

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

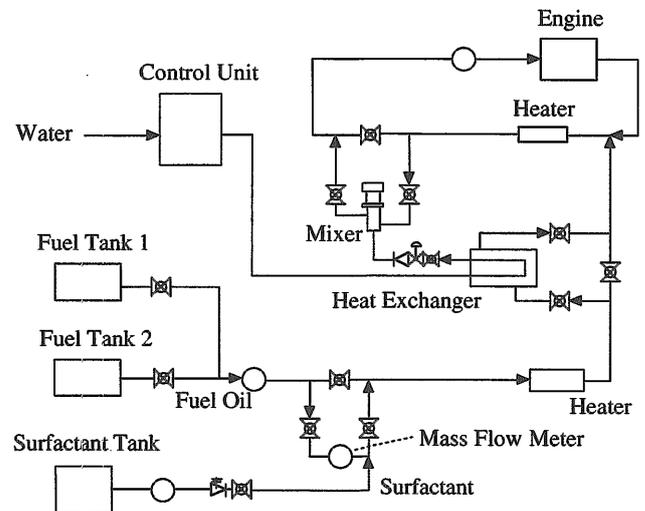


図16 乳化燃料製造装置のシステム概要

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

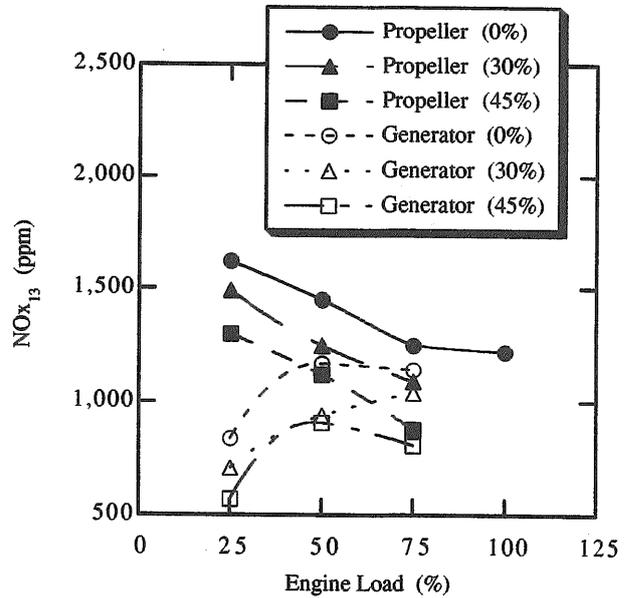


図18 運転特性の違いによる換算NOx濃度の変化

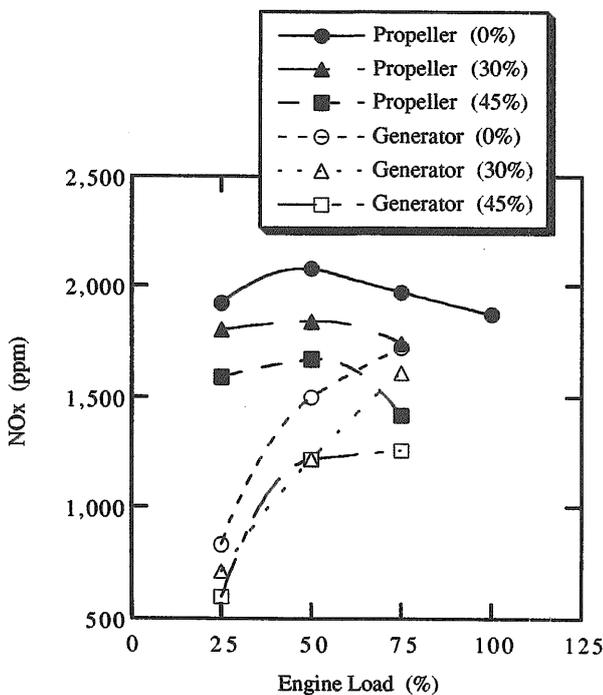


図17 運転特性の違いによる実測NOx濃度の変化

