

図39 燃料弁による筒内圧力、噴射圧力、噴射期間、熱発生率の比較

噴射率の違いがNO<sub>x</sub>濃度の低減効果に寄与したと考えられる。

5.2.3. 高加水率乳化燃料運転による効果

燃料噴射系を変更した実験機関を利用して、低負荷

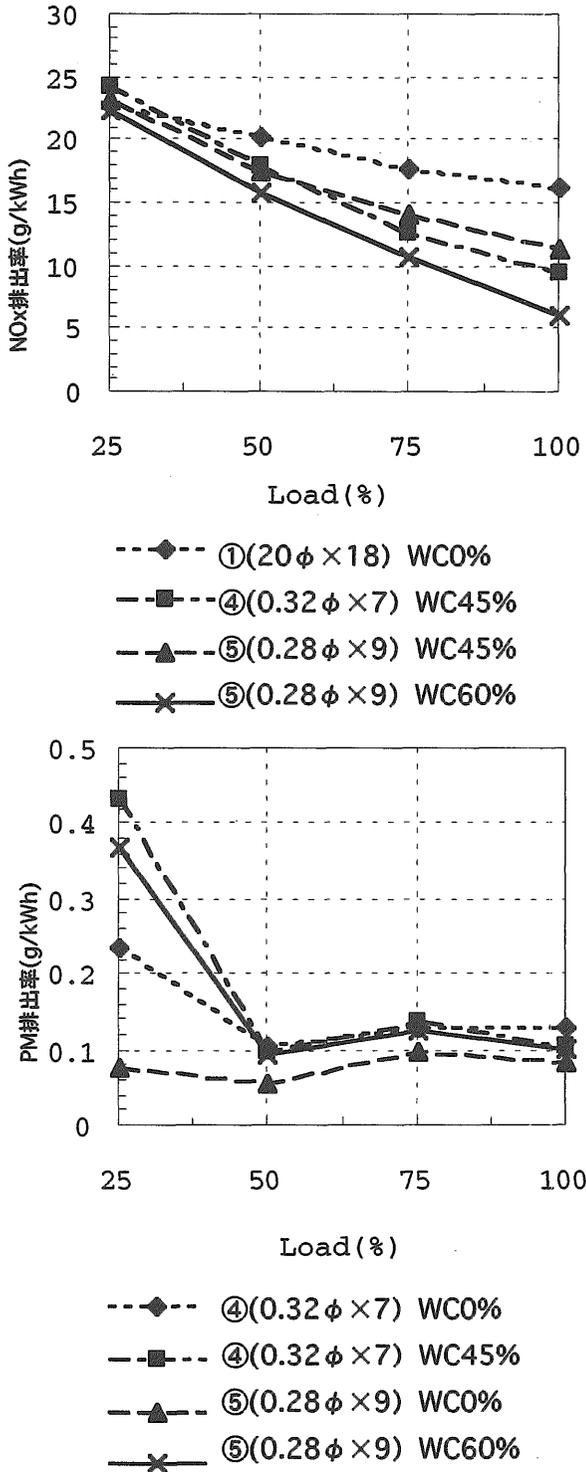


図40 燃料噴射系と乳化燃料によるNO<sub>x</sub>, PM排出率(船用特性)

域から高負荷域にかけて加水率45%~60% (含水率約31%~約38%) における乳化燃料運転を行い、排出率 (g/kWh) を基準にしたNO<sub>x</sub>低減率及び他の有害成分の排ガス特性の比較を通して、高加水率による乳化燃料運転の有用性を評価した。

図40に各種燃料噴射系の乳化燃料運転におけるNO<sub>x</sub>及びPM排出率の変化例を示す。また、図41はIMOにおいて排ガス規制のための評価法として提案されているE-3モードによるNO<sub>x</sub>排出率の比較である。

標準装備型に比較して、燃料噴射系を変更した乳化燃料運転によるNO<sub>x</sub>低減率は、加水率30% (含水率23%) では極めて低いが、加水率45%では平均で約25%と顕著になり、さらに加水率60%では負荷率の増加に従って上昇し、負荷率100%において63%に達した。また、高負荷域では乳化燃料の使用に伴う有害排ガス成分の増加は殆ど認められなかった。

