

IIII 身近な宇宙、落下塔による微小重力実験 IIII
(原著論文)

雰囲気中の二酸化炭素が微小重力環境下の単一燃料液滴の 燃焼挙動に及ぼす影響

中谷 辰爾¹・津江 光洋¹・瀬川 大資²

Effects of Ambient Carbon Dioxide on Burning Behaviors of Isolated Fuel Droplets under Microgravity

Shinji NAKAYA¹, Mitsuhiro TSUE¹ and Daisuke SEGAWA²

Abstract

Combustion behaviors of isolated fuel droplets for ethanol, n-decane and 1-butanol were investigated in high concentrations of carbon dioxide under microgravity. Fuel droplets were anchored at the tip of a quartz fiber with the diameter of 50 μ m. The ambience consisted of oxygen, nitrogen and carbon dioxide. Oxygen concentration was fixed at 21 % in volume, and the concentration of carbon dioxide was varied from 0 % to 60 % in volume. Detailed measurements of the droplet surface area were conducted using a high speed video camera, and instantaneous burning rates were calculated from histories of the surface area. Droplet flames were also observed using a video camera. An estimation of the droplet diameter using an ellipsoidal approximation had large error especially at the initial stage. The behavior of the instantaneous burning rate, which was measured from the change in surface area, showed droplet combustion events as with the thermal expansion, ignition and following combustions. Instantaneous burning rates of n-decane and 1-butanol showed an increasing trend, while that for ethanol was almost constant during the droplet life time. The burning rates for n-decane and 1-butanol were influenced by the initial droplet diameter. A stepwise increase in the instantaneous burning rate was observed for large n-decane droplet in air, which occurred around the soot shell collation. However, this behavior was not observed in high concentration of carbon dioxide even for large droplets. In high concentration of carbon dioxide, soot production was suppressed, and this suppression was enhanced for smaller droplets.

Keyword(s): Droplet combustion, Carbon dioxide, Microgravity, Alcohol

1. 緒言

単一液滴燃焼は、噴霧燃焼の最小構成要素あるいは二相を伴う燃焼形態の単純な系として幅広く研究がなされてきた。準定常理論に基づく d^2 則は液滴燃焼の基本的な挙動をよく表しており¹⁾⁻³⁾、幅広く研究に用いられており、多くの基礎的知見が得られている。しかしながら、準定常理論に基づく燃焼挙動を満足しない報告がされている。実際の液滴燃焼では、化学反応は速度を持ち、ルイス数は1ではなく、液滴の温度上昇⁴⁾、燃料蒸気の蓄積⁵⁾、輸送係数の変化⁶⁾、水蒸気の液滴内への凝縮⁷⁾⁻⁹⁾、放射の効果^{10),11)}、すす^{12),13)}の影響が考えられる。燃焼速度定数が初期液滴径に大きく依存する結果が得られており、特にすすを多く生成する液滴火炎においてはその影響が顕著である^{9),14),15)}。また、研究毎に燃焼速度定数の大きなば

らつきが見られる。すすの生成挙動は雰囲気成分にも大きく影響を受ける。二酸化炭素やヘリウムを多く含む雰囲気中での液滴燃焼挙動¹⁶⁾⁻²³⁾が調べられており、液滴の燃焼挙動に大きな影響を及ぼす。このような雰囲気では消炎さえも観察される^{18),19)}。また、すすの生成は初期液滴径が小さくなると軽減される^{15),22),24)-26)}。これらの環境下においては、様々なパラメータの影響を受けるため、準定常理論に基づく解析は不適であると考えられる。

一方で、液滴燃焼に及ぼす諸因子の効果を明確にするため、液滴の瞬時燃焼速度が実験により計測されている。圧力および速度変動がある場において、液滴燃焼速度の変動を調べ、蒸発の位相遅れやその液滴燃焼速度のヒステリシスな挙動が示されている^{27),28)}。また、単一液滴の燃焼において、精密に液滴径の2乗を測定し、その経時変化を最小二乗法により関数に回帰することで、関数の

1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

Department of Aeronautics and Astronautics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan.

2 大阪府立大学大学院工学研究科機械工学分野 〒599-8531 大阪府堺市中央区学園町 1-1

Department of Mechanical Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan.

(E-mail: tsnakaya@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)

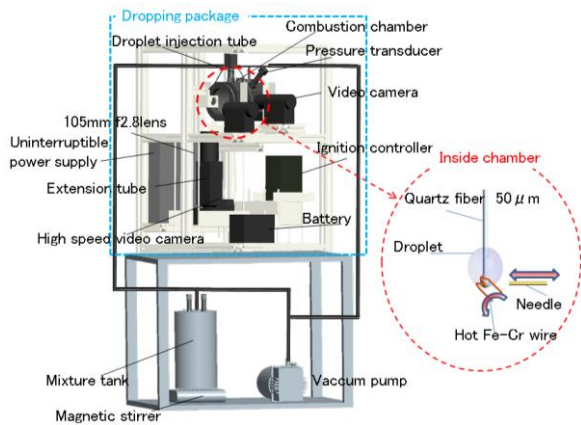


Fig. 1 Schematic of experimental setup

導関数から液滴の瞬時燃焼速度が求められている¹⁷⁾。また、微小重力あるいは通常重力環境において、対数関数による近似により液滴燃焼速度が求められている²⁹⁾。 d^2 則から離れた解析が行われつつある。同時に数値解析により、遷移的な液滴燃焼速度の変化も求められている^{7,23),30)}。

