

## 第5章 微小重力環境を利用した宇宙火災安全性研究

北海道大学 藤田 修

### 1. はじめに

2004 年は、米国のブッシュ大統領による壮大な「新宇宙計画」に関する声明から始まった。この計画は、国際宇宙ステーション (ISS) の完成後、有人月面基地を築き、ここをベースとして、有人火星探査へ歩を進めて行こうとするものである。この計画には、膨大な予算が必要とされ実現性を疑問視する向きもあるが、月面は重力が地球の  $1/6$  であり、月面で得られる種々の原料とエネルギーを用いて有人活動を維持できれば、人類の活動範囲は飛躍的に拡大できる。

また、2003 年 10 月には、中国が神舟 5 号により有人宇宙飛行を成功させたことは記憶に新しい。中国も、次の目標は 2010 年を目処に有人月面探査を行う計画を示唆している。国際的に、宇宙開発は予算の逼迫から厳しい情勢であるが、その中でも有人ミッションは、より遠くへ、またより長期化する方向に向かっている。

有人宇宙ミッションにおいて、最も重要な課題はクルーの安全の確保である。その中でも、ミッションが長期化した場合、宇宙船内における火災安全の確保は極めて重要な課題の一つとなる。アポロ 1 号の火災事故以来、NASA は船内火災安全性向上を進め、当時 100% であった船内酸素濃度が現在では地上と同じ 21% まで低下している。また、船内で使用される種々の材料も一定の火災安全基準に合格したものに制限されている。

それにも関わらず宇宙船内での小火はたびたび生じており、スペースシャトルでは小さなものを含めて 6 回、また、ロシア宇宙ステーションサリュート、ミールでは計 3 度の火災事故が報告されている。これらは、いずれもクルーの適切な対応により大事を逃れているが、現在建設中の ISS のように規模が大きくなると火災への早期対応が難しくなり、大きな被害が発生する可能性は否めない。

上でも述べたように、宇宙船で使用される材料は、火災安全の観点から一定の試験基準を通過したものでなければならない。具体的な試験方法の例は次節で述べるが、ここで問題は、その試験自体が地上で行われていることである。これは、地上のほうが宇宙 (微小重力場) よりも材料の燃焼性が高く、地上試験を通過していれば安全性を確保できることを前提としている。確かに、微小重力場では自然対流がなく、燃焼場への酸化剤供給が滞るため燃焼が抑制される。しかし、すべての場合に燃焼は抑制されるのであろうか。この点に答えを出すためには、微小重力場での燃焼現象のメカニズムを十分に理解し、重力の低下が燃焼に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

火災安全に関しては、固体の燃焼現象が最も関わりが深く、このために米国を中心として多くの微小重力場における固体燃焼の研究がなされている。また、固体の燃焼は他の燃

焼現象にくらべ時間スケールが長いことから、多くの ISS 実験が計画されている。著者らも、大型落下塔(JAMIC, MGLAB)あるいはパラボリックフライト(DAS, NASA-KC135)などを用いて微小重力場における固体の着火、燃え広がり、さらには消火ガスの輸送などに関する研究を実施してきたほか、宇宙火災の主要因が電気火災であることを考慮した電線被覆の燃焼に関する ISS 実験計画を有している。本報告では、米国の ISS 実験を中心に火災安全に関する固体燃焼研究の動向を紹介するとともに、著者らのこれまで実施してきた固体燃焼に関する研究および今後予定されている ISS 利用実験計画の紹介などを行う。

## 2. 微小重力場における火災安全基準と固体燃焼研究の動向

前述のように、固体の火災安全判定試験は、地上での実施が基本となっている。例えば、電線被覆の燃焼性に関する NASA の判定基準 (NASA NHB 8060.1C, 1991.4) では、図 1 に示すように、鉛直方向から 15 度傾けて張った電線の下方に所定のイグナイターで火を着け、その後電線の表面を 6 in(15cm)以上火炎が燃え広がらないこと、および滴下した溶融被覆材が下に置かれた可燃材料(紙)に着火させないこと、が条件となっている。また、実験の際、電線に過電流を流し、被覆の温度を 125 にすることなどが規定されている。

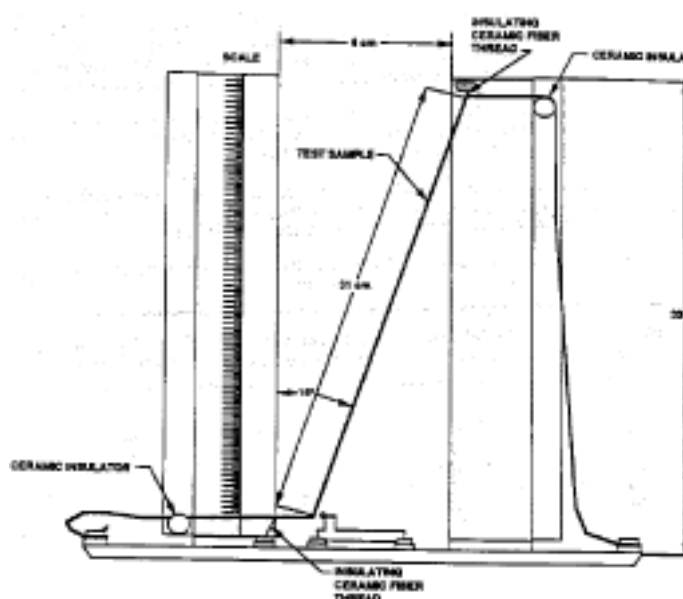


図 1 NASA NHB8060.1C による電線の火災安全確認試験法

また、紙やフィルム等に関しては、幅約 5cm、長さ約 30cm の短冊状の試料を垂直に立て、その下端に着火しその後の燃え広がりが 15cm 以下になることが要求されている。

序論でも述べたように、これらの試験法により宇宙船内の火災安全性を評価するには、宇宙船内の環境が地上よりも材料の燃焼性が低くなるという前提が必要であるが、この点については現時点で確認されているとは言えない。例えば、電線被覆が溶融した場合、地上では重力の作用により滴下するが、微小重力場では溶融液は常に電線上に付着し、燃え尽きるまで燃焼が継続する。周囲の流れに関しても、自然対流で発生する流れは新鮮な空気を供給する一方で試料を冷却する効果もある。従って、火災安全性の評価を地上試験に基づいて行うのであれば、微小重力場での固体の燃焼機構を知り、重力の低下が固体の燃焼性に与える影響を明らかにしておくことが必要なのである。

このような観点から、米国 NASA においては多くの固体燃焼に関するテーマが地上公募研究として採択されており、また、その中から長時間の微小重力期間を要するものについては、国際宇宙ステーション (ISS) 実験テーマとして研究が進められている。固体燃焼に関して ISS で実施が予定されている研究テーマを表 1 にまとめる[1]。

表 1 ISS おける固体燃焼のテーマ(FEANICS: Multi-user Solid Fuel Apparatus)[1]

No.	研究テーマ名	内容
(1)	Solid Inflammability Boundary at Low-Speed (SIBAL)	低速空気流中での固体表面の燃え広がり燃焼継続条件(PI J.T'ien,CWRU)
(2)	Transition from Ignition to flame Growth under External Radiation in 3-D (TIGER-3D)	シート状試料の着火から火炎伝播に移行する過程の観察(PI T.Kashiwagi,NIST)
(3)	Forced Ignition and Spread Test (FIST)	材料の微小重力場における燃焼安全性の確認手法の確立(PI C.F-Pello, UC Berkeley)
(4)	Radiative Enhancement Effects on Flame Spread (REEFS)	火炎伝播現象に及ぼす輻射損失、輻射再吸収影響の明確化(PI P.D.Ronney, USC)
(5)	Analysis of Thermal and Hydrodynamic Instabilities in Near-limit Atmospheres (ATHINA)	低速空気流中で、火炎先端付近に生じる熱 - 物質拡散特性の違いによる不安定現象の理論的研究と理論の実証試験(PI I.Wichman, Michigan State U.)
(6)	Smolder, Transition and Flaming in microgravity ( STaF )	スモールドリング ( 燻焼 ) から火炎発生に至るメカニズムの研究(PI C.F-Pello, UC Berkeley)
(7)	Effect of Material Properties on Wire Flammability in Weak Ventilation of Spacecraft (FireWIRE)	電線被覆の燃焼性に及ぼす試料形状、心線材質、等の影響を調べる。特に幾何形状、心線材質等の影響に注目(PI O.Fujita,Hokkaido U.)

