

ⅢⅢ「きぼう」利用重点課題テーマ「FLARE」ⅢⅢ
(解説)

「きぼう」利用重点課題テーマ FLARE の目的および概要

藤田 修

Introduction of JAXA Priority Project FLARE utilizing ISS/"KIBO"

Osamu FUJITA

Abstract

A research project relating fire safety in space, FLARE (Flammability Limits at Reduced Gravity Experiment), is briefly introduced in the article. The project is aiming at proposal of new fire safety standard for screening material intended to use in spacecraft, which is promoted by JAXA as a high-priority project utilizing ISS (International Space Station). Major efforts in the project are made for building up a formula to allow quantitative estimation of solid material flammability limit under microgravity (MLOC) based on Limiting Oxygen Index (LOI) according to ISO 4589-2. The formula will be verified by ISS flight experiments at the end of the project period and, then, is expected to be included as a key element in the new fire safety standard. Further, some potential advantages of the new standard such as shift from Pass/Fail test to index method, allowing use of available material flammability data as LOI values, and potential reduction of cost for material screening, are emphasized under comparison with NASA-STD-6001B, which is often used for screening material for space use. The project team consists of members from JAXA, NASA, ESA and eight (8) universities from all over the world and the role of individual member to reach the goal are summarized.

Keyword(s): Microgravity, Fire safety in space, International standard, Solid combustion, Flammability limit

Received 21 Sept. 2015, accepted 5 Oct. 2015, published 31 Oct. 2015

1. はじめに

有人宇宙活動において火災安全性の確保は最優先事項の一つである。宇宙船は一種の閉鎖環境であり、ひとたび火災が発生すると宇宙飛行士が避難することは容易ではなく、甚大な被害が発生する恐れがあるからである。特に NASA はアポロ計画の初期段階で、地上における試験中に宇宙船内で火災事故を起こすという深刻な事故を経験しており、火災安全性向上のために極めて多くの労力を費やしてきた。

宇宙火災安全性の確保は、(1) 材料の燃焼性を特定の試験法により判定し、これが一定基準を満たしたものだけ使用することで火災の発生を未然に防ごうとする部分と、

(2) 仮に火災が発生したような場合でも素早く検知し消火を可能とする、という部分からなる。このうち、(1) に関して最も広く使用されてきた材料選別手段が NASA-STD-6001B¹⁾ である。Figure 1 は、この基準に規定されて

いる試験法の例を示したものであり、基準の中では Test1 と呼ばれるシート状材料の燃焼性試験法である¹⁻³⁾。図に示されているよう 2 本の試料固定用の柱の間に幅 50 mm、長さ約 300 mm のシート状の試料を固定している。この試料の下端に棒状固形燃料が設置され、この燃料を燃焼させることで着火を行う。このとき、試料下端に着火した火炎が 6 インチ (約 15 cm) 以上燃え広がるか、燃焼した試料の一部が落下し試験装置の下に敷いた用紙 (K-10 紙) に着火が生じるような場合、その材料は不合格となる。また、電線被覆の燃焼性に対しても同様な試験方法が規定されており⁴⁾、これらの試験に合格することが宇宙船内へ材料を持ち込んで良いかどうかの判定基準となっている。なお試験方法の詳細は細貝ら⁵⁾ による解説を参照されたい。

これらの基準は、少なくとも 1981 年には NASA NHB8060.1B として確立されておりこれまで宇宙火災安全確保の面で大きな役割を果たしてきた。しかし、近年の種々の研究により、従来のこれら試験法の問題点が指摘さ

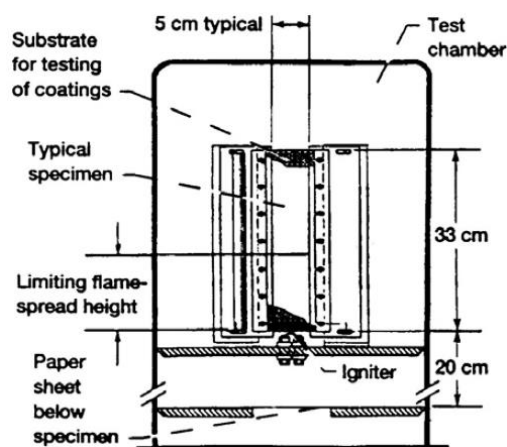


Fig. 1 Experimental Configuration for the Upward Flame Propagation Test (Test 1) of NASA-STD-6001B¹⁻³⁾.