本研究は落下塔を利用した微小重力環境下において、様々な性状を持つ燃料液滴に対し、大気圧環境下で瞬時液滴燃焼速度の精密測定を実施する。水より沸点の低いエタノール、すす生成が少なく水より沸点の高い1ブタノール、一般的なアルカン燃料としてnデカン単一燃料液滴に対して実験を実施し、燃料性状の違いによる液滴燃焼挙動の違いを明確にする。また、液滴燃焼に及ぼす効果として、雰囲気に含まれる希釈成分に着目し、雰囲気中の窒素を二酸化炭素に置き換える。酸素濃度を固定することで、高濃度二酸化炭素雰囲気は液滴燃焼に及ぼす効果について実験的に調べる。液滴燃焼に及ぼす諸因子の効果を明確にすることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 実験装置および条件

実験は微小重力環境下において実施された。微小重力環境は落下塔の上部からドラッグシールド内に設置された実験装置を落下させることで実現した。落下塔は大阪府立大学の自由落下距離約5mのもの、および東京大学の約10mのものを用いた。それぞれ約1秒および約1.4秒の微小重力環境が得られる。実験装置の概略図をFig. 1に示す。実験装置は概ね二部分からなる。一つは混合気タンクと真空ポンプからなる雰囲気生成系である。実験時に使用される雰囲気は混合気タンク内において、ガスポンプから所定の量のガスを導入し、攪拌することで生成される。もう一つは落下装置系である。落下装置系はドラッグシールド内に設置される。落下装置系は定容容器、点火装置、無停電電源、高速度ビデオカメラ (Vision research, Phantom miro ex4, Photron, FASTCAM

MH4-10K) およびビデオカメラ (SONY, DCR-PC300K)、圧力センサからなる。定容容器内を真空ポンプにより真空にした後、混合気タンクから混合気が導入される。その後、雰囲気生成系が分離される。定容容器内部には先端にビーズを持つ懸垂線が懸架されている。直径50 μ mの懸垂線を使用した。ビーズサイズは約90 μ mである。注記が無い限り、すべての実験結果はこの懸垂線を用いている。懸垂線の先端に石英製の細管から燃料をシリンジにより押し出し液滴を配置する。その後、石英製の細管は退避し、ロータリーソレノイドにより駆動される点火用の直径0.25mmの鉄クロム線のヒータが配置される。ヒータの抵抗は0.7 Ω である。落下塔上部から落下装置系が落下開始すると、点火シグナルが点火制御系に送られ実験および計測が開始する。落下開始後、鉄クロム線が加熱され、点火した後、液滴近傍から退避する。この動作すべては落下後約0.1秒で行われる。落下中の液滴の様子は、LED列を光源とする液滴の影写真を高速度カメラで測定することで観察される。高速度カメラの撮影速度は500fpsである。また、燃焼中の火炎の様子はビデオカメラによって液滴火炎の直接像を計測することで観察される。ビデオカメラの撮影速度は60fpsである。

実験は大気圧、室温環境下で実施される。雰囲気中の酸素濃度は21%で固定し、規定濃度の二酸化炭素、残りの成分は窒素である。燃料は和光純薬工業製の特級エタノール、1ブタノールおよびnデカンを用いる。

2.2 解析手法

液滴直径は高速度カメラで撮影された影写真から求め

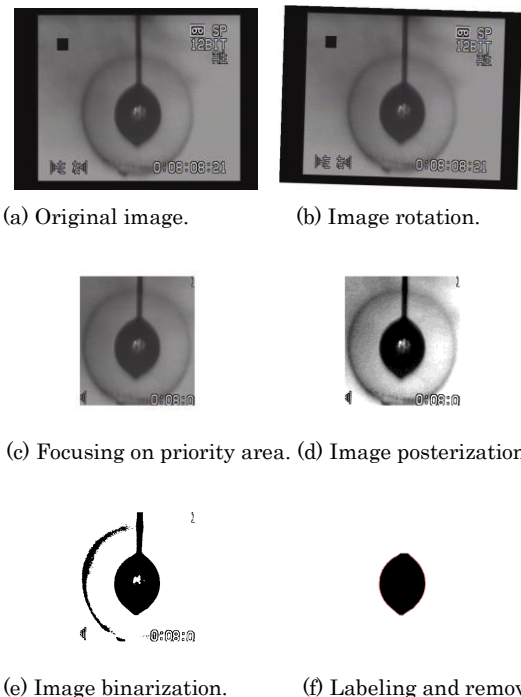


Fig. 2 Image processing and measurement of surface area.

