船用4ストロークディーゼル機関の 排気特性と性能に及ぼす乳化燃料油中の 水粒子径の影響*

張 涛** 塚 本 達 郎***
大 江 賢 二*** 岡 田 博***

Emission Characteristics and Performance of Marine Four-stroke Diesel Engine Operated with
Emulsified Marine Diesel Fuels in Different Mean Water Particle Diameter

T.ZHANG T.TSUKAMOTO K.OHE H.OKADA

Using emulsified fuel, with water particles dispersed in the continuous phase of fuel, is effective in suppressing the emission of polluting matter from spray combustors, such as diesel engines and boilers. This paper discusses the emission characteristics and the performance of a marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels having different water particle diameters. The research especially focused on how the PM (Particulate Matter) and NO_x (Nitrogen Oxide) emission was affected by the water particle diameter in emulsified fuel.

In the engine experiment, we used Marine Diesel Fuel (MDF) in three emulsified fuels having mean water particle diameters of 3.94 μ m, 7.71 μ m, and 8.78 μ m. The following results were found:

1. In comparison with using MDF, the emission level was decreased by about 10% to 40% by using emulsified fuels, and the smaller the mean water particle diameter of the emulsified fuel, the lower the NO_x emission level.
2. The PM, SOF (Soluble Organic Fraction), and ISF (Insoluble Organic Fraction) emission rates increased with use of emulsified fuel, especially in the low load area.
3. The SFC (Specific Fuel Consumption) of emulsified fuel having the largest mean water particle diameter in this experiment was lower than that of the MDF. Among the three emulsified fuels, the smaller the mean water particle diameter, the higher the SFC.

1. はじめに

地球環境の問題が大きく取り上げられる今日、ディーゼル機関は化石燃料を使用する各種熱機関中最も熱効率の高いものとして、CO₂の排出抑制に対して大きく貢献する一方、NO_x及びPM（粒子状物質）に関しては他の熱機関と比べて排出量が多く、その削減対策が急がれている。

NO_xの低減策の一つに、乳化燃料油を用いる方法がある。乳化燃料油の燃焼過程において、ミク

ロ爆発による二次微粒化効果 [1,2,3] や乳化燃料油中の水粒子の急速気化膨張作用 [4,5] によるNO_xの低減効果 [6,7] のほか、すす粒子の低減 [5] と燃料消費率の改善 [8] などに関する報告がされている。また、油滴の燃焼実験 [9] や、計算モデル [10] による研究も行われている。筆者らは燃焼過程における乳化燃料油中の水粒子径の影響を油滴燃焼実験で調べた結果 [11]、以下のことがわかった。大気圧下において、水粒子径が大きくなると、着火遅れ及び燃焼時間が短くなり、ミクロ

*原稿受付 平成16年6月1日

**学生会員 東京商船大学大学院交通システム工学専攻
(江東区越中島2-1-6)

***正会員 東京商船大学海洋工学部
(江東区越中島2-1-6)

爆発も激しく生じる。高圧雰囲気においては、ミクロ爆発の発生が弱くなる。

そこで、本研究では、水粒子径の異なる乳化燃料油を4ストロークディーゼル機関に用いて実験し、排気特性及び機関性能について実験的に調べた。特に排出物のNO_x濃度や、PM排出率等の排気特性を調べ、水粒子の作用機構の一端を明らかにすることを目的とした。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 供試機関 供試機関には、船用4ストロークディーゼル機関（3L13AHS、新潟鉄工所製）を用いて、負荷率を船用特性に従って30%、50%と75%に変化させて実験を行った。機関の主要目を表1に示す。この実験の目的が乳化燃料油とA重油を用いるときの排気特性と機関性能を比較することであるため、噴射時期22° BTDCを変えずに実施した。

表1 供試機関の主要目

名称	3 L13AHS	
形式	排気タービン過給機付4ストローク直接噴射式ディーゼル機関	
シリンダ径	130mm	
行程	160mm	
シリンダ数	3	
出力／回転速度	73.55kW(100PS)/1200rpm	
平均有効圧	1.153MPa	
平均ピストン速度	6.4 m/s	
圧縮比	15.3	
噴射時期	22° BTDC	

