

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

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。

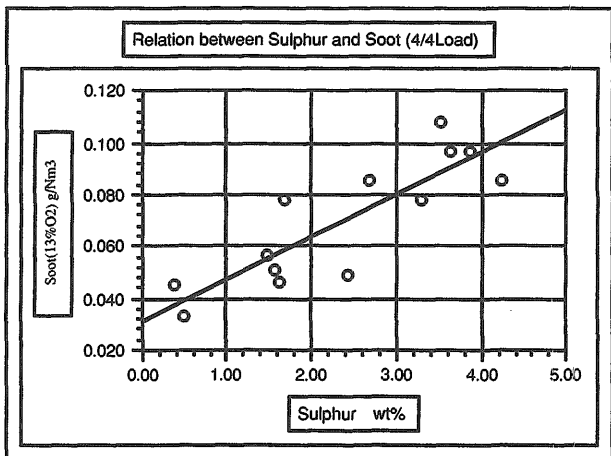


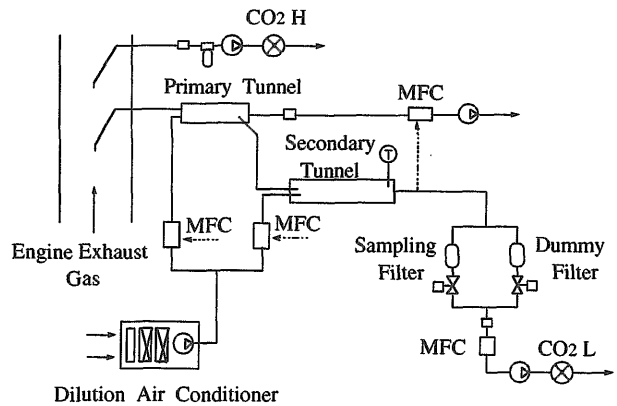
図3 ストと硫黄分との関係

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

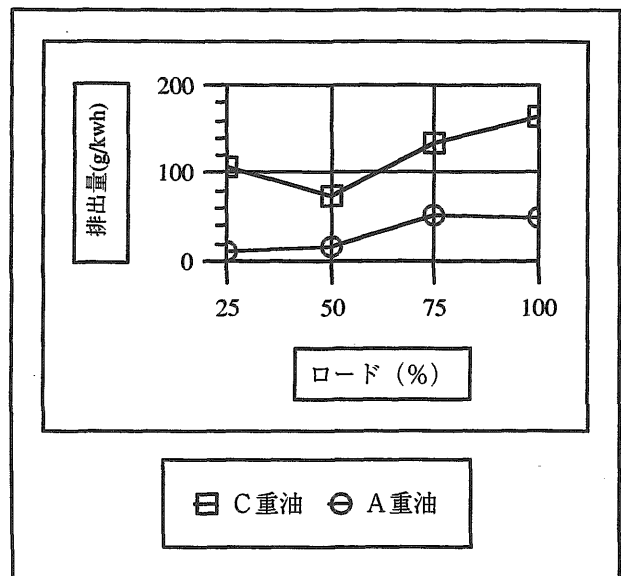