られる。計測は Visual Basic により記述されたプログラムにより行われる。Figure 2 にその処理手順を示す。高速度カメラの画像が 1 フレームごとにビットマップ画像に変換される。懸垂線の傾きを画像を回転させることで水平に対して垂直にする。メディアンフィルタによりノイズを取り除き、画像の階調補正を行うことにより、液滴界面を際立たせる。輝度をある閾値を用いて 2 値化し、白黒画像に変換する。画像内に存在する影をグループングし、液滴と懸垂線を含む物体以外を削除する。残った影の幅を軸方向に上下から追跡し、液滴と懸垂線の界面を同定し、懸垂線を画像から切り取る。得られた液滴像の幅を縦方向ピクセルごとに求め、軸対称の回転体であるとし、液滴表面積を求める。得られた液滴表面積を円周率 π で除すことにより d^2 を求める。得られた d^2 の時間変化に対し、細かなノイズの影響を取り除くため、過去と未来の 2 点を用いた移動平均を行う。得られた d^2 のデータに対し、時間方向二次精度中心差分を行うことにより、ある時刻における d^2 の一次導関数を求める。準定常理論では d^2 の変化は一次関数となり、導関数は定数となり、いわゆる燃焼速度定数と呼ばれる。本研究では、 d^2 の一次導関数の値を瞬時液滴燃焼速度と定義する。

液滴火炎に関しては、ほぼ球形火炎が得られるため、火炎の縦長を b 、横長を a の回転楕円体と考えると、体積の等しい球体の等価直径 $d_f = (a^2b)^{\frac{1}{3}}$ を火炎径とした。

3. 結果および考察

3.1 d^2 測定法の評価

最初に、大気圧、室温環境における直径 125 μm 懸垂線で懸架された n デカン液滴の燃焼に対して二種類の方法で d^2 を求めた。本研究による表面積測定による d^2 測定を表面積法とし、液滴の縦長を b_d 、横長を a_d を測定し、火炎測定の場合と同様に回転楕円体として $d^2 = (a_d^2b_d)^{\frac{2}{3}}$ と

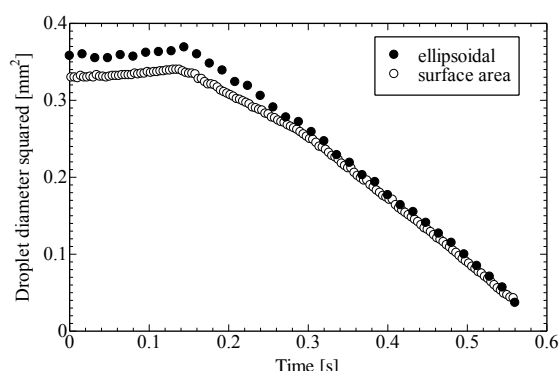


Fig. 3 Comparison of droplet diameter squared measured by ellipsoidal approximation method and surface area-measurement method.

して求めた場合の結果を楕円体近似法とする。Figure 3 にその二つの手法により求められた d^2 の時間履歴を示す。楕円体近似法で求められた d^2 の初期値が大きく見積もられていることがわかる。特に初期段階の挙動が大きく異なることがわかる。初期の熱膨張後に点火して d^2 が減少し始めると、準定常理論の挙動に近い挙動を示していることがわかる。一方で、表面積法により求めた結果では、 d^2 の変化が初期段階から大きく変化することがわかる。しかしながら、後半部においては二つの測定結果が概ね良く一致していることがわかる。この挙動の原因を液滴影画像を詳細に観察することで調べた。原因は液滴の表面張力の変化にあると考えられる。点火直後においては液滴の表面張力が強く、懸垂線近傍の曲率が小さい。そのため、液滴が上下において対称でない。時間が経過するにつれて、液滴の温度が上昇し、表面張力が小さくなる。それにより懸垂線近傍における液滴界面の曲率が大きくなり、回転楕円体に近づいていく。このため、回転楕円体の近似が懸垂線により保持された液滴の径を求める際に、特に初期段階において誤差を多く含むと考えられる。液滴の形状が回転楕円体であるならば、すべての表面積法と回転楕円体法による d^2 の測定値は一致する。懸垂線によって懸架された液滴の d^2 の変化を求める際には、表面積法による評価が妥当であると考えられる。

