

## ■ 特 集 ■ 新燃焼技術

# エマルジョン燃焼

## Burning of Oil-Water Emulsions

熊倉 孝尚\*

Takanao Kumakura

### 1 ま え が き

燃料油に水を混入したエマルジョン燃料はNO<sub>x</sub>の低減および燃焼改善の両面にわたり有効性が認められ、その燃焼技術が各方面で利用されつつある。エマルジョンの燃焼は特に目新しいものではなく、歴史的にはかなり古くから試みられてきた。そして1960年代に入ってから欧米を中心に研究が活発化し、火災防止対策としてジェット燃料のエマルジョン化あるいは重質燃料の燃焼性を改善しようとする試みがなされるなど<sup>1)2)</sup>、エマルジョン燃料の利用技術が検討されてきた。

わが国でも同様な研究が行なわれたが<sup>3)4)</sup>、昭和48年に環境庁から二酸化窒素の環境基準が告示されて以来、NO<sub>x</sub>低減策の一つとしてエマルジョン燃料の使用がボイラや工業用炉を中心に研究されてきた。そして同時にばいじんまたは煙の低減効果が実岳でも認められ、低O<sub>2</sub>燃焼が可能となることから最近ではエマルジョンの燃焼技術が省エネルギーに結びついたものへと進み、これはボイラや工業用炉ばかりでなく内燃機関にも普及しはじめている。

このような情勢に鑑み、本稿では燃料用として用いられているエマルジョンの燃料としての特性や製造法、燃焼および適用例などについて概説する。

### 2 エマルジョン燃料

#### 2.1 性質と安定性

油と水のエマルジョンは油中水滴形 (water-in-oil; W/O形) と水中油滴形 (oil-in-water; O/W形) の2つに大別される。W/O形は油の連続相の中に水が分散したもので、O/W形にくらべ粘度上昇が少なく、さらに乳化剤の使用が少なく済み、またエマルジョンの製造技術が進歩したことなどから、燃料用として採用

されてきている。そこでO/W形の詳細は他に譲り<sup>5)</sup>、本稿はW/O形エマルジョンを取り上げることにする。

エマルジョン中の水の粒子は表面張力の作用により球形となり、その最小粒径はエマルジョンミキサーなどで十分分散させると1~5 μm程度になる。エマルジョンの色は油の種類、水の割合によって異なるが、一般に灯軽油の場合は乳白色、重油の場合はチョコレート色である。また燃料単体にくらべ、みかけの比重、粘度が増加し、発熱量が低下するなどの性状を有する。

粘度の増加はエマルジョンを取り扱う上で考慮しておくべきことである。エマルジョンは分散相の水粒子による摩擦抵抗のため粘度が上昇する。通常の使用範囲では水の割合の増加とともに粘度は高くなる。図-1はその一例である。水の割合が30 vol.%で粘度は約2.3倍になる。従って燃料ポンプ吐出圧に余裕を見込む必要がある。また粘度の増加は噴霧の粒径を粗大化する。そのため燃料単体の噴射時と同じ噴霧粒径を維持しよ

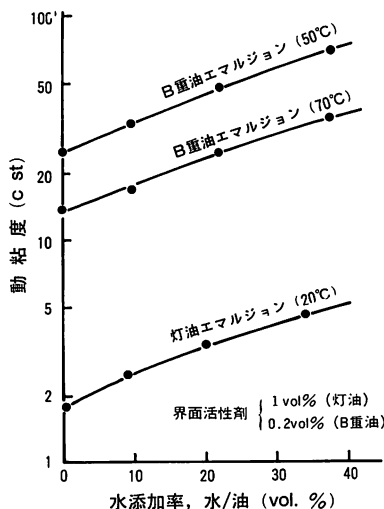


図-1 水添加による粘度の増加

\* 船舶技術研究所機関開発部主任研究官  
〒181 三鷹市新川6-38-1

うとすれば、エマルジョン燃料を更に予熱しなければならぬ。特にC重油のような高粘度油のエマルジョンでは、水の沸点以上の予熱温度にすることもあり、この場合燃料供給ラインの途中で水分が蒸発し流れを閉塞するベーパーロックが発生することがある。低圧のエマルジョンの温度管理に十分な注意が必要である。

