

微小重力場における対向流拡散火炎の挙動

前田博孝*・松本徹**・矢野利明***・

鳥居修一***・飯野直子***

FLAME BEHAVIOR OF COUNTER-FLOW DIFFUSION FLAMES UNDER MICRO-GRAVITY CONDITION

Hiroataka MAEDA, Akira MATSUMOTO, Toshiaki YANO,
Shuichi TORII and Naoko IINO

A counter-flow diffusion flame formed in the forward stagnation region of a porous cylinder was investigated under the influence of micro-gravity. The burner was made of sintered bronze with an outer diameter of 30mm. A wind tunnel made of acryl was used to generate a steady air-flow. The fuel used for the present study was propane. The flame was generated at the stagnation region when the fuel was ejected from the cylinder and the steady flow of air was blown from a blower to interfere with the fuel after passing through the wind tunnel. The fuel was supplied from a fuel tank and air was blown out from an electric blower. Both the volume flow rates of fuel and air were metered by two sets of orifices and manometers. In order to generate the effect of micro-gravity, a falling device comprised of a rack with height of 7m and a box with a 8mm video camera, the burner and wind tunnel was employed. The box was allowed to fall down from the top of the rack with a duration of 0.9s. Numerous images obtained from experiments were recorded by the video camera and were processed by using an Image and Processing Treatment device. Sundry characteristics of flame luminosities under the influence of micro-gravity were qualitatively and precisely investigated.

Keywords : Counter-flow, Porous Cylinder, Micro-gravity, Sintered Bronze, Orifice And Manometer

1. 緒言

宇宙環境における実験で最も特徴的なのは無重力状態にある。これは地球の引力と宇宙船などが地球

の周りを回っていることにより働く遠心力とが釣り合った状態である。しかし、実際には微小の重力があり、この微小重力環境下での火炎が、浮力と対流によって炎の形や、燃焼速度に大きく影響する。浮力によって高温の燃焼ガスが上方へ運ばれていくと同時に新しい空気が下方から供給され、対流が生じる。このように地上の燃焼では自然対流が、酸素の供給と燃焼ガスを運び去る役割を果たしている。この対流の存在が現象を複雑にしている大きな要素で

2000年7月15日受理

*博士前期課程機械工学専攻

**富士通(株)

***機械工学科

ある。しかし微小重力場で燃焼現象を観察できれば地上のように自然対流の働きがないため、複雑な燃焼状態を単純化することができる。そこで、地上でしかも重力の影響を極力排除した微小重力環境を得る方法に、自由落下法による実験が確立されている。この方法を利用して様々な燃焼形態について実験が行われ、形状変化や構造解明についての結果が報告されている^{1),2),3),4)}。

使用した火炎については、対向流拡散火炎を用いた。この火炎は燃料流と酸化剤流が対向する衝突面にあるよどみ領域に形成される、付着点を持たない火炎である。これは流れ場も単純、実験装置も簡単であるため様々な研究が、特に吹き消え限界や可燃限界、消炎機構、すす生成問題などについて行われている^{5),6),7),8)}。そこで本研究では微小重力環境が可能な落下塔を用いて、微小重力下における対向流拡散火炎の挙動を画像処理によって明らかにした。

2. 実験装置及び実験方法

本研究では微小重力環境を得る方法として安価で繰り返し実験の行なえる自由落下法を用いた。研究室外に全高 7.0m、横断面 1.75×1.0m の落下塔を設置した。この落下塔で自由落下距離 4.5m、約 0.9 秒間の微小重力環境を得る事が出来る。本実験で用いた落下塔の概略を図 1 に示す。落下塔下部には落下時の衝撃を吸収するためにクッションが敷き詰められている。また、何度も繰り返し実験が行なえるように、落下装置の切り離しには電磁ホルダを使用し、マグネットを制御するために適切な整流器を用いた。

落下装置の概略を図 2 に示す。落下装置本体は 600mm×900mm×350mm の直方体で重量 30kgf である。燃焼室上部の上面は開放し、高さ 270mm の木板でできた風よけを取り付けた。これは火炎の高さが大きいいため研究室外で実験するにあたって火炎に風の影響を与えないようにするためである。これによりある程度風の影響を取り除くことが出来た。