3.2 高濃度二酸化炭素を含む雰囲気中での火炎の様子

本研究では、空気中の窒素を二酸化炭素で置き換えて実験を行った。その時の火炎の様子を Fig. 4 に示す。n デカンの場合、液滴火炎のすす生成挙動は初期液滴直径の影響を大きく受けるため、今回は初期液滴径 d_0 が 0.80mm (懸垂線径 125 μm) の場合と、0.55mm (懸垂線径 50 μm) の場合の結果を示す。エタノールの場合は輝炎が観察されなかったため、初期液滴径が 0.55mm の場合の結果を示す。この時の初期液滴径の誤差は $\pm 0.005\text{mm}$ 以内である。同じ燃料および初期液滴直径の場合にはカメラの露光時間、感度、絞り等の設定は一定である。n デカンに着目すると、同じ初期直径の場合、二酸化炭素濃度が増大するにつれて輝炎の輝度が弱くなっていることがわかる。二酸化炭素濃度が増加するにつれて温度伝導率が低下し、液滴への熱輸送量が低下すると考えられる。一方で、二酸化炭素は赤外活性な分子であり、高温場における熱放射が大きくなり火炎温度の低下に至ると考えられる³¹⁾。また、燃焼生成物の二酸化炭素の拡散速度を低下させると考えられる。初期液滴径が 0.55mm の場合と 0.80mm の場合を比較すると、0.55mm の場合には二酸化炭素濃度が 30%の時にはわずかに輝炎が観察されるが、0.80mm の時には 45%においても観察される。この場合、0.80mm のほうが感度が低く設定されているにもかかわらず、より高濃度の二酸化炭素濃度下で輝炎が確認されている。初期液滴径が大きいほうが液滴火炎中の

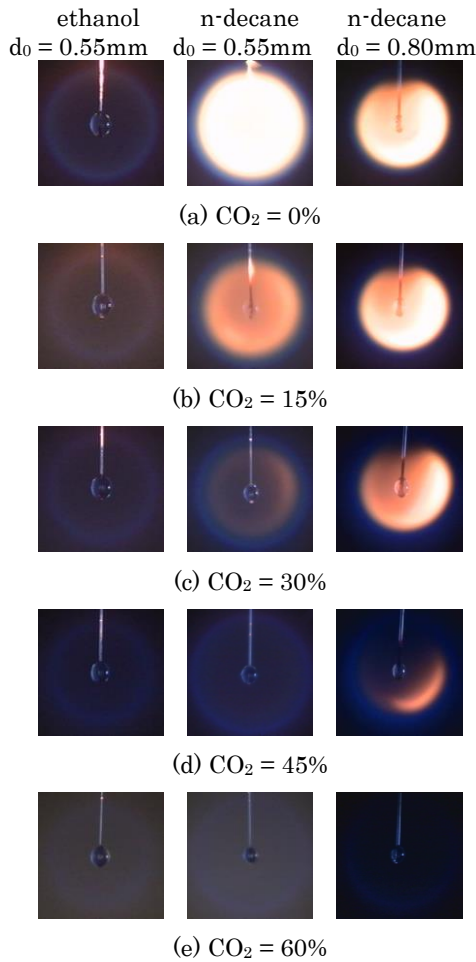


Fig. 4 Flame images of ethanol and n-decane droplet flame in ambiances including high concentrations of carbon dioxide.

すすが多く生成されるのに加え、二酸化炭素濃度の増加に伴うすす減少効果も小さいと考えられる。初期液滴径が小さいと、燃料蒸気が火炎内に滞留する時間が減少するため、すす生成が抑制される²⁴⁾。二酸化炭素が燃焼に及ぼす効果としては、対向流拡散火炎において、二酸化炭素を含む気流中では、窒素酸化物とすすの生成が抑制されている結果が得られている³¹⁾。水蒸気に対しても同様の結果が得られている³²⁾。また、メタン、水素/空気予混合火炎において、雰囲気中の二酸化炭素が瞬時液滴燃焼速度に及ぼす影響が調べられている³³⁾。

3.3 d^2 の変化と瞬時液滴燃焼速度

微小重力環境下において、エタノール、n デカン、1 ブタノールの単一燃料液滴に対して高濃度二酸化炭素を含む雰囲気中における d^2 の変化を調べた結果を **Figs. 5, 6, 7** に示す。0.1 秒付近でプロットがない部分はヒータが懸垂線に映りこんだことにより、液滴の外形を正確に測定できなかったため排除した。すべての場合において、二酸

化炭素濃度が 0%, 30%, 60%と増加するにつれて d^2 の減少率が小さくなっていることがわかる。二酸化炭素濃度の増加につれて全体的に瞬時液滴燃焼速度が減少していることがわかる。エタノールに着目すると、 d^2 の変化は一次関数的であり、概ね d^2 則に従うと考えられる。エタノール火炎の場合、**Fig. 5**に示すように、輝炎が存在しないことからすすなどの影響は無いと考えられる。一方で、n デカンの場合、**Fig. 6**に示されるように、二酸化炭素を含まず初期液滴径が大きい場合 d^2 の変化が一次関数的に

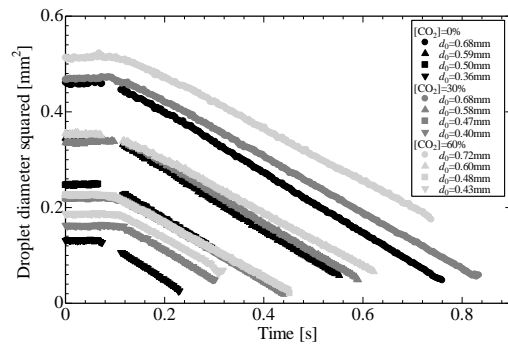


Fig. 5 History of droplet diameter squared for ethanol in carbon dioxide-rich ambience.

