乳化燃料油滴の燃焼挙動の観察* (ミクロ爆発発生の支配要因について)

木 本 恭 司^{*1}, 尾 鷲 幸 男^{*1}
大 前 義 弘^{*1}, 難 波 邦 彦^{*1}

Observation of Combustion Behavior for Single Droplets of Water-in-Oil Emulsified Fuels (Dominant Factor for Occurrence of Microexplosions)

Kyoji KIMOTO, Yukio OWASHI,
Yoshihiro OMAE and Kunihiro NAMBA

The combustion behavior of single fuel droplets of water-in-'A' heavy oil emulsions was observed in an electric furnace in order to elucidate the dominant factor for the occurrence of microexplosions. The tests were carried out by changing the following parameters: the size of water droplets in the emulsified fuels having the same water content, the ratio of water to 'A' heavy oil, and the power of surfactants in the emulsions. The results reveal that it is not the ratio of water to 'A' heavy oil, but the size of water droplets in the emulsified fuels which plays the most important role in microexplosions and surfactants may be the factor disturbing the occurrence of microexplosions by the effect of stabilizing the emulsified fuels. These phenomena are very similar to 'The Vaporizing Behavior of the Oil Droplet of Water-in-Oil Emulsions on the Hot Surface' reported previously by the authors.

Key Words: Combustion Phenomena, Liquid Fuel, Oil Droplet, Ignition, Emulsion, Electric Furnace, Microexplosion, Two-Stage Combustion, Surfactant

1. ま え が き

乳化燃焼法は火炎温度低下に伴う窒素酸化物(NO_x)の低減化とあわせて、乳化燃料特有のミクロ爆発と呼ばれる二次微粒化現象によって、燃焼性向上の面でも関心が寄せられてきた⁽¹⁾。しかし、後者に関しては疑問とする見方もあることから、現象を基礎的に見直す必要性が生じている。著者らはすでに蒸発燃焼を利用する燃焼機器への適用⁽²⁾を念頭に置いて、基礎的な知見を得ることを目的に、加熱面上でのA重油と水の油中水滴形乳化燃料油滴の蒸発挙動を詳細に観察した⁽³⁾。そこでは、乳化燃料油滴中に分散する水滴径の大小による油滴の蒸発寿命の相違に特に注目して実験を行った。その結果、水添加割合が一定であっても水滴径が小さく(1~2 μm)、均質に分散する乳化燃料では、A重油単味の場合よりも蒸発寿命は長くなり、逆に10 μm を超える粗大水滴のある水滴径分布の広がった乳化燃料では、高温の膜沸騰域でA重油よりも蒸発寿命が激減することが見いだされた。このように、油中水滴径の大小によって蒸発現象が基本的に異

なるのは、最近になって吉本らによって確認されている⁽⁴⁾。これらの現象は油滴と加熱面との間で伝熱抵抗となる蒸気膜がミクロ爆発により打ち破られるか否かによるが、高温雰囲気中で燃焼する単一油滴についても同様な現象が生じるか否か不明である。そこで、本報では電気炉内で熱電対に懸垂されたA重油-水の乳化燃料油滴の着火、燃焼挙動について油中水滴径の相違に注目して実験するとともに、水添加率、および界面活性剤の影響についても調べてみた。なお、懸垂部を石英糸に変えた実験も行っているが、定性的な傾向は熱電対の場合とまったく同じである。油滴の温度履歴、油滴径自身の大きさの影響、懸垂部の影響などについては別に報告を予定している。

2. 実験方法および実験条件

実験に用いた電気炉(内径 $\phi 60\text{ mm}$ ×長さ150 mm)を図1に示す。炉の両端は内部観察と高速度写真撮影用に石英ガラスがはめ込まれている。炉心の側面中央には油滴挿入用に直径 $\phi 6\text{ mm}$ の穴が開けられ、その対面には炉内温度制御用に熱電対が設けられている。

