微小重力環境を利用した壁面近傍における
液滴燃焼に関する実験的研究*岡井 敬一^{*1}, 津江 光洋^{*2}, 河野 通方^{*2}
佐藤 順一^{*3}, Daniel L. DIETRICH^{*4}, Forman A. WILLIAMS^{*5}An Experimental Study of Droplet Combustion near a Wall Using
Microgravity EnvironmentsKeiichi OKAI^{*6}, Mitsuhiro TSUE, Michikata KONO,
Jun'ichi SATO, Daniel L. DIETRICH and Forman A. WILLIAMS^{*6} Institute of Space Technology and Aeronautics (ISTA), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA),
7-44-1 Jindaiji-Higashi, Chofu-shi, Tokyo, 182-8522 Japan

This paper presents results of an experimental investigation on the combustion of a single droplet in the vicinity of a cold wall in microgravity. The fuel was *n*-heptane, and the ambient gas was air at normal atmospheric pressure. Two types of plates with different reflectivities were used as the cold wall. Droplet burning lifetimes, burning-rate constants, durations of the initial heat-up period and several flame characteristic scales are presented and discussed. The results showed that the wall causes flame deformation and flame extinction when it is close enough to the droplet. The droplet-burning lifetime reaches a minimum at a certain spacing between the droplet and the wall surface. This combustion enhancement is principally seen as a reduction of the initial heat-up period. It is suggested that the reduction of the total burning time is due to enhanced conductive heat transfer to the droplet caused by flame deformation. The present configuration is similar to that of combustion of a droplet pair. Comparisons with results for droplet-pair combustion are also presented. From the comparisons, several similarities were found, but the mechanism appears to be different. These differences are also discussed in the paper.

Key Words: Liquid Fuel, Flame, Diffusion Combustion, Droplet, Microgravity, Burning Life-time, Burning Rate Constant, Wall Surface

1. 緒 論

微小重力環境を利用した液滴燃焼に関する研究は、不均質燃焼を特徴付ける古典的な問題であるためだけでなく、噴霧燃焼の機構解明に寄与するという観点から、重要視されてきた。実用燃焼器においては、液滴は液滴同士で相互干渉するだけでなく、燃焼容器の壁面とも干渉する。噴霧の噴射を伴う自動車用エンジンにおいては、壁面への液滴の衝突や関連した壁面近傍での液滴挙動は極めて重要な問題である⁽¹⁾。近年の直噴エンジンへの関心と利用の増大に対応して、この問題はエンジン性能に直結する課題と

してより興味深いものとなっている。しかしながら、壁面近傍における液滴燃焼に関する基礎的な研究はほとんどなされていないのが現状である。Nguyen and Avedisian⁽²⁾は、燃焼器内での噴霧中の液滴と燃焼器壁面との干渉特性の理解を進めることを目標として、単一液滴の壁面近傍での蒸発挙動を数値的に研究している。また、Chandra and Avedisian⁽³⁾は、単一液滴に対して水平および垂直に配置された壁面近傍における液滴の燃焼挙動を実験的に調べているものの、主たる知見は自然対流の影響を受ける通常重力下において得られたものである。著者らは、これまで、微小重力環境において複数液滴相互の燃焼における干渉特性に関する研究を行ってきた^(4,5)が、同様に燃焼する液滴と壁面との干渉に関して調べることは、実用燃焼器に対して近年関心の高まっている燃焼挙動に及ぼす壁面の影響に関する基礎的知見を得るという観点から非常に重要であると考えられる。

* 原稿受付 2003年2月20日。

^{*1} 正員、独立行政法人宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部
(〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1)。^{*2} 東京大学大学院(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。^{*3} 正員、石川島播磨重工業(株)(〒100-0004 東京都千代田区
大手町2-2-1 新大手町ビル)。^{*4} NASA John H. Glenn Research Center(21000 Brookpark
Road, Cleveland, OH 44135 USA)。^{*5} University of California at San Diego(9500 Gilman Drive,
La Jolla, California 92093-0411 USA)。

