

## ■原著論文/ORIGINAL PAPER■

# 高温・減酸素対向流中における薄い可燃性固体の燃え拡がりとその限界

## Flame Spread and Its Limitation along a Thermally Thin Combustible Solid in a High-temperature / Low-oxygen Concentration Opposed-Gas Flow

伊藤 昭彦\*・鳥飼 宏之・小山 紘平

ITO, Akihiko\*, TORIKAI, Hiroyuki, and KOYAMA, Kohei

弘前大学大学院理工学研究科 〒036-8561 弘前市文京町3  
Hirosaki University, 3 Bunkyo-cho, Hirosaki, Aomori 036-8561, Japan

2013年5月2日受付; 2013年6月21日受理 / Received 2 May, 2013; Accepted 21 June, 2013

**Abstract** : This paper discusses the flame spread and its limitation along a thermally thin combustible solid (a sheet of filter paper) in a high-temperature / low-oxygen concentration opposed-gas flow, based on experimental investigations. The leading flame length along a solid surface for both horizontal flame spread and vertically downward flame spread decreases with decreasing oxygen concentration. Especially the flame becomes to be round shape in high-temperature/low-oxygen concentration gas flow, which is similar to the flame shape in microgravity condition. The flame leading edge retreats and extinction occurs at some oxygen concentration. We defined this oxygen concentration LOC (Low Oxygen Concentration), as the flame spread limitation. The flame spread rate near the LOC is close to that in microgravity with normal air condition. To clarify the effect of buoyant force on flame spread, the Rayleigh number for spreading flame was examined. The Rayleigh number decreases with decreasing oxygen concentration, and it is less than the critical Rayleigh number near the LOC. The relation between the non-dimensional flame spread rate,  $V$ , and the Damköhler number,  $Da$  was also examined. The  $V$  both of normal gravity and microgravity decreases with decreasing the  $Da$ , and reaches to the flame spread limitation at some  $Da$ . This paper suggests that it may be possible to simulate the flame spread under microgravity environment by using high-temperature / low-oxygen gas flow under normal gravity.

**Key Words** : Fire Safety, Flame spread, Thin combustible solid, Low oxygen concentration, Microgravity environment

### 1. 緒言

将来の宇宙環境利用の推進にあたり、微小重力空間あるいは月、火星などの低重力空間における火災安全性の確保は重要な課題である。今後、宇宙環境に持ち込まれる固体材料は益々増大するものと予想されるが、これらの多彩な材料の燃焼特性、すなわち、着火、燃え拡がりおよび消炎を明確にし、その安全性を微小重力環境下で評価することは容易ではない。

これまでに、落下塔や航空機による微小重力環境下での紙やPMMA(ポリメチルメタクリレート)などの可燃性固体表面上燃え拡がり[1-17]や、可燃物に被覆された電線に沿っての燃え拡がり[18-21]について研究報告がなされている。通常重力場と微小重力場での燃え拡がりの相違は主に浮力によって誘起される火炎面への流れの相違による。すなわち、図1(a)のモデル図に示すように、微小重力環境下

では強制的な流れが無い、あるいはこれが十分に小さい場合は、火炎への酸素の供給は主に拡散に依存する。このため、燃え拡がり火炎の形状は、先端部および後端部も含め、全体的に丸みをおびた青炎となる。一方、図1(b)で示した通常重力場では、燃え拡がり火炎は浮力による対流の影響で火炎後端が上方に伸び上がった形状となる。火炎前方では上昇気流によって誘起された流れが生じ、これにより火炎前方への酸素供給量は拡散のみの場合に比べて増加する。すなわち、電線のように中心に熱伝導体を含む場合を除き、可燃物に沿った燃え拡がりは通常重力環境の方が微小重力環境のそれよりも速いが、両者の差はおもに進行する火炎先端部への酸素供給量の差によるものと推察される。そこで、著者らは通常重力環境下で減酸素環境を用い、火炎に供給する酸素を強制的に制限することで、微小重力環境下での燃え拡がりを模擬できるのではないかと考えた[22]。しかしながら、気流の酸素濃度を低下させると、火炎は小さくなり熱損失の割合が大きくなること、気相の反応が抑制され火炎温度が低下すること、などが影響し燃え

\* Corresponding author. E-mail: atio@cc.hirosaki-u.ac.jp

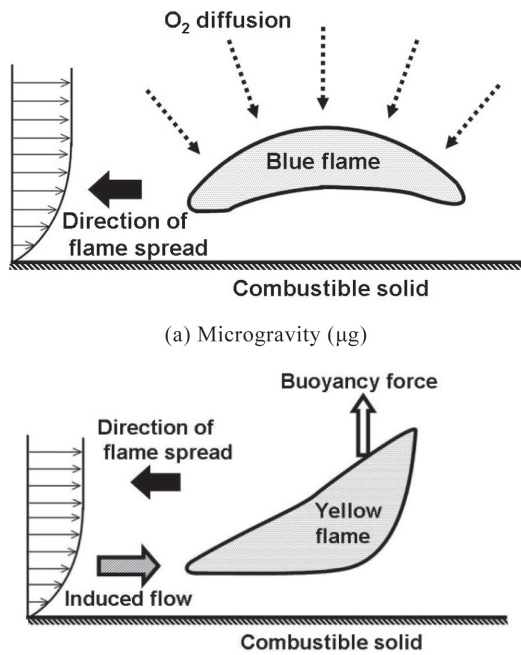


Fig.1 Flame spread model under microgravity and normal gravity conditions

拡がり火炎は不安定となり易い。そこで減酸素気流を高温化することで、熱損失を低減し、火炎を安定に伝播させることができるとともに、火炎と周囲雰囲気との密度差を減少させることで浮力の低減化を図ることが期待できる[23-24]。

以上より、本研究では高温・減酸素気流を用いて微小重力環境での燃え拡がりを模擬することを試みた。本報では、対向気流中で熱的に薄い固体の燃え拡がりとその限界を研究対象とし、気流の速度、酸素濃度を変化させるとともに、重力に対する燃え拡がり方向も変化させて実験を行い、微小重力環境の結果と比較した。さらに、Rayleigh数により燃え拡がり火炎に作用する浮力の影響について検討を加えるとともに、Damköhler数を用いて高温・減酸素環境と微小重力環境との燃え拡がりの相似性について考察した。

