

IIII 「きぼう」利用重点課題テーマ「FLARE」IIII  
(解説)

## 微小重力環境における薄い平板試料の可燃限界予測

高橋 周平

### Prediction of Flammability Limit of Flat Materials in Microgravity Environments

Shuhei TAKAHASHI

#### Abstract

Considering the recent increasing human activities in space development, the reduction of fire risk in a microgravity environment and performing convenient flammability tests for materials used in space will become important research issues. However, there is currently no reliable flammability test based on scientific background for space environments. In the FLARE project, it is one of the main objectives to derive a conversion equation which can predict the minimum limiting oxygen concentration (MLOC) of flat materials in microgravity from a ground-based flammability test, such as JIS K 7201. In the present article, a simplified model for predicting MLOC of a thin flat material with an opposed flow using ground-based flammability data is introduced.

**Keyword(s):** Flame spread, Flammability map, Minimum limiting oxygen concentration, Microgravity

Received 6 Aug. 2015, accepted 5 Oct. 2015, published 31 Oct. 2015

#### 1. 宇宙環境における火災安全国際標準基準の必要性

国際宇宙ステーション (ISS) での長期滞在や民間企業による有人宇宙輸送プロジェクトなど、近年、宇宙環境における有人活動がさらに活発化している。宇宙船のような閉鎖環境における有人活動では、火災は直接的および間接的にクルーの生命に危機を及ぼすものとして、嚴重に管理下に置かれなければならない。このため、有人宇宙活動において使用される固体材料に関しては、その可燃性を調べるための試験法が規定されている。米国では、アポロ計画において訓練中に3名の宇宙飛行士の火災死亡事故を起こした経験から、独自の火災安全基準を規定しており、またロシアも同様に独自の火災安全評価基準を有している。ISSではこれまでに火災事故は起きていないが、ロシアの宇宙ステーション、ミールにおいては、1997年に酸素発生モジュールから火災が発生している。このときの火災の持続時間は約90秒であったが、大量の煙が5~7分程度立ち込め、また、いくつかの機器が火災の熱によりダメージを受けた。微小重力環境においては浮力による自然対流が

発生せず、火災による熱が局所的に留まりやすいためである。このミールでの火災事故の経験は、現在のISS計画においても重要な教訓となっている。

ISSに参加している米国、欧州、日本においては、NASAが定める有人宇宙プログラム用安全性実証試験基準文書 (NASA STD-6001B) に基づき、宇宙環境で用いる固体材料の可燃性試験が実施されている<sup>1,2)</sup>。この規格は1974年にその前身となる規格NHB-8060.1が制定され、以後いくつかの改訂を重ねて2011年に最新版となっているが、もともと古い規格であるため、その試験法の根拠となる部分には不明な点が多いのも事実である。また、NASA STD-6001Bは、実際に使用する試料を用いてのpass/failテストであるため、試料の形状や使用環境が異なる場合には、別途試験を行って評価を受ける必要がある。NASA STD-6001Bで行われる試験法は現在ISO 14624-1として国際標準化されているが、この試験法を実施できる機関は、実質NASA (2か所)、JAXA (1か所) の2機関しかなく、このため有人宇宙開発事業に参入したい企業にとっては、材料選定にあたり多くの時間とコストがかかることが問題としてあげられる。

岐阜大学 工学部 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1  
Department of Mechanical Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193, Japan  
(E-mail: shuhei@gifu-u.ac.jp)

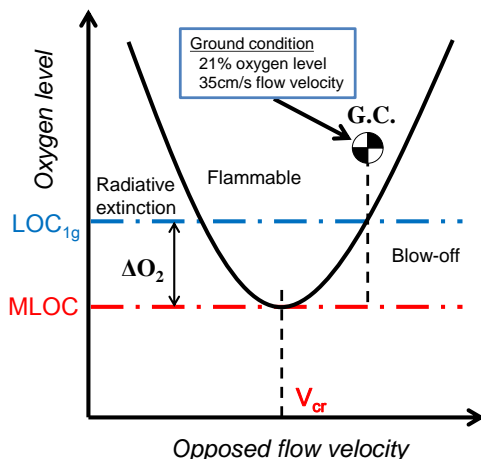


Fig. 1 Flammability map of a solid material with an opposed flow.

Table 1 ULOI and MOC for different gravity levels<sup>5)</sup>

Fuel	Mylar® G 10.2 psia	Ultem® 1000 10.2 psia	Nomex® HT90-40 14.7 psia
1g ULOI	21.2	23.5	23.5
1g MOC	20.0	23.0	22.1
Martian ULOI*	18.0	22.0	19.9
Martian MOC*	17.0	21.1	19.0
Lunar ULOI*	15.6	21.0	21.0
Lunar MOC*	14.1	19.9	19.9
0g* ULOI*	17.0	24.0	23.0
0g* MOC*	16.0	23.0	22.0
Martian $\Delta O_2$ %	-3.1	-1.7	-3.35
Lunar $\Delta O_2$ %	-5.75	-2.8	-2.35
0g $\Delta O_2$ %	-4.1	0.25	-0.3

