

船用機関から排出されるN₂O等有害排ガスの評価及び 処理に関する研究

高杉 喜雄*、西尾 澄人*、石村恵以子*、中島 康晴*、桑原孫四郎*、張 潔*
菊池 正晃*、西川 和美**、山谷 周二***、塩出敬二郎***

Study on Assessment and Treatment for Harmful Exhaust Emissions such as N₂O
from Marine Diesel Engines

by

Yoshio Takasugi, Sumito Nishio, Eiko Ishimura, Yasuharu Nakajima,
Magoshiro Kuwabara Zhang Jie, Masaaki Kikuchi, Kazumi Nishikawa,
Shuji Yamatani, Keiji Shiode
Power and Energy Engineering Div., Materials and Processing Div. and ex.
Power and Energy Engineering Div.

Abstract

Form the viewpoint of global environment protection, regulations for prevention of air pollution from ships have been discussed in the International Maritime Organization (IMO) and the regulations about NO_x and SO_x are expected to enter into force January 1st of 2000.

In addition to the above, IMO will revise the regulations every five years. Then emission restriction will be expected to apply to other air pollutants including N₂O and Particulate Matter (PM) in the near future.

Under these circumstances, we studied the evaluation of the harmful exhaust emissions from marine diesel engines the effective techniques for reduction of these emissions.

The study was conducted as follows:

First, the influence of fuel properties on emission characteristics including PM was investigated by experiments with various marine residual fuels that were collected from various regions.

Secondly, the change of NO_x concentrations with the alteration of engine operation conditions and variation of shaft torque was investigated experimentally by using a 4-stroke diesel engine. And the change of emission characteristics of other harmful components in exhaust gas was examined for the various combinations of engine loads and fuel oil species that were used.

Next, the effect of emulsified fuel on NO_x reduction in on-board test was verified by settling an apparatus for supplying emulsified fuel to a diesel generator in ship. Furthermore, the influence of operation with emulsified fuel on engine parts was also investigated.

* 機関動力部

** 材料加工部

*** 元機関動力部

原稿受付 平成11年3月23日

審査済 平成12年9月13日

Finally, the influence of the fuel injection system with emulsified fuel on emission characteristics from marine diesel engines was investigated by using a 4-stroke diesel engine. And adaptability of Selective Catalytic Reduction (SCR) system for marine diesel engines was investigated by using catalyst ($\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$) and aqueous urea solution as reducing agent experimentally.

The following results are obtained:

1. Influence of fuel properties on emission characteristics
 - 1) Influence quality of fuel can expressed by Calculated Carbon Aromaticity Index (CCAI).
 - 2) NO_x emission rate increases with an increase of CCAI of fuel, and soot emission rate increases with an increase of sulphur content.
2. NO_x emission characteristics with the shaft torque change of marine diesel engines
NO_x concentration during the periodic shaft torque variation can be dealt with that as equivalent to the corresponding NO_x concentration at an average load.
3. The emission characteristics of harmful exhaust components with emulsified fuel
 - 1) NO_x concentration decreases with an increase in the water ratio. Meanwhile, the reductuin rate of NO_x concentration with a decrease in engine load for Marine Diesel Fuel (MDF), while it increases for the blended fuel of MDF and Marine Fuel Oil (MFO).
 - 2) N₂O concentration increases with degradation of fuel oil, whereas it decrease with emulsified fuels. The increase in N₂O concentration with degraded fuel oil is expected to be caused by reduction of NO with SO_x.
4. Influence of the fuel injection system on the marine diesel engine with emulsified fuel
 - 1) Although the smaller-hole nozzle had superiority on emission characteristics, in the case with unemulsified fuel, the standard-hole nozzle caused better NO_x reduction rate in the case with emulsified fuel than the smaller-hole nozzle.
 - 2) More then 60% of NO_x reduction rate, was identified in the engine operating at higher loads with emulsified fuel of 60% water ratio without any increase in other harmful components of exhaust gas. It suggests that the operation with emulsified fuel of higher water ratio is extremely effective on NO_x reduction excepting at lower engine loads.
5. Emission characteristics from on-board engine with emulsified fuel
 - 1) Emission characteristics from on-board engine almost agreed with those on shop test, that is, NO_x concentration decreased with an increase in water ratio.
 - 2) NO_x emission increased with the passage of time.
6. Influence of operation with emulsified fuel on engine parts
 - 1) Parts in fueling system had no considerable corrosion or wearing, except the inside of nozzle hole of fuel injection nozzle.
 - 2) Hard deposit and melting traces were provided on the top piston head, while no significant changes were observed on other parts in combustion and exhaust system.
7. Study and adaptability of SCR system for marine diesel engines
 - 1) This SCR system is useful for engines using Marine Fuel Oil (MFO) as well as Marine Diesel Fuel (MDF).
 - 2) In addition to NO_x reduction, N₂O reduction is possible by using this SCR system.

目 次

1. 緒言
2. 燃料性状が排ガス特性に与える影響
 - 2.1. 実験装置及び方法
 - 2.2. 実験結果及び考察
 - 2.2.1. 燃料性状の着火遅れ及びNO_x濃度への影響
 - 2.2.2. 燃料性状のストートへの影響
 - 2.2.3. 乳化燃料のPMへの影響
 - 2.3. まとめ
3. 軸トルクによる船用機関のNO_x排出特性
 - 3.1. 実験装置及び方法
 - 3.2. 実験結果及び考察
 - 3.2.1. 機関運転点によるNO_x濃度の変化
 - 3.2.2. 軸トルク変動によるNO_x濃度の変化
 - 3.2.3. (最高圧力/軸トルク)の比とNO_x排出率の相関
 - 3.3. まとめ
4. 乳化燃料による船用機関からの排ガス特性
 - 4.1. 実験装置及び方法
 - 4.2. 実験結果及び考察
 - 4.2.1. NO_xの排出特性
 - 4.2.2. N₂Oの排出特性
 - 4.2.3. CO₂及びO₂の排出特性
 - 4.2.4. COの排出特性
 - 4.2.5. HCの排出特性
 - 4.2.6. PMの排出特性
 - 4.3. まとめ
 - 4.4. 結言
5. 乳化燃料による船料ディーゼル機関の排ガス特性に及ぼす燃料噴射系の影響
 - 5.1. 実験装置及び方法
 - 5.2. 実験結果及び考察
 - 5.2.1. 燃料噴射ポンプの噴射特性による影響
 - 5.2.2. 燃料弁の噴霧特性による影響
 - 5.2.3. 高加水率乳化燃料運転による効果
 - 5.3. まとめ
6. 実船における乳化燃料使用時排ガス特性の研究
 - 6.1. 実験装置及び方法
 - 6.2. 実験結果及び考察
 - 6.2.1. 乳化燃料使用時の排ガス特性
 - 6.2.2. 経年変化によるNO_xの発生について
 - 6.2.2.1. 吸気湿度の影響について
 - 6.2.2.2. 燃料性状の影響について
 - 6.2.2.3. 燃焼の影響について
 - 6.2.2.4. 運転時間の影響について
 - 6.3. まとめ
7. 乳化燃料運転が機関部品等に及ぼす影響
 - 7.1. 実験装置及び方法
 - 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
 - 7.2.1.2. 燃料噴射ポンプ
 - 7.2.1.3. 燃料パイプ
 - 7.2.1.4. 部品検査のまとめ
 - 7.2.2. 付着物検査
 - 7.2.2.1. ピストンヘッド
 - 7.2.2.2. シリンダヘッド触火面
 - 7.2.2.3. 吸気弁システム下部
 - 7.2.2.4. 排気弁システム下部
 - 7.2.2.5. 排気集合管
 - 7.2.2.6. 過給機内部
 - 7.2.2.7. 付着物検査のまとめ
 - 7.3. まとめ
8. 船用ディーゼル機関における脱硝装置の適合性について
 - 8.1. 実験装置及び方法
 - 8.2. 実験結果及び考察
 - 8.2.1. 運転状態の違いによる脱硝特性
 - 8.2.2. 燃料性状による脱硝特性
 - 8.3. まとめ
9. 本研究により得られた成果
10. 研究発表
11. 参考文献

1. 緒言

地球環境保護の観点から大気汚染対策として、船舶からの排ガス規制が国際海事機関 (IMO) において審議され、NO_x及びSO_xに対する規制が開始される予定となった。また、5年毎に規制が見直されることから、近い将来には、N₂O及びパーティキュレート (PM) 等の大気汚染物質にも規制の適用が及ぶものと予想される。本研究は、船用ディーゼル機関から排出される有害排ガス成分全般について、発生機構の解明及び抑制技術に関し、以下に示す研究を行った。

「燃料性状が排ガス特性に与える影響」では、性状が異なる船用燃料を用いて燃焼実験を行い燃料性状が排ガス組成に与える影響を調査し、また、PMの排出量の測定を行った。

「軸トルクによる船用機関のNO_x排出特性」では、実験用4サイクル・ディーゼル機関の運転点及び軸トルクを変動させ、それに伴うNO_x濃度の変化を把握し、同時に機関運転諸データが、NO_x濃度にどのような影響を与えるかの研究を行った。

「乳化燃料による船用機関からの排ガス特性」では、実験用4サイクル中速ディーゼル機関の運転条件、使用燃料及び加水率を変化させ、種々の大気汚染物質の排出特性を調査し、効果的な乳化燃料の適用法について研究した。

「乳化燃料による船用ディーゼル機関の排ガス特性に及ぼす燃料噴射系の影響」では、実験用4サイクル・ディーゼル機関の燃料噴射ポンプ、燃料噴射弁を変更して乳化燃料運転を行った。運転データの比較分析から、NO_x低減効果及び燃焼改善効果との関係を検討を行うとともに、改良した燃料噴射系を利用して高加水率運転を達成し、その有用性について検証した。

「実船における乳化燃料使用時排ガス特性の研究」では、運輸省航海訓練所の日本丸の3号発電機に乳化燃料を使用して長期運転を行った。その間、3回の排ガス特性の測定を行い、実船において乳化燃料の使用はNO_xの低減に対し有用である事を実証した。

「乳化燃料運転が機関部品に及ぼす影響」では、日本丸3号発電機における乳化燃料での長期運転後、機関部品の腐食及び摩耗検査を行うとともに、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。

「船用ディーゼル機関における脱硝装置の適合性について」では、陸上のプラントではNO_x低減のために一般的に使用されている脱硝装置を、実験用4サイクル・ディーゼル機関の排ガス系統の下流に設置し、機関の運転条件及び燃料性状の違いによる脱硝特性について調べ、船用ディーゼル機関への適応性を検討した。

2. 燃料性状が排ガス特性に与える影響

燃料性状が排ガス組成に与える影響を、性状の異なる船用燃料を用いて燃焼実験を行い、調査した。また、将来規制の対象となるであろうPMの排出量の測定及び元素分析などを行った。

2.1. 実験装置及び方法

船用燃料の性状が排ガス特性に与える影響を調査するために、性状の異なる13種類の燃料を用意した。ここで用意した燃料は、日本の船舶が外国で補油したものの、この実験のために着火性を調合してもらったものなどである。実験に使用した燃料の性状を表1に示す。この燃料を用い4サイクルディーゼル機関で燃焼実験を行った。実験に使用した機関の主要目を、表2に示す。実験は船用特性に沿って行い、各分力(25%、50%、75%、100%)での排ガス濃度(CO、CO₂、NO_x、O₂、THC、スモークなど)、機関性能(出力、燃費率、熱効率、各部の温度、圧力など)、燃焼特性(着火遅れ、燃焼期間、発熱量など)などを測定した。実験では燃料の粘度が燃料噴射ポンプ入り口で20cStになるように調整し、燃料粘度の影響が出ないようにした。

表2 実験機関の主要諸元

型式	立て型4サイクル単動ディーゼル機関 過給機、空気冷却器付き
シリンダ径	230mm
ストローク	380mm
シリンダ数	3
連続最大出力	257kW (350PS)
回転数	420rpm
平均ピストン速度	5.32m/s
最高爆発圧力	9.32MPa (95.0kg/cm ²)
正味平均有効圧力	1.55MPa (15.8kg/cm ²)
圧縮比	13

表1 実験に使用した燃料の性状

Fuel No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Specific gravity (15/4°C)	0.9629	0.9817	0.9716	0.9940	0.9783	1.0080	0.9791	0.9677	0.9649	0.8565	0.9890	0.9235	0.9564
Kinematic viscosity cSt (50°C)	266.60	305.00	258.80	430.40	245.30	31.50	345.30	397.20	169.24	2.55	36.36	6.77	13.84
Kinematic viscosity cSt (100°C)	26.180	30.440	24.670	37.060	24.430	3.399	33.76	39.420	22.510	*	*	*	*
Reaction	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	*	*	*	*
Flash point °C	130	90	112	95	112	180	94.00	106	*	76.00	204.00	86.00	101.00
Pour point °C	10.0	-5.0	5.0	5.0	7.5	42.5	10.00	5.0	20.0	-27.50	-27.50	-27.50	-27.50
Lower calorific value MJ/kg	43.06	42.12	42.58	41.55	42.55	41.98	42.26	42.50	43.00	*	*	*	*
CCR wt%	7.51	8.21	8.16	12.98	9.91	4.53	15.43	11.06	10.08	Tr	0.05	0.08	0.07
Water vol%	<0.05	0.20	0.20	0.20	0.30	0.05	<0.05	<0.05	1.50	Tr	Tr	Tr	Tr
Ash wt%	0.03	0.04	0.04	0.04	0.02	0.05	0.03	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Sulphur wt%	1.48	1.68	1.57	3.64	1.61	0.98	3.29	3.87	2.42	0.50	4.24	2.68	3.51
Nitrogen wt%	0.55	0.36	0.60	0.33	0.34	0.07	0.26	0.24	0.21	*	*	*	*
Carbon wt%	85.8	86.2	85.8	84.7	86.4	87.3	85.10	84.2	86.8	*	*	*	*
Hydrogen wt%	11.4	10.5	11.0	10.3	10.8	11.7	10.80	11.2	11.0	*	*	*	*
CCAI	828	845	837	854	844	902	841	828	835	814	880	850	866
Lower calorific value kcal/kg	10277	10053	10163	9917	10155	10020	10087	10142	10263				

* not measured
Tr: trace

表3 燃料性状と排ガスとの相関

	Density																					
Density	1.000	Viscosity																				
Viscosity	0.521	1.000	F.P.																			
F.P.	0.568	-0.183	1.000	P.P.																		
P.P.	0.644	0.473	0.288	1.000	CCR.																	
CCR.	0.558	<u>0.916</u>	-0.159	0.673	1.000	Water																
Water	0.154	0.107	-0.114	0.372	0.313	1.000	Ash															
Ash	0.648	<u>0.739</u>	0.146	<u>0.813</u>	<u>0.732</u>	0.064	1.000	Sulfur														
Sulfur	0.532	0.348	0.242	-0.081	0.265	0.004	0.063	1.000	CCAI													
CCAI	0.584	-0.296	<u>0.733</u>	0.233	-0.215	-0.142	0.101	0.271	1.000	Ignition lag												
Ignition lag	0.605	-0.027	0.661	0.146	-0.106	-0.281	0.280	0.142	<u>0.777</u>	1.000	NOx											
NOx	0.427	-0.464	0.622	0.173	-0.338	0.168	-0.103	0.162	<u>0.761</u>	0.459	1.000	Soot										
Soot	0.463	0.321	0.073	-0.184	0.148	-0.221	0.103	<u>0.889</u>	0.285	0.245	0.086	1.000										

2.2 実験結果及び考察

燃料性状（比重、粘度、残炭量、硫黄分、など）が排ガス組成（NOx、SOx、スート、）などに与える影響を見るために、燃料性状に対するこれらの測定結果との相関係数を計算した。表3に、その結果を示す。相関の強いものについてはアンダーラインを付けてある。

2.2.1 燃料性状の着火遅れ及びNOx濃度への影響

燃料の着火性は、排ガス特性に大きな影響を持つといわれているがその具体的な資料はほとんどない。そこで燃料の着火性の指標として最近使用されるようになったCCAI(Calculated Carbon Aromaticity Index)がどの程度、実際のディーゼル機関の着火遅れと関係しているかを調べた。

燃料のCCAIは、次の式によって計算されるものである。

$$CCAI = D - 81 - 141 \log(\log(V50 + 0.85))$$

ただし、Dは15°Cでの燃料密度 kg/m³

V50は50°Cでの燃料の動粘度 cSt

図1は、機関負荷100%時の各燃料に対するCCAIと4サイクルディーゼル機関の着火遅れの様子を示したものである。

この図から分かるように、燃料の着火遅れとCCAIの間には強い相関があることが分かる。部分負荷時においてもこの図と同じような傾向を示している。

しかし、個々の燃料についてみると回帰線よりかなり離れているものも見受けられる。これらの原因究明が今後の検討課題である。

図2には、CCAIにたいするNOx濃度の変化の様子を示した。この図からも分かるようにCCAIとNOx濃度の間には強い相関がある。しかし、着火遅れの場合と同じように回帰線から離れているものもあり、必ず

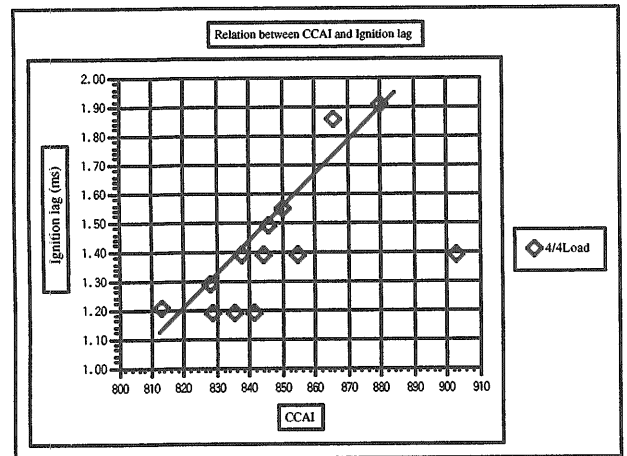


図1 CCAIと着火遅れとの関係

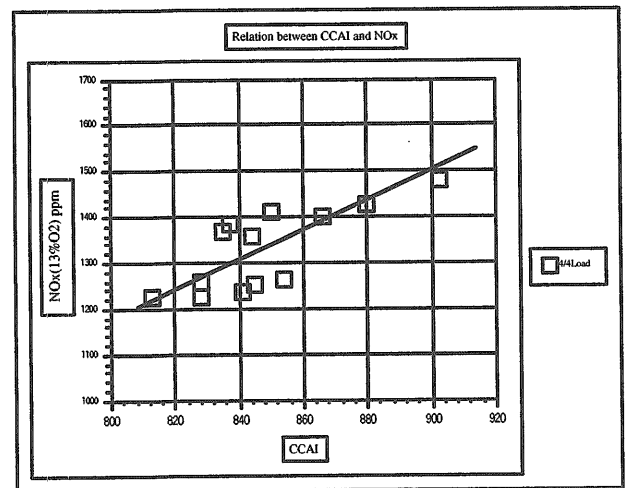


図2 CCAIとNOxとの関係

しもCCAIの影響だけではないことが窺われる。ディーゼル機関からのNOxの発生メカニズムを考えるとサーマル・ノックスとフェューエル・ノックスに大別でき、そのほとんどがサーマル・ノックスであると

いわれている。燃料の着火性の影響はサーマル・ノックスに対してである。CCAIが813から903まで変化するとNO_x濃度は約300ppm程度変化する。

同じ機関、同じ運転条件下でもNO_xの排出濃度は燃料によって大幅に変化することが分かる。

このことは、機関に使用する燃料を選定する場合、燃料によりNO_x排出量に変化するので、十分な配慮が必要である。

2.2.2. 燃料性状のストへの影響

排ガス中のスト量をJIS Z8808-ばいじん測定法に準拠して測定した。

図3には、機関負荷100%時の排ガス中のストの量と燃料中の硫黄分の関係を示した。この図からも分かるように、スト量は燃料中の硫黄分が増加するとこれに比例して増加する傾向を示す。硫黄分は一般的には難燃成分であり、また排気中では炭素粒子と炭素粒子を結びつけるバインダーの役目をするといわれているものである。

これらのことから、硫黄分が増加するとスト量が増加するという現象は説明ができる。

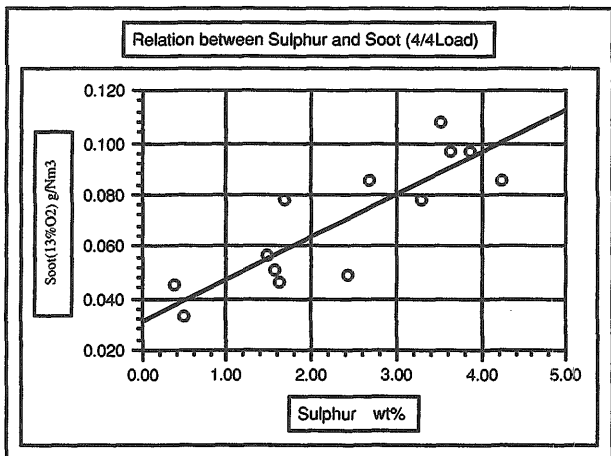


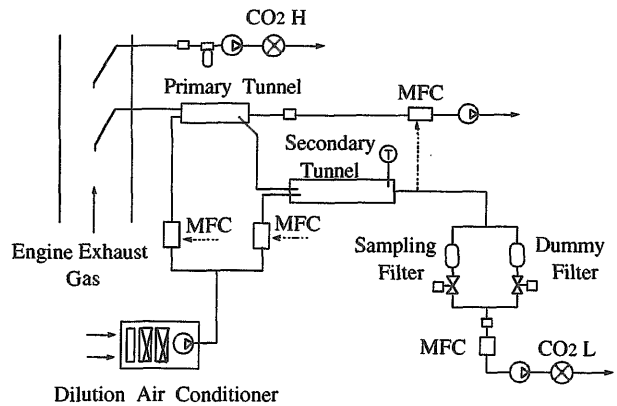
図3 ストと硫黄分との関係

2.2.3. 乳化燃料のPMへの影響

排ガス中のNO_xを低減するひとつの方法として、当所では乳化燃料を使用することを試みている。乳化燃料を使用するとNO_xの排出量、スモークなどは低減できることはこれまでの研究で明らかにされている。しかし、PMについては、ほとんど測定例が発表されていない。そこで、残さ油を使用する船用機関からのPM排出レベルを調べた。

PMの測定には、船舶技術研究所と民間会社で共同で開発したダブル・ダイリューション・トンネル・システムを使用した。このシステムの概略を図4に示す。図5に、A重油及びC重油での測定結果を示す。

この図からも分かるようにPMの排出量は、A重油の



MFC: Mass Flow Controller

図4 ダブルダイリューション・トンネル・システムのフローダイヤグラム

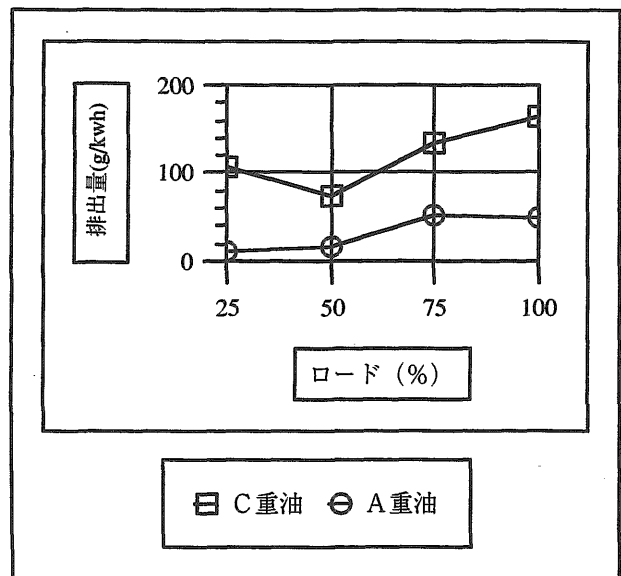


図5 A重油及びC重油のパーティキュレート排出量

場合C重油に比べて非常に少なく、負荷によって変化するが1/10から1/3程度である。

C重油は残さ油が基材であり、その中には難燃性の残留炭素分、金属分などを多く含んでいるのでPMの排出量が多くなっている。

図6は、乳化燃料の水分の影響を調べたものである。3/4負荷で運転しておいて水の添加量を変化させたときのPMの排出量を調べた。

この図からわかるように水分の影響が明確でない。

2.3. まとめ

船用燃料はその主成分が残さ油であるため、性状は蒸留油に比べて非常にばらついている。従って、燃焼するときにも着火遅れ、燃焼期間などに大きな差が生じる。これが燃焼生成物である排ガスの組成に大きな

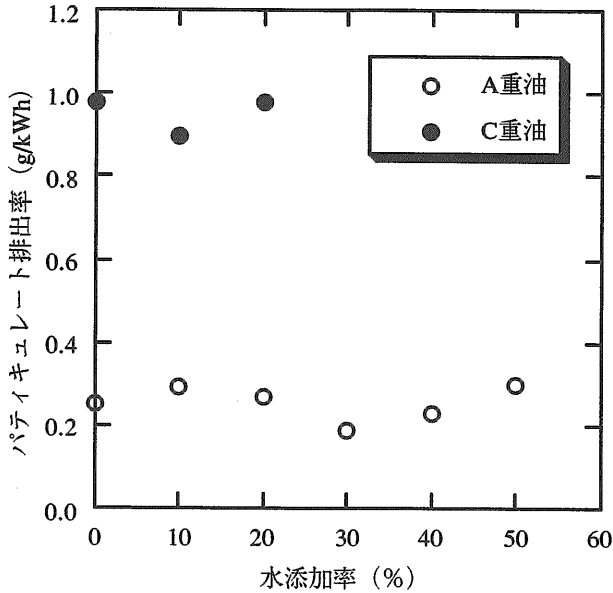


図6 パティキュレート排出量に対する水分の影響

影響を与えている。

船舶においても排ガスの規制が実施されることになり、ディーゼル機関の有害排ガスの排出量を決定することが必要である。燃料によってこのように排出量が異なると、試験に使用する燃料をまず決めなければならない。しかし、現状では燃料の着火性に対する規格は決められていない。

現在のところ燃料の着火性がNO_x濃度に与える影響はマクロ的には分かったが、より精密な推定ができる計算式を作ることが必要である。これが出来れば、どのような性状の燃料を使用しても、標準燃料に比較して検討することが可能となる。今後はこれまでに得た実験結果を分析調査して、排ガス組成と燃料性状との関係を明確にし、大気環境保全に役立てたい。

3. 軸トルクによる船用機関のNO_x排出特性

実験用の4サイクル・ディーゼル機関及び負荷変更プログラム機能を付加した水動力計を併用して、機関運転点の変更及び軸トルクの変動に対するNO_x濃度の変化を把握するとともに、同時に記録した機関運転緒元及び筒内圧力波形の連続データを用いて、これらがNO_x濃度に及ぼす影響について研究した。

3.1. 実験装置及び方法

実験機関の主要緒元は表2に示したものと同一である。なお、実験機関における負荷変更及び負荷変動については、水動力計附属水弁の開度設定プログラム機能を有する運転制御装置を使用した。また、実験機関の排ガス計測に当たっては、化学発光式NO_x分析計及び磁気風式O₂分析計を組み合わせ、ISOで定めるNO_x

排出率 (g/kwh) の計算に必要な排ガス流量の算出にあたっては酸素バランス法によった。

3.2. 実験結果及び考察

3.2.1. 機関運転点によるNO_x濃度の変化

船用ディーゼル機関から排出される排ガス中のNO_x濃度は、使用燃料及び大気条件等の外的要因を除外すれば、回転数と軸トルクによって決定される機関運転点に依存すると考えられる。