## 記号

$A$	頻度因子 [-]
$a$	熱拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$C$	定数 (9 式) [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$C_p$	定圧比熱 [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]
$Da$	Damköhler 数 [-]
$E$	活性化エネルギー [ $\text{J}/\text{mol}$ ]
$Gr$	Grashof 数 [-]
$g$	重力加速度 [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
$H$	固体試料の厚さ [m]
$h$	消炎距離 [m]
$L$	燃え拡がり方向の火炎長さ [m]
$n$	圧力指数 [-]

$P$	圧力 [Pa]
$Pe$	Peclet 数 [-]
$Pr$	Prandtl 数 [-]
$q$	熱流束 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$Ra$	Rayleigh 数 [-]
$Re$	Reynolds 数 [-]
$T$	温度 [K]
$T_a$	気流温度 [K]
$T_f$	火炎温度 [K]
$T_p$	固体試料の熱分解温度 [K]
$t$	時間 [s]
$U$	気流速度 [m/s]
$V_f$	燃え拡がり速度 [m/s]
$V$	無次元燃え拡がり速度 (10 式) [-]
$X_F$	燃料のモル分率 [-]
$X_{O_2}$	酸素のモル分率 [-]
$\beta$	体積膨張係数 [ $1/\text{K}$ ]
$\lambda$	熱伝導率 [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]
$\mu$	粘性係数 [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]
$\nu$	動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\rho$	密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

## Subscripts

$g$	気相
$s$	固相

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略は図 2(a) に示すとおりであり、気体の混合装置、気体の加熱装置および燃え拡がり実験用風洞より構成されている。まず、減酸素気流を形成するため、ガス混合器 (コフロク PMG-1) を用いて空気に窒素を加え、酸素濃度を調整した。その際、酸素濃度は酸素濃度計 (島津製作所 POT-101) を用いて測定した。また、酸素濃度計にはデジタルマルチメータ (CUSTOM 5000E) を接続することでデジタル表示させた。酸素濃度の調整を行った気流を、管状電気炉 (ヨーコー KTF-040N) 内に設けた加熱された流路に通し、高温・減酸素気流とした。また、電気炉内の流路内部にはセラミックボールを詰め、気流の高温化と空気 / 窒素の混合の効率化を行っている。風洞の入口部には整流格子を設け、流れを整えた。気流温度の測定には整流格子の上流に熱電対を設置し、データロガ (横河電機 モバイルコーダ MV100) により温度を記録した。また、燃え拡がり方向を水平、垂直下方に変化させるため、風洞の角度を変化させられるようにした。

図 2(b) に燃え拡がり実験装置を含めた風洞の詳細を示す。耐熱用 Pyrex 板 (厚さ 2 mm) により、高さ 30 mm×幅 60 mm×長さ 300 mm の流路を構成した。流路内の温度低下を防ぐため、燃え拡がり観測部以外に石膏ボードを使用し断熱化した。燃え拡がり実験に使用した試料はろ紙 (アドバンテック製, No. 131, 厚さ  $H = 0.25 \text{ mm}$ , 密度  $\rho = 560$

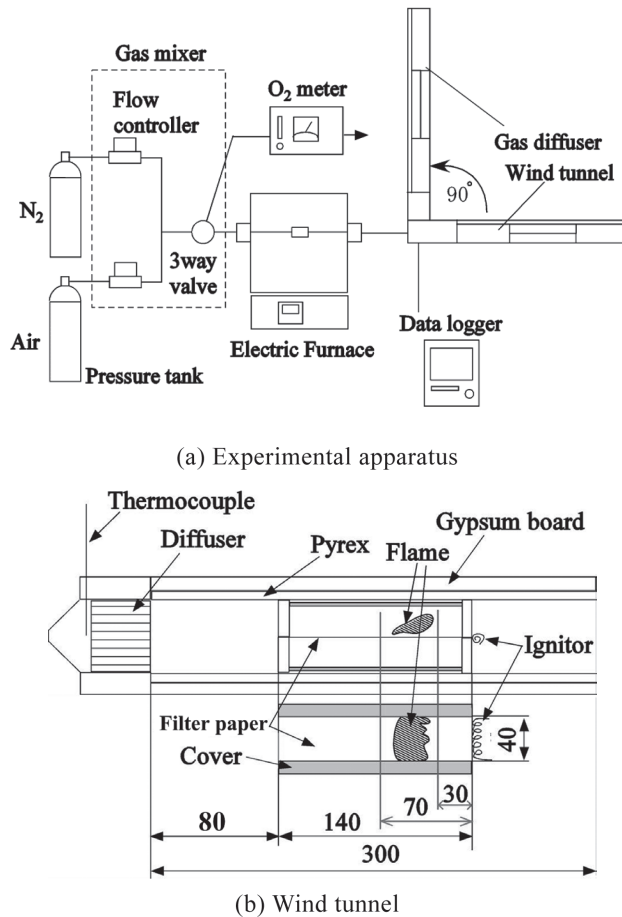


Fig.2 Schematic of experimental apparatus

kg/m<sup>3</sup>)であり、その寸法は幅 60 mm、長さ 140 mm である。ただし、幅方向に様に燃え拡がるようにするために、両端を幅 10 mm のアルミテープで覆った。それにより、実際に燃え拡がる部分の幅は 40 mm となる。ろ紙はアルミ製のアングルで作製したホルダにより風洞中央部に流路と平行になるように固定した。着火には通電加熱したニクロム線を用い、ろ紙の一端に着火した。