E-mail: okai.keiichi@jaxa.jp

以上の背景から、著者らは、本研究において壁面近傍におけるヘプタン単一液滴の燃焼挙動を調べた。燃焼実験は、自然対流により現象が複雑化し、重要な物理現象が覆い隠されることを防ぐため、すべて微小重力環境下で行われた。懸垂線を用いて液滴の位置を固定することによって、液滴を実験中全期間観察することを可能にし、さらに液滴と平板表面の距離を一定の既知の大きさに保つことができる。使用した平板（壁面）は相互に若干反射特性の異なる2種類の全反射鏡とした。全反射鏡を壁面として用いた場合、壁面による熱損失の影響を除けば、本研究の燃焼形態は、Chandra ら⁹も指摘しているように、2個の液滴が並んで燃焼する、いわゆる2液滴燃焼と類似していると言える。Mikami ら¹⁰は、2液滴燃焼における干渉特性に関して、隣接する液滴周囲に形成された火炎からの放射熱輸送により燃焼促進の可能性を示唆してきた。一方、2液滴燃焼では、液滴間の干渉により液滴周囲に形成される火炎の変形が生じ、火炎変形が燃焼促進の要因であることも考えられ、2液滴燃焼における燃焼促進効果について未だ明確な結論は得られていない。全反射鏡を側面に配した単一液滴燃焼実験は、2液滴燃焼における近接する液滴からの放射熱輸送をも模擬したものであると考えられる。このような観点から、本論文では、壁面近傍での液滴燃焼挙動の解析を行うとともに、同一燃料を用いた Mikami ら¹⁰による2液滴燃焼実験結果との関連性について考察を行った。

2. 実験装置および方法

実験は落下塔施設を利用してすべて微小重力環境下において行われた。使用した落下塔は、NASA John H. Glenn Research Center 2.2秒落下塔（米国オハイオ州クリーブランド）であり、本落下塔においては地上重力加速度の 10^{-4} 倍以下の加速度（微小重力）環境が与えられる。図1に実験装置の概要を示す。同図に示される枠を内箱とし、外側に空気抵抗効果低減用の外箱を配し、内箱・外箱を非接触の状態で落下させることで上述の精度の微小重力環境を得ている。液滴は、懸垂のために先端を直径の約2倍の径に丸めた石英製の直径0.125mmの細線の先端部に形成され、その初期直径は1.0mm（ ± 0.1 mm）である。この初期直径の液滴を用いることにより、微小重力期間中に燃焼が終了した。

燃料は、ステッピングモータにより駆動される注射器により、落下実験の開始直前に通常重力下で懸

①High pressure combustion chamber, ②Motor, ③Camera #1 (Backlit image), ④Camera #2 (Direct photograph), ⑤Mirror, ⑥2 Batteries, ⑦Transformer, ⑧Manual driver, ⑨Computer, ⑩Video transmitter

Figure 1 Experimental apparatus.

Table 1 Variation of reflectivity ($R[\%]$) of the mirror surface (P1 and P2) with wave length (λ [nm]).

Spectrum	λ [nm]	$R[\%]$	
		M1	M2
VUV	100	20	
	150	60	
UV	200	88	20
	250	90	22
	300	92	24
	350	93	26
VIS	400	93	28
	450	92.5	32
	500	92	45
	550	92	68
	600	92	80
	650	91	86
	700	90	89
	750	88	92
IR	800	89	94
	850	90	95
	900	92	96
	950	93	97
	1000	93	98
	1500	94	99
	2000	95	99
	2500		99
	3000		99
	4000		99
	5000		99
	5500		99
	10000		99

垂線先端に供給される。コイル状に加工された点火用熱線の加熱により微小重力下において液滴を点火させた。点火用熱線は、液滴の燃焼挙動に影響を及ぼさないよう、点火後直ちに燃焼領域外へ退避させた。点火に要する加熱時間は約0.4秒であった。上

(a) Plate Experiment (b) Droplet pair experiment ⁽⁷⁾

Figure 2 Definition of spacing z in the present plate experiment (a) and in the droplet pair experiment by Mikami and coworkers ⁽⁷⁾ (b).

