

乳化燃料のマイクロ爆発に関する研究 (脱気時間および乳化状態の影響)

山崎 博司・津江 光洋*・角田 敏一*

(愛媛大学教育学部技術研究室)

(平成4年4月27日受理)

A Study on the Microexplosion of Emulsified Fuel (Effect of Degasification and Emulsion Type)

Hiroshi YAMASAKI, Mitsuhiro TSUE* and Toshikazu KADOTA*

Department of Technology, Faculty of Education,

Ehime University, Bunkyo-cho, Matsuyama 790, JAPAN

(Received April 27, 1992)

ABSTRACT

An experimental study has been conducted on the effect of degasification and emulsion type on the onset probability of microexplosion of emulsified fuels. Emulsions were consisted of *n*-dodecane, *n*-hexadecane and silicone oil blended with high and low HLB surfactants. Water/fuel and fuel/water emulsions after vacuum degassing contained in glass capillaries were immersed in an oil bath. The waiting time for the onset of microexplosion was measured at 433K under atmospheric pressure. The results showed that waiting time were correlated with Weibull distribution and that the shape parameter was unity. It was observed that the waiting time for microexplosion was depended on degassing operation time of emulsified fuels, and the effect of fuels on the mean waiting time of fully degassed emulsions was assessed.

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

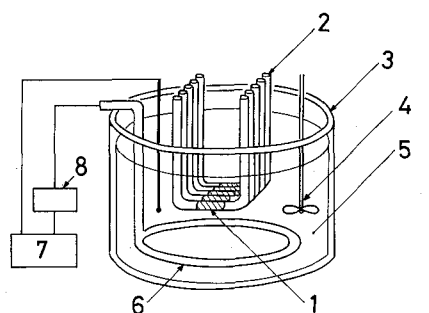
* 大阪府立大学工学部
(Department of Mechanical Engineering, University of Osaka Prefecture, 1-1, Gakuen-cho,
Sakai 593, JAPAN)

1. ま え が き

乳化燃料は、燃料に水を混入させ、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、通常の燃料の燃焼では見られない二次微粒化現象が存在する。この二次微粒化は、燃料中に分散した添加水分の蒸発によって引き起こされるものであり、燃料滴からの蒸気の吹出し (Puffing)、燃料滴の分裂 (Disruption)、燃料滴の爆発 (マイクロ爆発, Microexplosion) が観察されている。これらの過程は、燃焼場の混合促進に有効であり、また燃焼場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生成の抑制に効果がある。

乳化燃料の燃焼過程に関する研究としては実用条件に近い噴霧燃焼に関するもの¹⁾⁻⁵⁾ や単一液滴を対象としたもの⁶⁾⁻¹¹⁾ がある。しかしながら、その蒸発・燃焼機構については不明な点も多く、十分に解明されているとは言い難いのが現状である。筆者らは既報¹²⁾ において、乳化燃料の蒸発過程におけるマイクロ爆発の発生に着目し、シリコンオイルを用いた乳化試料のマイクロ爆発発生待ち時間を実験的に調べ、待ち時間分布がワイブル分布で近似できること、および平均待ち時間の温度依存性に関する実験式を提案した。本研究はその一環として、供試燃料にシリコンオイルおよび実際の燃料に近い炭化水素を用い、試料を減圧脱気した場合の脱気時間によるマイクロ爆発発生待ち時間分布の変化を調べるとともに、HLB 値の異なる2種の乳化剤を用いて、マイクロ爆発発生待ち時間分布に対する乳化状態の影響を検討したので、その結果について報告する。

2. 実験装置および方法



- | | |
|-------------------|--------------------|
| 1 Emulsified Fuel | 5 Silicone Oil |
| 2 Glass Tube | 6 Heater |
| 3 Oil Bath | 7 Temp. Controller |
| 4 Stirrer | 8 Transformer |

