

## 微小重力場において並向流と対向流中で薄い紙上に 形成された火炎の限界酸素濃度の比較

鳥飼 宏之・伊藤 昭彦

### Comparison of Limiting Oxygen Concentration between Concurrent-Flow and Opposed-Flow Flame Spreads over a Thin Paper Sheet in Microgravity

Hiroyuki TORIKAI and Akihiko ITO

#### Abstract

In order to compare the limiting oxygen concentration, below which a flame cannot continue to spread stably over solid materials, between concurrent-flow flame and opposed-flow flame spreads in microgravity, we have conducted parabolic flight experiments on flame spreading over a thin paper sheet (thickness: 0.12 mm and width: 20 mm) by varying the ambient air flow velocity. The two suction wind tunnels were mounted on the same aircraft and the opposed-flow and concurrent flow flame spread experiments were performed simultaneously. The air flows were driven by the pressure difference between inside and outside of the aircraft cabin, and the cross-sectional mean flow rate was obtained up to 7 cm/s. The oxygen concentration in the wind tunnel was controlled by adding nitrogen gas to the air flow sucked from the aircraft cabin. As a result, within the velocity range of the ambient flow from 1 cm/s to 7 cm/s, both limiting oxygen concentrations decrease as the ambient airflow rate increases. Moreover, it is found that although the propagation rate of the concurrent-flow flame spread is higher than that of the opposed flow flame spread at near limiting oxygen condition, both limiting oxygen concentrations of the concurrent-flow and opposed-flow flame spreads show almost the same values at the same ambient flow velocity.

**Keyword(s):** Flame spread, Microgravity, Opposed flow, Concurrent flow, Limiting oxygen concentration

Received 24 August 2015, accepted 13 January 2016, published 31 January 2016

#### 1. はじめに

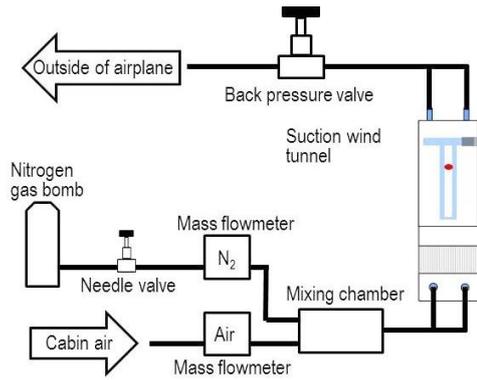
「きぼう」船内実験室利用第3期重点化テーマ FLARE (Flammability Limit At Reduced gravity) では、ISSで得られる長時間微小重力環境を活用し、これからの有人宇宙活動の基盤となる火災安全に関する国際基準を提案することを目的としてプロジェクトを進めている。その目的のためには微小重力環境における様々な可燃性物質の燃焼限界条件を定量的に明らかにする必要がある。特に、宇宙ステーション内では空気循環のために低速の流れが形成されているため、低流速域で可燃物が燃焼を維持できなくなる限界の酸素濃度を明らかにすることが重要となる<sup>1)6)</sup>。岐阜大学の高橋は FLARE プロジェクトにおいて航空機を用いて微小重力環境における薄い PMMA シート上を伝播する

火炎が、燃え広がりを継続できない限界酸素濃度 (Limiting Oxygen Concentration: LOC) の分布を対向気流流速の変化に対して明らかにし、その結果に基づいて平板状試料の燃え広がり現象に対する限界酸素濃度を定量的に予測可能なモデルの構築を進めている<sup>5),6)</sup>。他方、著者らの弘前大学チームは可燃性固体上の燃え広がりの基礎研究で広く使用され、PMMA とは異なり燃焼時に炭素残渣 (Char) を形成するろ紙について微小重力環境における限界酸素濃度を定量的に明らかにすることを目的として研究を進めている。特にろ紙は PMMA では考慮する必要が無い炭素残渣からの周囲への放射熱輸送や炭素残渣が存在することによる流れ場の変化があり、それらが PMMA とろ紙の限界酸素濃度の値に違いをもたらす要因の1つ考えている。そのため、

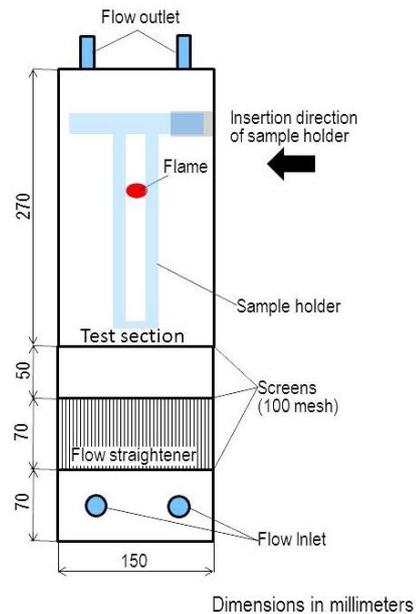
炭素残渣を形成する可燃性材料に対しても PMMA を用いて高橋が構築した予測モデルが適応可能であることを検証することも目的の1つである。

