

船用ディーゼル機関の排出ガス特性の把握

川原 秀夫* 山口 伸弥* 砂田 智裕**

Grasp of Exhaust Gas Characteristic of Marine Diesel Engine

Hideo KAWAHARA, Shinya YAMAGUCHI and Tomohiro SUNADA

Abstract

Recently, it is concerned with the problem of environmental pollution in the world, and the prevention of exhaust emission is enforcing day by day. The air pollution from vessel is also no exception. The regulation for pollution materials in the exhaust emission from the marine diesel engine will be enforced a few years after. The diesel engine has the high thermal efficiency and can be powered by the various fuels. However diesel, the contents of exhaust gas from diesel engine (Soot dust, NO_x, SO_x and other toxic substances) cause to the air pollution. The grasp of the exhaust gas characteristics in various operating conditions is important for the development of the exhaust gas purification technology of diesel engines. In this paper, the grasp of the exhaust gas characteristics of the diesel engine is examined. As a result, CO₂ and NO_x in change of load showed the changing trend generally known, and the influence on the PM measurement value by using opacity meter is clarified.

Key words: Diesel engine, Exhaust gas, NO_x, CO₂, PM measurement, Opacity meter

1. 緒言

高まる環境問題への取り組みの中、各種内燃機関の排出ガスによる大気汚染は地球環境に大きな影響を及ぼしている。さらに石油価格の上昇、枯渇問題が深刻となっており、再生可能エネルギーのような新しいエネルギーが重要視されている^[1]。

一方、ディーゼル機関の改良は、動力性能の向上は当然のことながら、エンジンから排出される粒子状物質 (PM : Particulate Matters) など有害物質の低減技術が求められている。そのため、エンジンの運転条件に対して排出ガス特性を把握することが重要である。排出ガスに含まれる PM の計測手段として、部分的に気化不十分となった燃料粒が火炎に曝され分離した炭素である Soot、未燃焼の燃料やオイルなど有機溶剤可溶成分 (SOF : Soluble Organic Fraction)、硫酸化物 (Sulfate) を分離し、それぞれの量を分析する方法がある。しかし、この方法は、操作に慣熟を必要とする大規模な設備が必要で

ある^[2-4]。

一方、従来からディーゼル機関の排出ガスによるフィルター汚染度で PM 排出量を判断するフィルター重量法が使用されている。このフィルターの汚染度は、主に PM に含まれる Soot による着色に依存している。しかし、近年のディーゼル車に対する排出ガス規制の強化とそれに伴う排出ガス低減技術の向上により、最新技術が導入されたディーゼル車から排出される PM および PM に含まれる Soot は微量であり、相対的に PM 中の SOF の割合が増加する傾向にある。これに対しフィルター重量法は、微量な PM や SOF の計測が困難であるとされている。そこで現在では、微量な PM の計測が可能であるとして、光透過式スモークメータ (オパシメータ) が導入されている。オパシメータは光を直接排出ガスに照射し、吸収、散乱される光の強度から PM 排出量を計測する。これらフィルター重量法およびオパシメータは超微量 PM 分析装置と比較すると、PM

に含まれる各成分の分離計測はできないものの操作が容易である。

本研究では、船用ディーゼル機関の排出ガスである二酸化炭素 (CO₂)、窒素酸化物 (NO_x) およびオパシメータを用いて PM 排出量を計測し、運転条件における排出ガス特性を明らかにする。また、PM 計測においては、フィルター重量法およびオパシメータが示す PM 検出傾向を確認し、オパシメータが簡易的な排出ガス特性の把握方法として有効であるか検討する。

2. 実験装置および方法

2. 1 実験装置

供試機関は、図1に示す排気タービン過給機付き4サイクル中速ディーゼル機関(松井鉄工所、MU323DSC型)である。主要目を表1に示す。実験は負荷率25、50、75% (正味平均有効圧ではそれぞれ0.39、0.78、1.16MPaに相当する)の船用特性(プロペラ特性)で行った。表2は実験用機関の運転条件を示す。図2はその測定システムを示す。排出ガスは排気管からプローブで直接抽出する。排出

