

小形プールバーナにおけるエマルジョンの燃焼

石橋 洋二*・秋葉 貞洋*・玉田 大輔**

Combustion of Emulsions in the Small Pool Burners

Yoji Ishibashi*, Sadahiro Akiba*, Daisuke Tamada**

Abstract

An experimental investigation on the combustion of emulsions in the small pool burners has been carried out. The base fuel used was kerosene. The water content was varied from 0-30% by volume and surfactant 2% by volume was used. The burner wall temperature was maintained from 115°C-120°C in order to make emulsions [burn quasi-steadily and form a laminar] diffusion flame accompanied with evaporating of water in the emulsion. The results show that yellow and sooting point increase and maximum burning point decreases with the increase of the water content. Sooting rate decreases with the increase of the water content.

Keywords : combustion, emulsion, pool burner, soot formation

1. はじめに

近年、地球規模の環境問題の深刻化が指摘される中、熱機関や燃焼装置においては、有害排出物の低減が重要な課題になっている。その対応策の一つとしてエマルジョンの利用がある。エマルジョンは、燃料と水を混合させ、界面活性剤などを用いて燃料または水を微細粒子として分散させて安定化したものである。これを用いたエマルジョン燃焼法は燃焼効率や機関の熱効率をほとんど低下させることなくNO_xや黒煙などを同時に低減できる方法として以前から注目されており、実用化に向けた研究が幅広く行なわれている⁽¹⁾。また、このような効果を生じる理由として、油滴のマイクロ爆発による蒸発、混合の促進や噴霧推力の増加に伴う空気誘引量の増大などといった物理的作用と水蒸気と燃料蒸気間の水性ガス反応や水添加による火炎温度の低下などといった化学的作用が考えられている^{(2), (3)}。このため基礎的研究としては、エマルジョンの蒸発・燃焼に関して、実用燃焼器における現象解明や実用化のための噴霧燃焼を取り扱った研究^{(2) (3) (4)}や噴霧の構成要素である液滴を対象とした蒸発、燃焼に関する実験的、理論的研究が幅広く行われている^{(5) (6) (7)}。

しかしながら、エマルジョンの燃焼過程は影響因子が多く、かつ高速非定常現象であるため、マイクロ爆発現象や水蒸気の燃焼反応への影響などについては、十分に解明されているとは言い難いのが現状で

ある。特にエマルジョン燃焼におけるNO_xとすすの抑制は、燃料中の微細水粒子の物理的作用と化学的作用との複合作用として現れるが、それぞれの作用を分離して評価することは、エマルジョンがマイクロ爆発を伴う強い非定常性燃焼のために難しい課題である。

本研究は、エマルジョン燃焼について、水蒸気の化学的作用に注目する立場から、エマルジョンを自由液面を持つ小形プールバーナにより、水の連続的蒸発を伴う準定常燃焼をさせることを試み、エマルジョン燃焼の含水率による燃焼特性やすす発生率への影響を調べ、エマルジョン燃焼に関する知見を広げることとする。

2. 実験装置および方法

2.1 エマルジョン燃料の製作

エマルジョンは灯油-水-界面活性剤系とした。灯油はA重油などに比べてエマルジョン化した時の安定性が高く、時間による性状変化が小さく、エマルジョンの準定常燃焼の実現に適している。

エマルジョンの製作は所定量の水と界面活性剤の混合液を作り、これを灯油に超音波ホモジナイザー（日本精機製US-150OT、出力150W）で攪拌しながら少量づつ追加混合させた。1回あたりの製作量は100mlとし、攪拌時間は約15分とした。界面活性剤

* 商船学科

** 専攻科海上輸送システム工学専攻

は日本油脂株のOP-80R (HLB値4.3) とOT-221 (HLB値15.0) を3対1で混合したものを用いた。エマルジョンの含水率は体積割合で0-30%とし、界面活性剤の添加は体積割合で2%とした。エマルジョンは乳白色を呈し、界面活性剤が無添加の場合や界面活性剤の添加割合が少ない場合は、約1昼夜静置で液上層に灯油が一部分分離するが、2%添加では灯油の分離は起こらない。