エマルジョンの取り扱いで問題となるもう一つにエマルジョンの安定性がある。エマルジョンはもともと溶け合わない油と水を混合したもので、時間とともに互に分離する。即ち油の粘度が小さいほど、油と水の比重差が大きいほど、また両液間の表面張力差が大きいほど安定性に欠ける<sup>6)</sup>。したがって灯軽油は重油より安定性が悪い。安定性を増すため表面張力を下げる目的で界面活性剤(乳化剤として)を用いる。灯軽油に活性剤を添加したエマルジョンで1~2週間は水の分離なく安定に保てるという報告がある<sup>7)8)</sup>。重油ではそれに含まれているアスファルテンが界面活性剤の役目をするので、活性剤を使用しない場合が多い。

## 2.2 界面活性剤の影響

界面活性剤は非イオン系のソルビタンと各種脂肪酸との化合物で、W/O形エマルジョンにはHLB (Hydrophile Lipophile Balance : 親水性と親油性のバランス)=6の活性剤が適している。よく使用されているものに、エマルフィンLおよびH (第一工業製薬)、イオネットS (三洋化成工業)、LN-100 (東洋ゴム)、OP-80RとO-2の混合(日本油脂)などがある。

活性剤の添加量は使用する燃料、活性剤の種類により異なるが、一般に燃料容積の1%以下で使われる場合が多い。コスト面からも少ない方がよい。

界面活性剤が分散相の水粒子径に及ぼす影響について、Jahaniら<sup>7)</sup>はJetA燃料(灯油相当)についてしらべ、粒子径が1 $\mu$ m程度になればその粒径は界面活性剤の濃度、混合時間にあまり影響を受けない。粒径の大きな水粒子がある場合には、粒径は活性剤の濃度および混合時間の増加にしたがい小さくなることを明らかにしている。

一方、界面活性剤が燃焼に及ぼす影響についてJahaniらによれば、JetA燃料の場合エマルジョン中の活性剤の濃度が1 vol. %程度までは火炎からのふく射量が減少し、その濃度を越えると増加する。Moses<sup>9) 12)</sup>は活性剤の濃度が1 vol. %程度までは水添加割合にもよるが火炎からのふく射量および粒状排出物の減少割合

が大きいことを示している。

## 2.3 エマルジョン燃料の製造

油中に水を分散させる方法として(1)超音波分散法と(2)流体機械的分散法とがある。(2)の方法によれば装置が簡単でかつ微細粒径の水粒子が均一に分散したエマルジョンを作ることができるので、現在これが主流である。代表的なものとしてタービン等の回転子を用いたホモミキサー、油中に水を噴射し乱流混合させる圧力噴射式ミキサー、パイプライン内に固定羽根を設けたスタテックミキサーがある。これらは既に実用的な装置として市販されている<sup>10)</sup>。

これらミキサーは燃料供給ラインの途中に組み込まれるが、燃焼装置にエマルジョンを供給する際2つの方式に分類できる。その一つはミキサーをライン中に設けて製造したエマルジョンを直接燃焼装置に供給するものである。この方式はエマルジョン供給ラインが短かければ軽質油でも界面活性剤を用いなくてすむ可能性があること、水添加割合の変更が容易であること、装置が小形化できる特徴がある。もう一つの方法はエマルジョン燃料用の中間タンクを設けるもので、1台の装置で複数個の燃焼装置にエマルジョン燃料を供給することができる。しかし水添加割合の変更が簡単でないため、水添加割合の一定したエマルジョンを使う場合に適する。またエマルジョンを一担貯蔵するため水が分離するおそれがあり、この傾向は灯軽油のような軽質油において大きいので界面活性剤の使用が必要である。またタンク内にエマルジョンを長期間放置すると活性剤も分離しタンク壁面などにガム状に付着することがある。