実験方法は自己発振形乳化燃料作成装置⁽⁵⁾にて所定の乳化燃料を作成し、それをマイクロシリッジにて台車に取付けられた白金-白金・ロジウム熱電対(素線

* 原稿受付 平成5年10月6日。

^{*1} 正員、大阪府立工業高等専門学校(〒572 寝屋川市幸町26-12)。

表 1 乳化燃料の作成条件

Case	Oil:Water	Surfactant	Object of Experiment
(a)	8 : 2	1 % A	Influence of Water Droplet Sizes in Emulsified Fuel
(b)	8 : 2	0.2 % A	
(c)	7 : 3	1 % A	Inf. of Oil:Water
(d)	9 : 1	1 % A	
(e)	8 : 2	1 % B	Inf. of Surfactant
(f)	7 : 3	1 % B	
(g)	8 : 2	0.2 % B

図 1 炉

径 $\phi 0.3 \text{ mm}$ の先端に一定量懸垂し、台車によりすばやく所定温度に設定された炉内に挿入する。着火遅れ時間 τ_i および全燃焼時間 τ_a はそれぞれ、油滴が炉内に入った瞬間より着火に至るまでの時間、および燃焼完結(消炎)までの時間と定義した。実験に用いた乳化燃料の作成条件(a)~(g)を表 1 に、表 1 中の case (a)~(c), (e), (f) の乳化燃料の顕微鏡写真を図 2 の同一記号に示す。表 1 の Case(a) は A 重油: 水 = 8 : 2 の全量に対して、市販の界面活性剤エムゾール A (エムゾールの原液を薄めたもので、以後この活性剤を A と表示) を 1% 混ぜて 10 min 程度、乳化燃料作成装置にてかくはんした乳化燃料で、文献(3)の乳化燃料 1 に相当している。顕微鏡写真 [図 2 (a)] より、この場合は水滴径が $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の微細で均一な乳化状態が得られている。作成条件を特に示す必要がある場合には、以後この乳化燃料を 8 : 2, 1% A と表示する。Case(b) は同じく 0.2% 混ぜて 2 min 程度かくはんした乳化燃料で、文献(3)の乳化燃料 2 に相当している(以後、8 : 2, 0.2% A と表示)。図 2 (b) より、この場合は $10 \mu\text{m}$ を超える粗大水滴のある粒径分

(a) 8 : 2, 1% A

(b) 8 : 2, 0.2% A

(c) 7 : 3, 1% A

(f) 7 : 3, 1% B 10 μm

図 2 乳化燃料の顕微鏡写真

布の広がった乳化状態にあることがわかる。表 1 の Case(c), (d) は水添加率の影響を調べたものである。Case(c) は A 重油: 水 = 7 : 3 の全量に対して、活性剤 A を 1% 混ぜて 10 min 程度かくはんしたもので、粗大水滴がいくつかみられる。Case(e)~(g) は活性剤の影響をみるために、活性剤としてエムゾールの原液を用いたもので、エムゾール A よりも界面活性剤としてより強力である。以後、この活性剤を用いた乳化燃料を B で表示する。

3. 実験結果および考察

3.1 油中水滴径の大きさおよび水添加率の影響

図 3 に 8 : 2, 1% A [Case(a)] と 8 : 2, 0.2% A [Case(b)] の各場合の全燃焼時間 τ_a と着火遅れ時間 τ_i の実験結果を比較して示す。横軸は炉内温度 $t [^\circ\text{C}]$ である。油滴は $4 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ (真球と仮定して、直径 $d_0 = 1.97 \text{ mm}$ 。図 3 中には $4 \mu\text{l}$ と表示) で一定としたが、乳化燃料中の燃料の量と等しくした A 重油単味の $3.2 \mu\text{l}$ の実験も行っている。図 3 をみると、Case(a) の τ_a は A 重油の τ_i に比べて若干長い傾向がある。それに対し、Case(b) では A 重油の τ_a に比べて、1 s 程度も短い。また、Case(b) の τ_i は A 重油よりも若干長い³⁾、Case(a) よりもかなり短い。A 重油の量を等し

くした $3.2\ \mu\text{l}$ の実験結果より、これらの結果が燃料の量に起因するものではないことがわかる。一般に、乳化燃料は水分があるために、その潜熱吸収により単一成分の燃料油滴に比べて、 τ_i が長いのは当然であるが、同じ水添加率である Case(a) と Case(b) で τ_i が異なるのは注目される。着火時の様子を高速写真で見ると、A 重油の場合は油滴の表面から着火するのに対し、乳化燃料では着火までの加熱過程で油滴が膨張、収縮を繰返し、やがて微細滴が飛び出す現象が観察される。着火はこの数個の微細滴で生じ、油滴の表面から着火するのではない。そして、この膨張、収縮および微細滴の飛出しは Case(b) のほうがより著しい。Case(b) の τ_i が Case(a) に比べて短いのは主としてこの飛出しの違いによると思われる。また、Case(b) の τ_a が Case(a) あるいは A 重油のそれらに比べて非常に短くなるのは、後の高速写真に示すように激しいマイクロ爆発が生じるからである。