ISS における固体の燃焼は、NASA の居住棟に搭載される燃焼実験モジュール ( CIR: Combustion Integration Rack ) に組み込まれる固体燃焼実験装置 ( FEANICS と呼ばれる共通固体燃焼実験装置 ) により実施される。現時点で表 1 の(1)~(6)の実験が米国実験として予定されているほか、著者らが提案している(7)の電線被覆の燃焼に関するテーマが国際公募研究テーマとして準備が進められている。以下に、(1)~(6)のテーマを概説する。

固体燃焼の研究は、着火、火炎伝播への遷移過程、定常燃焼性、などが主なものである。表 1 中、(1)(SIBAL)は、固体材料の可燃範囲を求めようとするものである。固体燃焼の可燃性は一般に限界酸素指数 ( LOI: Low Oxygen Index ) すなわち定常燃焼を維持できる最低の酸素濃度により評価される。LOI が小さいほど、燃焼性が高く火災のリスクが増加することを意味している。図 2 は、数値計算により、薄いシート状材料が火炎伝播を維持できる最低の酸素濃度を周囲空気流速 ( この場合は、燃え広がり方向と空気流が同方向 ) に対して求めたものである[2,3]。この図に見られるように、最低の酸素濃度は明らかに周囲空気流速に依存しており、流速が 5-10cm/s の領域で最も低酸素濃度条件で燃焼し、LOI が

この流速条件付近に存在していることがわかる。通常重力場では、自然対流の効果が大きく、常に大きな周囲流速が存在することになるので、ここに示す結果は、重力の消失により周囲流速が低下すると地上に比べ燃焼性の高くなることを示している。言い換えると、地上で定める LOI は、微小重力場での LOI より大きくなる可能性を示している。しかし、図 2 に対応するデータを実験的に求めることは容易ではない。なぜなら、通常重力場では、自然対流の影響が大きく、低速周囲空気流中での実験が困難だからである。さらに、可燃範囲を求める実験は、燃焼を維持できる条件と消炎する条件の両方を実施し、可燃限界条件を挟み込んで求めるプロセスが必要になり、膨大な繰り返し実験が必要となるからである。そこで、この研究では、ISS の長時間微小重力環境の特性を活用して、一定流速で燃焼をさせながら徐々に酸素濃度を低下させ、各流速条件に対し消炎の生じる酸素濃度を系統的に求めることを計画している。

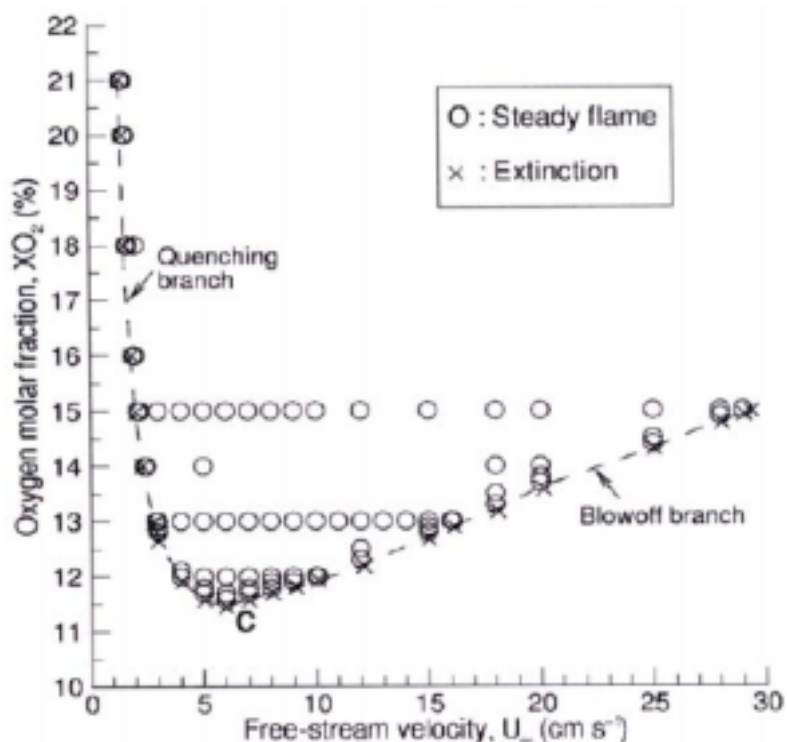


図 2 数値計算により求めた各流速条件での最低の酸素濃度 (薄いシート状固体試料) [2,3]

(2)の実験は、TIGER3D と呼ばれるテーマで、薄い紙の着火から火炎伝播に移行するプロセスを研究しようとするものである。紙に着火した後、火炎伝播に移行するかどうかは、着火時の外部エネルギー供給量や紙の厚さ、酸素濃度などで決定されるが、この伝播へ遷移する条件を知ろうとするのがこの研究の目的である。図 3 は、ISS 実験の予備試験として北海道上砂川町の地下無重力実験センター (JAMIC) において、NIST (National Institute

of Standards and Technology)と北海道大学の共同研究として実施された実験の例である [3,4]。この結果によると、10cm/s 程度の流速では非常に燃焼性が高く、容易に燃焼を継続するが、静止雰囲気では火炎は透明な暗い火炎に移行し、消炎する可能性が示された。また、この実験では火炎の燃え広がり方向と風向きが対抗する形で広がるが、このような燃焼条件では、下流側は上流から流れてきた燃焼ガスにより覆われ、酸素不足により消炎が生じる可能性が示されている。しかし、微小重力時間が 10 秒の範囲では現象が定常には至らず、また周囲空気流速が極めて小さい場合には、消炎の可否が判断できないなどの問題があり、ISS による長時間微小重力実験が必要となっている。