図5 A重油及びC重油のパーティキュレート排出量

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

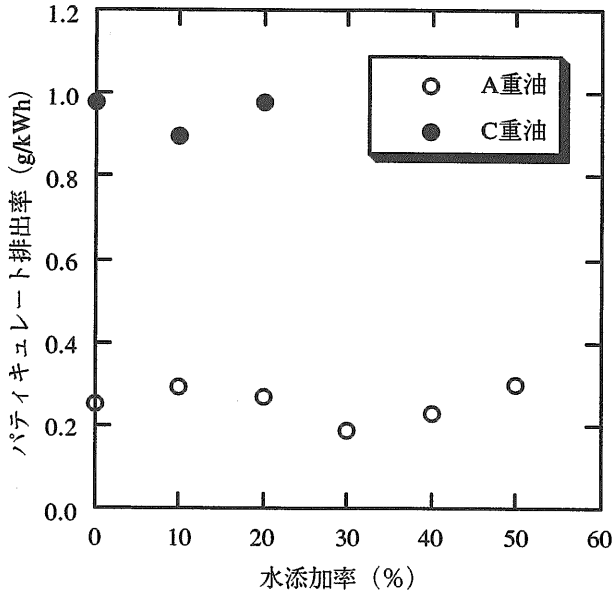


図6 パティキュレート排出量に対する水分の影響

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。

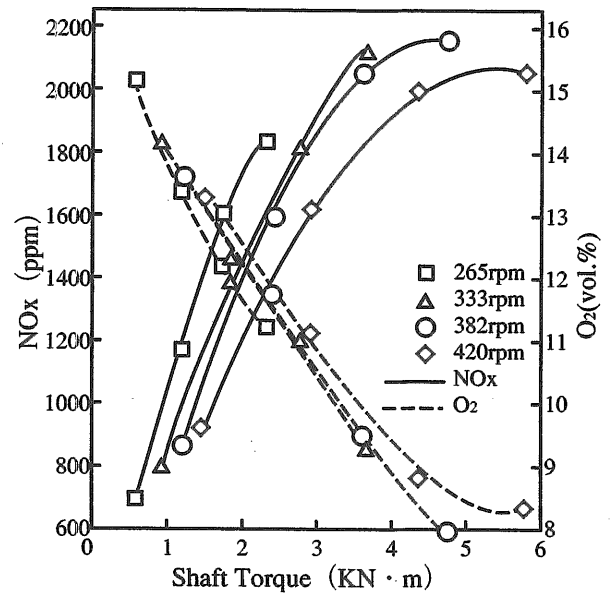


図7 軸トルクに対する実測NO_x濃度、O₂濃度の変化

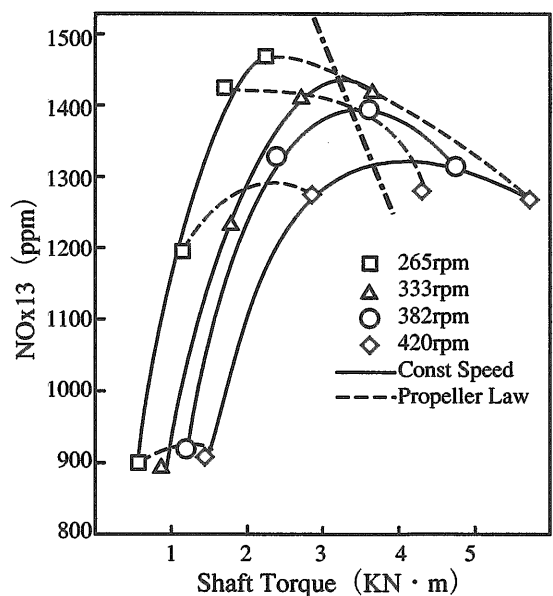