図1 実験装置概略

図1に実験装置の概略を示す。実験装置の構成は、試料保持部、恒温槽およびその制御系で構成される。試料保持部は、ガラス細管 (パイレックスガラス製、外径4mm、内径2.6mm) をU字状に曲げて5~10本並べたものであり、中性洗剤で洗浄後、乾燥器で乾燥させて実験に用いた。管の中央底部に乳化試料を保持し、両端は開放とした。恒温槽はガラス製容器で、底部にステンレス製シースヒータ (100V, 750W) が取り付けられており、ヒータへの電圧入力を、ON-OFF 制御した。試料保持部全域での設定温度からの空間的、時間的な温度誤差は ± 1.0 K (95%信頼度) であった。

供試燃料は、シリコンオイル、ドデカン (試薬特級) およびヘキサデカン (試薬一級) の3種類とした。表1に供試燃料の蒸発に関する主な物性値を示す。乳化剤としてはソルビタンモノオレエート (HLB 値=4.3, レオドル SP-O 10, 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 (HLB 値=10.8, エマルゲン906, 花王株, 以後界面活性剤B) を使用した。供試燃料: 蒸留

水：界面活性剤を79：20：1の体積比率で混合し、マグネチックスターラで攪はんして乳化試料を作成した。また乳化試料の前処理として、約5 kPaに減圧して脱気を行い、試料に含まれる溶存気体の影響を除去した。

ガラス細管の中央底部に、マイクロシリンジを用いて乳化試料を $5 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 注入し、これを $T_l = 433 \text{ K}$ （水の飽和温度からの過熱度 $\Delta T_s = 60 \text{ K}$ ）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本～200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1 供試燃料

Fuel	Density kg/m ³	Viscosity m Pa s	Boiling Temperature K
Silicone Oil	940 (298K)	90 (298K)	>593.0
n-Hexadecane	773 (293K)	5.0 (293K)	560.0
n-Dodecane	748 (293K)	1.5 (293K)	489.5

3. 実験結果および考察

図2に乳化試料の加熱曲線の例を示す。横軸はガラス管を浸漬してから時間 t_l であり、縦軸はガラス管内に挿入したK熱電対（ $\phi 0.05 \text{ mm}$ ）によって測定した温度である。図2は、燃料の種類を変化させた場合の、温度の上昇過程を示している。測定結果より、ガラス管を浸漬した直後の温度上昇過程は、燃料を変えた場合、同じとはなっていない。この差異の原因としては、燃料の熱拡散率、粘度などの物性値によるものと、熱電対の管中心から管径方向への位置の誤差などが考えられる。しかし、いずれの場合にも $t_l = 30 \text{ s}$ で設定温度にほぼ等しくなっている。本研究は、温度一定条件について取り扱うことを目的としており、図2の結果に基づいてマイクロ爆発発生までの待ち時間の起点（ $t_w = 0 \text{ s}$ ）として $t_l = 30 \text{ s}$ を用いることとした。

図3に、燃料をドデカンとして作成した乳化試料の顕微鏡写真を示す。図3(a)は界面活性剤A（HLB値=4.3）を用いた場合であり、図3(b)は界面活性剤B（HLB値=10.8）の場合を示している。(a)、(b)ともに倍率は150倍であり、(b)では乳化水に水性の黒色染料を5%加えたものを用いている。(a)においては、乳化剤のHLB値が低いために、添加水分は、直径が $1 \mu\text{m}$ 以下から $15 \mu\text{m}$ 程度の大きさの水滴群となって分散しており、油中水滴（W/O）形の乳化状態になっている。

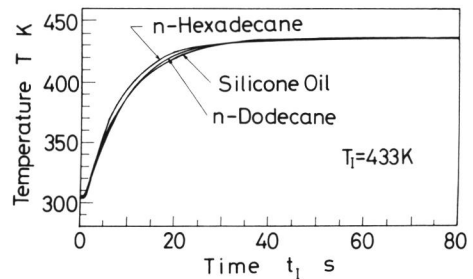
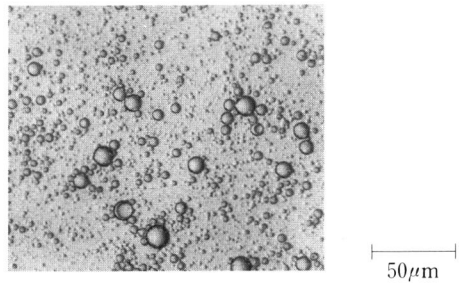
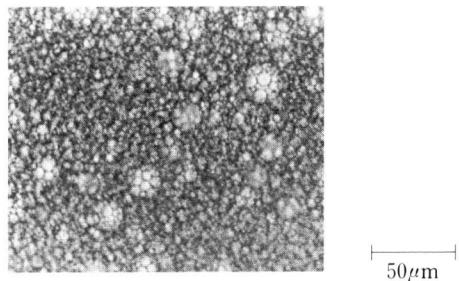


