

IIII 特集：航空機の放物線飛行による短時間微小重力実験 I IIII
(解説)

短時間微小重力環境を利用した固体材料の燃焼性に関する研究

藤田 修

Research on Solid Material Flammability by using Short-term Microgravity Facility

Osamu FUJITA

Abstract

The essential role of microgravity experiments for understanding solid material flammability is discussed based on the mechanism to determine limiting oxygen concentration to sustain spreading flame over solid material. Then some examples of significant extension of flammability limit of solid material in microgravity are introduced, which are given by short-term microgravity facilities. The limitation of short-term microgravity tests and necessity of long-term microgravity experiments are also described according to the example of large time scale unsteady phenomena included in the combustion process. At the last part of the present report, ongoing research project including ISS/KIBO experiments to build up a new fire safety standard is introduced.

Keyword(s): Combustion, Fire safety standard, Solid material, Electric wire

1. はじめに

燃焼学の分野においては、微小重力環境利用は依然として重要な研究手段であり、学問分野の先端を切り開くツールとして位置づけられている。微小重力環境を利用した燃焼研究そのものは、1950年代に熊谷らによる液滴燃焼の研究¹⁾が行われて以来極めて長い歴史を有する。一方で、燃焼現象は局所的に急激な温度上昇と密度変化を伴う現象であり、ほとんどの研究対象が重力に影響を受けるため、現在でも数多くの研究課題が残されている。実際に、これから実施予定の宇宙実験が複数存在しており、例えば、ISS きぼう第2期利用課題として、液滴群燃焼実験 (PI 三上真人 (山口大))、気体の燃料の対向流燃焼実験 (PI 丸田薫 (東北大))、固体燃焼実験 (PI 藤田修 (北海道大))、燃料液の分断特性観察実験 (PI 梅村章 (名古屋大)) などの準備が進行中である²⁻⁵⁾。また、これに引き続いて第3期 ISS きぼう利用テーマとして、宇宙火災安全基準に関する研究 (PI 藤田修 (北海道大)) が採択されている。ここでとくに指摘しておきたいのは、これらの研究課題が宇宙実験単独で成立しているわけではない、という点である。むしろ、数多くの地上実験および落下塔・航空機といった短時間微小重力実験の下支えがあって、初めて成立している研究課題といえる。一般に燃焼現象は、実験条件にもよるが、他

の物理現象に比較して時定数の小さい現象が多く、短時間微小重力実験であってもそれなりの科学的成果が得られる。上記の ISS きぼう実験プロジェクトは、これまで多くの短時間微小重力実験を実施したうえで、長時間微小重力実験でなければ実施できない部分を抽出したもの、あるいは、短時間微小重力実験で構築された仮説を長時間微小重力実験により検証しようとするものと言える。

2. 微小重力環境を利用した固体燃焼研究の意義と重要性

固体材料の燃焼研究において最も基礎的な研究課題は、固体表面を燃え広がる火炎の消炎現象である。すなわち、既に存在している火炎がなぜ消えるのか、という根本的な問いである。これに対して、固体材料燃焼の消炎現象は以下の2つの機構により説明される。

1 つ目は周囲流速が極めて大きい時に、火炎が気流の流れによって吹き飛ばされるいわゆる吹き飛び (Blow-off) によるものである。ちょうどロウソクの炎を息で吹き消すような現象である。燃焼現象は酸化剤と燃料の化学反応であり、反応速度が有限の値を持つので、燃焼場に含まれる燃料が燃焼するのに要する時間も有限値であり、これを反応特性時間(τ_c)と定義できる。一方、燃焼が進行している

空間が流れ場におかれた時、燃焼場における燃焼ガスの滞留時間を流体特性時間(τ_p)と定義する。この時、 $\tau_c > \tau_p$ となる条件が与えられると、燃焼が完了する前に燃焼ガスが流れ去り吹き飛びという現象が生じる。このため、ダムケラー数($Da = \tau_p / \tau_c$)は吹き消え条件を判定する重要な指標となり、 Da が大きいほど火炎は安定することになる。一般に反応特性時間は化学反応速度に反比例し、反応速度は酸素濃度とともに大きくなることから、反応特性時間は酸素濃度が增大するほど小さくなる。この結果、酸素濃度が增大すると Da は大きくなり火炎は安定して維持できることになる。一方、酸素濃度が低下し、 $Da < 1$ の条件に至ると吹き飛びが生じることになる。このようにして、周囲流速が与えられた時、吹き飛びが生じる酸素濃度が決まることになる。