また、このような技術的な問題のほかに、得られた可燃性試験結果の有効性に関する多くの課題がある。微小重力環境下での火災では、自然対流が発生しないことが大きな特徴の一つであるが、火災周囲には流れが全くないわけではなく、人の移動や周辺機器の換気などにより、自然対流に比べて低速の流れが存在することが十分予想される。このような環境下においては、ある固体試料がそれ以下の酸素濃度では燃焼することができない、いわゆる限界酸素濃度が、地上環境と比べて低下することが多くの研究で報告されている。Figure 1は、たとえばTienらなど<sup>3,4)</sup>によって報告されている、対向流が存在する条件での熱的に薄い固体材料の典型的なFlammability mapを示したものである。一般に限界酸素濃度は、対向流速が大きいかにも小さい場合にも高くなる。対向流速が大きくなり消炎する場合は、いわゆる吹き飛びに相当する。また、対向流速が小さくなって消炎する現象は、自然対流の存在しない微小重力環境特有の現象であるが、これはふく射熱損失による消炎と考えられている。地上における火災伝播においては、自然対流のため、火災周囲の流速として常に30~40cm/s

程度存在する。Figure 1における最低酸素濃度は自然対流速度より遅い流速、すなわち微小重力環境で換気などによる低流速が存在する環境で達成され、この時の限界酸素濃度は、たとえば地上試験で得られる下方伝播火災の限界酸素濃度より低い値をとることがわかる。同方向流が存在する条件においても類似の傾向がみられる。たとえば、Table 1は、Olsonら<sup>5)</sup>によって報告されているNASA STD-6001BのTest1 (Fig. 2)と対応する、上方火災伝播試験において、3種類のシート状試料(マイラー™ G, ULTEM™ 1000, NOMEX™ HT90-40)のULOI (Upward Limiting Oxygen Index)とMOC (Maximum Oxygen Concentration)を比較した結果である。ここでULOIは、酸素濃度をパラメータとし、それぞれ5回の上方火災伝播試験を行い、火災伝播成功の確率分布を求め、火災伝播確率が50%となる酸素濃度と定義されている。また、MOCは5回の試験で1回だけ火災伝播が成功した酸素濃度から、さらに1%低い値として定義されている。この実験は、落下塔内で遠心加速装置を用いて実現した低重力環境下で、重力レベルが異なる場合にULOIとMOCがどのように変化するかを調べたものであるが、1G ULOIおよび1G MOCの値と比較して、0Gでの結果より月重力(1/6 G)および火星重力環境下(1/3 G)のほうが、限界酸素濃度が低下していることがわかる。また、最も限界酸素濃度が低下する重力レベルも、材質によって異なることもわかる。

このように、対向流および同方向流いずれの流れ環境においても、地上試験で得られた限界酸素濃度は、その材料の宇宙環境における最低限界酸素濃度を表しているとは言い難い。NASA STD-6001Bで採用されている上方火災伝播試験では、初期着火エネルギーの影響、火災による未燃試料部の予熱、火災長さの成長による非定常的な加熱領域の増大など、火災伝播現象に様々な要因が作用するため、試験結果の再現性が乏しいことが課題としてあげられる。このような課題にもかかわらず、上方火災伝播試験はより厳しい条件での試験法である、すなわち”Conservative”であると認識され、これゆえ宇宙環境における火災安全のよりどころとされることが多いが、Table 1に示されるように、決して宇宙環境における火災安全性を担保していないことがわかる。

一方で、産業界では、NASA STD-6001Bのような実証試験主義的な試験法ではなく、インデックスとして材料の可燃性を表す酸素指数試験法が広く採用されている<sup>6)</sup>。酸素指数試験法はJIS K 7201で規定されており、下方火災伝播試験により有炎燃焼を維持するのに必要な最低酸素濃度を、酸素指数(OI: Oxygen Index)として与える。JIS K 7201では、Fig. 3に示される試験装置を用いて、下方

