高温高压雰囲気における A 重油及び その乳化燃料油滴の燃焼*

張 涛** 塚 本 達 郎***
大 江 賢 二*** 岡 田 博***

Experiment on Combustion of Single Droplet of Marine Diesel Fuel
and Its Emulsified Fuels at High Ambient Temperature and Pressure

by T.Zhang T.Tsukamoto K.Ohe H.Okada

Large two-stroke marine diesel engines have high thermal efficiency and use inexpensive marine diesel fuel (MDF). Such engines can contribute to control of global warming by low CO₂ emission. However, polluting matter, NO_x, SO_x, and PM are discharged in large quantities, and countermeasures are required for environmental protection. It was reported that fuel-water emulsion was effective to reduce emissions and to improve combustion. Micro-explosion phenomena and the behavior of water particles in the droplet of emulsified fuel are not clear enough for understanding the effects on combustion, however. This paper introduces an experimental study on combustion of a single droplet of water-in-fuel emulsion of MDF at high temperature and in a high-pressure chamber.

The experimental results show that, in an atmospheric experiment, when the mean diameter of the water particles increases, the micro-explosion becomes violent and the burning time and ignition delay become shorter; on the other hand, in a high-pressure experiment, when the initial pressure of the chamber increases, the projected flame area becomes smaller and the micro-explosion becomes weaker.

1. はじめに

近年、地球規模の環境破壊問題に関する対応について熱心に議論されており、熱機関から排出される有害排出物の低減は重要な課題となっている。その一つの対応策として乳化燃料油の使用に関する研究が注目を集めている。ディーゼル機関やディーゼル噴霧燃焼装置を用いた研究では、乳化燃料油は水粒子の急速な気化膨張とマイクロ爆発¹⁾により、NO_xの低減²⁻⁴⁾や、場合によっては排出黒煙の低減⁵⁾、熱効率の改善⁶⁻⁸⁾また以上の三者同時に改善する⁹⁾ことに効果があると報告されている。なお、機関の対応に関する研究もされている¹⁰⁾。

しかし、これらの研究では、水添加率によって、機関性能が悪くなる^{11, 12)}報告もある。これは多くの因子が複雑に絡み合っており、乳化燃料油中の水粒子の作用機構やマイクロ爆発現象について不明な点があるためである。それを解明するため、燃料油滴の研究も行われている。大気圧における乳化燃料油滴の燃焼では、すすの生成率が低下する¹³⁾、一方高压雰囲気において、乳化油滴の着火遅れ¹⁴⁾やそのマイクロ爆発現象の確認¹⁵⁾、発生時期¹⁶⁾、発生条件¹⁷⁾及び発生確率¹⁸⁾の実験研究及びモデリング計算研究¹⁹⁾等が行われている。

しかし、油滴の実験研究では、油滴を一定の雰囲気温度で着火させる例が少ない、また、高压雰

*原稿受付 平成16年3月25日

**学生会員 東京商船大学 (江東区越中島2-1-6)

***正会員 東京海洋大学 (江東区越中島2-1-6)

気において、乳化燃料油滴のマイクロ爆発の発生程度を調べることで、その二次微粒化や火炎伝播の解明及び高压雰囲気の実験データも必要とされている^{20, 21)}。そこで本研究では乳化燃料油滴を高温、高压雰囲気中で燃焼させ、油滴の燃焼過程において、水粒子の挙動とマイクロ爆発現象及び雰囲気気圧の影響について実験的に調べ、乳化燃料油の燃焼特性の一端を明らかにすることを目的とした。

