乳化燃料の蒸発と燃焼*

(ミクロ爆発の発生に対する燃料体積および含水率の影響)

山崎 博司^{*1}, 津江 光洋^{*2}, 角田 敏一^{*2}

Evaporation and Combustion of Emulsified Fuels

(Effect of Fuel Volume and Water Content on the Onset of Microexplosion)

Hiroshi YAMASAKI, Mitsuhiro TSUE and Toshikazu KADOTA

An experimental study has been conducted on the effect of fuel volume and water content on the onset probability of microexplosion of emulsified fuels. Water in fuel and fuel in water emulsions were consisted of *n*-dodecane, silicone oil and water doped with small amount of surfactants. Test emulsions contained in Pyrex glass capillaries after degasification were immersed in an oil bath. The waiting time for the onset of microexplosion was measured at 433 K under atmospheric pressure for fuel volume ranging from $1 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ to $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ and water content from 10% to 60%. The weakest link destruction model was adopted for predicting the distributions of the waiting time. It was confirmed that the waiting time at constant temperature was correlated with the Weibull distribution and that the shape parameter was unity. The results showed that the mean waiting time for microexplosion was inversely related to the fuel volume and the water content. A new empirical equation was proposed for the mean waiting time of the onset of microexplosion including the effect of fuel volume and water content.

Key Words: Liquid Fuel, Combustion, Evaporation, Microexplosion, Emulsion, Weibull Distribution

1. ま え が き

乳化燃料の燃焼においては、燃料中に添加された水分の蒸発が燃料の蒸発・燃焼と同時に進行するため、通常の燃料の燃焼とは異なった様相を呈する。すなわち火炎からの熱移動によって、添加水分は過熱され、Microexplosion や Puffing と呼ばれる蒸気爆発に起因した二次的な微粒化現象が発生する。これにより、燃焼場の混合は促進され、燃焼効率の改善およびすす生成や未燃炭化水素発生抑制に効果が期待される。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。

このような乳化燃料の燃焼過程に関する研究としては、実際の使用条件に近い実験条件下での燃焼過程、排ガス特性を検討したもの^{(1)~(6)}や単一滴などの蒸発、燃焼過程を検討したもの^{(7)~(17)}があり、前者は乳化燃焼を包括的に把握しようとしたものであるのに対し、後者は乳化燃焼の局所に注目してその特性を検討しようとしたものと言える。しかしながら、そのメカニズ

ムは十分に解明されているとは言い難いのが現状である。

著者らは、乳化燃料の蒸発と燃焼に関する系統的研究の第1段階として、シリコンオイルを用いた乳化試料をガラス細管内で加熱し、ミクロ爆発の発生の待ち時間を実験的に調べ、統計的見地から検討を行った⁽¹⁸⁾。その結果、温度一定状態に保持した乳化試料のミクロ爆発発生までの待ち時間は、ワイブル分布に従って分布していることを報告するとともに、平均待ち時間と添加水分の過熱度との関係を明らかにした。本報では、その一環として、乳化試料の体積および含水率を変化させた場合のミクロ爆発発生の待ち時間分布を検討したので、その結果について報告する。

2. 実験装置および方法

実験は、ガラス細管内に保持した乳化試料を、大気圧下において加熱し、添加水分の過熱度一定状態におけるミクロ爆発発生までの待ち時間を測定した。図1に実験装置の概略を示す。実験装置は前報⁽¹⁸⁾と同じであり、試料保持部、恒温槽および温度制御装置で構成される。試料保持部はU字状のパイレックスガラス細管(外径4 mm, 内径2.6 mm)を5~10本並べたものである。このガラス細管の中央底部に乳化試料を保持

* 平成3年12月9日 第29回燃焼シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成4年8月19日。

*¹ 正員、愛媛大学教育学部(〒790 松山市文京町3)。

*² 正員、大阪府立大学工学部(〒593 堺市学園町1-1)。

し、管の両端は開放とした。恒温槽はかくはん装置およびヒータを取付けたガラス製容器であり、熱媒体にはシリコンオイルを使用した。ヒータへの入力電圧をON-OFF制御することにより試料保持部の温度を制御した。試料保持部全域での設定温度からの空間的・時間的溫度誤差は ± 1.0 K(95%信頼度)であった。

