中速発電用ディーゼル機関のNO_x排出 に及ぼす燃料着火性の影響*

増田 和彦** 近藤 博美**
河野 高秀**

Effect of Fuel Ignition Quality on NO_x Emission
from Generating Medium Speed Diesel Engine

By Kazuhiko Masuda, Hiromi Kondoh, Takahide Kawano

This paper refers to the influences of variation factors in respect to NO_x emissions from medium speed power generating diesel engines. The level of NO_x emission from such an engine is liable to be influenced by airborne moisture and the ignitability of fuels. To clarify the influence of fuel ignitability among all relevant factors, upon NO_x emission, combustion testing was conducted on a single-cylinder engine using fuels of different cetane indexes. On the basis of this testing, the results revealed that at the combustion test for certification of compliance of marine diesel NO_x emission, the influence of fuel ignitability in NO_x emission is not negligible.

1. ま え が き

船舶用機関による大気汚染とその防止技術の動向は、近年の大気環境の悪化にともない、非常に注目されてきている。1988年2月、国際海事機関（IMO）の下部組織である、第26回海洋環境保護委員会（MEPC）において、船舶から排出される窒素酸化物（NO_x）が、大気汚染の要因になっている状況をノルウェーが報告した。その後、今日まで、MEPCでは、船舶用ディーゼル機関からのNO_x排出規制について、継続的に議論を重ねて、2000年1月1日以降に建造される船舶に搭載する出力130kW以上の機関について規制¹⁾することを、1997年9月に採択した。また、ディーゼル機関の認証を受ける際のNO_xの計測方法、計算方法、およびテストサイクル等についても指定される。

ディーゼル機関から排出されるNO_xは、その燃

焼室内において、高压で噴射された燃料噴霧が空気との混合・蒸発・燃焼の過程の空間的・時間的な履歴に基づいて生成される。このため燃焼に関わる燃料性状と、空気中の水分などによって、ディーゼル機関から排出するNO_x値が変動する。さらに、機関運転時の負荷、回転数などの諸条件によってもNO_x排出値が変化する。船舶では、種々の燃料が用いられることが多く、また、陸上試験での燃焼試験で使われる燃料油の密度、セタン指数などの特性も異なっている。このような中で、ディーゼル機関からの排気ガスの排出特性を知ることが重要で、特に、燃料油性状が、NO_x排出率に与える影響を把握することは急務である。

本研究では、機関の検査および認証を受ける際の、陸上試験で使用する燃料油の着火性が、NO_x排出率に及ぼす影響について明らかにした。供試機関として中速小形単気筒ディーゼル機関を用い、セタン指数の異なる5種類の燃料油を用いた燃焼試験および解析結果を報告する。

*原稿受付 平成10年12月4日

**正会員 ダイハツディーゼル株式会社（守山市古高町字松塚
808番地の2）

2. NOx排出率の計算

NOx排出率は、IMOのテクニカルコード¹⁾に基づいて算出した。図1にNOx排出率の計算フローを示す。実測NOx濃度(ppm)は、ドライベースからウェットベースへの換算および絶対湿度、室温、給気温度の周囲条件による影響について補正する。補正されたNOx濃度は、単位がppmからg/hの質量流量に換算される。この換算には、機関の排気ガス流量が必要となる。排気ガス流量は、流量計で直接計測する方法、または、カーボンバランス法や酸素バランス法などの計算により求める方法がある。本解析では、IMOテクニカルコードに記載されているカーボンバランス法により排気ガス流量を求めた。表1に、ISO-8178に準拠したテストサイクルと、NOx排出率の計算方法を示す。NOx質量流量は、各テストサイクルの、機関の各運転モードの各運転負荷での重み係数が加味され、NOx排出率(g/kWh)に換算される。各運転負荷の重み係数は、機関の運転条件によって異なり、主機関(E2, E3テストサイクル)では、75%の高負荷において重み係数は0.5である。それに比べて、発電機(D2テストサイクル)では、50%と25%の中低負荷域において、それぞれ0.3の重み係数が