2つ目は熱損失による消炎現象(Quenching extinction)である。固体材料の燃焼は、固体の熱分解により放出された可燃性ガスが固体より少し離れた位置で周囲空気と混合し火炎を形成する。この火炎から固体材料への熱循環によって燃焼が継続される。このとき、系の熱損失が発生熱量を上回ると、消炎が生じる。もう少し具体的に述べると、火炎から固体表面へフィードバックされる熱量を Q_f 、固体表面から輻射で周囲へ失われる熱量を Q_r とすると、固体の熱分解に活用される熱量は $Q_f - Q_r$ であり、固体の熱分解が吸熱反応でその反応熱を L とする、単位時間に発生する熱分解ガス量は、 $\dot{m} = (Q_f - Q_r)/L$ となる。この時、この値が臨界値 \dot{m}_c を下回ると消炎が生じる。従って、フィードバック熱量と固体表面からの輻射損失熱量の比 $Q_r/Q_f (= \eta_r)$ が重要な指標となる。一般に燃焼時の固体表面は燃焼状態によらず熱分解温度となっており Q_r は燃焼状態によらず一定に近い値になるのに対し、 Q_f は、酸素濃度および周囲空気流速が減少すると、火炎温度の低下を伴って小さくなる。したがって、周囲流速が小さくなると酸素濃度は大きくならなければ火炎を維持することができない。このような消炎現象は輻射熱損失に支配される系であるため、Radiative extinctionとも呼ばれる。また、このような系は微小重力場でなければ起こりえないことから、Microgravity-regimeと呼ばれることもある。なお、これら2つの消炎機構に関しては、平板状固体試料を対象として詳しい記述が高橋ら⁶⁾によりまとめられている。

このような2つの機構によって決定される消炎限界曲線を概念的に示したのがFig. 1である⁷⁾。周囲流速が早い条件においては、前者の機構で消炎限界が決まるため、流速が小さくなる程低い酸素濃度で消炎が生じる。一方、周囲流速が小さい領域では、流速が大きくなるほどより低酸素濃度で消炎が生じることになる。したがって、最も消炎限界酸素濃度が小さくなるのは両者の機構による消炎限界が一致する点であり、Fig. 1においてFundamental limitと記述されている点である。この値を知ることが固体材料

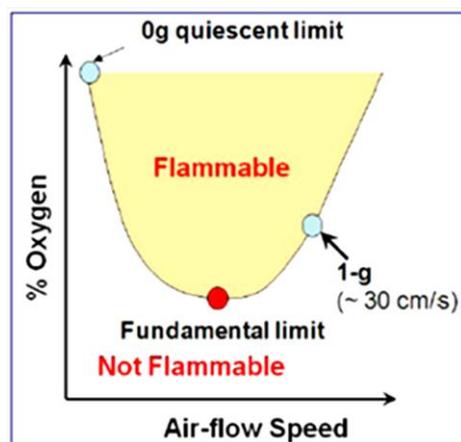


Fig.1 Conceptual description of extinction limit of spreading flame over solid material in opposed flow, described by Ferkul and Olson⁷⁾

の本質的な燃焼限界を理解することに他ならない。

消炎限界の基本特性はこのような機構によって決まるのであるが、通常重力場では自然対流の影響が大きく、強制対流により与えられた流速よりかなり大きな流速が火炎近傍に発生する。固体燃焼により発生する自然対流は試料の寸法にもよるが、多くの場合30cm/sを超える流速となる。したがって、通常重力場における流体特性時間は、強制対流流速により算出される値よりかなり小さくなる。結果として Da も大幅に小さくなり、消炎限界酸素濃度は大きくなる。例えば強制対流を与えない場合でも、通常重力場ではFig. 1中の1-gと記載された点在实际の条件となる。この結果、通常重力場では多くの場合、消炎現象が Da に支配される吹き消え消炎領域となり、消炎限界酸素濃度が流速とともに増加する領域しか現れてこない。この結果、最も消炎限界が低くなる条件は微小重力場でなければ現れず、通常重力条件における実験だけでは本質的に最も燃焼性の高くなる条件を知ることは難しい。

固体材料の消炎限界特性はこのように理解されているのであるが、この極小値がどこに現れるか、また個々の流速条件における消炎限界酸素濃度の絶対値がいくらになるかといった点は、材料の材質、幾何形状、厚さ、不活性ガスの組成、等種々の要因により変化する。これらの条件が変化するなかで、微小重力場での消炎限界の下限を予測可能にすることは、宇宙火災安全の観点からは極めて重要な課題であり、かつチャレンジングな研究課題と言える。