図7及び図8に実験用4サイクル・ディーゼル機関の軸トルクに対する排ガス中のNO_x濃度及びO₂濃度の変化を示す。

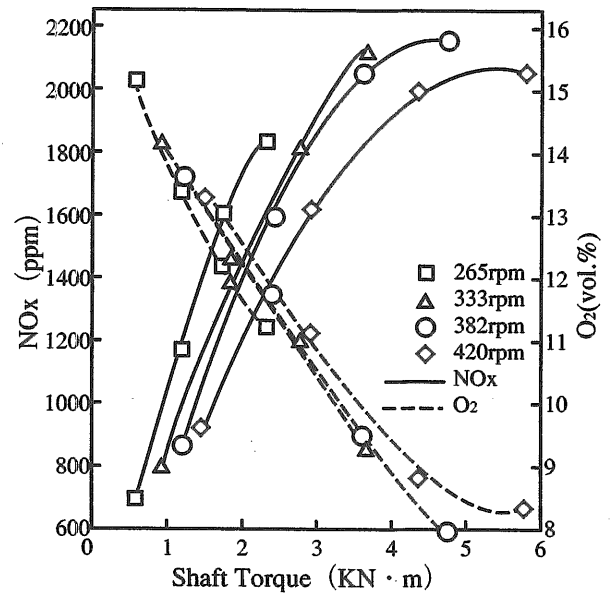


図7 軸トルクに対する実測NO_x濃度、O₂濃度の変化

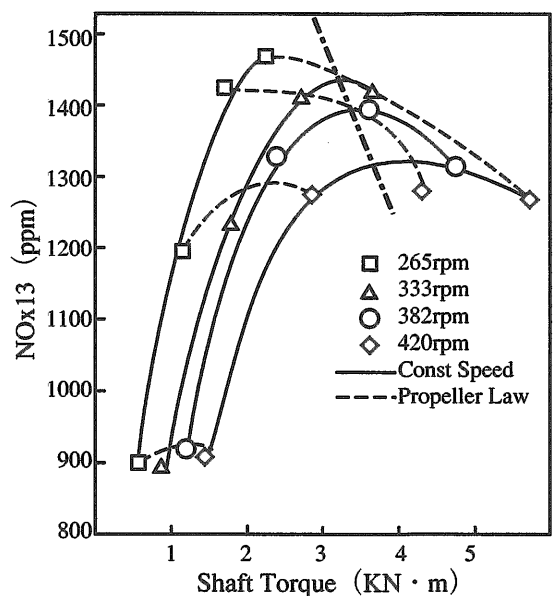


図8 軸トルクに対する換算NO_x濃度の変化

回転数一定運転における軸トルクの増大に対して、実測NO_x濃度は急激に増加した後、飽和傾向を示したが、O₂濃度は一律に減少した。また、同一軸トルクにおける回転数の上昇に対して、実測NO_x濃度は減少し、O₂濃度は僅かに増加した。他方、回転数一定運転における軸トルクの増大に対して、換算NO_x濃度（酸素濃度13vol.%下に補正したNO_x濃度）は、一旦急激に増加後、緩やかに減少した。なお、各定速特性において換算NO_x濃度を最大にする軸トルクの値はほぼ等しい範囲に収まった。

結果から、実験機関における換算NO_x濃度は、軸トルクの増大に対して、低出力域では増加傾向となり、高出力域では反対に減少傾向を示す。図9に軸トルクの増大に伴い、換算NO_x濃度が減少する実験機関の運転範囲を斜線部分で示す。

傾向から推察するに、4サイクル・ディーゼルに主機関を装備する船舶からの排ガス中の換算NO_x濃度は、高出力において大洋航行中の海象変化に伴う船体抵抗の増大に対しては減少し、出入港に伴う港内速力時の操舵に伴うプロペラ抵抗の増大に対しては増加すると考えられる。また、FPP（固定ピッチプロペラ）船とCPP（可変ピッチプロペラ）船では港内速力に対する機関運転点は相違するため、増減速に伴う換算NO_x濃度の変化は異なり、一般的にCPP船でNO_x変化率が大きくなると予想される。

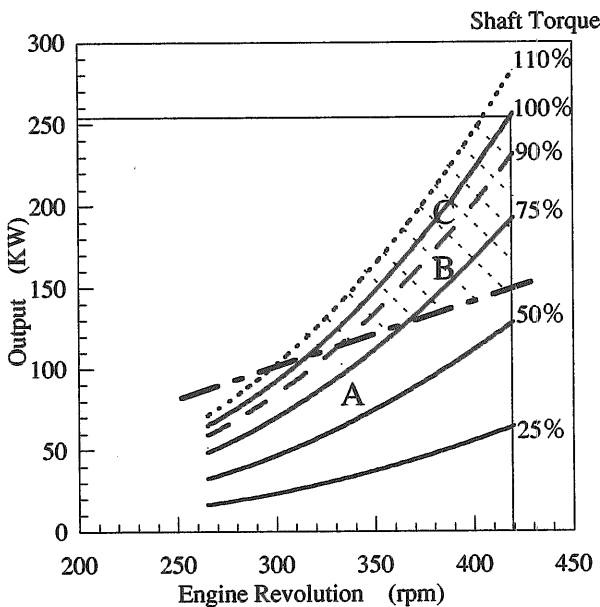


図9 軸トルクの増大に伴い換算NO_x濃度が減少する運転範囲

3.2.2. 軸トルク変動によるNO_x濃度の変化

軸トルク変動の影響による排ガス中のNO_x濃度の応答変化を把握する目的でガバナーのDroop特性によ

る回転数一定運転条件下で、軸トルク変動の振幅及び周期の組合せを変更をして、機関運転緒元及び特定排ガス成分の連続測定を行った。

図10は実験機関の低出力域（図9のA点）及び高出力域（同B点）における矩形波状軸トルク変動（周期；2分、振幅；±10%）に対するNO_x濃度の応答変化例である。また、図11～図13に当該軸トルク変動時における機関運転データの変化例を示す。換算NO_x濃度は低出力域では軸トルクの増減に応じた正応答を示し、高出力域では軸トルクの増減に対して逆応答を示した。また、軸トルク変動に伴う換算NO_x濃度は予想される変化幅を越えて変動し、特にその傾向は低出力域において顕著であった。

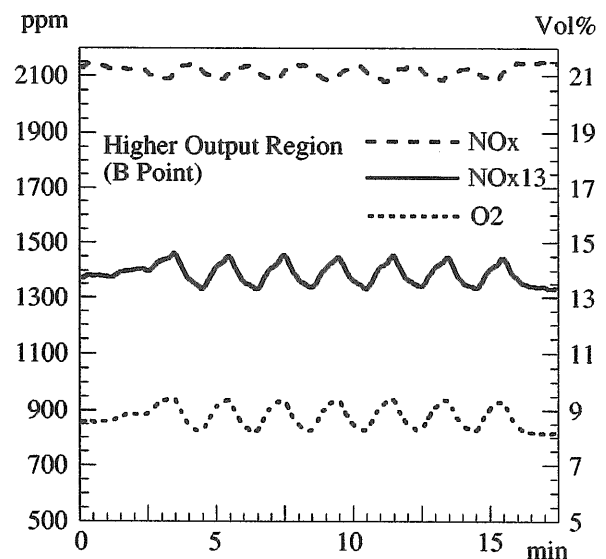
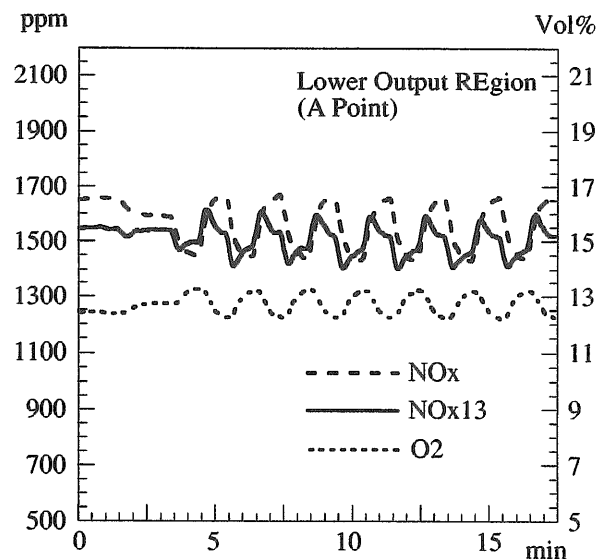


図10 軸トルク変動（周期2分、振幅±10%）に対するNO_x濃度およびO₂濃度の変化

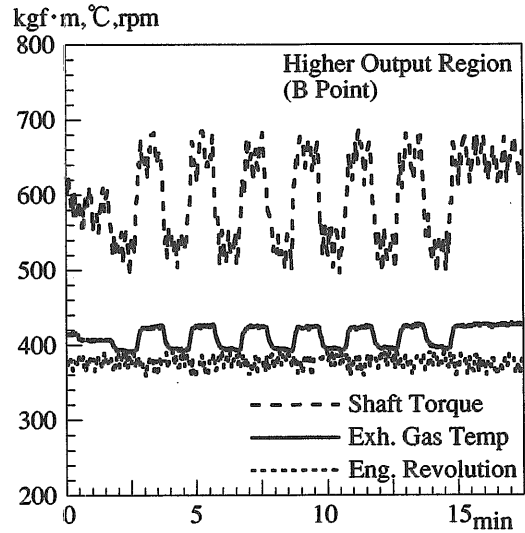
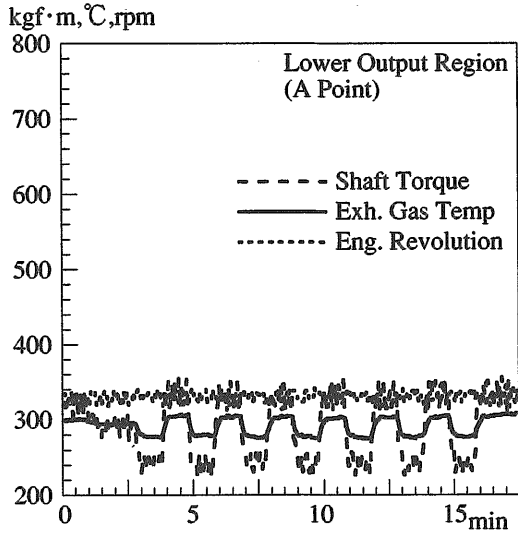


図11 軸トルク変動(周期2分、振幅±10%)に対する排気温度および回転数の変化

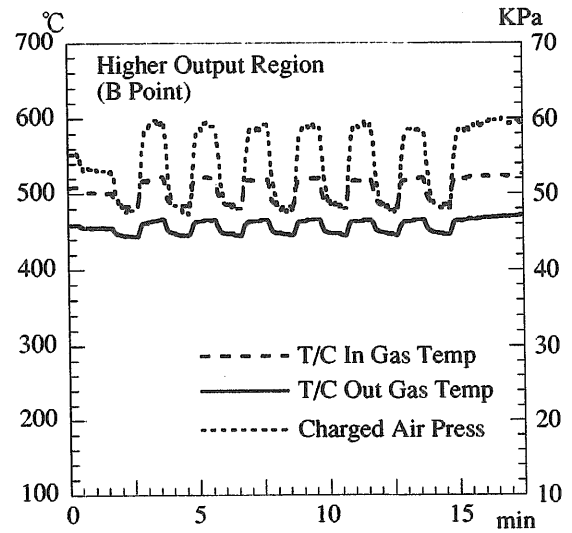
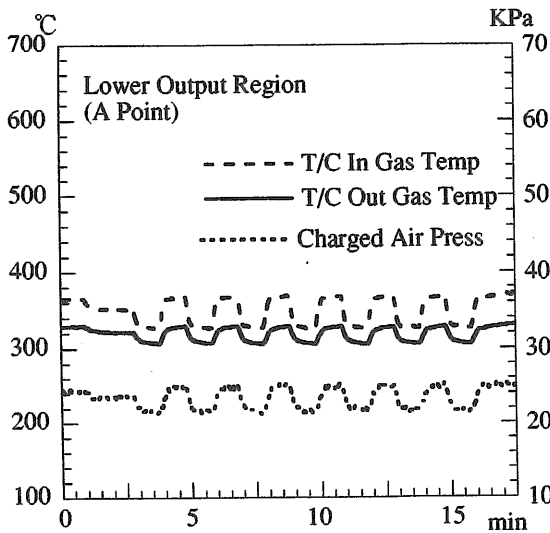


図12 軸トルク変動(周期2分、振幅±10%)に対するT/C前後排気温度および給気圧力の変化

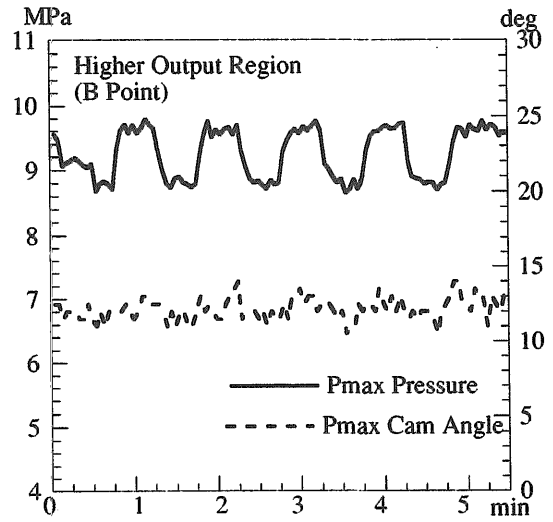
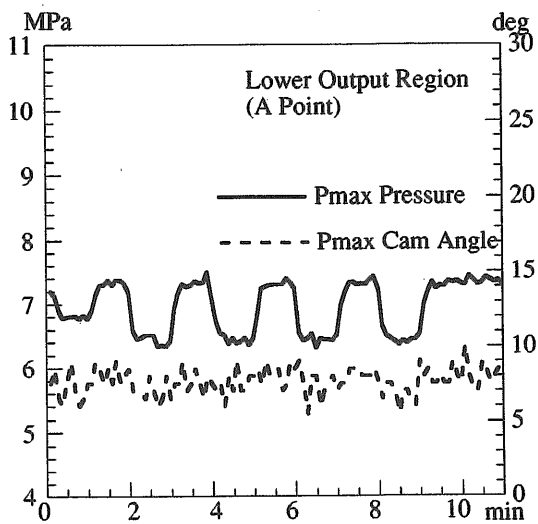


図13 軸トルク変動(周期2分、振幅±10%)に対する筒内最高圧力及び同角度位置の変化

一方、図14は高出力域（図9のC点）における矩形波

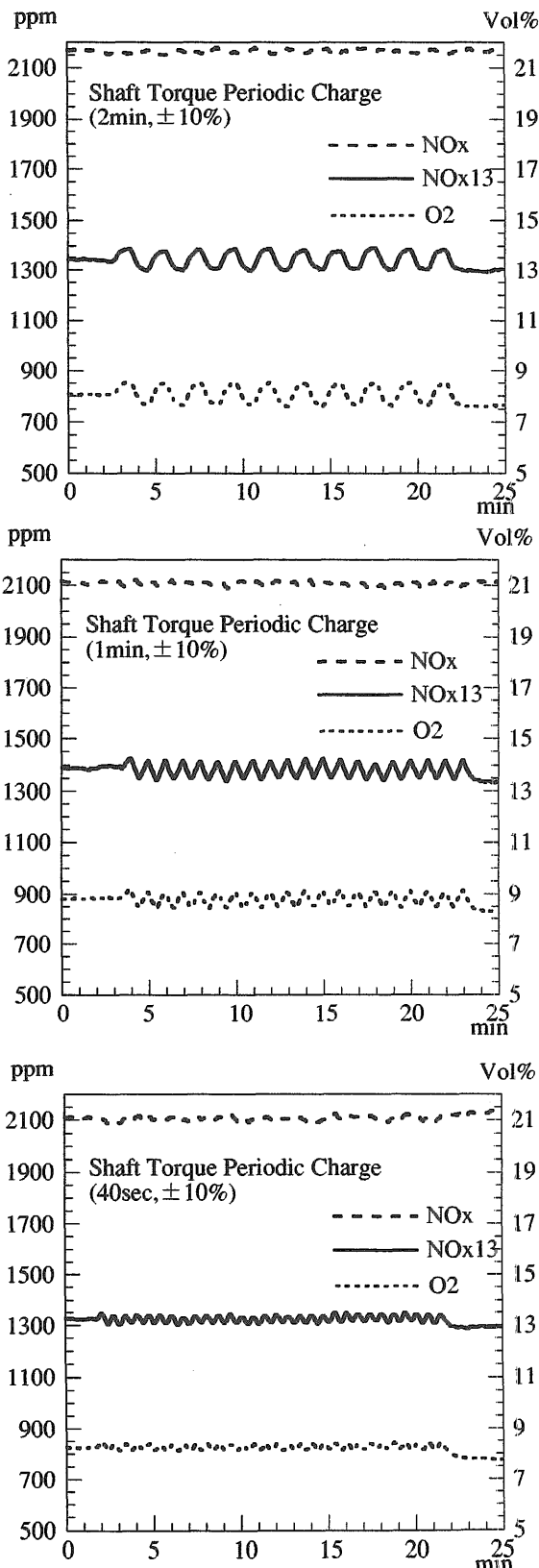


図14 高出力域（C点）における軸トルク変動周期の変更に伴うNO_x濃度、O₂濃度の変化

状軸トルク変動（振幅；±10%）の周期変更（2分、1分、40秒）に対するNO_x濃度の応答変化例である。結果から、軸トルク変動の周期短縮に従い、NO_x換算濃度の変動幅の減少が確認された。

連続撮取した筒内圧力変化を含む運転データから、機関の燃焼状態は軸トルク変動に対応し、過給機も極めて早く追従すると考えられる。従って、軸トルク変動の周期短縮に伴うNO_x換算濃度の変動幅の減少は測定器の応答遅れ時間が原因であり、また、軸トルク変動の周期が大なる場合におけるNO_x換算濃度の変動幅の増大は、NO_x測定器及びO₂測定器の応答遅れ時間の相違により、過度的に残留O₂濃度補正が不適正に働く影響によるものと思われる。

しかしながら、周期的な軸トルク変動に対する実測NO_x濃度及び換算NO_x濃度の平均は、振幅及び周期に拘わらず、軸トルク変動の平均値に対応した実測NO_x濃度及び換算NO_x濃度にそれぞれ匹敵することから、軸トルク変動を伴うNO_x濃度の評価に当たっては、対応する平均負荷状態のNO_x濃度の適用が可能と考えられる。

3.2.3. （最高圧力/軸トルク）の比とNO_x排出率の相関

船用機関に対する排ガス規制値は、ISOで定める計算式による単位出力当たりNO_x排出率（g/kwh）が基礎となる。NO_x排出率は機関の運転条件及び燃焼状態に影響を受けると考えられるため、それぞれの代表要素である軸トルク（T_q）及び筒内圧力変化における最高圧力（P_{max}）を選び、NO_x排出率との関係について検討した。

図15は実験機関の船用特性に対応するP_{max}/T_qの比とNO_x排出率の相関である。P_{max}/T_qの値は機関負荷率の増大に従い減少したが、同一船用特性におけるNO_x排出率とは比例関係を示した。また、同一回転数における軸トルクの減少に対して、P_{max}/T_qの値は増加し、これに伴って機関負荷率50~100%の間のNO_x排出率は増加した。なお、この傾向は図9に斜線を施した運転範囲で極めて良く成立した。

これらのことから、船用4サイクル機関の高出力域ではP_{max}/T_qの値が大きくなるほどNO_x排出率は増加すると思われる。また、軸トルクが機関の平均有効圧力（P_{max}）と比例関係にあると仮定すれば、NO_x排出率は初期燃焼過程における圧力上昇度に関係すると考えられる。

3.3. まとめ

船用4サイクル・ディーゼル機関の軸トルクによるNO_x排出特性について、要約を述べる。

1) 船用4サイクル・ディーゼル機関の換算NO_x濃度は軸トルクの増大に対して、低出力域では増加するが、

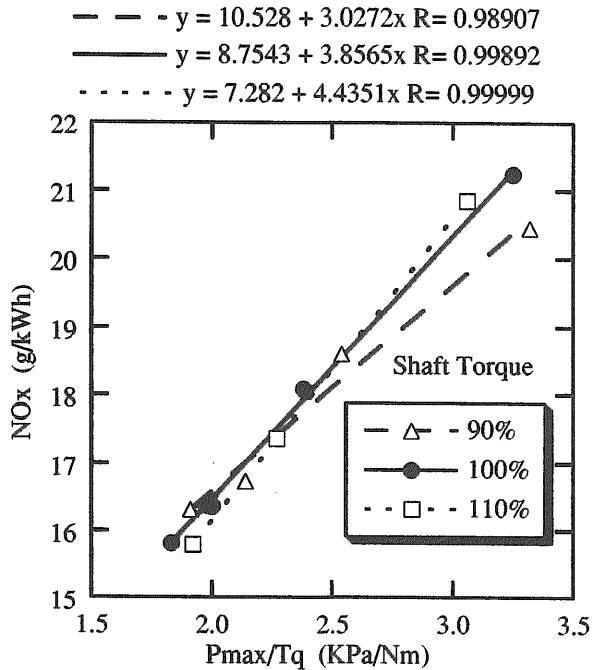


図15 実験機関のPmax/TqとNOx排出率

高出力域では減少傾向を示す。

2) 負荷変動を伴うNOx濃度の評価にあつては、NOx計及びO₂計による応答遅れ時間の影響を考慮する必要があるが、周期的軸トルク変動時におけるNOx濃度は対応する平均負荷状態のNOx濃度と同等として扱える。

3) 船用特性におけるNOx排出率はPmax/Tqと比例する傾向にあり、この関係は高出力域の運転範囲において良く成立する。

4) Pmax/TqすなわちPmax/Tmeの減少がNOx排出率の低減に繋がると考えられることから、着火遅れを短縮するとともに、最高圧力を抑制する燃焼制御方式が、NOx低減方策として有効と思われる。

4. 乳化燃料による船用機関からの排ガス特性

従前より船用機関から排出されるNOxの低減方式として乳化燃料の有効性が知られている。しかしながら、乳化燃料の使用に伴うN₂O (亜酸化窒素)、HC (炭化水素)、CO (一酸化炭素)、PM (粒子状浮遊物質) 等の大気汚染物質の挙動は殆ど知られていない。また、機関の運転条件及び燃料油種の相違が乳化燃料の効果に及ぼす影響についても十分把握されていない。そこで、船用4サイクル・ディーゼル機関を使用して、運転条件、使用燃料及び加水率 (燃料に対する水の容積比) の変更に伴う種々大気汚染物質の排出特性を調査し、効果的な乳化燃料の適用法について研究した。

4.1. 実験装置及び方法

本研究についても表2に示した実験機関を使用した。なお、機関運転条件は、固定ピッチプロペラの主機関に使用された場合に得られる船用特性及び、発電機の原動機に使用された場合に得られる発電機特性、これら二つの代表的な特性に基いて、機関負荷率を25%から100%までを25%間隔で変更した。

また、乳化燃料の基材には、表4に示すA重油及びC重油を使用した。なお、C重油及びA/C混合油 (混合比1:1) の使用にあつては、機関入口における動粘度が加水率0%の場合に12~15cStとなる様に加熱調整した。

乳化燃料の製造は図16に概要を示す装置を使用し、加水率設定はA重油及びA/C混合油のそれぞれに対して30%及び45%とした。また、系統内における乳化燃料の油水分離を防止する目的で、燃料に対する容積比0.5%として添加剤を注入した。

排ガス成分の計測については、化学発光式NOx分析計、非分散型赤外線ガス相関式N₂O分析計、磁気風式O₂分析計、非分散型赤外線CO/CO₂分析計、及び水素炎イオン化式HC分析計を使用した。また、PMの測定については図4に概要を示したダブル・ダイリュージョ

表4 使用燃料の性状

	Bunker A	Bunker C
Density @15 C (g/cm ³)	0.8644	0.9745
Kinetic Viscosity @50 C (cSt)	1.97	187.8
Flash Point (C)	78	100
Carbon Residue (mass%)	0.53	14.3
Water (vol.%)	<0.05	0.05
Ash (mass%)	<0.01	0.01
Sulphur (mass%)	0.04	2.82
Nitrogen (mass%)	0.01	0.2

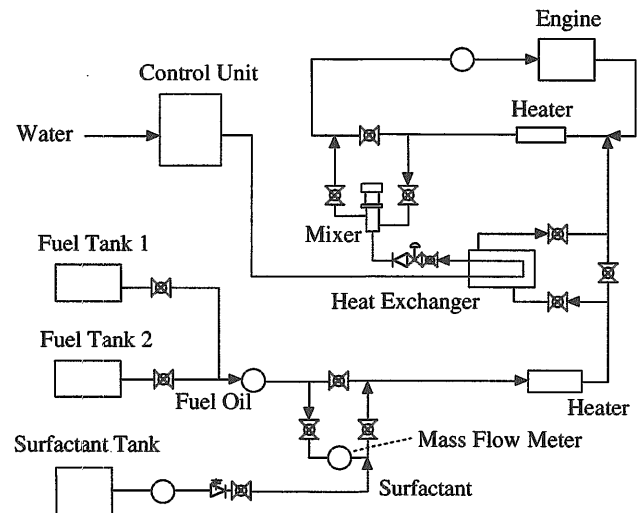


図16 乳化燃料製造装置のシステム概要

ン・トンネル方式により、サンプリング時間を10分としてフィルター上に捕集し、ISOで定める条件下（温度25℃、湿度50%）の恒温恒湿槽に24時間静置した後、電子天秤で秤量した。

4.2. 実験結果及び考察
4.2.1. NOxの排出特性

A重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性及び発電機特性の機関負荷率に対する実測NOx濃度及び換算NOx濃度（酸素濃度13vol.%下に補正したNOx濃度）の変化を図17及び図18に示す。両運転特性ともに、高負荷域では加水率の増加に従ってNOx低減率は大きくなり、加水率45%でNOxは約30%低下した。しかし、低負荷域では顕著なNOxの低減は見られなかった。

筒内圧力変化のデータを用いた燃焼解析から、低負荷域におけるNOx低減率の低下は加水による着火遅れの増加が原因と思われる。乳化燃料中の水の気化熱は燃焼ガス温度を低下してNOxの発生を抑制するが、低負荷域では着火遅れを増大し、予混合燃焼時のNOx発生率を高めるため、効果の一部が損なわれると考えられる。なお、船用特性及び発電機特性におけるNOx発生率の相違は、爆発的燃焼期間における燃焼ガス及びNOx生成に関わる反応時間の相違によるものと考えられる。

A重油及びC重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性の機関負荷率に対する実測NOx濃度及び換算NOx濃度の変化を図19及び図20

に示す。全般的に、A/C混合油基材の乳化燃料より、A重油基材の乳化燃料の方が、NOx低減率が大きい。また、低負荷域より、高負荷域の方がNOx低減率が大きい。

A重油及びA/C混合油におけるNOx低減率の変化の相違には、加水に伴う燃焼状態の良否が関与していると思われる。一般的に、燃料の粘性が高くなるほど燃料の微粒子が損なわれて燃焼が悪化するが、低質油ほ