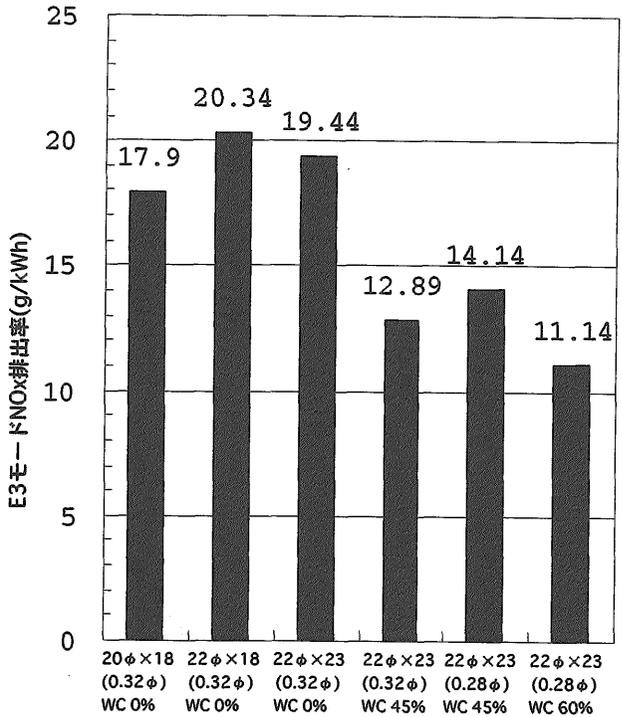


図41 燃料噴射系と乳化燃料によるE3モードNO<sub>x</sub>排出率

5.3. まとめ

- 1) 乳化燃料運転を想定して、噴射量の増加を図るため燃料噴射ポンプを変更する場合は、燃料カム形状の改造を併用して噴射特性を整合することにより、NO<sub>x</sub>低減効果の向上が期待できる。
- 2) 乳化燃料を使用しない場合は、小孔径多孔弁の優位性が確認されたが、乳化燃料を使用した際のNO<sub>x</sub>低減率は標準型の方が優れた結果となった。
- 3) 高負荷域における加水率60%の乳化燃料運転では、

他の有害排ガス成分を増加することなく、60%を越えるNOx低減率が確認されたことから、低負荷域を除く高加水率の乳化燃料運転は極めて有効なNOx低減方法と考えられる。

## 6. 実船における乳化燃料使用時排ガス特性の研究

1996年9月より1998年3月までの間、運輸省航海訓練所の練習船日本丸の3号発電機において、乳化燃料を使用し、長期運転を行った。その間、3回の排ガス特性の測定を行い、乳化燃料の使用は実船においてNOxの低減に有用であることが実証できた。

### 6.1. 実験装置及び方法

実験用発電機原動機機関の主要諸元は表5に示す。

乳化燃料装置については、セキエマー SP300Aを用いた。乳化燃料を安定させる添加剤を燃料体積に対して0.5%の比率で注入した。

日本丸では乳化燃料使用に当たり機関の改造は乳化燃料装置取り付けのための配管工事に限られた。このため、乳化燃料長期運転の指針を得る目的も兼ねて、加水率（燃料に対して混合調整する水の体積比率）及び負荷率を変更し、1996年10月に第1回目のデータを採取した。また、別の調査により季節毎の負荷率は80%を超えることはなかったため、乳化燃料で長期運転では加水率の設定を30%とした。また、第2回目以降の排ガス測定では負荷率は20%～80%、加水率は0%～30%とした。

表5 実験機関の諸元

型式	4サイクル、過給機付き、 単動6気筒
燃焼方式	直接噴射式
シリンダー径	180mm
ストローク	230mm
出力	441kW(600PS)
回転数	900rpm
ピストンスピード	6.9m/s
最高圧力	11.28MPa(115kgf/cm <sup>2</sup> )
図示平均有効圧力	1.68MPa(17.09kgf/cm <sup>2</sup> )
圧縮比	16.3
燃料弁開圧	29.4MPa(300kgf/cm <sup>2</sup> )
燃料噴射タイミング	TDC前 16度
使用燃料	A重油

なお、負荷率は発電機容量(400kW)に対する消費電力(kW)の割合で示している。

測定した排ガス成分及び使用した装置の種類を表6に示す。

表6 排ガス成分と測定装置

NOx	: 化学発光式 NOx 分析計
O <sub>2</sub>	: 磁気風式 O <sub>2</sub> 分析計
CO/CO <sub>2</sub>	: 非分散型赤外線 CO/CO <sub>2</sub> 分析計

### 6.2. 実験結果及び考察

#### 6.2.1. 乳化燃料を使った場合の排ガス特性

乳化燃料運転の中の3回の排ガス測定タイミングを表7に示す。

排ガス測定は表3のように3回にわたって行ったが、特性はほぼ同様の傾向であった。

ここでは第1回目の実験での加水率0%及び40%の排ガス特性を13%O<sub>2</sub>換算を行い、図42に示した。加水した場合のNOx濃度の変化は2/4負荷率までの低負荷域で加水率40%でも、低減はわずかであるが、負荷が大きくなるに従って、低減割合は大きくなり、3/4負荷率でのNOx濃度の低減割合は29%程度であった。COについてはNOx濃度の変化とは異なり、加水により低負荷域で増加し、高負荷域では加水しない場合と同程度であった。以上の結果は実験室で得られた図35の発電機特性と傾向がほぼ一致することが分かった。

つまり、乳化燃料の使用は実船において高負荷では他の有害排ガスを増加させることがなく、NOxを減少させる有効な手段だと考えられる。

表7 測定実施時期

第1回目測定： 1996年10月測定実施、 開放よりの総運転時間：143時間20分 乳化燃料運転の時間：00時間00分
第2回目測定： 1997年3月測定実施、 開放よりの総運転時間：1552時間45分 乳化燃料運転の時間：442時間10分
第3回目測定： 1998年3月測定実施、 開放よりの総運転時間：4438時間47分 乳化燃料運転の時間：2063時間45分