図1 実験装置の概略図

図2 懸垂系、垂下針と油滴の写真
懸垂系と燃料油滴を垂下する針 油滴の短径の測り方

2. 実験装置及び実験方法

本実験は高温、大気圧雰囲気における油滴の燃焼実験と高压容器を用いた高温、高压雰囲気における油滴の燃焼実験からなる。

図1には、本実験に用いた装置の概略図を示す。

実験装置は主に、高压容器、石英懸垂系（直径0.5mm、先端直径1mm）及びその固定装置、燃料油滴の垂下装置、加熱炉、燃焼室、撮影装置から構成される。石英懸垂系は操作棒①に固定されており、操作棒①を回転することによって石英懸垂系とそれに垂下した油滴を燃焼炉内に挿入することができる。燃料油滴垂下装置は注射針、ビニル管、注射器本体からなる。注射針は操作棒②に固定し、注射器本体は容器底に固定されており、操作棒③を回すと、注射器の中に充填した燃料油が針の先端から出る。操作棒①により、石英懸垂系を針の近くに移動させ、油滴を石英懸垂系に懸垂させる。図2には懸垂系、針と油滴の写真を示す。加熱炉は外から石綿断熱材、セラミック製の円筒管、断熱材、カンタル線コイルからなる。燃焼室は加熱炉の上に設置されており、圧力容器の観測窓に向く面は耐熱ガラス製で、それによって、油滴燃焼の撮影を行った。燃焼室の他の面は外から石綿断熱材、鉄板、石綿防熱材からなる。燃焼室内の温度は熱電対によって測定した。燃焼室内の温度はカンタル線コイルに加える電圧によって調整する。実験では、石英系に懸垂された油滴は燃焼室中に挿入されて瞬間的に高温雰囲気中にさらされる。

表1 実験項目

(ϕ : 水添加率, ε : 乳化剤添加率)

項目	$\varepsilon = 2$	$\varepsilon = 1$	$\varepsilon = 0.5$	$\varepsilon = 0.2$
$\phi = 0$	×	×	×	
$\phi = 10$				○×
$\phi = 20$	○×	○×	○×	○×△
$\phi = 30$				○×

本実験で用いた乳化燃料油の乳化剤（ソルビタル脂肪酸エステルを主成分とする界面活性剤、日本乳化剤株式会社製、TM-12614、HLB値7.9）添加率と水添加率を表1に示す。表1においては、 ε は乳化燃料油の乳化剤添加率、 ϕ は乳化燃料油の水添加率で、単位はvol%である。また、○は乳化燃料油の水粒子の粒子径を測定した実験項目、×は高温、大気圧の実験項目で、△は高温、高压（1.6MPaまで）の実験項目である。ここで実験を行った油滴は、短径が1.5mmで、長径が2.3mmである。

3. 実験結果及び考察

3.1 乳化燃料油中の水粒子径分布及び平均粒子径²²⁾ 表1に○印で示した6種類の乳化燃料油のサンプルを採取し、顕微鏡カメラで写真撮影し、水粒子径分布を求めた。図3に乳化剤添加率0.2vol%，水添加率20vol%の乳化燃料油中の水粒子径分布とその顕微鏡写真を示す。相対数量比率とは、計測した粒子全体の個数に占める d_i の粒子の個数の割合である。なお、平均水粒子径は次の式で計算した。

$$d_m = \sqrt[3]{\sum a_i \cdot d_i^3}$$

ただし、 d_m ：平均水粒子径、 d_i ：観測された水粒子径、 a_i ：水粒子径が d_i の粒子の相対数量比率。

図4と図5にはそれぞれ乳化剤添加率及び水添加率と平均水粒子径との関係を示す。

同じ水添加率では乳化剤添加率が大きいほど燃料油中の水粒子径が小さくなっており、また同じ乳化剤添加率では水添加率が大きいほど水粒子径が大きくなっていることが解った。平均水粒子径への影響は水添加率より乳化剤添加率のほうが大きい傾向も示している。

図3 乳化燃料油中の水粒子径分布

図4 乳化剤添加率と平均水粒子径の関係

図5 水添加率と平均水粒子径の関係

3.2 高温大気圧雰囲気における油滴燃焼実験

本実験では乳化燃料油中の水粒子の作用機構について、特にその重要因子である水粒子径が燃焼に及ぼす影響を調べた。実験では、石英糸に懸垂された油滴は高温炉中に挿入されて瞬間的に高温雰囲気さらされる。油滴はある遅れ時間の後に着火し、燃焼する。ここでは、ビデオ撮影により着火・燃焼状態の観察を行うとともに、着火遅れ及び燃焼時間の計測を行った。