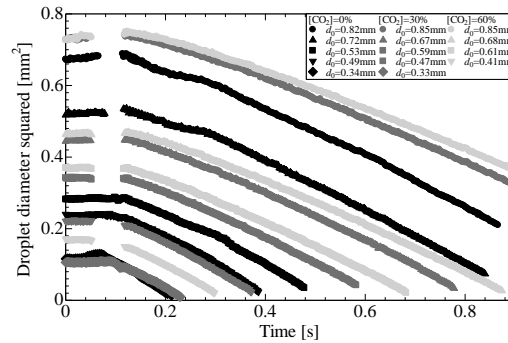


Fig. 6 History of droplet diameter squared for n-decane in carbon dioxide-rich ambience.

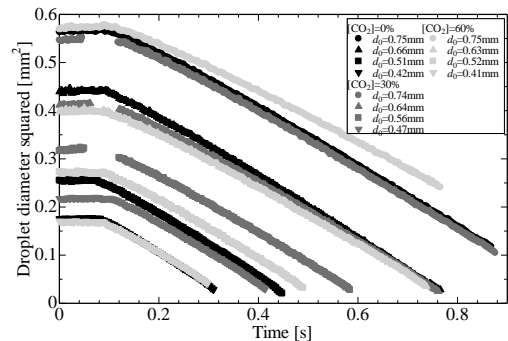


Fig. 7 History of droplet diameter squared for 1-butanol in carbon dioxide-rich ambience.

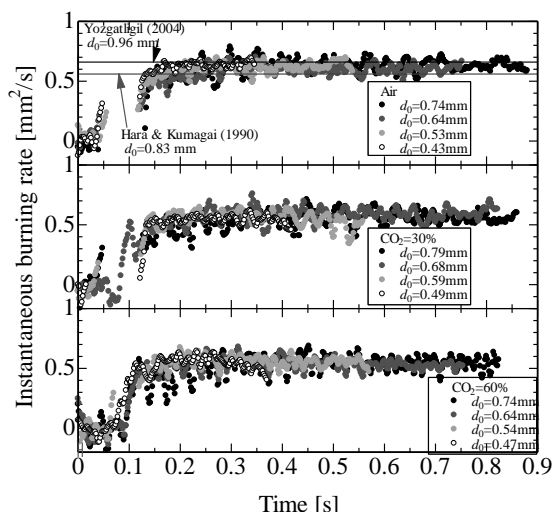


Fig. 8 History of instantaneous burning rate for ethanol in carbon dioxide-rich ambience.

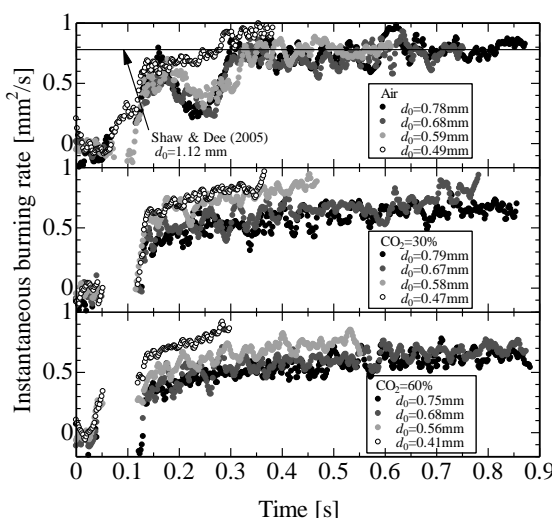


Fig. 9 History of instantaneous burning rate for n-decane in carbon dioxide-rich ambience.

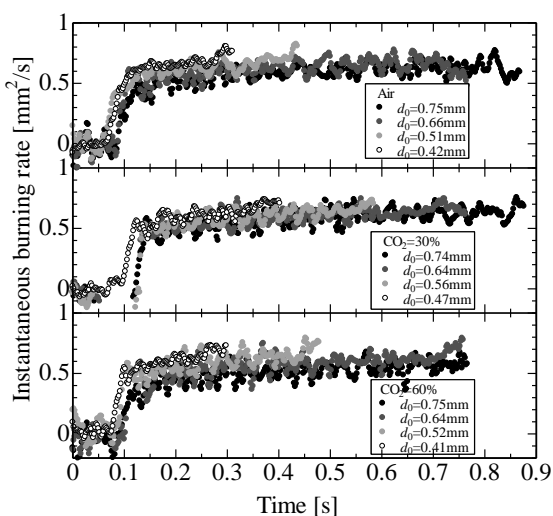


Fig. 10 History of instantaneous burning rate for 1-butanol in carbon dioxide-rich ambience.