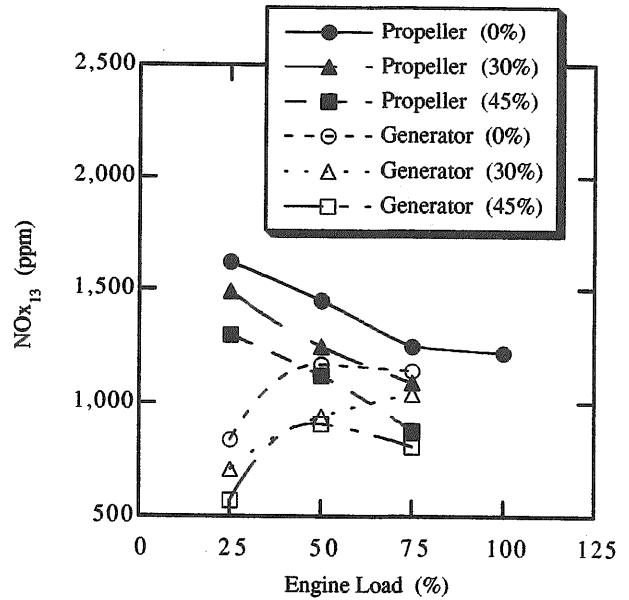


図18 運転特性の違いによる換算NOx濃度の変化

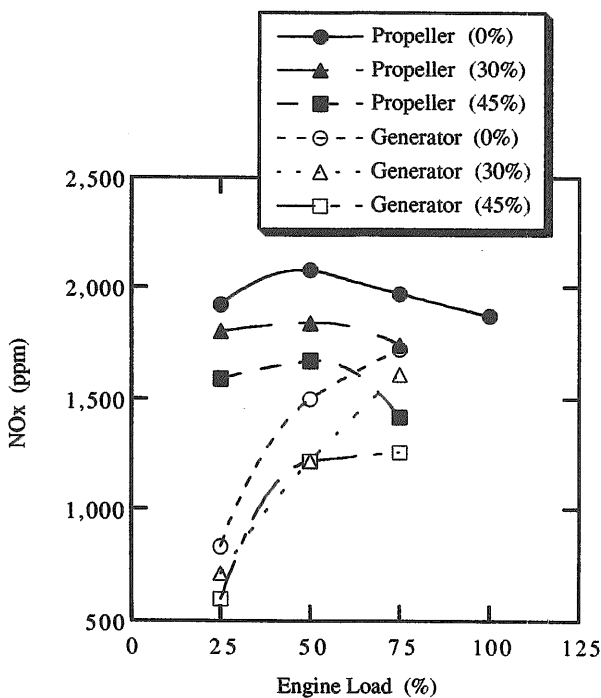


図17 運転特性の違いによる実測NOx濃度の変化

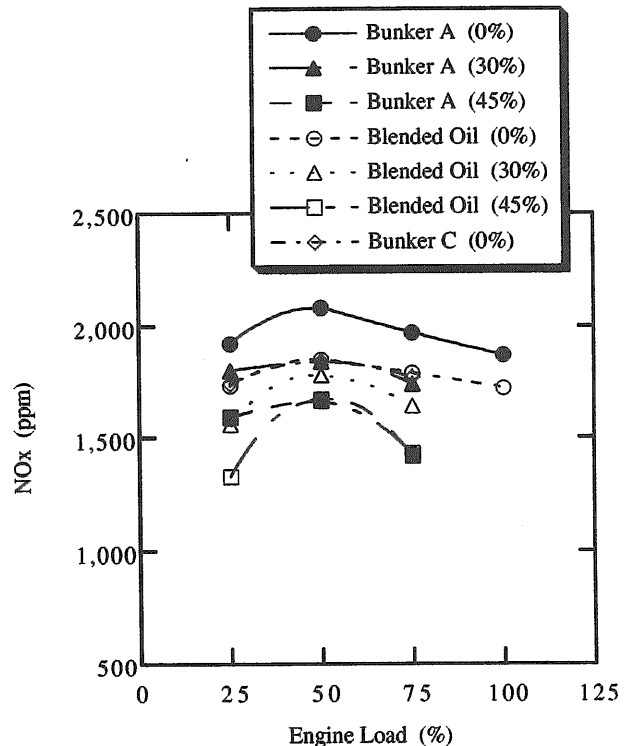


図19 使用燃料の違いによる実測NOx濃度の変化

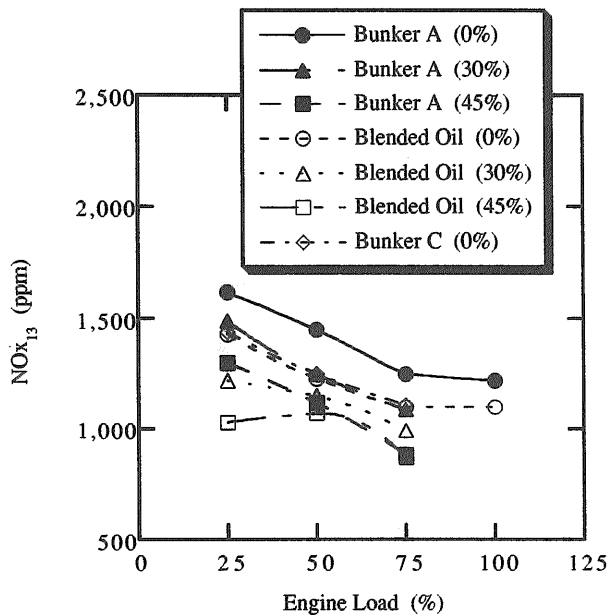


図20 使用燃料の違いによる換算NOx濃度の変化

ど加水による動粘度の増加が著しく、低負荷域では燃焼の悪化が著しくなるため、NOx発生率が低下すると考えられる。

4.2.2. NOxの排出特性

A重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性及び発電機特性に対するN₂O濃度の変化を図21に示す。N₂O濃度が測定器の検出限界に近い極めて低い値であったことから、運転特性における明瞭な相違及び加水による低減効果は認識出来なかった。

A重油及びC重油を基材とした乳化燃料の加水率を

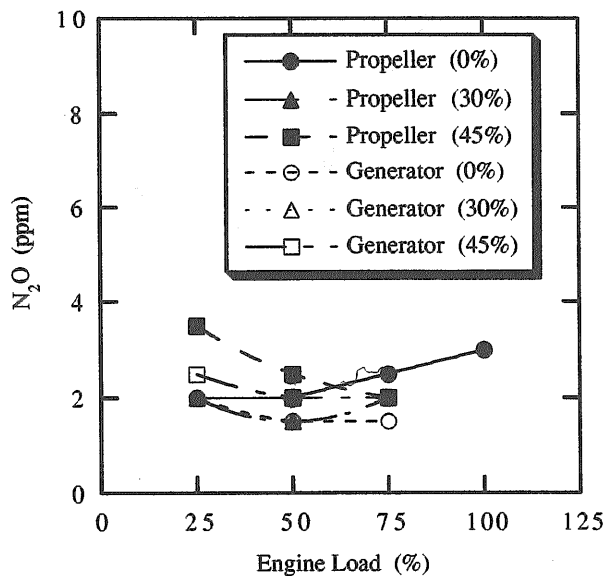


図21 運転特性の違いによるN₂O濃度の変化

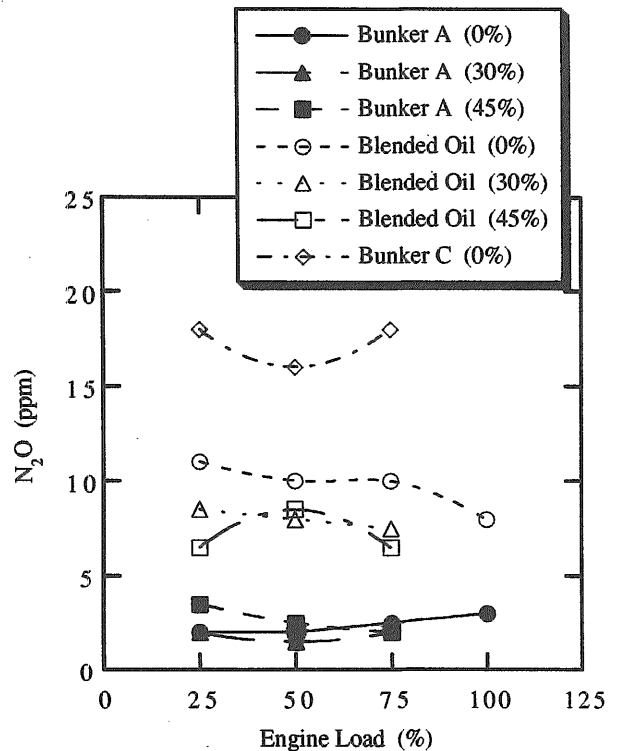
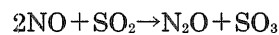


図22 使用燃料の違いによるN₂O濃度の変化

パラメータとして、船用特性に対するN₂O濃度の変化を図22に示す。N₂O濃度は燃料性状の悪化に伴って増大し、A/C混合油ではA重油の3~4倍、C重油ではA重油の7~8倍となった。また、A/C混合油では乳化燃料によるN₂Oの低減効果が認められた。

低質油の燃焼に伴うN₂O濃度の増加には、粗悪燃料中のS分の介在が考えられる。次式の化学平衡反応に示す排ガス中のSO_xによるNO_x還元作用がN₂Oの生成に関与すると思われる。



また、加水に伴うN₂Oの低減効率とNO_xの低減効率がほぼ比例する関係から、乳化燃料によるNO_x発生率の減少分がNO_x発生率の減少にも寄与すると考えられる。

4.2.3. CO₂及びO₂の排出特性

A重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性及び発電機特性に対するNO_x濃度及びO₂濃度の変化を図23及び図24に示す。

両運転特性ともに、加水率の増加に従ってCO₂濃度は増加し、O₂濃度は減少したが、この傾向は特に発電機特性において顕著であった。なお、CO₂濃度及びO₂濃度は互いに相補的な関係にあり、両者の和は常に約18%一定となった。

加水率の増加に従って排ガス温度及び給気圧力が低下する現象から、乳化燃料の使用によるO₂濃度の減少は、燃料中の水分による気化熱が過給機の駆動源であ

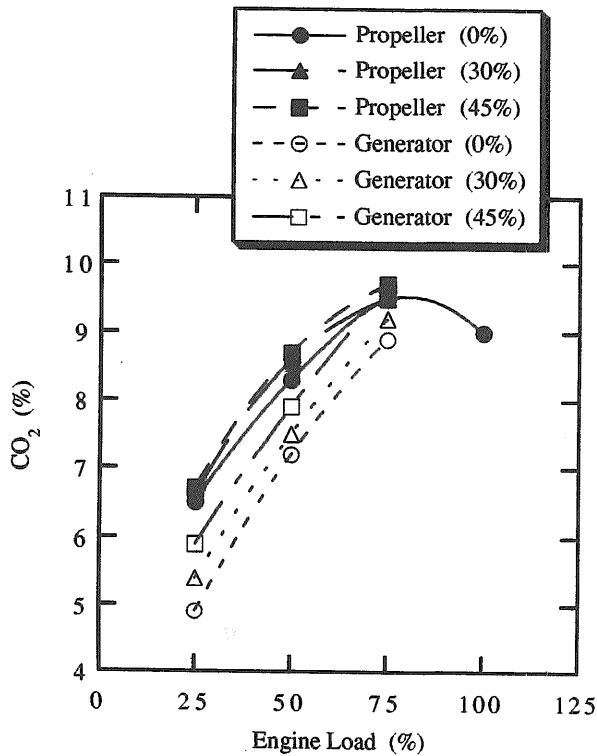


図23 運転特性の違いによるCO₂濃度の変化

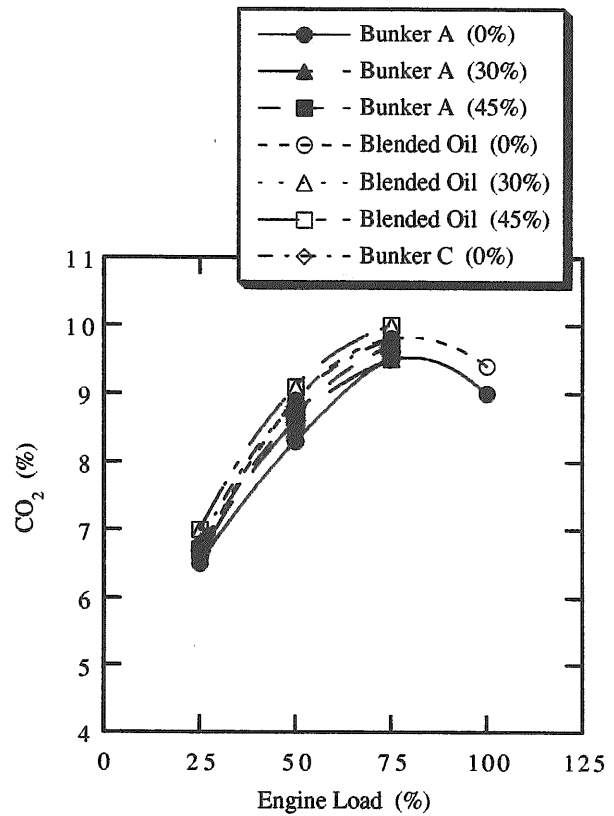


図25 使用燃料の違いによるCO₂濃度の変化

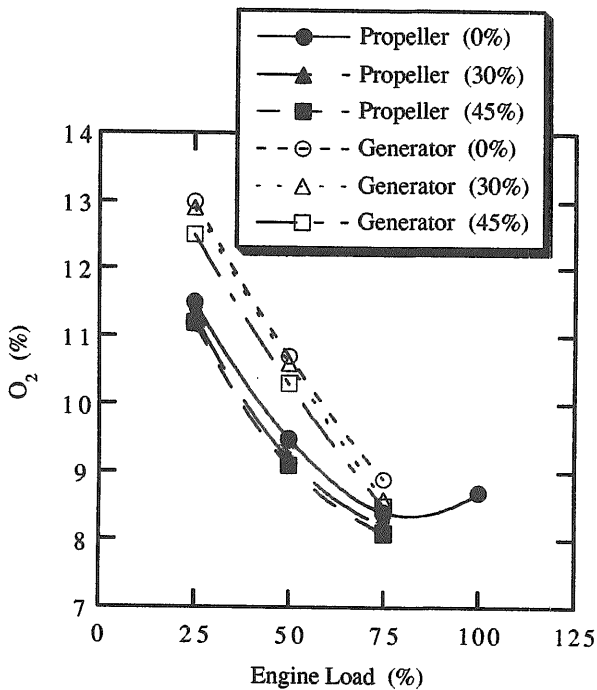


図24 運転特性の違いによるO₂濃度の変化

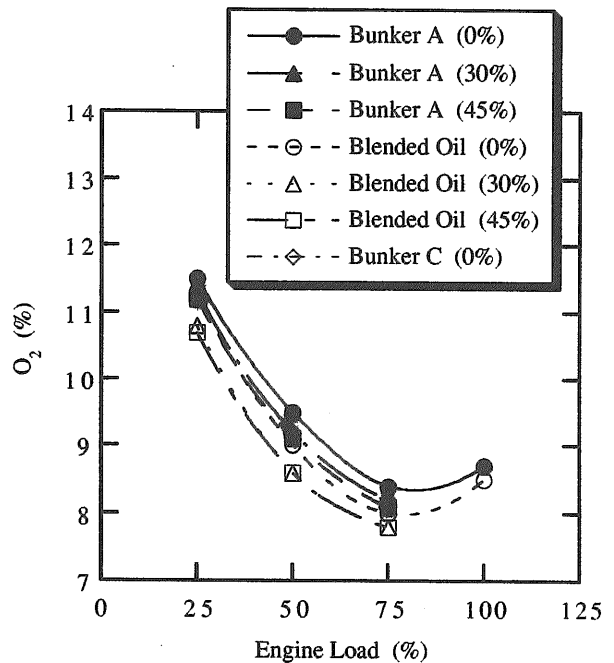


図26 使用燃料の違いによるO₂濃度の変化

る排ガスエネルギーの減少を招き、過給機回転数が低下して、給気量が減少するためと考えられる。

なお、船用特性及び発電機特性におけるCO₂濃度及びO₂濃度の相違は、機関運転状態の空気過剰率の違いが原因と考えられる。

A重油及びC重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性に対するCO₂濃度及びO₂濃度の変化を図25及び図26に示す。全負荷域でA重油、A/C混合油、C重油の順にCO₂濃度が増加し、O₂濃度は

減少した。これは、燃焼改善の可能性も否定はできないが、低質油になるほど炭素分が増加するためと思われる。また、加水率増加に伴うCO₂濃度の増加、O₂濃度の減少の傾向は見られなかった。

4.2.4. COの排出特性

A重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性及び発電機特性に対するCO濃度の変化を図27に示す。両運転特性ともに、加水率の増加に従って、CO濃度は高負荷域で減少し、低負荷域で増加した。特に、発電機特性では低負荷域において加水率の増加に伴うCO濃度の増大傾向が顕著であった。

A重油及びC重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性に対するCO濃度の変化を図28に示す。全負荷域において、燃料油性状の劣化に伴うCO濃度の増加傾向が認められたが、加水による影響に差異は見られなかった。

CO濃度の増減は燃焼状態の良否に密接に関係することから、低負荷域における加水率の増加及び燃料油性状の劣化は燃焼の悪化を招くと考えられる。

なお、負荷率変更に伴うCO濃度の変化には、加水に伴う燃料液滴の微粒化混合に関わる物理的効果の他、高温ガス中の吸熱化学反応が影響すると思われる。カム軸駆動による燃料噴射ポンプでは、負荷の増加に伴ってポンプの吐出圧力が上昇する他、加水率の増加に従って燃料噴射圧力が上昇する。そのため、高負荷域では噴霧燃料と空気の混合が促進されて燃焼が改善されCO濃度が減少するが、低負荷域では燃料粘度の増

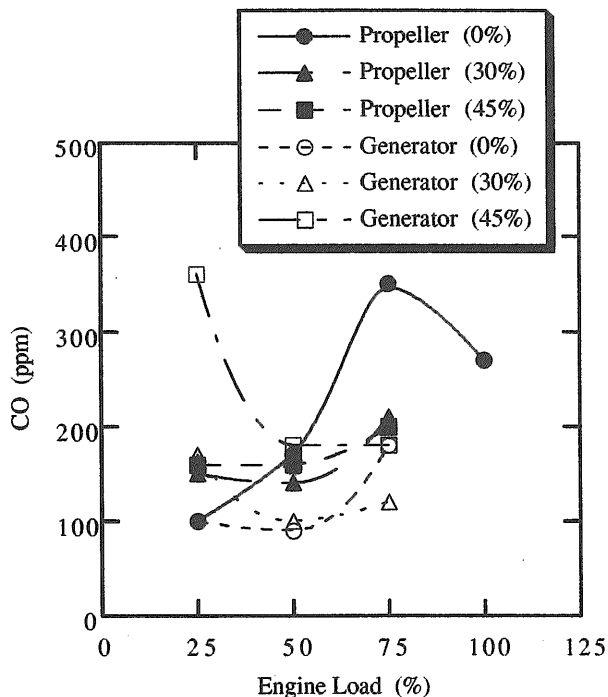


図27 運転特性の違いによるCO濃度の変化

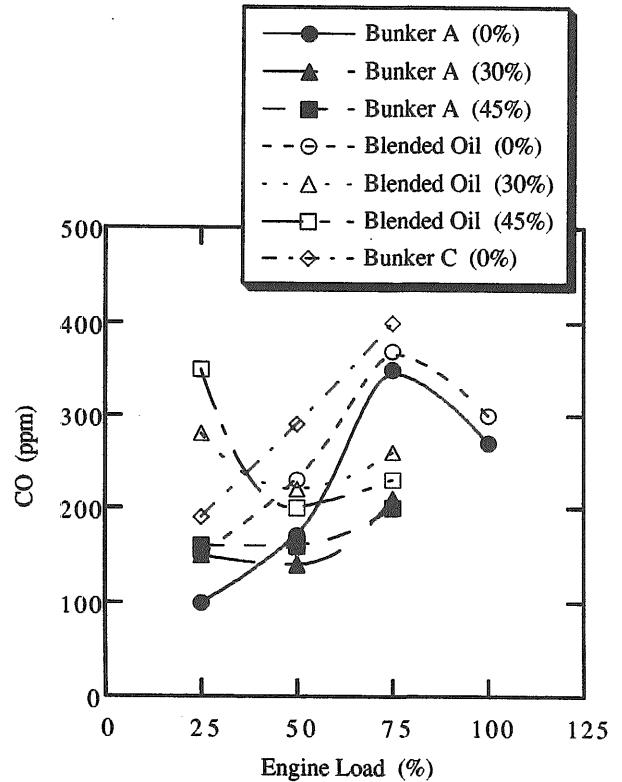
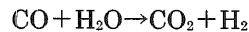


図28 使用燃料の違いによるCO濃度の変化

加により燃料液滴の微粒化が不十分となり、着火遅れの影響と相まって燃焼が悪化し、CO濃度が増加するものと推測される。一方、高温ガス中では次式に示す水性ガス反応が起きるため、高負荷域においてCO濃度が減少した可能性も考えられる。



4.2.5. HCの排出特性

A重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性及び発電機特性に対するHC濃度の変化を図29に示す。両運転特性におけるHC濃度は、加水率の増加に従って、高負荷域では僅かに減少したが、低負荷域では逆に増加した。

A重油及びC重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性におけるHC濃度の比較を図30に示す。A重油に比較して、A/C混合油では低負荷域において加水率の増加に伴うHC濃度の増加が顕著であった。

燃料の熱分解生成物であるHCは燃焼時の高温持続時間の不足、すなわち不完全燃焼により増大すると考えられる。従って、乳化燃料の使用は、高負荷域では燃焼改善効果を期待出来るが、低負荷域では燃焼悪化を惹き起こす可能性が高く、特に、低質油においてその傾向が強いと思われる。

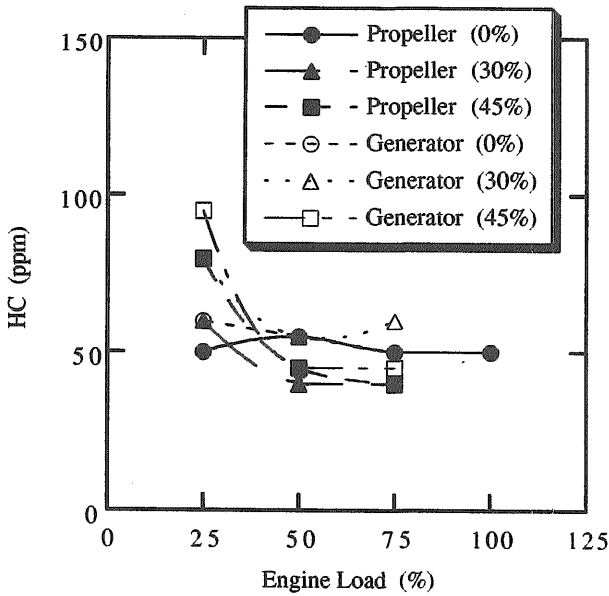


図29 運転特性の違いによるHC濃度の変化

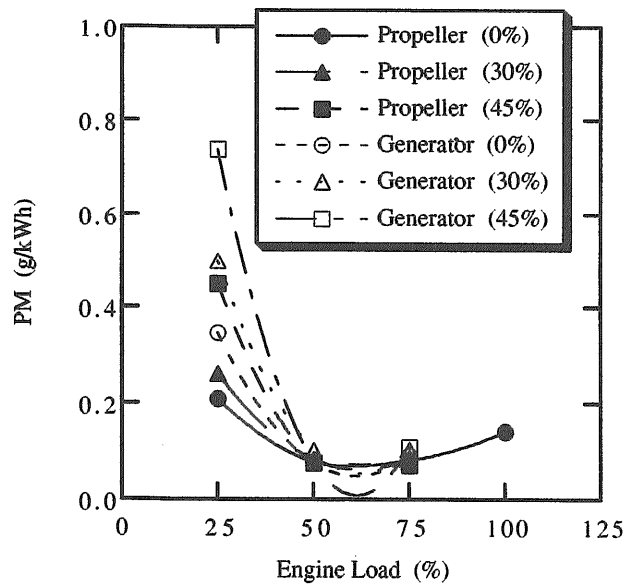


図31 運転特性の違いによるPM排出率の変化

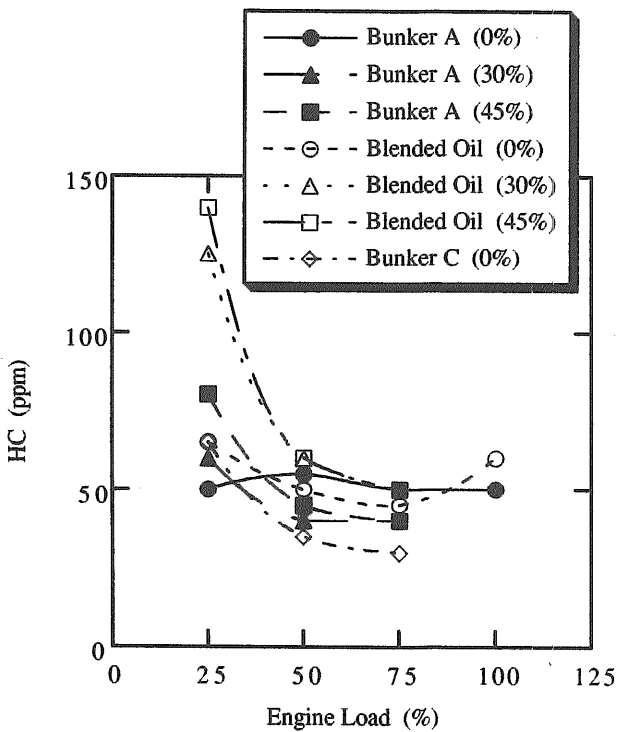


図30 使用燃料の違いによるHC濃度の変化

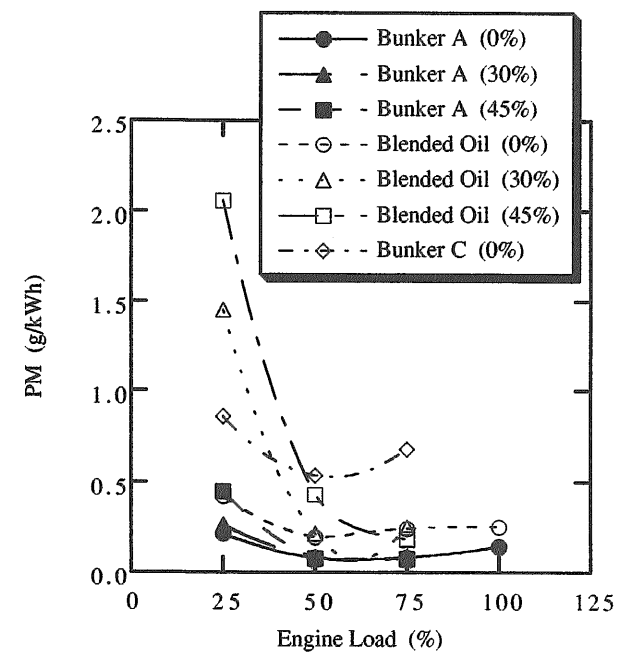


図32 使用燃料の違いによるPM排出率の変化

4.2.6. PMの排出特性

A重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性及び発電機特性に対するPM排出率の変化を図31に示す。両運転特性ともに、機関負荷率が50~75%の間でPM排出率は最小値を示した。また、PM排出率は加水率の増加に対して、機関負荷率50%以上の高負荷域では殆ど差が無かったが、低負荷域では増大した。なお、この傾向は発電機特性で顕著となっ

た。

A重油及びC重油を基材とした乳化燃料の加水率をパラメータとして、船用特性に対するPM排出率の変化を図32に示す。使用燃料の低質化に伴ってPM排出率は増加したが、特に低負荷域では加水率の増加によるPM排出率の増大傾向が顕著であった。

PMの排出特性はHCの排出特性と類似したが、PMには燃料を起源とする高分子系の炭化水素を主成分とするSOF(可溶性有機化合物)が多量に含まれ、且つ燃焼状態と強い因果関係を有するため、共通傾向を生

じるものと思われる。なお、低負荷域では乳化燃料の使用に伴う燃焼火炎の温度低下がPM排出率を増加させる原因と考えられる。

4.3. まとめ

船用4サイクル・ディーゼル機関における乳化燃料の使用に伴う有害排ガス成分の排出ガス特性について要約を述べる。

- 1) NO_x濃度は加水率の増加に従って減少したが、NO_x低減率は機関負荷率の減少に対して、A重油では低下し、A/C混合油では増加した。燃料粘度の増減は油粒と空気の子混合気形成過程に関係する他、燃焼状態にも影響を与え、NO_x発生率を変化させると考えられる。
- 2) N₂O濃度は燃料性状の低質化により増加し、乳化燃料の使用に伴って減少した。粗悪燃料油によるN₂O濃度の増加は、SO_xによるNOの還元作用が関与すると考えられる。
- 3) CO₂濃度及びO₂濃度の関係は互いに相補的であり、CO₂濃度は加水率の増加に従って増加した。乳化燃料の使用に伴うO₂濃度の減少は、水の蒸発潜熱が過給機の駆動源である排ガス・エネルギーを低下し、給気量の減少を招くためと考えられる。
- 4) CO濃度は加水率の増加に従って、低負荷域で増加したが、高負荷域では減少した。また、CO濃度は燃料性状の悪化に対して、全般的に増加した。高負荷域における乳化燃料による濃度の減少は、燃料液滴の微粒化混合効果の他、高温ガス中の吸熱化学反応の影響が考えられる。
- 5) HC濃度は加水率の増加に従って、低負荷域で増加したが、高負荷域では顕著な差異が無かった。また、HC濃度は燃料性状の低質化によっても増加し、特に低負荷域において顕著であった。
- 6) PM排出率はHC濃度と類似した排出特性を示した。