図1 NOx計算フロー

表1 テストサイクルとNOx排出率計算式

定回転主推進機					
E 2 テストサイクル	速 度	100%	100%	100%	100%
	出 力	100%	75%	50%	25%
	重み係数	0.2	0.5	0.15	0.15
補機機関					
D 2 テストサイクル	速 度	100%	100%	100%	100%
	出 力	100%	75%	50%	25%
	重み係数	0.05	0.25	0.3	0.3
プロペラ則に従う主推進機および補機機関					
E 3 テストサイクル	速 度	100%	91%	80%	63%
	出 力	100%	75%	50%	25%
	重み係数	0.2	0.5	0.15	0.15

$$\text{NOx 排出率} = \frac{\sum \text{gas-mass}(i) \cdot \text{WF}(i)}{\sum \text{P}(i) \cdot \text{WF}(i)} \quad (\text{g/kWh})$$

gas-mass(i) : NOx質量流量 (g/h)
WF(i) : NOx値重み係数
P(i) : 機関出力 (kW)

図2 IMO NOx排出率規制値

配分される。尚、本試験で用いた単気筒機関は、同型の商用6気筒機関と比較して機械損失が大きいため、同様の運転条件であっても、機関出力は若干低い。本解析では、NOx排出率の算出には、6気筒機関相当の機関出力値を用いた。図2に、NOx規制値を示す。規制値は、機関の定格回転数をnとした場合、下記の様に表される。

$n < 130 \text{ min}^{-1}$ で、 17.0g/kWh
 $130 \leq n < 2000 \text{ min}^{-1}$ で、 $45 \times n^{-0.2} \text{ g/kWh}$
 $n \geq 2000 \text{ min}^{-1}$ で、 9.8g/kWh

3. 実験装置及び方法

3.1 供試機関 燃焼試験に用いた機関は、シリンダ内径200mm、行程長300mmの単気筒4サ

図3 供試機関外観

表2 機関主要目

気筒数		
シリンダ径	mm	200
ピストン行程	mm	300
回転数	min^{-1}	900
出力	kW	160
ピストン		皿形
圧縮比		13.4
燃料噴射ポンプ	MPa	MAX150
燃料噴射弁孔径	mm	0.32
燃料噴射弁孔数		10
給気方式		スクルーコンプレッサ

イクル直接噴射式中速小形ディーゼル機関（SCEダイハツディーゼル製）である。この機関の外観を図3に、主要目を、表2に示す。給気圧力は、機関と独立したコンプレッサで圧縮され、減圧弁を調整することにより、燃料噴射量と独立に任意に設定できる。機関に入る給気の絶対湿度は、3～5g/kg程度である。また、給気温度は、空気加熱器を制御することにより、任意に設定することができる。

燃料噴射量と給気圧力の設定条件は、本試験で用いた機関と同型の過給機付6気筒商用機関相当に設定した。定格回転数は 900min^{-1} 、出力は1気筒あたり160kW相当である。標準的な燃料を用いた場合の気筒内最高燃焼圧力は約16MPaである。図4は、各設定負荷における燃料噴射量、給気圧力、給気温度および気筒内最高燃焼圧力について示している。上記の設定条件で、D2テストサイクルにおける商用機関の排出NOx値は、IMOのNOx規制値の11.5g/kWh程度である。

図4 供試機関の機関性能

3.2 供試燃料油 本試験では、セタン指数36～58の燃料A、B、C、D、Eの5種類を用いた。燃料A～Dはセタン指数36～58のA重油である。燃料Eはセタン指数56の軽油である。また、セタン指数49の燃料Cは、ディーゼル機関の燃料として用いられる標準的なものである。これら試験に用いた燃料油の性状を、表3に示す。

3.3 測定装置 機関各部の圧力、温度および流量は、各計測箇所に取付けられたセンサおよび流量計によって検出され、コンピュータに取込まれる。NOx濃度は非分散型赤外線分析計、O₂濃度は磁気圧力式の排気ガス分析計（㈱堀場製作所製 ENDA-1400）を用いて計測した。

表3 供試燃料の性状

燃料種類	A重油				軽油
	A	B	C	D	E
密度 g/cm^3 (15°C)	0.8950	0.8845	0.8567	0.8366	0.8334
動粘度 mm^2/s (50°C)	2.938	2.816	2.301	2.432	2.172
硫黄分 mass%	0.12	0.29	0.69	0.20	0.20
蒸留性状 °C (50%留出温度)	281.0	285.5	279.0	282.0	267.5
真発熱量 MJ/kg	42.20	42.24	42.45	42.87	42.91
セタン指数	36.0	40.5	49.0	58.0	55.5
窒素分 mass%	0.01	0.02	0.01	0.01	0.003