従来から用いられている NASA の火災安全性試験法 (NASA-STD-6001 Test1) <sup>7)</sup> では、通常重力場において鉛直に材料を設置し下方からケミカルイグナイタで着火する。そして上方へ燃え広がる火炎が着火位置から 15 cm の距離を越えて伝播するか否かで、その材料の火災安全性を評価する。通常重力場で上方燃え広がる火炎を形成した場合、火炎で生成された高温の燃焼ガスが自然対流により未燃部へと流れて火炎が到着する前に材料が加熱される。その結果、その燃え広がり速度の値は時間経過と共に加速的に増大する <sup>8),9)</sup>。この伝播形態では、火炎は上昇する周囲気流と同方向へ伝播する並向流中燃え広がり (Concurrent-flow flame spread) となる。他方、通常重力場で下方燃え広がる火炎を形成した場合、浮力によって誘起された火炎の伝播とは逆方向の流れの中を燃え広がる対向流中燃え広がり (Opposed-flow flame spread) となる。この場合、火炎は定常伝播し、その燃え広がり速度の大きさは火炎の最上流端に位置する火炎基部から材料未燃部分への熱輸送速度によって決定され、並向流燃え広がりの場合よりも、その値は小さくなる <sup>8)</sup>。そのため通常重力場では、より燃え広がり速度が大きな、つまりより危険な燃え方をする上方燃え広がり燃焼条件を用いて様々な材料の火災安全性を評価することは重要である。

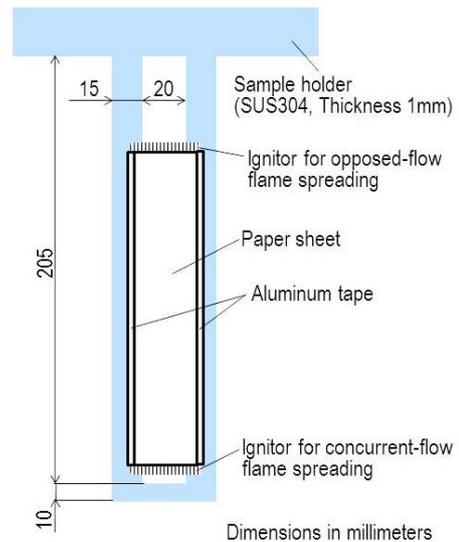
その一方で、微小重力環境において火炎の伝播と周囲気流とが相対する対向流中の燃え広がり現象と、火炎伝播方向と周囲気流方向が同一となる並向流中の燃え広がり現象とで、どちらの方がより危険なのか、つまり燃え広がり速度や限界酸素濃度の大小が対向流と並向流でどのように違うのかということの数値解析によって比較・検討した例はあるものの <sup>10)</sup>、実験的に研究例はほとんどない。微小重力環境での材料の火災安全性評価の方法を提案しようとしている FLARE プロジェクトとしては、特に微小重力場での限界酸素濃度の値が流れによってどのように変化するかは興味あるところである。そこで本研究は、微小重力環境において対向流中と並向流中で、ろ紙上に形成された火炎の限界酸素濃度の値を実験的に測定し、そして、地上と同様に並向流中の燃え広がりの方が、対向流中の燃え広がり比べてより危険度が大きいのかどうかを明らかにする。具体的には、同一の風洞装置を2台作製し、これを同一の飛行機に搭載してパラボリックフライトを利用して微小重力環境でのろ紙の燃え広がり実験を行い、対向流中と並向流の燃え広がり形成される火炎、燃え広がり速度そして限界酸素濃度の比較・検討を行う。



(a) Flow line



(b) Suction wind tunnel



(c) Sample holder

Fig. 1 Experimental setup

## 2. 実験装置および方法

微小重力環境の形成にはダイヤモンドエアサービス株式会社が所有する航空機 MU-300 を使用した。この航空機のパラボリックフライトにより微小重力環境が 20 秒間実現された。航空機実験では、同じ機器構成の 2 台の実験装置を別々の実験ラックに収納して機体に搭載し、並向流と対向流の燃え拡がり実験を同時に行った。その実験装置の詳細を Fig. 1 に示す。まず Fig. 1(a) に装置の流路を示す。この流路により風洞内に酸素濃度  $X$  vol. % と気流流速  $U$  cm/s を調節した流れを供給した。風洞は吸い込み風洞で航空機の機内圧力と機外圧力との差圧を利用して風洞内の流れを形成した。吸い込まれた機内空気の流量は流量計 (HORIBA, SEF-12) を用いて測定し、その流量を流路の最後の位置に設置した排圧弁 (KOFLOC, 6801A) を用いて調節した。また、酸素濃度を変化させるために機体に搭載した高圧ボンベから窒素ガスを空気流に加えた。窒素ガスの流量は流量計 (HORIBA, SEF-12) を用いて測定しニードルバルブを用いて調節された。流量を調節された機内空気と窒素ガスは混合容器に導かれ、その中で十分攪拌され一様な酸素濃度を有する流れとなって風洞内に供給された。酸素濃度  $X$  vol. % は空気と窒素の流量比によって決定した。そして、風洞内を流れる総流量を風洞テストセクションの断面積で除した値を、断面平均流速  $U$  cm/s として用いた。また風洞内圧力は機内圧力と同様であり、今回の航空機実験では 893-978 hPa の範囲であった。また、機外圧力は飛行高度によって変化する。そのためパラボリックフライト中に若干の流量変化は生じるが、総流量の数%程度であった。そのため機外圧力変化の影響により、燃え拡がり現象が大きな変化するという事はなかった。今回の実験では機体内外の圧力差によって風洞内には  $U=1-7$  cm/s の範囲の流れを形成することができた。