2.2 供試燃料油 実験に用いたA重油の性状を表2に示す。表2に示すA重油を用い、水と乳化

表2 供試燃料油（A重油）の主な性状

密度（288K）	g/cm ³	0.8845
動粘度（323K）	mm ² /s	3.1
引火点（PM）	℃	85
硫黄分	質量%	0.04
水分	質量%	0.01
残留炭素分	質量%	0.04
灰分	質量%	0.0
総発熱量	MJ/kg	44.85

剤（ソルビタル脂肪酸エステルを主成分とする界面活性剤、TM-12614、HLB価7.9、日本乳化剤製）を添加して、水添加率（φで示す）20vol%の乳化燃料油を作製した。乳化燃料油の水添加率は水対燃料油全体（水＋燃料油＋添加剤）の容積割合である。異なる水粒子径の乳化燃料油を作るために、燃料油全体の0.5vol%、1.0vol%、2.0vol%の乳化剤を添加した。乳化剤添加率をεで示す。作製した乳化燃料油をE1、E2、E3と称する。表3には乳化燃料油とその水粒子径を示す。乳化燃料油の水粒子径は燃料油試料を顕微鏡で観察し、撮影した写真から水粒子径の分布を求め、水粒子径の分布から体積平均水粒子径を計算した[11,12]。一例として、図1にE3の水粒子径の分布と顕微鏡写真を示す。図中の水粒子の数量的割合は水粒子の個数頻度である。

表3 乳化燃料油とその平均水粒子径
(φ:水添加率 ε:乳化剤添加率)

乳化燃料油(vol%)	平均水粒子径(μm)
E1 φ=20 ε=0.5	8.78
E2 φ=20 ε=1.0	7.71
E3 φ=20 ε=2.0	3.94

図1 E3の水粒子径の分布及び顕微鏡写真

2.3 計測項目と計測方法 図2には実験計測装置の概略図を示す。機関における計測項目は機関回転速度、ロードセル指示荷重、燃料油の流量、給気温度、給気圧力、排気温度（過給機入り口）、大気温度、大気圧、大気湿度、上死点の検出、燃料高压管内圧、筒内圧等である。燃料高压管内圧と筒内圧の測定には、歪ゲージ式圧力センサー（PE-200KP、共和電業製）を、それぞれ燃料噴射

図2 実験計測装置の概略図

図3 希釈トンネルの概略図

ポンプ出口，燃料噴射弁入り口と一番シリンダのインジェクターバルブに取り付け，それぞれの電気抵抗の変化をアンプ（6M62，三栄測器製）を介して8CHのデジタルスコープ（DL708，横河電機製）に読み込ませた．また上死点（TDC: Top Dead Center）の検出はクランク軸の自由端の一番シリンダにTDCとなる位置に反射テープを張り，ファイバースエンサ（E3XR-CE4，オムロン社製）から光を当て，その光の反射から求め，筒内圧等と同様にセンサーからの信号をアンプに介してデジタルスコープに読み込ませた．

排気ガスの計測項目は排気温度，排気圧力，CO₂濃度，NO_x濃度，O₂濃度及びPM排出率である．CO₂濃度はガスクロマトグラフ（YanacoG180，柳本製

作所製）により測定した．NO_x濃度とO₂濃度の測定には磁気式酸素濃度計内蔵の減圧形化学発光法NO_x計（ECL-88A，アナテック・ヤナコ製）を用いた．

PM排出率は部分希釈法〔13〕で計測した．図3に希釈トンネル（ディーゼル排気粒子計測用希釈トンネル，全長1600mm，ダイレック社製）の概略図を示す．図に示すように排気ガスの一部を排気管に差し込んだサンプリング管を通して，希釈トンネルに流入させた．排気ガスは送風機から送り出された空気と混合し，希釈される．PMは，捕集フィルター（ガラス繊維濾紙表面をフッ素樹脂で覆った複合繊維濾紙，直径47mm，有効直径37mm，東洋濾紙製）で捕集される．PMの捕集量は実験前後に恒温恒湿状態（温度295±2K，湿度45±8%）に8時間捕集フィルターを放置した後に，電子天秤（AG285，メトラートレス製）で秤量した重量差とした．

