

微小重力環境を利用したスラリー燃料液滴および
液滴混在予混合気の燃焼に関する基礎的研究

谷重 亮介

学位請求論文

微小重力環境を利用したスラリー燃料液滴および
液滴混在予混合気の燃焼に関する基礎的研究

1998年3月

谷重 亮介

目次

第1章 緒論	1
1.1 緒言	1
1.1.1 微小重力燃焼実験の動機と背景	1
1.1.2 微小重力実験を行う手段	2
1.2 従来の研究	3
1.2.1 液滴の蒸発・燃焼	3
1.2.2 液滴列の燃焼	8
1.2.3 液滴群・粒子群の燃焼および噴霧火炎	10
1.2.4 噴霧粒径の測定技術	14
1.2.5 高粘度スラリーや固体粒子混入燃料の燃焼	16
1.3 本研究の目的	19
1.4 本論文の構成	20
第2章 落下実験施設および実験運用の概略	21
2.1 緒言	21
2.2 落下実験システムの概況	21
2.3 JAMIC 落下施設	23
2.3.1 概要	23
2.3.2 実験装置の搭載方式	24
2.3.3 実験装置とのインターフェース	25
2.3.4 実験運用	26
2.4 MGLAB 落下施設	30
2.4.1 概要	30
2.4.2 実験装置の搭載方式	30
2.4.3 実験装置とのインターフェース	30
2.4.4 実験運用	35
2.5 結言	37

第3章 微小重力下におけるパルスレーザーホログラフィー法を用いた 噴霧粒径測定	38
3.1 緒言	38
3.2 ホログラフィーの計測原理概要	38
3.3 実験装置および方法	40
3.3.1 ホログラム撮影系	40
3.3.2 ホログラム再生系	46
3.3.3 画像解析および粒径測定	47
3.4 実験結果および考察	48
3.4.1 ノズル, 噴射圧, 噴射期間による噴霧への影響	53
3.4.2 3Dレンダリングによる噴霧イメージの作成	54
3.5 結言	56
第4章 COM燃料液滴の着火と燃焼	57
4.1 緒言	57
4.2 実験装置および方法	58
4.3 実験条件	59
4.4 実験結果および考察	62
4.4.1 通常重力下の燃焼挙動	62
4.4.2 微小重力下の燃焼挙動	64
4.5 結言	70
第5章 マグネシウムおよび純カーボン粒子混入燃料液滴の着火と燃焼	71
5.1 緒言	71
5.2 実験装置および実験方法	71
5.3 実験結果および考察	72
5.3.1 通常重力下の燃焼挙動	72
5.3.2 微小重力下の燃焼挙動	75
5.4 結言	89

第6章 液滴が混在する予混合気の点火および火炎伝播特性	90
6.1 緒言	90
6.2 実験装置および方法	90
6.2.1 実験装置	90
6.2.2 予備実験	97
6.2.3 灯油当量比測定	98
6.2.4 総合当量比およびガス混合割合の条件設定方法	99
6.2.5 LDSAを用いた噴霧粒径測定	100
6.3 実験結果および考察	101
6.3.1 点火および火炎伝播特性の観察	101
6.3.2 LDSAによる粒径測定結果および他の研究における 火炎伝播測定結果との比較	106
6.4 結言	118
第7章 結論	119
主な記号	124
参考文献	125
謝辞	130

第1章 緒論

1.1 緒言

1.1.1 微小重力燃焼実験の動機と背景

ディーゼル・ガスタービン・ボイラなどにおける燃焼器においては、液体燃料を噴霧微粒化させ、燃焼器内の酸化雰囲気と高速に、また広い面積をもって接触させることにより、高い効率の燃焼反応を行わせて、所要の機関出力を得ている。こうしたいわゆる噴霧燃焼方式をとる内燃機関については、それらの考案以来現在まで、その高効率性、汎用性、また化石燃料等のエネルギー資源との適合性により、自動車、航空機などの輸送機関、また定置型発電施設など広範な利用形態をもって使用されてきている。

これらの内燃機関については、過去数十年来、公害問題、石油危機など、その時代における状況によって、さまざまな視点から高い関心と注目が集められてきた。そして最近の10数年間は、地球温暖化防止や酸性雨問題対策など、いわゆるグローバルな環境問題に対応する観点から、CO₂、NO_x、Particulateなど燃焼排出物が環境に与える有害な影響を低減する方策の必要性が、世界的に高まっている。

実機考案の時代より、燃焼器内の圧力または温度といった間接的なファクターをたよりとした研究は、機関効率の向上などを目的として盛んに行われてきた。しかしこれによっては、燃焼器内部の現象、とりわけ液体燃料の噴霧燃焼そのものについて、直接的に把握しづらと考えられ、現象を解明する手法の模索が行われ始めた。中でも1930年代以降の棚沢らによる噴霧微粒化に関する研究⁽¹⁾は、ディーゼル機関におけるそうした研究の端緒を、世界で初めて切り開いたものである。以降、噴霧燃焼過程を、液体燃料の噴射による微粒化、液滴群の蒸発による雰囲気ガスとの混合気生成、渦の生成などの乱流混合、着火、火炎伝播および燃え拡がり、燃焼ガス生成などのプロセスに還元し、諸プロセスについての実験的計測と数値的解析を組み合わせることが、現在に至るまで噴霧燃焼研究の主要な方法論となっている。噴霧燃焼過程における熱・物質および運動量移動の各プロセスは、非常に高速かつ複雑であり、個々の現象の詳細な解明は、近年のレーザの利用などによる光学的計測法や、コンピュータによる高速データ処理法などの発達によって、著しい進展をみている。そして、それらのプロセスにおける現象を還元的に単純化する手段として、1990年代以降とみに有力視されているのが、微小重力環境を利用した実験的燃焼現象研究である。

燃焼現象は、反応に伴う熱発生や生成ガスの熱膨張などを伴った移動過程の複合であり、現象自体またその解析においてさまざまな因子が影響する。中でも重力に伴う自然対流は、密度差や場の流れの影響を大きく受けるこれらの過程に本質的にはたらくものである。自然対流が燃焼過程に与える影響を取り除き、重力場における燃焼過程と比較し、照らし合わせることは、とくに高速かつ複雑な諸移動過程の複合たる、噴霧燃焼過程における基礎現象についての本質的な知見を導き出すために、有力な手段となり得る。そして、近年の長大な落下施設の完成など、実験リソースの充実に伴い、微小重力環境での種々の実験手法を用いた基礎的燃焼実験が、国内的にも世界的にも、ここ10年来急速に盛んになってきた。

本章では、噴霧液滴および液滴群の燃焼を取り扱った、従来の噴霧燃焼に関する基礎的研究をいくつか取り上げ、それらの研究が行われてきた背景および内容、また微小重力実験にそれらが適用された例について述べる。

1.1.2 微小重力実験を行う手段

微小重力環境を得る手段としては、図1.1⁽²⁾に示すようないくつかの方法がある。

実験時間（微小重力時間）が数sから10sの範囲であれば、自由落下による落下実験で実験が可能である。落下実験により得られる微小重力レベルは、落下システムにもよるがおおむね 10^{-4} - 10^{-5} g程度と良好なものである。実験時間が10sを超えると、航空機やロケットによる放物形飛翔時間を利用した実験となり、航空機の場合 10^{-2} gレベルで20s程度、ロケットの場合は 10^{-4} - 10^{-5} gレベルで6min程度である。このオーダーより長時間になると、シャトル実験など宇宙実験の必要が生じる。比較的短時間で実験可能な燃焼・流体など熱流体基礎実験については、落下実験による実験が多く行われており、国内の大学等の研究機関にある10m以内の落下施設については、こうした実験を主目的とするものが多い。また、近年は航空機およびTR-1Aロケットにより、凝集法生成燃料液滴群の火炎伝播実験が行われ始めており⁽³⁾、シャトル実験においても、液滴などの燃焼実験が、ここ1-2年の数回のフライトで行われ始めている⁽⁴⁾。

微小重力時間が数s以上の落下施設については、数十～数百m規模の施設となるため、建設・運営等の形態は、専門機関などによることが多い。日本で1991年に運用開始された北海道・地下無重力実験センター落下施設は、炭坑跡を利用して建設され、世界で最長の490mの自由落下距離を有している。図1.2に落下施設の概要⁽⁵⁾を示す。また1995年に運用開始された岐阜・日

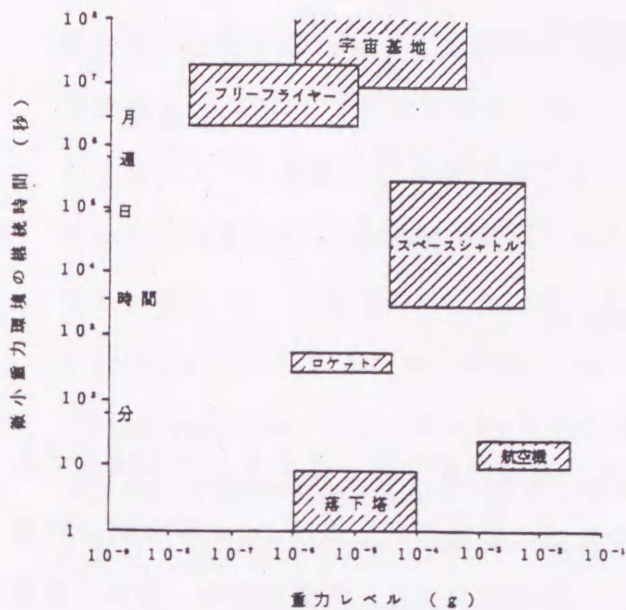


図 1.1 微小重力環境を得る手段の重力レベルと継続時間⁽²⁾

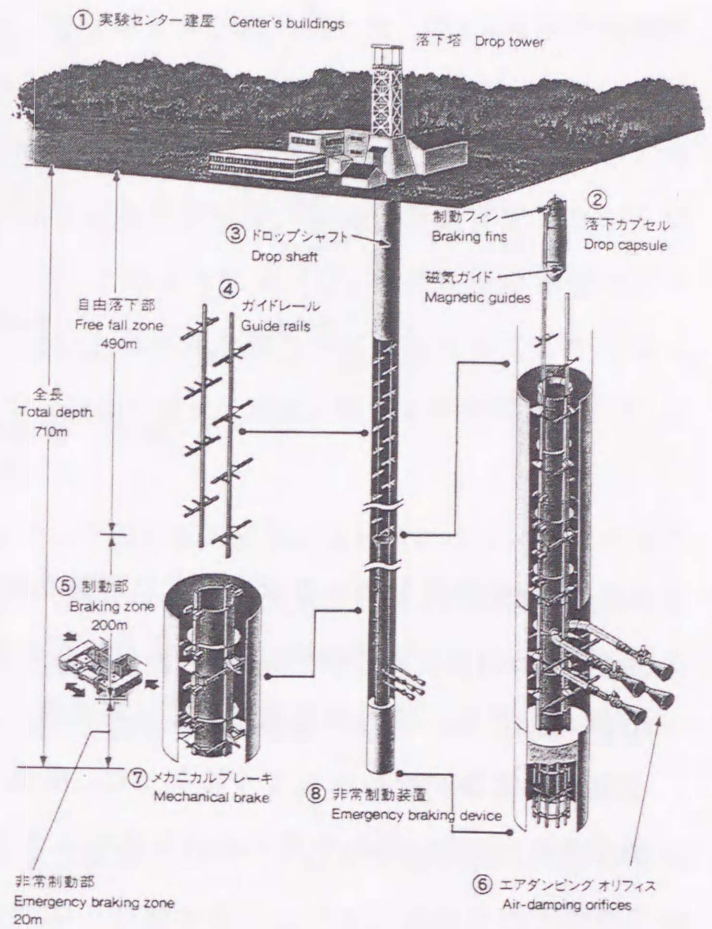


図 1.2 地下無重力実験センター落下施設概要⁽⁵⁾

本無重量総合研究所落下施設も100mの自由落下距離を有している。両施設とも得られる微小重力レベルは 10^{-4} - 10^{-5} g程度である。また制動にはエアダンパーやベロースダンパーなどを用いて、制動時衝撃は10g以内であり、高度な実験装置の反復的使用が十分に可能となっている。

1.2 従来の研究

1.2.1 液滴の蒸発・燃焼

1940年代以降、噴霧の燃焼機構を現象的に把握するための方法が検討され、あらためて単一液滴の蒸発・燃焼過程の観察から、その熱移動および物質移動を単位的に取り扱い、噴霧燃焼を現象的に還元することを目的とした研究がなされ始めた。

その具体的な方法とは、故意に大粒径の燃料液滴を作って燃焼させ、粒径の変化、蒸気層・反応層の構成、および燃焼温度などを詳細に調べ、同時に従来の熱移動に蒸発・凝結

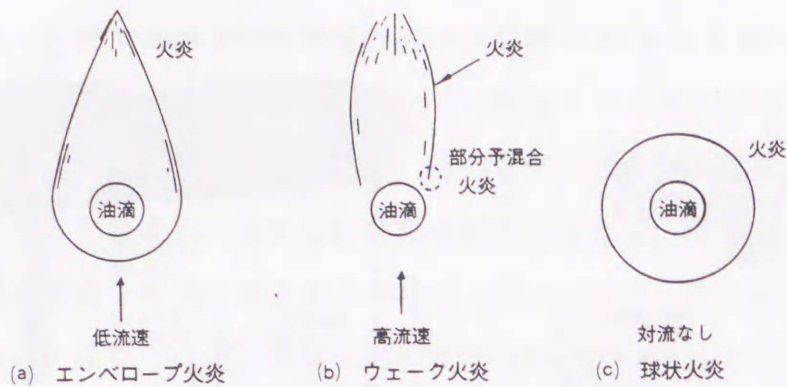


図 1.3 液滴の燃焼⁽¹⁰⁾

などの物質移動を伴う要素を加えた理論を築いて、実験結果を裏付けようとする試みである⁽⁶⁾。Godsave⁽⁷⁾、Spalding⁽⁸⁾により、石英糸の先端に懸垂された直径1mmの液滴の燃焼実験が行われ、 d^2 則が見出され、以降非常に多くの研究者により、液滴の蒸発、着火、燃焼に関する実験が行われるようになった。高温・高圧雰囲気での液滴燃焼については、角田・廣安⁽⁹⁾らが、着火遅れや見かけの活性化エネルギーなどについて系統的な実験的研究を行っている。

こうした実験において、具体的な液滴生成法として最も多く用いられているのが、燃料液滴を、先端を球状に加工した石英ガラス糸の先端に懸垂する方法である。この他にも、液体燃料を供給可能な管の先端に多孔質 (porous) 球を取り付け、その孔部から燃料液滴をしみ出して液滴を生成するなどの方法があるが、いずれにしても、懸垂法により生成できる液滴径の下限界は0.5mm-1mm程度であり、実機に使用するアトマイザの噴霧粒径よりはかなり大きくなる。また、通常重力下の実験においては、燃料蒸気の形成、着火後の火炎・燃焼ガスの生成などの過程において、浮力および自然対流の影響を受け、すなわち図1.3⁽¹⁰⁾のエンベロープ火炎に示すように、着火後の火炎は上方に伸びた形となり、燃焼ガス・すすなどは液滴の上方に移動する。このため球状燃焼を仮定する理論的解析とは乖離する部分があり、真に理論が現象を記述し得ているかについて議論の余地が残ることとなった。実際の燃焼器内の噴霧粒径が数十～数百 μm を外れることは少なく、流れの乱れを考慮しない一次元の燃焼器を仮定した場合、このような大きさの液滴が周囲気流とのスリップ速度を持たずに飛行すると、液滴は球状の蒸発・燃焼過程を持つという理想化が自然であるとの直観が支配的であり続けたことも、その一因と考えられる。

このような状況のもとで、Kumagaiら⁽¹¹⁾により、高さ5 mの落下塔において、燃料の懸垂液滴および点火装置を備えた燃焼室に、観察用カメラを同梱した、図1.4に示す実験装置を自由落下させ、約1 s間の自由落下中の微小重力状態において液滴に点火を行い、燃焼寿命・燃焼速度定数などを測定する実験が行われ始めた。このことは、気流中において周囲気流とのスリップ速度が零の状態での燃焼中の飛行液滴を、液滴と等速移動しながら撮影することを、模倣的に実現することともいえ、このようにすれば、自然対流の影響を取り除いた燃料液滴の球状燃焼が実現するため、理論との相関を現象的に検証することが可能となる。表1.1に、従来行われてきた微小重力下の液滴の着火・燃焼に関する研究について示し、また以下にそれらの主だった研究について述べる。

Faeth and Olson⁽¹²⁾は、約4.9mの落下塔を用いた微小重力実験において、イソオクタンなどの炭化水素燃料の懸垂液滴に、電気炉をかぶせるという方法で、液滴径および雰囲気温度を変化させて着火遅れを測定している。直径1mm前後の液滴で、常圧下では着火遅れは通常重力下よりも微小重力下の方が若干短い結果を得ており、自然対流の影響については、あまり大きくないものと評価している。

武井ら⁽¹³⁾は、5mの落下塔を用いた微小重力実験において、二成分混合燃料液滴の着火時間の粒径依存性を詳細に調べ、通常重力下との比較を行っている。実験は懸垂液滴に加熱した電気炉をかぶせ、着火させる方法で行われ、直径1mm前後の液滴では、通常重力下と微小重力下の中に着火時間の有意な差は認められなかったとしている。微小重力下においては、液滴周囲の燃料蒸気と酸化剤の混合気形成過程は拡散のみに支配され、自然対流による散逸が抑えられることが着火に有利な要因となるが、いっぽう通常重力下においては、液滴周囲での流れによる酸化剤との混合促進の効果があり、これが微小重力下と同程度に着火に有利となるため、着火時間が異ならなくなっているものと考察している。

Tanabeら⁽¹⁴⁾は、通常重力下および微小重力下において、ヘプタンなどの懸垂液滴を瞬時に高温雰囲気にし、着火前の液滴周囲の気相の温度変化履歴を、He-Neレーザを使用したマイケルソン干渉計により測定している。着火に至るまでの過程で、図1.5に示すような、発光なしに温度上昇が生じる冷炎の発生と、熱炎の発生の二つの段階があることを示している。そして各段階につき、それぞれ物理過程支配および化学過程支配との特性化を行っている。

Satoら⁽¹⁵⁾は、通常重力下と微小重力下の懸垂燃料液滴の火花点火による蒸発・燃焼挙動を、高圧下で調査した。図1.6のように圧力を常圧から燃料の臨界圧の4倍まで変化させて測定を行い、燃焼寿命時間は通常重力下でも微小重力下でも臨界圧で最小となり、燃焼速

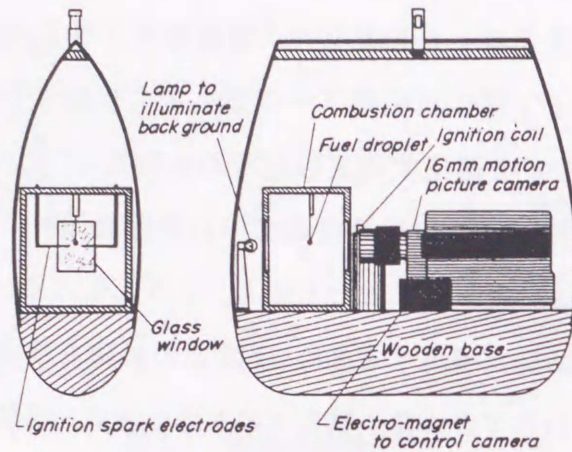


図 1.4 Isoda らの落下実験装置⁽¹¹⁾

表 1.1 微小重力環境下の液滴燃焼実験例

研究者	落下距離, 微小重力時間	使用燃料	液滴生成, 点火方式 および初期液滴径	操作雰囲気温度 および圧力	主な測定パラメータ
熊谷ら ⁽¹¹⁾	5m, 1s	n-ヘプタン	懸垂液滴, 火花点火, 1mm前後	常温・常圧	燃焼中液滴径変化, 火炎径変化
Kumagaiら ⁽¹⁹⁾	5m, 1s	n-ヘプタン	自由液滴, 火花点火, 1mm前後	常温・常圧	燃焼中液滴径変化, 火炎径変化
Williamsら ⁽²⁰⁾	4.9m, 1s	n-ヘプタン	懸垂液滴, 火花点火, 500 μ m前後	常温・常圧~ 0.2MPa	燃焼中液滴径変化
Avedisianら ⁽²¹⁾	24m, 2.2s (NASA, LeRC)	n-ヘプタン トルエン	自由液滴, 火花点火, <500 μ m	常温・常圧	燃焼中液滴径変化
Yangら ^{(22),(23)}	24m, 2.2s (NASA, LeRC)	炭化水素混合 ⁽²²⁾ およびアルコール 混合 ⁽²³⁾ 燃料	自由液滴, 火花点火, <500 μ m	常温・常圧	燃焼中液滴径変化
Faethら ⁽¹²⁾	4.9m, 1s	イソオクタン ベンゼン	懸垂液滴, 高温雰 囲気に曝露, 1.3- 1.4mm	高温・常圧~ 0.3MPa	初期液滴径, 着火遅れ, 通常重力下との比較
武井ら ⁽¹³⁾	5m, 1s	炭化水素混合燃 料	懸垂液滴, 高温雰 囲気に曝露, 0.6- 1.4mm	高温・常圧	初期液滴径, 着火遅れ, 通常重力下との比較
Tanabeら ⁽¹⁴⁾	114m, 4.7s (Bremen大, ZARM)	n-ヘプタン n-ドデカン	懸垂液滴, 高温雰 囲気に曝露, 0.7mm	高温・常圧~ 2.0MPa	初期液滴径, 冷炎およ び熱炎発生遅れ, 通常 重力下との比較
Satoら ⁽¹⁵⁾	114m, 4.7s (Bremen大, ZARM)	n-オクタン	懸垂液滴, ニクロ ム線加熱, 0.6- 1.0mm	高温・高圧	燃焼中液滴径変化およ びその圧力依存性
津江ら ⁽²⁴⁾	5m, 1s	乳化燃料	懸垂液滴, ニクロ ム線加熱, 1.0mm	高温・常圧	マイクロ爆発発生確率

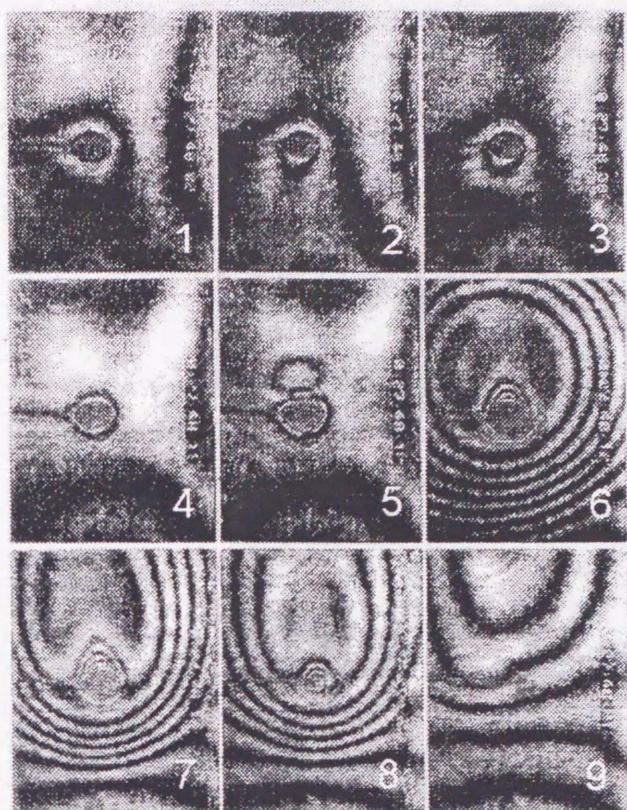


図 1.5 冷炎および熱炎の発生挙動⁽¹⁴⁾

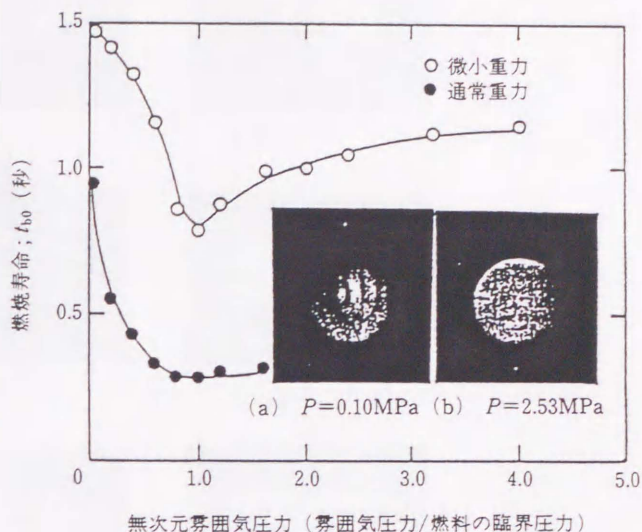


図 1.6 燃焼速度定数の圧力依存性⁽¹⁵⁾

度定数 K が圧力増大に伴い亜臨界圧では増大し、超臨界圧では減少することを示した。そして微小重力下で臨界圧におけるその変化が通常重力下に比べて鋭くあらわれることを示した。これらの結果と過去の研究のデータと比較して、液滴燃焼に対する自然対流および雰囲気圧力の影響を、 K/K_0 (K_0 ; 微小重力下の燃焼速度定数) とグラスホフ数 Gr および燃料の臨界圧で正規化した無次元雰囲気圧力 P によって次のように表わしている；

$$\frac{K}{K_0 - 1} \sim Gr^{0.25} \quad (1-1)$$

$$\frac{K}{K_0 - 1} \sim P^{0.5} \quad (1-2)$$

こうした臨界圧における燃料液滴の燃焼挙動の特徴的な変化については、通常重力下の研究において、Kadota and Hiroyasu⁽¹⁶⁾、Faeth ら⁽¹⁷⁾ によって以前より指摘されていたが、微小重力実験でこの挙動がより明確になることを見出している。

Shaw ら⁽¹⁸⁾ は微小重力下の常温・常圧での自由液滴燃焼実験において、球状火炎の燃焼進行に伴うすす粒子殻の生成について調査している。液滴燃焼については（液滴径の 2 乗

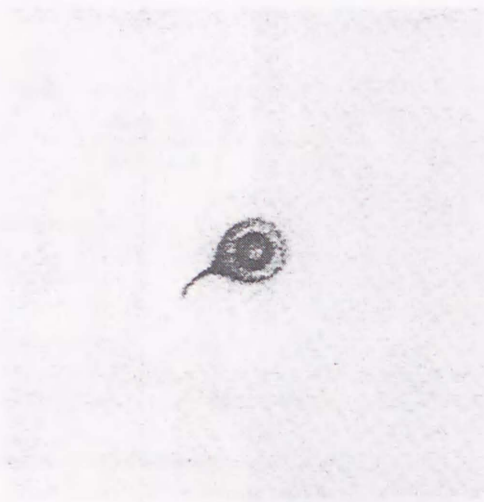


図 1.7 すす殻⁽¹⁸⁾

／火炎径の 2 乗) について非定常性が認められ, また図 1.7 に示すような, 火炎内部へのすす粒子の凝集が見られた. すす粒子殻の直径は火炎直径の $1/2$ から $1/3$ の間であり, 火炎内部の熱・物質移動に関して熱拡散を導入した考察を行っている. 熱拡散については通常の液滴燃焼理論では無視の仮定があり, 微小重力実験と理論との比較において一つの課題となりつつある.

1.2.2 液滴列の燃焼

実際の噴霧燃焼においては, 単一液滴の着火時間および燃焼期間を支配する要素のほか, 液滴間の相互干渉の効果が強く影響を及ぼしていると考えられている. 複数個並べた液滴の燃焼および液滴間の火炎伝播実験については, 通常重力下の研究も行われてきているが, 液滴間の熱・物質移動過程における相互効果については, いわば単一液滴の燃焼よりも, 通常重力実験による微視的な現象把握が困難なものといえ, 微小重力実験の適用としては, 比較的早い時期よりこの種の研究が行われている. そして近年では, 長大な落下施設などを利用することにより, 液滴列⁽²⁵⁾・⁽²⁶⁾ から液滴マトリックス⁽²⁷⁾ にまで実験の対象が広げられている.

Brzustowski ら⁽²⁸⁾ は, 微小重力下で 2 個の液滴列の一端の液滴に火花点火し, さまざまな液滴間隔と液滴径における火炎の伝播時間を調査した. それらの火炎すじ写真および直接写真により, 液滴間の火炎伝播は, 図 1.8 に示すように, 一つ目の液滴の輝炎の火炎面がとなりの液滴に触れることがなくても生じていることを観察している. そしてシュリーレ

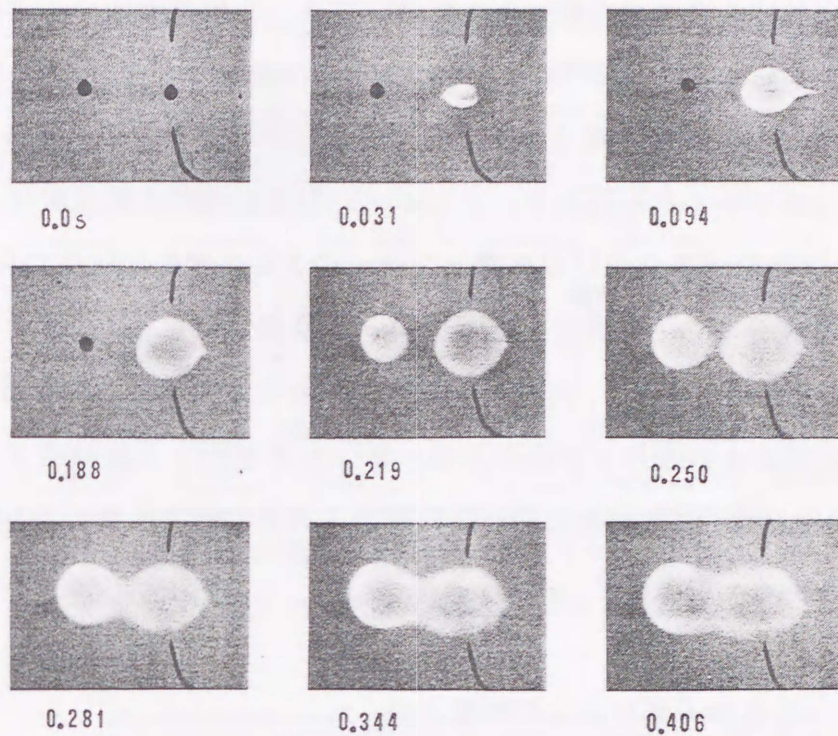


図 1.8 微小重力下における液滴列の火炎伝播⁽²⁸⁾
(液滴間隔 14mm, ベンゼン, 液滴径 2.2mm)

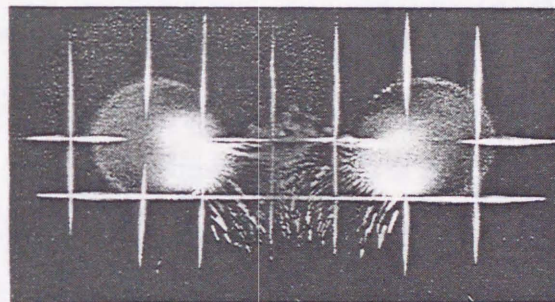


図 1.9 3個液滴列の燃焼時における相互干渉⁽²⁶⁾
(液滴間隔 10.2mm, n-ヘプタン, 燃焼中に中心液滴が消火)

ン写真からは、それらが火炎到達以前の、著しい温度変化が起こっている熱面の到達により、生じていることを示している。

三上ら⁽²⁵⁾は、微小重力下でとなり合う二つの液滴を同時に点火し、火炎形状の変化を観察している。点火後当初はほぼ独立に燃焼し、時間とともに互いの火炎が重なり合い、さらに時間が経って液滴径が小さくなると再び独立の火炎になることを示し、液滴列燃焼の準定常理論と液滴径の二乗の変化および燃焼寿命を比較して、液滴列燃焼における非定常性が燃焼形態に影響を及ぼすことを示している。

最近の日本における研究プロジェクトにおいては、3個液滴列の燃焼実験が行われ、特徴的な実験結果が得られている⁽²⁶⁾。SiCファイバー格子上に定置した、平均液滴径1.3mmのn-ヘプタン液滴の液滴間距離をさまざまに変化させ、白金線ヒータにより加熱・点火を行った。またSiCファイバーにより、ファイバーの温度による輝度変化を撮影写真よりスキャンし、ブタン拡散火炎および赤外線センサーによる温度測定結果から較正を行って、火炎半径方向の温度分布のCT測定も行っている。結果は、図1.9に示すように、液滴間隔10.2mmの3個液滴列において、同時点火後に中心液滴の火炎が消火する現象が見られ、中心液滴付近の比較的大きなすす粒子の生成、および外側の2液滴の相互干渉が観察されている。この実験結果は、液滴燃焼における火炎面内の燃料蒸気生成の非定常性に関して、重要な示唆を与え得るものと考えられる。

1.2.3 液滴群・粒子群の燃焼および噴霧火炎

噴霧した液滴群・粒子群の点火や火炎伝播などの基礎的な燃焼過程に関する研究は、おもに航空用ガスタービンやロケットモータ、筒内直噴成層給気ガソリンエンジンにおける点火および火炎伝播過程の基礎的な解明を動機とした研究が多い。図1.10に示すように、こうした液滴群あるいはそれが混在した混合気の燃焼過程は、均一予混合気のそれと異なって、噴霧の蒸発帯を有し、さらに噴霧液滴の粒径や数密度によって蒸発・点火・火炎伝播挙動が大きく左右される、いわゆる不均質燃焼 (heterogeneous combustion) 過程となる⁽²⁹⁾。これらの基礎的な燃焼過程の研究においては、Burgoyne and Cohen⁽³⁰⁾、Lefebvreら⁽³¹⁾⁻⁽³³⁾、Hayashiら⁽³⁴⁾、水谷ら⁽³⁵⁾⁻⁽³⁷⁾、吉田ら^{(38)、(39)}により、開放系の火炎伝播管、密閉容器、あるいは噴霧火炎バーナなど、多様な実験系による研究がなされているが、微小重力場を用いた実験はきわめて少なく、燃料噴霧を用いたものでは、ここ数年の国内の研究^{(40)、(41)}を除くと、Ballalら⁽⁴²⁾によるものがあるのみである。また同様の粒子分散系である固体の粒子群についても、微小重力実験に関しては、1990年代の研究以前では、系統だった実験は行われてきていない。近年噴霧液滴群の浮遊・分散が可能な微小重力環境を用いた研究に関心が寄せられているが、液滴群の分散および液滴径の均一性をどのように得るか、またそれらをどのように計測するかについて、実験手法の模索が行われ始めている。

いっぽう理論的研究については、1940年代以降Probert⁽⁴³⁾や棚沢⁽⁴⁴⁾による連続燃焼器内における噴霧燃焼解析の試みをはじめとし、以降、Mizutaniら^{(45)、(46)}、Williams⁽⁴⁷⁾、Sirignanoら⁽⁴⁸⁾、Polymeropoulos⁽⁴⁹⁾などにより理論解析がなされている。これらの多くにお

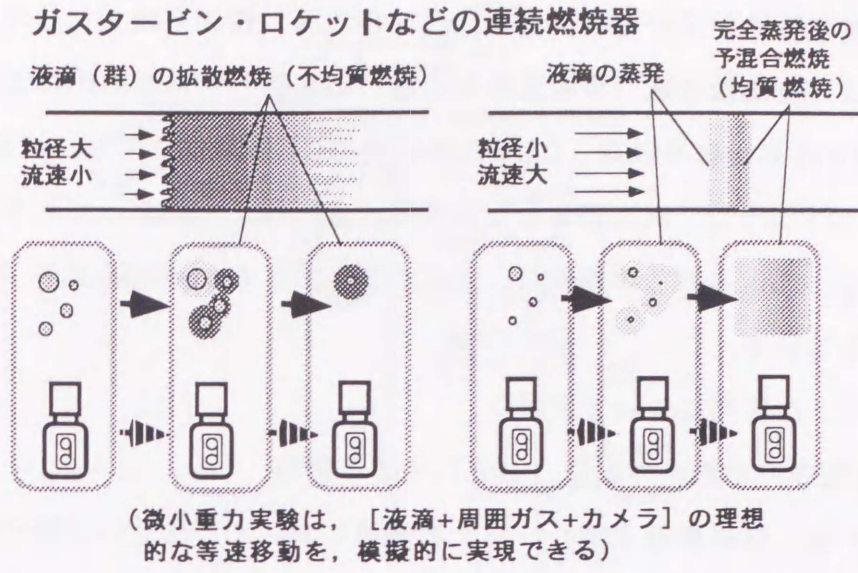
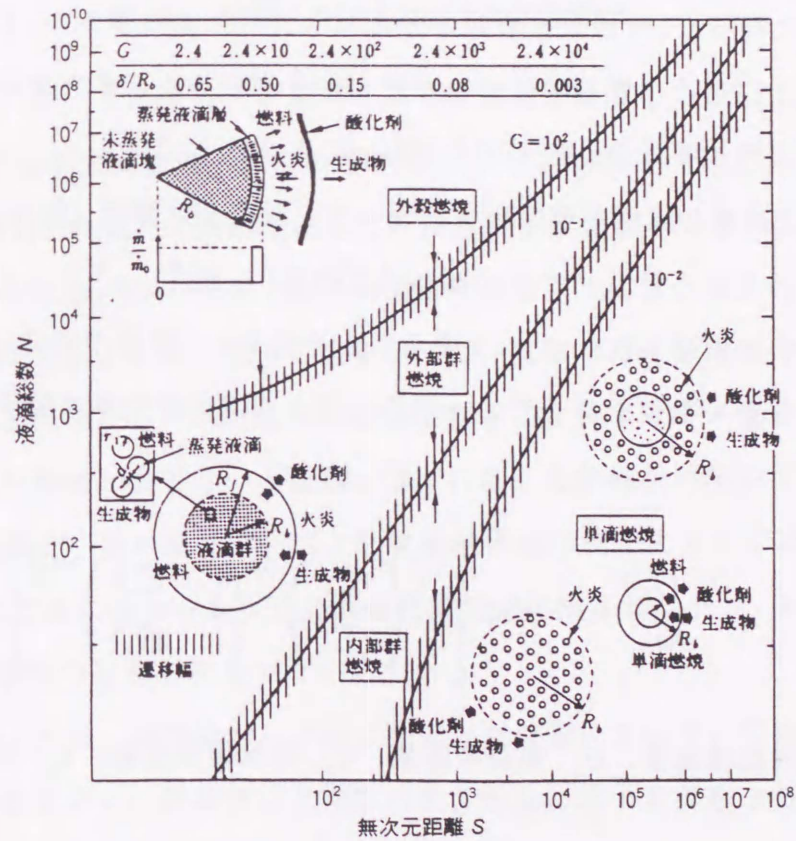


図1.10 噴霧火炎伝播と微小重力実験



$$S = 0.05(d/r_i) / (1 + 0.276 Re^{1/2} Pr^{1/3})$$

$$G = 4\pi \lambda r_{i0} \eta (1 + 0.276 Re^{1/2} Sc^{1/3}) R_b^2 / \rho D c_p$$

d : 平均液滴間距離 η : 無次元座標 ($\equiv r/R_c, r$
 Re : レイノルズ数 : 中心からの距離, R_c : 噴霧の半径)
 λ : 熱伝導率 Sc : シュミット数 R_b : 予熱帯半径
 r_i : 液滴半径 ρ : 密度 D : 拡散係数 c_p : 比熱
 Pr : プラントル数
 r_{i0} : 基準状態における液滴半径

図 1.11 液滴群の無次元距離と燃焼形態⁽⁵¹⁾

いては、噴霧液滴の粒径分布を仮定し、個々の液滴の燃焼を独立として、液滴間の相互効果については、液滴数密度（平均液滴間距離）を基準とした平均化によって考えられている。そして1970年代後半以降、Chiuによる群燃焼理論⁽⁵⁰⁾により、液滴間の相互効果を、図1.11⁽⁵¹⁾に示すような、液滴径および液滴間距離の比にしたがってクラス分類する考え方が提唱された。Chiuらのこの理論は、近年水谷らによるレーザ計測^{(52), (53)}によって実験的検証が行われている。

以下に主だった研究について述べる。

(1) 噴霧粒径分布が燃料の蒸発・燃焼に与える影響

Probert⁽⁴³⁾は、噴霧燃焼を行う一次元燃焼器において、任意の粒径分布をもった噴霧について、噴霧液滴の(1)蒸発・燃焼の準定常(2)燃焼速度一定(3)周囲気流とのスリップ速度零の仮定をおき、噴霧の粒径分布が燃焼器内での蒸発・燃焼に与える影響の理論解析を最初に行った。粒径分布関数の分布パラメータ β の小さい、すなわち均一度の低い噴霧が燃焼器入口近くの燃焼率は高いが燃え切りがおそく、また均一度の高い噴霧が燃焼器入口近くでは燃焼率は低く燃え切りが早いことを示している。

棚沢⁽⁴⁴⁾は、逃がし式渦巻き噴射弁について、粒径分布関数(抜山-棚沢の分布関数)

$$f_n(x) = n_T A x^\alpha \exp(-Bx^\beta) \quad (1-3)$$

の分布パラメータが $\alpha = -0.5$, $\beta = 1$ であることを見出し、液滴の蒸発・燃焼に関して上記と同様の仮定を置いて数値解析を行い、噴霧粒径と噴霧の燃焼率に関する次の経験式を導いている。

$$\frac{G_b}{G_0} = 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{C_b t}{4\bar{x}_0^2} \right)^{0.75} \left(1 - \frac{C_b t}{4\bar{x}_0^2} \right)^{-0.25} \right] \quad (1-4)$$

ただし、 G_b : 燃焼噴霧量、 G_0 : 初期噴霧量、 C_b : 燃焼速度定数、 x_0 : 初期液滴径、 t : 時間である。

Burgoyne and Cohen⁽³⁰⁾は、テトラリン噴霧と火炎伝播管を用いた実験的研究から、(a) $10 \mu\text{m}$ 以下の直径の液滴の混在するエアロゾルでは液滴燃焼は起こらず、火炎伝播は均一混合気のそれに近いこと、(b) $40 \mu\text{m}$ 以上の直径の液滴の混在するエアロゾルでは、個々の液滴燃焼が生じ、伝播機構は液滴から液滴へとつながっていく形となること、そして(c) $10 - 40 \mu\text{m}$ の間に遷移機構が存在することを示した。定量的な視点からは、実験結果は一

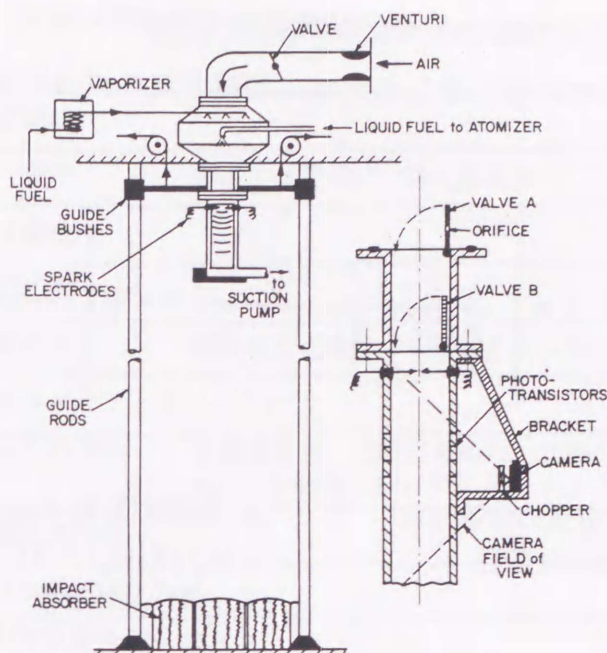


図 1.12 噴霧火炎伝播の落下実験装置⁽⁴⁵⁾

定の混合気当量比において燃焼速度が最適となる液滴径が存在することを示唆している。

(2) 噴霧液滴の存在が火炎速度・火炎伝播挙動に与える影響

Ballal and Lefebvre⁽⁴⁵⁾ は、火炎速度に与える浮力の影響を取り除き、また噴霧液滴の分散制御を容易にするため、図1.12に示す火炎伝播管中に噴霧流定置火炎を作る手法を用いた実験装置の、自由落下による微小重力実験を行った。実験では音響的效果により噴霧流の定置火炎形状を平面火炎とし、平均粒径が小さくなることによって一意的に火炎速度が増大し、均一混合気で最大となるという結果を得ている。実験結果に用いている液滴の平均粒径は $60 \mu\text{m}$ であるが、他の研究者らによる実験的研究の多くにおいては、この程度の粒径の噴霧の、適量の添加による火炎速度の増大効果が見出されており、実験方法および結果自体については検討の余地が残されている。

水谷と中島ら^{(35)・(36)} は、逆円錐バーナおよび定容燃焼器において、灯油噴霧およびプロパン - 空気混合気を用いて、気体燃料と噴霧の混合燃焼に関する実験を行い、少量の噴霧の添加により同一全燃料-空気比における燃焼速度が大きく増加することを示している。実験に用いた噴霧の平均粒径は $60 \mu\text{m}$ および $30 \mu\text{m}$ 程度であるが、著者らはバーナ法の論文で噴霧流の乱れ強さを測定し、液滴混入と乱れによる燃焼促進効果を区別して検討している。

Polymeropoulos⁽⁴⁹⁾ は、Burgoyne and Cohen および Ballal らの実験結果を、著者らの考案した数値解析モデルを用いることにより検証し、噴霧液滴の添加により、均一混合気よ

りも、数 μm から 30 ないし 40 μm の平均粒径範囲の液滴群の存在下において、火炎伝播速度が高くなることを示している。そして気液二相混合気の火炎伝播速度について次の理論式を導いている。

$$S = \left[\frac{D_u^2 (1 - \Omega)}{12\alpha^2 \left(\frac{\rho}{\rho_l} \right) \ln(1 + B)} + \frac{\Omega}{S_L^2} \right]^{-1/2} \quad (1-5)$$

ただし	S : 気液二相混合気の燃焼速度	B : 物質移動数 (mass transfer number)
	D_u : 流れ上流部の液滴径	$[C_p (T_{ad} - T_B) + QY_0^\infty f] / [L + C_{pl} (T_B - T_u)]$
	α : 熱拡散率	Ω : 燃料蒸気割合
	ρ : 気相密度	S_L : 均一混合気の燃焼速度
	ρ_l : 液相密度	

1.2.4 噴霧粒径の測定技術

前項で述べたような、噴霧燃焼における大きな支配過程となる燃料噴霧微粒化過程の最も基本的な評価項目としては、液滴粒径が挙げられる。しかし液滴粒径を測定する手法については、個々の粒子の粒径を測定し、平均粒径や粒度分布を求めることは非常に困難なため、これを容易にする多くの方法が考えられてきた。表1.2には噴霧粒径測定法の分類⁽⁵⁴⁾を示す。こうした噴霧粒径測定法のうち、とくにレーザ測定による方法が、微小重力実験において系統的に適用された例は、現在のところ見られていない。ごく最近日本の地下無重力実験センターで、フラウンホーファ回折法を用いた、ラック搭載専用装置が開発された⁽⁵⁵⁾ばかりで、微小重力実験では未踏領域の一つといえる。ここでは、主に斎藤の噴霧特性の測定技術に関する総説⁽⁵⁴⁾に基づき、各種測定法の概略について述べる。

現在でも用いられる液侵法は、基本的な計測法であり、ガラス板にシリコンオイルなどといった粘度の高い液体を塗布し、噴霧粒子を受け止める方法である。また沈降法は、高さ10m程度の沈降塔の頂部から燃料を噴射し、大粒径は速く、小粒径は遅く降下する液滴を、塔底部でサンプリングする方法であり、噴射後の経過時間に対して粒子の終端速度から粒径を校正した曲線を用いて、回収した噴霧重量から粒径分布を求めるものである。

近年レーザ測定技術の発達とともに主流となっているのが、光学的方法を用いた計測法である。レーザ光回折法（フラウンホーファ回折）は、Sheffield大学のSwithenbankによ

表 1.2 噴霧粒径測定法の分類⁽⁵⁴⁾

1.痕跡法	
2.付着法	粉に，吸着紙に，無孔表面に
3.液侵法	
4.沈降法	
5.固化法	溶けたろうを用いる方法，急冷法
6.カスケード・インパクト	
7.光学的な方法	直接撮影法，光吸収を利用，光散乱を利用，光回折を利用，レーザ・ホログラフィー
8.電気的方法	
9.その他	

り装置開発が行われた⁽⁵⁶⁾。レーザ平行光束中に噴霧を通し，噴霧粒子群による回折光（Fraunhofer回折）のエネルギー分布を多素子ディテクタで測定することにより，粒子群の粒度分布を計算する方法で，現在広く用いられている方法の一つであるが，噴霧濃度が高い場合や，測定装置の計測パラメータの設定により，測定結果が大きく異なってくる場合がある。

フェーズドップラ法は，Erlangen大のDurst，Aerometrics社のBachaloらによって開発された方法である^{(57)・(58)}。装置構成はLDV（Laser Doppler Velocimeter）と同様であり，これとの違いは，粒子による散乱光を複数の検出器でとらえ，検出器間の信号の位相差から粒径を計算する点である。ほぼ空間の一点である測定体積に入った個々の噴霧粒子を測定するため信頼性は高いが，検出器の感度レベルの設定によっては，微細粒子からの信号がカットされる場合があり，また噴霧全体での粒度分布を知るためには，測定位置を3次元的に移動させて測定を繰り返す必要がある。吉津ら⁽⁵⁹⁾，金ら⁽⁶⁰⁾は近年，フラウンホーファ回折法とフェーズドップラ法との比較を行っている。

ホログラフィー法は，イギリスのGaborによって1948年に開発された方法であり，同一波長の，物体に照射／透過させた光（物体光）と，照射／透過を行わない光（参照光）との干渉縞を写真乾板に記録し，これを再生して3次元画像を得る手法である。この方法を噴霧特性の測定に応用する研究は，村上ら^{(61)・(62)}，西田ら^{(63)・(64)}により行われている。図1.13にディーゼル噴霧のパルスレーザホログラフィー法による計測装置の概略⁽⁶³⁾を示す。