図2 加熱曲線



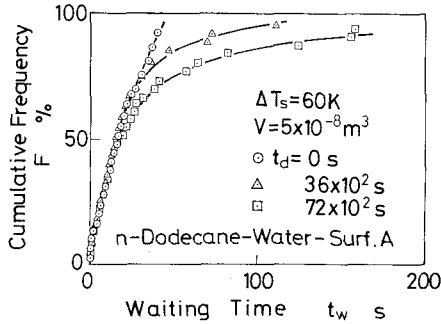
(a) ドデカン-水(20%) - 界面活性剤A(1%)



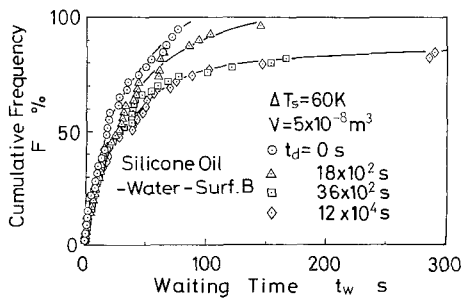
(b) ドデカン-水(20%) - 界面活性剤B(1%)

図3 乳化試料の顕微鏡写真

これに対して、(b)では HLB 値が高いため、乳化状態は水中油滴 (O/W) 形であり、燃料は直径 1~10 μm 程度の小さな滴群に分散し、体積比が 1/4 である添加水分が膜厚 5 μm 以下の薄い膜状となって、燃料滴を覆っている。このように本研究で用いた乳化剤によって、乳化状態の全く異なる試料が得られていることがわかる。



(a) ドデカン-水(20%) - 界面活性剤A(1%)



(b) シリコンオイル-水(20%) - 界面活性剤B(1%)

図4 累積度数分布 (脱気時間の影響)

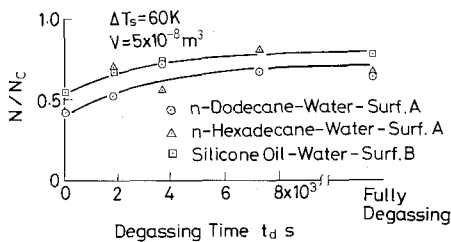


図5 脱気時間による N/N_c の変化

を行うことで 30 s 以前に発泡するデータ数は少なくなる傾向があることがわかる。これは、試料中に溶存気体が存在することで、 $t_f = 30$ s 以前の、設定温度までの昇温過程において乳化試料の蒸発が生じる可能性が高くなることを示している。液体中での気泡核生成に関しては、液体の過熱限界について溶存気体が大きく影響していることが報告されており¹³⁾、これと同様に、本報の結果から過熱限界以下の気泡核生成に関しても溶存気体が寄与していることが確認できる。

図4に過熱度一定状態におけるマイクロ爆発発生までの待ち時間分布の例を示す。横軸は、ガラス管を油中に浸漬して 30 s 後 ($t_w = 0$ s) の時点から乳化試料にマイクロ爆発が生ずるまでの待ち時間 t_w 、縦軸は累積度数 F である。図4(a)はドデカン-水-界面活性剤A、図4(b)はシリコンオイル-水-界面活性剤Bについての測定結果であり、図中には、乳化試料の脱気処理時間 t_d による待ち時間分布の変化が示してある。図4(a), (b)から、待ち時間の累積度数分布は、W/O形のドデカンを用いた試料とO/W形のシリコンオイルを用いた試料のいずれの場合も、待ち時間初期に急激に立ち上がり、その後徐々に傾きが緩やかになっている。また脱気を行っていない試料に比べて、脱気時間を長くすると、マイクロ爆発発生までの待ち時間は長くなることがわかる。図4(b)において、脱気時間が 1 h 程度で、累積度数分布が変化しなくなっているのに対し、図4(a)のドデカンの場合では、2 h 程度の脱気時間が必要である。すなわち燃料によって、脱気の影響が小さくなるまでに必要な処理時間が異っている。以上から本研究においては、待ち時間分布の研究を行う場合に、十分に脱気を行った試料を用いて検討を行うことにした。