燃焼モードについては、気筒内圧力をピエゾ型センサで、燃料高压管内の燃料噴射圧力と燃料噴射弁の針弁リフト量を歪ゲージで検出し、燃焼解析装置（小野測器(株)製 CB-466）を用いて、100サイクル分を計測し、解析を行った。燃焼圧力の解析には、気筒内圧力の脈動波形を平滑化処理したものをを用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 陸上試験における燃料の性状 工場においてディーゼル機関の試験に使用される燃料の性状を調べるため、1996年6月～1997年5月までの1年間、1回/週、ダイハツディーゼル守山工場のコージェネ用エンジンの燃料濾器より燃料油を採取し、性状分析をおこなった。サンプル数は49である。図5に、採取した燃料油のセタン指数のヒストグラムを示す。全試料油の約8割は、セタン指数が45～49程度であり、全体的にこの付近がピークとなっている。燃料セタン指数の分布範囲は、40～50程度である。ダイハツディーゼル守山工場においては、商用機関の出荷検査において、機関の白煙、起動性等を考慮し、できるだけセタン指数45以上の燃料を入荷するように配慮している。しかし、全試料数の約2割は、セタン指数が45未満であった。そして、セタン指数41以下の低いものが、若干入ってきている。

図6は、コージェネ用ディーゼル機関(CGE)で採

図5 燃料セタン指数ヒストグラム

取した燃料油と、供試機関(SCE)で用いた5種類の燃料油について、着火性の尺度としてよく用いられるセタン指数とCCAIとの相関を示している。

表4に、セタン指数とCCAIの計算式²⁾について示す。

セタン指数が46程度で、CCAIは約830～840の範囲でばらつきを示すが、全体的には高い相関性

図6 燃料セタン指数とCCAI

表4 燃料セタン指数とCCAI計算式

燃料セタン指数 CCI 計算式

$$CCI = 0.49083 + 1.06577(X) - 0.0010552(X)^2$$

$$X = 97.833(\log A)^2 + 2.2088B \log A + 0.01247B^2 - 423.51 \log A - 4.7808B + 419.59$$

$$A: 9/5 \cdot \{101.3 \text{ kPa での } 50\% \text{ 留出温度 } (^\circ\text{C})\} + 32$$

$$B: \text{API 度 (比重)}$$

CCAI 計算式²⁾

$$CCAI = D - 140.7 \log_{10} \log_{10}(V+C) - A$$

$$D: \text{燃料密度 } (15^\circ\text{C}) \text{ kg/m}^3$$

$$V: \text{動粘度 } (50^\circ\text{C}) \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$C: 0.3 \text{ (MDF)}$$

$$A: 80.6$$

図7 燃料密度とセタン指数

を示していることがわかる。また、燃料密度とセタン指数の相関を図7に示す。燃料密度に対してセタン指数は、全体的に相関性はみられるが、比較的ばらつきは大きく、0.87g/cm³程度の燃料密度では、セタン指数は約41～47の範囲でばらつきがみられる。

4.2 燃料のセタン指数によるNO_x濃度の変化 図8に、供試機関を用いた燃焼試験を、燃料をA～Eと変更させて行った場合の、NO_x濃度の13%酸素濃度換算値であるNO_x13値の変化率を示す。横軸は燃料セタン指数、縦軸は、標準的な

図8 セタン指数と比NO_x13

燃料CでのNO_x13値を基準とした場合の、各燃料におけるNO_x13の相対排出率を示す。機関負荷50～100%の中高負荷域においては、セタン指数41の燃料BのNO_x13は、燃料Cと比較して、約7～8%増加する。セタン指数36の燃料Aでは、約13～18%増加する。機関負荷10～25%の低負荷域においては、燃料Cと比較して、燃料Bで約19～26%増加する。燃料Aで約35～43%増加する。低セタン指数である燃料A、BのNO_x13は、燃料C、D、Eと比較すると、著しく増大する。

4.3 着火および燃焼特性 図9と図10に、機関負荷がそれぞれ100%と25%のときの、燃料A、

図9 燃料油種の違いによる熱発生率の比較 (機関負荷率：100%)

図10 燃料油種の違いによる熱発生率の比較 (機関負荷率：25%)

C, Dにおけるクランク角度ごとの熱発生率を示す。機関負荷100%において、燃料の種類による熱発生率の波形は、セタン指数の低下にともない、燃焼初期における予混合燃焼のピークがわずかに大きくなっている。しかし、燃焼初期における熱発生率の波形の立上がり時期や拡散燃焼領域における熱発生率の波形は、燃料油種の違いによる変化がほとんど見られない。負荷25%においては、セタン指数の低下にともない、燃焼初期における波形の立上がり時期は遅れ、予混合燃焼のピークおよび領域が急激に大きくなり、拡散燃焼領域は小さくなってきている。