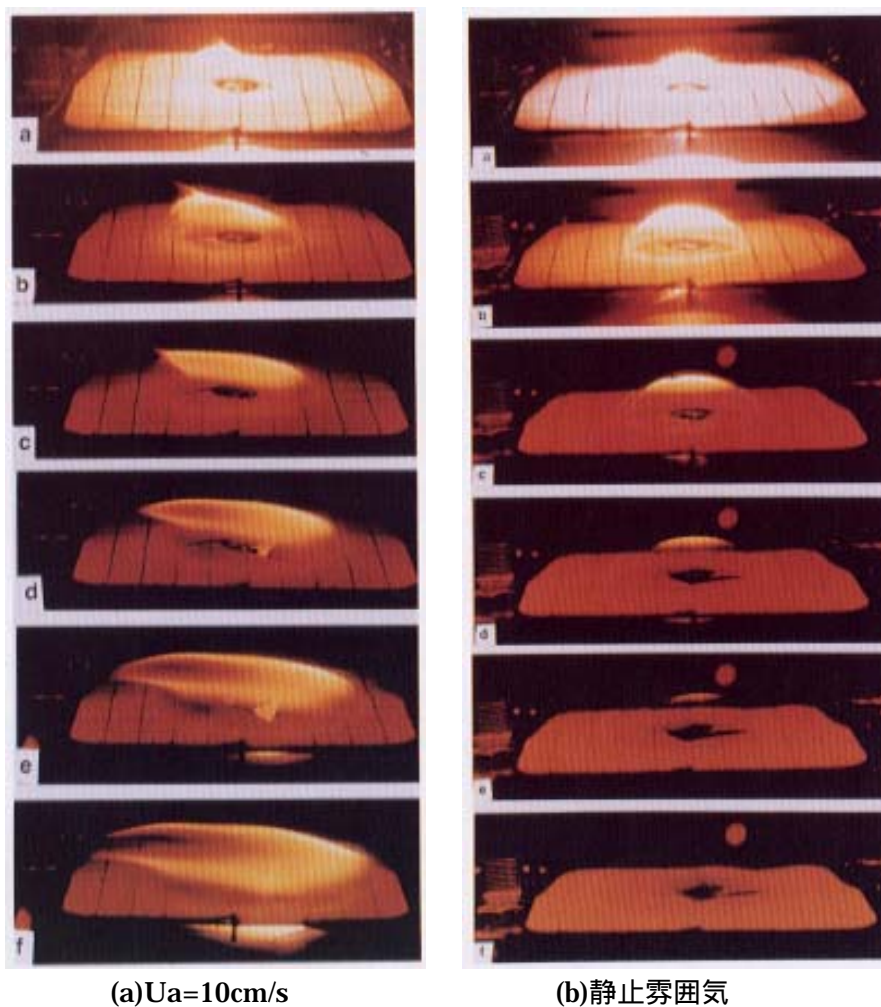


図3 中心に点火された火炎が燃え広がり状態へ移行する過程

(O<sub>2</sub>=35%, 周囲空気は左から右へ流れている、地下無重力実験センターで取得)[4,5]

(3)(FIST)の研究も燃え広がりに関するものである。外部から常時放射加熱が与えられているとき、その放射加熱強度により試料の燃え広がり速度や燃焼下限界がどのように影響を受けるかという研究である。これは、通常は燃焼性の低い材料でも、実際の火災が発生

した場合、火災からの放射熱を受けて燃焼する可能性があり、火災の拡大過程を考える上で重要な研究である。また、(4)(REEFS)の研究は、やはり燃え広がりに関する研究であるが、ここでは周囲に CO<sub>2</sub> などの輻射の吸収性ガスが含まれているときに、固体の燃え広がり特性がどのように変化するかということに関する研究である。再吸収効果が存在すると、微小重力火災特有の輻射消炎が生じにくくなり、火災の燃焼性が増大する結果となるが、この点を平板状の発泡プラスチック材料表面の燃え広がり現象を対象として調べるものである。(5)(ATHINA)の研究は、(2)の TIGER3D と関連の深いテーマである。紙の燃え広がりを 1-2cm/s 程度の極端に低い流速で燃焼させると、炎が消失しいがり燃焼状態で燃焼部前縁が広がっていく。このとき、前縁に不安定化が生じ、人間の指のような形で特定の部分が細長く燃え広がっていく複雑な現象が発生する。このような状態を **Fingering** と呼ぶが、この現象を理論的に解析しようとするのが ATHINA と呼ばれる研究プロジェクトである。(6)(StaF)の研究は、発泡ポリウレタンに外部からゆっくりとした加熱を与え続けると、内部で **Smoldering** と呼ばれる熱分解をともなうゆっくりとした発熱反応が生じ、これが徐々に温度上昇につながり最終的に有炎燃焼へ発展する過程を観察しようとするものである。これは、火災研究では重要なテーマであるが、現象の進行に極めて長時間を必要とするために、従来実施できなかったものである。これを ISS 燃焼実験モジュールを用いて実施しようとするものである。

いずれの研究も、微小重力環境が現象に本質的な影響を与え、先に述べた火災安全の評価に貴重な情報を与えるものである。さらに、これらの研究は、火災の問題だけでなく、それぞれ燃焼科学の立場からも極めて興味深い課題を含んでいる。

最初に述べたように、NASA は、宇宙開発シナリオの中で、当面有人火星探査を大きな目標としている。このために、長期間にわたる有人活動を支援する研究として宇宙船内火災安全性研究は重要と認識されており、現在第 2 優先順位のグループとして宇宙ステーション実験の準備が進められている。

### 3 . 微小重力場における固体の着火現象

#### 3 . 1 着火研究の必要性

この節では、北海道大学において行われている微小重力場における火災安全研究の例を紹介する。火災は、大きく分けると、初期の着火過程、その後伝播および拡大過程、消火過程、からなる。著者らは、このそれぞれに対し、固体の輻射着火現象の解明[6-8]、電線被覆の燃え広がり過程[9-13]、排ガスの回収に関する研究[14]を実施している。本報告では、このうち着火、および燃え広がりに関する研究を紹介する。

火災開始の第 1 段階は、固体材料の着火現象である。着火現象は、被熱領域近傍の化学組成や温度条件に極めて敏感であり、重力の有無で現象そのものが大きく異なる。このため、微小重力場における着火現象を地上実験のみから類推することは難しい。

本研究では、固体着火時の最も基本的な熱輸送形態である輻射加熱による固体の着火機構を微小重力実験に基づいて検討した。輻射加熱による着火の研究[15-18]は従来からいくつか行われているものの、微小重力場で実験的に研究された例はほとんどなく、数値計算に基づく研究が数例見られる程度である。

### 3.2 実験装置および方法

本研究における微小重力実験は、MGLAB、JAMIC、などの落下塔およびDASにおけるパラボリックフライトにより行われている。固体試料として紙(95×56mm)を用い、外部輻射エネルギー源としてCO<sub>2</sub>レーザー光(波長10.6μm)を用いる。燃烧室の様子を図4に示す。試料面と垂直にレーザーを照射し、着火の様子を高速度カメラおよびHi-8ビデオカメラを用いて観察した。また、いくつかの実験はHe-Neレーザー(波長633nm)を用いたMach-Zehnder干渉法により、照射されたレーザー光の中心を原点としてレーザーの照射方向(z方向)およびレーザー光と垂直方向(r方向)へのガス拡散や、z方向への温度変化の様子を観察した。

### 3.3 実験結果の例

図5に酸素濃度30%、窒素バランス、レーザー出力5.0W(ピーク値8.0W/cm<sup>2</sup>、半値幅6.0mmのガウス分布)、ビーム直径10.5mmの場合における、微小重力環境下での紙の加熱、着火の様子を試料上方から高速度カメラにより撮影した結果を示す。ガイド光により明るく照らされているのが試料部であり(a)、レーザーは図では上方から照射されている。