3. 短時間微小重力実験による固体材料燃焼性に関する研究例

3.1 研究成果の例

本節では、著者らが継続して研究を行っている電線被覆の燃焼現象に対して、いくつかの研究成果の例を示す。宇宙船内では、地上で見られる一般的な火災発生要因(例え

ばたばこの火の不始末，調理に起因する火災，火遊び，等）はほとんど考えられず，電気系統に起因する火災が唯一と言って良い火災発生要因である．このため，著者らは電気配線における燃焼現象を扱ってきた．電気配線の燃焼に関しては，おもに電気系統の過電流やショートといった要因による電線被覆の着火現象と着火が生じた後の燃え広がり現象がある．本報告では，後者の燃え広がり現象に限定して研究成果を紹介する．なお，通電着火現象に関しては，文献⁸⁻¹⁰にて報告を行っているのでそちらを参照されたい．

前節でも述べたように，燃え広がり現象に関しては火災の消炎限界が最も基本的なデータの一つである．消炎限界を知ることで，何らかの理由で発生した火災が燃焼を継続するか，あるいは自律的に消炎に至るかを判断できる．また，消火活動を行う際に火災を抑制するうえで酸素濃度をどの程度低下させる必要があるか分かる．Figure 2 は，微小重力場において電線被覆上を燃え広がる火災の写真の例である¹¹．火災は，写真の左から右に向かって燃え広がっており，それに対向する流速 $Ua=5\text{cm/s}$ 程度の空気の流れを与えている．微小重力環境移行後少しの期間火災に擾乱が観察されるが，時間の経過とともに写真のような安定した球形に近い火災が形成される．また，火災の体積が微小重力時間の継続とともに徐々に増加し，地上火災に比べかなり大きくなる．火災内部には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．

この火災に対して，周囲酸素濃度を徐々に低下させ，火災が維持できる下限の酸素濃度を求めた結果¹²を Fig. 3 に示す．微小重力実験手段は，航空機（ダイヤモンドエアサービス：DAS）によるパラボリックフライトである．この図には，心線材質が NiCr に加え，銅の場合の結果についても示している．まず，同一心線材質同士で異なる重力条件の結果を比較すると，いずれの心線材質でも微小重力場の方が消炎限界酸素濃度が低くなっていることが分かる．例え

ば，NiCr 心線の場合，微小重力場のほうがいずれの流速条件でも約 3% 消炎限界酸素濃度が低くなっている．これは，Fig. 1 に概念的に示すように，通常重力場では流速条件によらず消炎限界が Da により決定される領域にあり，微小重力環境へ移行すると自然対流が消失し局所流速が低下することがそのまま消炎限界酸素濃度の低下に繋がった結果と考えられる．また，消炎限界酸素濃度の流速依存性をみると，銅心線の通常重力条件の場合のみ特定流速で極小値を示しているが，他の条件では流速の減少とともに単調減少している．本来，微小重力場では低流速条件で極小値が現れるはずであるが，ここで実験を行った範囲では現れない．低流速条件は僅かな流速変動に対しても敏感に現象が影響を受けるため，パラボリックフライト中の残存重力の影響が現れたものと考えられる．なお，通常重力場の銅心線の場合に，特定の流速条件で極小値が現れているが，銅心線の場合心線の熱伝導率が大きく，自然対流下で熱損失の効果が顕著となり，比較的大きな空気流速においても Quenching Extinction の領域が現れるものと考えられる．

もう一つ航空機実験で取得した実験結果の例を示す．電線は実際の使用条件においては，心線への通電によりジュール熱が発生する．そこで，心線で発生するジュール熱が消炎限界酸素濃度に及ぼす影響を調べた．周囲流速は 15cm/s に固定した．Figure 4 はその結果の例である．消炎限界酸素濃度は，通電量の増加とともに低下し，その低下量は 6W/m の加熱量に対し，1%程度である．また，重力条件による消炎限界を比較するといずれの通電条件でも約 3%程度微小重力場の方が低下しており，通電加熱状態によらず微小重力場の方が燃焼性が高くなることが理解できる．

以上述べてきた結果はいずれも短時間微小重力実験により得られたものであり，微小重力時間に限度があっても固体材料の燃焼性に及ぼす重力影響に対し，十分に貴重な情報を提供してくれる．ここで得られた結果からは，微小重力場においては，通常重力場より燃焼下限酸素濃度が低下，

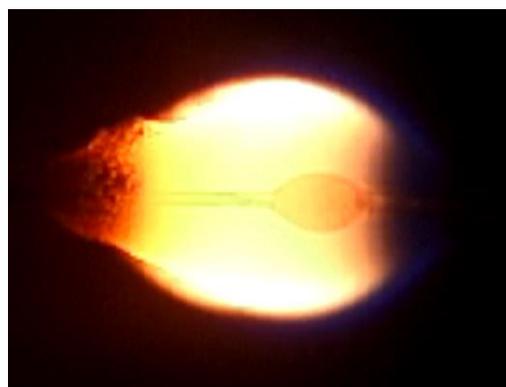


Fig.2 Example of spreading flame over wire insulation in opposed air flow in microgravity. Sample : PE#2 (NiCr) (Outer diameter: 0.8mm, Inner core diameter: 0.5mm, Core: NiCr, Insulation: Polyethylene), $O_2=21\%$, $Ua=5.2\text{cm/s}$.