記に示した実験部は約 27L の容積を持つ密閉された燃焼容器に収められる。液体燃料として正ヘプタンを用い、周囲気体は大気圧、室温の空気である。

本実験で使用した壁面は、P1, P2 と称する 2 種の平板であり、いずれも 7cm x 7cm で厚さ 7mm の直方体である。これらは全反射鏡であり、表 1 に示すように、波長に対して異なる反射特性を持っている。P1 は可視光域および赤外線領域を反射するもので、P2 は可視光での反射率が P1 より低く赤外線領域での反射率が P1 より高いという特性を有している。本研究では、輻射の特性を調べることを目的として、P1 を波長に対して帯域の広いす層の放射を、P2 を H_2O や CO_2 といった気相の放射の影響を受けやすい鏡面として選定した。図 2 に、本実験における燃焼場の概略を直接写真で示す。比較のため、2 液滴燃焼の様子もあわせて示す。

実験では、直交 2 方向からのビデオカメラによる映像を取得した。第一は、バックライトによって液滴を観察した像であり、これから液滴径の時間変化データが得られる。このバックライト像取得には、画像拡大のため 105mm のマクロカメラレンズを使用した。第二は液滴像とは直交方向の白黒 CCD カメラによる火炎像である。この火炎像自体は直接像であり、光学的に正確な火炎輪郭を捉えたものではない。直接火炎像はすすの放射の影響を強く受け、直接像の外縁が正確に火炎端を示すものとは必ずしもならないことに注意する必要がある。

実験結果のビデオ画像は、コンピュータを用いて

Figure 3 Histories of droplet diameter squared, δ^2 , and flame characteristic scales, D_f/d_0 and D_f/d , of a single (isolated) droplet during combustion.

Figure 4 Dependence of correction factor of the burning Lifetime, τ_b/τ_{bs} , on initial spacing, ξ_0 .

滴像の長径と短径二乗の積を三乗根した値とした。また、火炎は鏡面の影響で球形から大きく変形しており、図 2 に示す各火炎特性径を定義し調べた。

3. 実験結果および考察

図 3 に、壁面がない状態で燃焼する液滴の代表的な液滴径二乗 d^2 、および火炎径 D_f の正規化された時間変化を示す。距離は、初期液滴径 d_0 で正規化され、正規化された液滴径は $\delta = d/d_0$ で表される。火炎径—液滴径比 D_f/d も同図に示されている。これらは、正規化された時間 $\tau = t/d_0^2$ の関数として表されている。初期加熱期間 $t_i = \tau_i d_0^2$ および

燃焼期間 $t_b = \tau_b d_0^2$ は、図3に示すように定義される。 τ_b は、液滴径の自乗の後半一定の区域の最小自乗法によって得られた直線と縦軸 $\delta^2=1$ との交点における τ の値とした。また、Nomuraら⁶⁾に従い、図に示すように燃焼速度定数を初期加熱期間に続く準定常燃焼期間における液滴径二乗の時間変化率とした。なお、時刻 $\tau=0$ は、点火器の退避開始時刻とした。

図3から、燃焼期間と初期燃焼期間が燃焼速度定数 K と、 $\tau_b = \tau + 1/K$ の関係にあることがわかる。孤立液滴の形成する火炎は球形であり、 D_f/d_0 は初期に急激に増大し最大値をとり、その後減少するが、 D_f/d は単調に増大する。