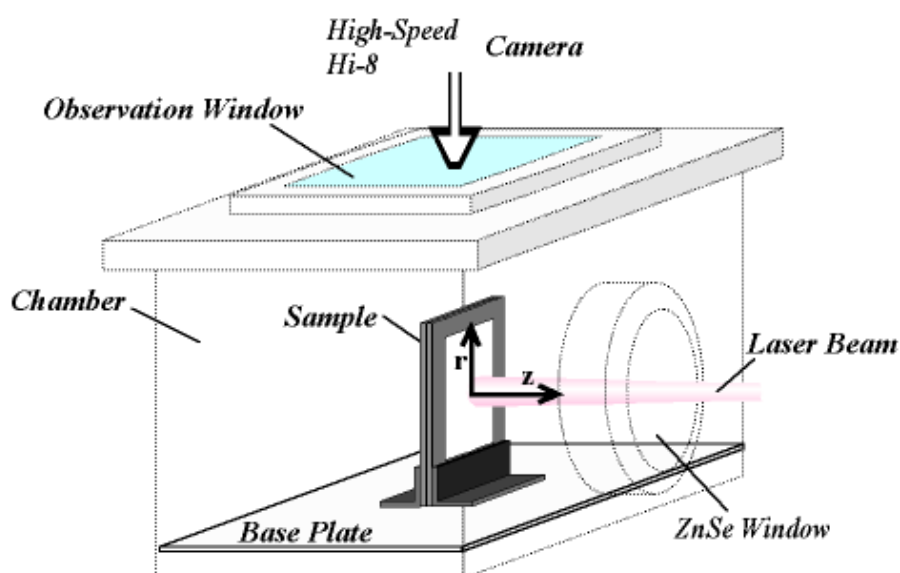


図4 燃烧室概要

試料はレーザ加熱により熱分解し、生成した可燃ガスが拡散していき(b)、その先端付近で発光(図中矢印)を伴う着火(c)に至る。ここで注目すべきは、着火の開始位置である。火炎の最初の発光は、(c)に見られるように試料から離れた位置で生じている。つまり、火炎は試料表面から発生するのではなく、そこから離れた気相から開始しているのである。

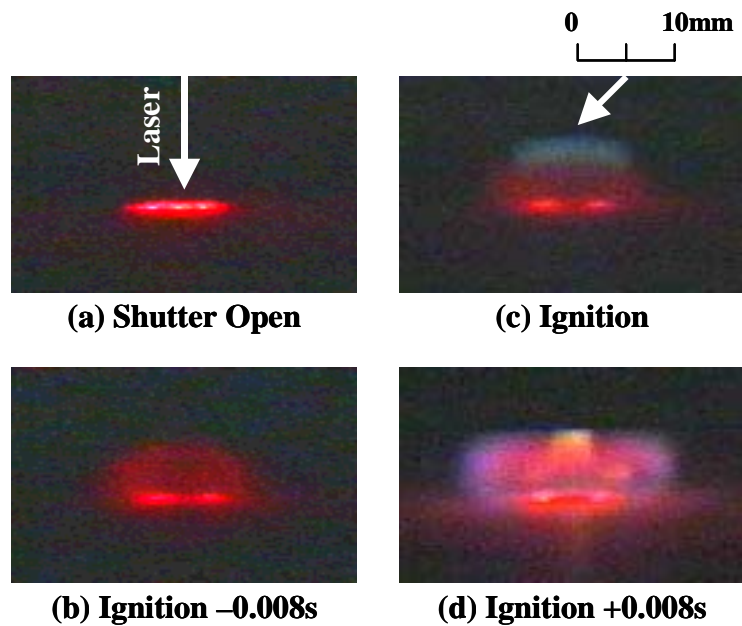


図5 微小重力場におけるろ紙の輻射着火現象の観察

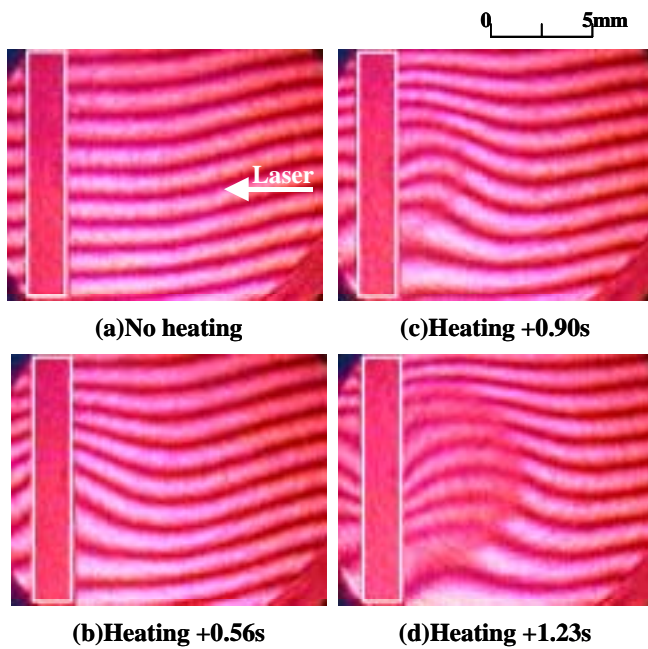
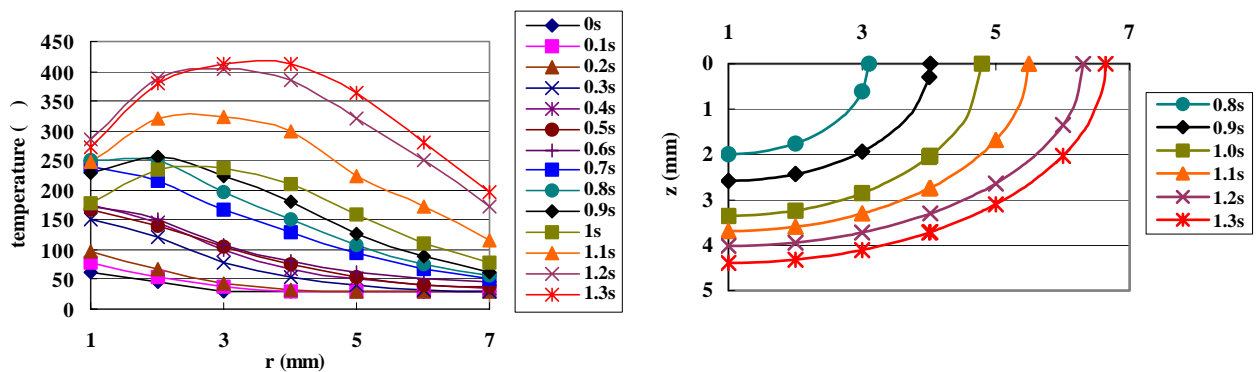


図6 Mach-Zehnder 干渉法による着火位置近傍の密度分布の可視化





(a) 干渉像による温度分布の時間変化

(b) 熱分解ガスの拡散状況

図7 干渉像に基づく温度分布と熱分解ガスの拡散状況予測

図5と同一条件において、Mach-Zehnder干渉法により着火直前の気相の密度変化を可視化した結果を図6に示す。本研究では、気相の密度が減少すると干渉縞が上方に移動するように設定した。図では白線で示した部分が試料であり、レーザーは右方から照射されている。レーザーによる加熱が始まると、最初平行であった干渉縞が試料表面付近から上昇し始め(b)、やがて熱分解により発生したガスが拡散していく様子がわかる(c)(d)。また、これから求めた気相の温度分布の時間変化、及び熱分解ガスの拡散の様子を図7に示す。図7において(a)は加熱中心軸上の気相温度の時間変化を表しており、(b)は目視で観察される熱分解ガス拡散の時間変化を表している。この結果から、ろ紙がレーザーの加熱により温度上昇し、200 を越えたあたりで熱分解ガスが発生し始めていることがわかる。この熱分解ガスの拡散とともに、レーザーにより直接加熱されている表面よりも、そこから少し離れた気相で温度上昇し、熱分解ガスの拡散とともに気相温度のピーク位置が、右の方に移動していくのがわかる。今回の研究では、測定対象の気体を空気と考えているため、熱分解ガス発生直後の試料のごく近傍では、熱分解ガスの密度の違いにより干渉縞は少なからず影響を受けている。しかし、その影響を考慮しても、この気相における温度上昇は試料表面と比べ十分大きく、気相では試料表面からの熱伝導による温度上昇だけでなく、何らかの自発的な発熱があることがわかる。

