船用ディーゼル機関の微粒子排出特性*

—4ストローク高速機関と2ストローク低速機関の比較—

塚 本 達 郎** 三 好 朋 宏***
大 江 賢 二** 岡 田 博**

Characteristics of Particulate Emission from Marine Diesel Engines
— Comparison between High Speed Four-stroke Engine and Low Speed Two-stroke Engine —

By Tatsuro Tsukamoto, Tomohiro Miyoshi, Kenji Ohe, Hiroshi Okada

In this paper, experimental investigation was conducted with two marine diesel engines, such as high speed four-stroke engine and low speed two-stroke engine, to know the present condition and characteristics of particulate emission. Particulate matter collected on a sampling filter by dilution tunnel system was divided into SOF and ISF by Soxhlet extraction method. The results show that SOF concentration decreases and ISF increases as engine load becomes larger for the four-stroke engine. On the other hand, an increase in engine load promotes both SOF and ISF emission for the two-stroke engine. An analysis of SOF by gas chromatography suggests that cylinder lubrication has a significant effect on SOF concentration in the exhaust gas of the two-stroke engine.

1. ま え が き

地球規模の大気環境保全に対する関心の高さから、内燃機関より排出される微粒子、NO_x、SO_x等の更なる低減が社会的課題となっている。船用ディーゼル機関においてもIMO(国際海事機関)により、NO_x、SO_xの規制が予定されており¹⁾、今後、微粒子についても規制の対象となると思われる。ディーゼル機関から排出される微粒子は大部分が有機溶剤に溶解する可能性有機物質(SOF)と固形の炭素質である不可溶性有機物質(ISF)に分けられる。多環芳香族炭化水素(PAH)等の有害成分は主としてSOF中に含まれる。このため、機関から排出されるSOFの低減が課題となってくる。これまで船用ディーゼル機関の排出微粒子の濃度の計測は、スモークメータや直接法(JIS Z8808に定

められている排気ガスを高温のままでフィルタを通過させて微粒子を捕集する方法)によって計測されてきた。しかし、これらの方法ではSOFを含めた粒子状物質全体の計測ができないため、ISO(国際標準化機構)では、往復動内燃機関全般について希釈法(大量の空気で排気ガスを希釈した後にフィルタを通過させて微粒子を捕集する)で計測することを提案している。²⁾

ここでは、船用4ストローク高速ディーゼル機関および船用2ストローク低速ディーゼル機関の機関負荷率を変化させ希釈法により排出微粒子濃度の計測を行った。また、採取した微粒子中のSOFをソックスレー抽出法により抽出した後、ガスクロマトグラフにより分析し成分の性状を検討した。

2. 実験装置および方法

供試機関は、3気筒4ストロークトランクピストン型ディーゼル機関と3気筒2ストローククロスヘッド型ディーゼル機関である。それらの主要目をそれぞれ表1および2に示す。使用した燃料油はA

*原稿受付 平成9年10月24日

第56回学術講演(平成8年5月15日)

**正会員 東京商船大学(江東区越中島2-1-6)

***正会員 ダイハツディーゼル株式会社(大阪市中央区徳井町2-4-14)

表1 供試機関の主要目 (4ストローク機関)

名 称	3 L 1 3 A H S
形 式	排気タービン過給機付 4ストローク直接噴射機関
シリンダ内径	1 3 0 m m
ピストン行程	1 6 0 m m
出 力	7 3 . 6 k W
回転数	1 2 0 0 r p m
正味平均有効圧	1 . 1 5 M P a
シリンダ数	3

表2 供試機関の主要目 (2ストローク機関)

名 称	3 U E C 3 7 L A
形 式	排気タービン過給機付 単流掃気2ストローク 単動クロスヘッド形機関
シリンダ内径	3 7 0 m m
ピストン行程	8 8 0 m m
出 力	1 1 0 5 k W
回転数	1 8 8 r p m
正味平均有効圧	1 . 2 4 M P a
シリンダ数	3

表3 使用燃料性状 (A重油)