エマルジョンの形態は油中水滴形(W/O)であり、含水率30%の顕微鏡写真を図1に示す。水粒子径は大きいもので数 μm である。含水率が小さいほど水粒子径は小さくなる。表1にエマルジョンと灯油の比重と動粘度を、比重は浮きばかり法で、動粘度はキャノンフェンスケ動粘度計で測定した結果を示す。含水率を大きくしていくと比重、動粘度ともに灯油よりも大きくなるが、動粘度の増大割合が大きく、30%含水率の動粘度は灯油の4.3倍となる。

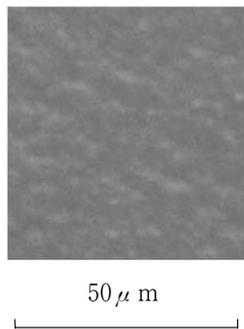


図1 エマルジョンの顕微鏡写真 (含水率30%)

表1 エマルジョンと灯油の物性 (15℃)

含水率	比重	動粘度 (cSt)
0% (灯油)	0.793	1.8
10%	0.809	2.4
20%	0.831	3.6
30%	0.848	7.7

2. 2 小形プールバーナ

図2に燃焼実験装置を示す。燃焼実験装置は水冷却式の小形プールバーナ、燃料供給系、すすサンプリング系からなる。小形プールバーナはSUS製の内径 $\phi 9.5$, $\phi 13$, $\phi 16$ の円管バーナを用いた。円管バーナは容器内プール燃焼の研究として用いられており、燃料油の液面降下速度や容器寸法による燃焼形態の変化などが調べられている⁽⁸⁾。本研究では、燃料供給速度を可変とし、燃料蒸発速度と燃料供給速度がバランスする各々の液面レベル一定で燃焼させる。バーナの上端部の管壁に銅管 ($\phi 2$) を巻きつ

け、これに流量が微量調節可能なチューブポンプにより冷却水を流してバーナ壁温を調節し、エマルジョンの蒸発と燃焼状態を調整できるようにした。バーナ壁温は端面から2mmの位置に取り付けた熱電対 (銅・コンスタンタン, 素線径 $\phi 0.32$) により、また、バーナ内の液温度測定は同種の熱電対を4本束ねたものを用いた。熱電対は零接点 (図示せず) を介してデジタル温度計で測定した。燃焼は大気開放の拡散燃焼とし、バーナ部をついで囲み、気流の影響を極力なくした。

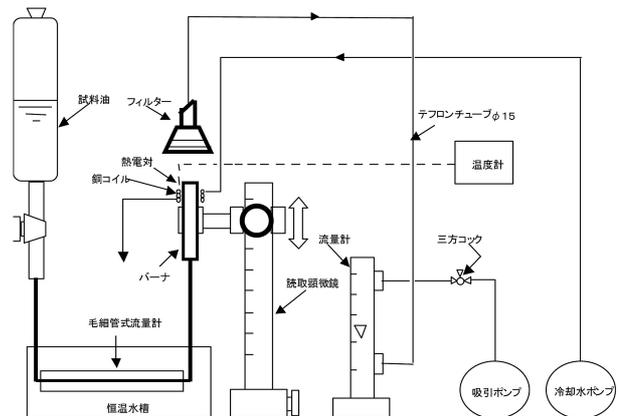


図2 燃焼実験装置

燃料の供給は、バーナ内の液面レベルを一定とする燃焼を実現するために、微小流量が定常的に供給できる落差式とした。燃料流量の調節はガラス製毛細管流量計 (公称 $\phi 0.5$) を用いた。燃料ヘッドの調整は、バーナを読み取り顕微鏡の駆動台に取付けることによって行った。燃料の温度変化による粘性の変化を抑えるために、流量計は恒温水槽に入れた。流量校正は燃料ヘッドをパラメータに燃料の重量流量を電子天秤 (最小読取値 $1/10000\text{g}$) で測定して行い、毎回実験ごとに行った。