## 3 エマルジョンの燃焼機構

一般に液体燃料をボイラ、工業用炉、ガスタービン、ディーゼル機関などで燃焼させる場合、バーナまたは噴射弁を用いて燃料を微細化し噴霧燃焼させる。噴霧粒径はバーナまたは噴射弁の形式や寸法、作動条件および燃料の種類によって異なるが、平均粒径は一般に30~100 $\mu$ mである。特に重油では噴霧粒径は粗大になり燃焼室内で完全燃焼させることが困難な場合が多い。

油滴の燃焼については周知のように、油滴が高温雰囲気内で加熱されると軽質油の場合は蒸発と燃焼の過程を通して燃えつき、重質油ではスプラッシュを伴いながら燃焼し、最後にセノスファとよばれる炭素粒を残す。

エマルジョン燃料を使用した場合、エマルジョン油

滴は数ミクロンの水の粒子を多数含んでおり、この油滴が高温雰囲気中で加熱されると表面から蒸発して燃焼を始めるとともに、内部の水が加熱され熱水または過熱蒸気の状態に急激にふき出し、水粒子をとりまく油をふきとばして油滴を微粒化する。これは油単体の燃焼では見られない現象でマイクロ爆発(micro explosion)といわれるものである。写1に典型例を示す。油滴が再微粒化すると空気との接触面積が増加し、かつ空気との混合がよくなるため、燃焼が促進する。

マイクロ爆発現象についてIvanovら<sup>11)</sup>が重油エマルジョンの単一懸垂油滴の燃焼実験で指摘して以来、各方面で研究が行われ、殊にマイクロ爆発現象の発生要因について油滴内の水の割合、水粒子の大きさ、水の核沸とう温度、油滴の着火モード、油の種類などいろいろな角度から検討が加えられている<sup>5)12)~15)</sup>。

ところが、マイクロ爆発現象は大粒径の単一油滴の燃焼で確認されているものの、実際の噴霧火炎中でもこの現象が起きているか定かでない。この点に着目して噴霧火炎内の油滴速度を測定し、速度成分分布からマイクロ爆発の存在を示唆した研究がある<sup>16)</sup>。また単一油滴の実験は大気圧下で行われる場合が多いが、最近では高圧雰囲気中でも実験が行われ、この場合には大気圧下でみられるような激しいマイクロ爆発現象は観察されないとの報告がある<sup>17)</sup>。

一方、火炎中に水が存在することから水の蒸発潜熱が奪われて火炎温度が低下しNO<sub>x</sub>の発生を抑える。また火炎中の遊離炭素と水蒸気との水成ガス反応(C+

H<sub>2</sub>O→CO+H<sub>2</sub>) および水蒸気の触媒作用によるCOの燃焼促進などの効果があることも提言されている。

エマルジョンの燃焼特性については、エマルジョン液滴の燃焼および噴霧燃焼の実験から①油滴の着火遅れが大きい②着火後の燃え切り時間は短縮する③火炎中のピーク濃度が低下する④火炎中のすす濃度が減少しふく射量が減る⑤火炎の長さが短縮する、などが得られている<sup>17)~19)</sup>。なお廣安ら<sup>20)</sup>は着火着水にS型(短い)とL型(長い)の2通りあることを示している。

ところでエマルジョン燃焼を評価する場合、水分割合が最も重要であるが、その表示法および呼称が一定していないように見受けられる。前者については大別して水/(油+水)(vol. %またはwt. %)と水/油(vol. %またはwt. %)があり、後者についてはエマルジョン率、注水率、水添加率、含水率、水分含有率などである。しかしボイラなどでは水/(油+水)、内燃機関では水/油で表わされている場合が多い。そこで本文ではこの表示法を用い、呼称は水添加率と仮称する。

