

熱的に薄い固体試料上の火炎伝播に及ぼす試料幅と雰囲気圧力の影響

高橋 周平*, 関 泰典*, 若井 和憲*, 井原 禎貴*, Subrata BHATTACHARJEE**

Effect of Sample-Width and Ambient-Pressure on Flame Spread over a Thermally Thin Material
Shuhei TAKAHASHI*, Yasunori SEKI*, Kazunori WAKAI*, Tadayoshi IHARA*, Subrata BHATTACHARJEE**

*Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu, 501-1193, Japan

**San Diego State University, 5300 Campanile Drive, San Diego, CA 92182-1323, USA

Abstract: The flame spread over a thin PMMA film is measured in microgravity condition with varying the ambient flow velocity, the diluent gas such as N₂, CO₂, Ar, and He, the ambient pressure and the sample width in order to find out the impact of these factors. The result shows that the flame spread near a quiescent condition is suppressed due to mainly two heat losses; one is a radiative loss and the other is a conductive heat loss sideward. The scale analysis is very helpful to decouple these effects.

Key words: Flame spread, Extinction, Suppression, Scale analysis, PMMA

1. 緒言

宇宙ステーションのような微小重力環境でかつ密閉された場所での有人活動において、火災の発生は脅威であり、いかに火災防止や消火対策をするかが重要である。

我々はこれまで、酸素濃度、周囲流速、雰囲気熱物性値、試料形状をパラメータとして微小重力環境での燃焼実験を行い、火炎伝播速度を計測する一方、このように複雑現象を、スケール解析を通して単純化し、各因子の火炎伝播に与えるインパクトを見積もってきた^[1,2]。本研究では、微小重力環境において対向流がある条件での火炎伝播速度を実験的に測定し、それらの結果とスケール解析での予想を比較することで、微小重力環境での火炎伝播速度に影響を及ぼしている因子の影響の度合いを調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験では、Fig. 1 に示されるような密閉式の小型風洞燃焼器を用いて後述の各種パラメータを変化させ、微小重力環境における固体試料上の火炎伝播速度を測定した。風洞は、長さ37cm、幅12cm、高さ24cmで、回転数を制御できるモーターとファンを用いて、風洞内に任意の低周囲流速(0~280mm/s)を作ることが出来る。着火はニクロム線を電気加熱することによって行う。固体試料は、大きさは長さ6cm、厚さ125 μ mのPMMAを用いる。また、試料幅の影響を調べるため、幅5mm、10mm、20mmの3種類で実験を行った。本実験では、雰囲気酸素濃度を30%に設定し、熱物性値を変えるためにN₂、CO₂、Ar、Heの4種類をバランスガスとした混合ガスを作り、風洞内雰囲気ガスとした(Table. 1 参照)。

パラメータとして周囲流速、バランスガスの種類、雰囲気圧力および試料幅を変化させ、CCDカメラで火炎伝播を撮影することで伝播速度を測定し、それぞれの因子が火炎伝播に与えるインパクトを評価する。微小重力環境は、日本無重量総合研究所の4.5秒落下塔、およびダイヤモンドエアサービス社の20秒航空機実験(G-II)により得た。

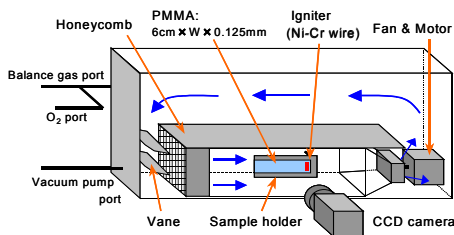


Fig. 1 Experimental apparatus for drop experiment.

	定圧比熱 Cp[J/mol.K]	熱伝導率 λ_g [W/m.K]	熱拡散率 α_g [m ² /sec]	密度 ρ [kg/m ³]	吸収波長帯 [μ m]
N ₂ -O ₂	29.2	0.0251	21.2	1.18	N/A
CO ₂ -O ₂	34.9	0.0184	13.2	1.61	4.4
Ar-O ₂	23.4	0.0196	20.3	1.51	N/A
He-O ₂	23.4	0.0506	58.7	0.22	N/A

Table. 1 Properties of ambient gas at 30% O₂ level.

3. スケール解析

火炎周りのエネルギーバランスを考える際に、気相予熱帯、および固相予熱帯のスケールを Fig. 2 のような単純化されたスキームを用いて考える^[3]。

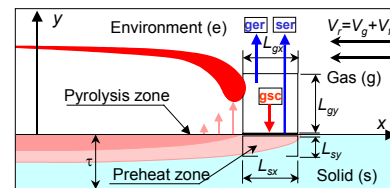


Fig. 2 Schematic of flame structure for scale analysis.