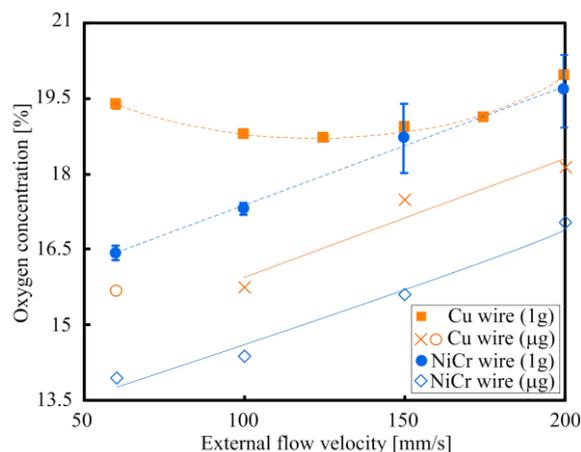


Fig.3 Extinction limit as a function of external flow velocity in 1g and μg for two types of wire core. Sample: PE#2 (NiCr) and PE#2 (Cu)¹².

すなわち、燃焼性が大幅に拡大し、**Fig. 1** に示す **Fundamental limit** が微小重力場においてのみ現れ得ることを示唆している。また、各流速における消炎限界の絶対値、極小値の現れる流速条件等は、心線材質や通電加熱状態等によって変化することがわかり、固体材料の本質的な燃焼性を知る上では、種々の材料の特性値や外的条件の影響を明確にしていくことの重要性が理解できる。

3.2 長時間微小重力実験の必要性

燃焼現象は、現象の進行が比較的早いために航空機や落下塔といった短時間微小重力実験により多くの成果が得られている。しかし、現象が限界条件に極めて近い場合に、短時間実験のみでは研究の遂行が難しい状況に直面する。例えば、真の消炎限界のごく近傍条件において、これが実際に定常的に火炎を維持できる条件であるかどうかを判定するには多くの場合、長時間の連続的な実験が必要となる。とくに現象に内在する非定常性が消炎限界に直接影響を及ぼす場合は、その非定常現象の時間スケールに応じた長時間微小重力実験が不可欠となる。

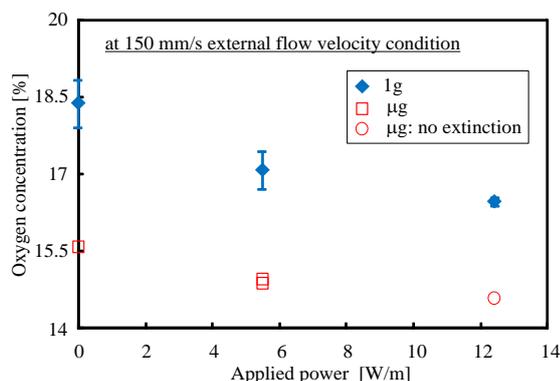


Fig.4 Extinction limits as a function of applying power both in 1g and μg ¹³⁾. Sample: PE#2 (NiCr), $U_a=150$ mm/s.

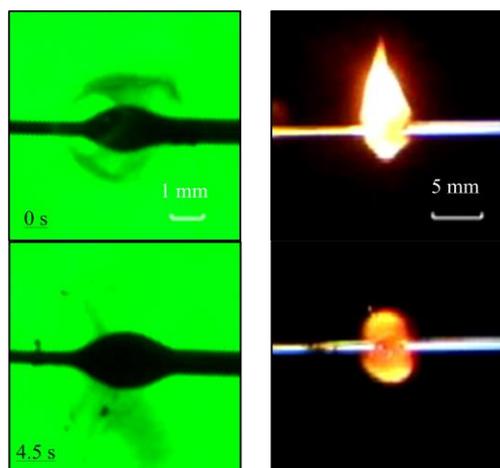


Fig.5 Molten insulation (MI) and direct flame of spreading flame. Sample: PE#2 (NiCr), $U_a=0$ mm/s, $O_2=30\%$

