乳化燃料液滴燃焼時における含水率の変化*

山崎 博 司^{*1}, 角 田 敏 一^{*2}
津 江 光 洋^{*3}, 瀬 川 大 資^{*2}

Time Histories of Water Contents in a Burning Emulsified Fuel Droplet

Hiroshi YAMASAKI, Toshikazu KADOTA,
Mitsuhiro TSUE and Daisuke SEGAWA

An experimental study has been carried out of the combustion behavior of an emulsified fuel droplet in a quiescent gaseous environment. Attention was mainly paid to time histories of water contents in the droplet and microexplosion. The fuel in water emulsions consisting base fuel and water doped with small amount of surfactant were tested after degasification. An emulsified fuel droplet suspended at the tip of a quartz filament was ignited and the droplet flame was quenched by a jet of gaseous nitrogen at an arbitrary instant of time after ignition. Several droplets were sampled in a micropipette, being heated to cause the separation of water and oil layers. Thus, the time histories of the volume of fuel and water in the emulsion droplet were determined for the base fuels of *n*-dodecane and *n*-hexadecane. The results showed that the water volume in the droplet was almost constant during the combustion while the fuel volume decreased remarkably with the lapse of time. The effects of the time histories of water content on the onset rate of microexplosion were also revealed.

Key Words: Combustion, Liquid Fuel, Evaporation, Emulsified Fuel Droplet, Water Content, Microexplosion

1. ま え が き

乳化燃料は、石油系燃料(ベース燃料)と水を混合させ、界面活性剤などで安定化させた燃料であり、その燃焼過程には、マイクロ爆発、燃料液滴からの蒸気の吹出しおよび燃料液滴の分裂などの二次微粒化現象が存在している。これにより、燃料と空気との混合は増大し、燃焼効率の向上、すす生成および未燃炭化水素発生の抑制などに効果が期待できる。また燃焼過程における水蒸気の発生は、燃焼温度を低下させ、窒素酸化物の発生を抑制できるなどの利点を有しているといわれている⁽¹⁾。

二次微粒化現象は、添加水分がベース燃料(以後、燃料と呼ぶ)によって過熱され、急激な沸騰を起こすことによって生じるものである。乳化燃料液滴の燃焼過程では、燃料の蒸発、燃焼と添加水分の蒸発が同時に進行しており、液滴内部の乳化状態および含水率は変化していると考えられる。添加水分の過熱は、燃料お

よび水の相互作用によって生じるものであることから、液滴内部の変化を調べ、二次微粒化現象への影響を明らかにすることは、乳化燃料の燃焼現象を解明するうえで重要である。

乳化燃料液滴の蒸発、燃焼過程に関しては、従来より理論的研究⁽²⁾⁽³⁾をはじめ、懸垂液滴あるいは自由液滴を用いた実験的研究^{(4)~(8)}および加熱面上における液滴を対象とした実験的研究^{(9)~(12)}が行われてきた。しかしながら、マイクロ爆発などの二次微粒化現象の発生条件に関しては不明な点が多く、また液滴燃焼時の液滴内部の変化に関しても詳細な検討はなされていない。

近年、著者らは、乳化燃料液滴のマイクロ爆発機構を解明するための基礎研究を行ってきた。液滴燃焼におけるマイクロ爆発現象発生の待ち時間分布を統計的見地から検討し、その発生率に対する燃料成分、初期含水率、雰囲気圧力の影響を明らかにした^{(13)~(15)}。本研究は、その一環として、燃料成分および水分量の変化を実験的に調べて、マイクロ爆発現象発生への影響を明らかにすることを目的としたものである。ここでは、乳化燃料液滴を燃焼させた場合について、点火から一定時間後に消炎させて含水率の経時変化を測定した。またマイクロ爆発発生の待ち時間分布を測定して、ミク

* 1994年11月22日 第32回燃焼シンポジウムにおいて講演、原稿受付 1997年5月19日。

^{*1} 正員、愛媛大学教育学部(☎790-8577 松山市文京町3)。

^{*2} 正員、大阪府立大学工学部(☎599-8531 堺市学園町1-1)。

^{*3} 正員、東京大学大学院工学系研究科(☎113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)。

