

第4章 短時間微小重力環境を利用した燃焼研究と宇宙実験への展開

北海道大学 藤田 修

Combustion Researches Utilizing Short-term Microgravity Facilities and Their Potential as Future Space Experiments

Hokkaido University Osamu Fujita

ABSTRACT Combustion phenomena are strongly affected by gravitational field because they are always accompanied by local intensive heat release and resulting steep density gradient. Therefore, use of Microgravity environment is very effective for combustion researches through the elimination of the disturbance from buoyancy-induced flow. Since time scales of combustion phenomena are generally short many subjects on combustion could be studied by using short-term Microgravity facilities, such as drop tower or parabolic flight of aircraft. Some of them, however, require longer Microgravity time to take the final set of data after many repeated short-term Microgravity experiments. In the present report some examples of combustion research attained by short-term Microgravity facilities are introduced and their potential as future Space Experiments is discussed.

1. はじめに

地上では、空間的に密度分布が存在するとそれに起因する自然対流現象が発生する。この対流現象は人為的には制御することが難しく、熱や物質の移動現象を取り扱う場合に、実際に生じる現象はこの自然対流とそれ以外の輸送現象（例えば、強制対流、拡散、重力以外の体積力による効果、等）が複合した形で現れてくる。その結果として、自然対流以外の物理的機構による輸送現象の本質を捉えることはしばしば難しくなる。その一方で、微小重力環境下では自然対流を完全に取り除くことができ、本来観察すべき物質や熱の輸送に関する物理機構を精密に観測できる。

このように、微小重力環境は、熱や物質の輸送現象の関わる研究に対し、本質的な利点を有しておりその価値が失われることはない。それにもかかわらず、微小重力環境利用研究は、国際的には予算的な要因から縮小の方向に向かっているといわざるを得ない。米国では、新宇宙政策[1]のなかで、月面基地の計画(return to the Moon)やそこを拠点とした有人火星探査計画が華々しく謳われている一方で、スペースシャトルの2010年での退役、それにとまなうISS利用計画の縮小が是認され、それにとまなう、従来スペースシャトルやISSが担うことを予定されていた微小重力実験は大幅に縮小されつつある[2]。また、これと関連して米国における微小重力環境利用

科学実験の予算はほとんど凍結されており、唯一残ることができるものは火星有人探査ミッションに必要な技術開発に直接つながるプログラムのみである。また、ISSに取り付けが予定されていた遠心重力発生装置（セントリフュージ）も打ち上げが中止され、ライフサイエンス研究も大きな影響を受けている。我が国においても、世界最大を誇っていた地下無重力実験センター（JAMIC）が予算的な理由から2003年に閉鎖されるなど、微小重力利用研究が厳しい環境に置かれていることは否めない。

微小重力利用研究は、多くの場合が科学研究として実施されることから、その評価を経済原理に乗せて行うことは適切ではないと考えられる。しかしながら、これまで宇宙実験におけるコストはあまりにも大きく、相応に優れた科学研究であっても、その成果が投入した予算に見合うものであるとすることは容易ではなかったと考える。むしろ、微小重力を利用した科学研究という目的を設定することで、その手段である宇宙ステーションやスペースシャトル、サウンディングロケット、軌道上実験システムなどが開発されてきたという見方のほうが適切かもしれない。したがって、これまでの微小重力科学は、高度な実験設備が先行して存在し、結果として投下した予算が成果（産業への具体的な貢献のような短期的な視点に基づく評価）を上回る、という構図が継続してきた。これが国家予算の逼迫にともなって、微小重力研究が縮小しつつある現状の大きな要因の一つであると考えられる。本報告では、このような考えのもと、微小重力実験手段の低コスト化、それをベースとする長時間微小重力実験への展開について、著者が専門とする燃焼研究を対象として述べる。

2. 低コスト微小重力実験施設の必要性

2.1 微小重力燃焼研究の状況

燃焼研究分野においては、微小重力の利用が効果的である研究課題は数多く存在している。図1は、燃焼分野を構成する研究領域を概念的に示したものである。燃焼現象を構成する代表的研究領域としては、気体（予混合燃焼、拡散燃焼）、液体燃焼、固体燃焼、燃焼生成物、燃焼合成などが考えられる（具体的にどのような課題が存在しているかは、文献[3]を参照されたい）。燃焼現象そのものが燃料と酸化剤の急激な化学反応の結果生じる現象であり、局所的な化学組成および密度分布が生じるものであることから、いずれの研究領域においても、重力が大きな影響を与える課題が必ず存在している。