## 4 エマルジョン燃焼の適用

### 4.1 ボイラおよび工業用炉

エマルジョン燃料を最も早く実用化している分野である。わが国では当初NO<sub>x</sub>低減が目的であった。図-2はNO<sub>x</sub>生成濃度と水添加率との関係を種々の燃料について求めた例である<sup>21)</sup>。水添加率30 vol. %におけるNO<sub>x</sub>の低減率をみると軽質油では40~50%であるの



写-1 エマルジョン懸垂液滴の燃焼<sup>12)</sup> (バンカーC)

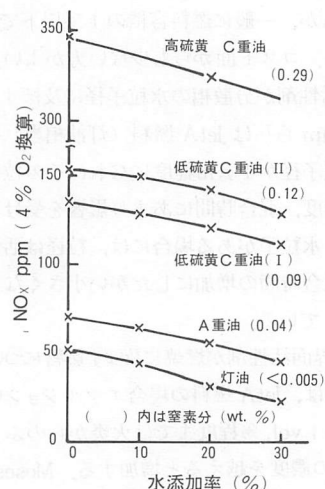


図-2 水添加率とNO<sub>x</sub>の関係<sup>21)</sup>

に対し、窒素含有量の多い重油では15~20%にすぎない。即ちエマルジョン燃焼は Thermal NO<sub>x</sub> の低減に効果があるが、Fuel NO<sub>x</sub> の低減に効果のないことを示している。

エマルジョン燃焼では水の蒸発潜熱による熱的損失があり、ボイラ効率を落さずにごとまで NO<sub>x</sub> が低減できるかというのも重要である。水添加率 15 vol. %程度まではボイラ効率はそれほど落ちないとの報告もあるが、公表されているデータは少ない。

一方、排ガス再循環法や二段燃焼法などの NO<sub>x</sub> 低減法はばいじんや煙が発生しやすく、通常の燃焼よりも空気過剰で燃焼させており、ボイラ効率が低下している。また省エネルギーの見地から低 O<sub>2</sub> 燃焼が行われるが、中小ボイラや工業用炉ではばいじんまたは煙の発生があるため低 O<sub>2</sub> 燃焼が困難である。これを打開する方法としてエマルジョン燃焼が取り入れられている。しかし、発電用ボイラなどの既に低 O<sub>2</sub> 燃焼が実施されているものには向いていない。

ところで、ばいじんまたは煙が減少する程度は燃焼装置などによって異なるが、最適水添加率として10~20 vol. %が見込れている。ばいじんの総量は水添加によって低減するものの、ばいじんの粒子分布をみると 1 μm 以下の粒子量は増加するという結果も得られている。図-3はその例である<sup>22)</sup>。

船用ボイラについては船用燃料油の低質化の傾向が強まるに伴ない、ボイラの高温伝熱面の外部汚れ(スケール付着)が問題になっている。そこで外部汚れの低減を目的としたエマルジョン燃焼が試みられ、実船試験から低 O<sub>2</sub> 燃焼を維持して燃焼改善を図れば硫酸塩の生成が抑制され、かつ油滴の再微粒化でスケール粒子が微小になること、炉内の温度が均一化してスケールの付着がおこりにくくなることなどにより、外部汚れが低減できたとの成果が得られている<sup>23)</sup>。

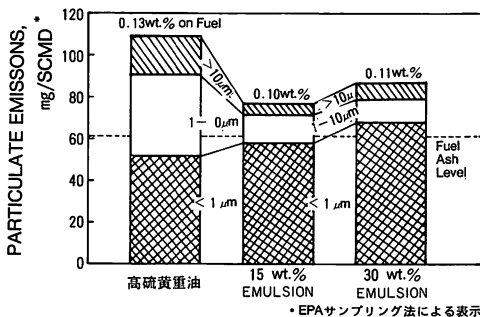


図-3 ばいじん粒子分布に及ぼす水添加率の影響<sup>22)</sup> (500kw パッケージボイラ)