落下装置の中には燃焼室、多孔質円筒バーナ、燃焼風洞、8mm ビデオカメラ (ソニー (株) 製、TR1000) が搭載されている。火炎の撮影条件はシャッタースピ

ード 1/60、手動フォーカス、明るさ 12 であり、1/30 秒毎の火炎を撮影した。酸化剤 (空気) は、ブロー、スライダ、オリフィスマノメータにより供給され、燃料は、燃料ポンプ、ニードルバルブ、オリフィスマノメータを通して供給され実験の際には地面に設置し、長く伸ばしたホースを使い、外部から落下装置に供給した。

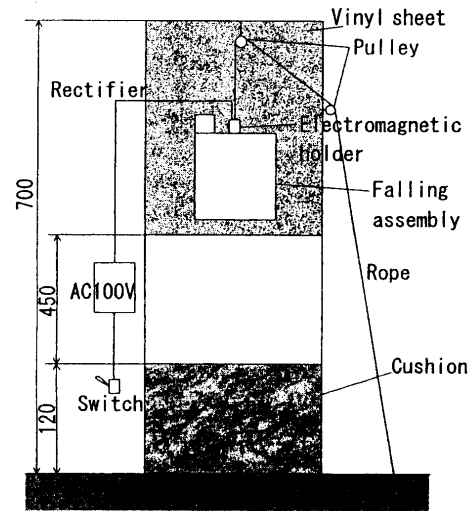


図 1 落下塔

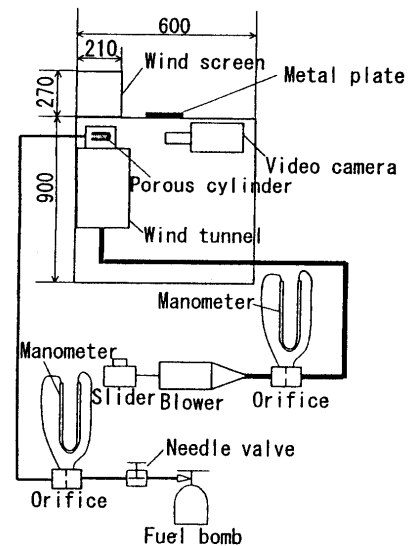


図 2 落下装置

燃料流量と空気流量の設定は、あらかじめ流量と差圧との検定曲線を作成しておき、落下前のマンメータの差圧の読み値により行った。燃料にはプロパンを使用し、燃料流量と空気流量をパラメータとして実験を行った。表1に今回行った実験条件を示す。

表1 実験条件

実験番号	流量 ($\times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$)	
	プロパン	空気
A1	5	20
A2		30.5
A3		36
B1	10	20
B2		30.5
B3		36
C1	15	20
C2		30.5
C3		36

3. 画像解析方法

本研究では画像処理装置(三谷商事(株)製、Win Roof)を利用して火炎の形状特徴、火炎輝度ヒストグラム(R, G, B値)を測定した。画像解析の流れの概要を図3に示す。画像処理装置に火炎画像を取り込み、横軸にX、縦軸をYとしたときの画像処理範囲であるROIを図4のように設定し、各々の方法で解析を行った。図5は火炎の形状特徴である。

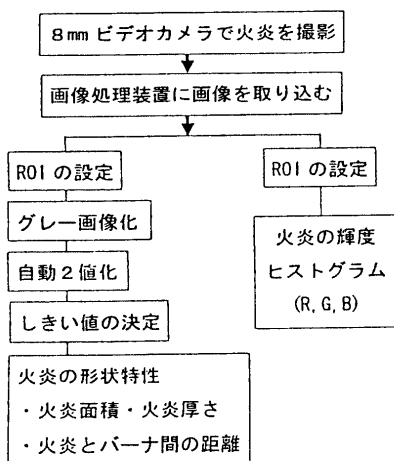


図3 計測プロセスの流れ線図

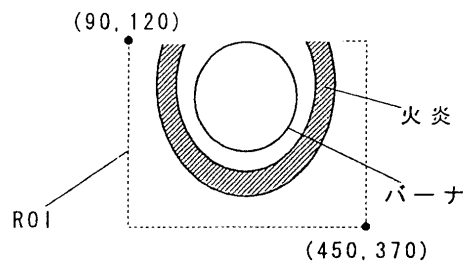
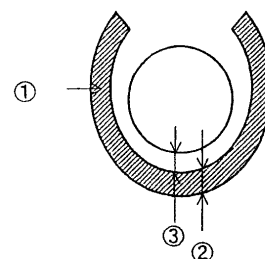