れており（詳しくは次節で述べる）、これらの問題点を解決しつつ既存の安全基準と並んで使用することのできる新たな火災安全基準を構築しようとするのが本重点課題テーマの大きな狙いである。本テーマ名称は、「火災安全性向上に向けた固体材料の燃焼現象に対する重力影響の評価」であり、英文略称で FLARE (Flammability Limits at Reduced Gravity Experiment) と呼ばれている。以下の節において、従来試験法の問題点、本プロジェクトで提案を行おうとする新たな国際基準の概要、および研究実施体制について紹介を行う。

2. 現状の試験法の課題

既存の試験法の例については前節で概要を説明したが、この試験法に関してはいくつかの課題が指摘されている。

まず第 1 に挙げられるのが、基本的にこの試験法が Pass/Fail 試験であることである。すなわち、この試験法は実際に使用する試料および周囲環境をこの試験法に適用し可否を判定するいわゆる「実証試験」であり、宇宙船内の設計酸素濃度が変わる場合（実際、船外活動を行う予備室や次世代の宇宙船などは酸素濃度が異なることが予想される）や、厚み等の試料形状が変化すると、そのたびに試験を繰り返さなくてはならない。これは、極めて多くの労力を要する作業であり、将来の民間や米国以外の宇宙活動にもこの基準を適用しようとする、これが大きな障害になる可能性もある。この点は NASA も認識しており、近年では本試験法を維持したうえで Pass/Fail の判定だけではなく、任意の材料に対し基準を満たす下限酸素濃度をデータとして蓄積し、これを異なる船内環境に対する適合性判定に活用していこうとする動きがある⁶⁾。しかしなが

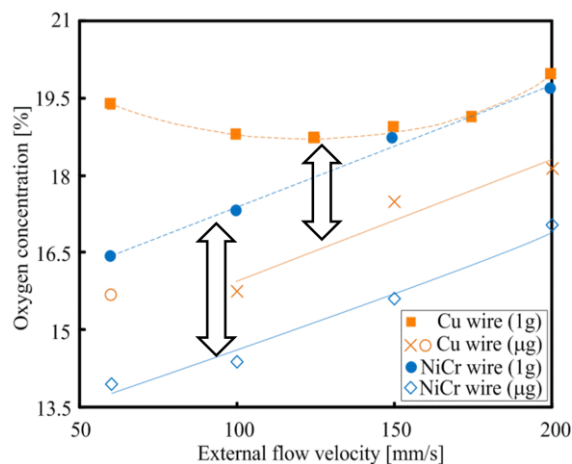


Fig. 2 Limiting Oxygen Concentration of Spreading Flame Over Polyethylene Insulated Wire as a Function of External Air Flow Velocity in 1G and μ G⁷⁾.

ら、従来の試験法は Pass/Fail 試験を前提にしたものであることに変わりはなく、本試験法により与えられる下限酸素濃度を判定基準とすることが必ずしも有利な選択とは言えない。

第 2 の課題は、従来の試験法がそもそも地上における試験に基づく判定であることが挙げられる。固体材料の燃焼性が、通常重力場に比べ微小重力場の方が低いのであれば地上試験により得られる結果は常に安全側の判定となるが、実際には微小重力場の方が燃焼性の高くなる場合も存在することが近年多くの研究で指摘されている。たとえば、Fig. 2 はポリエチレン被覆電線（心線は銅およびニクロムの 2 種類、被覆外径 0.8 mm、心線径 0.5 mm）上を対向空気流中で燃え広がる火炎の消炎限界酸素濃度を通常重力場および微小重力場において比較した結果であるが、微小重力場の方が常に 2~3% 低くなっている。すなわち、微小重力場の方がより低い酸素濃度まで火炎が維持できることを示している⁷⁾。