PMに含まれたSOF（可溶性有機物質）分の計測は，ジクロロメタンを溶媒とするソックスレー抽出法により行った．PM重量を秤量した後の捕集フィルターをソックスレー抽出装置（柴田科学機器工業製）で16時間抽出後，抽出液を1mlまで濃縮し，予め重量を測った秤量瓶に移し替え窒素を吹き付けて溶媒を蒸発させ，秤量瓶の重量を測った．その重量測定前後の重量差をSOFの重量とした．ISF（不可溶性有機物質）分は，PM中のSOF分以外すべての物質とした．

3. 実験結果及び考察

本実験ではA重油及びその前述のような乳化燃料油を用いて、各負荷率において、機関の回転数及びロードセル指示荷重を同じ船用特性の指標に合わせて実験した。なお、乳化剤自身の影響の有無を調べるために、A重油と2%乳化剤を用いた実験を実施した。その結果から機関性能値や各排出物濃度などがA重油のみ使用時と変わらないことを確認した。

3.1 排気ガス中における NO_x 、 O_2 及び CO_2 の濃度と水粒子径 図4にはA重油及び水粒子径の異なる乳化燃料油を用いた実験の排気ガスにおける NO_x 濃度（13% O_2 換算）を示す。各負荷率において、乳化燃料油の NO_x 濃度はA重油より大幅に低くなる。また、乳化燃料油中の水粒子径が小さくなると NO_x の濃度は低くなる。負荷率50%において、E3の NO_x 濃度はA重油のそれより40%ほど低減する。

図5には、排気ガス中の O_2 濃度を示す。 NO_x 濃度

図4 負荷率と NO_x の濃度

図5 負荷率と O_2 濃度

図6 負荷率と CO_2 濃度

と同様に乳化燃料油の O_2 濃度はA重油より低くなる。また、乳化燃料油中の水粒子径が小さくなると、排気ガス中の O_2 濃度は低くなる。図6には排気ガス中の CO_2 濃度を示す。乳化燃料油の CO_2 濃度はA重油のそれより高くなる。また、乳化燃料油中の水粒子径が小さくなると、 CO_2 濃度は高くなる。

排気ガス中の O_2 濃度と CO_2 濃度とは、給気質量流量と燃料消費率とに大きく関係すると思われる。本実験では、計測した給気の質量流量の結果から、給気の質量流量はA重油と3種類の乳化燃料油と殆んど変わらない。燃料消費率の実験結果(図12に示す)は、E1、A重油、E2、とE3の順番で多くなっており、 O_2 濃度と CO_2 濃度の実験結果と一致しない。しかし、着火遅れ(図16に示す)の実験結果から、乳化燃料油の着火遅れはA重油のそれより長くなる。乳化燃料油においては、水粒子径が小さい乳化燃料油の着火遅れが長くなる。着火遅れが長くなると、初期燃焼量が多くなり、燃焼反応がより充分に行われ、排気ガス中の O_2 濃度が低くなり、 CO_2 濃度が高くなる。以上のことは、図5と図6の実験結果になる重要な因子であると考えられる。

NO_x 濃度の実験結果(図4に示す)について、水粒子径の小さい乳化燃料油中の水分は気化しやすく、燃焼温度を下げることによるものと考えられる。

3.2 排気ガス中におけるPM等の排出率と水粒子径 図7～図10にはA重油及び水粒子径の異なる乳化燃料油を用いた実験の排気ガス中のPM、SOFとISF等の排出率の実験結果を示す。乳化燃料油のPM、SOF分とISF分排出率はA重油より多く

なる。負荷率30%においては、水粒子径が大きい乳化燃料油のPM、SOF分とISF分の排出率は高くなる傾向にある。負荷率が高くなると、水粒子径によるPM、SOF分とISF分の排出率値の差が小さくなる。PM排出率におけるSOF分排出率の割合については、負荷率30%においては、A重油と3種類の乳化燃料油はほぼ同じであるが、負荷率が高くなると、乳化燃料油のそれがA重油のそれより高