この気相の発熱要因として考えられるのは、気相における酸化反応およびレーザー光の気相吸収である。すなわち、固体の輻射着火現象は、固体表面より少し離れた位置で熱分解ガスが周囲と混合し可燃混合気を形成し、ここで発熱を伴う酸化反応が進行し、最終的に発火に至る。この際、輻射光の気相吸収がこの気相反応を増強する形で影響を及ぼしている。このような着火現象の概念を模式的に示すと図8のようになる。この気相で温度上昇が生じ、直接加熱を受けている固体試料表面から離れた位置で着火が開始する機構は、文献[5]に詳しく述べられている。

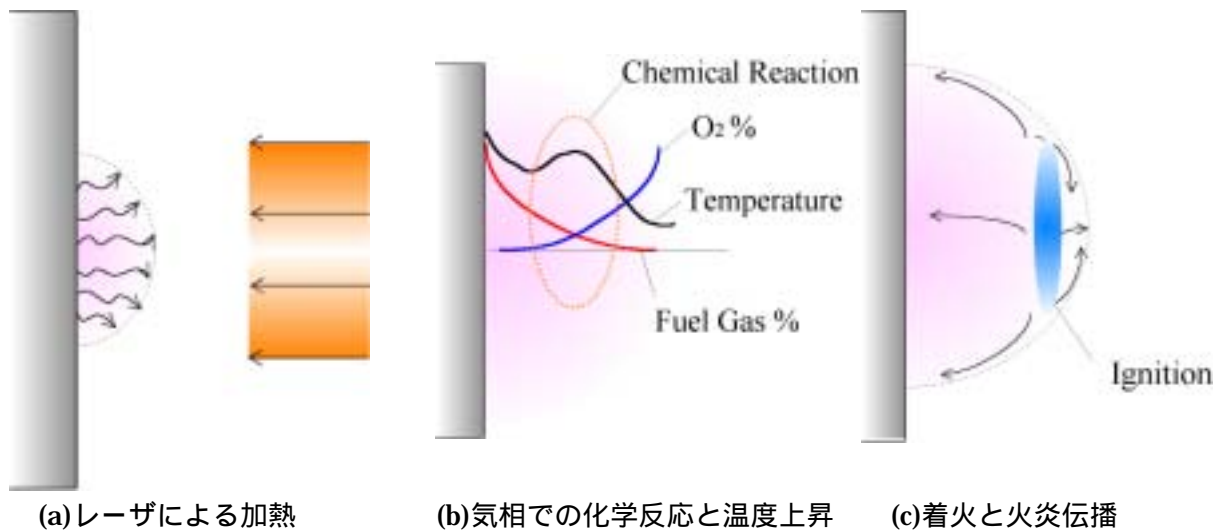


図8 固体試料の輻射型着火のメカニズム

この研究では、さらに外部放射の波長影響や照射角度、さらには照射エネルギーと照射面積の影響などを調べている。また、これらの結果を数値計算と比較することで、従来確定することが難しかった固体の熱分解速度、気相の吸収係数、気相の化学反応速度、などを与えることが微小重力実験により可能である。微小重力実験は、現象が単純化されるため、数値計算と合わせ込みが容易で、このように従来求めることができなかった諸物性値や定数を実験との比較から求めることができることが大きな特徴である。

#### 4. 微小重力場における電線被覆上火災燃え広がり

##### 4.1 電線被覆燃焼の必要性

宇宙機器においては極めて多くの電気配線が用いられており、その燃焼は宇宙機器における最も可能性の高い火災要因である。電線の宇宙用材料としての火災安全基準は、2節で示したように地上における燃焼性試験に基づき与えられる。ここで重要な点は、微小重力場での燃焼性が地上における燃焼性より低いかどうかの判断である。微小重力場での燃焼性の方が高いのであれば、地上試験による判断は危険ということになる。

そこで、本研究では微小重力環境を用いて周囲空気流速影響[9,10]、不活性ガス組成の影響[11,12]、心線材質の影響[13]などを調べた。周囲流速影響は、地上の条件から徐々に重力の影響を取り除いて行った時に燃焼性がどのように変化するか、という点に答えを与えるものであり、不活性ガス影響は宇宙船内の消火ガスの選択に関する基礎データとなる。また、心線の存在は電線に特徴的なものであり、この影響を知ることは電線の火災安全性の検討には不可欠である。

さらに、本研究は表1(7)に示されるように、国際宇宙ステーション国際公募採択テ-

マとなっており、その概略についても本節で述べる。

#### 4.2 実験装置

図9は、実験で使用した燃焼用ダクトの概略である。ダクトの前後に整流部を設け、左端からファンで空気を吸い出すことにより、ダクト内に一様空気流が形成される。ダクトの中央部にサンプルである電線を固定し、その左端にカンタル線コイルで着火する。その後、火炎は流れに対向する形で燃え広がっていく。このときの様子を、ビデオカメラ等で撮影し、燃え広がり速度を求める。使用した試料は、ETFE (Ethylene- tetrafluoroethylene) 被覆の AWG28 ワイヤー(外径 0.62mm, 心線径 0.32mm)およびポリエチレン被覆導線#2 (外径 0.8mm,心線径 0.5mm)である。本装置を用いて、地下無重力実験センターおよび NASA KC135 航空機により微小重力実験を実施した[10]。

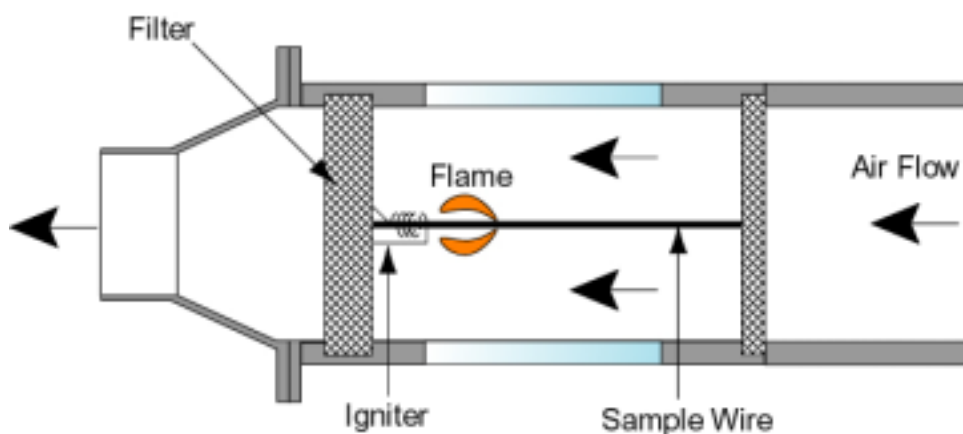


図9 使用した実験装置の概略（左端着火、火炎は流れに対向して燃え広がる）

#### 4.3 周囲空気流速が燃え広がり現象に及ぼす影響

図10に、微小重力場において電線上を燃え広がる火炎の写真の例を示す。この実験においては、流速 5cm/s 程度の空気を右から左に向かって与えており、火炎はそれに対向する形で右方向へ燃え広がっている。火炎は、着火直後少しの期間擾乱が見られるが、時間の経過とともに安定した球形に近い形状を示す。また、火炎の体積が微小重力時間の継続とともに徐々に増加し、地上火炎に比べかなり大きくなる。また、火炎内部に溶融した被覆材が楕円形状で溜まっており、これが滴下することなくすべて電線上で燃焼する。また、微小重力火炎の特徴