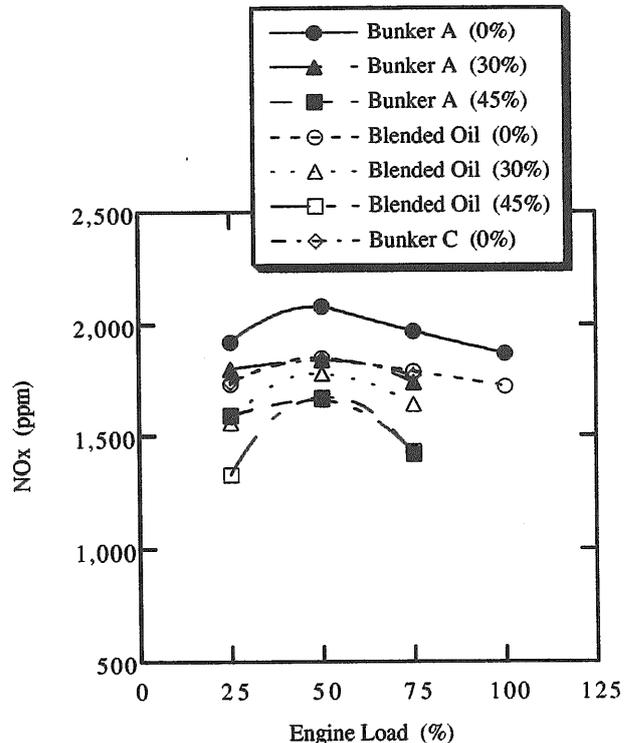


図19 使用燃料の違いによる実測NOx濃度の変化

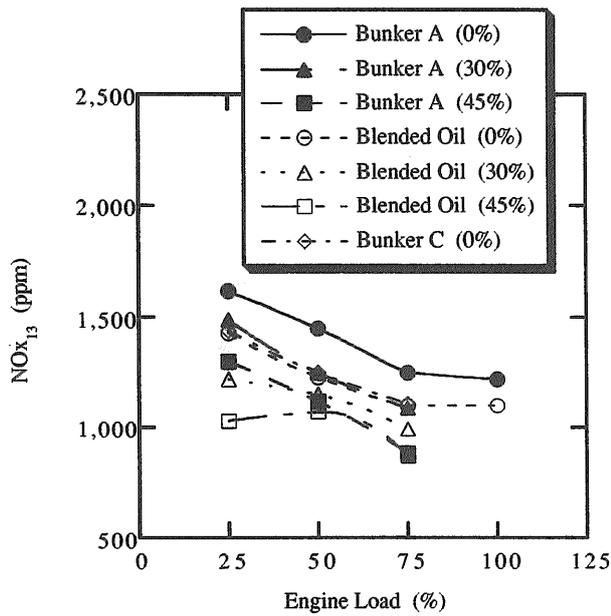


図20 使用燃料の違いによる換算NOx濃度の変化

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

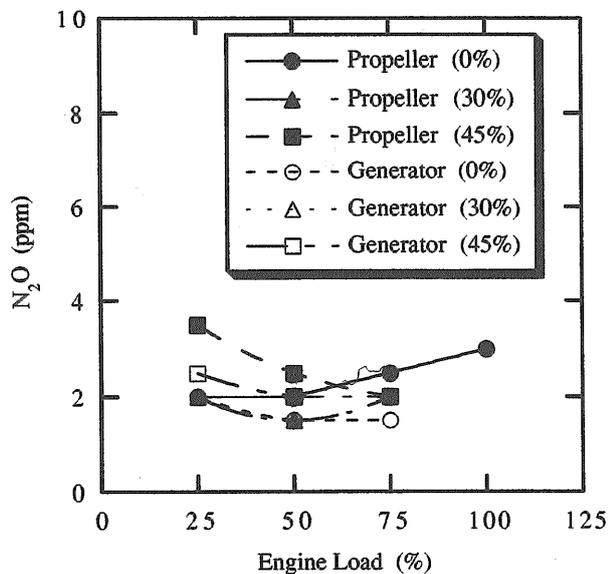


図21 運転特性の違いによるN₂O濃度の変化

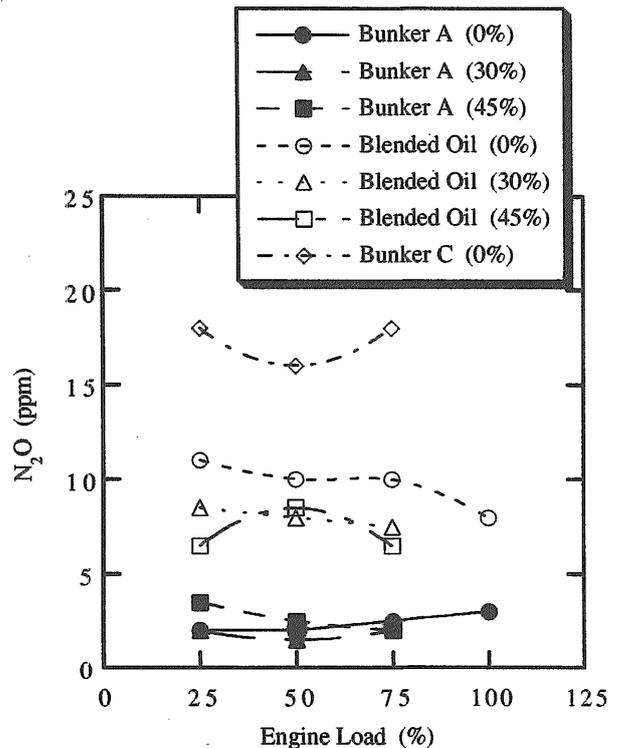
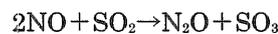