図5は、 $t_f = 30$ s までのマイクロ爆発発生データの含まれたデータ数 (N_c) と $t_f > 30$ s でマイクロ爆発が生じたデータ数 (N) との比 (N/N_c) に対する脱気時間の影響を示したものである。

図5より、データのばらつきは大きいですが、脱気

既報¹²⁾と同様に乳化試料の最も発泡し易い部分が発泡核となってマイクロ爆発が発生すると考えて、最弱リンクモデルを採用し、その代表的な分布であるワイブル分布を適用する。その確率密度関数 $f(t)$ は次式で表される。

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

式(1)において m 、 α は形状母数および尺度母数と呼ばれ、 m は無次元、 α は時間の次元を有している。ワイブル分布の分布形は形状母数の値によって、初期故障 ($m < 1$)、摩耗故障 ($m > 1$)、偶発故障 ($m > 1$) の3種類に分類でき、これらはそれぞれ、単位時間当りのマイクロ爆発の発生割合 J の時間変化に関して、 $dJ/dt < 0$ ($m < 1$)、 $dJ/dt > 0$ ($m > 1$)、 $dJ/dt = 0$ ($m = 1$) の場合に対応している。

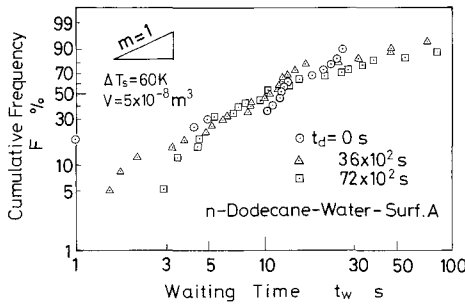


図6 ワイブル確率紙上に表した累積度数分布 (脱気時間の影響)

の過熱初期に発泡が生じるデータ数が減少し、比較的待ち時間の長いデータ数が増加することであるといえる。

図6は、図4(a)に示した脱気時間による累積度数分布の変化を、ワイブル確率紙¹⁴⁾を用いて表したものである。図から累積度数分布は確率紙上でほぼ直線的に分布しており、ドデカン-界面活性剤Aの系についてもワイブル分布で近似できることがわかる。 $t_d = 0$ s、 36×10^2 s、 72×10^2 sと脱気を行った場合、確率紙上では F が70%以上の部分で違いが現れ、分布の形や位置について大きな変化は見られない。図5、図6の結果より脱気処理による分布への影響とは、 $t_l < 30$ s

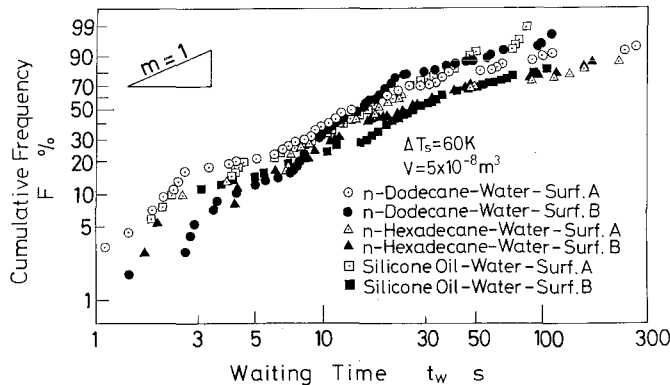


図7 ワイブル確率紙上に表した累積度数分布 (燃料、乳化状態の影響)

図7は、温度、体積を同一条件として、界面活性剤を変え、乳化状態を変化させた場合の累積度数分布を、ワイブル確率紙上に示したものである。図には燃料としてドデカン、ヘキサデカン、シリコンオイルを用いた場合が示してある。いずれの場合も、ほぼ直線と見なすことができ、マイクロ爆発発生待ち時間分布は、燃料を変えた場合およびW/O形やO/W形という乳