図11に、燃料噴射弁の針弁リフト波形の立上がり時期から熱発生率波形の立上がり時期までの時間を着火遅れ時間とした場合の、各燃料油における着火遅れ時間を機関負荷について示す。横軸はセタン指数を、縦軸は着火遅れ時間を示す。機関負荷100%および75%の高負荷域においては、各燃料の着火遅れ時間は約0.7msecで、セタン指数の相違による着火遅れ時間の変化はほとんど見られない。機関負荷50%においては、燃料E, Dで着火遅れ時間は約0.7msecで最も短く、燃料C→B→Aとセタン指数の低下とともに長くなり、燃料Aにおいて着火遅れ時間は約1.2msecである。機関負荷25%と10%において、燃料Dで着火遅れ時間は約1.1msecで最も短く、燃料D→C→B→Aとセタン指数の低下にともない長くなり、燃料Aでは、負荷25%で約1.7msec、負荷10%で約1.8msecである。機関負荷率にともない、着火性の低い低セタン指数の燃料油の燃焼は、高セタン指数のものに比べて、より着火遅れ時間が増大するために予混

図11 セタン指数と着火遅れの関係

図12 燃料油種の違いによる気筒内燃焼圧力変化の比較 (機関負荷率：100%)

図13 燃料油種の違いによる気筒内燃焼圧力変化の比較 (機関負荷率：25%)

合燃焼量が大きくなり、NO_x増加の要因となることが考えられる。

図12と図13に、機関負荷がそれぞれ100%と25%のときの、燃料A, C, Dにおけるクランク角度ごとの気筒内燃焼圧力Pcombの変化を示す。機関負荷100%において、ピーク値は、燃料Cで約15.5MPaであり、燃料D→C→Aとセタン指数低下にともない、0.2MPaずつ増大する。それぞれの波形は、大きな変化は見られない。機関負荷25%の場合には、燃焼圧の最大値は、燃料C, Dで約6.7MPaである。燃料Aのピーク値は、燃料C, Dのピーク値と比較して、約0.5MPa増加する。また、燃料D→C→Aとセタン指数低下にともない、燃焼初期圧力の立上がり時期が遅くなり、Pcombが最大値に達するまでの勾配が急激になる。特に、燃料C→Aにおいて、この傾向は顕著である。

4.4 発電機および主機モードにおけるNO_x排出率 図14に、カーボンバランス法で計算したD2, E2テストサイクルのNO_x排出率について

図14 セタン指数と比NOx排出率の関係

示す。横軸はセタン指数を、縦軸は標準燃料CのD2テストサイクルでのNOx排出率を基準とした場合の、各燃料におけるNOx排出率の比較値を示している。D2において、NOx排出率は、燃料Bで約3%、燃料Aで約12%増加する。また、E2においては、燃料Bで約1%、燃料Aで約8%増加する。E2よりもD2がセタン指数の低下にともなうNOx排出率の増加割合は大きい。これは、D2の低負荷におけるNOx排出率の重み係数が大きいためである。

5. む す び

単気筒中速小形ディーゼル機関を用い、セタン指数が異なる5種類の燃料油について燃焼試験を行った。本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) セタン指数が40以下になると、NOx値は著しく増大する。低負荷になるほど、その増加傾向は顕著である。
- (2) 燃料のセタン指数が低下しても、高負荷運転域では、燃料の着火遅れの変化はみられない。一方、低負荷運転域においては、着火遅れが長くなり、予混合燃焼量が増大する。
- (3) 燃料セタン指数が低下する場合、中低負荷における重み係数の大きいD2テストサイクルのNOx排出率は、E2のそれよりも増加傾向にある。

上記の結果より、ディーゼル機関の検査および認証試験に際し、陸上試験時の燃料油セタン指数の選定に際して、十分な留意が必要である。

おわりに、本研究は、競艇公益資金による日本財団の補助金を受けて、(社)日本舶用工業会と共同で実施した。

本研究を実施するにあたり、お世話になった関係各位に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) IMO, "TECHNICAL CODE ON CONTROL OF EMISSION OF NITROGEN OXIDES FROM MARINE DIESEL ENGINES", (October 1997), 12-22, 37-41, 76-79.
- 2) 淡井ほか2名, 陸舶中・大型ディーゼル機関用燃料油, (平成6年), 167, 山海堂.