, No.135 (2004), Page.42-49.
13. 若嶋 勇一郎, 菊池 政雄, 依田 眞一, 大八木 大史, 三上 真人, 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, 日本燃焼学会誌, Vol.47, No.139 (2005), Page.48-57.

14. 吉田 真樹, 磯村 潤, 瀬川 大資, 中谷 辰爾, 角田 敏一, 単分散懸垂液滴群モデルの微小重力燃焼実験, 日本マイクログラフィティ応用学会誌, Vol.22, No.1 (2005), Page.35-41.
15. 小林完, JU Y, 新岡嵩, 予混合火炎を通過する単一燃料液滴の着火数値解析, 日本機械学会論文集B編, Vol.64, No.623 (1998), Page.2148-2154.
16. 角田 敏一, 瀬川 大資, 小浜 良太, 津江 光洋, 層流伝ば火炎による燃料液滴列の着火, 日本機械学会論文集B編, Vol.65, No.631 (1999), Page.1115-1121.
17. 空賢, 吉田 直弘, 桐山 英哉, 河合 英直, 千田 二郎, 藤本 元, 予混合気を伴う液滴・液滴列燃焼に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集B編, Vol.68, No.676 (2002), Page.3467-3472.
18. 鈴木 豊彦, 藤本 義雄, 落合 義孝, 上山 幸司, 液滴列燃焼の干渉効果 理論的研究, 日本機械学会論文集B編, Vol.54, No.505 (1988), Page.2592-2597.
19. 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, Vol.68, No.672 (2002), Page.2422-2428.
20. 梅村 章, 微小重力下での直線液滴列に沿った火炎伝ば (第2報, 火炎伝ば速度特性), 日本機械学会論文集B編, Vol.68, No.672 (2002), Page.2429-2436.
21. 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3報, 火炎伝ばのモデル計算), 日本機械学会論文集B編, Vol.68, No.673 (2002), Page.2636-2642.
22. 菊池 政雄, 山本 信, 依田 眞一, 液滴間火炎伝播メカニズム研究, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, No.04-052 Page.31P (2005.03.31).
23. 浜崎 豊宏, 野村 浩司, 氏家 康成, 佐藤 順一, 予混合気中に分散させた燃料液滴の燃焼促進効果, 日本機械学会論文集B編, Vol.70, No.697 (2004), Page.2441-2448.
24. 三上 真人, 森上 修, 小嶋 直哉, 山本 和浩, 中本 圭太, 正デカンを用いた部分予混合噴霧流の燃焼特性, 日本機械学会論文集B編, Vol.71, No.701 (2005), Page.344-350.
25. 早崎 将司, 野村 浩司, 氏家 康成, 部分予蒸発層流噴霧バーナを用いた燃焼実験, 微粒化, Vol.14, No.48 (2005), Page.75-81.
26. Brzustowski, A. T., Sobiesiak, A. and Wojcicki, S., Flame propagation along an array of liquid fuel droplets at zero gravity, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.18 (1981), pp. 265-273.
27. Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Kikuchi, M., Wakashima, Y. and Yoda, S., Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays at high temperatures, Combustion and flame, Vol.146 (2006), pp.391-406.