図22 使用燃料の違いによるN₂O濃度の変化

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

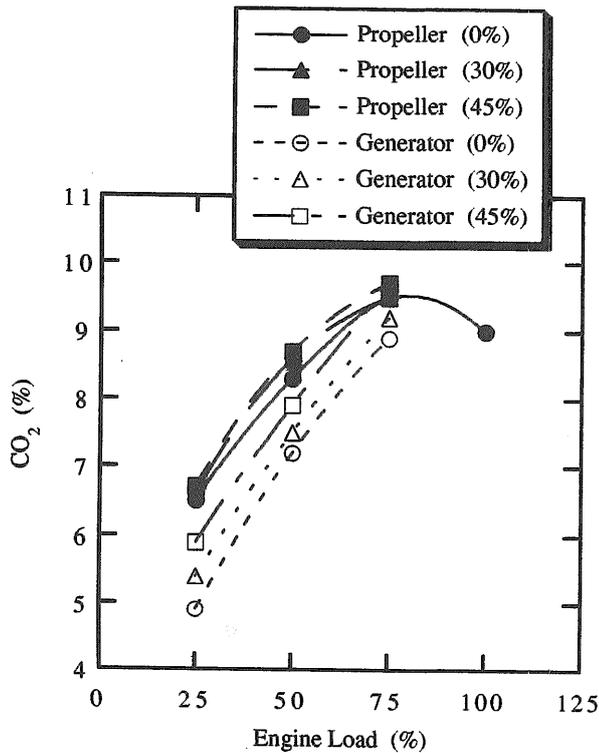


図23 運転特性の違いによるCO₂濃度の変化

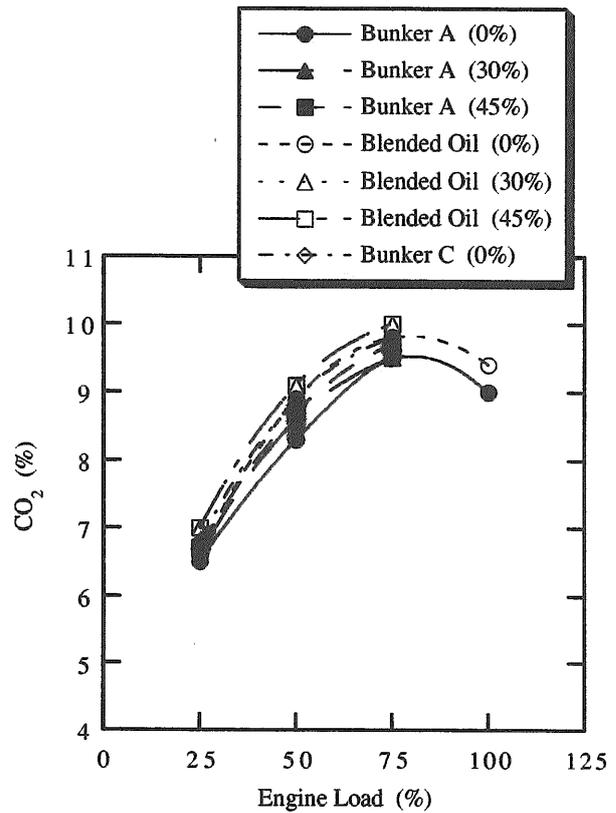


図25 使用燃料の違いによるCO₂濃度の変化

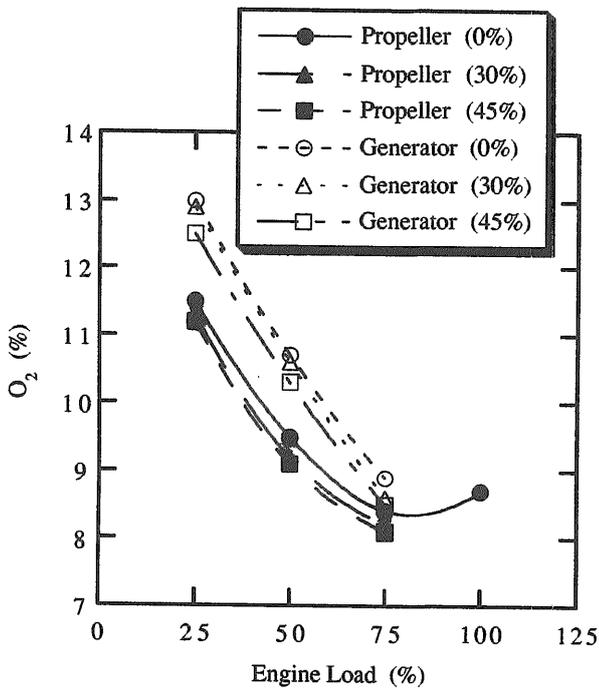


図24 運転特性の違いによるO₂濃度の変化

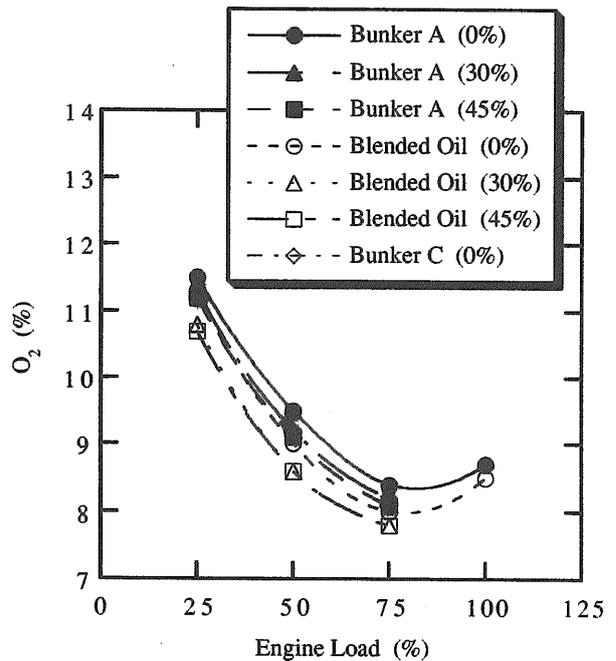