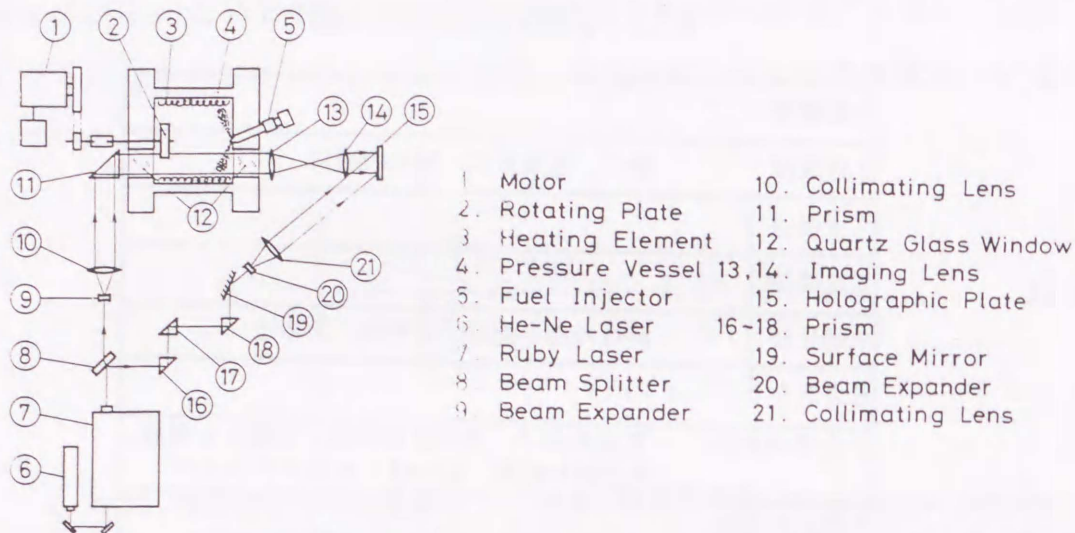


図 1.13 ディーゼル噴霧のパルスレーザホログラフィー法による計測装置⁽⁶⁴⁾

1.2.5 高粘度スラリーや固体粒子混入燃料の燃焼

液体燃料微粒化の用途として、現在使用されている石油系燃料の代替用途としての重質油、あるいは微粉炭スラリーや、航空宇宙用炭化水素系燃料の高エネルギー密度化をねらった金属粒子混入スラリー燃料など、高粘度流体の噴霧燃焼の基礎的研究が行われている。こうした固体粒子混入スラリー燃料などの高粘度流体については、内部混合型二流体噴射弁を用いた微粒化特性および噴霧特性に関する研究^{(65)・(66)}が行われているが、微粒化する流体の見かけ粘度が大きくなると、微粒化装置に工夫が必要となり、噴霧特性および液滴の燃焼に関する研究といった基礎的知見に関する調査が必要となってくる。

微粉炭あるいは金属粒子などを、従来の石油系燃料に混入した、いわゆる固体粒子混入燃料の液滴については、高温の自然対流場あるいは強制対流場において、基礎的燃焼過程についての多くの実験的研究が行われ、液体燃焼・固体燃焼の複合した複雑な着火・燃焼過程を経ることが明らかになっている。しかし、こうした固体粒子混入燃料の液滴燃焼を、噴霧燃焼解析に応用しようという視点から、微小重力実験が行われた例はまだみられない。こうした液滴の着火・燃焼過程については、固体微粒子凝集-分散系を含んだ気-液-固3相の複合した物理化学的移動過程となるため、現象自体が複雑であり、微小重力環境を利用した燃焼過程における現象の単純化は、その詳細な解明にとって有益なものと考えられる。以下に従来の研究について述べる。

Sakai ら⁽⁶⁷⁾ は、石炭スラリー (COM, SRC-oil slurry, TCM) 単一液滴の常圧高温雰囲気内での燃焼特性を自発着火、強制着火の双方を用いて調べている。気相燃焼に続いて固体燃焼が起こる2段階の燃焼挙動が観察され、気相燃焼ののちに生じる固体残渣凝集物の初期直径は、点火前の液滴径にほぼ等しいことを示している。そして固体燃焼期間が総燃焼期間の大部分を占めるため、総燃焼期間はほぼ固体燃焼期間に等しいと近似できるとしている。

廣安ら⁽⁶⁸⁾ は、石炭スラリー (COM, CWM) 単一液滴の常圧高温壁面上での高温雰囲気での燃焼期間を、液体成分の蒸発・燃焼、微粉炭揮発成分の分解燃焼、微粉炭固定炭素成分の表面反応 (チャー燃焼) の各期間に分け、雰囲気温度に対する各燃焼段階の変化を、種々の微粉炭および粉碎粒子径について詳細に調べた。微粉炭の粒度分布が粒径の小さい方に移動すると表面反応の下限界温度が低下し、また微粉炭中の炭素割合が40%付近の炭種で表面反応の下限界温度が最低になるとしている。

松江ら⁽⁶⁹⁾ は、高温雰囲気中で蒸発及び燃焼するCWM液滴の表面および中心温度を、放射温度計および熱電対を用いて測定している。CWM液滴の中心温度が水の沸点を超える時点が乾燥終了時点と一致することを示している。図1.14に雰囲気温度650KにおけるCWM液滴の中心および表面温度履歴の比較を示す。高温雰囲気内懸垂後から中心および表面温度ともに液滴内に含まれる水の沸点までまず上昇し、液滴表面の乾燥終了と同時に温度上昇を開始する。チャー燃焼開始 (C.C.S) 時の表面温度は約700Kであり、この時点に達する前に中心温度が表面温度を超えている。すなわち、雰囲気温度である650Kを超える温度は、まずCWM液滴の中心に出現したのち表面にまで波及し、表面が700Kを超えると目視観察によるチャー燃焼が開始する。このことは目視観察によるチャー燃焼開始以前にCWM液滴の内部で発熱反応が開始していることを示唆するものであり、中心温度が表面温度を超える時点からこの発熱反応が起こると考えると、図からはおよそ500Kから液滴内部の発熱反応が開始されているとしている。

Lee and Law⁽⁷⁰⁾ は単一スラリー液滴の蒸発・燃焼において、Antaki⁽⁷¹⁾ による理論モデルを改良し、スラリー中液体成分の蒸発に伴う固体粒子の凝集による、球状多孔質殻 (shell) の形成過程に、図1.15に示すような、多孔質殻内部での液体成分蒸気の気泡生成を導入したモデルを提案している。固体殻の内部表面直径および気泡直径の3乗が時間に比例し、またスラリー中固体成分濃度の違いによる固体殻の凝集度 (殻の空隙率) の違いにより、殻の湿った状態 (wet shell)、乾いた状態 (dry shell) を仮定して計算を行い、カーボ

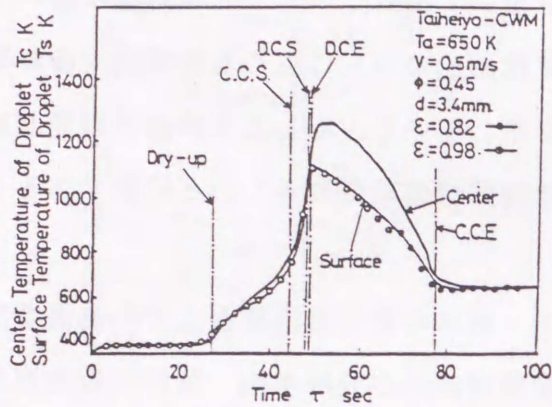


図 1.14 CWM 液滴の中心および表面温度履歴⁽⁶⁹⁾

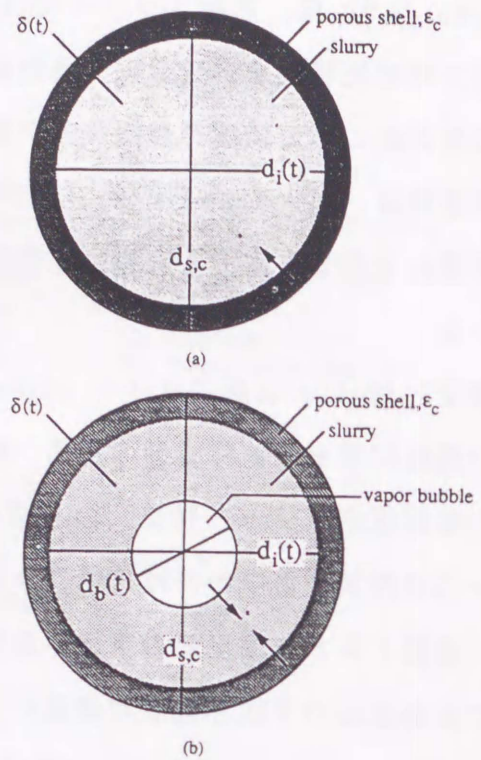


図 1.15 スラリー液滴の内部気泡発生モデル⁽⁷⁰⁾
(a) 気泡なし (b) 気泡あり

ン粒子と JP-10 の混合燃料液滴を用いた実験値との比較を行っている。

Wong ら⁽⁷²⁾ は、ホウ素/JP-10 スラリーおよびホウ素/炭素/JP-10 スラリー単一液滴について懸垂液滴を平面火炎バーナ中火炎にさらし、そのマイクロ爆発過程について詳細な分析を行っている。ホウ素については固体粒子径 $0.8 \mu\text{m}$ のものを用い、ホウ素/JP-10 スラリー中ホウ素粒子濃度 45wt% において最も激しいマイクロ爆発挙動が見られ、これより濃度が高い場合は固体粒子凝集物の燃え残りが生じる。またホウ素/炭素/JP-10 スラリーにおいては、ホウ素粒子濃度 30wt% において炭素粒子 12wt% の添加で最も激しいマイクロ爆発挙動が見られており、爆発挙動の発生時期はホウ素/JP-10 スラリーよりも早まっている。ホウ素粒子径は $20 \mu\text{m}$ のものも用いているが、この場合 $0.8 \mu\text{m}$ のものと比べて凝集物の多孔質殻が硬くなり、マイクロ爆発挙動の発生は遅れる。著者らは燃焼期間短縮の観点からは、ホウ素粒子径については $1\sim 2 \mu\text{m}$ が最適と結論づけている。

1.3 本研究の目的

微小重力環境を利用した燃焼実験は、前項まで述べたように、1990年代のごく最近になるまで、数 s 以上の比較的長時間の実験が行われておらず、それ以前のものについては、ほとんどが単一燃料液滴ないし液滴列の燃焼実験であった。国内の大学等に比較的多く見られる 5 m 程度の落下塔による、1s 程度の落下時間で実施できる実験においては、内容的制約が大きかったことがその要因とみられるが、1980年代に入ってドイツ・ブレーメン大学 4.7 s 落下塔など、長時間の落下施設の完成により、多様な実験手法を採用できる可能性が生まれ、宇宙実験の予備実験用途としての役割も含めて注目されることとなった。そして国内では、近年の長大な落下施設の運用開始とともに、国内、またアメリカ、ドイツなどの研究機関との共同研究プロジェクトがスタートし、以降多くの研究成果が得られている。

本研究では、噴霧燃焼の基礎的知見を得るために有用と考えられる、単一スラリー燃料液滴の着火・燃焼過程、および燃料噴霧液滴群が混在する可燃混合気の点火および火炎伝播特性についての基礎的実験を行った。単一スラリー燃料液滴の着火・燃焼過程の調査には、石炭およびマグネシウム、純カーボンの固体粒子と、液体炭化水素の混合物スラリー燃料液滴を用い、これを高温雰囲気にし、その複雑な燃焼過程の観察を行って、通常重力下のデータとの比較、および固体粒子含有による燃焼促進効果についての検討を行う。また燃料噴霧液滴群が混在する可燃混合気の点火および火炎伝播特性については、微小重力場で火炎伝播管内の予混合気中に燃料噴射を行って燃料液滴を浮遊・分散させ、点火を行って、予混合気および燃料噴霧の当量比を独立にさまざまに変化させた場合の火炎伝播挙動の観察を行う。そして微小重力場の噴霧粒径および粒子数密度分布をパルスレーザーホログラフィー法を用いて測定し、火炎伝播実験結果における地上での粒径測定結果との比較、および微小重力下での燃料噴射圧・噴射期間を変化させた場合の噴霧特性の測定を行う。

以上の実験的研究から、これまで行われてこなかった、

- (1) 微小重力環境下での高温雰囲気内でのスラリー液滴の着火・燃焼特性
 - (2) 微小重力環境下での燃料噴霧の浮遊・分散挙動
 - (3) 微小重力環境下での液滴群混在予混合気の点火・火炎伝播特性
 - (4) 微小重力環境下での空間的粒径・粒子数密度の測定手法開発
- のテーマに関して、その基礎現象の解明および実験手法開発を行う。

1.4 本論文の構成

前節に述べた研究項目に関して、本論文は以下のように構成される。

第1章では、微小重力環境を利用した、噴霧燃焼に関する基礎的実験の動機と背景について、液滴および液滴群などにおける従来の実験的研究の手法および成果を参考にし、それらをふまえたうえで、本研究の目的および本論文の構成について述べる。

第2章では、本研究で用いた自由落下による微小重力実験施設および施設における実験運用の概略について述べ、通常の地上における実験とは性格を異にする、一般的な微小重力実験の特質および本研究における実験での運用の実際について示す。

第3章では、噴霧燃焼の基礎的評価項目である噴霧粒径の、パルスレーザホログラフィー法を用いた3次元計測手法の開発について、微小重力実験の結果を中心に述べる。そしてこれまで行われてこなかった微小重力実験への粒径測定手法の適用、および第5章に述べる液滴群混在予混合気の火炎伝播に関する基礎的実験などとの組み合わせによる、微小重力環境下での噴霧燃焼に関する基礎的解明への寄与について検討する。

第4章では、石油系燃料の代替用途としての石炭スラリー燃料の基礎的着火・燃焼過程を解明するため、従来から多く微小重力実験では行われてきている手法である、単一液滴の着火・燃焼過程の調査を通して、その液体燃焼・固体燃焼の複合した燃焼プロセスの解明を行う。また、通常重力下と微小重力下の実験結果を比較し、スラリー液滴の着火・燃焼に及ぼす自然対流の影響についても考察する。

第5章では、航空宇宙用炭化水素燃料のさらなる高エネルギー密度化を企図されている、マグネシウムおよび純カーボン粒子混入スラリー燃料の基礎的着火・燃焼過程の解明を、第3章と同様の単一液滴の着火・燃焼過程の調査を通して行い、通常重力下および微小重力下の結果を比較する。また微小重力実験の結果から、火炎直径変化を測定し、固体粒子含有による液体燃料の燃焼促進効果について考察する。

第6章では、こうした噴霧燃料の混在する混合気の基礎的な燃焼特性を明らかにするため、微小重力下において予混合気中に燃料噴霧を行い、液体燃料および予混合気の当量比を種々に変化させて、点火および火炎伝播特性の調査を行う。また燃料噴霧の粒径測定を行い、従来の他の研究者の研究結果との比較可能性について考察を行う。

第7章では、これらの微小重力環境を利用した実験結果を通して得られた、種々の基礎的知見についてまとめる。

第2章 落下実験施設および実験運用の概略

2.1 緒言

微小重力を得る手段として最初期から用いられている、自由落下方式による実験を行う落下塔については、現在5m級のものから数百m級のものまで存在している。その中で、本研究で利用した北海道・地下無重力実験センター（JAMIC）および岐阜・日本無重量総合研究所（MGLAB）落下施設については、490m および100mの自由落下距離を持ち、JAMIC 落下施設については現在世界最長の落下距離を持つものとなっている。

本研究で利用したこれら二つの長距離落下施設は、ロケットなど他の微小重力実験関連の施設と同等の運用形態がとられており、施設を利用する大学・企業等の実験者グループは、落下システム運用担当者による運用管理および実験支援を受けて実験を行っている。また、実験者が製作する実験装置においては、落下カプセルへの搭載、および他の実験グループとの混載を行う関係上、装置の大きさ、データ/コマンドの入出力インターフェース、および安全対策等において、様々な基準の適用および制約を受ける⁽¹⁾。したがって、装置製作においては、これらに従う必要があり、落下実験で取得可能なデータの性質についても、事前の十分な検討が必要となる。また実験運用上においても、実験準備から装置の落下カプセルへの搭載、落下カプセル組立などの落下準備など、こうした共同的な実験に特有の、実験施設側だけで行う準備作業および作業時間があり、実験者側が実験装置上および実験準備作業上で、これらに支障なく対応でき、かつ安全上でも起こり得る問題を最小限にとどめることが可能な実験系を製作しなくてはならない。これらのことから、実験においては、装置のシステムの・機械的な遠隔操作、および高い確実性や安全性を考慮した装置設計など、いわゆる軌道上無人実験に準じた性格のノウハウが必要であり、こうしたこともこれらの大規模落下実験施設に対して、宇宙実験の予備実験施設的な性格を付与しているものともいえる。

本章では、本研究で利用したJAMICおよびMGLAB落下施設の概要、およびそれらにおける実験運用の実際について述べる。そして次章以降の、本研究で行った微小重力実験の特質理解の一助となれば幸いである。

2.2 落下実験システムの概況

大規模落下塔には、大気中を落下するものと真空中を落下するものの二方式がある。大

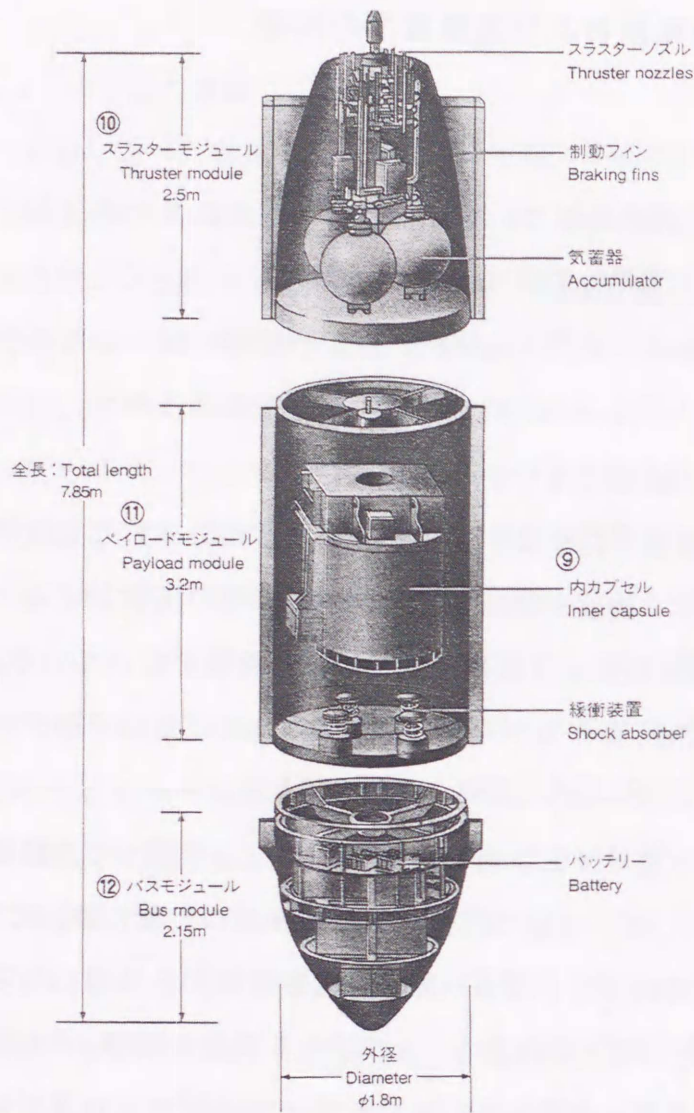


図2.1 JAMIC 落下カプセル概略⁽²⁾

空中を落下するものについては、落下中の空気力学的な抵抗を考慮して、内外の二重カプセル構造となっている。すなわち、落下実験装置を搭載した内カプセルと外カプセルとが、真空中で絶縁されており、落下と同時に内カプセルは外カプセルと切り離されて、真空中を落下するように落下する。図2.1⁽²⁾にJAMIC落下施設の落下カプセルの概略を示す。具体的には、外カプセルが受ける空気抵抗により、外カプセルの落下速度は内カプセルより遅くなるが、内カプセルは外カプセル内部の真空中を、完全な自由落下状態で落下するという方式である。高さ5m程度の落下塔では、内カプセルは真空中でなくとも充分な微小重力状態を得られるが、落下距離が長くなると、内カプセルが外カプセル内部底面に接触する時

点が生じるほどに落下時間が長くなる。これを避けるため、JAMIC落下施設では、外カプセル内部を真空引きし、かつ外カプセル上部にガススラスタを装備し、内カプセルと外カプセル内部底面のクリアランスを光センサで計測して、出力信号に比例した量の推進力をスラスタにより発生させ、外カプセルの加速を行って、衝突を防ぐ方式をとっている。

真空中を落下する方式については、落下シャフト内全体を真空引きする必要があるが、ポンプ施設が必要となるが、二重カプセル方式をとったり、カプセルにスラスタ等の装備を施す必要がないので、カプセル本体が複雑な構造を持たずにすみ、カプセルのペイロード容積率を高めることが可能である。自由落下長100mのMGLAB落下施設はこの方式である。

表2.1⁽³⁾に代表的な落下実験施設の仕様の比較を示す。

表 2.1 世界の主な落下施設の仕様比較⁽³⁾

項目	国内		国外			
	北海道 上砂川	岐阜県 土岐	アメリカ ハンツビル	アメリカ クリーブランド	アメリカ パサデナ	ドイツ プレーメン
所在地	北海道 上砂川	岐阜県 土岐	アメリカ ハンツビル	アメリカ クリーブランド	アメリカ パサデナ	ドイツ プレーメン
落下高さ (m)	490	100	100	145	13.7	110
落下時間 (sec)	10	4.5	4.3	5.5	1.7	4.7
微小重力 レベル (g)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
衝撃 (g)	10	10	25	25(AVE.)	不明	30
カプセル重量 (kg)	5000	1000	1642 (供試体 204)	452	不明	300
カプセル口径 (mm)	φ1800	φ900	φ2200	φ1000	□ 600	~φ800
抗力補償方式	2重カプセル およびスラス タ	真空 10 ⁻² Torr	ドラッグ・シ ールドおよび スラスト	真空 10 ⁻² Torr およびスラスト	空気流式	真空 10 ⁻⁵ bar
ガイド方式	ガイドレール	なし	ガイドレール	不明	なし	不明
制動方式	エアダンパー	ベローズ	不明	減速タンク	不明	ポリスチレン 緩衝材
所有または 運営者	地下無重力実 験センター	日本無重 量総合研 究所	NASA MSFC	NASA LeRC	JPL	プレーメン 大学

2.3 JAMIC 落下施設

2.3.1 概要

北海道・上砂川町にある(株)地下無重力実験センター(JAMIC)落下施設は、三井上砂川炭鉱の立坑跡を利用して建設され、1991年に運用開始された、世界で最長の落下距離を持つ自由落下実験施設である。図2.2⁽²⁾に落下実験施設のシステム概要を示す。落下塔全長は710mであり、自由落下部490m、制動部200mである。得られる微小重力時間は10sである。

実験装置を搭載し、落下塔内を落下する落下カプセルの概略は図2.1⁽²⁾に示すものである。落下カプセルは、前節に述べたように内カプセルと外カプセルの二重構造となっており、外カプセルは、スラスターモジュール、ペイロードモジュールおよびバスモジュールの3つのモジュールからなっている。組立時の全長は7.85m、外径は1.8mである。実験者の実験装置は内カプセルに搭載され、内カプセル内部は大気圧である。内カプセルはペイロードモジュールの上面に保持され、内カプセルとペイロードモジュールの間の空間は真空に維持される。前節に述べた、こうした二重カプセル構造およびガススラスト方式によ

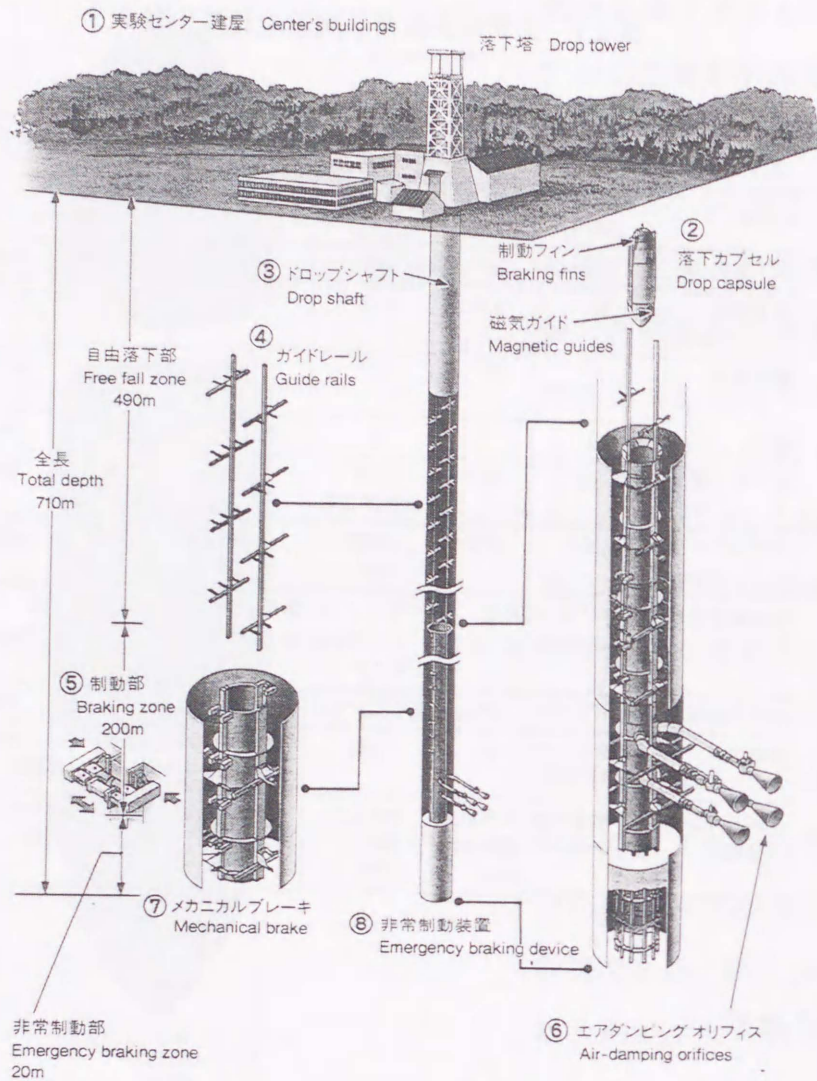


図 2.2 JAMIC 落下施設概略 (2)

り、得られる微小重力レベルは $10^{-5}g$ オーダーとなっている。

落下カプセルの制動は、図 2.3 (2) に示すエアダンピングオリフィスを用いたエアブレーキおよびメカニカルブレーキの併用による。制動加速度は約 $8g$ であり、ノートパソコンなど精密機器の搭載・使用も可能なものとなっている。

2.3.2 実験装置の搭載方式

図 2.4 (2) に実験用ラックの概略図を示す。実験用ラックに収納可能な実験装置の最大寸法は、 $870L \times 870W \times 918H$ である。このサイズを 1/1 モジュールと呼ぶ。この収納部分は、分割して複数の実験装置を搭載することもできる。4 分割した 1/4 モジュールを標準として、1/2 モジュールなどの組み合わせがあり、本研究で使用した実験装置は、第 4 章で

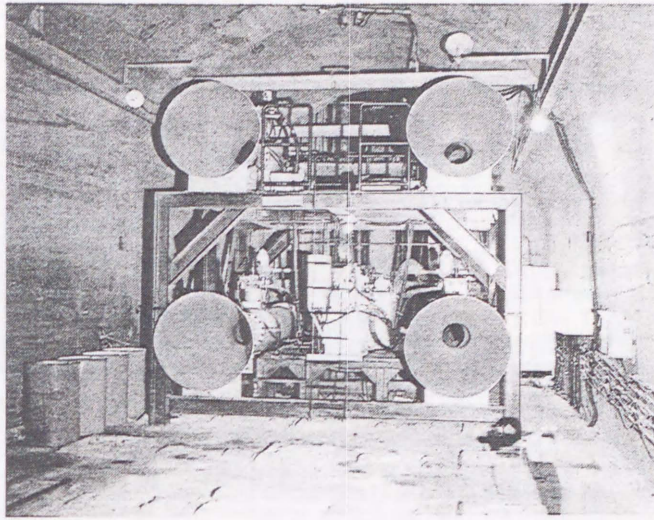


図 2.3 JAMIC の制動用エアダンピングオリフィス⁽²⁾

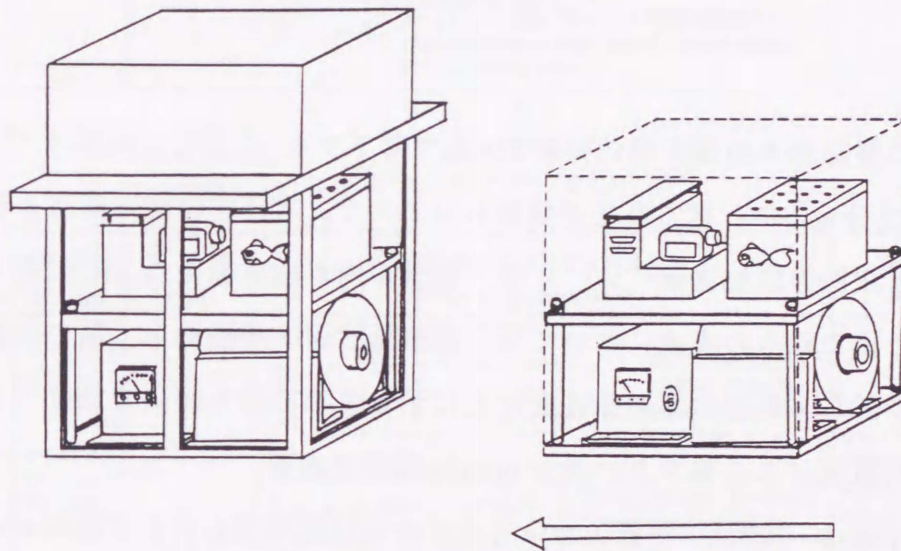


図 2.4 JAMIC の実験装置搭載用ラック⁽²⁾

1/4, 第 5 章で 1/2, 第 6 章で 1/2 の各モジュールである。実験装置の最大搭載重量は, バランスウェイト込みで 500kg である。

2.3.3 実験装置とのインターフェース

(1) 電力供給

図 2.5⁽²⁾ に電力供給のタイムシーケンスを示す。通常の運行スケジュールでは, 落下カ

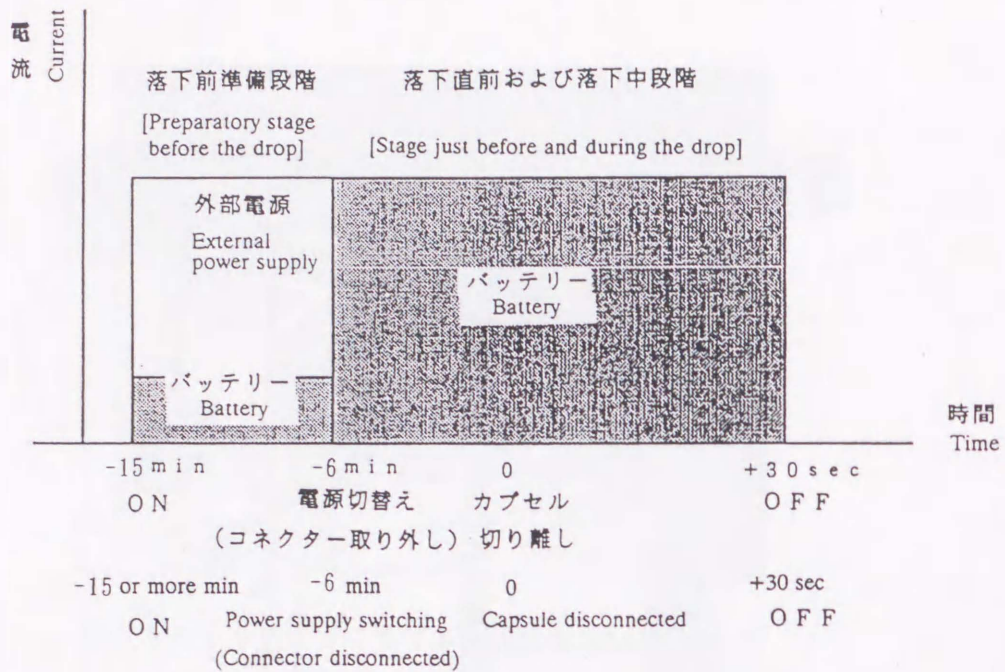


図2.5 JAMICの落下実験時における実験装置への電力供給シーケンス⁽²⁾

プセル搭載の移動台車の運行開始後約25minで落下する。しかしこのスケジュールでは、落下時刻の約15分minから電力供給が始められるので、本研究の第4章および第5章で行った、スラリー液滴の燃焼実験においては、電気炉内雰囲気温度の上昇に要する時間が不足する。このためこれらの実験においては、実験施設側と相談の上、電力供給後に運行スケジュールを中断し、希望の雰囲気温度付近に至るまでの待ち時間を設けている。待ち時間は希望雰囲気温度により異なり、最大60min程度である。

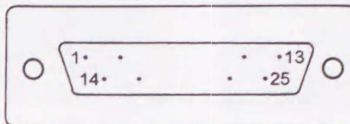
供給電力仕様は、DC28Vが最大50A（カプセル外部電源）および最大40A（内部電源）、AC100Vが最大8A（外部電源、内部電源とも）となっている。本研究では、AC100Vの他、第4章および第5章の実験における電気炉加熱時に、大電力が供給できるDC28Vを使用した。

(2) コマンド/データ入出力

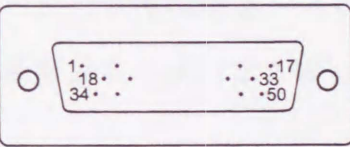
表2.2⁽²⁾ (a) に、実験装置と実験カプセルとの間で受渡し可能な、デジタルデータ/デジタルコマンド、(b) にアナログデータ/アナログコマンドの、インターフェースコネクタ仕様を示す。第4章および第5章の実験では、落下開始コマンドを含むデジタルコマンド2点 (DB-25S, 18-19 および 14-15)、および雰囲気温度の熱電対出力用アナログデータ (DD-50S, 19-20) 1点を使用した。また第6章の実験では落下開始コマンドを含むデジタルコマンド2点 (DB-25S, 18-19 および 14-15) を使用している。

表2.2 JAMICのコマンド/データのコネクタインターフェース⁽²⁾

(a) デジタルコマンド/データの仕様

コネクタ番号 Connector No.	信号の種類 Kind of signal	型式 Type	形状およびピンアサインメント Shape and pin assignment	備考 Remarks	
1	デジタルコマンド、デジタルデータ Digital command, Digital data	DB-25S	 25ピンD subコネクタ メス型/ソケット型 25 pins D sub-connector Socket type	スクリューロック装置 Screw lock D20418-J/J2/J3/J7	
			1,2,3,4,5,6		デジタルデータ (マイナス極) Digital data (minus polarity)
			7		デジタルデータ用共通コモン (プラス極) Common for digital data (plus polarity)
			10		デジタルデータ (高速カメラ起動アンサ) Digital data (high speed camera starting answer)
			11		コモン (プラス極) Common (plus polarity)
			14-15, 16-17		デジタルコマンド (光伝送できるのは、14-15のみ) Digital command (optical one is only 14-15)
			18-19, 20-21		落下開始コマンド Drop start command
			22-23, 24-25		デジタルコマンド (高速カメラ起動、35mmカメラ起動等支援コマンド) Digital command (high speed camera starter, 35mm camera starter)

(b) アナログコマンド/データの仕様

コネクタ番号 Connector No.	信号の種類 Kind of signal	型式 Type	形状およびピンアサインメント Shape and pin assignment	備考 Remarks	
2	アナログコマンド、アナログデータ Analog command, Analog data	DD-50S	 50ピンD subコネクタ メス型/ソケット型 50pins D sub-connector Socket type	スクリューロック装置: Screw lock: D20418-J/J2/J3/J7 アナログ信号の極性: Polarity of analog lines: 組み合わせ番号の小さい方: 信号側 (極性側) Smaller one in a paired number: signal line (voltage) 組み合わせ番号の大きい方: OV (COM) Larger one in a paired number: OV (common)	
			1-2, 4-5, 7-8, 10-11, 11-13, 16-17		アナログデータ (0~20mA) Analog data(0-20mA)
			19-20, 22-23, 25-26, 28-29, 31-32, 34-35		アナログデータ (0~5V) Analog data(0-5V)
			37-38, 40-41, 43-44, 46-47		アナログデータ (±10V) Analog data(±10V)
			49-50 (ユーザAのみ光伝送可) (available only for one user)		アナログコマンド (±10V) Analog command(±10V)
			3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48		シールド Shielded (earthed)

すべてのコマンド入力およびデータ出力制御は、制御室から行うことが可能である。またデータ記録は、MS-DOS形式ファイルの形に落とされ、実験時のカプセル内温度、圧力、微小重力レベル、また実験者設定によるデータファイルなどが記録される。第4章および第5章での実験における正確な雰囲気温度は、これの解析より求めている。

ビデオ信号出力はNTSCであり、1/4モジュールに一つのコネクタが割り当てられる。第

4章、第5章および第6章のビデオ画像は、装置搭載のビデオカメラ、およびこの出力を
経由した制御室でのモニタ画面での記録を行っている。

以上のデータ／ビデオ信号の出力は、光伝送方式により落下中もモニタリングが可能で
ある。

2.3.4 実験運用

実験運用における作業フローについて図2.6⁽²⁾に示す。実験運用は実験装置の(1)準備、
(2)輸送・搬入、(3)調整・実験準備、(4)ラックへの組込み、(5)カプセルへの組込み、(6)
落下実験、(7)カプセル回収、(8)データ回収・解析、(9)搬出の各プロセスからなる。こ
れらのうち、(4)のラックへの組込み以降、(7)のカプセル回収までが、実験装置が実験者
の手を完全に離れ、実験施設側に引き渡された状態となっており、この間の装置に対する
実験者側が可能なコントロールは、落下前から落下開始まで、前項に述べたインターフェー
スからのみ行うこととなる。このため、実験装置の実験施設側への引渡しまでの間に、実
験者は当事者の実験装置の調製やセッティングのみでなく、電力供給時のショートや、燃
焼による排出ガス・排熱あるいはレーザー・照明などの光源、制御機器の電氣的ノイズなど
が、落下カプセル内の環境や制御系、あるいは混載する他の実験者の装置に与える影響に
対して、十分な確認および対策を行う必要がある。

本研究の第4章、第5章および第6章における実験運用の実際については、各章の実験
方法の項にて述べる。

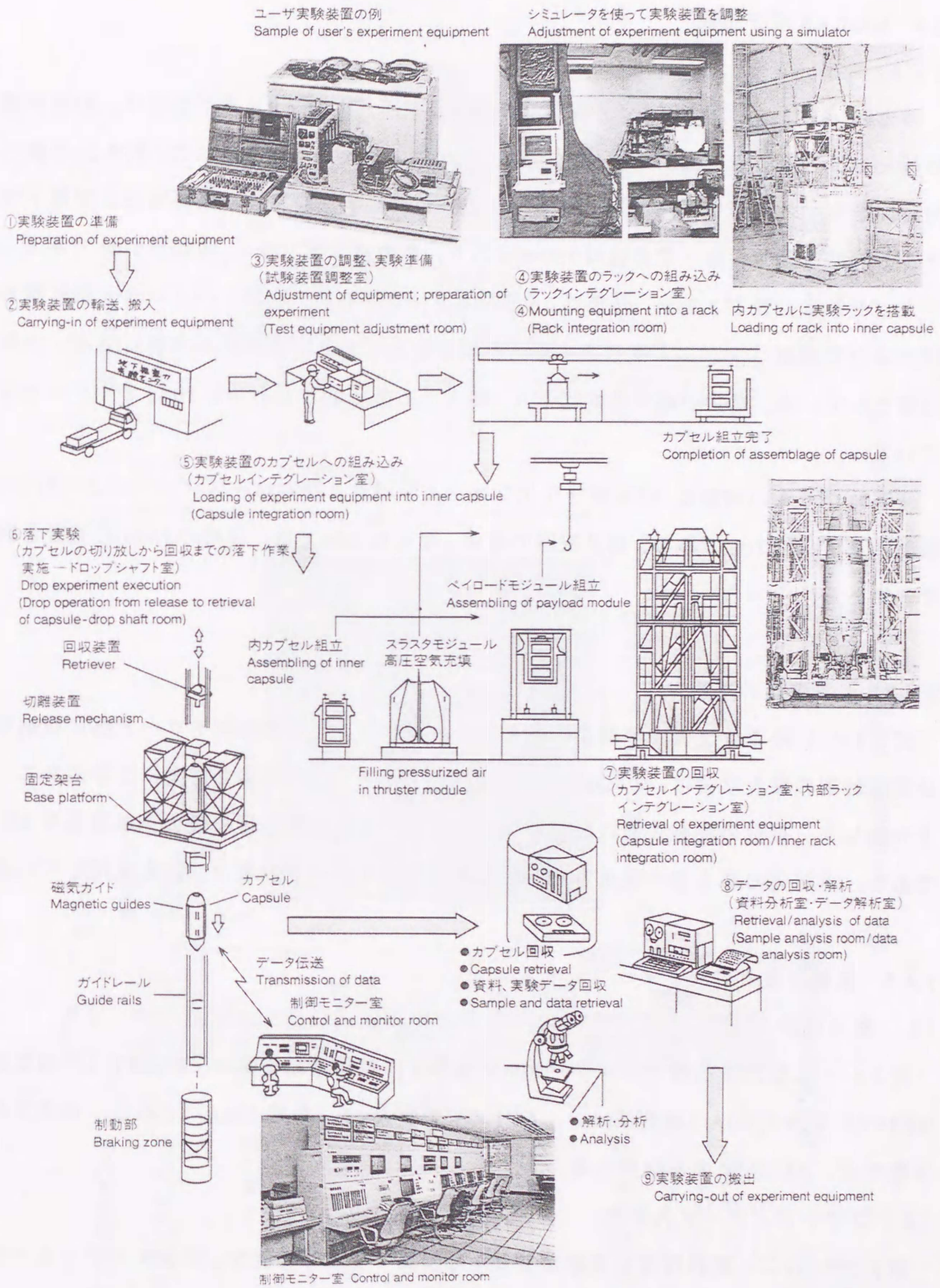


図 2.6 JAMIC の落下実験時における実験運用フロー (2)

2.4 MGLAB 落下施設

2.4.1 概要

岐阜県・土岐市にある(株)日本無重量総合研究所(MGLAB)落下施設は、動燃東濃地科学センター東濃鉦山の第二立坑を利用して、1995年に運用開始された、約4.5sの微小重力時間を有する大規模落下施設である。図2.7⁽⁴⁾に落下実験施設の概要図および落下カプセルの概略を示す。落下塔全長は150mであり、自由落下部100m、制動部50mである。落下カプセルは全長が2.28m、外径は0.9mであり、カプセルノーズ、ペイロード部外胴および上ぶたを連結リングにより結合する一体型となっており、カプセル内部は室温・大気圧に保たれている。真空中落下方式により、得られる微小重力レベルは $10^{-5}g$ オーダーとなっている。

落下カプセルの制動は、円筒型フリクションダンパおよびベローズダンパにより行われ、制動加速度は約10gである。精密機器の搭載・使用については、前節のJAMIC施設と同様可能である。

2.4.2 実験装置の搭載方式

図2.8⁽⁴⁾に落下カプセルの構成概略を示す。カプセル中央部のペイロード部に収納可能な実験装置の最大寸法は、 $\phi 720\text{mm} \times H885\text{mm}$ であり、これを高さ方向に2分割あるいは3分割して、複数の実験装置の混載が可能である。また実験装置の最大搭載重量は400kgである。本研究の第2章で使用した実験装置は、ペイロード部最大寸法を使用している。

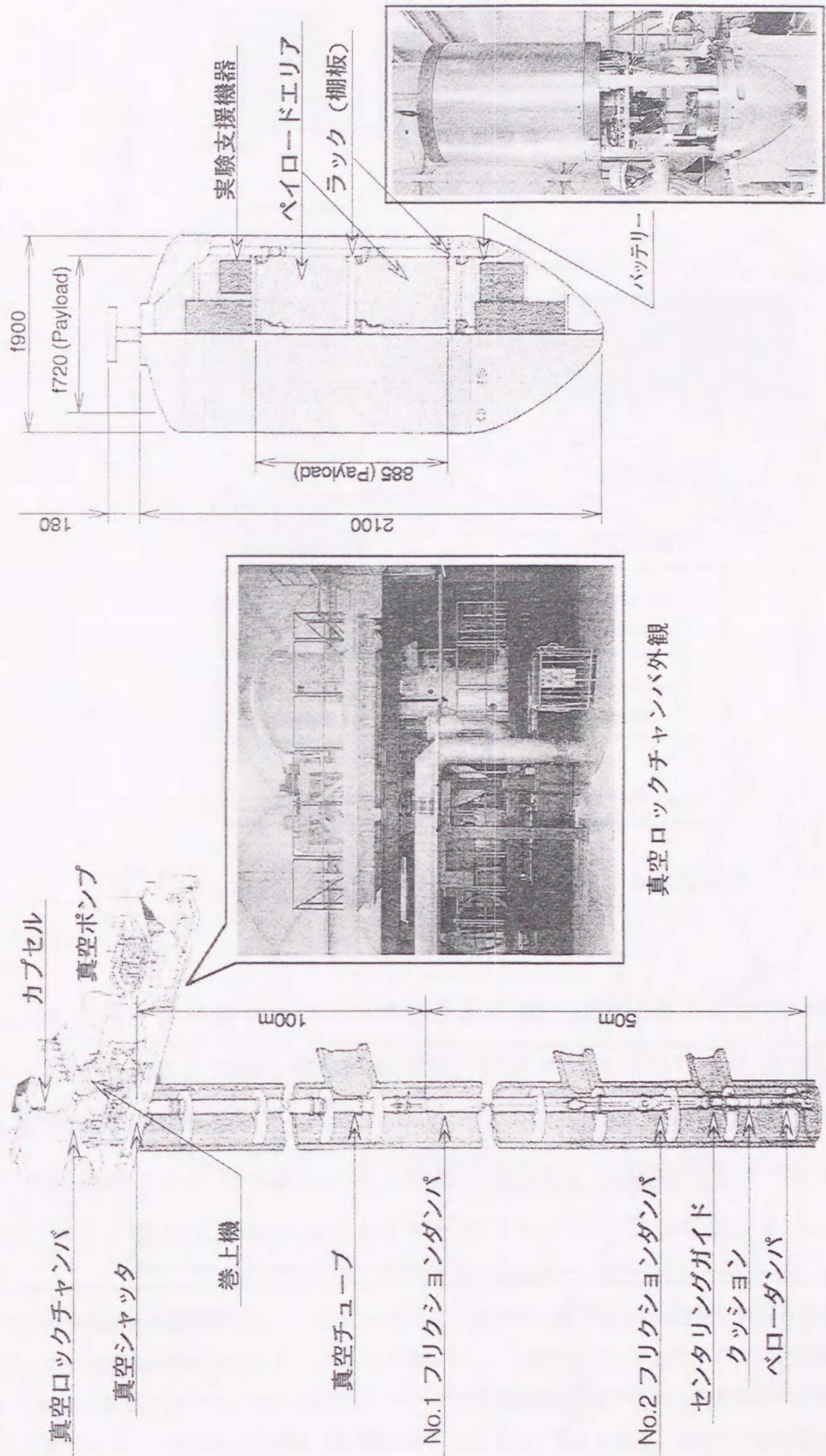
2.4.3 実験装置とのインターフェース

(1) 電力供給

図2.9⁽⁴⁾に電力供給のタイムシーケンスを示す。供給電力仕様は、DC28V(内部電源時DC24V)が最大40A(最短7min)、AC100Vが最大4A(最短5min)である。本研究の第2章では、AC100Vのみ使用した。

(2) コマンド/データ入出力

表2.3⁽⁴⁾(a)に、実験装置と実験カプセルとの間で受渡し可能な、デジタルデータ/デジタルコマンド、(b)にアナログデータ/アナログコマンドの、インターフェースコネクタ仕様を示す。これらのコマンド/データは、前節のJAMIC施設の場合と異なり、実験者のコマンド入力シーケンスについては、カプセルにコネクタが接続されている間に、予め落下



落下実験施設概要図

カプセル概要図

図2.7 MGLAB落下実験施設および落下カプセル概要(4)

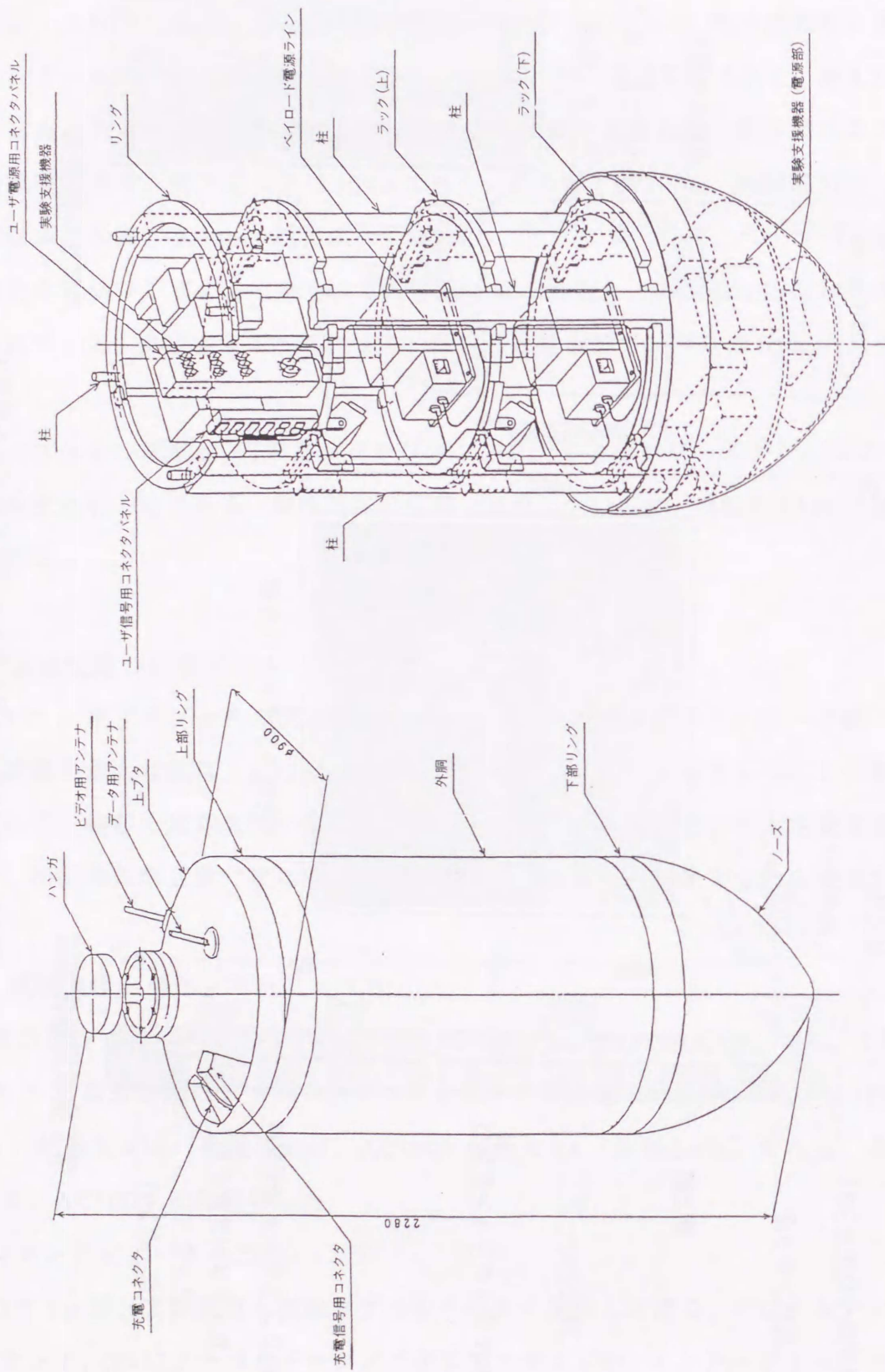


図2.8 MGLAB落下カプセル構成(4)

