

練習船耕洋丸における NO_x 排出量の低減方法*¹桐畑友明*²・安成幹男*³・日笠純扶*³・前田和幸*⁴The Reduction Methods of NO_x Emission
on T. S. KOYO-MARUTomoaki Kiriata, Mikio Yasunari, Sumio Hikasa,
and Kazuyuki Maeda

To clarify the characteristics and reduction methods of NO_x emission on ships, ship's speed [knot], NO_x emission [ppm], relative smoke density [%], engine output [kW], fuel oil consumption [kg/h] and indicator diagrams were examined by using a 1990GT/2795kW ship equipped with CPP, and then the relationship between engine load and NO_x emission [kg/h], the effect of fuel injection timing retard and the effect of increasing wave making resistance were discussed. The results obtained from the examinations are as follows: (1) The relationship between engine load [%] and NO_x emission [kg/h] can be shown as follows: NO_x emission = $-0.889 \times 10^{-3}(L^2) + 0.377(L) - 0.928$. (2) NO_x emission reduced 30% with 3 deg CA fuel injection timing delay from normal timing and 50% with 6 deg. CA delay at 215 rpm. (3) Optimum crank angle of fuel injection timing retard on experimental ship is 3 deg CA. (4) On sailing with constant propeller revolution and CPP angle, the ship's speed decreases and NO_x emission grows up due to the increasing wave making resistance. The quantity of NO_x emission per nautical mile increases 17% per 1 knot down.

1. まえがき

IMOの海洋環境保護委員会の資料によると、国際航海に従事している船舶からのNO_x排出量は世界全体の7%を占めており¹⁾、船舶通行量の多い海域付近の気環境に与える影響はより深刻であろうと考えられる。これに対し1990年第30回海洋環境保護委員会において、船用機関から

排出されるNO_xについては「西暦2000年までに現在レベルの70%」という達成期日と低減目標が示された。

機関単体でのNO_x排出の低減方法については造機メーカーや研究機関等において研究され、種々の方法が提案されている²⁾³⁾⁴⁾。しかし船舶は一度就航すると通常20年以上の間、同じ船体、機関で運航されるため、低NO_x仕様機関の研究、開発のみでなく、既存船からのNO_x排出量

水産大学校研究業績 第1492号, 1994年12月20日受付.

Contribution from Shimonoseki University of Fisheries, No. 1492. Received Dec. 20, 1994.

*1 平成5年度日本船用機関学会春季大会(東京)にて発表。

*2 水産大学校天鷹丸(Training Ship Tenyo-Maru, Shimonoseki University of Fisheries).

*3 水産大学校耕洋丸(Training Ship Koyo-Maru, Shimonoseki University of Fisheries).

*4 水産大学校機関学科内燃機関学講座(Laboratory of Marine Internal Combustion Engineering, Department of Marine Engineering, Shimonoseki University of Fisheries).

の低減方法を見いだすことも重要である。著者らは、船舶運航体系を含めた総合的見地からの有効なNO_x低減について、評価方法の提案⁵⁾を行った。

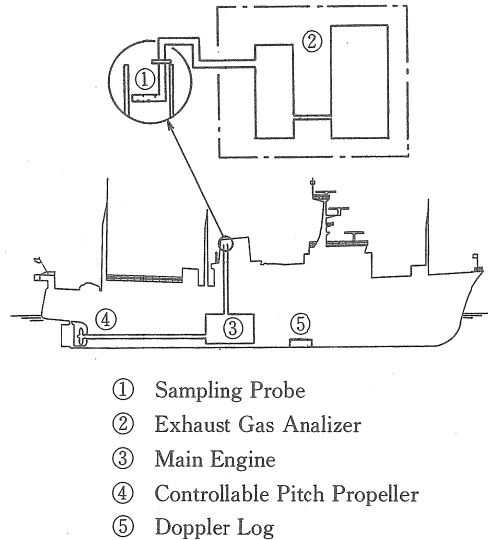
本研究では、船用2サイクルディーゼル機関(2795kW/230 rpm)を搭載した水産大学の練習船耕洋丸を用いて実船の運航時におけるNO_xの排出特性を調べるとともに、指圧線図から熱発生率を算出し、NO_x排出量との関係について検討した。また、既存船舶から排出されるNO_xの低減方法としてもっとも有効かつ確実であるとされている、燃料噴射時期遅延によるNO_xの低減効果と、これが機関に与える影響および運航上発生する問題点についても検討した。さらに、船舶の運航状態を左右する外的要因の1つである船体抵抗の変化が、NO_xの排出特性に及ぼす影響も明らかにし、既存船の航行時における運航体系を含めたNO_xの低減方法について検討したので報告する。