図10 微小重力場において電線被覆を燃え広がる火炎（周囲流速 5.2cm/s, 酸素濃度 21%, 被覆材ポリエチレン）

として、火炎中に高濃度のすすが発生し、火炎からの放射強度が大きくなる。一般に、微小重力場では火炎への酸素供給が抑制され燃焼が生じにくくなるとされているが、わずかな空気流速を与えると一転して、このように高い燃焼性を示す。

燃焼性の代表的な判断基準は、試料表面の燃え広がり速度である。図 11 は、3種類の酸素濃度条件における電線上の燃え広がり速度を周囲空気流に対して示したものである。この結果から、電線の燃え広がり速度は低空気流速条件において極大値を持つことがわかった。しかも、その極大値は地上における電線の燃え広がり速度（図 11 の流速の速い条件に相当）よりも大きくなる。この極大値が現れる流速条件は 5 ~ 10cm/s 程度の船内換気流に相当する値であり、微小重力場のほうが燃焼性の高くなる条件が存在していることが示された。

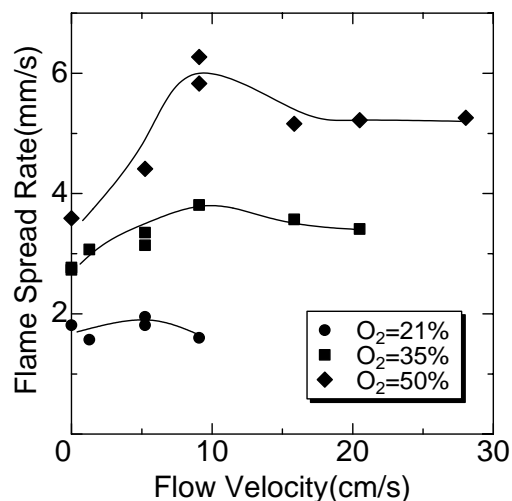
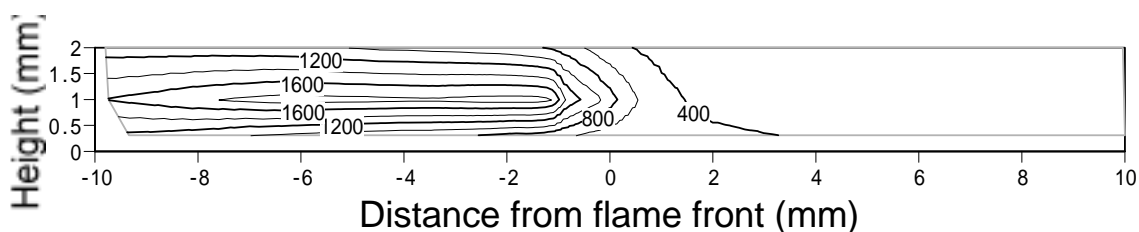
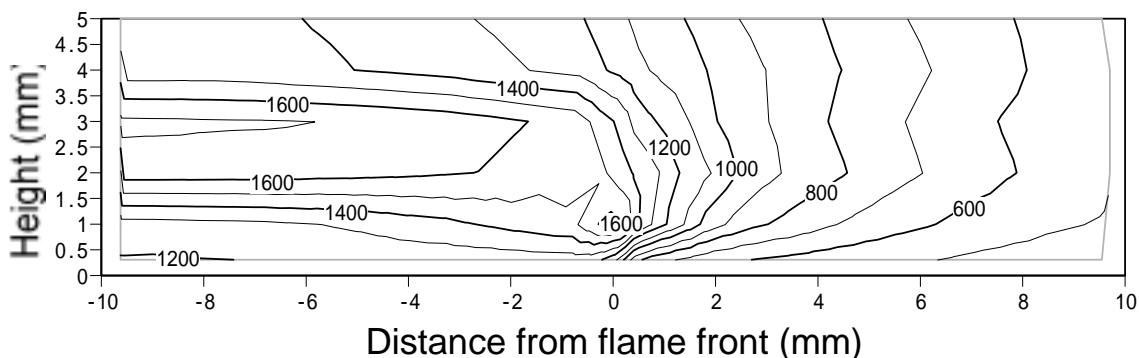


図 11 燃え広がり速度と周囲空気流速の関係(酸素濃度 35%,心線径 0.5mm,電線外径 0.8mm の場合)



(a) Normal gravity



(b) Microgravity

図 12 通常重力場および微小重力場における火炎近傍の温度分布の比較 (O<sub>2</sub>=40%, N<sub>2</sub> balance、火炎前縁を座標の 0 としている)。

先に示した図2の場合にも、LOI が低空気流速条件でにおいて与えられることが示されており、微小重力環境で低速の換気流程度の条件は、最も燃焼性の高くなる条件であることがわかる。特に、電線のような円筒形状試料においては、低速流条件での輻射熱損失に伴う火炎温度の低下が生じにくくなるいわゆる“幾何形状効果” [9]が現れ、微小重力場における燃焼性が高くなる可能性がある。

微小重力場において、固体試料の燃焼性が高くなる要因として最も重要な点は、火炎前方に広く広がる予熱領域の存在である。図12は、電線被覆を通常重力場において下方に燃え広がらせた場合と、微小重力場の静止雰囲気において燃え広がらせた場合の火炎前方の温度分布の比較を行った結果である。通常重力場においては、自然対流の効果により強い流れが発生し、温度分布は極めて狭い領域に限定されているのに対し、微小重力場では火炎前方のかなり広い領域に温度分布が広がっている。この結果、火炎前方の未燃焼試料の予熱が容易に進み、燃え広がり速度が大きくなる。

#### 4.4 雰囲気不活性ガスが燃え広がり現象に及ぼす影響

さらに、微小重力場で興味深い現象は、燃焼に及ぼすCO<sub>2</sub>ガスの影響である。図13は、異なる不活性ガス雰囲気中でETFE（テフロン系の被覆材）電線を静止雰囲気中で燃焼させ、その時の燃え広がり速度を微小重力場（ $V_{f0G}$ ）と通常重力場（ $V_{f1G}$ ）で比較したものである[11,12]。図において、いずれの不活性ガスにおいても、微小重力場のほうが燃え広がり速度の大きくなる条件が存在しているが、とくにCO<sub>2</sub>ガス雰囲気では微小重力場での燃え広がり速度の増大割合が大きい。

CO<sub>2</sub>ガスは、地球温暖化ガスとしても知られるように、火炎からの放射熱を吸収する。このため、火炎周囲にCO<sub>2</sub>ガスが存在していると、火炎からの放射熱が再吸収され火炎温度が下がりにくくなる。この効果は、火炎付近の流動が生じにくい微小重力場においてより顕著となり、結果的にCO<sub>2</sub>を混入した雰囲気では微小重力場のほうが燃焼性が高くなる。ISSでは火災時の消火ガスとしてCO<sub>2</sub>が利用されており、火災安全性の点から、ここで観察された現象は極めて興味深い結果である。