#### 4.2 ガスタービン

米国ではスモーク低減と燃焼効率改善を主目的にエマルジョン燃焼の研究が進められてきた。

ジェットエンジンのスモーク低減のため JP-5 燃料のエマルジョン化により、高出力時に発生するスモークを大巾に低減することができた。なお燃焼効率を落さずに使用できる水添加率の限度は30wt.%であった<sup>24)</sup>。

産業用ガスタービンでは燃料コストの面から高価な軽質油に替って重質油の使用が望まれ、これを効果的に燃焼させるためにエマルジョン燃料が用いられ、水添加率 5 wt. %の最適値が得られている<sup>25)</sup>。

また船用ガスタービンについてはバンカーC油や残さ油が使用されるが、これらのエマルジョン化による燃焼改善が研究された。Asia Linerの航空転用型ガスタービン搭載高速コンテナ船で重質油使用により生ずる噴霧粒径の増大で燃焼が悪化するのを防ぐ方法としてエマルジョン燃焼が試みられ、水添加率 5 wt. %でスモークおよび燃焼効率が最も改善できたとの報告がある<sup>26)</sup>。

バンカーC油や残さ油はタービンに有害なバナジウムやナトリウム化合物が含まれているので、これらを除去するために前処理装置が用いられている。燃料をエマルジョン化する場合この前処理装置の後にエマルジョン製造装置を取りつけることになる<sup>27)</sup>。

わが国では数は少ないが、陸上固定式ガスタービンは大気汚染対策から使用する燃料油を重質油より軽質油に替えている。NO<sub>x</sub> 規制がきびしくなるに伴ない、NO<sub>x</sub> 抑制を目的に水添加法(水噴射も含めて)が行われ、エマルジョン燃焼は燃焼効率の低下が少ないことから注目されている。

NO<sub>x</sub> の低減率を大きくするには水添加率を大きくしなければならないが、燃焼を悪化させずにどの程度まで水添加ができるかについてはまだ明らかでない。水添加は特に NO<sub>x</sub> 生成の多い高出力時にその効果がみられる。その効果の一例として実験用ガスタービン燃焼器において燃焼器入口空気温度のみのちがいがいによる NO<sub>x</sub> 排出量と燃焼効率の低下分との関係を示したのが図-4である<sup>28)</sup>。負荷の高い条件に対応する燃焼器入口空気温度の高い場合には水添加率を大きくしても燃焼効率をほとんど低下させることなく NO<sub>x</sub> がかなり低減できることを示している。

#### 4.3 ディーゼル機関

直接噴射式ディーゼル機関にエマルジョン燃料を使えば NO<sub>x</sub> の低減とともにスモークの低減および燃料消

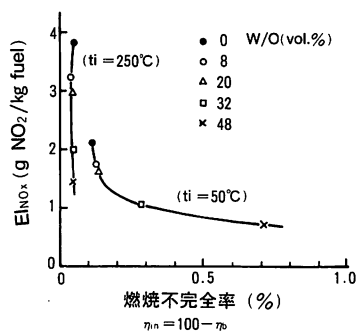


図-4 NO<sub>x</sub>と燃焼効率の低下との関係<sup>28)</sup>

〔燃料：灯油， $t_i$ ：燃焼器入口空気温度，  
 〕  
 〔圧力：大気圧，空燃比：60〕

費率の改善が可能だとの知見が得られてから研究が活発化している。最近では燃料が重質化してくるに伴ない、燃焼改善を目的にした研究も行われている。

これらの効果は使用する機関の種類、負荷等により必ずしも一律ではない。Thomson<sup>24)</sup>によれば、中高速機関の場合水添加率 15 vol. %のエマルジョンを使用したとき全負荷運転時の燃料消費率は 2～8 %程度改善される。そして水添加率の上限は 20 vol. %であるとしている。なお多気筒中速機関のテスト結果の一例