図4 ROIの設定



- ① 火炎面積 S
- ② 火炎厚さ T
- ③ 火炎とバーナ間の距離 D

図5 火炎の形状特徴

4. 実験結果ならびに考察

4.1 微小重力下における火炎画像

図6は表1に示した実験番号のA1の微小重力環境下における火炎の連続写真である。約0.9秒間の微小重力環境であり、1コマあたり1/30秒で0コマから27コマまで計28コマの画像が撮影された。

0コマ目の画像は落下直前の通常重力下での火炎画像であり、多孔質円筒バーナの前方よどみ領域に安定した対向流拡散火炎が形成されている。落下開始後の約0.233秒の7コマ目あたりから、火炎の幅や、火炎の厚みが大きくなり始める。輝度の低下などは見られず、むしろ輝度は上がっている。落下開始後の約0.333秒後の10コマ目あたりから、火炎がバーナ表面から離れ始めているのがわかる。18コマ目あたりを過ぎると火炎が乱れ始めだんだんと火炎がバーナの前面の方に出てくる様子が見られる。これでは解析が不可能であるため、他の実験条件とも比較するため0から18コマの間で解析を行った。

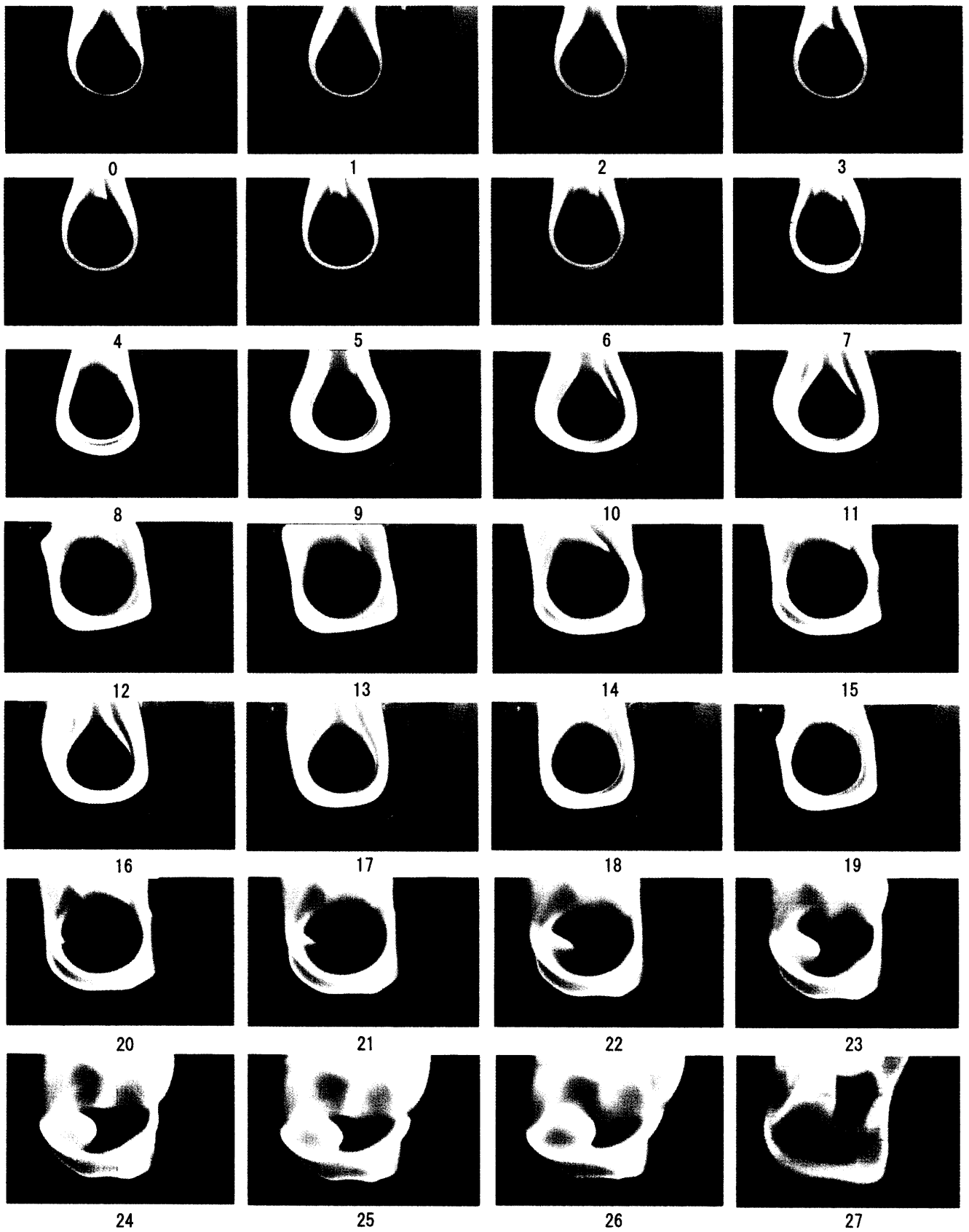


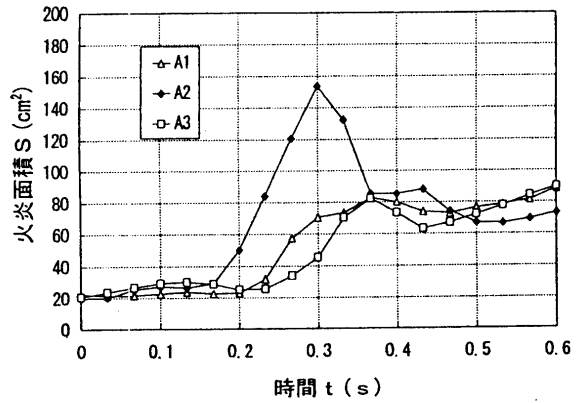
図 6 火炎の連続画像

4.2 火炎の形状特性

