漁船用高速ディーゼル機関のNO_x排出特性*

長谷川 勝 男** 高 橋 秀 行**
小 田 健 一**

NO_x Emission Characteristics of High Speed Diesel Engine for Coastal Fishing Boats.

By Katsuo Hasegawa, Hideyuki Takahashi, Ken'ichi Oda

There are about 150,000 fishing boats which install the diesel engine in Japan. High speed diesel engines are widely used for coastal fishing boats. In this study exhaust gas emissions characteristics such as NO_x, CO and Smoke were examined by means of a high speed diesel engine for fishing boats. These emissions were measured the difference between gas oil and fuel oil A. Moreover, the relation between atmospheric humidity and NO_x concentration was evaluated. Total exhausted NO_x weight from whole fishing boats was calculated by NO_x exhaust coefficient which obtained from this engine. It is presumed that about 136,000 tons in terms of NO₂ of NO_x in a year are exhausted from fishing boats in Japan.

わが国の漁船のうち約15万隻には、ディーゼル機関が搭載されている。特に沿岸小型漁船には、高速機関が広く用いられている。本論においては、漁船用の高速ディーゼル機関を用いて、そのNO_x、CO、スモーク等の排気特性を調べた。燃料として軽油とA重油を用いて燃料の違いによる排気特性への影響及び大気湿度がNO_x排出濃度に与える影響等について検討した。実験から得られたNO_x排出係数をもとに漁船からのNO_x排出総量を計算した。その結果、年間約13.6万トンのNO_xが漁船から排出されるものと推定された。

1. はじめに

諸産業において環境への配慮が共通の課題となっている。漁業においても海洋性の稀少動物保護の観点より混獲防止が叫ばれ、公海での流し網漁業が禁止されるなど環境保護が最優先される状況となりつ

つある。化石燃料などの燃焼による大気汚染は地球規模の問題として取り上げられていることから、船舶においても排出されるNO_xやSO_xなどの大気汚染物資の削減が求められている。船舶では出力100kW以上の機関に排気ガス規制が適用されることが予想されており、ディーゼル機関を搭載する多くの漁船もその対象となるものと考えられる。

沖合や遠洋で操業する漁船では、主機関に中速機関や4サイクル低速機関が使用されているがそれらの隻数の占める割合は僅かである。漁船の大多数を占める10トン以下の沿岸小型漁船では、主機関として高速ディーゼル機関が搭載されている。小型の漁船用高速ディーゼル機関については、NO_x等の排気ガス特性を詳細に検討した報告はほとんど無いのが実状である。ここでは漁船用の高速ディーゼル機関を用いてNO_x、CO、スモークなどの排気ガス特性を調べることにする。燃料として軽油とA重油を用いて、燃料の差異および大気湿度がNO_x排出量に及ぼす影響について検討した。また、NO_x排出量を単位燃料当たりに換算した排出係数をもとに漁船から排出されるNO_x総量を推定した。

*原稿受付 平成8年3月11日

平成7年秋季学術講演(平成7年10月11日)

**正会員 水産庁 水産工学研究所(茨城県鹿島郡波崎町海老台)

図1 動力別漁船の割合

図2 トン数別漁船隻数 (ディーゼル機関搭載船)

2. 漁船機関の動向

図1にわが国の動力別の漁船隻数の内訳を示す。漁業白書によると平成5年に稼働している漁船は無動力船を含めると合計約27万隻であり、ディーゼル機関を搭載した動力船が全体の55%を占めている。船外機船は漁場の近い沿岸の養殖場や採貝藻などの使用に限定され、漁船漁業はディーゼル機関搭載船によって支えられているのが実状である。図2には、ディーゼル機関搭載船のトン数別の漁船隻数の内訳を示す¹⁾。隻数の上では20トン未満の小型漁船が圧倒的多数を占めている。

漁船に搭載可能な機関規模は、漁船法による推進機関の馬力数 (以下漁船法馬力数と略す) を用いて農林水産省が動力漁船の性能の基準で船の大きさ (計画総トン数) に対して規定している。漁船法馬力数は漁船用機関にだけ適用される独自のもので、この馬力数は機関の軸出力を表すものではなく、シリンダ径D、シリンダ数Nと係数Cを用いて次のように計算される値である²⁾。