図8 軸トルクに対する換算NO_x濃度の変化

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。

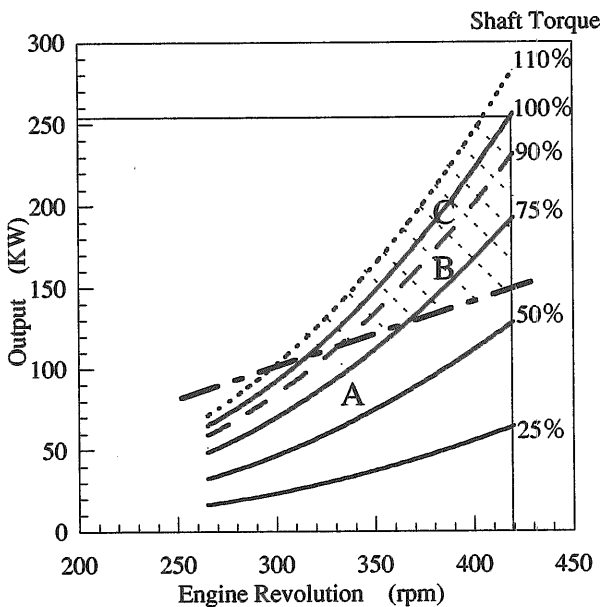


図9 軸トルクの増大に伴い換算NO_x濃度が減少する運転範囲

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。

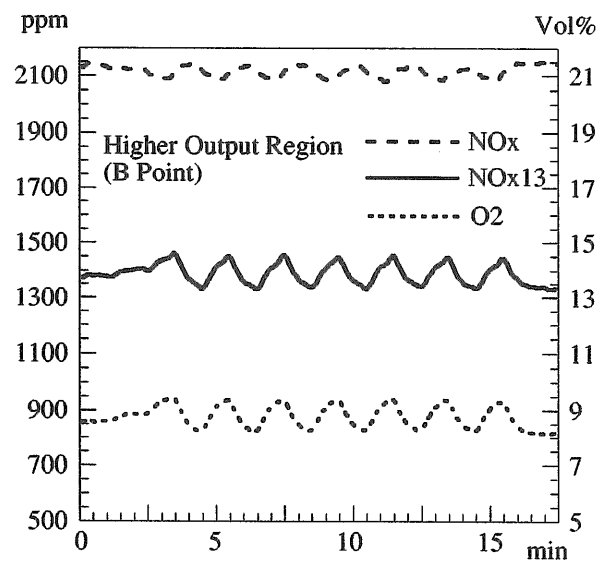
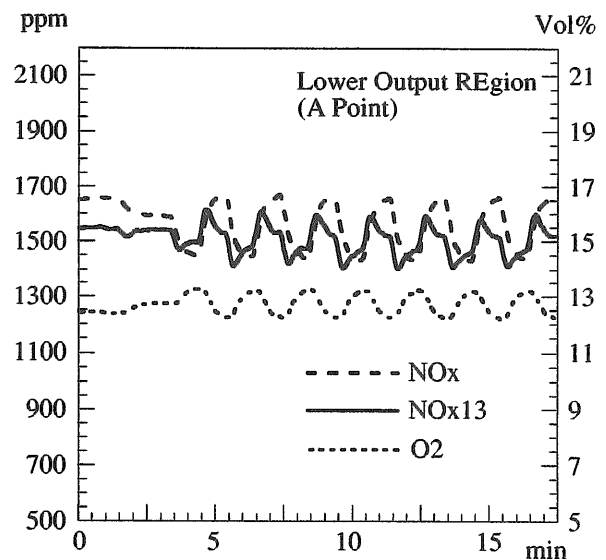