次に、Fig. 1(b) の吸い込み風洞について説明する。吸い込み風洞は機内の床面に対して直立させた。風洞のテストセクションは観察のために前と横の 2 面の壁は厚さ 5 mm のパイレックス硝子とし、残り 2 面は厚さ 5 mm のアルミ板とした。テストセクションの流路断面は 150 mm×60 mm、長さは 270 mm とした。その上流側には 3 枚のスクリーンとストローを配置し流れを整流した。その結果、テストセクション内は流速に依らず常に層流を保つことができた。可燃性材料であるろ紙はサンプルホルダーに貼り付け、風洞内に設置した。このサンプルホルダーは風洞側方部から取り出して交換可能とした。

最後に Fig. 1(c) でサンプルホルダーの詳細について説明する。サンプルホルダーは材質 SUS304、厚さ 1 mm で作製した。これにろ紙 (ADVANTEC 社製 No.4A、厚さ 120  $\mu$ m)

を貼り付けて用いた。サンプルホルダーには 20 mm の隙間あり、ホルダーにアルミテープで固定したろ紙に着火した場合、20 mm の幅でろ紙は燃焼した。実験に使用したろ紙の長さは 150 mm とした。着火にはコイル状に巻いたニクロム線 (Nilaco、線径 0.1 mm) を、直流電源 (松定プレジジョン、P4K36-1) を用いて 36 V、1 A で通電加熱して用いた。5-7 秒程度の通電時間で試料に着火することが可能であった。対向気流中の燃え拡がりを形成する場合は、サンプルホルダーの Fig. 1(c) の上部にニクロム線を配置して着火を行った。並向流中の燃え拡がりの場合にはサンプルホルダーの下方にニクロム線を配置した。着火タイミングは、対向流燃え拡がりでは設定した酸素濃度が通常重力場の限界酸素濃度より大きな値つまり燃焼可能な条件の場合では、微小重力環境となる前にろ紙に着火した。それ以外は、対向流、並向流ともに微小重力条件となつてからろ紙に着火を行った。

燃え拡がりの様子は 2 台のデジタルビデオカメラ (SONY, HDR-PJ630V) を風洞の正面と側方に設置し記録した。この記録映像から燃え拡がり速度を求めた。

燃え拡がりの限界酸素濃度 (LOC) の測定は次のように行った。まず酸素濃度  $X$  vol. % と周囲気流流速  $U$  cm/s を任意の値に固定した。そして微小重力条件でニクロム線に通電して着火しなかった場合、またろ紙に着火し、火炎が形成されたとしても微小重力期間中に、燃え拡がり火炎が消炎してしまった場合、その実験条件は燃え拡がり火炎が安定して形成されない条件つまりその流速における限界酸素濃度より低いものとして判断した。そのため限界酸素濃度の値は燃え拡がった酸素濃度と燃え拡がらなかった酸素濃度の間にあるものとして決定した。

また通常重力場、大気圧でも同様の装置を用い、試料をその表面が重力方向と平行になる様に設置して、限界酸素濃度の測定を行った。通常重力場では繰り返して実験が容易に可能なため、気流流速と酸素濃度が同一の条件で 3 回の燃え拡がり実験を行い、3 回とも火炎が試料全体を燃え拡がった酸素濃度と、3 回のうち 1 回でも火炎が試料全体を燃え拡がるのがでなかったときの酸素濃度との間の値として通常重力場での限界酸素濃度を定義した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 火炎形状の比較

Fig. 2 に微小重力環境下で形成された並向流および対向流中での燃え拡がり火炎の様子を正面と側方から撮影した画像を示す。典型的な例として Fig. 2(a) と (b) には酸素濃度  $X=21$  vol. %, 空気流速  $U=4$  cm/s で観察された火炎の画像を示す。Figure 2(a) の正面画像からは対向流燃え拡