表1 動力漁船の性能規準の一例

船の大きさ 計画総トン数	搭載できる機関	
	推進機関の馬力数	シリンダ径 (6気筒)
3.9 以下	70 以下	105 mm 以下
4.0～5.9	90 以下	117 mm 以下
6.0～10.0	120 以下	132 mm 以下
11.0～15.0	160 以下	150 mm 以下
16.0～20.0	190 以下	160 mm 以下
21.0～30.0	250 以下	180 mm 以下

図3 漁船主機関の正味平均有効圧

$$\text{漁船法馬力数} = CD^2N \dots\dots\dots (1)$$

動力漁船の性能の基準で規定される計画総トン数と推進機関の馬力数の関係を表1に示す²⁾。実際には船のトン数に対し、搭載可能な機関のシリンダ径の上限が制限されることになる。例えば6気筒機関の場合、5トン船では117mm以下、10トン船では132mm以下となる。従ってこれまで、この規定の枠内で漁船用機関は低燃費化・高出力化がはかられてきた経緯がある。

このような背景のなかで、漁船用機関では非常に多くの機種が市場に供給されている。漁船用に市販されている機関各機種のシリンダ径に対する定格出力時の正味平均有効圧Pmeを図3に示す³⁾。これらのなかには無過給機関や副室式機関でPmeの小さい機関から過給度を上げて高出力化をはかった機関まで様々な型式の機関が含まれている。特にシリンダ径105mmや132mmの機種が多い。

国内の漁業・養殖業向けの燃料油の販売量の推移を図4に示す。沖合・遠洋漁業が衰退傾向にあるな

ど漁業生産活動の停滞を反映し、燃油販売量は減少気味にある。平成5年では軽油とA重油併せて4百万kLである¹⁾。この大部分は漁船機関の燃料として消費されたものと考えられる。

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置 実験装置の概略を図5に示す。機関は、定格出力118kW (160PS)/2500rpmの過給機・空気冷却器付きの4気筒機関である。この機関の6気筒シリーズは、4トン未満の漁船に数多く搭載されている。排ガス測定は排ガス中の水分やススを取り除き、各分析器へ排ガスを導入している。スモークはボッシュ式のスモークメータで測定した。吸気管に設けたオリフィス式流量計から吸入空気量の計測が可能である。また、燃料流量は容積式流量計にて計測した。

3.2 供試燃料 使用した軽油及びA重油の燃料性状を表2に示す。燃料の炭素/水素の原子比は、密度と動粘度から水素分を求めるノモグラフを使用し算出した¹⁾。

3.3 実験条件 機関の運転条件として、船用プロペラ特性の1/8負荷 (15kW/1250rpm) から4/4負荷 (118kW/2500rpm) のもとで排気濃度の計測を行った。また、定格出力時 (118kW/2500rpm) の正味平均有効圧 (Pme=1.30MPa) 一定の条件で機関回転数を変化させた運転モードでも排気濃度の計測を行った。単に航行するだけの船舶に比べ、漁船では曳網時等では長時間にわたり機関が低回転・高負荷で用いられる場合がある。このような漁船機関の特殊性を考慮して、Pme一定の条件の実験も行った。

図4 漁業向け国内燃油販売量の推移

表2 供試燃料油の性状

項 目	軽 油	A 重 油
密 度 15℃ g/cm ³	0.828	0.857
引 火 点 (FM) ℃	60	77
粘 度 50℃ mm ² /s	2.34	2.779
粘 度 30℃ mm ² /s	3.447	4.266
流 動 点 ℃	-17.5	-17.5
10%残油 残留炭素分 質量%	0.02	0.31
硫 黄 分 質量%	0.16	0.8
組成環分析 CP	65.9	57
% CN	20.4	19.9
CA	13.7	23.1
初留温度 ℃	161	184
50% 留出温度 ℃	277.5	287
90% 留出温度 ℃	337.5	350.5
95% 留出温度 ℃	354	366.5
真発熱量 kJ/kg	42,950	42,430
セタン指数	60.5	51
C/H 原子比	0.52	0.56