Fig. 2 に示すような検査体積を固相および気相中に考えて、固相を予熱する熱量と予熱帯から周囲への熱損失量および気相からの熱伝導量のバランス式は以下のように表される。

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

ここで、 q_{loss} に相当するものとして、固相予熱帯からのふく射による熱損失 q_{rad} と、気相予熱帯の両サイドからの熱伝導による熱損失 q_{side} を考えると、 q_{loss} は以下の式で表される。

$$q_{loss} = q_{rad} + q_{side} = \varepsilon(1 - a_{abs}) \sigma (T_v^4 - T_\infty^4) L_{sx} W + 2 \lambda_g \frac{(T_f - T_\infty)}{W/2} L_{gx} L_{gy} \quad \text{Eq. 2}$$

また、熱的に薄い燃料に関して、“熱支配領域”における火炎伝播速度 $V_{f,th}$ は以下のように表される^[4]。

$$V_{f,th} \sim \frac{\lambda_g}{\rho_s c_s \tau} \frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \quad \text{Eq. 3}$$

ここで、Eq. 3における $V_{f,th}$ を用いて、Eq. 1の V_f を $\eta = V_f / V_{f,th}$ と無次元化して、Eq. 1を書き直すと

$$\eta + R_{rad} + R_{side} = 1 \quad \text{Eq. 4}$$

という単純な式に帰着する。ここで、 R_{rad} および R_{side} は以下の式で表される。

$$R_{rad} = \frac{\varepsilon(1 - a_{abs}) \sigma (T_v^4 - T_\infty^4)}{\rho_s c_s V_f (T_f - T_\infty)} \propto (1 - a_{abs}) \frac{1}{V_f P} \quad \text{Eq. 5}$$

$$R_{side} = 4 \left(\frac{\alpha_g}{V_f W} \right)^2 \frac{T_f - T_\infty}{T_f - T_v} \propto \alpha_g^2 \frac{1}{W^2 V_f^2} \quad \text{Eq. 6}$$

この2つの無次元数の物理的な意味は、火炎伝播に必要な固相予熱帯加熱量に対して、それぞれ固相予熱帯からふく射により散逸していくエネルギー、お

よび気相予熱帯両サイドからの熱伝導により散逸していくエネルギーの比である。 R_{rad} および R_{side} とも、分母に火炎と周囲雰囲気との相対速度 V_r を含んでいるため、周囲流速が小さくなる微小重力環境においてその影響が大きくなることが予想できる。これは、周囲流速の低下に伴って、予熱帯サイズが増大することが原因である。

R_{rad} の効果を詳しく見てみると、ふく射で放射されるエネルギーのうち、 a_{abs} は気相予熱帯で回収される。PMMAの気化温度である650~700Kではふく射エネルギーの波長分布では4.1~4.4 μ m付近に最大ピークを持つため、 CO_2 のように4.4 μ m付近の赤外域に強い吸収のあるガスをバランスガスとして用いた場合、再吸収の影響が大きいことが予想される。また雰囲気圧力 P に対しては、 P^{-1} で損失が増大することがわかる。

一方で R_{side} を見ると、試料幅 W が小さいほど、あるいは温度拡散率 α_g が大きいほど、つまり雰囲気圧力 P が低いほどその影響が強くなることがわかる。また、ふく射損失と異なり、影響が V_r^{-2} で現れるため、ある周囲流速を境に急激に影響が顕在化することが予想される。この傾向は、試料幅 W および雰囲気圧力 P に関しても同様で、それぞれ W^{-2} 、 P^{-2} で影響することがわかる。

このように R_{rad} 、 R_{side} の効果は、周囲流速の低下にしたがって大きく現れる傾向があるが、それらの効果が顕在化する周囲流速は、雰囲気ガスの熱物性値および圧力によりかなり違いがあると予想される。

4. 実験結果および考察

微小重力環境実験の結果をFig. 3, 4に示す。これらの図から、全てのバランスガスにおいて、周囲流速の低下にしたがって伝播速度も低下していることがわかる。また、バランスガスの種類によって試料幅および雰囲気圧力が伝播速度に及ぼす影響の度合いが異なることがわかる。

N_2-O_2 、 $Ar-O_2$ の条件においては、試料幅を5mm, 10mm, 20mmと変化させたときの伝播速度を比較した場合、幅5mmでやや低下する以外は影響がほとんど見られなかった。よって、伝播速度の低下は、 R_{rad} の影響が支配的であると予想される。