実験は対向気流中で行い、流量は 20 L/min 一定とし、このとき断面平均流速は水平方向、垂直方向で  $U = 0.2 \text{ m/s}$  である。気流温度は予め整流格子上流と風洞内部に設置した熱電対により、整流格子上流部と風洞内部の温度の相関を得ておき、実験時には火炎が燃え拡がっている間の整流格子上流の温度と比較することで気流温度を決定した。燃え拡がりの様子は 2 台のビデオカメラ (SONY DCR-VX1000, Panasonic NV-GS70) とデジタルカメラ (Nikon D200, レンズ Nikon PC Micro Nikkor 85 mm F2.8D) を使い、それぞれ側面方向と上面方向から測定した。また、流れ方向の温度変化を考慮し、測定区間はろ紙の着火位置から上流側の 30 ~ 70 mm の区間とした。

高温・減酸素気流中での燃え拡がりに果たす浮力の作用を考察するために、日本無重量総合研究所 (MGLAB) が保有する落下実験塔を利用し、微小重力環境下での燃え拡が

り実験を実施した。実験装置の概略と実験方法の詳細は文献[25]を参照する。試料は高温・減酸素気流下での実験と同様にろ紙を用い、その寸法も同様とした。また、風洞内の断面平均流速は 0.1 m/s とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 燃え拡がり速度および限界酸素濃度

水平方向および垂直方向の燃え拡がり速度  $V_f$  と酸素濃度  $X_{O_2}$  との関係は気流温度  $T_a$  をパラメタとして図 3 に示す。ここでの気流温度は、燃え拡がりの測定区間 (着火位置から上流 30 ~ 70 mm) の平均値である。図中には、比較のために、微小重力環境下での実験データ[25]も示してある。ここで興味深い点は、いずれの燃え拡がり方向に対しても、燃え拡がり速度は酸素濃度低下に伴って減少することである。すなわち、気流の酸素濃度を制御することで、微小重力環境下での燃え拡がり速度と同等の速度が得られ、そして気流温度を高くすることで酸素濃度の減少幅を広げることができる。例えば、酸素濃度 21 % の微小重力下での燃え拡がり速度は通常重力環境下での  $T_a = 78 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $X_{O_2} = 17.0 \text{ } \%$  あるいは  $T_a = 216 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $X_{O_2} = 15.0 \text{ } \%$  の水平燃え拡がり速度と同等になる。酸素濃度がある値以下になると、火炎は燃え拡がり途中で消炎に至る。このときの酸素濃度をここでは燃え拡がり限界酸素濃度 (以下では LOC) と定義する。LOC 近傍の燃え拡がり速度を高温・減酸素気流の通常重力下と微小重力下のそれと比較すると、後者の方が小さい値となる。これは、気流速度が通常重力環境下での 0.2 m/s に対して、微小重力下では実験の都合上、0.1 m/s であり、この流速の違いが影響した可能性がある。本実験の LOC の最小値は垂直下方燃え拡がりの  $T_a = 224 \text{ }^\circ\text{C}$  で約 12.8 % であったが、LOC 近傍にも関わらず燃え拡がり速度が他に比べて高い値 (特に酸素濃度 16 % 以下の低酸素条件で) を示している。この理由は定かではないが、この温度は測定区間の平均温度であり、その上流は更に高温であること、条件を整えるのに加熱時間を多く要したことなど

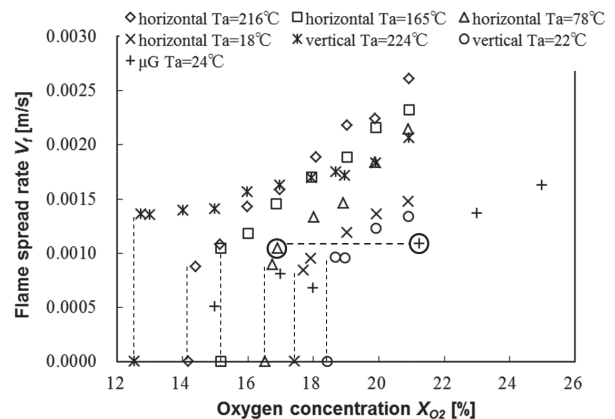


Fig.3 Effect of oxygen concentration in opposed-gas flow on flame spread rate

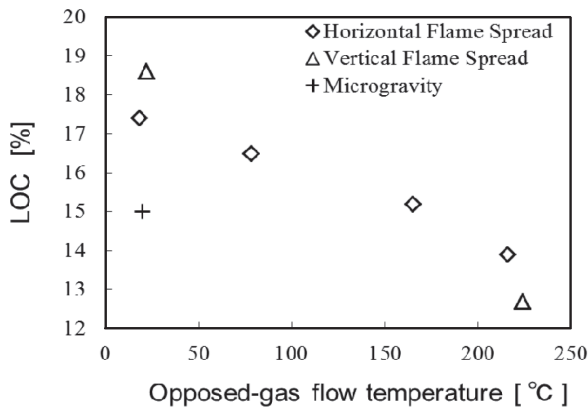


Fig.4 Relation between LOC and opposed-gas flow temperature

から未燃部の熱分解に影響した可能性があると考えられる。以下では垂直下方  $T_a = 224^\circ\text{C}$  のデータは火炎形状などの定性的な比較に留め、後の Rayleigh 数や Damköhler 数を整理する上では除外する。

燃え拡がり限界となる LOC の値は図 4 に示すように燃え拡がりの方向によらず気流温度が高温になる程小さくなる。次節で述べる通り LOC 付近の燃え拡がり火炎の火炎長さは小さく、これを代表長さにとって表した Rayleigh 数  $Ra$  は小さくなる。すなわち、火炎によって誘起される浮力流の流速は小さくなる。同時に火炎と気流温度の差も小さくなり、これらにより対流による熱損失は小さくなり、火炎温度の低下が抑制されると考えられる。常温付近での LOC は対流による熱損失の影響を受けやすい垂直下方燃え拡がりの方が水平燃え拡がりよりも大きい。対流のない微小重力下での LOC は前者に比べて小さな値となる。