2. 実験装置と方法

実験は、水産大学の練習船耕洋丸を用いて行った。実験装置の概要をFig. 1に、供試船舶の主要目をTable 1に示す。

図において、排気管の出口付近に取り付けた採取プローブ①は、ロイドが用いた装置⁶⁾を参考にし、排気ガスを均等に採取できるように螺旋状に合計6個の吸入孔を設けた。

吸入した排気ガスは高温フィルター、クーラーにより乾き燃焼ガスにし、コンバータ、フィルター、フロメーター



- ① Sampling Probe
- ② Exhaust Gas Analyzer
- ③ Main Engine
- ④ Controllable Pitch Propeller
- ⑤ Doppler Log

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

等を通した後、化学発光式酸化窒素・酸素分析計②に導き、NO_xおよびO₂濃度を測定した。またこの測定と同時に、主機関③の指圧線図、軸馬力、燃料消費量、排気ガス温度、可変ピッチプロペラの翼角、対水相対船速(以下船速という)および排煙濃度を測定した。

実験は、まず航行時における負荷率とNO_x排出量との関係を調べるために、出渠直後の船体、プロペラが清浄な状態において、機関回転数を204 rpm および215 rpm に設定し、それぞれの回転数においてプロペラ翼角を変更することにより負荷率を変化させ、各部の計測を行った。次に、燃料噴射時期遅延によるNO_x低減効果を調べるために、機関回転数を215 rpm に設定し、負荷率を約20, 30, 40, 70%に変化させ、それぞれの負荷率において燃料噴射時期を標準より3度および6度遅らせて各部の計測を行った。さらに、外洋における船舶の運航状態を左右する波浪等の外的要因がNO_x排出特性に及ぼす影響を明らかにするために、長期航海において機関回転数を207 rpm、翼角を19.0度に設定し、下関～オーストラリア間で12日、ニュージーランド～下関間で9日、計21日間にわたり、1日当り3～5回、いずれも海面状況が目視可能な昼間のみ、船速および軸出力の計測を行った。使用した燃料油は重油1種2号相当で、その性状をTable 2に示す。NO_x測定時における機関室温度は25～35℃であった。

Table 1 Principal specifications of experimental ship.

Length (overall)	81.4 m
Breadth	13.00 m
Depth	8.40 m
Gross Tonnage	1990.17 ton
Trial Speed	15.67 knot
Main Engine	
Type	6UET 45/75C
Output	2795 kW (3800 PS)
Engine Speed	230 rpm
Pme	1.02 MPa
Bore	450 mm
Stroke	750 mm
Date of Delivery	June 7, 1978

Table 2 Fuel properties.

Density (15°C)	kg/m ³	858.7
Kinematic Viscosity (50°C)	mm ² /S	2.61
Flash Point	°C	72
Constituent wt %	C	85.5
	H	13.2
	S	0.58
Residual Carbon wt %		0.64
Lower Calorific Value	kJ/kg	42383

3. 結果と考察

3.1 航行時における NO_x 排出特性

Fig. 2 に航行時(機関回転数204 rpm および215 rpm)における負荷率と単位時間当たりの NO_x 排出量の関係を示す。

図より NO_x 排出量は機関回転数に関係なく、負荷率の上昇とともに増加するが、その増加割合は小さくなっている。この関係を、最小2乗法による2次の近似曲線で表すと次式となる。

$$NO_x(\text{kg/h}) = -0.889 \times 10^{-3}(L^2) + 0.377(L) - 0.928 \quad \dots(1)$$

ここで NO_x(kg/h)は単位時間当たりの NO_x 排出量、Lは負荷率(%)を示し、図中の破線は式(1)による2次曲線である。

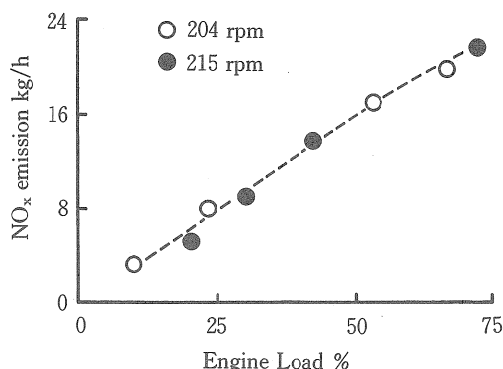


Fig. 2 Relationship between engine load and NO_x emission [kg/h].