図26 使用燃料の違いによるO₂濃度の変化

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

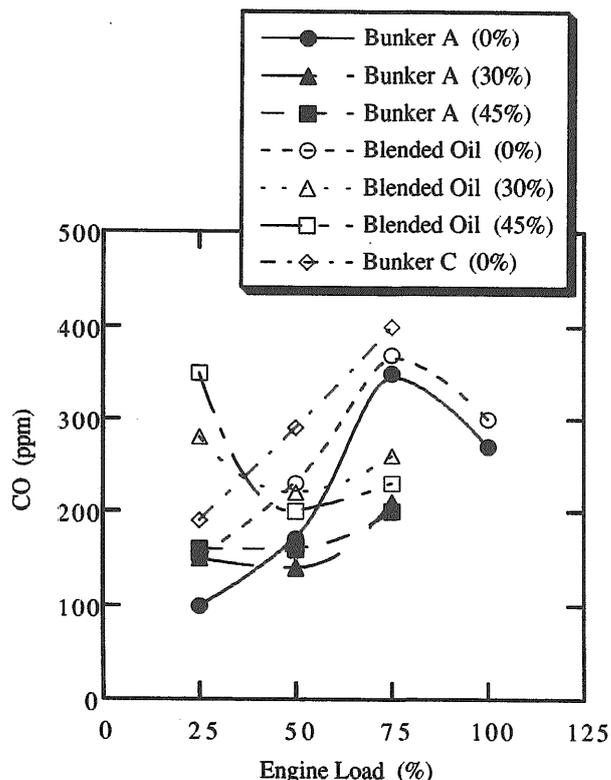


図28 使用燃料の違いによるCO濃度の変化

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。

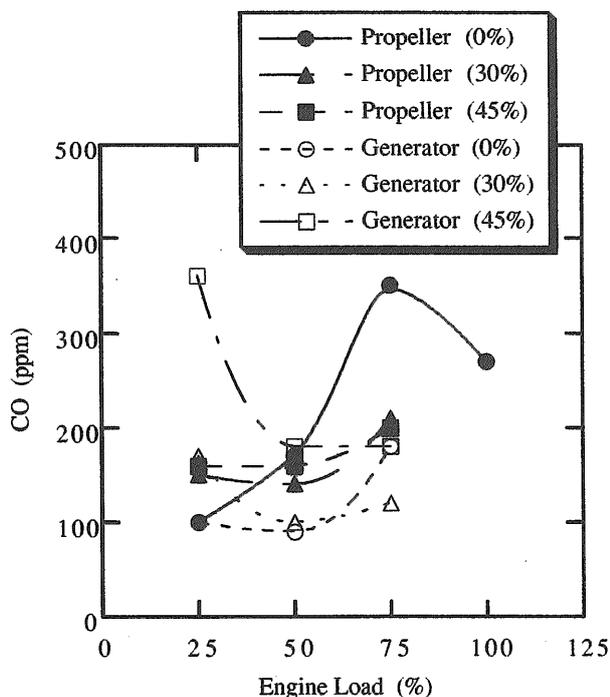


図27 運転特性の違いによるCO濃度の変化