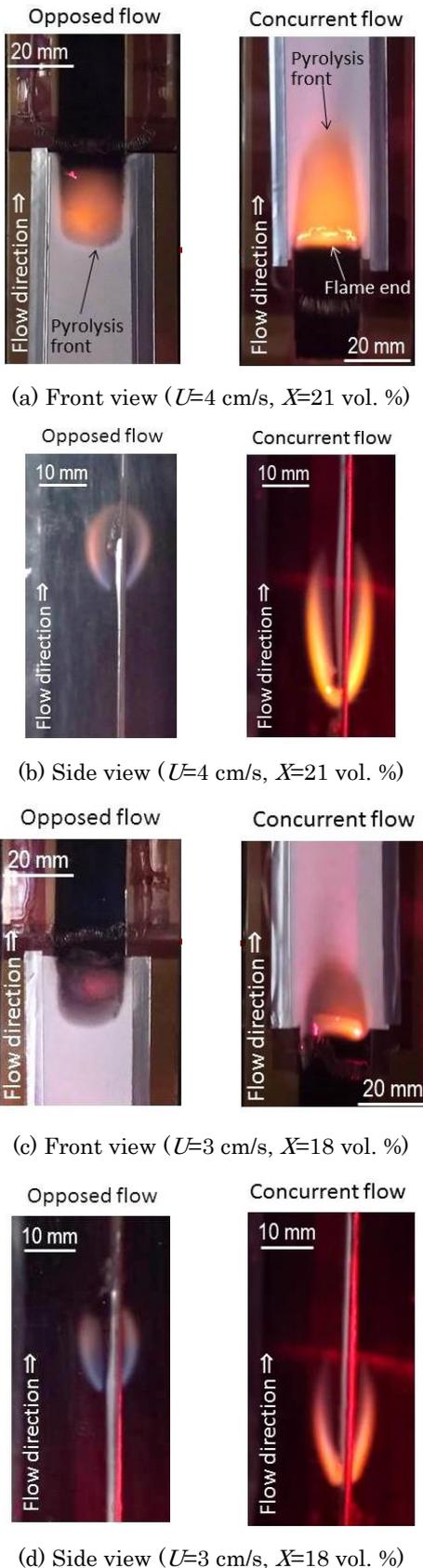


Fig. 2 Flame feature

がりで形成された熱分解領域の大きさが並向流燃え拡がりよりも小さいことがわかる。熱分解領域が大きいほどろ紙から生成される可燃性気体量が増し、火炎高さが大きくなる。実際、側方から見た対向流中そして並向流中の燃え拡がり火炎を示している Fig. 2(b) より、並向流燃え拡がりの火炎高さが対向流の火炎の高さよりも大きいことがわかる。Figure 2(a) の並向流燃え拡がり火炎の高さは 36 mm、対向流燃え拡がり火炎の高さ 19 mm であり、並向流中の火炎は対向流中の火炎の 1.9 倍の大きさを示している。また Fig. 2(b) から対向流燃え拡がりの火炎は、全体的に丸みを帯びた形状となっており、特に火炎基部分が青炎となっていることがわかる。他方、並向流燃え拡がりの火炎は全体が黄炎となっており、対向流燃え拡がり火炎ほど丸みを帯びていない。

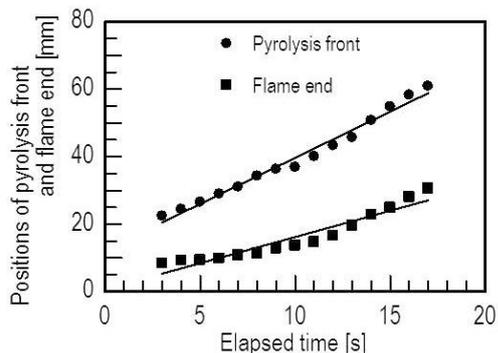
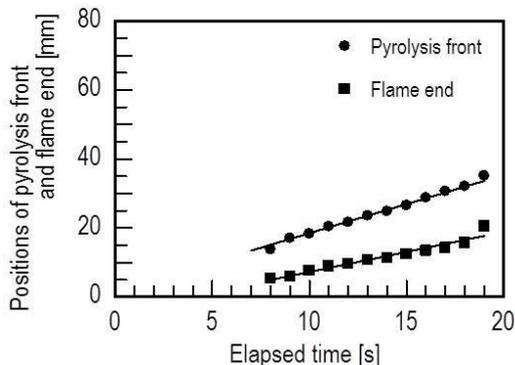
また Fig. 2(a) から各画像中の火炎進行方向を前方として考えた場合の熱分解領域先端部(Pyrolysis front)の位置の時間的な変化を画像から測定することにより、後で示す燃え拡がり速度  $V_f$  mm/s を測定している。また Fig. 2(a) の並向流中燃え拡がりの画像から、火炎の最下端 (Flame end) が明瞭に観察できることがわかる。並向流燃え拡がりにおいては、熱分解領域先端と火炎最下端の移動速度を比較することで、燃え拡がり非定常状態なのか定常状態に近いのかを判断することができる。この結果については次節で検討する。