4.4. 結言

船用機関の排ガス成分に及ぼす関係因子及び影響度の把握は、船舶からの有害排出物質の適正な評価及び抑制方法を検討する上で極めて重要である。船用機関の運転条件及び燃焼状態が排ガス成分に与える影響については、実験を通じて少なからず知見が得られたが、大気条件及び使用燃料等の外的要因を含めて有害物質の排出に関与する諸影響の解明を図り、将来のNO_x低減技術に資するためには、今後も実験データの収集解析を基にした研究が必要と思われる。

また、乳化燃料の使用に対しては、機関の運転条件に応じた加水率を選択すれば、CO、HC、PMを増大させることなくNO_x低減を図れることから、有害排ガス成分を総合的に低減する観点から有用な方策であることを再認識したが、一方で低負荷域における燃焼改

善対策の必要性も認識された。問題対策の一助として、高圧燃料噴射の適合性及び機関負荷率に最適な燃料噴射時期について研究する必要がある。

5. 乳化燃料による船用ディーゼル機関の排ガス特性に及ぼす燃料噴射系の影響

乳化燃料運転に適応した燃料噴射系の把握を目的として、実験用の4サイクル・ディーゼル機関の燃料噴射ポンプ、燃料カム及び燃料弁を変更して運転データの比較分析を行い、NO_x低減効果及び燃焼改善効果との関係を検討するとともに、改良した燃料噴射系を利用して高加水率の乳化燃料運転を達成し、その排ガス特性を基に有用性について検証した。

5.1. 実験装置及び方法

実験に用いた船用4サイクル・ディーゼル機関の主要緒元は表2に示したものである。乳化燃料運転の燃焼に影響を及ぼす燃料噴射系の代表としては、主要構成要素である燃料ポンプ及び燃料弁を選び、燃料噴射ポンプは標準装備型に加えて2段階に噴射量を増加した合計3種類について比較し、燃料弁は標準型及び小孔径多孔型の2種類について実験を行った。また、燃料ポンプのプランジャー・ストロークを長くして噴射量を増加した場合は、噴射特性の改良を目的として燃料カム形状も変更した。標準型及び改造型の燃料カムにおけるプランジャーの速度及び揚程線図を図33に示す。

なお、使用した乳化燃料はA重油を基材とし、加水率（燃料に対して混合調整する水の体積比率）及び薬油率（乳化燃料の安定化を図る目的で使用する添加剤の燃料に対する注入比率であり、0.5%とした）の制御には乳化燃料製造装置（セキエマー DND200A）を使用した。

5.2. 実験結果及び考察

5.2.1. 燃料噴射ポンプの噴射特性による影響

燃料の噴射時期及び噴射率は着火時期及び燃焼初期における圧力上昇率に影響を与え、その結果NO_x濃度は変化する。一方、乳化燃料によるNO_x低減率は加水率の上昇に従って一般的に増加することが知られるが、機関に標準装備される燃料噴射ポンプは、噴射容量の制約から高加水率の乳化燃料運転を実現できない。従って、乳化燃料によるNO_x低減効果の向上を図るには、燃料噴射ポンプの噴射量増加を目的とした改造が必要となる。しかしながら、これに伴って燃料噴射特性が変わり、NO_x低減率が減少する場合もあるため、効果的な改造方法に対する知識が求められる。

燃料噴射ポンプの噴射特性が乳化燃料運転に及ぼす影響を把握する目的で、実験機関の標準装備方に変え

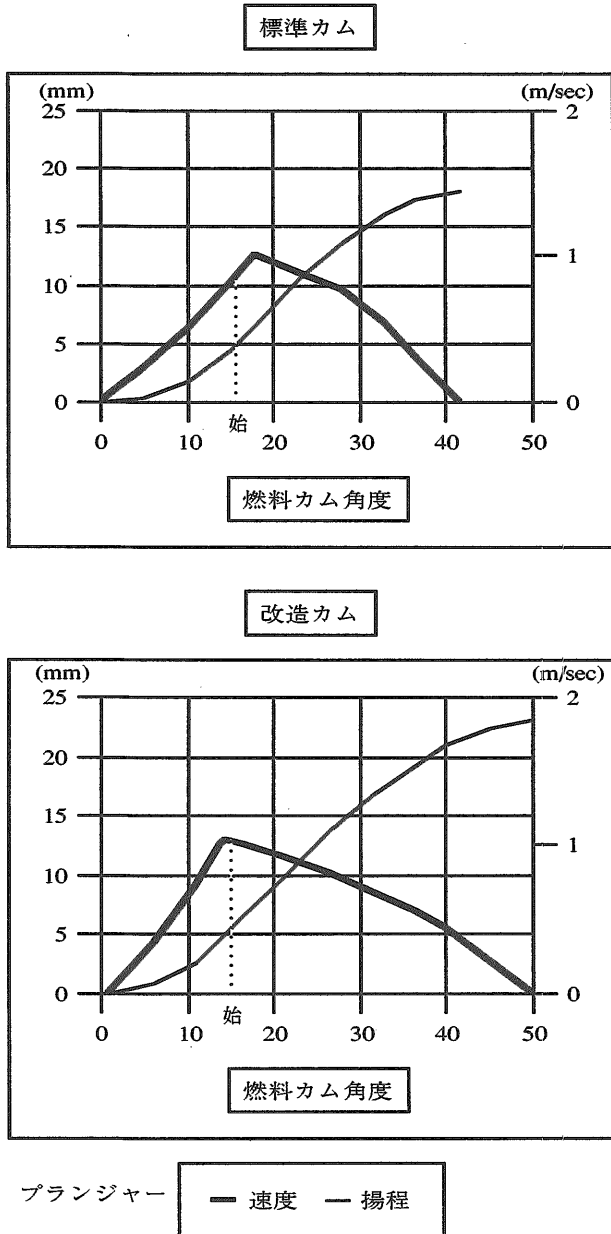


図33 燃料カムによるプランジャー速度揚程線図

て、2種類の噴射量を増加させた燃料ポンプを使用し、排出特性を比較した。

燃料ポンプの仕様（プランジャー径×ストローク、許容圧力）及び燃料カム形状の組合せを下記に示す。但し、燃料噴射開始時期は上死点（TDC）前13度に統一した。

- ① 標準装備型燃料噴射ポンプ（20φ×18mm、83.4MPa）、標準カム
- ② 約20%増量型燃料噴射ポンプ（22φ×18mm、83.4MPa）、標準カム
- ③ 約55%増量型燃料噴射ポンプ（22φ×23mm、117.7MPa）、改造カム

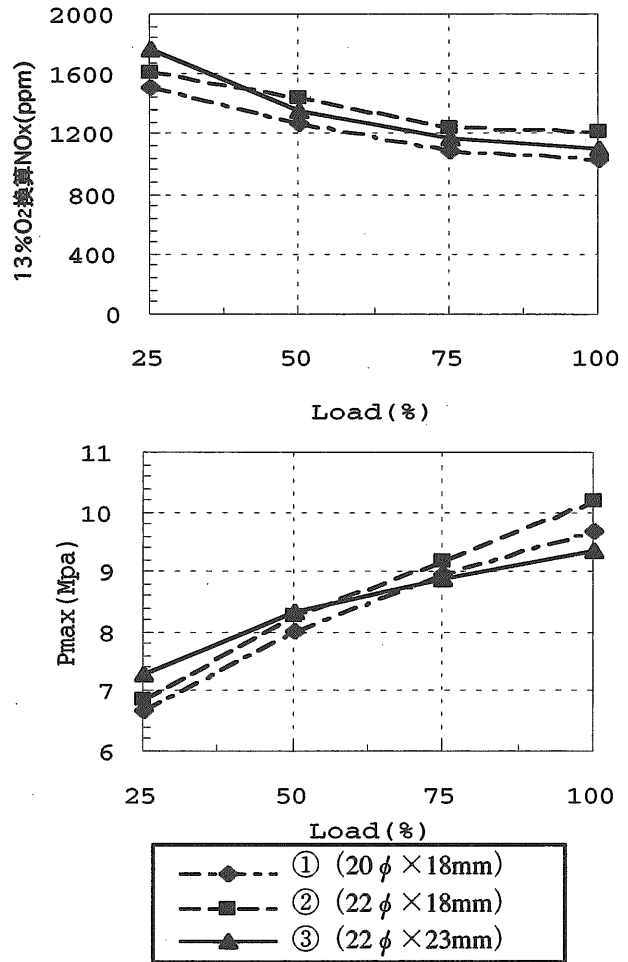


図34 燃料ポンプによるNO_x濃度とPmax（船用特性）

図34に燃料噴射ポンプの相違による船用特性におけるNO_x濃度及び筒内最高圧力（Pmax）の変化を示す。乳化燃料を使用しない場合のNO_x濃度は、負荷全域において標準装備型である①が噴射量増加方である②及び③よりも低く、低負荷域では②の方が③に比べて低いが、高負荷域では③の方が②よりも低かった。また、Pmaxは負荷全域で②よりも①が低く、低負荷域では③よりも②が低い、高負荷域では①及び②より③の方が低かった。なお、燃料消費率は①に比べて②及び③では改善されたが、②及び③の間には有意な差は認められなかった。

一方、乳化燃料を使用した場合の②及び③における負荷率に対するNO_x濃度の変化傾向は乳化燃料を使用しない場合と相似した。船用特性及び発電機特性に対するNO_x濃度の変化例を図35に示す。また、②及び③において乳化燃料を使用した場合のCO及びHC濃度には殆ど差が無く、ともに乳化燃料を使用しない場合に比べて低負荷域では増加し、高負荷域では減少した。図36にそれぞれの場合のCO及びHC濃度の比較例を示す。

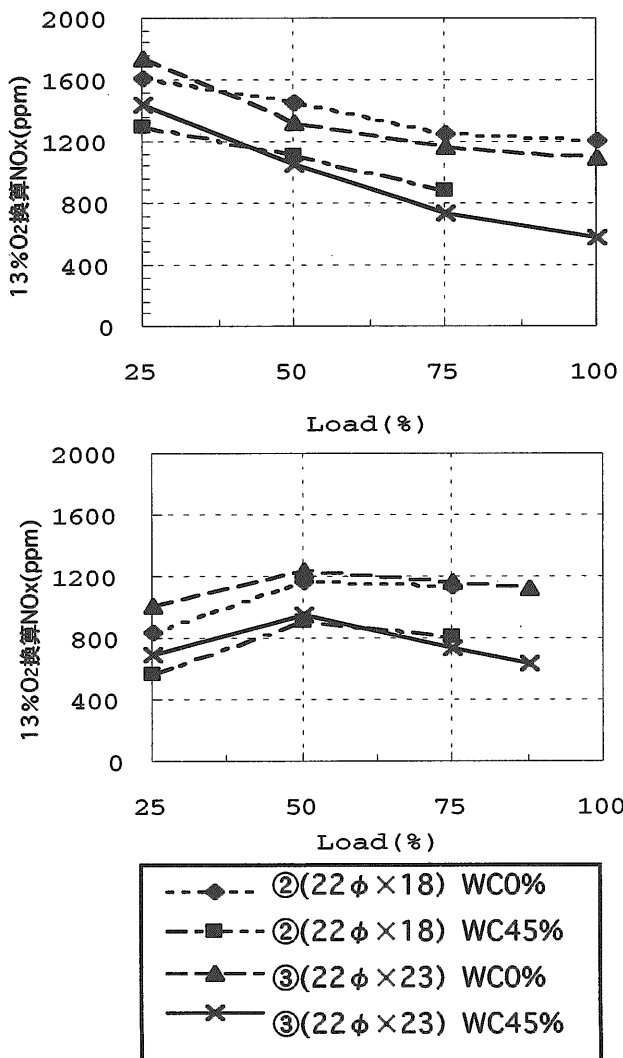


図35 燃料ポンプと乳化燃料によるNO_x濃度 (上: 船用特性、下: 発電機特性)

燃料カムを変更せずに、燃料噴射ポンプ・プランジャー径の拡大により噴射量を増加した②の場合は噴射期間が短縮され、燃料噴射率は増加し、最大熱発生率が上昇して、その結果NO_x発生量が増加したと考え、さらに噴射量の増加を目指した③の場合は、プランジャーの有効ストロークを長くして最大噴射量を増加するとともに、燃料カムプロフィールの変更によりプランジャー速度を調整して、燃料噴射率の抑制を図った。その結果、乳化燃料の使用によるNO_x低減効果は低負荷域では減少したものの、高負荷域では向上し、特にその傾向は船用特性において顕著となった。

5.2.2 燃料弁の噴霧特性による影響

燃料弁の噴孔径及び噴孔数によって噴霧燃料の粒径、到達距離及び分散状態は変化し、燃焼状態は影響を受けて、NO_x濃度に変化すると考えられる。一方、

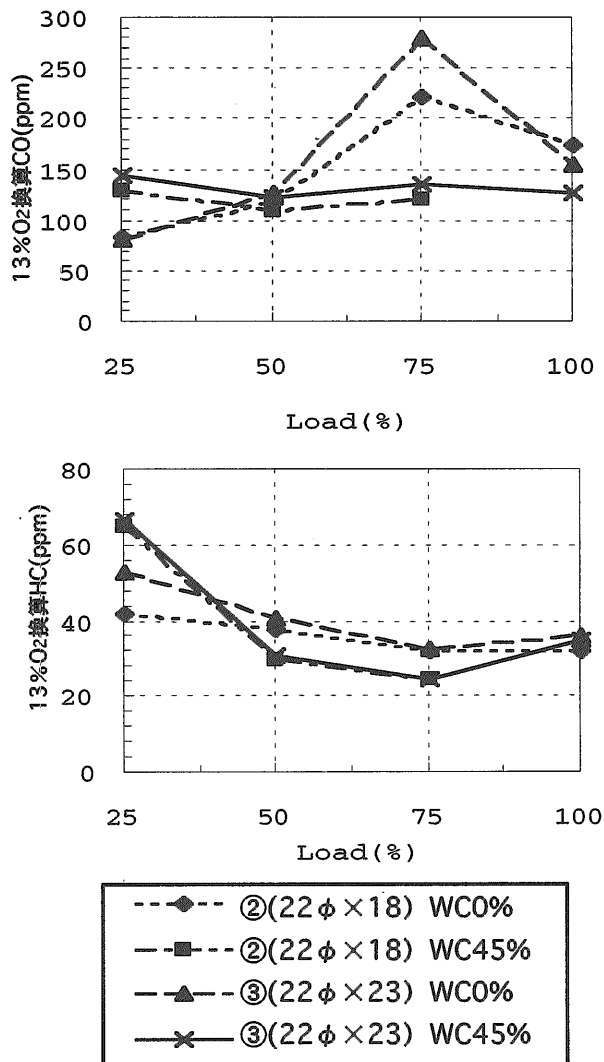


図36 燃料ポンプと乳化燃料によるCO、HC濃度 (船用特性)

乳化燃料の使用に伴う動粘度の増加及び噴射圧力の上昇が噴霧状態に影響することが予想される。従って、乳化燃料によるNO_x低減効果の拡大を図るには、乳化燃料の加水率に適合した噴霧形成の把握と適正な燃料弁の選択が必要と思われる。

燃料弁の噴霧特性が乳化燃料運転に及ぼす影響を理解する目的で、燃料弁の種類を変更して、排気特性を比較した。但し、燃焼室形状に対して適合可能な噴霧角の範囲、噴孔径及び噴孔間隔の最小寸法等の制約から選択肢の自由度は少なく、また、不適合な条件下では火炎の相互干渉を生じて燃焼状態の悪化を招く危険性があることから、使用可能な燃料弁の種類は限定された。

燃料弁ノズルチップの仕様(噴孔径×噴孔数、噴霧角度、開弁圧)を下記に示す。但し、設計上の噴孔面積合計はほぼ同一とした。なお、燃料噴射ポンプとの

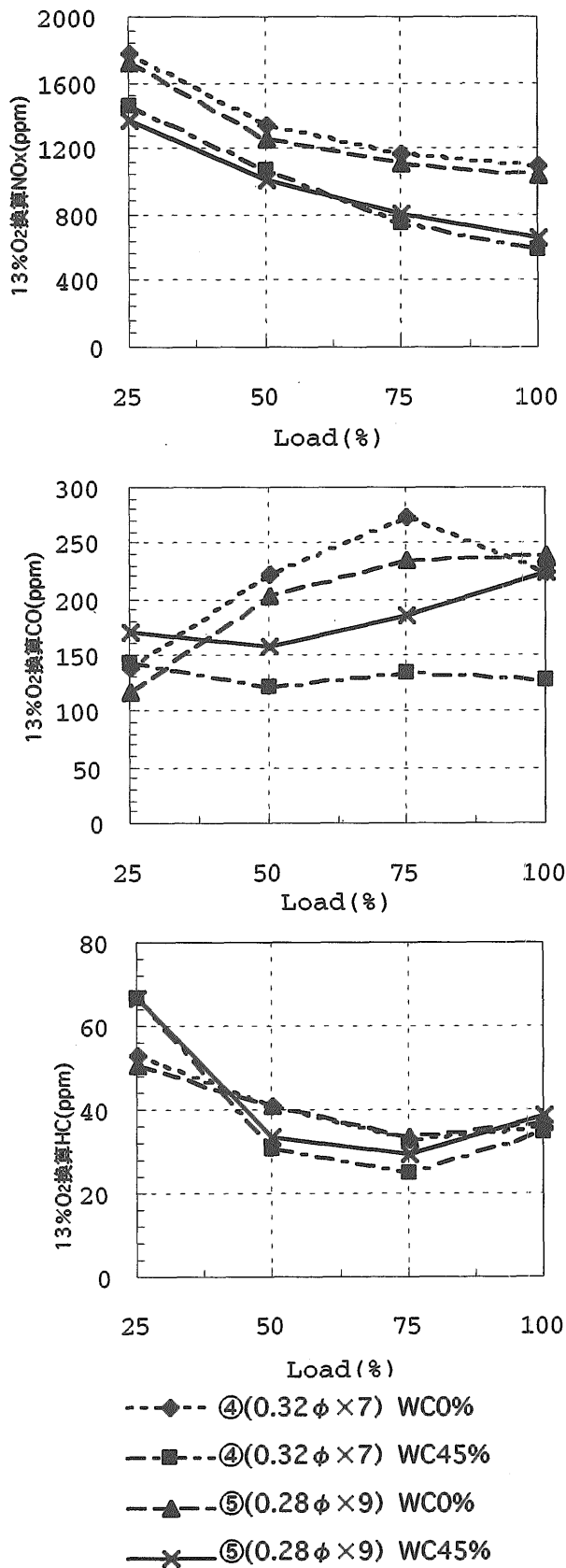


図37 燃料弁と乳化燃料によるNO_x、CO、HC濃度（船用特性）

組合せは全て上記の③とした。

- ④標準装備型（0.32φ × 7孔、120°、27.5MPa）
- ⑤特別仕様型（0.28φ × 9孔、120°、27.5MPa）

2種類の燃料弁による排ガ斯特性の比較例を図37に示す。乳化燃料を仕様しない場合は、④に比較して⑤の方が全般的にNO_x及びCO濃度は低かったが、乳化燃料を使用した場合は、低負荷域では⑤の方がNO_x濃度は低く、高負荷域では④の方がNO_x、CO及びHC濃度が低下した。但し、燃料消費率については乳化燃料使用の有無に関わらず、⑤の方が④よりも向上した。図38に燃料弁の変更に伴う燃料消費率の変化を示す。

小孔径多孔形状の燃料弁の使用は燃料粒子の微粒化を促進して、燃焼改善に効果を発揮するとともに、均一希薄混合気の形成に役立ち、NO_x抑制にも効果があるとされる。結果からは、乳化燃料を使用しない場合の小孔径ノズルの優位性が認められたが、乳化燃料を使用した場合には排ガ斯特性の観点から標準型の方がむしろ優れていた。

図39は④及び⑤を使用した乳化燃料運転における筒内圧力、噴射圧力、噴射期間及び熱発生率の比較例である。⑤に比較して④の場合には負荷率が高くなるほど最高噴射圧力は高く、噴射期間は長くなり、負荷率50%以上では最高筒内圧力及び最高熱発生率が低くなった。これらのことから、燃料弁の噴孔形状に加えて、加工精度による噴孔断面積等の相違による燃料

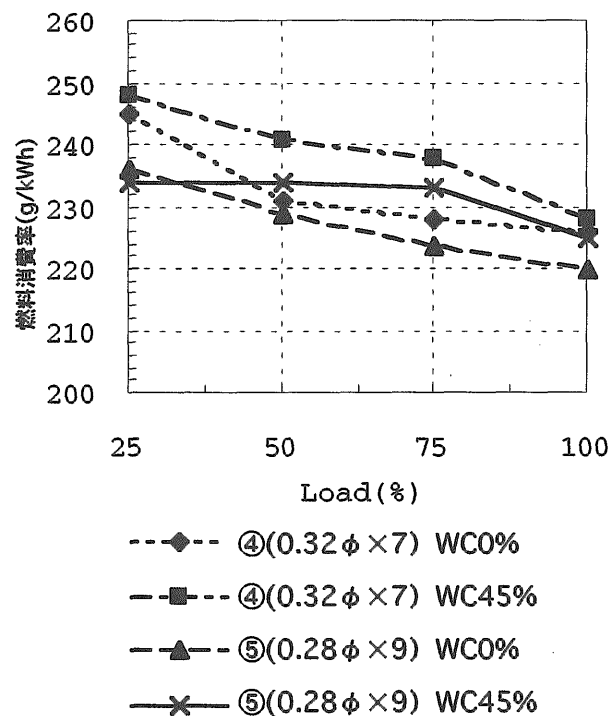


図38 燃料弁と乳化燃料による燃料消費率（船用特性）

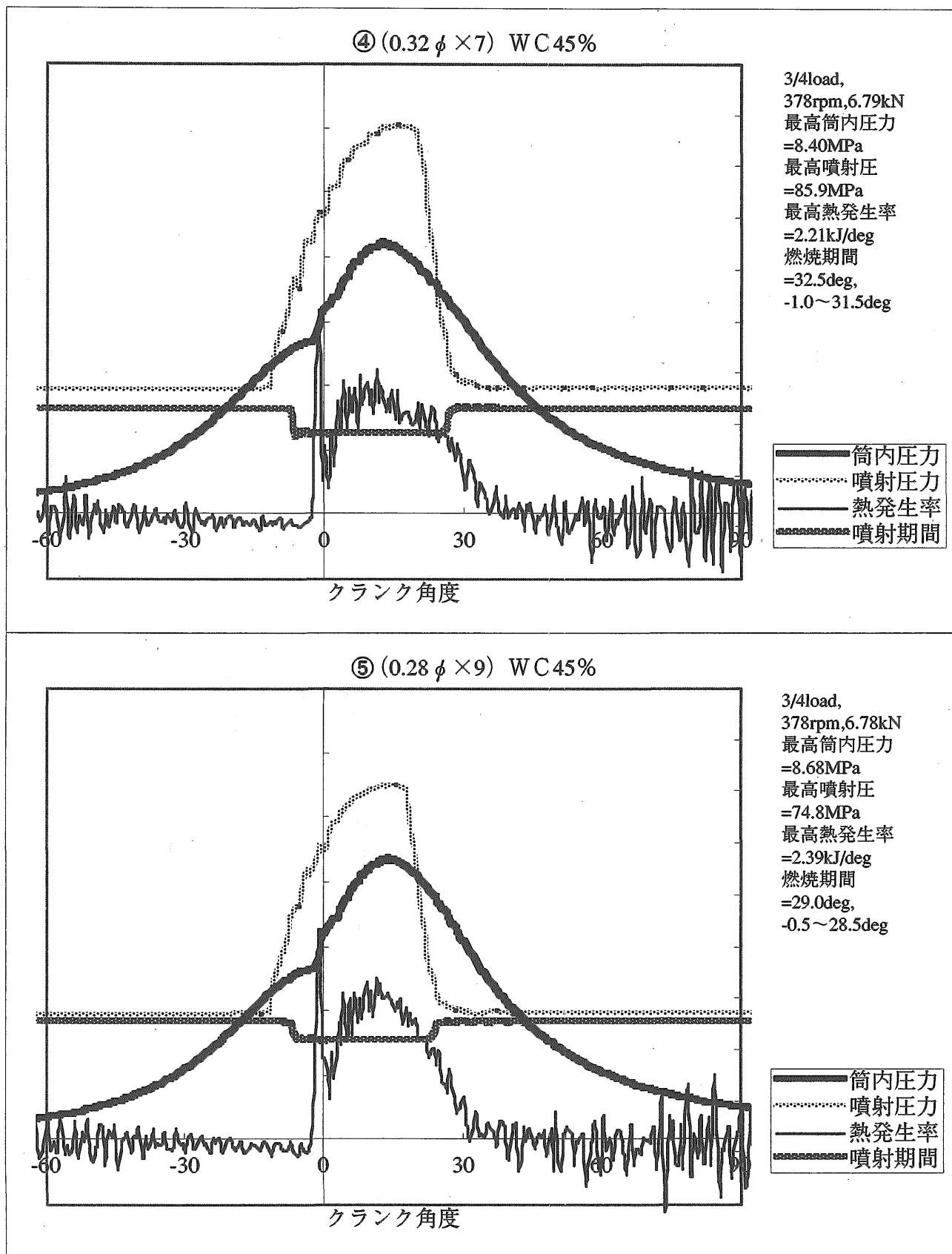


図39 燃料弁による筒内圧力、噴射圧力、噴射期間、熱発生率の比較

噴射率の違いがNO_x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

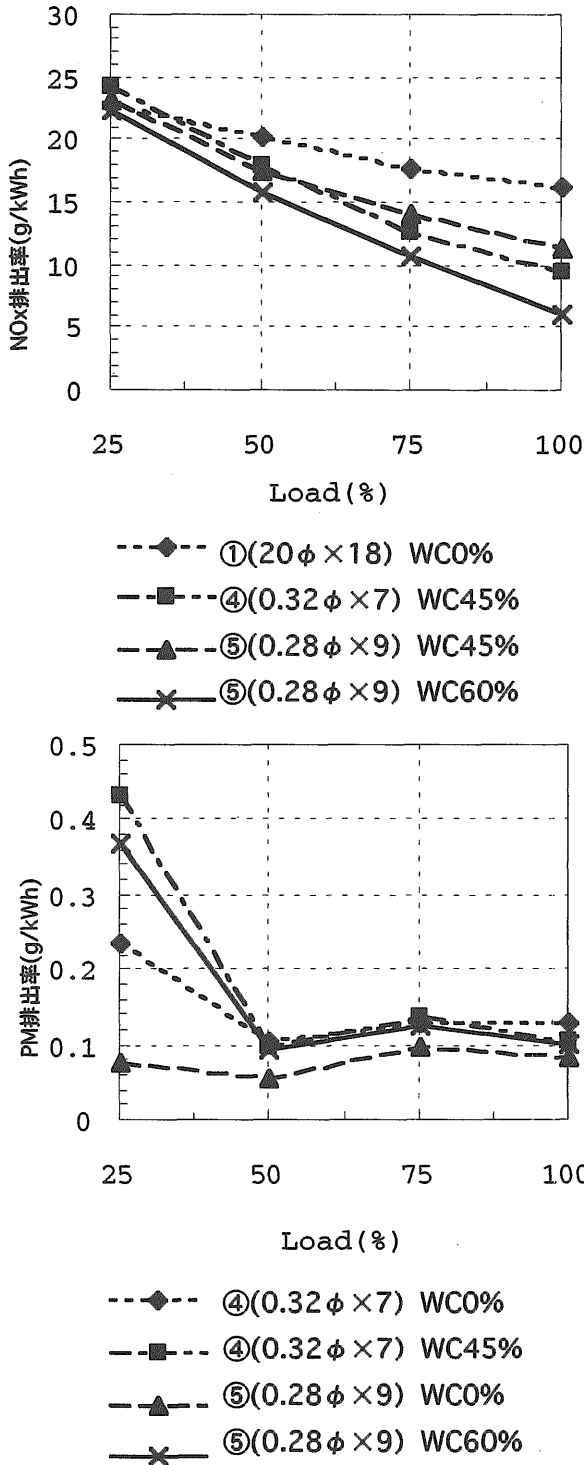


図40 燃料噴射系と乳化燃料によるNO_x, PM排出率(船用特性)