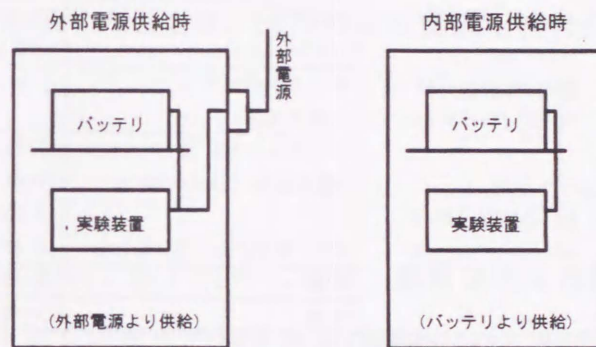
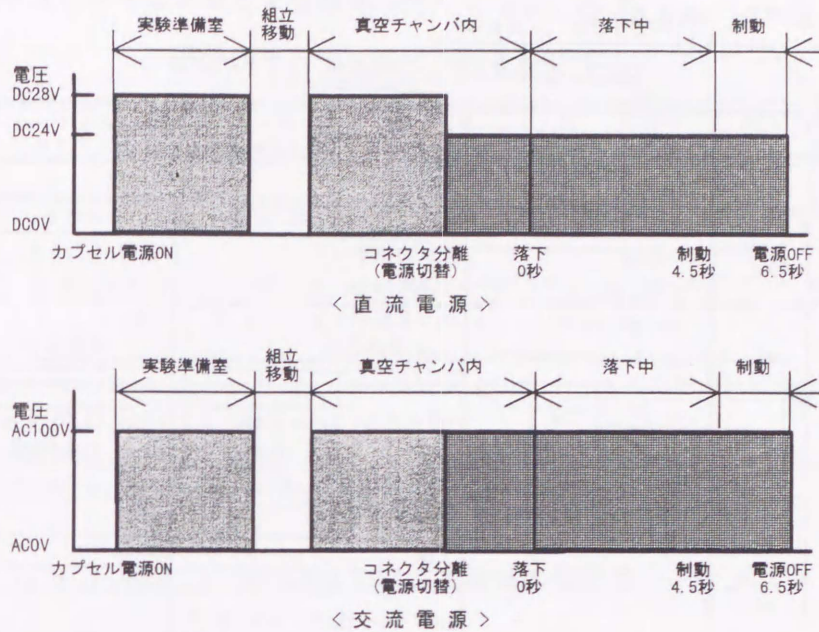


図 2.9 MGLAB の落下実験時における実験装置
への電力供給シーケンス⁽⁴⁾

カプセルのシーケンサにローディングされる^{*}。図 2.10⁽⁴⁾に落下実験時の制御系タイムシーケンスを示す。本研究の第 3 章の実験では、デジタルコマンド 1 点 (DD-50, 27-28) を、 μ g 検知信号検出と同期させて使用している。また、ビデオ信号出力は NTSC が 1ch ある。

データ記録はコンピュータファイルの形に落され、実験時のカプセル内温度、圧力、微小重力レベル、また実験者設定によるデータファイルなどが記録される。

※ このため実験装置の遠隔操作については、コネクタ分離後から落下前までは直接には実行できない。また直接的なコマンド入力が可能な JAMIC 施設においても、落下前コマンドと落下コマンドとのタイミング同期制御は不可能となっている。このような落下前コマンドによる落下コマンドの同期制御は、落下直前の非常事態の回避手段が不可欠である観点より、落下システム設計時の仕様から取り除かれているものと考えられる。そしてこのことは、燃料噴霧の浮遊制御に精確さが必要となる、本研究の第 3 章および第 6 章における、一回噴射の場合の燃料噴射タイミングを、落下前に設定することを難しいものになっている。

表2.3 MGLAB のコマンド/データの接続インターフェース (4)

(a) デジタルコマンド/データの仕様

コネクタ	コネクタ型式	ピンアサインメント	
		信号	ピン番号
SA1	ユーザ側 D-sub 50t [♂] DD-50PF-N(コネクタ) DD-C8-J13-F4-1(7-ト [♂])	デジタルデータ (1ch~12ch)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13
		デジタルデータ (+側コモン)	7, 14
		デジタルコマンド (接点出力, 1ch~12ch)	27-28, 29-30, 31-32, 33-34, 35-36, 37-38, 39-40, 41-42, 43-44, *若い番号のピンを+にとる
	カプセル側 DD-50SF-N(コネクタ) D20418-JF(嵌合 [♂])		45-46, 47-48, 49-50
		予備	15-16
		予備	17-18
		デジタルコマンド (オープンコレクタ出力, 1ch~5ch)	19, 20, 21, 22, 23
		オープンコレクタ用GND	24
	SB1	ユーザ側 D-sub 50t [♂] DD-50PF-N(コネクタ) DD-C8-J13-F4-1(7-ト [♂])	デジタルデータ (13ch~24ch)
デジタルデータ (+側コモン)			7, 14
デジタルコマンド (接点出力, 13ch~24ch)			27-28, 29-30, 31-32, 33-34, 35-36, 37-38, 39-40, 41-42, 43-44, *若い番号のピンを+にとる
カプセル側 DD-50SF-N(コネクタ) D20418-JF(嵌合 [♂])			45-46, 47-48, 49-50
		予備	15-16
		予備	17-18

*型式はすべて日本航空電子製

(b) アナログコマンド/データの仕様

コネクタ	コネクタ型式	ピンアサインメント	
		信号	ピン番号
SA2	ユーザ側 D-sub 25t [♂] DB-25PF-N(コネクタ) DB-C8-J10-F4-1(7-ト [♂])	アナログデータ (1ch~3ch) 入力電圧範囲: ±10V 若い番号のピンを+にとる	1-2, 4-5, 7-8
		カプセル側 DB-25SF-N(コネクタ)	シールド
SB2	ユーザ側 D-sub 25t [♂] DB-25PF-N(コネクタ) DB-C8-J10-F4-1(7-ト [♂])	アナログデータ (4ch~6ch) 入力電圧範囲: ±10V 若い番号のピンを+にとる	1-2, 4-5, 7-8
		カプセル側 DB-25SF-N(コネクタ)	シールド

*型式はすべて日本航空電子製

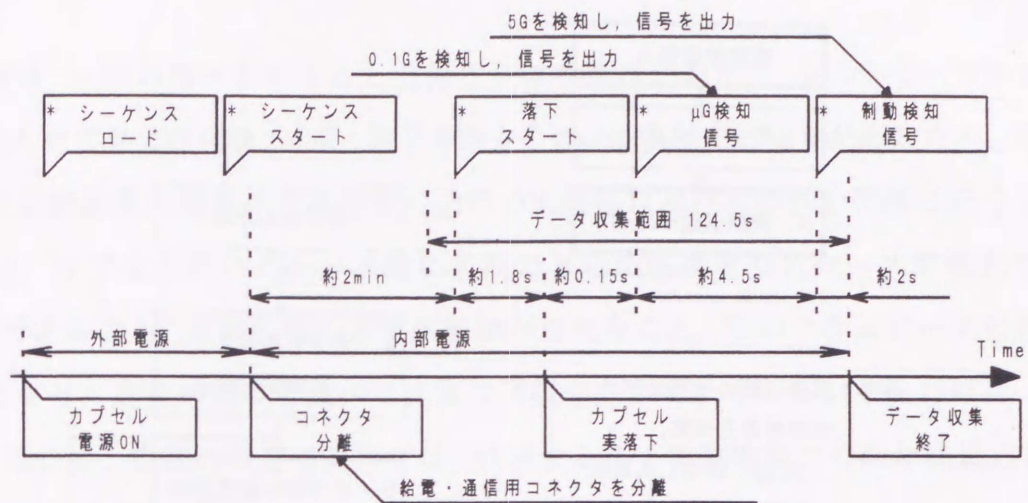


図 2.10 MGLAB の落下実験時の制御系シーケンス (4)

以上のデータ／ビデオ信号の出力は、電波による無線方式により落下中もモニタリングが可能である。

2.4.4 実験運用

落下実験運用フローについて図 2.11 (4) に示す。実験運用は実験装置の (1) 準備, (2) カプセル組み込み, (3) カプセル変重量の測定および調整, (4) 落下実験, (5) カプセル回収・搬出・分解, (6) データ回収・解析などからなる。これらのうち, (2) のカプセル組み込み以降, (5) のカプセル回収・搬出・分解までが, 実験装置が実験者の手を離れている状態にある。前節で述べた JAMIC 施設と異なるのは, 連続して落下実験を行う場合, 実験装置をカプセルに組込んだままで準備作業を行うのが通常であること, またカプセルも比較的小型のため, 施設側の作業人員が少なく, 作業時間も短いことなどである。しかし実験装置の安全性については, JAMIC 施設と同様の基準が適用されており, 実験者は十分な確認および安全対策を施す必要がある。

本研究の第 3 章における実験運用の実際については, 本文の実験方法の項にて述べる。

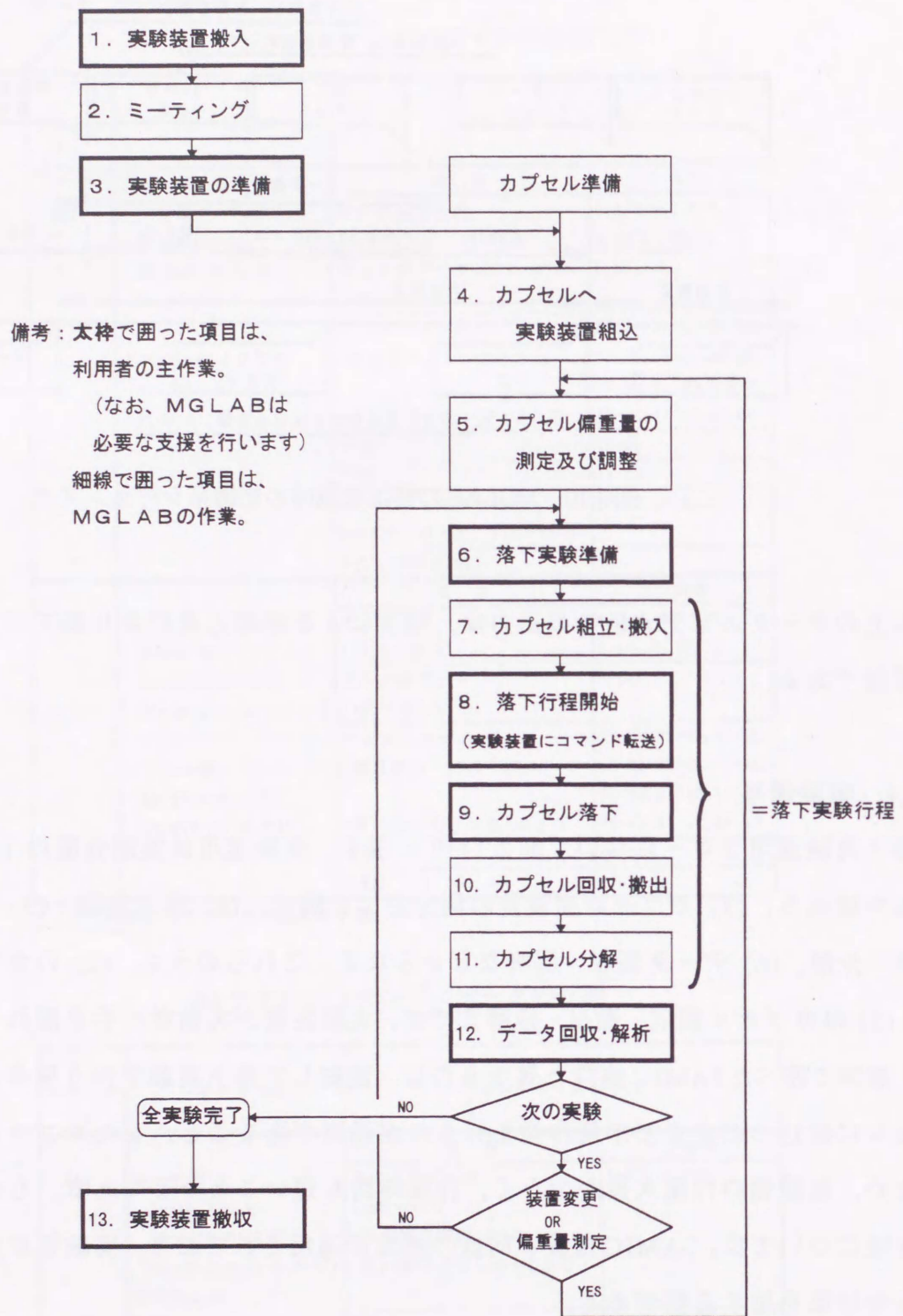


図 2.11 MGLAB の落下実験時における実験運用フロー (4)

2.5 結言

落下実験は、一回の落下を行うこと自体に大きな費用がかかり、かつテーマの実験につき、年間最大で実験出張回数2-4回、落下本数合計20-30本程度と限りがあるため、実験を行いながらの実験装置の調整や最適化を、通常の実験室におけるそれと同等に行うことは難しい。また、カプセルのペイロード部に搭載できる実験装置のスペースが最大でも0.6-0.8m³程度であること、実験装置の遠隔制御が不可欠なこと、取得できるデータの性質が限られることなど、通常の実験と比べて非常に制限の多い実験である。それだけに、実験装置の設計・製作や、事前の準備においては、使用する落下実験施設で可能な実験内容を、詳細に検討することが第一の前提条件となる。また、カプセル搭載時のカプセル本体や混載時の他装置への影響、および微小重力環境という特異な実験環境において起こり得る問題についても、十分な考慮が払われていなくてはならない。

しかしこういった制約の中で、貴重な微小重力時間を可能な限り有効に生かしていくことを、実験系の構想、実験装置の設計・製作、および実験運用の実際の時点で常に考慮することが、実験者にとって最も重要な点の一つである。

次章以降において、これらの施設で行った微小重力実験およびそれらで得られた結果について述べる。

第3章 微小重力下におけるパルスレーザホログラフィー法を用いた噴霧粒径測定

3.1 緒言

燃料噴霧により混合気を形成し燃焼させる噴霧燃焼においては、燃焼室内に噴射される噴霧の微粒化過程が燃焼に重要な影響を及ぼす。とくに、噴霧燃焼を利用した実在機関（ディーゼル機関、筒内直接噴射式ガソリン機関、ガスタービンなど）においては、使用する噴射ノズルのタイプ、運転条件の変化、噴射条件の変化によって、燃焼室内での噴霧の微粒化状態が変化し、その燃焼特性が大きく異なってくることが考えられる。したがって、このような実在機関における噴霧燃焼の基礎的研究として、燃料噴霧微粒化過程を評価することが重要となる。

燃料噴霧微粒化過程の最も基本的な評価項目として、噴霧液滴の粒径分布が最も重要な評価項目であると考えられる。液滴の大きさおよび数密度が、燃料の酸化剤との拡散・混合や、燃焼特性を直接的に支配するパラメータの一つとなるためである。近年、微小重力場において噴霧液滴群を浮遊・分散させ、それが混在した可燃混合気の点火および火炎伝播特性を調査する基礎的研究が行われている^{(1),(2)}が、それらにおける重要な基礎データとなる噴霧粒径および数密度分布の測定については、ほとんど実施例がみられないのが現状である。火炎伝播挙動に液滴群の空間分布が及ぼす影響を調べるうえでは、点測定・面測定などの平均化プロセスをもった手法や、撮影面のみの2次元測定法では必ずしも充分とはいえず、3次元情報の把握が可能な測定手法の、微小重力実験への適用の意義は大きいものといえる。

レーザホログラフィー測定法については、通常重力場においてディーゼル噴霧粒径測定への適用⁽³⁾、シュリーレン再生によるディーゼル噴霧液相/蒸気相濃度の分離計測⁽⁴⁾などの研究が精力的に行われているが、微小重力場における適用は、世界的に例が見られていない。

本実験では、日本無重量総合研究所（MGLAB, 岐阜県土岐市）の4.5s自由落下施設で得られる微小重力環境を利用して浮遊・分散させた噴霧液滴の粒径の測定を、パルスレーザホログラフィー法により行う。

3.2 ホログラフィーの計測原理概要

ホログラフィーでは、時間的・空間的コヒーレンスの高い光源を用いる必要がある。す

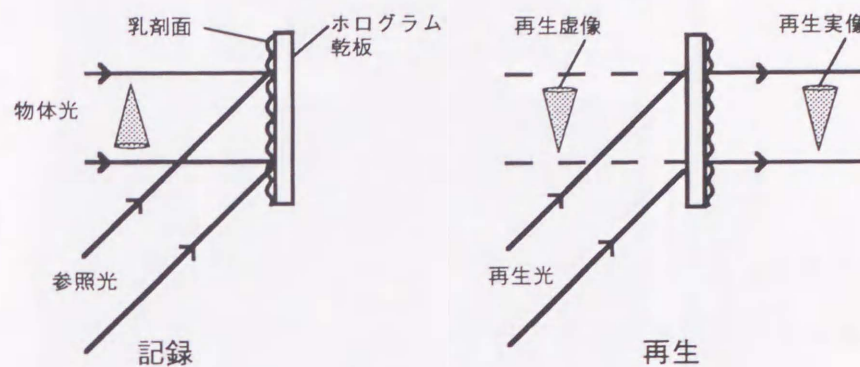


図 3.1 透過型オフアキシス光学系のホログラム記録・再生の概念図

なわち単一波長で到達距離による位相変化がきわめて少なく、光波の位相が空間的にそろっているような、レーザ発振などによる光源である。これは、以下に述べるような撮影および再生光学系を構成するためには不可欠な条件となる。

本実験で使用しているような、透過型オフアキシス光学系の概要は、次のように述べられる。レーザ光をビームスプリッタによって分割して、ビームエキスパンダ等によって平行光とし、一方の光（物体光）を撮影対象物に照射すると、物体から反射光ないし散乱光が生じる。散乱光は、物体から適当な距離に設置した乾板に露光される。もう一方の光（散乱光）は直接乾板に照射・露光する。これら2つの光を重ねて照射・露光し、これを現像したホログラム乾板には、1000～7000本/mmの密度で、非常に細かい物体光と参照光の干渉縞が記録されている。この干渉縞はレーザ光分割後、物体光と参照光が再び重ね合わされた結果、物体光の散乱を生じる撮影対象の3次元位置にしたがって互いに強め合ったり、弱め合ったりする現象（干渉）によって生じる。すなわちホログラムは、写真のように物体の像そのものをフィルムに記録したものではなく、参照光を導入することにより、物体から伝播してくる光を干渉縞の形で凍結して記録したものといえる。

ホログラム再生は、現像したホログラム乾板上に、物体光との干渉縞のかたちで記録・凍結した撮影対象の3次元位置を、撮影時の参照光と等価な条件の光源を照射することにより行う。再生光照射によって、撮影対象は、撮影時に物体光が照射されたのと等価な位置に、乾板からの回折光の形で3次的に再生される。透過型オフアキシス光学系のホログラム記録・再生の概念図を図 3.1 に示す。

光学的記述は以下のようなになる^{(5),(6)}. 乾板面における物体光と参照光の複素振幅 $*$ を O, R とすると, 乾板上における干渉縞の強度分布 I は次式となる;

$$\begin{aligned} I &= (O + R)(O + R)^* \\ &= |O|^2 + |R|^2 + RO^* + R^*O \\ &= I_o + I_r + RO^* + R^*O \end{aligned}$$

なお $*$ は共役を表し, I_o, I_r はそれぞれ物体光, 参照光の強度である.

記録されたホログラムに再生照明光を照射すると, 以下のような三種類の光が生じる;

$$RI = R(I_o + I_r) + RRO^* + RR^*O$$

右辺第一項はホログラムをそのまま透過する光, 第二項はホログラムの前に焦点を結ぶ共役像(実像)である. 第三項は元の物体と全く同じ光で直接像(虚像)と呼ばれるものである.

透過型ホログラフィーは参照光の取り扱いにより, 物体光と参照光を同一光軸で与え, 参照光が物体を透過するインライン型ホログラフィーと, 参照光が物体中を透過しないオフアクシス型ホログラフィーに分けられる. インライン型ホログラフィーは光学系の配置や再生が簡単であるが, 濃度の高い粒子群には適用が難しい. オフアクシス型ホログラフィーは光学系の配置や再生が複雑であるが, 参照光が乱されないので良好な再生像が得られる. また, 比較的濃度の高い粒子群にも適用可能である.

3.3 実験装置および方法

3.3.1 ホログラム撮影系

図3.2 (a), (b), (c)に, ホログラフィー落下実験装置の外観および撮影系概略を示す. (a)は遮光のためのカバー取付時外観, (b)はカバー取外し時外観, (c)はホログラム撮影系の概略である. 実験装置は, 燃料噴射系, 制御系に, Nd:YAG レーザ(第2高調波532nm)および光学系からなるホログラム撮影装置を組み合わせたものである. 光学系には, 噴射ノズルからの噴霧を行う噴霧容器が組み込まれている.

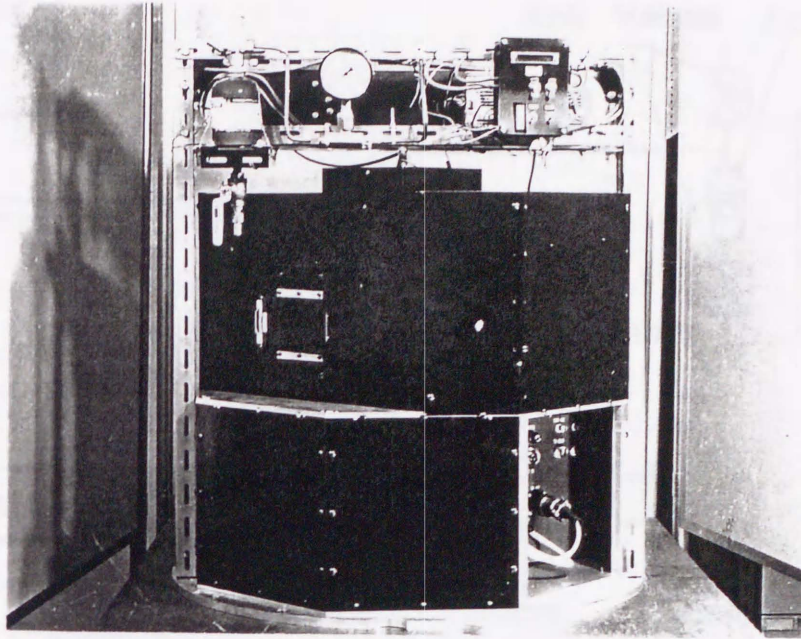
※ 一般に, 角周波数 ω , 任意の点 x, y, z における振幅 $a(x, y, z)$, 空間依存位相成分 $\phi(x, y, z)$ のとき, 単色正弦波形光波 $V(x, y, z, t)$ を,

$$V(x, y, z, t) = a(x, y, z) \cos \{ \omega t + \phi(x, y, z) \} = \text{Re} \left[a(x, y, z) \exp \{ i \phi(x, y, z) \} \exp(i\omega t) \right]$$

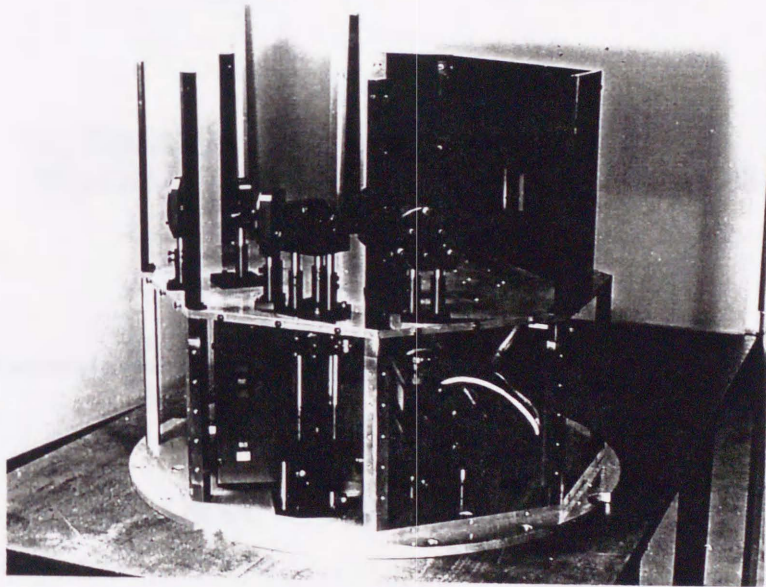
のように複素関数表示した場合の, 空間依存項

$$a(x, y, z) \exp \{ i \phi(x, y, z) \}$$

を光波の複素振幅と呼ぶ. 光波の空間的分布のみを論ずる場合は, $V(x, y, z)$ を複素振幅のみで記述するのが習慣となっている ($\text{Re}[\]$ は実数部を表す).

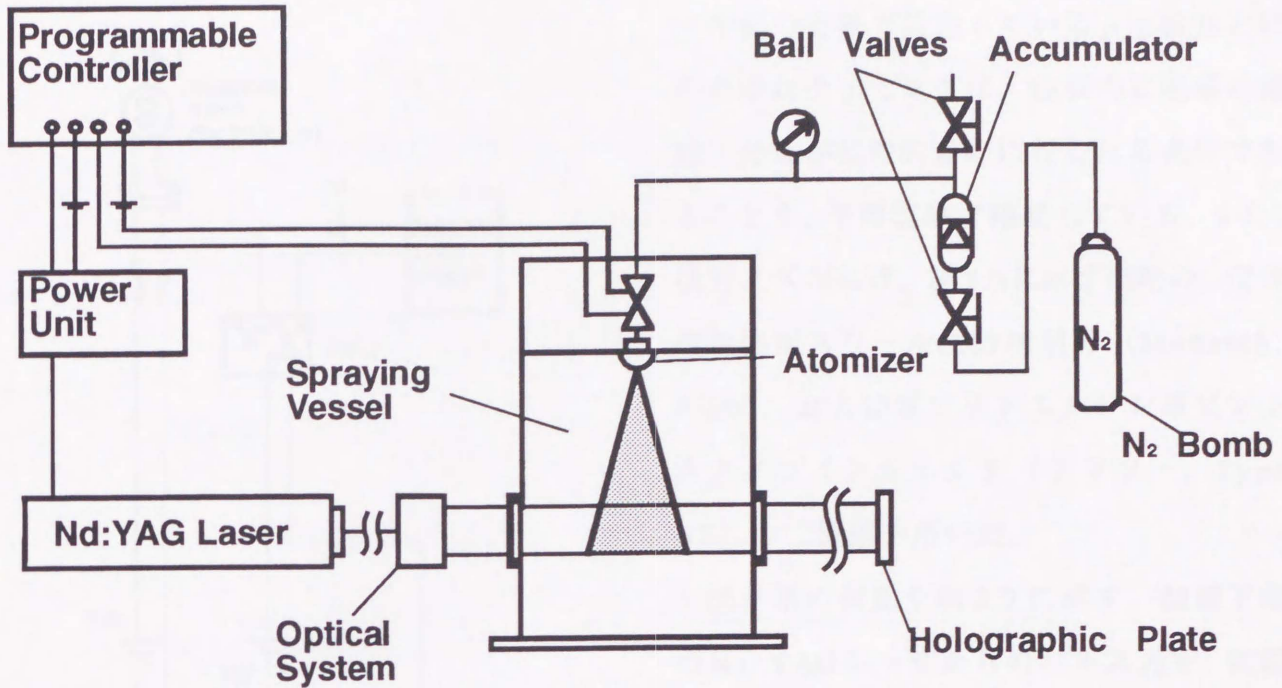


(a) カバー取付時外観



(b) カバー取外し時外観

図 3.2 ホログラフィー落下実験装置概略



(c) ホログラム撮影系概略

図 3.2 ホログラフィー落下実験装置概略

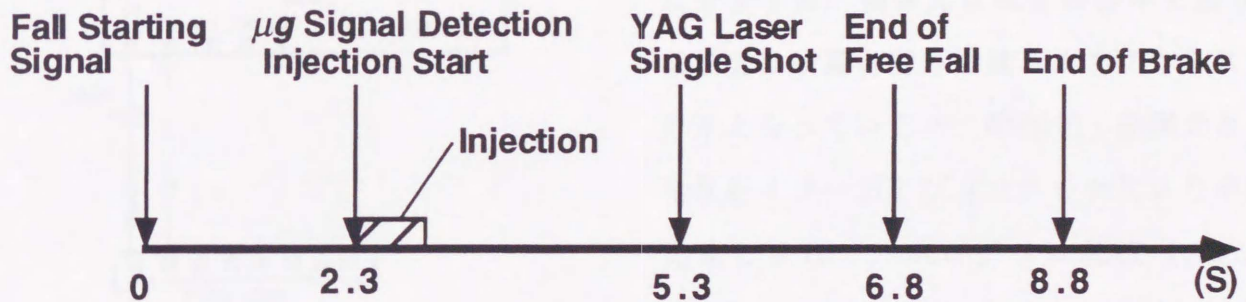


図 3.3 落下実験時の装置作動シーケンス

落下実験における実験装置の作動シーケンスについて図 3.3 に示す。落下開始直後の μg 検知信号と同期して、アキュムレータにより加圧した灯油を、ノズルから噴霧容器内に噴射する。噴射ののち、 μg 検知後 3s または 3.5s にレーザ照射し、写真乾板への容器内の噴霧液滴のホログラム撮影を行う。以上の制御は実験装置に搭載したプログラマブルコントローラ（シャープ、New Satellite W-10）によって行う。また図 3.4 に制御系の配線図、図 3.5 にプログラマブルコントローラのシーケンスラダー図を示す。

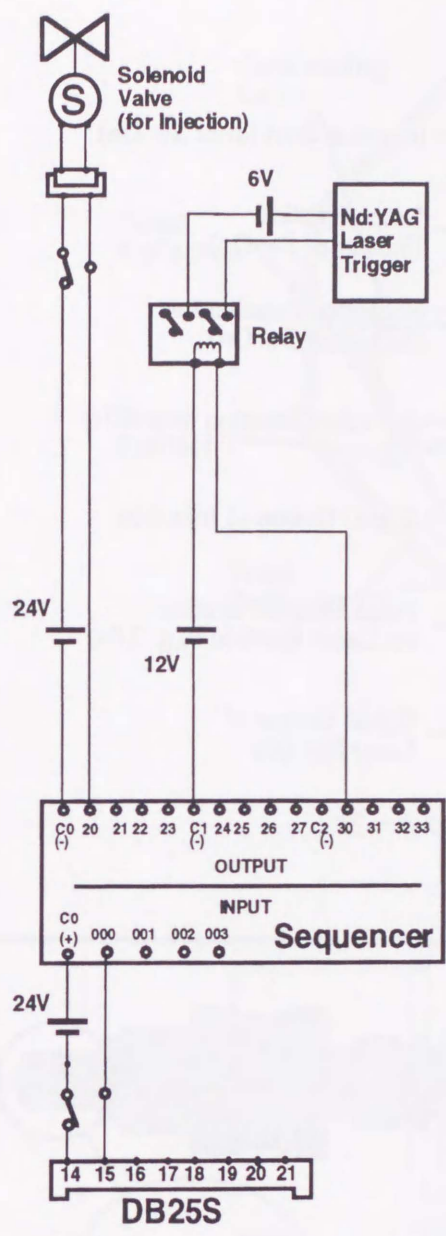


図 3.4 制御系配線図

今回の実験で設定している μg 検知と同時の噴射タイミングは、容器内に噴霧の浮遊・分散が比較的良好に行われる条件であることを、予備実験で確認している。また、噴射ノズルには、図 3.6 に示す概略の、定常燃焼器用スワール圧力噴射弁 (Monarch, F-60)、およびガソリンエンジン用ピントルタイプインジェクタ (デンソー, Type HF) の二種類を用いた。

光学系の構成を図 3.7 に示す。装置下部の Nd:YAG レーザからのパルス光を、装置下部のスペイシャルフィルタで拡大し、さらに装置上部のホログラム光学系のビームスプリッタで物体光光路および参照光光路に分割する。物体光は噴霧容器中を通り、参照光は噴霧容器外を通るオフ軸光学系となっている⁽⁴⁾。物体光・参照光とも全反射ミラーおよびコリメータにより平行光束とされて、ホログラム乾板 (Agfa-Gevaert, 8E56, 解像度 5000 本/mm) に、噴霧の物体光・参照光による干渉じまが結像される。

図 3.8 に噴霧容器内部の構造を示す。容器内の中央上方から噴霧が行われ、微小重力環境では噴霧が浮遊・分散する。レーザ光 (物体光) は、容器側方に取り付けた観察窓を通して、容器内を透過する。このとき、容器内に分散した噴霧液滴が観察窓に付着するのを避けるため、容器内部の観察窓の縁に円筒形のフード型カバーを取り付けた。また、噴霧液滴の大きさを較正するため、図 3.9 に示すスケールを取り付けた。スケールは公称直径 330 μm , 235 μm , 128 μm の 3 本のワイヤーを、平行・段違いに、レーザ光入射方向 25mm 間隔で取り付けたものである。

このようにして乾板乳剤面上に記録された物体光と参照光の干渉じまを、現像を行って

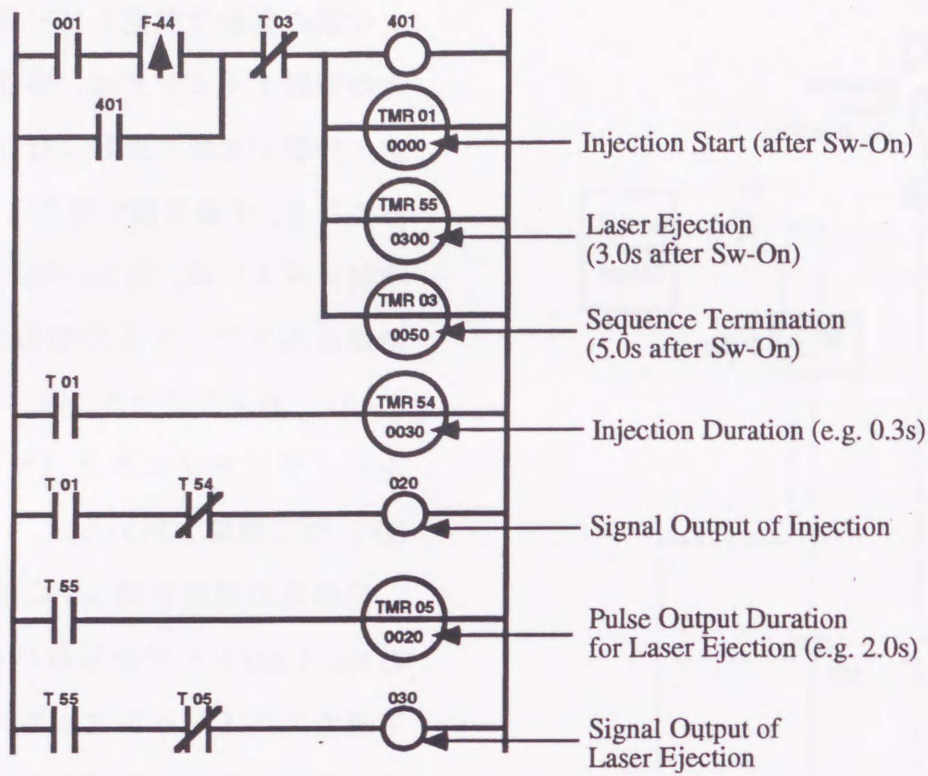


図 3.5 シーケンスラダー図

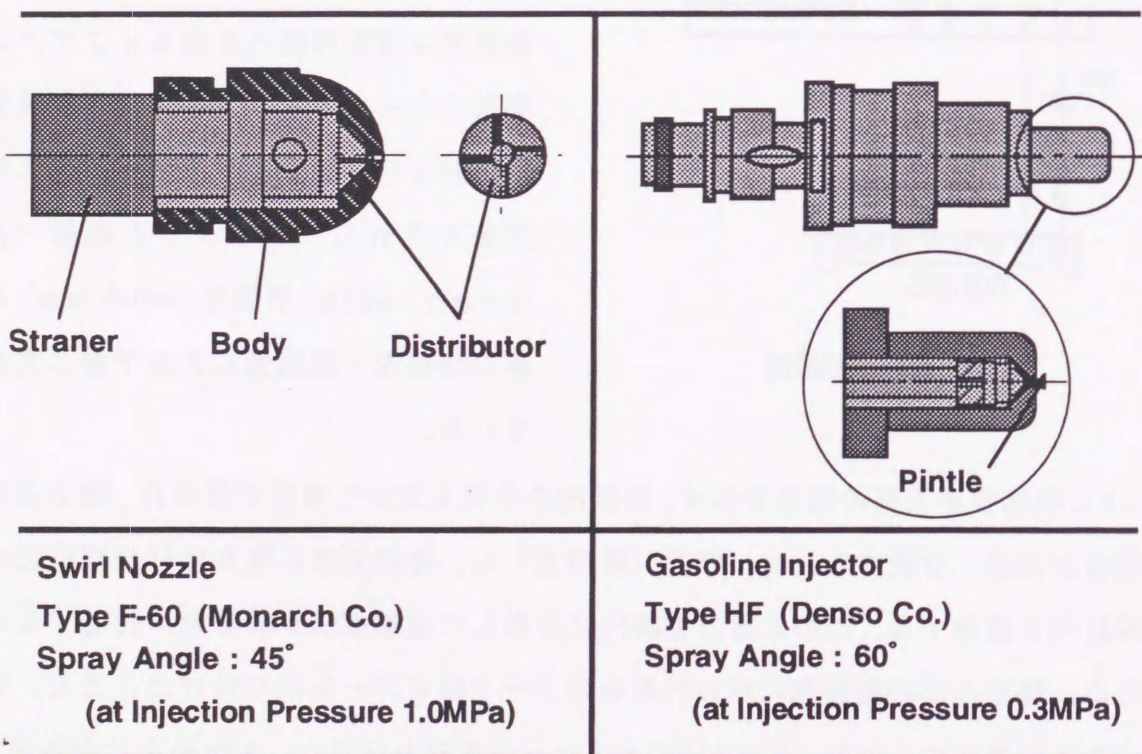


図 3.6 実験に使用した噴射ノズルの概略

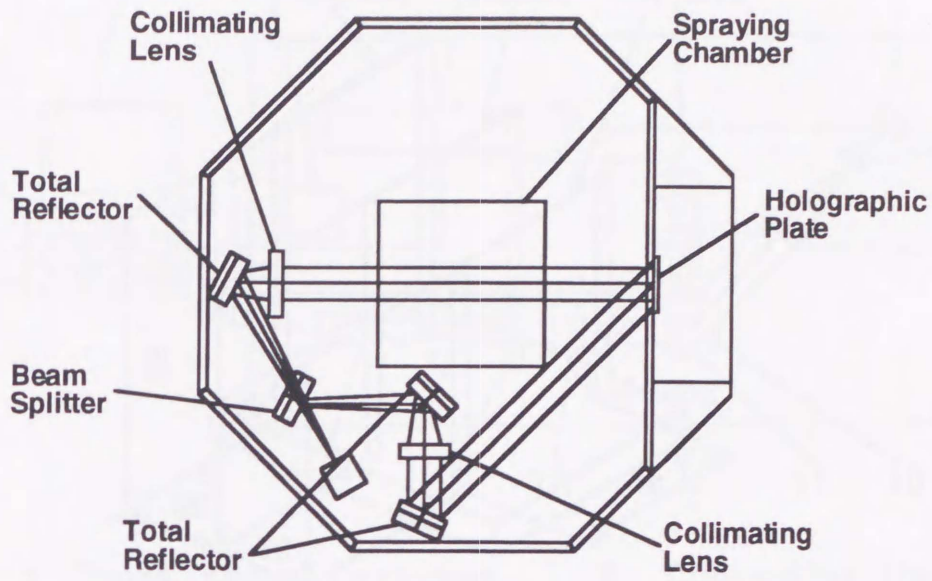


図 3.7 ホログラフィー撮影光学系概略

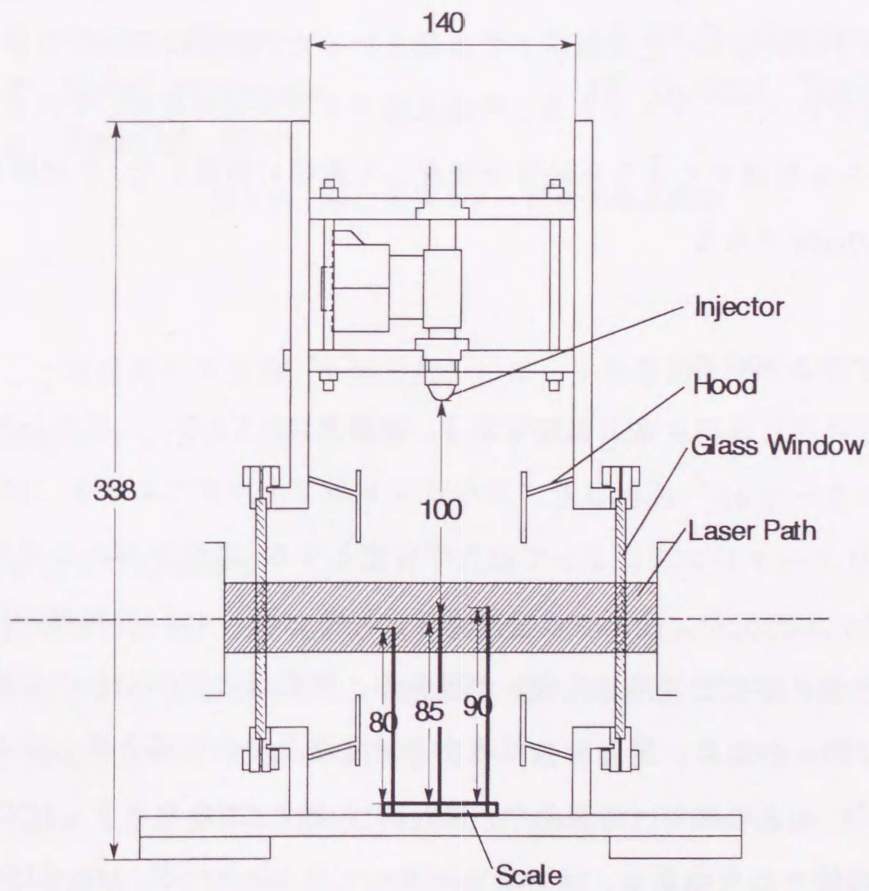


図 3.8 噴霧容器内部の構造

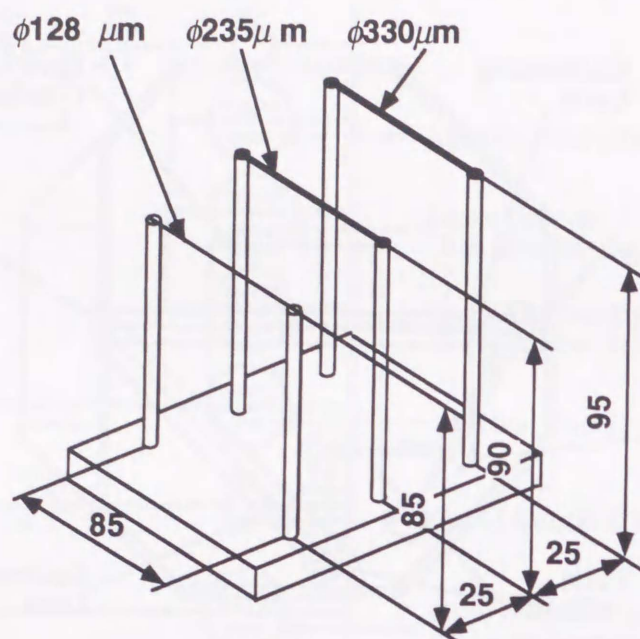


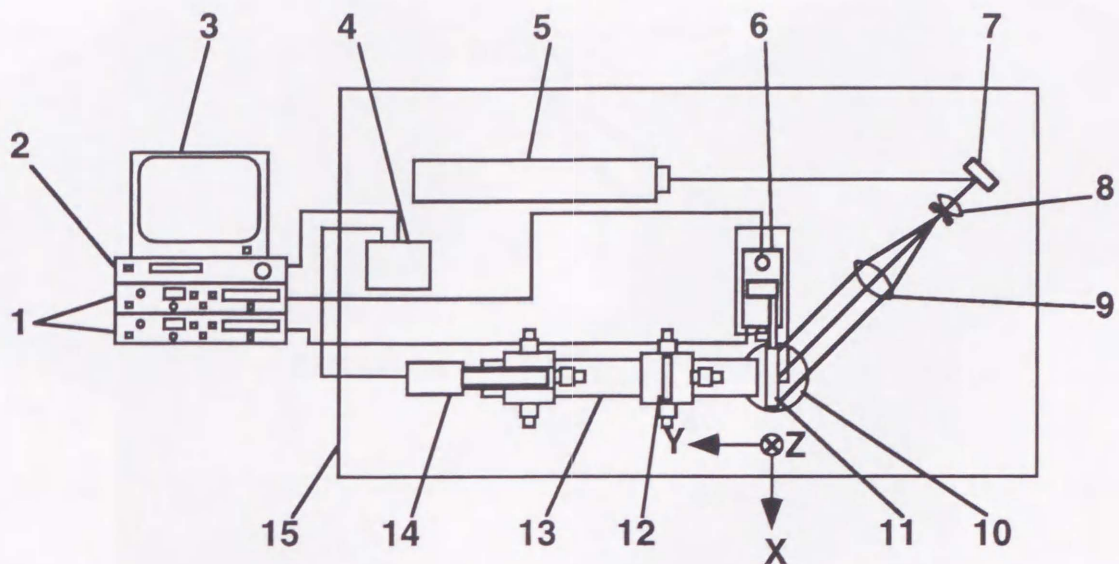
図 3.9 粒径較正用スケール概略

適切な再生光学系により再生すると、噴霧液滴群のホログラム 3次元画像が得られる。撮影後のホログラム乾板は、完全暗室下で現像を行った。現像に使用した現像液は Kodak D-19、定着液はフジフィックスである。現像液温および現像時間は、それぞれ 20℃、3min であり、現像むらを低減するよう室温等を考慮して適切に調節した。また停止時間は 1.5min、定着時間は 10min である。

3.3.2 ホログラム再生系

図 3.10 にホログラム再生系の概略を示す。連続光 Nd:YAG レーザから照射されたレーザー光を全反射ミラーで 45° 反射させ、スペイシャルフィルタユニット（ピンホール径 10 μm）およびコリメータレンズによって拡大平行光とする。現像後のホログラム乾板の非乳剤面に、この拡大平行光を、撮影時の参照光の入射角と同じ 45° の角度で照射すると、乳剤面側にホログラム再生像（再生実像）が現れる。再生像の乾板からの距離は、撮影光と再生光の波長が同一のため、撮影時の乾板から対象物までの距離と等しくなる。

再生像はズーム光学鏡筒（清和光学，MS-101）付き CCD カメラ（3CCD，SONY）により総合倍率 51 倍で拡大撮影し、画像はコンピュータ（シャープ，MN-7150）に取り込んだ。再生像の 3 次元的撮影位置は、まず画面平面方向（X 軸，Z 軸方向）に、コントローラ付き二軸パルスステージ（日本科学エンジニアリング，PC-101）により乾板を移動させ、調整



- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1 Pulse Motor Controller | 9 Collimating Lens |
| 2 Video Tape Recorder | 10 Rotary Stage |
| 3 Monitor | 11 Holographic Plate |
| 4 Camera Adaptor | 12 Scale |
| 5 He-Ne Laser | 13 Optical Rail |
| 6 Pulse Stage | 14 CCD Camera |
| 7 Total Reflector | 15 Optical Table |
| 8 Spatial Filter | |

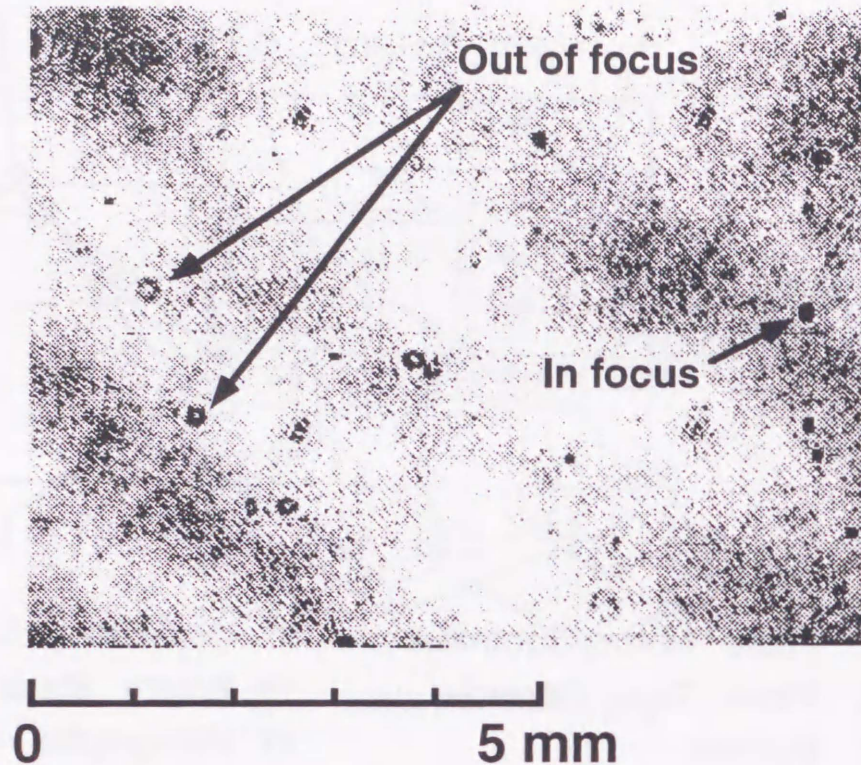
図 3.10 ホログラフィー再生光学系概略

を行った。そして画面奥行き方向（Y 軸方向）には、手動微動ステージにより CCD カメラを移動させ、調整を行った。

3.3.3 画像解析および粒径測定

ホログラム再生像の撮影においては、撮影画面上で In focus となっている液滴が一つ以上ある場合に、画像の取込みを行った。液滴の X 軸、Z 軸位置は画面上位置から、Y 軸位置は CCD カメラ微動ステージ位置から決定した。取り込んだ各画像から、ソフトウェア (Adobe, Photoshop 4.0 および Media Cybernetics, Image-Pro Plus 3.0) による画像処理および計測後、各液滴の X, Y, Z 座標および液滴直径の計 4 種類のデータを得た。

画面拡大の総合倍率は、図 3.9 に示したスケールの、乾板に写し込んだワイヤー直径から較正した。図 3.11 に取り込み画像の一例を示す。CCD カメラ微動ステージの前後によって、



Gasoline Injector
 $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$
 $\Delta t_{inj} = 0.2 \text{ s}$

