

船用機関からの NO_x 低減と PM 測定に関する研究

石村恵以子*、高杉 喜雄**、大橋 厚人*、高木 正英*、
菊地 正晃*、菅 進**、張 潔**、井亀 優*

Study on NO_x Reduction and PM Measurement Method for Marine Diesel Engine

by

Eiko ISHIMURA, Yoshio TAKASUGI, Atsuto OHASHI, Masahide TAKAGI,
Masaaki KIKUCHI, Susumu KAN, Jie ZHANG and Masaru IKAME

Abstract

In this study, the technique for NO_x reduction and the new onboard measurement system of particulate matter (PM) were experimentally researched for the marine diesel engines. The investigation of NO_x reduction was carried out by the fuel injection system and the variable mechanism of the intake and exhaust valve using the hydraulic actuator. It was shown that the displacement from the traditional cam mechanism to the hydraulic actuator decreased the fuel consumption rate and the PM exhaust amount in a light load. The simultaneous application of internal EGR (Exhaust Gas Recirculation) and late exhaust valve opening could reduce NO_x emission without increasing the fuel consumption. The late opening was used to recover a fuel consumption rate aggravation due to internal EGR by the expansion work. Furthermore, if internal EGR was applied under the condition of constant excess air ratio, NO_x emission decreased without increasing the PM exhaust amount.

An onboard system of PM measurement using β -ray absorption method was proposed. The results of the new onboard system were compared with those of the traditional method and the problems of the new system were clarified. In addition, a onboard measurement for a diesel generator was performed using the new system. the PM emission varied widely in 25% load. The PM concentration became large in proportion to the load.

* 環境・エネルギー研究領域

原稿受付 平成17年 3月 16日

** 元 環境・エネルギー研究領域

審査済 平成17年 7月 7日

1. はじめに	14
2. 電子制御ディーゼル機関の 吸排気弁開閉時期の制御について	15
2.1 装置の概要	15
2.1.1 全体構成	15
2.1.2 燃料噴射系	16
2.1.3 吸排弁系	16
2.2 実験方法	17
2.3 吸排気弁の作動確認	17
2.4 吸排気弁開閉時期制御の実験結果	17
2.4.1 排気弁開閉時期の制御	18
2.4.2 吸気弁閉時期の制御	18
2.4.3 オーバーラップ制御	19
2.4.4 排ガス中の酸素濃度と NOx 濃度の関係	19
2.5 噴射時期と吸排気弁開閉時期の 組み合わせによる評価	20
2.6 カム駆動式、燃料噴射系及び吸排気弁 の電子制御の比較	20
2.7 まとめ	21
3. 可変バルブタイミングを用いた 内部 EGR 制御について	21
3.1 実験装置及び実験方法	22
3.2 シリンダ内空気量簡易推定法	22
3.2.1 吸気弁閉時期シリンダ内ガス質量	22
3.2.2 排気タービンと過給機 の仕事の釣合い	22
3.2.3 化学反応式	22
3.3 実験結果及び考察	23
3.3.1 オーバーラップの効果	23
3.3.2 排気弁開閉時期による影響	24
3.3.3 排気弁閉時期による影響	24
3.3.4 燃料消費率と NOx、PM 排出量について	25
3.3.5 空気量推定法について	26
3.4 まとめ	27
4. β線吸収法 PM 計測システムを 用いた実船発電機での測定	27
4.1 はじめに	27
4.2 使用した機関及び燃料	27
4.3 β線吸収法 PM 計測システム	28
4.4 実験結果及び考察	29
4.4.1 検証実験	29
4.4.2 実船発電機での測定	29
4.5 まとめ	30
5. 本研究により得られた成果	30
謝辞	30
参考文献	31

記 号

A, B, C, D, E ; 式(3-5)内の各燃焼反応物のモル数
F, G, H, I ; 式(3-5)内の各燃焼生成物のモル数
Fr_a ; 残留ガス内の空気の質量分率
Fr_{CO_2} ; 残留ガス内の二酸化炭素の質量分率
Fr_{H_2O} ; 残留ガス内の水の質量分率
Fr_{N_2} ; 残留ガス内の窒素の質量分率
G_{cg} ; 燃焼ガス [kg]
G_{del} ; 吸入新気 [kg]
G_{exh} ; シリンダ外に排出されるガス [kg]
G_{res} ; シリンダ内へ残留するガス [kg]
G_{ret} ; シリンダ内へ供給される新気 [kg]
G_{short} ; オーバーラップ期間に排気管へ吹き抜ける 新気 [kg]
M_f ; 1 回に噴射される燃料質量 [kg]
m ; 燃料中の酸素原子数
m_a ; 空気の分子量 [g/mol]
m_{CO_2} ; 二酸化炭素の分子量 [g/mol]
m_f ; 燃料の分子量 [g/mol]
m_{H_2O} ; 水の分子量 [g/mol]
n ; 燃料中の炭素原子数
P_b ; 過給圧 [Pa]
Q ; 見かけの最大熱発生量 [J]
R_s ; 空気のガス定数 [J/kgK]
R_t ; 燃焼ガスのガス定数 [J/kgK]
T_b ; 過給機出口温度
T_s ; シリンダ吸入 (インタークーラ後) 空気温 度 [K]
T_{se} ; タービン出口温度 [K]
T_t ; タービン入口温度 [K]
T_0 ; 大気温度 [K]
V_{cl} ; 吸気弁閉時期におけるシリンダ体積 [m ³]
W_b ; 過給機駆動に要する仕事 [J]
W_t ; タービン出力 [J]
γ ; 排気管内の酸素濃度
η_{gl} ; 等容度
$\eta_{gl\theta}$; 微小定容サイクルの熱効率
κ_s ; 空気の比熱比
κ_t ; 燃焼ガスの比熱比

1. はじめに

IMO (国際海事機関) は船用機関から排出される窒素酸化物 (NOx) に関する規制を近々施行する予定である。今後、地球規模の環境対策の一環として更なる規制の強化が行われることが考えられる。しかしながら排ガス中に含まれる NOx の排出抑制技

術については、実用化に向けて試行段階にある各種方式にも熱効率の低下、あるいは副次的に派生する問題が懸念されているため、新たな排出抑制技術の登場が待たれている。また、新たに問題にされ始めた大気汚染物質である PM (粒子状物質) に関しては、船用機関に適用できる計測技術が確立しておらず、船舶からの排出実態すら未だに把握されていない状況にある。

そこで本研究では、船用内燃機関の燃料噴射系、吸排気弁系の電子制御化 (油圧駆動によるカムレス化) を行い、大気汚染物質の総合的な抑制を試みた結果、吸排気弁開閉時期を制御して、燃料消費率を損なうことなく NOx を低減させる方法を明らかにした。また、実船で適用可能な PM 計測法の確立を目指し、β線吸収法 PM 計を用いて実船での定量的な測定を行い、提案した PM 計測法の有効性を示すと共に排出実態の一例を得た。以下にそれらの結果について報告する。

2. 電子制御ディーゼル機関の吸排気弁開閉時期の制御について

船用機関の低 NOx 化を目的として、中速 4 サイクルディーゼル機関の燃料噴射系と吸排気弁系の電子制御化を行ってきた。これまでの研究において燃料噴射系を電子制御化することで、噴射圧力を一定に保つことができ、低負荷域での NOx 排出濃度と燃料消費率を同時に低減できることを示した²⁻¹⁾。

大型 2 サイクル機関においても、噴射系、排気弁系の電子制御化が行われているが²⁻²⁾、現状では噴射タイミングのみにより環境規制に対応しており、可変バルブタイミングを利用して低環境負荷を目指した研究はほとんど行われておらず、可変バルブ機構の性能が有効に発揮されているとは言い難い状況にある。

そこで、本研究では吸排気弁系の電子制御化によって、吸排気弁開閉時期をそれぞれ独立に制御し、NOx 排出量と燃料消費率あるいは PM に対する効果を調べ、更に燃料噴射時期を組み合わせることで NOx 排出濃度と燃料消費率の同時低減の可能性を調べた。

2.1 装置の概要

2.1.1 全体構成

実験には当所の松井鉄工所製立形 3 気筒 4 サイクル中速ディーゼル機関を使用した。図-2-1 に供試機関を、表-2-1 にその機関諸元を示す。図-2-2 に電子制御化のために変更した燃料噴射系及び吸排気弁系の全体構成図を示す。

本研究では、燃料噴射ポンプと吸排気弁を電子制

御化の対象とした。これらの駆動装置を従来のカム駆動式から油圧駆動式に改造し、電磁弁を操作することで油圧の駆動力を用いて弁開閉を行う。この結果、任意の作動時期を選ぶことが可能となり、また、油圧元圧を変更することによって燃料噴射圧を高め

表-2-1 供試機関諸元

型式	松井鉄工所 立形 4 サイクル単動 ディーゼル機関
シリンダ数	3
ボア×ストローク	φ230 mm×380 mm
最大出力×回転数	257 kW×420 rpm
圧縮比	13.7

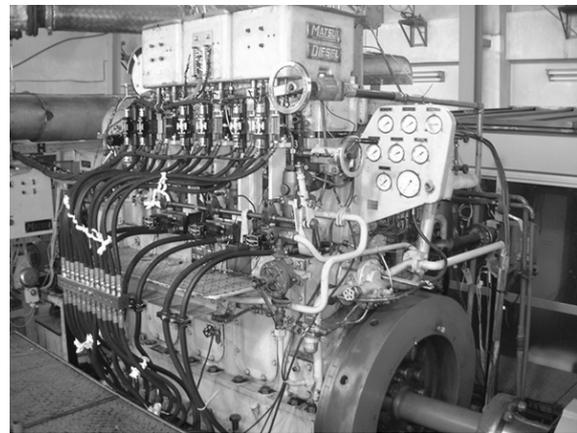


図-2-1 供試機関

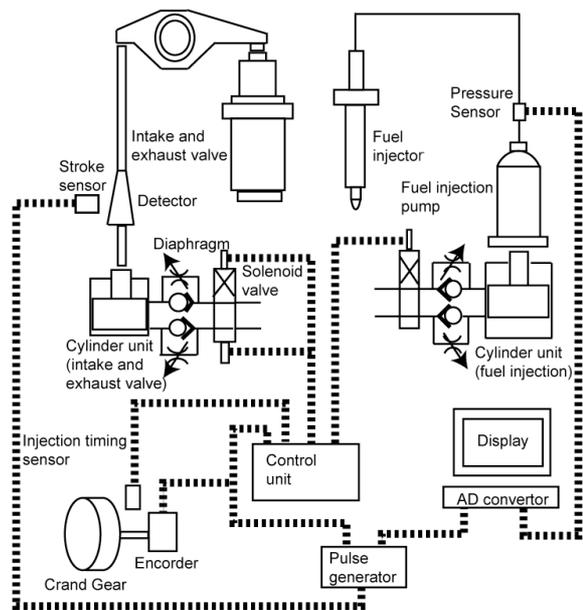


図-2-2 燃料噴射系及び吸排気弁系の全体構成図

ることや吸排気弁の開閉速度を変えることができる。

油圧源には燃料噴射系では 45kW、吸排気弁系では 20kW 電動機で駆動される油圧シリンダと電磁弁を一体化した油圧シリンダユニットを使用した。油圧シリンダはそれぞれの油圧回路の電磁弁を制御器（コントロールユニット）で制御して操作する。燃料噴射ポンプと吸排気弁の動きは表示ユニットで監視している。

2.1.2 燃料噴射系

燃料噴射ポンプは既設のボッシュ式ポンプを使用し、ポンプの下に油圧シリンダユニットを取り付けた。燃料噴射量の制御は既設のガバナにより行った。

図-2-3に本装置による燃料噴射圧特性と従来のカム駆動時の特性の比較を示す。カム駆動の場合、クランク角に対する噴射初期の圧力上昇は比較的緩やかであり、また最高圧力及び噴射持続時間は負荷の増大と共に増加する。これに対して油圧駆動の場合、噴射初期の圧力上昇速度はカム駆動に比べて大きくなる。最高圧力は作動油圧を一定に保てば負荷が変わってもほとんど変わらない。このことから、油圧駆動によって負荷によらずに噴射圧力を一定に保つことができるため、低負荷でも高負荷と同程度の噴