また、Fig. 3 は宇宙用材料としても使用されることの多い Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) を被覆とする電線（心線は銅、被覆外径 1.1 mm、心線径 0.5 mm）上を燃え広がる火炎の消炎限界酸素濃度（Limiting Oxygen Concentration, 以降 LOC と呼ぶ）を通常重力場と微小重力場で比較した結果である⁸⁾。この実験では周囲流速を約 12 mm/s に固定し、外部輻射加熱強度を変化させながら消炎限界を調べている。この結果からわかるように、いずれの外部輻射条件においても消炎限界酸素濃度は微小重力場において大きく低下し、その差は 6% 前後となっている。

Figure 2 に示したポリエチレン被覆の場合と比較すると、実用難燃材料である ETFE 被覆電線のほうがその低下幅

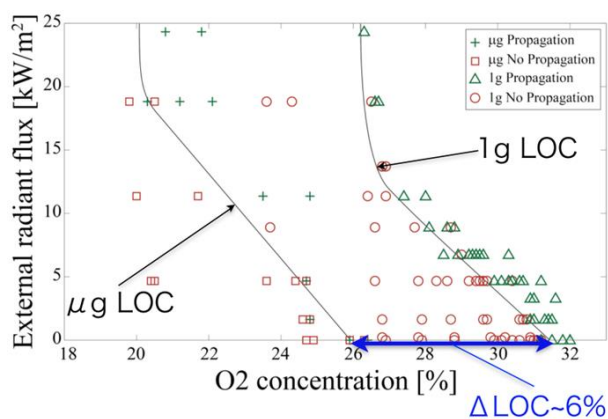


Fig. 3 Limiting oxygen concentration of spreading flame over ETFE insulated wire under various external radiation in 1G and μ G.⁸⁾

ははるかに大きくなっていることがわかる。この他にも、たとえば電線の着火現象に関して微小重力場の方が燃焼性が大幅に拡大する例⁹⁻¹¹⁾も示されている。

これらの結果は、地上の試験で与えられる結果は必ずしも安全側の評価を与えるとは限らないことを示しており、**Fig. 2**や**Fig. 3**で示したような微小重力場での燃焼性の拡大を考慮した新たな安全基準の設定は火災安全性のさらなる向上に対して重要な意義を持つといえる。

第3に挙げられる課題は、NASA-STD-6001Bに規定される従来の試験法は試料下端に着火し上方伝播により燃焼性を判断している点である。上方伝播では浮力により火炎が揺らぎ、これが未燃の燃料の予熱状態を変化させるため、データにばらつきが生じやすい。さらには、本試験法では、初期の着火方法として特種な Chemical Ignitor が用いられており、これもデータにばらつきが生じる要因となる。この結果、材料の Pass/Fail を判定するだけでも多くの繰り返し実験が必要となる。まして、この方法により消炎限界を求め Index 法として利用しようとする統計的処理に耐えうる繰り返し実験が必要となり、これが試験を実施する上での大きなコスト増加につながる。また、本試験を行う上での試験施設が NASA や JAXA など特定の宇宙機関にしか存在していないことも、将来的に民間主導の宇宙開発が進められようとした場合、大きな障害となる可能性がある。