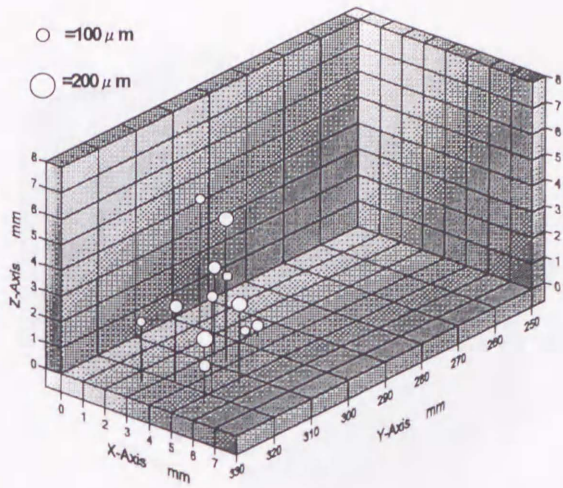
図 3.11 取り込み画像

画面上で黒い中実の液滴像の輪郭が最も明確になるステージ位置を、In focus 位置としている。

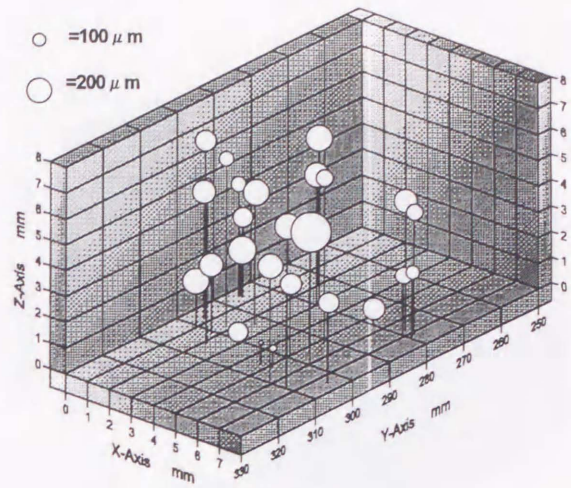
3.4 実験結果および考察

図 3.12 (a) ~ 図 3.12 (l) には、各実験条件における噴霧液滴分布の 3 次元表示を示す。噴霧液滴の存在する座標位置は X, Y 平面に対して鉛直線を引いて示した。また、X, Z 軸方向を基準にした時、Y 軸方向は 0.18 倍、液滴粒径は 3.9 倍のスケールリングを行っている。

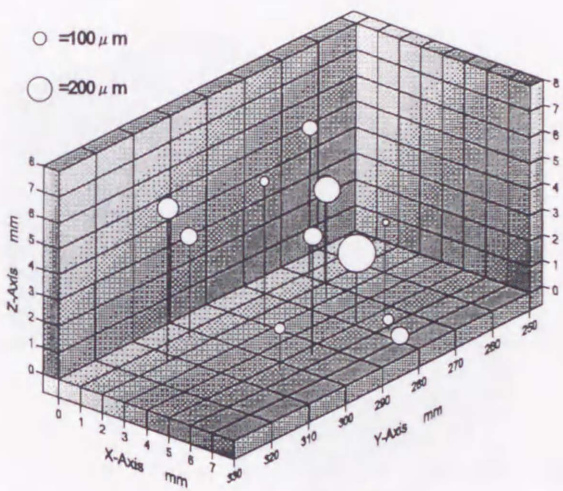
図 3.12 (a) ~ 図 3.12 (d) の Y 軸は、乾板から 250 ~ 330 mm, 図 3.12 (e) ~ 図 3.12 (l) の Y 軸は同 180 ~ 260 mm の範囲になっている。これはスワールノズルを使用した時に噴霧容器の位置が、ガソリンインジェクタを使用した時よりも乾板から離れていたことによる。噴霧容器内スケールの $\phi 235 \mu\text{m}$ のワイヤの乾板からの距離は、スワールノズル使用時は約 293 mm, ガソリンインジェクタ使用時は約 218 mm である。後者について若干撮影画質が前



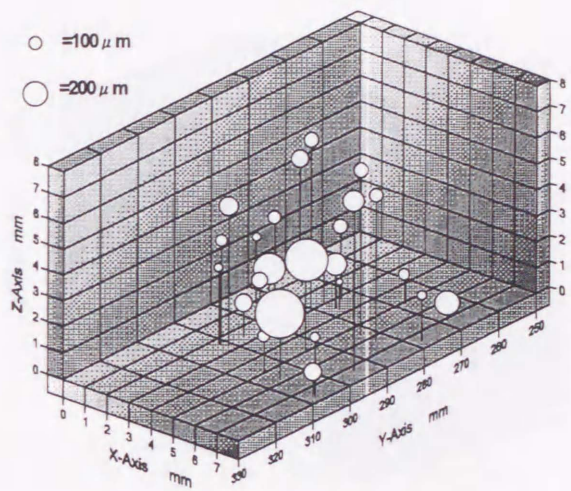
(a) $P_{inj} = 0.05 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.5 \text{ s}$



(b) $P_{inj} = 0.05 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 1.0 \text{ s}$

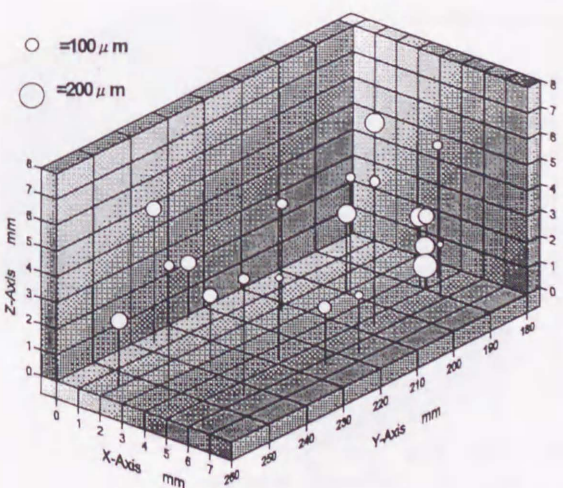


(c) $P_{inj} = 0.1 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.5 \text{ s}$

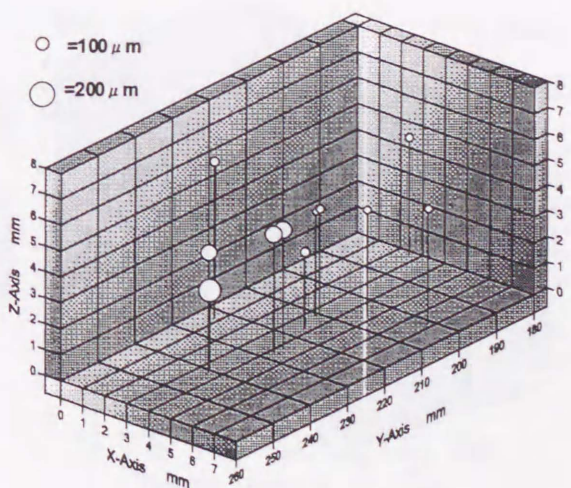


(d) $P_{inj} = 0.1 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 1.0 \text{ s}$

Swirl Nozzle



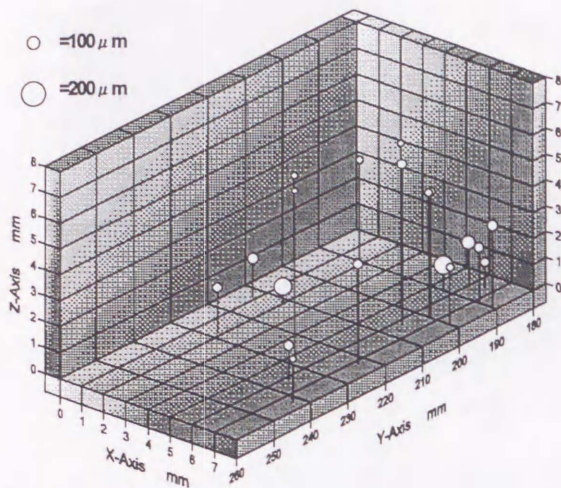
(e) $P_{inj} = 0.1 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.5 \text{ s}$



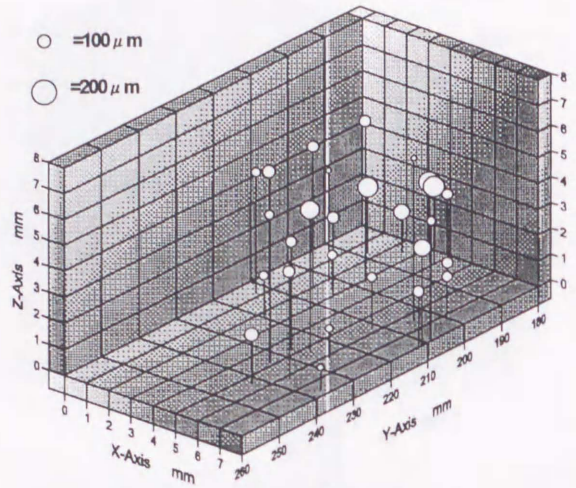
(f) $P_{inj} = 0.1 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 1.0 \text{ s}$

Gasoline Injector

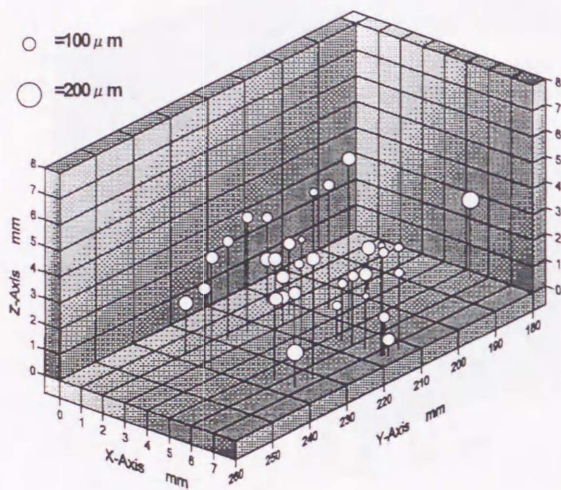
図 3.12 粒径分布の3次元表示
((a) - (d) スワールノズル (e), (f) ガソリンインジェクタ)



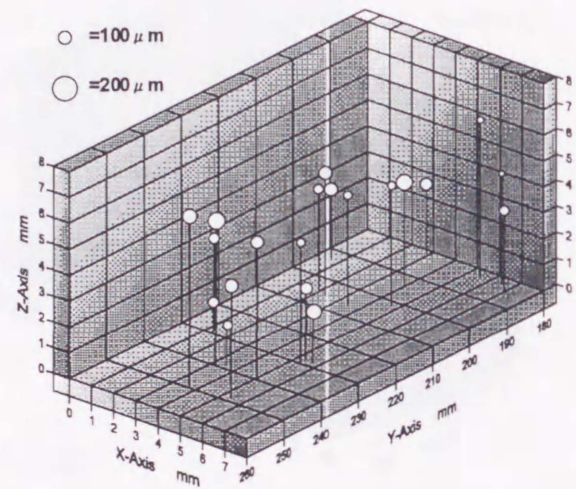
(g) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.1 \text{ s}$



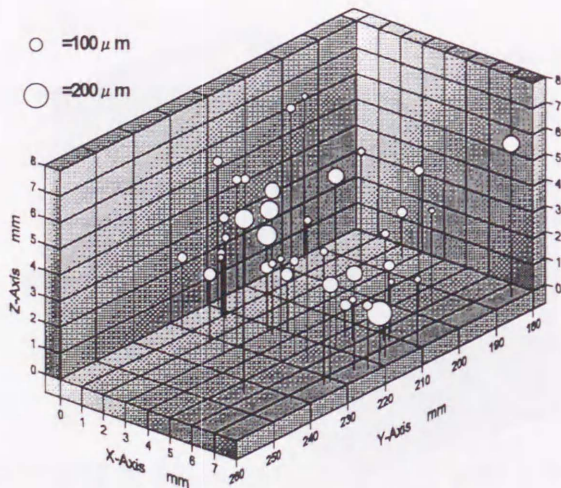
(h) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.2 \text{ s}$



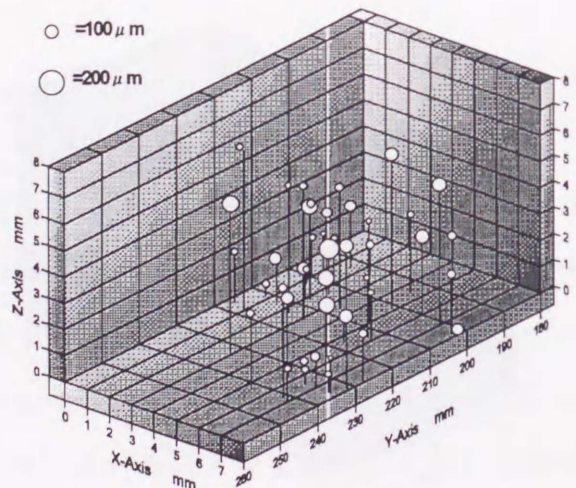
(i) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.3 \text{ s}$



(j) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.5 \text{ s}$



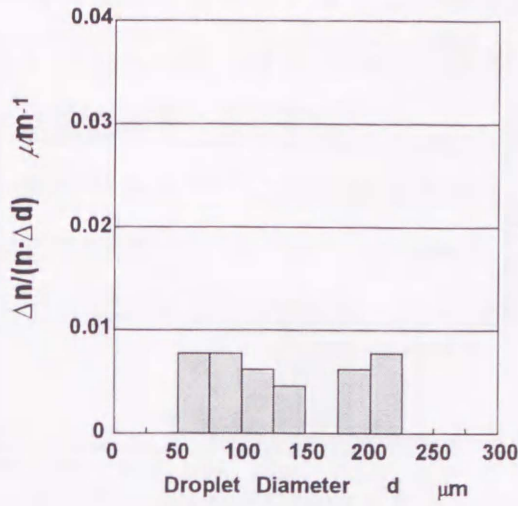
(k) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.75 \text{ s}$



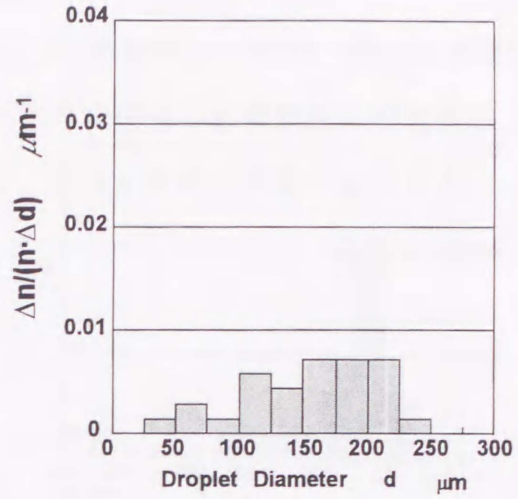
(l) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 1.0 \text{ s}$

Gasoline Injector

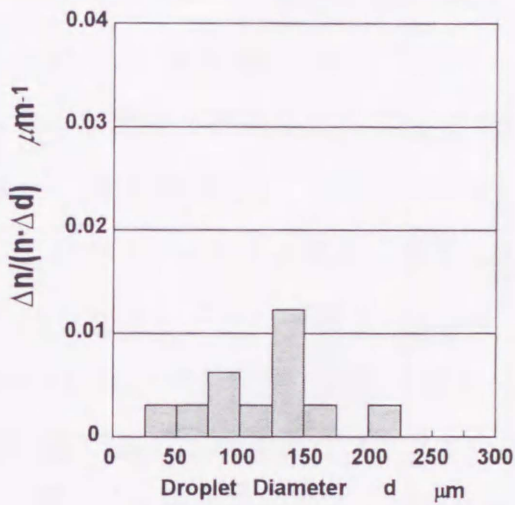
図 3.12 粒径分布の3次元表示
(g) - (l) ガソリンインジェクタ



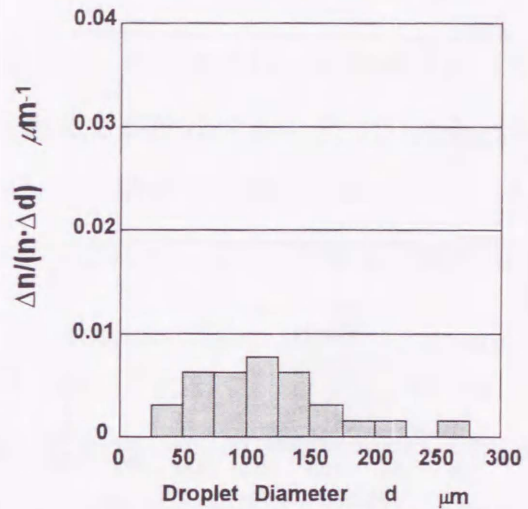
(a) $P_{inj} = 0.05$ MPa, $\Delta t_{inj} = 0.5$ s



(b) $P_{inj} = 0.05$ MPa, $\Delta t_{inj} = 1.0$ s

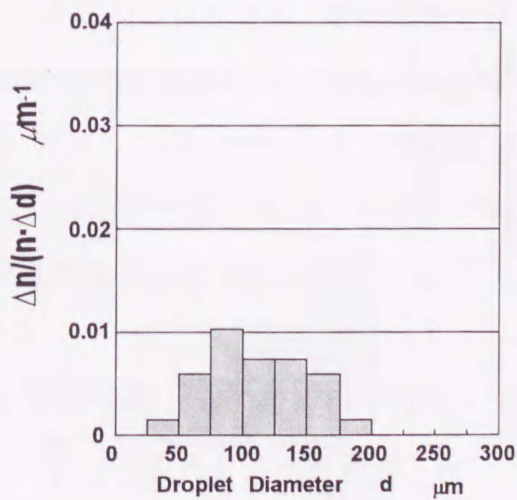


(c) $P_{inj} = 0.1$ MPa, $\Delta t_{inj} = 0.5$ s

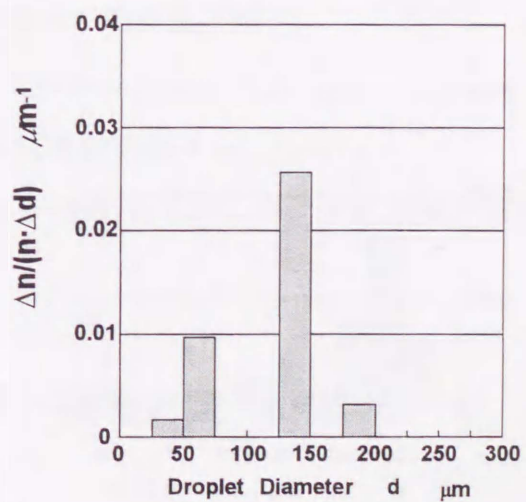


(d) $P_{inj} = 0.1$ MPa, $\Delta t_{inj} = 1.0$ s

Swirl Nozzle



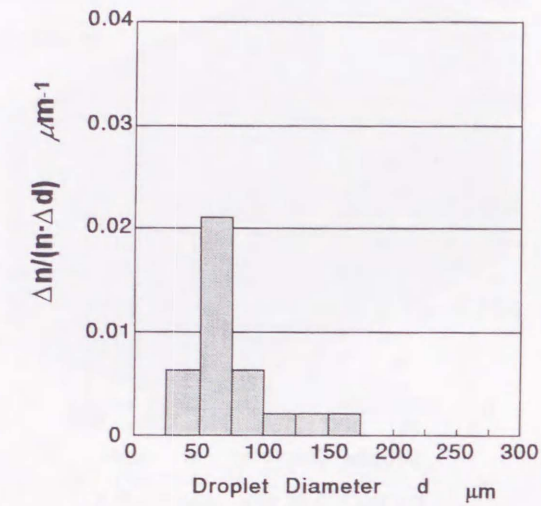
(e) $P_{inj} = 0.1$ MPa, $\Delta t_{inj} = 0.5$ s



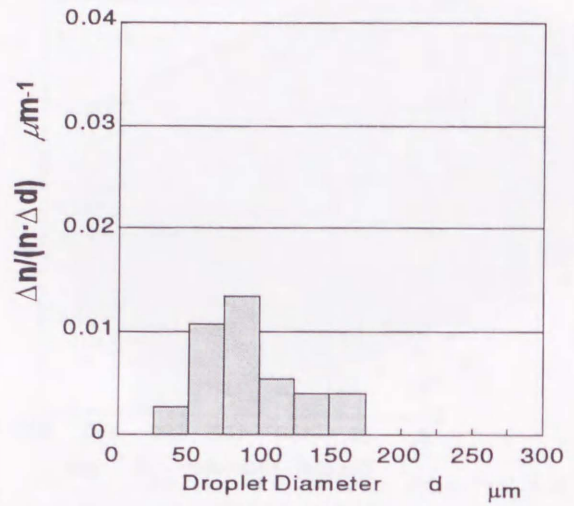
(f) $P_{inj} = 0.1$ MPa, $\Delta t_{inj} = 1.0$ s

Gasoline Injector

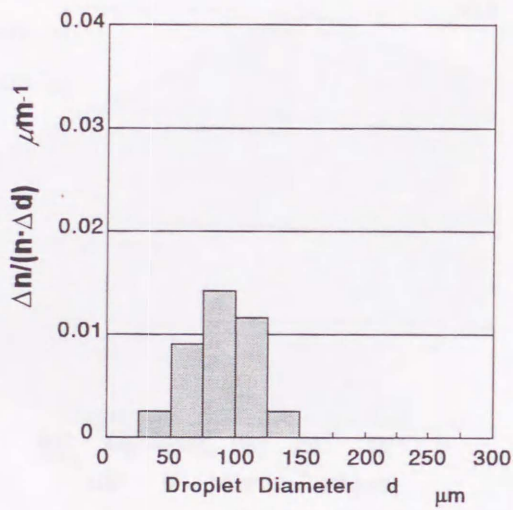
図 3.13 測定範囲における粒径分布
((a) - (d) スワールノズル (e), (f) ガソリンインジェクタ)



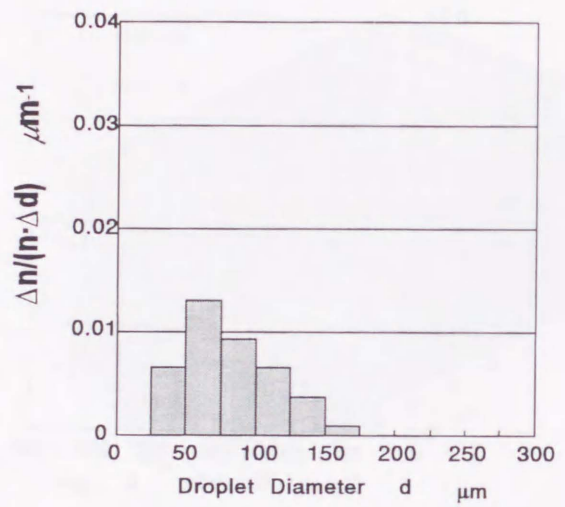
(g) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.1 \text{ s}$



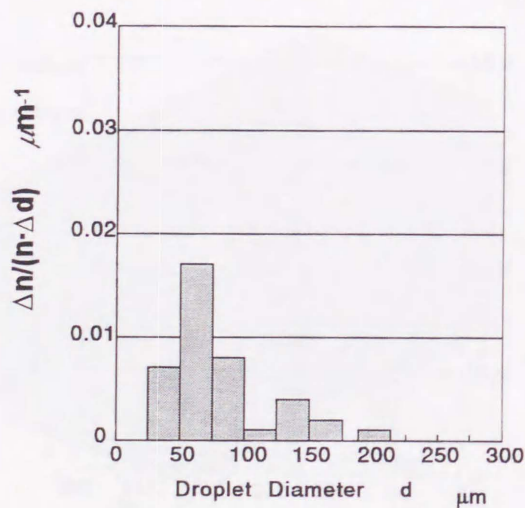
(h) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.2 \text{ s}$



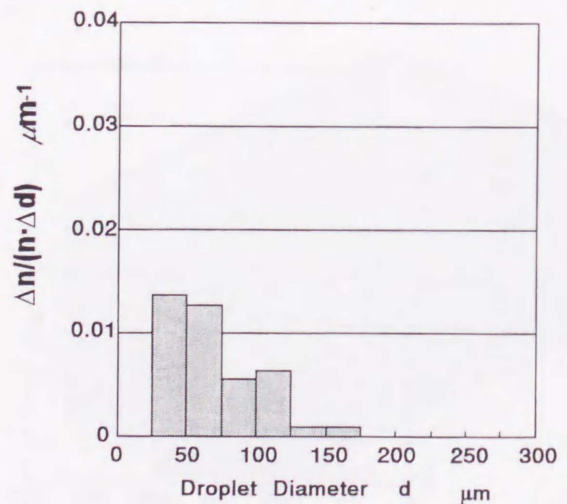
(i) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.3 \text{ s}$



(j) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.5 \text{ s}$



(k) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 0.75 \text{ s}$



(l) $P_{inj} = 0.22 \text{ MPa}$, $\Delta t_{inj} = 1.0 \text{ s}$

Gasoline Injector

図 3.13 測定範囲における粒径分布
(g) - (l) ガソリンインジェクタ

者に比べ良好となっている。また測定空間は約 $9 \times 7 \times 70$ mmである。

図 3.13 (a) ~ 図 3.13 (l) には、各実験条件における粒度分布を示す。横軸は噴霧粒径、縦軸には粒数基準の頻度関数をとっている。グラフ中で任意の粒径範囲に頻度関数が存在しない個所があるが、これは測定空間内において、該当する粒径範囲の液滴がなかったことを示している。

以下に各結果および考察について述べる。

3.4.1 ノズル，噴射圧，噴射期間による噴霧への影響

(1) 噴射圧一定で噴射期間を変えた時の噴霧への影響

(i) スワールノズル，噴射圧 0.05MPa

図 3.12 (a) (噴射期間 0.5s) と図 3.12 (b) (同 1.0s) の比較では、噴射期間を長くすることにより噴霧量が増加している。また、液滴粒径が全体的に大きくなっている。また、図 3.13 (a) (噴射期間 0.5s) と図 3.13 (b) (同 1.0s) の比較でも、噴射期間が 1.0s のものは液滴粒径が $150 \mu\text{m}$ 以上の範囲に集中し、0.5s のものは $125 \mu\text{m}$ 以下の範囲に集中している。

(ii) スワールノズル，噴射圧 0.1MPa

図 3.11 (c) (噴射期間 0.5s) と図 3.11 (d) (同 1.0s) の比較では、(i) と同じように噴射期間が長くなると噴霧量が増加している。また、図 3.13 (c) (噴射期間 0.5s) と図 3.13 (d) (同 1.0s) の比較においても、噴射期間が長くなると液滴粒径が大きくなっている。

(iii) ガソリンインジェクタ，噴射圧 0.1MPa

(i) の結果とは異なり、噴射期間を長くした場合に噴霧量が減少しているが、これは選択した測定領域中のみの、例外的な傾向と考えられる。

(iv) ガソリンインジェクタ，噴射圧 0.22MPa (噴射期間 0.1s ~ 1.0s)

図 3.12 (g) ~ 図 3.12 (l) を比較してみると、一部例外もあるが、噴射期間が長くなると噴霧量が増加していることがわかる。

(2) 噴射期間一定で噴射圧を変えた時の噴霧への影響

(i) スワールノズル，噴射期間 1.0s

図 3.12 (b) (噴射圧 0.05MPa) と図 3.12 (d) (同 0.1MPa) の比較から、噴射圧が高い場合、液滴粒径が全体的に小さくなっている。

図 3.13 (b) (噴射圧 0.05MPa) と図 3.13 (d) (同 0.1MPa) を比較してみても、噴射圧が

0.1MPaの粒度分布は、液滴粒径が $150\mu\text{m}$ 以下のものが多くなっていることがわかる。

(ii) ガソリンインジェクタ，噴射期間0.5s

図3.12(e) (噴射圧0.1MPa)と図3.12(j) (同0.22MPa)を比較してみると、(i)と同じ傾向がみられる。

図3.13(e) (噴射圧0.1MPa)と図3.13(j) (同0.22MPa)を比較してみても、噴射圧を高くすると液滴粒径が小さくなっていることがわかる。

(iii) ガソリンインジェクタ，噴射期間1.0s，噴射圧0.1MPa，0.22MPaの場合

図3.12(g) (噴射圧0.1MPa)と図3.12(l) (同0.22MPa)，図3.13(g) (同0.1MPa)と図3.13(l) (同0.22MPa)を比較してみても、(i)と同じ傾向がみられる。

(3) 噴射ノズルを変えた時の噴霧への影響

図3.12(d)と図3.12(f)を比較してみると、ガソリンインジェクタで噴射した噴霧の方が、全体的に液滴粒径が小さくなっている傾向がみられる。また噴射圧が低い時でも、ガソリンインジェクタの微粒化が良好と考えられる。

3.4.2 3Dレンダリングによる噴霧イメージの作成

図3.14に、噴霧撮影結果の3Dレンダリングイメージの一例を示す。これは測定結果を描画ソフトウェア(POV-Ray 3.0)に読み込ませ、画像の生成を行ったものである。また表3.1に、図3.14における噴霧撮影時の実験条件を示す。測定を行った液滴数はおよそ1600個であり、図における1グリッドは 5mm 四方に相当する。測定領域における噴霧液滴の算術平均粒径は $70\mu\text{m}$ 、ザウタ平均粒径は $140\mu\text{m}$ であった。

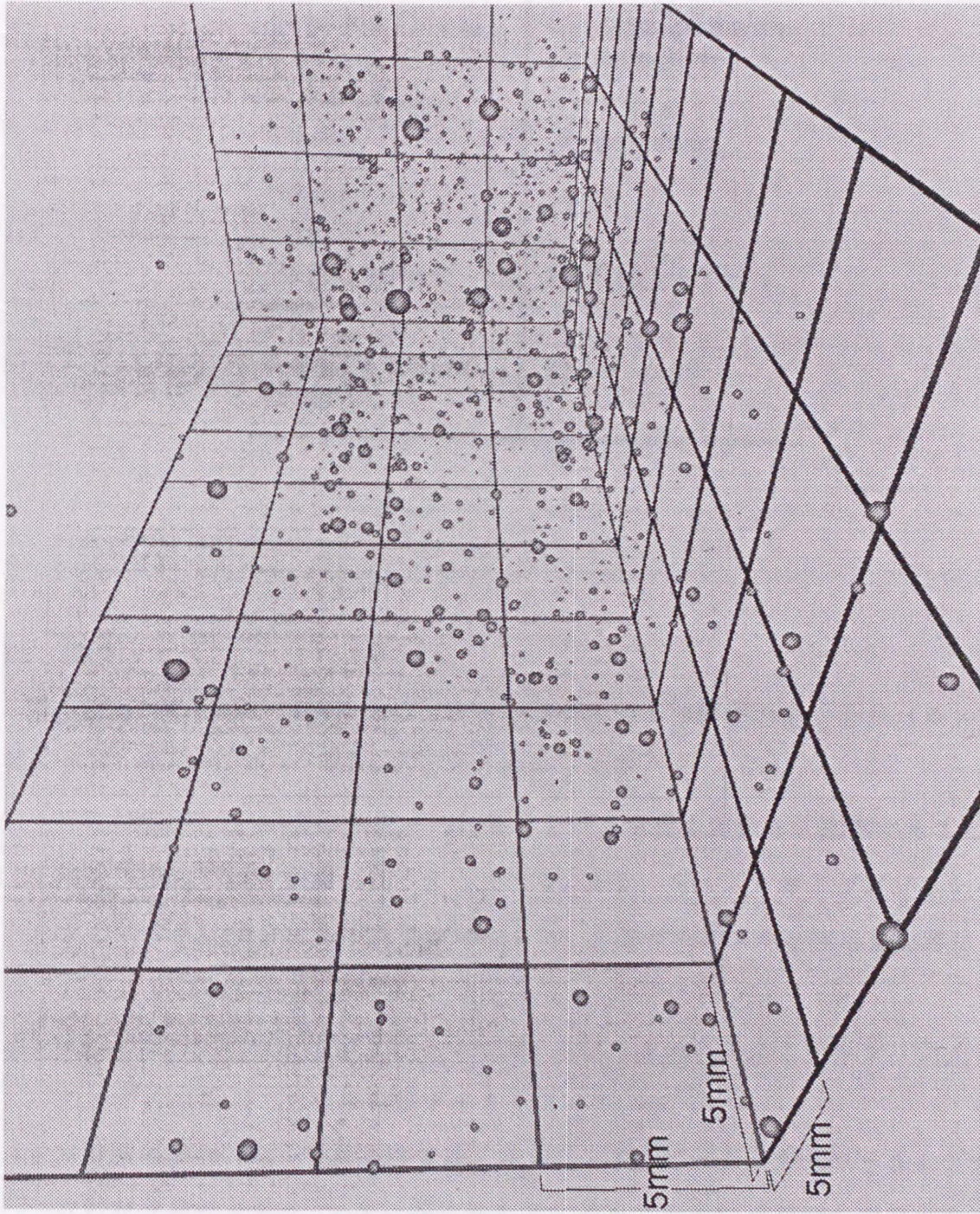


図3.14 噴霧の3Dレンダリングイメージ
(実験条件および測定結果は表3.1)

表 3.1 図 3.14 における実験条件

Atomizer	Gasoline Injector
Fuel Pressure	0.1 MPa
Injection Duration	0.5 s
Injection Timing	Simultaneous with μg detection
Laser Ejection Timing	0.5 s after μg detection
Number of Droplets	1562
Measurement Area	18 x 13 x 50 mm
Average Number Density	133.5 / cm^3

3.5 結言

微小重力下における噴霧液滴の 3 次元空間分布および粒径の測定を、パルスレーザホログラフィー法により行い、以下のような結論を得た。

- (1) 上記方法により、噴霧液滴個々の粒径および 3 次元空間分布を把握することができた。
- (2) 噴射圧一定で噴射期間を長くすることで、スワールノズルおよびガソリンインジェクタのいずれの場合でも噴霧量が増加した。スワールノズルを使用した時は、液滴粒径が大きくなっている。
- (3) 噴射期間一定で噴射圧を上げることで、スワールノズルおよびガソリンインジェクタのいずれの場合でも液滴粒径が小さくなっている。
- (4) 本実験の場合、同一噴射条件では、ガソリンインジェクタがスワールノズルより良好な微粒化特性を示し、火炎伝播実験などに適用しうる粒径範囲の噴霧が生成される条件が得られた。
- (5) 噴霧の 3 D レンダリングイメージ (3 次元描画画像) の、上記測定結果からの自動作成を行った。

第4章 COM燃料液滴の着火と燃焼

4.1 緒言

固体燃料の一つである石炭は、燃焼率の向上や負荷変動に即応させるために粉碎・分級し、微粉炭燃焼させることが多い。そして石油系燃料の代替用途として、微粉炭を水や油に混入させスラリー化したCWM（石炭-水混合物）燃料、COM（石炭-オイル混合物）燃料などが、噴霧燃焼が可能になること、ハンドリングが容易になることなどの観点から、ディーゼル⁽¹⁾、発電用ボイラ^{(2)・(3)}など実機への適用のため研究されてきており、その微粒化および液体成分と固体成分の複合した燃焼過程に着眼して調べられている。これらの研究においては、その微粒化手段としての二流体噴射弁による噴霧の解析⁽⁴⁾や、飛行液滴の燃焼過程⁽⁵⁾を調べたものなどがあるが、基礎的な噴霧燃焼特性の把握を目的とするものでは、単一液滴の着火・燃焼過程についての調査が挙げられる^{(3)・(6)・(7)}。

流れの乱れなどを全く考慮しない場合、一次元の燃焼器内において周囲気流と同一速度で移動するような十分小さい噴霧液滴の基礎的な着火・燃焼過程を調べるためには、静止雰囲気における単一液滴の着火・燃焼挙動の観察が有効と考えられるが、地上の通常重力下では自然対流のために火炎が上方に伸びた形となり、蒸発および燃焼期間中の熱および物質移動過程の理想化された一次元的な解析は不可能である。微小重力環境では、燃料蒸気や燃焼ガスの密度差が補償され浮力の影響がなくなり、液滴の球状蒸発・燃焼が実現されるため、約40年前のKumagaiらの実験⁽⁸⁾以降、自由落下法などによる微小重力環境下の液滴燃焼実験が数多く行われてきた。しかしこうした石炭スラリーをはじめとする、固体粒子混入スラリー燃料については実験例がほとんど見受けられない。

従来行われてきた通常重力下の実験から、これらのスラリー燃料液滴が、液体燃焼・固体燃焼の複合した複雑な着火・燃焼過程を経ることが明らかになっている。これらの実験では、液滴の着火・燃焼過程の解明から、燃焼器内の噴霧燃焼過程における蒸発帯・火炎帯の形成および燃焼促進効果についての基礎的知見を得ることが目的とされている。しかし、自然対流場あるいは強制対流場におけるデータでは、液滴燃焼を噴霧燃焼解析に応用しようという立場のうえでは、上述のように一次元解析ができないため、必ずしも十分といえない。加えて、スラリー燃料の微粒化手段として応用しうる二流体噴射弁などについては、未だその多くが実験的な研究開発の段階にあるので、数値計算シミュレーションに適用できるようなデータを獲得する試みは重要といえよう。これらの観点から、このよう

なスラリー液滴の微小重力下における燃焼実験は、その基礎的着火・燃焼過程の解明上、またガスタービン、ボイラ、液体ロケットなど燃焼器実機への適用上有用な知見が得られるものと期待できる。

本章では、石炭-オイル混合物 (Coal-Oil Mixture) スラリーを使用し、地下無重力実験センター (JAMIC) において得られる 10s の微小重力環境を利用して、石炭スラリー単一液滴の着火ならびに燃焼特性について調査し、地上実験 (通常重力下) との比較を行って、基礎的な着火・燃焼特性について調査を行った。

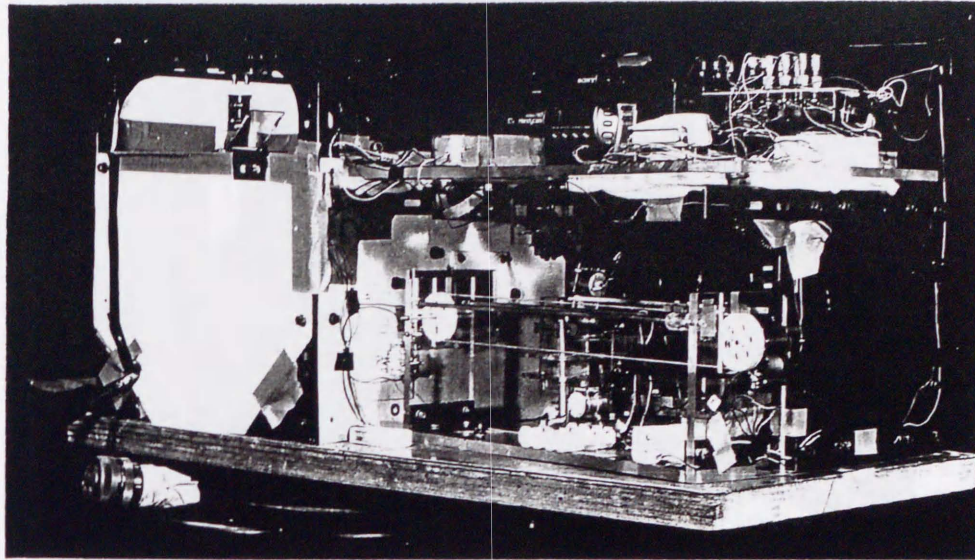
4.2 実験装置および方法

図 4.1 に本実験で使用した実験装置の (a) 外観、および (b) 概略図を、図 4.2 には COM 液滴の懸垂および電気炉内への移動に用いた液滴移動台の (a) 外観、および (b) 概略図を示す。落下カプセルの実験装置搭載ラックにおいては横置き 1/4 ラック (L870mm × W425mm × H443mm) となる。

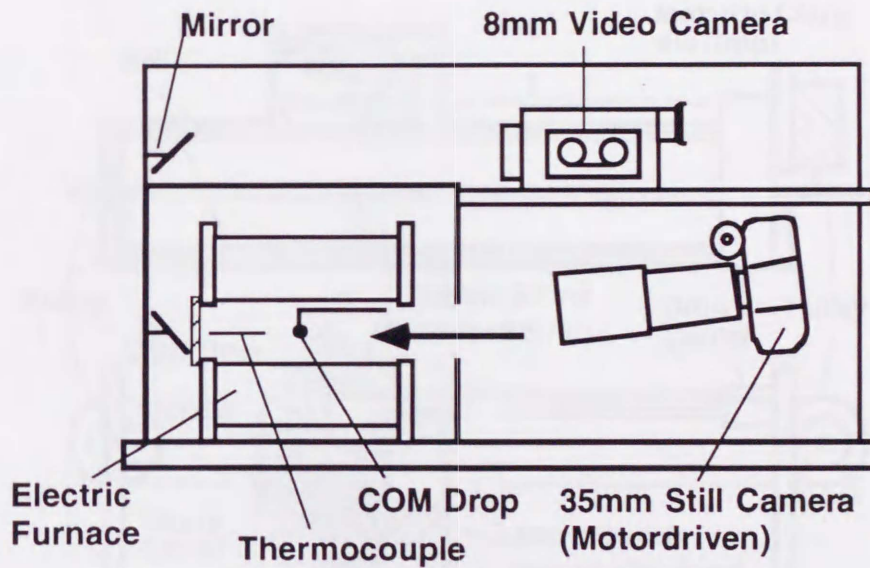
COM 液滴は図 4.2 の液滴移動台により懸垂を行い、落下開始と同時に十分に昇温した電気炉内に進入させる。COM 試料には界面活性剤などを添加せず、放置すると試料だめの中で分離、沈澱を生じるため、試料だめにセットする COM 試料は、実験装置の落下カプセル搭載前に電動モータによるかくはんを行う。

落下開始 40s 前から COM の入った試料だめを制御室からのコマンドで上下して COM を $\phi 2\text{mm}$ の球状の先端を持つ石英ガラス糸に懸垂し、そののち落下開始コマンドと同期して石英ガラス糸を電気炉内に電動モータにより移動させる。液滴の懸垂状況は、懸垂部近くに取り付けられた CCD カメラにより、制御室でモニターした。また炉内雰囲気温度は、電気炉内に線径 0.3mm の K 型熱電対を取り付け、熱電対出力をオペアンプで 100 倍に増幅して同様に制御室でモニターした。

電気炉内に挿入した COM 液滴が着火し燃焼する状況は、液滴進入方向から 35mm スチルカメラ (Nikon FE, モータードライブ付属) により、また液滴進入の反対方向からミラーを介して 8mm ビデオカメラ (SONY, CCD-TR900) により撮影を行う。35mm スチルカメラのモータードライブは、落下開始コマンドと同期して撮影を開始する。また 8mm ビデオカメラは、実験装置の落下カプセル積み込み前から流し撮りを行う。



(a) 装置外観

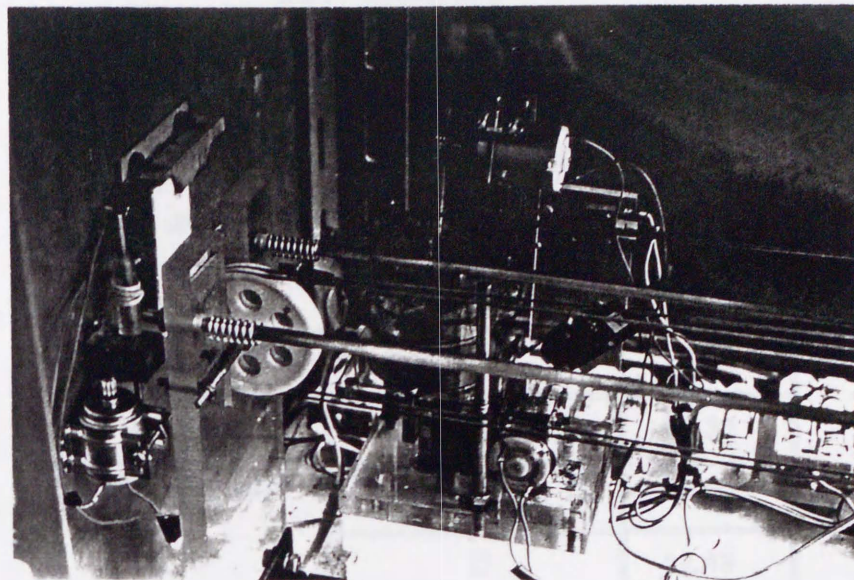


(b) 装置概略図

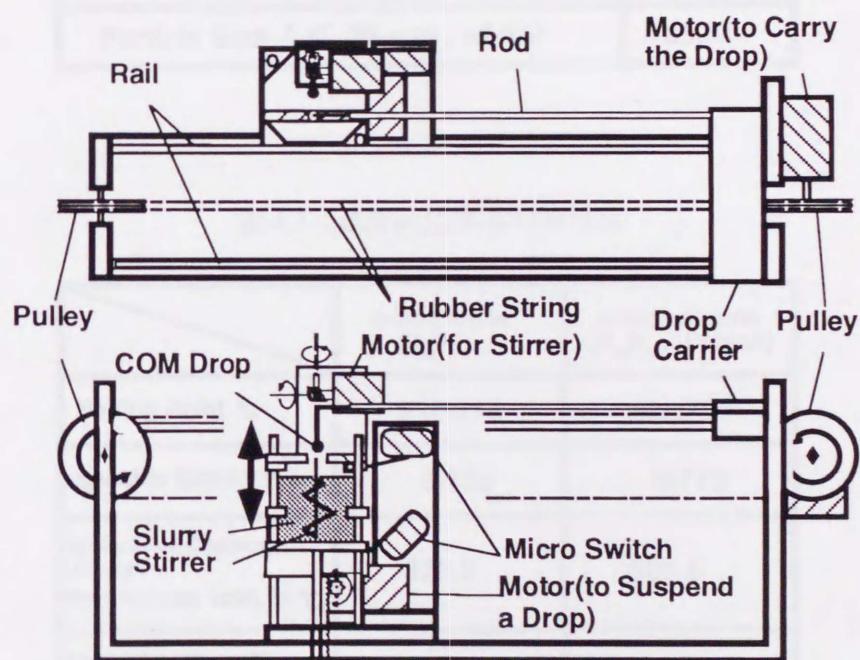
図4.1 スラリー液滴燃焼落下実験装置概略

4.3 実験条件

COM 燃料に使用した微粉炭については、燃料比が比較的低い亜瀝青炭で、粉碎粒子径が通常工業的に使用されるものに近い太平洋炭を使用した。また液体燃料としては純炭化水素を使用した。表4.1に実験に使用した微粉炭の諸元を、また表4.2に実験に使用した純炭化水素の物性値を示す。



(a) 液滴移動台外観



(b) 装置概略図

図4.2 液滴移動台概略

実験に使用したサンプルは、太平洋炭50wt%とn-ドデカンまたはn-ヘキサデカン（セタン）50wt%の混合物である。以下それぞれ、太平洋炭-0.50-ドデカン、太平洋炭-0.50-セタンと称する。

35mm スチルカメラにはフォーカス用ペローズと70-210mmズームレンズを装着し、

表 4.1 微粉炭諸元

Coal		Taiheiyo
Proximate Analysis (wt % , dry base)	Fixed Carbon (FC)	43.03
	Volatile Matter (VM)	40.97
	Ash	16.00
Fuel Ratio (FC/VM)		1.05
Elemental Analysis (wt % , dry base)	C	63.30
	H	5.00
	O	14.48
	N	1.08
	S	0.35
Particle Size (< 75 μ m , wt %)		85.74

表 4.2 液体炭化水素の物性値

	n-Dodecane (C ₁₂ H ₂₆)	n-Hexadecane (C ₁₆ H ₃₄ , Cetane)
Boiling Point °C	216.278	286.793
Specific Gravity 20 d -	0.750	0.773
Molar Heat Capacity JK ⁻¹ mol ⁻¹ liquid phase, 1atm, 25 °C	376.0	501.5
Molar Heat Capacity JK ⁻¹ mol ⁻¹ gas phase, 1atm, 25 °C	291.3	387.7

シャッタースピード 1/60s, 絞り 5.6-4 で ISO 感度 400 のカラーネガフィルムにモータードライブの巻取り速度 3 コマ / s で撮影した。また 8mm ビデオカメラにはクローズアップレンズを装着しズームを最大にしてフォーカスを手動固定, シャッタースピード (電子シャッ

ター開放時間)は1/60 s, 絞りは自動とした。

4.4 実験結果および考察

4.4.1 通常重力下の燃焼挙動

COM 液滴の通常重力下における燃焼挙動について述べる。COMはオイルの液体燃料分と石炭の固体燃料分の複合した燃焼段階を持っていることが報告されているが、これには次のような3つが挙げられる⁽⁶⁾;

(1) COMの液体成分が比較的大きな火炎をともなって燃焼する蒸発燃焼

(2) 石炭中の揮発分が比較的小さな火炎とともに燃焼する分解燃焼

(3) 石炭中の固定炭素分を主とするチャー(Char)が赤熱するチャー燃焼

である。今回行った実験に用いた試料では、通常重力下では(1)の蒸発燃焼と(2)の揮発燃焼は明確に区別できず、火炎発生を伴う燃焼は1回とみられた。これは微粉炭の炭種および液体燃料分の組合せ、石炭濃度、および懸垂液滴径などの因子の影響が考えられるが、主にどの因子に影響されるかは不明である。

図4.3に太平洋炭-0.50-ドデカンの通常重力下における燃焼期間を示す。横軸に温度、縦軸に時間を取り、火炎期間、チャー燃焼期間が温度によりどのように変化するかを示したものである。各燃焼期間はビデオテープのコマ送りから測定した。

低い雰囲気温度の範囲では火炎発生はみられず、雰囲気への液滴進入完了後比較的長い時間を経て、微粉炭塊が赤熱するチャー燃焼を生じ、赤熱が終了して残灰の状態に到る。雰囲気温度が高くなるにつれてチャー燃焼の開始時期は早まり、かつ赤熱の期間(チャー燃焼期間)は長くなる。

およそ970K以上では、電気炉内への液滴の進入後、一次火炎発生が起こる。本報では電気炉内への液滴進入が完了して、一次火炎発生が起こるまでの時間を着火おくれと定義した。この着火おくれは温度が高くなるにつれ短くなり、かつ火炎が生じている期間(一次火炎期間)は長くなる。そして一次火炎消失ののちにチャーの赤熱が始まる。

一次火炎発生の最低温度の970K付近では、チャー燃焼の開始時期が、その温度以下からの傾向から若干外れ、遅くなっている。これはチャーからの揮発分の放出が起こり、それが一次火炎において燃焼するため、チャーの燃焼が遅れるものと考えられる。

図4.4に通常重力下の太平洋炭-0.50-セタンの燃焼期間を示す。図4.3と比べて、一次火炎期間はおよそ970Kより高い範囲で比較的長いことが分かる。この一次火炎期間の長さ