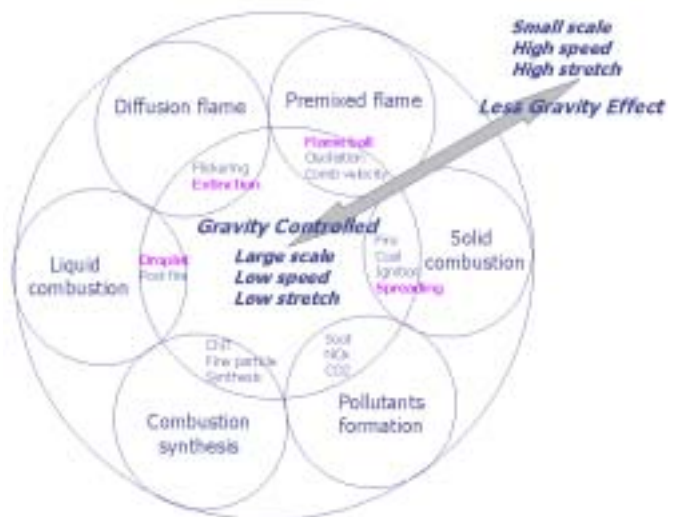


図1 燃焼分野を構成する種々の研究領域とその中で一定割合を占める微小重力利用研究

いずれの研究領域においても、重力が大きな影響を与える課題が必ず存在している。

燃焼現象を特徴づける無次元数としてグラスホフ数（浮力と粘性力の比, $Gr: L^3g / (\nu(T-T_0))$ ）およびフルード数（慣性力の浮力の比, $Fr: u^2/gL$ ）（記号 L ：代表寸法、 g ：重力加速度、 ν ：体積膨張係数、 $(T-T_0)$ ：観察対象と周囲の温度差、 ν ：動粘性係数、 u ：強制対流流速）が知られているが、これらの無次元数は、現象の代表寸法が大きいほど、また強制対流による流れが遅いほど浮力の影響が支配的になることを示唆している。図1では、円の中心に近くなるほど Gr が大きい、あるいは、 Fr が小さいものとして描かれており、燃焼分野では、中央側の円の内側に含まれる一定割合の課題が微小重力利用研究の対象になることを概念的に示している。

これまで実施されてきた微小重力燃焼研究に関して、すでにいくつかの Review[4-7]がなされているが、その中で、例えば液滴燃焼[8]や、宇宙船内の火災安全性に関する研究[9]、ガス火災の消炎[10]、すす生成[11]に関する課題が、盛んに研究のなされている対象として知られている。しかし、実際には燃焼分野にはさらに多く課題が存在しており、そのなかで微小重力場を用いた研究が効果的であるにも関わらず手を付けられていない課題や限定的な実験が行われているものの十分に理解が進んでいない課題が数多く存在している。したがって、燃焼科学分野においては微小重力利用研究が継続的に重要な位置を占め続けている。

一般に、研究の初期段階においては、その研究課題がテーマとして将来性があるのか、あるいは研究者自身には将来性のあるテーマであると確信があっても、少なくとも重要かつ本質的なテーマであることを周囲に納得させるまでの期間は独自研究によるデータ取得と相当な試行錯誤が必要である。また、研究者であれば経験することであるが、他の目的で試行錯誤している過程でより重要なテーマに遭遇することもたびたびある。通常の上陸実験の場合、この初期の部分は研究者の熱意と努力により突破することが可能であり、このような努力を行う研究者が数多く存在する中から魅力的な研究課題が生み出され、予算的な裏付けのある研究プロジェクトへと展開していく。

ところが、微小重力研究に関していえば実験環境そのものが日常に存在しているものではなく、試行錯誤のプロセスを実施することは容易ではない。通常重力場での実験は繰り返し実施可能であるが、微小重力場での現象が地上と大きく異なる場合は、微小重力場でも試行錯誤実験が必要であり、それなしで質の高い成果を納めることは難しい。我が国の地上における微小重力実験手段としては、落下実験施設として $MGLAB$ （日本無重力総合研究所）、航空機実験として DAS （ダイヤモンドエアサービス）のパラボリックフライトがある。しかし、これらの利用コストは一般研究者の研究予算と比較するとかなり大きく、すでに試行錯誤の段階を越えたレベルの研究であることが要求される。この意味でも、初期の試行錯誤の段階を許容する低コストの実験施設の存在は極めて重要である。

図2は、上述の微小重力研究に関する概念を模式的に示したものである。第1層が、初期の試行錯誤に相当する部分であり、その中から選定された魅力的な課題が第2層に位置するより高度な施設によるテーマとして推進される。当然ながら、第1層の裾野が広いほど、第2層の研究課題としてより優れたものが選択される可能性が高くなる。さらに、第2層の研究の質が高いほど、

第3層のサウンディングロケット等による数分程度の微小重力研究、最上層の長時間の軌道上実験に対し、優れた研究課題が提供されることになると考えられる。この意味でも、第1層の裾野を広げることが重要である。