本実験で使用した供試燃料の主な物性値を表1に示す。燃料としては、軽油を想定して、ドデカン(試薬特級)を用いるとともに、燃料成分の蒸発の影響がない場合を検討することを目的として、シリコンオイルを使用した。乳化剤にはソルビタンモノオレエート[レオドール SP-O 10, HLB 値=4.3, 花王(株), 以後界面活性剤 A] および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 値=10.8, 花王(株), 以後界面活性剤 B]を使用した。供試燃料、蒸留水および界面活性剤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して乳化試料を作成した。前報⁽¹⁸⁾の結果から、乳化試料のマイクロ爆発発生待ち時間分布は試料の減圧脱気の影響を受ける。脱気処理を行うことにより、マイクロ爆発発生までの待ち時間は長くなる傾向があり、2 h 程度の脱気処理を行えば、以後は脱気時間を長くしてもマイクロ爆発発生待ち時間分布はあまり変化しない。このことより、試料作成初期には、試料中に溶存ガスのような蒸気泡発生

の核となりうる要因を内在しており、脱気処理によってその要因は除去できると推測される。そこで本報では、2 h 以上脱気処理を行った乳化試料を用いることとした。また試料の混合状態を均一にするため、実験の直前にマグネチックスターラにより 30 s かくはんした後、実験に供した。

実験は、室温状態でガラス細管の中央部に、マイクロシリッジと内径 0.6 mm のステンレスパイプを用いて所定量の乳化試料を注入し、これを、 $T_f=433$ K(水の過熱度 $\Delta T_s=60$ K)に設定した恒温槽内に浸漬して、大気圧下において過熱状態を実現した。40~150 本の乳化試料について、過熱状態を目視で観察しながら、マイクロ爆発発生までの待ち時間を測定した。

表2に本報における乳化試料と実験条件を示す。試料体積の影響を調べるために、含水率を20%としたドデカンと2種の界面活性剤およびシリコンオイルと界面活性剤 B の3種類の試料と、含水率を10%としたドデカンと界面活性剤 B の試料について実験を行った。また、含水率に関しては、試料体積を 5×10^{-8} m³として、ドデカンと界面活性剤 A およびドデカンと界面活性剤 B の2種類の試料を用いて検討した。

3. 実験結果および考察

図2に、ドデカンおよび界面活性剤 A を用いて作成した乳化試料の顕微鏡写真を示す。試料の含水率は10%および40%であり、倍率は150倍である。界面活性剤 A(HLB 値=4.3)を用いることにより油中水滴形の乳化状態になっていることがわかる。図2(a), (b)ともに水滴は小さな滴群として燃料中に分散し、

表 1 供試燃料

Fuel	Density kg/m ³	Viscosity m Pa·s	Boiling Temperature K
Silicone Oil	940 (298K)	90 (298K)	> 593
n-Dodecane	748 (293K)	1.5 (293K)	489.5

図 1 実験装置概略

表 2 実験条件

Fuel(%)	Water %	Surf. (%)	Volume m ³
n-Dodecane (79)	20	A (1)	1×10^{-8} 2.5 5 10
n-Dodecane (79)	20	B (1)	1×10^{-8} 2.5 5 10
Silicone Oil(79)	20	B (1)	2.5×10^{-8} 5 10 20
n-Dodecane (89)	10	B (1)	2.5×10^{-8} 5 10
n-Dodecane (89) (79) (59) (39)	10 20 40 60	A (1)	5×10^{-8} 5 5 5
n-Dodecane (89) (79)	10 20	A (1)	5×10^{-8} 5

その直径は $2 \sim 30 \mu\text{m}$ 程度である。界面活性剤量が同じで、含水率を 10% から 40% へと増加させた場合、両者間で直径の大きな水滴の割合には差はなく、小さな水滴の個数が増加していることがわかる。図 3 に、

(a) ドデカン-水(10%)-界面活性剤 A(1%)

(b) ドデカン-水(40%)-界面活性剤 A(1%)

図 2 乳化試料の顕微鏡写真

(a) ドデカン-水(20%)-界面活性剤 B(1%)

(b) シリコンオイル-水(20%)-界面活性剤 B(1%)