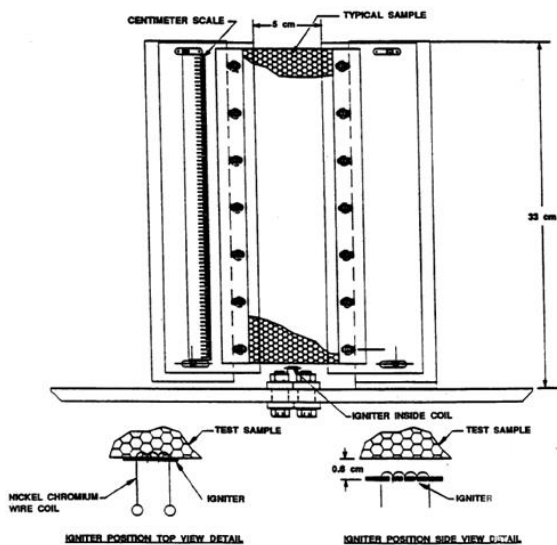


Fig. 2 NASA STD-6001 test1

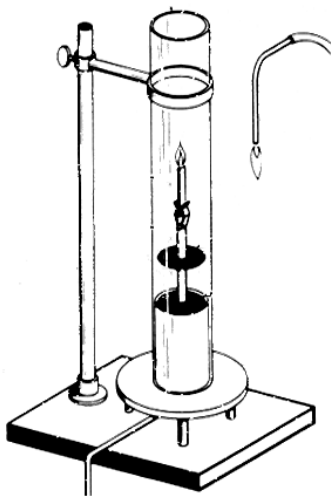


Fig. 3 JIS K 7201 Oxygen Index method

から 4 cm/s の流速を与えて、厚さ 4 mm、幅 10 mm の試料の上端をバーナーで着火する。火炎周囲は自然対流による流れがあるため、火炎に相対する実際の流速は、4cm/s を大きく超えて、上述の 30~40 cm/s に近い値をとる。酸素指数試験は下方火炎伝播を対象としているため実験の再現性があり、信頼のおける数値が比較的容易に得られる。また、試験装置も多くの企業で保有されている。もちろん OI も地上試験で得られた値であるため、Fig. 1 で説明したように、NASA STD-6001B と同様に宇宙環境における火災安全性を担保しない。しかしながら、NASA STD-6001B も JIS K 7201 も、過去に莫大な量のデータを有し、また産業界でも広範に利用されているため、これらのデータを

活用しつつ、新たに宇宙環境における火災安全基準を策定することが現実的である。そこで、ISS きぼう第 3 期重点化テーマに選定された「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」(FLARE プロジェクト, PI: 北海道大学 藤田修 教授) の Gr. 1 では、平板状の固体試料の最低限界酸素濃度を、試験の再現性が高く、民間でも広く採用されている JIS K 7201 で規定される OI から推算する変換式の導出が、大きな目的の 1 つとなっている。変換式の目的は、OI からの最低限界酸素濃度の導出であるが、その前段階として、熱的に十分薄い材料が地上での下方伝播試験において示す限界酸素濃度 (LOC<sub>1g</sub>: Limiting Oxygen Concentration at 1G) から、微小重力環境で実現される最低限界酸素濃度 (MLOC: Minimum Limiting Oxygen Concentration) やそれらの酸素濃度の差として定義される  $\Delta O_2$  がどのように推算されるかを、本解説で述べたい。

## 2. スケール解析による可燃限界の推算

対向流中におかれた平板状の固体試料は、前述のように対向流速の大きさにより 2 つの火炎伝播を阻害する因子が働く。1 つは高速流中における吹き飛び (化学反応支配領域) であり、もう 1 つは低速流中におけるふく射消炎 (微小重力環境領域) である。このため、これらの因子により火炎伝播速度がどのように変化するかをスケール解析<sup>7-9)</sup>により明らかにする。Figure 4 は、対向流速  $V_g$  の中に置かれた試料半厚さ  $\tau$  の平板状の固体試料上を、速度  $V_f$  で伝播する 2 次元的な火炎をモデル化したものである。このモデルにおいては、気相における温度場の貫通距離  $L_{gx} = L_{gy} = \alpha_g / V_f$  として表しており、これを気相予熱帯の代表サイズとしている。ここで  $\alpha_g$  は気相の温度拡散係数、 $V_f$  は火炎に対する対向流の相対速度であり、 $V_f = V_g + V_f$  である。この気相予熱帯を対向流が通過する時間に、同様に固相内部へ温度が貫通する距離  $L_{sy}$  は  $\sqrt{(\alpha_g \alpha_s) / (V_f V_f)}$  と表せる。ここで、 $\sqrt{(\alpha_g \alpha_s) / (V_f V_f)} > \tau$  の条件が成立する場合には、 $L_{sy} = \tau$  となり、熱的に薄い試料と見なすことができる。火災安全の点から考えると、熱的に厚い場合は、熱的に薄い場合と比べ試料厚み方向への熱伝導が加わるため、火炎伝播限界酸素濃度は高くなると考えられる。そこで、より危険側にあると考えられる熱的に薄い試料に対しての火炎伝播限界について考察する。いま、化学反応速度が十分速く、かつ火炎から固相予熱帯への熱伝導が支配的で、固相予熱帯における未燃試料の予熱量とバランスしている (熱支配領域) と仮定すると、以下の式(1)が成立する。

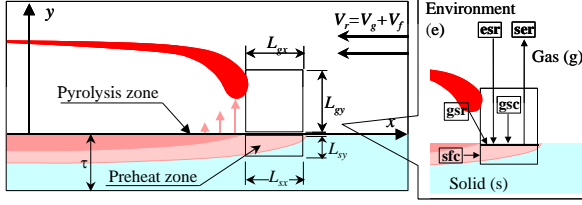


Fig. 4 Schematic of 2D flame for scale modeling.

$$V_f \rho_s c_s L_{sy} W (T_v - T_\infty) \sim \lambda_g \frac{T_f - T_v}{L_{gx}} L_{gy} W \quad (1)$$

この式から  $V_f$  を求めると、

$$V_{f,th} \sim \frac{\lambda_g}{\rho_s c_s \tau} F \quad \text{ここで } F = \frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \quad (2)$$

が得られる。この式は、いわゆる熱支配領域での火炎伝播速度  $V_{f,th}$  を表し、de Ris の式<sup>10)</sup>と同一である。一方、対向流速が小さくなると、予熱帯サイズが大きくなり固相予熱帯表面からのふく射伝熱が無視できなくなる。よって、いわゆる微小重力領域における熱バランスは式(3)のように書ける。

$$V_f \rho_s c_s L_{sy} W (T_v - T_\infty) + \varepsilon (1 - \alpha_{abs}) \sigma (T_v^4 - T_\infty^4) L_{gx} W \sim \lambda_g \frac{T_f - T_v}{L_{gx}} L_{gy} W \quad (3)$$