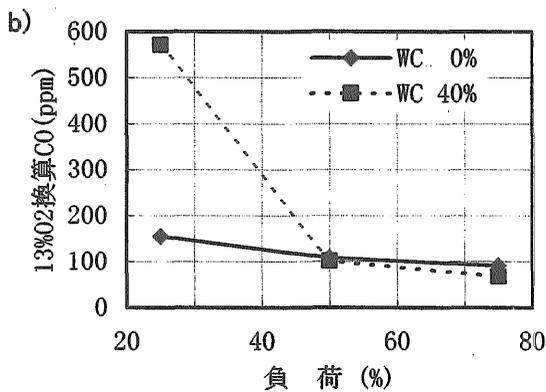
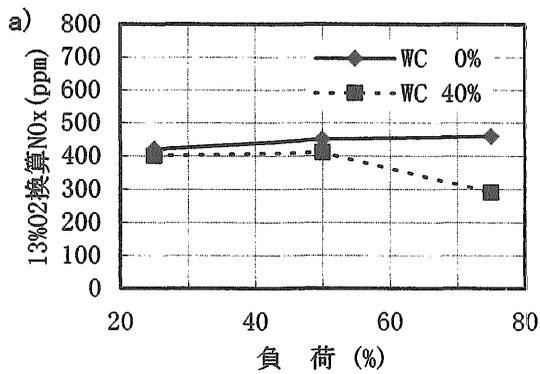


図42 実船での加水による排ガスの特性

6.2.2. 経年によるNOxの発生について

3回実験の加水率0%場合の排ガス特性を図43に示している。この図からNOx排出量は経年的に増加することが分かった。NOxの排出量は第1回目を基準にして、第2回目では平均24%程度、第3回目では39.7%程度増加している。これは加水した場合も同様の傾向となっている。

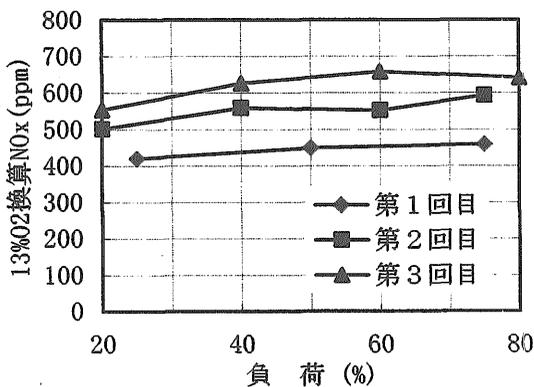


図43 排ガス特性の比較

6.2.2.1. 吸気湿度の影響について

船用ディーゼル機関から排出されるNOxの量はエンジンに供給される温度及び絶対湿度などの大気状態により大きく影響を受ける。特に実船の場合、海上の

大気の状態は激しく変化するため、年間の比較は難しい。このため、ISO/DIS8178の換算式を用いて、加水率0%におけるNOxの排出率の補正を行い、比較した。結果を図44に示す。

図44から第2、3回目のNOxの排出率は第1回目よりそれぞれ平均8.14%程度と、27.6%程度の増加となった。補正しない場合より、わずかに差は少なくなったが、依然として大きな差は残っている。従って、経年的にNOxが増加したのは吸気湿度の影響以外の要因が考えられる。

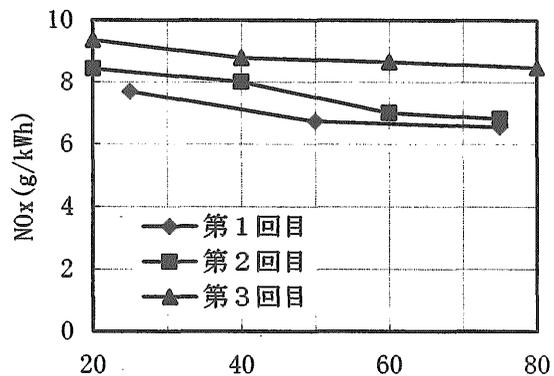


図44 湿度の補正による比較

6.2.2.2. 燃料性状の影響について

燃料の着火性、つまり着火遅れはディーゼル燃焼に密接に関係することとされている。即ち着火遅れは大きければ大きいほど、その間に蓄積した可燃混合気は急速に燃焼し、NOxの生成量が増加する。そこで、3回の測定時に使用された燃料について、CCAIの調査を行なった。

このCCAIの値は小さいほど着火が優れ、着火遅れが少ないことを意味している。使用された燃料油は日本で搭載されたA重油(第1回目)とハワイで搭載されたA重油(第2、3回目)であった。その性状及び2章2.2.1.で示した式に従って求めたCCAIを表8に示す。

表8におけるCCAIの値を見ると、第3回目の燃料の着火性が一番優れ、他の条件を同じとすればNOxの生成は少なくなるはずである。しかし、図43に示した実験結果は逆であった。

表8 燃料油の性状及びCCAI値

	D	$\nu$	CCAI
第1回目	887.4	3.09	845.57
第2回目	852.9	3.20	809.49
第3回目	850.4	3.20	806.99

ここで：C=0.3；A=80.6

また、CCAIの違いが着火遅れにどの程度関係しているか、燃焼はじめのタイミングで調査した。

ここでは熱発生曲線が急激に立ち上がり始める線の延長と基準線が交わる点を燃焼はじめ $\theta_c$ として、加水率0%について3回実験の比較を行ったものが図45である。

図45を見ると、燃焼はじめ $\theta_c$ は負荷率が40%のところに若干ずれがあるが、CCAIの大きさによる $\theta_c$ の変化は見られない。以上からNO<sub>x</sub>排出量増加の原因は燃料性状によるものではなく、他の原因と考えられる。