図10 軸トルク変動（周期2分、振幅±10%）に対するNO_x濃度およびO₂濃度の変化

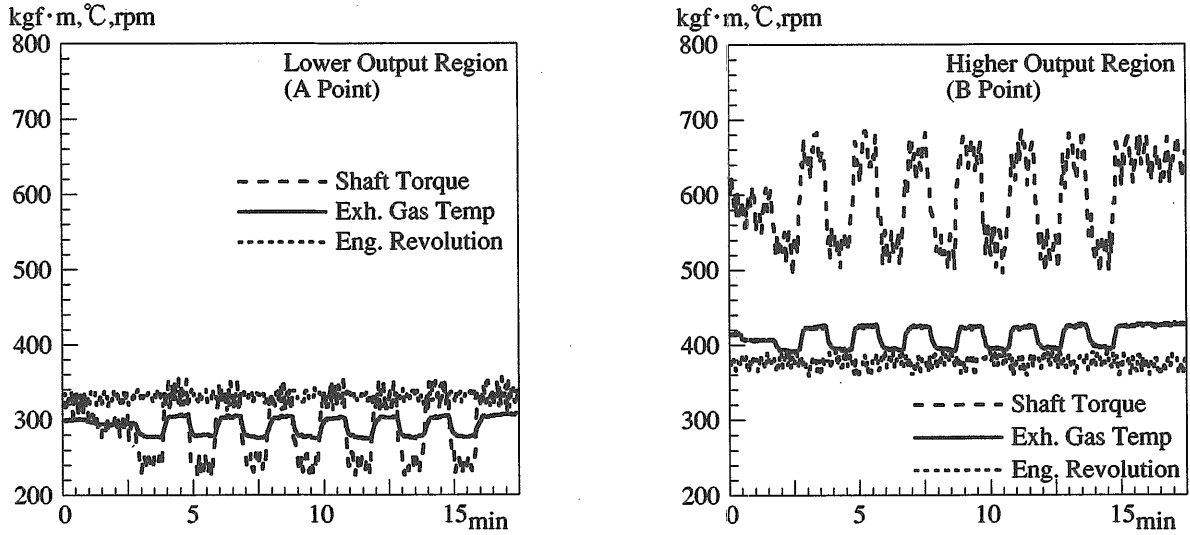


図11 軸トルク変動(周期2分、振幅±10%)に対する排気温度および回転数の変化

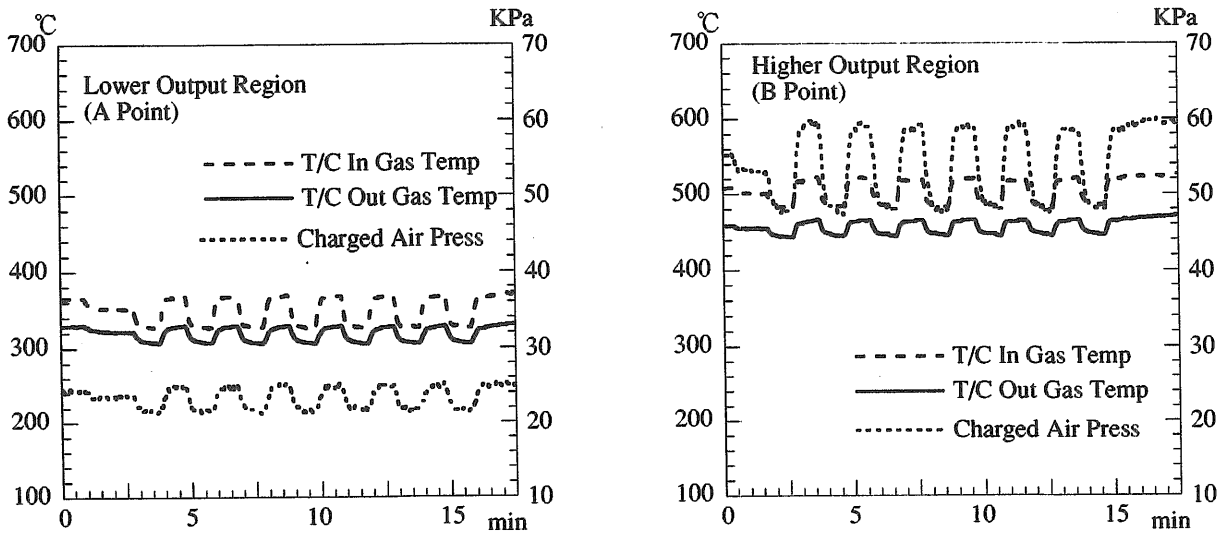


図12 軸トルク変動(周期2分、振幅±10%)に対するT/C前後排気温度および給気圧力の変化