### 3.2. 火炎形状および火炎長さ

気流の酸素濃度を变化させたときの水平方向燃え拡がり火炎の写真(進行方向の側面より撮影)を、気流温度  $T_a = 18^\circ\text{C}$  に対して図 5(a)~(d) に、 $T_a = 216^\circ\text{C}$  に対して図 6(a)~(d) に示す。火炎形状に与える浮力の作用は、試料上側の火炎に顕著にあらわれる。すなわち、図 5(a) に示した  $T_a = 18^\circ\text{C}$ 、 $X_{O_2} = 21\%$  気流中の火炎は上側の Tail 部分が上方へ伸び上がっている。それに対して図 6(a) で示した  $T_a = 216^\circ\text{C}$ 、 $X_{O_2} = 21\%$  気流中での火炎は、上側と下側でほぼ対称となる。さらに、酸素濃度の低下とともに上下の対称性は良くなり、浮力の作用が減少していることが見てとれる。図 3 中の破線で示した微小重力環境  $X_{O_2} = 21\%$  の燃え拡がり速度と同等になる通常重力下での火炎写真 ( $T_a = 78^\circ\text{C}$ 、 $X_{O_2} = 17.0\%$ ) を微小重力下、 $X_{O_2} = 21\%$  の火炎写真と比較して図 7 に示す。同図 7(b) の  $\mu\text{g}$  での火炎写真は装置の都合上、下側の火炎は撮影されていないが、少なくとも両者の上側の火炎形状およびそのサイズは同等となる。垂直下方燃え拡がりについては  $\mu\text{G}$ 、 $X_{O_2} = 21\%$  と同等の燃え拡がりとなるデータを取得していないが、参考までにそれより僅かに燃え拡がり速度が小さい  $T_a = 22^\circ\text{C}$ 、 $X_{O_2} = 18.75\%$  (Fig.8(d)

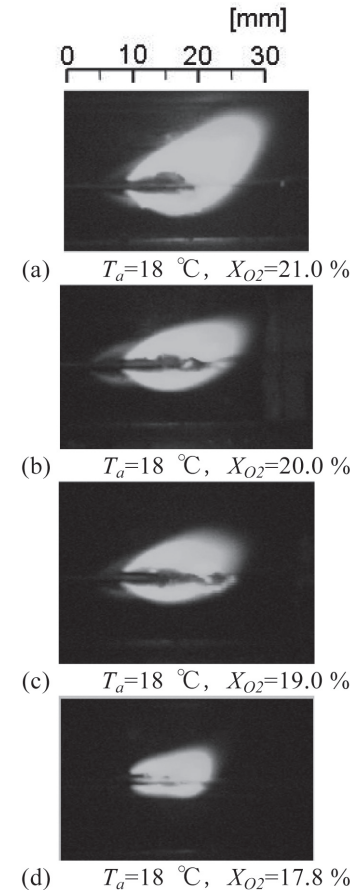


Fig.5 Side view of horizontal flame spread (Opposed-gas flow temperature  $T_a = 18^\circ\text{C}$ )

の写真)と比較すると、燃え拡がり速度が遅い分、火炎長さは僅かに小さいが、火炎形状はほぼ同等となる。

垂直下方の燃え拡がりの火炎写真を、 $T_a = 22^\circ\text{C}$  の気流に対して図 8(a)~(d) に、 $T_a = 224^\circ\text{C}$  に対して図 9(a)~(d) に示す。垂直下方燃え拡がりでは、浮力の作用は主に火炎長さ  $L$  に現れる。ここでの火炎長さの定義は、図 10 に示すとおりである。常温気流、高温気流ともに酸素濃度の低下とともに火炎長さ  $L$  は短く、かつ火炎は丸みを帯び、とりわけ図 9(d) で示した  $T_a = 224^\circ\text{C}$ 、 $X_{O_2} = 12.7\%$  の火炎でその傾向が著しい。ここで、図 10 の火炎モデルで定義した火炎長さ  $L$  と酸素濃度  $X_{O_2}$  の関係をそれぞれの気流温度と燃え拡がり方向について図 11 に示す。ただし、酸素濃度の低下に伴い燃え拡がりが不安定となり、とりわけ燃え拡がり限界近傍では火炎長さ  $L$  の変動が大きくなる傾向にある。これは、おもに火炎の幅方向の 2 次元性が失われることによる。そこで、図中のデータは試料幅方向中心部での最小値をプロットしている。図 11 より、水平方向および垂直下方ともに、酸素濃度  $X_{O_2}$  の低下に伴い火炎長さ  $L$  は減少することがわかる。高温気流での火炎長さは同じ酸素濃度の常温気流に対して大きい。燃え拡がり限界酸素濃度も低下するため、いずれの場合も限界酸素濃度 LOC 近傍での  $L$  はほぼ一定の値をとる。

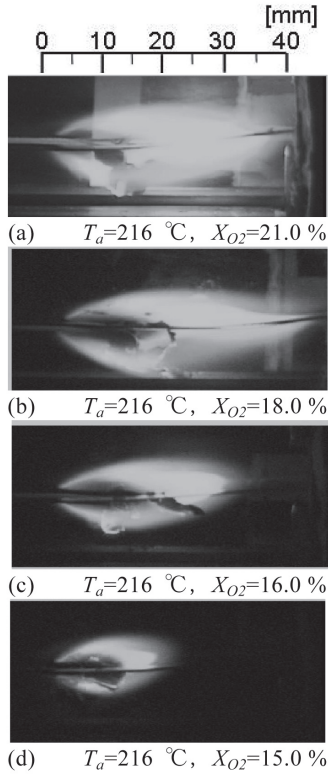


Fig.6 Side view of horizontal flame spread (Opposed-gas flow temperature  $T_a = 216\text{ }^\circ\text{C}$ )

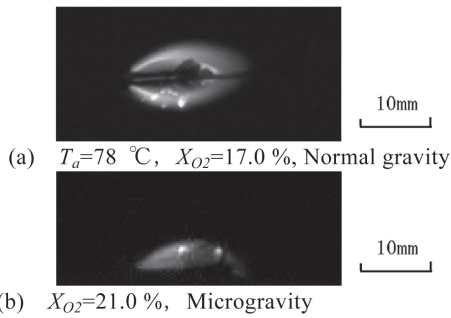


Fig.7 Comparison between flame spread in reduced oxygen and high-temperature opposed-gas flow under normal gravity condition and flame spread in opposed-gas flow under microgravity condition