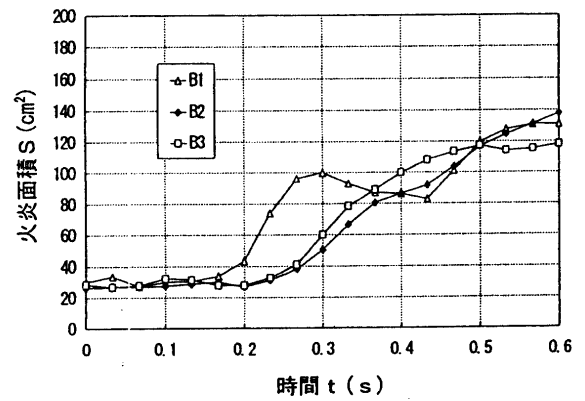
図7, 8, 9は、表1で示した各実験条件について、判別分析法で2値化した火炎画像の形状特徴を示したものである。図7は落下時間 t と火炎面積 S 、図8は落下時間 t と火炎厚さ T 、図9は落下時間 t と火炎とバーナ間の距離 D の関係を示している。 S, T, D はそれぞれ微小重力の開始から増加の傾向がある。この原因として考えられるのは、自然対流の損失により、火炎が拡散したためではないかと思われる。

S, T, D の中で S, T は約 0.2 秒後にそれまで目立った変化は示さず一定だった値から急に変化を始める。特に S, T は急激な増加をしている。 S の値は最初と最後では4倍~5倍、 T も4倍~6倍も増加している。ロウソクやガスライターなど比較的その体積や、エネルギーなどの小さな火炎は、落下直後からすぐに体積が大きくなったり、火炎長さが長くなるといった変化を示すことが報告されている⁸⁾。しかし、本研究における対向流拡散火炎ではこのような現象は見られなかった。これは、燃料流量がロウソクなどの火炎に比べかなり大きいことにより火炎が急激な環境変化についていけなかったためではないかと思われる。また、火炎とバーナ間の距離 D は、落下後 0.4 秒間ぐらひは大きな変化はしないが、その後急に増加を始めるのがわかる。