図4には、2種の平板P1, P2を用いた場合について、燃焼時間に及ぼす液滴中心—平板表面距離（以下、液滴—壁面間隔と略する）の影響を示している。燃焼時間 τ_b は、壁面なしの状態の孤立液滴の燃焼時間 τ_{b0} で無次元化され、図2aで示されている液滴—壁面間隔 z を無次元化した無次元間隔 $\xi_0 = z/d_0$ の関数として示してある。図4には、比較のためにMikamiら⁷⁾による、同一雰囲気、同一燃料による2液滴燃焼実験結果を示してある。2液滴燃焼実験に対しては、本実験結果と比較するために、 ξ_0 を液滴中心間距離の半分 z を用いて定義した（図2b）。この比較は、前述のように、鏡面が完全反射特性をもつとした場合、火炎から液滴への熱放射特性が模擬できるため、放射熱伝達が燃焼挙動に及ぼす影響の検証という意味も持つ。2液滴燃焼実験⁷⁾においては、燃焼時間は輝炎の観察される時間として与えられており、本研究における燃焼時間の定義と異なる。2液滴燃焼実験における燃焼時間は、本研究で定義した t_b に比べ若干小さな値をとることが確認されているものの、この定義の相違は定性的な比較に関してほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

図4からわかるように、両実験結果とも、間隔 ξ_0 が減少すると、燃焼時間はやや減少し、続いてより大きく増大するようになる。2液滴燃焼実験では、この燃焼時間の減少は、隣接する液滴周囲に形成された火炎からの放射熱伝達により燃焼が促進されることによると説明されている⁷⁾。一方、本実験結果では、燃焼時間が最小値をとる間隔 ξ_0 が2液滴の場合の約2倍と大きい。液滴間隔が大きくなると放射の影響は小さくなると考えられ、上述の説明は成り立たないように思われる。また本実験では、2液滴燃焼実験において燃焼時間が最小になる液滴

Figure 5 Dependence of flame characteristic scales, $(H/W)_{\max}$ and $(2R/W)_{\min}$ on initial spacing, ξ_0

間隔($\xi_0 \sim 8$)以下では消炎が生じるため、その領域における燃焼時間は測定されていない。また、 ξ_0 が減少し8に近づくと、後述のように、火炎の変形が顕著になっている。このことから、消炎の要因は主として火炎から壁面への熱損失増大によるものと考えられる。

なお、本実験の精度の範囲内では、平板P1, P2の実験結果に差異は見られなかった。このような傾向は、後述の実験結果についても同様であったため、本論文では平板の反射特性の影響について特に考察を行わなかった。

図5には、図2aに定義される火炎特性径を用いて火炎変形の程度が示されている。本実験結果では、火炎（輝炎）は平板方向へ変形し、 H が常に火炎の最大径となっている。最小火炎径 R を持つ位置は ξ_0 に従い移動したが、図2aに示される場合と大略変わらなかった。

火炎の平板方向への伸張(H/W)を火炎変形の尺度と見なすと、図5から、火炎変形は液滴間隔の減少とともに増大し、消炎直前の液滴—壁面間隔において最大30%程度となることがわかる。前述のように、消炎は壁面への熱損失と関連すると予想されるが、実際火炎の大きさに相当する液滴間隔で消炎が起きていることから、この予想は妥当であると考えられる。平板は酸素の火炎への流入にとって障壁となるとともに、平板のすべりなし条件による酸素の平板側からの流入量の減少により平板側領域では酸素不足に陥るため、火炎は平板側に引き寄せられると考えられる。2液滴燃焼実験⁷⁾においても、燃焼時間が最小値をとる液滴間隔条件（ ξ_0 が8程度）

Figure 6 Dependence of burning rate constant, K , on initial spacing, ξ_0 .

Figure 7 Dependence of ratio of initial heat-up period, τ_i/τ_b , on initial spacing, ξ_0 .