3. 新たな国際標準の提案

3.1 ISO4589-2 をベースと火災安全基準

前節で述べた課題を考慮したうえで、これらの課題を解決しつつより汎用性のある宇宙火災安全基準を提案しよ

うとするのが、FLARE プロジェクトの研究上の狙いである。この際、従来から使用されてきた NASA-STD-6001B をベースとすると前述の課題をクリアすることは容易ではない。そこで本プロジェクトでは材料難燃性に関する性能評価試験として広く用いられる ISO4589-2 (JIS K 7201-2) に基づく酸素指数法 (LOI 法)^{5,12)} で取得された限界酸素指数を利用することを提案している。LOI 法の詳細についても細貝らの解説⁵⁾ に詳しく述べられているが、ここで簡単に説明する。本試験法は一般にプラスチック材料に対して適用されるもので、標準試料寸法として断面形状が 10 mm×4 mm、長さが 80~150 mm 程度のものを用いる。この試料を流速約 40 mm/s の上向き一様空気流中の流れる燃焼管の中に流れに平行に固定し、その上端にガスバーナで着火を行う。ここで火炎は試料を上端から下方に向かって伝播するため、火炎は対向空气中を燃え広がる形になる。このように形成した火炎の周囲流中の酸素濃度を変化させることで、消炎限界酸素濃度を特定する。このようにして与えられた限界酸素濃度を LOI (限界酸素指数) と呼んでいる。地上で使用する材料に対しては、この LOI に基づいて、可燃性物質、自己消火性物質、難燃性物質に分類される。

本プロジェクトではこの LOI 値から、微小重力場における限界酸素濃度 (MLOC: Minimum Limiting Oxygen Concentration¹³⁾) を予測可能にし、これを宇宙船内酸素濃度と比較しようとしている。すなわち、LOI 値を補正することで MLOC を求め、この MLOC の値を宇宙船内酸素濃度 ($(O_2)_{in\ spacecraft}$) と比較を行うという考え方である。この考え方を概念的に示すと以下の式ようになる。

$$(O_2)_{in\ spacecraft} < MLOC = \{f(t) \times (LOI)_{1G}\} - Ka$$

ここで $(LOI)_{1G}$ とは、ISO4589-2 にもとづいて与えられる酸素指数であり通常重力場で取得されるものであることを示すために下付で 1G と表記している。また、MLOC は宇宙船内での使用時に想定される試料の厚さに対して種々の周囲流速の中で最も低い消炎限界酸素濃度¹³⁾を示している。上式は $(LOI)_{1G}$ と MLOC の関連付けを概念的に示したものであるが、ISO4589-2 では試料の標準厚みが 4 mm と固定されていることから、実際の使用材料の厚さを考慮した厚さの補正 ($f(t)$) と重力影響の補正 (Ka) を含む形で表現している。実際にどのような関数形が適切であるかはさらなる考察が必要であるが、これに関する現時点での検討状況は本特集号の高橋¹⁴⁾ および中村¹⁵⁾の記事を参考にされたい。

3.2 新たな国際基準の波及効果と課題

上述のような安全基準を実現できれば、有人宇宙活動の拡大に対して極めて大きな波及効果がある。その最も重要な点の一つは、本手法により微小重力場における限界条件 (MLOC) が定量値として与えられることである。これにより微小重力場における燃焼性拡大の影響は当然考慮されることになるが、それ以上に MLOC は地上における LOI と同様、微小重力場における材料特性の一種として扱うことができるものと考えられ、設計データとして使用できる可能性がある。従来の試験法が Pass/Fail であったことを考えると、材料の安全性評価に対しては大幅な労力やコストの節減が期待できる。また、MLOC のベースとなるデータである LOI 値は既に多くの材料に対してその値が存在しており、既存の多くの材料に対して宇宙船内材料として使用できるかどうか、新たな試験を実施せずとも判定可能となることが期待される。