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_x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_x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_x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_x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。

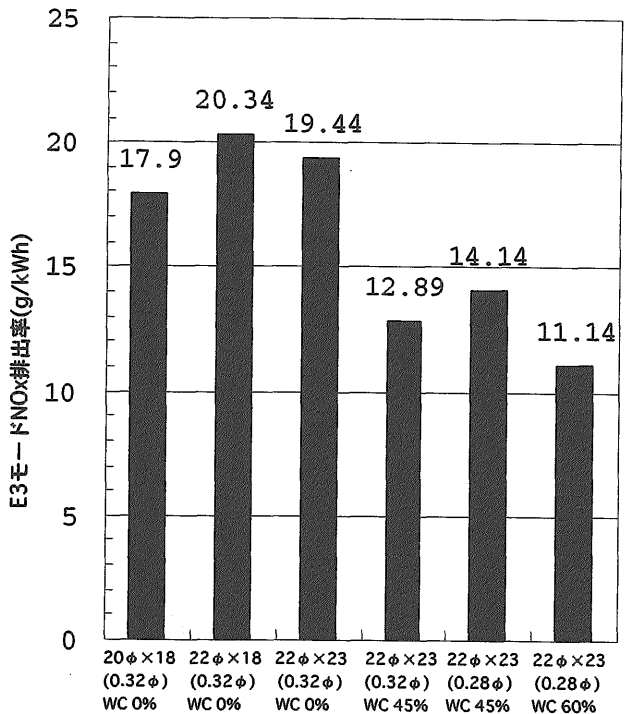


図41 燃料噴射系と乳化燃料によるE3モードNO_x排出率

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_x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_x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 ²)
図示平均有効圧力	1.68MPa(17.09kgf/cm ²)
圧縮比	16.3
燃料弁開圧	29.4MPa(300kgf/cm ²)
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 ₂	: 磁気風式 O ₂ 分析計
CO/CO ₂	: 非分散型赤外線 CO/CO ₂ 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%O₂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

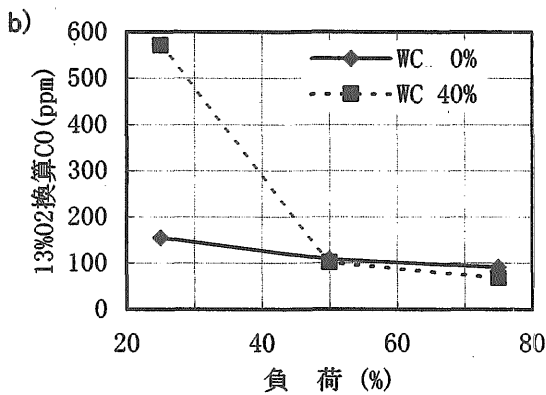
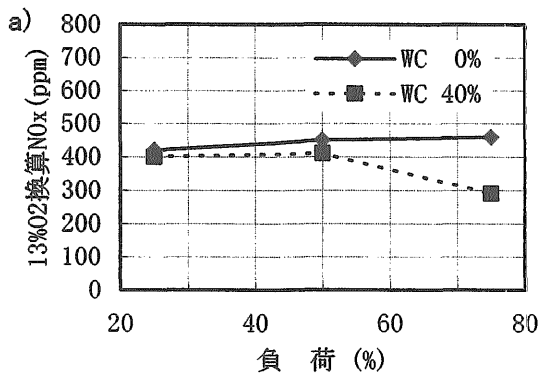


図42 実船での加水による排ガスの特性

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。

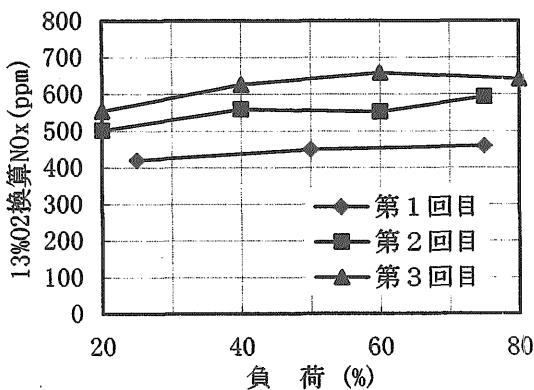


図43 排ガス特性の比較

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。

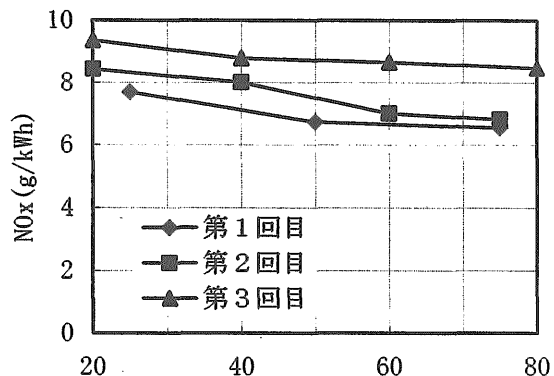


図44 湿度の補正による比較

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	ν	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 θ_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 θ_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 θ_c の変化は見られない。以上からNO_x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。

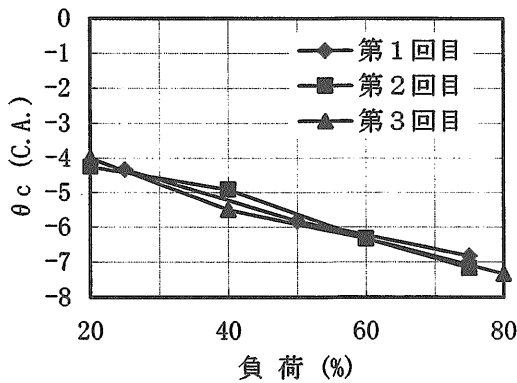


図45 燃焼初めのタイミングの比較

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 θ_p C.A.及び燃焼はじめ θ_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 θ_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、 θ_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 θ_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_x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

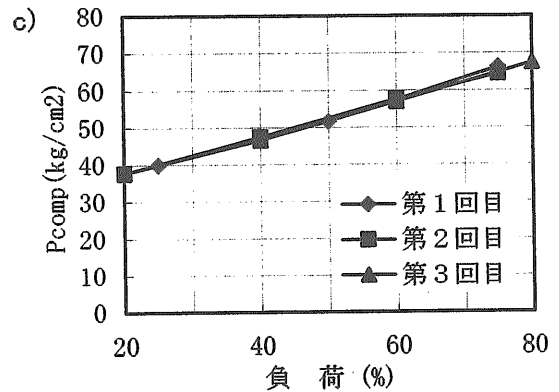
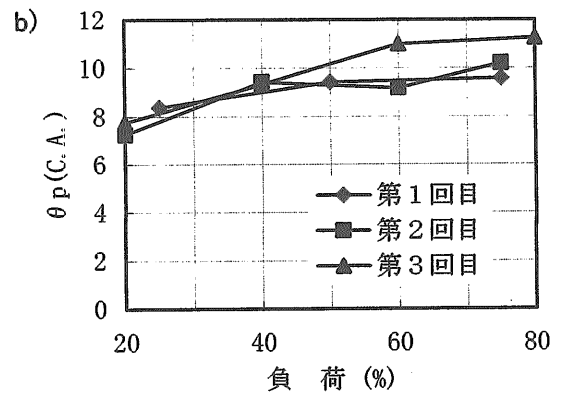
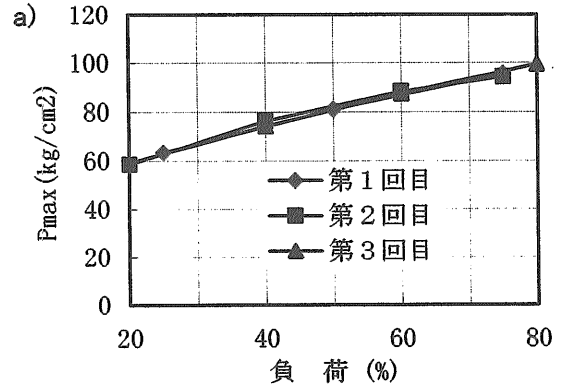


図46 最高圧力及び圧縮圧力の比較

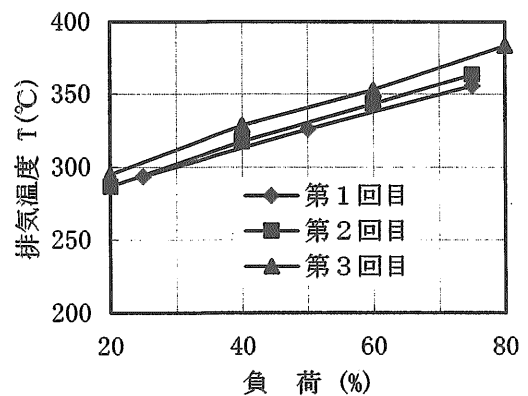


図47 排ガス温度の比較

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 5kgf/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 5kgf/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、 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、 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 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、 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、 NO_x 濃度の低下に高負荷域では有効である。

(2) 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 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 ³)	0.8744
動粘度@50°C (mm ² /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。

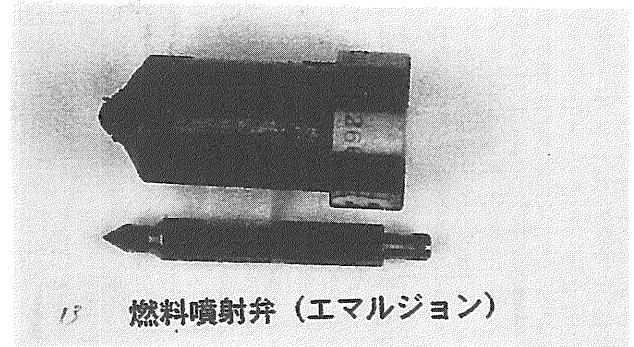
7.2. 実験結果及び考察

7.2.1. 部品検査

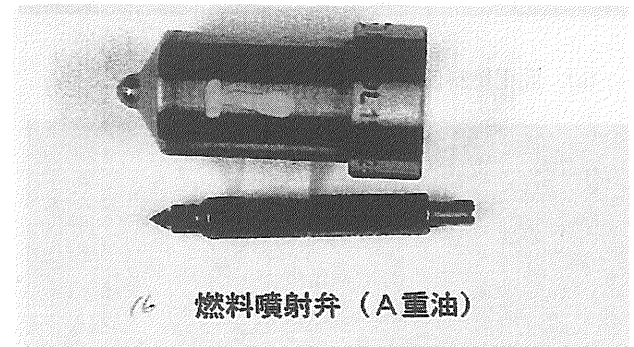
7.2.1.1. 燃料噴射弁

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。

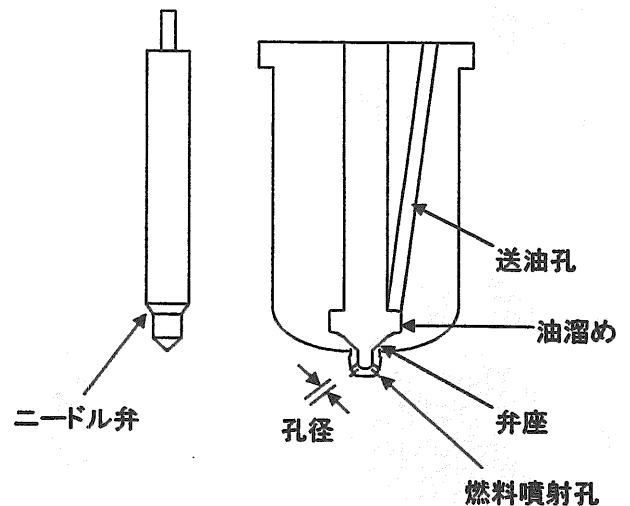
SEM観察では、まず、燃料噴射孔の孔径を測定した。乳化燃料運転により孔口部が磨耗し、孔径が拡大することが懸念されていたが、乳化燃料、通常燃料及び新造品のいずれにおいても孔径は0.26mmで、同一であ



(a) 乳化燃料を使用



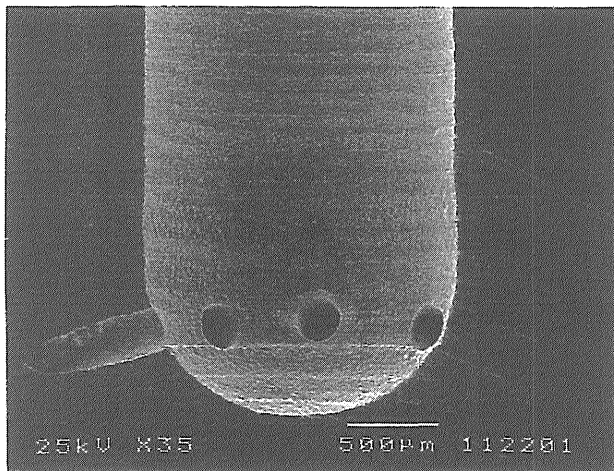
(b) 通常燃料を使用



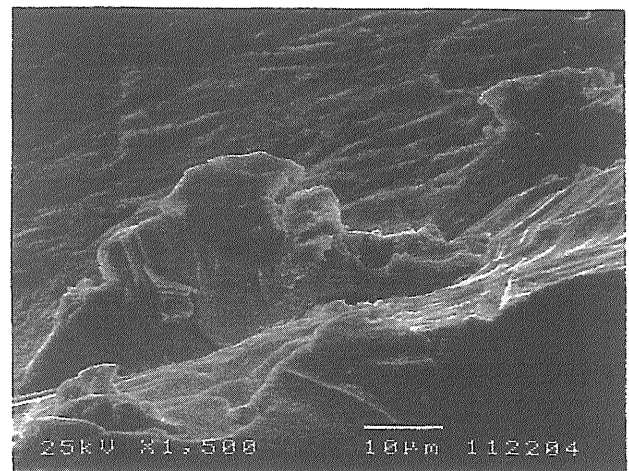
(c) 燃料噴射弁の検査部位

図48 燃料噴射弁の外観及び検査部位

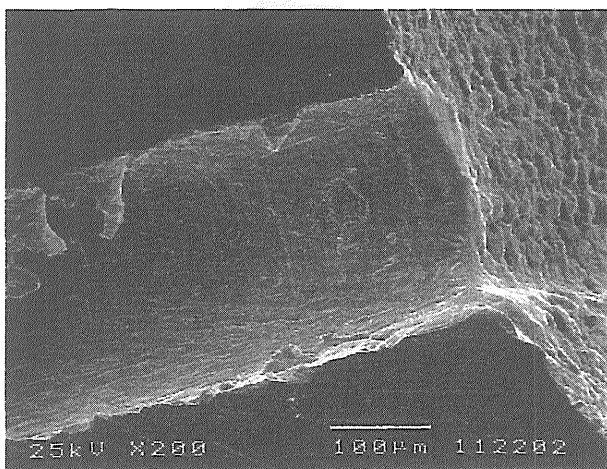
ることが確認された。次に、噴射孔を軸方向に切断して孔口部の形状及び内部の状態を観察した。図49にそのSEM写真を示す。乳化燃料及び通常燃料で使用したいずれの燃料噴射弁においても、孔口部の拡張は観察されなかった。噴射孔内部には、乳化燃料で使用した



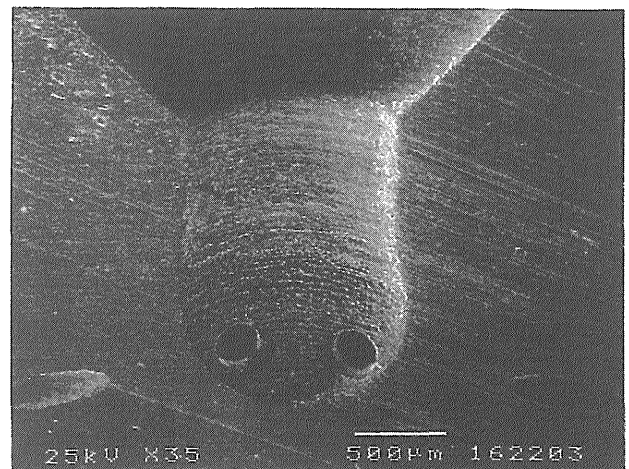
(a) 乳化燃料使用。全体（4つの噴射孔がみえる）



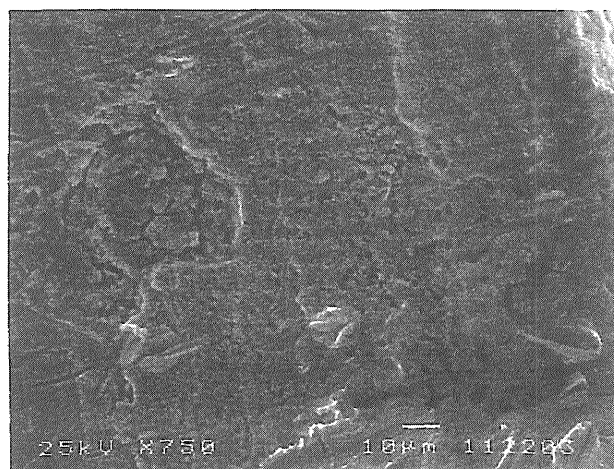
(d) 同左。孔内部、切断面付近のえぐれた箇所。



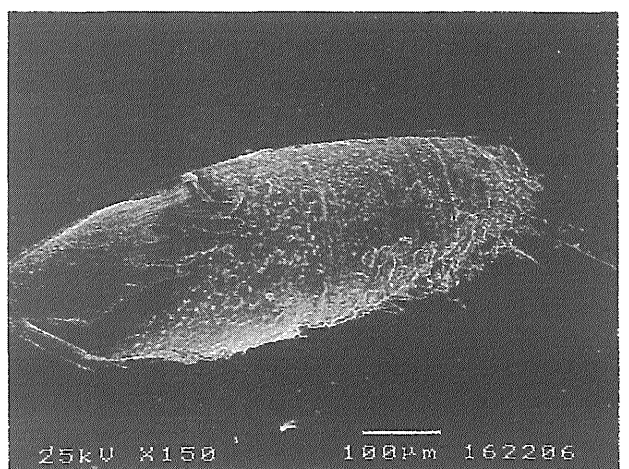
(b) 同上。左端の孔を拡大。



(e) 通常燃料使用。全体。

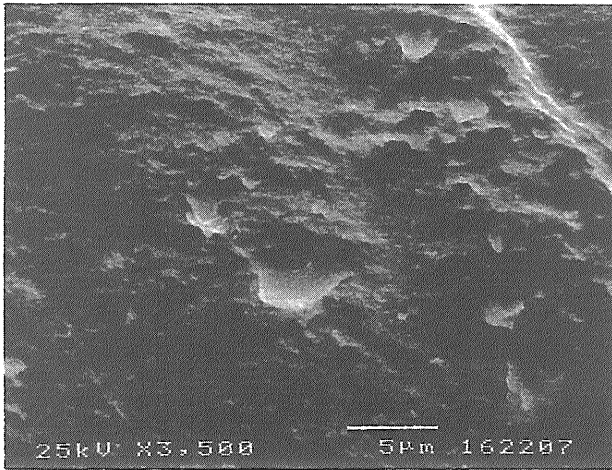


(c) 同上。孔内部の陥没部を拡大。

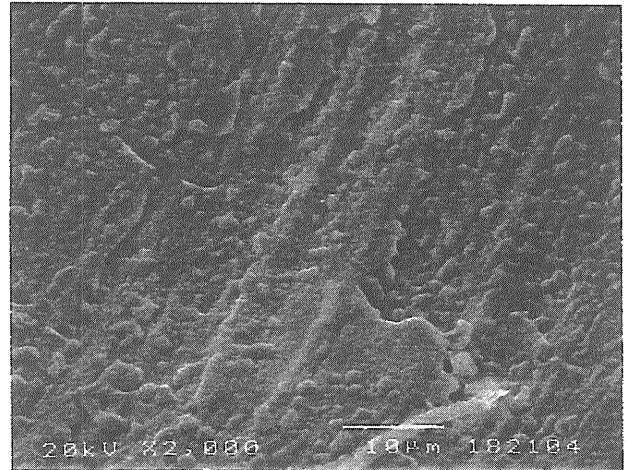


(f) 同上。左端の孔を拡大。

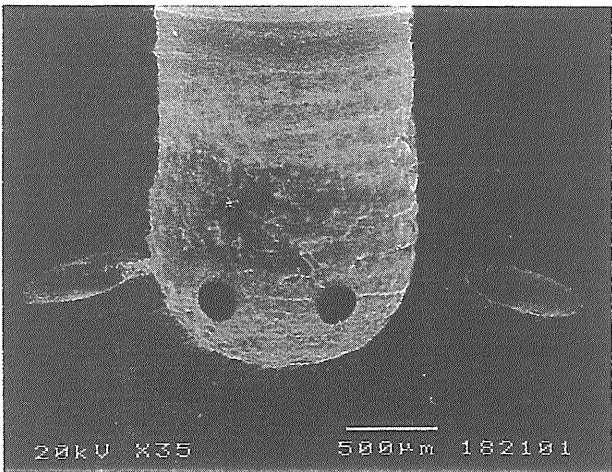
図49 燃料噴射弁噴射孔内部SEM写真



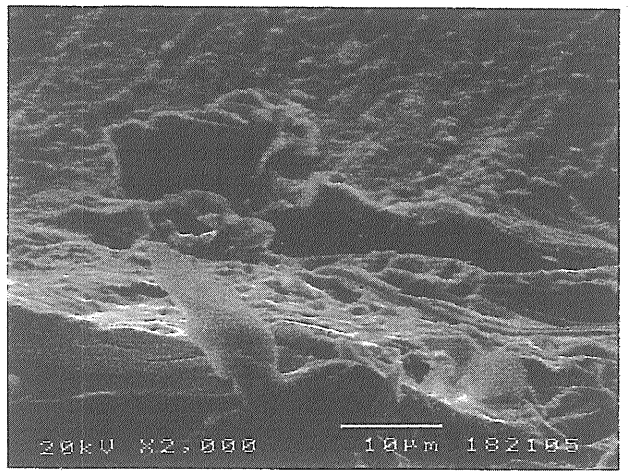
(g) 通常燃料使用。孔内部を拡大。



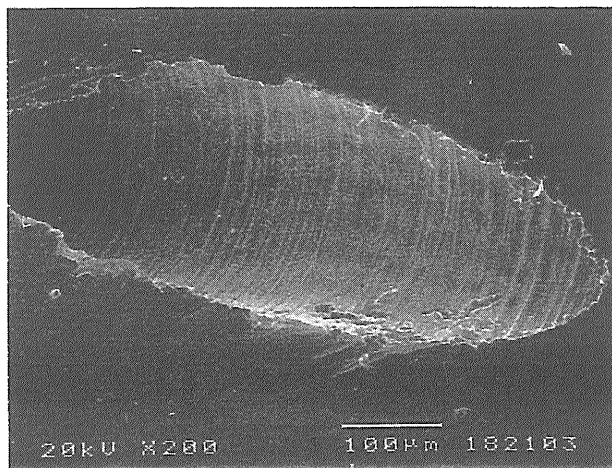
(j) 新造品。孔内部を拡大。



(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

燃料噴射弁では孔食とみられる陥没やえぐれた箇所が観察されたが、円周方向の加工痕はほとんど消滅していた。一方、通常燃料で使用した燃料噴射弁では加工痕は残存していたが、その表面を拡大すると酸化が進行していたことが分かる。さらに、新造品では円周方向の加工痕に加えて、乳化燃料で運転した場合に見られたものとよく似たえぐれた箇所が観察された。いずれも、SEM観察用に切断した面の付近にあったことから、このえぐれは切断時に発生したものと推定される。

さらに、弁座の表面を観察した。図50にそのSEM写真を示す。使用済み燃料噴射弁の弁座の上半分（いわゆる黒あたり）では、表面は比較的平滑であるものの、ところどころに孔食が観察された。一方、下半分（いわゆる白あたり）ではほぼ一面が酸化生成物で覆われていた。また、加工痕は上、下側ともほとんど残存していなかった。こうした状況は、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ほぼ同様であった。これに対して、新造品の場合は、上、下側とも加工痕が観察された。使用済み燃料噴射弁の場合は、上側にはニードル弁が衝突する際の衝撃によりエロージョンが発生し、そこから腐食が広がっていくものと推測される。また、下側では全面的に酸化が進み、酸化生成物で覆われると考えられる。

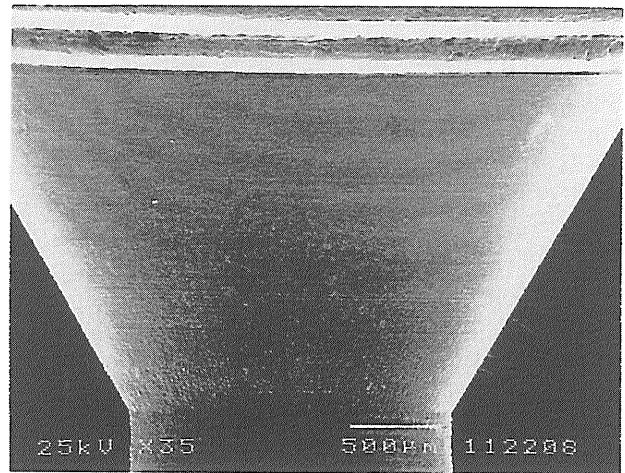
次に、弁座と衝突するニードル弁の先端部（あたり面）を観察した。図51にそのSEM写真を示す。目視観察では、使用済みのニードル弁は、いずれも先端部（先端から約1.2mmの範囲）がカーボン状のものがこびりついたように黒色を呈していた。SEMにより、この部分が酸化され、さらにカーボンが付着していることが観察された。一方、それよりも後方の部分は比較的平滑であるが、ところどころに燃料中に残留していた改質触媒粒子と見られる粒子がめり込むように付着していた。この部分は弁座に高速で衝突するため、衝突により粒子がニードル弁上にめり込むと同時に、弁座上にエロージョンが発生するものと推測される。

最後に、送油孔及び油溜めを観察した。図52にそのSEM写真を示す。使用済みの場合は、いずれも油溜めに近いところほど送油孔内側の酸化が進行しており、油溜め内面も酸化していることが観察された。これに対して、新造品の場合は加工痕が観察されたのみであった。

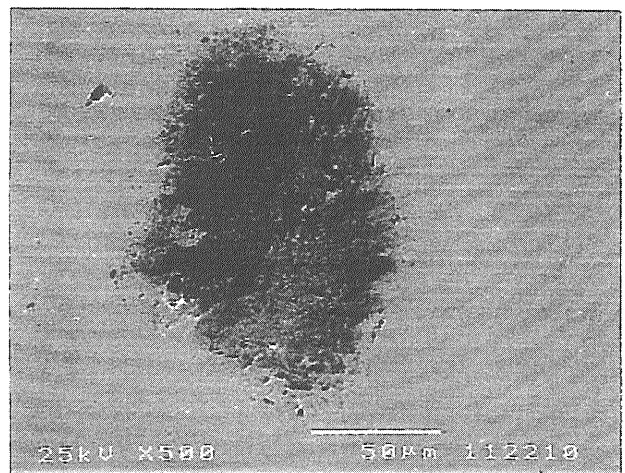
以上のように、乳化燃料の使用においては、噴射孔内部の腐食等については留意する必要があるものの、それ以外の部位については通常燃料を使用した場合と比較して、顕著な腐食及び摩耗は観察されなかった。

7.2.1.2. 燃料噴射ポンプ

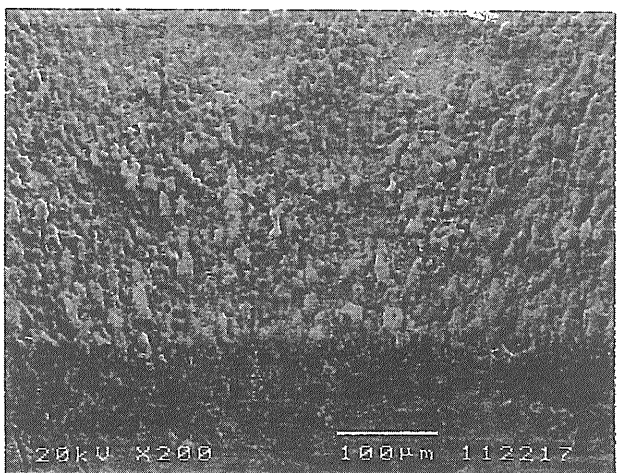
燃料噴射ポンプの外観及び検査部位を図53に示す。目視検査では、乳化燃料で運転したものは、通常燃料