次に  $X=18$  vol. %,  $U=3$  cm/s での各流れの燃え拡がり火炎の様子を Fig. 2(c) と (d) に示す。Figure 2(c) の正面からの画像から、ろ紙上に形成される熱分解領域の大きさが並向流と対向流をあまり変わらないことがわかる。更に Fig. 2(d) の側方からの観察でも、並向流中に形成される火炎の形状が Fig. 2(b) よりも対向流中の火炎に形状が近くなっていることがわかる。ただし、対向流燃え拡がり火炎の青炎領域が Fig. 2(b) に比較して増加しているのに対して、並向流燃え拡がり火炎では酸素濃度に依らず火炎全体が黄炎となっており変化はない。また Fig. 2(d) の並向流燃え拡がり火炎の大きさは 25 mm、それに対して対向流燃え拡がり火炎の大きさは 17 mm で、その比率は 1.5 倍まで減少している。

このように、並向流と対向流中で流速や酸素濃度が低下し燃え拡がりの限界酸素濃度近傍では、両者の流れの中で形成される火炎の形状や大きさは完全に一致するわけではないが近づいてくることがわかる。この傾向は他の空気流速においても定性的に同様であった。

### 3.2 並向流燃え拡がりの非定常性について

一般に並向流燃え拡がりでは、その燃え拡がり速度が時間と共に増加する非定常燃え拡がり現象を示す。これは可燃物の未燃領域の加熱が、対向流燃え拡がりのように火炎

(a)  $U=5$  cm/s,  $X=21$  vol. %(b)  $U=5$  cm/s,  $X=16.8$  vol. %

**Fig. 3** Positions of Pyrolysis Front and Flame end in Concurrent-Flow Flame Spread vs. Time.

先端にある反応面からの熱輸送だけで決まるのではなく、火炎で形成された燃焼ガスによっても行われることに起因する。そして並向流燃え拡がりにおける未燃部の加熱は、燃焼ガス量が多いほど、つまり火炎が大きい程大きくなるため、可燃ガスを放出する熱分解領域の大きさが、並向流燃え拡がりの伝播速度に対して重要となると考えられる。そこで **Fig. 2(a)**の並向流燃え拡がりの画像で示した熱分解領域先端 (Pyrolysis front) と火炎最下端 (Flame end) の位置を時間の変化に対してプロットしたものを **Fig. 3** に示す。この熱分解領域先端と火炎最下端の距離が熱分解領域の大きさを表すと考えられる。そして **Fig. 3** の熱分解領域先端が示す曲線の傾きは燃え拡がり速度を示す。他方、火炎最下端が示す曲線の傾きは火炎基部の移動速度を示す。そして、この熱分解領域と火炎最下端の曲線の傾きに違いがある場合、その燃え拡がり現象は定常状態にあるとは言えない。

**Figure 3(a)** は気流流速  $U=5$  cm/s, 酸素濃度  $X=21$  vol. % での並向流燃え拡がり火炎の結果を示す。横軸は航空機内で微小重力環境が形成されてからの経過時間を表している。**Figure 3(a)** から時間が経過するほど熱分解領域先端

と火炎最下端との間の距離が増加していることがわかる。その結果, **Fig. 3(a)** の並向流燃え拡がりは定常状態にはないことがわかる。

他方, **Fig. 3(b)** は  $U=5$  cm/s,  $X=16.8$  vol. %における並向流燃え拡がりの結果を示している。この  $X$  の値は限界酸素濃度近傍である。**Figure 3(b)** から, **Fig. 3(a)** に比較して熱分解領域先端と火炎最下端との間の距離が時間と共に大きく増加していないことがわかる。

このように非定常性を示す並向流燃え拡がりにおいて、熱分解領域先端と火炎下端の移動速度の酸素濃度の減少に対する変化傾向を示すために、熱分解領域先端の移動速度つまり燃え拡がり速度と火炎最下端の移動速度の平均速度を, **Fig. 3(a), (b)** で示した分布に便宜的に1次関数をあてはめ、その傾きから各値を評価した。その結果, **Fig. 3(a)** では燃え拡がり速度  $V_f=2.7$  mm/s, そして火炎最下端の移動速度は  $1.6$  mm/s, それら2つの値には1.7倍の違いがあった。そして **Fig. 3(b)** では燃え拡がり速度は  $V_f=1.7$  mm/s, 火炎最下端の移動速度  $1.2$  mm/s であり、その比率は1.4倍まで減少している。

以上のように、酸素濃度が低下し限界酸素濃度の条件に近づくと並向流燃え拡がり火炎の燃え拡がり速度は、定常状態へと近づいていくと考えられる。また、このように酸素濃度が減少すると、燃え拡がり速度と火炎下端の移動速度の比が1に近づくという傾向は、他の流速条件においても同様に観察されている。今後、長時間、微小重力環境が安定して得られる ISS において並向流燃え拡がり実験が実施できた場合、より限界に近い酸素濃度での燃え拡がり現象が形成でき、その場合、燃え拡がり速度は非常に小さくなり、燃焼ガスによる紙の未燃部の加熱と、未燃部から周囲への熱損失が釣り合うような条件が達成されれば、特に熱的に薄い紙を用いた場合、定常な燃え拡がり現象が観察されるものと期待している。