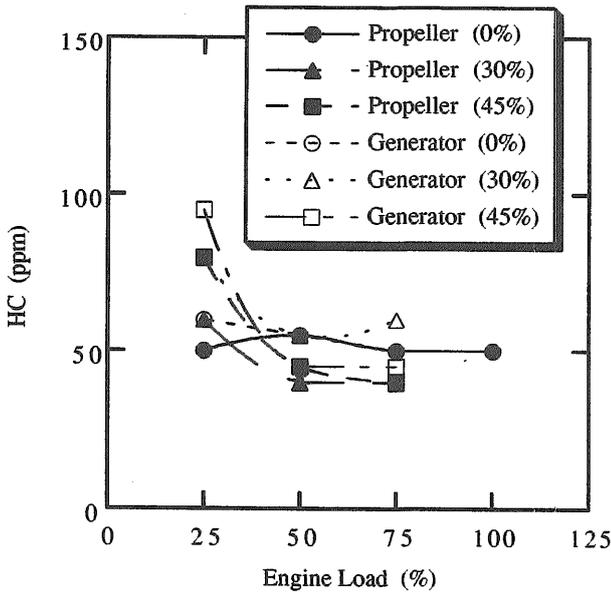


図29 運転特性の違いによるHC濃度の変化

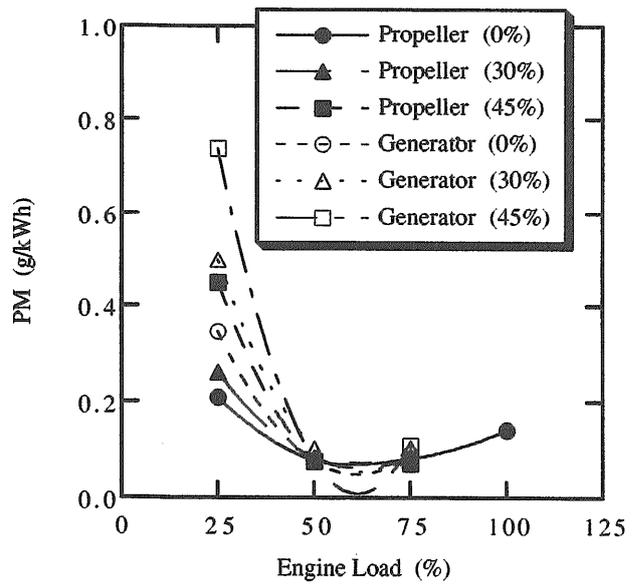


図31 運転特性の違いによるPM排出率の変化

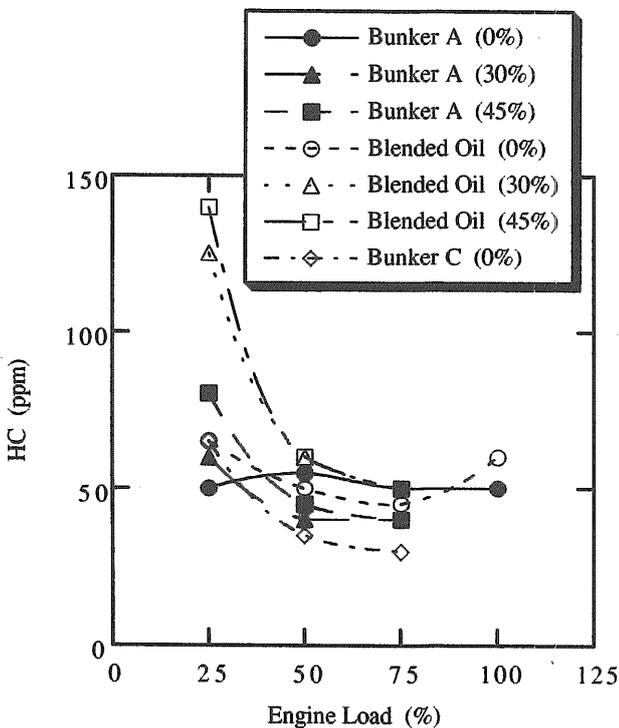


図30 使用燃料の違いによるHC濃度の変化

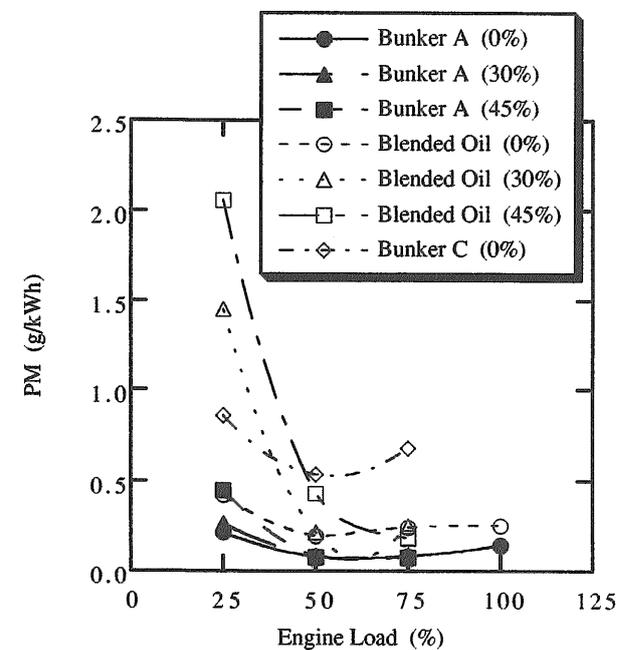


図32 使用燃料の違いによるPM排出率の変化

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