(a) 乳化燃料使用。全体。

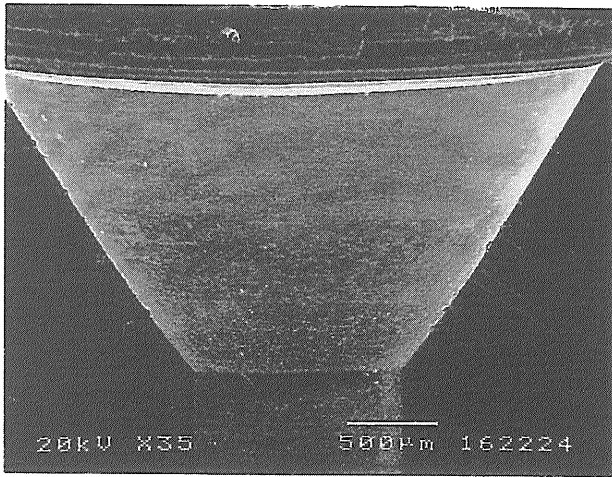


(b) 同上。上端部の孔食部拡大。

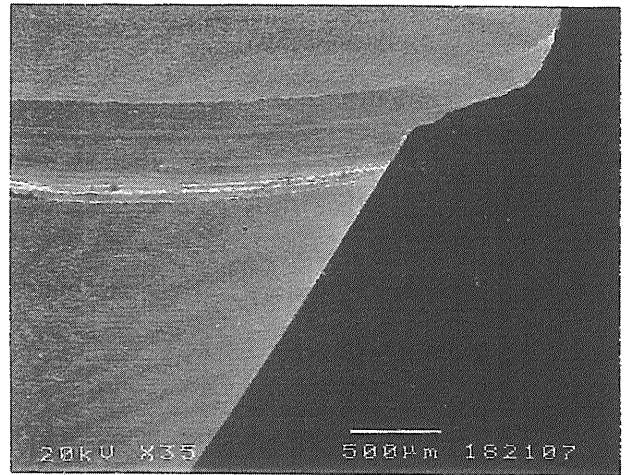


(c) 同上。下端部拡大（酸化物に覆われている）。

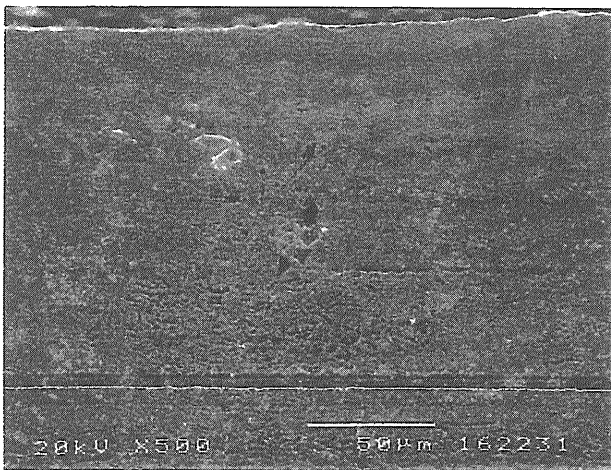
図50 燃料噴射弁弁座表面SEM写真



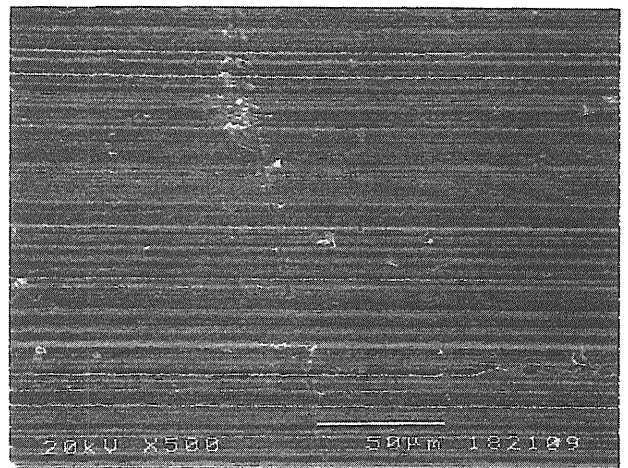
(d) 通常燃料使用。全体。



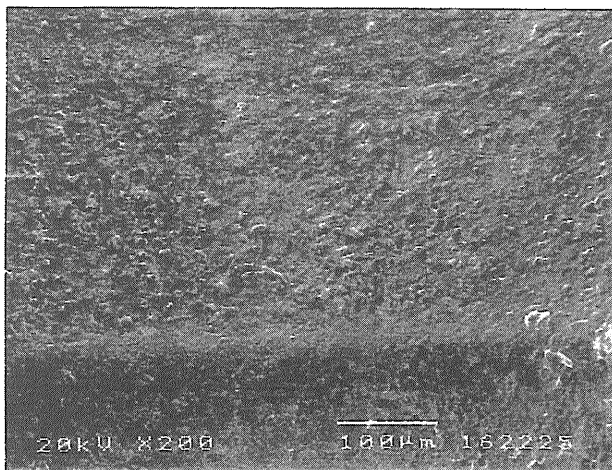
(g) 新造品。全体。



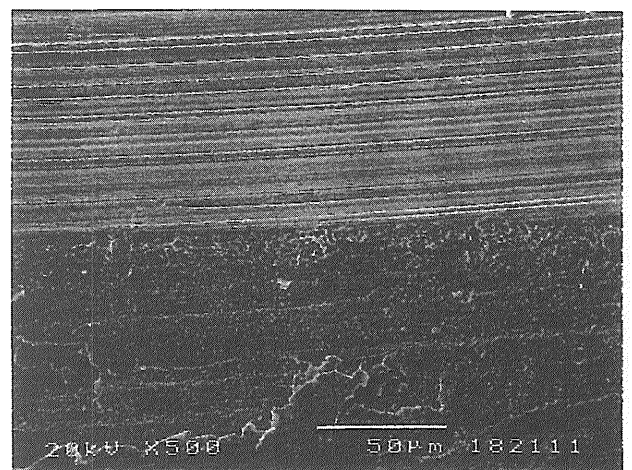
(e) 同上。上端部拡大。



(h) 同上。上端部拡大。

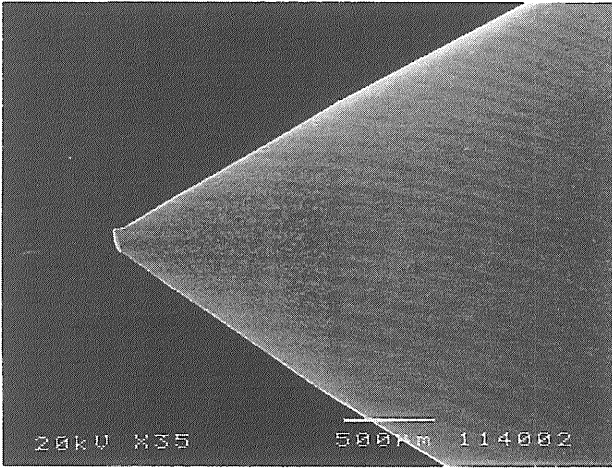


(f) 同上。下端部拡大。



(i) 同上。下端部拡大。

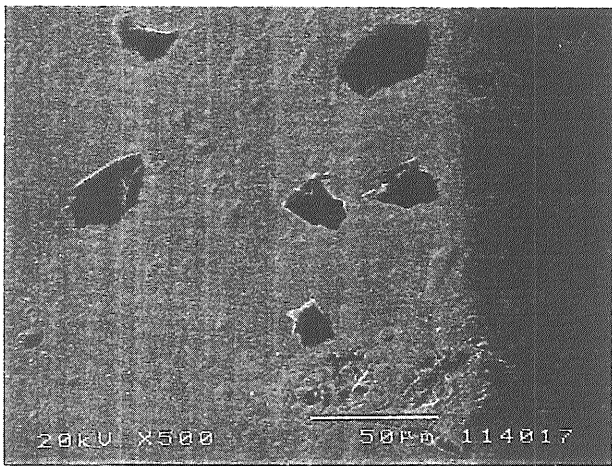
図50 燃料噴射弁弁座表面SEM写真



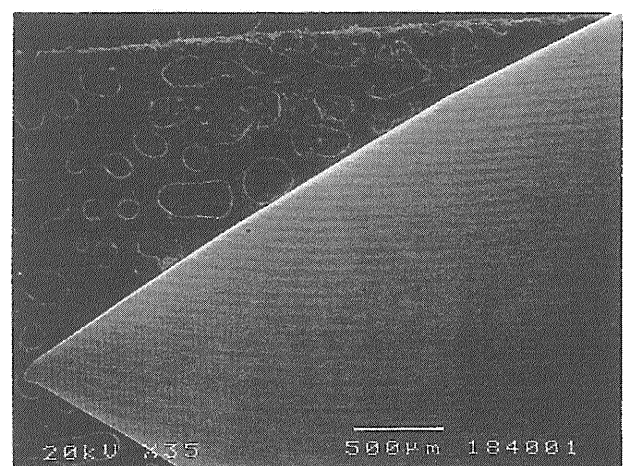
(a) 乳化燃料使用。先端部全体。



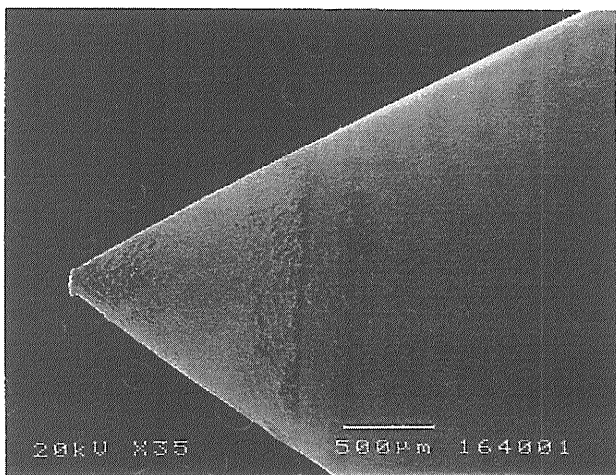
(d) 通常燃料使用。拡大 (粒子が付着しているの見える)。



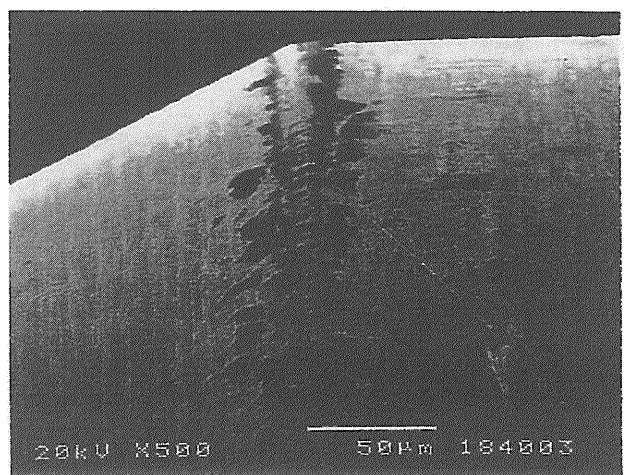
(b) 同上。拡大 (粒子が付着しているの見える)。



(e) 新造品。先端部全体。

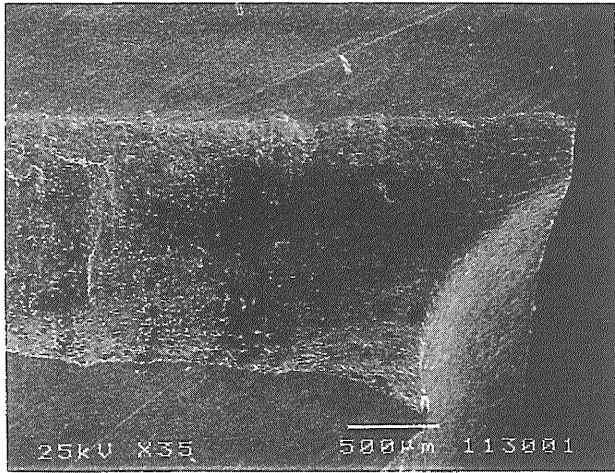


(c) 通常燃料使用。先端部全体。

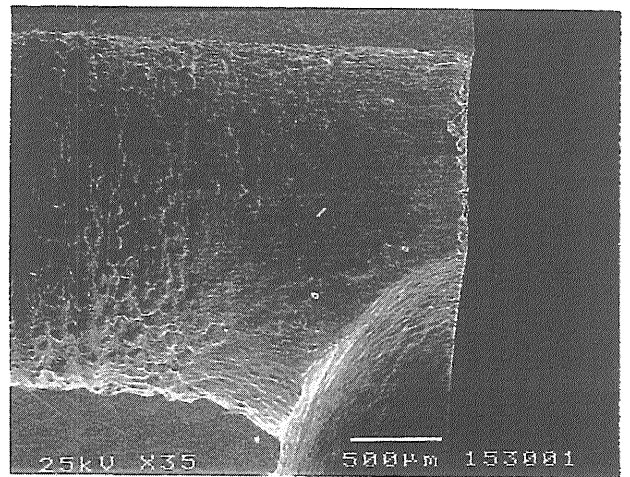


(f) 同上。拡大 (グリスが付着しているの見える)。

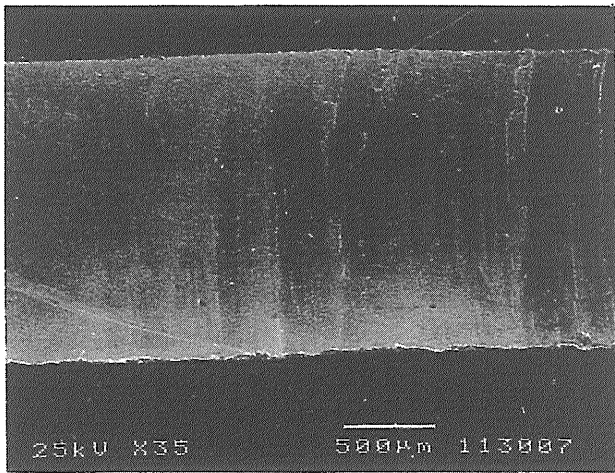
図51 燃料噴射弁ニードル弁表面SEM写真



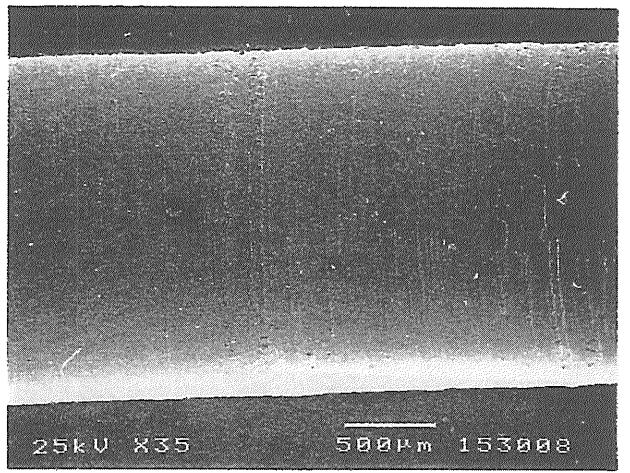
(a) 乳化燃料使用。送油孔 (油溜めに近いところ)。



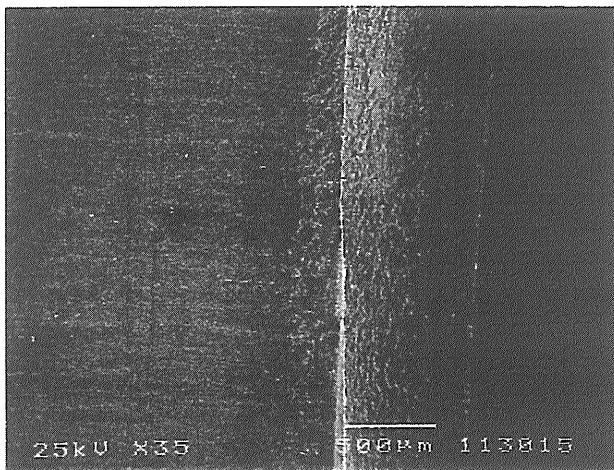
(d) 通常燃料使用。送油孔 (油溜めに近いところ)。



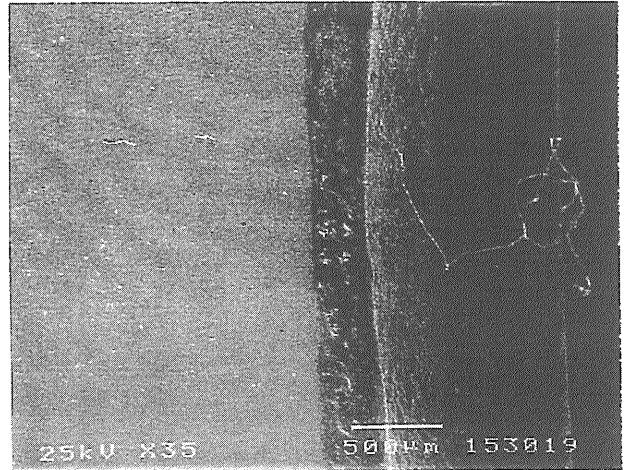
(b) 同上。送油孔 (油溜めから離れたところ)。



(e) 同上。送油孔 (油溜めから離れたところ)。

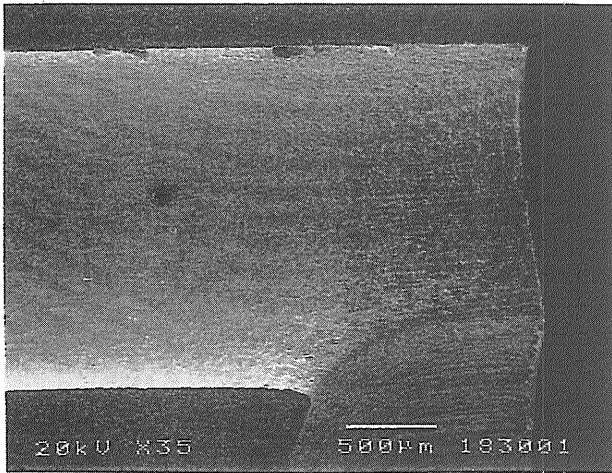


(c) 同上。油溜め。

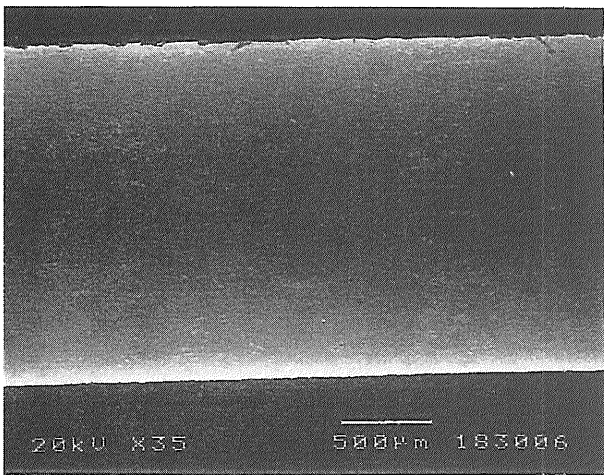


(f) 同上。油溜め。

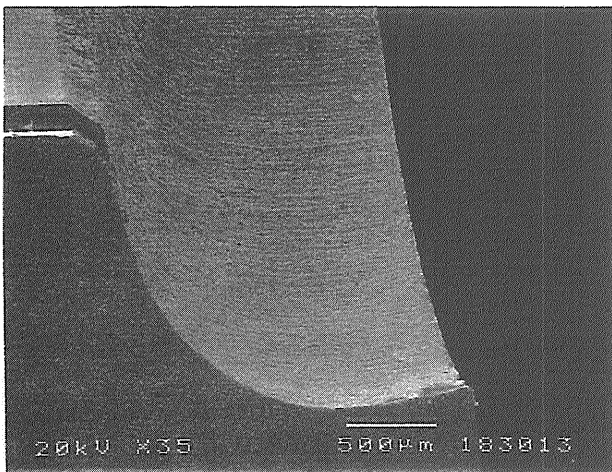
図52 燃料噴射弁送油孔内部および油溜めSEM写真



(g) 新造品。送油孔（油溜めに近いところ）。

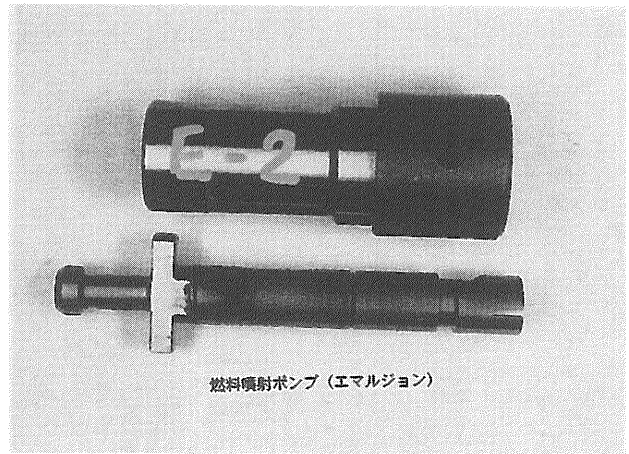


(h) 同上。送油孔（油溜めから離れたところ）。

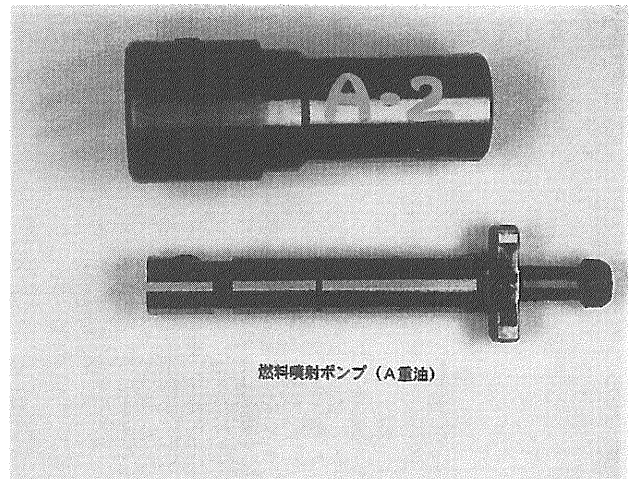


(i) 同上。油溜め。

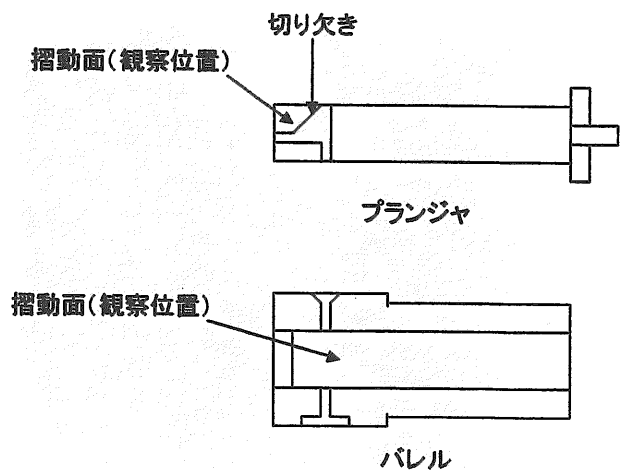
図52 燃料噴射弁送油孔内部および油溜めSEM写真
(328)



(a) 乳化燃料を使用。



(b) 通常燃料を使用。



(c) 燃料噴射ポンプの検査部位。

図53 燃料噴射ポンプの外観及び検査部位

で運転したものと及び新造品と比較してプランジャ及びバレルの摺動面の光沢が鈍いことが観察された。

まず、図54にプランジャのSEM写真を示す。乳化燃料を使用したものでは、摺動面上に摺動方向に平行な痕が観察された。これに対し、通常燃料を使用したものでは、加工痕と見られる摺動方向に垂直な痕が観察され、新造品と類似した外観を呈した。

次に、図55にバレルのSEM写真を示す。乳化燃料を使用したものでは、摺動面上に摺動方向に平行な痕が観察された。これに対し、通常燃料を使用したものでは、加工痕と見られる斜めの痕が観察され、新造品と類似した外観を呈した。

以上の結果から、水の添加により燃料の潤滑性が低下し、摺動面における摩耗が進行して加工痕が消滅する一方で、摺動方向に平行な痕が発生し、光沢が鈍くなるのではないかと考えられる。しかしながら、ポンプの噴射特性等については明白な性能低下等は見られず、実用上の支障はないと考えられる。

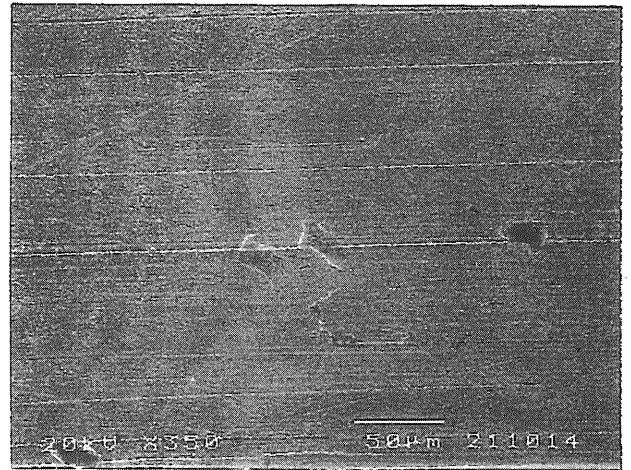
7.2.1.3. 燃料パイプ

燃料パイプの外観及び検査部位を図56に示す。検査は、口部、曲管部及び直管部において行った。目視検査では、内側に黒色の酸化皮膜が発生していることが観察された。

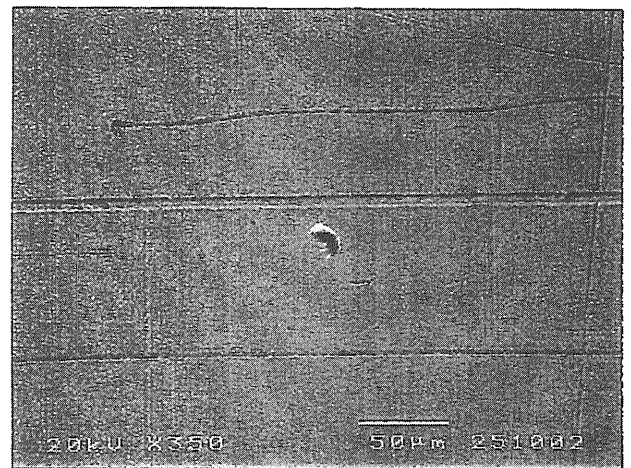
次に、図57に燃料パイプの内部のSEM写真を示す。いずれの部位においても、燃料の流れの方向に沿って酸化皮膜の流線模様が観察された。口部付近には球形の塊が見られたが、これは溶接時に飛散した鉄が球形に固まって付着したものと見られる。燃料パイプについては、過去に油水分離が報告された例があり、また、キャビテーションによるエロージョンの可能性も懸念されていたが、今回の検査においては、このような事例は観察されなかった。

7.2.1.4. 部品検査のまとめ

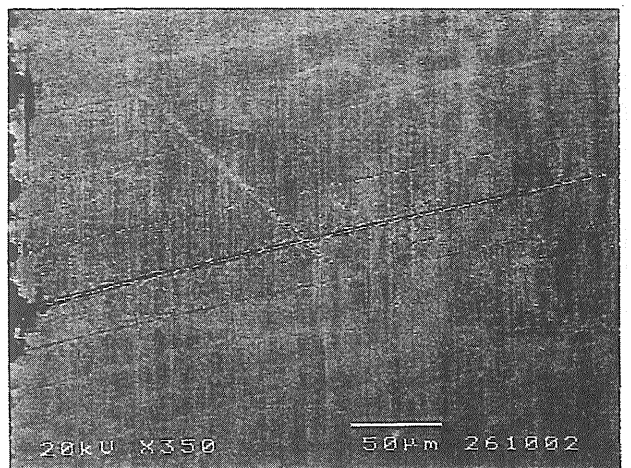
乳化燃料の使用が機関部品に与える影響を検討するため、燃料が直接接触する燃料噴射弁、燃料噴射ポンプ及び燃料パイプについて目視及びSEMによる観察を行った。この結果、燃料噴射弁については、当初懸念された噴射孔の孔口部の拡張は見られなかったものの、噴射孔内部の腐食、摩耗等は通常燃料を使用した場合と比較してやや進行しており、孔食と見られる陥没も観察された。一方、弁座、ニードル弁、送油孔及び油溜めについては、通常燃料を使用した場合と比較して、顕著な相違は見られなかった。また、燃料噴射ポンプ及び燃料パイプについても顕著な腐食、摩耗等の進行は見られなかった。このように、一部の部品については再検討の必要性が指摘されるものの、それ以外の部品については乳化燃料の使用は支障はないと考えられる。