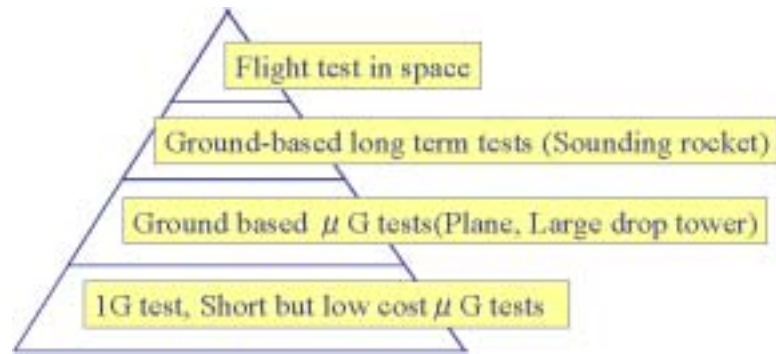


図2 微小重力科学研究のカスケード構造

しかしながら、現実にはこ

の第1層に位置する部分については、従来はほとんど環境が整っていなかったといえる。結果として、微小重力場における予備的試験なしに、MGLABあるいはすでに閉鎖されたJAMIC（地下無重力実験センター）を利用することとなり、結果的に初期の試行錯誤的な段階の実験もこれらの施設で兼ねて実施されるような状況が生じていた可能性がある。予算と成果をバランスさせて行くためには、この状況は必ずしも望ましいものではなく、試行錯誤の段階でも限られた予算の中で微小重力実験が可能な設備の存在は不可欠であるといえる。

2.2 50M級微小重力実験設備の設置

前述のような考えから、北海道赤平市に新たな落下塔（コスモトーレ）が建設された。本落下実験施設は、北海道大学および（株）植松電機により整備されたものであるが、設置当初の目的が微小重力研究の裾野を広げることであり、以下の点を実現できることを基本のコンセプトとしている。

- (1) 低コストで多くの繰り返し実験が可能
- (2) 国内外研究者に広く利用機会を開放する
- (3) 理科教育などへも活用できる

本設備の一般への利用機会の提供は、NPO法人北海道宇宙科学技術創成センター（HASTIC）（<http://www.hastic.jp/>）により行われており、すでに運用が開始されている。

落下塔の写真を図3に、落下塔の主な仕様を表1に示す。本落下塔の全長は約55m、落下距離は約40mであり、微小重力時間は2.5-2.8秒程度である。落下カプセルは、2重構造となっており、落下中の外カプセルが空気抵抗を受け、内カプセルは微小重力の質を高く保つことができる構造となっている。

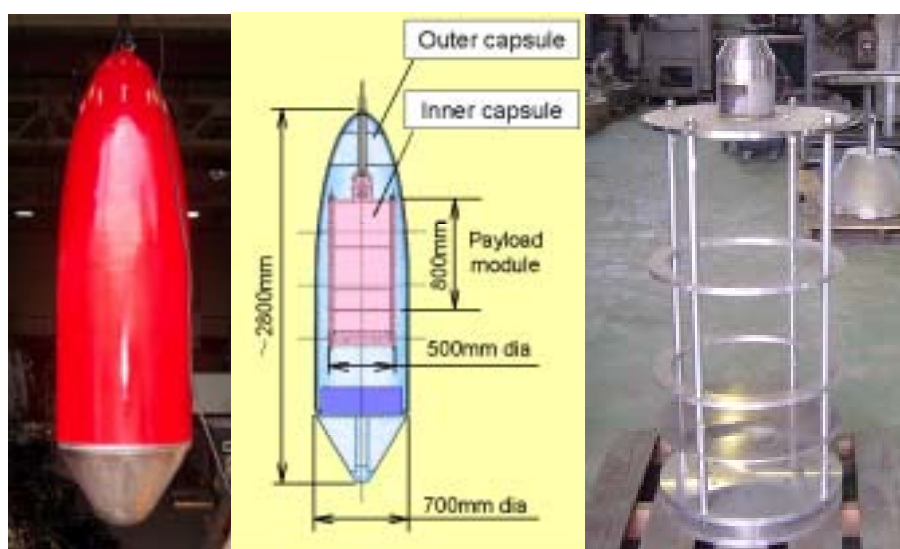


図3 新たに建設された50M級落下塔
コスモトーレ(COSMOTORRE)

表 1 落下塔コスモトーレの仕様

項目	仕様
微小重力時間	2.5-2.8 sec (40mdrop)
重力レベル	$>10^{-3} G_0$
ペイロード寸法	Φ50cm × 80cm
総重量(内カプセル)	400 kg (100kg)
カプセルタイプ	二重カプセル方式

図 4 には、落下カプセルの外観、内部構造、および内ラックの外観写真を示す。カプセル全長は、約 2.8m、外径 70cm で総重量は約 400kg である。この内部に内カプセルが組み込まれ、内カプセルを吊り上げることで外カプセル全体を持ち上げる構造となっている。内カプセルは、図 4 (c) に示すように上下 2 枚の円盤（途中にリング状の仕切りが入っている）を支柱でつないだ構造で、この間の空間に実験装置を搭載できる。実験者が使用できるのは直径 50cm × 長さ 80cm の空間であり、100kg までの重量を搭載できる。本設備では、1 日に最大 10 回程度の実験を実施することが可能であり、図 2 に示す最下層の裾野を広げる設備となることが期待される。