図7 負荷率とPM排出率

図8 負荷率とSOF排出率

図9 負荷率とISF排出率

図10 PMにおけるSOFの割合

図11 負荷率と排気温度

くなる。

図11に負荷率と排気温度の関係を示す。乳化燃料油を用いたときの排気温度がA重油のそれより低くなり、特に負荷率30%において、水粒子径が大きくなると、乳化燃料油の排気温度が低くなる。生成されたPMは主に燃焼の後半で酸化される〔14〕ので、燃焼後半の燃焼温度はPMの生成に大いに影響を及ぼす。前述の排気温度からは、乳化燃料油、特に水粒子径の小さい乳化燃料油の燃焼温度が低くなると思われるので、それがPMの排出率が高くなる要因と考えられる。排気温度の実験結果は乳化燃料油中の水粒子の急速気化膨張による燃焼反応の促進効果が燃焼温度を高めることよりも水粒子の蒸発によって燃焼温度を下げることに及び乳化燃料油の水分によって燃焼室内のガスのモル数の増加による燃焼温度を低下させることの影響が大きく、乳化燃料油を用いると排気ガス温度が低下すると考えられる。

3.3 機関の性能と水粒子径 図12にはA重油及び水粒子径の異なる乳化燃料油を用いた実験の燃料油消費率を示す。水粒子径が最も大きい乳化

燃料油E1の燃料油消費率はA重油より低くなる。中低負荷率域では、乳化燃料油の水粒子径が大きくなると、燃料油消費率は低くなる。負荷率75%においては、燃料油消費率値の差が小さくなる。

図13～図15には、それぞれ負荷率30%、負荷率50%及び負荷率75%の筒内圧と燃料高压管内圧波

図12 負荷率と燃料油消費率

図13 負荷率30%における筒内圧と燃料高压管内圧波形

図14 負荷率50%における筒内圧と燃料高压管内圧波形

形を示す。図13には、筒内圧を見易いたため、クランク角0～8degの筒内圧を示す。本実験では、機関の運転は船用特性に従って、すなわち、同じ負荷率では、機関の回転速度とトルクを一定（出力も一定となる）で運転し、乳化燃料油の噴射量がA重油のそれと比較して、高くなるため、高压管内圧波形は図に示すような差が生じた。これらの図から、乳化燃料油の圧力上昇始めがA重油のそれより遅くなる。また、乳化燃料油中の水粒子径が小さくなると、その圧力上昇始めが遅くなる。図13～図15の結果を用いて、最高筒内圧 p_{max} 及び p_{max} 時のクランク角 θ_1 を負荷率と燃料油別にまとめて表4の左欄に示す。表4の各特性値の採取サイクル数は6サイクルである。負荷率30%を除いて、乳化燃料油の p_{max} はA重油のそれより高くなる。また、乳化燃料油中の水粒子径が大きくなると、 p_{max} は

図15 負荷率75%における筒内圧と燃料高压管内圧波形

図16 負荷率と着火遅れ

図18 負荷率50%における筒内圧上昇率

図17 負荷率30%における筒内圧上昇率

図19 負荷率75%における筒内圧上昇率

高くなる。その理由として、粒子径の大きい水粒子の急速気化による二次微粒化作用が強く、燃料蒸気と空気の混合がよくなると考えられる。P_{max}の発生時期は水粒子径の小さい乳化燃料油が遅くなる。乳化燃料油の水粒子の小さいときの総水粒子の表面積がより大きくなると、連続相をなす燃料相との接触面積が大きくなり、燃料相からの伝導熱が多くなる。そのために、燃料相の温度が低

くなり、蒸発速度が低下し、可燃性混合気の形成が少なくなるために、着火遅れが長くなると考えられる。負荷率と着火遅れの関係を図16に示す。図13～図15の燃料高压管内圧が上昇から最初に下がる時を噴射開始クランク角とし、また、筒内圧の急激な上昇開始時を燃焼開始クランク角とする。着火遅れは噴射開始から燃焼開始までのクランク角を時間に換算したものである。図16から