次に、図 4 は他の条件を一定にして水添加率を変えた結果である。図 4 中には A 重油の量を変えた実験結果も参考に示してある。図 4 をみると、 τ_i は水添加率の変化により大きくは変わらない。一方、 τ_a は 8:2, 1% A, 9:1, 1% A および A 重油単味の量を変えた実験結果がそれぞれ似かよった傾向を示すのに対し、7:3, 1% A [Case(c)] の場合はこれらよりもかなり短く、図 3 の Case(b) に近い結果が得られている。こ

の場合、A 重油の量は $2.8\ \mu\text{l}$ ($4\ \mu\text{l} \times 0.7$) であるが、破線で示す A 重油単味の $2.8\ \mu\text{l}$ の実験結果よりもかなり短いことから、原因は図 2 (b) の場合と同様に粗大水滴 [図 2 (c)] によると思われる。これらの結果をみると、電気炉内での乳化燃料油滴の全燃焼時間 τ_a の挙動は加熱面での乳化燃料油滴の蒸発挙動⁽³⁾ と非常によく似ている。そこで、図 1 の実験装置で着火、燃焼時の油滴を高速写真撮影することにより、マイクロ爆発現象の観察を試みた。図 5 ~ 7 に $t = 700^\circ\text{C}$ における A 重油と Case(a) および Case(b) の条件の高速写真 (2500 fps) を示す。ただし、油滴の量は $3.5\ \mu\text{l}$ で、図 4 中に示されている時間は着火後の経過時間である。

図 5 をみると、A 重油では通常の単一油滴の燃焼であるが、図 6 の Case(a) では着火後、膨張と収縮が著しくなる。そして、ついには小さな破裂に至り (disruption あるいは puffing)、油滴表面より多くの小油滴が飛散する。この状態が着火後 1250 ms くらいまで続くが、水分がなくなった後は、写真にみられるように単一油滴の静かな燃焼に移り、やがて消滅していく。この状況は文献 (3) に示した加熱面上での二段蒸発の現象とよく似ている。文献 (3) で指摘したのと同様に、油滴内部および表面での微細水滴の過熱および蒸発が油滴内部での微細水滴の合体よりも先行するため、このような二段燃焼の現象が生じるのであろう。

図 3 全燃焼時間および着火遅れ時間
(水滴径の影響)

図 4 全燃焼時間および着火遅れ時間
(水添加率の影響)

 図 5 A 重油の高速度写真
(2 500 fps)

図 6 8:2, 1% A [Case(a)] の高速度写真

一方、図 7 の Case(b) の場合をみると、着火後も膨張、収縮、小破裂を繰り返すが、その後 1 040 ms くらいまで一時期静かに燃焼する時期があり、その後一転して激しいマイクロ爆発(図 7 中矢印)に至る。この状況も文献(3)の激しい破裂によく似ている。すなわち、加熱される間に粗大水滴 [図 2 (b)] が合体を引き起こし油滴中で過熱状態となった粗大水滴が熱水と蒸気および油分を伴って一気に噴出し、飛散した小油滴が瞬時に燃えつきていくためであろう。このように、本実験で示された熱電対に支持された乳化燃料油滴の電気炉内での着火、燃焼挙動がマイクロ爆発に関して熱電対の支持のない加熱面上での乳化燃料油滴の蒸発挙動⁽³⁾と非常によく似た現象を示すことは、熱電対による支持が本現象の基本的な原因ではないことを物語っている。