(a)落下カプセル (b)カプセルの構造 (c)内カプセル

図 4 落下カプセルおよび内カプセルの外観と構造

3 . 微小重力燃焼研究の例

3 . 1 宇宙火災安全性に関する研究

落下塔を用いた微小重力実験の例として、宇宙火災安全性に関する研究を紹介する。宇宙空間で最も起こりうる火災は電気火災である。電気火災は主に配線がショートすることによって起こるものであり、中でも宇宙船内や宇宙基地内のあらゆる部分で使用されている導線被覆材は火災発生源としての潜在的危険性を有する。米国において計画されている月面基地を経由した有人火星探査ミッションでは、長期間にわたる有人活動が展開されることとなり、さらなる火災安全性の向上が求められる。したがって、火災発生源となる電線の燃焼について十分に理解を深めるこ

とは極めて重要な課題と考えられる。

著者らは、これまで電線被覆表面燃え広がり現象について研究を継続しており、電線被覆表面の燃焼性は微小重力場において微風速を与えられた際に最も高くなることを示している[12]。この研究に関しては、定常条件での精密な燃え広がり速度を測定することの重要性から、軌道上実験候補テーマとして選定され、現在長時間微小重力実験に向けた準備が進められている。この詳細については、以前の報告[13]で詳しく紹介している。

しかしながら、前述のように、電線被覆の燃焼は電気配線のショートに端を発する 경우가ほとんどであり、電線が短絡した際の燃焼性を把握しておくことが、燃え広がり研究にも増して重要と考えられる。とくに、宇宙火災安全性を考える上では、通常重力場と微小重力場のいずれにおいて燃焼性が高いのかを明らかにする必要がある。また、微小重力場の方が着火性の高い場合には、その機構を明確にした上で、配線ショートに対する火災リスクの増大を量的に評価する必要がある。

3.2 実験装置および試料

本研究では、(1)地上実験、(2)産業技術総合研究所北海道センターの10m級落下塔施設(微小重力時間1.4秒)、(3)前節で紹介した50m級落下施設(同2.5秒)、(4)MGLAB(同4.5秒)における実験を実施している。本研究で用いた実験装置の概要を図5に示す。図中の試料支持装置の支柱に長さが70mm程度の試料を固定したものを燃焼室内に設置し、定電流電源を用いて任意の電流を供給する。その際の挙動をビデオカメラ(あるいは高速度ビデオカメラ)により燃焼室の観察窓を通して記録する。

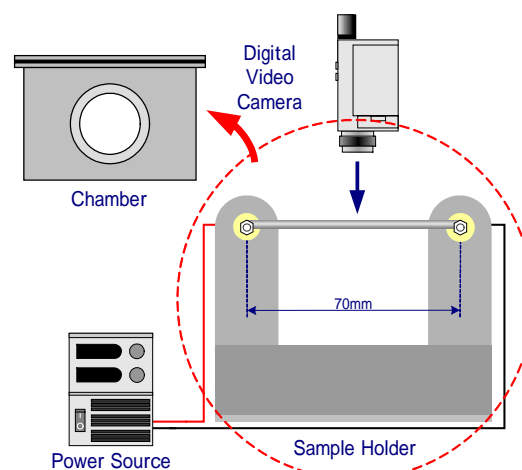


図5 電線通電着火試験装置の概念

本研究で使用した試料は、ポリエチレン(PE)被覆を施したニクロム線(図6)である。芯線にニクロムを用いているのは、サンプル線に電流を供給する配線との抵抗の差が大きく、通電による発熱、被覆の熔融、蒸発、着火に至るまでの現象を比較的短時間で観察可能にするためである。用いた試料の諸元を表2に示す。芯線の直径は0.5mm、被覆の厚さは0.15mm、試料外径は0.8mmである。実験の変数は、被覆導線への通電電流値、周囲酸素濃度などである。取得データは、着火が生じる下限電流値、および通電を開始してから着火に至るまでの着火遅れ時間である。

図7は、本実験装置をコスモトール落下カプセルに組み込んだ様子である。使用可能な空間を上下方向に3段に分けて使用しており、最上部が制御装置および通電着火用電源制御装置、中段が燃焼容器およびビデオ記録装置、下段がバッテリーおよびインバータである。



図6 使用した実験試料の概要(PE-insulated single core wire)