ロ爆発発生率に対する含水率変化の影響についても検討を行ったので、それらの結果について報告する。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。実験に使用した石英線は直径0.25 mmであり、その先端は直径0.5 mmあるいは1.3 mmの球状に加工されている。加熱したニクロム線を液滴の近傍に移動させることにより点火を行い、干渉を防ぐため、点火後ニクロム線は液滴から遠ざけられる。石英線先端から水平方向に約100 mmの位置に、窒素ガス噴出用ノズルの先端が設置されており、電磁弁を介して窒素ガスポンプに接続されている。電磁弁の制御には16 bit パーソナルコンピュータを用いた。点火を確認した後、一定の時間経過後に電磁弁を開き窒素ガス噴流により消炎させた。同一時刻に消炎された2~10個の液滴を、微量測定用メスピペットに採取した。それを373 K以上に加熱して燃料と水を分離させたのち、室温まで冷却し、燃料および水の量を測定し、その結果をもとに含水率を算出した。液滴の燃焼過程はVTRカメラで撮影した。撮影速度およびシャッタースピードはそれぞれ30 こま/s、1/10 000 sである。点火から消炎までの時間は、ビデオのこま数から算出した。背景光の光量を調整することにより、液滴あるいは火炎の観察を行った。

乳化燃料は *n*-ドデカン(試薬特級)あるいは *n*-ヘキサデカン(試薬一級)と、界面活性剤[ポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル：エマルゲン 906, HLB=10.8, 花王(株)] および蒸留水を所定の体積比率で

混合し、マグネチックスターラでかくはんすることにより作成した。マイクロ爆発現象は乳化燃料の減圧脱気処理の影響を受けることが知られており⁽¹³⁾、作成した乳化燃料を、約50 kPaの減圧状態に2 h保持した。乳化燃料の均一性を保つため実験の直前に再びかくはんを行って実験に供した。

初期液滴直径1.5, 2.0 mm, 初期含水率0.1, 0.2の場合について測定を行った。液滴を回転だ円体と仮定して、短径、長径を測定することにより、その直径を算出した。

3. 実験結果および考察

図2は、*n*-ドデカンを用いて作成された含水率0.2の乳化燃料の顕微鏡写真の例である。写真撮影時には、水性黒色染料を加えて着色している。界面活性剤のHLB値が高いために、分散層として微細な燃料滴が形成され、そのまわりを体積比にして1/4の水分が薄い膜状の連続層として存在する水中油滴型の乳化状態となっている。燃料滴の直径は5 μm 程度のものが多く、最大でも15 μm である。水の薄膜厚さは5 μm 以下である。

Fig. 2 Microphotograph of *n*-dodecane/water emulsion

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Fig. 3 Time histories of water content during the droplet combustion for the initial droplet diameter $d_0 = 1.5 \text{ mm}$

図3に、液滴燃焼時の含水率変化の測定結果を示す。横軸は点火からの経過時間、縦軸は含水率である。初期液滴直径を1.5 mm, 初期含水率を0.1, 0.2とした場合の結果である。図3から、点火からの時間経過とともに含水率はいずれの条件においても上昇していることがわかる。また初期含水率が0.1の場合に比べ、0.2の場合のほうが含水率の上昇割合が大きくなっている。燃焼後期では燃焼液滴にマイクロ爆発現象が発生するため、測定データ数は、燃焼初期のそれに比べ、少なくなっている。この傾向は含水率が高い場合により顕著である。図4には、初期液滴直径を2.0 mmとした場合の結果が示されている。この場合も、図3と同様に、点火からの時間経過とともに含水率は上昇しており、また初期含水率が高いほうが含水率の上昇割合が大きいことがわかる。

図5は、*n*-ヘキサデカンで、初期液滴直径を2.0 mmとした場合の測定結果である。この場合も時間

経過とともに液滴内部の含水率は上昇しており、初期含水率が0.1に比べ、0.2の場合のほうが上昇割合は大きくなっている。また点火からマイクロ爆発発生までの時間は、*n*-ドデカンに比べて短くなり、含水率変化の測定可能範囲も短くなっている。図3~5の結果において測定誤差は最大で7%程度と見積もられる。一方、乳化燃料の燃焼過程では燃焼初期にも蒸気の吹出し現象が発生しており、小液滴が飛散することによって液滴の体積が変化する。この蒸気の吹出しの発生は、直径が小さい場合、*n*-ヘキサデカンを用いた場合および含水率が高い場合に顕著であり、測定結果のばらつきの原因となっている。