(a) 乳化燃料使用。

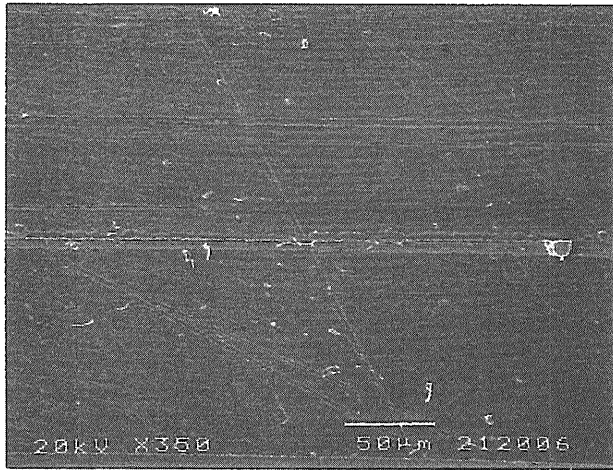


(b) 通常燃料使用。

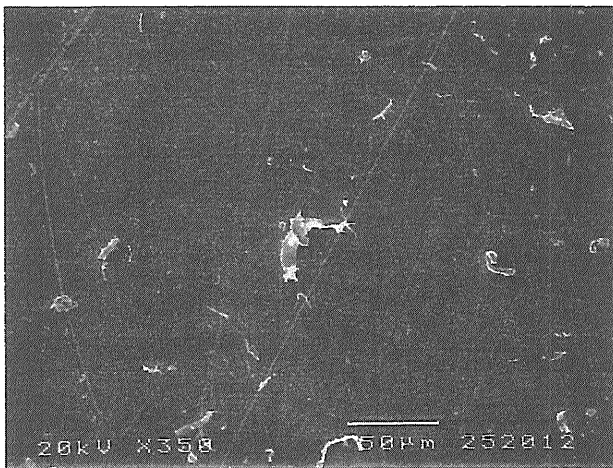


(c) 新造品。

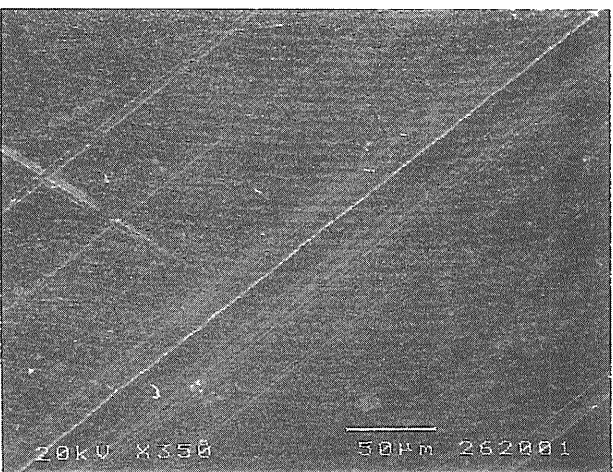
図54 燃料噴射ポンププランジャ表面SEM写真



(a) 乳化燃料使用

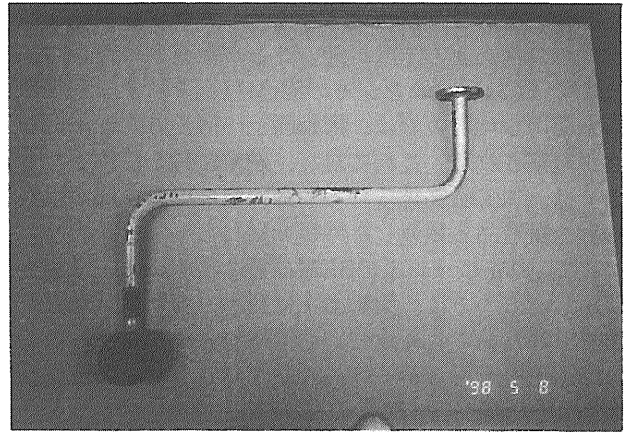


(b) 通常燃料使用

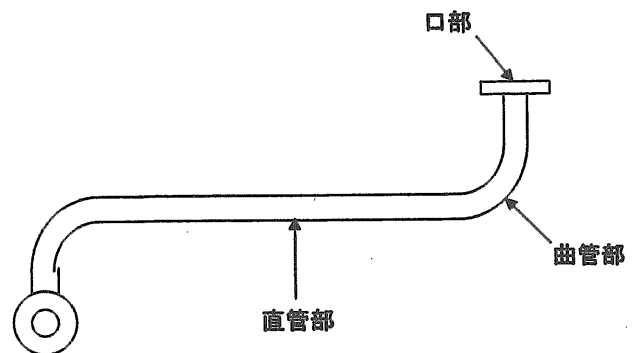


(c) 新造品

図55 燃料噴射ポンプパレル内部SEM写真



(a) 外観



(b) 燃料パイプの検査部位

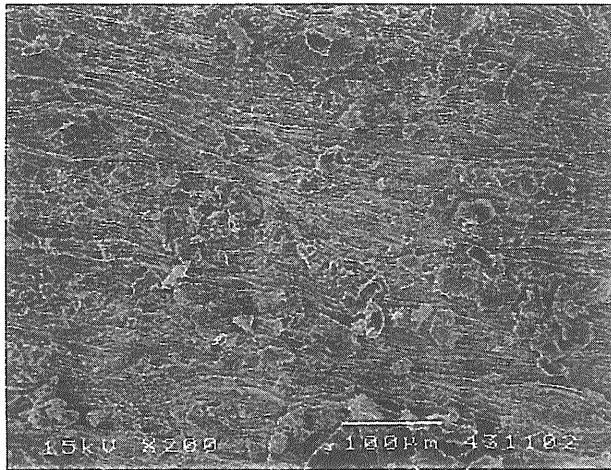
図56 燃料パイプの外観及び検査部位

7.2.2. 付着物検査

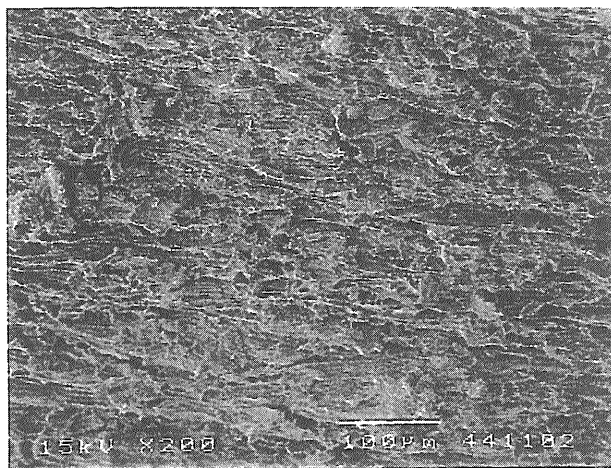
7.2.2.1. ピストンヘッド

乳化燃料を使用した結果、ピストンヘッドの頂部に通常とは異なる付着物が固着した。この付着物を削りとしてサンプリングし、XRD及びEPMAにより分析した。付着物の写真を図58に示す。通常燃料を使用した場合の付着物は黒色粒状のもののみであったが、乳化燃料を使用したときにはこの下に灰色灰状の外観を呈する付着物が堆積した。

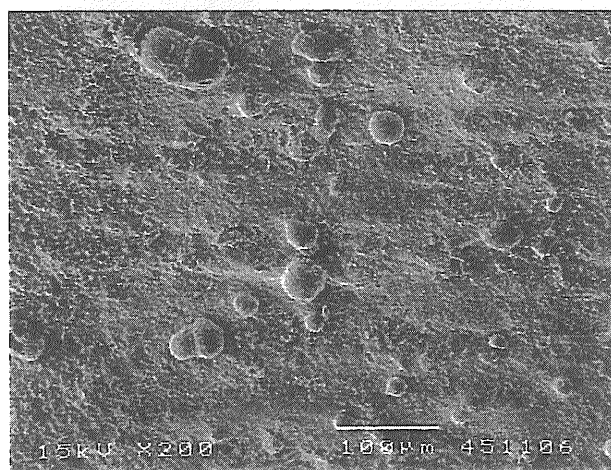
XRD及びEPMAの結果を表12に示す。XRDにより、灰色付着物の場合は、試料の結晶性は比較的高く、結晶質の主成分として硫酸カルシウム (CaSO_4) が検出された。一方、黒色付着物の場合は、試料の結晶性は比較的低いが、結晶質の主成分としてやはり硫酸カルシウムが検出された。さらに、EPMAにより、灰色付着物の場合は、主要な元素として硫黄、酸素及び炭素、微量元素としてカルシウム、ケイ素、バナジウム、亜鉛、カリウム及びナトリウムが検出された。一方、黒色付着物の場合は、主要な元素として、炭素、酸素及びカルシウムが、微量元素として、硫黄及び亜鉛が検



(a) 直管部

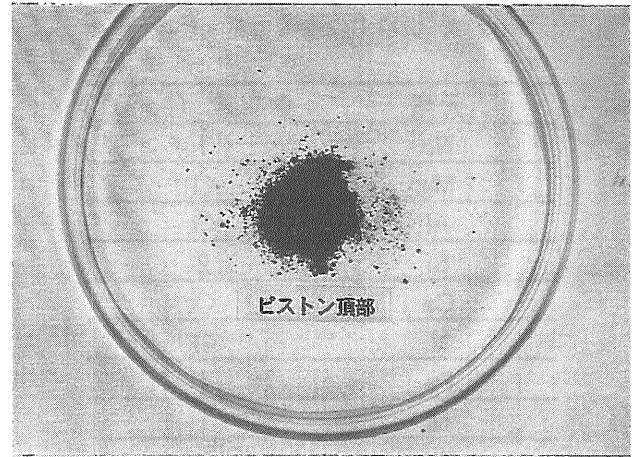


(b) 曲管部

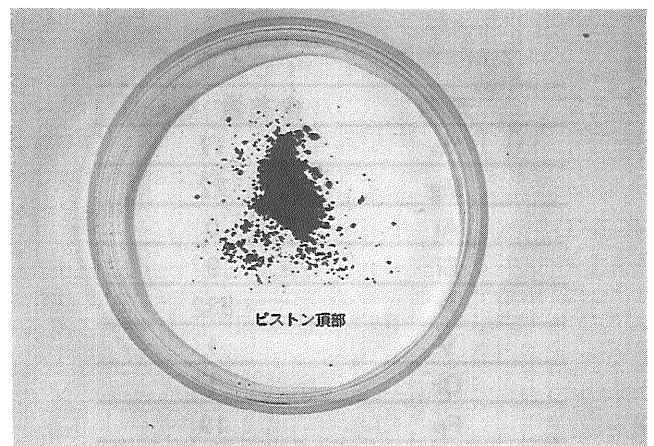


(c) 口部付近

図57 燃料パイプ内部SEM写真



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図58 ピストンヘッド付着物外観

表12 ピストンヘッド付着物の分析結果

外観	乳化燃料	通常燃料	
	灰色灰状	黒色粒状	
XRD	結晶性	高い	低い
	結晶質の主成分	CaSO ₄	CaSO ₄
	結晶質の副成分	-	-
EPMA	主要元素*	S, O, C	C, O, Ca
	少量元素**	Ca, Si, V, Zn, K, Na	S, Zn

* : 10%以上含まれるもの

** : 1%以上含まれるもの

出された。以上の結果から、いずれの試料も硫酸カルシウム及び炭素を主成分とすることが分かった。

このうち、炭素の主な起源としては燃料及び潤滑油、硫黄では燃料油、金属元素の場合は燃料、潤滑油、雑用水及び部材が考えられる。燃料及び潤滑油中の金属元素の分析値を表13及び14に示す。燃料については、給油の度毎に詳細な値は異なるが、A重油の品質は比

表13 燃料中の金属元素含有量

元素	含有量 (ppm)
Na	1
Mg	<1
Al	<1
Si	2
Ca	<1
V	<1
Fe	1
Ni	1
Zn	<1
Pb	<1

表14 潤滑油中の金属元素含有量

元素	含有量 (ppm)
Na	17
Mg	22
Al	0
Si	9
P	332
V	1
Cr	1
Fe	19
Ni	0
Cu	1
Zn	422
Mo	0
Sn	0
Ba	4
Pb	0

較的一定しているため、成分の傾向は把握できるものと考えられる。この表から、カルシウムの起源は主として潤滑油であるが、乳化燃料を製造するために用いた雑用水からの供給もありうると考えられる。さらに、亜鉛は主として潤滑油、ケイ素等の微量元素は雑用水が起源と考えられる。また、ケイ素、カリウム及びナトリウムについてはXRDでは関連するピークが見られなかったため、ガラス状となっていた可能性が指摘される。以上から、付着物中の主な成分の生成プロセスを検討すると、炭素は燃焼火炎中の未燃炭素及び高温にさらされた潤滑油が熱分解して生成した無機炭素が堆積したものと、また、硫酸カルシウムは、潤滑油もしくは雑用水中のカルシウムと燃焼により生成した

硫酸化合物が反応して生成したものと考えられる。

しかし、乳化燃料を使用した場合は比較的炭素の量が少なく、色も灰色で結晶性が高いのに対して、通常燃料を使用した場合は比較的炭素の量が多く、色も黒色で結晶性が低い。添加した水は陸上から水道水として供給されたものであり、それに含まれる金属塩類の濃度が非常に高いとは考えにくい。ため、乳化燃料の使用により燃焼状態が変化し、付着物の性状及び組成に影響したのではないかと考えられる。

さらに、船内において付着物を除去した後のピストンヘッド頂部表面の目視観察を行ったところ、表面に部材（アルミニウム合金）がわずかに溶けた痕跡と見られるしわが観察された。この写真を図59に示す。さらに6個のピストンヘッドのうち1個（5番シリンダ）は、頂部の辺縁部の一部に高温によると見られる溶損が観察された。

このため、乳化燃料の使用により燃焼火炎が伸張し、ピストンヘッドの頂部にまで到達し、溶痕等が発生したと考えられる。燃料に水を添加すると着火遅れが増大し、また燃焼期間が延長されるため、火炎が伸張されることが報告されており、この報告からも上記の考察は支持される。また、火炎に直接さらされることにより潤滑油が燃焼し、生成した硫酸カルシウムがピストンヘッド上に堆積したと考えられる。頂部のしわ状の溶痕はただちに問題とはならないが、辺縁部の溶損については運航中に5番シリンダの不調が発生しており、ピストンヘッドの形状及び材質の再検討が成されるべきと考えられる。

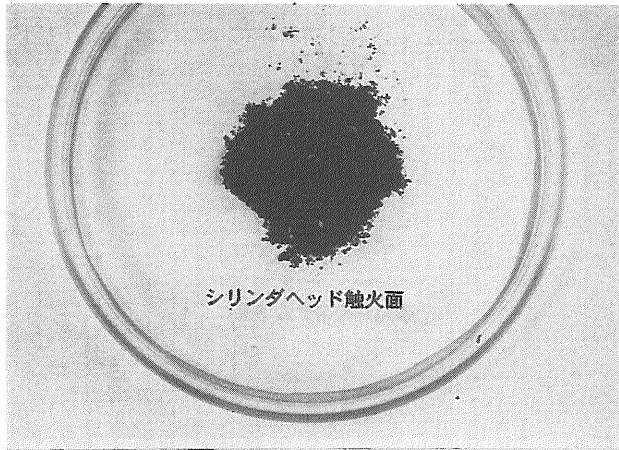


図59 ピストンヘッド外観

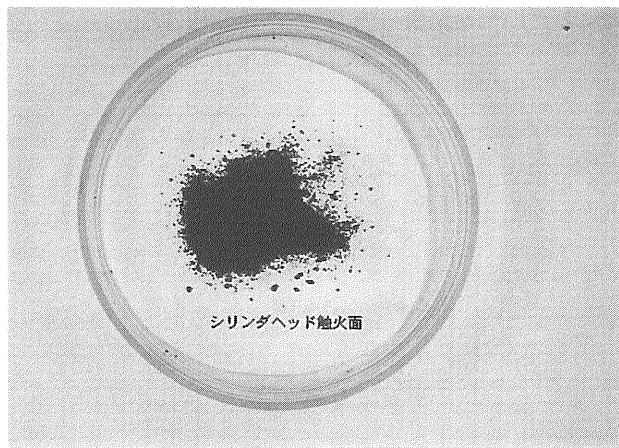
マーカーで囲んだところにしわ及び溶損が観察された

7.2.2.2 シリンダヘッド触火面

シリンダヘッド触火面の付着物の写真を図60に示す。乳化燃料を使用した場合、灰色灰状の外観を呈した。これに対し、通常燃料を使用した場合の付着物は黒色粒状であった。



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図60 シリンダヘッド触火面付着物外観

XRD及びEPMAの結果を表15に示す。XRDにより、乳化燃料を使用した場合、試料の結晶性は比較的高く、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、試料の結晶性は比較的低く、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが、副成分として亜硫酸カルシウム四水和物 ($\text{CaSO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 及び硫酸鉄(II)一水和物 ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

表15 シリンダヘッド触火面付着物の分析結果

	乳化燃料	通常燃料
外観	灰色灰状	黒色粒状
XRD	結晶性	高い
	結晶質の主成分	CaSO_4
	結晶質の副成分	$\text{CaSO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
EPMA	主要元素*	S, O, Ca
	少量元素**	C, Si, Zn, Fe, K, Na

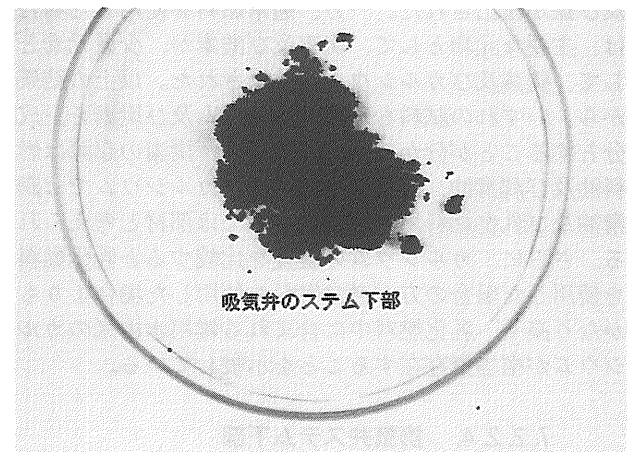
* : 10%以上含まれるもの
** : 1%以上含まれるもの

が検出された。さらに、EPMAにより、乳化燃料を使用した場合は、主要な元素として硫黄、酸素及びカルシウムが、少量元素として炭素、ケイ素、亜鉛、鉄、カリウム及びナトリウムが検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、主要な元素として、炭素及び酸素が、少量元素として、硫黄及びカルシウムが検出された。以上の結果から、ピストンヘッドの場合とほぼ同様に、いずれの試料も硫酸カルシウム及び炭素を主成分とすることが分かった。元素の起源もほぼ同様であろうが、鉄は部材が起源と考えられる。燃料の相違による付着物の性状及び成分比率の相違についてもピストンヘッドの場合と同様に考えられる。

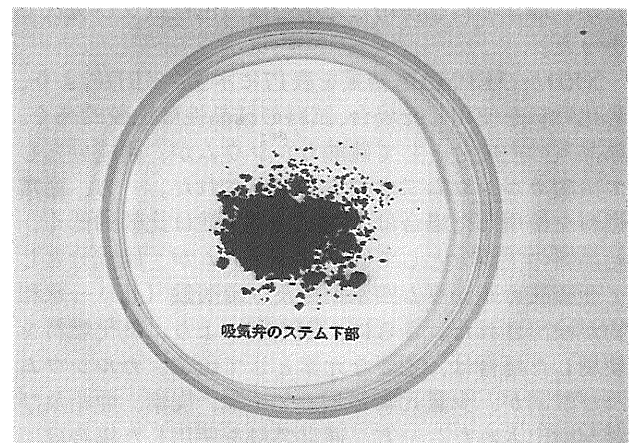
7.2.2.3. 吸気弁ステム下部

吸気弁ステム下部の付着物の写真を図61に示す。いずれの燃料を使用した場合も黒色粒状の外観を呈し、硫黄臭を有した。

XRD及びEPMAの結果を表16に示す。XRDにより、



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図61 吸気弁ステム下部付着物外観

表16 吸気弁ステム下部付着物の分析結果

	乳化燃料	通常燃料
外観	黒色粒状 (塊状を含む)	黒色粒状 (塊状を含む)
XRD	結晶性	低い
	結晶質の主成分	CaSO ₄
	結晶質の副成分	CaSO ₄ ・2H ₂ O CaSO ₃ ・4H ₂ O FeSO ₄ ・H ₂ O
EPMA	主要元素*	C, S, Ca
	少量元素**	O, Fe

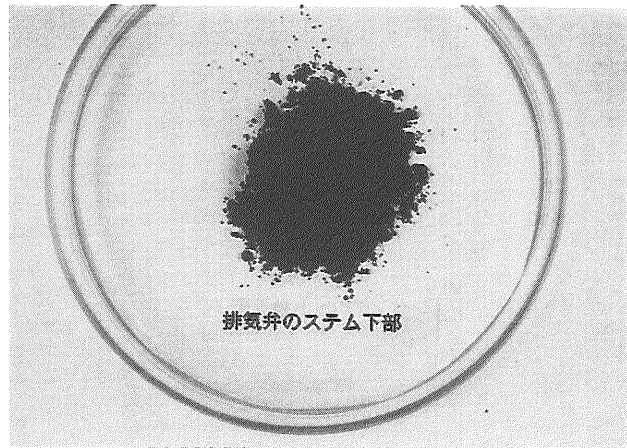
* :10%以上含まれるもの
** : 1%以上含まれるもの

いずれの試料も結晶性が低いものの、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが検出された。また、微量成分として、乳化燃料を使用した場合には、硫酸カルシウム二水和物 (CaSO₄・2H₂O) が、一方、通常燃料を使用した場合には、亜硫酸カルシウム四水和物及び硫酸鉄 (II) 一水和物が検出された。さらに、EPMAにより、乳化燃料を使用した場合は、主要な元素として炭素、硫黄及びカルシウムが、少量元素として、酸素及び鉄が検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、主要な元素として、炭素及び酸素が、少量元素として、硫黄及びカルシウムが検出された。以上の結果から、いずれの試料も硫酸カルシウム及び炭素を主成分とすることが分かった。このうち、炭素の起源は燃料油及び潤滑油、硫黄では燃料油、カルシウムでは潤滑油及び乳化燃料用の水道水、鉄では部材と考えられる。さらに、カルシウムの濃度を比較すると乳化燃料を使用した場合の方が通常燃料を使用した場合よりもかなり高く、乳化燃料中に含まれる雑用水由来のカルシウムが相当量存在することを示唆している。

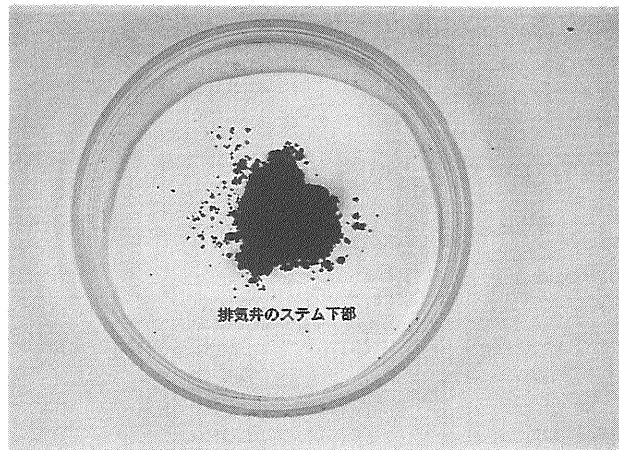
7.2.2.4. 排気弁ステム下部

排気弁ステム下部の付着物の写真を図62に示す。乳化燃料を使用した場合、試料は灰色灰状の外観を呈したが、通常燃料を使用した場合は黒色粒状及び塊状であった。

XRD及びEPMAの結果を表17に示す。XRDにより、乳化燃料を使用した場合、試料の結晶性は比較的高く、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが、副成分として硫酸カルシウム二水和物が検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、試料の結晶性は比較的低く、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが、副成分として亜硫酸カルシウム四水和物及び硫酸鉄 (II) 一水和物が検出された。さらに、EPMAにより、乳化燃料を使用した場合は、主要な元素として硫黄、カルシウム及び酸素が、少量元素としてケイ素、炭素、亜鉛及び鉄が検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、主要な元素として、炭素及び酸素が、少量元素として、硫黄及びカルシウムが検出された。以上の結果から、いずれの試料も硫酸カルシウム及び炭素を主成分とす



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図62 排気弁ステム下部付着物外観

表17 排気弁ステム下部付着物の分析結果

	乳化燃料	通常燃料
外観	灰色灰状	黒色粒状 (塊状を含む)
XRD	結晶性	高い
	結晶質の主成分	CaSO ₄
	結晶質の副成分	CaSO ₄ ・2H ₂ O CaSO ₃ ・4H ₂ O FeSO ₄ ・H ₂ O
EPMA	主要元素*	S, Ca, O
	少量元素**	Si, C, Zn, Fe

* :10%以上含まれるもの
** : 1%以上含まれるもの

ることが分かった。各元素の起源については吸気弁の場合と同様であるが、ケイ素等の微量元素は乳化燃料用の雑用水が起源と考えられる。さらに、カルシウム濃度の比較結果についても吸気弁の場合と同様であり、乳化燃料中に含まれる雑用水由来のカルシウムが相当量存在することを示唆している。

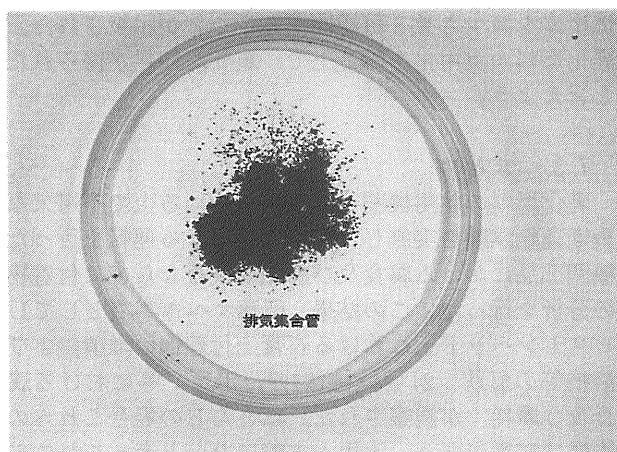
7.2.2.5. 排気集合管

排気集合管の付着物の写真を図63に示す。乳化燃料を使用した場合、灰白色灰状の外観を呈した。これに対し、通常燃料を使用した場合の付着物は黒色灰状であった。

XRD及びEPMAの結果を表18に示す。XRDにより、乳化燃料を使用した場合、試料の結晶性は高く、結晶質の主成分として硫酸銅 (CuSO₄) が、副成分として硫酸銅五水和物 (CuSO₄・5H₂O) 及び硫酸カルシウムが検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、試料の結晶性は比較的低く、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが、副成分として亜硫酸カルシウム四水和物及び硫酸鉄 (II) 一水和物が検出された。さらに、EPMAにより、乳化燃料を使用した場合は、主要な元素として銅、硫黄及び酸素が、微量元素としてケイ素、カルシウム、鉄及び炭素が検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、主要な元素として、炭素及び酸素が、微量元素として、硫黄、鉄及びカルシウムが検



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図63 排気集合管付着物外観

表18 排気集合管付着物の分析結果

外観	乳化燃料	通常燃料	
	灰白色灰状	黒色灰状	
XRD	結晶性	高い	低い
	結晶質の主成分	CuSO ₄	CaSO ₄
	結晶質の副成分	CuSO ₄ ・5H ₂ O CaSO ₄	CaSO ₃ ・4H ₂ O FeSO ₄ ・H ₂ O
EPMA	主要元素*	Cu, S, O	C, O
	微量元素**	Si, Ca, Fe, C	S, Fe, Ca