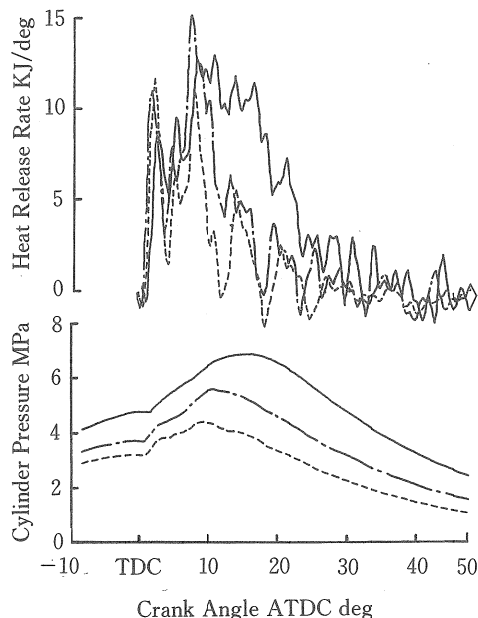


Fig. 3 P-θ diagram and heat release rate at each engine load.

Notes ----- 19% Load
 - - - - - 42% Load
 ———— 72% Load

Fig. 3 に、機関回転数215 rpm において、負荷率が19、42、72%のときの指圧線図およびそれぞれの線図から算出した熱発生率を示す。なお、これらの線図は150サイクルの平均である。

図において、予混合燃焼域における熱発生量がほぼ同じであるのは、本機関の場合は機関回転数が変われば燃料噴射時間はほぼ一定であり、また負荷率の変化に対する着火遅れ期間の変化も小さいためである。

負荷率の上昇とともに NO_x 排出量が増加するのは、燃料噴射期間、燃焼期間ともに長くなるのでシリンダ内ガス圧力および温度が高くなり、また高温期間も長くなることによって NO_x 生成が促進されるためである。しかし負荷率が上昇すると主燃焼域が上死点から遠ざかるため、熱発生量に対する NO_x 排出量の増加割合は小さくなる。

3.2 燃料噴射時期遅延による NO_x の低減効果と問題点

Fig. 4 に燃料噴射時期遅延による O₂13%換算 NO_x 濃度

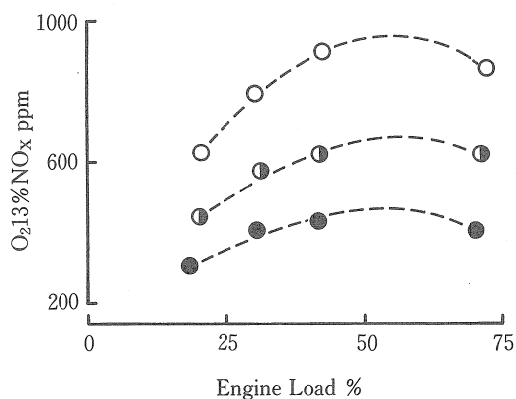


Fig. 4 Change in $O_213\%NO_x$ (ppm) with timing retard.

Notes ○ : Normal timing
◐ : Retarded 3 deg CA
● : Retarded 6 deg CA

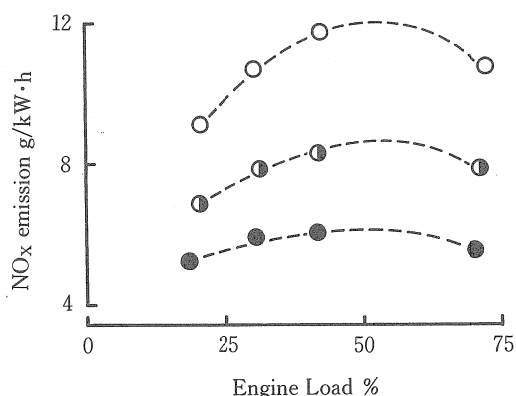


Fig. 5 Change in NO_x emission (g/kW·h) with timing retard.

Note. Symbols are shown in Fig. 4.