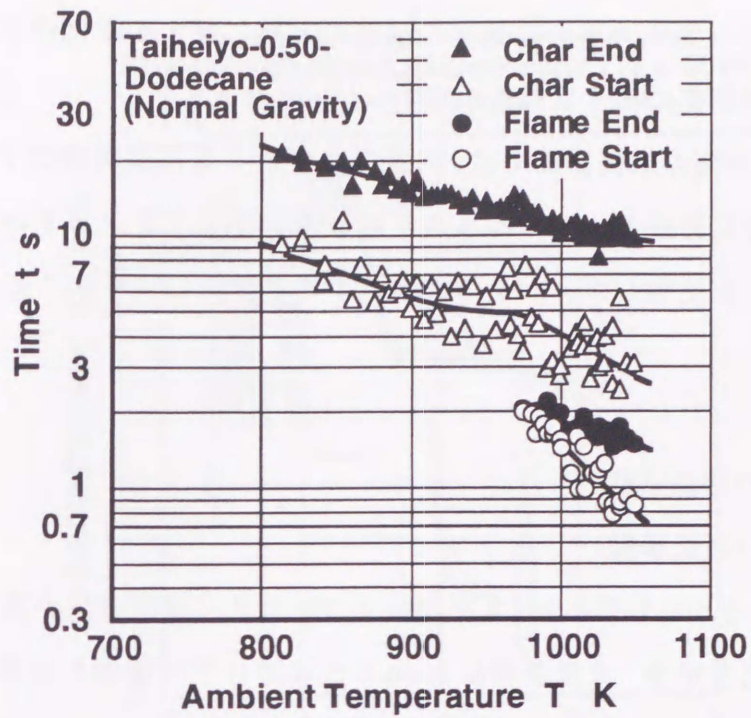


図 4.3 通常重力下の太平洋炭-0.50-ドデカン液滴の燃焼期間

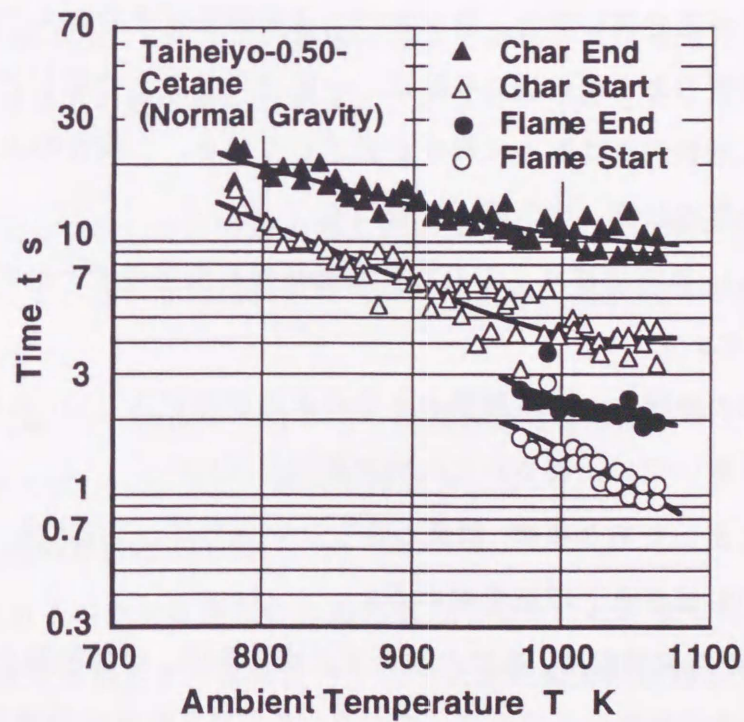


図 4.4 通常重力下の太平洋炭-0.50-セタン液滴の燃焼期間

は、図4.3のドデカンCOMの場合に比べて温度の上昇に対する変化が小さく、また着火おくれ期間長さの温度上昇に伴う変化も小さい。

またセタンCOM液滴の燃焼挙動では、火炎発生が起こる高温雰囲気下で、特徴的に着火の直前に液滴が下方に膨張し、そののち若干の破裂を伴って着火している様子が観察された。これはドデカンに比較して、セタンが沸点が高く蒸発しにくいことが反映しているものと考えられる。

4.4.2 微小重力下の燃焼挙動

(1) 各COM試料の燃焼挙動

図4.5に太平洋炭-0.50-ドデカン、太平洋炭-0.50-セタン液滴の微小重力下における球状火炎直径の経時変化を示す。火炎直径は8mmビデオカメラで撮影した画像を、ビデオデッキによるコマ送りでモニターしながら、水平方向の定方向径を測った。一次火炎は着火後急激に膨張・収縮して、そののち再び膨張し火炎直径が極大となる。そして再び収縮して、この温度域では両サンプルとも二段目の燃焼による火炎が観察されている。

(i) 太平洋炭-0.50-ドデカン

液滴の雰囲気温度が充分高い場合、着火時の火炎の膨張はそののちの再膨張のときより大きい。そして再膨張のあとの火炎の収縮は、一定の大きさまでにとどまる。

この直径における球状火炎は徐々に輝度が低下していき、二段目の火炎が発生する前には球殻状のすす粒子群の状態（すす殻）に変わる。

二段目の燃焼は0.1s以内で終り、このあと懸垂糸の石炭塊のチャーが赤熱する。

(ii) 太平洋炭-0.50-セタン

一次火炎の着火時の膨張よりも再膨張のときの火炎直径が大きい。そしてドデカンCOMより長い燃焼時間のあいだに、緩やかに火炎が膨張していく。

火炎が直径最大に達したあと収縮、消炎しきらないうちに、この火炎の内縁部に着火し、二段目の球状火炎が形成され、収縮を始める。

セタンCOM液滴の燃焼挙動は、最初の顕著な火炎の膨張・収縮挙動を加えた場合、三段の球状火炎の膨張・収縮挙動から成り立っており、すなわち液体成分が重質になることが、視覚的には石炭中の可燃成分の燃焼を促しているように見受けられる。これは通常重力下での破裂を伴う着火挙動の要因とも考えられる。

(2) COM液滴燃焼挙動の雰囲気温度による変化

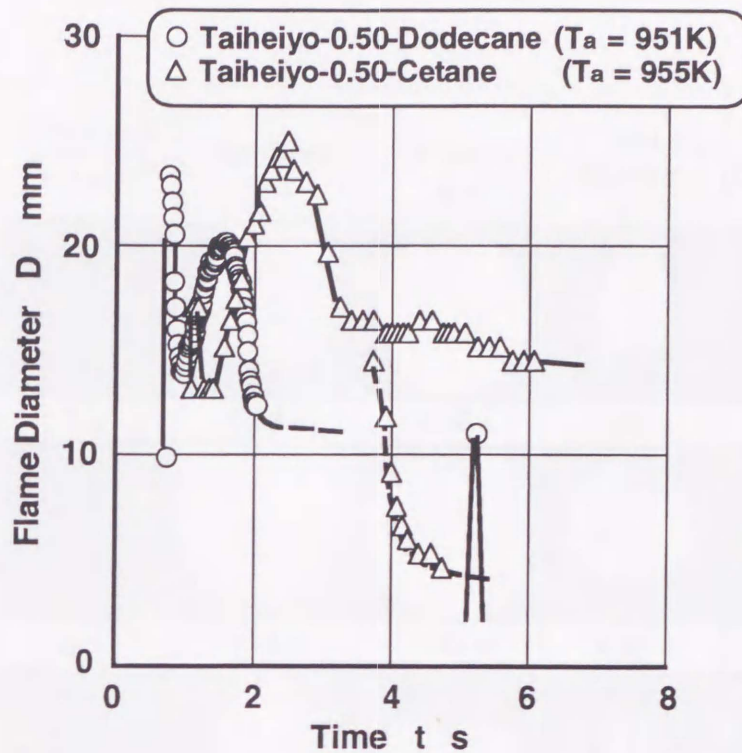


図4.5 微小重力下のCOM液滴の火炎直径変化

図4.6に太平洋炭-0.50-ドデカンの雰囲気温度を変化させた場合の燃焼挙動を示す。画像は、8mmビデオカメラの静止画をカラービデオコピープロセッサ（三菱電機 CP-15）で出力した。

雰囲気温度が低くなるにつれて着火おくれは長くなり、また球状火炎の直径が最大となる時期が遅くなっている。また二段目の火炎の発生が、比較的高温域で生じ、低温域では生じていない。

落下制動直前（落下から10s後）のチャー燃焼の赤熱は温度が低くなるにつれて弱まり、およそ870K以下では10s以内での赤熱は観察されない。

(i) 通常重力下の燃焼挙動との比較

図4.7は微小重力下の燃焼挙動変化を通常重力下のそれと比較したものである。この図は微小重力下の一次火炎発生が、通常重力下の一次火炎発生の最低温度よりも著しく低い温度域で見られること、また微小重力下の無対流場で一次火炎期間が通常重力下の場合より長くなることを示している。

チャー燃焼は、およそ950K以上については開始が確認できたが、10s以内で燃焼終了までにはいたらなかった。また約870K以下の温度では、今回の実験ではチャー燃焼の開始は

	When Droplet Comes into Furnace	Ignition	Flame * 0 10 mm	2nd Ignition	Char ** Combustion
988 K					
t	0 s	0.63 s	1.30 s	3.80 s	8.77 s
969 K					
t	0 s	0.73 s	1.42 s	4.53 s	9.33 s
951 K					
t	0 s	0.73 s	1.62 s	5.30 s	9.13 s
914 K					
t	0 s	1.02 s	1.70 s		9.42 s
855 K					
t	0 s	1.35 s	1.98 s		
589 K ***					
t	0 s	5.20 s	5.38 s ***		

*The secondary maximum of flame diameter after ignition

**Just before the dropshaft facility's brake

***Not the secondary maximum of flame diameter

図 4.6 微小重力下の COM 液滴の着火・燃焼挙動
(太平洋炭-0.50-ドデカン)

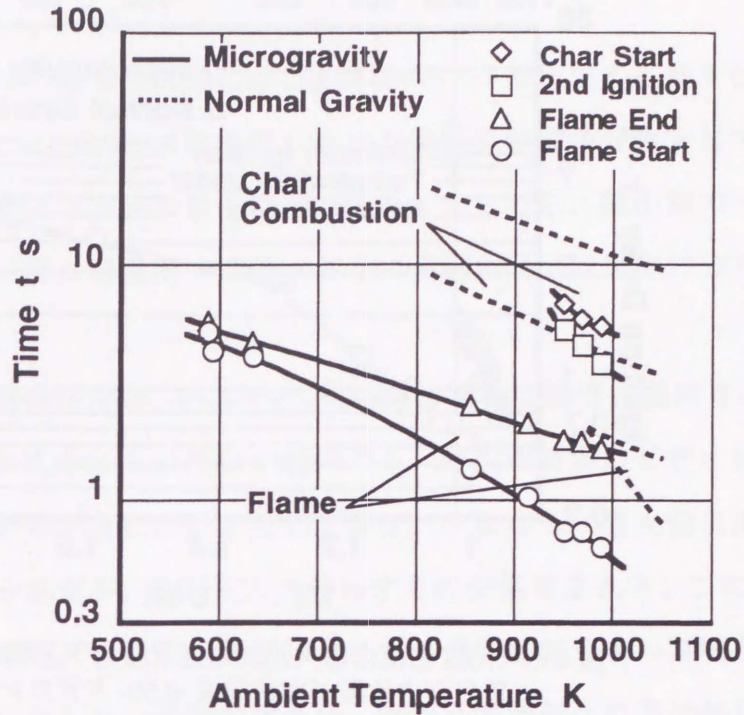


図4.7 COM液滴の燃焼期間の通常重力下と微小重力下の比較 (太平洋炭-0.50-ドデカン)

確認できなかった。

(ii) 通常重力下の着火おくれとの比較

図4.8に雰囲気温度(絶対温度)の逆数に対する着火おくれ(一次火炎発生おくれ)の対数値のプロット(アレニウス表示)を、通常重力下および微小重力下について示す。どちらのデータについても液体燃料の単一液滴の着火おくれ⁽⁹⁾と同様に、着火おくれ τ と雰囲気温度 T の間には

$$\tau \propto \exp\left(\frac{D}{T}\right)$$

の関係があるものと見受けられる。ここで D はデータをアレニウス表示した場合の直線の勾配を示すもので、みかけの活性化エネルギーとなる。すなわち、微小重力下におけるCOM液滴の着火に要するみかけの活性化エネルギーが、通常重力下のそれに比べてかなり低いことがわかる。

(iii) すず殻の生成

燃焼挙動の観察の項で述べたように、液体燃料液滴の実験に見られるのと同様、微小重

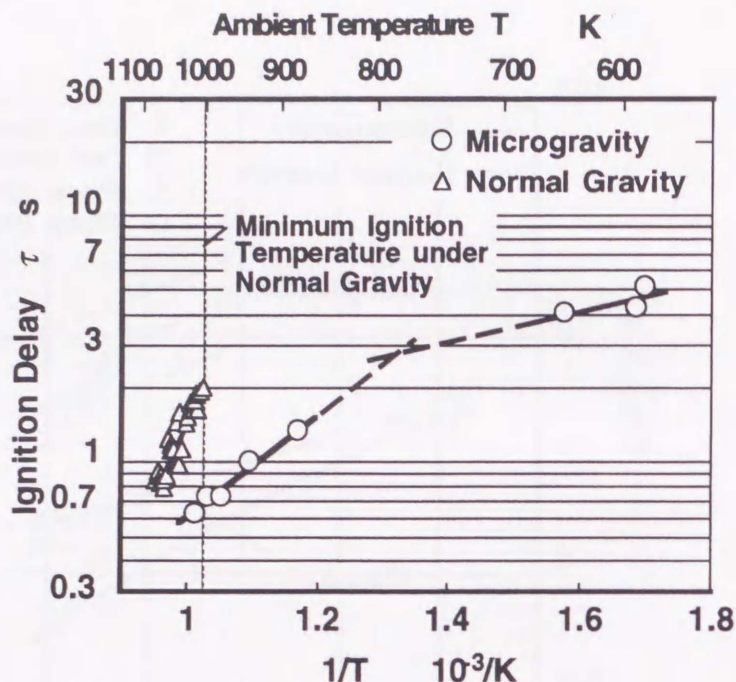


図4.8 COM液滴の着火遅れの通常重力下と微小重力下の比較（太平洋炭-0.50-ドデカン）

力下では球状火炎の輝度が低下していくにつれ、液滴を中心とした球殻状のすすの生成が顕在化する。このすす殻は、とくにセタンCOMにおいては、すす粒子1個の大きさがドデカンCOMのそれより大きく、凝集が進んでいるように見られる。

このような挙動についても、セタンの沸点がドデカンに比べて高く石炭中の揮発分の着火温度に近く、またセタンの発熱量が比較的高いため、火炎直径変化の項で述べたのと同様、石炭中可燃成分の燃焼が促されることが原因と考えられる。

(iv) サンプルによる燃焼挙動の差異

実験回数が限られる落下実験では、地上実験との比較が容易なことが必要になる。微小重力実験を行う前に、実験条件選定のため、太平洋炭微粉炭よりも固定炭素分がより多く粉砕粒子径がより小さい、ワンボ炭微粉炭を使用したスラリー、および液体成分にメタノールを使用したスラリーについて、地上実験を行ったが、それぞれ高温雰囲気中で石炭粒子が凝集性を失って飛散・落下する現象が見られた。しかし落下実験機会が限られるため、地上実験との比較を行い易い太平洋炭サンプルに重点をおいて実験を行った。ワンボ炭サンプルの落下実験については、二段目の燃焼、すす殻の生成などで太平洋炭と共通する挙動が見られた。

(v) きわめて低い温度域での着火挙動

燃焼挙動の観察の項で示したように、本実験で用いたCOM試料である太平洋炭-0.50-ド

デカン⁽¹⁾は、微小重力下の場合、通常重力下の最低着火温度の約970Kよりも大幅に低い589Kで着火が起こっている。

図4.6における589Kの着火の瞬間には、液滴径の7~8倍程度の直径を持つ球殻状の青い炎が観察できる。図4.7では870K前後でも着火の瞬間には炎が青色を呈するのが観察されるが、その火炎の大きさは液滴の数倍程度である。すなわち、微小重力下で着火前に蒸発した液体成分蒸気は、特に低温度で顕著なように液滴周囲で球対称に分布することが分かる。

これに対して通常重力下では、特にセタンCOMの場合で顕著に観察されたように、液体成分の上部から下部に向かっての蒸発が進行する。着火の瞬間のビデオ静止画では、青色の火炎が液滴の側面から下方にかけて生じており、すなわち、着火前に蒸発した比較的低温度で高密度の液体成分蒸気が、液滴下方に分布するのが観察される。これは等々力⁽¹⁰⁾の通常重力下のマイクロ着火に関する解析における、燃料蒸気分布の説明と合致する。すなわち、高温雰囲気内におかれた液滴の周囲に、液滴と雰囲気との温度差による下向きの流れが生じ、燃料蒸気は液滴下方に蓄積される。液滴が加熱され、燃料蒸気が拡散するにつれて温度差は小さくなり、下向きの流れも小さくなり、こののちに着火に到る。雰囲気温度が低い場合は液滴周囲の下向きの流れが小さく、液滴下方の燃料蒸気の蓄積が充分でないため、着火に到らないものと考えられる。

これに対して微小重力下の混合気形成のための拡散過程および伝熱過程は、熱拡散などを無視した場合、流れの影響を全く受けない。すなわち、加熱された燃料蒸気-空気の混合気が散逸するような周囲空気の流れがなく、かつ加熱中に混合気の平均的な当量比も増大する。こうして微小重力下の液滴は、通常重力下よりも着火条件に容易に到達すると考えられる。

着火温度そのものについては、Zabetakisらが炭化水素燃料の最小自発点火温度に関する研究⁽¹¹⁾において、n-ドデカンの自発点火の最低温度が477Kである結果を得ており、無対流場で燃料蒸気の散逸がなかった場合、今回の実験における最低雰囲気温度の593Kは、比較的着火には十分な温度を与えられているものと考えられる。

4.5 結言

微小重力下において直径約 3mm の COM 燃料（太平洋炭-0.50-ドデカン）単一懸垂液滴を高温雰囲気へ挿入してその蒸発、燃焼挙動を観察し、通常重力下の挙動との比較を行った。その結果次のようなことが明らかとなった。

- (1) 微小重力下の COM 液滴の着火おくれは、通常重力下より短い。
- (2) COM 液滴の着火における微小重力下のみかけの活性化エネルギーは、通常重力下のそれに比べて小さい。火炎発生の最低雰囲気温度は、微小重力下では通常重力下より 380K 以上低い。
- (3) 通常重力下の COM 液滴の火炎発生期間は微小重力下に比べて短い。
- (4) 微小重力下の COM 液滴の火炎は、最初の比較的長い期間の火炎のあと、比較的高温雰囲気では 2 段目の火炎が発生する。最初の火炎では石炭中の軽質の揮発分および COM の液体成分、2 段目の火炎では石炭中の重質の揮発分および固定炭素成分が燃焼していると考えられる。

第5章 マグネシウムおよび純カーボン粒子混入燃料液滴の着火と燃焼

5.1 緒言

液体燃料ロケットあるいはラムジェット機関用燃料としての、JP-10、RJ-1Jなどの航空用高密度炭化水素燃料（炭素数10～14程度のアルキル環状パラフィンが主成分）は、その燃焼が液体酸素／水素系の燃焼に比べて不安定になりやすく、高い燃焼効率を得ることが難しいとされている。このため炭化水素系液体燃料にアルミニウム⁽¹⁾、カーボン⁽²⁾、ボロン⁽³⁾などの固体粒子を混入し、その混合燃料の燃焼によって燃焼ガス温度を高温化して、炭化水素の燃焼促進および燃焼安定化を図ることが考えられている⁽⁴⁾。

固体粒子混入燃料の研究は、その基礎的な燃焼過程を調査する観点から、単一液滴の燃焼を取り扱ったものが多い。また実用上では見かけ粘度が高くなるので、二流体噴射弁の使用など、微粒化装置に工夫が要求されることも、基礎的研究が必要とされる一因である。これらの基礎的研究のうち、上述のような高効率推進用液体燃料の開発を意図したものは、過去1940-50年代にアメリカで、ボロン-灯油系燃料について実験的研究が行われた例があるが、当時は望んだような燃焼効率向上を得られなかった。しかし、液体燃料ロケットあるいはラムジェット機関における密度比推力の向上は、現在もなお要求度の高い課題と位置づけられ、液滴燃焼⁽¹⁾⁻⁽³⁾、数値計算⁽⁴⁾など、幅広い視点から精力的に研究が行われている。

本章では、前章のCOM燃料液滴に続き、マグネシウムおよび純カーボン粒子混入スラリー燃料の単一液滴を用いて、微小重力下での固体粒子混入燃料の着火・燃焼特性に関する実験および通常重力下の実験との比較を行った。

5.2 実験装置および実験方法

基本的な実験装置および実験方法は、前章と同様であり、実験装置および固体粒子混入燃料液滴の懸垂および電気炉内への移動に用いた液滴移動台の概略は、前章の図3.1および図3.2と同様である。予め混合比を調整したスラリー燃料を試料だめにたくわえておき、その試料だめを落下開始40s前から上下させて、 ϕ 2 mmの球状の先端を持つ石英ガラス糸先端にスラリー液滴を懸垂する。懸垂されたスラリー液滴は落下コマンドと同時に電気炉内に挿入され、昇温した電気炉内の中央部に到達する。電気炉内の最高雰囲気温度は、マグネシウムスラリーに用いた実験装置においては、セラミックヒータ（広島電熱，300W）によ

り 1400K 程度，純カーボンスラリーに用いた実験装置においては，U字型セラミックヒータ（カンタル社，カンタルスーパー 33，400W）により 1600K 程度である．スラリー試料には界面活性剤などを添加せず，放置すると試料だめの中で分離，沈澱を生じるため，試料だめにセットするスラリー試料は，COM 燃料と同様実験開始時から実験中にわたって，電動モータによるかくはんを行った．

落下開始40s前からスラリーの入った試料だめを制御室からのコマンドで上下して，スラリーを石英ガラス糸先端に懸垂し，そののち落下開始コマンドと同期して石英ガラス糸を電気炉内に電動モータにより移動させた．液滴の懸垂状況は，懸垂部近くに取り付けた CCD カメラにより，制御室でモニターした．また炉内雰囲気温度は，電気炉内に取り付けた K 型熱電対（マグネシウムスラリー使用時）ないし R 型熱電対（純カーボンスラリー使用時）により制御室でモニターした．

電気炉内に挿入したスラリー液滴が着火し燃焼する状況は，電気炉内への液滴進入の反対方向からミラーを介して 8mm ビデオカメラ（SONY CCD-TR1000）により撮影を行った．燃焼期間等の測定は，撮影画像のビデオテープ再生（30frames/s）により行った．

スラリー燃料に使用した混入固体粒子については，マグネシウムおよび純カーボン粉末を使用した．およびまた液体燃料としては純炭化水素の n-ドデカンおよび n-ヘキサデカン（セタン）を使用した．表 5.1 に実験に使用したものを含めた固体粒子の物性値，また表 5.2 には実験条件を示す．

実験に使用したサンプルは，固体粒子 40wt% と n-ドデカンまたは n-ヘキサデカン（セタン）60wt% の混合物である．これらの組み合わせにより，4 種類のサンプルを使用した．以下それぞれ，Mg-0.40-ドデカン，Mg-0.40-セタン，C-0.40-ドデカン，C-0.40-セタンと称する．

5.3 実験結果および考察

5.3.1 通常重力下の燃焼挙動

(1) マグネシウムスラリー

図 5.1 に Mg-0.40-ドデカン液滴の通常重力下における燃焼期間を示す．横軸に温度，縦軸に時間を取り，火炎期間，固体燃焼期間の温度依存性を示したものである．雰囲気温度がおおよそ 820K 以上になると，電気炉内への液滴の進入後，液体燃料の燃焼による一次火炎発生が生じる．本報では電気炉内への液滴進入が完了して，一次火炎発生が起こるまでの

表 5.1 混入用固体粒子の物性値

	Magnesium	Carbon	Boron	Aluminium
Molecular Weight	24.305	12.011	10.81	26.982
Melting Point [K]	923	3823	2573	933.6
Boiling Point [K]	1380	5100	2823	2740
Density solid phase 0.1MPa, 293K [kgm ⁻³]	1740	2267	2460	2700

表 5.2 実験条件

	Magnesium	Carbon
Liquid Fuel	n-Dodecane / n-Hexadecane	
Mass Concentration [wt%]	40	
Particle Diameter [mesh (μm)]	325 (44)	
Droplet Diameter [mm]	2	
Ambient Temperature (Normal Gravity) [K]	550 ~ 1400	600 ~ 1600
Ambient Temperature (Microgravity) [K]	700 ~ 1400	400 ~ 1500

時間を着火遅れと定義した。雰囲気温度が上昇するにつれ、着火遅れは短くなる。また、火炎が生じている期間（火炎期間）は長くなる。

図 5.2 に Mg-0.40-セタン液滴の通常重力下における燃焼期間を示す。一次火炎発生の最低温度は、Mg-0.40-ドデカンの場合よりもやや低く、800K 程度である。雰囲気温度の上昇につれて、着火遅れが短くなり火炎期間が長くなるのは Mg-0.40-ドデカンと同様であるが、着火遅れは全般により長く、また火炎期間の温度上昇による変化はより緩やかである。

また、着火直前に液滴下部が膨張して破裂する、マイクロ爆発的な挙動もみられた。セタン含有スラリーの場合は比較的高沸点のため熱蓄積が大きく、殻構造を持った液滴内部で気泡成長が起こりやすいものと考えられる。

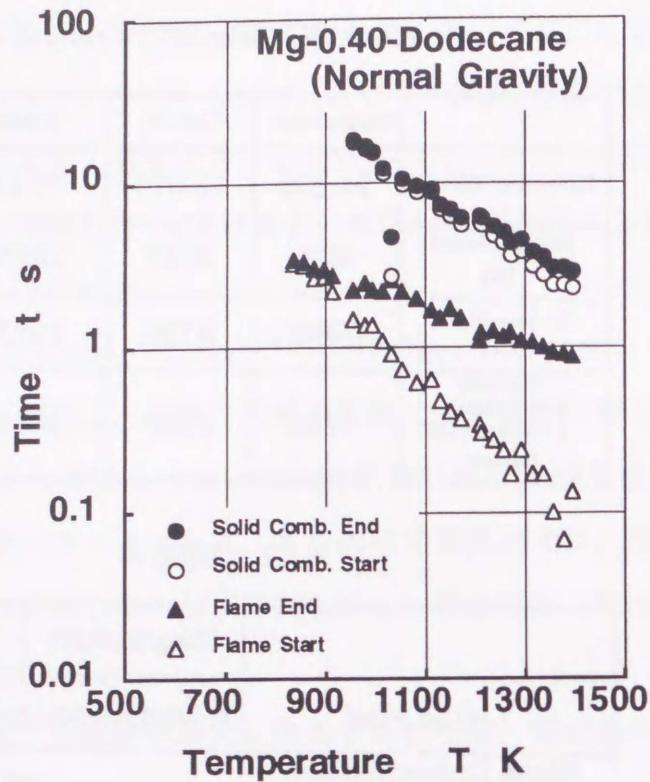


図 5.1 通常重力下における Mg-0.40-ドデカン液滴の燃焼期間

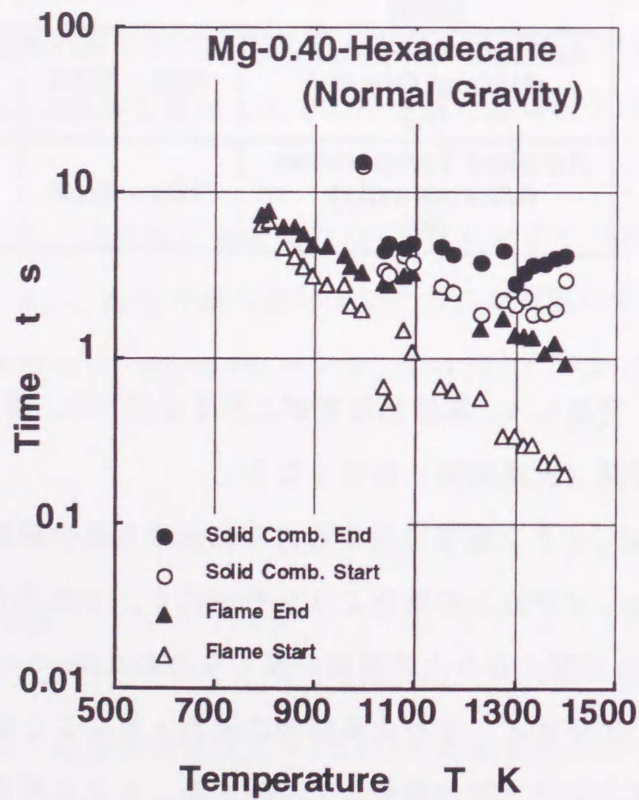


図 5.2 通常重力下における Mg-0.40-セタン液滴の燃焼期間

一次火炎の発生におけるこれらの傾向の差異は、いずれも前章の石炭スラリー液滴の実験でみられており、*n*-ドデカンに比べたセタンの良好な着火性、大きな発熱量および高沸点といった、液体成分の物性の差異によるものと考えられる。

火炎期間の終了ののち、マグネシウムの固体燃焼が生じる。マグネシウムの燃焼は、高温ではその形状が白い輝炎をともなったエンベロープ炎となる。こうした雰囲気温度では、Turnsらのアルミニウムスラリー液滴の実験⁽¹⁾でみられるのと同様の金属蒸気層が、マグネシウムスラリーでも生じているものとみられる。

(2) 純カーボンスラリー

図5.3および図5.4にC-0.40-ドデカン液滴およびC-0.40-セタン液滴の通常重力下における燃焼期間を示す。一次火炎発生の最低温度は600K程度である。双方のサンプルにおけるドデカン、セタンの液体成分の違いによる燃焼挙動の違いの傾向については、マグネシウムの場合と同様である。

純カーボンスラリーの場合は、マグネシウムスラリーと異なり、固体燃焼期間においては固体粒子凝集物の赤熱は生じるが、輝炎を伴った燃焼は生じない。これはカーボンが高融点であることによるものと考えられる。

5.3.2 微小重力下の燃焼挙動

(1) 微小重力下の燃焼過程

(i) マグネシウムスラリー

微小重力下における固体粒子混入燃料液滴の燃焼においては、まず液体燃料の球状火炎が発生し、その後固体粒子の燃焼がおこる。このときの燃焼挙動を低温度域(700K付近)、中温度域(1100K付近)、高温度域(1200~1400K)の3つの領域に分け、図5.5に示した。図中には、懸垂棒を炉内に挿入した瞬間、液体燃料の着火、液体燃料の燃焼時、固体成分の着火、固体成分の燃焼時、カプセル制動直前の6つの瞬間における画像を示した。

低温度域では輝度の高い火炎が球状に発生する。着火時には青色の火炎が大きく球状に発生する。青色の火炎は、ビデオ画像における次のフレーム(17ms後)には橙黄色の輝炎となっている。固体燃焼については10sの微小重力時間内には確認できなかった。

中温度域になると火炎の輝度が薄れ、石英ガラス糸先端近傍から着火する様子が観察された。また、火炎が収縮し始めてから固体粒子の凝集物の燃焼が始まるまでの間に、マグネシウム粒子が点々と白輝する、微細な燃焼もみられた。

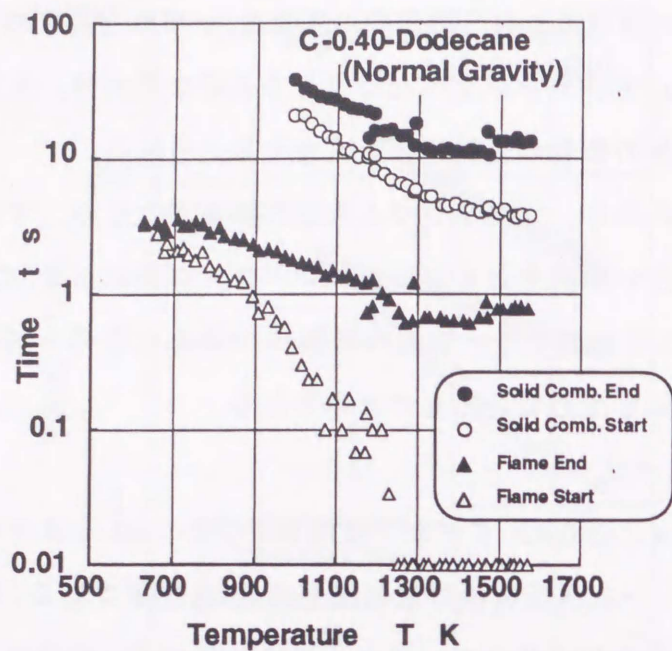


図 5.3 通常重力下における C-0.40-ドデカン液滴の燃焼期間

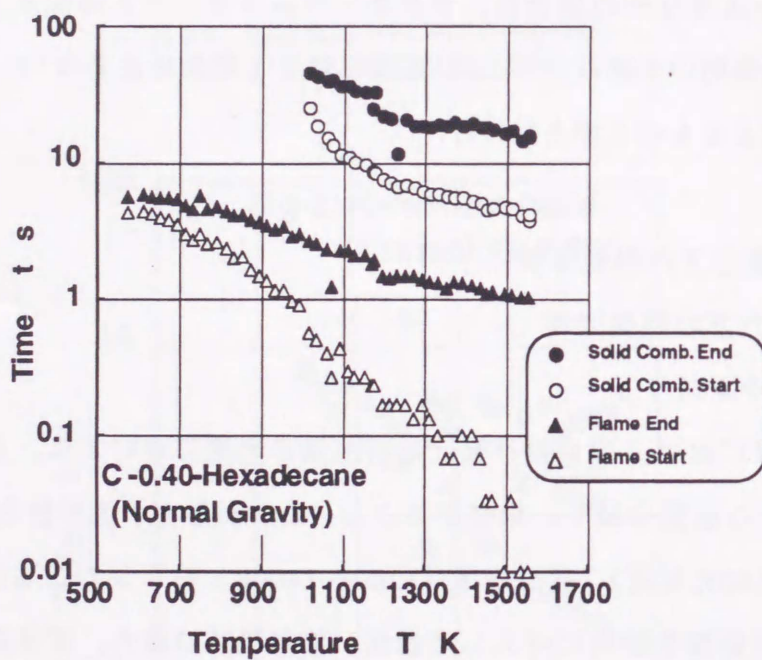


図 5.4 通常重力下における C-0.40-セタン液滴の燃焼期間

高温領域においては火炎の輝度がさらに薄れ、また発生するすす殻は、石炭スラリー燃料液滴で見られるように厚いものではなかった。

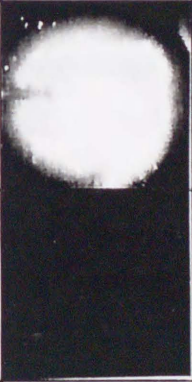


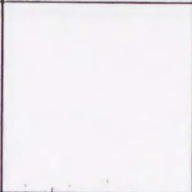
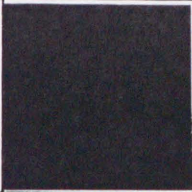

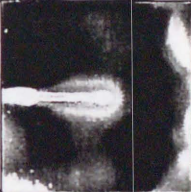
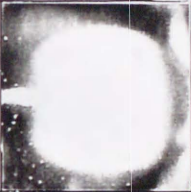
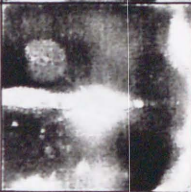
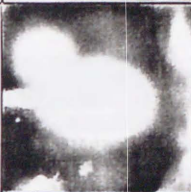

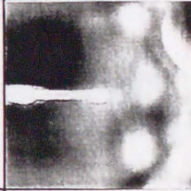





Ambient Temp.	When the Drop Comes into Furnace	Ignition	Flame	2nd Ignition	2nd Combustion	Just Before the Braking of the Capsule
736.6 K						
t	0 s	2.83 s	2.87 s			8.77 s
1071 K						
t	0 s	0.73 s	1.77 s	6.97 s	7.53 s	9.03 s
1177 K						
t	0 s	0.33 s	1.60 s	4.83 s	5.57 s	9.60 s

図5.5 微小重力下におけるマグネシウム
スラリー液滴の燃焼挙動
(Mg-0.40-ドデカン)

Ambient Temp.	When the Drop Comes into Furnace	Ignition	Flame	2nd Ignition	2nd Combustion	Just Before the Braking of the Capsule
818.2 K						
t	0 s	1.27 s	1.90 s			9.57 s
1208 K						
t	0 s	0.13 s	0.90 s	9.40 s	9.50 s	9.60 s
1505 K						
t	0 s	0.03 s	0.37 s	4.80 s	5.73 s	9.63 s

図5.6 微小重力下における純カーボン
スラリー液滴の燃焼挙動
(C-0.40-ドデカン)

(ii) 純カーボンスラリー

微小重力下における純カーボンスラリーの燃焼挙動について図 5.6 に示す。

低温度域（800K 付近）での着火の際には青色の炎が観察され、それに続く橙黄色火炎の輝度は高い。また微小重力時間内に固体燃焼は確認されなかった。

中温度域（1200K 付近）においては懸垂棒下端から着火しているのが観察され、火炎の輝度は低温度域のそれより低くなっており、火炎自体が黒ずんでいるのがわかる。火炎の収縮とともに球状のすす殻が形成され、消炎する。このすす殻はマグネシウムスラリーのものよりもはるかに黒色を帯びており、石英ガラス糸先端方向に円錐形となっている。固体燃焼の開始は確認されたが、微小重力時間内には燃焼は終了せず、カプセルの制動が終了した時点で燃焼が終了していた。

高温度域（1500K 付近）においては火炎の輝度はさらに失われる一方、すす殻表面の粒子濃度が表面の凹凸が確認できるほど高くなる。固体燃焼時の輝度も中温度域と比較して低下している。固体燃焼は微小重力時間内に終了した。

(iii) すず殻の生成

図 5.7 には、モータドライブ駆動の 35mm スチルカメラにより撮影した、雰囲気温度 1177K において燃焼中のマグネシウムスラリー液滴の連続写真を示す。撮影速度は 3 コマ / s である。写真の 4 コマ目付近から、火炎内の液滴周囲で、すす粒子の生成が縦長の球殻状に生じているのが観察される。すす粒子の殻は液滴の向かって左側に一部凝集の著しい部分を有し、写真 4 コマ目ではその部分の赤熱が点状に生じているのが見られる。そして時間の経過とともに、赤熱状態からすすの凝集の著しい状態に移行している。

この、すす粒子凝集の球殻状態からの逸脱については、火炎面内部および外部周縁について、液滴懸垂ロッドの挿入時や、電気炉内の自然対流により生じる流れが、ステップ的に収束するものではなく、液滴周囲の流れが完全にはゼロになり得ないため、確率的によどみ点的な部分が早く生じる箇所に、すす粒子やその前駆体が集積されることによるものと考えられる。

純カーボンスラリーを中、高温度域で燃焼させた場合は、図 5.6 のビデオ画像に示すように著しく凝集したすす殻がみられる。このときの球状火炎は輝度が低く、火炎内部が黒ずんでいる。これはスラリー燃料中に含まれるカーボン粒子とみられ、火炎の膨張の際に分散し、火炎内側に滞留したのと考えられる。すす殻の形成においては、このカーボン粒子群と不完全燃焼により生成したすすとがあわせて凝集している可能性が高いものとみられる。

特徴的な点として、純カーボンスラリーの場合、液滴の炉内への挿入直後では、スラリー燃料は石英ガラス糸先端にしか付着していなかったのに対して、液体燃料の球状火炎発生後では、石英ガラス糸全体に黒い粒子塊の付着が観察された。この粒子塊が収縮したすす殻であると思われる。この現象は、マグネシウムスラリーには見られず、密度の濃いすす殻は炭素成分を含んだスラリーの独特の現象であること裏付けている。

マグネシウムスラリーの場合も、固体燃焼時の火炎の膨張時に、酸化マグネシウムと思われる白色の粒子が火炎内部に分散しているが、純カーボンスラリーの場合ほど、火炎の収縮時にはこの粒子群は分散しない。

液体燃料の火炎期間にもすす殻形成、ふく射熱の蓄積などのうえで、固体粒子の違いによる影響が出てくるものと考えられる。

(2) 通常重力下の燃焼過程との比較

(i) マグネシウムスラリー

図 5.8, 図 5.9 にそれぞれ Mg-0.40- ドデカン液滴, Mg-0.40- セタン液滴の, 微小重力下と通常重力下の燃焼過程の比較を示す。一次火炎の着火遅れ, 燃焼期間ともに通常重力下と大きくは異ならないが, 通常重力下の最低着火温度よりも低い雰囲気温度で, 微小重力下では着火が起こっている。

(ii) 純カーボンスラリー

図 5.10, 図 5.11 にそれぞれ C-0.40- ドデカン液滴, C-0.40- セタン液滴の, 微小重力下と通常重力下の燃焼過程の比較を示す。マグネシウムスラリーと同様, 一次火炎の着火遅れ, 燃焼期間ともに通常重力下と大きくは異ならない。

(iii) 石炭スラリーとの相違について

第 4 章の石炭スラリー (太平洋炭 -0.50- ドデカン) 液滴の実験結果では, 微小重力下において, 通常重力下の下限界着火温度である 970K よりも 320K 程度低い, 650K 程度でも一次火炎の発生がみられた。また一次火炎の着火遅れは微小重力下の方が短く, 燃焼期間は長くなっていたが, マグネシウムスラリーおよび純カーボンスラリーでは, こういった微小重力下と通常重力下のあいだの顕著な差異はみられなかった。この要因については,

(1) 石炭中の揮発分の存在, (2) 固体粒子の粒子径の差異, (3) マグネシウムスラリーおよび純カーボンスラリーにおいて, 高温における固体燃焼条件を得るため, 電気炉発熱体を改造しており, 炉内の伝熱特性が, とくに通常重力下で石炭スラリーの場合と異なる可能性があること, などが考えられる。

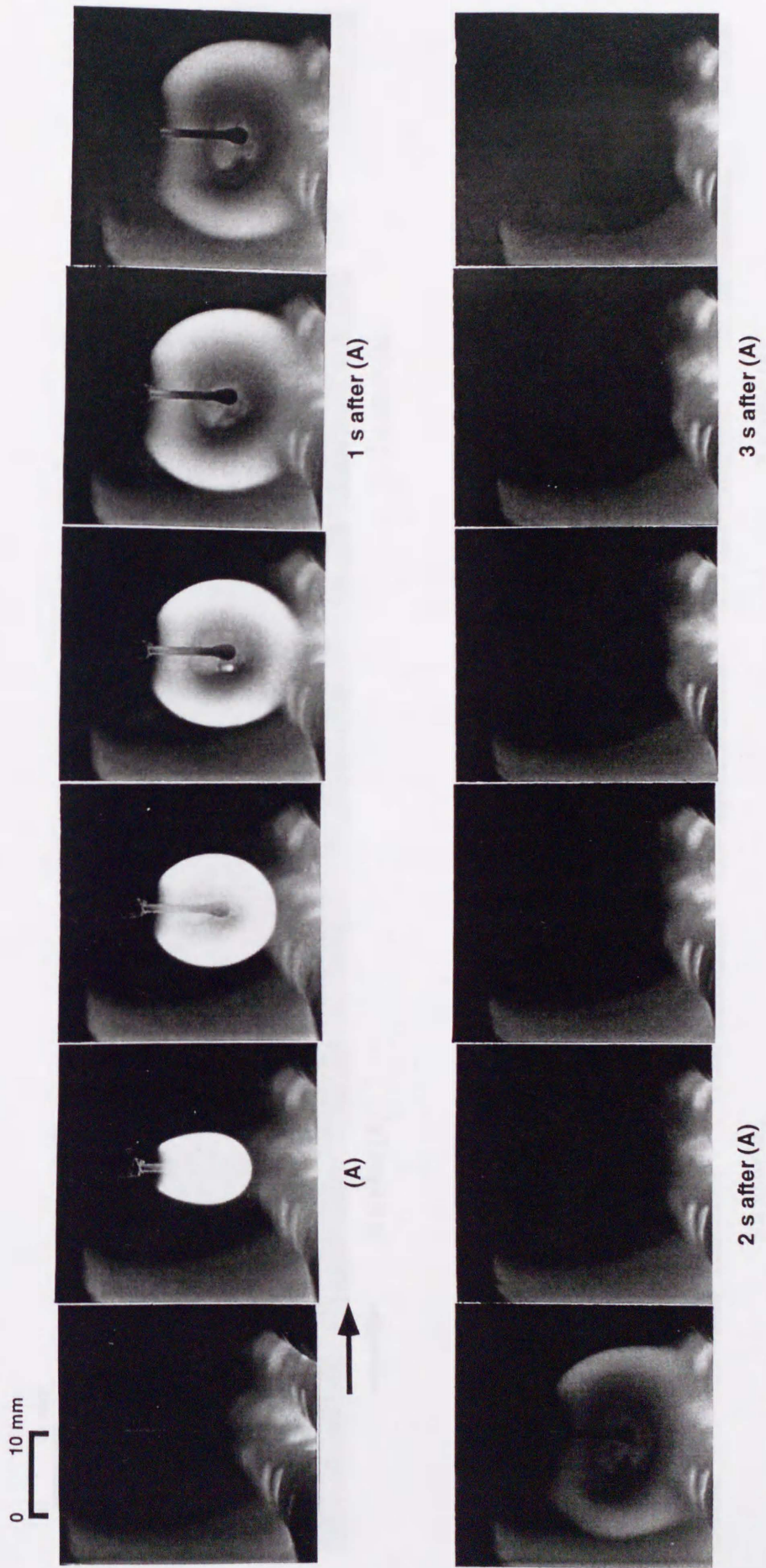


図5.7 Mg-0.40-Dデカン液滴の燃焼挙動の
連続写真 1/2
(3コマ/s, 雰囲気温度1177K)

0 10 mm



4 s after (A)

5 s after (A)



6 s after (A)

7 s after (A)

図5.7 Mg-0.40-ドデカン液滴の燃焼挙動の
連続写真 2/2
(3コマ/s, 雰囲気温度1177K)

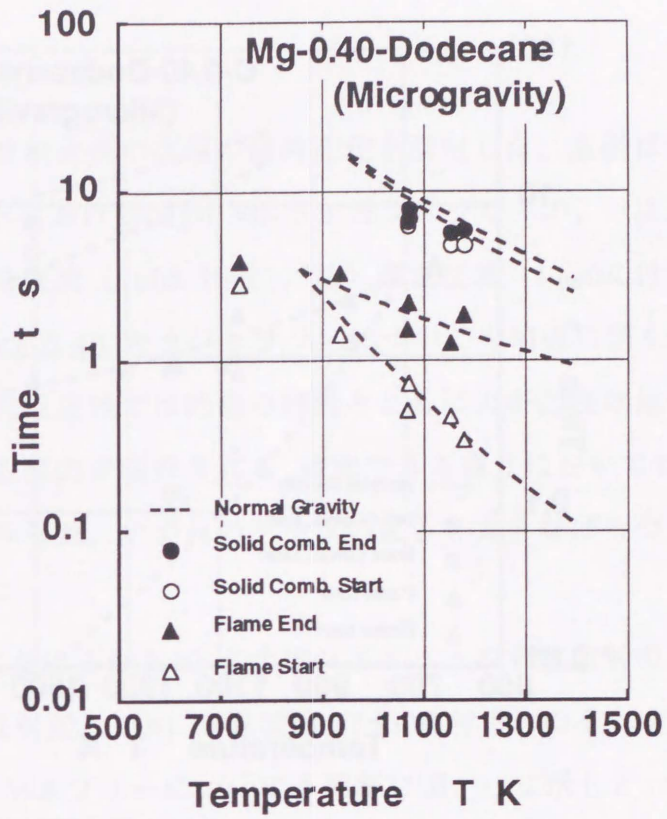


図 5.8 Mg-0.40-ドデカン液滴の燃焼期間の微小重力下と通常重力下の比較

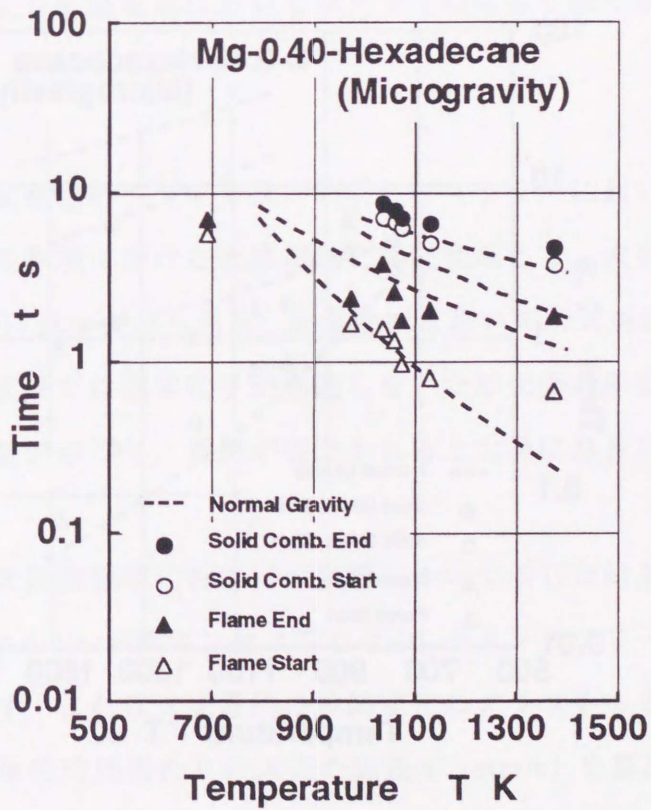


図 5.9 Mg-0.40-セタン液滴の燃焼期間の微小重力下と通常重力下の比較

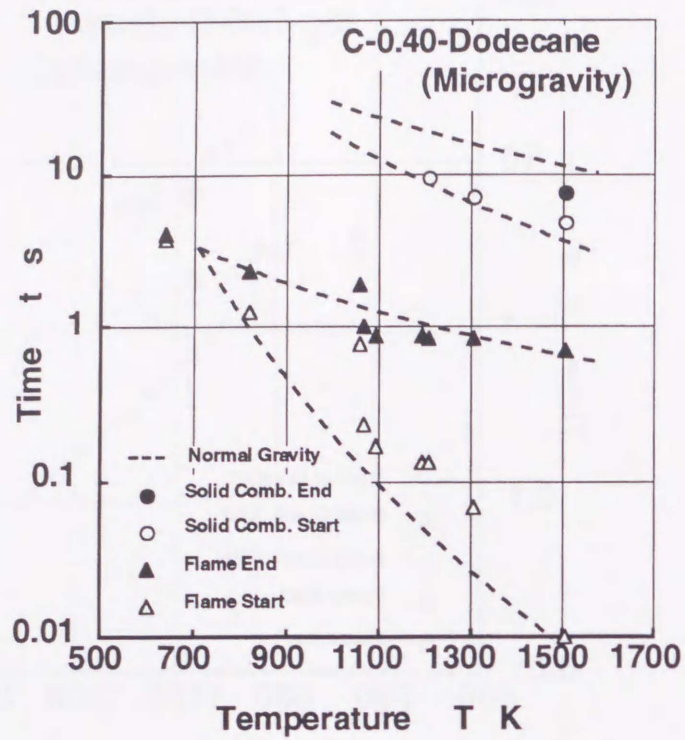


図 5.10 C-0.40-ドデカン液滴の燃焼期間の微小重力下と通常重力下の比較

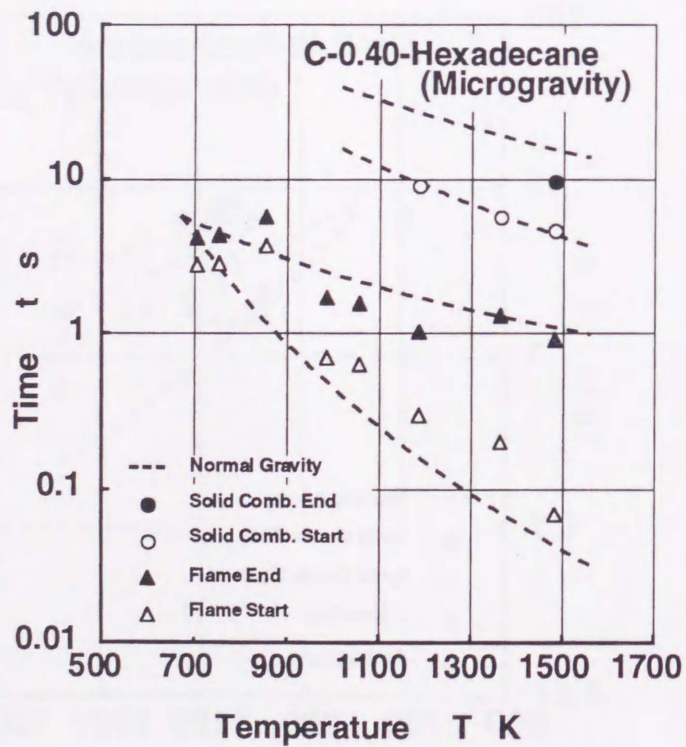


図 5.11 C-0.40-セタン液滴の燃焼期間の微小重力下と通常重力下の比較

(3) 火炎直径

(i) マグネシウムスラリー

微小重力下の液滴の球状火炎の直径の経時変化を測定した。直径は画面水平方向の定方向径である。微小重力下における Mg-0.40-ドデカンスラリーの、一次火炎期間の火炎直径の時間変化を、(a) 低温度域 (700K 付近)、(b) 高温度域 (1100K 付近) のそれぞれについて図 5.12 に示した。Mg-0.40-セタンスラリーについても同様に図 5.13 に示した。いずれの液体燃料においても低温度域では時間の経過とともに火炎直径は減少し、逆に高温度域では火炎直径は増加する傾向が観察される。確認できる限りにおいては 900K 以上の温度域では火炎直径の増加がみられ、いずれのグラフの傾きも大きなばらつきはみられない。