一方で、 $He-O_2$ の条件においては、試料幅が10mm, 20mmの場合には火炎伝播が確認できたが、5mmの

場合には火炎伝播が確認できなかった。また、火炎伝播が確認できた10mm, 20mmの条件では、ある周囲流速を境に伝播速度が急激に低下していることから、伝播抑制は R_{side} が支配的であると予想される。

CO_2-O_2 の条件においては、試料幅を5mm, 10mm, 20mmと変化させたときの伝播速度を比較した場合、幅5mmでやや低下する以外は影響がほとんど見られなかった。しかし、周囲流速が低下した場合、他のバランスガスの条件とは異なり、伝播速度の低下は急激ではないことから、 R_{rad} 、 R_{side} の大きさは、他のバランスガスの条件より小さいと予想される^[5]。

雰囲気圧力の影響は試料幅の影響のように顕著に現れないが、雰囲気圧力を100kPaから50kPaへ変化させることで、伝播速度を半分程度まで低下させている。これは、雰囲気圧力の低下に伴う温度拡散率の増大と試料幅の減少が相乗し、 R_{side} を急増させたためと考えられる。

5. 結論

微小重力環境における有限な幅を有する試料上の火炎伝播は、主にふく射損失と幅方向への熱伝導損失という2つの熱的な要因により、対向流速の低下とともに抑制される。また、ふく射損失と幅方向の損失のどちらが主要因となるかは、試料幅、雰囲気圧力、雰囲気ガスの熱物性値により変化する。

謝辞

本研究は、日本宇宙フォーラムの地上公募研究の一環として行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

1. S.Takahashi, T.Nagumo, K.Wakai, and S.Bhattacharjee, JSME International Journal B, 43, pp. 556-562, 2000.
2. S. Bhattacharjee, K. Wakai, and S. Takahashi, Combust. Flame, 132, pp. 523-532, 2003.
3. S. Bhattacharjee, J. West, S. Dockter, Combust. Flame, 104, pp. 66-80, 1996.
4. J. N. de Ris, Proc. Combust. Inst., 12, pp. 241-255, 1969.
5. S. Takahashi, S. Bhattacharjee, T. Ihara, and K. Wakai, 日本マイクログラビティ応用学会誌, 24, pp.225-230, 2007.

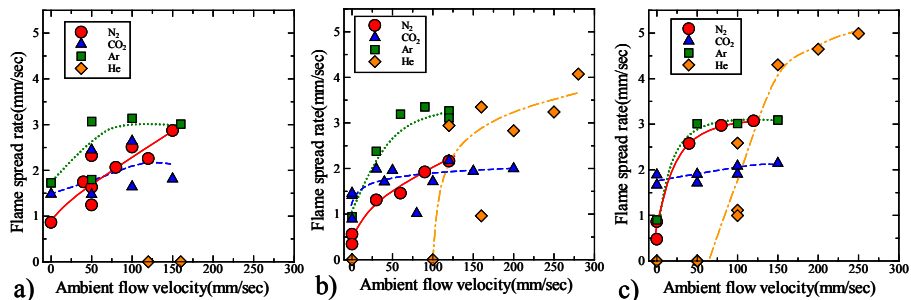


Fig. 3 Flame spread rate with varying ambient flow velocity in microgravity; a) at $W=5$ mm, b) at $W=10$ mm, c) at $W=20$ mm. The ambient pressure is 100kPa and the O_2 level is 30%.

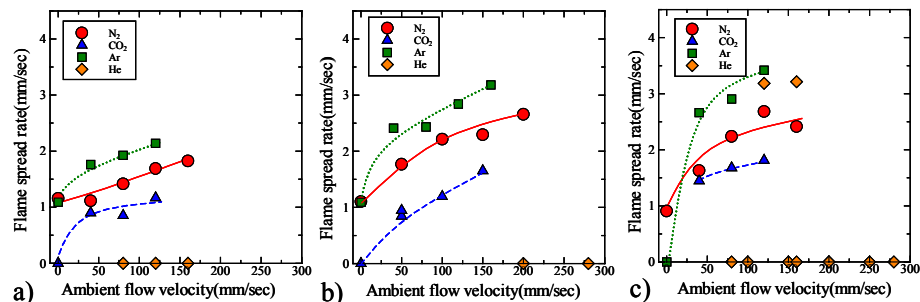


Fig. 4 Flame spread rate with varying ambient flow velocity in microgravity; a) at $W=5$ mm, b) at $W=10$ mm, c) at $W=20$ mm. The ambient pressure is 50kPa and the O_2 level is 30%.