* : 10%以上含まれるもの
** : 1%以上含まれるもの

出された。以上の結果から、乳化燃料を使用した場合の試料は硫酸銅を主成分とし、このほかに微量の硫酸銅五水和物、硫酸カルシウム及び炭素を含むことが分かった。また、通常燃料を使用した場合の試料は硫酸カルシウム及び炭素を主成分とし、このほかに微量の亜硫酸カルシウム四水和物及び硫酸鉄 (II) 一水和物を含むことが分かった。このうち、炭素及び硫黄の起源は燃料油、銅では排気集合管の銅製パッキン、カルシウムでは潤滑油及び乳化燃料用の雑用水と考えられる。通常燃料を使用した場合に銅が検出されないのは、サンプリング位置の違いによるものと考えられる。

7.2.2.6. 過給機内部

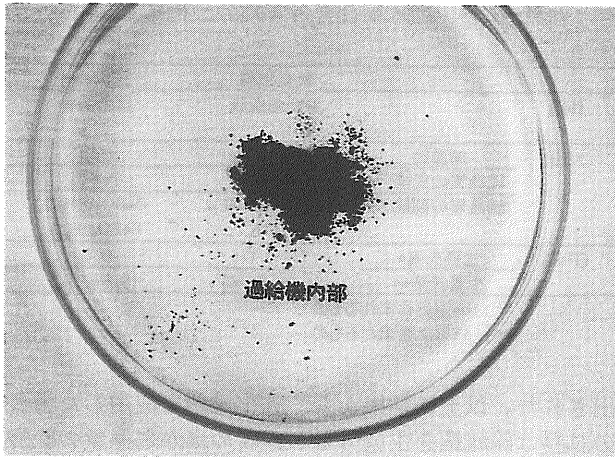
過給機内部の付着物の写真を図64に示す。いずれの燃料を使用した場合も試料は黒色灰状の外観を呈した。

XRD及びEPMAの結果を表19に示す。XRDの結果から、いずれも試料の結晶性は比較的低く、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが検出された。また、乳化燃料を使用した場合は微量の硫酸カルシウム2水和物が、一方、通常燃料を使用した場合は微量の亜硫酸カルシウム四水和物及び硫酸鉄 (II) 一水和物が検出された。さらに、EPMAの結果から、乳化燃料を使用した場合は、主要な元素として炭素、硫黄、酸素及びカルシウムが、微量元素としてケイ素及び鉄が検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、主要な元素として、炭素及び酸素が、微量元素として、硫黄、カルシウム及び鉄が検出された。以上の結果から、いずれ

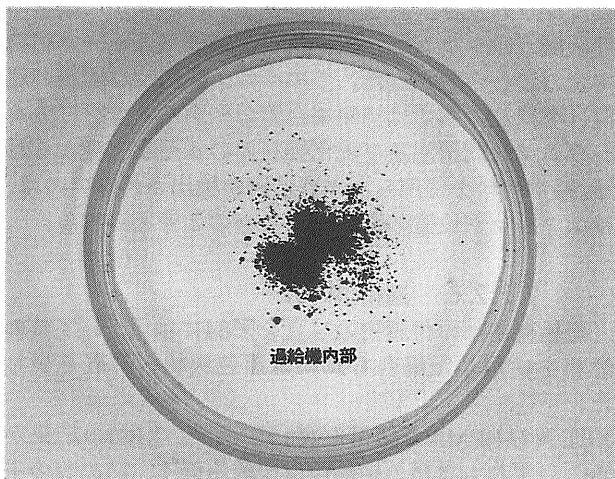
表19 過給機内部付着物の分析結果

外観	乳化燃料	通常燃料	
	黒色灰状	黒色灰状	
XRD	結晶性	低い	低い
	結晶質の主成分	CaSO ₄	CaSO ₄
	結晶質の副成分	CaSO ₄ ・2H ₂ O	CaSO ₃ ・4H ₂ O FeSO ₄ ・H ₂ O
EPMA	主要元素*	C, S, O, Ca	C, O
	微量元素**	Si, Fe	S, Ca, Fe

* : 10%以上含まれるもの
** : 1%以上含まれるもの



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図64 過給機内部付着物外観

の試料も硫酸カルシウム及び炭素を主成分とすることが分かった。元素の起源ならびに燃料の相違によるカルシウム濃度の変化については吸気弁等と同様と考えられる。

7.2.2.7. 付着物検査のまとめ

以上の結果から、今回調査した付着物は3つのグループに分類される。第一は、乳化燃料を使用した場合のピストンヘッド頂部、シリンダヘッド触火面及び排気弁システム下部の試料、第二は、乳化燃料を使用した場合の排気集合管の試料、そして第三は、乳化燃料を使用した場合の吸気弁システム下部及び過給機内部の試料、ならびに通常燃料を使用した場合の全ての試料である。第一グループは炭素が少なく、硫酸カルシウムを多く含む。一方、第二グループは炭素が少なく、硫酸銅を多く含む。そして第三グループは多量の炭素を含み、結晶性の成分として硫酸カルシウムを多く含

む。このうち、第二グループは、サンプリング位置等による影響が考えられるため、通常燃料を使用した場合と単純に比較することは出来ないものの、第一及び第三グループを比較することにより、乳化燃料の使用が付着物に及ぼす影響を検討することが出来、さらにそこから燃焼及び部品に与える影響を検討する上で有益な知見を見いだすことが出来る。

第一グループのうち、ピストンヘッド頂部及びシリンダヘッド触火面の試料は、いずれも噴射された燃料が燃焼した直後に火炎もしくは排気ガスが直接接触する部位からサンプリングされたため、乳化燃料の試料が燃焼に及ぼす影響を検討する上で重要であるといえよう。まず、ピストン頂部に着目すると、7.2.2.1.節で述べたように、乳化燃料の使用により付着物の堆積状態が全く異なっており、また、ピストンヘッド上に溶痕が観察されたことから、燃焼火炎が伸張して、ピストンに直接接触したと示唆される。次に、シリンダヘッド触火面上の試料であるが、こちらも燃焼した直後の排ガスが接触する部分であるため、XRD及びEPMAともピストンヘッド頂部の場合とよく似た結果を示している。さらに、排気弁システム下部を含むこれら第一グループの試料を同一位置でサンプリングした第三グループの試料と比較すると、いずれも乳化燃料を使用した場合の方が炭素の含有量が低下している。排気弁システム下部には、燃焼後、燃焼室から排気されるガスが冷却される過程でガス中の固形物が付着し、この中には通常多量の炭素が含まれるが、乳化燃料を使用した場合は炭素の割合が少なく結晶性が高い。水の添加により燃焼温度は低下するはずであるが、それが必ずしも燃焼の悪化や未燃炭素の増加とはなっていないと考えられる。

このように、付着物の分析から、一部の部品への硬質付着物の堆積及び溶損等の発生が指摘されたが、一方で、乳化燃料の使用は燃焼を悪化させず、むしろ未燃炭素を減少させる可能性があることが示唆された。乳化燃料の実用化を図る上で、重要な知見が得られたと言えよう。

7.3. まとめ

乳化燃料の船用機関への適用を進める上で不可欠な長期運転試験を実施し、乳化燃料による運転を行った機関部品における腐食及び摩耗の検査ならびに付着物の分析を行った。この結果、留意すべき事項として1) ピストンヘッド上における石膏上付着物の堆積および溶損等の痕跡、2) 燃料噴射弁、ポンプ等における腐食及び摩耗、が観察された。ほとんどの場合これらの影響は軽微であり、実用上支障はないと考えられるものの、ピストンヘッド及び燃料噴射弁については、機関の安全性の観点から、材質、形状等を再検討する必要性が指摘される。乳化燃料の利用を促進する上で、

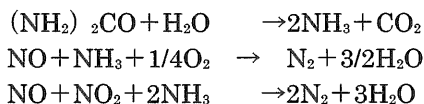
これらの問題についても充分留意する必要があると言えよう。

8. 船用ディーゼル機関における脱硝装置の適合性について

脱硝装置の使用は大幅なNOx排出量の削減が可能であるばかりでなく、機関は燃費の良い状態に調整できるため地球温暖化物質であるCO₂の排出量の削減にもつながる有効な手法である。そこで脱硝装置を実験用ディーゼル機関の下流に設置し、機関の運転条件及び燃料性状の違いによる脱硝特性について調べ、船用ディーゼル機関における本装置の適合性について検討した。

8.1. 実験装置及び方法

本実験はSCR式(選択接触還元式)脱硝装置を用いて行った。触媒にはTiO₂-V₂O₅系の触媒を、還元剤には40%尿素水を使用した。この脱硝装置での代表的な反応式は次式である。



実験に使用した脱硝装置の主要目を表20に示す。図65、66に脱硝装置の反応器の外形図、脱硝システムの系統図を示す。反応器は150mm²、長さ580mmの触媒(セル数40)9本で構成される触媒層を2段配置したもので、機関出口から約14m下流に設置されている。また、排気温度の低下を防ぐため機関出口から反応器までの配管には保温が施されている。還元剤は反応器の約2m上流に設けられたノズルから噴射混合され、曲管部でさらに混合され反応器に導かれる。還元剤の投入量は、脱硝率が約90%に成るように設定した。

本実験についても表2に示した実験機関を使用し

表20 脱硝装置の主要目

様式	SCR式
処理ガス量	1350m ³ N/h (SV値: 5750m ³ N/m ³ h)
温度	330~480℃
構成機器	脱硝反応器 還元剤供給装置 スートブロー
触媒	TiO ₂ -V ₂ O ₅ 系
還元剤	40%尿素水

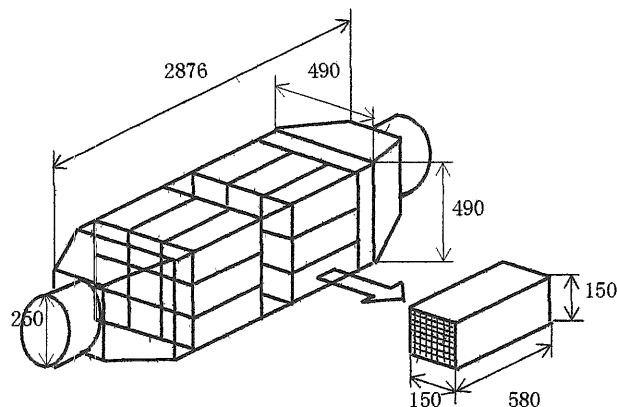


図65 脱硝反応器の外形図

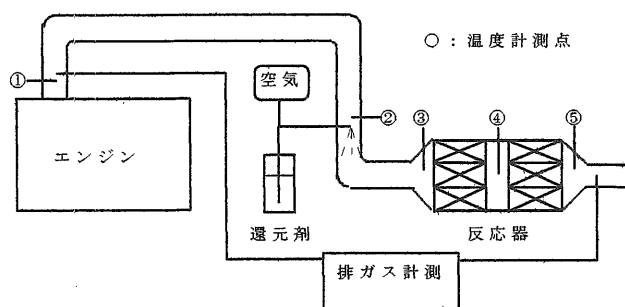


図66 脱硝システムの系統図

た。燃料は、表21に示すA重油及びC重油を使用した。実験は①機関の運転条件の違いによる脱硝特性、②燃料の性状の違いによる脱硝特性を調べるため実施した。

機関の運転条件の違いによる脱硝特性を調べるための実験は、機関を表22に示す船用特性、発電機特性の

表21 使用燃料の性状

燃料	A重油	C重油
密度 (15℃)g/cm ³	0.8599	0.9555
反応	中性	中性
引火点 ℃	88	116
目づまり温度 ℃	-13	
流動点 ℃	-15	-7.5
動粘度 cSt(50℃)	2.52	163
総発熱量 kcal/kg	10840	10290
残炭分 wt%	0.42(10%)	11.1
硫黄分 wt%	0.06	2.92
灰分 wt%	0.01以下	0.02
水分 vol%	0.05以下	0.1
窒素分 wt%	0.02	0.22

表22 排ガス成分と測定装置

機関運転条件	船用特性		発電機特性	
負荷	50%	75%	50%	75%
出力 PS (kW)	175 (129)	262.5 (193)	175 (129)	262.5 (193)
回転数 rpm	333	382	420	420
荷重 kgf	525.5	687.1	416.7	625.0

50%負荷、75%負荷で運転し、機関出口部及び脱硝装置出口部の排ガスのNO_x、O₂、CO₂、CO、HC、N₂Oを計測した。機関の運転条件は排ガス温度及び排ガス流量の違いを考慮して選定した。

燃料性状の違いによる脱硝特性を調べるための実験は、A重油とC重油を使用して、機関を船用特性の50%負荷、75%負荷で運転し、機関出口部及び脱硝装置出口部の上記排ガス成分を計測した。

また、図66に示す過給機後、還元剤注入前、触媒前、触媒中間部、触媒後の排ガス温度も測定した。

8.2 実験結果及び考察

8.2.1 運転状態の違いによる脱硝特性

図67に、機関を船用特性、発電機特性の50%負荷、75%負荷で運転した時の機関出口部及び脱硝装置出口部のNO_xの変化を示す。(13%O₂換算の値である。)脱硝装置の使用により十分な脱硝効果(約90%脱硝)を確認できる。

図68に機関を運転開始後、船用特性50%負荷で運転した時の脱硝装置出口部でのNO_x、O₂、CO₂、CO及び各部排ガス温度を示す。還元剤の注入により脱硝反応が起こり、NO_xが大幅に低減しているのが分かる。また、還元剤の注入を停止するとNO_xが増加するのが分かる。COは還元剤注入の有無に関わらず変化しないのが分かる。

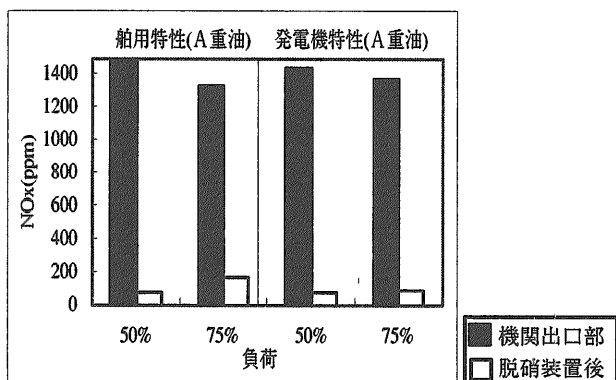


図67 機関出口部及び脱硝装置出口部のNO_x濃度

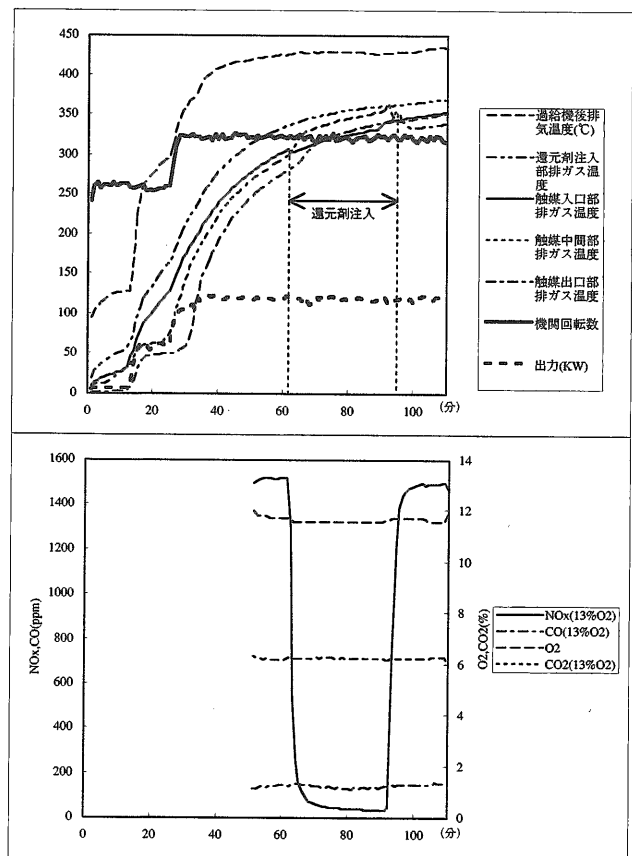


図68 各部排ガス温度及び脱硝装置出口部での排ガス計測例(船用特性50%負荷、A重油)

また、触媒前排気ガス温度は時間と共に上昇するが、還元剤注入の際に還元剤の蒸発熱により低下しているのが分かる。触媒中間部及び触媒後排気ガス温度は還元剤注入の際に発熱反応である脱硝反応により上昇しているのが分かる。機関運転開始後1時間後に還元剤を注入したが(触媒温度は定常状態に到達していないが)、触媒前、触媒中間部及び触媒後排気ガス温度は300°Cを越えており、十分な脱硝効果が得られた。

8.2.2 燃焼性状の違いによる脱硝特性

図69、70に、A重油とC重油を使用して機関を船用特性の50%負荷、75%負荷で運転した時の機関出口部及び脱硝装置出口部のNO_x、N₂Oの変化を示す。(それぞれ13%O₂換算の値である。)脱硝装置の使用により十分な脱硝効果(約90%脱硝)を確認できる。

N₂Oについて見てみると、機関から排出されるN₂Oレベルは、A重油では低いですがC重油では非常に高くなっているのが分かる。NO、SO₂及び水の反応によりN₂Oが生成されるという報告もあり、燃料中のS分の影響によりC重油ではN₂O排出レベルが高くなったものと考えられる。また、脱硝装置(Pt系触媒)の使用によりN₂Oが増加するという報告もあるが、今回のC重油

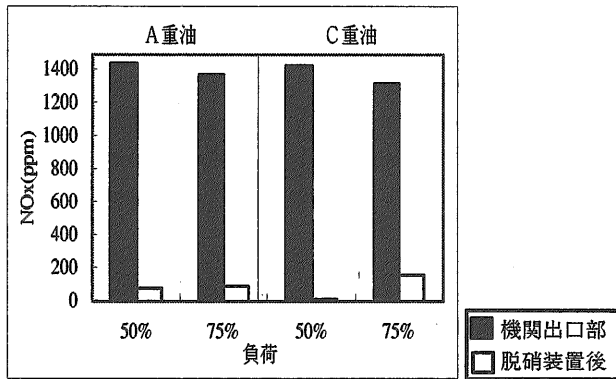


図69 機関出口部及び脱硝装置出口部のNO_x濃度

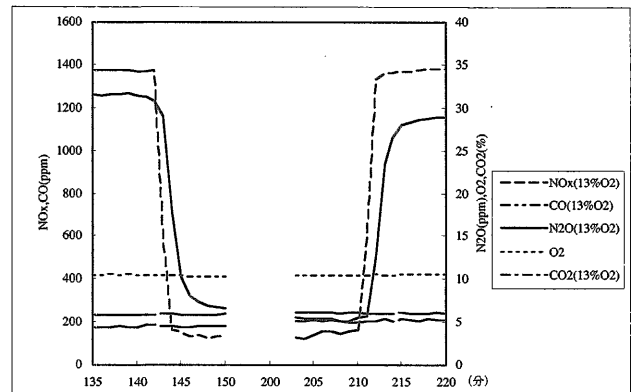


図71 脱硝装置出口部での排ガス計測例 (船用特性75% 負荷、C重油)

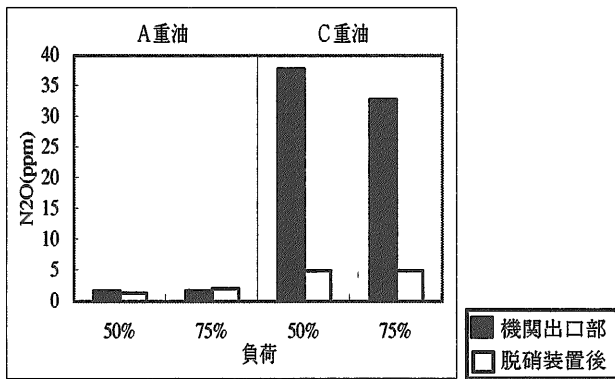
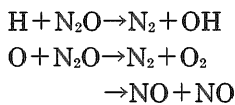


図70 機関出口部及び脱硝装置出口部のN₂O濃度

での実験では減少することが確認された。これは、以下の反応により低減したものと考えられる。



触媒の種類によっては、NO_xに加えてN₂Oも低減が可能であることが分かった。

図71にC重油を使用して機関を船用特性75%負荷で運転した時の脱硝装置出口部でのNO_x、O₂、CO₂、CO、N₂Oを示す。還元剤の注入により脱硝反応が起こり、NO_xが大幅に低減すると共にN₂Oも低減しているのが分かる。また、還元剤の注入を停止するとNO_xが増加し、N₂Oも増加するのが分かる。COは還元剤注入の有無に関わらず変化しないのが分かる。

8.3. まとめ

今回の船用中速4サイクル機関を用いたSCR脱硝装置の実験により以下のことが分かった。

- 1) 船用特性、発電機特性ともに機関負荷50%から脱硝装置の使用が可能である。
- 2) 機関を始動後負荷50%で運転すれば、1時間後に脱硝装置の使用が可能である。

3) C重油についてもA重油同様に十分な脱硝効果を確認した。

4) 本脱硝装置の使用により、NO_xに加えN₂Oの削減も可能である。

9. 本研究により得られた成果

船舶が大気汚染に与える影響を正確に推定できるようにするため、船用ディーゼル機関から排出される有害ガスの排出特性を実験用4サイクルディーゼル機関によって調査した。まず、燃料の性状が排ガス特性にどのような影響を与えるかについて、13種類の船用燃料を使用して調査した。燃料の着火性に注目してNO_xの排出特性を調べた結果、燃料の着火性とNO_x排出量の間には強い相関があることがわかった。

次に、負荷変更プログラム機能を備えた水動力計を使用して、船舶の航行状態における海象変化を模擬し、実験用ディーゼル機関からの有害排ガス成分の排出挙動を調査した。その結果、機関軸トルクによるNO_x濃度の変化傾向を把握するとともに、周期的な負荷変動状態におけるNO_x濃度の平均値が対応する平均静的負荷状態の値と同等であることを確認した。

また、将来のNO_x低減対策として期待が高まる水エマルジョン燃料運転に伴う大気汚染物質の排出傾向を把握する目的で、実験用ディーゼル機関の負荷率、使用燃料油種及び加水率の組合せを種々に変更して、有害排ガス成分全般における発生率の変化を評価した。その結果、NO_x低減効果の特性を確認したが、機関負荷率の低下に伴う燃焼悪化及びNO_x低減効率の減少傾向を認識した。

更に、燃料ポンプ、燃料カム及び燃料弁を変更して、NO_x低減高加及び燃焼改善効果との関係を検討するとともに、高加水率の乳化燃料運転を達成し、その排気特性を基に有用性について検証した。その結果、乳化燃料による噴射量増加のために燃料ポンプを変更する場合は、燃料カム形状、燃料弁を適合させることに

より、NO_x低減効果の向上が期待できることが分かった。また、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%を超えるNO_x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NO_x低減法と考えられる。

次に、排ガス浄化システムである脱硝装置を実験機関に装備し排ガスに与える影響を調べた。その結果、TiO₂-V2O5系の触媒を用いた本脱硝装置により、NO_xの大幅な低減(脱硝率90%)に加えN₂Oの削減も可能であることが分かった。

なお、本研究成果は下記の多くの発表論文の内容を総合的に取りまとめたものであることを付記する。

10. 研究発表

- 1) 菊地正晃他：船用4サイクルディーゼル機関のNO_x排出量の実船計測(第2報)、船舶技術研究所第67回研究発表会、東京、1996
- 2) 中島康晴他：船用ディーゼル機関から排出されるパーティキュレートの測定、船舶技術研究所第67回研究発表会、東京、1996
- 3) 西川和美他：水エマルジョン燃料を用いた船用ディーゼル機関から排出されるパーティキュレートの測定、船舶技術研究所第67回研究発表会、東京、1996
- 4) 中島康晴他：エマルジョン燃料を用いた船用ディーゼル機関から排出されるパーティキュレートの測定、日本船用機関学会第57回学術講演会、神戸、1996
- 5) Y. Nakajima et al: Study on the exhaust emissions of NO_x and Particulate Matters from a marine diesel engine with emulsified fuel, 3rd International Marine Engineering Conference, Shanghai, 1996
- 6) 山谷周二他：船用4ストローク機関の軸トルク変動によるNO_x排出特性、日本船用機関学会第58回学術講演会、東京、1997
- 7) 菊地正晃他：NO_x計測値に及ぼすトルク変動の影響、船舶技術研究所第69回研究発表会、東京、1997
- 8) 中島康晴他：乳化燃料を利用した場合の中速ディーゼル機関からの排ガス組成の研究、日本化学会第73回秋季年会、盛岡、1997
- 9) NAKAJIMA Y., et al: Study on Exhaust Emission from Medium-speed Marine Diesel Engine with Emulsified Fuels, 3rd International Conference on Internal Combustion Engines: Experiments and Modeling, Naples, 1997
- 10) 西尾澄人他：乳化燃料による船用ディーゼル機関の排気特性に及ぼす燃料噴射系の影響、日本船用機関学会第59回学術講演会、神戸、1997
- 11) NAKAJIMA Y., et al: Study on Emissions Characteristics of Air Pollutants from Medium-speed Marine Diesel Engine with Emulsified Fuels, 22nd CIMAC International Congress on Combustion Engines, Copenhagen, 1998
- 12) 石村恵以子他：船用ディーゼル機関の乳化燃料運転に及ぼす燃料噴射系の影響、第71回船舶技術研究所研究発表会、東京、1998
- 13) 西尾澄人他：船用ディーゼル機関における脱硝装置の適合性について(第1報)、第71回船舶技術研究所研究発表会、東京、1998
- 14) 西川和美他：エマルジョン燃料とEGRを使用した場合の高速ディーゼル機関の排ガステ性、第71回船舶技術研究所研究発表会、東京、1998
- 15) 桑原孫四郎他：船用ディーゼル機関における脱硝装置の適合性について、日本船用機関学会第61回学術講演会、神戸、1998
- 16) 張潔他：実船における乳化燃料使用時の排気特性の研究、日本船用機関学会第61回学術講演会、神戸、1998
- 17) 中島康晴他：4サイクルディーゼル機関への乳化燃料の適用、機械学会第7回交通物流部門大会講演、川崎、1998
- 18) 桑原孫四郎他：N₂O等有害排ガスに与える燃料性状および脱硝装置の影響、日本船用機関学会誌Vol34.No.2、1999

11. 参考文献

- 1) 前田和幸他：水産大学校研究業績、第1414号、P.19~26、1993
- 2) 神戸商船大学船舶排ガス測定グループ：日本船用機関学会第53回学術講演会予稿集、P.6~11、1994
- 3) 山谷周二他：運輸省航海訓練所研究調査時報第72号、P.1~36、1996
- 4) 塚本達郎他：日本船用機関学会第57回学術講演会予稿集、P.26~30、1996
- 5) 西田修身他：日本船用機関学会誌第32巻第1号、P.30~36、1997
- 6) 前田和幸他：日本船用機関学会誌第32巻第3号、P.223~231、1997
- 7) 吉本康文他：日本船用機関学会誌第28巻第3号、P.228~235、1993
- 8) 塚本達郎他：日本船用機関学会第56回学術講演会予稿集、P.49~53、1996
- 9) 中山信義他：日本船用機関学会誌第32巻第3号、P.243~252、1997
- 10) 塚原茂司他：日本機会学会論文集(B編)54巻506

- 号、P.2955～2960、1988
- 11) 塚原茂司他：日本機会学会論文集 (B編) 57巻542号、P.3584～3589、1991
 - 12) 吉本康文他：日本船用機関学会第56回学術講演会予稿集、P.64～68、1996
 - 13) 長谷川勝男他：日本船用機関学会第58回学術講演会予稿集、P.13～18、1997
 - 14) 近藤博美：日本船用機関学会誌第33巻第5号、P.319～324、1998
 - 15) 淡井信幸他：陸泊中・大型ディーゼル機関用燃料油、山海堂、1994
 - 16) 中山信義他：日本船用機関学会誌第32巻第3号、P.243～252、1997
 - 17) 高崎講二：日本船用機関学会第61回学術講演会学術講演論文集、P.202～207、1998