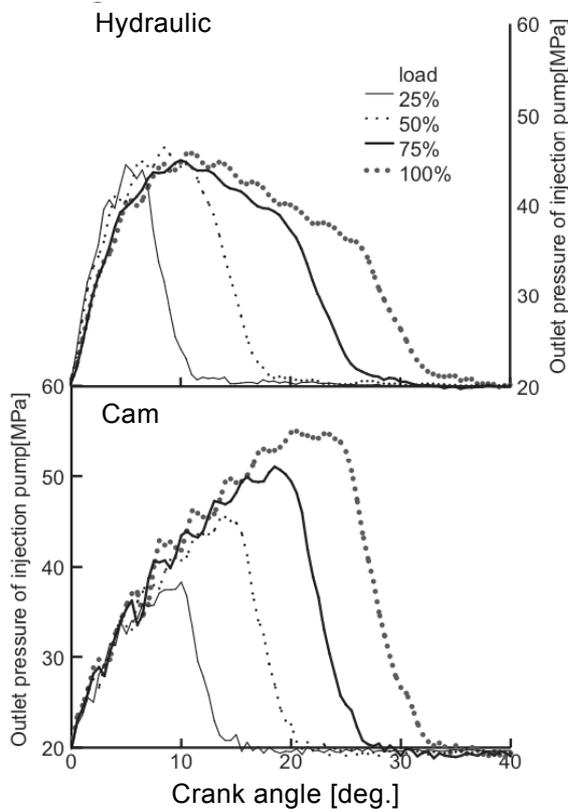


図-2-3 カム及び油圧駆動時の各負荷での燃料噴射圧特性

出エネルギーを持った燃料噴射が行えることがわかる。

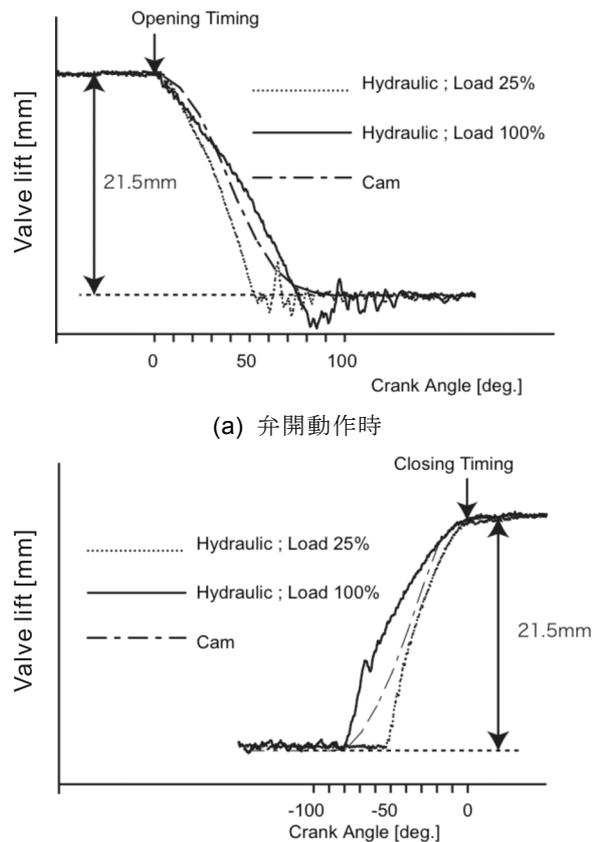
2.1.3 吸排気弁系

吸排気弁系では実験機関の気筒毎に吸気弁と排気弁が 1 組ずつ、全体で 6 本の弁があり、それぞれの押し棒の下に油圧シリンダユニットを取り付け、電磁弁により油圧駆動の制御を行う。これは燃料噴射系に採用した方法と同じであるが、開閉時期をそれぞれ確実に制御できるダブルアクション電磁弁を使用している。

吸排気弁の開閉速度は作動油圧によって変えることができる。また、油圧シリンダユニットのスローチェック弁絞りを調整して、個々の弁速度を一定に揃えた。この調整では弁バネの自己発振を考慮して 100% 負荷でカム駆動時と弁速度が同程度となるように設定した。このようにして設定した弁揚程曲線の弁開動作時、弁閉動作時の例を図-2-4a、b に示す。

弁の作動はカム駆動では開始から終了までカム曲線に従って滑らかに変化するが、油圧駆動では作動が直線的になる。このため、弁閉時の弁座への衝撃的な接触を防ぐため、油圧シリンダにクッションを設けた。

弁の開閉特性はカム駆動の場合、クランク角で表



(a) 弁開動作時

(b) 弁閉動作時

図-2-4 弁揚程曲線例

表-2-2 標準吸排気弁開閉時期

		カム駆動	油圧駆動 (電子制御)
吸排気弁 開閉時期	排気弁	開	100
		閉	395
	吸気弁	開	295
		閉	-145

[deg. ATDC]

すと機関回転速度によらず一定となるが、油圧駆動では実時間で一定となるため、クランク角に対しては機関回転速度に反比例して変化する。例えば、100%負荷でカム駆動時と同程度、即ちクランク角で80~90 deg.で弁の開閉が行われるとすると、25%負荷では45~55deg.と短期間での開閉が可能となる。

本報告では吸排気弁開閉時期は弁が弁座から離れる時を開時期、また弁が弁座に着座する時を閉時期として圧縮上死点からのクランク角(deg. ATDC)で表した。

2.2 実験方法

吸排気弁系の電子制御化に伴い、燃料着火時期を4.0deg. ATDCとして、排気温度が従来のカム駆動とほぼ同等になる吸排気弁開閉時期を表-2-2のように標準の開閉時期とした²⁻³⁾。

本章では、まず吸排気弁の作動を確認するため、吸排気弁開閉時期を固定して燃料着火時期を変化させ、従来の燃料噴射系のみを電子制御時と同様の傾向が得られるか確認した。次に排気弁開時期(EO)、排気弁閉時期(EC)と吸気弁開時期(IO)及び吸気弁閉時期(IC)をそれぞれ単独で変更し、これらが正味燃料消費率(BSFC)及びNOx排出濃度に与える影響を調べた。更に一層の燃料消費率及びNOx排出濃度の低減を目指して着火時期(IGT)を組み合わせる実験を行った。

実験は船用特性で実施、燃料はA重油、油圧ユニットの作動油圧は燃料系・吸排気弁系ともに20MPaとした。

排ガス測定には化学発光式NOx分析計、磁気式O₂分析計及び赤外線吸収式CO₂分析計を使用した。NOx排出濃度は酸素濃度13%の値に換算したNOx濃度(NOx13)で示す。また、PMの測定にはファームテック社製の部分希釈トンネルを使用した。

2.3 吸排気弁の開閉作動確認

ここでは、吸排気弁の作動の確認及び燃料噴射系のみを電子制御時の実験結果の検証のため、吸排気弁開閉時期を表-2-2に示す標準設定として、燃料噴

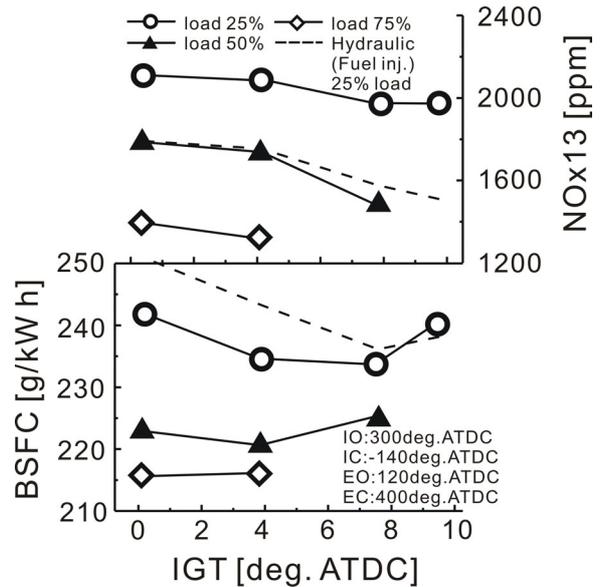


図-2-5 燃料消費率とNOx排出濃度に及ぼす着火時期の影響

表-2-3 実験条件の設定

負荷		25%	50%
		65.3 kW ; 265 rpm	130.6 kW ; 333 rpm
作動油圧		20 MPa	20 MPa
着火時期		4.0	4.0
吸排気弁 開閉時期	排気弁	開	120 ~ 160
		閉	380 ~ 390
	吸気弁	開	320 ~ 350
		閉	-190 ~ -130

[deg. ATDC]

射時期(着火時期)を変えて実験を行った。図-2-5に25~75%負荷における着火時期に対する燃料消費率とNOx濃度を示す。

燃料消費率に関しては、25%負荷ではIGT=8.0deg. ATDC、50%負荷では4.0deg. ATDC、75%負荷ではTDCで最小となった。25%負荷での結果は図内に点線で示される燃料噴射系のみを電子制御化した時の実験結果と同じ着火時期で最小となり、NOx排出濃度についても燃料噴射系のみを電子制御時と同様に、着火時期の遅れに伴って低減した。これらの結果から電子制御化された吸排気弁系が制御通りの作動をしていることが確認できた。

2.4 吸排気弁開閉時期制御の実験結果

吸排気弁開閉時期変更による基礎的なデータの取

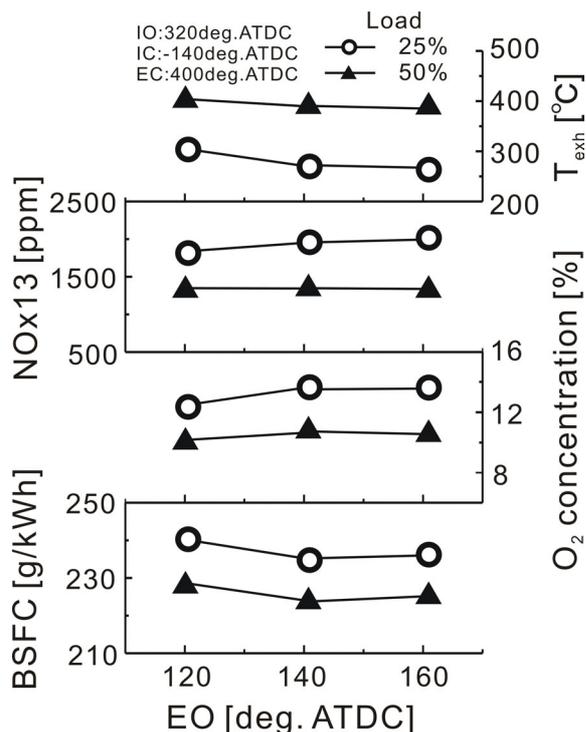


図-2-6 排気弁閉時期による排気、機関性能への効果

得、並びに各バルブの特徴を把握するために、吸気弁閉時期、排気弁閉時期とオーバーラップ、即ち、吸気弁閉時期、排気弁閉時期をそれぞれ変化させて、排ガス温度、燃料消費率、NOx 排出濃度等に与える影響を調べた。ここで IGT=4.0deg. ATDC に固定した。表-2-3 に本章の実験条件を示す。

2.4.1 排気弁閉時期の制御

図-2-6 に 25、50%負荷時に排気弁閉時期を 120~160deg. ATDC の間で変えた場合の結果を示す。

排ガス温度は排気弁閉時期を遅らせると低下し、燃料消費率は 140deg. ATDC で最小となる。EO を遅角すると燃料消費率が低減するのは、膨張仕事が増加したためである。NOx 排出濃度は 25%負荷でやや増加、50%負荷時ではほとんど変化しない。排ガス中の酸素濃度は NOx 排出濃度と同じ傾向を示す。50%負荷での値は 25%負荷に比べて EO に対する変化が小さい。これは、図-2-4a、b に示したように負荷の増加によって、クランク角度あたりの弁閉度が小さくなり、排気弁を開くために時間を要し、かつ相対的に弁が開いている期間が短くなるため、排気行程になっても排気弁が完全に開いておらず、不必要な仕事を行っていることが考えられる。そのため、低負荷では排気弁閉時期を遅らせることによる燃料消費率の改善効果が見られるが、高負荷では効果が少なくなることや、ガス交換の期間が相対的に短く

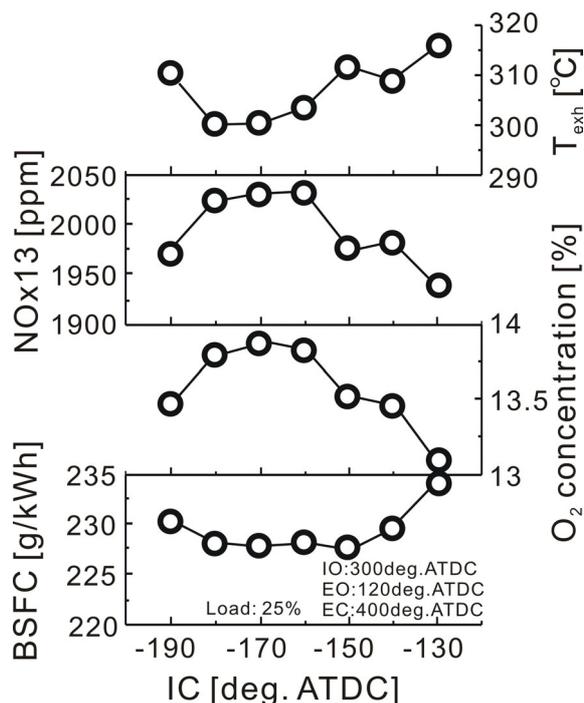


図-2-7 吸気弁閉時期による排気、機関性能への効果 (25%負荷)