図6に、乳化燃料液滴中の水分量および燃料成分量の変化を示す。ここで左縦軸は液滴中の水分量、右縦軸は液滴中の燃料成分の量である。*n*-ドデカンについて、 $d_0=1.5, 2.0$ mmの結果が示されている。初期液滴直径にかかわらず、液滴中の燃料成分量は、燃焼の

Fig. 4 Time histories of water content during the droplet combustion for the initial droplet diameter $d_0=2.0$ mm

Fig. 5 Time histories of water content during the droplet combustion for *n*-hexadecane/water emulsion

(a) $d_0=1.5$ mm

(b) $d_0=2.0$ mm

Fig. 6 Time histories of water and fuel volume during the droplet combustion for *n*-dodecane/water emulsion

Fig. 7 Time histories of water and fuel volume during the droplet combustion for *n*-hexadecane/water emulsion

Fig. 8 Combustion process of an emulsion droplet

開始とともに急激に減少し、その減少率は時間の経過とともに小さくなっている。これに対して液滴中の水分量の減少は燃料成分に比べて小さくなっている。また、液滴中の水分量に関して、図6(a)の場合には若干の減少傾向が見られたのに対し、図6(b)では、測定範囲内で減少傾向はほとんど見られなかった。図7は、*n*-ヘキサデカンの場合の燃料成分量、水分量の変化である。この場合も *n*-ドデカンの場合と同様に、燃料成分は燃焼初期に急激に減少するのに対し、液滴内の添加水分はほとんど減少しないことがわかる。

図8に乳化燃料液滴の燃焼過程の可視化例を示す。図8は、液滴内部の変化を撮影したものであり、直径0.75 mmの懸垂線を用い、初期液滴直径を約3.5 mmとしたものである。また背景光を強くして撮影しており、火炎は撮影されていない。図8(a)は加熱開始直後であり、液滴内部はほぼ均一な白濁状態である。図8(b)において、液滴内部の循環流に沿って白濁部は透明度を増しながら循環し、液滴下方に凝集する。図8(c)は、白濁部分と透明部分が完全に分離した状態であり、液滴の内部に循環流は確認できるものの白濁部分と透明部分が再び混合することはない。この液相

(a) *n*-dodecane/water emulsion

(b) *n*-hexadecane/water emulsion

Fig. 9 Distribution function of the waiting time for the onset of microexplosion

分離は細管内に保持した乳化燃料を加熱した場合にも確認されており⁽¹⁶⁾、燃料と水が分離し、その比重差によって水が液滴下方に凝集、滞留しているものと推測できる。

以上の結果から、本実験で採用した水中油滴型乳化燃料の液滴燃焼においては、燃焼の進行とともに、燃料成分と水分との分離が発生する。この液相の分離によって、添加水分が液滴の内部に凝集したために燃料成分だけが蒸発し、結果として含水率が上昇したものと推察できる。

図9に乳化燃料の液滴燃焼におけるマイクロ爆発発生までの待ち時間の分布関数の測定結果を示す。図9は、燃料を *n*-ドデカンあるいは *n*-ヘキサデカンとし、初期液滴直径2.0 mm、初期含水率0.1、0.2とした場合の結果である。横軸は、点火からマイクロ爆発発生までの待ち時間、縦軸は分布関数である。図9(a)において、マイクロ爆発発生までの待ち時間の分布関数は $c_{w0}=0.1, 0.2$ とともに点火後、ほぼ同じ待ち時間から立ち上がっており、待ち時間初期には、分布関数の傾きは緩やかである。分布関数の傾きは、待ち時間が長くなるに従って大きくなっている。また、マイクロ爆発が