次に、図 8 と図 9 にこれらの高速度写真より求めた着火後の経時時間 τ に対する油滴径 d および d^2 の変化を示す。油滴径 d は油滴をだ円形状とし、その長径 d_1 、短径 d_2 の測定より等価な球として、 $d = (d_1 \times d_2)^{1/3}$ より求めた。また、図 8、9 中 d_{th} は熱電対先端部の直径($d_{th} \approx 0.8 \text{ mm}$)である。図 8、9 中の photo は図 6 および図 7 の高速度写真の時間に対応している。図 8 の Case(a) の場合には、着火後しばらく小破裂を繰り返すが、その間の油滴径 d は増減を繰り返しつつ徐々に減少していき、1 250 ms くらいまでその状態が続く。その後は高速度写真(図 6)に示すように単一油滴の燃焼となるが、そこでは一点鎖線に示すように d^2 はほぼ直線的に減少していく。一方、図 9 の Case

図 7 8:2, 0.2% A [Case(b)] の高速度写真

(b)の場合には着火後小破裂が続いた後、燃焼の末期(1040 ms)に激しいマイクロ爆発に対応した直径 d の急速な減少がみられ、これにより全燃焼時間は非常に短くなる。

以上の燃焼実験結果より、マイクロ爆発による破裂の有無およびその強さについては、加熱面上の乳化燃料油滴の蒸発挙動⁽³⁾と同様に、水添加率が本質的な影響因子ではなく、油中の水滴径とその分布状態のほうが現象を支配する基本的な要因であることがわかる。

3.2 界面活性剤の影響 乳化燃料の安定性を確保するために、通常界面活性剤が用いられる。本節では3.1節までに用いたエムゾール A の原液(活性剤 B で表示)を用いて界面活性剤の強さの影響について調べてみた。先の図2(e), (f)はA重油:水=8:2および7:3の全量に対して、原液の活性剤 B を1%混ぜて自己発振形流体論理素子にて、表1 Case(a), (c)の場合と同様に、10 min 程度かくはんした乳化燃料である。図2(e), (f)より、界面活性剤が強くなると、水滴と油相との境界がぼやけてくるのがわかる。

図10にA重油:水=8:2, 1% A [Case(a)]の場合と8:2, 1% B [Case(e)]の場合の τ_i , τ_a を比較し

て示す。図10より τ_i , τ_a とも活性剤の強さによる違いはあまりなく、Case(e)の場合に低温側で若干 τ_a が長くなる程度である。このように水滴径が微細で均一なCase(a)の乳化燃料では活性剤がそれ以上強くなっても着火、燃焼への影響はほとんどないことがわかる。

図10 全燃焼時間および着火遅れ時間
(界面活性剤の影響1)

図8 油滴径の時間的変化(8:2, 1% A)

図9 油滴径の時間的変化(8:2, 0.2% A)

図11 全燃焼時間および着火遅れ時間
(界面活性剤の影響2)

一方、図 11 に、8:2, 0.2%と 7:3, 1%の場合の両活性剤による τ_i , τ_a を比較して示す。3・1 節で述べたように、8:2, 0.2% A [Case(b)] の場合は粗大水滴のある水滴径分布の広がった乳化状態であったが、これを 8:2, 0.2% B [Case(g)] と比較すると、後者は前者に比べ、全温度範囲にわたって τ_a が 1 s 程度長い。7:3, 1%の場合には活性剤 A [Case(c)] と活性剤 B [Case(f)] の τ_a に及ぼす影響はさらに顕著である。Case(f) の場合は水分が多く、かつ乳化燃料の安定性もよいために、油滴内部での水分の蒸発潜熱吸収が大きく、 τ_i がもっとも長いのが特徴である。

次に、高速度写真より求めた着火後の経過時間 τ に対する油滴径 d および d^2 の変化を図 12~14 に示す。油滴量は 3・1 節と同じく 3.5 μ l である。図 12 の Case(e) では、着火後の油滴は膨張、収縮、小破裂が強められる [領域(I)]。その後、小破裂は弱まるが、水分が残っているためにその蒸発によって油滴の動きが盛んな領域(II)が続く。ここでは油滴径はほぼ一定に保たれる。水分が完全に抜けきった後は単一油滴の静かな燃焼 [領域(III)] に移る。この領域では d^2 はほぼ直線的に減少する。このような二段燃焼の時間的経過は前節で示した Case(a) の場合と定量的によく似ているが、油滴径がほぼ一定の領域(II)が明りように認められるという点が異なっている。