なることなどから、高負荷での燃料消費率の改善には更なる弁速度の高速化が必要であると考えられる。

2.4.2 吸気弁閉時期の制御

図-2-7 に 25%負荷、図-2-8 に 50%負荷での IC を変更した時の実験結果を、表-2-3 に実験の設定条件を示す。IC はカム駆動ではほぼ-145deg. ATDC であるが、ここでは 25%負荷で下死点前の-190deg. ATDC から-130deg. ATDC まで、50%負荷では-170 deg. ATDC から-130deg.ATDC まで変更し、燃料消費率、NOx 排出濃度への影響について調べた。

25%負荷では吸気弁閉時期-180deg.から-150deg. までの間で燃料消費率は最小となる。これに対して 50%負荷では-150deg.付近で最小となり、最小値を取る範囲は負荷によってわずかに変わるが、25%負荷に比べて IC の影響が小さく、タイミングが変わっても燃料消費率の増加は小さい。NOx 排出濃度は燃料消費率と相反した傾向を示し、燃料消費率が最小の範囲で最大となり、燃料消費率が増加すると共に減少する。排気温度と燃料消費率、NOx と O₂ 排出量は IC に対して同じ傾向をもつ。

IC が早過ぎても、遅過ぎてもシリンダ内への空気供給量が減少するため、最適なタイミングが存在することがわかる。他の閉閉時期、特に吸排気弁のオーバーラップ量を変えていない本実験では、O₂ 排出濃度はシリンダ内空気過剰率と同じ傾向があると推

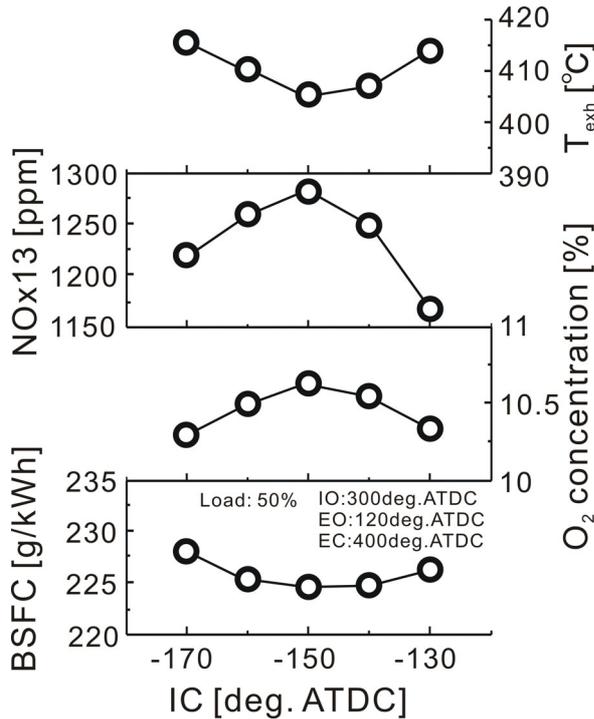


図-2-8 吸気弁閉時期による排気、機関性能への効果 (50%負荷)

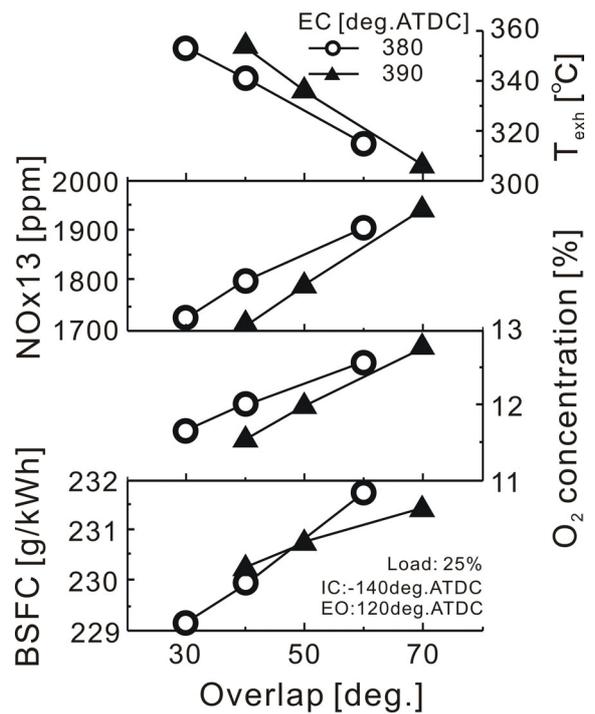


図-2-9 オーバーラップ量に対する排気、機関性能の変化

定できる。そのため、空気過剰率の低下により、燃焼状態が悪化し、燃料消費率の増加、それに伴い、シリンダ内最高温度が低下し NOx 排出濃度の低減を生じたと考えられる。

以上の結果から、吸気弁閉時期 IC は燃料消費率の悪化を許容範囲に保ちつつ NOx 排出濃度の低減をはかる方針で選ぶこととして、以降の実験では 25% 負荷でも燃料消費率の悪化が少ない -140deg. ATDC に固定した。

2.4.3 オーバーラップ制御

吸気弁閉時期から排気弁閉時期の間の吸排気弁が同時に開いている期間は、いわゆるオーバーラップ期間であり、実験条件を表-2-3 に示すように、両者を IO=300~350deg.ATDC、EC=370~410deg.ATDC まで変更した。

オーバーラップは最小で 30deg.、最大は 70deg. となるが、最小の場合には吸気弁は開き始めて且つ、排気弁は閉じる寸前であるので実質的にはほとんど 0deg.になる。オーバーラップ量を小さくすると排気温度が上昇し、運転に支障をきたすことがあるが、本実験の範囲内においては運転に特段の支障は生じなかった。

図-2-9 に 25%負荷時の実験結果を示す。EO=380、390deg. ATDC のどちらの場合でも同じ傾向を示し、オーバーラップが小さくなるに従って、排ガス中の

酸素濃度は低下し、同時に NOx 排出濃度と燃料消費率は共に減少した。しかし、オーバーラップ変更による燃料消費率の低減は 2~3g/kWh であり、正のオーバーラップのままでは大幅な改善は望めないことがわかった。

2.4.4 排ガス中の酸素濃度と NOx 濃度

本実験機関では吸排気弁の油圧駆動を用いた電子制御化によって開閉時期をそれぞれ設定することができる。しかし実用上の観点から制御対象をできるだけ簡素化することが望ましい。そこで排ガス中の残存酸素濃度に着目してこれまでの実験結果での各弁開閉時期制御の効果を検討する。

今回実施した実験における排ガス中の酸素濃度と NOx 排出濃度との関係を図-2-10 に示す。図中のデータの負荷は 25%と 50%である。25%負荷では冬及び夏期での実験データを含んでいるため、吸入空気の状態(温度、湿度)は大きく異なっている。ただし IGT=4.0deg. ATDC とした。NOx 排出濃度は、25%負荷のときが 50%負荷に比べて大きく、残存酸素濃度がとる範囲も広い。25%負荷時に NOx 排出濃度が高いのは、ガス交換が 50%負荷時に比べて良好に行われているので、排気がシリンダ内に残留していないことや、高空気過剰率によって良好な燃焼が行われていることが考えられる。残存酸素濃度がとる範囲が広いのは、相対的にバルブ開閉速度が速くなり、

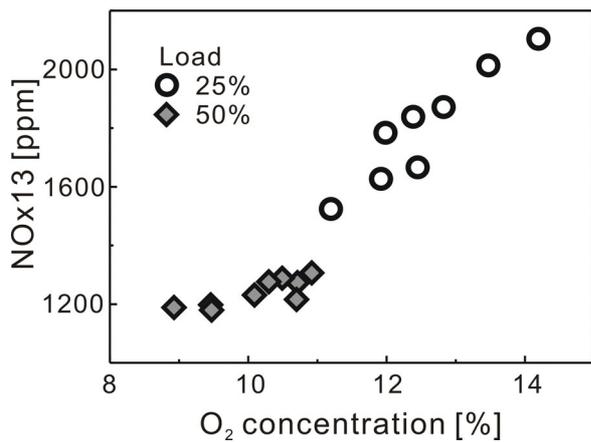


図-2-10 排ガス中の酸素濃度と NOx 排出濃度との関係

同一の吸排気弁開閉時期でも実質的に吸排気弁の開閉時間が長くなるため、同じ実験範囲でも吸排気ガス量を取り得る範囲が広がっているからである。全体的な傾向として、排ガス中の酸素濃度が低くなるにつれて NOx 排出濃度が下がることがわかる。すなわち、吸排気弁開閉時期を制御して NOx 排出濃度の低減を図るには、排ガス中の酸素濃度が低くなる方向に制御すべきと考えられる。

2.5 噴射時期と吸排気弁開閉時期の組み合わせによる評価

前項で NOx 濃度を低減させるには排ガス中の酸素濃度が低くなる方向に制御を進めれば良いとの方向性が示されたが、噴射時期に関する報告²⁻¹⁾では NOx 濃度と燃料消費率の同時低減化が得られている。このため、船用特性 25% 負荷において、吸排気弁開閉時期及び燃料噴射時期を順次変更し、NOx 濃度、燃料消費率等への影響を調べた。

実験結果を図-2-11 に示す。標準状態より、まず EO を 120deg. ATDC から 140deg. ATDC に遅らせると NOx 排出濃度は増加したが燃料消費率は大幅に改善された。次に IO を 300deg. ATDC から 350deg. ATDC に変更すると NOx 排出濃度は減少する一方、燃料消費率は増加したが、次いで EC を 400deg. ATDC から 380deg. ATDC にすると NOx 排出濃度、燃料消費率ともに大幅に減少した。最後に IGT を 4.0deg. ATDC から 8.0deg. ATDC にするとタイミングリタードの効果によって NOx 排出濃度に若干の低下が見られたが、燃料消費率はやや増加した。

以上の実験で、表-2-2 に示された標準の開閉時期と比較して燃料消費率が 3.3g/kWh (1.5%)、NOx 濃度が 150ppm (8.3%) の改善が達成され、燃料消費率と NOx 排出濃度を同時に低減する上で着火時

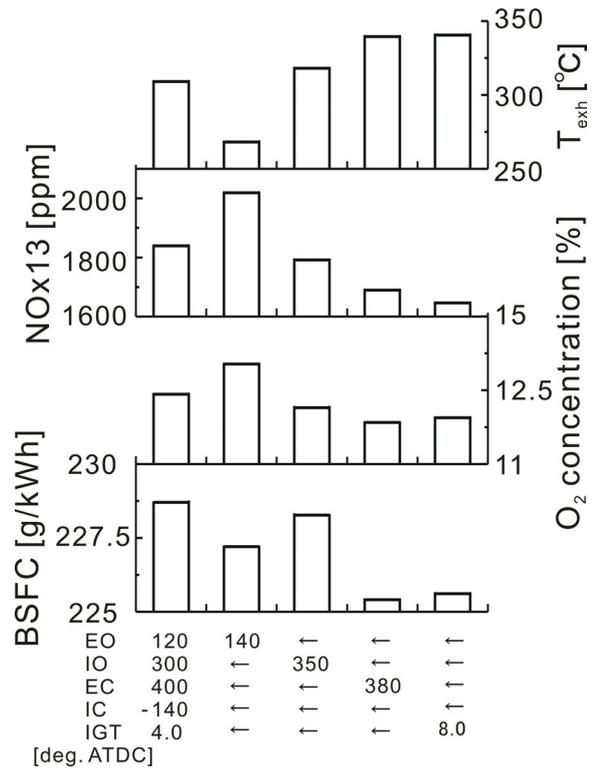


図-2-11 各吸排気弁開閉時期及び着火時期に対する排気、機関性能への効果

期と吸排気弁開閉時期の変更は有用な手段であることを確認することができた。しかし、このように通常のタイミングから大きく変更しない場合には、吸排気弁と着火時期の変更だけでは燃料消費率と NOx 排出濃度の改善を同時に行う上で大きな期待はできないことがわかった。