この式を無次元火炎伝播速度  $\eta \equiv V_f / V_{f,th}$  を用いて無次元化すると、

$$\eta + R_{rad} = 1 \quad \text{ここで } R_{rad} \sim \frac{\varepsilon (1 - \alpha_{abs}) \sigma (T_v^4 - T_\infty^4)}{\rho_g c_g V_r (T_f - T_v)} \quad (4)$$

という無次元式が得られる。この式より無次元ふく射損失パラメータ  $R_{rad}$  が 1 に近づくと  $\eta \rightarrow 0$  となり、これはふく射消炎を意味する。

一方、対向流速が大きい場合は、気相予熱帯中で反応が完結せずに吹き飛びが生じる。吹き飛び現象は、滞留時間と化学特性時間の比であるダムケラ数  $Da$  を用いて整理でき、

$$Da \equiv \frac{t_{res}}{t_{chem}} = \frac{L_g / V_r}{\rho_g / \dot{\omega}} \sim \frac{\alpha_g}{V_r^2} \rho_g Y_o A exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) \quad (5)$$

$Da$  が 1 に近づくと吹き飛びが生じる。一方で  $Da$  は単位質

量あたりの発熱量  $\Delta h_r$  を使い、以下のように変形できる。

$$Da \sim \frac{L_{gx} L_{gy} \dot{\omega} \Delta h_r}{\rho_g c_g L_{gy} V_r (T_f - T_v)} \quad (6)$$

気相火炎帯では、火炎帯温度分布の変曲点での温度を  $T_i$  としたときに、以下の式が成り立つが、

$$\rho_g c_g V_r (T_i - T_v) \sim \lambda_g \frac{T_f - T_i}{L_{gx}} \quad (7)$$

このとき

$$O\left(\frac{T_f - T_i}{T_i - T_v}\right) \sim 1 \quad (8)$$

であることに留意すると、

$$Da \sim \frac{L_{gx} L_{gy} \dot{\omega} \Delta h_r}{\lambda_g \frac{T_f - T_v}{L_{gx}} L_{gy}} \quad (9)$$

となり、この式より総発熱量の  $1/Da$  が気相での温度勾配維持のために使われる熱量とみなせることが分かる。そこで、 $Da$  数が十分大きい場合と比較して、固相側への伝熱量が  $(1 - 1/Da)$  倍に減少するというモデルを考えると、化学反応支配領域での熱バランス式は、

$$V_f \rho_s c_s L_{sy} W (T_v - T_\infty) \sim \left(1 - \frac{1}{Da}\right) \lambda_g \frac{T_f - T_v}{L_{gx}} L_{gy} W \quad (10)$$

となり、無次元化すると  $\eta + 1/Da = 1$  が得られる。これを式(4)と結合させることにより、

$$\eta + R_{rad} + \frac{1}{Da} = 1 \quad (11)$$

が得られ、この式が対向流速中に置かれた熱的に薄い固体試料の可燃限界を与える。

### 3. ポリメタクリル酸メチル樹脂 (PMMA) を試料とした場合のモデルの検証

スケール解析から得られた可燃限界を与える式(11)を検証するため、予熱帯に炭化物質を生じない (non-charring) 代表的なポリマー材である PMMA を試料として、対向流中における火炎伝播試験を航空機実験で行った結果と式(11)による予測値との比較を行った。実験に用いた PMMA 試料の寸法は、幅 2 cm、長さ 12 cm、厚さ 0.125 mm であり、熱的に十分薄いとみなすことができる。本モデルで

**Table 2** Properties of PMMA and ambient gas.

	PMMA
Density, $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1190
Specific heat, $c_s$ (kJ/Kg·K)	1.465
Vaporization temperature, $T_v$ (K)	670
Enthalpy of formation, $\Delta H_f$ (kJ/mol)	-348.7
Surface emissivity, $\epsilon$	1.0
Pre-exponential factor, $A$ (m <sup>3</sup> /kg·s)	$1.36 \times 10^9$
Activation energy, $E$ (J/mol)	$1.50 \times 10^5$

	$C_p$ [J/mol K]	$\Lambda_g$ [W/m K]	$\alpha_g$ [mm <sup>2</sup> /s]	$a_{abs}$
N <sub>2</sub>	30.47	0.0444	80.1	0.0
Ar	20.78	0.0312	82.7	0.0
CO <sub>2</sub>	48.94	0.0396	44.5	0.6

は、PMMA および雰囲気物の物性値は、Table 2 に示される値を用いた<sup>11)</sup>。

定量的な比較を行うために、まず本モデルで重要な無次元パラメータである  $Da$  と  $R_{rad}$  に対して、吹き飛び限界とふく射消炎を与えるための実験定数を、通常重力場における下方伝播での可燃限界試験、および落下塔を用いた低対向流速下でのふく射消炎試験結果から求めた。下方伝播試験においては酸素濃度 17.0% で可燃限界となること ( $LOC_{1g}=17\%$ )、また酸素濃度 21% の条件で対向流速を変化させて微小重力環境実験 (100 m 落下塔 : MGLAB) を行った結果では対向流速 3 cm/s で消炎することがわかっている。そこで、実験定数  $B_1$  および  $B_2$  を以下のように導入した。

$$Da = B_1 \frac{\alpha_g}{V_r^2} \rho_g Y_O A \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) \quad (12)$$