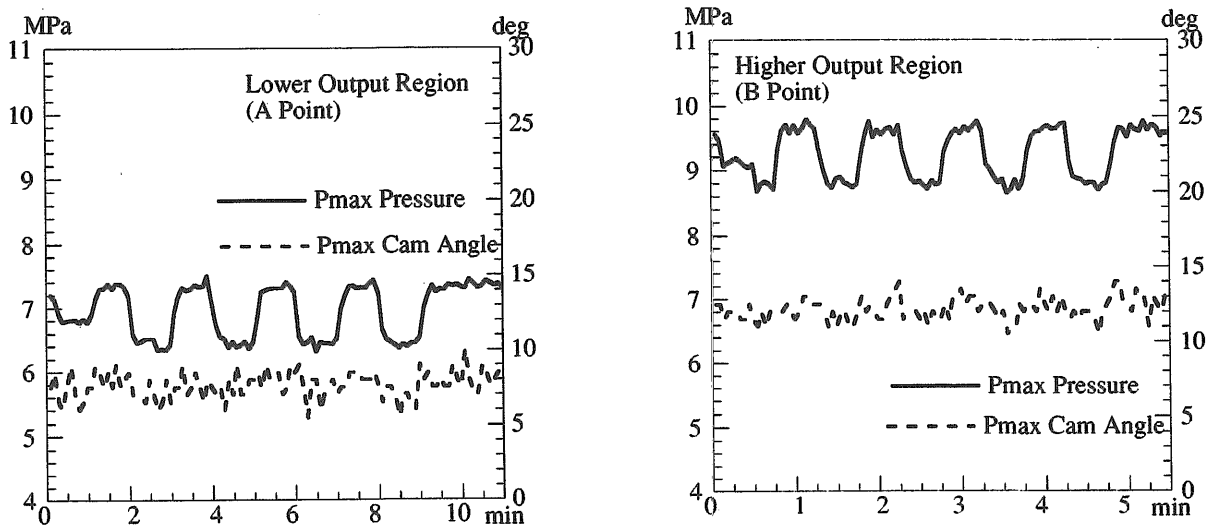


図13 軸トルク変動(周期2分、振幅±10%)に対する筒内最高圧力及び同角度位置の変化

一方、図14は高出力域（図9のC点）における矩形波

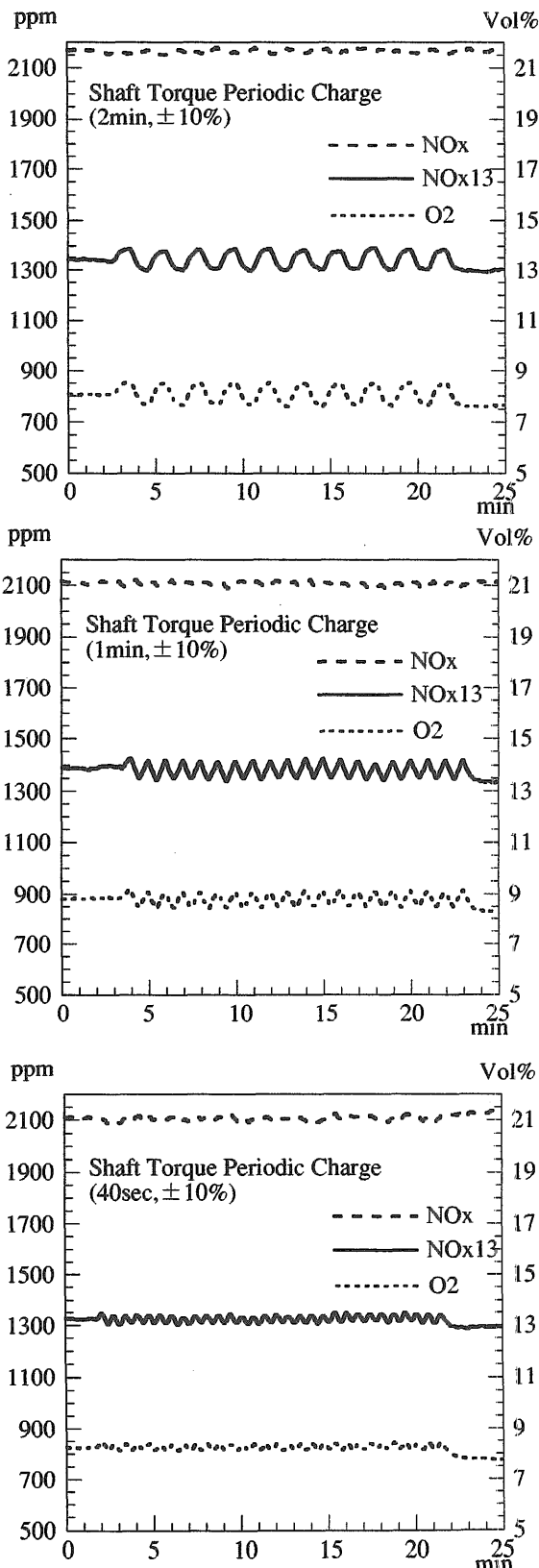


図14 高出力域（C点）における軸トルク変動周期の変更に伴うNO_x濃度、O₂濃度の変化

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、