2.6 カム駆動式及び燃料噴射系、吸排気弁系の電子制御の比較

電子制御の特徴を調べるため、カム駆動時、燃料噴射系のみ及び吸排気弁系をも含めた電子制御化した時の燃料消費率、NOx 排出濃度、PM 排出量を図-2-12 に示す。それぞれの実験には条件の違いがあるため、カム駆動時と燃料噴射系のみでの電子制御時のデータは参考文献 2-4、2-5)により、また、燃料噴射系及び吸排気弁系の電子制御時は参考文献 2-6)の条件に近いものを選んでいく。

燃料消費率は全ての条件で負荷の増加に対して低下している。これは、負荷が上がると相対的に壁面からの熱損失が低減される²⁻⁷⁾ためである。25% 負荷ではカム駆動、燃料噴射系、燃料噴射・吸排気弁系の順に低下している。特に燃料噴射・吸排気弁系では、改善の著しいことがわかる。これに対して、50% 負荷では吸排気弁系で多少の低下がみられるが、

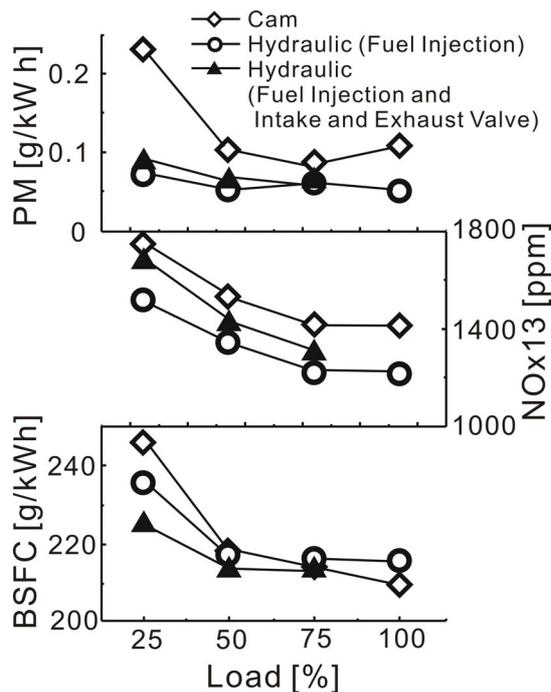


図-2-12 各負荷での駆動方式による性能比較

75%負荷ではカム駆動式とほとんど変わらない。このように高負荷において電子制御の有利性が無くなるのは、一つに、図-2-3、図-2-4 に示したように高負荷において燃料噴射圧がカム駆動式より低い、或いは吸排気弁開閉速度が遅いことが原因であると考えられる。

NOx 排出濃度はカム駆動が最も高く、燃料噴射・吸排気弁系、燃料噴射系の順となった。最も高いカム駆動と最も低い燃料噴射系の差は全負荷範囲で180~250ppmであった。特に吸排気弁系の25%負荷では弁開閉時期の組み合わせを行ったにも関わらず、NOx 濃度の低減は燃料噴射系に及ばなかった。しかしこれは、燃料消費率の良好な結果を示したためであり、NOx と燃料消費率のトレードオフが示されているに過ぎない。可変バルブタイミングを利用することによって、NOx 排出濃度を低減させることも充分可能であり、その結果は次章に示す。

PM 排出量は燃料噴射系と燃料噴射・吸排気弁系がほぼ同等であり、カム駆動時の1/2~1/3の値となる大幅な改善が得られた。また、燃料噴射系と吸排気弁系の負荷に対するPM 排出特性は全負荷範囲でほぼ一定となるが、これらの特徴は図-2-3 に示した燃料噴射がカム駆動時と比較して噴射圧の立ち上がりが速いことによるものと考えられる。

2.7 まとめ

(1) 吸排気弁開閉時期を固定して燃料着火時期を変

化させ、従来のカム駆動と同様の傾向が得られたことから、吸排気弁が制御通りに作動していることを確認した。

- (2) 吸排気弁開閉時期をそれぞれ単独で変更し、これらが燃料消費率とNOxに与える影響を調べ、以下のことが確認された。
- 1) 排気弁開閉時期の制御で燃料消費率の改善が期待できる。
 - 2) 吸気弁閉閉時期はほぼ一定値に固定してよい。
 - 3) オーバーラップ制御によって、NOx 排出濃度と燃料消費率を同時に改善できる可能性がある。ただし排気温度の上昇によって制御範囲は制限されるため、注意を要する。
 - 4) 吸排気弁開閉時期を制御してNOx 濃度の低減を図るには、排ガス中の酸素濃度が低くなる方向に制御すべきであると考えられる。
- (3) 25%負荷における吸排気弁開閉時期の組み合わせでは燃料消費率及びNOx 排出濃度の同時低減が可能であるが、着火時期を組み合わせても燃料消費率の低減はみられなかった。
- (4) 燃料噴射系及び吸排気弁系のカム駆動式と電子制御式の比較において、吸排気弁系も電子制御化すると低負荷で燃料消費率の著しい低減がみられるが、NOx 濃度の低減は大きくはない。

3. 可変バルブタイミングを用いた内部EGR制御について

前章では、燃料系並びに吸排気弁系の油圧駆動による電子制御化を行い、着火時期、吸排気弁開閉時期を負荷によって変え、燃費を悪化させることなく有害排気物質を低減する可能性を検討してきた。^{2-4, 3-1)}その中で、積極的に排気管内の酸素濃度を下げることによって、NOx 低減に寄与する方法が考察された。

EGR (Exhaust Gas Recirculation) にはNOx 低減効果があることが知られており、内部³⁻²⁾、外部^{3-3, 3-4)}EGR の研究も行われてきた。船用機関で外部EGR を用いる場合、燃料に含まれている硫黄分が軽油に比べて多く、排気中の硫酸化合物が排気温度の低下によって配管系及び過給機、インタクーラに腐食を生じさせる可能性がある。

IMO によるNOx に関する現在の規制は燃料噴射のタイミングリタード等によって対応できているが、陸地に近い港湾区域内では更なるNOx 排出量の削減が求められることが予想される³⁻⁵⁾。このことから部分負荷時にはNOx 低減率の高い運転モードに切り替える必要が出てくる。そのため本章では、部分負荷時のNOx 低減に焦点を絞って、軽負荷での可変バルブタイミング機構を利用したオーバーラップ変更

と排気弁遅閉じの 2 種類の手法による内部 EGR を積極的に利用したときの効果についての実験を行い、両手法の特徴について検討した。また、吸排気弁開閉時期の変更によって、シリンダに投入される空気量や、吹き抜け量を知ることは開閉時期を決める上で重要となるため、実機で計測可能なデータを用いた簡易推定法によって、吸排気タイミングによる EGR 率の燃費、NOx 排出濃度への影響を調べた。

3.1 実験装置及び実験方法

供試機関は前章で用いた松井鉄工所製立形過給機付 3 気筒 4 サイクル中速ディーゼル機関である。燃料には A 重油を、排気ガス内 NOx、酸素の計測には化学発光式 NOx 分析計、磁気式 O₂ 分析計を使用した。PM 計測にはファームテック社製部分希釈トンネルを用いた。燃料噴射弁は噴口 0.28mm、噴口数 9、燃料噴射圧 45MPa とした。

実験は船用特性 25% 負荷で実施し、油圧ユニットの作動油圧は 20MPa とした。本章では IC は -140deg. ATDC 一定とした。表-3-1 に実験に用いた吸排気弁開閉時期を示す。燃料噴射時期は表-2-2 に示された標準の開閉時期において着火時期が圧縮上死点後 4.0deg. となる噴射時期に固定した。

3.2 シリンダ内空気量簡易推定法

吸排気弁開閉時期を変化させた時、シリンダ内の空気過剰率や残留ガス量を調べることは燃焼状態を

表 3-1 吸排気弁開閉時期

[deg.ATDC]	EO	EC	IO	IC
標準	120	400	300	-140
オーバーラップ 変更 (3.3.1)	160	340 ~400	300 ~380	
排気弁開閉時期 変更 (3.3.2)	120 ~160	340	380	
排気弁閉閉時期 変更 (3.3.3)	120、 160	340 ~440	380	

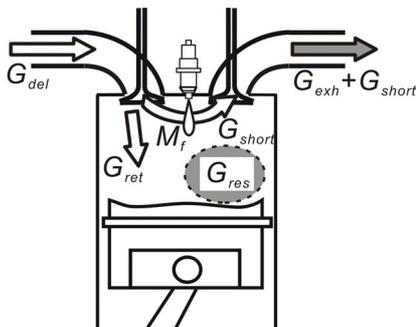


図-3-1 ガス交換概念図

知る上で重要である。シリンダ内ガス成分を調べる方法は、直接ガスサンプリングを行う方法^{3-6, 3-7)}や、一次元吸排気行程計算によって求める方法³⁻⁸⁾、一次元と三次元の数値シミュレーションを結合して計算する方法³⁻⁹⁾等がある。本研究では試験機関であるディーゼルエンジンシステムの単純なモデル化を行い、実験で求められた各種計測値によって、ガス交換過程を調べた。図-3-1 にガス交換の概念図を示す。本モデルでは、燃焼ガス G_{cg} [kg] はシリンダ内へ残留するガス G_{res} [kg] とシリンダ外に排出されるガス G_{exh} [kg] に、吸入新気 G_{del} [kg] はシリンダ内へ供給される新気 G_{ret} [kg] とオーバーラップ期間に排気管へ吹き抜ける新気 G_{short} [kg] になる。シリンダ内に供給される新気量と排出される燃焼ガス量には、G_{exh} = G_{ret} + M_f の関係が成り立つとする。M_f は 1 回に噴射される燃料質量である。

3.2.1 吸気弁閉時期シリンダ内ガス質量

吸気弁が閉じた後のシリンダ内ガス質量は、過給圧 P_b、空気的气体定数 R_s、シリンダ吸入空気温度 T_s、吸気弁閉時期におけるシリンダ体積 V_{cl} から求まると仮定すると以下のように示される。

$$G_{res} + G_{ret} = \frac{P_b V_{cl}}{R_s T_s} \quad (3-1)$$

3.2.2 排気タービンと過給機の仕事の釣合い

過給機駆動に要する仕事 W_b とタービンの出力 W_t は以下のように示される。

$$W_b = \frac{\kappa_s}{\kappa_s - 1} G_{del} R_s T_0 \frac{T_b - T_0}{T_0} \quad (3-2)$$

$$W_t = (G_{short} + G_{exh}) \frac{\kappa_t}{\kappa_t - 1} R_t T_t \frac{T_t - T_{se}}{T_t} \quad (3-3)$$

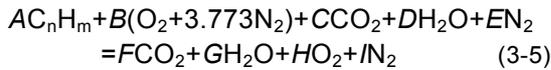
ここで、R_t は燃焼ガスのガス定数、κ_s、κ_t は空気、燃焼ガスの比熱比であるが、簡単のため、R_t = R_s、κ_t は空気の比熱比とする。但し、比熱比は温度の関数とし、κ_s には吸気入口温度を、κ_t にはタービン入口温度を用いる。T₀ は大気温度、T_b は過給機出口温度、T_t はタービン入口温度、T_{se} はタービン出口温度である。W_b と W_t の両者が等しいとすると、式(3-2)、(3-3)から以下の式が成り立つ。

$$\frac{T_b - T_0}{T_0} = \frac{T_t - T_{se}}{T_t} \frac{T_t}{T_0} \frac{\kappa_s - 1}{\kappa_s} \frac{\kappa_t}{\kappa_t - 1} \frac{R_t}{R_s} \frac{G_s + B}{G_s} \quad (3-4)$$

3.2.3 化学反応式

本実験では、排気管内の酸素濃度γが計測されている。排気管内は燃焼ガスと吹き抜けた新気が混合している。完全燃焼していること、残留ガス組成が燃

焼生成物と等しいことを仮定すると、化学反応式は以下の式で表される。



$$A = \frac{M_f}{m_f}, \quad B = \frac{G_{ret} + Fr_a G_{res} + G_{short}}{4.773m_a}$$

$$C = \frac{Fr_{CO_2} G_{res}}{m_{CO_2}}, \quad D = \frac{Fr_{H_2O} G_{res}}{m_{H_2O}}, \quad E = \frac{Fr_{N_2} G_{res}}{m_{N_2}}$$

$$F = \frac{M_f}{m_f} n + \frac{Fr_{CO_2} G_{res}}{m_{CO_2}}, \quad G = \frac{M_f}{m_f} \frac{m}{2} + \frac{Fr_{H_2O} G_{res}}{m_{H_2O}}$$

$$H = \frac{G_{ret} + Fr_a G_{res} + G_{short}}{4.773m_a} - \frac{M_f}{m_f} \left(n + \frac{m}{4} \right)$$

$$I = \frac{3.773}{4.773} \frac{G_{ret} + Fr_a G_{res} + G_{short}}{m_a} + \frac{Fr_{N_2} G_{res}}{m_{N_2}} \quad (3-6)$$