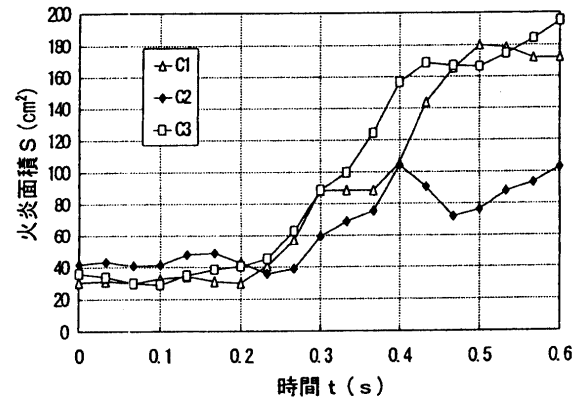
これらを総合して考えると、火炎面積 S 、厚さ T は約 0.2 秒後に変化を始め、火炎とバーナ間の距離 D は約 0.4 秒後に変化しはじめる。燃料流量に対する S, T, D 各値の変化は確認できたが、空気流量に対する違いはあまり確認できなかった。



(a) 燃料流量 : $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

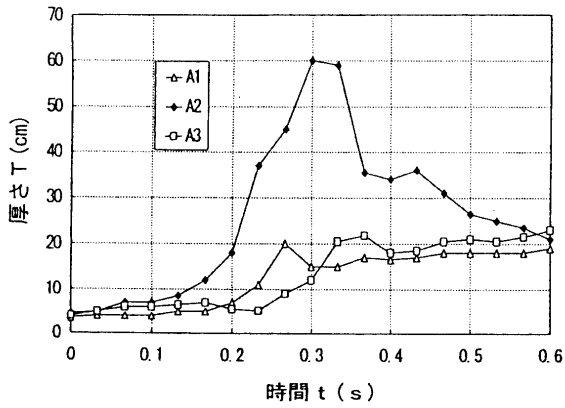


(b) 燃料流量 : $10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

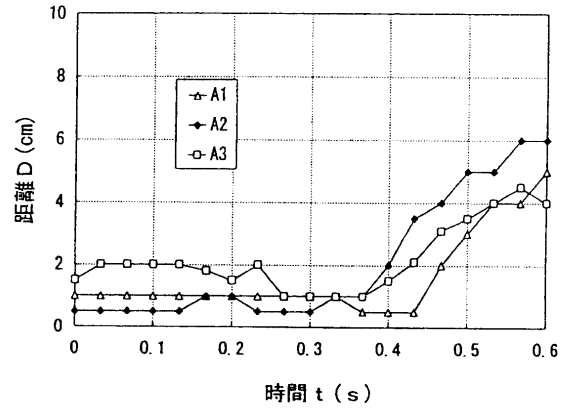


(c) 燃料流量 : $15 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

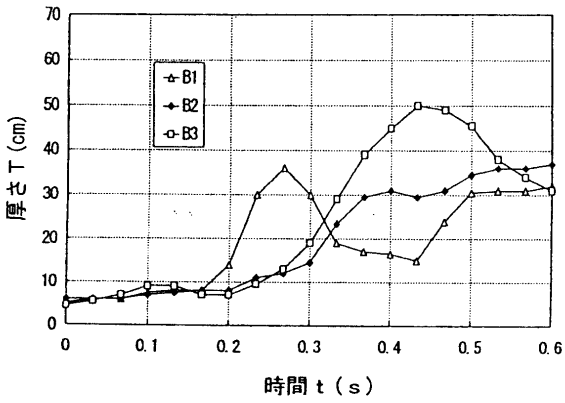
図7 火炎面積 S の時間変化



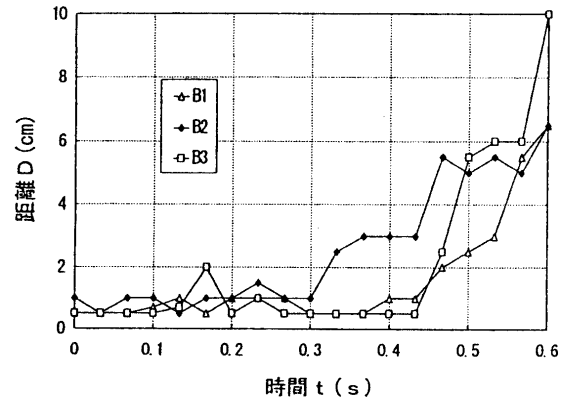
(a) 燃料流量 : $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$