2. 3 すずの採取

すす採取フィルターは、 $\phi 70$ の三角ロートに目皿 ($\phi 30$) を置き、その上にガラスウールを2.5~2.6g充填し、SUS製の金網 (30メッシュ) で押さえアルミテープで固定した。フィルター写真を図3に示す。

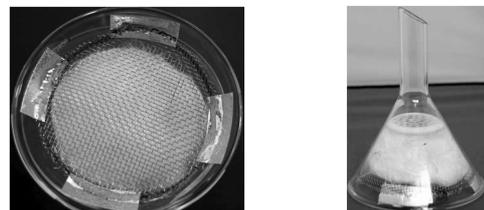


図3 すず採取プローブ

フィルターは160℃に加熱した乾燥器に1時間以上入れ、水分を飛ばした。乾燥後は、デシケータに入れて冷却、保持した。すすの採取は、所定の条件にて安定燃焼に達した後、フィルターを火炎先端から30mmから50mmの位置に取り付け、吸い込み空気量20ℓ/minで燃焼ガスを吸引した。採取時間は5～15分間行った。すすを採取した後、160℃に加熱した乾燥器で1時間以上保持し、水分を飛ばした。これをデシケータ内で冷却した後、電子天秤で重量測定を行い、採取前後のフィルター重量差をすすの重量とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 エマルジョンの燃焼

エマルジョンの燃焼状態を調べる予備検討として、無冷却のガラス管バーナを用い火炎観察を行った。燃料供給速度が小さく液面がバーナ端面から離れて低位で燃焼する時は、エマルジョンは相変化を起こさず、灯油燃焼と同様の定常火炎となる。燃料供給速度を大きくしていくと液面は上昇していき、バーナ壁温度は上昇し、蒸発速度は大きくなり火炎は延びる。エマルジョンは上層部の透明液と下層部の乳白色部に分離し、透明液部と乳白色部の境界を含む上層液部では熱対流による不規則な流動が見られる。燃焼量を増やしていくと乳白色層のバーナ壁面から水の蒸発による気泡が断続的に発生し始め、この気泡は燃焼量の増加とともに連続的かつ激しくなり、これによって液面は微小な波うち状態となる。火炎は気泡の発生が緩やかであれば、ほぼ定常な層流拡散火炎を形成する。この条件に相当するエマルジョン火炎の写真を図4に示す。図5はバーナ内のエマルジョンの様子を模式的に示すものである。さらに燃料供給速度を増加していくと、液面はバーナ端面に近づき、気泡の発生が激しくなり液面の乱れが増し、それに伴って火炎は揺らぎ始める。

また、断続的（数十秒から数分間隔）に突沸が発生する。突沸が起こると一気に液が飛散し、油滴が

燃焼しながら火炎面を通過してブラシ状の火炎となる。激しい突沸の場合は液の飛散により液面が下がり、突沸後火炎が消えることがある。先に述べた上層部の透明液をピペットで採取し、密度を測定すると0.76 g/cm³であり、灯油よりも若干密度が小さい液であることを確認した。

次に水冷式SUS管バーナにより、バーナ壁温度を変化させて燃焼状態を調べた。バーナ壁温が概略100℃を超えると、バーナ壁面に沿って水の蒸発による気泡が発生し始める。気泡の発生は温度上昇とともに活発になり、これに伴い液面の揺らぎも大きくなる。壁温が125℃程度になると、突沸が数十秒から数分に1回程度の割合で起こり、火炎はブラシ状となり火炎先端がゆらぎ、間欠的にすすの発生が増大する。突沸の頻度と強さは壁温度の上昇とともに高くなる。バーナ壁温が115℃～120℃の範囲では、エマルジョンは水の連続的蒸発を伴う準定常燃焼（液面の変動と間欠的な火炎面の微小変動を伴う）をする。以降の燃焼実験はこのバーナ壁温度の条件で行った。

火炎の燃料供給速度 g_f （水、界面活性剤を含む）による特徴的な変化は、輝炎点（カーボン発生により火炎先端に輝炎が現れる燃料供給速度）、すす発生点（火炎先端からすすが流出し始める燃料供給速度）、および最大燃焼点（バーナ端面から燃料がオーバーフローし始める燃料供給速度）である。図6にこれらの燃焼条件に対応するエマルジョンの火炎写真を