密度(288K)	g/cm ³	0 . 8 3 6 0
反応		中性
セタン指数		5 6
引火点	K	3 3 1
流動点	K	2 6 0 . 5
動粘度(323K)	mm/s	2 . 5 3 6
硫黄分	質量%	0 . 6 6
窒素分	質量%	0 . 0 1 1
残炭分	質量%	0 . 4 7
灰分	質量%	0 . 0 0 5 (-)
水分	質量%	0 . 0 5 (-)
総発熱量(推定)	kJ/kg	4 5 5 0 0

図1 負荷率と微粒子濃度の関係(4ストローク機関:船用特性)

量測定を行ったSOFは、FID付ガスクロマトグラフ (GC-FID) により分析し、成分の性状を検討した。

3. 実験結果と考察

3.1 船用4ストロークディーゼル機関による実験 図1に船用特性における負荷率と微粒子濃度の関係を示す。横軸は機関負荷率、縦軸は標準状態の排気ガス1立方メートル中に含まれる微粒子重量および微粒子に含まれるSOFの割合である。棒グラフで示した微粒子濃度のうち、SOF濃度は30%負荷時に高くなっており、その他の負荷ではほぼ一定となった。また、ISF濃度は負荷率の増加とともに増加する傾向を示している。その結果、両者を合わせた微粒子濃度は50%負荷時に最小値を

重油で、その性状を表3に示す。4ストローク機関では、船用特性および発電機特性で負荷率を変化させて、排出微粒子濃度の計測を行った。船用特性では、機関出力は回転数の3乗に比例して変化し、発電機特性では、回転数一定(1200rpm)でトルク変化させている。また、2ストローク機関では、船用特性で負荷率を変化させた。微粒子濃度については、小型希釈トンネル(内径70mm、全長1400mm)を使用して部分希釈法で計測した。希釈率は希釈前後のNOx濃度の比から求めた。NOx濃度は化学発光式のNOx計を用いて計測した。

微粒子を捕集する前後のフィルタの秤量は、恒温恒湿(297±2K、45±5%)の室内に8時間静置した後に行った。捕集前後のフィルタ重量の差を微粒子重量とした。フィルタに捕集した微粒子は重量測定後、ジクロロメタンを溶媒として、16時間、ソックスレー抽出を行った。抽出液をメンブランフィルタで減圧濾過し、ロータリーエバポレータで1.0mlまで濃縮した。濃縮した抽出液を秤量瓶に移し換え、窒素ガスを吹き付けて乾かした。以上の手順で抽出したものをSOFとして重量測定を行い、最初に計測した微粒子との差をISFとした。重

示した。また、折れ線で示した微粒子に占めるSOFの割合は、負荷率が増加すると減少した。低負荷時には、シリンダ壁面温度が低いので、壁面付近で火炎が冷やされてSOFが生成したと考えられる。また、このときの着火遅れ時間を調べると30%負荷時に最も長くなっていた。低負荷で着火遅れ時間が長いと希薄領域が生じやすく³⁾、この希薄領域でSOF分が生成されやすいと言われており、このために30%負荷時にSOF分割率およびSOF濃度が高くなったと考えられる。

図2に発電機特性(回転数一定)における負荷率と微粒子濃度の関係を示す。発電機特性では、負荷率が上昇すると、SOF分割率および濃度は減少したが、ISF濃度は増加した。このため、微粒子濃度は85%負荷時に最小値を示した。このとき、負荷率が上昇しても着火遅れ時間はあまり変化しなかったが、空気過剰率は30%負荷時の2.6から100%負荷時には、1.6まで減少していた。図3に負荷率一定(100%負荷)で、吸入空気量を変化させた場合の結果を、横軸に空気過剰率をとって示す。この結果から、空気過剰率が上昇すると、ISF濃度は減少し、SOF濃度は増加していることがわかる。このことから図2において、高負荷では、空気過剰率の減少により希薄領域が生じにくくなることと、シリンダ壁面温度の上昇によりSOF濃度が減少したと考えられる。また、ISF濃度は、空気過剰率の減少により、生成したISFが酸化されにくくなるため増加したと考えられる。ここで、船用特性で運転した場合の結果との違いは、SOF分割率が80%から30%まで変化することで、これは発電機特性で

図2 負荷率と微粒子濃度の関係(4ストローク機関：発電機特性)