図 3 乳化試料の顕微鏡写真

含水率を 20% として、界面活性剤 B によって作成した乳化試料の顕微鏡写真を示す。図 3 (a), (b) は、それぞれ供試燃料にドデカンおよびシリコンオイルを使用した場合のものである。蒸留水に 0.5 vol% の水性の黒色染料を加えて着色した試料の顕微鏡写真であり、倍率は図 2 の場合と同じである。ここでは界面活性剤の HLB 値が高いために、燃料滴が形成され、そのまわりに体積比にして 1/4 の添加水分が薄い膜状に存在し、水中油滴形の乳化状態となっている。図 3 (a) において燃料滴の直径は最大で $15 \mu\text{m}$ であり、直径が $5 \mu\text{m}$ 程度の小さな燃料滴が多く見られる。水の薄膜厚さは $5 \mu\text{m}$ 以下である。図 3 (b) のシリコンオイルを用いた乳化試料においても、燃料滴の最大直径は $15 \mu\text{m}$ であって、 $5 \mu\text{m}$ の小さな滴も見られる。またドデカンの場合と比べて、直径の大きな燃料滴の割合が大きく、水膜の厚さは、ドデカンの場合とほぼ同じ程度であった。

図 4 にマイクロ爆発発生までの待ち時間の累積度数分布の例を示す。横軸は温度一定状態でのマイクロ爆発発生までの待ち時間 t_w 、縦軸は累積度数 F である。既報⁽¹⁹⁾ における測定結果より、シリコンオイルおよびドデカンのいずれの場合も、試料温度はガラス管を浸漬してから 30 s 後には恒温槽の設定温度に一致している。よって、ここでは浸漬後 30 s を温度一定状態での待ち時間 $t_w = 0 \text{ s}$ とした。図 4 には、ドデカン-水-界面活性剤 A について、乳化試料の体積を変化させた場合の累積度数分布の変化が示してある。累積度数分布は t_w の小さい部分で急激に立ち上がり、時間の経過とともに傾きは緩やかとなっている。また乳化試料の体積を、 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ から $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ と大きくしていくと累積度数分布は左上方向に移動し、マイクロ爆発発生までの待ち時間は短くなる。

ここで前報⁽¹⁸⁾ と同様に、乳化試料中の過熱水の最も発泡しやすい部分が発泡核となってマイクロ爆発が発生するという考え方にに基づき、マイクロ爆発発生待ち

図 4 累積度数分布の例(試料体積の影響)

時間分布に対して、ワイブル分布を適用する。ワイブル分布の確率密度関数 $f(t)$ は次式で表される。

$$f(t) = \frac{m}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^m \right] \cdots \cdots (1)$$

ここで m , α は形状母数および尺度母数と呼ばれるパラメータであり, m は無次元, α は時間の次元を有している。

図5に、ワイブル確率紙上にプロットした乳化試料のマイクロ爆発発生までの待ち時間の累積度数分布を示す。横軸は温度一定状態での待ち時間 t_w , 縦軸は累積度数 F である。図5(a)は図4の結果をワイブル確率紙上にプロットしたものである。ワイブル確率紙上で直線とみなすことができれば、その分布はワイブル分布で近似できる。図5(a)の実験結果は、いずれも直線状に分布しており、ワイブル分布で近似ができることがわかる。また体積を大きくしていくと累積度数分布は確率紙上を左方向に平行に移動しており、その傾きに大きな差は見られない。図5(b)は、図5(a)と同じ成分組成で、乳化状態を油中水滴形から水中油滴形へと変化させた場合の実験結果である。乳化状態がまったく異なる場合においても、累積度数分布は、ワイブル確率紙上で、やはり直線状に分布しており、待ち時間分布はワイブル分布で近似できることがわかる。また、試料体積を大きくしていくと累積度数分布は確率紙上で左方向に平行に移動する。図5(c)には、供試燃料にシリコンオイルを用い、図3(b)の顕微鏡写真で示した試料に関して、試料体積を変化させた場合のマイクロ爆発発生までの待ち時間の累積度数分布が示してある。燃料をシリコンオイルとした場合についても、累積度数分布は確率紙上でほぼ直線とみなすことができ、ワイブル分布に従って分布していると考えることができる。この場合も体積を大きくしていくことにより、累積度数分布は左方向にほぼ平行に移動している。ワイブル確率紙上での直線の傾きはワイブル分布における形状母数 m を示している。図5のいずれの場合においても、 m の値を調べたところ、1に近い値となっている。前報⁽¹⁸⁾の検討結果とも考え合えると形状母数 m の値は1であることが推定できる。図5中では、傾きを1として各分布を近似した直線が示しており、これらの分布は $m=1$ の直線で近似できることがわかる。すなわちマイクロ爆発発生待ち時間分布は、試料の種類および体積を変化させても、ワイブル分布に従い、その形状母数は1で近似できる。