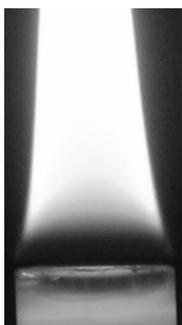


図4 エマルジョン火炎

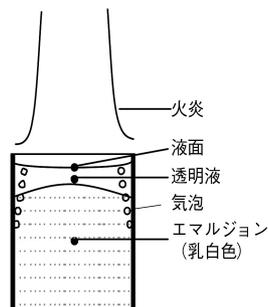


図5 エマルジョンの様子

(a) $g_f=0.5\text{mg/s}$



(c) $g_f=3.2\text{mg/s}$

(b) $g_f=1.6\text{mg/s}$



(d) $g_f=3.2\text{mg/s}$



図6 エマルジョンの燃焼状態（φ16-20%）

示す。いずれもバーナ径φ16, 含水率20%である。図6 (a) は輝炎点近傍の条件, (b) はすす発生点, (c) はバーナ端面から液がバーナ壁面にたれ, 火炎がバーナをはみ出して燃焼する最大燃焼点の条件である。また (d) は突沸が起こった時の火炎である。

エマルジョン火炎の発光輝度は灯油のそれより弱く, 含水率の増加とともに一層弱くなり, 白色の度合いを増す。

3. 2 バーナ内の液温度

バーナ内の液温度の測定結果を図7に示す。含水率は20%, バーナ径φ13であり, バーナ壁温はいずれも120℃に保った。液温度はバーナ下方に向かって低下し, 上層部分の温度変化が下層部より急であり, バーナ端面から2.5mmから4.5mmの中間部のところで温度変化は緩やかとなる。液温度は燃料供給速度を大きくしていくと, $g_f = 2.4\text{mg/s}$ から $g_f = 2.8\text{mg/s}$ の如く高くなるが, $g_f = 3.0\text{mg/s}$ で逆に温度が低下している。これは, $g_f = 3.0\text{mg/s}$ では, 液面が上昇して液がバーナリム全面を覆うようになり, 火炎からの熱移動が減少するためである。灯油と比較すると, エマルジョンは液面近くの温度が高く, 逆に下層の温度が低くなっており, 全体的に灯油より温度勾配が急である。このことはエマルジョンは水の蒸発による気泡発生により, バーナ上層部の熱対流が灯油より促進されることを示していると思われる。

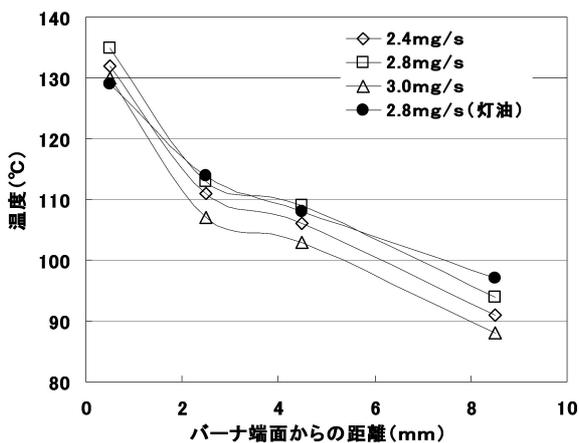


図7 液温度 (φ13-20%)

3. 3 含水率の燃焼特性への影響

含水率による輝炎点, すす発生点および最大燃焼点の変化を図8に示す。含水率の増大とともに輝炎点, すす発生点とも増加し, 含水率0% (灯油) と含水率30%エマルジョンで比較すると, 輝炎点は $g_f = 0.13\text{mg/s}$ から $g_f = 0.50\text{mg/s}$ に, すす発生点は $g_f = 0.94\text{mg/s}$ から $g_f = 1.61\text{mg/s}$ に増加する。燃料供給速度を灯油量に直すと, 輝炎点は 0.31mg/s , すす発生