ガスである CO₂および NO_x は、電気式ガスセンサーを使ったポータブル燃焼排ガス分析計 (TESTO testo350) で計測を行い、さらに PM は、オパシメータ (AVL DiSmoke4800) で計測した。これらの計測装置を使った排出ガス特性は、連続計測が可能であるが、実験条件を設定した後、計測開始後数値が安定したところのデータを採取した。燃料は A 重油を使用し、その性状を表3に示す。燃料消費量は、電子式燃料消費計 (城西システム、FC-9531) を用いてサンプリング時間 1 s での瞬時計測及びある一定時間における積算値から算出した。

表1 供試機関の主要目

メーカー及び型式	マツイ MU323DSC
名称	立形4サイクル過給機付きディーゼル機関
シリンダ数	3
シリンダ内径	230mm
ピストン行程	380mm
定格出力	257kW
定格回転数	420rpm
正味平均有効圧	1.55MPa



図1 供試機関

表2 供試機関の運転条件

運転特性	負荷率 (%)	25	50	75
船用特性	出力 (kW)	64	129	193
	回転速度 (rpm)	265	333	382

表3 燃料油の性状

油種	A 重油
密度 (15℃) g/cm ³	0.8814
反応試験	中性
引火点 ℃	69.0
動粘度 (50℃) mm ² /s	2.64
流動点 ℃	-20.0
残留炭素分 (10%残油) 質量%	0.44
灰分 質量%	0.01 以下
硫黄分 質量%	0.61
水分 容量%	0.05 以下
総発熱量 MJ/kg	44.84
セタン指数	41

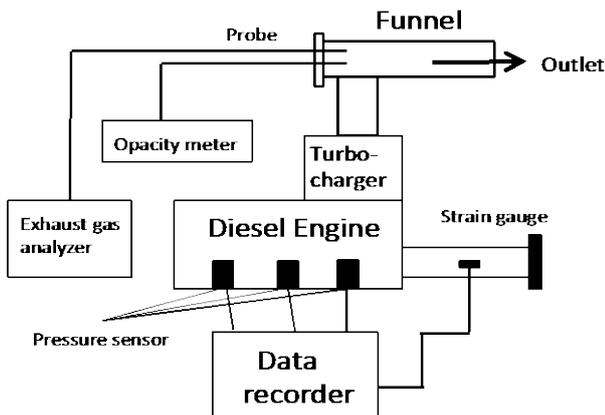


図2 測定システム

2. 2 オパシメータ

光を使ったスモークメータには、大別して、フィルター上に捕集した PM に光を照射して反射率の変化から煙濃度を測定する光反射式、直接排ガスに光を照射して、吸収・散乱する光の強度から煙濃度を測定する光透過式の 2 種類がある。このオパシメータは光透過式を採用している。図 3 は、オパシメータの原理図を示す。測定セルに導かれる排ガス中に、燃料の高温燃焼により生じる黒煙、未燃オイル／未燃燃料・水分からなる青煙、白煙などが含まれると光源からの可視光はそれらにより吸収・散乱を受けて減衰する。この減衰量を Lambert-Beer の法則（式（1））に当てはめて煙濃度を算出する。なお、結果は式（2）でオパシメータ N（%）、式（3）は吸光係数 k（m⁻¹）で表す。

$$I = I_0 \cdot e^{-kL} = I_0 \cdot (1 - N/100) \quad (1)$$

$$N = (1 - I/I_0) \cdot 100 \quad (2)$$

$$k = -1/L \cdot \ln(1 - N/100) \quad (3)$$

I_0 : スモークが無い時の光強度 (cd/m²)

I : スモークが流れている時の光強度 (cd/m²)

L : セル長 (m)

今回使用したオパシメータは排気圧力を利用したサンプリング方法を採用している。この方式は、特別なサンプリングポンプが不要で、変動しやすい排ガスを安定に採取できる特長を有している。