図5 実験装置及び機関要目

図6 NO_x等の排気ガス濃度

図7 酸素等の排気ガス濃度

4. 結果および考察

4.1 排気ガス濃度 船用特性及びPme一定の条件で、機関回転数に対するNO_x排出濃度、CO排出濃度、スモーク濃度の関係を図6に示す。図6では軽油とA重油について比較している。Pme一定の条件では回転数の低下とともにNO_x濃度は高くなっている。船用特性では2/4負荷でNO_x濃度が最大となっている。軽油に比較してA重油使用時の方が若干NO_x濃度が高くなる傾向にある。なお実験時の大気条件は、軽油使用時では気温23℃湿度10.5g/kg、A重油使用時では気温22℃湿度11g/kgとほぼ同一の条件であり、標準的な大気条件である。

COスモーク濃度は、Pme一定の条件で回転数が低下すると急激に大きくなっている。この運転条件はNO_xの排出濃度も高いことから、この領域での機関の運転は避けるべきであろう。

船舶からのNO_xの排出量は、g/kWhの単位で規制されようとしている。従って、計測したNO_x濃度(ppm)をこの単位系に換算する必要がある。排出されるNO_xの重量を求めるためには、排気ガス量を知る必要がある。排気ガス量を直接計測する代わりに、排気ガス中のO₂濃度、CO₂濃度と燃料消費量を用いて排気ガス量を求めることにする。

まず排気中のH₂O濃度を求める。燃料中の炭素Cと水素Hは全てCO₂とH₂Oに酸化されると仮定し、微少成分のCOやSO₂は無視する。計測したO₂

図8 燃料の炭素／水素原子比

図10 NO_x排出量

図9 吸気量と排気量

濃度とCO₂濃度を用いてH₂O濃度を推定する。各組成をそれぞれO₂, CO₂, H₂Oとすると、吸気と排気の酸素に関する物質収支は(2)式で表される。吸気ガス量に比較して排気ガス量は、燃焼により生成されるH₂O量の半分が加算される。

$$0.21 = (O_2 + CO_2 + 0.5H_2O) \cdot (1 + 0.5H_2O) \quad (2)$$

図7に測定されたO₂濃度とCO₂濃度、および(2)式から求めたH₂O濃度を示す。これらの排出濃度は、軽油とA重油ではほとんど一致しているが、CO₂濃度は僅かであるがA重油の方が高くなっている。定格運転時にはH₂O濃度は6%であることから、排気ガス量は吸気量の1.03倍となる。

排気ガスのCO₂濃度とH₂O濃度から、燃料のC/H原子比を計算した結果を図8に示す。燃料性状か

ら求めたC/H原子比は、軽油で0.52、A重油で0.56であったが、図8からは燃料の違いによる差は認められず、C/H原子比は0.58～0.6の値となった。

4.2 NO_x排出量 (g/kWh) の算出

NO_x排出重量を求めるために、燃料消費量F (kg/h) およびCO₂とH₂Oの排気濃度を用いて次式から排気ガス量G (kmol/h) を求めた。

$$F = (12CO_2 + 2H_2O) G \quad (3)$$

ここで、(3)式右辺の12はCO₂ガス1kmol中の炭素Cの質量(kg)であり、同様に2はH₂Oガス1kmol中の水素Hの質量(kg)を表している。式(3)より計算した排気量とオリフィス式流量計から計測した吸気量の比較を図9に示す。排気量は0.5H₂O濃度だけ吸気量よりも増加することを考慮すれば、(3)式から得られる排気量の精度は高いと判断できる。

NO₂換算でのNO_x排出量は、計測値NO_x(ppm)と機関出力p (kW)を用いて次式から算出できる。なお、(4)式中の46はNO₂ガス1kmolの質量(kg)である。

$$\text{kg/kWh換算NO}_x = 46 \frac{\text{NO}_x}{10^6} \frac{G}{P} \quad (4)$$

図10に換算されたNO_x排出量を示す。定格時の値は約8 g/kWhとなった。IMOで提案されている回転数基準のNO_x排出規制値案では、回転数2000 rpm以上では9.84 g/kWhである。船用E3サイクル⁵⁾に従って、各モードでのNO_x排出量に重み係数をかけて全モード加算してNO_x排出量を計算すると、軽油使用時では8.87 g/kWh、A重油使用時では9.47 g/kWhとなった。いずれも9.84を下回る