では無いことがわかる。 d^2 の変化率が徐々に変化していることがわかる。二酸化炭素濃度が増大すると、変動が小さくなる。しかしながら d^2 の変化は一次関数的ではないと思われる。エタノールの場合には、沸点が水より低いため、燃焼ガスから液滴への水の溶解込みの効果が考えられる。その影響を避けるため、沸点が 117.6°C の 1 ブタノールに対しても実験を行った。 Figure 7 に示されるように、1 ブタノールの場合もエタノールと同様に、n デカンにおいて $0.2\sim 0.3$ 秒付近に観察された d^2 の大きな変化は観察されない。比較的には準定常理論に近い挙動が観察されているものの、わずかに直線からはずれているように思われる。

これらの得られた d^2 のデータを使用して、瞬時液滴燃焼速度を求めた。本研究では細かな振動は無視し、グローバルな挙動に着目する。その結果を Figs. 8, 9, 10 に示す。 Figure 8 はエタノールの場合の結果である。図中の空気条件における実線は Yozgatligil ら²⁰⁾と原, 熊谷³⁴⁾により測定された燃焼速度定数を示す。エタノールの場合、液滴燃焼速度が時間に対して概ね一定である。本研究で測定された液滴燃焼速度は概ね上記の燃焼速度定数の間に入っており、精度よく液滴燃焼速度を測定できている。初期液滴径が変化しても、概ね液滴燃焼速度は一定である。 d^2 則に概ね従っている。二酸化炭素濃度の増大につれて、液滴燃焼速度の減少が観察される。

一方で、 Fig. 9 で観察されるように、n デカンの場合にはすべての初期液滴径の場合において、液滴燃焼速度があまり一致していないことがわかる。図中の実線は Shaw と Dee¹⁸⁾らによって測定された燃焼速度定数である。この場合も、後期においては概ね同じレンジにあることがわかる。Shaw らの報告のよると、n デカンの場合、液滴燃焼速度が一定でなく幅広く変化していることが示されている¹²⁾。空気条件において、初期液滴径が 0.78mm , 0.68mm および 0.59mm の場合、点火後、液滴燃焼速度があまり大きくない期間があり、 0.3 秒後くらいで液滴燃焼速度のステップ状の増加が観察される。液滴径が小さい場合、および二酸化炭素濃度が大きい場合にはこのような挙動が観察されなかった。また、二酸化炭素濃度が大きい場合、エタノールの場合とは異なり、初期液滴径が異なると同時刻の液滴燃焼速度が異なる。初期液滴径が小さいほど同時刻における液滴燃焼速度が大きいことがわかる。また、全体的に液滴燃焼速度が時間が経過するとともに増加している。同様に n ヘプタンに対しても計測を行ったが、同様の結果が得られている。過去の研究において、燃焼速度定数の大きなばらつきが観察される^{9),12),14),15),35)}のは液滴径の影響や、時間の経過とともに瞬時燃焼速度が増加するといった液滴燃焼速度が一定でないことに起因すると考えられる。

Figure 10 には 1 ブタノールの場合の液滴燃焼速度の変化を示す。この場合においては、n デカンの場合と同様、初期液滴径が小さくなると同時刻の液滴燃焼速度が大き

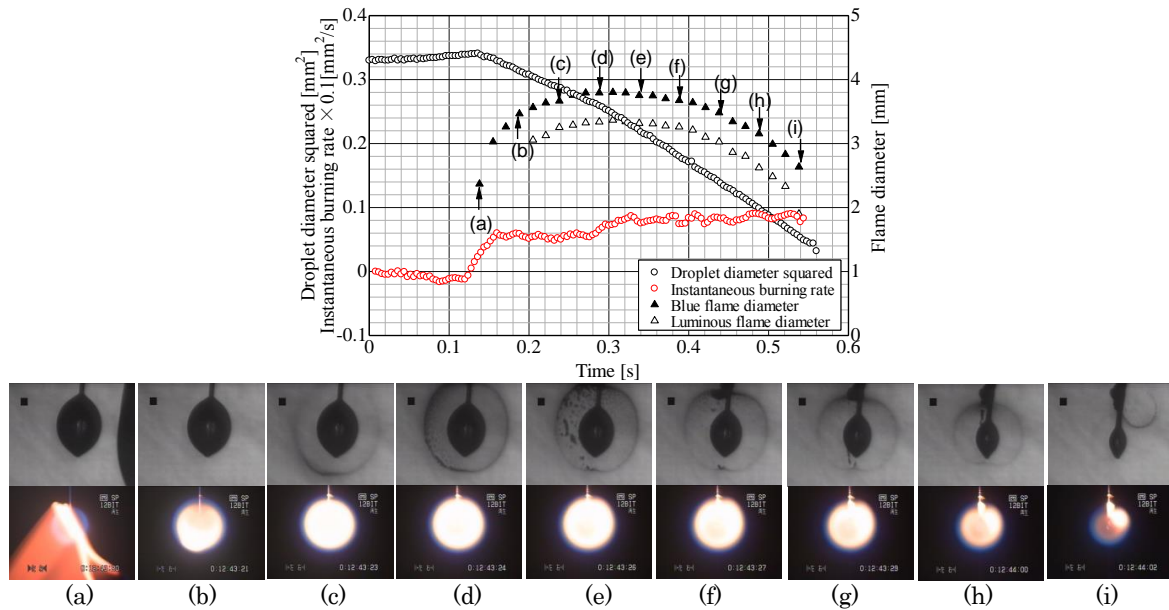


Fig. 11 Relationship between burning rate, flame diameters, backlit image and droplet flames for n-decane in air. Initial droplet diameter is 0.57mm.