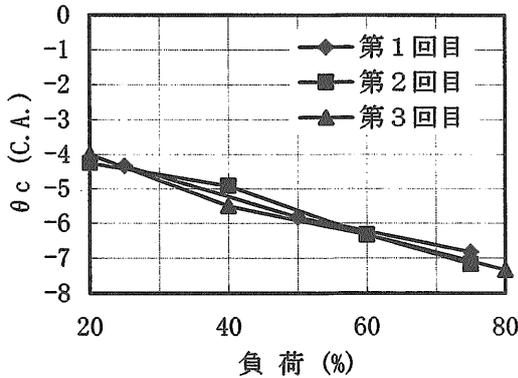


図45 燃焼初めのタイミングの比較

### 6.2.2.3. 燃焼の影響について

さらに3回測定した加水率0%時の燃焼波形から最高圧力 $P_{max}$ とそれが発生した位置 $\theta_p$ C.A.及び燃焼はじめ $\theta_c$ 点の圧縮圧力 $P_{comp}$ を調べてまとめた。それらをそれぞれ図46a)、b)、c)に示している。図46a)及びc)から見ると、3回の $P_{max}$ 及び $P_{comp}$ はほぼ一致することが分かった。図46b)の最高圧力 $P_{max}$ の発生位置 $\theta_p$ の値を見ると、第1回目と第2回目に使った燃料の性状が異なるが、 $\theta_p$ はほぼ同じである。第2回目と第3回目に使った燃料の性状はほぼ同じであるが、 $P_{max}$ の位置 $\theta_p$ は異なり、後者の方が大きい。つまり、第3回目の $P_{max}$ の発生時期は遅れていることが認められた。

また、燃焼波形から経年的に燃焼時間が長くなっているため、排ガス温度を調査した。結果を図47に示したように、排ガス温度も経年的に高くなっている。同じ負荷率で毎年約10°C高くなった。これに伴い燃費率も悪くなり、わずかであるが、平均有効圧力、過給圧も経年的に上昇していた。このいずれもNO<sub>x</sub>の増加につながるものと考えられる。

### 6.2.2.4. 運転時間の影響について

実験を用いた3号発電機は乳化燃料運転を実施する直前の1996年9月に入渠工事で開放受検を行い、1998年3月に再度入渠工事で開放を行った。その間にA重油のみの運転と乳化燃料運転を行い、約900時間間隔に

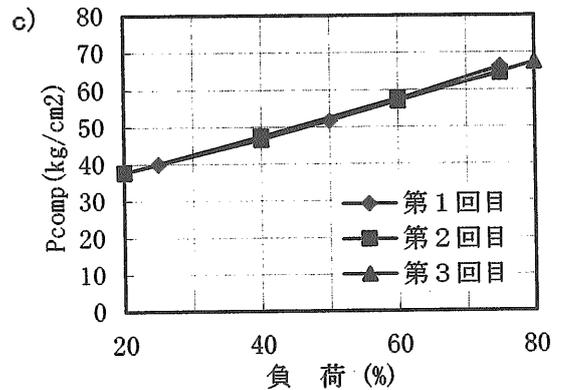
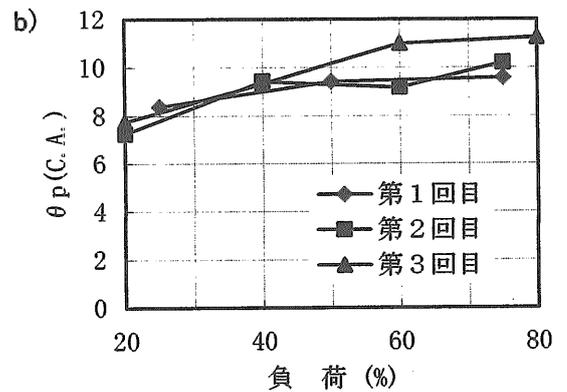
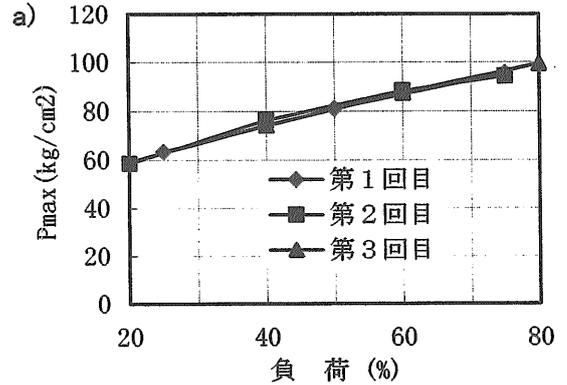


図46 最高圧力及び圧縮圧力の比較

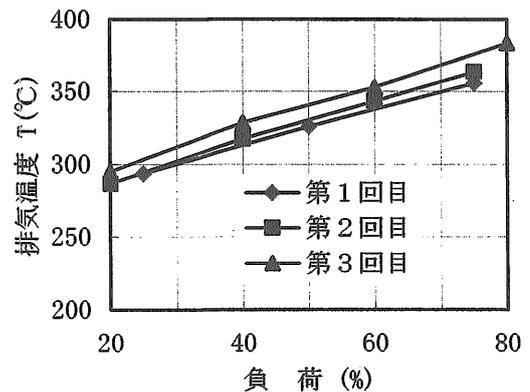


図47 排ガス温度の比較

て4回の燃料弁の整備を行った。通常、A重油のみ使用の燃料弁では、燃料弁開圧の低下 $5\text{kgf/cm}^2$ 程度のものが、乳化燃料では平均 $15\sim 20\text{kgf/cm}^2$ の低下であったと報告されている。