(以後これを換算 NO_x 濃度とよぶ)を示す。

この図において、いずれの負荷率においても噴射時期を遅らせるほど換算 NO_x 濃度は低下し、その低下割合は3度遅延で約30%、6度遅延で約50%となっている。また噴射時期に関係なく負荷率の増加とともに換算 NO_x 濃度は上昇し、負荷率55%付近でピークを示した後低下する。

Fig. 5に単位時間・出力当りの NO_x 排出量を示す。この図において、単位時間・出力当り NO_x 排出量は換算 NO_x

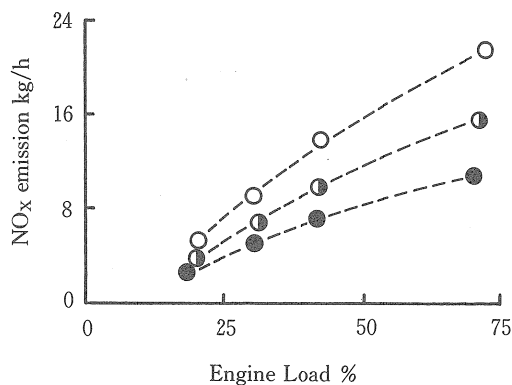


Fig. 6 Change in NO_x emission (kg/h) with timing retard.

Note. Symbols are shown in Fig. 4.

濃度と同様の傾向にあり、噴射時期を3度遅らせると約30%、6度遅らせると約50%低下している。

回転数や出力の異なった機関からの NO_x 排出量の比較を行う場合には、換算 NO_x 濃度や単位時間・出力当りの NO_x 排出量での評価が適当であり、同一機関において使用条件の違いによる大気汚染への影響を考える場合には、機関から排出される NO_x の総量、即ち、単位時間当りの NO_x 排出量の総量で評価することも必要である。

Fig. 6に単位時間当りの NO_x 排出量を示す。この図において、単位時間当りの NO_x 排出量は、換算 NO_x 濃度や単位時間・出力当りの NO_x 排出量と同様に、3度遅延で約30%、6度遅延で約50%減となっている。

しかし換算 NO_x 濃度や単位時間・出力当りの NO_x 排出量は負荷率55%付近でピークを示したが、単位時間当りの NO_x 排出量は負荷率の増加とともに増大している。これは負荷率の増加に伴い機関の過給圧力および燃料消費量が急増し、排気ガス重量が増加するためである。

以上の結果より、航行時の機関回転数において噴射時期を遅らせた場合、換算 NO_x 濃度、単位時間・出力当りの NO_x 排出量および単位時間当りの NO_x 排出量のいずれの評価単位においても、 NO_x 排出量は3度遅延で約30%、6度遅延で約50%減少する。しかしその減少割合は遅延角度の増加とともに小さくなるのがわかる。

以上、燃料噴射時期遅延による NO_x 低減効果について示したが、この遅延が機関の運転状態にどのような影響を及ぼすかについて検討する。

Fig. 7 に燃料噴射時期遅延を行った時の、負荷率と燃料消費率の関係を示す。この図において、実験範囲では遅延角度にかかわらず負荷率を増すと燃料消費率は減少し、常用負荷域付近で最小となっている。また常用負荷域での燃料消費率は、噴射時期を標準より3度遅らせると約3%、6度遅らせると約10%増加している。遅延角度を大きくすると燃料消費率が増加するのは、燃焼時期が上死点から離れるほど排気ガスに失われる熱量が急激に多くなり、線図係数が小さくなるためである。従って、燃料噴射時期遅延角度を大きくすると線図係数の減少割合が大きく、燃料消費率は急増する。

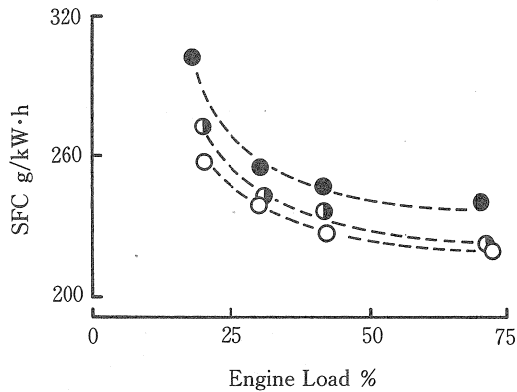


Fig. 7 Change in SFC with timing retard.
Note. Symboles are shown in Fig. 4.