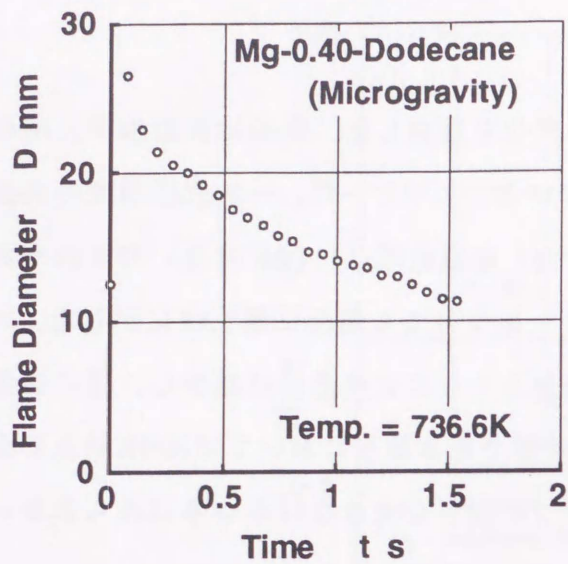
(ii) 純カーボンスラリー

同様に、微小重力下における C-0.40-ドデカンスラリーの液体燃料の火炎直径の時間変化を (a) 低温度域 (800K 付近)、(b) 高温度域 (1500K 付近) のそれぞれについて、図 5.14 に示した。C-0.40-セタンスラリーについても同様に図 5.15 に示した。いずれの液体燃料においても雰囲気温度の上昇につれて火炎直径も増加し、極大値をむかえた後、比較的急激に減少している。純カーボンスラリーにおいては、1100K 前後を境にグラフの傾きが異なっている。境界温度より低温度域においてはグラフの傾きも緩やかであるが、高温度域では傾きが急である。

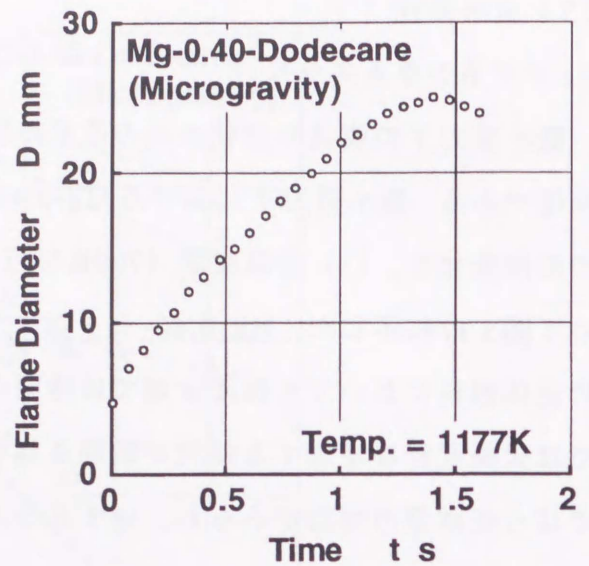
(iii) 火炎直径変化

上述の火炎直径の時間変化のグラフでは、いずれのスラリーにおいても、固体粒子の燃焼が開始する雰囲気温度を境に分けた低温度域と高温度域とで、火炎直径が増大する速度 (火炎膨張率と称する) に違いがみられる。低温度域においては火炎膨張率は小さく、高温度域では大きい。低温度域では固体粒子が燃焼しないため火炎の膨張は緩慢であるが、高温度域で固体粒子の燃焼が起こり、燃焼が促進されると火炎は急速に膨張すると考えられる。

雰囲気温度の変化が火炎膨張率におよぼす影響について示した結果を、Mg-0.40-ドデカン、Mg-0.40-セタン、C-0.40-ドデカンおよび C-0.40-セタンスラリーのそれぞれについて図 5.16 (a) ~ (d) に示す。これは火炎直径の時間変化のグラフをもとに、火炎直径 (mm) を時間 (s) で割って、単位時間当たりの火炎の膨張率 (mm/s) を算出した。但し、火炎直径変化のグラフにおいて、傾きが一定の期間 ($t=0$ から火炎直径が最大となる t の値の範囲まで) のみで計算を行っている。

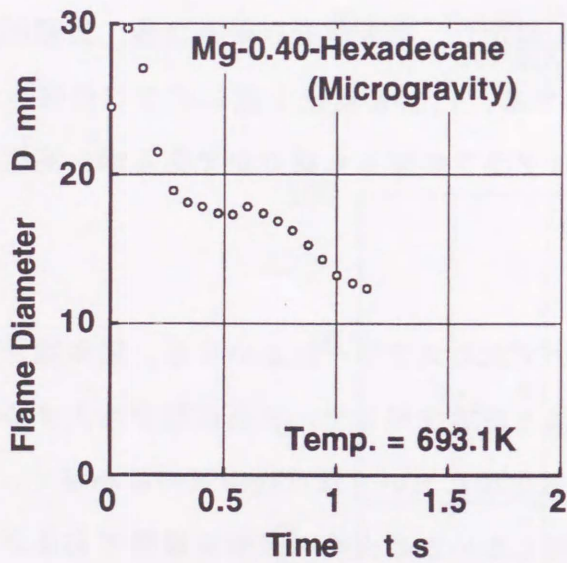


(a) 低温度域

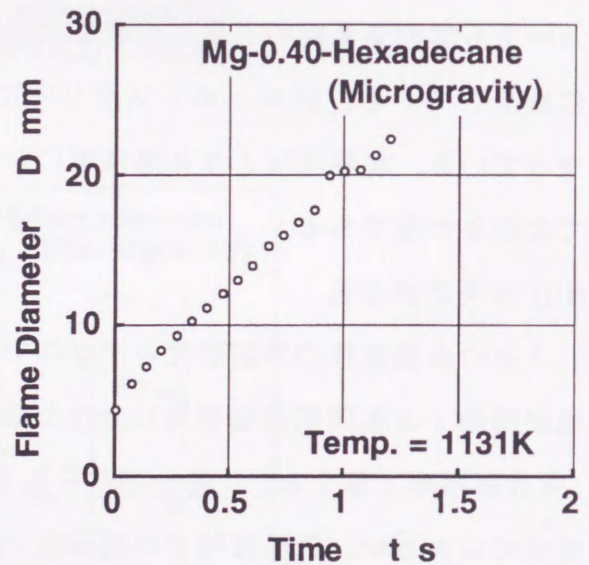


(b) 高温度域

図 5.12 Mg-0.40-ドデカン液滴の火炎直径の時間変化

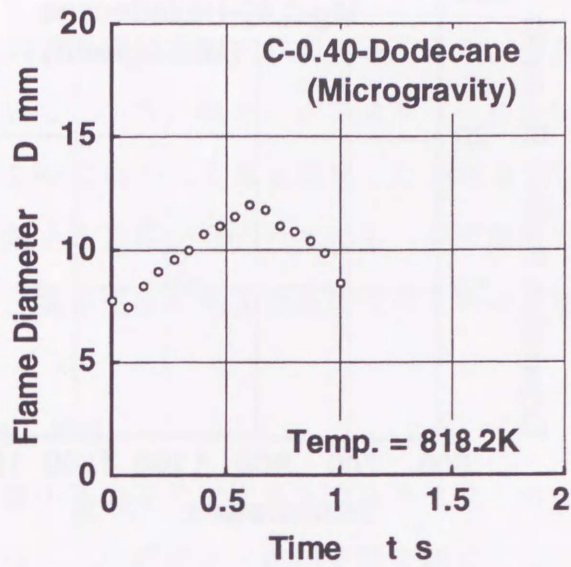


(a) 低温度域

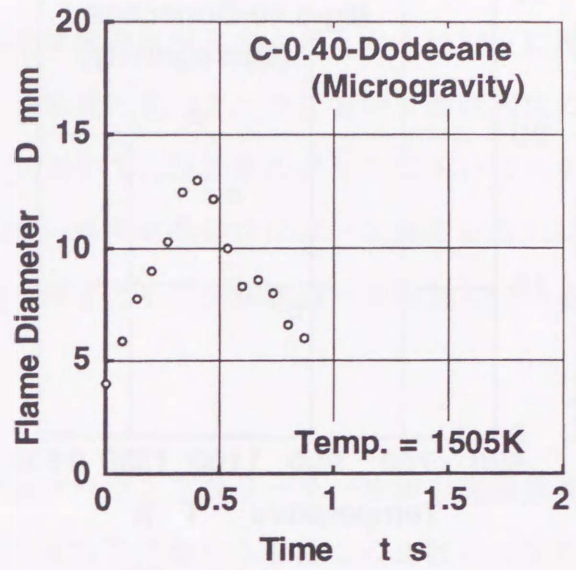


(b) 高温度域

図 5.13 Mg-0.40-セタン液滴の火炎直径の時間変化

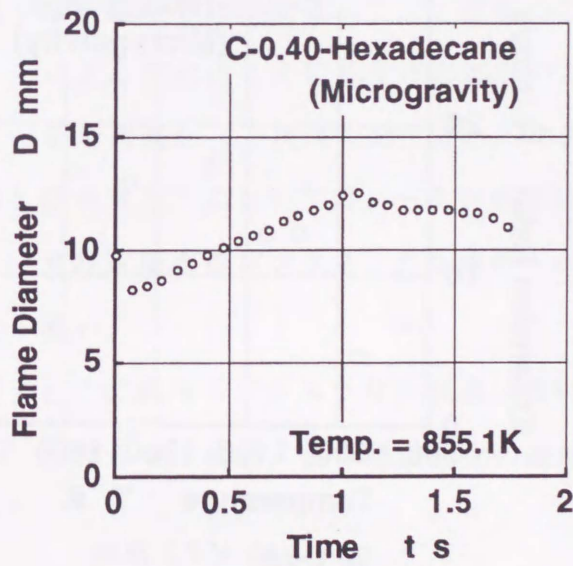


(a) 低温度域

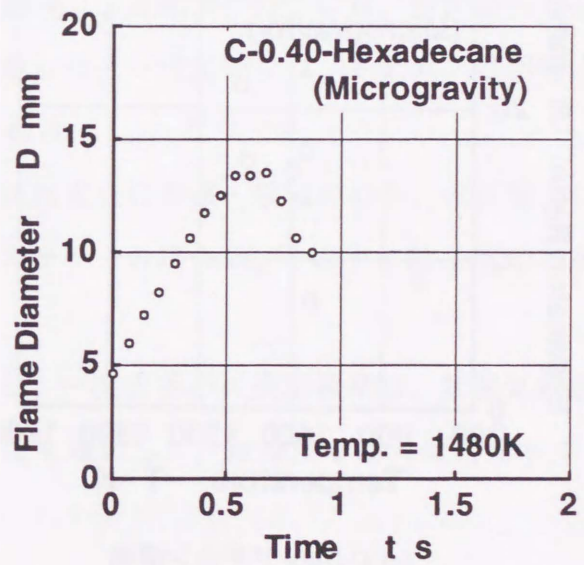


(b) 高温度域

図 5.14 C-0.40-ドデカン液滴の火炎直径の時間変化

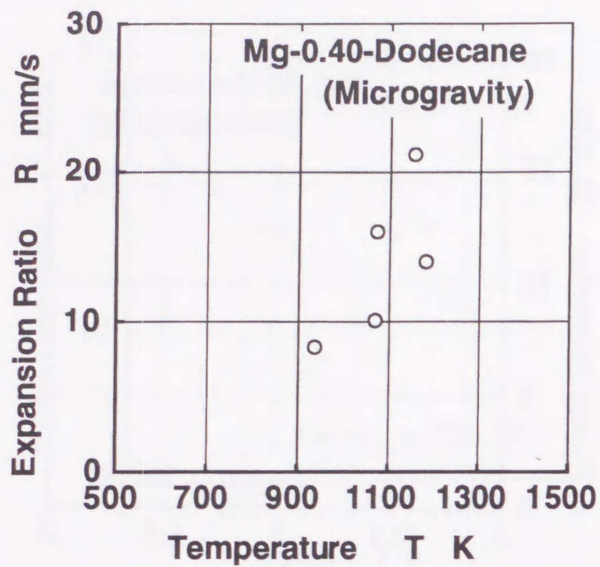


(a) 低温度域

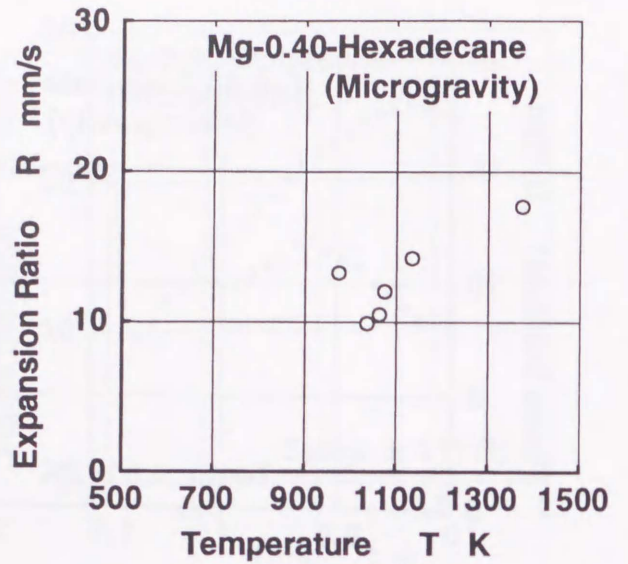


(b) 高温度域

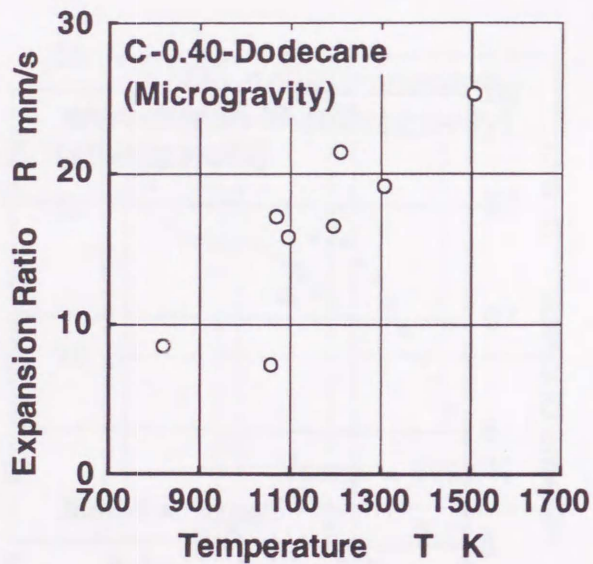
図 5.15 C-0.40-セタン液滴の火炎直径の時間変化



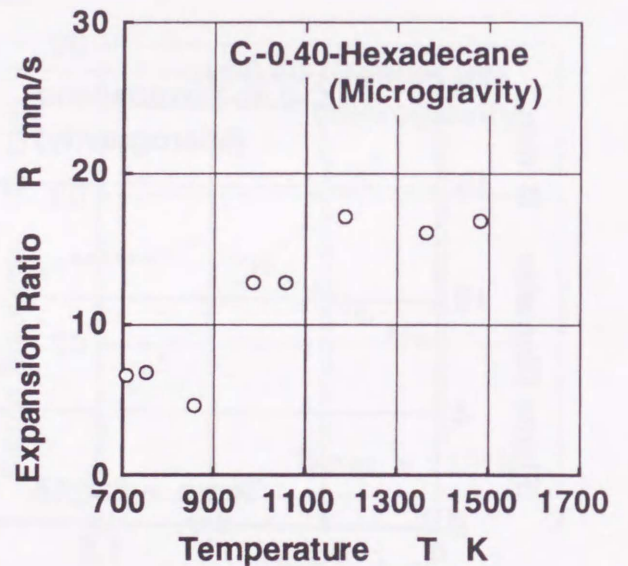
(a) Mg-0.40-ドデカン液滴



(b) Mg-0.40-セタン液滴



(c) C-0.40-ドデカン液滴



(d) C-0.40-セタン液滴

図 5.16 雰囲気温度の変化が火炎膨張率に及ぼす影響

マグネシウムスラリーについては液体燃料の火炎膨張率は液体燃料の種類によらず、最低火炎温度においては負の値をとり、それ以後は雰囲気温度の上昇とともに徐々に増加している。一方、純カーボンスラリーにおいては燃焼期間のグラフにおいて燃焼期間の形態が2つに分かれる境界温度（約1100K前後）において、膨張率のグラフにおいてもその値の集まる領域が分かれている。境界温度より低い温度域の値はほぼ一定値をとるのに対して、境界温度を超えた温度域のものは温度の上昇とともに火炎膨張率は増加している。

5.4 結言

微小重力下でマグネシウムスラリーおよび純カーボンスラリー単一液滴を高温雰囲気にし、その着火・燃焼挙動を観察した。通常重力下における挙動との比較などを行った結果、以下のようにまとめられる。

- (1) 微小重力下においては、液体燃料燃焼時に発生する一次火炎の最低発生温度が、通常重力下よりも低い。
- (2) 微小重力下におけるスラリー液滴の固体燃焼（二次燃焼）特性には、液体燃料の違いによる変化はとくに見受けられない。しかしセタン使用時には、ドデカン使用時よりも着火遅れ（一次火炎発生遅れ）は長くなる。
- (3) 微小重力下においては、一次火炎期間の球状火炎の膨張・収縮ののち、火炎面上にすす粒子層が観察される。また純カーボンスラリーの場合は、そのすす粒子層の密度が濃い。
- (4) とくに純カーボンスラリー液滴においては、一次火炎の火炎膨張率は、雰囲気温度を上昇させた場合、固体燃焼発生の最低温度を境にして、段階的な増大傾向を示す。

第6章 液滴が混在する予混合気の点火および火炎伝播特性

6.1 緒言

燃料噴霧の蒸発により形成された燃料蒸気-空気混合気中に噴霧液滴が混在していると、噴霧液滴周辺で混合気の燃料濃度が局所的に高くなり、混合気はいわゆる噴霧液滴により局所的に成層化された微細成層混合気⁽¹⁾となる。ディーゼル、ガスタービン、また筒内直噴成層給気ガソリン機関などにおいては、このような燃料噴霧が混在する可燃混合気の燃焼が、基礎的な過程となっている。しかし種々の粒径分布をもって混在する燃料液滴の存在により、局所的に成層化された混合気の燃焼過程に及ぼす影響を、燃焼室内の流れの乱れをできるだけ小さくし、液滴と周囲気流との相対速度をゼロに近づけて調べようとした研究^{(2)・(3)}は少なく、さらにはそれらの究極的な方法と考えられる無重力法を用いたものは、Ballalら⁽⁴⁾の噴霧流平面火炎の実験例を除いては見られない。

本章では灯油噴霧とプロパンの混在割合を変化させた場合の点火および火炎伝播特性を明らかにすることを目的とし、通常重力下での実験と微小重力下での実験を試みる。そして地上において噴霧粒径の測定を行い、他の研究者の実験結果との比較を行う手法について検討する。実験は地下無重力実験センター 10s 落下施設にて行った。

6.2 実験装置および方法

6.2.1 実験装置

図 6.1 に本実験で使用した実験装置の外観を示す。JAMIC の実験装置搭載ラックにおいては縦置き 1/2 ラック (L870 mm x W425 mm x H918 mm) となる。実験装置の構成は大別して、燃焼容器、灯油噴射系、混合気調整系、点火系、排気系、撮影系および実験装置制御系からなる。実験系の構成を図 6.2 に示す。

図 6.3 に落下実験時の装置作動シーケンスの概略を示す。落下実験前に、予め混合比を調整したプロパン-空気混合気で燃焼容器内を常圧で置換し、実験装置を落下カプセルに搭載する。落下カプセル搭載後、容器内の混合気は不均一な分布を防ぐために混合気循環用ポンプにより循環を行う。落下開始後にアキュムレータにより加圧された灯油燃料を、噴霧助走部および観察部からなる燃焼容器内にガソリン機関用インジェクタを用いて噴射する。灯油噴射後、浮遊、分散した灯油液滴が混在するプロパン-空気混合気に、容器最下部に設けた点火電極により点火を行い、上方への火炎伝播状況を 8mm ビデオカメラで撮影

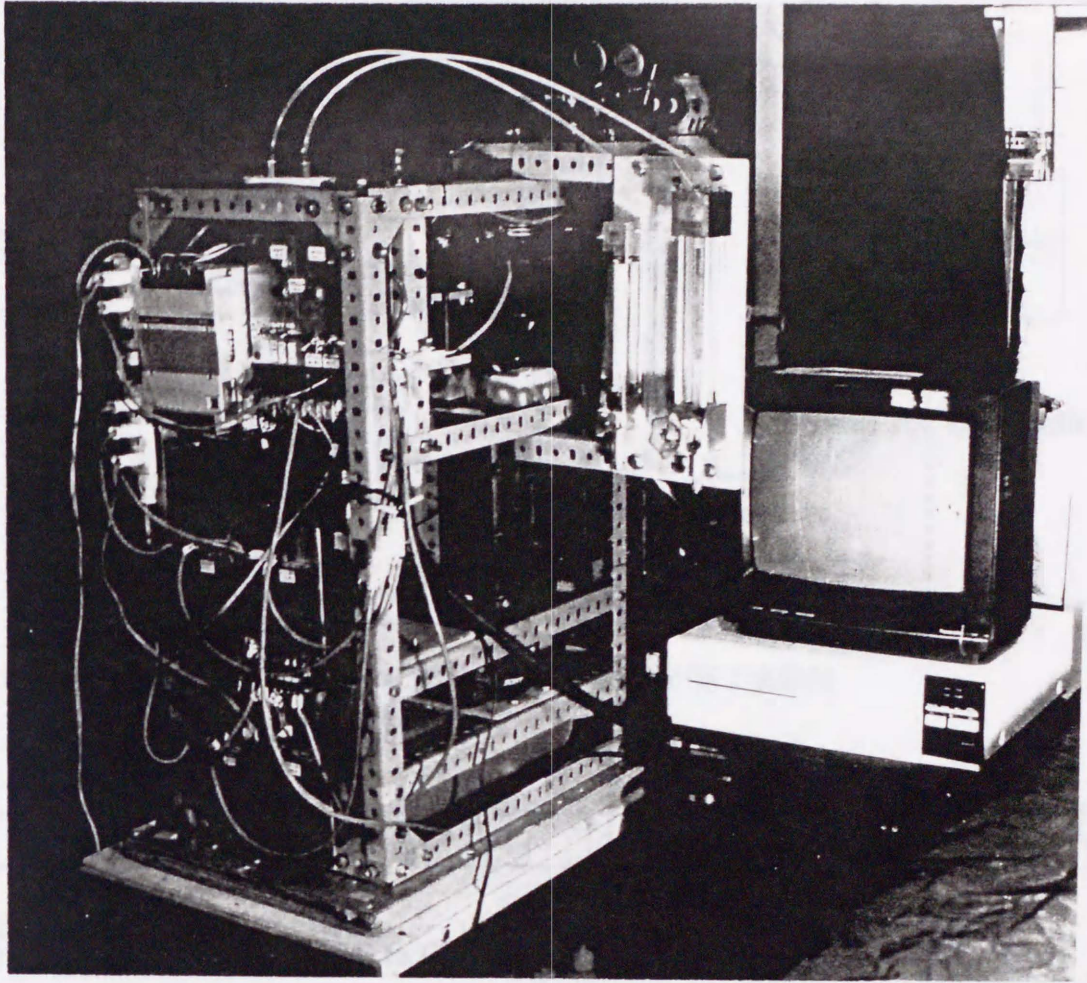


図 6.1 火炎伝播落下実験装置外観

する。点火後の燃焼容器内の燃焼ガスの膨張に対応するため排気ダクトを設け、点火直前までは予混合気の充満する容器とダクトの間はPEフィルムで隔てている。そして点火直前にPEフィルムを取り去ることにより点火後の膨張したガスをスムーズに排出して、円滑に上方伝播する火炎面を得る。以上の落下開始後の装置各部の作動制御はプログラマブルコントローラ（シャープ、New Satellite W-10）によって行う。

次に実験装置各部について述べる。燃焼容器（火炎伝播管）の概略を図 6.4 に示す。2 基の燃焼容器はそれぞれ、燃料噴射用インジェクタを組み入れた $\phi 105 \times 190$ mm の円筒状の内部をもつ塩ビ製の噴霧助走部、および $50 \times 50 \times 420$ mm の矩形断面をもち上部に円形の、下部に矩形のフランジ部を持ったアクリル製の観察部からなっている。観察部の厚さ

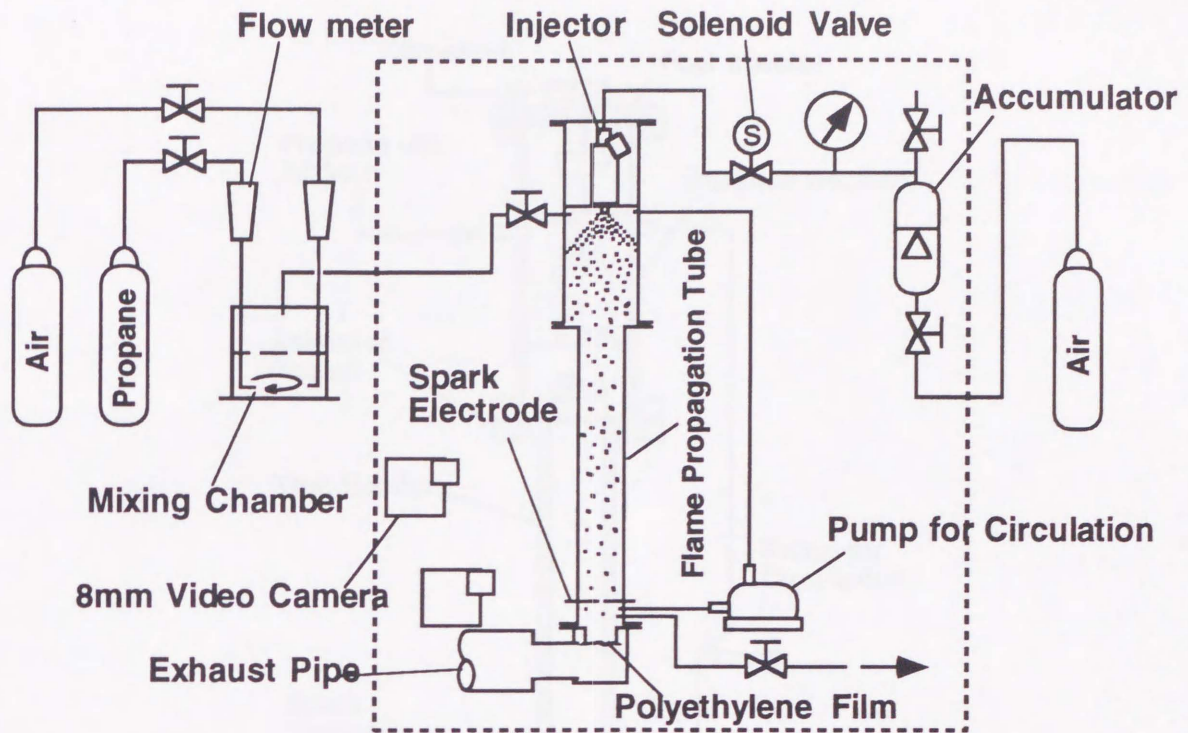


図 6.2 実験系の構成 (点線内が落下実験装置部分)

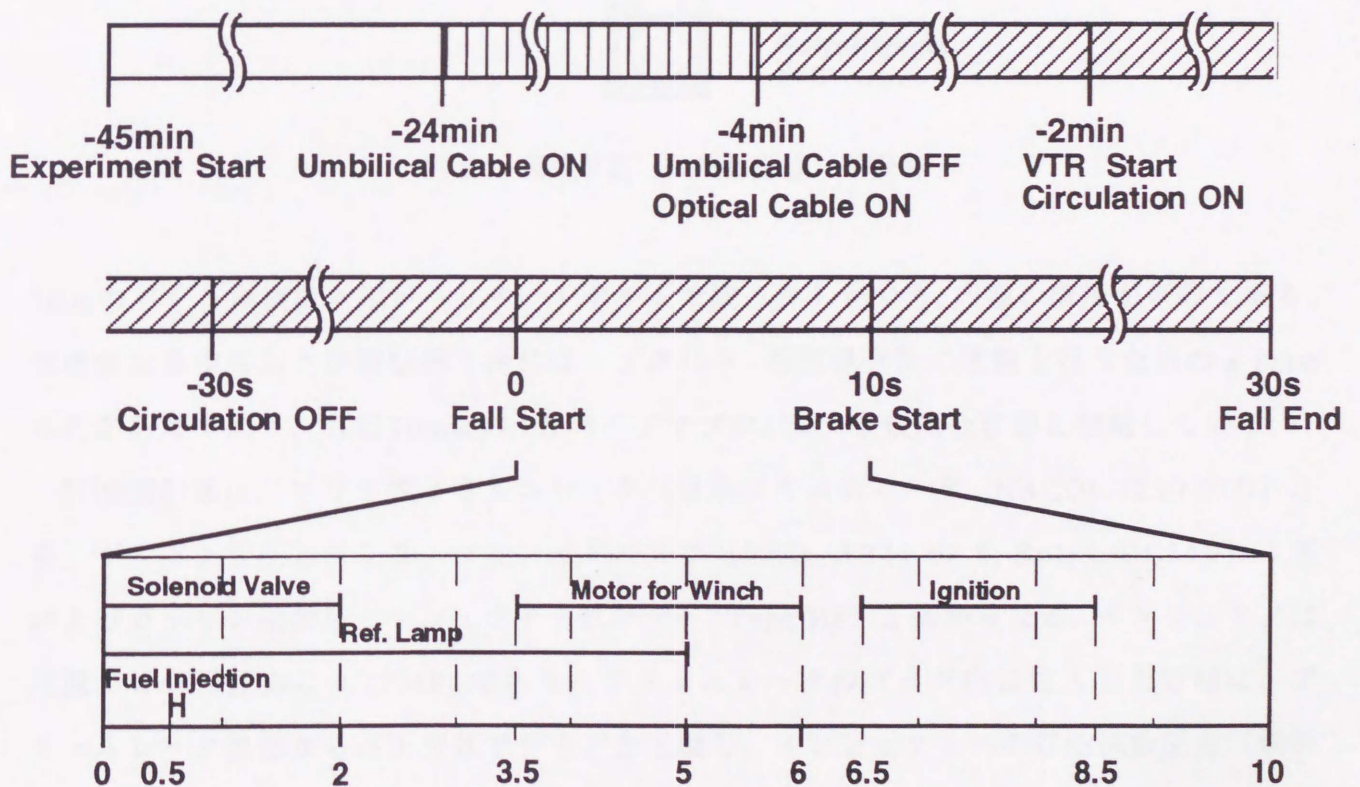


図 6.3 落下実験時の装置作動シーケンス

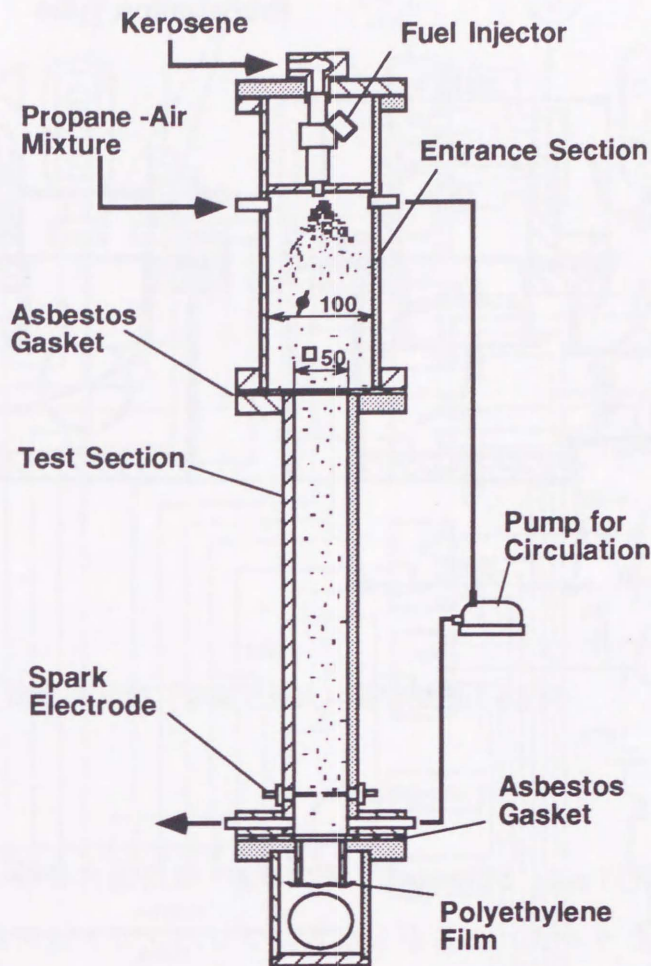


図 6.4 燃焼容器（火炎伝播管）の概略

5mmの亚克力板は一辺がヘリサートボルトで取り外しができ、内部の清掃が可能である。噴霧助走部中央および観察部下端には、プロパン-空気混合気で置換を行うための $\phi 8\text{mm}$ の孔があけてあり、外径10mmのPEパイプでプロパン-空気混合容器と接続している。

灯油噴射系は、ブラダ式アキュムレータ（日本アキュムレータ，NACOL J250-01D）1基，ブルドン管圧力計1基，ソレノイドバルブ（CKD，AB31-02-2，Rc1/4，DC24V）1基およびガソリン機関用インジェクタ（デンソー，Type HF）2基からなる。インジェクタは実機での使用圧力は0.27MPaであり，アキュムレータのブラダ内に注入した灯油は，アキュムレータ後部から高圧空気でブラダを圧縮し，インジェクタへの灯油供給圧力（燃料圧）は圧力計読みで0.22MPaで一定とした。灯油供給ラインには内径3mmの銅パイプを用い，二つのインジェクタに分岐する前にソレノイドバルブを設け，噴射直前まではインジェクタに圧力がかからないようにしている。

混合気調整系は，プロパンおよび空気用の浮遊式流量計2基（大阪フローメータ，プロパ

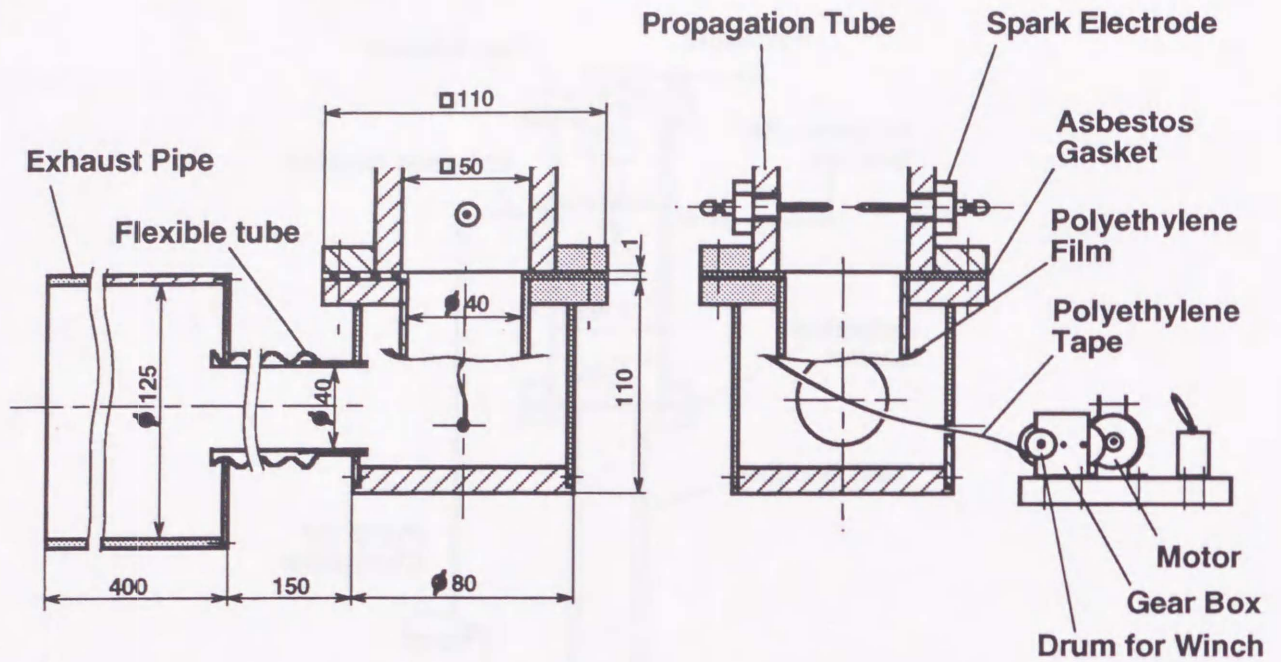
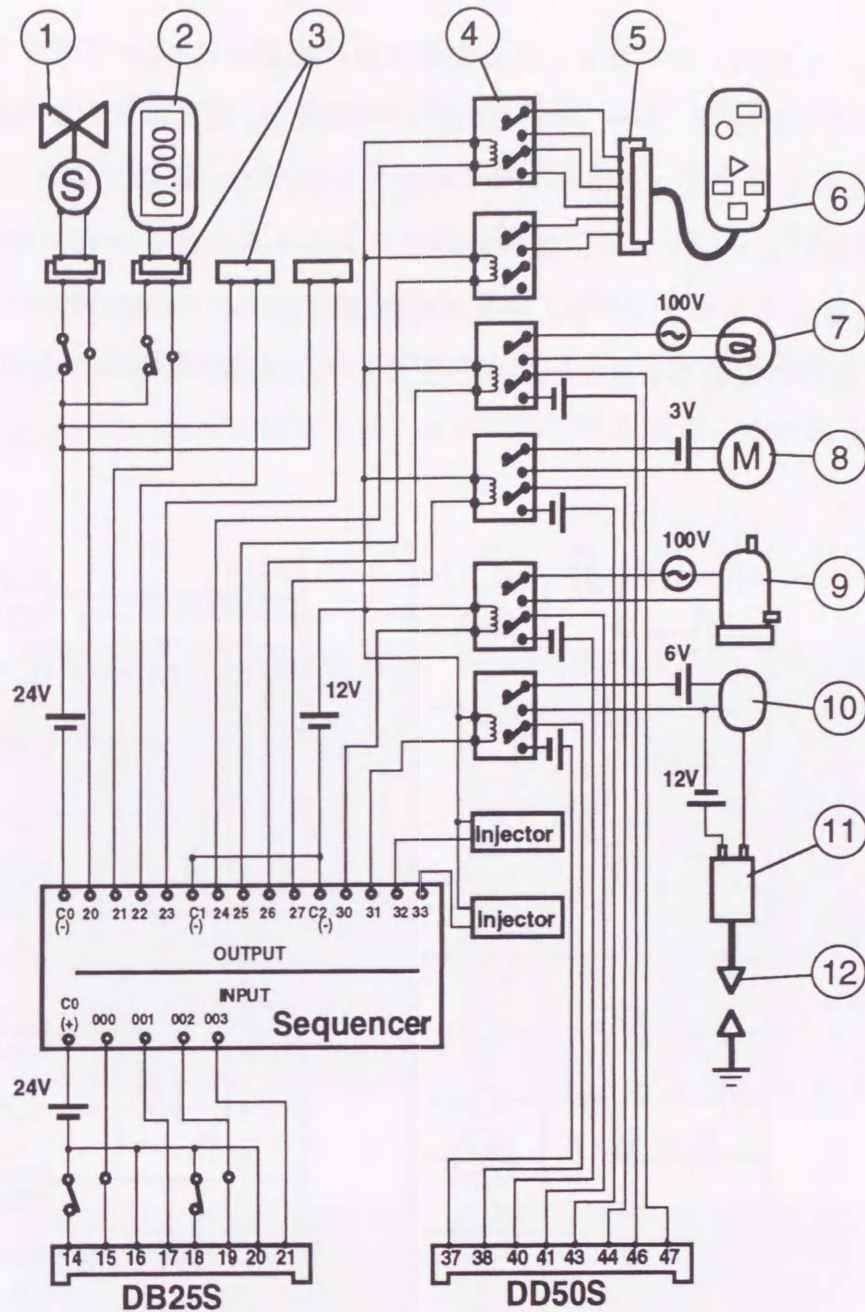


図 6.5 燃焼容器（火炎伝播管）排気部詳細

ン用 max.1l/min, 空気用 max. 50l/min), プロパン-空気混合容器 1 基および混合気循環用電動ポンプ（ダイヤフラム式）2 基からなる。プロパンガスは市販のものを用い、組成はプロパン 97% である。プロパン当量比は空気流量 10l/min に対するプロパン流量（0.42l/min で当量比 1）で調整した。プロパン-空気混合気による燃焼容器内の置換は 1min 以上行い、容器内充填後、落下前に 1min 循環を行い、混合気の放置による分布の不均一を防ぐ。

点火系は、点火電極 2 組およびガソリン機関用イグナイタ（マツダ、B 型エンジン用）2 基からなる。点火電極間隔は 14mm に調整してある。イグナイタには DC12V-2.5A の電源が供給され、シーケンサの出力信号以降 0.2s おきに 5 回の放電を行う。

排気系は排気部、PE フィルムの巻取り除去用モータおよび内径 38mm の塩ビ管の排気ダクトからなる。図 6.5 に排気部の詳細を示す。排気部内の燃焼容器につながる塩ビ管断面に液状ガスケット（Holts, 自動車部品補修用）を塗布し、断面にビニールひもをビニールテープ片で取り付けた PE フィルムを漏れが起こらないように貼りつける。ビニールひもは排気部側面の小孔から引き出しておき、燃焼容器観察部の矩形のフランジにガスケットをはさんで取り付けたのちにビニールテープ片でモータ駆動のドラムに巻き付ける。モータは点火タイミング 2.5s 前から作動し、PE フィルム巻取りを行って、燃焼容器と排気ダクトをつなぎ点火後の燃焼ガスを燃焼容器から排気ダクトに円滑に排出する。排気ダクトはダクト



- | | |
|---------------------|---|
| 1 Solenoid Valve | 8 Motor for Winch of Polyethylene Film |
| 2 1/1000 sec Timer | 9 Pump for Circulation of Propane - Air Mixture |
| 3 Connector (2-pin) | 10 Power Unit |
| 4 Relay | 11 Ignition Coil |
| 5 Connector (9-pin) | 12 Spark Electrode |
| 6 Remote Controller | |
| 7 Reflex Lamp | |

図 6.6 制御系システム図

内で燃焼ガスの排気温度と流速を低下させる目的で設けている。

撮影系は 8mm ビデオカメラ (SONY, CCD-TR900) 3 台 (うち 2 台は JAMIC で借用), ミニレフランプ (30W) 1 基および計時に用いた制御用クォーツタイマ (OMRON, H5CN-

XZNS,0.001s~9.999s) からなる。火炎伝播状況の撮影時は8mmビデオカメラはズーム最大、フォーカス手動固定、シャッタースピード1/100 s, 絞りは最大から2クリック絞って固定した。8mmビデオは2台はリモコン起動, 1台は流し撮りとした。

実験装置制御系はシーケンサ, 落下実験用D-subコネクタインタフェース, ビデオカメラ操作リモコンインタフェース, 装置各部制御用リレー (OMRON MY2N, DC12V) 6個からなる。制御系の配線図を図6.6に, シーケンサの作動プログラムを示すラダー図を図6.7に示す。

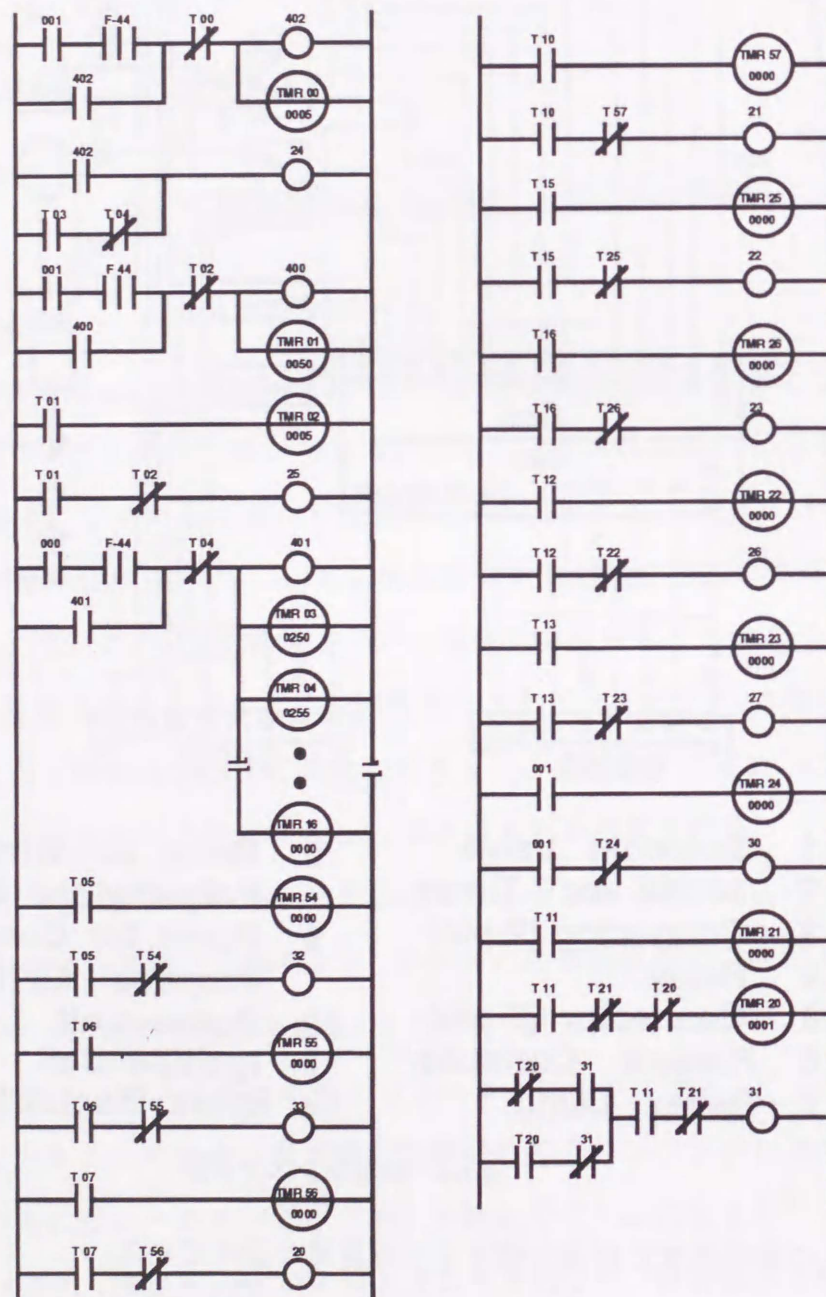


図6.7 シーケンサプログラム (ラダー図)

6.2.2 予備実験

図 6.8 に燃焼容器（火炎伝播管）の閉鎖時の微小重力場における噴霧挙動を示す。火炎伝播管をテーピングにより閉鎖し、 $X=0.5s$ から $1s$ 間噴射を行い、噴射終了直後、 $1s$ 後、 $3s$ 後、 $5.5s$ 後の挙動の $8mm$ ビデオカメラによる撮影結果を示している。画像はシャッタースピード $1/60s$ 、コマ数 $30frames/s$ の画像の field 画面 ($1/60s$) をコンピュータに取り込み、出力したものである。各画像の比較から、噴射終了後 $5.5s$ では燃料液滴の移動量が減衰し、静止状態に近づいているのが観察され、点火時期が噴射後のこの程度の時間で十分なものと判断した。