図3 空気過剰率と微粒子濃度の関係(機関負荷率100%)

図4 負荷率と微粒子濃度の関係(2ストローク機関)

は負荷率によって空気過剰率が大きく変化するためと考えられる。また、ISF濃度にはほとんど差がないがSOF濃度が発電機特性の方が高くなっており、結果として微粒子濃度は発電機特性で運転した場合の方が高くなっている。

3.2 船用2ストロークディーゼル機関による実験 図4に船用特性における負荷率と微粒子濃度の関係を示す。負荷率が上昇すると、微粒子濃度、SOF濃度およびISF濃度はすべて増加している。また、SOF分割率は負荷率が変化してもあまり変化が見られない。4ストローク機関の船用特性の結果(図1)と比較すると、微粒子濃度が小さいこと、高負荷ほどSOF濃度が高くなっていること、高負荷においてもSOF分割率が大きいことが異なっている。SOFの排出傾向の相違の理由として、2

図5 シリンダ注油量と微粒子濃度の関係(機関
負荷率25%)

ストローク機関ではシリンダ内径が大きいこと、燃料噴射量の少ない低負荷では火炎が壁面近傍まで達せずSOF濃度が低くなったこと、高負荷ではシリンダ壁面温度の上昇により、シリンダ油のミストがSOFとして排出されやすくなったこと等が考えられる。

図5に25%負荷時におけるシリンダ注油量と微粒子濃度の関係を示す。横軸は機関1回転当たりの注油量である。シリンダ注油量の増加に伴って微粒子濃度、SOF濃度共に増加している。SOF割合はやや増加傾向にあるが、ほぼ一定である。これらのことから、シリンダ油の一部は微粒子(SOF)となって排出されていると考えられ、シリンダ注油がトランクピストン型機関とクロスヘッド型機関のSOF排出傾向の違いの一因となっていると思われる。

3.3 SOFの性状 これまでの実験で得たSOFをガスクロマトグラフを用いて分析し、その性状を調べた。図6に4ストローク機関での結果の一例として、100%負荷時のSOFのガスクロマトグラムを示す。SOF中のパラフィン成分は、使用した燃料油の300℃以上の高沸点留分とほとんど同じパターンを示しており、大部分が燃料油由来成分と考えられる。図7に2ストローク機関での結果の一例として、85%負荷時のSOFのガスクロマトグラムを示す。保持時間16分から28分にかけては、4ストローク機関と同様のパターンが見られ、SOF成分の大部分が燃料油由来成分であることは同じであると考えられるが、4ストローク機関の場合とは異なり保持時間28分以降にも山が現れており、

図6 ガスクロマトグラフによるSOFの分析結果(4ストローク機関)

図7 ガスクロマトグラフによるSOFの分析結果(2ストローク機関)

これはシリンダ油のガスクロマトグラムのパターンと一致する。またそれぞれの機関で負荷率の異なるSOFのガスクロマトグラムの比較も行ったが、今回の実験ではSOF成分の負荷率による違いは確認できなかった。

4. ま と め

4ストロークディーゼル機関の実験では、負荷率が上昇するとSOF濃度は減少し、ISF濃度は増加した。また、空気過剰率が増加すると、SOF濃度は増加し、ISF濃度は減少した。2ストロークディーゼル機関の実験では、負荷率が上昇すると、SOF濃度、ISF濃度とも増加した。また、いずれの負荷率においても、高いSOF分割合を示した。SOF成分の分析結果から、4ストローク機関では、大部分が燃料油由来成分であるが、2ストローク機関ではさらにシリンダ油由来の成分を含んでいる

ことがわかった。

最後に、SOFの抽出および分析に御協力いただいた交通安全公害研究所の堀重雄氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 船舶排出大気汚染物質削減手法検討会,「平成8年度船舶大気汚染物質削減手法検討調査報告書」,(平9-3)。
- 2) ISD/DIS8178-1, RIC engines-Exhaust emission measurement-Part 1: Test bed measurement of gaseous and particulate exhaust emission from RIC engines,(1993)。
- 3) 宮本登,「ディーゼルパティキュレートの生成と削減」,日本船用機関学会誌,第28巻第1号,(平5-1),19