一方で、本手法は前項で示した関係式を与えられることが大前提となっており、このためには現象に対する深い理解が必要であり、それに基づいた関係式構築は既述のとおり極めて挑戦的な作業となる。また、実際には種々の実用材料が存在しており、材料の種類が変わってもその関係式が成立することを科学的立場から示していく必要がある。この点に対しては、研究チームのさらなる研究の推進と ISS/「きぼう」による軌道上検証実験が重要となってくる。また、もう 1 つの課題は、NASA においてはこれまで NASA-STD-6001B により火災安全に関わる材料選別が行われており、これに関する多くのデータが蓄積されている。そのようななかで新しい材料火災安全基準がどの程度信頼性あるものとして受け入れられるかという点も重要である。この点に関しては、NASA や関連機関との継続的な議論を通して本手法の有効性について理解を得ていく必要がある。

Table 1 Description of research teams

Group name	Researcher name	Role of each member
Group 1 Flammability limit of flat sheet	◎Shuhei Takahashi (Gifu Univ.)	Dominant parameter to control limiting condition in microgravity, PMMA sheet & NOMEX
	Hiroyuki Torikai (Hirosaki Univ.)	Thickness effect, Charred material in microgravity, Thick PMMA & filter paper
	Sandra L. Olson (NASA GRC)	Flammability of fabric clothes material Cheese cloth
Group 2 Flammability of electric wire and cylindrical material	◎Carlos Fernandez-Pello (UC Berkeley)	External radiation effect on material flammability in cylindrical shape, Thick PE rod with/without conductor
	☆Osamu Fujita (Hokkaido Univ.)	Flammability limit of wire insulation in microgravity, Effect of core material and flow direction PE & ETFE wire
	Guillaume Legros (Univ. Pierre-et-Marie Curie-Paris 6)	Soot formation in microgravity flame and its radiation characteristics, Microgravity tests in CNES parabolic flight
Group 3 Critical mass loss rate for ignition in μ G	◎Mitsuhiro Tsue (The Univ. of Tokyo)	Ignition limit by laser break down method in different gravity conditions.
Group 4 Formulation of thickness effect, Comparable LOI data, and evaluation of ignition method	◎ Yuji Nakamura (Toyohashi Univ. of Technology)	Formulation of thickness effect applicable to different material, Discussion on recommended ignition method
	Aki Hosogai (JAXA)	Accumulation of comparable data according to LOI method with flight experiments.
	Kaoru Wakatsuki (Shinshu Univ.)	Discussion on consistency of new recommendation with present ISO 4589
Group 5 Discussion on new standard recommendation and its consistency with present method utilized in individual agency	◎Harold D. Beeson (NASA WSTF)	Comparable data with present NASA test method, Discussion on validity of newly recommended material evaluation method
	David Hirsch (NASA WSTF)	
	Toshihiro Shimamura (JAXA)	Draft of recommendation as a base of discussion, Discussion on its validity and consistency with present method.
	Osamu Fujita (Hokkaido Univ.)	
	Thomas Rohr (ESA ESTEC)	Comparable data with present ESA test method, Discussion on validity of newly recommended material evaluation method.
Marika Orlandi (ESA ESTEC)		
Group 6 Hardware and instrumentation	◎Masao Kikuchi (JAXA)	Hardware and instrumentation on Solid Combustion and their extension to FLARE experiments.

☆PI ◎Group leader

4. 研究実施体制

本研究プロジェクトは、Table 1 に示すような国際研究チームにより推進されている。本研究では、これまで述べたように、固体材料の燃え広がり現象に関する物理的理解と、それに基づいて試料の厚さの影響 ($f(t)$) や重力影響による限界酸素濃度の変化 (K_a) を定式化していく必要がある。また、NASA-STD-6001B には平板状試料だけでなく、電線の安全性判定に関する規定も含まれている。これらの点に対応するため、研究チームがグループ 1 から 6 まで分けられ、それぞれが表に記載されるような役割を担っている。各グループを簡単に説明すると、グループ 1 は平板試料に対する重力影響の補正式に関する検討、グループ 2 は電線被覆燃焼に対する重力影響の補正式に関する検討を担当し、この両グループが ISS による長時間微小重力実験を主体的に担う。グループ 3 は燃え広がり現象や消炎現象の基礎となる固体材料から放出される分解ガスの燃焼限界に関する検討、グループ 4 は LOI 法に則った試験法のもとで厚み影響の評価と着火方法の影響を検討する。グループ 5 には 3 つの宇宙機関が参画しており、本テーマで提案される基準の妥当性についての議論を行う。グループ 6 はグループ 1, 2 と協力して、宇宙実験実現に向けた取り組みを行う。研究期間は、2013 年度から 2017 年度の 5 年間で予定しており、この期間中に ISS/「きぼう」を利用した軌道上実験を開始する計画である。