Figure 5 は、ポリエチレン被覆電線の燃え広がりに見られる非定常現象の一例である ¹⁴⁾。燃焼試料は、PE#2 (NiCr) (**Fig. 2** と同じ試料) で、左端に着火し右方向に向かって火炎が伝播する様子を示している。実験は MGLAB で実施し、周囲は静止条件である。図の右側は直接写真、左側が背景光画像である。火炎を背景光のもとで撮影することで火炎中の熔融被覆が球状に蓄積している様子 (以下熔融球と呼ぶ) が可視化できる。また、写真の上段が微小重力環境移行直後の様子、下段は落下後約 4.5 秒 (制動直前) の写真である。微小重力環境移行の直後は自然対流の影響が残っており、火炎が上方向に立ち上った形状となっていることが分かる。火炎形状は、微小重力移行後比較的短時間の内に球形に変わり、その後火炎の輝度を徐々に低下させながら右方向へ伝播していく。左側の背景光像をみると、微小重力環境移行直後の熔融球直径に比べ、落下 4.5 秒後の熔融球の直径が明らかに大きくなっていることが分かる。

Figure 6 は、この熔融球体積の時間変化を異なる周囲流速に対して示したものである。図中、小刻みに変動しているのが実験による実測値である。時刻 0 秒における値が通常重力場における値で、そこから微小重力環境経過時間に対する熔融球体積の変化を示している。この結果をみると、いずれの流速条件でも微小重力期間中熔融球の体積が変化しており、非定常性が継続していることがわかる。流速毎にその変化を見ると、0mm/s~150mm/s の範囲では、熔融球体積は時間と共に増大するのに対し、200mm/s 以上の条件では、時間とともに減少している。また、時間に対する変化率は静止雰囲気の場合が最も大きく、4.5 秒の間ほぼ一定の割合で増加し続ける。この非定常性に関する理解を深めるため、数値計算モデル ¹⁴⁾ を構築し熔融球体積の時間変化の予測を試みた。**Figure 6** 中実線で示した曲線が計算結果である。この結果からも、各流速条件において熔融球の体積変化が継続しており、この微小重力時間の範囲では定常状態には到達しないことが分かる。この中で特に流速 100mm/s の場合について、微小重力継続時間を延長して計算した結果を **Fig. 7** に示す。微小重力時間の継続とともに徐々に定常値に近づいていくが、体積変化は約 30 秒後でも継続しており、定常状態に到達するにはかなりの微小重力時間が必要となることが分かる。**Figure 8** は、計算時間を十分に長く取り、定常状態に達したときの熔融球体積 (体積の時間変化が $0.01\text{mm}^3/\text{s}$ 以下になった瞬間を定常と見なしている) の周囲流速に対する変化を示している。流速条件により、定常状態における体積が極めて大きくなることが理解できる。

火炎の消炎現象は、熔融球表面からの熱損失、分解ガス放出量、熔融球表面曲率などの影響を強く受けるため、消炎限界は熔融球体積と連動して変化する。このため、微小重力場における消炎限界を高い精度で定めるには、長時間微小重力環境が必要となる。先にも述べたとおり、短時間で取得される消炎限界は、比較的容易に消炎に至るような

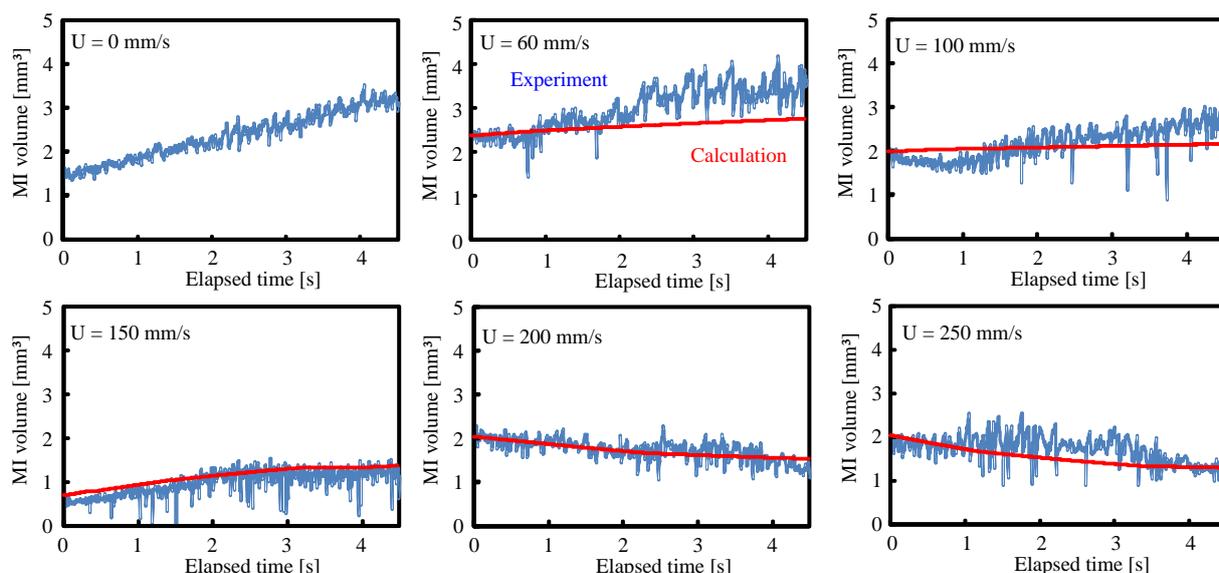


Fig.6 Experimental and calculated numerical results of the time dependent volume changes of the molten insulation (MI) in opposed air flow. Sample: PE#2 (NiCr), O₂=30%.