表2 使用したサンプルの緒元

	#2
心線外径 : D_i [mm]	0.5
被覆材厚さ : [mm]	0.15
導線外径 : D_o [mm]	0.8

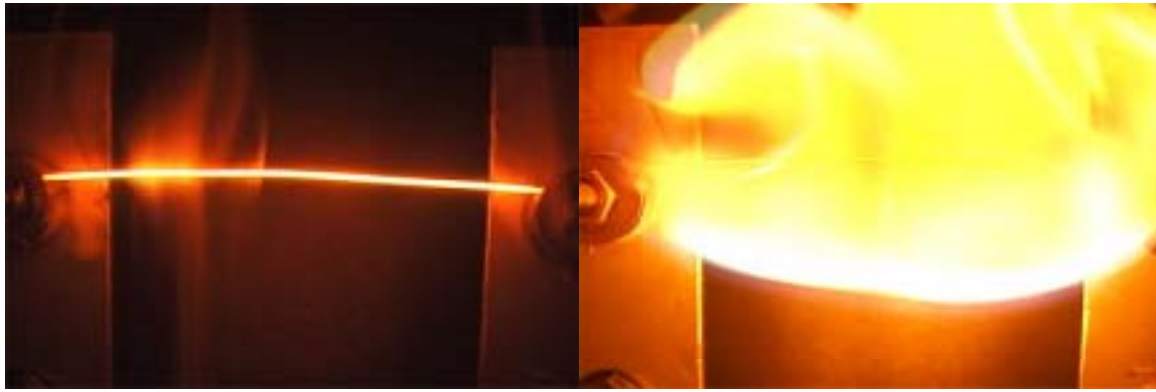


図7 実験装置を内カプセルに組み込んだ様子(左)および、これをコスモトール落下カプセルに組み込んだ様子(右)

3.3 実験結果と考察

図8に通常重力場および微小重力場における電流供給直後の画像を示す。電流値は12.5A、試料は表2に示したものである。図のように、通常重力場では着火が生じなかったのに対し、微小重力場では着火が生じ、その後図のように激しく燃焼した。このように、着火の挙動は重力条件により明らかに異なり、微小重力場の方が容易に着火の生じることがわかった。

この着火特性の違いを10m級の落下塔で取得しプロットしたものが図9である。この設備では、実験機会が限定されていたため、酸素濃度21%の場合のみの結果を示しているが、微小重力場では着火できる下限の電流値が約15Aから約12Aまで低下し、着火下限電流範囲が拡大しているこ



(a)通常重力場

(b)微小重力場

図8 通電直後の燃焼挙動の比較 (周囲酸素濃度 21%, 電流値 12.5A)

とがわかる。

次に同様な実験を、50m 級の落下塔で実施した。図 10 は、この結果の一例で、3 種類の酸素濃度に対し、通電電流を変えながら着火遅れ時間を測定した結果である。この結果からわかるように、着火遅れ時間は、酸素濃度の低いほど、また、通電電流値が小さいほど長くなっていくことがわかる。図 10 において、実験点のプロットが存在する下限の電流値が着火範囲である。この結果をみる

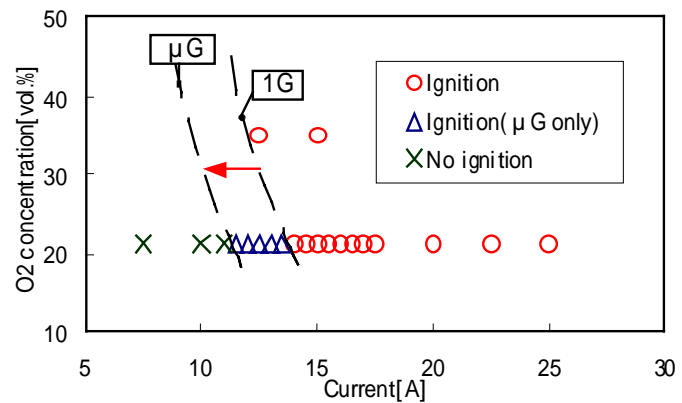


図9 微小重力時間が .4sの時の電線着火範囲の変化 (#2, 1G and μG)

と、例えば酸素濃度 21%の場合には、下限の電流値は約 10A、酸素濃度 30%の場合には 9A まで低下している。図 9 で観察した下限の電流値は、酸素濃度 21%の場合には 12A 程度であったことを考えると着火下限電流範囲が大幅に拡大していることがわかる。

さらに、同様に実験を、微小重力時間が 4.5 秒の MGLAB において実施した。図 10 のデータに MGLAB のデータを追加したものが図 11 である。この図において、塗りつぶしのシンボルが MGLAB で取得したものである。この結果から明らかなように、MGLAB で行った実験では着火下限電流がさらに拡大している。例えば、酸素濃度 21%の場合には、7A まで着火が発生しており、50m 落下塔による結果からさらに 2A 以上着火下限電流範囲が拡大していることがわかる。これらの結果は、微小重力継続時間が増大すると着火下限電流範囲も広がっていくことを示しており、着火の危険性も増大していくことを示している。

微小重力場においては、自然対流の影響がなく被覆の蒸発成分が試料付近に留まると同時に通電によって発生する熱も試料付近に留まる。この結果、試料近傍に適度な温度場と濃度場の条件が生じると考えられる。このとき生じる化学反応速度に対し試料近傍でのガスの滞留時間が十分長ければ着火に至るものと考えられる(すなわち、試料近傍での混合気の滞留時間と反応時間の比(ダムケラー数: $Da = \text{滞留時間} / \text{反応特性時間}$)が十分に大きくなった状況)。