### 3.3 燃え拡がり速度の比較

**Figure 4** に  $U=4$  cm/s と  $5$  cm/s のときの対向流と並向流中に形成された火炎の燃え拡がり速度  $V_f$  の比較を示す。各燃え拡がり速度は 3.2 節で示したのと同じようにグラフの直線近似から求められている。横軸は酸化剤流中の酸素濃度  $X$  としている。また図中のハッチングは各  $U$  での限界酸素濃度 (LOC) の値を示している。

**Figure 4(a)** と **(b)** から、 $U$  の値に依らず  $X$  の低下とともに  $V_f$  が減少することがわかる。そして  $U$  に依らず並向流燃え拡がり火炎の  $V_f$  は、対向流燃え拡がりの  $V_f$  よりも常に大きいことがわかる。定量的には, **Fig. 4(a)** の場合,  $X=21$  vol. %の並向流燃え拡がり火炎では  $V_f=2.8$  mm/s であり、対向流燃え拡がり火炎では  $V_f=1.8$  mm/s であり、そ

の比率は 1.6 倍である。更に Fig. 4(a) の LOC 近傍の  $X=17.3$  vol. % では、並向流燃え拡がり  $V_f$  は 1.3 mm/s, 対向流燃え拡がりの  $V_f$  は 0.9 mm/s であり、その比率は 1.4 倍である。また  $U=5$  cm/s の Fig. 4(b) で、 $X=21$  vol. % において並向燃え拡がりの  $V_f$  は 2.7 mm/s として対向流燃え拡がりの  $V_f$  は 1.8 mm/s で、その比率は 1.5 倍となる。また限界酸素濃度近傍の  $X=16.8$  vol. % では並向燃え拡がりの  $V_f$  は 1.8 mm/s として対向流燃え拡がりの  $V_f$  は 0.9 mm/s となり、その比率は 2 倍となる。

このように、微小重力場においても通常重力場と同様に同一濃度と流速条件の下では、並向流中の火炎は対向流燃え拡がり火炎に比べて 1.4~2 倍程度大きな燃え拡がり速度の値を示すことがわかる。従って燃え拡がり速度の観点からは、並向流燃え拡がりの方が対向流燃え拡がりに比較してその値は大きく、火災安全性の観点からは、微小重力場での並向流燃え拡がりの方が対向流燃え拡がりよりも危険性が高いといえることができる。

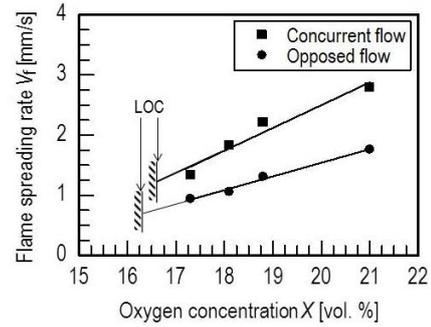
ただし本研究で調べることができた気流流速範囲は 7 cm/s までと、その変化幅は狭いため、より高い流速域において並向流中の火炎の燃え拡がり速度が対向流燃え拡がり火炎の何倍の燃え拡がり速度を示すのかはわからない。

### 3.4 限界酸素濃度の比較

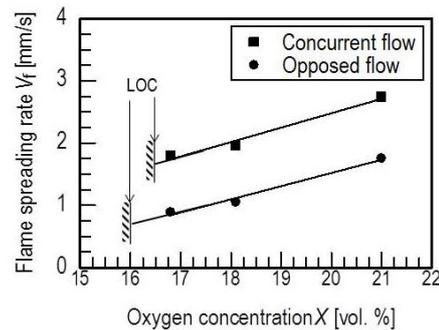
Figure 5 に微小重力環境における並向流と対向流燃え拡がりの限界酸素濃度線を、横軸を  $U$  として縦軸を  $X$  として示す。Figure 5(a) と (b) には 1G の限界酸素濃度線も示してある。本研究の空気流速条件では、1G, 大気圧下での燃え拡がり火炎の限界酸素濃度は、対向流そして並向流燃え拡がり共に流速に依らず、対向流燃え拡がりでは 17.8 vol.% 一定そして並向流燃え拡がりでは 15.8 vol. % 一定であった。また、本実験で変化させた気流流速範囲 (1-7 cm/s) に比べ、1G での燃え拡がり火炎によって誘起される自然対流速の値の方が大きいため、1G の限界酸素濃度の値は、設定した周囲流速の影響を顕著に受けていない。

まず Fig. 5(a) の対向流燃え拡がり火炎の限界酸素濃度線について検討する。Figure 5(a) から、本実験で測定できた流速範囲では微小重力環境での対向流燃え拡がり火炎の限界酸素濃度は、 $U$  が増加するほど低下する傾向を示すことがわかる。そして、 $U \leq 2$  cm/s では限界酸素濃度の値が 1G よりも微小重力環境の方が大きく、 $U > 2$  cm/s では微小重力環境で得られる限界酸素濃度の値が 1G より小さな値を示すことがわかる。つまり、対向流燃え拡がり火炎は、1G よりも微小重力条件で形成されたほうが消炎しにくいことを示している。

この対向流燃え拡がり火炎の限界酸素濃度の分布は、従来から多くの研究者により検討されており、流速範囲 0-20 cm/s



(a)  $U=4$  cm/s



(b)  $U=5$  cm/s

Fig.4 Flame Spreading Rate vs. Oxygen Concentration.

