

微小重力環境での熱的に薄い可燃性固体の燃え拡がり限界酸素濃度

弘前大学 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 八戸工業大学 工藤祐嗣

Oxygen Concentration Limits for Flame Spread over Thermally Thin Combustible Solid in Microgravity Environment

TORIKAI, Hiroyuki¹, ITO, Akihiko¹, KUDO, Yuji²

¹ Hirosaki University, 3 Bunkyo, Hirosaki, 036-8561, Japan, ² Hachinohe Institute of Technology, 88-1 Obiraki, Myou, Hatinohe, 031-8501, Japan

E-Mail: torikai@cc.hirosaki-u.ac.jp

Abstract: The relationship between the oxygen concentration limit for spreading flame over thermally thin combustible solid under microgravity condition and the opposed flow velocity has been clarified experimentally. The oxygen concentration limit for flame spread indicates the critical oxygen concentration, below which any flame can not spread over a combustible solid. The graph of the oxygen concentration limits for microgravity flame spread showed a V-shaped curve for variation of the opposed flow velocity.

Key words: Flame spread, Thermally thin combustible solid, Oxygen concentration limit, Space fire

1. はじめに

現在、国際宇宙ステーション等による宇宙環境の利用が進められている。その過程において火災等の事故が起き人命が失われた場合、宇宙開発計画の再考と停滞が避けられなくなる。そのため宇宙環境利用の推進と伴にその安全性確保が重要である。

通常重力場では可燃性固体上を伝播する拡散火災の反応帯への酸素供給は、燃焼反応と自然対流によって生じる火炎帯内の濃度勾配による物質拡散で行われる。しかし微小重力場では自然対流が無く、または強制対流も無ければ、火炎反応帯への酸素供給は燃焼反応による濃度勾配で生じる物質拡散だけで行われる。そのため宇宙では地上に比べて火災への酸素供給量が顕著に減少し、火災の燃え拡がり速度も減少する。このように微小重力場では燃焼反応は抑制され消炎が地上に比べ容易となる可能性がある。しかし自然対流が無く火炎へ流入する気流流速が減少することは、火炎の吹飛びをも抑制するため通常重力場よりも消炎し難くなる可能性もある。

可燃物の火災安全性を評価する1つの指標として燃え拡がり限界酸素濃度がある。これは可燃性固体が燃焼を継続できなくなる限界の酸素濃度を意味し、その値が小さい材料ほど危険度が増す。そこで本研究は、宇宙火災つまり微小重力環境で発生した火災を安全かつ確実に消火する方法の確立を目指して、微小重力場で熱的に薄い可燃性固体上に形成された火災の燃え拡がり限界酸素濃度と酸化剤気流流速との関係について明らかにする。本報ではその微小重力実験の結果について報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 落下実験用風洞装置

日本無重量総合研究所で落下実験を行い 10^{-5} Gの微小重力環境を約4.5秒間得た。落下カプセルに図1に示す風洞装置を搭載した。風洞はアクリル製で高さ70 mm×幅70 mmの流路断面と、長さ100 mmの整流部と長さ300 mmのテストセクションを有する。また風洞は2つのポンプを持つ。低酸素条件の燃え拡がり限界測定では、一方のポンプに落下前の火炎形成のために通常重力場の燃え拡がり限界より大きな酸素濃度の気体（例えば空気）を、初期ガス