表 1 8気筒四サイクル直接噴射式過給中速エンジンのテスト結果<sup>24)</sup>

燃 料	class "A" (軽油相当)		Heavy Fuel (950 S)	
	水添加率 (wt%)	0	15	0
ピストン速度 (rev/min)	600	600	600	600
平均有効圧 (lbf/in <sup>2</sup> )	204	204	204	204
正味燃料消費率 (lb/b. hp. h)	0.356	0.351	0.373	0.357
最高圧力 (lbf/in <sup>2</sup> )	1,620	1,622	1,685	1,625
排気温度 (°C)	518	503	488	488
過給圧 (in Hg)	39.6	38	40	39
過給機回転数 (rev/min)	22,000	21,700	22,230	—
排気煙	clear	clear	clear	clear
D. S. N	0.2	0	0.3	0.2

を表 1 に示す。また低速機関での燃料消費率の改善は中高速機関ほどではない。

わが国でもかなり研究が進められており、村山ら<sup>8)</sup>は車輛を対象にした四サイクル直接噴射式機関において軽油エマルジョンを用い、水添加率 80 wt. %までの実験を行ない、吸気管水噴射と比較して特に噴射時期遅延と組合せると NO<sub>x</sub> の低減効果が大きくかつ大巾に燃料消費率の改善やスモークの低減が可能となることを明らかにした。また三橋ら<sup>17)</sup>は小形機関および大形機関において C 重油エマルジョンを用いて水添加率 70 vol. %までしらべ、噴射時期遅延との組合せで NO<sub>x</sub> を大巾に低減できたが、燃焼改善については燃料消費率の小さい大形機関では小形機関ほど効果がみられないと報告している。また船用機関については低質 C 重油エマルジョンのベンチおよび実船による燃焼テストが行われている<sup>29)30)</sup>。

ディーゼル機関ではボイラやガスタービンにくらべて燃焼現象が複雑である。スモークの低減や燃料消費率の改善が得られる理由としてマイクロ爆発によるとも言われるが、前述のようにディーゼル機関のような高圧燃焼ではマイクロ爆発はあまり期待できないので、水の働きは例えば、噴霧エネルギーの増大による空気のまき込み効果の増加、着火遅れ期間中の予混合気の形成、着火後の化学的作用が考えられている<sup>17)</sup>。

一方、水を混入したために始動性の悪化、燃料噴射系の耐久性、排気管の腐食および潤滑油の汚れなどの問題が残されている。

## 5 あとがき

従来の燃焼技術では NO<sub>x</sub> の低減と燃焼の改善とは相反するものであったが、エマルジョン燃料を用いることによって使用条件を適切に選べば両立が可能となる。

特に良好な燃焼を行わせることが困難な場合の打開策としてエマルジョン燃料を用いることは有望である。しかし本来は噴射弁の微粒化特性の改善や燃焼室の改良などで燃焼を改善することが最善の対策と考えられるが、それには開発研究費や期間の点で実用化まで幾多の困難があろう。つまりエマルジョンの燃焼技術は従来の装置を大巾に改造することなく、燃焼改善を可能にするところに魅力がある。

石油系燃料の重質化傾向が強まりつつあり、更に燃料多様化、代替燃料がさげばれている時代において、水-油エマルジョンだけでなくアルコール-油エマル

ジョンや水-油-石炭エマルジョンの研究も行われている。また装置の耐久性、耐食性に及ぼすエマルジョンの影響などまだ不明な部分があり、今後もエマルジョンの燃焼技術は進んでいくものと思われる。