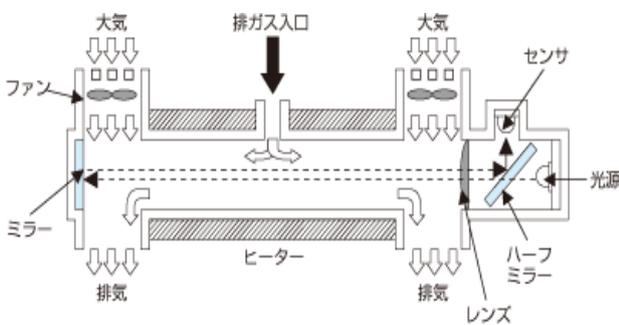


図 3 オパシメータの原理図

3. 実験結果

船用ディーゼル機関の排ガ斯特性を検討する前に供試機関の運転性能を押えておく必要がある。図 4 は供試機関のエンジン負荷と燃料消費率の関係を示す。なお、燃料の密度は、温度換算による補正を行

い、燃料消費率を算出した。燃料消費率は、負荷の増加に伴い急激に減少し、負荷 50% で 165g/PSh を示し、その後、負荷の増加に伴い上昇傾向に転じている。これらの変化傾向は、一般的なディーゼル機関の負荷に対する燃料消費率の変化と同様な傾向である。

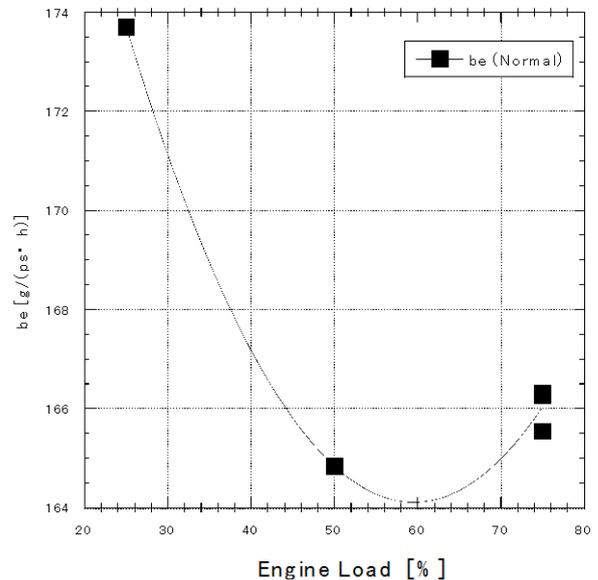


図 4 エンジン負荷と燃料消費率の関係

図 5 はエンジン負荷と排ガス温度の関係を示す。なお、図中には No.1 から No.3 シリンダの排ガス温度を併記した。全体的な傾向として、負荷の増加に伴い排ガス温度はほぼ直線的に変化しており、負荷 25% から 75% の間で約 150°C 温度上昇していることがわかる。今回の実験では各シリンダ毎で温度のバラツキが現れており、特に No.2 シリンダの排ガス温度は他のシリンダに比べてどの負荷においても約 50°C 高い値を示している。この温度変化の違いは、シリンダ毎の燃料噴射のタイミングのバラツキ、あるいはインジェクタの汚れ等の調整不良が原因だと思われる。