燃料弁の整備時期と合わせてみると、1996年10月1回目の排ガス測定実施時にエンジンは入渠工事で受検したばかりで、燃料弁整備の直後で燃料弁開圧の低下は $5\text{kgf/cm}^2$ 入ないと考えられる。1997年3月2日の排ガス測定は燃料弁の整備と次の整備の間で、燃料弁開圧の低下は $5\text{kgf/cm}^2\sim 20\text{kgf/cm}^2$ の間と考えられる。1998年3月3回目の排ガス測定はちょうど整備になる直前に実施し、燃料弁開圧の低下は $15\sim 20\text{kgf/cm}^2$ 程度であったと考えられる。

燃料弁開圧がある程度に低くなると、噴射時期も早くなると考えられるが、前述したように、図43の3回目の測定時の着火タイミングの変化がなかったことで、燃料弁開圧の低下は着火にあまり影響しないと推定される。

この燃料弁開圧の低下より、燃料弁交換時の整備中に5番シリンダーのニードル弁の作動が悪かったためノズルを交換しているが、むしろこれが燃焼に影響し、 $\text{NO}_x$ の増加に寄与しているのではないと思われる。

最後に、実験終了後に行われた3号発電機の整備で、ピストン頂部に硬質の白い物質が放射状に付着し、ピストン頂部のほぼ全面に渡り、皺のような模様をした腐食が発見された。吸気弁、排気弁とも燃焼生成物が弁棒部分に厚く付着していた。

このような燃焼生成物の付着が吸気、排気に影響し、さらに燃焼に関係し、ひいては燃焼率に影響を与えたものと考えられる。

以上のように、吸気湿度の影響を除けば、 $\text{NO}_x$ の増加の原因として、燃料性状や5番シリンダーノズルのように、燃焼に影響する特殊な要因で起こったもの、あるいは一般的に起こる燃焼生成物も付着が挙げられるが、これらの一つ一つの要因での $\text{NO}_x$ の増加はわずかなものであると考えられるが、これらの原因が相互に関連し、27%程度大きな値になったと推測する。

### 6.3. まとめ

以上、日本丸練習船の3号発電機を用いて、乳化燃料を使って、 $\text{NO}_x$ などの排ガスの実船実験測定結果とその考察から次の知見が得られた。

(1) 実船における乳化燃料運転は実験室で得られた結果と傾向がほぼ一致していることが分かった。即ち、他の有害排ガスを増加させることなく、 $\text{NO}_x$ 濃度の低下に高負荷域では有効である。

(2)  $\text{NO}_x$ の排出量は経年で増加していることが分かった。様々な原因を考察したが、エンジンの運転性能の変化と燃焼の状態などから総合的に考えると、燃焼生成物の堆積を通して、それぞれの要因がエンジン

の排ガス特性に何処まで影響するかは不明であり、それを解明するため、データの蓄積が必要である。

## 7. 乳化燃料運転が機関部品等に及ぼす影響

乳化燃料は高い $\text{NO}_x$ 低減効果を有する一方で、他の大気汚染物質の排出特性への影響は低負荷域を除けば少ないことから、IMOによる国際的な船舶に対する排ガス規制に対応する技術として広く活用されることが望まれている。乳化燃料の実用を進めるに当たっては、長期運転試験を実施し装置の信頼性、耐久性を確認するとともに、機関部品において、キャビテーション等により発生が懸念される腐食、磨耗等の有無、程度を確認し、これらを許容範囲内にとどめる措置を講ずることが不可欠である。本研究では、実船舶に搭載されている機関を用いて乳化燃料による長期運転を行った後、使用された機関部品の腐食及び磨耗の検査、ならびに機関内部の付着物の分析を行い、乳化燃料運転が機関部品等に及ぼす影響の評価を行った。

### 7.1. 実験装置及び方法

本研究では運輸省航海訓練所に所属する連習船日本丸において発電機として設置されている機関を使用した。その主要諸元は第6章に示したものと同様である。燃料としてA重油を基材とした乳化燃料を用い、合計2,063時間にわたって運転を行った。使用した機材燃料の性状値を表9に示す。乳化燃料製造装置は第4章に示したものと同様である。また、水は船内の雑用水をそのまま用い、加水率は30%とした。

検査は表10及び11に示す部品及び付着物について行った。部品検査では、乳化燃料の使用がキャビテーション等をもたらすことが懸念されたため、燃料系統の主要な部品を検査対象とした。また、付着物の分析

表9 燃料の性状

油種	A重油
ISO規格	DMB
密度@15°C (g/cm <sup>3</sup> )	0.8744
動粘度@50°C (mm <sup>2</sup> /s)	3.09
引火点 (°C)	62
流動点 (°C)	-20
残炭 (mass%)	0.04
水分 (vol.%)	<0.05
灰分 (mass%)	0.01
炭素 (mass%)	86.05
水素 (mass%)	13.19
硫黄 (mass%)	0.76
窒素 (mass%)	0.02

表10 検査部品一覧

部品名	使用燃料	全運転時間*/h
燃料噴射弁	乳化燃料	4,465 (2,063)
"	通常燃料	4,513
"	なし(新造品)	-
燃料噴射ポンプ	乳化燃料	4,438 (2,063)
"	通常燃料	4,594
"	なし(新造品)	-
燃料パイプ	乳化燃料	4,438 (2,063)