微小重力場では、試料近傍にほとんど流れが発生せず、滞留時間が十

分に長くなるためより低い電流値でも着火するようになると考えられる。また、微小重力継続時間はそのままガスの滞留時間増大に繋がると考えられることから、微小重力時間の増加とともに Da が増大し着火が容易になるものと考えられる。

これらの結果を踏まえたときに大きな疑問として残るのは、微小重力継続時間がさらに増大したときに、着火下限電流値がどこまで拡大するかという点である。また、微小重力継続時間が十分に長くなったときの着火下限電流を決めるメカニズムが、短時間微小重力実験の場合と同じであるかどうか興味有る課題である。これらの疑問に関しては、現有の地上ベース実験の範囲では確認することは不可能であり、サウンディングロケットあるいは軌道上実験への展開が必要となる。

ここで与えられた疑問は、短時間微小重力実験を段階的に積み上げた結果生じてきたものであり、図2に示したような階層的な微小重力実験手段の利用が効果的に連携した例と考えられる。

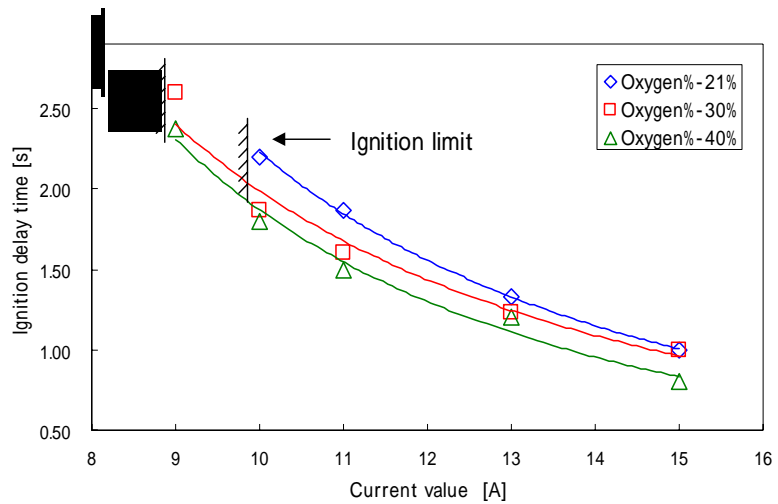


図 10 50m 落下塔による着火遅れの電流依存性と着火範囲

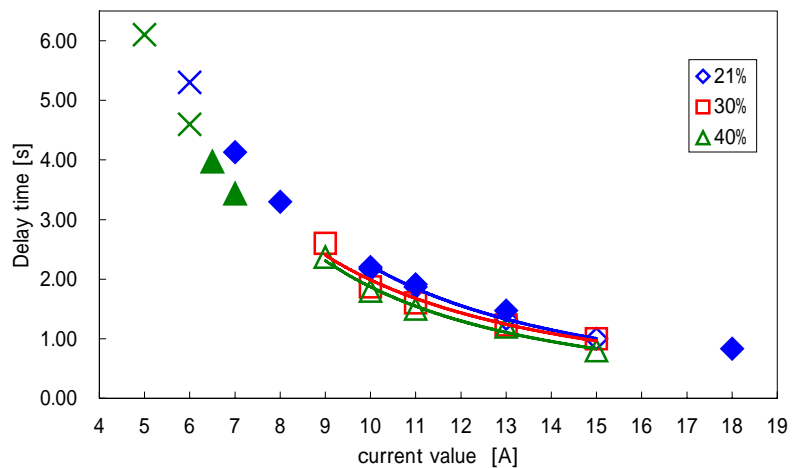


図 11 MGLAB における着火遅れの電流依存性と着火範囲

この研究課題は継続中のものであり、今後さらなる研究の進展が期待される。

4．短時間微小重力実験で観察可能な研究例

前節で述べた研究は、繰り返しの短時間微小重力実験から、長時間微小重力実験への展開が想定される例であるが、燃焼分野の課題の中には、落下塔による短時間微小重力実験のみで、ある程度の成果が得られる対象も多い。

例えば、燃料空気予混合気の火炎伝播などは現象の進行が比較的速く、短時間微小重力環境でも十分に観察を行うことができる。図 12 は、現在著者らが研究を進めている予混合気の火炎振動伝播現象[14]を観察する実験システムである。

直径 50mm、長さ 450mm の伝播管に予混合ガスを封入し、その一端からレーザ光を投入する。図 13 に示すように、レーザ通過位置で予混合気によるレーザ光の吸収が生じ、局所的に燃焼速度が増大する。この効果により、火炎伝播面に任意の曲率を与えることができる。このときの火炎先端面の曲率と不安定伝播挙動の関係を明らかにしようとする研究である。

このような系においては、伝播速度が比較的遅い混合気条件では浮力影響が顕著に現れ、目的とする観察を行うことができなくなる。図 14 は典型的な例を示したもので、レーザを照射なしで管内火炎伝播の様子を観察した結果である。上段が通常重力場、下段が微小重力場における映像である。図から明らかなように、通常重力場では浮力により火炎が上側に偏っているのに対し、微小重力場では球状の先端面をもつ火炎が定常的に伝播する。通常重力場で見られるような火炎では、先端面の上下の対称性が失われ、目的とする観察が難しくなる。