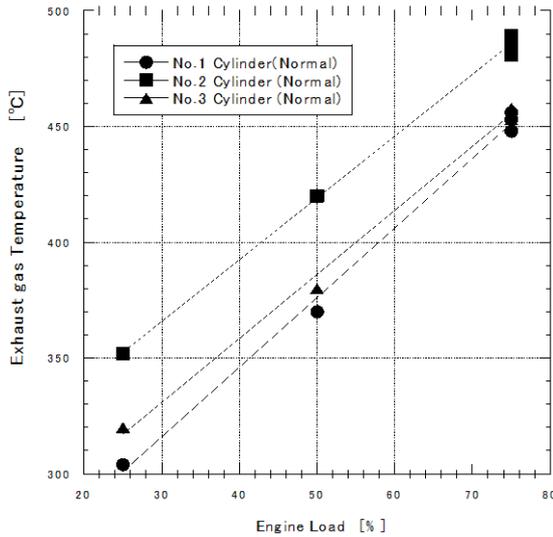


図5 エンジン負荷と各シリンダの排ガス温度の関係

図6はエンジン負荷とCO₂、NO_xの関係を示す。まずCO₂は負荷の増加に伴い、増加傾向であるが負荷50%から75%の間では大きな変化は示していない。全体的に5%から8%の範囲で変動している。一方NO_xは、負荷の増加に伴い、1000ppmから1200ppmの間でほぼ直線的に増加している。これは、図5に示したように排ガス温度は負荷の増加に伴い上昇傾向にあったことから、NO_x生成のメカニズムであるサーマルNO_xが支配的になったことによる影響と考えられる。

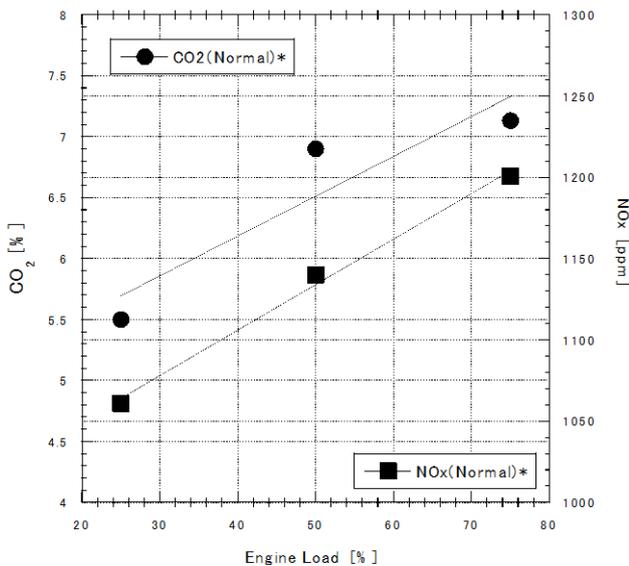


図6 エンジン負荷とCO₂、NO_xの関係

図7は、エンジン負荷とPM排出量の関係を示す。なお、図中には比較を行うため、以前実施したフィルター重量法による計測値⁵⁾も併記した。このフィ

ルター重量法とは、希釈トンネル内で生成したPMをフィルターに採取し、採取していない状態のフィルター重量と、採取後のPMを含むフィルター重量の差分によりPM重量を精密天秤を用いて計測するものである。一般的に低負荷から高負荷に変化させると、供給燃料の増加により空気過剰率が低下するため、局所的に不完全燃焼が発生し、PM発生量は増加する。図に示すように計測されたPM値は、図4に示したエンジン負荷と燃料消費率の変化に対応しており、負荷50%を境に急激に上昇しているのがわかる。またオパシメータによる透過率の変化傾向は、フィルター重量法によるPM値の変化傾向と非常に良く類似している。以上のことから、簡易的で連続計測が可能であるオパシメータによるPM値はほぼ妥当であることが確認された。