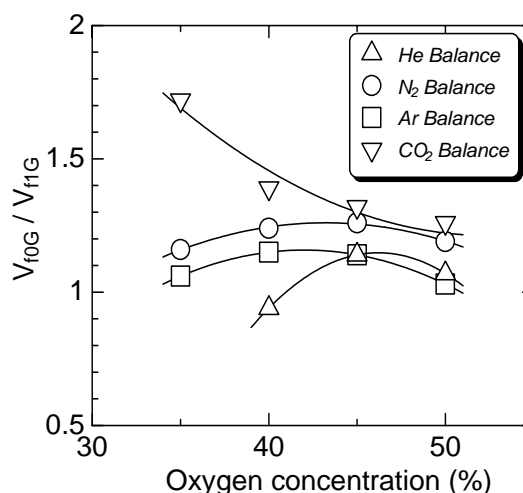


図13 微小重力場と通常重力場下方燃え広がり速度の比較（試料  $V_{f0G}/V_{f1G}>1$  は、微小重力場のほうが燃え広がり速度が大きくなることを示している、試料はETFE被覆のAWG28の電線）

#### 4.5 心線材質の影響

心線材質の影響は、電線に特有のものであり、地上においてはすでにいくつかの研究が行われている[19]。しかし、微小重力場においては、実験機会の制約などからこの影響について観察された例はほとんどない。

従来の地上における研究では、心線の熱伝導率が高いほど燃え広がり速度が大きくなることが知られている。本節では、微小重力場においても同様な傾向が現れるかどうかを実験的に検討した結果を紹介する。

図14は、心線材質を銅線の場合とニクロム線の場合で比較した結果である。

この場合、周囲流速は与えていない。被覆はポリエチレンであり、心線材質を除けば、太さや被覆厚さは全く同じである。図を見てわかるように、通常重力場でのデータは、いずれの酸素濃度条件においても従来の地上研究[19]と同様、銅心線のほうが燃え広がり速度が大きくなっている。一方、微小重力場においては、酸素濃度条件により、銅心線のほうが燃え広がり速度が大きくなる場合(O<sub>2</sub>=35%)とニクロム心線のほうが大きくなる場合(O<sub>2</sub>=21%)の存在していることがわかる。さらに、地上と微小重力場を比較すると銅心線の場合は常に通常重力場の方が大きくなっているのに対し、ニクロム線の場合は酸素濃度 21%の時に微小重力場と通常重力場の差がほとんどなくなることがわかる。このように心線材質の影響の現れ方が、地上と微小重力場では異なる。この現象が現れる機構には、微小重力場特有の輻射熱損失の増大による火炎温度の低下が重要な役割を果たしている。すなわち、通常は火炎内側にある心線が火炎から熱を受けて温度上昇し、これが心線を通して未燃焼の予熱領域に輸送されるため、熱伝導率の高い試料の燃え広がり速度が大きくなるが、火炎温度が低下すると、心線が炎から受ける熱が少なくなり、この結果心線を通して予熱領域へ輸送される熱量よりも予熱領域からさらに前方の冷たい領域へ失われる熱量の方が大きくなり、結果として熱伝導率の大きい試料のほうが燃え広がり速度が小さくなる[12]。

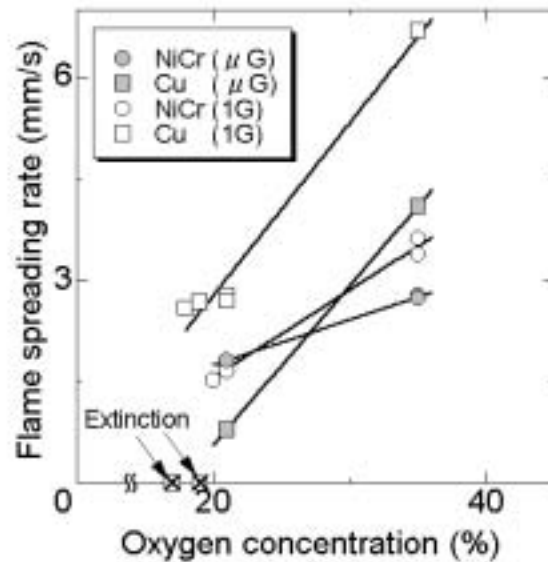


図14 火炎燃え広がり速度に及ぼす心線材質の影響

これまで述べてきたように、電線の燃焼に関して微小重力場における燃焼挙動は、通常

重力場における挙動とは異なり、条件によっては微小重力場のほうが燃焼性が高くなる場合のあることが示された。このことから、宇宙火災安全性を検討する上では、さらに微小重力場での燃焼現象の理解を深めていく必要がある。

#### 4.6 ISSにおける電線被覆の燃焼研究

上記のような研究を行う過程で、酸素濃度が低い場合や試料径が太い場合など、多くの条件において、現象の時間スケールが長く地上の手段ではデータ取得が難しいことがわかってきた。比較的定常に達する時間が早いと見られる図10の条件においても、詳細に観察すると、制動直前(微小重力期間約10秒)でも火炎の直径がわずかながら変化しており、火炎の明るさも変化している。今後、実験データを基に、電線燃え広がり の精密な数値モデルを構築していくためには、正確な燃え広がり速度と火炎形状を知ることが不可欠であり、より長時間の微小重力実験が望まれる。

そこで、NASA、EASA、NASDA(当時)などが行った、ISSの各国設備を相互有効利用することを目的とした第1回微小重力科学国際公募[20]へ本研究(テーマ名「Effect of Material Properties on Wire Flammability in Weak Ventilation of Spacecraft (略称 FireWIRE)」を提案したところ、幸運にも採択された。この提案では、周囲空気流速を与えた条件で、電線の形状(太さ、被覆厚さ等)や心線材質を変化させ、定常的な

火炎燃え広がり速度や火炎形状、火炎の放射特性などを取得し、数値シミュレーションとの比較を行う。図15は、実験で使用予定の米国燃焼実験モジュール

(CIR、エンジニアリングモデル)の写真である。実験の実施時期は当初2007年頃の予定であったが、昨年2月のコロンビア号の事故により当初予定より遅れる見込みである。



図15 米国燃焼実験モジュール  
(中央部にみえるリング状のハンドルを手前に引くと燃焼室が引き出される。上側に燃焼用ポンプ、下方にデータ収録用のインターフェースが見える。)

## 5. 地上火災安全研究への展開

微小重力場における燃焼研究は、宇宙火災安全の観点から重要であることは言うまでもないが、それに加え、地上の諸問題に対して如何に貢献していくかという点は極めて重要である。

特に 2003 年は、産業現場や身近な生活環境での大規模な火災災害が多数発生しており、多くの人命が失われ、また甚大な経済的損失を引き起こしている。中でも、2003 年 2 月に発生した韓国大邱（テグ）で生じた地下鉄火災（図 16）は 200 名近い死者を出した大惨事であった。この火災では図 17 に示すように着火、延焼拡大、隣接車輦への飛び火、その後の煙等による被害の拡大過程、などを経て大惨事となったと考えられる。地下空間で発生する火災は、周囲が囲われた空間での現象であるため、この図に示す個々のプロセスに浮力が大きな影響を及ぼしており、このそれぞれの過程での火災と浮力の相互関係を理解することは重要である。