\*: 括弧内は乳化燃料による運転時間

表11 付着物一覧

位置
ピストンヘッド
シリンダヘッド触火面
吸気弁ステム下部
排気弁ステム下部
排気集合管
過給機内部

では、燃焼・排気系内の主要な部品上における燃焼生成物を対象とした。部品検査は、部品を適当に切断し、超音波洗浄機で洗浄した後、目視及び走査式電子顕微鏡 (SEM) により、腐食、磨耗等の検査を行った。燃料噴射弁及び燃料噴射ポンプについては、比較のため、新造品及び通常燃料を用いて運転した同型式の部品も同様に切断し、検査した。なお、ピストンヘッドは付着物検査に関連して、船内において目視観察のみを行った。付着物の検査は、目視により性状を確認した後、X線回折 (XRD) 及び電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) により成分の結晶相及び元素を分析した。比較のため、通常燃料を用いて運転した機関からも付着物をサンプリングし、同様に分析した。なお、試料のサンプリングは共同研究先の航海訓練所に依頼した。

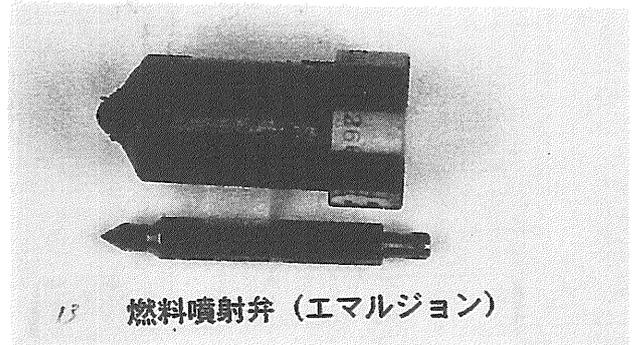
## 7.2. 実験結果及び考察

### 7.2.1. 部品検査

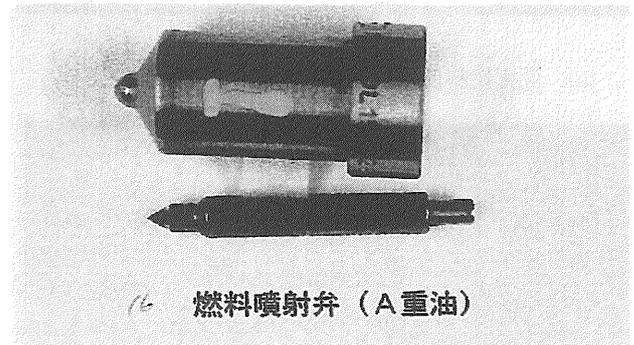
#### 7.2.1.1. 燃料噴射弁

燃料噴射弁の外観及び検査部位を図48に示す。目視検査では、使用した部品には、いずれも表面にカーボンが付着しているほかは新造品と比較して顕著な変化は観察されなかった。

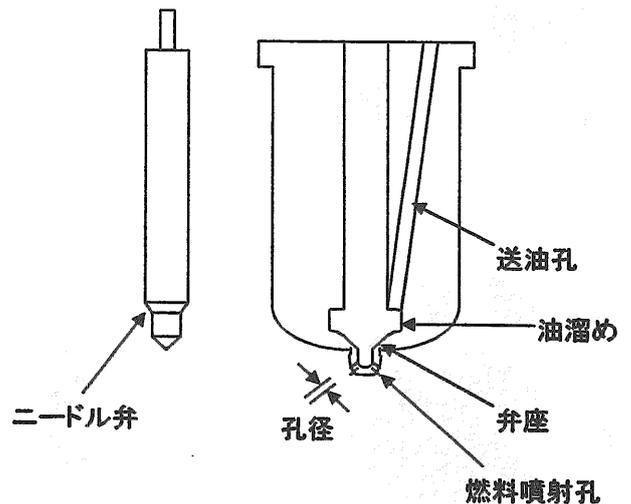
SEM観察では、まず、燃料噴射孔の孔径を測定した。乳化燃料運転により孔口部が磨耗し、孔径が拡大することが懸念されていたが、乳化燃料、通常燃料及び新造品のいずれにおいても孔径は0.26mmで、同一であ