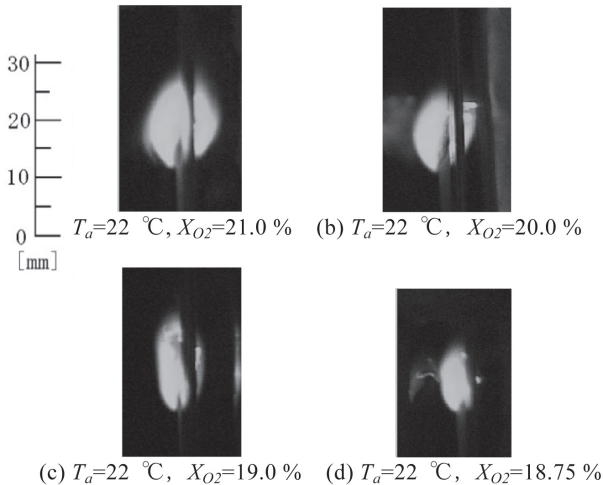


Fig.8 Side view of vertical flame spread (Opposed-gas flow temperature  $T_a = 22\text{ }^\circ\text{C}$ )

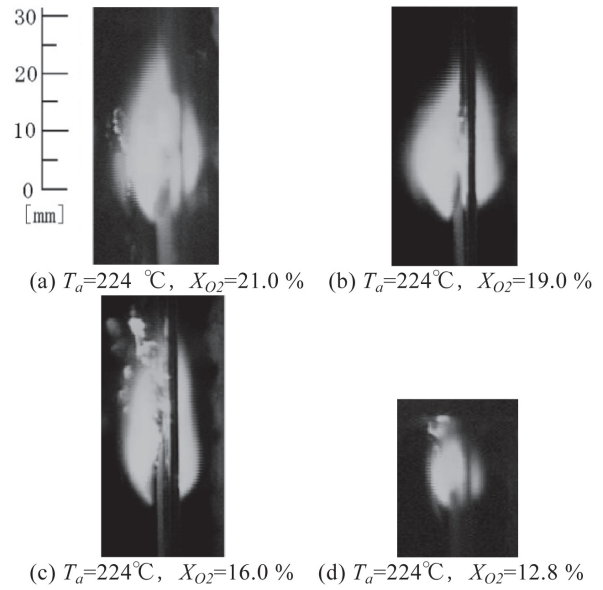


Fig.9 Side view of vertical flame spread (Opposed-gas flow temperature  $T_a = 224\text{ }^\circ\text{C}$ )

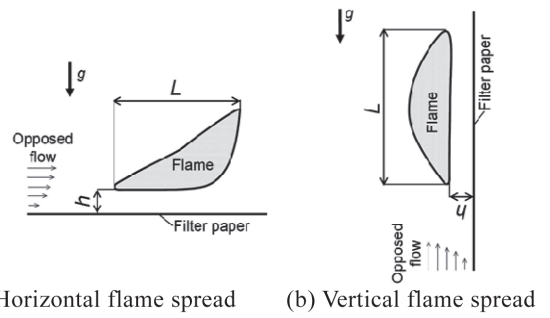


Fig.10 Schematic of spreading flame

### 3.3. 高温・減酸素気流中での浮力の作用

高温・減酸素気流中での火炎に作用する浮力の影響は火炎長さを代表寸法にとった局所 Rayleigh 数  $Ra$  を用いて検討する。 $Ra$  は次式で表せる。

$$Ra = Pr \cdot Gr \tag{1}$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_f - T_a)L^3}{\nu_g^2} \tag{2}$$

$$Pr = \frac{\nu_g}{\alpha_g} \tag{3}$$

ここで、 $Gr$  は Grashof 数、 $Pr$  は Prandtl 数であり、 $g$  は重力加速度、 $\beta$  は体積膨張係数、 $\nu$  は動粘性係数、 $\alpha$  は熱拡散係数である。物性値は代表温度  $T = T_f - 0.38(T_f - T_a)$  に対する値[26]を用いた。 $T_f$  は火炎温度、 $T_a$  は気流温度、 $L$  は図 10 で定義した火炎長さであり、図 11 の結果を用いる。火炎温度は酸素濃度に依存するが、これを燃え拡がり火炎に対して測定することは容易ではない。ここではプール火炎の基部温度に対して酸素濃度を 16～21% で変化させて得

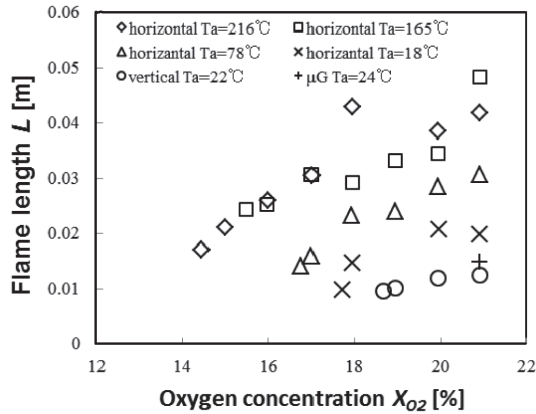


Fig.11 Effect of oxygen concentration in opposed-gas flow on flame length

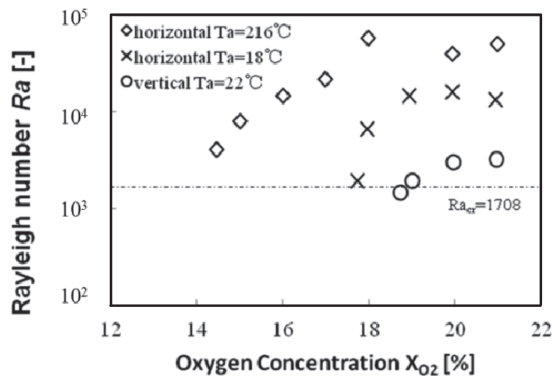


Fig.12 Relationship between oxygen concentration in opposed-gas flow and Rayleigh number