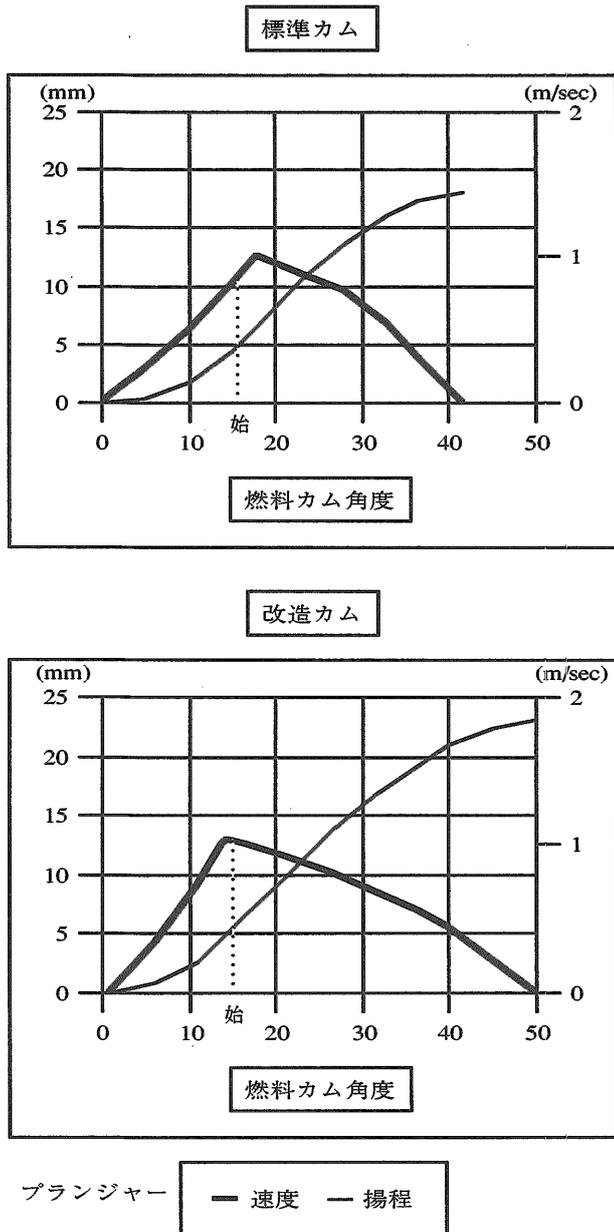


図33 燃料カムによるプランジャー速度揚程線図

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

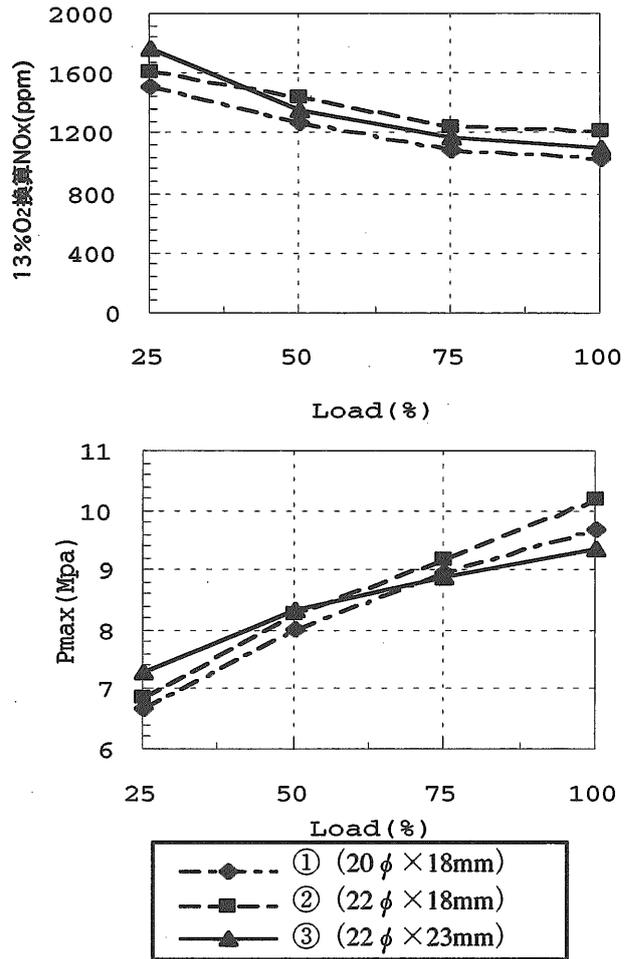


図34 燃料ポンプによるNO_x濃度とPmax（船用特性）

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。

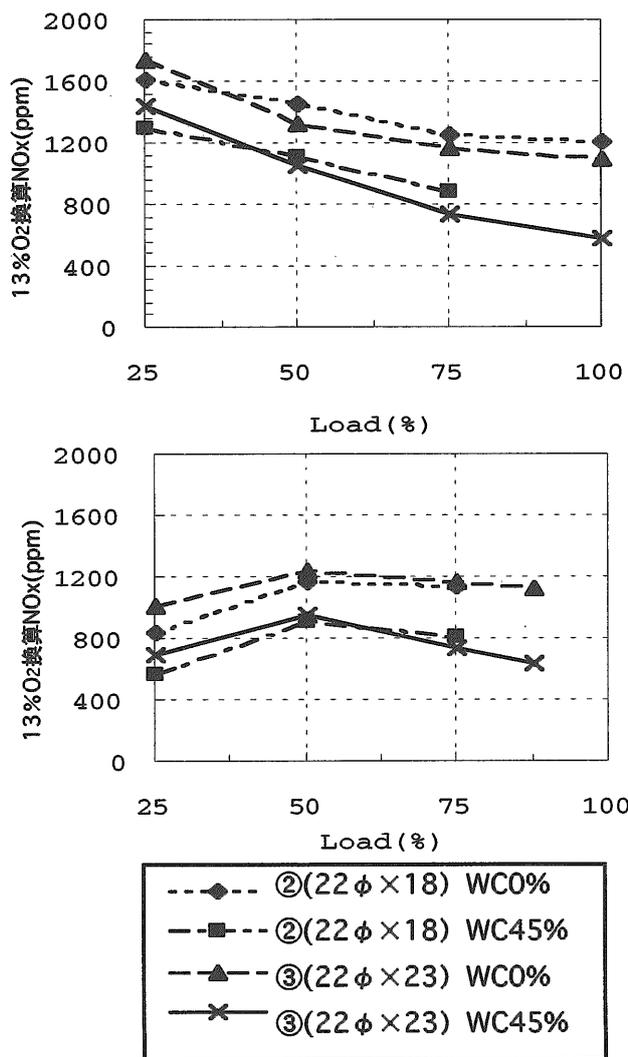