点は 1.01mg/s となり, いずれの条件も灯油単独燃焼の場合より高燃焼量となっており, 火炎中でのすす生成が抑制される結果となる。これは水蒸気による燃料濃度の希釈, 火炎温度の低下および水生ガス反応などによるものと考えられる。なお, すす発生点は火炎先端近傍の反応帯で火炎中で生成したカーボンが燃え切らないで流出する条件であるが, 水蒸気がすす酸化反応にどのように影響しているかは不明である。

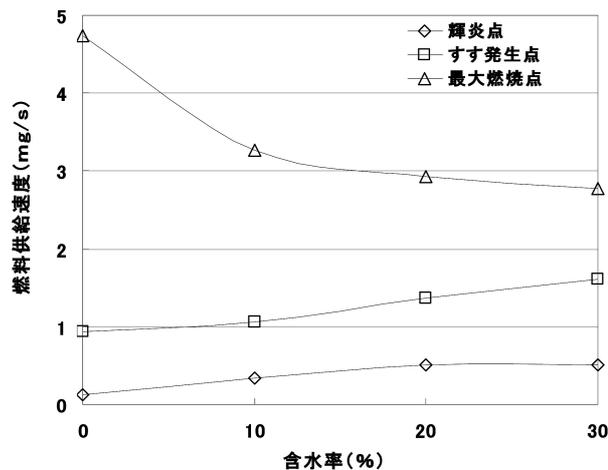


図8 含水率による燃焼特性の変化 (φ13)

一方, 最大燃焼点は含水率の増加とともに小さくなる。これについて, まず, 最大燃焼点の条件について考察する。最大燃焼点直前の燃焼は液面レベルがバーナ端面に達した状態で燃料供給速度 g_f と蒸発速度が釣り合いを保ちながら燃焼しているが, この時燃料供給速度 g_f わずかに増加させると液の蒸発がおいつけず, 液はバーナからはみ出すようになる。これが最大燃焼点である。最大燃焼点の燃料供給速度を g_{fm} とし, 火炎からの熱移動を伝導伝熱のみ⁽⁸⁾とすると, g_{fm} は熱バランスの式より

$$g_{fm} = \frac{h \pi d (T_f - T_\ell)}{L} \dots \dots (1)$$

となる。すなわち, g_{fm} はガスの熱伝導率に関する定数 h , 火炎温度 T_f と液温度 T_ℓ との温度差 $(T_f - T_\ell)$ およびバーナ直径 d に比例し, 蒸発熱 L に逆比例する。

次に, 最大燃焼点が含水率で小さくなることについて検討する。(1)式の各項について水分を含有することによる変化を検討する。まず, h であるが, 水蒸気の熱伝導率は 0.027W/mK (400K)であり, 一方, 低級炭化水素のプロパンの熱伝導率は 0.018W/mK (300K), n -ブタン 0.022W/mK (360K)であり, 水蒸気と同程度である。従ってエマルジョン蒸気の熱伝導率は灯油のそれと同程度の値であると推定され, 項 h の

影響は小さいと考えられる。

次にエマルジョンの蒸発熱Lについて検討する。蒸発は成分に比例して蒸発するとし、それぞれの蒸発熱の質量分率の和で見積もる。xを水の質量分率とすると、エマルジョンの蒸発熱Lは次式となる。

$$L = L_{(K)} \times (1-x) + L_{(w)} \cdot x \cdot \dots \cdot (2)$$

含水率30%エマルジョン（界面活性剤を無視し、水の質量分率0.35、灯油の質量分率0.65）について、蒸発熱を見積もると、962kJ/kgとなる。これは灯油の蒸発熱の3.6倍であり、最大燃焼点を大幅に減少させる要因となる。