では、火炎が隣接する液滴方向へ伸張する様子が見られる。これは、上述と同様に液滴間領域における酸素不足によるものと考えられる。しかしながら、酸素不足の影響は、すべりなしの条件が課せられる平板実験の場合の方が顕著であるため、より大きい液滴間隔において、火炎変形が生じたものと推察される。なお、本実験において、燃焼時間が最小値を示す液滴間隔の火炎変形は、2液滴実験のそれと同程度であった。

図6は、図3で定義された燃焼速度定数 K の無次元間隔 ξ_0 依存性を示す。2液滴燃焼実験データ⁷⁾も同図に示した。なお、図6および後述の図7に示す2液滴燃焼実験のデータは、文献⁷⁾の液滴径二乗時間変化のグラフから再解析されたものであり、単一液滴の結果は、 $\xi_0 = \infty$ として示されている。図6から、本実験結果では、 K は ξ_0 によらずほぼ一定

の値をとり、壁面なし($\xi_0 = \infty$)の場合と同様であることがわかる。このことは、図4に示されるような火炎の変形は燃焼速度定数にはほとんど影響を及ぼさないことを示唆している。2液滴燃焼実験結果では、 ξ_0 が5付近までの K は単一液滴のそれとほぼ同様であり、本実験結果と一致している。一方、 ξ_0 が5より小さくなると、 K は若干減少している。これは、このような液滴間隔では、2液滴の周囲に一つの火炎が形成される、いわゆる結合火炎になるためであると考えられる⁷⁾。なお、上述の本実験で得られた結果は、同様の液滴—壁面間隔において Chandra らの結果⁸⁾と定性的に一致している。Chandra らはさらに小さい ξ_0 では、 ξ_0 の減少とともに K が減少するという結果を報告しているが、本実験では燃焼途中で消炎が起きたため、 K の測定は行っていない。

図7には、燃焼時間 τ_b に対する初期加熱期間 τ_i (図3)の割合の無次元間隔 ξ_0 依存性を示す。初期加熱期間割合 τ_i/τ_b は、 ξ_0 が約10から15の範囲において単一液滴のそれより小さくなっており、その減少割合は約50%に達することがわかる。図6に示されたように燃焼速度定数がほとんど変化しないという結果に基づくと、このことは、図4に見られる燃焼時間の減少が、主として初期加熱期間の減少によるものであることを示唆している。また、図7から、初期加熱期間は ξ_0 に対し極小値を取ることがわかる。これはより小さい ξ_0 では、火炎から壁面への熱損失が増大することによるものであると考えられる。

図4に示されているように、平板実験では、2液滴実験に比べて ξ_0 が大きい条件下において燃焼時間が減少しており、これが鏡面反射による放射熱伝達の影響とは考えにくく、燃焼時間の減少をもたらす初期加熱期間の減少は、主として火炎の変形による液滴への熱輸送の増大によるものであると考えることが妥当である。火炎変形の内、液滴と火炎の距離の減少は、火炎と液滴の間の局所温度勾配を増大させ、熱伝導による熱輸送を増大させるものと考えられる。火炎の観察から、図5に示された火炎変形は燃焼初期に顕著であることが確認されており、これにより初期加熱期間が減少したものと考えられる。また、このことは、燃焼初期以後の平均的な燃焼特性を示す燃焼速度定数には火炎変形は大きな影響を及ぼしていないことを示唆している。

2液滴燃焼に関する準定常理論⁹⁾を用いた解析結果⁹⁾では、火炎変形は液滴—壁面間隔を液滴直径で除した値で決定され、その値が小さくなると火炎変形が顕著

になると予測されている。このことは、燃焼初期において火炎変形が顕著になることを示唆しており、本実験の観察結果と一致する。しかしながら、準定常理論では、火炎直径/液滴直径は時間によらず一定であるのに対し、本実験でも確認されているように、実際にはその値は燃焼初期では小さくなる。このことは、燃焼初期では火炎と壁面との距離は準定常理論で予測されるものより大きいことを意味しており、壁面との干渉は小さくなると予想される。このように、火炎変形が燃焼初期で顕著となる理由は現段階では不明であり、燃焼初期の非定常性等を考慮する必要があるものと推察される。