くっており、時間の経過とともに液滴燃焼速度が増大していることがわかる。しかしながら、ステップ状の液滴燃焼速度の増加は観察されない。1 ブタノールの場合、すべての条件において輝炎が観察されず、すすの生成は無いと考えられる。同じくすすの生成の無いエタノールの場合には、 d^2 則に従った挙動が観察されたものの、1 ブタノールでは観察されなかった。エタノールと 1 ブタノールの違いの一つとして、沸点の違いがあげられる。エタノールは 78.37°C、1 ブタノールは 117.6°Cである。水の沸点が 100°Cであることから、エタノールの液滴温度は水の沸点より低く、燃焼ガスから液滴への水蒸気拡散、凝縮および溶け込みの効果が考えられる。そのため、従来なら液滴径が小さくなるにつれて液滴燃焼速度が増加すると考えられるが、水蒸気の溶け込みの効果により燃料の蒸気圧が低下し、液滴燃焼速度があまり変化しないと考えられる。1 ブタノールの場合には、液滴表面温度が 100°Cを超えていると考えられ、n デカンのすす生成が無い場合と同じ挙動を示していると考えられる。

全ての燃料において、液滴径が小さくなると火炎の放射の影響が軽減されると思われる。そのため、時間の経過とともに液滴燃焼速度が増加すると考えられる。また、二酸化炭素濃度が増大するにつれて雰囲気温度伝導率が低下するのに加え、高温領域の二酸化炭素による放射が増大し燃焼速度は低下する。そのため、火炎温度の低下が考えられる。燃焼速度に及ぼす懸垂液滴の影響は、本研究では 50 μ m といった非常に細い懸垂線を用いているため、Farouk らの数値計算で示されるように²³⁾、その影響は液滴径が非常に小さくなる燃焼末期以外は小さいと考えられる。

n デカンの場合、空気条件において、初期液滴径が大き

い場合ステップ状の液滴燃焼速度の増大が観察された。その原因について考察するために、液滴径の変化、火炎直径、液滴の影写真および火炎の様子を観察した。その結果を Fig. 11 に示す。図中の火炎直径はビデオカメラで観察される青炎の直径と輝炎の直径を示している。液滴の点火により液滴燃焼速度が上昇した後、(a)から(d)の期間においてはあまり変化しない。(d)と(e)の間において液滴燃焼速度のステップ状の増大が観察される。(a)から(d)の期間において、影写真中にすすの生成が観察されすす殻が形成しているのがわかる。(e)の時点ですす殻が崩壊しているのがわかる。すす殻の崩壊近傍で液滴燃焼速度が増大しているのがわかる。その後、液滴径が小さくなっていくにつれてすす濃度は薄くなり、輝炎の輝度が小さくなっていくことがわかる。液滴径が小さくなると燃料成分の滞留時間の減少からすすの生成が抑制されていることがわかる。放射の影響が小さくなることにより、液滴燃焼速度は徐々に上昇すると考えられる。二酸化炭素濃度が 30%以上の場合、影写真中にすす殻は観察されなかった。30%および 60%の場合には、初期液滴径が大きくても、液滴燃焼速度のステップ状の変化が観察されなかったことから、この液滴燃焼速度の変化はすすに影響されていると考えられる。

4. 結論

微小重力環境下において、空気および高濃度二酸化炭素を含む雰囲気中でのエタノール、1 ブタノールおよび n デカン単一燃料液滴の燃焼挙動を実験的に調べた。エタノール液滴の場合、すべての条件において概ね d^2 則に基づいた燃焼挙動が観察された。点火後、液滴燃焼速度は