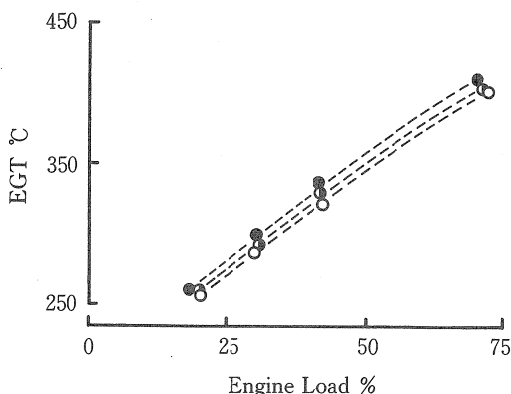


Fig. 8 Change in exhaust gas temp with timing retard.
Note. Symboles are shown in Fig. 4.

Fig. 8 に負荷率と排気ガス温度との関係を示す。なお、この図に示す温度は、2台の過給機入口における排気ガス温度の平均であり、破線は、各噴射時期における排気温度を最小二乗法による2次の近似曲線で表したものである。噴射時期遅延を行うと、各負荷率における排気温度は3度の遅延で約5℃、6度の遅延で約13℃上昇している。排気温度の上昇は、熱負荷の増加や、材質強度の低下を招くため、排気系統や過給機に対して制限値を持つ。従って、標準噴射時期における100%負荷での排気温度を制限値とすると、燃料噴射時期遅延を行うことにより、最大出力の低下をまねく。

Fig. 9 に負荷率と排煙濃度との関係を示す。この図において、排煙濃度は負荷率を増すと各噴射時期ともわずかに減少し、負荷率約40%付近で最小となった後増加している。また遅延角度が大きくなるほど排煙濃度は増加している。

従って、噴射時期遅延角度をある程度以上大きくしても、NO_x 排出量の減少は少なく、排煙による大気汚染を引き起こす原因になることが考えられる。

Fig. 10 に負荷率72%において噴射時期遅延を行った時の指圧線図と、この線図から算出した熱発生率を示す。図より噴射時期を遅らせても熱発生率のパターンにほとんど変化はないが、噴射時期を遅らせるほど燃焼期間が長くなり、後燃え期間が長くなる形跡が見られる。これが排気温度の上昇や排煙温度の増大の原因と思われる。

以上の結果より、燃料噴射時期を遅らせることにより NO_x 排出量は低減できるが、燃料消費率の増大による経

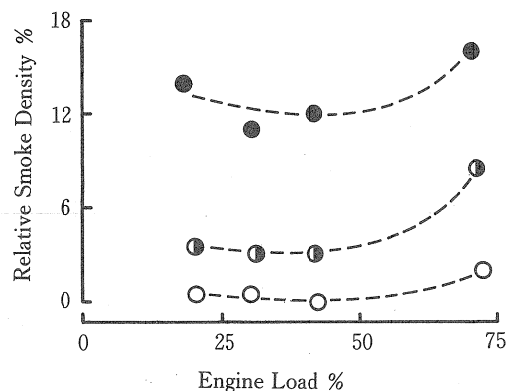


Fig. 9 Change in relative smoke density with timing retard.
Note. Symboles are shown in Fig. 4.

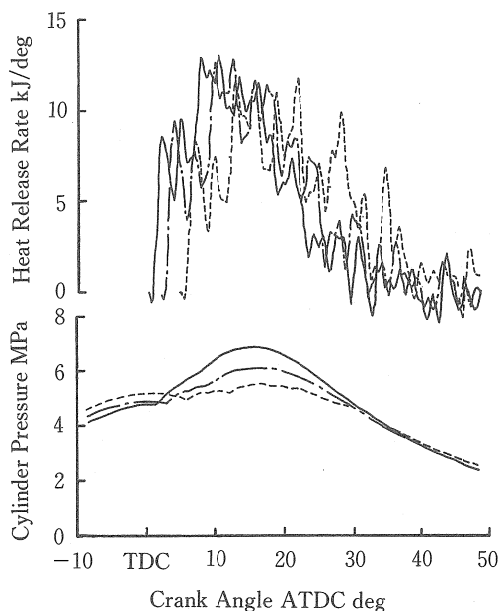


Fig. 10 P-θ diagram and heat release rate at each fuel injection timing.