3.2.1 ミクロ爆発現象の観察 本実験では、燃料油滴が高温雰囲気に入る瞬間を時間0秒とした。

図6にはA重油滴の燃焼過程の写真を示す。0.93秒に着火している。着火時には火炎は油滴の下方に現れる。その後、油滴全体を包み込むエンベロープ火炎を形成している。また、1.37秒以降では、火炎先端から煤が放出されていることが観察された。

図7には乳化剤添加率2vol%，水添加率20vol%の乳化燃料油滴の場合を示す。燃焼過程において、開始段階ではミクロ爆発が発生するが、後半ではミクロ爆発が発生しなくなり、火炎もA重油とほぼ同じ形状をしている。乳化燃料油中の水粒子径が小さく、熱い燃料油との接触面積が大きく、加熱されると、早く水が蒸発してしまうためと考えられる。

図8には乳化剤添加率1vol%，水添加率20vol%の乳化燃料油滴の場合を示す。図6の乳化剤添加率2vol%の場合と比べて、明らかにミクロ爆発が発生する時間が長くなっている。しかし、燃焼の後半では、火炎はA重油滴のそれとほぼ同じ形状に

なる。

図9には乳化剤添加率0.5vol%, 水添加率20vol%の乳化燃料油滴の場合を示す。燃焼期間でマイクロ爆発の時間がかかなり長くなっており、また、マイクロ爆発も激しくなっている。

図10には乳化剤添加率0.2vol%, 水添加率20vol%の乳化燃料油滴の場合を示す。燃焼の最初

から最後まで、マイクロ爆発が継続して、発生しており、また、火炎が大きく四方に飛散し、マイクロ爆発の程度も激しくなることがわかる。

図11と図12には乳化剤添加率0.2vol%, 水添加率それぞれ10vol%と30vol%の乳化燃料油滴の場合を示す。図10と同様に燃焼期間中激しいマイクロ爆発が発生している。

図6 A重油滴の燃焼過程 ($T_a: 1000\text{K}$, $P_a: 0.1\text{MPa}$)

図7 乳化燃料油滴の燃焼過程 ($T_a: 1000\text{K}$, $P_a: 0.1\text{MPa}$, $\phi: 20\text{vol}\%$, $\varepsilon: 2\text{vol}\%$)

図8 乳化燃料油滴の燃焼過程 ($T_a: 1000\text{K}$, $P_a: 0.1\text{MPa}$, $\phi: 20\text{vol}\%$, $\varepsilon: 1\text{vol}\%$)

図9 乳化燃料油滴の燃焼過程 ($T_a: 1000\text{K}$, $P_a: 0.1\text{MPa}$, $\phi: 20\text{vol}\%$, $\varepsilon: 0.5\text{vol}\%$)

図10 乳化燃料油滴の燃焼過程 ($T_a: 1000\text{K}$, $P_a: 0.1\text{MPa}$, $\phi: 20\text{vol}\%$, $\varepsilon: 0.2\text{vol}\%$)

図11 乳化燃料油滴の燃焼過程 ($T_a: 1000\text{K}$, $P_a: 0.1\text{MPa}$, $\phi: 10\text{vol}\%$, $\varepsilon: 0.2\text{vol}\%$)

時間 1.03秒 1.07秒(着火) 1.4秒 1.67秒 2.07秒 2.6秒(消炎直前)

図12 乳化燃料油滴の燃焼過程 ($T_a: 1000\text{K}$, $P_a: 0.1\text{MPa}$, $\phi: 30\text{vol}\%$, $\varepsilon: 0.2\text{vol}\%$)