微小重力研究の最も優れた点は、外乱の無い単純化された系での現象の観察が可能になることである。例えば、先に述べた周囲流速の影響を純粋に観察することは、地上では自然対流の影響により極めて難しい。しかし、微小重力場の利用により、外乱のない状態での現象理解を行うことができれば、それに浮力効果を重ねることで重力場での現象を理解することができる。

## 6. まとめ

有人宇宙活動の長期化にともなって、宇宙船内での火災安全性はますます重要な課題となっている。本報告では、宇宙火災安全性に関する中心的な研究対象である微小重力場における固体燃焼の研究動向をまとめた。米国では、歴史的に多くの火災安全に関する研究が行われており、現在でも国際宇宙ステーションフライト実験テーマを中心に研究が進め



図 16 2003 年 2 月に韓国テグで発生した地下鉄火災（MAINICHI Interactive 写真特集 2003.2.19 より）

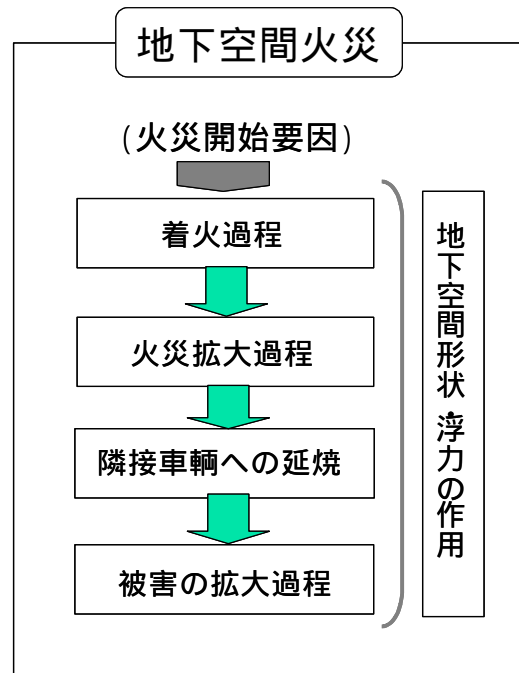


図 17 地下鉄火災の過程と浮力の介在



られている。我が国においても、地下無重力実験センターおよび日本無重量総合研究所の開設を契機として多くの固体燃焼研究が進められている。これらの研究を通して指摘されている点として、材料の燃焼性は、微小重力場で低速空気流の存在する場合に最も高くなることが挙げられ、火災安全性を地上実験に基づいて行う場合にはこの点を考慮したうえで判断することが重要と言える。このためには、微小重力場で燃焼性が増大する効果を数値モデルで表現するなど、さらに現象の理解を深めていく必要がある。また、同時に宇宙火災安全に関する研究は、地上の火災に対しても燃焼現象に対する浮力の効果を基礎的な面から与えるものであり、今後地上の火災抑制への貢献という面も極めて重要と考えられる。

## 参考文献

- [1] <http://microgravity.grc.nasa.gov/feanics/about.html>
- [2] Ferkul, P. V. and T'ien, J. S.: A Model of Low-Speed Concurrent Flow Flame Spread Over a Thin Fuel. *Combustion Science and Technology*, vol. 99, pp. 345-370 (1994).
- [3] T'ien, J. S., Shih, H.-Y., Jiang, C.-B., Ross, H.D., Miller, F.J., Fernandez-Pello, A. C., Torero, J.L., and Walther, D., in: *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*. Ross, H. D. (Ed.), Academic Press, San Diego, pp. 299-418 (2001).
- [4] Kashiwagi, T., Olson, S.L., Fujita, O., Kikuchi, M., and Ito, K., Effects of Slow Wind on Localized Radiative Ignition and Transition on Flame Spread in Microgravity, *Proc. Combustion Institute* Vol.26, (1996-8), pp.1345 -1352.
- [5] Olson, S.L., Kashiwagi, T., Fujita, O., Kikuchi, M., and Ito, K.; "Experimental Observation of Spot Radiative Ignition and Subsequent Three-Dimensional Flame Spread over Thin Cellulose Fuels", *Combustion and Flame*, V.125, pp.852-864, 2001.
- [6] Fujita, O., Takahashi, J. Ito, K., "Experimental Study on Radiative Ignition of Paper Sheet in Microgravity", *Proc. Combustion Institute* Vol.28,(2000), pp. 2761-2768.
- [7] Fujita, O., Takahashi, J., and Ito, K., Experimental Study on Radiative Ignition of Filter Paper with Near Infrared Radiation under Microgravity, *JSME Int.Journal, Series B*, Vol.46, No.4 (2003), pp.625-632.
- [8] 高橋 絢也、藤田 修、伊藤 献一、微小重力下におけるろ紙のふく射着火現象に及ぼす照射波長の影響、*日本機械学会論文集 B 編*, Vol.69, No.683(2003 年 7 月号), pp.1685-1691.
- [9] Fujita, O., Nishizawa, K. and Ito, K., Effect of Low External Flow on Flame Spread over Polyethylene Insulated Wire in Microgravity, *Proc. Combustion Institute* Vol.29,(2002), pp.2545-2552.
- [10] 西澤勝弘、藤田修、伊藤献一、菊池政雄、Sandra L. OLSON, Takashi KASHIWAGI, 微小重力

環境における低速空気流中の ETFE 被覆導線の燃焼挙動, 日本機械学会論文集、(印刷中) (2004).

- [11] Masao KIKUCHI, Osamu FUJITA, Kenichi ITO, Atsuki SATO, and Takashi SAKURAYA, Experimental Study on Flame Spread over Wire Insulation in Microgravity, 27th Symp.(Int.) on Combustion, (1998-8),pp.2507-2514.
- [12] Fujita,O., Kikuchi,M., Ito,K., Nishizawa,K., Effective Mechanisms to Determine Flame Spread Rate Over ETFE Wire Insulation. Discussion on Dilution Gas Effect Based on Temperature Measurements Proc. Combustion Institute Vol.28,(2000), pp. 2905-2912.
- [13]西澤、藤田、伊藤、微小重力環境におけるポリエチレン被覆導線の燃焼現象に及ぼす心線材質の影響、日本機械学会論文集、(投稿中)。
- [14]藤田、伊藤、伊勢、仲西、”磁場による宇宙船内燃焼排ガス回収技術の基礎的検討”,第44回宇宙科学技術連合講演予稿集(2000.10),p.297,(福岡).
- [15]Kashiwagi,T., A radiative ignition model of a solid fuel, *Combust.Sci.Tech.* 8, 225 (1974)
- [16]Kashiwagi,T., Experimental observation of radiative ignition mechanism, *Combust. Flame* 34, 231 (1979)
- [17]Kashiwagi,T., Effect of sample orientation on radiative ignition, *Combust. Flame* 44, 223 (1979)
- [18]Nakamura,Y., Yamashita,H., Takeno,T., Effect of gravity and ambient oxygen on a gas-phase ignition over a heated solid fuel, *Combust. Flame* 1120, 34-48, (2000).
- [19]N. N. Bakhman, L. I. Aldavaev, B. N. Kondrikov, V. A. Filippov, Burning of polymeric coatings on copper wires and glass threads: flame propagation velocity, *Comb. Flame*, 41 (1981) 17-34
- [20] [http://iss.sfo.jaxa.jp/utiliz/collect/mg\\_iao01.html](http://iss.sfo.jaxa.jp/utiliz/collect/mg_iao01.html)