最初に発生するまでの待ち時間に対しては、初期含水率の影響がほとんどないのに対して、分布関数の位置は、初期含水率0.1の場合のほうが0.2の場合に比べて右側に位置しており、初期含水率が低い場合のほうが待ち時間は長くなる傾向があることがわかる。これらの傾向は、図9(b)についても同様である。また *n*-ヘキサデカンの場合のマイクロ爆発発生までの待ち時間は *n*-ドデカンの場合よりも短くなる。以上の結果は、液滴直径を1.0 mmとした既報⁽¹⁴⁾における実験結果と同様なものであった。

マイクロ爆発の発生率 $J(t)$ は、残存したサンプルにおける事象の発生割合として次式で定義される。

$$J(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (1)$$

ここで $f(t)$ は確率密度関数であり、分布関数を時間で微分したものとして定義される。ガラス細管内に乳化燃料を保持した場合の実験結果⁽¹⁷⁾から、温度一定、体積一定、含水率一定の条件下でのマイクロ爆発発生率の実験式は次式で与えられることが示されている。

$$J = K_0 V_E C_{w0} \exp[A \Delta T_s] \quad (2)$$

式(2)において V_E , C_{w0} , ΔT_s は乳化燃料体積、初期含水率、添加水分の過熱度であり、 K_0 , A は実験定数である。また既報の結果⁽¹⁶⁾から、温度が変化している非定常状態でのマイクロ爆発発生率 $J(t)$ は準定常を仮定することによって、予測することができる。よって準定常を仮定することによって、式(2)は式(3)のように変形できる。

$$J(t) = K_0 l_w(t) \exp[A \Delta T_s(t)] \quad (3)$$

従来より、乳化燃料の燃焼過程における液滴温度に関しては、大気圧下においては純粋燃料と含水率が0.4の乳化燃料では液滴の最終到達温度に大きな差がないという測定結果⁽¹⁵⁾および含水率が0.3以下の乳化燃料液滴の燃焼過程では液滴温度に及ぼす水の添加の影響は少ないという実験結果⁽¹⁸⁾が示されている。すなわち、本研究で用いた初期含水率が0.1と0.2の乳化燃料の燃焼過程では液滴温度の変化に大きな差はないと考えられる。そこで式(3)において、初期含水率が0.1の場合と0.2の場合で乳化燃料液滴の液滴温度の時間的変化が等しいと仮定して、 $c_{w0}=0.2$ の場合のマイクロ爆発発生率を、 $c_{w0}=0.1$ の場合のマイクロ爆発発生率を使って表すと、式(3)の K_0 , A , $\Delta T_s(t)$ は消去されて、次式で表される。

$$J(t) = [l_w(t)/l_{w0}(t)] J_0(t) \quad (4)$$

ここで $J_0(t)$, $l_{w0}(t)$ は、 $c_{w0}=0.1$ におけるマイクロ爆発発生率および液滴中の水分量である。

図10は、マイクロ爆発発生率の時間的変化を示した

(a) *n*-dodecane/water emulsion

(b) *n*-hexadecane/water emulsion

Fig. 10 Onset rate of microexplosion

ものである。横軸は点火からの経過時間、縦軸はマイクロ爆発の発生率である。図10には、図9に示した分布関数およびその傾きから、式(1)を用いて算出したマイクロ爆発発生率が実線で示されている。図10(a)の *n*-ドデカンの場合、マイクロ爆発発生率は時間の経過とともに急激に増加している。また初期含水率0.1においては $t=1.4$ s 程度からほぼ一定値を示している。既報⁽¹⁴⁾の検討結果より、マイクロ爆発発生率が増加する期間は液滴温度上昇期間に対応し、一定値を示す期間は液滴温度一定期間に対応している。図10(a)の結果から、初期含水率が0.2の場合には液滴温度上昇期間中にすべての液滴でマイクロ爆発が発生したことがわかる。また燃料を *n*-ヘキサデカンとした図10(b)では、マイクロ爆発発生率の上昇は下に凸の変化を示しており、いずれも液滴温度上昇期間内にマイクロ爆発が発生していることがわかる。これは、*n*-ヘキサデカンの沸点が水の過熱限界(543 K, 0.1 MPa⁽¹⁹⁾)よりも高いため、液滴温度が一定となる以前にマイクロ爆発が発生したためと考えられる。図10(a), (b)とも初期含水率が高いほうがマイクロ爆発発生率は高くな