られた以下の関係式[27]から推定する.

$$T_f = 867 \times \log(X_{O_2}) + T_{ad} \quad [\text{K}] \quad (4)$$

ここで、上式の定数  $T_{ad}$  はろ紙に対して  $T_{ad} = 2050 \text{ K}$  とした。これにより、 $X_{O_2}$  が 13~21% の範囲で火炎温度は 1280~1460 K の範囲で変化する。Rayleigh 数  $Ra$  と酸素濃度  $X_{O_2}$  の関係を図 12 に示す。水平方向および垂直下方燃え拡がりともに、 $X_{O_2}$  の低下とともに  $Ra$  は減少する。図中には参考までに平行平板間の臨界 Rayleigh 数の値 ( $Ra_{cr} \approx 1700$ ) を示してある。高温・減酸素気流中での燃え拡がりには、とりわけ限界酸素濃度近傍では浮力の効果は小さくなり、それに伴って火炎先端部での局所流速も減少すると予想される。Rayleigh 数の減少に最も貢献するのは代表長さを選んだ火炎長さ  $L$  であるが、これは減酸素気流中での燃え拡がり速度に依存するため一義的に決まらず、ここでは得られた結果に対して浮力の影響を評価するに留める。しかし、例えば風洞の流路高さを代表長さを選び、この値を用いて臨界 Rayleigh 数以下に設定した環境下で実験を行えば、地上でも微小重力環境での実験を模擬できると考えられる。図 12 で示した  $Ra$  が 1000 以下となる火炎の長さは約 10 mm である。風洞の流路高さを試料面から 10 mm 以

下の狭流路の風洞 (薄い固体の場合、両面で火炎が形成されるので、この倍の 20 mm 以下) を用いることで、地上でも浮力の影響をなくした燃え拡がり実験が可能になる。このような高温・減酸素狭流路内の燃え拡がりについて実験 [24]を行っているが、詳細は別の機会に議論する。

### 3.4. 高温・減酸素環境と微小重力環境との燃え拡がりに対する相似性

通常重力環境での固体の燃え拡がり現象は未燃焼部への伝熱過程で律速されるため、気相での化学反応時間よりも物理的時間 (伝熱時間あるいは混合気体の滞留時間) に支配される。したがって、両者の比で表される Damköhler 数は安定火炎では大きな値となる。しかしながら、減酸素環境あるいは微小重力環境では、火炎への酸素供給量の低下により化学反応が抑制されるため、反応時間が増加し、条件 (燃え拡がり限界近傍) によっては反応時間と伝熱時間が同等になる可能性がある。ここでは、Fernandez-pello [28]らが行った方法と同様に、Damköhler 数を用いて高温・減酸素環境と微小重力環境との燃え拡がりに対する相似性について考察する。

速度  $U$  の流れの中での混合気体の滞留時間は、熱拡散による代表長さと流速との比として次式で表される。

$$t_{res} = \frac{a_g}{U^2} \quad (5)$$

ここで、 $a_g (\equiv \lambda_g / \rho_g \cdot C_p)$  は気体の熱拡散係数であり、 $U$  は流れの平均速度である。また、 $\lambda_g$  は気体の熱伝導率であり、 $\rho_g$  は気体の密度、 $C_p$  は気体の定圧比熱である。流れの速度は進行する火炎先端部への局所流速とすべきであるが、減酸素環境あるいは微小重力環境では自然対流の影響が小さいものとし、風洞内の平均速度で代表させる。火炎先端部での化学反応時間は、総括 1 次反応を仮定し、次式で表す。

$$t_{chem} = \rho_g / X_{O_2} \cdot X_F \cdot P^n A_g \exp(-E_g / RT_f) \quad (6)$$

ここで、 $X_{O_2}$  は酸素のモル分率、 $X_F$  は燃料のモル分率、 $P$  は圧力、 $A_g$  は頻度因子、 $E_g$  は活性化エネルギー、 $R$  は気体定数、 $T_f$  は火炎温度である。ここでの  $T_f$  は酸素濃度の変化を考慮して式 (4) より算出する。 $X_F$  は未燃部への熱流束に依存している。燃え拡がり火炎の先端部では火炎は青炎のためその放射率が小さい。一方、未燃部から周囲へ放射による熱損失が生じ、両者の差が放射による正味の熱流束となる。この放射による正味の熱流束は熱伝導による熱流束に比べて十分小さいとして、これを省略し、気相から未燃部への熱流束を次式で与える。

$$q = -\lambda_g \frac{T_f - T_p}{h} \quad (7)$$

ここで、 $T_p$  は熱分解温度、 $h$  は消炎距離 (図 9 を参照) である。 $X_F$  は、試料の熱分解に必要な伝熱量に比例するとし、

次式で表す.

$$X_F \propto q = -\lambda_g \frac{T_f - T_p}{h} \quad (8)$$

(5)~(8) 式より, Damköhler 数,  $Da$  は次式のように表せる.

$$Da = \frac{t_{res}}{t_{chem}} = C \frac{\lambda_g (T_f - T_p)}{Pe_g \cdot \rho_g \cdot U} X_{O_2} \cdot P^n \cdot A_g \exp\left(-\frac{E_g}{RT_f}\right) \quad (9)$$