図35 燃料ポンプと乳化燃料によるNOx濃度 (上: 船用特性、下: 発電機特性)

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NOx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NOx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、NOx濃度が変化すると考えられる。一方、

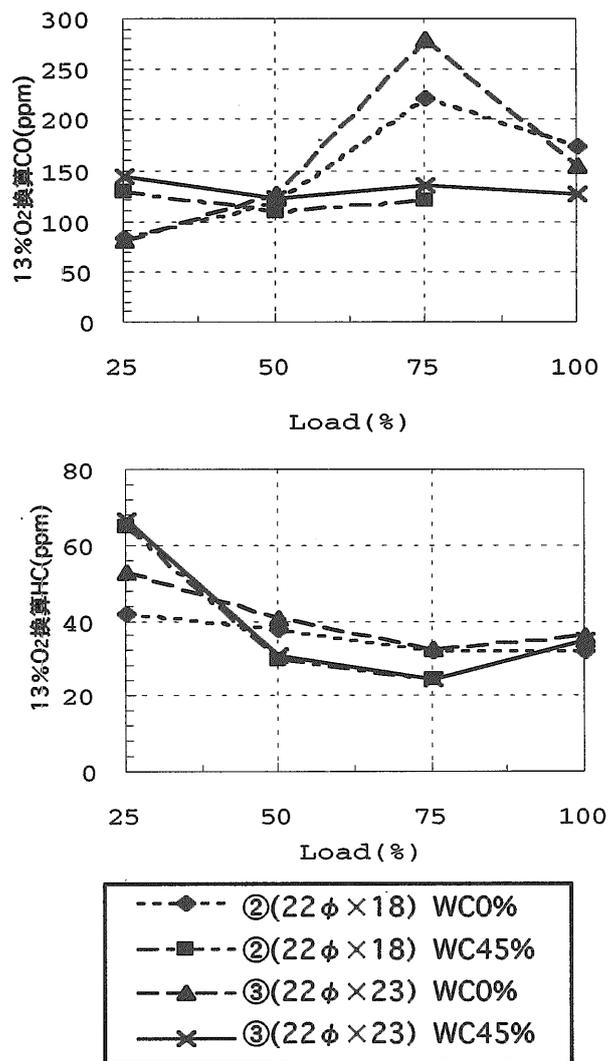


図36 燃料ポンプと乳化燃料によるCO、HC濃度 (船用特性)