っており、マイクロ爆発現象の発生率は液滴中の水分量の増加とともに増加することがわかる。これらの結果も既報⁽¹⁴⁾の結果と一致したものである。図10には初期含水率0.1の測定結果をもとに、式(4)を用いて算出した初期含水率0.2の場合のマイクロ爆発発生率が破線で示されている。ここで式(4)中の $l_w(t)/l_{w0}(t)$ は測定結果から初期値で一定として取扱った。図10からわかるように、式(4)から得られたマイクロ爆発発生率は測定結果とほぼ一致している。このことは、上記に示した仮定の有効性を示唆するものと考えられることができる。図10の結果において、図中の破線はいずれも測定結果より低い値を示している。この傾向は、既報⁽¹⁴⁾の測定結果においても同様に見られているものであり、この原因については今後さらに検討を行う必要があると思われる。

4. ま と め

n -ドデカンあるいは n -ヘキサデカンを燃料とした水中油滴型乳化燃料を用いた燃焼実験において、点火から一定時間後に窒素ガス噴流によって消炎させて液滴を採取し、燃料成分量および水分量の変化と含水率の経時変化を調べた。また含水率変化のマイクロ爆発現象発生待ち時間分布に対する影響についても検討を行った。本研究で得られた結論は、以下のとおりである。

(1) 乳化燃料液滴の燃焼過程においては、液滴中の燃料成分量は減少するのに対して水分量はほぼ一定値であり、その結果として液滴中の含水率は上昇する。

(2) 燃焼過程における含水率の上昇割合は、初期含水率の高い場合のほうが大きい。

(3) 乳化燃料液滴の燃焼過程では、液滴内部で燃料相と水分相の分離が生じ、液滴内部に水分相が凝集して、その周囲に燃料相が存在する現象が見られる。

(4) 液滴中の初期水分量の増加とともに、マイクロ爆発発生率は増加する。

本研究で使用した界面活性剤は花王株式会社から提供されたものである。記して深甚なる謝意を表する。

文 献

- (1) 例えば, Dryer, F. L., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, (1977), 279-295.
- (2) Law, C. K., *Combust. Sci. Technol.*, **17**(1977), 29-38.
- (3) Law, C. K., ほか2名, *Combust. Flame*, **37**(1980), 125-143.
- (4) Lasheras, J. C., Fernandez-Pello, A. C. and Dryer, F. L., *Combust. Sci. Technol.*, **21**(1979), 1-14.
- (5) Wang, C. H., ほか2名, *Combust. Flame*, **56**(1984), 175-197.
- (6) 岡島敏・ほか2名, 機論, **50**-455, B(1985), 555-563.
- (7) Yap, L. T., ほか2名, *Combust. Sci. Technol.*, **41**(1984), 291-313.
- (8) Gollahai, S. R., ほか2名, *Proc. 18th Symp. (Int.) Combust.*, (1981), 349-360.
- (9) 木本恭司・ほか2名, 機論, **52** 477, B(1986), 2275-2281.
- (10) 吉本康文・ほか2名, 機論, **55**-519, B(1989), 3538-3543.
- (11) Averdisian, C. T. and Faeth, M., *J. Heat Mass Transf.*, **31**-8(1988), 1587-1603.
- (12) Chung, S. H. and Kim, J. C., *Proc. 23rd Symp. (Int.) Combust.*, (1990), 1431-1435.
- (13) 津江光洋・ほか2名, 機論, **61**-587, B(1995), 1189-1194.
- (14) 津江光洋・ほか2名, 機論, **61** 587, B(1995), 2712-2717.
- (15) 津江光洋・ほか2名, 機論, **62**-601, B(1996), 3488-3493.
- (16) Yamasaki, H., ほか2名, *JSME Int. J.*, **36** 4(1993), 667-681.
- (17) 山崎博司・ほか2名, 機論, **59** 560, B(1993), 1362-1367.
- (18) 中野真二・ほか2名, 日本船用機関学会誌, **15**-5(1980), 393-398.
- (19) Cole, R., *Boiling Nucleation, Advances in Heat Transfer*, **10**(1974), 99, Academic Press, New York.