形状母数が1の場合のワイブル分布は、偶発故障に分類され、単位時間当たりのマイクロ爆発の発生割合 J の時間微分 $dJ/dt=0$ の場合に対応している。すなわ

ち、マイクロ爆発現象の発生は偶発故障に分類され、その発生割合 J は、温度一定状態では時間に関係なく一定であると言える。ワイブル分布において、形状母数 $m=1$ の場合にその分布形は指数分布となり、 $m=1$ とすると式(1)の確率密度関数 $f(t)$ は次式となる。

$$f(t) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[- \left(\frac{1}{\alpha} \right) t \right] \cdots \cdots (2)$$

指数分布において、 α は現象発生までの平均待ち時間であり、過熱された乳化試料のマイクロ爆発発生までの平均待ち時間となる。

(a) ドデカン-水(20%)-界面活性剤 A (1%)

(b) ドデカン-水(20%)-界面活性剤 B (1%)

(c) シリコンオイル-水(20%)-界面活性剤 B (1%)

図5 ワイブル確率紙上に表した累積度数分布 (体積の影響)

図6にマイクロ爆発発生までの平均待ち時間に対する乳化試料体積の影響を示す。横軸は乳化試料の体積 V であり、縦軸はマイクロ爆発発生までの平均待ち時間 α である。ここで α は図5の直線で示す結果から求めた。どの乳化試料についても、 V を大きくすると α は両対数グラフ上でほぼ直線的に小さくなっており、乳化試料の体積の増加により平均待ち時間は指数的に小さくなることからわかる。図6中には、傾きが -1 の直線、すなわち $\alpha \propto V^{-1}$ とした場合の直線が示してある。ドデカンを用いた乳化試料では、界面活性剤を変えて乳化状態を変化させた場合および含水率を10%とした場合のいずれについても、 V と α とは反比例関係にある。また燃料としてシリコンオイルを用いた系についても、反比例関係は成立している。

図7は、マイクロ爆発発生待ち時間分布に対する含水率 W の影響を示したものである。横軸、縦軸は図5と同じで、ドデカン-水-界面活性剤Aについての結果である。いずれの含水率についても、待ち時間分布はワイブル確率紙上で $m=1$ の直線で近似できる。また含水率を10~60%と高くすることによって、マイクロ爆発発生までの待ち時間分布は左方向にほぼ平行に移動しており、温度、体積が同じであれば、含水率が高いほど、マイクロ爆発は起こりやすくなる。図8に、マイクロ爆発発生までの平均待ち時間と乳化試料の含水率との関係を示す。横軸は乳化試料の含水率 W であり、縦軸はマイクロ爆発発生までの平均待ち時間 α である。含水率を大きくすると、 α は両対数グラフ上でほぼ直線的に小さくなっている。図8には、 $\alpha \propto W^{-1}$ で近似

- n-Dodecane-Water(20%)-Surf.A(1%)
- n-Dodecane-Water(20%)-Surf.B(1%)
- Silicone Oil-Water(20%)-Surf.B(1%)
- ▲ n-Dodecane-Water(10%)-Surf.B(1%)

図6 平均待ち時間に対する体積の影響

した直線が示してあり、図6の場合と同様に、含水率に関しても α と W は反比例の関係にあることがわかる。図6および図8に示した α に対する乳化試料の体積、含水率の影響を考え合せると、マイクロ爆発発生までの平均待ち時間は、乳化試料中の水分量に大きく依存していると推測できる。

図9に添加水分の過熱度 ΔT_s とマイクロ爆発発生までの平均待ち時間 α との関係を示す。ここでの α は、図6、8と同様に、ワイブル確率紙上で各過熱度におけるデータを $m=1$ の直線で近似して得たものである。図9には、前報⁽¹⁸⁾の温度依存性の検討において得たシリコンオイル-水(20%)-界面活性剤B(1%)の結果と、本報で主な検討対象としたドデカン-水(20%)-界面活性剤A(1%)の結果が示してある。片対数グラフにおいて、実験点はほぼ直線で近似でき、過熱度が高くなるにつれて平均待ち時間は指数関数的に小さくなる。図9には、 α が ΔT_s の指数関数で表されるとして得た直線が示してある。図9において2本の直線はほぼ平行であり、実験に使用した2種類の乳化試料において、マイクロ爆発発生までの平均待ち時間は同じ温