ほとんど変化せず、初期液滴径の影響もあまり観察されない。一方で、1 ブタノールおよび n デカンにおいては、初期液滴径が小さくなると、液滴燃焼速度が大きくなった。また、液滴燃焼速度も燃焼期間にわたって一定ではなく、徐々に上昇する。本研究の条件下では、1 ブタノールに対して輝炎が観察されなかったことから、すすの影響が少ない火炎における基本的な挙動であると考えられる。エタノールの場合、沸点が水より低いことから水蒸気の凝縮の影響が考えられる。二酸化炭素濃度が増大すると、n デカン燃料液滴火炎中のすす生成が抑制される。また、このすす抑制効果は、初期液滴径が小さくなると大きくなる。空気中においては、n デカンの初期液滴径が大きい場合、すす殻崩壊の近傍でステップ状に液滴燃焼速度が増大する。二酸化炭素濃度が 30% および 60% と高い場合、すすの生成が観察されないが、このような場合にはステップ状の液滴燃焼速度の増大は観察されず、すすの影響であると考えられる。また、初期液滴径が小さく、すすの生成が少ない場合にもこのような挙動は観察されなかった。すべての燃料において、雰囲気中の二酸化炭素濃度が増大すると、液滴燃焼速度は小さくなる。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金若手研究(B) 21760162 によってなされたものであり感謝の意を表します。また、実験実施に精力的にご助力頂いた大阪府立大学の長島芳明君、古田智也君、東京大学大学院の藤島孝太郎君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) D.B. Spalding: Proc. Combust. Inst., **4** (1953) 847.
- 2) G.A. Godsavage: Proc. Combust. Inst., **4** (1953) 818.
- 3) S. Kumagai, T. Sakai and S. Okazima: Proc. Combust. Inst., **13** (1971) 779.
- 4) C.K. Law: Combust. Flame, **26** (1976) 219.
- 5) M. Matalon and C.K. Law: Combust. Flame, **59** (1985) 213.
- 6) I.K. Puri and P.A. Libby: Combust. Sci. Technol., **76** (1991) 67.
- 7) A.J. Marchese, F.L. Dryer, R.O. Colantonio and V. Nayagam: Proc. Combust. Inst., **26** (1996) 1209.
- 8) A. Lee and C.K. Law: Combust. Sci. Technol., **86** (1992) 253.
- 9) A. Kazakov, J. Conley and F.L. Dryer: Combust. Flame, **134** (2003) 301.
- 10) M.Y. Choi, K. Lee: Proc. Combust. Inst., **26** (1996) 1243.
- 11) K. Okai, M. Tsue, M. Kono, J. Sato, D.L. Dietrich and F.A. Williams: Combust. Flame, **133** (2003) 169.
- 12) B.D. Shaw, F.L. Dryer, F.A. Williams and J.B. Haggard Jr.: Acta Astronaut., **17** (1988) 1195.
- 13) M.Y. Choi, F.L. Dryer and J.B. Haggard Jr.: Proc. Combust. Inst., **23** (1990) 1597.
- 14) G.S. Jackson and C.T. Avedisian: Proc. R. Soc. Lond., **A 446** (1994) 255.
- 15) S.L. Manzello, M.Y. Choi, A. Kazakov, F.L. Dryer, R. Dobashi and T. Hirano: Proc. Combust. Inst., **28** (2000) 1079.
- 16) T. Kadota, H. Hiroyasu and A. Farazandehmehr: Combust. Flame, **29** (1977) 67.
- 17) J.H. Bae and C.T. Avedisian: Combust. Flame, **32** (2009) 2231.
- 18) B.D. Shaw and V. Dee: Microgravity Sci. Technol., **16** (2005) 26.
- 19) J.B. Wei and B.D. Shaw: Combust. Sci. Technol., **181** (2009) 1480.
- 20) A. Yozgatligil, S.H. Park, M.Y. Choi, A. Kazakov and F.L. Dryer: Proc. Combust. Inst., **31** (2007) 2165.
- 21) J. Dzik, V. Nayagam and F.A. Williams: Int. Comm. Heat Mass Transfer, **37** (2010) 221.
- 22) S. Nakaya, D. Segawa, T. Kadota, Y. Nagashima and T. Furuta: Proc. Combust. Inst., **33** (2011) 2031.
- 23) T. Farouk and F.L. Dryer: Combust. Flame, **159** (2012) 200.
- 24) G.S. Jackson and C.T. Avedisian: Proc. R. Soc. Lond., **A 446** (1994) 255.
- 25) K. Lee, S.L. Manzello and M.Y. Choi: Combust. Sci. Technol., **132** (1998) 139.
- 26) M.Y. Choi and K. Lee: Proc. Combust. Inst., **26** (1996) 1243.
- 27) M. Jang, S. Sakurai, Y. Ogami and H. Kobayashi: Combust. Flame, **156** (2009) 99.
- 28) G.C. Hsiao, H. Meng and V. Yang: Proc. Combust. Inst., **33** (2011) 1997.
- 29) C.T. Avedisian and B.J. Callahan: Proc. Combust. Inst., **28** (2000) 991.
- 30) T.I. Farouk, Y.C. Liu, A.J. Savas, C.T. Avedisian and F.L. Dryer: Proc. Combust. Inst., **34** (2013) 1609.
- 31) F. Liu, H. Guo, G.J. Smallwood and O.L. Gulder: Combust. Flame, **125** (2001) 778.
- 32) F. Liu, H. Guo, G.J. Smallwood: Combust. Flame, **133** (2003) 495.
- 33) D. Zhao, H. Yamashita, K. Kitagawa, N. Arai and T. Furuhashi: Combust. Flame, **130** (2002) 352.
- 34) H. Hara and S. Kumagai: Proc. Combust. Inst., **23** (1990) 1605.
- 35) H. Wise, J. Lorell and B.J. Wood: Proc. Combust. Inst., **5** (1955) 132.

(2014年7月30日受理, 2014年10月1日採録)