次に火炎温度 T_f （理論混合比）を文献⁽⁹⁾に基づいて見積る。エマルジョン燃料1kg当たりの燃焼ガスの質量を G_w 、燃焼前の温度 T_0 （298k）とし、温度 T_0 と T_f 間の燃焼ガスの平均定圧比熱を C_{pm} 、エマルジョン燃料の低位発熱量を H_ℓ とする。また、エマルジョン燃料の燃焼の場合はエマルジョン燃料単位量当たりを蒸発するための熱が火炎から放出される。その損失熱量L（蒸発熱）を考慮すると、火炎温度 T_f は次式より求められる。

$$T_f = \frac{(H_\ell - L)}{G_w C_{pm}} + T_0 \cdot \dots \cdot (3)$$

なおエマルジョン燃料の低位発熱量 H_ℓ は灯油の低位発熱量 $H_{(k)}$ に対して水の質量分率分、減少するとし

$$H_\ell = H_{(k)} \times (1-x) \cdot \dots \cdot (4)$$

とする。灯油の組成を炭素0.86、水素0.14とし、低位発熱量を43.3MJ/kgとすると、灯油火炎温度の2395Kに対して含水率30%エマルジョンの火炎温度は2230Kであり、灯油に対し165K低い。これに対応して火炎からの熱移動速度は減少する。以上2項による最大燃焼点の減少を、 T_ℓ 400Kとして求めると、エマルジョンの最大燃焼点は灯油の0.25倍となる。実験結果は0.6倍であり、見積もりによる低減が大きく出る。一方、エマルジョンの蒸発が促進される要因の一つにエマルジョンではバーナ壁近傍から水の蒸発による気泡の発生が起り、熱対流を促進するので、バーナ壁から燃料への熱伝達の増大があげられる。さらに、灯油の熱伝導率（液）は0.11W/mK（360K）であるのに対して水の熱伝導率は0.67W/mK（360K）と大きいので、エマルジョンの熱伝導率の増大があげられる。バーナ内の液温度は両者にそれ程大きな差異が認められないが（図7）、液の熱伝導率の増大は、バーナ壁および液表面から液内部への熱移動を促進する。これらのエマルジョンの熱移動促進作用は最大燃焼点を大きくする方向に作用するので、傾向的には実験結果に近づくことになる。

3. 4 バーナ径による燃焼特性への影響

バーナ径によるプール燃焼火炎の燃焼特性の変化を調べた。その結果を図9に示す。輝炎点やすす発生点はバーナ径が増加してもあまり変化が見られない。一方、最大燃焼点はバーナ径にほぼ比例して増加する。これは最大燃焼点が式（1）に示すようにバーナ径に比例することに対応している。また、エマルジョン燃料の最大燃焼点のバーナ径による変化は、灯油に比べ、緩やかとなる結果となった。

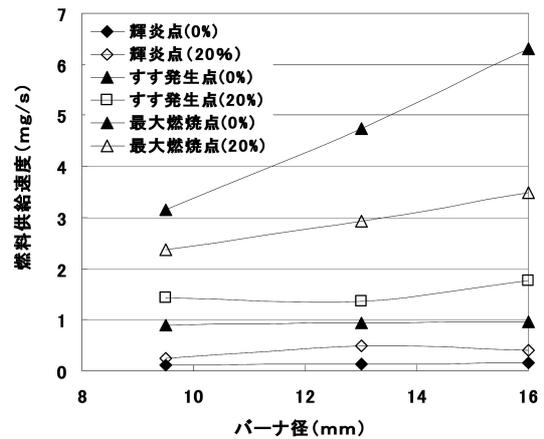


図9 バーナ径による燃焼特性の変化

3. 5 すず発生率

エマルジョンおよび灯油のすす発生量を測定し、すす発生率（単位時間当たりのすす重量／燃料供給速度）で整理して図10に示す。すす発生点以下の燃料供給速度においては、いずれの条件もすす採取フィルターにすす付着の痕跡はなく、すす計量値も零であった。すす発生点を越えて燃料流量を増大させるとすす発生率は急速に増加する。すす発生率と燃料供給速度の関係はデータにバラツキが見られるものの、ほぼS字形となる。