ここで  $B_1 = 0.131$

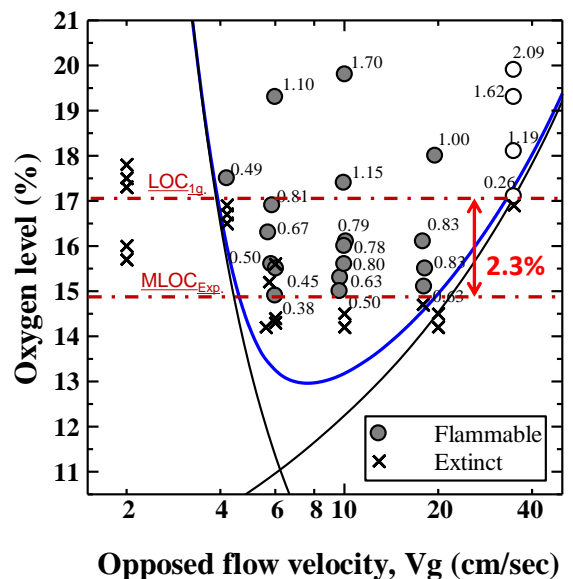
$$R_{rad} = B_2 \frac{\epsilon(1 - \alpha_{abs})\sigma(T_v^4 - T_\infty^4)}{\rho_g c_g V_r (T_f - T_v)} \quad (13)$$

ここで  $B_2 = 2.67$

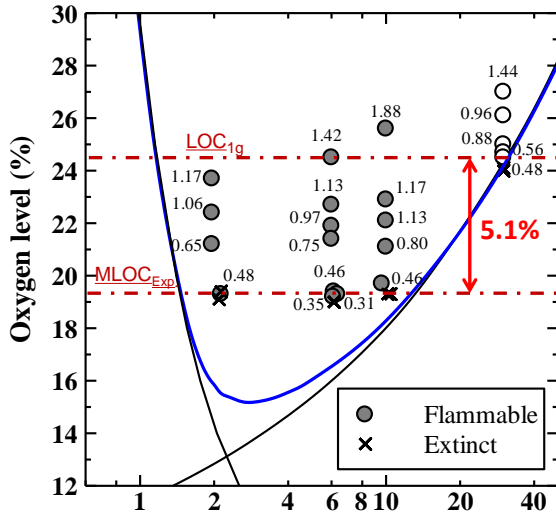
このとき火炎温度  $T_f$  は、それぞれの酸素濃度条件における断熱火炎温度を計算して与えている。

これらの実験定数と式(11)を用いて可燃限界を予測した結果と、航空機実験 (20s パラボリックフライト : DAS) で得られた結果を合わせて Fig. 5 に示す<sup>12)</sup>。図において黒丸は火炎伝播した条件、その横の数字は火炎伝播速度

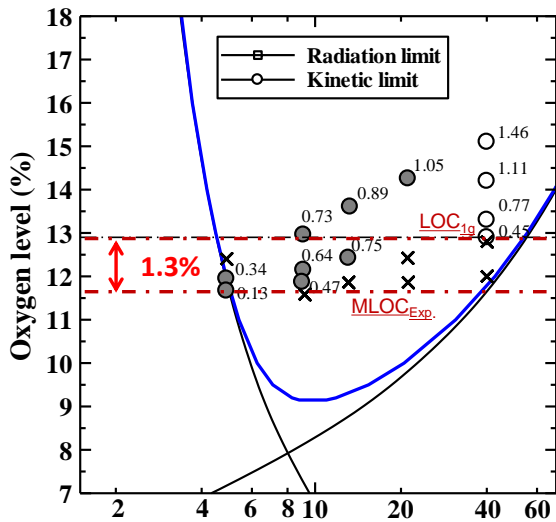
(mm/s) を表す。バツ印は着火しなかったか、微小重力環境中に消炎した条件を指す。また、白丸は地上における下方伝播試験で得られた結果を、自然対流の対向流速を 35cm/s と仮定して示したものである。PMMA 試料の下方伝播における限界酸素濃度 ( $LOC_{1g}$ ) は 17.0% であったが、微小重力環境では、対向流速が 10cm/s 付近の条件において、 $LOC_{1g}$  以下の酸素濃度でも火炎伝播していることがわかる。これは、前述した微小重力環境特有の現象であり、宇宙環境における火災の危険性を示すものである。航空機実験においては、最低限界酸素濃度 ( $MLOC_{Exp}$ ) として 14.7% という値が観測されている。一方、青線は式(11)で表される可燃限界であるが、伝播可能な条件を取り囲むように位置しており、モデル式が定量的に可燃限界を予測できていることがわかる。しかしながら、モデル式から算出される  $MLOC_{Predict}$  は 13.0% であり、実測値の 14.7% と比較するとやや過小評価した値となっている。この原因として、以下のことが考えられる。式(11)の可燃限界は、固相予熱帯における熱バランスが成立しなくなる条件、すなわち  $\eta = 0$  を消炎としているが、この基準は消炎条件としては、かなり厳しい条件であり、実際は消炎直前の火炎伝播速度は 0 ( $\eta = 0$ ) ではなく、 $\eta = 0.2 \sim 0.5$  程度に相当する速度を持っていることが示唆されている<sup>13,14)</sup>。これは、熱的なバランスは破綻していないが、反応速度の低下により気相中の火炎構造を維持できなくなることが要因と考えられる。このため、酸素濃度が低くなり火炎温度も低下する  $MLOC$  付近にお