次に、図 13, 14 に Case(f) と Case(c) の場合を比較して示す。図 13 に示す 7:3, 1% B [Case(f)] の活性剤が強い場合には、図 12 の 8:2, 1% B [Case(e)] と同じように燃焼挙動は領域(I)~(III)に分けられる。高速度写真をみると、着火後 300 ms 後(photo)では puffing が確認され、511 ms 後の photo では単一油滴の静かな燃焼が確認されている。他方、7:3, 1% A [Case(c)] の活性剤が弱い場合には(図 14)、小破裂が続いた後、720 ms 後に激しい爆発(Micro. E)が起こることがこの時刻の高速度写真

(photo) で確認されている。図 1(c) に示したように、この場合は粗大水滴の散見される条件であったが、実験結果は 3・1 節の Case(b) の場合(図 9) とよく似かよっていることがわかる。これらの実験結果は、活性剤による乳化燃料の安定化がマイクロ爆発現象に対しては逆に阻害要因にもなりうることを示している。

3・3 ミクロ爆発の発生機構について 以上の実験結果をまとめると、激しいミクロ爆発が起こるか否かは本質的には水滴どうしが合体する速度と合体後の水滴の大きさにあることが明らかである。すなわち、界面活性剤により微細な水滴が均一に分散された Case(a), (e), (f) の乳化燃料では、微細水滴の合体よりも水滴の蒸発のほうが時間的に先行し、小破裂(puffing)を起こしつつ燃焼する。そして、水分が抜けきった後は高沸点の油分のみが残り、単一油滴の燃焼が続く二段燃焼の状況を示す。それに対し、Case(b), (c) では粗大水滴の存在により、水滴の蒸発よりも水滴どうしの合体が先行する。そのために粗大水滴の蒸発がいつそう遅れることになり、飽和温度を超えたところで過熱水と蒸気が一気に噴出し、そのときに激しいミクロ爆発を引き起こす。ここで、界面活性剤は水滴と油分との間の界面張力を減少し、水滴どうしの合体を防げる役割を果たすから、活性剤が過度に強いと水滴どうしの合体を遅らせ、ミクロ爆発の発生を防げることになる。

図 13 油滴径の時間的変化(7:3, 1% B)

図 12 油滴径の時間的変化(8:2, 1% B)

図 14 油滴径の時間的変化(7:3, 1% A)

以上に述べた燃焼挙動は著者らが加熱面上の乳化燃料油滴の蒸発挙動⁽³⁾で説明したのと非常によく似ている。最近、吉本らは乳化燃料の蒸発実験⁽⁴⁾で、マイクロ爆発に及ぼす粘性の影響を調べ、粘性が大きいほど乳化燃料の安定性がよく、マイクロ爆発が起こりにくいことを報告している。この結果もマイクロ爆発に対する上述の機構を裏づけるものであろう。

4. ま と め

電気炉内で熱電対に懸垂された A 重油-水の乳化燃料油滴の着火、燃焼挙動について油中水滴径の相違に特に注目して実験を行った結果、加熱面上での乳化燃料油滴の蒸発挙動⁽³⁾と同様の結果が得られた。すなわち、マイクロ爆発の破裂の有無およびその強さについては、水添加率が本質的な影響因子ではなく、油中水滴径の分布が基本的な支配要因である。また活性剤は

乳化燃料の安定性に寄与する結果として、水滴どうしの合体を遅らせ、マイクロ爆発現象の阻害要因にもなりうることを示した。こうして、激しいマイクロ爆発が起こるか否かは本質的には水滴どうしが合体する速度と合体後の水滴の大きさにあることが明らかとなった。

これらの結果は乳化燃焼法の燃焼促進効果の有無に対する議論に有効な指針となるであろう。

文 献

- (1) Gollahalli, S. R., ほか 2 名, *Combust. Flame*, **55**(1984), 93.
- (2) Kimoto, K., ほか 2 名, *Proc. ASME-JSME Thermal Eng. Conf.*, **4**(1983), 105.
- (3) 木本・尾鷲・大前, 機論, **52**-477, B(1986), 2275.
- (4) 吉本・塚原, 日本船舶機関学会第 51 回(春季)学術講演会論文集, (1993), 39.
- (5) 大前・木本・尾鷲, 燃料及燃焼, **49**-2(1982), 1.