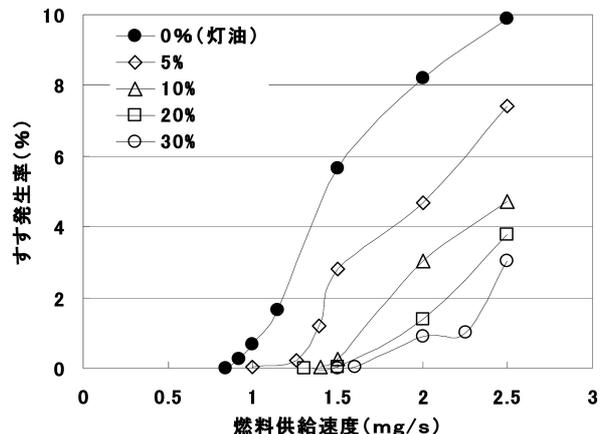


図10 すず発生率

エマルジョンのすす発生率は灯油より小さく、含水率の増加とともにすす発生率は減少する。すす発生率を燃料供給速度2.5mg/sで見ると、灯油が9.9%、含水率5%が7.4%、含水10%が4.7%、含水率20%が3.8%、含水率30%が3.1%となる。すす発生率のエマルジョン化による低減効果を、エマルジョン中の灯油燃焼量に対して評価すると、燃料供給速度2.5mg/sにおいて、含水率5%が灯油の82%、含水率10%が56%、含水率20%が52%、含水率30%が49%となる。このすす抑制効果はエマルジョンの水分による化学的作用によるものと考えられる。

4. まとめ

灯油-水-界面活性剤系のエマルジョンを製作し、自由液面を持つ小形円管プールバーナにより、エマルジョンを準定常燃焼せることを試み、エマルジョン火炎の観察や含水率による燃焼特性の変化およびすす発生率におよぼす影響などを調べた。結果をまとめて以下に示す。

- (1) エマルジョンはバーナ上層部において分解が起こり、上部液面は透明液、下層部は乳白色のエマルジョンの2層となる。透明液は灯油よりもわずかに密度が小さい液である。
- (2) バーナ壁温が100℃くらいよりバーナ壁に沿って水の蒸発による気泡が断続的に発生し始め、これは壁温の上昇とともに連続的かつ激しくなる。バーナ壁温が125℃程度を超えて高温になると間欠的に突沸が起こり、激しい突沸が起こると火炎はブラシ状となり、大きく乱れる。バーナ壁温度を115℃~120℃に調節することで、エマルジョンは水の連続的な蒸発を伴う準定常燃焼をする。
- (3) エマルジョン火炎の発光輝度は灯油より低く、含水率の増加とともに一層低くなる。
- (4) 輝炎点およびすす発生点は、含水率を多くすることで増加する。また、最大燃焼点は含水率とともに減少する。
- (5) 輝炎点やすす発生点はバーナ径の影響をあまり受けない。最大燃焼点はバーナ径に対して、比例的に増加する。
- (6) エマルジョン燃焼により、すす発生率は低減する。すす発生率の灯油に対する低減は、すす発生点を含む灯油燃焼率が小さい範囲(~1.2mg/s)で大きく、灯油燃焼率が大きくなると低減割合が減少する傾向を示す。

エマルジョン燃焼においてすすの発生が抑制されるのは、水蒸気による燃料希釈や火炎温度低下および水性ガス反応などの水蒸気の化学反応的作用によるものと推測される。

参考文献

- (1) F.L.Dryer, Sixteenth Symposium (international) on Combustion, (1977), P.279-295
- (2) 水谷, 多木, 日本機械学会論文集 (B編), 47巻424号, (昭56), P.2379-2385
- (3) 廣安, 新井, 西田, 日本機械学会論文集 (B編), 48巻430号, (昭57), P.1182-1189
- (4) S.R.Gollahalli et al, Eighteenth Symposium (international) on Combustion, (1981), P.349-359
- (5) 山崎 他3名, 日本機械学会論文集 (B編), 64巻618号, (1998), P.236-241
- (6) 張 他3名, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第39巻第11号, (2004), P.53-60
- (7) 田中 他4名, 日本機械学会論文集 (B編), 70巻694号, (2004), P.191-196
- (8) 平野, 燃焼学, 海文堂, (昭61)
- (9) 水谷, 燃焼工学, 森北出版, (2002)