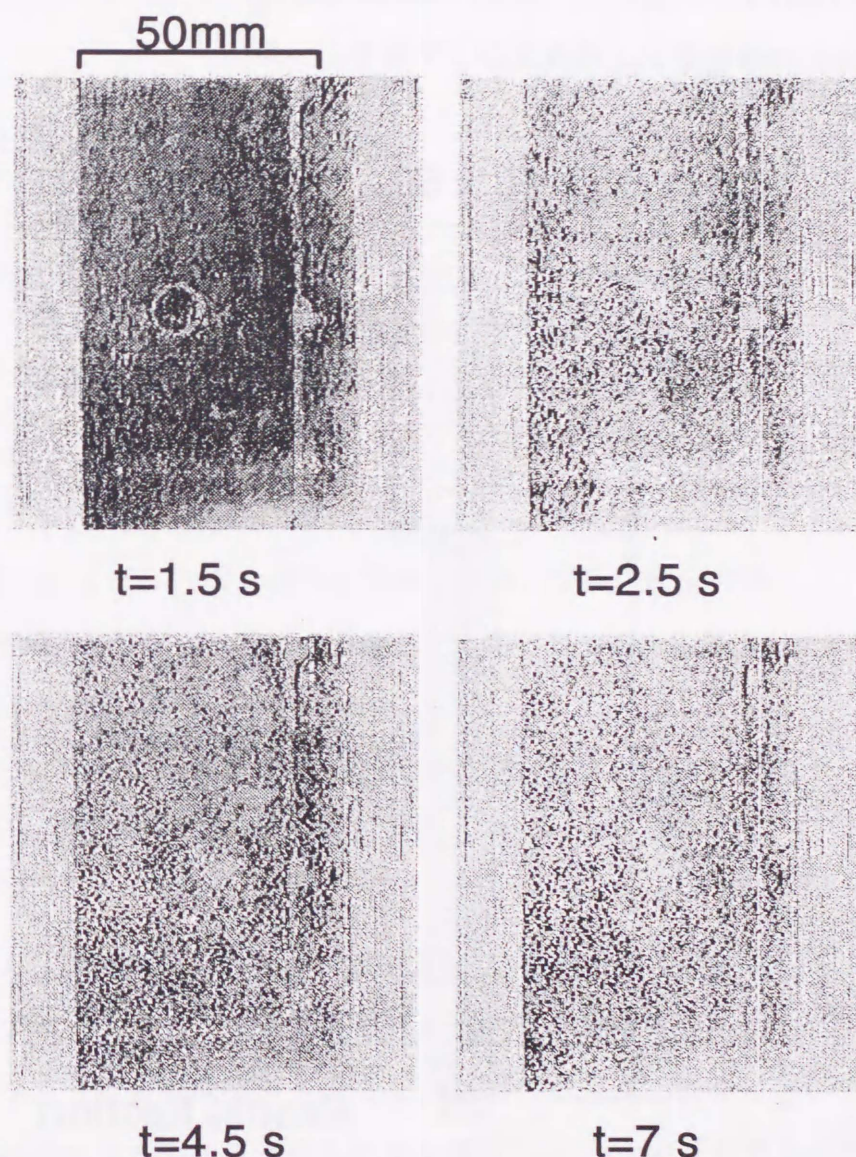


図 6.8 微小重力下における噴霧挙動
(落下と同時に $X=0$ から $1s$ 間噴射)

6.2.3 灯油当量比測定

灯油当量比は燃焼容器内への灯油有効噴射量を有効容器容積で除したものと、理論燃空比の比から算出した。算出にあたっては灯油の理論燃空比を (1/15) kg/kg, プロパンの理論燃空比を (1/15.6) kg/kg (以上文献5), 灯油密度 0.80g/cm^3 とした。灯油有効噴射量の測定は、燃焼容器観察部最下部の矩形フランジ部で規定の期間噴射した灯油噴霧を回収し、壁面に付着せずに観察部内を沈降した噴霧液滴量を灯油有効噴射量とした。図6.9に有効容器容積の概略を示す。

燃料圧は 0.22MPa で一定とし、規定の噴射期間は短いほうから 0.05s , 0.10s , 0.15s であり、各3~5回分の噴射量を3回測定して平均をとった。

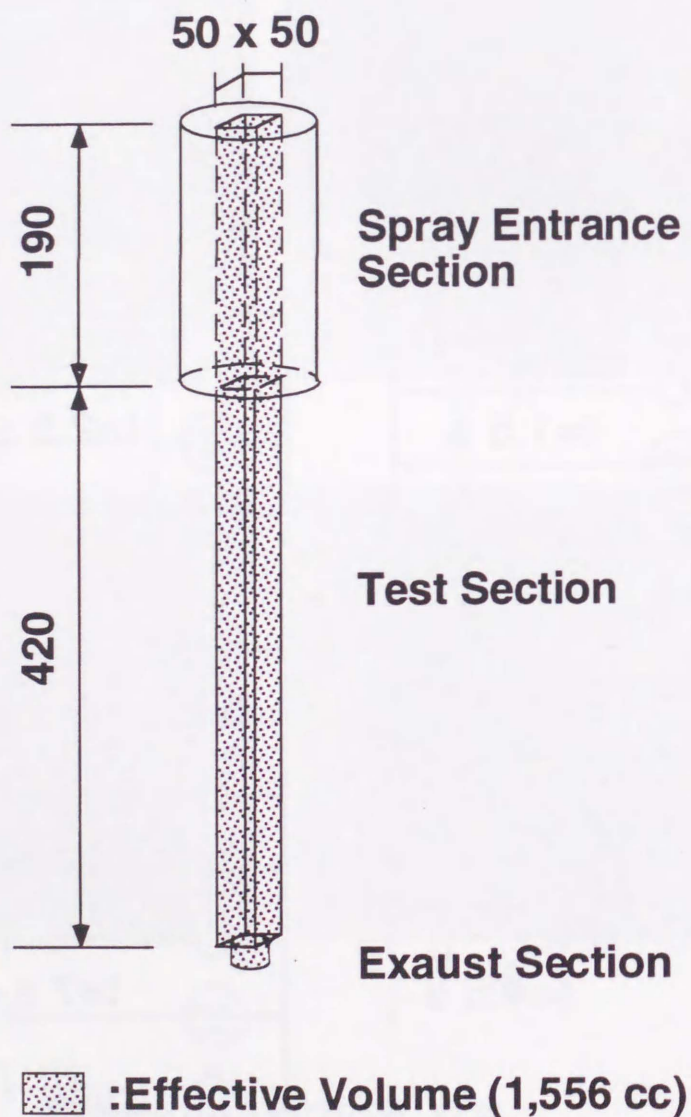
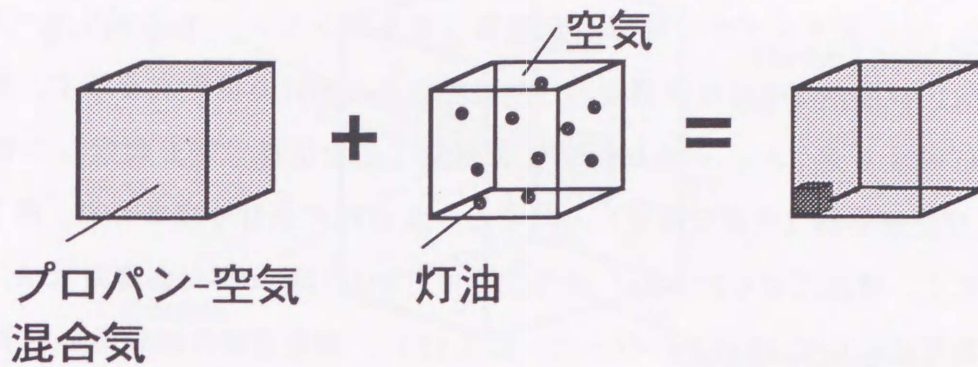


図 6.9 灯油当量比算出のための有効容器容積の概略



$$\phi_t (\text{総合当量比}) = \phi_g (\text{プロパン当量比}) + \phi_l (\text{灯油当量比})$$

$$R_g (\text{ガス混合割合}) = \frac{\phi_g (\text{プロパン当量比})}{\phi_t (\text{総合当量比})}$$

図 6.10 総合当量比およびガス混合割合の算出方法

6.2.4 総合当量比およびガス混合割合の算出方法および条件設定方法

本実験で用いる操作パラメータである液滴混在予混合気の総合当量比 ϕ_t およびガス燃料割合 R_g は、図 6.10 のように定義される。すなわち、

$$(\text{総合当量比 } \phi_t) = (\text{灯油当量比 } \phi_l) + (\text{プロパン当量比 } \phi_g)$$

$$(\text{ガス燃料割合 } R_g) = (\text{プロパン当量比 } \phi_g) / (\text{総合当量比 } \phi_t)$$

である。

総合当量比およびガス混合割合の条件設定方法は、前述の灯油噴射期間をシーケンサにより設定し、またプロパンおよび空気流量を浮遊式流量計で調整することにより行った。条件は総合当量比をガス混合割合よりも優先し、希望のガス混合割合に近いシーケンサ設定による灯油噴射期間をまず決めて灯油当量比を算出し、希望の総合当量比からそれを引いたものがガス当量比となるように流量計でプロパン-空気混合気を調整した。

6.2.5 LDSA を用いた噴霧粒径測定

図 6.11 に、レーザドップラー粒径測定装置（東日コンピュータアプリケーションズ，LDSA-1200A）を用いた噴霧粒径測定の、燃焼容器内における測定点を示す。測定点は点火プラグが位置する点（A）、火炎伝播速度を測定した伝播形態を観察した領域の 2 点（B,C）、および燃焼容器（火炎伝播管）入口付近の点（D）の合計 4 点とした。落下実験・地上実験と同じく、噴射圧は 0.22MPa、使用流体は灯油とした。また測定回数は、各点、各噴射期間の条件について 10 回ずつ行った。図 6.12 に、測定空間の詳細図を示す。

●: Measurement Points

M.A.: Measurement Area for Flame Propagation Velocity

O.A.: Observation Area for Flame Propagation Processes

Points	Distance from Spark Electrode
A	0
B	115
C	215
D	365
a	65
b	265

Unit : mm

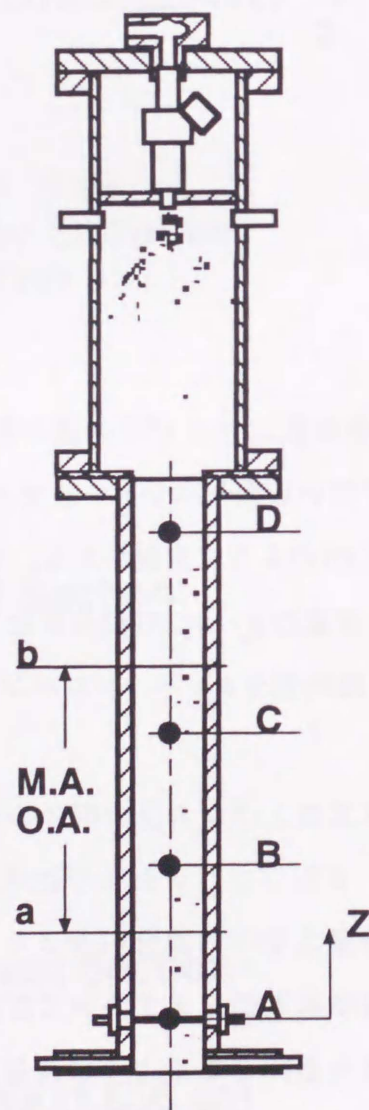


図 6.11 燃焼容器（火炎伝播管）における粒径測定点

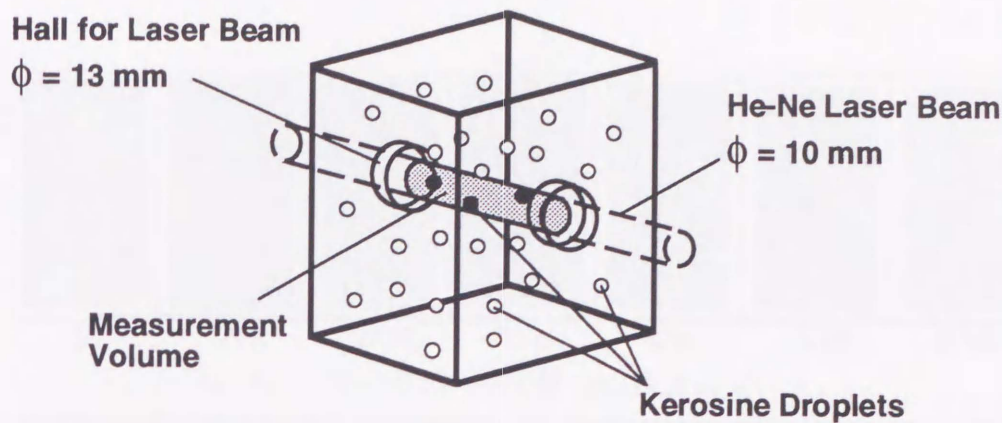


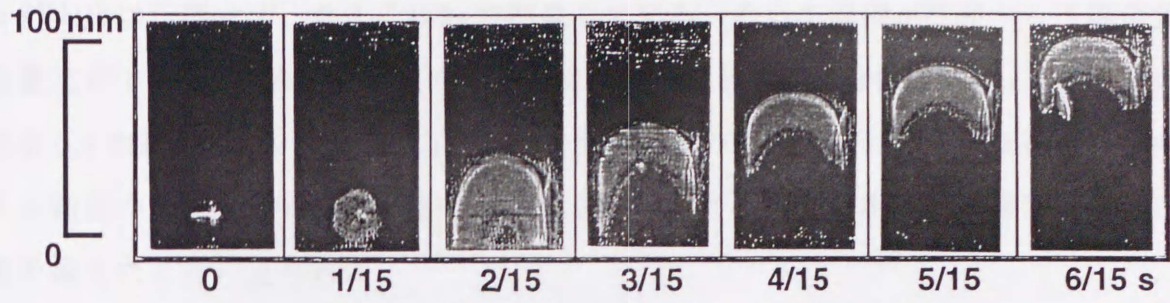
図 6.12 粒径測定点における測定空間の概略

6.3 実験結果および考察

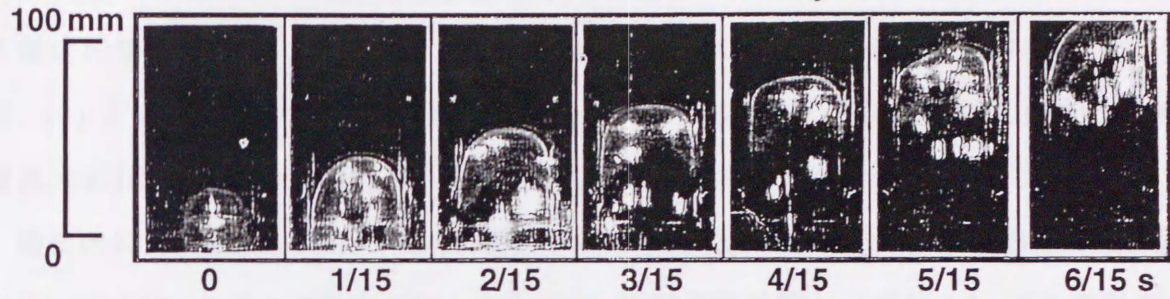
6.3.1 点火および火炎伝播特性の観察

均一混合気の点火および火炎伝播過程を，液滴が混在する予混合気の実験に先立って調査した．図 6.13- (a) に，微小重力下における当量比 0.8 の予混合気の点火および火炎伝播過程の，8mm ビデオカメラによる撮影結果を示す．この画像から，伝播速度はおよそ 25cm/s ともとめられた．同一実験条件，つまり同一の実験装置による同一の当量比における通常重力下の上方火炎伝播速度は，およそ 40cm/s である．微小重力下で浮力の影響が取り除かれることがこの原因と考えられる．

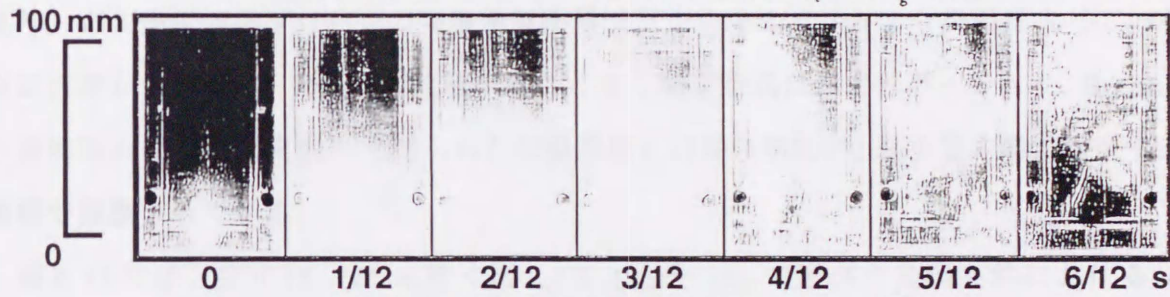
液滴が混在する予混合気の点火および火炎伝播過程について，図 6.13- (b) ， (c) ， (d) ， (e) に示す．図 6.13- (b) は総合当量比 0.8 およびガス燃料割合 0.8，図 6.13- (c) は総合当量比 0.8 およびガス燃料割合 0.6 についての結果をそれぞれ示している．図 6.13- (b) の場合，ガス燃料の当量比は可燃領域にあり，火炎伝播は主に予混合気の燃焼によって起こっている．すなわち，プロパン-空気混合気にまず点火し火炎伝播が起こり，噴霧液滴が火炎に捕捉され，そののち液体燃料の点火および火炎伝播が起こる．いっぽう図 6.13- (c) の場合は，ガス燃料当量比は希薄可燃限界を下回っており，火炎伝播は主に液体燃料の燃焼によって起こっている．すなわち，点火栓付近の燃料液滴に点火し，断続的に火炎付近の燃料液滴に火炎が飛び移るのを繰り返しながら伝播する挙動が見られる．ガス燃料の当量比が希薄可燃限界を下回る場合，点火過程は不安定になり，点火栓付近に燃料液滴が存在しない場合は，点火が起こらない．図 6.13- (d) には，総合当量比 0.6 およびガス燃料割合 0.8



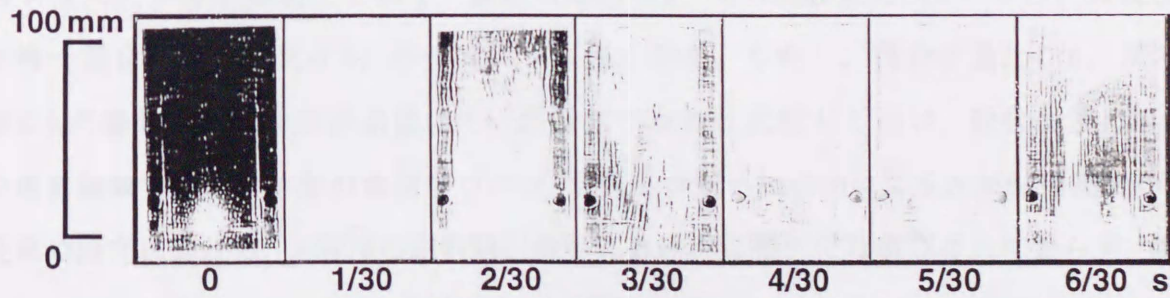
(a) 均一予混合気の火炎伝播 ($\phi_t=0.7, R_g=1.0$)



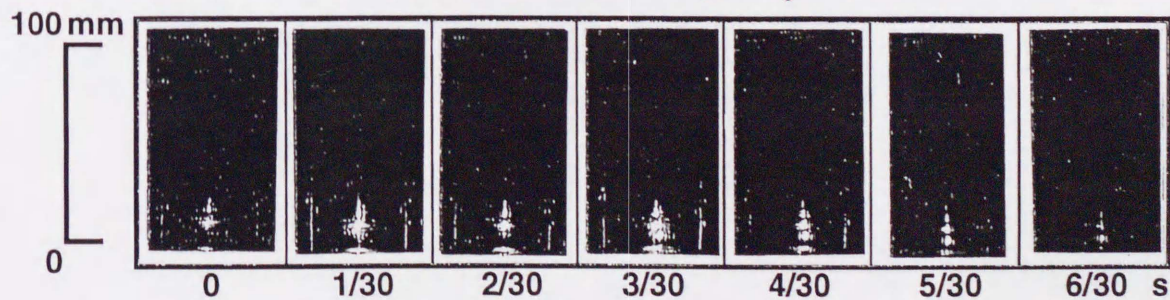
(b) 予混合気の燃焼が主体の火炎伝播 ($\phi_t=0.8, R_g=0.8$)



(c) 液滴燃焼が主体の火炎伝播 ($\phi_t=0.9, R_g=0.6$)



(d) 乱流燃焼による火炎伝播 ($\phi_t=1.0, R_g=0.9$)



(e) 着火のみで火炎伝播が起こらない状態 ($\phi_t=0.6, R_g=0.8$)

図 6.13 液滴が混在する予混合気の点火および火炎伝播過程

についての結果を示している。この場合は、火花電極付近の燃料液滴に点火が起こっているが火炎は伝播せず、およそ0.2sで消炎している。そして液滴が混在する予混合気の総合当量比が1.0程度になると、乱流火炎が生じる。例として、総合当量比1.0およびガス燃料割合0.9の結果について、図6.13-(e)に示す。この乱流火炎は、火炎伝播管において伝播火炎前面の未燃ガスの圧縮が生じることが原因と考えられ、本装置の層流火炎測定可能範囲を越えたときに見られる。

これらの実験結果から、液滴が混在する予混合気の火炎伝播特性は、均一混合気および不着火の場合を含め、次のような6つのパターンに分類される。(1) 均一混合気の火炎伝播、(2) 主にガス燃料火炎の発達による層流火炎伝播、(3) 主に液滴燃料火炎の発達による層流火炎伝播、(4) 点火後の消炎、(5) 乱流火炎伝播、(6) 不着火、である。

図6.14には、図6.13-(c)の領域に相当する、液滴燃焼が主たる火炎伝播過程の撮影結果について、1/60コマ/sごとに出力したものを示す。実験条件は総合当量比0.9、ガス燃料割合0.5であり、ガス当量比はプロパンの理論希薄限界以下であるので、ガス火炎面は生じていない。火炎は液滴から液滴に、火炎面が接触することなく飛び石状に燃え広がっており、Brzustowskiらの液滴列の火炎伝播実験⁽⁵⁾で見られた伝播形態と同様の挙動が、微小重力場で浮遊する噴霧液滴群で観察されている。

図6.15には、図6.13-(d)を除く図6.13-(a)～(e)で述べた実験条件における、時間に対する火炎伝播距離変化を示す。総合当量比0.8、ガス燃料割合0.8のとき、火炎伝播速度は均一混合気(当量比0.8)のそれよりも速くなる。しかし、総合当量比0.8、ガス燃料割合0.6の場合は、火炎伝播速度は均一混合気のそれに比較して遅い。総合当量比0.8のような希薄領域での灯油噴霧の希薄プロパン-空気混合気への添加による火炎伝播速度の増大は、従来の研究における、同程度の燃料噴射条件における実験⁽³⁾では確認されておらず、総合当量比0.8、ガス燃料割合0.8での測定結果には実験装置上の誤差が含まれている可能性もある。

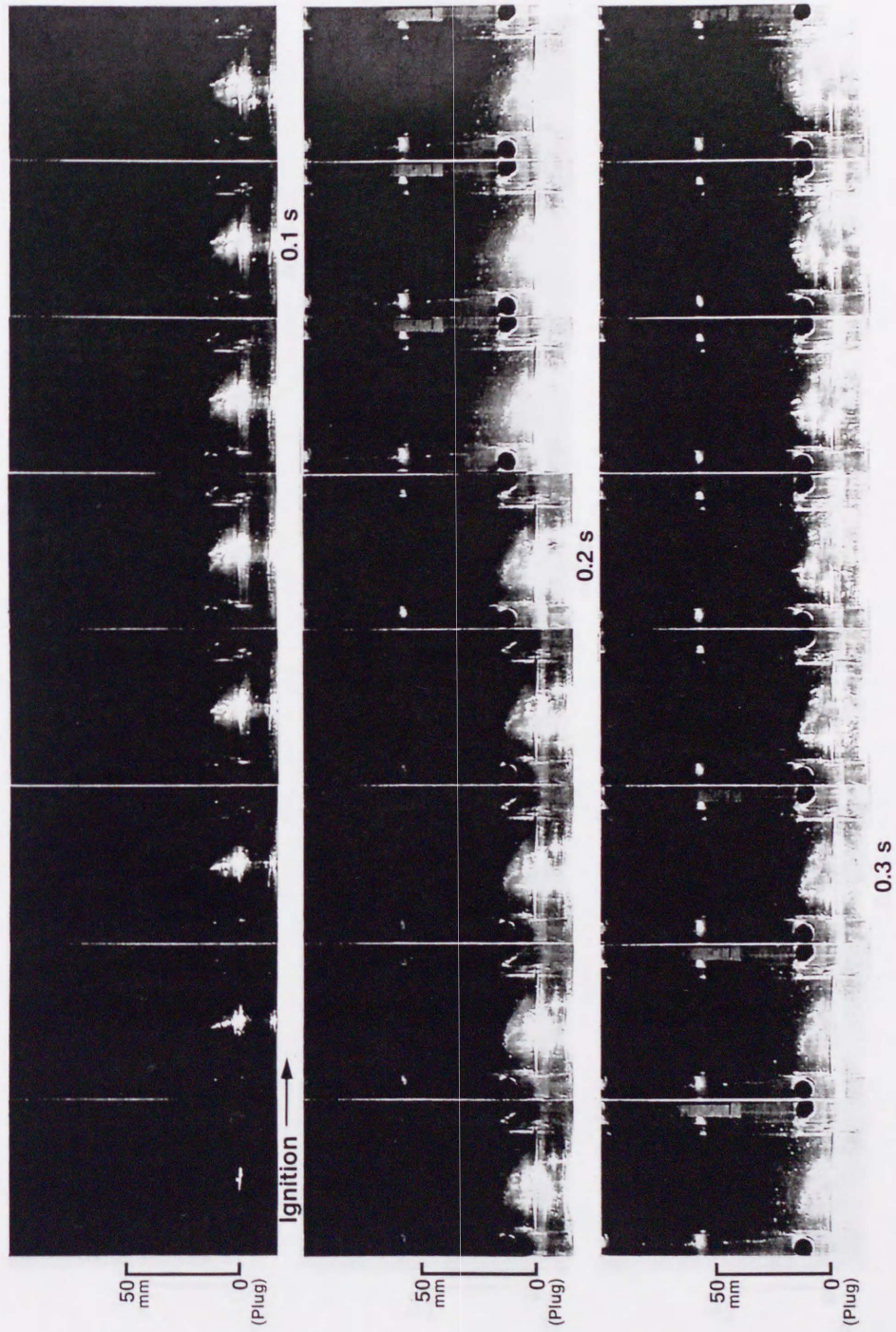


図6.14 液滴群の火炎伝播
 ($\phi=0.9$, $Rg=0.5$, $1/2$)

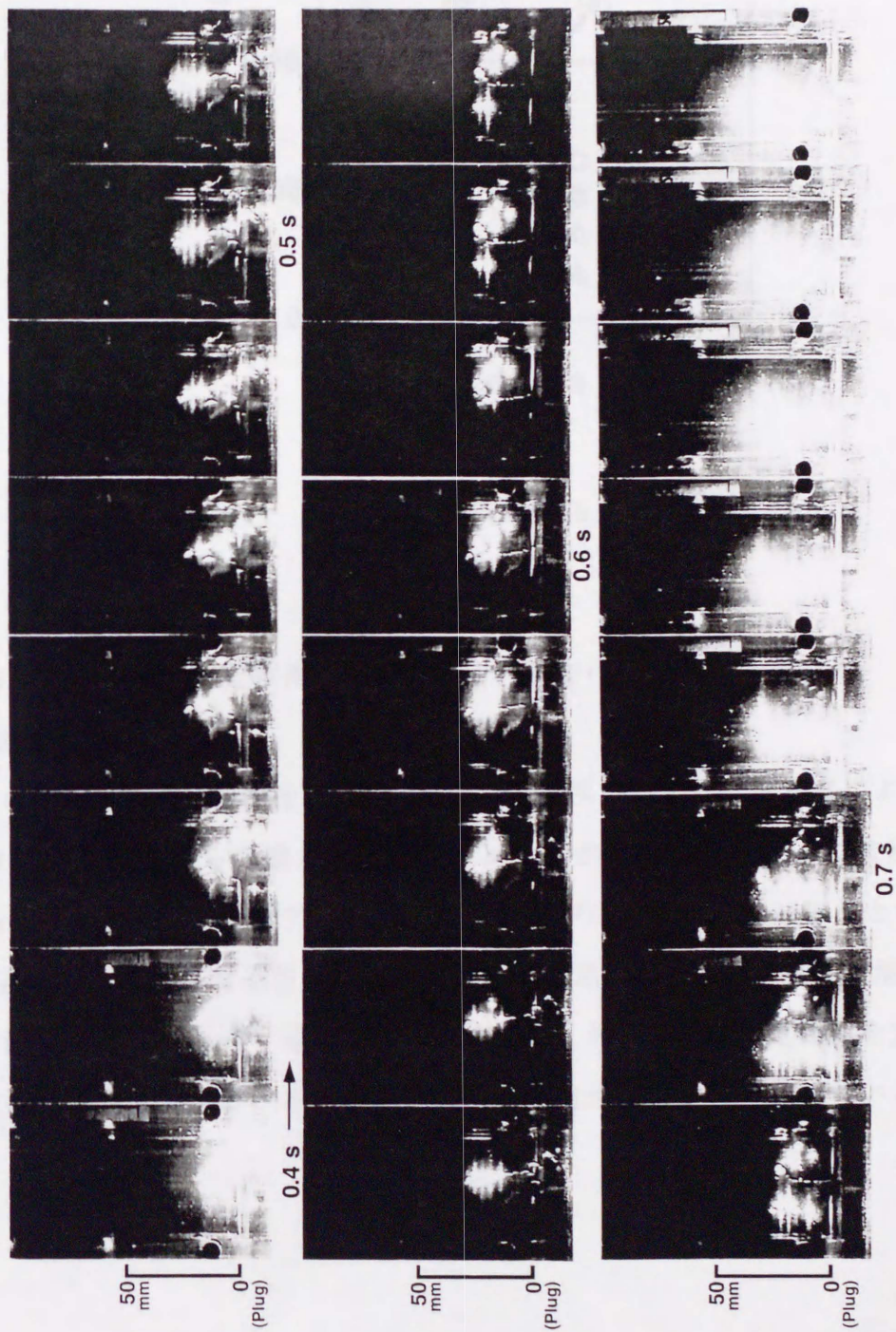


図6.14 液滴群の火炎伝播
 ($\phi=0.9, Rg=0.5, 2/2$)

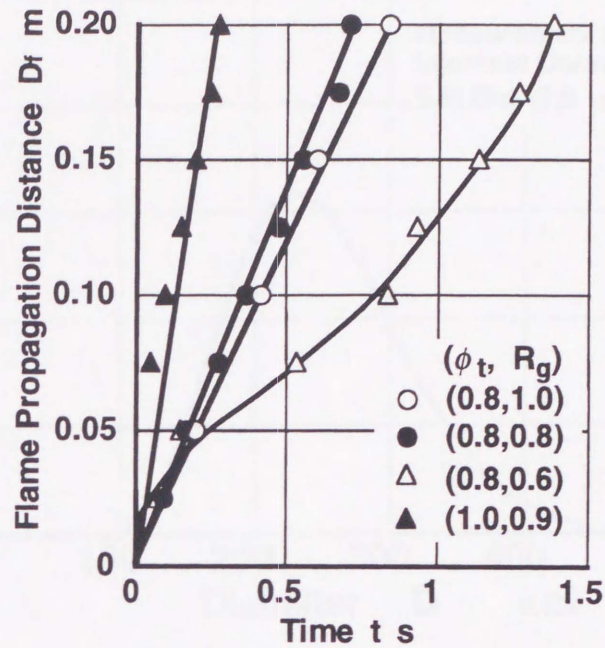
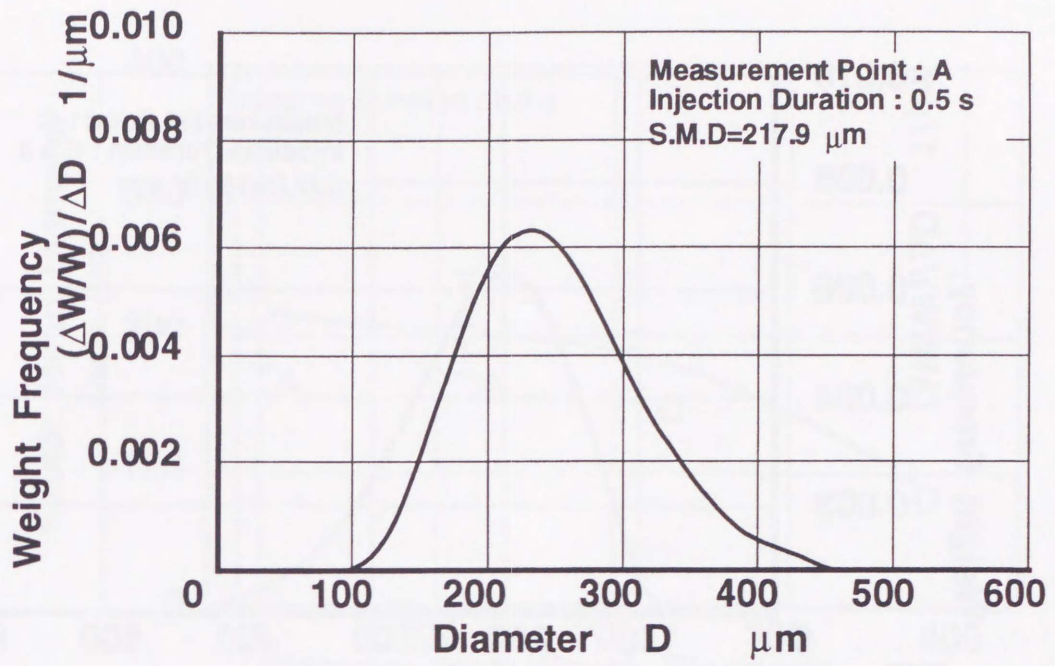


図 6.15 点火からの時間に対する火炎伝播距離変化

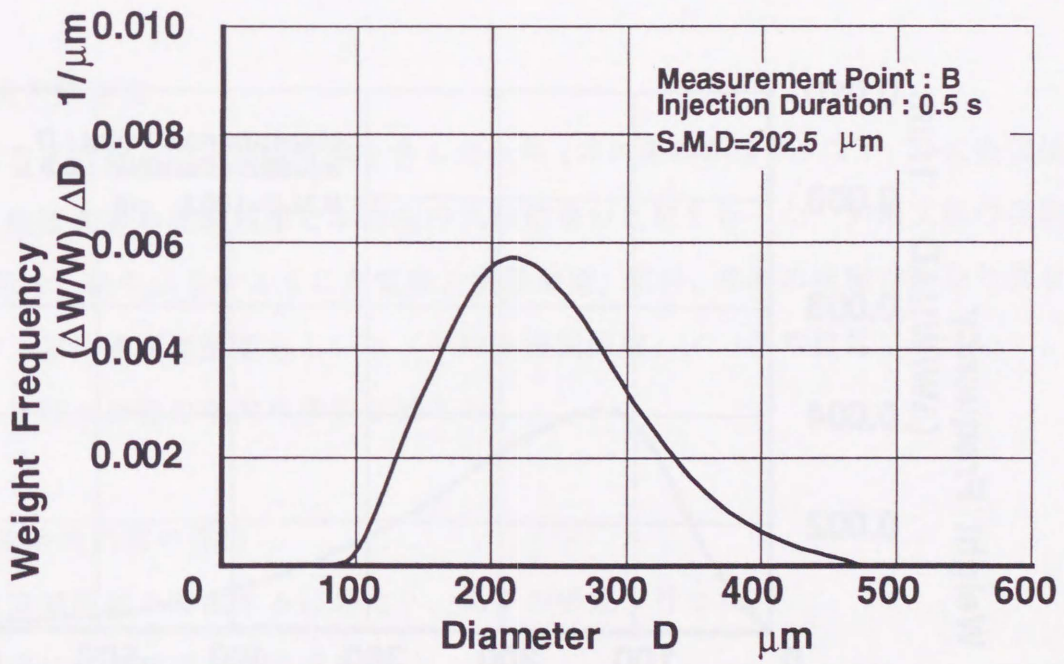
6.3.2 LDSA による粒径測定結果および他の研究における実験値との比較

(1) 粒径測定結果

各測定点の平均的な粒径分布を図 6.16 (a) - (d) に示す。また、測定点による SMD の変化を図 6.17 に示す。これらの図から、インジェクタからの距離によって粒径分布および SMD が大きく変化しており、上方へ行くほど液滴径が小さくなっていることがわかる。これは、噴霧液滴の運動量減衰過程の違いによるものと思われる。微小重力環境においては、液滴の重力沈降がなく、液滴の運動量のみがインジェクタからの到達距離を支配しているため、今回の通常重力下における粒径測定結果の傾向が、さらに強まっているものと考えられる。

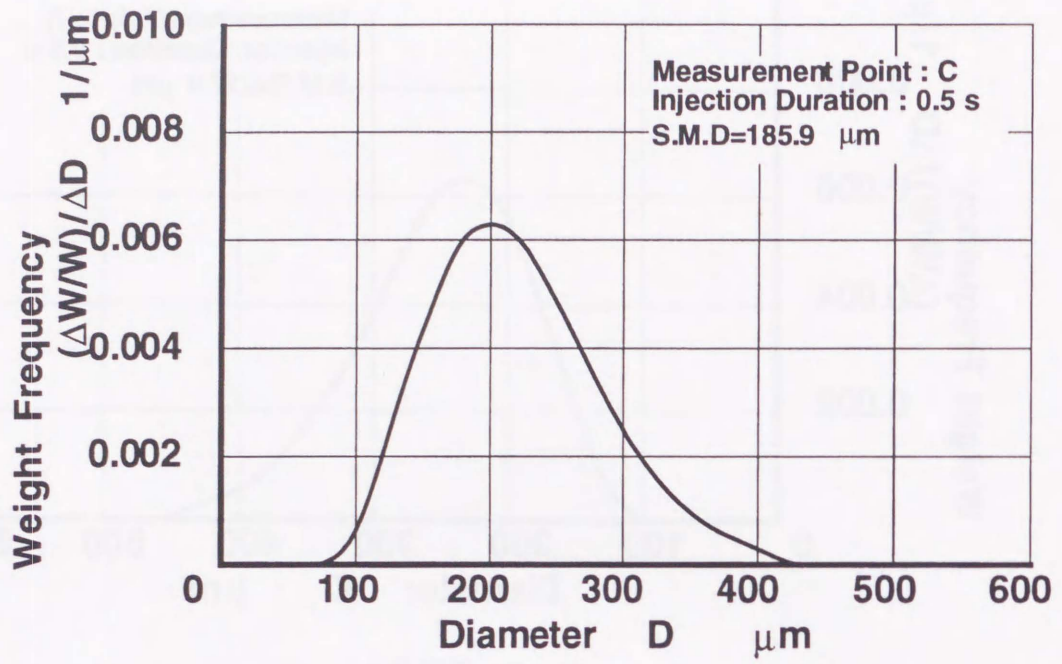


(a) 測定点A

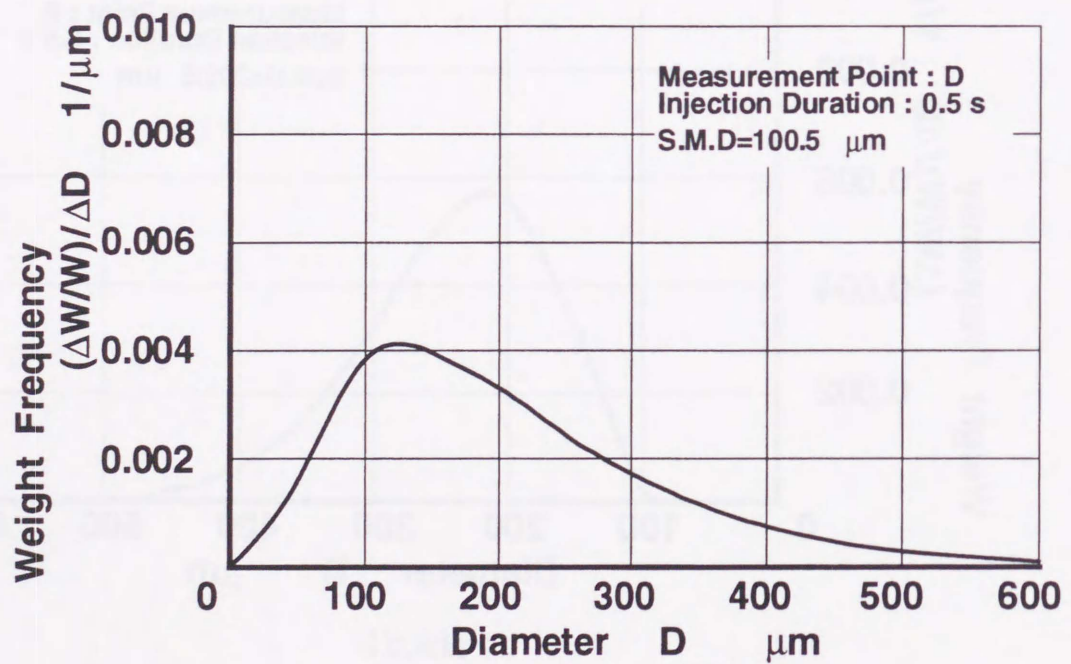


(b) 測定点B

図 6.16 (a) , (b) 各粒径測定点の平均粒径分布



(c) 測定点C



(d) 測定点D

図 6.16 (c) , (d) 各粒径測定点の平均粒径分布

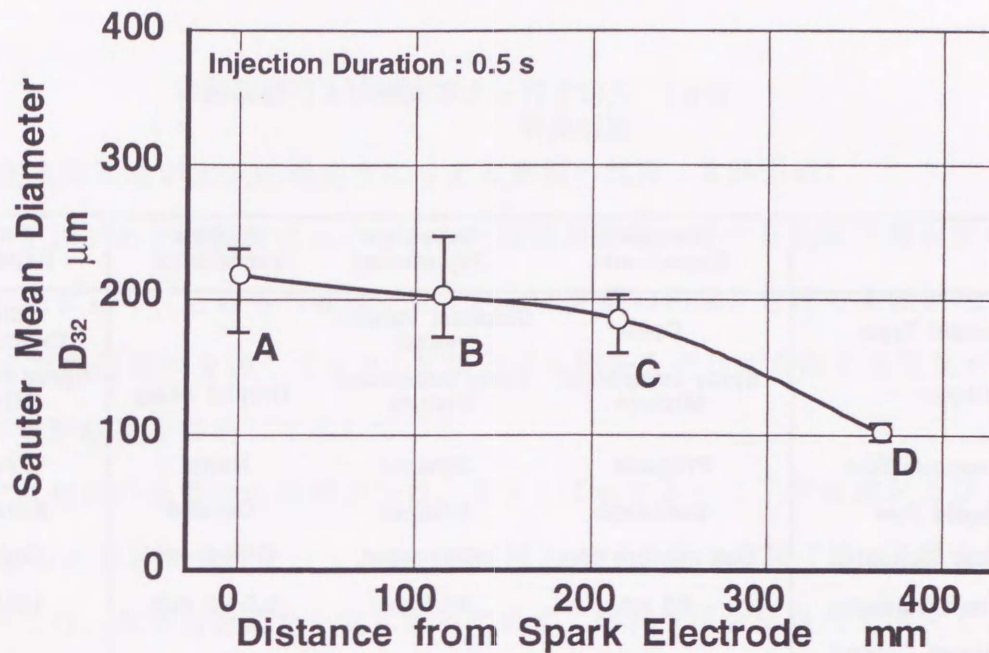


図 6.17 各粒径測定点の SMD の変化

(2) 火炎伝播速度

通常重力下で行った、燃料液滴を含んだ条件 (ガス燃料割合 0.9 以下) の火炎伝播速度について、他研究者の実験結果と本研究の実験結果の比較を行った。引用文献の実験条件を表 6.1 に示す。表中に示すように各実験の実験装置、燃料、燃料の状態はかなり異なるものであるが、平均液滴間距離あるいは (平均液滴間距離) / (平均粒径) について、火炎伝播速度に及ぼす影響の傾向の考察を試みる。

(i) 平均液滴間距離の算出

平均液滴間距離を算出するにあたり、以下の仮定を行った。

- ・ 液滴径は平均粒径で代表できる
- ・ 液滴は、容器内の位置によらず、空間的に均一に存在する。

以上の仮定を用いて、平均液滴径を以下の式を用いて計算した。

$$S = \frac{1}{N_D^{1/3}}$$

ここで、 S は平均液滴間距離、 N_D は噴射量と平均粒径から算出される液滴数密度である。

表 6.1 比較を行った本実験および他実験の実験条件

	Yoshida's Experiment	Hayashi's Experiment	Niioka's Experiment	Present Experiment
Vessel Type	Open	Constant volume vessel	-	Closed (before expt.)
Subject	Spray compound Mixture	Spray compound Mixture	Droplet Array	Spray compound Mixture
Gaseous Fuel	Propane	Ethanol	None	Propane
Liquid Fuel	Kerosene	Ethanol	Decane	Kerosene
Flow Condition	Gas mixture flow	Quiescent	Quiescent	Quiescent
Mean Diameter	60 μm	30.0 μm	0.5-1.0 mm	185.9 μm
Phase Control between Gas and Liquid Fuel	Independent	Not independent	None	Independent

なお、以下の考察において用いた各実験におけるSの値については、各文献中に挙げられている実験条件から算出を行っている。

(ii) 平均液滴間距離が火炎伝播速度に与える影響の比較についての概要

火炎伝播速度の比較については、本実験装置で実験が可能であった総合当量比の操作条件が、希薄領域 ($\phi_t < 1$) のみであったことから、希薄領域のみ、および希薄領域・過濃領域を含む総領域（以下、総領域）に分けてこれを述べる。総領域での比較を行うのは、本実験以外の他の実験で、火炎伝播速度が最大値を持つ結果が得られている過濃領域についても考察を行うためである。これらについては、それぞれ以下に示す各実験結果の比較を行う：

・希薄領域

本実験の結果、吉田の実験結果⁽³⁾、Hayashiらの実験結果⁽⁶⁾

・総領域

吉田の実験結果⁽³⁾（ただし過濃領域 ($\phi_t > 1$) のみ）、Hayashiらの実験結果⁽⁶⁾、新岡らの実験結果⁽⁸⁾

以下に、(i) で算出した平均液滴間距離が、火炎伝播速度に与える影響の比較について述べる。

(iii) 平均液滴間距離が火炎伝播速度に与える影響の比較（希薄領域）

当量比が1以下の希薄領域における、平均液滴間距離に対する火炎伝播速度の変化を図6.18～図6.20に示す。これらの図はそれぞれ、本実験の結果、吉田の実験結果⁽³⁾、およびHayashiらの実験結果⁽⁶⁾を表しており、液滴とガス燃料を合わせた総合当量比が1.0以下の希薄領域の実験結果を抽出して示している。

液滴とガス燃料の当量比の制御方法は、表6.1に示すように、本実験および吉田の実験と、Hayashiらの実験では異なっている。本実験および吉田の実験では、予混合気中に燃料噴霧を行うため、総合当量比を一定に保ったまま、燃料予混合気濃度を増大し、液体燃料当量比を減少させて平均液滴間距離を増大（液滴数密度を減少）させることが可能である。これに対してHayashiらが用いている密閉容器の急速膨張による液滴凝縮法では、凝縮に用いる容器内の初期液体燃料量が一定であるため、平均液滴間距離を増大（液滴数密度を減少）させる場合、総合当量比の減少が不可避である。

図6.18の本実験結果、および図6.19の吉田の実験結果においては、平均液滴間距離の増大に対して火炎伝播速度が増大するという傾向を示しているのに対し、図6.20では反対に火炎伝播速度が減少している。これは、図6.18、図6.19の実験において、総合当量比一定で平均液滴間距離を増大させ、かつガス燃料割合を増大させているのに対し、図6.20の実験では、平均液滴間距離の増大とともに、各プロット点における総合当量比が減少していることが主因であり、上述した液滴とガス燃料の当量比の制御方法における本質的相違によるものである。

また、平均液滴間距離および火炎伝播速度の絶対値のオーダーが、とくに図6.18、6.19と図6.20とのあいだで大きく異なるため、これらのあいだの直接的な比較は難しい。そこで、算出した平均液滴間距離を、各実験のSMDあるいは平均粒径で除した数値である相対平均液滴間距離（以下とくに S/D と表す）、および火炎伝播速度を装置係数 α によって除した値である相対火炎伝播速度（以下とくに V_f/α と表す）を用いて、図6.21に示すように整理し直すと、実験装置によらないで各当量比ごとの曲線上にほぼまとめることができる。 α については、本実験結果で1.0、吉田の実験結果で1.8、およびHayashiらの実験結果で3.5を用いているが、これらは希薄側の当量比条件でみられた最大火炎伝播速度を参考にして、

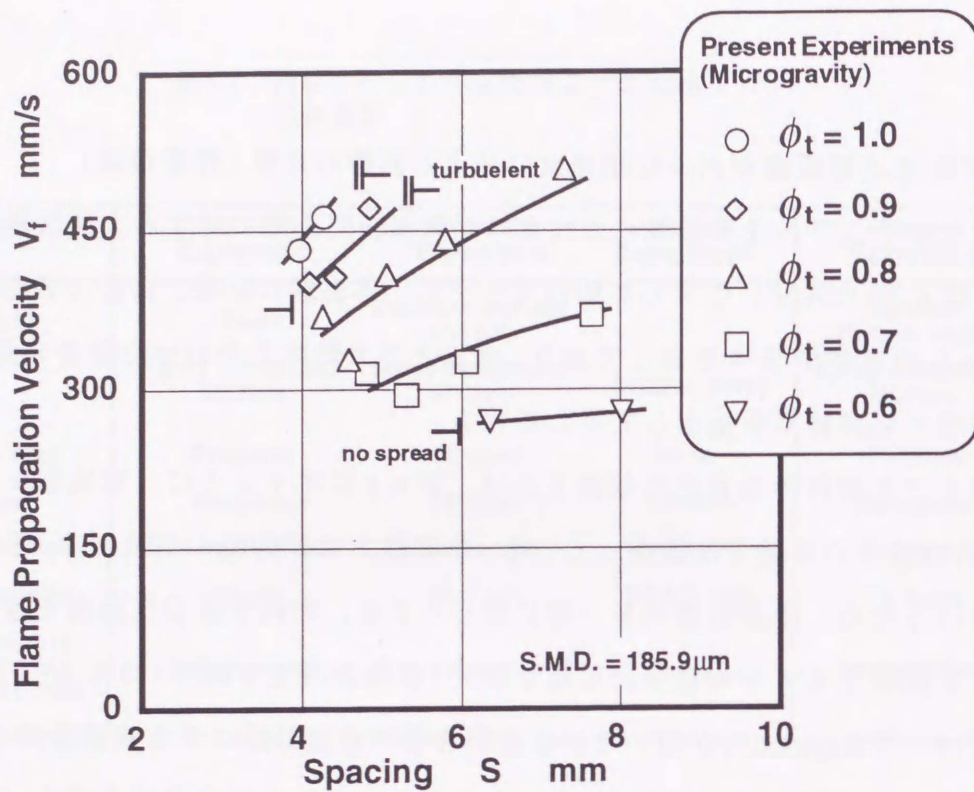


図 6.18 平均液滴間距離が火炎伝播速度に及ぼす影響 (希薄領域, 本実験)