表4 $p_{\max}$ と $(dp/d\theta)_{\max}$ 及びそのクランク角

負荷	燃料	$p_{\max}$	θ_1	$(dp/d\theta)_{\max}$	θ_2
単位		kg/cm ²	deg	kg/cm ² /deg	Deg
30%	A	96.1	5.5	10.2	1.7
	E1	95.3	9.3	11.5	6.3
	E2	95.3	9.2	10.3	6.5
	E3	100	9.6	11.5	7.7
50%	A	109	6.3	10.5	3.4
	E1	118	9.5	13.0	6.9
	E2	112	11.1	10.6	7.4
	E3	110	13.1	12.0	8.0
75%	A	122	7.5	12.3	3.6
	E1	133	10.8	14.5	7.8
	E2	129	11.8	12.2	8.5
	E3	128	12.4	12.0	9.1

水粒子径の小さい乳化燃料油の着火遅れが長いことがわかる。

図17～図19には筒内圧の上昇率を示す。図17～図19の結果より求め、最大筒内圧上昇率 $(dp/d\theta)_{\max}$ と $(dp/d\theta)_{\max}$ 時のクランク角 θ_2 を負荷率と燃料油別にまとめて表4右欄に示す。乳化燃料油の $p_{\max}$ と $(dp/d\theta)_{\max}$ はA重油のそれに比べてより遅れて現れる。また、乳化燃料油中の水粒子径が小さくなると、 $p_{\max}$ と $(dp/d\theta)_{\max}$ はより遅れて現れる。水粒子径の一番大きいE1の $(dp/d\theta)_{\max}$ は最も大きいことがわかる。それは水粒子径の大きい乳化燃料油の二次微粒化効果が強いからと考えられる。

4. まとめ

以上の実験結果をまとめると、

- ① 乳化燃料油を用いると、排気ガス中の NO_x 濃度が10%～40%低くなる。水粒子径の小さい乳化燃料油は NO_x 濃度低減作用が大きくなる。
- ② 乳化燃料油を使用すると、排気ガス中のPM排出率は増え、また、SOF分とISF分の排出率も増える。低負荷域ではそれらの増加幅が大きくなる。
- ③ 水粒子径が最も大きい乳化燃料油E1を用いるときの燃料油消費率はA重油のそれより低くなる。中低負荷率域では、乳化燃料油の水

粒子径が大きくなると、燃料油消費率は低くなる。負荷率75%においては、A重油と乳化燃料油の燃料油消費率値の差が小さくなる。

- ④ 水粒子径が小さくなると、その乳化燃料油の着火遅れは長くなる。中高負荷率域において、乳化燃料油の最高筒内圧はA重油のそれより高くなる。また、乳化燃料油中の水粒子径が大きくなると、最高筒内圧は高くなる。

これらのことから、ディーゼル機関に乳化燃料油を用いるとき、燃料油中の水粒子径は排気成分や機関性能に大きく影響することが判る。乳化燃料油中の水粒子径と機関の燃料噴射時期を最適に調整すれば、排出 NO_x の低減と燃料消費率を小さくすることが可能となる。

最後に、水粒子径の顕微鏡撮影に際し、本学海洋工学部志摩政幸教授と地引達弘講師のご指導を得ました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 塚原実ほか1名, 内燃機関, 19 (326), (1980), 19.
- [2] 橋本正孝ら, 日本船用機関学会 第36回学術講演会, (昭和60年), 63.
- [3] 岩間彬ら, 燃料協会誌, 58 (632), (1979), 1041.
- [4] 村山正, 日本船用機関学会誌, 26 (9), (1991), 12.
- [5] 西川和美ら, 日本船用機関学会誌, 26 (9), (1991), 128.
- [6] 岡田博ら, 日本船用機関学会 第51回 (平成5年春季) 講演会講演予稿集, 44.
- [7] 塚本達郎ら, 日本船用機関学会 第51回 (平成5年春季) 講演会講演予稿集, 48.
- [8] 村山正, 日本船用機関学会誌, 21 (12), (昭和61年), 8.
- [9] 津江光洋ら, 日本機械学会論文集 (B編), 62 (601), (1996), 3488.
- [10] Law C.K. et al., Combust. Flame, 37 (1980), 125.
- [11] T.Zhang et al., Proceedings of the ICOPE-03, (2003), 2-409.
- [12] Boeckle.S., MTZ, 47 (9), (1986), 351.
- [13] 岡田博ら, 第71回 (平成16年春季) マリンエンジニアリング学術講演会 講演論文集, 3.
- [14] John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Company, 645.