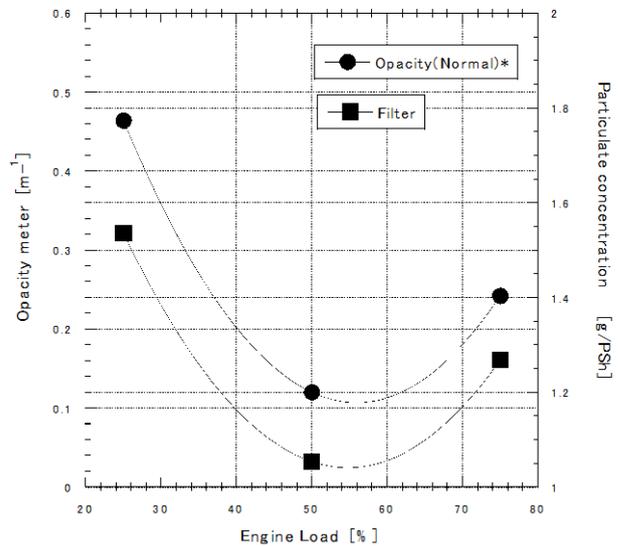


図7 エンジン負荷とPM排出量の関係

最後に、ディーゼル機関の排出ガスの中で特に低減が求められているのがNO_xとPMである。ただし、NO_xとPMはトレードオフの関係にあることが、同時低減を困難な課題としている。その理由は、ディーゼル機関はピストンにより圧縮された高温、高圧の場に燃料を噴射し、蒸発した燃料が周囲の空気と混合した後、自着火することによって動力を得るが、この際に筒内の燃料蒸気と周囲ガスの混合状態が排出ガス成分の生成に大きく寄与するため、十分に混合が進まずに局所的に燃料が過濃となる領域ではPMが多量に生成されるからである。図8は、今回の実験条件で得られたNO_xと燃料消費率の関係を整理したものである。図に示すように、NO_xと燃料消費率の関係は多少のバラツキはあるが右下がりの傾向であり、NO_xの削減と燃料消費率の増加にもトレ

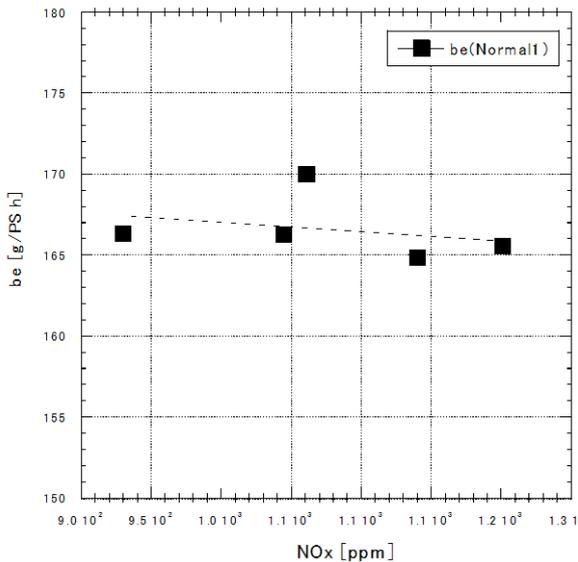


図8 NO_xと燃料消費率の関係

ードオフの関係があることがわかる。燃料消費率の悪化を押えて、NO_xの削減を達成するためには、従来の燃焼システムの改良又は異なるシステムが必要となることが推定される。

4. 結論

これまで本校であまり実施されていなかった船用ディーゼル機関の排出ガスである二酸化炭素(CO₂)、窒素酸化物(NO_x)およびオパシメータによるPM排出量計測を行い、運転条件における排出ガス特性について検討した結果、以下の点が明らかになった。

- (1) エンジン負荷に対するCO₂の変化は、大きな変化は観察されなかったが、NO_xはエンジン負荷の上昇に伴い直線的に増加し、この変化傾向はエンジン負荷に対する排ガス温度の変化に対応している。
- (2) エンジン負荷に対するPM値の変化は、エンジン負荷における燃焼消費率の変化に対応している。また、今回の実験で使用したオパシメータによる値は、従来から使用されているフィルター重量法による値とほぼ同様な変化傾向であることが確認された。
- (3) NO_xの削減と燃料消費率の増加はトレードオフの関係があることがわかった。

参考文献

- [1] 秋本，船用ディーゼルエンジンの排気規制動向，日本マリンエンジニアリング学会誌，第42巻第1号，pp.35-40
- [2] 井亀優，大橋厚人他，船用ディーゼル機関から

排出される粒子状物質(PM)の計測とその排出特性

- [3] 中嶋聡，吉本隆光，船用ディーゼルエンジンにおける吸気ガス条件及び各種燃料の変化による燃焼と排ガス特性への影響について，神戸高専研究紀要第49号，pp.55-60
- [4] 位田晴良，上嶋敏裕，オパシメータによるディーゼルエンジンの排出ガス特性の把握，福井工業大学研究紀要 第42号 pp.172-179
- [5] 三原伊文，西田修身他，船用4サイクル中速ディーゼル機関における高硫黄分燃料の燃焼及び排出ガス特性，日本マリンエンジニアリング学会誌，第41巻 第6号 pp.114-119