図11(a) 計測NO_x濃度と湿度の関係

図11(b) 補正NO_x濃度と湿度の関係

値とはなっている。

4.3 大気湿度のNO_x排出濃度への影響

機関の正味平均有効圧P_{me}=1.30MPaのもとで、回転数1800rpmと2500rpmのときのNO_x濃度と湿度の関係を図11(a)に示す。1800rpm時と2500rpm時ともに湿度の増加に対してNO_x濃度は低下する傾向にある。ディーゼル機関のNO_x濃度は湿度や気温に影響されるとして、計測値を標準状態のNO_x濃度に補正するための補正式がISO7182で提案されている⁵⁾。この補正式より補正したNO_x濃度を図11(b)に示す。軽油2500rpm時ではNO_x濃度はほぼ640ppm一定となり、軽油1800rpm時ではほぼ

図12 NO_x排出係数

1100ppmと一定の値となった。軽油に比較してA重油の方が僅かにNO_x濃度が高いが、A重油はセタン指数が軽油よりも小さく着火性がやや低いことが原因と考えられる。

4.4 漁船からのNO_x排出総量の推定

すでに述べたように漁船はトン数の階層別に搭載できる機関の漁船法馬力数が制限されている。漁業種類や機関搭載経過年数等によって同一シリンダ径の機関でも無過給機関から過給機・空気冷却器を装備した機関まで出力の異なる様々な機種が使用されている。実験で使用した機関は、シリンダ径105mmで3.9トン以下の漁船に搭載されている機関であり、また定格出力時のP_{me}=1.30MPaは現在市販されている漁船機関の平均的な値である。従って、実験機関は沿岸漁船に搭載されている機関を代表するような型式であり、実験から得たデータを用いて漁船全体のNO_x排出総量を推定しても大きな誤差はないものと考えられる。図10のNO_x排出量を単位燃料使用量当たり換算したNO_x排出係数を図12に示す。運転条件によってNO_x排出係数は30から45の間の値となっている。平均的な値としてここではNO_x排出係数40 g/kg-fuelを採用する。

図4で示したように、漁業向け国内燃油販売量はA重油と軽油を併せて、平成5年ではほぼ400万kLである。その内訳は7割以上をA重油が占めることから、燃油密度0.85で重量換算すると燃油使用量は340万トン/年となる。

従って漁船からのNO_x排出総量は、0.04 (kg/kg-fuel) × 3.4 × 10⁹ (kg-fuel/year) を計算すれば、年間13.6万トンとなる。日本沿岸における漁船

を除く船舶からのNO_x排出量は32万トンと云われており⁶⁾、この数値と比較しても漁船からの排出量の占める割合は無視できないと考えられる。

5. あとがき

漁船用の高速ディーゼル機関を用いて、NO_x排出量についてその算出法も含めて検討した。結論を以下に要約する。

(1) 本論では排気ガス中の酸素濃度、二酸化炭素濃度と燃料消費量の3つの計測値を用いて排気ガス量の算出を試みた。最終的に計算されるNO_x排出重量はこれらの計測精度に依存する。

(2) 本機関のNO_x排出量はIMOの規制値案をかりうじてクリアーする値であった。

(3) 軽油使用時とA重油使用時を比較すると、NO_x排出濃度、NO_x排出係数ともに僅かであるがA重油使用時の方が大きくなった。

(4) NO_x排出濃度は大気条件、特に湿度の影響

が大きい。大気基準状態へのISOの補正式は高速機関に対しても妥当であった。

(5) わが国の漁船からのNO_x排出総量は年間13.6万トンと推定された。

参考文献

- 1) 平成6年度版漁業白書，農林統計協会
- 2) 水産庁：漁船法による推進機関の馬力数，p. 1 - 5 (1993)
- 3) 小田健一：漁船機関データベースとその使用法，漁船，308，p. 22-29 (1993)
- 4) 小川勝：石油製品の密度と動粘度からの他性能の換算，漁船機関，794，p. 40 (1992)
- 5) 塩出敬二郎：船用機関の排ガス計測，第38回特別基金講演会講演予稿集，舶機学会，p. 64 (1995)
- 6) 平田賢：船舶からの大気汚染物質排出抑制の動向，船舶大気汚染抑制検討委員会の成果報告予稿集，舶機学会，p. 3 (1995)