**Fig. 5** Flammability map of PMMA sheet in N<sub>2</sub> balance condition.



a) Opposed flow velocity,  $V_g$  (cm/sec)



b) Opposed flow velocity,  $V_g$  (cm/s)

**Fig. 6** Flammability map of PMMA sheet in a)  $\text{CO}_2$  condition and b) Ar balance condition.

いては、この影響が強く現れるため、予測値が過小評価されたものになったと考えられる。しかしながら、本モデルによる差異は、火災安全上では安全側へのマージンとしてとらえることができるため、火災安全基準作成のためのツールとしては有効的な利用が期待される。

また、式(11)のモデルでは、対象とする試料がどの対向流速条件で最も火災伝播しやすいかを予測することができる。Figure 5では、予測された限界線で最も限界酸素濃度が低下する条件での対向流速 $V_{g,cr}$ は 8 cm/s となっているが、実験結果からはどの点で最も酸素濃度が低下するかを読み取ることは難しい。そこで、何条件かの酸素濃度に

**Table 3** LOC, MLOC and critical opposed flow velocity,  $V_{cr}$  for each balance gas.

Balance gas		$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$	Ar
LOC	Predicted	17.0%	24.0%	12.0%
	<b>Measured</b>	<b>17.0%</b>	<b>24.3%</b>	<b>12.9%</b>
MLOC	Predicted	13.0%	15.4%	9.2%
	<b>Measured</b>	<b>14.7%</b>	<b>19.2%</b>	<b>11.6%</b>
$\Delta\text{O}_2$	Predicted	-4%	-8.6%	-2.8%
	<b>Measured</b>	<b>-2.3%</b>	<b>-5.1%</b>	<b>-1.3%</b>
$V_{cr}$	Predicted	8cm/s	3cm/s	9cm/s
	<b>Measured</b>	<b>10cm/s</b>	<b>2~6cm/s</b>	<b>9cm/s</b>

対して、対向流速を変化させたときに火災伝播速度がどのように変化するか、計測された火災伝播速度から内分法で求めた結果、火災伝播速度が 10 cm/s 付近で極大となることがわかっており<sup>9)</sup>、これはモデル式から得られた予測値と比較的よく一致する。

次に、希釈ガスの種類を  $\text{CO}_2$  および Ar (それぞれの熱物性値は Table 2 参照) に変えて実験した結果に対して、同様の検討を行ったものを Fig. 6 および Table 3 に示す。雰囲気ガスの熱物性値が変わると、火災温度 $T_f$ にも大きな変化が生じるため、 $R_{rad}$ および $Da$ の両方に影響が現れ、モデルの検証にちょうど良い。これら各雰囲気条件での可燃限界予測値の算出においては、上述の  $\text{N}_2$  希釈条件で得られた実験定数 $B_1$ および $B_2$ をそのまま使っているが、それぞれの雰囲気条件における下方伝播試験での  $\text{LOC}_{1g}$  および微小重力環境における MLOC を比較的定量的に予測することができている。たとえば、 $\text{CO}_2$  希釈雰囲気においては、雰囲気ガスの比熱が高いため下方伝播火災を維持するためには 24.5%という比較的高い酸素濃度が必要である。しかしながら、微小重力環境になり対向流速度が低下すれば、 $\text{MLOC}=15.4\%$ と予測されており、 $\Delta\text{O}_2$  が非常に大きいことがわかる。実際には、前述のように予測値はやや過小評価であるため  $\text{MLOC}=19.2\%$ であったが、それでも  $\Delta\text{O}_2=-5.1\%$ と  $\text{N}_2$  希釈雰囲気と比べて大きな値をとることがわかる。また、非常に低周囲流速側でもロバストな火災伝播が観察されており、この傾向もモデルの予測と一致した。このような傾向を持つ材料・環境においては、JIS K 7201 のような地上試験の結果をそのまま宇宙環境で使用することが危険であることが理解できる。一方で、Ar 希釈雰囲気の場合は、 $\text{CO}_2$  希釈条件と逆の傾向を示し、 $\text{LOC}_{1g}$  は低いものの、 $\Delta\text{O}_2$  が小さく地上試験結果との乖離は小さ