Notes — Normal timing
 --- Retarded 3 deg CA
 Retarded 6 deg CA

済性悪化や排気温度の上昇による出力制限に加え、排煙濃度の増大による大気汚染が生じる結果となる。従って、これらのマイナス面も考慮した上での遅延角度を決定することにより、NO_x 排出量の低減効果を高めることが可能である。供試船舶における燃料噴射時期の遅延角度は、約3度が適当である。

3.3 船体抵抗の増加が NO_x 排出量に及ぼす影響

供試船舶での燃料噴射時期遅延による NO_x 排出量低減効果、およびその問題点については前述の通りである。一方、航行中の船舶からの NO_x 排出量について考えると、波浪等の外的要因によって船体抵抗が増せば、機関の運転諸元も変化する、NO_x 排出量は増加すると考えられる。これについて検討するため、機関回転数 207 rpm、プロペラ翼角 19度で航行し、各種のデータを採取した。

Fig. 11にデータ採取日の正午位置を、Fig. 12に負荷率と船速の関係を示す。

船舶の航行時における主機出力Pは、近似的には次式で

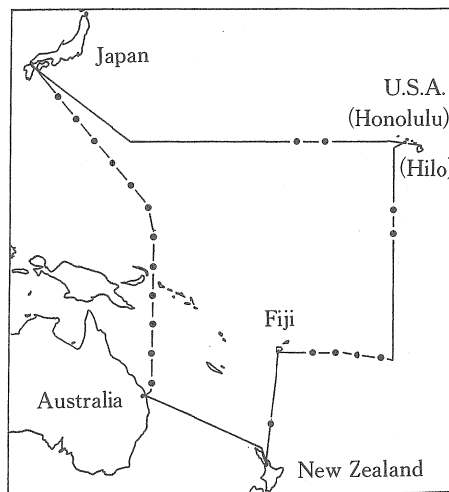


Fig. 11 Measuring point.

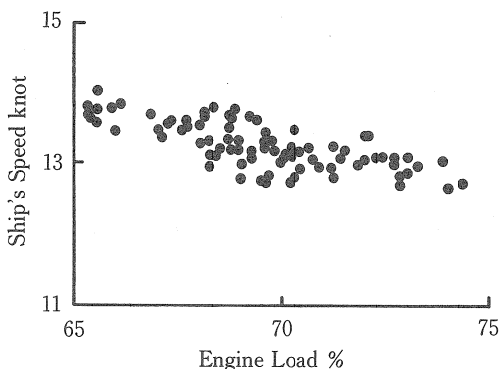


Fig. 12 Relationship between engine load and ship's speed.

表される。

$$P \propto R_t \cdot V \propto W^{2/3} \cdot V^3 \dots\dots\dots(2)$$

この式において、R_tは船体抵抗、Wは排水量、Vは船速である。同一機関回転数・翼角であれば理論的に船速は一定となり、また全航程においてほとんど喫水は変化しなかったため排水量が一定であると仮定すると、式(2)より主機出力も一定となるはずである。しかしFig. 12において、同一機関回転数・翼角であるにもかかわらず負荷率および船速は変化し、負荷率が増すと船速は低下している。この

理由は、次のように考えられる。

主機出力 (\propto 軸出力) は、翼角が一定のとき軸回転数 N (= 機関回転数) および軸トルク T と次の関係がある。

$$P \propto NT \dots\dots\dots(3)$$

船体抵抗が増すとプロペラ負荷が増加するため軸トルクは大きくなる。従って、主機出力が一定であれば式(3)より機関回転数は低下する。しかし供試船舶の機関回転数はガバナー制御されているため、機関回転数が低下すれば燃料噴射量が増し、機関回転数はもとに戻る。従って、燃料噴射量が増すと主機出力は増加する。即ち、船体抵抗が増すと主機出力は増加する。

一方、船速 V は次式で表される。

$$V \propto (1-S)\theta N \dots\dots\dots(4)$$

ここで S はプロペラスリップ、 θ は翼角である。式(4)において、翼角および機関回転数が一定でも、外的要因の影響が大きくなればプロペラスリップが変わるので、船速は変化する。即ち、同一機関回転数・翼角において船体抵抗が増せばガバナーの作動によって負荷率は増加するが、プロペラスリップが大きくなるため船速は低下する。