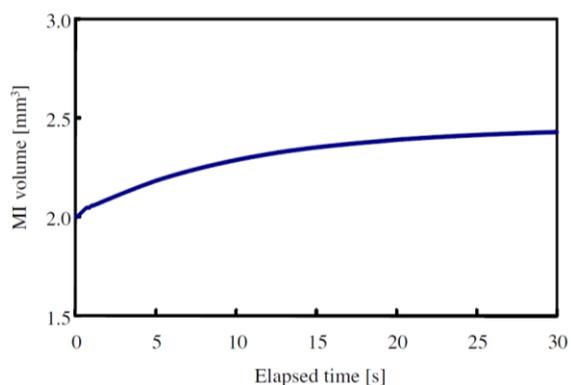


Fig.7 Calculated molten insulation (MI) volumes change as a function of microgravity time in opposed air flow of 100 mm/s. Sample: PE#2 (NiCr), O₂=30%.

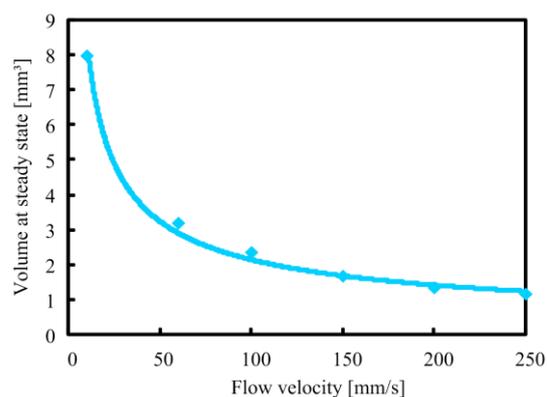


Fig.8 Calculated volume of molten insulation (MI) after reaching steady state as a function of opposed flow velocity. Sample: PE#2 (NiCr), O₂=30%.

十分に低い酸素濃度における実験に基づいて与えざるを得ず、本質的な消炎限界を短時間微小重力実験のみで特定することは極めて難しい。

もう1点短時間微小重力実験で難しい点は、航空機を使用した場合の G-jitter および残留重力の影響である。とくに、低流速条件では、僅かな対流が現象を大きく変化させる。とくに消炎限界が、Quenching Extinction 領域の場合、発熱が酸素供給により制御されるため、僅かな流動の発生で急激な発熱が生じ、現象が全く異なる結果になってしまう。Figure 3 において、微小重力下の低流速条件において Quenching Extinction の領域が明確でないのは、この残留 g の影響が大きいためと考えられる。現在、落下塔施設は北海道赤平市の HASTIC50m 級落下塔^{15,16)}が最大のものであり、これを用いても高々3秒の微小重力期間しか得られない。このため、固体材料の消炎研究において

は航空機実験が主要な実験手段となっているが、残留重力が大きな影響を及ぼす実験範囲に関しては不確定性を伴う実験とならざるを得ない。

4. 宇宙実験への展開

既述のように、通常重力場における固体材料の燃焼性は微小重力場において高くなる。とくに、最も燃焼性が高くなる Fundamental limit は基本的に微小重力場でなければ取得できない。この最も燃焼性の高くなる条件を知ることが、宇宙船内の火災安全性を保證する上で極めて重要である。また、火災を消火する場合にも、火炎近傍の酸素濃度をどの程度低下させると消炎が実現するかという点について、理論的な根拠を与えることにもなる点で重要である。ところで、現状の火災安全性に対する宇宙用材料の選別

は、NASA 関連の活動に対しては NASA の規定する材料燃焼性試験¹⁷⁾に基づいて行われている。この試験は、対象となる材料を例えば Fig. 9 に示すような装置により下端から着火し、燃え広がり距離が 6 インチ (約 15 cm) を超えると船内へ持ち込むことができない、というものである。しかしこの手法は火災安全性の判定を通常重力場で実施するために、最も安全側の判定と言えるかどうか明確ではない。また、この試験は特定の条件に対し可否を判定するだけの試験であるため、対象となる条件が変わると材料が同じでも改めて試験を実施する必要がある。例えば、将来の民間宇宙活動において宇宙船内の酸素濃度が異なるような場合は、これに対応した試験を改めて行う必要が生じる。さらに、燃焼性判定に上方燃え広がりを利用していることや着火手段として特殊なケミカルイグナイターを利用していることに起因する判定結果のばらつきがあり、所定の繰り返し試験が必要となる点など、基準そのものについて検討の余地があると考えられる。