ここで,  $Pe_g (\equiv Pr \cdot Re)$  は Peclet 数,  $Pr (\equiv \nu_g/\alpha_g)$  は Prandtl 数,  $Re (\equiv Uh/\nu_g)$  は Reynolds 数である.  $C$  は比例定数で, 通常重力環境においては酸素濃度 21% の条件で  $Da$  数が 1 になるように便宜的に定めた.  $U$  は通常重力下で 0.2 m/s, 微小重力下で 0.1 m/s 一定としているため  $X_{O_2}$  の変化に伴う  $Pe_g$  の変化は, 主に消炎距離  $h$  に依存する. そこで, 燃え拡がり火炎先端部の写真より, 図 9 で定義した消炎距離を測定し, 酸素濃度との関係を示した結果が図 13 である. 水平方向燃え拡がりでは, 酸素濃度の減少とともに消炎距離  $h$  は増加し, 消炎に至る. 酸素濃度一定の下で通常重力環境から微小重力環境に移行すると, 消炎距離は増加する. また, 酸素濃度減少とともに消炎距離は直線的に増加する. 一方, 垂直下方の燃え拡がりとは  $T_a = 17^\circ\text{C}$  の水平燃え拡がりでは  $X_{O_2}$  の減少に伴って  $h$  は増加するが, ある濃度以下では一定になる傾向を示す. Damköhler 数  $Da$  は, 以下のように算出した. 図 13 の消炎距離の結果から Peclet 数  $Pe_g$  を, そして (4) 式から各酸素濃度に対する火炎温度  $T_f$  を求め, さらに表 1 で示した各値を用いて  $Da$  数を算出した. ただし, 気体の物性値は, 火炎温度  $T_f$  と熱分解温度  $T_p$  との平均温度に対する空気の値を用いた. 一方, 燃え拡がり速度  $V_f$  は, 次式のとおり, 固体の熱拡散速度で無次元化した.

$$V = V_f \cdot H / a_s \quad (10)$$

ここで,  $H$  は固体試料の厚さ,  $a_s$  は固体の熱拡散係数である. このように,  $V$  は燃え拡がり速度を固体の厚みを代表値とした Peclet 数  $Pe_s$  である.  $V$  と  $Da$  の関係は, 図 14 に示すとおりである.  $Pe_s$  は Damköhler 数の低下とともに減少し, ある Damköhler 数で燃え拡がり限界となる. なお, 図中の実験点のばらつきはおもに消炎距離の測定値に依存する. まず, 通常重力下, 常温付近での水平燃え拡がり ( $T_a = 18^\circ\text{C}$ ) と垂直下方燃え拡がり ( $T_a = 21^\circ\text{C}$ ) の結果を比較すると, 両者はほぼ同一直線上にある. 燃え拡がり限界となる  $Da$  数 (図中の網掛けで示す) は水平燃え拡がりの方が僅かに小さな値となる. 微小重力下の結果を前二者と比較すると  $Pe_s$ - $Da$  線の勾配はほぼ同様であるが燃え拡がり限界となる  $Da$  数は前二者に比べて小さな値となる. この理由はまず, 微小重力下の LOC の値が小さいこと, それによ

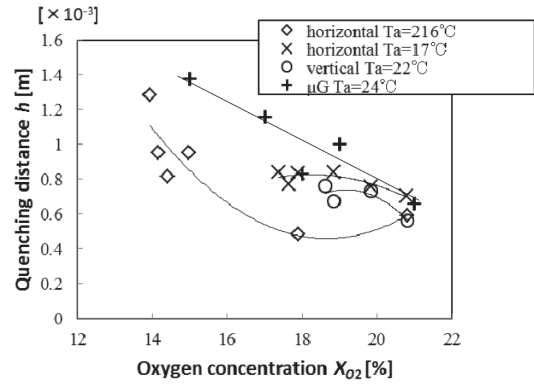


Fig.13 Relationship between quenching distance and oxygen concentration

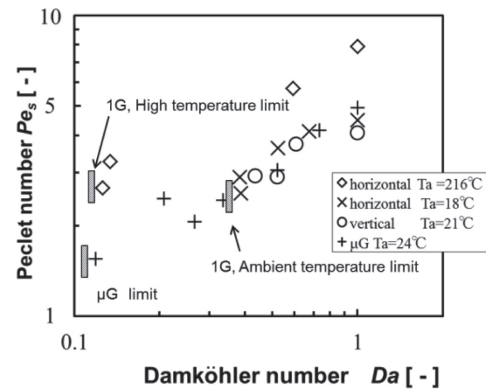


Fig.14 Relation between Peclet number and Damköhler number

Table 1 Data used calculation

Gas phase		
Opposed-gas flow rate	$U$ [m/s]	0.2
Ambient pressure	$P$ [atm]	1
Overall order of gas phase reaction	$n$	1
Pre-exponential factor	$A_g$ [kg/m <sup>3</sup> ·s·atm]	$4.5 \times 10^5$
Activation energy	$E_g$ [J/mol]	$113 \times 10^3$
Universal gas constant	$R$ [J/mol·K]	8.314
Solid phase		
Pyrolysis temperature	$T_p$ [K]	613
Sample thickness	$H$ [mm]	0.25
Thermal diffusivity of solid (Paper)	$a_s$ [mm <sup>2</sup> /s]	0.082
Density of solid (Paper)	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	560

て (4) 式より算出された火炎温度  $T_f$  が小さいことによる. 次に, 通常重力下, 高温での水平燃え拡がり ( $T_a = 216^\circ\text{C}$ ) の  $Pe_s$ - $Da$  線と微小重力下のそれと比較すると, 曲線の勾配はほぼ同様であり, 燃え拡がり限界となる  $Da$  数の値も同等である. しかし, 無次元燃え拡がり速度  $Pe_s$  の値は通常重力下, 高温気流の方が微小重力下の値よりも大きい.

同一の  $Da$  数に対して、高温気流下の無次元燃え拡がり速度が常温気流のそれよりも高い値を示しているのは、第一に  $Pe_s$  の中に気流温度の影響、すなわち、固体を周囲温度から熱分解温度まで上昇させるに必要な熱量の変化が考慮されていないことにある。第二に火炎から周囲への放射熱損失の違いにより火炎温度に差が生じ、これが未燃部への伝熱速度に影響したことが考えられる。いずれにしても燃え拡がり限界となる  $Da$  数を議論する上では LOC 近傍での火炎温度についても更なる検討を要する