(a) 乳化燃料を使用



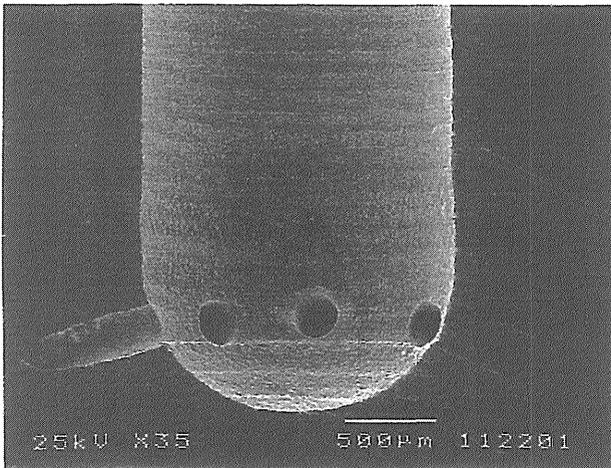
(b) 通常燃料を使用



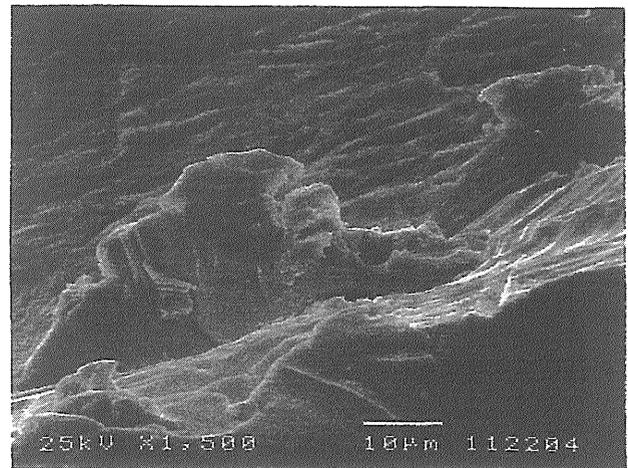
(c) 燃料噴射弁の検査部位

図48 燃料噴射弁の外観及び検査部位

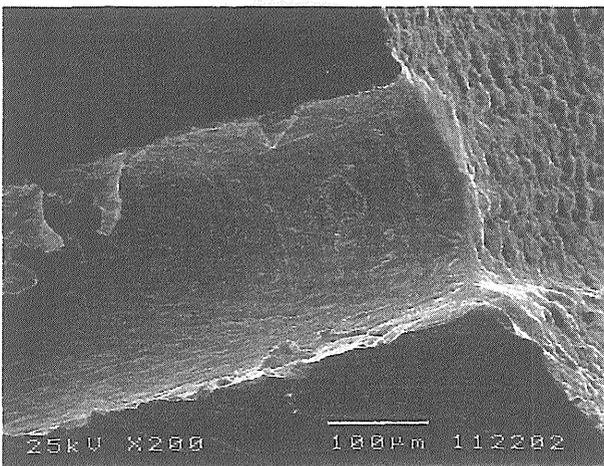
ることが確認された。次に、噴射孔を軸方向に切断して孔口部の形状及び内部の状態を観察した。図49にそのSEM写真を示す。乳化燃料及び通常燃料で使用したいずれの燃料噴射弁においても、孔口部の拡張は観察されなかった。噴射孔内部には、乳化燃料で使用した