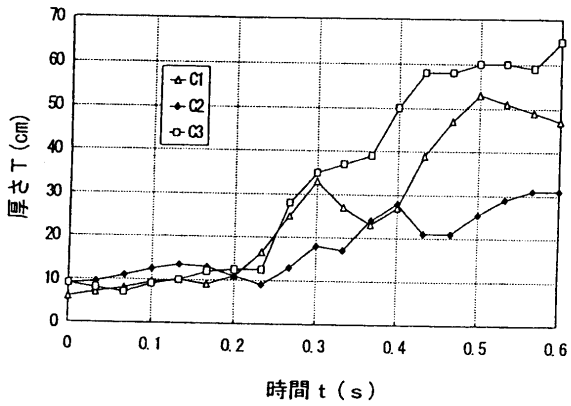
(a) 燃料流量 : $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$



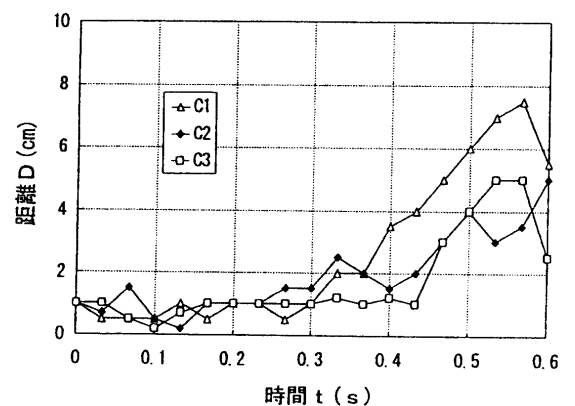
(b) 燃料流量 : $10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$



(b) 燃料流量 : $10 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$



(c) 燃料流量 : $15 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$



(c) 燃料流量 : $15 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

図 8 火炎厚さ T の時間変化

図 9 火炎とバーナ間の距離 D の時間変化

4.3 火炎の輝度ヒストグラム

図10はA1における通常重力(NG)と微小重力(MG)の時の輝度値(R, G, B値)のヒストグラムを求めたものである。NGはR値、G値、B値の値の低いところでP(ピクセル数)のピークがきており、MGは値の高いところでPのピークがきている。これはMGでは、かなり輝度の高い火炎が広範囲にわたり形成されていることを示している。