い。このように、どのような状況で $\Delta O_2$ が大きくなるかを把握することが重要であることがわかる。

#### 4. 様々な材料に対する MLOC の推算

有人宇宙開発では様々な実用難燃材が用いられているが、これらの難燃性は NASA STD-6001B や JIS K 7201 で実証されており、一般には高い OI を有する材料を指す。しかしながら、CO<sub>2</sub> 希釈雰囲気中での PMMA の限界酸素濃度で示されたように、通常重力場で高い OI を示す材料は、 $\Delta O_2$  も高い傾向を示しやすいことが懸念される。これは、微小重力環境では対向流速の低下に従い、吹き飛びの条件が緩和され、より低い火炎温度の伝播が可能となるが、OI が高い材料では OI の低い材料に比べて、火炎温度低下が同じ程度と仮定した場合には  $\Delta O_2$  の絶対値が大きくなるためである。よって、いわゆる難燃材の宇宙環境における利用は注意が必要である。そこで、簡単な例として、PMMA 試料をベース燃料として、以下の 3 つのケースで OI が高い試料を模擬した場合で、微小重力環境における MLOC を検討する。

- (1) 材料の火炎温度が低く OI が高い
- (2) 一般的に反応速度が遅く OI が高い
- (3) 不活性化化学種などが発生し低温域での反応が阻害されるため OI が高い

これらの各要因に対し、例えばケース 1 では材料の反応熱が低い (標準生成エンタルピー $\Delta h_f$ が低い)、ケース 2 では前指数因子  $A$  が小さい、ケース 3 では活性化エネルギー  $E$  が大きい、などでモデル化できる可能性がある。ここでは、Table 1 で示される PMMA の物性値の中で、標準生成エンタルピー、前指数因子、活性化エネルギーを操作することで、仮想的に LOC<sub>1g</sub> が 29% の材料を作成し (NOMEX HT90-40 と同じ LOC<sub>1g</sub>)、この材料の可燃限界を表したものを Fig. 7 に示す。図中で青線はケース 1、赤線はケース 2、緑線はケース 3 をそれぞれ指す。火炎温度が低くなるケース 1 では  $R_{rad}$  および  $Da$  の両方に影響が現れ、 $\Delta O_2$  は 3 条件の中で最も小さいがそれでも 8% 程度ある。一方で、火炎温度が高く維持されるケース 2 では、対向流速低下による吹き飛び限界の緩和から  $\Delta O_2$  が非常に大きくなる。また、同じく火炎温度が高いケース 3 では、活性化エネルギーが大きいため低酸素条件での反応速度が大きく低下し、 $\Delta O_2$  はケース 1 とケース 2 の中間的な値をとる。この図

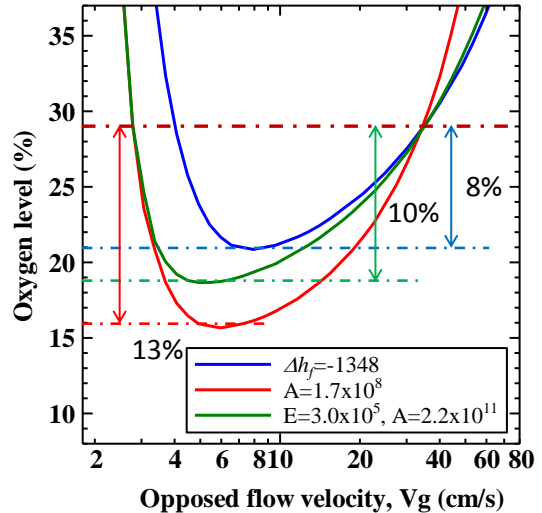
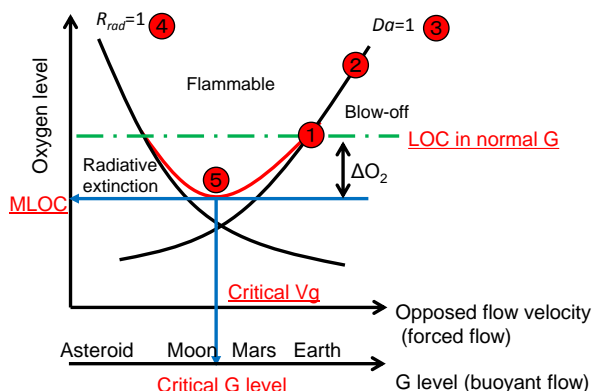


Fig. 7 Comparison of MLOC in each condition.

から明らかのように、下方伝播における LOC<sub>1g</sub> が同一の材料でも、酸素濃度に対する感度がそれぞれ異なり、MLOC および  $V_{g,cr}$  が大きく異なる可能性があることが分かる。このため、対象とする材料の熱物性値を定量的に把握することが推算には非常に重要である。

一方で、本解説では PMMA の消炎限界を Table 1 および Table 2 の熱物性値を用いて計算しているが、密度、比熱、熱分解温度、断熱火炎温度のように定量的なデータを入手しやすい、あるいは計測・計算しやすい数値に対して、吹き飛び限界を記述する前指数因子  $A$  および活性化エネルギー  $E$  は、いわゆる実験的な定数であり、様々な材料に対して、これらを文献等から入手することは難しいと思われる。つまり、吹き飛び消炎側の限界線の推定にはやや不確定さが残るといえる。そこで FLARE プロジェクト Gr. 1 では、JIS K 7201 に追加して計測する項目として、高速対向流中での吹き飛び限界の計測することで MLOC を求める手法を提案している (Fig. 8)。JIS K 7201 では先に述べたように 4 cm/s での対向流速中で下方伝播させるが、自然対流より大きい 60~100 cm/s の対向流速中での吹き飛び酸素濃度を 1~2 点加えて計測することにより、吹き飛び限界線を特定し、式(11)のモデルにより MLOC および  $V_{g,cr}$  を推算できることが期待される。比較的高速の対向流中での吹き飛びデータから中速領域の吹き飛び現象を外挿で記述できるかは、今後実験と検討が必要であるが、地上試験結果から微小重力環境での限界酸素濃度を求める手段として注目している。