次に、伝播管にレーザ光を照射して火炎伝播現象を観察した結果を図 15 に示す。燃料にエチレンを用い、燃焼速度が 25.1cm/s となるような組成(表 3)を調整したうえで火炎伝播現象の観察を行った。

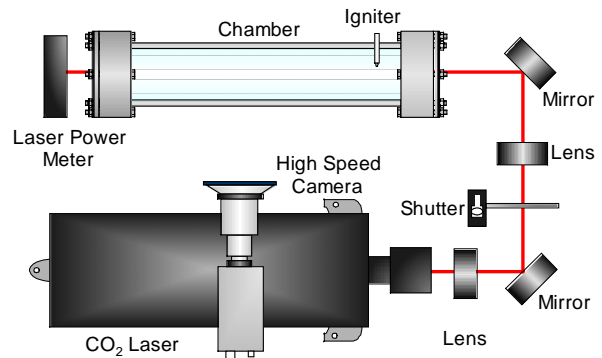


図 12 火炎振動伝播現象観察装置

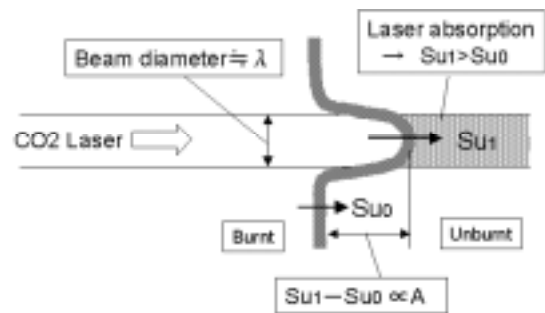


図 13 レーザ法による火炎先端曲率制御の概念

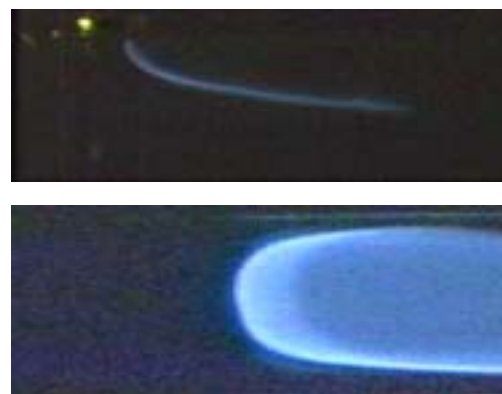


図 14 管内を伝播する予混合火炎
(上：通常重力場、下：微小重力場)

図 15 は、このときそれぞれの組成での伝播現象を通常重力場および微小重力場において観察した結果である。この実験では、浮力影響を少しでも緩和するため、伝播管は垂直に立てて実験を行っている。下方から直径 5mm のレーザを照射するとともに、伝播管の下端で着火を行い、上方へ伝播する様子を高速度カメラで捉えている。レーザを照射しなければ球状の先端形状をもつ火炎が一定速度で伝播するが、レーザを照射すると、先端の尖った火炎が時間的に変動しながら伝播するという興味深い挙動が見出された。また、図ではやや判断しにくいですが、この現象は通常重力場および微小重力場のいずれでも観察され、本振動現象が重力条件によらず火炎先端面に現れる本質的な不安定現象であることを示唆している。

図 16 は、Gas2 の条件に対して、火炎先端位置の時間変化をプロットしたものである。管内の上方伝播であるため、浮力の影響は火炎を加速する方向に現れ、通常重力場における伝播速度のほうが明らかに大きくなっている。しかし、いずれの重力条件に対しても、火炎先端位置は定常的に移動することなく、時間的に変動しながら移動する興味深い挙動を示している。

この発生機構は、 $Le < 1$ (Le : ルイス数) の時に火炎先端が自立的に不安定化する作用と、火炎先端曲率が増大したとき燃焼反応が停滞する作用が複合したことによるものと考えられるが、この点については、今後さらに微小重力場を活用しさらに検討を進める予定である。

ここで観察したように、本現象には重力が無視できないレベルで影響を現すが、現象そのものは比較的短時間で進行する。その時間スケールから判断して、ほとんどの実験は落下塔による短時間微小重力環境で十分観察可能と考えられる。したがって、このような課題の場合は、繰り返しの実験を常時実施可能であるという利点を考えると、落下塔による微小重力実験を中心として

表 3 設定した予混合気組成 ($Su_0=25.1\text{cm/s}$)

No.	C ₂ H ₄	O ₂	CO ₂	other		Le
Gas1	9%	21%	70%		1.28	0.84
Gas2	9%	20%	65.7%	He	1.35	0.68