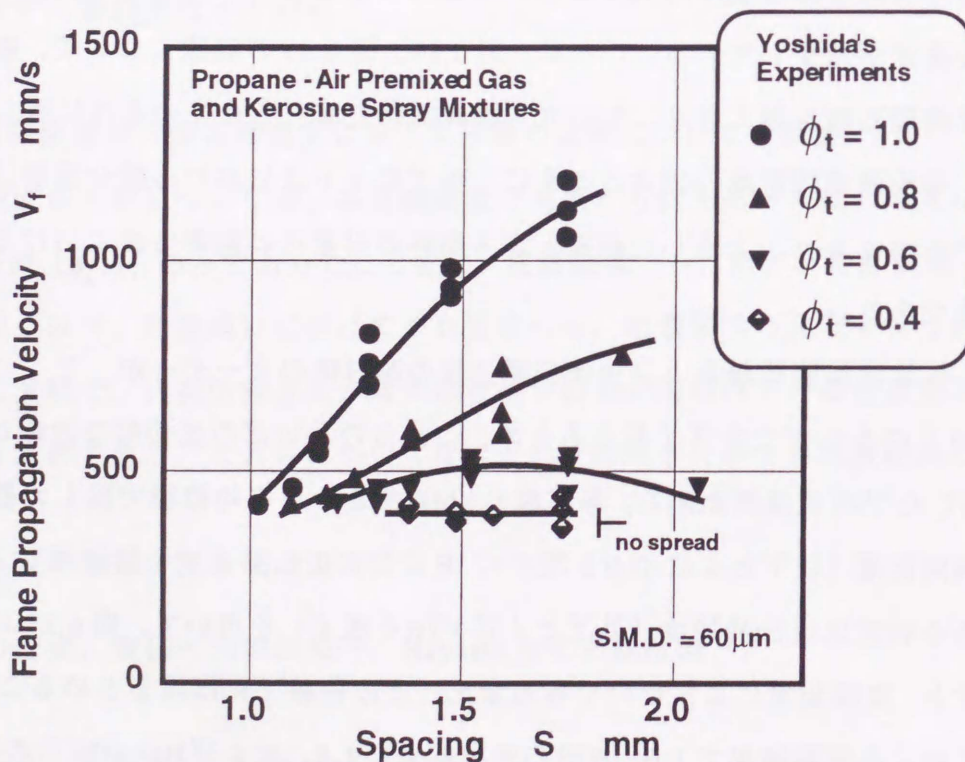


図 6.19 平均液滴間距離が火炎伝播速度に及ぼす影響 (希薄領域, 吉田の実験)

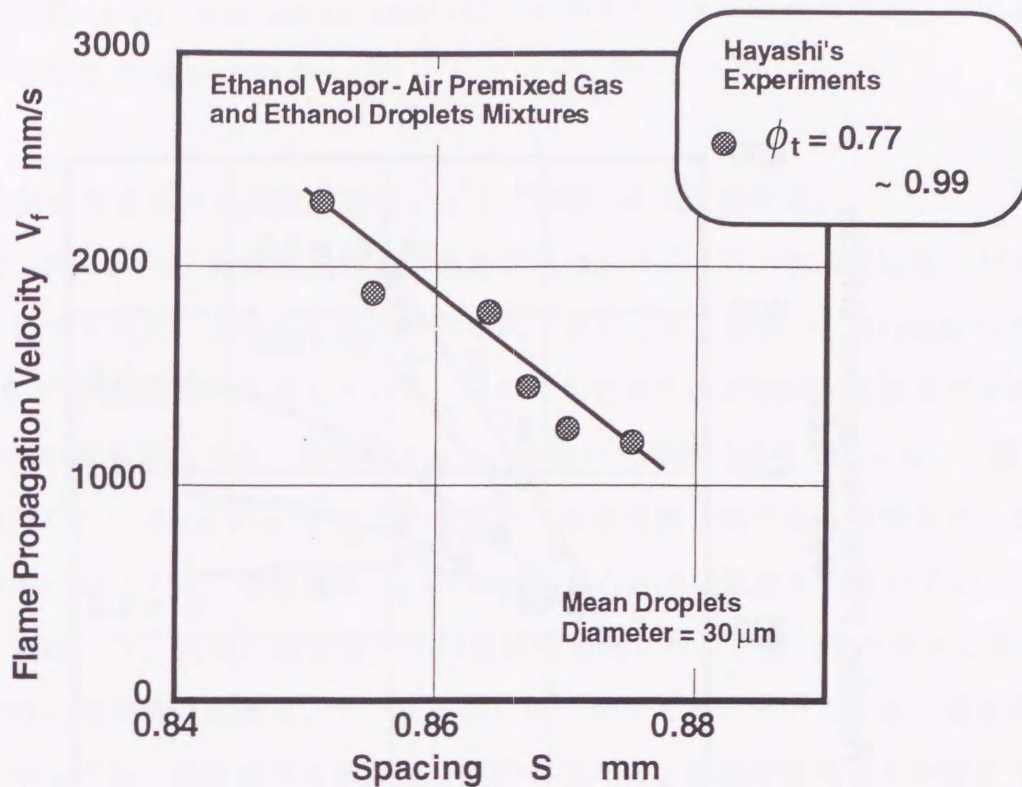
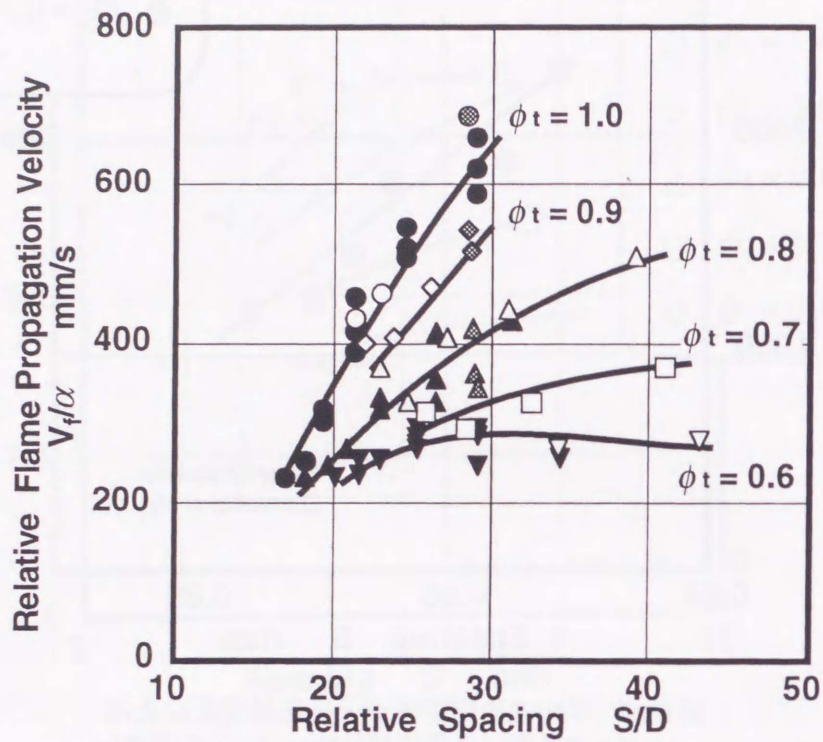


図 6.20 平均液滴間距離が火炎伝播速度に及ぼす影響（希薄領域，Hayashi らの実験）

任意に決定したものである。αは、実験装置によって大きく異なる火炎伝播速度を、図 6.21 のようにまとめることを目的として導入したものであるが、各実験装置に固有の火炎伝播速度のオーダーに依存した係数といえ、これが大きくなるほど実験装置における絶対的な火炎伝播速度のオーダーは大きくなる。

図 6.21 でみられる傾向については、パラメータに考慮していないガス状態の燃料，差異の大きな実験装置・実験条件，および平均液滴間距離の算出時に必要となった現実を反映するとは言い難い仮定にもかかわらず，(1) 任意の S/D および総合当量比における V_f/α の値，(2) 任意の総合当量比における S/D の変化に対する V_f/α の変化率，の 2 点につき，各実験値のあいだの比較的よい一致がみられている。このことは言い替えると，希薄領域において，任意の総合当量比をもつ液滴混在予混合気の火炎伝播特性を，S/D を求めるのに必要な液体燃料当量比および平均粒径 D の値，および巨視的な装置係数 α から，一意的に表し得る可能性を示唆するものと考えられる。S/D については，Hayashi らが燃焼限界を表現するパラメータとして⁽⁷⁾，また Chiu らが液滴群の燃焼に関する理論において，液滴総数お



	Present Experiments (μg)	Yoshida's Experiments	Hayashi's Experiments
	○ $\phi_t = 1.0$	● $\phi_t = 1.0$	⊙ $\phi_t = 1.0$
	◇ $\phi_t = 0.9$	▲ $\phi_t = 0.8$	■ $\phi_t = 0.9$
	△ $\phi_t = 0.8$	▼ $\phi_t = 0.6$	▲ $\phi_t = 0.8$
	□ $\phi_t = 0.7$		
	▽ $\phi_t = 0.6$		
α	1.0	1.8	3.5
D	185.9 μm	60 μm	30 μm

図6.21 相対平均液滴間距離および相対火炎伝播速度を用いた各実験値の比較 (希薄領域)

よび群燃焼数 (group combustion number) と合わせて、その燃焼形態を区分するためのパラメータとして⁽⁸⁾ 用いている。

(iv) 平均液滴間距離が火炎伝播速度に与える影響の比較 (総領域)

図 6.22～図 6.24 に、希薄領域および過濃領域における、平均液滴間距離に対する火炎伝播速度の変化を示す。これらの図はそれぞれ、吉田の実験結果⁽³⁾、Hayashi らの実験結果⁽⁶⁾、新岡らの実験結果⁽⁹⁾ を示している。このうち新岡らの実験は、液滴混在予混合気ではなく、数本の石英ガラス糸 (線径 $130 \mu\text{m}$) 先端の球形部 (直径 $300 \mu\text{m}$) に懸垂された、初期液滴径 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ の n-ドデカン液滴列の燃焼実験に関するものである。また、吉田の実験結果については、過濃領域 ($\phi_t = 1.4 \sim 2.2$) のみの実験結果となっている。

これらの図より、火炎伝播速度が平均液滴間距離に対して最大値を持つことがわかる。ピーク時の平均液滴間距離は、オーダー的に近い数字となっている。最大値を有するという現象については、燃料液滴の添加が、燃焼促進作用と燃焼抑制作用を同時に有することが要因と考えられ⁽³⁾、燃焼促進作用については、火炎面付近の液滴燃焼による火炎表面積

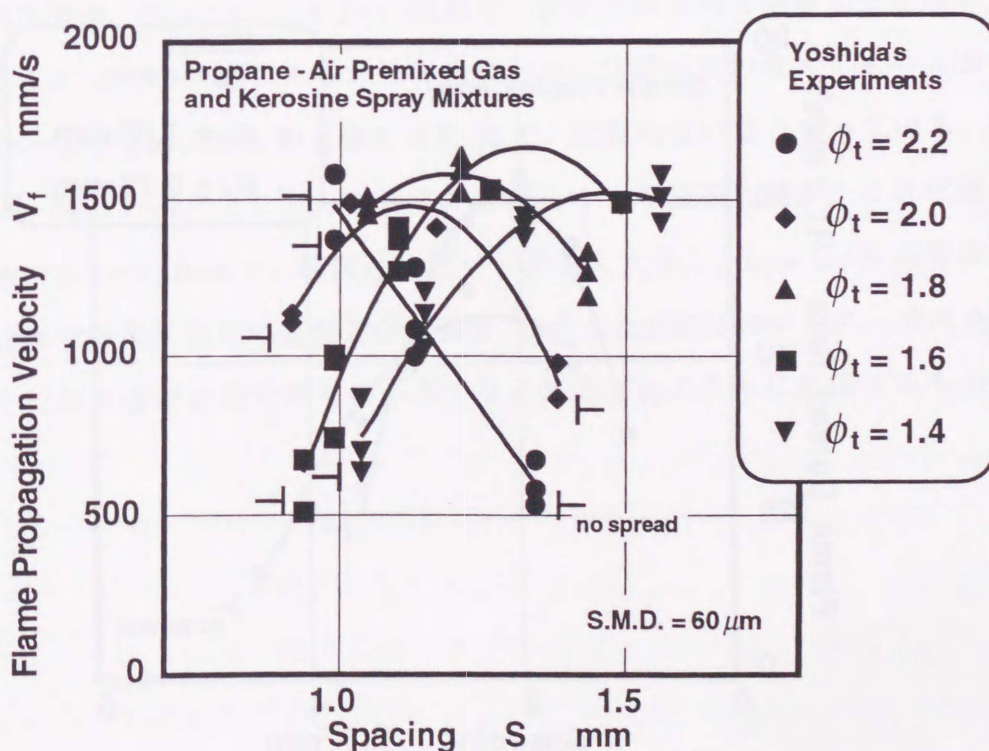


図 6.22 平均液滴間距離が火炎伝播速度に及ぼす影響 (過濃領域, 吉田の実験)

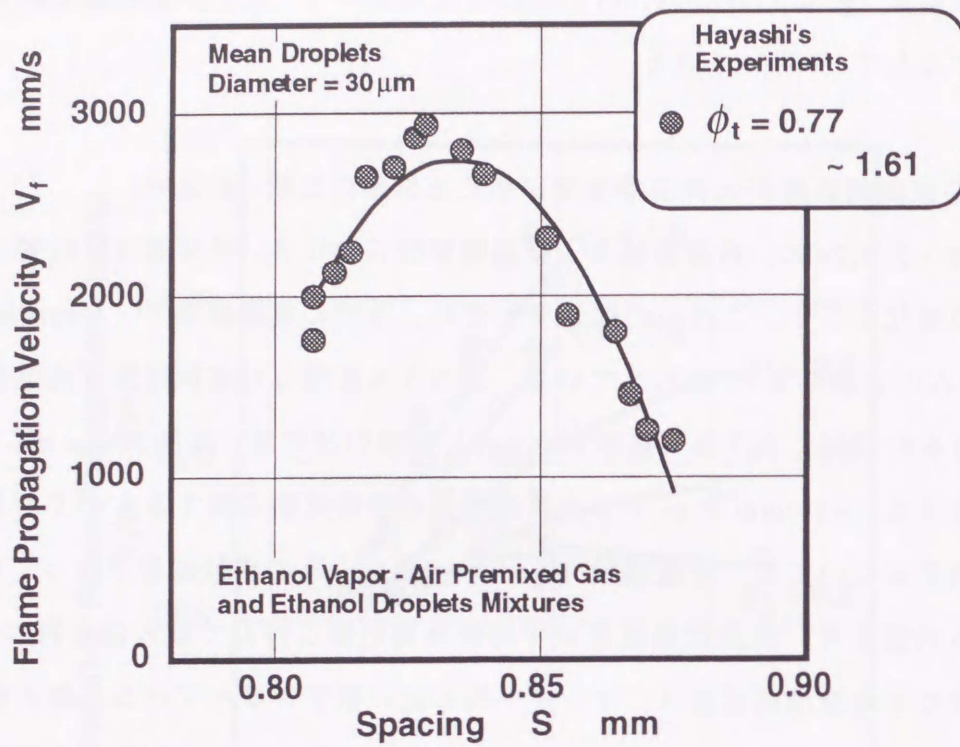


図 6.23 平均液滴間距離が火炎伝播速度に及ぼす影響 (総領域, Hayashiらの実験)

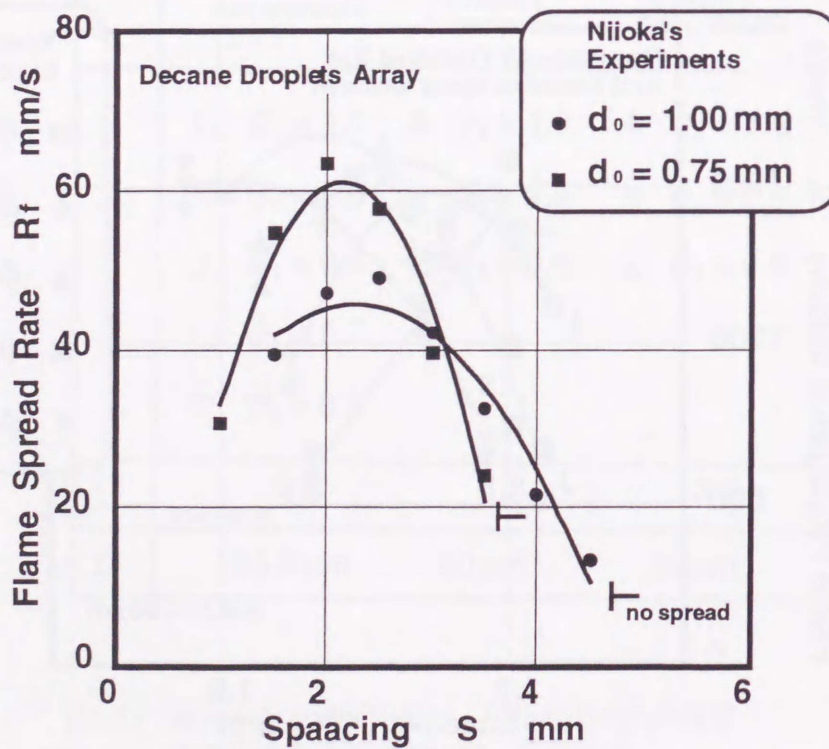


図 6.24 平均液滴間距離が火炎伝播速度に及ぼす影響 (総領域, 新岡らの実験)

う現象については、燃料液滴の添加が、燃焼促進作用と燃焼抑制作用を同時に有することが要因と考えられ⁽³⁾、燃焼促進作用については、火炎面付近の液滴燃焼による火炎表面積の増加、火炎面付近の乱れの発生、および燃焼中の液滴の高温の熱源としての作用による熱伝達の促進などが、また燃焼抑制作用については、液滴が蒸発に必要な熱を火炎から奪う、火炎に対する冷却作用が挙げられる。

また、液滴の直径について各実験を比較すると、液滴の直径が小さくなるにつれて、これと火炎伝播速度の最大値をもつ平均液滴間距離が小さくなっている。このことは、上述の燃焼促進および燃焼抑制作用とも合わせて、次のような新潟らの考察するメカニズム⁽⁹⁾を示唆するものとなっている：既燃液滴の火炎が隣接する未燃液滴に近づくとつれて、未燃液滴はより高温のガスにさらされ、蒸発と反応が共に促進される。そして、液滴間の距離が既燃液滴の火炎半径とほぼ等しくなったときに、未燃液滴は最も高温にさらされ、既燃液滴からの熱伝達が最大になると考えられる。液滴間の距離がさらに減少すると、液滴どうしが互いに密集することで、蒸発潜熱として熱が奪われる冷却効果が大きくなる。その結果、火炎燃え拡がり速度は最適な液滴間距離によって最大値を持つことになる。こうしたメカニズムの基本は、先に述べたChiuらの液滴群の燃焼に関する理論⁽⁸⁾でも取り扱われており、現象を表現するパラメータとして、一般性を持っているものと考えられる。

そこで前項と同様、図 6.22～図 6.24 の横軸を、相対平均液滴間距離 S/D を用いて整理したものを、図 6.25 に示す。図にみられるように、火炎伝播速度の最大をもつ S/D が、吉田の実験では 16～25、Hayashi らの実験では約 28 で、比較的近い値となっている。また新潟らの実験では、約 2.2～2.7 とこれらに対して非常に小さな値をもつが、これは懸垂液滴列の初期液滴径が 0.5～1.0mm と、他実験に比べて非常に大きく、Law ら⁽¹⁰⁾ が考察しているような液滴近傍での燃料蒸気の蓄積効果により、こうした液滴径のオーダーで火炎径/液滴径比が、とくに燃焼履歴初期で非常に小さくなる傾向があることに起因するものと考えられる。

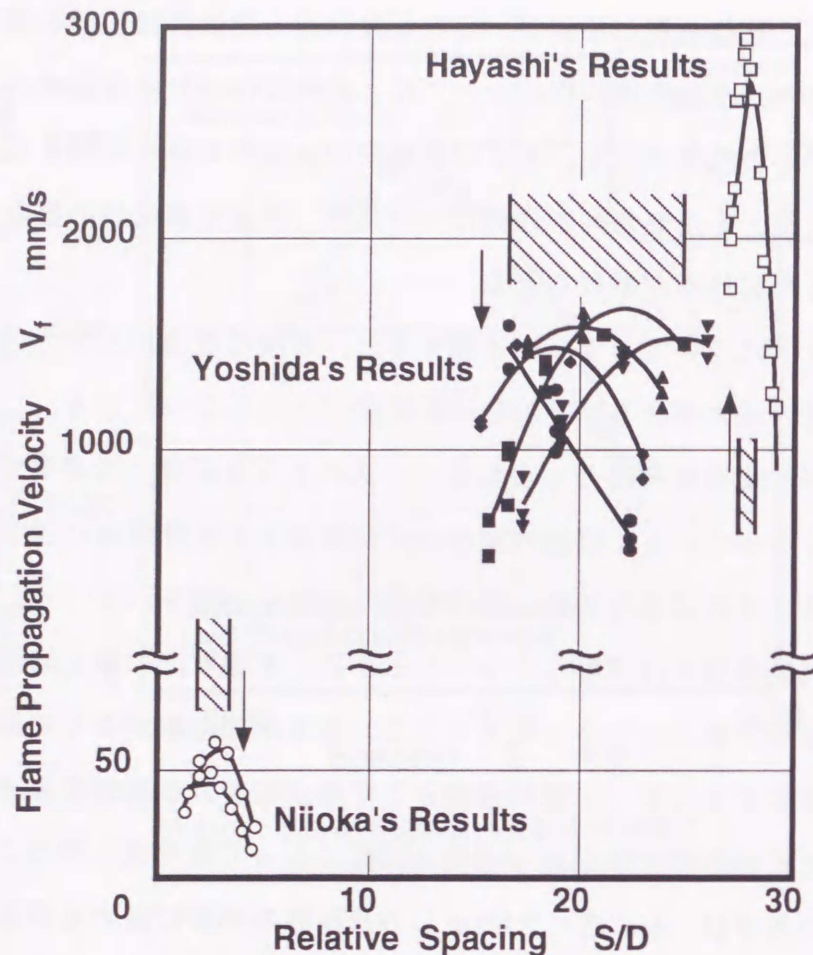


図 6.25 相対平均液滴間距離に対する火炎伝播速度の最大値 (総領域)

6.4 結言

微小重力環境を利用して可燃予混合気中に燃料噴射を行い、浮遊した噴霧液滴が混在する予混合気の点火および火炎伝播過程を調査し、以下のような結論を得た。

- (1) 燃料噴霧の粒径測定を地上で測定し、本実験で用いた噴霧のザウタ平均粒径が $200 \mu\text{m}$ 程度である結果を得た。
- (2) 液滴が混在する予混合気の花炎伝播過程は、総合当量比およびガスと液滴の混在割合によって、液滴燃焼が支配的な過程と、気相燃焼が支配的な過程におおよそに分類できる。
- (3) 微小重力下の実験では、予混合気の当量比が希薄限界以下で、液滴が少量混在している場合、点火栓付近の浮遊液滴には着火するが火炎伝播が生じない場合がある。
- (4) 噴霧粒径分布の測定結果を、落下実験での火炎伝播速度測定結果に適用し、解析結果を平均液滴間距離、あるいは (平均液滴間距離) / (液滴平均粒径) のパラメータを用いて整理したところ、従来の他実験との比較が可能となった。

第7章 結論

ディーゼル・ガスタービン・ボイラなどのような、液体燃料を微粒化し、反応気体との接触面積を大きくし燃焼させる、噴霧燃焼を用いる機関は、その高いエネルギー効率および幅広い汎用性のため、現在また将来的にも社会的に重要な役割を担い続けると考えられている。しかし、ここ数十年来の、とくに石油系液体燃料を始めとするエネルギー利用に関しては、公害問題に始まり2度のオイルショック、そして近年の環境問題と、目まぐるしい社会的情勢の変動の中にさらされ続けている。そして基本的なエネルギー資源の利用形態において、とくに化石燃料の燃焼に依存する構造的変化がみられない中で、自動車・航空宇宙・船舶などの移動体や発電など定置型装置における、内燃機関の燃焼技術のさらなる高効率化、有害排出物低減化のための研究開発は、近年の電子技術や計測技術の発達に伴って大きな進歩を遂げており、多くの研究成果がそうしたエネルギー利用技術に生かされてきている。

しかしいっぽうで、そうした内燃機関などのエネルギー利用形態において、主要なエネルギー変換法となっている、液体燃料の噴霧燃焼過程における基礎現象については、最近のレーザ計測技術あるいはコンピュータによる数値シミュレーション技術の発達をもってしても、未だに確固とした理論的解明がなされていないのが現状である。噴霧微粒化過程の存在あるいは乱流燃焼といった、実機における燃焼現象の高速および複雑は、その熱・物質・運動量の移動過程の詳細な数学的記述を非常に困難なものにしており、燃焼器実機の開発において、経験的な要素を未だ欠かせないものになっている。燃焼器実機の開発においては、理論的な側面からの開発技術の向上、とくに物理的・化学的現象の正確な把握が、時間的・経済的な面からもあらためて重要視されているのが、昨今の現状である。

こうした背景をもって、本研究は、液体燃料の噴霧微粒化過程、単一液滴の着火・燃焼過程、および噴霧液滴群が混在する予混合気の点火・火炎伝播過程を、微小重力環境の特質である無浮力および自然対流の影響の排除などにより単純化し、噴霧燃焼現象の基礎的解明に資することを目的として行われた。

第1章では、微小重力環境を利用した、噴霧燃焼に関する基礎的実験の動機と背景について、液滴および液滴群などにおける従来の実験的研究の手法および成果をふまえ、本研究の目的について述べた。

第2章では、本研究で利用した微小重力実験施設の概略および実験運用について述べ、微

小重力実験を運用するにあたっての実際などについて示した。とくに現象の基礎的解明を行うにあたっては、微小重力実験で得られる貴重な無浮力・無沈降の環境を、実際の実験装置の構想や設計・製作の上で、システムの機械的にどのように適性化させていくかが大変重要な点といえる。

液体燃料の噴霧微粒化過程は、ディーゼル、ガスタービンなどの機関においては、燃焼器内でその燃焼特性を大きく支配するプロセスである。第3章では、パルスレーザホログラフィー法を用いた、噴霧微粒化過程の基礎的評価項目である噴霧粒径および粒子分布の3次元的計測法を、世界でも初めて、微小重力環境における噴霧微粒化過程の解析に適用した。ガスタービン用スワールアトマイザまたは通常のカソリン機関用ピントルタイプインジェクタを用いた燃料噴射系およびホログラフィー撮影系を搭載した落下実験装置を製作し、落下時間中に容器内に噴射された燃料噴霧の、オフアクシス光学系を用いた透過型ホログラムを撮影した。撮影したホログラムは、地上の再生光学系および画像解析装置を用いて再生・解析を行い、アトマイザ直下100mm付近の、約 $9 \times 7 \times 80$ mmの容積内における、個々の噴霧液滴の粒径および3次元位置の計測を行い、噴霧特性の評価を行った。アトマイザの種類、噴射期間、噴射圧力の違いによる噴霧特性の差異を比較し、また計測データの3Dレンダリングによる自動表示を行った。本実験における粒径計測手法は、通常重力下の研究では高温・高圧下にも適用され、シュリーレン法など光学的計測法との組合せにより、噴霧周囲の燃料蒸気濃度分布の測定などに用いられており、第6章に述べるような噴霧液滴群の微小重力下における燃焼実験などへの適用は、粒径と火炎伝播挙動の関連の把握のみならず、高温高圧下における、噴霧からの燃料蒸気相形成の基礎的過程の把握にも、応用が可能なものと考えられる。

噴霧された液体燃料の燃焼過程は、従来から液体燃料の単一液滴の着火・燃焼過程と大きく関連すると考えられてきており、歴史的に微小重力環境下の燃焼実験が始まった契機は、単一液滴の球状燃焼が実現できるという、現象の単純化および理想化が可能であったことによる。第4章においては、石油系燃料の代替用途として考えられている、COM燃料の単一液滴の着火・燃焼過程を、液滴を石英ガラス糸先端に懸垂し、電気炉内の高温雰囲気中に曝露する方法で調査した。微小重力下の結果と通常重力下の結果の比較を行い、微小重力下の最低着火雰囲気温度が、通常重力下のそれより380K程度低く、一次火炎期間は微小重力下の方が通常重力下より長いなどの結果を得た。またみかけの活性化エネルギーについて、微小重力下のそれが通常重力下より小さく、また雰囲気温度の低下に伴い小さ

くなる結果を得た。これらの現象の相違の原因については、石炭粒子が含まれることによる輻射の影響や石炭の揮発分の影響などが考えられるが、燃焼現象そのものには自然対流の有無による着火状況・火炎形状・固体燃焼挙動などにおける相違が明確に現れており、こうした諸々の影響が厳密には不可分であるものの、自然対流が着火および燃焼現象に与える影響が非常に大きいものと考えられる。

第5章では、第4章と同様の実験手法を用い、液体燃料ロケットやラムジェットエンジン用の航空宇宙用炭化水素燃料の高エネルギー密度化を目的として考えられている、マグネシウムおよび純カーボンなどの固体粒子を混入したスラリー燃料の、単一液滴の基礎的な着火・燃焼過程を調査した。第4章と同様、着火遅れ、液体燃焼期間および固体燃焼期間などを測定し、微小重力下と通常重力下の結果の比較を行った。その結果、COM燃料ほど二つの間に顕著な相違は見られなかった。また火炎直径の経時変化の測定、および含有固体粒子の相違によるすす生成挙動の相違を調査し、とくに純カーボンスラリーにおいて、液体燃料の一次火炎期間中の、火炎内での顕著なすす粒子層形成がみられ、また固体燃焼の開始とともに球状火炎の膨張率（燃焼速度の平方根に比例）が高まる傾向が見受けられる結果を得た。スラリー燃料の場合、燃焼器実機の小型化に寄与するためには、固体粒子凝集物の燃え切り性を良好にする必要があり、実機への適用の前提として、微粒化装置の高性能化、あるいは固体粒子の凝集性および液滴のマイクロ爆発性の制御手法の開発などが必須と考えられるものの、固体粒子の混入が燃焼温度を高め、燃焼効率改善につながる可能性は認められるといえよう。

第6章では、噴霧液滴群が混在した予混合気の点火および火炎伝播過程を、微小重力下で予混合気中に燃料噴射し、点火を行うという実験手法により調査した。こうした噴霧液滴が混在することによる、可燃混合気の燃焼促進効果については、ディーゼル、ガスタービンだけでなく、近年ようやく実用化に至った筒内直接噴射成層給気ガソリン機関、あるいは航空宇宙用ロケットモータの再点火などにおいて、重要な問題となっている。本研究で得られた点火および火炎伝播特性の測定においては、噴霧の浮遊および浮力の影響の除去などにより、液滴群と周囲ガスの相対速度の小さい条件で、燃焼速度に近い噴霧混在予混合気の火炎伝播速度を測定する手法の開発を試みた。そして混合気の希薄領域において、液滴群およびガス相の当量比を独立に変化させ、浮遊液滴群が主たる、またはガス相が主たる火炎伝播過程の観察を行った。火炎伝播速度については、実験装置が開放系の上方火炎伝播を取り扱っているため、同一の総合当量比およびガス燃料割合の条件では、浮力の

影響を受けない微小重力下のそれが、通常重力下のそれより遅い結果を得た。そして希薄領域においても、適量の燃料液滴の添加により、同一の総合当量比の均一予混合気よりも火炎伝播速度が速くなる結果を得た。また火炎伝播速度を、平均液滴間距離あるいは（平均液滴間距離）／（平均液滴径）をパラメータとして整理し、希薄領域、および過濃領域を含む総領域において、他の研究者らの実験結果と比較した。（平均液滴間距離）／（平均液滴径）を用いた整理により、希薄領域では、他実験との比較的よい一致がみられる結果を得た。また総領域における比較では、火炎伝播速度が最大となる（平均液滴間距離）／（平均液滴径）の値の存在がみられた。

第6章の実験については、こうしたテーマを取り扱った従来の基礎的研究において、微小重力下の実験が行われた例が世界的にもほとんどなく、本実験で用いた方法をとるにあたっては、従来全く行われた例がない、二つの実験的課題に直面することとなった。一つ目は、常圧開放系における火炎伝播を観察するために、予混合気を火炎伝播管内に保持し、予混合気濃度および火炎伝播挙動に与える影響を小さくしながら、点火と同時に火炎伝播管を大気に開放する方法の考案であり、二つ目は、微小重力場の燃料噴射による噴霧挙動の確認である。これらの課題に対して行った対応については、本実験の性格を特徴的に表すので、以下に具体的に述べる。

前者について、本研究でとった開放系火炎伝播の実験方法は、落下カプセルの完全密閉環境内で、燃焼ガス排出を伴う実験が可能な手法を模索するうちにたどりついたものである。フィルムと液体ガスケットを用いたシールによる予混合気の保持、およびそのはく離・除去による点火直前の火炎伝播管の開放については、それらのシール性およびはく離性の両立が必要となるため、必ずしもデータの厳密さを効果的に追求し得るものではないと考えられる。しかし、排気を伴う開放系火炎伝播を観察する目的の火炎伝播管において、その密閉性をいたずらに高めることは、火炎伝播管の破裂の危険性につながり、落下カプセル搭載上の安全性の面からも、本実験でとった方法は、これらを解決する手段の一つであることは確かと考えられる。密閉性と装置の開放性を両立するような機械的バルブシステムとしては、密閉型のスライド弁あるいはバタフライ弁などが考慮されるが、機構上でシール性の確保が比較的難しいこと、また点火装置とのフェールセーフ機構が不可欠なことなどが問題として挙げられる。

後者については、実験結果の上では、噴霧方向に垂直な速度成分をもった噴霧液滴および噴霧周囲気体の流動を取り除くような形状の容器の中に、0.22MPaといったごく低い噴

射圧で、燃料の一回噴射を微小重力時間内に行った場合に、静止に近い噴霧液滴の浮遊状態が得られることとなった。しかしこれ以外の、例えば落下前から噴霧を定常的に行った場合などについては、実験装置上および実験回数の制約から、噴霧挙動の観察を行っていない。本実験で行った、微小重力場での一回噴射については、通常重力下の噴霧粒径測定結果より、容器下部と容器上部で粒径の値がかなり異なっていることから、現状では必ずしも十分な噴霧の制御が行えているといえない。しかし高温・高圧下における火炎伝播特性などを調査する目的においては、液滴群生成法として燃料噴射以外は考え難く、容器内の噴霧特性をコントロールしながら、浮遊・静止液滴群を得る手法の模索は非常に重要なものと考えられる。また微粒工学的および宇宙工学的な見地からも、微小重力場の噴霧特性の基礎的研究については、進捗が期待されるどころと考えられる。

主な記号

d	：液滴直径	[μm]
D	：微小重力下の火炎直径	[mm]
	：平均液滴直径	[mm]
	：みかけの活性化エネルギー	[-]
D_{32}	：ザウタ平均粒径	[μm]
D_f	：火炎伝播距離	[m]
g	：重力加速度	[m/s^2]
Gr	：グラスホフ数	[-]
K	：燃焼速度定数	[s^{-1}]
K_0	：微小重力下の燃焼速度定数	[s^{-1}]
n	：液滴数	[-]
N_D	：液滴数密度	[mm^{-3}]
P	：圧力	[MPa]
P_{inj}	：噴射圧力	[MPa]
R	：火炎膨張率	[mm/s]
R_g	：液滴混在予混合気のガス燃料割合	[-]
S	：平均液滴間距離	[mm]
T	：温度	[K]
t	：時間	[s]
V_f	：火炎伝播速度	[mm/s]
W	：液滴の累積重量	[g]
X	：落下中時刻	[s]
α	：火炎伝播実験装置の装置係数	[-]
Δt_{inj}	：噴射期間	[s]
τ	：着火遅れ	[s]
ϕ_g	：ガス燃料（プロパン）の当量比	[-]
ϕ_l	：液体燃料（灯油）の当量比	[-]
ϕ_t	：液滴混在予混合気の総合当量比	[-]

参考文献

第1章

- (1) 大井上・佐次・棚沢・吉田・藤平, ディーゼル機関I [高速編], 山海堂(1963), 41
- (2) 新岡・佐藤, 燃焼研究, **90**(1992), 33
- (3) 野村・佐藤・氏家・川崎, 微粒化, **6-15**(1997), 90
- (4) King, M.K., 宇宙環境利用国際シンポジウム IN SPACE '95 前刷集(1995), 443
- (5) JAMIC User's Guide, 地下無重力実験センター(1995), 6
- (6) 大井上・佐次・棚沢・吉田・藤平, ディーゼル機関I [高速編], 山海堂(1963), 146
- (7) Godsave, G. A. E., *4th Symp. (Int.) Combust.*(1953), 818
- (8) Spalding, D. B., *4th Symp. (Int.) Combust.* (1953), 847
- (9) 角田・廣安・大矢, 機論, **41-348**(1975), 第2部, 2475
- (10) 吉田, 油燃焼の理論と実際, 省エネルギーセンター(1992)
- (11) Kumagai, S., and Isoda, H., *7th Symp. (Int.) Combust.* (1959), 523
- (12) Faeth, G. M. and Olson, D. R., *SAE Paper* 680465 (1968)
- (13) 武井・小林・新岡, 第30回燃焼シンポジウム講演論文集(1992), 328
- (14) Tanabe, M., Kono, M., Sato, J., Koenig, J., Eigenbrod, Ch., Dinkelacker, F. and Rath, H. J., *Combust. Sci. Technol.*, **108**(1995), 103
- (15) Sato, J., Tsue, M., Niwa, M. and Kono, M., *Combust. Flame*, **82**(1990), 142
- (16) Kadota, T. and Hiroyasu, H., *18th Symp. (Int.) Combust.* (1981), 275
- (17) Faeth, G. M. et al., *12th Symp. (Int.) Combust.* (1969), 9
- (18) Shaw, B. D., Dryer, F. L., Williams, F. A. and Haggard Jr, J. B., *Acta Astronautica*, **17**(1988), 1195
- (19) Kumagai, S., Sakai, T. and Okajima, S., *9th Symp. (Int.) Combust.* (1963), 779
- (20) Knight, B. and Williams, F. A., *Combust. Flame*, **38**(1980), 111
- (21) Avedisian, C. T., Yang, J. G. and Wang, C. H., *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, **420** (1988), 183
- (22) Yang, J. C. and Avedisian, C. T., *23rd Symp. (Int.) Combust.* (1988), 2037
- (23) Yang, J. C., Jackson, G. S. and Avedisian, C. T., *23rd Symp. (Int.) Combust.* (1990), 1619

- (24) 津江・山崎・角田, 機論, **61**-583(1995), **B**, 405
- (25) 三上・加藤・佐藤・河野, 機論, **61**-582(1995), **B**, 373
- (26) NEDO/JSUP, 平成8年度 微小重力環境を利用した高度燃焼技術創出に関する研究開発
成果報告書(1997), 131
- (27) 門脇・丸田・長谷川・小林・新岡, 日本マイクログラビティ応用学会誌,
14-1(1997), 17
- (28) Brzustowski, T. A., Sobiesiak, A. and Wojcicki, S., *18th Symp. (Int.) Combust.*
(1981), 265
- (29) Williams, F. A., 燃焼の理論, 第2版(1987), 日刊工業新聞社, 495
- (30) Burgoyne, J. H. and Cohen, L., *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A**, **225**(1954), 375
- (31) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., *Combust. Flame*, **31** (1978), 115
- (32) Rao, H. N. S. and Lefebvre, A. H., *Combust. Sci. Technol.*, **8**(1973), 95
- (33) Myers, G. D. and Lefebvre, A. H., *Combust. Flame*, **66** (1986), 193
- (34) Hayashi, S., Kumagai, S. and Sakai, T., *Combust. Sci. Technol.*, **15** (1976), 169
- (35) 小笠原・水谷, 機論, **31**-326(1965), 第2部, 1002
- (36) Mizutani, Y. and Nishimoto, T., *Combust. Sci. Technol.*, **6**(1972), 1
- (37) 水谷・中島, 機論, **39**-325(1973), 第2部, 2872
- (38) 吉田・新井・廣安, 機論, **56**-528(1990), **B**, 2490
- (39) 吉田・新井・廣安・横谷, 機論, **57**-539(1990), **B**, 2416
- (40) 奥山・大友・小林・新岡, 第32回燃焼シンポジウム講演論文集(1994), 236
- (41) 永田・岡田・工藤・藪・藤田・伊藤・北野・竹下, 第34回燃焼シンポジウム講演論
文集(1996), 505
- (42) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H., *18th Symp. (Int.) Combust.* (1981), 321
- (43) Probert, R. P., *Phil. Mag.*, **37**(1946), 1954
- (44) Tanasawa, Y., *Tech. Rept. Tohoku Univ.*, **18**(1954), 195
- (45) Mizutani, Y., *Combust. Sci. Technol.*, **6**(1972), 11
- (46) Mizutani, Y. and Yasuma, G., *Combust. Sci. Technol.*, **8** (1974), 275
- (47) Williams, F. A., *8th Symp. (Int.) Combust.* (1962), 50
- (48) Seth, B., Aggarwal, S.K. and Sirignano, W. A., *Combust. Flame*, **39**(1980), 149
- (49) Polymeropoulos, C. E., *Combust. Sci. Technol.* **40**(1984), 217

- (50) Chiu, H. H. and Liu, T. M., *Combust. Sci. and Tech.*, **17**(1977), 127
- (51) 吉田, 油燃焼の理論と実際, 省エネルギーセンター (1992)
- (52) 中部・赤松・水谷・香月・井本, 機論, **61-581**(1995), **B**, 317
- (53) Akamatsu, F., Tsushima, S., Katsuki, M. and Mizutani, Y., *1st Asia-Pacific Conf. Combust.* (1996), 408
- (54) 斎藤, 燃協誌, **70-4**(1991), 299
- (55) 櫻谷・竹下, 燃焼研究, 108(1997), 77
- (56) Swithenbank, J., Beer, J. M., Taylor, D. S., Abbot, D. and McCreath, G. C., *AIAA Paper*, 76-69(1976)
- (57) Bauckhage, K., *Proc. 3rd ICLASS*, Paper No. VC/3/1(1985)
- (58) Bachalo, W. D., *Proc. 3rd ICLASS*, Paper No. VC/2/1(1985)
- (59) 吉津・新井・中山, 機講論, 900-59(1990), **B**, 509
- (60) 金相進, 広島大学学位論文(1997)
- (61) 石川・西村・村上, 九大工学集報, 昭58-8(1983), 391
- (62) 石川・村上, 航宇誌, **30-342**(1982), 21
- (63) 西田・村上・廣安, 機論, **53-488**(1987), **B**, 1487
- (64) 西田・高須賀・廣安, 機論, **54-497**(1988), **B**, 203
- (65) 佐藤・沖浦・正路・秋山・船崎, 機論, **54-506**(1988), **B**, 2935
- (66) 佐藤・沖浦・正路・高橋, 燃協誌, **70-11**(1991), 1067
- (67) Sakai, T. and Saito, M., *Combust. Flame*, **51** (1983), 141
- (68) 廣安・新井・橋崎・松江, 機論, **54-505**(1988), **B**, 2585
- (69) 松江・新井・廣安, 機論, **56-528**(1990), **B**, 2476
- (70) Lee, A. and Law, C. K., *Combust. Flame*, **77**(1991), 93
- (71) Antaki, P., *Combust. Sci. Technol.*, **46**(1986), 113
- (72) Wong, S. C., Lin, A. C. and Wu, C. E., *Combust. Flame*, **96**(1994), 304

第2章

- (1) 石川・日比谷編, マイクログラビティ, 培風館(1994), 213
- (2) JAMIC User's Guide, 地下無重力実験センター(1995)
- (3) 石川・日比谷編, マイクログラビティ, 培風館(1994), 188

- (4) 無重量落下実験施設ユーザズガイド, 日本無重量総合研究所(1997)

第3章

- (1) 野村・佐藤・氏家・川崎, 微粒化, **6-15**(1997), 90
(2) 谷重・松田・吉崎・廣安・櫻谷, 機講論, 96-15(1996), III, 627
(3) 石川・西村・村上, 九大工学集報, 昭58-8(1983), 391
(4) 西田・村上・廣安, 機論, **53-488**(1987), **B**, 1487
(5) 格内, レーザ計測, 経営システム研究所(1984), 150
(6) 村田, ホログラフィー入門, 朝倉書店(1976), 15

第4章

- (1) 村山・宮本・近久・永田・山崎・金, 日本船用機関学会誌, **20-6**(1985), 352
(2) 佐藤・秋山・沖浦・正路・馬場, 機論, **53-494**(1987), **B**, 3003
(3) 坂井・徳田・松尾・中嶋・金子・今本・高塚, 三菱重工技報, **22-5**(1985), 694
(4) 佐藤・沖浦・馬場・正路・秋山, 機論, **53-494**(1987), **B**, 2890
(5) 壹岐・永井・平井, 機論, **59-560**(1993), **B**, 1375
(6) 廣安・新井・橋崎・松江, 機論, **54-505**(1988), **B**, 2585
(7) 松江・新井・廣安, 機論, **56-528**(1990), **B**, 2476
(8) Kumagai, S., and Isoda, H., *6th. Symp.(Int.) Combust.* (1957), 726
(9) 角田・廣安・大矢, 機論, **41-348**(1975), 第2部, 2475
(10) 等々力・中田・齋藤, 第31回燃焼シンポジウム講演論文集(1993), 531
(11) Zabetakis, M. G., Furno, A. L. and Jones, G. W., *Indust. Eng. Chem.*, **46-10**
(1954), 2173

第5章

- (1) Wong, S. C. and Turns, S. R., *Combust. Sci. Tech.*, **52**(1987), 22
(2) Szekly Jr., G. A., Turns, S. R., and Faeth, G. M., *Combust. Flame*, **58**(1984), 31
(3) Wong, S. C., Lin, A. C., and Wu, C. E., *Combust. Flame*, **96**(1994), 304
(4) Bhatia, R. and Sirignano, W.A., *Combust. Flame*, **100**(1995), 605
(5) 谷重・吉崎・廣安・櫻谷, 日エネ誌, **75-12**(1996), 1056

第6章

- (1) 梶谷・阿久津, 機論, **50**-451(1984), **B**, 788
- (2) 水谷・中島, 機論, **39**-325(1973), 第2部, 2879
- (3) 吉田 肇, 広島大学学位論文(1991)
- (4) Ballal, D.R. and Lefevre, A.H., *18th Symp.(Int.) Combust.*(1981), 321
- (5) Brzustowski, T. A., Sobiesiak, A. and Wojcicki, S., *18th Symp. (Int.) Combust.* (1981), 265
- (6) Hayashi, S., Kumagai, S. and Sakai, T., *Combust. Sci. Tech.*, **15**(1984), 169
- (7) Hayashi, S. and Kumagai, S., *15th Symp.(Int.) Combust.*(1974), 445
- (8) Chiu, H.H. and Liu, T.M., *Combust. Sci. and Tech.*, **17**(1977), 127
- (9) 加藤・水野・小林・新岡, 第34回燃焼シンポジウム講演論文集(1996), 377
- (10) Law, C.K., Chung, S.H. and Srinivasan, N., *Combust. Flame*, **38**(1980), 173

謝辞

本研究は、広島大学 工学部 第一類（機械系）原動機工学講座 燃焼工学研究室において行われたものである。本研究ならびに研究生活の全般にわたって、終始多大なる貴重なご教示、ご鞭撻を賜った廣安 博之 教授に対し、ここに謹んで深厚なる感謝の意を表します。

本論文をまとめるに際し、有益なご助言ならびにご討論を賜った、化学工学講座 熱移動操作研究室の奥山 喜久夫 教授、化学工学講座 粉体工学研究室の吉田 英人 教授、ならびに原動機工学講座 燃焼工学研究室の西田 恵哉 助教授に対し、衷心より深く感謝いたします。

さらに、本研究の遂行に際し、研究の細部にわたって、終始多くの適切かつ有益なご教示、ご指導を賜った原動機工学講座 燃焼工学研究室の西田 恵哉 助教授、吉崎 拓男 助手に対し、衷心より深くお礼申し上げます。

また、本研究は、財団法人 宇宙環境利用推進センター（JSUP）などによる、「微小重力環境を利用した高度燃焼技術創出に関する研究開発」、および「宇宙環境利用フロンティア共同研究」の一環において、広島大学との共同研究として行われたものであり、宇宙環境利用推進センター 無重力施設利用部 主任研究員 櫻谷 隆 氏、および同 フロンティア共同研究推進部 主任研究員 小山 正人 氏をはじめとする各位の方々に対し、深くお礼申し上げます。

燃焼工学研究室の在籍開始当初から、研究および研究室生活の上で、多くのご指導を賜った小田 哲也 元助手（現在 鳥取大学 工学部 機械工学科 講師）に対し、謹んでお礼申し上げます。

実験結果の考察などにおいて、重要なご教示をいただいた広島工業大学 工学部の松江 孝博 助教授、海上保安大学の吉田 肇 助教授に対し、深くお礼申し上げます。

実験に使用した微粉炭のご提供をいただいた、バブコック日立株式会社 呉研究所の佐藤 一 教氏に対し、厚くお礼申し上げます。

実験装置製作にあたって、点火系装置のご提供をいただいた、マツダ株式会社 技術研究所の藤本 昌彦 氏に対し、厚くお礼申し上げます。

実験装置の製作にあたって、多大なご協力をいただいた、広島大学 工学部 学校工場、および日本科学エンジニアリング株式会社の各位の方々に対し、厚くお礼申し上げます。

落下実験施設における実験運用にあたって、多大なご支援、ご協力をいただいた、株式会社 地下無重力実験センターおよび株式会社 日本無重量総合研究所の各位の方々に対し、厚くお礼申し上げます。

また、研究室のよき先輩、よき相談相手としてご指導、ご助言をいただいた、玉木 伸茂 氏

(現在 近畿大学 工学部 助手), 金相進氏(現在 韓国 現代自動車)に, 感謝の意を表します.

実験の遂行にあたって, 多大なご助力をいただいた燃焼工学研究室 卒業生の増田 耕一氏(現在 株式会社前川製作所), 槇山 正氏(現在 ホーコス株式会社), 松田 基宏氏(現在 京セラ株式会社), 下口 剛氏(現在 三菱農機株式会社), 高木 満一氏(現在 株式会社豊田自動織機製作所), 新田 健作氏, および同 大学院生の上川 将洋氏, 山口 雅之氏, 同 学部学生の水口 貴之氏に対し, 厚くお礼申し上げます. また, 博士課程のよき同輩, よき相談相手として, 研究および日常生活の上でさまざまなご助言, ご協力をいただいた, 周 剣光氏, 金 壮憲氏, 今西 宏文氏に, 厚くお礼申し上げます. さらに, 広島大学 工学部 第一類(機械系) 原動機工学講座 燃焼工学研究室の卒業生, ならびに若井 謙介氏をはじめとする現役学生の皆様に, 感謝申し上げます.

なお, 北海道大学 工学部 在籍時に, 研究生生活を続ける機会をおゆるし下さり, さらに現在に至るまで, たび重ねてご激励のお言葉を賜った, 真田 雄三 北海道大学 名誉教授ならびに横山 晋 北海道大学 元助教授に対し, 衷心より深く感謝の意を表します.

最後に, 研究に没頭するために, 長期にわたって物質面, 精神面で支えてくれた両親, 祖母, 弟に感謝する.