Fig. 13 に船速と式(1)より算出した単位時間当りの NO_x 排出量の関係を示す。この図より、船体抵抗の増加により船速が低下すると、負荷率が增大するため NO_x 排出量は増す。その割合は、船速が 1 knot 低下した時、約 7% の増加である。

Fig. 14 に船速と単位航行距離当りの NO_x 排出量の関係を示す。前述のように、船体抵抗が増加すると NO_x 排出

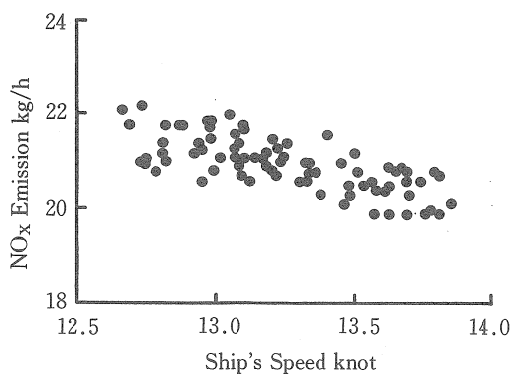


Fig. 13 Relationship between ship's speed and NO_x emission [kg/h].

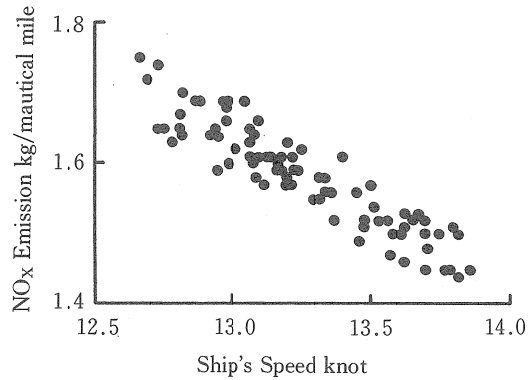


Fig. 14 Relationship between ship's speed and NO_x emission [kg/nautical mile].

量が増大し、さらに船速低下により所要航海時間が長くなるため、単位航行距離当りの NO_x 排出量は増加する。この図より、船体抵抗の増加により船速が 1 knot 低下すると、単位航行距離当りの NO_x 排出量は約 17% 増加する。

これらより、供試船舶においては、同一機関回転数・翼角であっても、船体抵抗が大きくなると主機出力および NO_x 排出量は増加し、船速は低下する。従って、一定船速を維持させようとして負荷率を増すと、単位時間当りの NO_x 排出量および単位航行距離当りの NO_x 排出量はさらに増大する。

4. まとめ

練習船耕洋丸を用いて、船舶から排出される NO_x の低減方法を調べる実験を行い、以下のような結果が得られた。

(1) 通常航行時の回転数における NO_x 排出量は次式により示される。

$$NO_x(\text{kg/h}) = -0.889 \times 10^{-3}(L^2) + 0.377(L) - 0.928$$

ただし NO_x (kg/h) は単位時間当りの NO_x 排出量、 L は負荷率を示す。

- (2) 通常航行時の回転数において燃料噴射時期遅延を行うと、NO_x 排出量は 3 度で約 30%、6 度で約 50% 減少する。
- (3) 燃料噴射時期遅延を行うと NO_x 排出量は低減するが、それに伴う経済性の悪化、最大出力の低下、排煙濃度の増加等を考慮した結果、遅延角度は約 3 度が適当である。
- (4) 同一回転数・翼角において、船体抵抗の増加により船

速が低下すると、船速 1 knot の低下で、単位時間当りの NO_x 排出量は約 7 %、単位航行距離当りの NO_x 排出量は約 17% 増加する。

参 考 文 献

- 1) 壇上裕二：日本海事協会誌，220，40-53(1992).
- 2) 園田憲一・山下尚・中山信義・神社洋一・桜井秀明：
日本船用機関学会第53回(平成6年春季)学術講演会講演予稿集，21-25.
- 3) 西田修身・木内智久・藤田浩嗣・原野亘・安達渉：日本船用機関学会第54回(平成6年秋季)学術講演会講演予稿集，1-4.
- 4) 近藤博美・乾豊・河野高秀・弓場友昭：舶機誌，29-11，798-801(1994).
- 5) 前田和幸・安成幹男・日笠純扶・森下晋一：舶機誌，28-1，31-37(1993).
- 6) G. Reynolds, *The Motor Ship 13th International Marine Propulsion Conference*, London, 1991.