では下に凸の U 字分布を示すことが知られている<sup>1)-6)</sup>。本研究は流速範囲が 1-7 cm/s に限定されていたため、U 字分布の左側の反比例傾向の分布が観察されたものと考えられる。周囲流速が非常に低速まで減少した場合、限界酸素濃度が増加するつまり消炎が生じやすくなる傾向について、従来の研究では次のように述べられている。PMMA を用いて限界酸素濃度分布を検討している高橋ら<sup>5),6)</sup> は可燃性固体の予熱領域の長さが流速の低下と伴に増大し、それに伴い可燃性固体から放射による熱損失量が増大する。この燃え拡がりからの放射熱損失量が流速低下と伴に増大したため、低速でより消炎しやすくなるとしている。また S. Olson ら<sup>1)-4)</sup> は流速が低下するほど周囲空気から火炎面へ輸送される酸素量が低下し、それに伴い燃焼強度が低下することで、低流速での消炎がより容易に生じやすくなるとしている。

Figure 5(b) の並向流燃え拡がり火炎の限界酸素濃度線を示す。Figure 5(b) から、並向流燃え拡がり火炎の限界酸素濃度の分布は定性的に Fig. 5(a) の対向流燃え拡がり火炎の限界酸素濃度と同様な傾向を示すことがわかる。つまり、周囲空気の流速が増加するほど並向流燃え拡がり火炎の限界酸素濃度は減少し消炎しにくくなる。そして、微小重力環境で得られる並向流燃え拡がりの限界酸素濃度の値は、 $U=7$  cm/s において 1G と微小重力での限界酸素濃度の値がほぼ等しい値を示しているが、それ以外の流速範囲

囲つまり  $U < 7 \text{ cm/s}$  では、常に微小重力での限界酸素濃度の値が  $1G$  より大きくなっており、並向流燃え拡がりでは  $1G$  より微小重力条件の方が、火炎が消炎しやすいことを示している。このように並向流燃え拡がりの限界酸素濃度分布も、対向流燃え拡がり火炎と同様の傾向を示すことから、その限界を決定する支配因子についても同様と考えることができる。つまり、周囲流速の低下に伴う可燃性固体からの放射による熱損失増大そして火炎の安定性を支配する火炎基部への酸素供給量の低下が、並向流燃え拡がり火炎をより消炎しやすくするものと考えられる。

最後に、**Fig. 5(c)** では **Fig. 5(a)** と **(b)** の微小重力環境での限界酸素濃度線図の値を重ねて、並向流と対向流燃え拡がりの流れの違いによる限界酸素濃度への影響を、比較・検討する。**Figure 5(c)** から見てわかるように、並向流および対向流ともに、ほとんど各気流流速に対する限界酸素濃度の値が大きく変化しないことを示していることがわかる。つまり、 $1G$  においては限界酸素濃度の値が並向流燃え拡がりの方が対向流燃え拡がりよりも大きく、限界酸素濃度の値から判断した火災に関する危険性としては並向流の方が大きいことになる。ただし、微小重力環境そして流速範囲  $1\text{--}7 \text{ cm/s}$  では、並向流と対向流のどちらで火炎が形成されても、限界酸素濃度の値から判断した火災危険度としてはほとんど変わらないと考えられる。

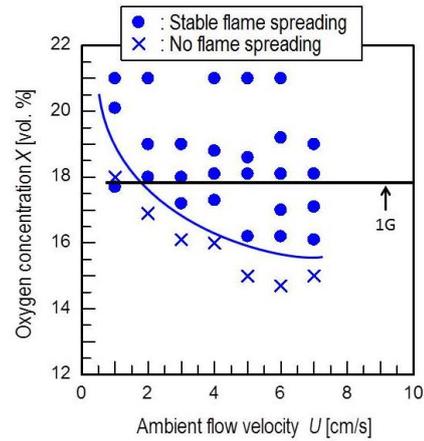
また流速範囲は  $1\text{--}7 \text{ cm/s}$  と限定されているものの並向流と対向流燃え拡がり火炎がほぼ等しい限界酸素濃度を示すという事実は、燃え拡がりの限界については、並向流そして対向流ともに周囲空気流れの最上流側に位置する火炎基部が安定して存在するかもしくは消炎するののかということに依存しているものと考えられる。

他方、本研究の目的の1つである PMMA との限界酸素濃度分布の定量的な比較・検討は、流速範囲が限定されているために難しく、今回の実験結果では炭素残渣の限界酸素濃度分布への影響は明確にすることはできなかった。