反応物の第一項は投入燃料、第二項はシリンダ内に供給される新気、残留ガス中の空気及び吹き抜け新気、第三、四、五項は残留ガスを表す。式中の Fr_{CO_2} 、 Fr_{H_2O} 、 Fr_a 、 Fr_{N_2} は残留ガス内の二酸化炭素、水、空気、窒素の質量分率である。これらの値は燃焼生成物のガス組成と等しいとしているので、式(3-5)で $G_{short}=0$ とした時の式(3-5)の右辺 (生成物) から求められる。 m_f 、 m_a 、 m_{CO_2} 、 m_{H_2O} は燃料、空気、二酸化炭素、水の分子量である。

本研究で用いている A 重油は成分分析より $m/n=2.105$ である。ここでは燃料を n テトラデカン ($C_{14}H_{30}$) と仮定して理論空燃比は 14.9 とする。以上より、計測されている排気管内酸素濃度 γ の式が決まる。この式と式(3-1)、(3-4)を連立して吹き抜け新気、排出ガス、残留ガスの質量 G_{short} 、 G_{exh} 、 G_{res} が求められ、他の質量は自動的に計算できる。本計算では、全てのガス質量が負にならないことを条件とした。

計算に用いる計測値は、回転数[rpm]と燃料流量

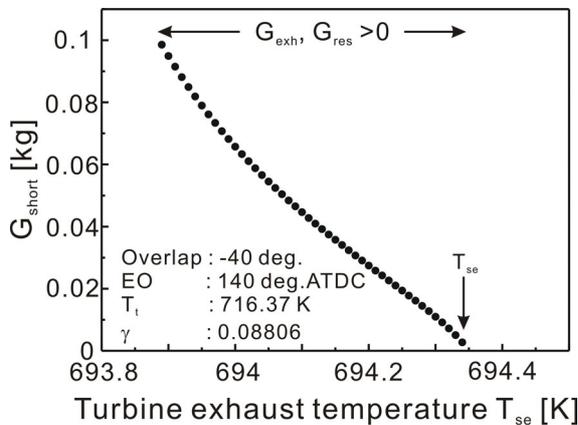


図-3-2 G_{short} と T_{se} の関係

[l/h]から求められる燃料質量 M_f 、酸素濃度 γ 、シリンダ吸入 (インタークーラ後) 温度 T_s 、過給機出口圧力 P_b 、温度 T_b 、タービン入口温度 T_t である。タービン出口温度は計測されているが、排気管からの放熱も大きく計測値の信頼性が低い。そこで、まずタービン出口温度を決めるため、吹き抜け新気が 0 と仮定できる負のオーバーラップ (-40deg.) 時での計算を行った。図-3-2 に全てのガス質量が正となる時のタービン出口温度と吹き抜け新気質量の関係を示す。吹き抜け新気質量が 0 になるのは、タービン出口温度が最も高い時である。この結果より、その他の吸排気弁開閉時期においても全ての質量が負にならない条件の中でタービン出口温度が最も高い時の質量を解として採用した。

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 オーバーラップの効果

オーバーラップ変更による EGR 制御には、各シリンダに対して独立に制御が行えるという利点がある。前章 2.4.3 では正のオーバーラップを用いて、EC と IO についてそれぞれの影響について調べたが、ここではオーバーラップ量をパラメータとし、負のオーバーラップを含めて検討を行った。

図-3-3 にオーバーラップ期間を変更した際の燃料消費率、NOx 排出濃度及び EGR 率を示す。EGR 率はシリンダ内ガスと残留ガスの質量割合と定義し、前節の簡易推定法によって求めた。オーバーラップ

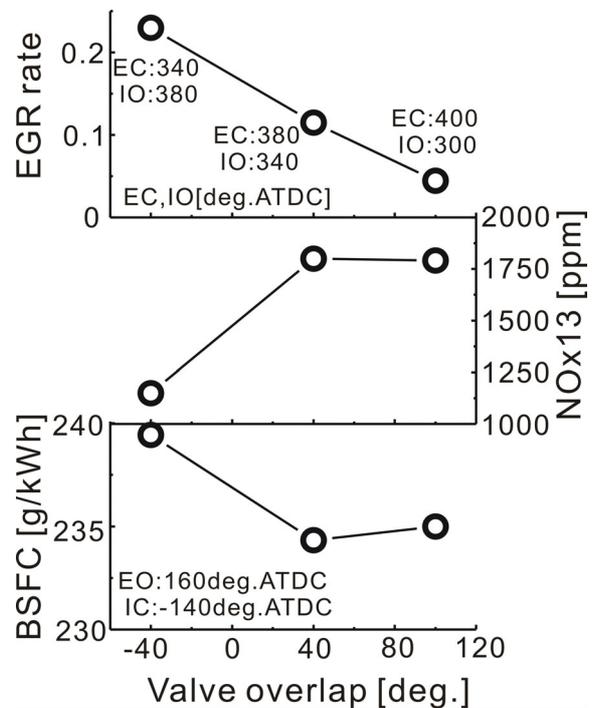


図-3-3 オーバーラップの影響

期間を 100deg. から -40deg. まで変化させ、各オーバーラップでの EC、IO は図-3-3 内に示す。燃料消費率、NOx 排出濃度ともオーバーラップ期間を 100deg. から 40deg. に変更しても大きな変化はない。一方、EGR 率はオーバーラップ量に対して直線的に変化していることがわかる。EGR 率が増加しているにも関わらず NOx 排出濃度が変わらないのは、残留ガスと新気が不均一にシリンダ内に存在していることが考えられる。それに対して、負のオーバーラップとなる -40deg. では NOx 排出濃度はオーバーラップ 100deg. と比較して約 35% 減少するが、燃料消費率が約 2% 増加するため、オーバーラップの変更のみでは燃料消費率を保持したまま NOx 排出濃度を低減できないことが確認できた。図-3-4 に各オーバーラップでの圧力、熱発生率を示す。NOx 排出濃度がほぼ一定であるオーバーラップ期間 100deg. と 40deg. では、熱発生率もほとんど変わらないが、-40deg. では燃焼初めの急激な熱発生が抑制されていること、着火遅れが短くなっていることがわかる。

3.3.2 排気弁開時期による影響

3.3.1 より、負のオーバーラップによる内部 EGR 効果は、NOx 低減に対して効果がある反面、燃料消費率を悪化させることが確認できた。燃料消費率を改善するためには、(1)膨張仕事を大きく取る (EO を遅角する) 方法と、(2)EO を進角させ、過給機に仕事をさせることによって、空気過剰率を大きくし、燃料の燃え切りを向上させて等容度を改善する方法が考えられる。ここでは、EO の効果について検討

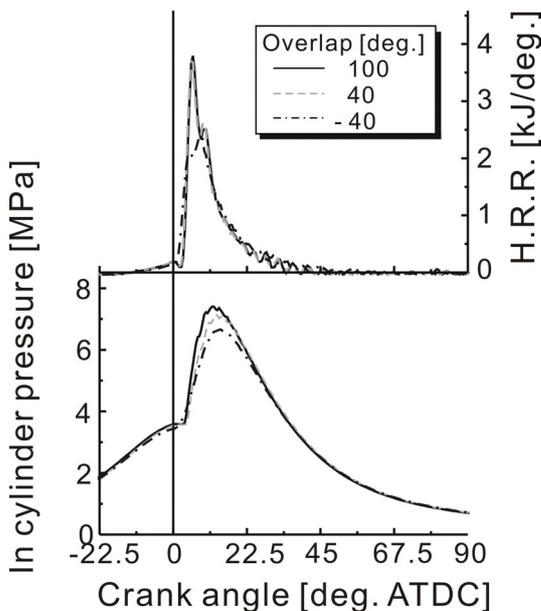


図-3-4 オーバーラップによるシリンダ内圧力、熱発生率への影響

し、上記の方法の実現性について検討した。

図-3-5 に、EO の変更による NOx 排出濃度、燃料消費率、過給圧への影響を示す。ここで、オーバーラップは -40deg. とした。NOx 排出濃度には EO はほとんど関係がないことがわかる。これは、内部 EGR 量が負のオーバーラップによって固定されているからである。また、EO によって過給圧はほとんど変わらないこと、燃料消費率は EO を遅角することで低減するがわかる。これは本機関では、EO の進角による過給機への排気エネルギーの増分が効率良く回収されていないことを示している。過給機(タービン側)は、定格点で最高効率となるように設計されているため、定格点から大きく外れた低負荷では EO の進角による排気エネルギーの増分を利用できるほど過給機が敏感に作動しない。このため、排気エネルギーを有効利用するためには、可変容量ターボ (VGT: Variable Geometry Turbo) や W/G 付ターボによる過給機側の制御も必要と考えられる。以上のことから、本機関においては膨張仕事の増加による燃料消費率改善の方が現実的であることがわかる。

3.3.3 排気弁閉時期による影響

EO を 120、160deg. とした時の排気弁遅閉じによる燃料消費率、NOx、EGR 率への影響を図-3-6 に示す。IO は 380deg. に固定し、排気弁閉時期の影響のみを調べた。EC=340、380deg. では EO の違いによ

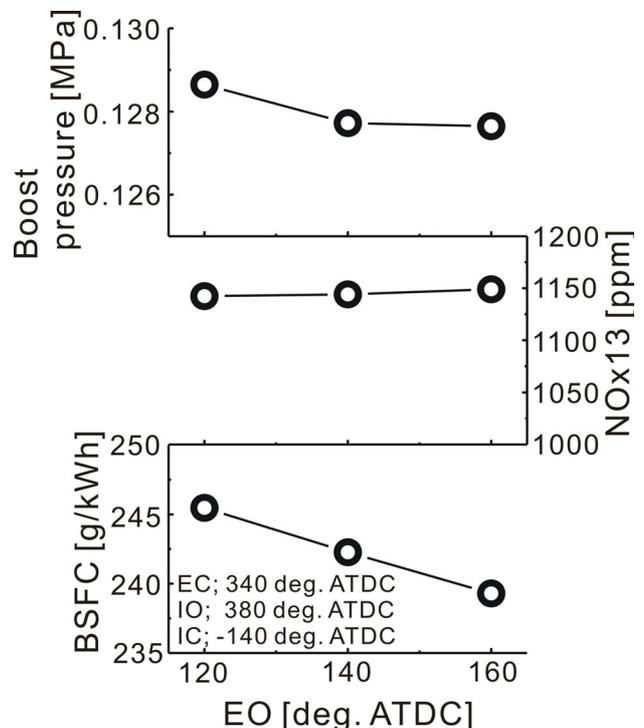


図-3-5 排気弁閉時期による効果

る NOx 排出濃度の変化はない。燃料消費率のみ EO=160deg.の方が小さくなるのは、EGR 率が変わらないこと、膨張仕事を多く行わせていることが原因である。EO=120、160deg.について、それぞれ EC を 420、440deg.より遅閉じにすると吐煙し、運転ができなくなった。NOx 排出濃度が減少するのは排気マニホールドからシリンダ内へ排気が逆流するからであるが、EO によって逆流するタイミングが異なる。これは本機関が 3 気筒であるため、図-3-7 に示すように 1 番気筒の排気弁が開く 160deg.の時に 3 番気筒は圧縮 TDC 後 400deg.となる。このため EC=380deg.では排気の逆流が起こらず、1 番気筒の EO と 3 番気筒の EC が重なるようになる EC=420、440deg.の時に逆流が起こる。この現象による NOx 低減効果は、EO=160deg.では EC=420~440deg.で、EO=120deg.では EC=380~420deg.で顕著であるが、