化状態の違いに依らずワイブル分布に従うといえる。また、その形状母数は1に近い値となる。ワイブル分布において、形状母数が $m = 1$ の場合に分布形は指数分布となり、式(1)の確率密度関数 $f(t)$ は次式で表される。

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

式(2)において、 α は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。

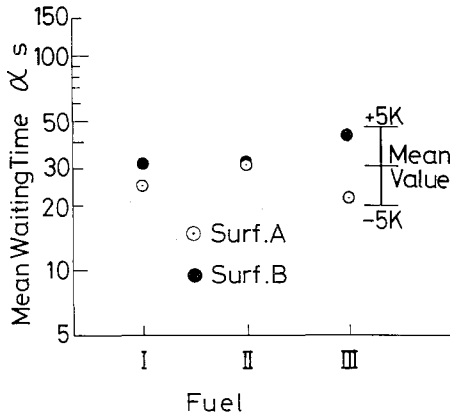


図8 ミクロ爆発発生までの平均待ち時間
(I: *n*-Dodecane, II: *n*-Hexadecane, III: Silicone Oil)

図8には、図7において $m = 1$ とした場合の、各試料のマイクロ爆発発生までの平均待ち時間 α を示す。図には、既報¹²⁾において、シリコンオイル-水-界面活性剤Bの系で求めた平均待ち時間の温度依存性が他の試料についても同様に成立すると仮定して、各試料の平均待ち時間 α の算術平均値を中心として過熱度が5 K高い場合および5 K低い場合の α の範囲が併せて示してある。図8において、燃料を変えた場合の α の違いは、界面活性剤Aでは8.4 s、界面活性剤Bでは14.3 sであり、また界面活性剤を変えた場合、W/O形(界面活性剤A)の方が α は短くなる傾向がある。しかしながら、これらの影響は温度(過熱度)の依存性から換算すると ± 5 K以内であり、温度の影響に比べて小さいことがわかる。

4. ま と め

乳化燃料のマイクロ爆発発生までの待ち時間分布に対する脱気時間、乳化状態の影響を3種類の燃料および2種類の界面活性剤を用いて、実験的に検討した結果、次の結論を得た。

(1) 乳化試料を脱気することによって、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、燃料、乳化状態に依らず脱気条件を考慮する必要がある。

(2) 過熱度一定状態でのマイクロ爆発発生までの待ち時間分布は、燃料、界面活性剤を変えても、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。

(3) ミクロ爆発発生までの平均待ち時間に対する燃料および乳化状態の影響は、過熱度に換算して ± 5 K程度である。

文 献

- 1) 吉本, 塚原, 第29回燃焼シンポジウム前刷集 (1991), 514.
- 2) 水谷, 多木, 日本機械学会論文集, 47-424, B (1981), 2379.
- 3) Jahani, C. and Gollahalli, S. R., *Combust. Flame*, 37 (1980), 145.
- 4) Law, C. K., Lee, C. H. and Srinivasan, N., *Combust. Flame*, 37 (1980), 125.
- 5) Greeves, G., Khan, I. M. and Onion, O., *Proc. 16th Symp. (Int.) Combust.*, (1977), 321.

- 6) Wang, C. H. and Law, C. K., *Combust. Flame*, 59 (1985), 53.
- 7) Lasheras, J. C., Kennedy, I. M. and Dryer, F. L., *Combust. Sci. Technol.*, 26 (1981), 161
- 8) 吉本, 塚原, 村山, 日本機械学会論文集, 55-519, B (1989), 3538.
- 9) 木本, 尾鷲, 大前, 日本機械学会論文集, 52-477, B (1986), 2275.
- 10) 北村, 黄, 高橋, 第27回伝熱シンポジウム講論集 (1990), 310.
- 11) 新岡, 佐藤, 第23回燃焼シンポジウム前刷集 (1985), 238.
- 12) 山崎, 津江, 角田, 日本機械学会論文集, 58-546, B (1992), 582.
- 13) Stralen, S. V. and Cole, R., *Boiling Phenomena*, Vol. 1, (1979), 81, Hemisphere.
- 14) 真壁, ワイブル確率紙の使い方, (1988), 日本規格協会.