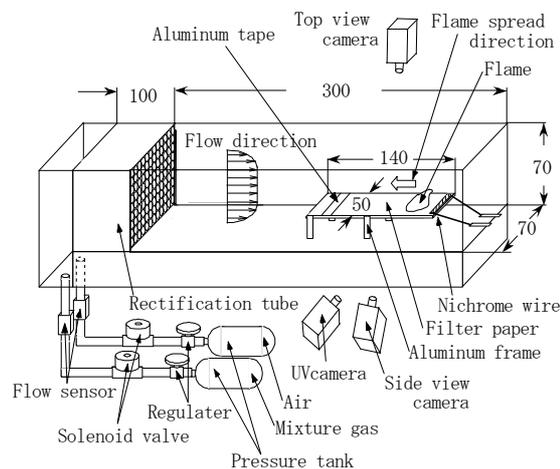


Fig.1 Experimental apparatus

として充填して風洞へ流した。他方のポンプには落下後、微小重力場の形成と同時に風洞内を低酸素条件とするために初期ガスよりも酸素濃度を減少させた気体（ここでは消火ガスと呼ぶ）を充填して風洞へ流した。空気より低酸素の消火ガスは空気に窒素を加えて形成した。また空気より高酸素のガスは空気に酸素を加えて形成した。ただし、空気よりも高酸素の落下実験では、初期ガスから目的とする高酸素ガスを風洞に供給し、重力変化に伴う酸素濃度の切り替えを行わなかった。ガスの切り替えを行う場合、各ポンプに備えられた電磁弁の開閉を制御することにより行った。

2.2 可燃性固体試料

火災から未燃固体への熱輸送が主に気相で行われる熱的に薄い可燃性固体としてろ紙（アドバンテック No.131, 厚さ 0.25 mm, 密度 560 kg/m^3 ）を使用した。ろ紙寸法は幅 50 mm×長さ 140 mm と幅 25 mm×長さ 140 mm の 2 つを使用した。低流速条件では落下前の風洞のガス置換量と試料からの燃焼ガス発生量とを考慮し、幅 25 mm の試料を使用し風洞内の酸素濃度が設定値となるようにした。ろ紙は張力をかけアルミ製ホルダに取り付け風洞に固定した。ろ紙上流端にはアルミテープを貼り、そこに火

炎が到達すると自己消炎するようにした。着火はニクロム線の通電加熱で行った。火炎は伝播方向と周囲気流との向きが相対する対向流火炎伝播とした。風洞には3台のビデオカメラを設置し、この映像から消炎の判断を行った。

2.3 燃え拡がり限界酸素濃度の測定

落下実験で得られる微小重力環境は約4.5秒間なので、本研究では微小重力場において4秒以内で消炎した条件を燃え拡がり限界外と定めた。ただし時間制限がない場合、通常重力での燃え拡がり限界酸素濃度は約17.5%であった[1],[2]。実験条件は酸素濃度6~40%そして気流流速0.01~0.1 m/sの範囲で設定した。一般に、通常重力では自然対流を取り除けず火炎では0.1 m/s以上の対流が常に存在する。そのため0.1 m/s未満での燃焼実験は微小重力場でしか達成できない。