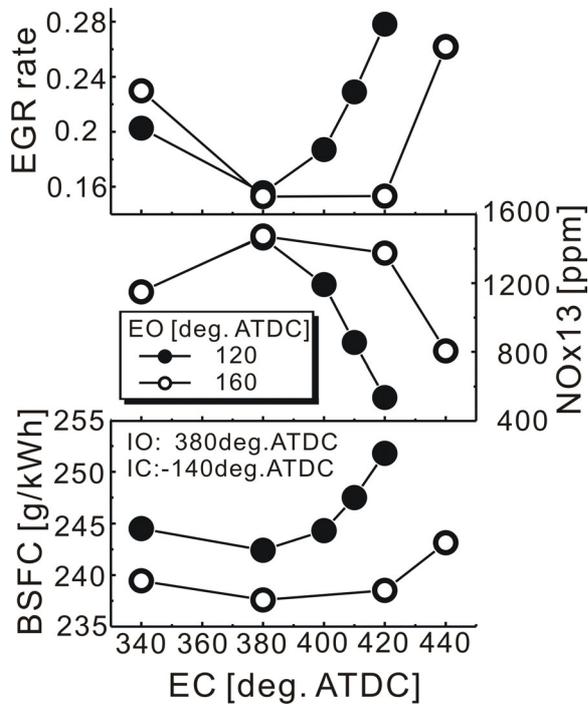


図-3-6 排気弁開時期による効果

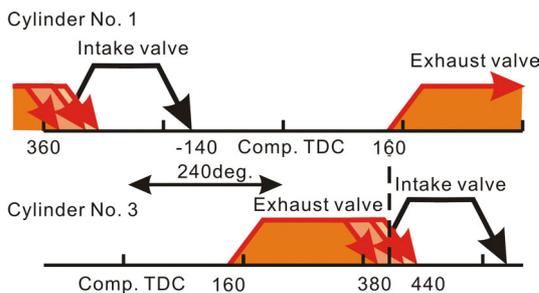


図-3-7 バルブタイミング模式図

後者の方が EC の変化に対して NOx 排出濃度が緩やかに変化する。これは TDC 近傍ではピストン下降速度が遅く、排気の逆流が比較的抑えられているからであり、制御が行い易いといえる。

以上のことから、オーバーラップを変化させる方法は他気筒の影響を考えずに EGR 率を制御できたが、排気弁遅閉じを用いる方法は、他気筒の影響によって排気ガスがシリンダ内に逆流することを考慮して EGR 制御を行う必要がある。図-3-8 に EO=160deg.での EC=380、420、440deg. ATDC と変化させたときの熱発生率を示す。図-3-7 に示したように、EO=380、420deg.の場合には、EGR 率、NOx 排出濃度はほとんど変わらないが、熱発生率も変化しない。EC=440deg.となると、着火遅れが短くなり、最大熱発生率となるクランク角も遅角され、緩やかな熱発生となることがわかる。図-3-4 に示した熱発生率と比較しても、EGR 率の増加が着火遅れを短くしていることがわかる。

3.3.4 燃料消費率と NOx、PM 排出量について

図-3-9 に本機関の標準の吸排気弁開閉時期とオーバーラップ変更、排気弁遅閉じを行った時の燃料消費率と NOx 排出濃度の関係を示す。燃料消費率と NOx 排出濃度にはトレードオフの関係が見られるが、EO が 120deg.から 160deg.に変化すると、それぞれの結果は異なる直線上にのることがわかる。EO=160deg.の場合には、オーバーラップ変更、排気弁遅閉じの 2 種類の方法で EGR 制御を行ったが、NOx 排出濃度と燃料消費率の関係において両者の違いは表れない。また EO を遅らせると、NOx 排出濃度を一定のまま燃料消費率を低減させることができることから、EGR を行い且つ EO を遅らせることによって、標準開閉時期での燃料消費率を維持したまま NOx 排出濃度を約 35%低減できることがわかる。図-3-10 に本機関の標準開閉時期と負のオーバ

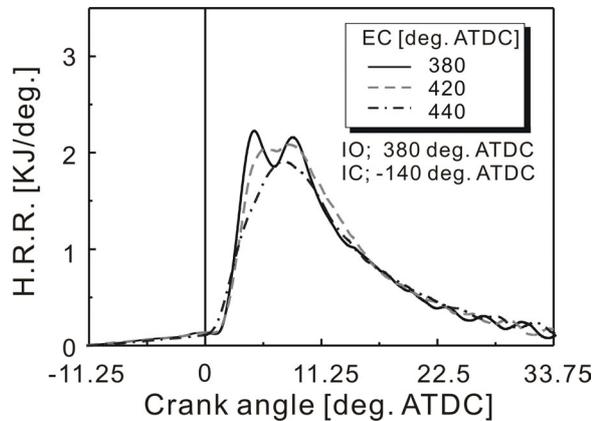


図-3-8 排気弁開時期による熱発生率への影響

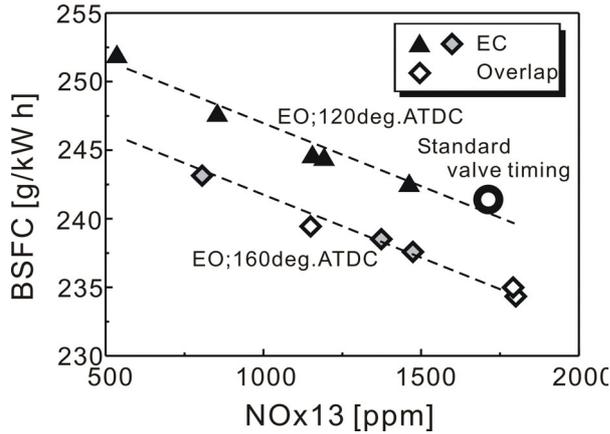


図-3-9 排気弁開時期の NOx 排出濃度、燃料消費率への影響

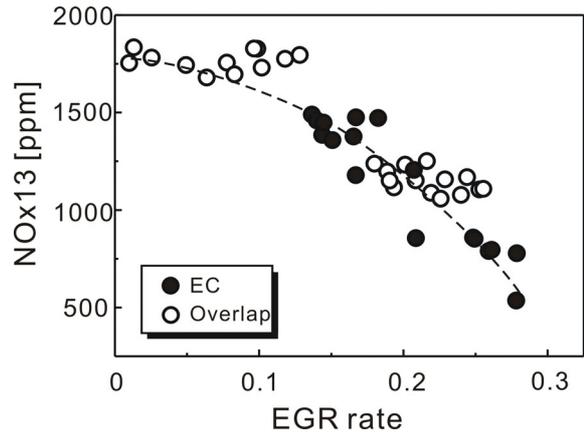


図-3-11 EGR 率と NOx 排出濃度の関係

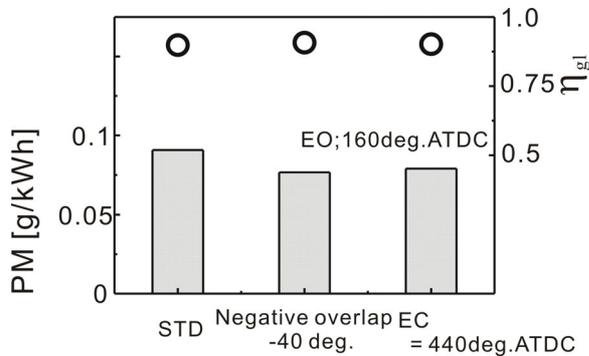


図-3-10 各バルブタイミングでの PM 排出量、等容度

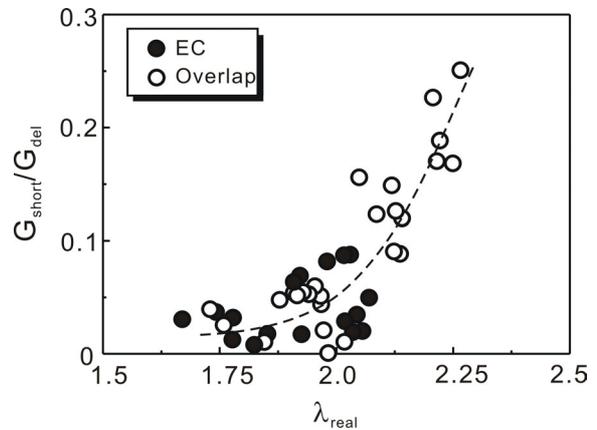


図-3-12 吹き抜け新気量と空気過剰率の関係

ーラップ、排気弁遅閉じを行った時の PM 排出量と等容度の変化を示す。EGR を行うと熱発生期間が延び、それに伴って PM 排出量が増加すると見込まれたが、PM 排出量は標準開閉時期と比較してほとんど変わらなかった。このため、熱発生期間の変化を調べるため等容度の計算を行った。等容度は以下の式で表される。

$$\eta_{gi} = \frac{1}{Q} \int \frac{dQ}{d\theta} \eta_{g\theta} d\theta \quad (3-7)$$

ここで、 Q は見かけの最大熱発生量[J]、 $\eta_{g\theta}$ は微小定容サイクルの熱効率を表す。等容度は全ての条件で約 0.9 となり変わらなかった。これは EGR によって熱発生期間が延びていないことを表している。この原因は、シリンダ内の空気過剰率が負のオーバーラップで 1.9、排気弁遅閉じでも 1.8 であり、EGR を行っても十分な空気がシリンダ内に存在するためと考えられる³⁻¹⁰⁾。このことは、NOx、PM の同時低減の可能性を示唆していると考えられる。

3.3.5 空気量推定法について

簡易推定法の精度を確認するため、図-3-2 で計算した負のオーバーラップ (-40deg.)、EO=140deg. ATDC から EO を 120deg. ATDC に変更して計算を行った。負のオーバーラップでは実際の吹き抜け新気質量は 0 と想定できるが、本条件では吸入新気の約 2.5% となり、簡易推定法によって求められた他のガス質量にも同程度の誤差が含まれていることが確認できる。

総合的な内部 EGR の影響を把握するため、図-3-11 に EGR 率と NOx 排出濃度の関係を表す。図-3-11 内の表示は、本章の結果の全てを示している。NOx 排出濃度は EGR 率の増加に対して減少しているが、EGR 率が 0.1 付近で NOx 排出濃度が高い。これは、3.3.1 にて示したオーバーラップ 40deg. の結果である。一方、EC を変更した時には EGR 率の増加に対して直線的に NOx 排出濃度が減少していることから、残留ガスはシリンダ内でほぼ同じ分布をしていることが推定できる。図-3-12 に吸入新気で無次元化した吹き抜け新気量とシリンダ内空気

過剰率の関係を示す。EGR 率の増加は空気過剰率を低下させるが、空気過剰率の低下に伴い吹き抜け新気量も減少している。また、空気過剰率が 2.0 以下になると吹き抜け新気量は 5%以下になり、ほとんど吹き抜けなくなることがわかる。

計算されたガス量は内部 EGR の導入方法の違いによる差異はほとんどなく、同一線上にのる。しかし、NOx 排出濃度と EGR 率との関係から示されるようにシリンダ内の残留ガス分布が異なることが推定されることから、ガス量だけでなく、シリンダ内の分布も知る必要があることがわかる。

3.4 まとめ

油圧制御による可変バルブタイミング機構を用いた軽負荷での内部 EGR の効果について調べ、以下の知見を得た。

- (1) オーバーラップを変化させて EGR を制御する場合には、負のオーバーラップを行わない限り、大幅な NOx 排出濃度の低減はできない。また、負のオーバーラップは各気筒単独で EGR 量が決められるが、排気弁遅閉じによって行う場合には、他気筒の影響を考慮する必要がある。
- (2) オーバーラップ、排気弁遅閉じを利用して EGR を行ったが、燃料消費率と NOx 排出濃度のトレードオフの関係は変わらなかった。軽負荷で EGR を行う場合、併せて排気弁開時期を遅らせることによって、PM、燃料消費率を悪化させることなく、NOx 排出濃度を低減することができる。これは、EGR を行っても燃焼期間が変わらない、十分な空気を供給することによって実現される。
- (4) 排気弁遅閉じによって EGR を制御する場合、EGR 率の増加に対して、NOx 排出濃度は直線的に減少することから、残留ガスはシリンダ内でほぼ同じ分布をしていることが推定できる。

4. β線吸収法 PM 計測システムを用いた 実船発電機での測定

4.1 はじめに

ディーゼル機関から排出される粒子状物質 (PM) は、人体に甚大な影響を与える可能性があると認識されている。一方、船用ディーゼル機関では IMO 及び国内法による規制がなく、実船における排出実態の報告例も少ない。前田ら⁴⁻¹⁾は部分希釈トンネルを用いたフィルタ重量法による実船測定を行った。フィルタ重量法は測定装置が大がかりとなるため、運搬・設置場所など実船の測定には支障が大きく、測定例の蓄積は難しい。我々は、実船測定例の蓄積を目標として、可搬可能な測定系の確立を目指してき

た^{4-2~4-5)}。以前に行ったフィルタ振動法 (R&P 社製 TEOM-1400a) による測定系では、200 秒の周期変動が観察できる利点がある一方、船体動揺の影響を受ける、希釈部の吸引ノズル周りの PM 沈着が大きいなどの問題点があった。