28. Kobayashi, H., Park, J., Iwahashi, T. and Niioka, T., Microgravity experiments on flame spread of an n-decane droplet array in a high-pressure environment, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29 (2003), pp.2603-2610.
29. 安居院 克巳, 小型落下塔を用いた自由燃料液滴の蒸発実験, 日本大学大学院生産工学研究科 1998 年度修士論文
30. 菅沼 祐介, 野村 浩司, 氏家 康成, 菊池 政雄, 依田 真一, 三上 真人, 燃料液滴列の燃焼火炎燃え広がり及び気相燃料蒸気濃度の影響と気相火炎伝播に及ぼす燃料液滴列の影響, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.7, No.737 (2008), pp.212-220.
31. 菅沼祐介, 微小・通常重力場における燃料蒸気 - 空気予混合気中の燃料液滴列燃焼, 日本大学大学院生産工学研究科 2006 年度修士論文
32. Robert C Reid, *The Properties of Gas & Liquids*, 4th., (1988), McGraw-Hill.
33. Nomura, H., Ujiie, Y., Rath, J., H., Sato, J. and Kono, M., Experimental study on high-pressure droplet evaporation using microgravity condition, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.26 (1996), pp.1267-1273.
34. Nomura, H., Takahashi, H., Sukanuma, Y. and Kikuchi, M., Droplet ignition behavior in the vicinity of the leading edge of a flame spreading along a fuel droplet array in fuel-vapor/air mixture, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34 (2013), pp.1593-1600.
35. 岩崎 拓史, 燃料蒸気 - 空気予混合気中の燃料液滴列燃え広がり火炎に関する通常・微小重力実験, 日本大学大学院生産工学研究科 2008 年度修士論文
36. 高橋 弘, 微小重力環境を利用した燃料液滴列火炎燃え広がりにおける液滴と火炎の熱的干渉に関する研究, 日本大学大学院生産工学研究科 2010 年度修士論文
37. 大窪 弾, 微小重力環境での燃料蒸気/空気予混合気中燃料液滴列火炎燃え広がりに関する研究, 日本大学大学院生産工学研究科 2012 年度修士論文
38. 菅沼 祐介, 橘田 聖, 野村 浩司, 氏家 康成, 微小重力環境における燃料液滴列火炎燃え広がり速度に及ぼす雰囲気圧力の影響, *日本機械学会論文集*, Vol.83, No.855 (2017)
39. 池山 典孝, 燃料液滴列の火炎燃え広がり及び雰囲気圧力と当量比の影響, 日本大学大学院生産工学研究科 2014 年度修士論文
40. 橘田 聖, 燃料液滴列の火炎燃え広がり及び雰囲気圧力と液滴間隔の影響, 日本大学大学院生産工学研究科 2016 年度修士論文
41. Sato, J., Tsue, M., Niwa, M., and Kono, M., Effects of natural convection on high-pressure droplet combustion, *Combustion and flame*, Vol.82 (1990), pp. 142-150.
42. Yusuke Sukanuma, Noriyuki Ikeyama, Hiroshi Nomura, Yasushige Ujiie, Droplet Array Combustion Experiments on Effect of Initial Droplet Diameter on Flame Spread

Characteristic Time, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.60, No.3 (2017), pp. 127-131.

43. 野村 浩司, 氏家 康成, 微小重力場における高温高圧力雰囲気中の単一燃料液滴の蒸発挙動, 日本機械学会論文集B編, Vol.61, No.591 (1995), Page.4137-4143.
44. CHIU H H, KIM H Y, CROKE E J, Internal Group Combustion of Liquid Droplets, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.19 (1982), Page.971-980.
45. Poling, E. B., Prausnitz, M. J. and O'connell, P. J., The properties of gas and liquids (fifth edition) (2000), p. 7.5.

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり，多くの皆様に多大なる御支援，御指導を賜りました．主査である日本大学教授 野村 浩司 先生には，本研究を遂行にするにあたり，現象の理解，考察の切り口をはじめとして，研究者としての基本的な思考や心構えなど全般にわたり，御指導，御助言を賜りました．本論文は，その御指導，御助言の賜物であり，ここに甚謝の意を表します．

本論文をまとめるにあたり，副査である日本大学教授 松島 均 先生，日本大学教授 山崎 博司 先生にも数々の御指導，御助言を賜りました．御多忙の中，貴重な時間を割いて割いて頂き，深く感謝いたします．

研究活動において御指導，御助言を賜り，また燃焼工学の道へ導いていただいた日本大学教授 氏家 康成 先生に深く感謝いたします．

本論文のデータ取得にご協力いただいた，岩崎拓史様，高橋弘様，大窪弾様，池山典孝様，橘田聖様をはじめとして，尽力していただいた野村研究室の皆様に深く感謝致します．

実験装置の開発においては，機械工学科の工場の先生方に大変お世話になりました．深く感謝致します．

本論文は，この他にも多くの皆様に御支援，御指導を賜ってまとめたものであります．最後に，常に支えてくれた妻に感謝の意を表し，謝辞とさせていただきます．