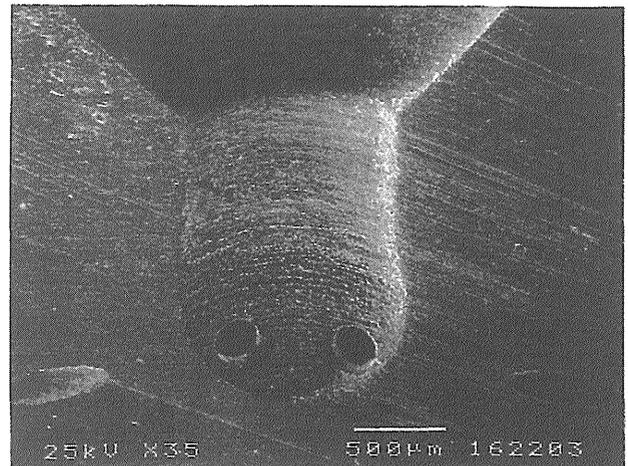
(a) 乳化燃料使用。全体（4つの噴射孔がみえる）



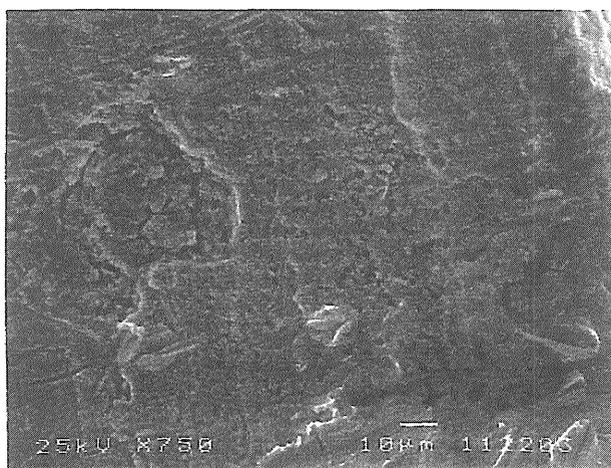
(d) 同左。孔内部、切断面付近のえぐれた箇所。



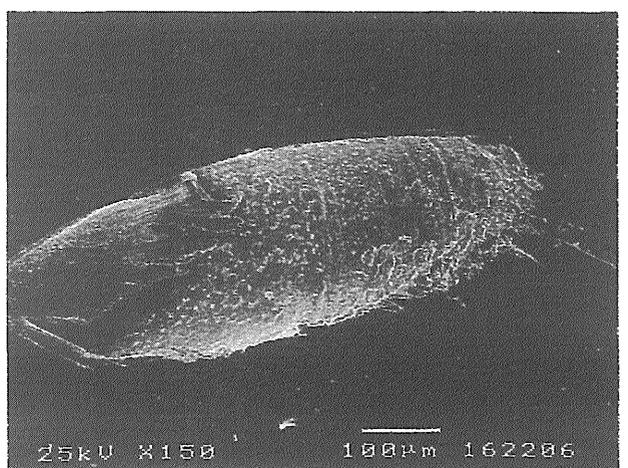
(b) 同上。左端の孔を拡大。



(e) 通常燃料使用。全体。

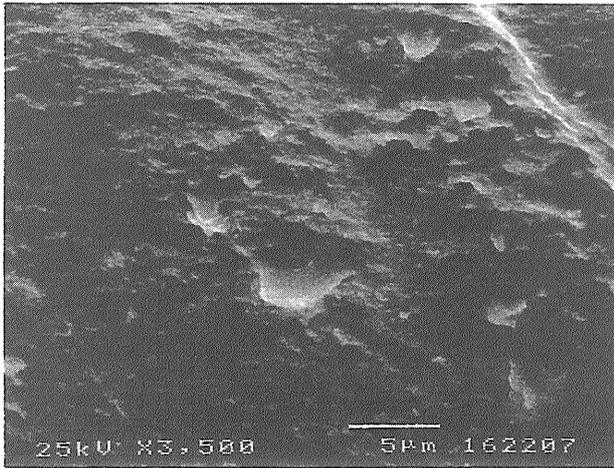


(c) 同上。孔内部の陥没部を拡大。

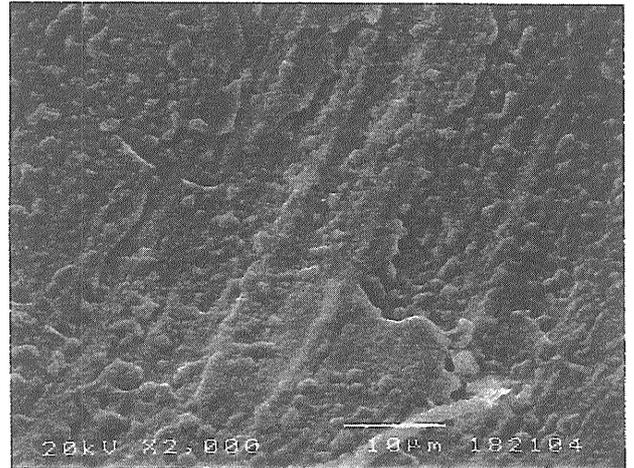


(f) 同上。左端の孔を拡大。

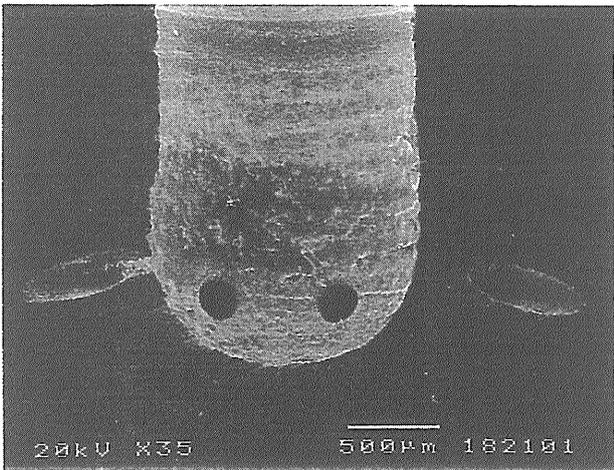
図49 燃料噴射弁噴射孔内部SEM写真



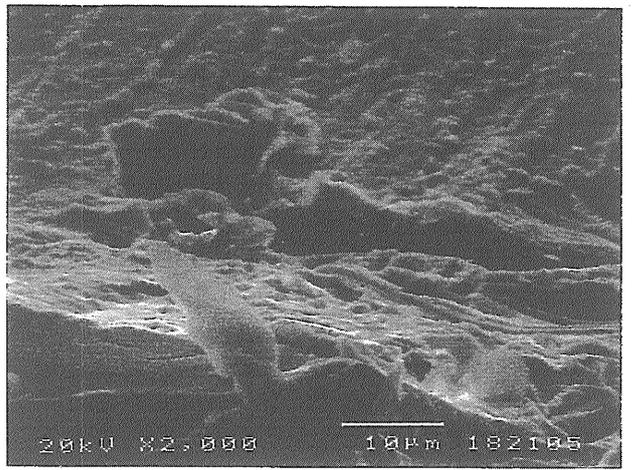
(g) 通常燃料使用。孔内部を拡大。



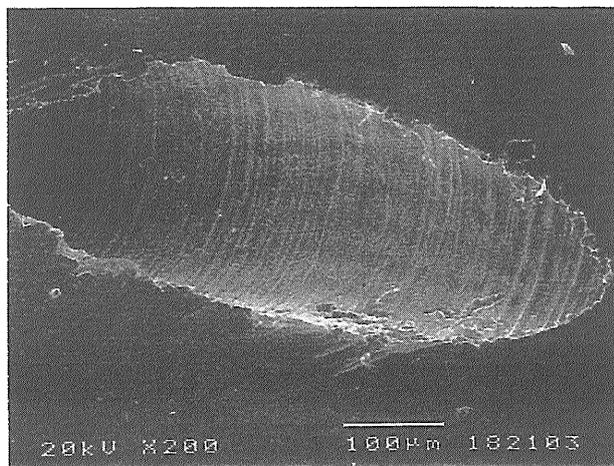
(j) 新造品。孔内部を拡大。



(h) 新造品。全体。



(k) 同上。孔内部、切断面付近のえぐれた箇所。



(i) 同上。右端の孔を拡大。

図49 燃料噴射弁噴射孔内部SEM写真