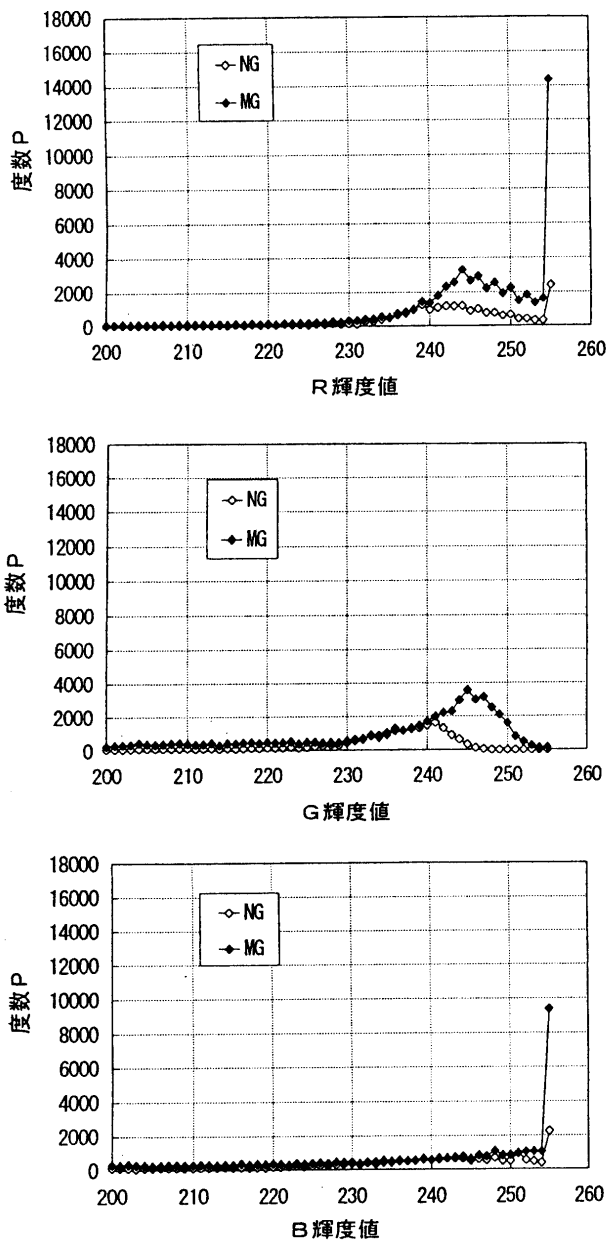


図10 火炎輝度ヒストグラム

この事をもとに考察してみると、ろうそくやガスライターといった拡散火炎は、微小重力場になると火炎面積や火炎厚さは対向流拡散火炎の時と同様、増加傾向を示すが、火炎輝度は低下することがわかっている。これは、これらの拡散火炎が燃焼ガスの放出・酸素の流入という換気システムを自然対流の力を借りておこなっていたのが、微小重力場では自然対流が喪失され、このシステムが上手く作動しなくなり、火炎が酸素不足の状態になるために輝度の低下が見られた。しかし、対向流拡散火炎は微小重力場において火炎の拡散・膨張といった挙動はろうそくなどと同じ傾向を示すのに対して火炎輝度は上がっている。これは、一様な空気流という強制流が常にバーナに向かって働いているため、酸素不足の状態にはならず、むしろ拡散された燃料流と混合され、よりよい燃焼状態を呈するものと思われる。

5. 結論

微小重力下における対向流拡散火炎の挙動を8mmビデオカメラで撮影し、画像処理することによって以下の結論を得た。

- (1) 研究室外の高さ7.0mの落下塔を使用して、約0.9秒間と短い微小重力環境ではあるが、通常重力と微小重力における対向流拡散火炎の火炎形状や火炎色の違いを見ることができた。
- (2) 8mmビデオカメラで撮影された火炎画像を画像処理装置に取り込み、画像処理することによって、火炎形状や火炎輝度の特徴を捉えることができた。
- (3) 火炎幅、面積、厚さは落下後、増加の傾向を見せた。これは、自然対流が取り除かれた微小重力場では、燃料が拡散される範囲が広がり、その領域において燃焼反応が起こると考えられる。これに伴い火炎とバーナ間の距離はひらく。
- (4) 火炎輝度は、微小重力環境において低下すると考えられていたが、今回の実験で火炎

輝度はすべての場合において向上した。これは、自然対流はなくなるものの、下方からの空気(酸化剤)の強制対流のために起こると考えられる。

参考文献

- 1) 新岡・丸田、日本マイクログラビティー応用学会誌、vol.12(2)、1995、p80-87
- 2) 伊藤・藤田、第7回宇宙利用シンポジウム、1990、p73-78
- 3) 伊藤、日本機械学会誌、vol.197、1994、p767-769
- 4) 新井、日本機械学会誌、vol.100、1997、p49-51
- 5) 辻・石塚、第16回燃焼シンポジウム、1978、p4-6
- 6) 山岡・辻、第16回燃焼シンポジウム、1978、p7-9
- 7) 吉田・小谷・山崎、日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集、1997、p25-26
- 8) 杉山・謝・河野、第26回燃焼シンポジウム、1988、p170-172
- 9) 川口・矢野・鳥居・松本、第36回航空原動機・宇宙推進講演会、1996、p213-218