1. Measure the LOC of the downward spread. (LOI may be used.)
2. Measure the LOC at a certain high opposed velocity,  $V_g=60\sim 100\text{cm/s}$
3. Draw blow-off limiting line. (Empirical A and E are obtained.)
4. Draw radiative extinction line with  $T_r$ ,  $T_v$  and other gas properties.
5. Draw the limiting line on which  $R_{rad}+1/Da=1$ .



**Fig. 8** Procedure for predicting MLOC and the critical opposed flow velocity by ground-based data.

## 5. まとめと今後の課題

ISS きぼう第3期重点化テーマ「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」(FLARE プロジェクト)の目的の1つである、宇宙環境における平板状試料の限界酸素濃度の推算に関しての解説を行った。有人宇宙活動における火災安全基準は、理想的には宇宙環境で実証的な燃焼試験を行うことが望ましいのであるが、実際問題としては地上で得られた試験結果を使って検討せざるを得ない。この時に、地上試験の結論をそのまま用いるのではなく、宇宙環境における特徴を踏まえて科学的な根拠から限界酸素濃度を推算し、安全基準に対してある程度の見積もりを出しておくことが、有人宇宙開発の進展加速に寄与すると考える。本解説で紹介したFLAREプロジェクトで開発中のモデルは、幾分乱暴な仮定も盛り込まれているが、上述の安全基準の見積もりを検討するうえで、地上試験でどのようなデータを揃える必要があるかを議論する便利なツールと考えている。今後の課題としては、多くの固体試料を用いて今回のモデルを検証するとともに、同方向流がある場合のモデルの構築も必要である。地上においては下方伝播(対向流条件)と上方伝播(同方向流条件)には現在酸素濃度に大きな差が見られる一方で、まだ報告例は少ないが、航空機実験の結果では、両条件において最低限界酸素濃度に大きな違いがないことも観察されている。このことは、比較的低周囲流速の消炎近傍条件においては、火炎長さが短くなることにより、周囲流の

方向の影響が現れにくいことを示唆しているかもしれない。また、最終的にはJIS K 7201でのOIとリンクさせるために、試料厚みが限界酸素濃度に与える影響のモデル化も求められる。FLAREプロジェクトが直接目指している目標は宇宙環境における火災安全基準の策定であるが、展開されたモデルは閉鎖空間や狭隘空間、低圧力環境での火災や火災伝播にも応用できる可能性がある。様々な環境における火災安全に対しても、多くの新しい知見が得られることを期待している。

## 謝辞

本研究内容は、ISS きぼう第3期重点化テーマ「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」(FLARE プロジェクト)の一環として行われた。関係各機関および実験を担当した本学大学院生の坪井寛大君、丸田圭介君に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) NASA-STD-6001 B: Flammability, Offgassing, and Compatibility Requirements and Test Procedures (2011).
- 2) A. Hosogai, K. Wakatsuki, and Y. Nakamura: J. Combustion Society of Japan **56** (2014) 47 (in Japanese).
- 3) K.R. Sacksteder and J.S. Tien: Proc. Combust. Inst. **25** (1994) 1685.
- 4) A. Kumar, H.Y. Shih and J.S. Tien: Combustion and Flame, **132** (2003) 667.
- 5) S.L. Olson and P.V. Ferkul: Evaluating Materials Flammability in Microgravity and Martian Gravity Compared to NASA's Normal Gravity Materials Flammability Testing, 42nd International Conference on Environmental Systems (ICES), 15-19 July 2012, San Diego, CA.
- 6) JIS K 7201-1: Plastics 'Determination of burning behaviour by oxygen index', 1999 (in Japanese).
- 7) S. Bhattacharjee, J. West and R.A. Altenkirch: Proc. Combust. Inst., **26** (1996) 1477.
- 8) S. Bhattacharjee, R. Ayala, K. Wakai and S. Takahashi: Proc. Combustion Inst., **30** (2005), 2279.
- 9) S. Takahashi, K. Tsuboi, T. Ihara and S. Bhattacharjee: Int. J. Microrgravity Sci. Appl., **31** (2014) 22 (in Japanese).
- 10) J.N. de Ris, Proc. Combust. Inst., **12** (1969) 241.
- 11) A.C. Fernandez-Pello, S.R. Ray and I. Glassman: Proc. Combust. Inst., **18** (1981) 579.
- 12) S. Takahashi, T. Ebisawa, S. Bhattacharjee and T. Ihara: Proc. Combustion Inst., **35** (2014) 2535.
- 13) S. Bhattacharjee, K. Wakai and S. Takahashi: Combust. and Flame, **132** (2003) 523.
- 14) S.L. Olson and F.J. Miller: Proc. Combustion Inst., **32** (2009) 2445.