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NOx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

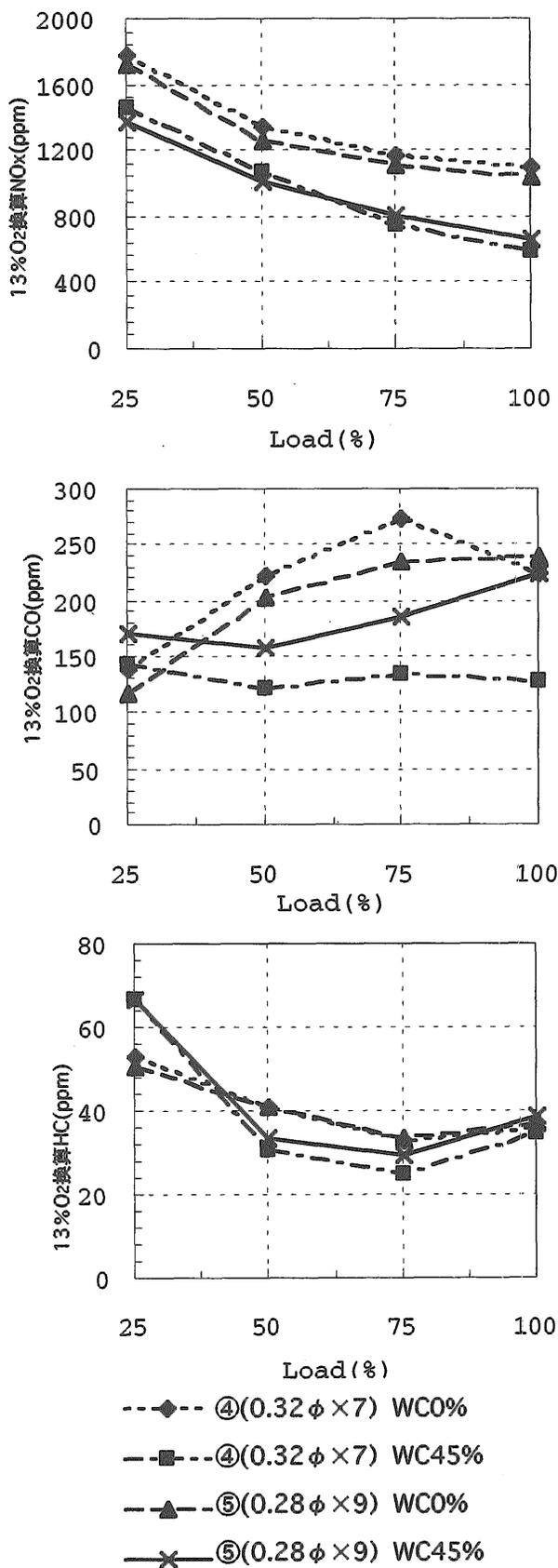


図37 燃料弁と乳化燃料によるNO_x、CO、HC濃度（船用特性）

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

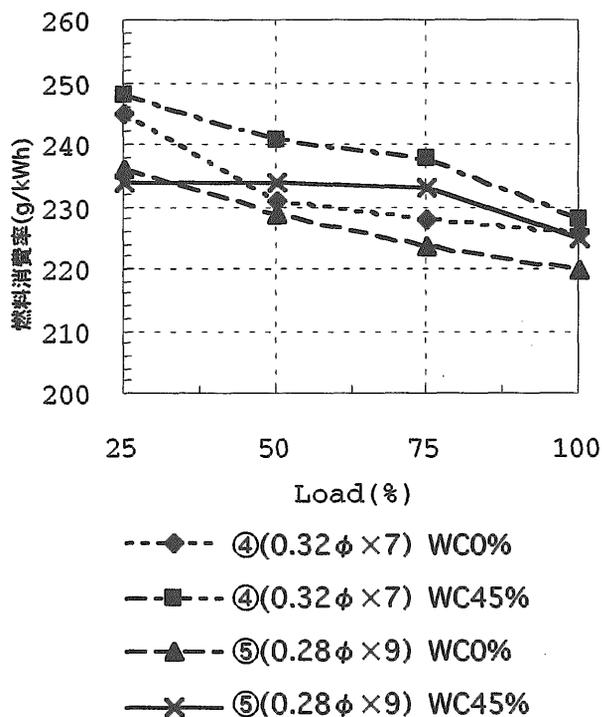


図38 燃料弁と乳化燃料による燃料消費率（船用特性）