#### 4. 結言

高温・減酸素気流中における熱的に薄い紙について水平方向ならびに垂直下方燃え拡がりとその限界酸素濃度を調査するとともに、高温・減酸素雰囲気下での燃え拡がりに与える浮力の作用を考察した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 対向流中の酸素濃度を減少させると、水平および垂直下方の燃え拡がりとともに、固体面に沿う火炎長さは減少し、火炎が丸みを帯びた形状となる。とりわけ、高温・減酸素気流中での燃え拡がり火炎の形状は、微小重力環境下、対向気流 ( $X_{O_2} = 21\%$ ) 中での火炎形状と相似となる。
- (2) 対向流中の酸素濃度の低下に伴い、燃え拡がり速度は小さくなり、ある酸素濃度以下では火炎は燃え拡がらず途中で消滅する。本報では、これを限界酸素濃度 (LOC) と定義したが、この値は気流温度が高いほど小さくなる。通常重力環境であっても気流温度と酸素濃度を制御することで微小重力環境下の燃え拡がり速度が得られる。
- (3) 固体面に沿った火炎長さを代表長さにとって算出した Rayleigh 数は、高温、減酸素環境下では小さくなり、燃え拡がりに対する浮力の影響が低下する。  
上記の (1) ~ (3) までの知見から、高温・減酸素環境を用いることで、微小重力環境下での燃え拡がりがある程度模擬できると言える。
- (4) (10) 式で定義した無次元燃え拡がり速度を、(9) 式で定義した Damköhler 数  $Da$  で整理した結果 (図 14)、両者の間に相関があり、 $Da$  の減少とともに燃え拡がり速度も減少し、Damköhler 数がある値以下になると燃え拡がり限界となる。

#### 謝辞

本論文を執筆するにあたり、実験データの取得および解析を行った当時の大学院生、佐藤一宏氏 (現 西原環境 (株))、風晴勇太氏 (現 タムロン (株)) ならびに議論をしていただいた助手の工藤祐嗣氏 (現 八戸工業大学) に謝意を表す。

#### References

1. Kimzey, J., Proc. of the 3rd Space Proceeding Symposium, NASA Space Flight Center, M-74-5, NASA TM-X70752, 1 (1974) 115-130.
2. Olson, S. L., The effect of microgravity on flame spread over a thin fuel, NASA TM-100195 (1987).
3. Friedman, R. and Urban, D. L., Contributions of microgravity test results to the design of space craft fire-safety systems, AIAA paper 93-1152-(1993).
4. Shipp, M. and Spearpoint, M., Fire Safety Science: Proc. of the 4th International Symposium, IAFSS, (1994) 739-750.
5. Ramachandra, P. A., Altenkirch, R. A., Bhattacharjee, S., Tang, L., Sacksteader, K., and Wolverson, M. K., *Combust. Flame*, 100 (1995) 71-84.
6. Bryant, D. and Judd, M. D., Proc. of the 10th Anniversary of First ESA Parabolic Flight Campaign Workshop, ESA, (1995) 99-101.
7. Sanchez T. C., Linan, A., Salva, J. A., Conchero, G., Juste, G. L., and Estenban, F., Combustion Experiments During KC-135 Parabolic Flights. ESA SP-1113 (1989) 53-64.
8. West, J., Tang, L., Altenkirch, R. A. Bhattacharjee, S., Sacksteader, K. and Delichatsios, M. A., *Proc. Combust. Inst.*, 26 (1996) 1335-1343.
9. Kashiwagi, T., Mcgrattan, K. B., Olson, S. L., Fujita, O., Kikuchi, M. and Ito, K., *Proc. Combust. Inst.* 26 (1996) 1345-1352.
10. Altenkirch, R. A., Tang, L., Sacksteader, K., Bhattacharjee, S. and Delichatsios, M. A., *Proc. Combust. Inst.* 27 (1998) 2515-2524.
11. Takahashi, S., Kondou, M., Wakai, K. and Bhattacharjee, S., *Proc. Combust. Inst.* 29 (2002) 2579-2586.
12. Bhattacharjee, S., Ayala, R., Wakai, K., and Takahashi, S., *Proc. Combust. Inst.* 30 (2005) 2279-2286.
13. Sacksteader, K. R., Pettegrew, R. D., and T'ien, J. S., Flame spreading over thin fuel samples in partial gravity environments, AIAA paper 98-0567 (1998).
14. Olson, S. L., *Combust. Sci. and Technol.* 76: 233-249 (1991)
15. Olson, S. L., et al., *Combustion and Flame*. 156: 1214-1226 (2009)
16. Takahashi, S. et al., *Journal of the Japan Society of Microgravity Application*, 24, No.3, pp.225-230 (2007)
17. Takahashi, S. et al., Effect of Sample Width on Flame Spread Rate over a Thin Material in Microgravity, JSASS Space Technology Japan, (2009)
18. Nakamura, Y., et al., *Proc. 9th ASPACC, Taipei*, 101 (2009.5)
19. Nakamura, Y., et al, *Proc. 27th ISTS, Tsukuba*, h-23 (2009.7)
20. Fujita, O., Nishikawa, K., Ito, K., *Proc. Combust. Inst.* 29: 2545-2552 (2002)
21. Umemura, A., Uchida, M., Hirata, T., Sato, J., *Proc. Combust.*



- Inst.* 29: 2535-2552 (2002)
22. 佐藤, 工藤, 伊藤, “高温・減酸素気流中における薄い可燃性固体の燃え拡がりと消炎”, 日本火災学会研究発表会概要集 (2006-5) 150-153.
  23. 佐藤, 工藤, 鳥飼, 伊藤, “高温・減酸素気流中における薄い可燃性固体の燃え拡がり”, 第 44 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2006-12) 412-413.
  24. 長土居, 鳥飼, 伊藤, 工藤, “高温減酸素狭流路内における薄い可燃性固体の燃え拡がり” 第 45 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2007-12) 150-151.
  25. 風晴, 鳥飼, 伊藤, 工藤, “微小重力環境下における薄い可燃性固体の燃え拡がり限界”, 第 46 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2008-12) 544-545.
  26. 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第 4 版, pp.69 (1986)
  27. Izumi, J., et al. Scale Effects on Anchoring, Liftoff and Extinction of Pool Fires in Co-axial Low Oxygen Gas Flow, 15th International Symposium on Scale Modeling (2006)
  28. Fernandez-pello, A. C., Ray, S. R. and Glassman, I., *Proc. Combust. Inst.* 18 (1981) 579-588.