また、同図から、2液滴燃焼実験結果においても、平板実験と同様の傾向が見られることがわかる。このことから、2液滴燃焼における燃焼時間の減少は平板実験の場合と同様に、主として初期加熱期間の減少によるものと考えられる。2液滴実験の場合、液滴間距離が比較的小さい領域で燃焼時間の減少が見られることから、隣接する火炎からの放射熱伝達が影響を及ぼすことが考えられる。しかながら、2液滴実験における火炎変形程度は、本実験のそれとほぼ同程度であり、また燃焼時間の減少も同程度であることから、2液滴実験においても燃焼時間の減少には火炎変形が大きく関与していると言える。2液滴燃焼においては、燃焼促進の見られる液滴間隔が小さいことから放射熱伝達の影響も否定できないが、上記火炎変形に注目すると、他方の液滴の形成する火炎と、自身の形成する火炎による放射熱伝達の変化を考慮する必要があると考えられる。2液滴燃焼の燃焼促進に及ぼす放射熱伝達の影響をさらに検討するためには、本報で明らかになった火炎変形の影響を注視し、本実験で使用した2種類の平板よりさらに反射特性の異なる鏡面、あるいは反射をほとんどしない平板を用いた実験結果との比較等を行う必要があると考えられる。

4. 結 論

微小重力環境下において壁面近傍における単一液滴燃焼実験を行い、2液滴燃焼実験結果と関連させて、その燃焼挙動を考察した。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- 1) 壁面近傍で燃焼する液滴の火炎は、壁面方向に伸張するように変形する。変形は液滴—壁面間隔が小さくなるとともに顕著となり、壁面が液滴に十分近い場合には火炎は途中で消失する。また、燃焼の比較的初期に、火炎変形は顕著であることが観察された。
- 2) 液滴燃焼寿命は液滴—壁面間隔に対してある間隔で最小値をとる。一方、燃焼速度定数は液滴—壁面間隔に依存せず、ほぼ一定値を取る。したがって、このような液滴燃焼寿命の減少は、主に液滴初期加熱期間の減少によるものである。上記の傾向は、2液滴燃焼の場合と定性的に一致する。
- 3) 壁面の存在下における液滴初期加熱期間の減少は、火炎変形の結果液滴と火炎の距離が減少し、液滴への熱輸送量が増大したことに帰結するものと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、「微小重力環境を利用した燃料多様化対応燃焼技術の研究開発」の一環として、(財)宇宙環境利用推進センター(JSUP)が、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。NASA John H. Glenn Research CenterのP. M. Struk氏および東京大学大学院生の植田毅氏(現日本IBM)には、実験に対するご助言とご助力をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988.
- 2) Nguyen, T. K. and Avedisian, C. T., Int. J. Heat Mass Transfer 30 (7) 1497-1509 (1987).
- 3) Chandra, S. and Avedisian, C. T., Proc. R. Soc. Lon., A 429: 481-503 (1990).
- 4) Okai, K., Tsue, M., Kono, M., Mikami, M., Sato, J., Dietrich, D. L. and Williams, F. A., Proc. Combust. Inst. 27, 1998, p. 2651.
- 5) Okai, K., Moriue, O., Araki, M., Tsue, M., Kono, M., Sato, J., Dietrich, D. L. and Williams, F. A., Combust. Flame 121:501 (2000).
- 6) Okai, K., Moriue, O., Araki, M., Tsue, M., Kono, M., Sato, J., Dietrich, D. L. and Williams, F. A., Proc. Combust. Inst. 28, 2000, p. 977.
- 7) Mikami, M., Kato, H., Sato, J. and Kono, M., Proc. Combust. Inst. 25, 1994, p. 431.
- 8) Nomura, H., Ujiie, Y., Rath, H.J., Sato, J. and Kono, M., Proc. Combust. Inst. 26, 1996, p. 1267.
- 9) Umemura, A., Ogawa, S. and Oshima, N., Combust. Flame 41: 45-55 (1981).