図7 ワイブル確率紙上に表した累積度数分布 (含水率の影響)

図8 平均待ち時間に対する含水率の影響

図 9 平均待ち時間に対する過熱度の影響

度依存性を有していることがわかる。

以上の検討結果から、マイクロ爆発発生の平均待ち時間と試料体積、含水率および添加水分の過熱度の関係を整理すると、図 10 のようになる。図 10 中の直線は、式(3)を表したものであり、その式中の実験定数を表 3 に示す。

$$\alpha = K_1 V^{-1} (W/100)^{-1} \exp(-A \Delta T_s) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、実験式と実験値とのばらつきは極端な場合を除いて最大 20% 程度であった。

4. ま と め

乳化燃料におけるマイクロ爆発発生待ち時間について、ドデカン、シリコンオイルおよび 2 種類の界面活性剤を用い、乳化試料の体積および含水率を変化させて実験を行った結果、次の結論を得た。

(1) 過熱度一定状態でのマイクロ爆発発生待ち時間分布は、体積、含水率を変えても、ワイブル分布に従っており、その形状母数は 1 で近似できる。

(2) マイクロ爆発発生平均待ち時間は、乳化試料の体積および含水率に反比例する。

(3) 乳化状態を油中水滴形、水中油滴形と変化させても待ち時間分布はワイブル分布に従い、形状母数は 1 で近似できる。

(4) マイクロ爆発発生平均待ち時間について、添加水分の過熱度、体積、含水率の影響を考慮した実験式を提案した。本実験式による計算値と実験結果とのばらつきは極端な場合を除いて最大 20% 程度であった。

表 3 実験定数

	A (1/K)	$K_1 (m^3 s)$
n-Dodecane	8.4×10^{-2}	3.32×10^{-5}
Silicone Oil	8.4×10^{-2}	1.03×10^{-4}

図 10 マイクロ爆発発生平均待ち時間

文 献

- (1) Jahani, H. and Gollahalli, S. R., *Combust. Flame*, **37** (1980), 145.
- (2) Greeves, G., Khan, I. M. and Onion, G., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, (1977), 321.
- (3) 水谷・多木, 機論, **47-424**, B(1981), 2379.
- (4) 水谷・多木, 機論, **47-424**, B(1981), 2386.
- (5) 広安・新井・西田, 機論, **48-430**, B(1982), 1182.
- (6) 吉本・塚原, 第 29 回燃焼シンポジウム前刷集, (1991), 514.
- (7) Wang, C. H. and Law, C. K., *Combust. Flame*, **59**(1985), 53.
- (8) Lasheras, J. C., Kennedy, I. M. and Dryer, F. L., *Combust. Sci. Technol.*, **26**(1981), 161.
- (9) Law, C. K., Lee, C. H. and Srinivasan, N., *Combust. Flame*, **37**(1980), 125.
- (10) Lasheras, J. C., Fernandez-Pello, A. C. and Dryer, F. L., *Proc. 18th Symp. (Int.) Combust.*, (1981), 293.
- (11) Lasheras, J. C., Yap, L. T. and Dryer, F. L., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, (1984), 1761.
- (12) 新岡・佐藤, 第 23 回燃焼シンポジウム前刷集, (1985), 238.
- (13) Law, C. K., *Combust. Sci. Technol.*, **17**(1977), 29.
- (14) Gollahalli, S. R., *Combust. Sci. Technol.*, **19**(1979), 245.
- (15) Tsao, K. C. and Wang, C. L., *SAE Paper*, No. 860304(1987).
- (16) 吉本・塚原・村山, 機論, **55-519**, B(1989), 3538.
- (17) 木本・尾鷲・大前, 機論, **52-477**, B(1986), 2275.
- (18) 山崎・津江・角田, 機論, **58-546**, B(1992), 582.
- (19) 山崎・津江・角田, 機論, No. 910-62(1991-10), 386.