本研究チームでは国際ワークショップと称して毎年 1 回全体会議を実施している。第 1 回は 2014 年 1 月につくばで実施、第 2 回は本年 (2015 年) 1 月に米国 NASA White Sands Test Facility (WSTF) にて開催した。Figure 4 はそのときの集合写真である。第 3 回は 2016 年 1 月に札幌での開催を予定しており、本プロジェクトの目標達成に向けて引き続き活発な議論が期待される。



Fig. 4 Photo of research team at 2nd International Workshop on FLARE held at NASA WSTF. 2015.1.21-23

5. まとめ

本報告では、ISS/「きぼう」を利用した宇宙火災安全性に関するプロジェクト FLARE の概要をまとめた。本プロジェクトでは、微小重力場における固体材料の燃焼限界に関する基礎的理解をベースに新たな宇宙火災安全基準の提案を行おうとするものであるが、その背景となる既存の基準の課題、新たに提案しようとする基準の波及効果および課題、研究体制などを述べた。本プロジェクトの成果が、次世代の有人宇宙活動の安全性向上の礎の一つとなることを期待している。

謝辞

本研究は、JAXA の「きぼう」船内実験室第 3 期利用重点課題テーマ「火災安全性向上に向けた固体材料の燃焼現象に対する重力影響の評価」として進められている。本研究推進に対し支援頂いている JAXA 関連部署および関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) NASA-STD-6001B (2011), Flammability, Offgassing, and Compatibility Requirements and Test Procedures.
- 2) ISO 14624-1, Space Systems -Safety and Compatibility of Materials- Part1 Determination of Upward Flammability of Materials (2003).
- 3) A.G. Ruff, L.D. Urban and K.M. King: AIAA 2005-0341.
- 4) ISO 14624-2, Space Systems -Safety and Compatibility of Materials- Part 2 Determination of Electrical-Wire Insulation and Accessory Materials (2003).
- 5) A. Hosogai, K. Wakatsuki and Y. Nakamura: J. of Combustion Society of Japan, **56** (2014) 47 (in Japanese).
- 6) S.L. Olson, P.V. Ferkul, Proc. International Conference AIAA 2012-3492, 42nd International Conference on Environmental Systems, 2012.
- 7) S. Takahashi, H. Ito, Y. Nakamura and O. Fujita: Combustion and Flame, **160** (2013) 1900.
- 8) A. Osorio, K. Mizutani, C. Fernandez-Pello and O. Fujita: Proc. Combust. Inst., **35** (2015) 2683.
- 9) K. Agata, O. Fujita, Y. Ichimura, T. Fujii, H. Ito and Y. Nakamura: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **25** (2008) 11. (in Japanese)
- 10) O. Fujita, T. Kyono, Y. Kido, H. Ito and Y. Nakamura: Proc. Combust. Inst., **33** (2011) 2617.
- 11) Y. Takano, O. Fujita, N. Shigeta, Y. Nakamura and H. Ito: Proc. Combust. Inst., **34** (2013) 2665.
- 12) ISO4589-2 (1996), Plastics -Determination of Burning Behavior by Oxygen Index-.
- 13) O. Fujita: Proc. Combust. Inst., **35** (2015) 2487.
- 14) S. Takahashi: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **32** (2015) 320403. (in Japanese)
- 15) Y. Nakamura and A. Hosogai: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **32** (2015) 320406. (in Japanese).