一方、前節で述べたように微小重力場における本質的な消炎限界酸素濃度を与えることができれば、宇宙船内の酸素濃度が変化しても新たな試験を実施することなく材料の火災安全性を判定できるなど、将来の新たな宇宙船の設計や民間の有人宇宙活動の火災安全性の判定に対し多くの利点がある。そこで、既存の NASA 材料燃焼性試験の代替となりうる新たな火災安全判定基準を、消炎限界酸素濃度の考え方にに基づき構築しようとするのが ISS きぼう利用重点課題候補テーマ「火災安全性向上にむけた固体材料の燃焼現象に対する重力影響の評価」である¹⁸⁾。

この提案では、新たな試験法として地上の材料燃焼性試験法である酸素指数法 (Oxygen Index Method) の微小重力場環境への拡張を考えている。酸素指数法自体は、地上の試験法として広く普及しているもので、装置の汎用性や取り扱いの容易さで多くの利点がある。試験法の概要は、Fig. 10 に示すとおりであるが、NASA 試験法と比べ特徴的な点は着火位置が試料上端であり、下方燃え広がりに対

して消炎限界酸素濃度 (この限界値を酸素指数と呼ぶ) を与えることである。この手法では、本質的に実験の再現性が高く、限界酸素濃度を特定するうえで有利である。また、判定結果が可否で与えられるのではなく、限界酸素濃度条件が与えられる点で情報の汎用性が高い。しかし、この試験は基本的に通常重力場で行われるものであり、この試験法により与えられる酸素指数と微小重力場における限界酸素濃度の相互関係を与える必要がある。この点が、本提案の最も重要な研究項目であり、繰り返しの短時間微小重力実験による相互関係に関する仮説の構築と、長時間微小重力実験による検証からなる。また、その相互関係には、試料の幾何形状や厚さ、外部加熱条件、材料の材質影響などを含めて検討する。最終的には、この関係性を数式の形で表現し、これを取り込んだ宇宙材料燃焼性試験法の国際基準 (ISO) の提案につなげる計画である。

本プロジェクトは、JAXA, NASA, ESA の他、国内外の大学の研究者で構成される研究チームにより推進される。研究メンバーは、以下の通りであるが、全体で 6 つのグループからなり、それぞれが特定の役割を担って研究を推進している。

研究メンバー

Group1 (平板状試料, 1 g と μg の差を与える物理)

高橋周平 (岐阜大), 鳥飼宏之 (弘前大),

Sandra L. Olson (NASAGRC)

Group2 (電線試料, 1 g と μg の差を与える物理)

Carlos Fernandez-Pello (UC Berkley)

藤田 修 (北大・研究代表者),

Guillaume Legros (UPMC)

Group3 (熱分解ガスの着火現象)

津江 光洋 (東大)

Group4 (酸素指数法による限界条件の 1g と μg の違い)

中村祐二 (北大), 細貝亜樹 (JAXA)

小藏将斗 (JAXA), 若月 薫 (消防研)

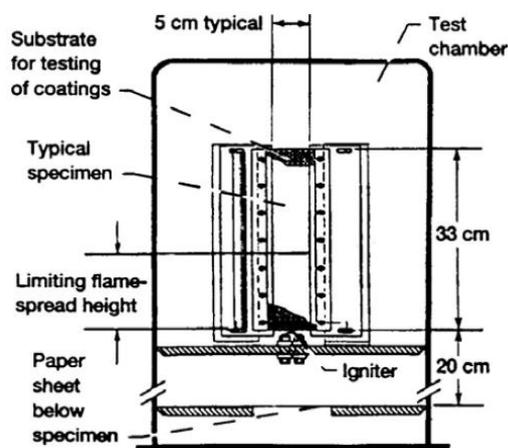


Fig.9 Experimental configuration for the upward flame propagation test (Test 1) of NASA-STD-6001¹⁷⁾.