3.2.2 着火遅れと燃焼時間 本実験では油滴を燃焼室に入れてから、着火するまでの時間を着火遅れとする。燃焼時間は油滴が着火してから、燃焼が終わるまでの時間とする。A重油滴と乳化燃料油滴の燃焼映像からそれらの着火遅れと燃焼時間を解析する。3.1で述べたように乳化燃料油の水添加率と乳化剤添加率によって、平均水粒子径が変わるので、平均水粒子径が着火遅れと燃焼時間に及ぼす影響も調べた。

図13にはA重油滴とその乳化剤添加率別の乳化燃料油滴の雰囲気温度と着火遅れの関係を示す。着火遅れは雰囲気温度が高くなると短くなるとともに、乳化剤添加率が小さいほど短くなることが解った。これは乳化燃料油中の水粒子径の影響によるものと考えられる。

図13 雰囲気温度と着火遅れの関係

図14と図15には乳化燃料油中の水粒子径と着火遅れの関係を示す。平均水粒子径が増加すると着火遅れが短くなることが解った。図14において、水粒子径が大きくなると、乳化燃料油中の油(連続相)と水粒子(分散相)との全接触面積は小さくなり、油相から水粒子への熱伝達

が少なくなり、油滴温度の上昇は速くなる。これによって、油滴中の燃料成分の蒸発も速くなり、可燃混合気も速く形成し、油滴の着火遅れが短くなる。図15に示す乳化燃料油中の水粒子径は大きくて、互いにその差も小さい。加熱されると、油滴の外側表面に燃料油が蒸発して、可燃混合気を形成し、着火するので、水添加率が着火遅れに及ぼす影響は小さくなると考えられる。

図14 水粒子径と着火遅れの関係

図15 水粒子径と着火遅れの関係

図16, 図17と図18には雰囲気温度, 水粒子径と乳化燃料油滴の燃焼時間の関係をそれぞれ示す. 着火後の燃焼時間も平均水粒子径の増加によって, 短くなった. 平均水粒子径が大きいほ

図16 雰囲気温度と燃焼時間の関係

図17 水粒子径と燃焼時間の関係

図18 水粒子径と燃焼時間の関係

ど燃焼中に激しくマイクロ爆発を起こすのが観察され, そのため燃焼時間が短縮している.

3.3 高温, 高压雰囲気における油滴燃焼実験

本実験では雰囲気温度を1000Kにし, 雰囲気圧を1.6MPaまでに行った. A重油及びその乳化剤添加率0.2vol%, 水添加率20vol%の乳化燃料油滴を燃焼させ, その過程をビデオカメラで撮影し, 映像から乳化燃料油滴の燃焼状況を考察する. 図19, 図20には高压雰囲気における燃焼時間と着火遅れを調べた結果を示す. 雰囲気圧の上昇とともに燃焼時間は短くなる. また着火遅れも雰囲気圧が上昇すると短くなる.

乳化燃料油滴のマイクロ爆発の強さを数値として表わすことは難しい. そこではマイクロ爆発が起こると, 火炎の投影面積が急増することに着目し, マイクロ爆発の程度が大きくなるほど, 火炎投影面積は大きくなると考え, 各雰囲気圧において, 油滴が燃焼室入って, 着火してから, 燃焼が終わるまでの火炎投影面積の時間の変化を求めることにする. 火炎投影面積²³⁾はビデオカメラで撮影した映像から火炎の輪郭面積を測り, 実際の面積に換算したものである. 図21～図24にはマイクロ爆発発生を比較するためにビデオ画像から火炎投影面積の変化を計測した結果を示す. 雰囲気圧が高くなるほどA重油滴とその乳化燃料油滴の火炎投影面積はともに減少した. また雰囲気圧の上昇につれて, A重油滴と乳化燃料油滴の火炎投影面積の差が小さくなるのが解った.