今回、その動揺対策としてβ線吸収法による測定器を採用し、更に、エアガンを用いた希釈器を開発して⁴⁻⁶⁾、部分希釈トンネル (ISO 規定準拠⁴⁻⁷⁾) を用いたフィルタ重量法と比較するとともに、(独)航海訓練所所有の練習船旧「銀河丸」停泊中に発電機原動機において実船測定を行った。

4.2 使用した機関及び燃料

今回の報告に関係したディーゼル機関の概要と使用燃料について表-4-1、4-2 に示す。但し、4.4.1 の検証実験に用いた機関は表-2-1 に示した松井鉄工所製立形過給機付 3 気筒 4 サイクル中速ディーゼル機関である。

表-2-1、4-2 に示された機関の内径、行程は類似しているが、最大回転数については、補助発電機用ディーゼル機関の方が大きくなっている。2 台のディ

表-4-1 燃料性状

	中速 ディーゼル機関 (4.4.1)	補助発電機用 ディーゼル機関 (4.4.2)
油種	A 重油	A 重油
密度 (15°C) [g/cm ³]	0.8533	0.859
動粘度 (50°C) [mm ² /s]	2.532	2.402
引火点 [°C]	82	75
流動点 [°C]	-25	-22.5
残炭 [mass%]	0.65	0.28
水分 [vol.%]	0	0.01
灰分 [mass%]	0	0.001
硫黄 [mass%]	0.08	0.13

表-4-2 供試機関諸元 (実船)

型式	旧銀河丸補助発電機用 ディーゼル機関 立形 4 サイクル 6 シリンダ 過給機、インタクーラ付
燃料油	A 重油
ボア×ストローク	φ220 mm×300 mm
定格出力	840 PS
発電出力	560 kW
最大回転数	720 rpm

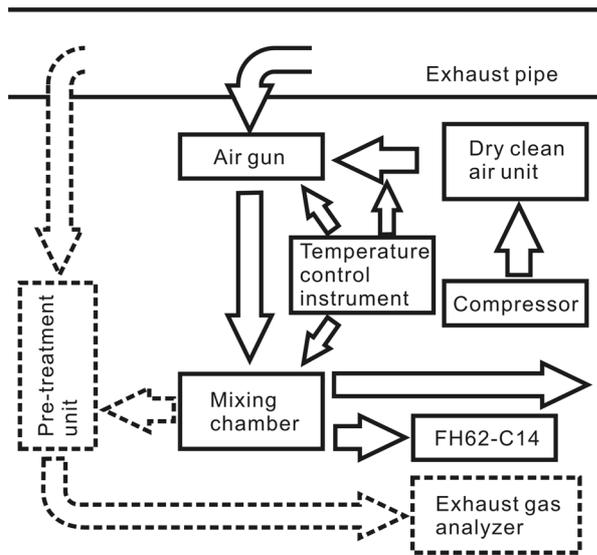


図-4-1 実船実験での計測系

ーゼル機関とも A 重油を使用している。両者に性状に違いがあるが、硫黄分については 0.08% と 0.13% であり、両者とも A 重油としては少ないものであった。

4.3 β線吸収法 PM 計測システム

図-4-1 にβ線吸収法 PM 計測システム（新測定系）を示す。以前使用していた市販の希釈器の排ガス吸引ノズルは、内径が 2.0mm まで狭められ、この部分に多くの沈着が見られた。そのため、本計測システムではエアガンを用いた希釈器を作成した。エア

ガンには、給気口（1 次エア）と吸気口（2 次エア）と噴射口があり、粉体の移送を行う道具として使われている。

1 次エアがエアガンの内部でノズルから噴出され負圧を作り、吸気口からの 2 次エアを吸引し、一緒に噴射口からはき出す構造となっている。ここでは、ドライクリーンエアユニットからの清浄空気を給気口に接続し、吸気口にボールバルブ経由で排ガスのサンプリング管を接続した。噴射口から出た両者は、混合室で混合された後、その一部がβ線吸収法による測定器（Thermo Electron Corporation 製 FH62-C14）へ送られる。

β線吸収法は、放射線源から放出されるβ線が、透過する質量に応じて減少する現象を利用して、フィルタ上に捕集された PM 質量を測定するものである。図-4-2 に PM 計測器(FH62-C14; 装置 A と称す)の機能構成図を示す⁴⁻⁸⁾。PM はフィルタ上に捕集され、フィルタ下に設置された放射線源(¹⁴C)からのβ線を上側の比例計数管で検出する。捕集流量は、16.7[l/min]になるようにポンプでコントロールされるとともに、基準状態(0°C、1 気圧)換算の流量も表示される。そしてフィルタ上に蓄積された質量と捕集流量から希釈排ガス中の PM 濃度を求める。

図-4-1 の破線で示した部分は、排ガス及び希釈排ガスの O₂ と CO₂ の濃度測定系である。これらのガスは前処理装置(島津製作所製 CFP-301)を經由し、O₂ 濃度測定器あるいは CO₂ 濃度測定器に至る。O₂ 濃度の測定には 榊テスト製 GSV-350 を、CO₂ 濃度には、島津製作所製 CGT-10-2A (0-15%) と扶桑理化製品株式会社製 CD-602B (0-5%) を用い、

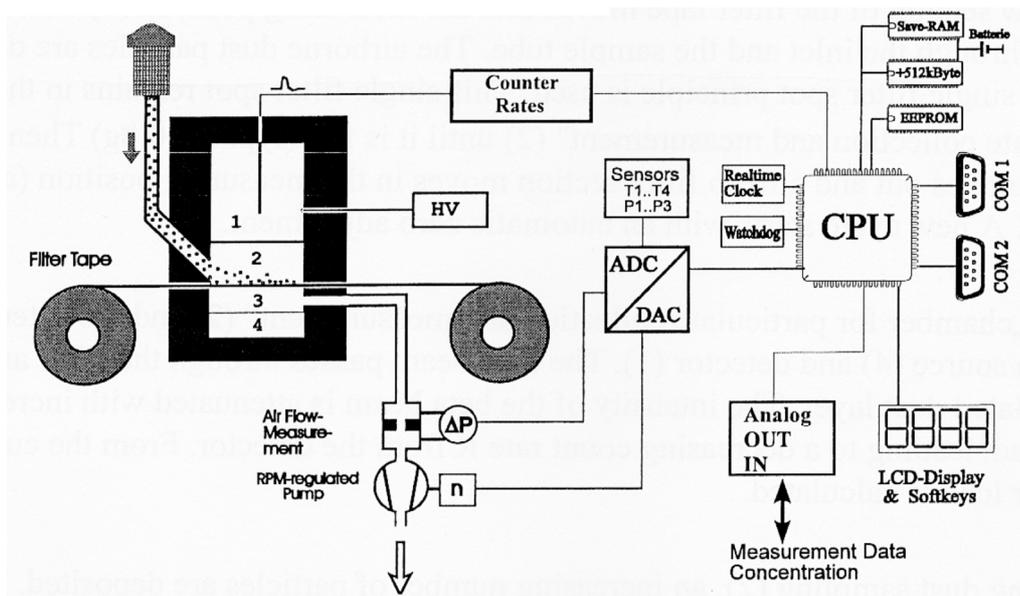


図-4-2 PM 計測器 (FH62-C14) 機能構成図⁴⁻⁸⁾

濃度レベルに応じて2種の測定器を使い分けた。また、サンプリング空気の温度・湿度を神栄株式会社製 TRH-3A で測定した。

排ガス流量は、完全燃焼を仮定した炭素バランス法⁴⁻⁷⁾により計算した。希釈係数は、排ガス、希釈排ガス、希釈空気の O₂あるいは CO₂濃度から計算した。但し、測定した値が dry 濃度であるので wet 濃度に換算している。希釈係数の計算式を以下に示す。

$$\text{希釈係数} = \frac{a - c}{b - c}$$

排ガス中の濃度 (%) : a

希釈排ガス (%) : b

希釈空気 (%) : c

4.4 実験結果及び考察

4.4.1 検証実験

フィルタ重量法による PM 測定はダブルダイリュージョントンネル方式 (ファームテック社製 MIT-1000 ; 装置 B と称す) を用いた。この装置ではフィルタ (PALLFLEX PRODUCTS CORP. 製 TX40HI- 20-WW) を2枚使用するマルチフィルタ法を採用している。PM のサンプリングの前後に恒温槽にて温度 25℃、湿度 50% で 24 時間放置し、フィルタ重量の差から PM 重量を求めた⁴⁻⁹⁾。PM の捕集効率が異なる可能性があるので、装置 A で使用するテープフィルタの形を整え、装置 B で使用し (Case2)、従来のフィルタ (Case1) との捕集効率の比較を行った。このとき、装置 A での測定条件 (面速度 : 捕集流量を捕集面積で割った値) と同じになるように、捕集面積を調整した。更に、新測定システムのサンプリング管を装置 B のサンプリング部と同じ位置にするとともに同時に測定 (Case3) を行った。Case3 では酸素濃度から希釈係数を求めた。但し、希釈空気の酸素濃度は実験開始直前にドライクリーンエアユニットを通過している空気の酸素濃度を基準とした。

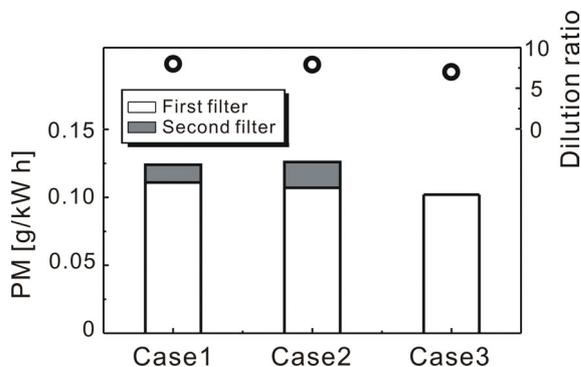


図-4-3 PM 計測器の比較

図-4-3 に比較測定の結果を示す。Case1 で 2 回、Case2 で 3 回測定した平均値を示す。1 枚目のフィルタの捕集量は Case2 の方が少なく、フィルタ自体の捕集効率が異なることがわかった。一方、2 枚の合計では、良い一致を示した。これから判断すると Case3 では Case2 と同一フィルタを用いていることから Case2 の一枚目の捕集量と同程度の値となることが望まれる。Case2 の 1 枚目の捕集量はおよそ 85% にあたる。Case3 の結果は 0.102 [g/kWh] となり、装置 B で測定した 5 回の平均値の 0.85 倍 (0.125 g/kWh × 0.85 = 0.106 g/kWh) と良い一致を示した。

4.4.2 実船発電機での測定

実船発電機での測定では、過給機の下流にあるドレイン抜き管を取り外して新測定系のサンプリング管を取り付けた。以前観測された変動周期 200 秒を考慮してこの整数倍の測定時間 (400 秒又は 600 秒) の PM 積算重量を使い、PM 濃度を求めた。

測定結果を図-4-4 に示す。この図中の横軸は軸出力である。軸出力約 25% で 4 回、約 45% で 2 回、約 60% で 2 回測定を行った。希釈係数は CO₂ 濃度を用いて計算し、軸出力に対する変化はほとんどなく、4 程度の値となった。単位出力あたりの PM 排出量は 0.19~0.35 [g/kWh] となり、約 25% の 4 点で大きくばらついた。一方、同じ 25% のデータでも排ガス中の PM 濃度では、16~22 [mg/m³]_N、(wet 条

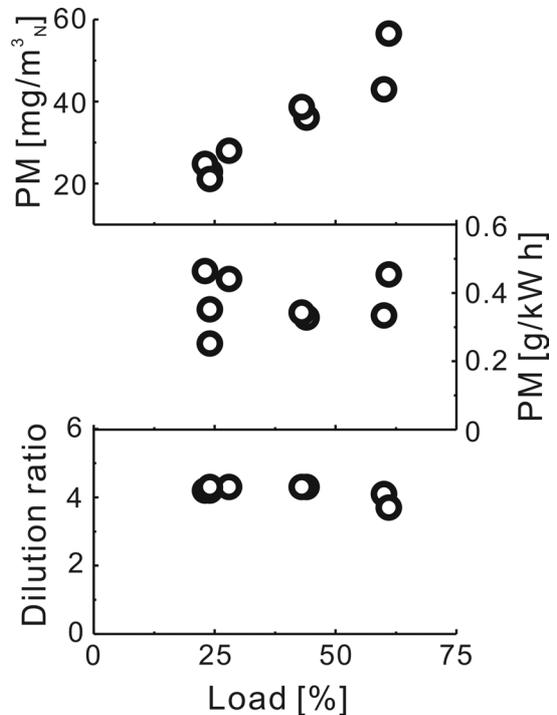


図-4-4 実船計測での負荷に対する PM 排出量

件)と変動は小さくなった。両者のばらつきの違いは、燃料流量の違いに起因している。PM濃度からPM排出量に変換する過程で排ガス流量を求める必要があり、排ガス流量は燃料流量に大きく依存しているためである。排ガス中のPM濃度としては、出力上昇とともに濃度が増加した。今後、考察を進めるとともに、測定データの蓄積を進めていきたい。