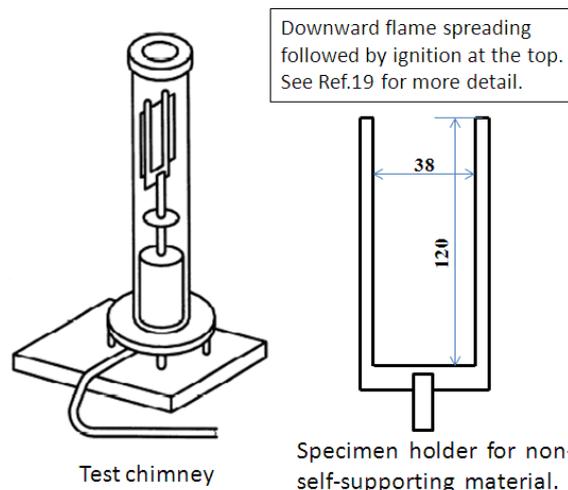


Fig.10 Oxygen Index Method defined in ISO4589/ASTM 2863¹⁹⁾.

Group5 (ISO 提案の議論, NASA-STD による地上試験)

Harold D. Beeson (NASA WSTF)
 David Hirsch (NASA WSTF)
 島村宏之 (JAXA), 藤田 修 (北大)
 Thomas Rohr (ESA ESTEC)
 Marika Orlandi (ESA ESTEC)

Group6 (フライト実験装置の検討)

菊池政雄 (JAXA)

5. まとめ

本報告では、著者らが取り組む微小重力場における固体材料の燃焼研究についての紹介を行った。とくに、固体材料の燃焼研究を微小重力場において行うことの科学的背景と、これまで得られてきた短時間微小重力実験による研究成果の例を紹介した。さらに、その中で短時間微小重力実験の限界と長時間微小重力実験の必要性について述べた。これらを踏まえて提案された ISS きぼう利用第 3 期重点課題テーマの概要について説明を行った。

本文でも強調したように、燃焼学の分野では、微小重力環境利用は依然として最も重要な研究手段の一つと認識されており、今後も継続して活発な研究が展開されるものと考えられる。また、燃焼現象は比較的時定数が短く短時間微小重力実験の利用が効果的であるが、そのなかで限界条件近傍の条件では長時間微小重力実験が必要となり、短時間および長時間微小重力実験を効果的に組み合わせる研究を推進することが重要と考えられる。

謝辞

第 3 章に示したデータの多くは、JAXA の ISS きぼう船内実験室第 2 期利用後半テーマ「宇宙火災安全性評価の基礎となる重力条件による固体材料燃焼性変化の定量的把握」の一部として取得されたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) S. Kumagai and H. Isoda: Symposium (International) on Combustion, **6** (1957) 726.
- 2) M. Kikuchi: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **28** (2011) 137. (in Japanese)
- 3) O. Fujita: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **28** (2011) 90. (in Japanese)
- 4) A. Umemura: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **28** (2011) 74. (in Japanese)
- 5) K. Maruta, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Takase, Xing Li: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. **29** (2012) 40. (in Japanese)
- 6) S. Takahashi, M. Hotta, Subrata Bhattacharjee, Y. Ihara, K. Wakai: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **29** (2012) 23. (in Japanese)
- 7) P. V. Ferkul, and S. L. Olson: AIAA, 2010-6260, 40th International Conference on Environmental Systems, Barcelona, Spain, July 11-15, 2010.
- 8) K. Agata, O. Fujita, Y. Ichimura, T. Fujii, H. Ito, Y. Nakamura: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **25** (2008) 11. (in Japanese)
- 9) O. Fujita, T. Kyono, Y. Kido, H. Ito and Y. Nakamura: Proc. Combustion Institute, **33** (2011) 2617.
- 10) Y. Takano, O. Fujita, N. Shigeta, Y. Nakamura and H. Ito: Proceedings of the Combustion Institute, **34** (2013) 2665
- 11) O. Fujita, K. Nishizawa and K. Ito: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **18** (2001) 276. (in Japanese)
- 12) S. Takahashi, H. Ito, Y. Nakamura and O. Fujita: Combustion and Flame, **160** (2013) 1900.
- 13) S. Takahashi, H. Izumo, H. Ito, Y. Nakamura and O. Fujita: AIAA, 2013-3388, 43rd International Conference on Environmental Systems, 2013
- 14) S. Takahashi, H. Takeuchi, H. Ito, Y. Nakamura and O. Fujita: Proceedings of the Combustion Institute, **34** (2013) 2657.
- 15) O. Fujita, H. Ito, Y. Nakamura, T. Uematsu and K. Ito, IAC-05-A2.7.02, CD-ROM, 2005.
- 16) <http://york-me.eng.hokudai.ac.jp/HASTIC/Newdroptower.pdf> (in Japanese)
- 17) NASA-STD-6001, Flammability, Offgassing, and Compatibility Requirements and Test Procedures.
- 18) http://iss.jaxa.jp/kiboexp/participation/application/fy24priority_selection.html (in Japanese)
- 19) ISO4589/ASTM 2863, Oxygen Index Method.

(2014 年 1 月 16 日受理, 2014 年 1 月 23 日採録)