### 引用文献

- 1) Harris, J.C.etal : Emulsified Gas Turbine Fuel, ASME paper 68-GT-17.
- 2) 堀田 : 機械的油水混合器によるエマルジョン燃焼例の紹介, ボイラ研究, 160号 1977.
- 3) 岩間ほか : 航空安全のためのゲル化ジェット燃料, 東大宇航研報告 7, 2 (B) 1971.
- 4) 荒巻ほか : 水分添加による重油燃焼促進法の研究, 三菱重工技報, vol. 8 No 4 1971.
- 5) 岩間ほか : エマルジョン燃料滴の燃焼(I), (II), 燃料協会誌, 57巻611号 1978, および58巻632号 1979.
- 6) 日本化学会編 : 実験化学講座 7, 丸善, 1956.
- 7) Jahani, H.etal : Characteristics of Burning Jet A Fuel and Jet A Fuel-Water Emulsion Sprays, Combust. and Flame, 37 1980.
- 8) 村山ほか : ディーゼル機関におけるNO<sub>x</sub>低減に関する研究, 自動車技術会論文集, No16 1978.
- 9) Moses, C.A. : Reduction of Exhaust Smoke from Gas Turbine Engines by Using Fuel Emulsion, Paper No75-18, Western Section Meeting of the Combustion Institute, Oct. 1975
- 10) 井原 : エマルジョン燃料化技術と燃焼について, 省エネルギー, vol.33 No 4 1981.
- 11) Ivanov, V.M.etal : Experimental Investigation of the Combustion Process of Natural and Emulsified Liquid Fuels, NASA TT F-258, 1965.
- 12) Dryer, F.L. : Water Addition to Practical Combustion Systems Concepts and Application, 16th Symposium on Combustion, 1976.
- 13) Jacques, M.T.etal : The Combustion of Water-in-oil Emulsions and the Influence of Asphaltene Content, 16th Symposium on Combustion, 1976.
- 14) 岩間ほか : エマルジョン燃料の燃焼, 燃料協会誌, 58巻626号 1979.
- 15) Law, C.K. etal : Combustion Characteristics of Water-in-oil Proplets, Combust. and Flame, 37 1980.
- 16) 水谷ほか : 乳化燃料噴霧の燃焼機構と燃焼特性 (第1報), 第17回燃焼シンポジウム講演集, 1979.
- 17) 三橋ほか : 内燃機関の水分添加燃焼について, 日本船用機関学会誌, 13巻8号 1978.
- 18) Nasrullah, M. etal : Structure of Burning Residual Oil and Residual Oil-Emulsion Sprays, Combust. Inst. Can. Sect. Spring Tech. Meet., 1979.
- 19) Gollahalli, S.R. etal : Composition Structure of Burning Sprays of Jet A Fuel and Its Emulsions with Water, ASME paper, 80-GT-57.
- 20) 廣安ほか : 乳化重質燃料の燃焼機構に関する研究, 日本機械学会講演文集 No800-5 1980.
- 21) 石川ほか : 燃料別にみたエマルジョン燃焼の効果, 省エネルギー, vol. 31 No 5 1979.
- 22) Goldstein, H.L. : Particulate Emissions from Residual Fuel Fired Boilers : Influence of combustion Modification, Trans. of the ASME, J. of Engineering for Power, July 1977.
- 23) 倉澤ほか : 船用ボイラにおける水注入燃焼について, 日本船用機関学会誌 15巻2号 1980.
- 24) Thompson, R.V. : Water-emulsified fuels : Part 2-internal combustion engines, M.E.R., Apr. 1979.
- 25) Spadaccini, L.J. etal : Evaluation of Oil/Water Emulsions for Application in Gas Turbine Engines, ACS Preprints, Division of Petroleum Chemistry, Inc., vol. 21 No 4 1976.
- 26) Novak, S M. etal : Increased Profits for Gas Turbine Containerships by Unique Applications of Combustion Technology and Hydrodynamics, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, the Annual Meeting, No 8 1977.
- 27) Winkler, M.F. : Management of Residual Fuel Systems for Gas Turbine, Gas Turbine International, May-June 1977.
- 28) 熊倉ほか : ガスタービン用燃焼器の排出ガスの研究 (第6報), 船舶技術研究所, 第37回春季講演会, 1981.
- 29) 中野ほか : 船用低速ディーゼル機関における乳化燃料油の燃焼のすす生成に関する研究 日本船用機関学会, 第29回学術講演会, 昭56.
- 30) 岡本 : 中小形, 中速機関と低質油について, 日本船用機関学会誌, 15巻2号 1980.