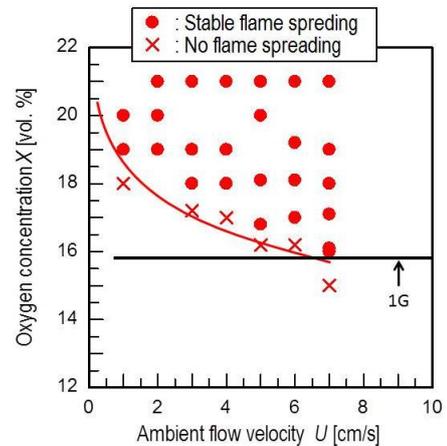
#### 4. まとめ

微小重力場で薄い紙上を燃え拡がる火炎を並向流と対向流中に形成して、火炎形状、燃え拡がり速度、限界酸素濃度について比較・検討した。微小重力場の対向流と並向流の燃え拡がり火炎は、2台の吸い込み風洞装置を1つの航空機に搭載して行ったパラボリックフライトで形成した。

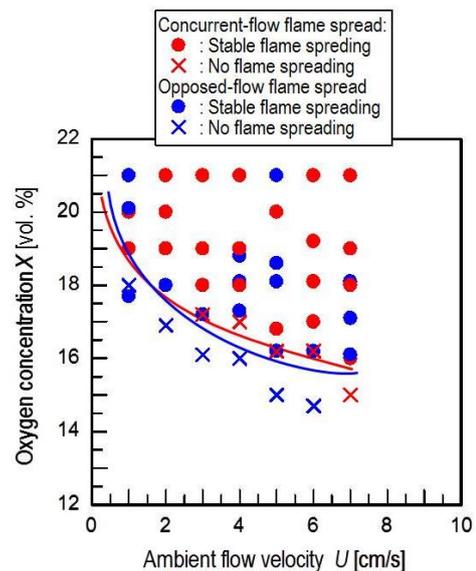
その結果、微小重力環境における並向流燃え拡がり形成される火炎は、その火炎高さは対向流燃え拡がり形成される火炎よりも大きいが、酸素濃度が低下して限界酸素濃度に近づくほど並向流と対向流の火炎の大きさの等しい値へと近づいていくことがわかった。他方、燃え拡がり



(a) Opposed-Flow Flame Spread



(b) Concurrent-Flow Flame Spread



(c) Comparison of Limiting Oxygen Concentration between Concurrent-Flow and Opposed Flow Flame Spreads

**Fig. 5** Diagram of limiting oxygen concentration under microgravity condition.

速度に関しては、限界酸素濃度に近づくほど量燃え拡がり速度の値は減少するものの、並向流の燃え拡がり速度は対向流の燃え拡がり速度に比して 1.4~2 倍程度大きな値を示した。そして、気流流速を変化させて測定した限界酸素濃度の分布は、並向流と対向流のどちらにおいても定性的にもまた定量的にもほとんど変わらないことがわかった。

ただし、今回の実験では機体内と機体外の圧力差で風洞内の流れを駆動したが、実験装置の流動抵抗から形成できた流速範囲は 1-7 cm/s であった。そのため、広い流速範囲での各流れの限界酸素濃度線図の測定が行えなかった。従って、今後の研究として 8 cm/s 以上の流速範囲で並向流と対向流燃え拡がり火炎の限界酸素濃度の値を測定し比較・検討する必要がある。

### 謝辞

本研究は、日本宇宙航空研究開発機構 (JAXA) および日本宇宙フォーラム (JSF) から支援を受けた研究の一環として行われた。ここに記して謝意を表す。また実験遂行に関して多大なる協力と支援を頂いたダイヤモンドエアサービスのスタッフの方々にも感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) S.L. Olson: Combustion Science and Technology, **76** (1991) 233.
- 2) S.L. Olson, F.J. Miller, S. Jahangirian and I.S. Wichman: Combustion and Flame, **156** (2009) 1214.
- 3) S.L. Olson: NASA/CP-2004-213205, **2** (2004) 296.
- 4) S.L. Olson and F.J. Miller: NASA/TM-2008-215260, p.1 (2008).
- 5) S. Takahashi, M. Hotta, S. Bhattacharjee, T. Ihara and K. Wakai: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **29** (2004) 23 (in Japanese).
- 6) S. Takahashi, T. Ebisawa, S. Bhattacharjee, and T. Ihara: Proceedings of Combustion Institute, **35** (2015) 2535.
- 7) National Aeronautics and Space Administration, Flammability, Odor, Off-gassing, and Compatibility Requirements and Test Procedures for Materials in Environments that Support Combustion, NASA (1998).
- 8) D. Drysdale: An Introduction to Fire Dynamics 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley&Sons, Ltd, p.278 (2011).
- 9) M.C. Johnston, J.S. T'ien, D.E. Muff, X. Zhao, S.L. Olson and P.V. Ferkul: Fire Safety Journal, **71** (2015) 279.
- 10) A. Kumar, H.Y. Shih and J.S. T'ien: Combustion and Flame, **132** (2003) 667.