4.5 まとめ

可搬可能なPM測定システムを目指して、β線吸収法による測定器の採用、エアガンを用いた希釈器開発を行った。

ISO規定に準拠したフィルタ重量法と比較すると、8割強の値を示し、この違いの大部分はフィルタの捕集効率に関わる問題であることがわかった。

旧「銀河丸」停泊中に発電機原動機において実船測定を行った。排ガスサンプリング流量が等速サンプリングより大きくなるという問題があった。各軸出力において測定を行い、ほぼ一定の希釈率の下でPM排出量は、軸出力に対して変化がなく、特に25%出力で大きくばらついた。一方、PM排出濃度は出力に比例して大きくなった。

5. 本研究により得られた成果

「電子制御ディーゼル機関の吸排気弁開閉時期の制御」では

- (1)吸排気弁開閉時期を固定して燃料着火時期を変化させ、従来のカム駆動と同様の傾向が得られたことから、吸排気弁が制御通りに作動していることを確認した。
- (2)吸排気弁開閉時期をそれぞれ単独で変更し、これらが燃料消費率とNOxに与える影響を調べ、以下のことが確認された。
 - 1)排気弁開閉時期の制御で燃料消費率の改善が期待できる。
 - 2)吸気弁閉時期はほぼ一定値に固定してよい。
 - 3)オーバーラップ制御によって、NOx排出濃度と燃料消費率を同時に改善できる可能性がある。ただし排気温度の上昇によって制御範囲は制限されるため、注意を要する。
 - 4)吸排気弁開閉時期を制御してNOx濃度の低減を図るには、排ガス中の酸素濃度が低くなる方向に制御すべきと考えられる。
- (3)25%負荷における吸排気弁開閉時期の組み合わせでは燃料消費率及びNOx排出濃度の同時低減が可能であるが、さらに着火時期を組み合わせでは燃料消費率の向上はみられなかった。
- (4)カム駆動式、燃料噴射系及び吸排気弁系の電子制御の比較では、吸排気弁系も電子制御すると

低負荷で燃料消費率の著しい低減がみられるが、NOx濃度の低減は大きくはない。

「可変バルブタイミングを用いた内部EGR制御について」では、

- (1)オーバーラップを変化させてEGRを制御する場合には、負のオーバーラップを行わない限り、大幅なNOx排出濃度の低減はできない。また、負のオーバーラップは各気筒単独でEGR量が決められるが、排気弁遅閉じによって行う場合には、他気筒の影響を考慮する必要がある。
- (2)オーバーラップ、排気弁遅閉じを利用してEGRを行ったが、燃料消費率とNOx排出濃度のトレードオフの関係は変わらなかった。軽負荷でEGRを行う場合、併せて排気弁開閉時期を遅らせることによって、PM、燃料消費率を悪化させることなく、NOx排出濃度を低減することができる。これは、EGRを行っても燃焼期間が変わらない、十分な空気を供給することによって実現される。
- (3)排気弁遅閉じによってEGRを制御する場合、EGR率の増加に対して、NOx排出濃度は直線的に減少することから、残留ガスはシリンダ内でほぼ同じ分布をしていることが推定できる。

「β線吸収法PM計測システムをもちいた実船発電機での測定」では、

- (1)可搬可能なPM測定システムを目指して、β線吸収法による測定器の採用、エアガンを用いた希釈機の開発を行った。
- (2)β線吸収法とISO規定に準拠したフィルタ重量法と比較すると、およそ8割強の値を示し、この違いの大部分はフィルタ捕集効率に関わる問題であることがわかった。
- (3)旧「銀河丸」停泊中に発電機原動機において実船測定を行った。排ガスサンプリング流量が等速サンプリングより大きくなるという問題があった。各軸出力において測定を行い、ほぼ一定の希釈率の下でPM排出量は、軸出力に対して変化がなく、特に25%出力で大きくばらついた。一方、PM排出濃度は出力に比例して大きくなった。

謝辞

本報告第4章の実船実験は、(独)航海訓練所との共同研究により実施された。同所関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 2-1) 高杉喜雄他 6 名、電子制御化ディーゼル機関の運転その 1 吸排気弁開閉時期の設定について、日本マリンエンジニアリング学会第 65 回学術講演会論文集(2000)73-76
- 2-2) 例えば、花房眞、2.3 排ガスの排出規制 -主機関における排ガス制御の現状-、日本造船学会誌 TECHNO MARINE 第 879 号(平成 16 年 5 月) 300-304
- 2-3) 張潔他 7 名、燃料噴射系の電子制御化による船用ディーゼル機関の排ガス特性の改善 -A 重油使用時の運転結果-、日本マリンエンジニアリング学会誌第 35 巻第 12 号(2000)841-847
- 2-4) 高杉喜雄、電子制御ディーゼル機関運転までの経過、日本マリンエンジニアリング学会誌第 36 巻第 12 号(2001)964-972
- 2-5) 高杉喜雄他 6 名、船用ディーゼル機関の燃料噴射系と吸排気弁系の電子制御化運転、日本マリンエンジニアリング学会誌第 37 巻第 3 号(2002)220-226
- 2-6) 藤井龍雄他 5 名、油圧駆動電子制御システムによるエンジン性能の向上 -その 3 試験機関の運転と機関性能評価-、日本船用機関学会誌第 26 巻第 7 号(1991)351-357
- 2-7) 榎本良輝、燃焼室内の熱伝達の計測手法と解析、日本機械学会講習会 No.01-77 エンジンにおける実験・計測の基礎と応用(その 3)(2001)33-44
- 3-1) 華山伸一他 2 名、国内における船舶からの NOx 排出の現状と今後の船用機関について考える、日本マリンエンジニアリング学会誌第 36 号第 9 号(2001)686
- 3-2) 張潔他 4 名、電子制御ディーゼル機関の運転 -オーバーラップの制御について-、日本マリンエンジニアリング学会第 68 回学術講演会論文集(2002)237-240
- 3-3) 雲雅二他 5 名、新 EGR システムの開発、自動車技術、Vol.54、No.9(2000)86-93
- 3-4) 辻幸浩他 2 名、ディーゼルエンジンにおける EGR ガス温度の NOx 生成におよぼす影響、第 16 回内燃機関シンポジウム講演論文集(2000) 419-424
- 3-5) 佐藤謙他 4 名、直噴ディーゼルエンジンにおける EGR と NOx、排気煙の関係、第 13 回内燃機関シンポジウム講演論文集(1996)447-452
- 3-6) 加藤聰他 2 名、燃焼室内直接サンプリング法による DI ディーゼル機関の粒子状物質の測定と生成機構、第 16 回内燃機関シンポジウム(2000) 413-418
- 3-7) 鶴島理史他 3 名、筒内直接ガスサンプリングによる予混合気の圧縮自着火過程に関する研究、第 16 回内燃機関シンポジウム(2000)133-138
- 3-8) 村山哲也他 3 名、可変動弁系における吸・排気過程の数値解析、日本機学会 2003 年年度大会講演会論文集 Vol.III(2003)75-76
- 3-9) 森光司他 3 名、三次元流れ解析を用いた EGR 分配均一化技術開発、第 16 回内燃機関シンポジウム(2000)139-144
- 3-10) 青柳友三他 5 名、単気筒エンジンによる高過給ディーゼル燃焼の研究(第 1 報)、自動車技術会学術講演会前刷集 No.46-03(2003)11-16
- 4-1) 前田和幸他 3 名、船舶における PM 排出特性評価、日本マリンエンジニアリング学会第 63 回学術講演会論文集(1999)125-128
- 4-2) 松崎範行他 4 名、フィルタ振動法による実験での PM 計測について、日本マリンエンジニアリング学会第 64 回学術講演会論文集(2000)85-88
- 4-3) 大橋厚人他 4 名、フィルター振動法による船用ディーゼル機関の PM 測定に関する基礎研究、平成 12 年度(第 74 回)船舶技術研究所研究発表会講演集(2000)37-40
- 4-4) 大橋厚人他 4 名、フィルター振動法による実船での PM 測定について(その 2)、日本マリンエンジニアリング学会第 65 回学術講演会論文集(2000)1-4
- 4-5) 大橋厚人他 4 名、実船での PM 測定に関する基礎研究、平成 13 年度(第 1 回)海上技術安全研究所研究発表会講演集(2001)319-322
- 4-6) 大橋厚人他、特願 2001-273331、特願 2001-273332
- 4-7) ISO/DIS8178, Reciprocating internal combustion engines-Exhaust emission measurements
- 4-8) Thermo Electron Corporation, Operating Instructions Dust Monitor FH62-C14 online, 1999. 12. 07.
- 4-9) 中島康晴他 7 名、船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の計測、平成 11 年度(第 73 回)船舶技術研究所研究発表会講演集(1996) 218-223

研究成果

所外研究発表

- ・西尾澄人、高杉喜雄、大橋厚人、石村恵以子、張潔、菊地正晃、桑原孫四郎、電子制御化ディーゼル機関の運転(燃料噴射・吸排気弁の電子制御化運転の結果について)、日本機械学会第 10 回交通・物流部門大会講演論文集 P317-320、平成 13

- 年 12 月 5 日
- ・張潔、高杉喜雄、石村恵以子、菅進、燃料噴射電子制御時の熱発生率解析(その 2)、第 67 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集(2002)29-32、平成 14 年 5 月 15 日
 - ・高杉喜雄、石村恵以子、西尾澄人、菊地正晃、張潔、菅進、電子制御船用ディーゼル機関の有害排ガスへの変動要因-吸排気弁開閉時期の変更-、日本機械学会第 8 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集(2002)267-270、平成 14 年 6 月 18 日
 - ・高杉喜雄、電子制御ディーゼル機関運転までの経過、日本マリンエンジニアリング学会誌第 36 巻第 12 号(2001)964-972
 - ・高杉喜雄、石村恵以子、西尾澄人、大橋厚人、桑原孫四郎、張潔、菅進、船用ディーゼル機関の燃料噴射系と吸排気弁系の電子制御化運転、日本マリンエンジニアリング学会誌第 37 巻第 3 号(2002)220-226
 - ・張潔、高杉喜雄、石村恵以子、菊池正晃、菅進、電子制御ディーゼル機関の運転-オーバーラップの制御について-、日本マリンエンジニアリング学会第 68 回学術講演会論文集(2002)237-240、平成 14 年 11 月 21 日
 - ・高杉喜雄、電子制御 4 サイクルディーゼル機関、東京商船大学海事交通共同研究センター 第 2 回産官学フォーラム前刷集(2002)11-19、平成 14 年 12 月 6 日
 - ・高木正英、高杉喜雄、ディーゼル機関におけるバルブタイミングの内部 EGR に及ぼす影響、日本マリンエンジニアリング学会第 70 回学術講演会論文集(2003)21-22、平成 15 年 10 月 21 日

- ・高木正英、高杉喜雄、可変バルブタイミングを用いた内部 EGR 制御の研究、日本マリンエンジニアリング学会誌第 39 巻第 10 号(2004)387-393
- ・大橋厚人、高杉喜雄、石村恵以子、張潔、 β 線吸収法 PM 計測システムを用いた実船発電機での測定、日本マリンエンジニアリング学会第 67 回学術講演会論文集(2002)13-16、平成 14 年 5 月 15 日

特許

- ・「船舶用浮遊性微粒子状物質測定システム及びガス希釈器」
特願 2001-27333、提出日；平成 13 年 9 月 10 日、
発明者；大橋厚人
- ・「NOx 低減型ディーゼル機関」
特願 2003-318941、提出日；平成 15 年 9 月 10 日
発明者；石村恵以子、高木正英、高杉喜雄、
菊地正晃、張潔
- ・「過給機付 4 ストロークディーゼル機関の気筒内の空気過剰率の簡易的計算法」
特願 2003-406476、提出日；平成 15 年 12 月 4 日
発明者；高木正英、石村恵以子、高杉喜雄、
菊地正晃、張潔

プログラム登録

- ・「電子制御式中速中型 4 ストロークディーゼル機関の吸気弁・排気弁作動状態表示および平均化した吸気弁・排気弁開閉時期の表示方法のプログラム」
登録番号 P 第 7223 号-1、
登録年月日；平成 13 年 9 月 28 日、
管理責任者；石村恵以子、大橋厚人