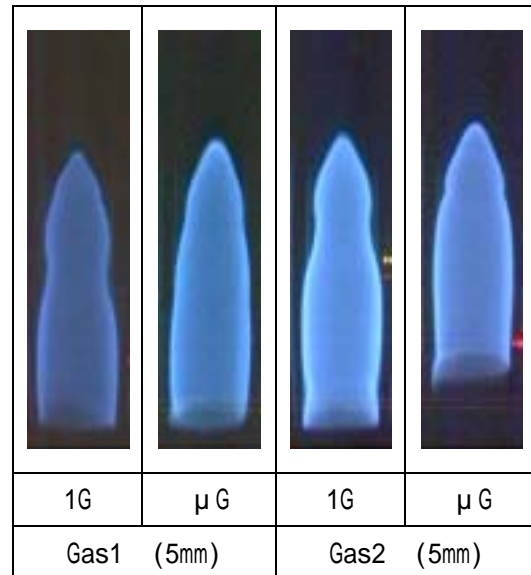


図 15 振動伝播現象の観察 (レーザ径 5mm)

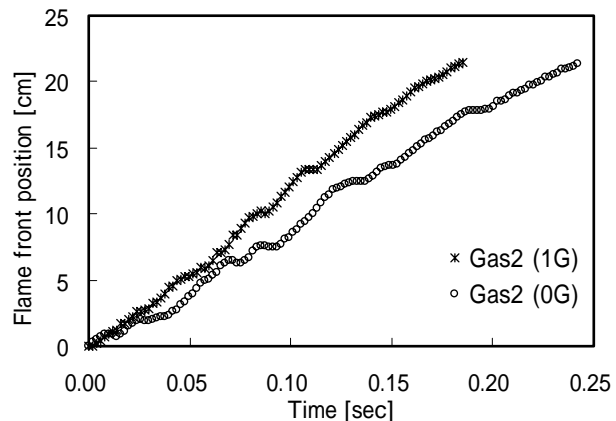


図 16 火炎先端位置の時間変動 (Gas2)

進めることが研究に適している。

このように、燃焼現象の中には、短時間微小重力実験を繰り返し実施し、その中から軌道上実験のような長時間微小重力実験への展開して行くべき課題と、短時間微小重力実験のみである程度の成果が期待できるものの両者が存在している。この点を見極め、研究課題により最も適した設備を選択して実施できる状況が望ましいと考える。

5. まとめ

燃焼現象は局所的な発熱と密度変化を伴う現象であり、重力に起因する自然対流に大きな影響を受ける。このため、自然対流以外の要因による物質や熱の移動現象を精密に把握するには、微小重力環境の利用が本質的な役割を果たす。このため、燃焼分野には微小重力環境の利用が効果的な研究対象が数多く存在しており、その中のかなりの割合は十分に解明がなされないまま残されている課題となっている。これら研究課題に対し、初期の試行錯誤の段階を担う実験施設の一つとして新たに設置された 50m 級の落下塔の紹介を行った。

また、微小重力燃焼研究の例として、宇宙火災安全性に対し重要となる電気配線の短絡による着火現象、および予混合火炎の振動伝播現象について紹介した。とくに、前者については短時間微小重力実験の繰り返しの結果から、最終的には長時間微小重力実験への展開が望まれる課題であることを述べた。

なお、本稿で紹介した微小重力実験に関わる部分は、(財)日本宇宙フォーラムの宇宙環境利用に関する公募地上研究の一部として実施されたものである。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] http://history.nasa.gov/Vision_For_Space_Exploration.pdf
- [2] <http://history.nasa.gov/sepbudgetchart.pdf>
- [3] 藤田 修、日本マイクロ重力応用学会誌 Vol.20, No.4, 2003, pp286-291.
- [4] Law, C. K. and Faeth, G. M., Prog. Energy Combust. Sci. 20:65–113 (1994).
- [5] Ronny, P.D., Proc. the Combustion Institute, Vole 27, The Combustion Institute,(1998), pp. 2485–2506.
- [6] Kono, M., et al., Proc. the Combustion Institute, Vol.26, The Combustion Institute, (1996), pp. 1189–1199.
- [7] Ross, H.D. Edition, Microgravity Combustion –Fire in Free Fall-, Academic Press (2002).
- [8] 例えば Kumagai, S, Isoda, H., Proc. Combustion Institute, Vol.5, The Combustion Institute,, pp.129-132.
- [9] 例えば Olson, S.L., Combust.Sci.Techonol.,76,(1990), 233-249.
- [10] 例えば Guo, H., Ju, Y., Maruta, K., Niioka, T., and Liu, F., Combust. Flame 109, (1997), pp.639–646.

- [11]例えば Urban, D.L., et al., AIAA J. 36,(1998),pp.1346-1360.
- [12]Fujita,O., Nishizawa, K., and Ito, K., Proc. Combustion Institute Vol.29, The Combustion Institute, (2002), pp.2545-2552.
- [13]藤田 修、平成 15 年度 宇宙環境利用の展望 - 第 5 章 - 、宇宙環境利用推進センター(2004).
あるいは、<http://www.jaros.or.jp/>
- [14]槌本真和，興津彰宏，藤田 修，伊東弘行，中村祐二,日本機械学会論文集 B、Vol.73, No.727(2007-3), (印刷中).