図19 雰囲気圧と乳化燃料油滴の燃焼時間

図20 高压雰囲気下の雰囲気温度と着火遅れの関係

図21 平均火炎投影面積の時間変化及び火炎の写真

図22 平均火炎投影面積の時間変化及び火炎の写真

図23 平均火炎投影面積の時間変化及び火炎の写真

図24 平均火炎投影面積の時間変化及び火炎の写真

4. まとめ

以上の実験結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 同じ水添加率では乳化剤添加率の大きいほど乳化燃料油中の水粒子径が小さくなり、同じ乳化剤添加率では水添加率が大きいほど水粒子径が大きくなる。
- (2) 大気圧雰囲気では、乳化燃料油滴の着火遅れは、水添加率が同じでも平均水粒子径が増加すると(乳化剤添加率が小さいほど)短くなる。燃焼時間も平均水粒子径の増加によって、短くなる。平均水粒子径が大きいほど燃焼中に激しくマイクロ爆発を起こすのが観察され、そのため燃焼時間が短縮している。
- (3) 高圧雰囲気中では、雰囲気気圧の上昇とともに着火遅れは短くなる。また燃焼時間も圧力が上昇すると短くなる。雰囲気気圧が高くなるほどA重油滴とその乳化燃料油滴の火炎投影面積はともに減少し、A重油滴と乳化燃料油滴の火炎投影面積の差が小さくなる。

以上の結果から、大気圧では乳化燃料油滴は水粒子径が大きいほど、着火遅れは短くなり、また燃焼中に激しくマイクロ爆発を生じて燃焼時間も短くなるので、乳化燃料油の燃焼に際しては、水粒子径を一つ重要な因子と考えるべきである。実際のディーゼル機関のような高圧雰囲気における燃焼ではマイクロ爆発による作用は少なく、乳化燃料油中の水粒子の急速な気化膨張が主に生じていると考えられる。

参考文献

- 1) 村山, 日本舶用機関学会誌, 21(1986), 12, 8.
- 2) 社団法人 日本舶用機関学会 燃料乳化による排気浄化に関する調査委員会報告書, (1997), 50.
- 3) Mollenhauer, K., et al., MTZ, 47 (1986), 1, 3.
- 4) 園田ら, 日本舶用機関学会誌, 30(1995), 6, 463.
- 5) 西川ら, 日本舶用機関学会誌, 26(1991), 9, 128.
- 6) Murayama, T., et al., SAE Tech. Pap. Ser. (Soc. Automot. Eng.), No. SAE-891841, (1989), 11.
- 7) 広瀬ら, 日本舶用機関学会誌, 19(1984), 1, 47.
- 8) 浜崎, 日本機械学会講演論文集, No. 998-3, (1999), 123.
- 9) Murayama, T., et al., SAE Trans., 87(1979), 946.
- 10) 宮元ら, 日本機械学会論文集, B編, 48(426), (昭57-2), 381.
- 11) 岡田, 昭和54年度東京商船大学受託研究報告書, (1979).
- 12) 園田ら, 日本舶用機関学会誌, 30(1995), 9, 661.
- 13) 岡田ら, 日本舶用機関学会誌, 15(1980), 5, 399.
- 14) 松本ら, 日本舶用機関学会誌, 23(1988), 3, 22.
- 15) 松本ら, 日本舶用機関学会誌, 24(1989), 1, 37.
- 16) 津江ら, 日本機械学会論文集, B編, 62(601) (1996-9), 3488.
- 17) 三上ら, 日本機械学会論文集, B編, 64(624) (1998-8), 2690.
- 18) 三上ら, 日本機械学会論文集, B編, 67(663), (2001-11), 2828.
- 19) A. MAKINO and C. K. LAW, COMBUSTION AND FLAME, 73(1988), 331-336.
- 20) 岩間, 石田ら, エマルジョン燃料の燃焼, 燃料協会誌, 58(626), (1979), 432.
- 21) Kadota T., et al., Progress in Energy and Combustion Science, 28(2002), 385.
- 22) Boeckle, S., MTZ, 47 (1986), 9, 351.
- 23) 中村, 岡田ら, 日本舶用機関学会誌, 18(1983), 1, 34.