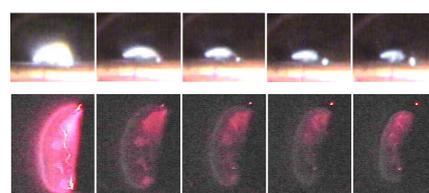
3. 実験結果および考察

図2(a), (b)に重力変化と同時に風洞内の流れを通常重力場の燃え拡がり限界以下の酸素濃度を有する気流へと変化させた場合に得られた火炎の連続画像を示す。どちらの条件の火炎も上方・側方から見た火炎形状は緩やかな丸みを帯びている。そして図2(a)では火炎が4秒以上伝播しつづけていることから燃え拡がり限界内の条件と判断できる。他方、図2(b)では火炎面積が時間経過と共に急激に減少し、4秒で火炎が消滅しており、この条件は燃え拡がり限界外といえる。このように各酸素濃度・流速条件で火炎が消炎するかどうかを調べ、グラフにプロットした結果を図3に示す。横軸は気流速度、縦軸は酸素濃度である。この図から、微小重力環境における紙の燃え拡がり限界酸素濃度が図中の実線として得られ、その限界値は気流速度の増加に対して下に凸のV字曲線を描くことがわかる。また、その燃え拡がり限界酸素濃度の最小値を示す気流流速は0.05 m/sである。流速0.05 m/s以上の条件では、流速増加と共に限界酸素濃度が上昇する。これは流速増加つまり酸化剤供給量の増加に対して、それを消費するための反応速度の増加が燃焼継続に必要となり、その結果、限界酸素濃度が増加したと考えられる。またこの限界酸素濃度の値は、先に示した通常重力場の限界酸素濃度の値に比べて小さく、微小重力場では火炎が消炎しにくくなっていることを示している。他方、0.05 m/sより小さい流速範囲では、流速減少に対して限界酸素濃度が急増し、火炎が高酸素条件でも容易に消炎することを示している。これは流速減少により酸素供給量が低下し、また同時に燃焼ガスの火炎外への排出量も低下するため燃焼ガスが不活性ガスとして火炎付近に滞留することになる。その結果、0.05 m/sから流速が減少するほど、火炎が消炎し易くなり酸素濃度21%以上の高酸素条件でも消炎が生じたと考えられる。この対向気流速度の変化に対して、燃え拡がり限界酸素濃度が最小値をとる傾向は、 T^{ien} らによる数値解析結果[3]と同様である。また、対向気流速度が火炎近傍の物質の拡散速度のオーダーに近づくと、通常重力場より微小重力場の方が消炎は容易になると考えられる。

4. まとめ

微小重力環境下でろ紙を燃焼させ、対向気流流速を変化させて燃え拡がり限界酸素濃度の測定を行った。その結果、燃え拡がり限界酸素濃度の値は気流流速の増加に対して下に凸のV字曲線を描くことが

← Direction of flame spread



(a) Flame spreading, flow velocity $U=0.1$ m/s, oxygen concentration $X_{O_2}=15$ %



(b) No flame spreading, flow velocity $U=0.03$ m/s, oxygen concentration $X_{O_2}=8$ %

Fig. 2 Flame spreading under micro gravity condition

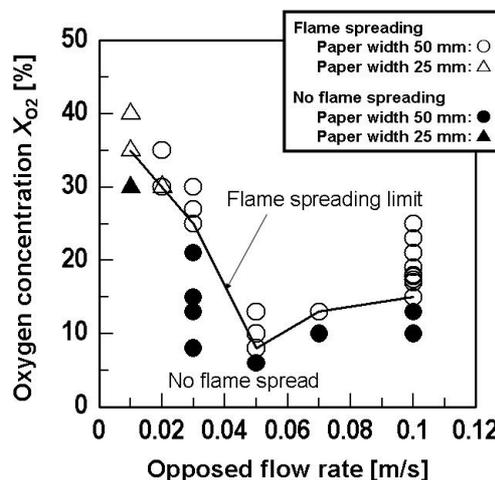


Fig. 3 Oxygen concentration limit for flame spreading under micro-gravity condition

実験的に明らかになった。燃え拡がり限界が最小値を示す流速0.05 m/sより小さい範囲では、流速の減少に伴い急激に燃え拡がり限界酸素濃度は増加し、通常重力場に比べ消炎が容易となることがわかった。また0.05 m/s以上の流速では、流速の増加に伴い燃え拡がり限界が増加し、その値は常に通常重力場での限界酸素濃度の値を下回った。そのため、0.05 m/s以上の流速範囲では、通常重力場に比べ消炎がより困難となることがわかった。

本研究は科研費基盤研究(B) (19310103), 宇宙環境利用科学委員会研究班 WG の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1. 佐藤 一宏, 日本火災学会 平成 18 年度研究発表会概要集, pp.150-151 (2007).
2. 風晴勇太, 日本機械学会 東北学生会 第 37 回卒業研究発表講演会講演論文集, pp.81-82 (2007).
3. T^{ien} , Combustion and Flame, 65, pp.31-34 (1986)