環境に優しく低コストの船用燃料油の設計と 性能評価—廃プラスチック油(WPD)利用—*

Vu Phong Hai** 西田 修身** 藤田 浩嗣**
原野 亘** 豊島 紀彦*** 射手矢 政美****

Development and Evaluation of Marine Fuel Oil for Clean Environment and Reduction of Running-Cost
— Utilization of Waste Plastics(WPD) —

Vu Phong Hai, Osami Nishida, Hirotsugu Fujita, Wataru Harano, Norihiko Toyoshima, Masami Iteya

In order to revitalize sea transportation it is essential to be capable of using low-cost, low-quality fuel oil with simplified fuel systems, the emissions of which must be environmental-friendly. The authors of this paper have developed the blended oil of Marine Heavy Fuel Oil (C-Oil) and pyrolytic oil made of household and industrial waste plastics (hereafter called Waste Plastic Disposal or WPD) and applied it to diesel engines. The experiment on the engine with non-preheated blended oil has shown the stable operation of the engine. This would lead to the significant reduction of heating cost. Furthermore, the emission of soluble organic fraction (SOF) also decreases. This paper describes the effects of sulfur content on the engine performance and emission. However, NO_x emission slightly increases so that the emulsified fuel oil has been made with the aid of capsule-typed additives. The experimental emulsion fuel oil (Emulsion F.O) containing 10%(v) water and 0.3%(v) additives indicates stability and helps to reduce NO_x emission almost by half.

1. まえがき

海運界活性化のためには、より安価な燃料油を簡易なシステムのもとで使用可能とすることである。同時に環境に優しい排ガ斯特性を示す燃料油でなければいけない。筆者らは家庭及び産業廃棄物であるプラスチックから高効率(約90%)で回収した廃プラスチック油(今後、廃プラスチック油はWPDとする)⁽¹⁾とC重油をブレンドした新種油を開発し、実機に使用したところ、非加熱の状態で運転可能を示した^{(2)~(7)}。その結果、燃料油加熱コストを大幅に削減でき、安定な運転が可能であったとともに微粒子特にSOFの低減を計ることができた。しかしながら、NO_xについては若干の増加が認められたため、特殊なカプセル式乳化剤による水添加

エマルジョン燃料油を試作した。水と油の混合にあたり、カプセル式乳化剤による乳化燃料油を作成した結果、よい安定性が得られ、実機試験の結果で、NO_x排出量を約半減することができた。

2. 供試燃料油の性状

2.1 C重油とWPDの混合油の特性 本実験に使用のC重油の性状値、WPDの性状分析値及び供試燃料油の構成内容をそれぞれ表1、2、3に示した。C重油中の硫黄分及び残留炭素分は2.56、12.3%(m/m)である。また、WPD中の成分の約六十数%はスチレンモノマーである。両油の比較において、密度に大きな差がないが、動粘度には大きな差異がある。C重油の動粘度は50℃で177cSt、密度は0.982g/cm³、硫黄含有率は2.56%(m/m)である。WPDの密度はC重油並みの0.939 g/cm³であるが、動粘度は約1.2cSt(30℃)で極めて低い。C重油にWPDを10、20、30%(v)添加した場合の密

*原稿受付 平成12年10月13日

**正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

***日邦産業K.K

****WOS-21 CO.,Ltd

度、粘度、CCAI値(着火性指標)及び硫黄分変化を図1に示した。図より、WPDの添加率増加に伴って、密度、動粘度及び硫黄分が小さくなる。特に動粘度は添加率20%(v)で急激に低下し、約1/9になる。しかしWPDの割合を増すほど、CCAI値は増し、セタン価が減少する。CCAI値以外の性状は機関使用燃料油には良い傾向である。さらに蒸留特性を把握するために、示差熱分析計(DTG-50/50H)にて、種々供試油の蒸留曲線を示したのが図2である。図より全試料とも500℃付近で90%近く蒸発している。特にWPDのみでは300℃でほぼ蒸発が完了する。

2.2 C重油とWPDと水のエマルジョン燃料の性能試験結果 NO_x排出を抑制するために、C重油とWPD 90:10(v)の混合油をベースとし、ベース油に水を10、20%(v)混入した安定なエマルジョンを得るために、乳化剤(商品名:WOS-21)を0.3%(v) (ベース油に水を混合した混合油に対する体積割合)添加した。この供試燃料油の特性と、実機での機関性能及び排気ガス特性の検討を行った。

表1 C重油成分分析表

JOMO C.Oil No. 30E		
Item	Unit	Value
Density (15°C)	g/cm ³	0.982
Reaction degree		Neutral
Flash point	°C	74.0
Kinematic viscosity (50°C)	m m ² /s (cSt)	177.0
Pour point	°C	-10.0
Carbon residue	% (m/m)	12.3
Sulfur	% (m/m)	2.56
Water	% (m/m)	0.00
Ash	% (m/m)	0.020
Nitrogen	% (m/m)	0.25
Gross Calorific Value	MJ/kg(kcal/kg)	42.780 (10,220)
Vanadium	m g/kg	58
Aluminum	m g/kg	4
Magnesium	m g/kg	2
Silica	m g/kg	13

表2 廃プラスチック熱分解油 (WPD) 成分分析表

Item		Unit	Value
Density(15°C)		g /cm ³	0.939
Kinematic viscosity (30°C)		m m ² /s (cSt)	1.189
Gross calorific value		MJ/Kg	44.99
Flash point		°C	30.5
Components	Styrene monomer	% (v)	63.9
	Styrene dimer	% (v)	11.5
	Styrene trimer	% (v)	5.7
	Toluene	% (v)	2.2
	Ethyl benzen	% (v)	1.4
	α - methyl styrene	% (v)	2.2
	Others	% (v)	13.1

本実験に使用した乳化添加剤は重質油中に水粒子を分散させウォーター・イン・オイル型エマルジョンを形成するための乳化剤であって、苛性ソーダ25%(v)と塩化カルシウム25%(v)と水50%(v)とを主成分とする重質油処理用乳化剤である。水と重質油に乳化剤を加えて混合することによって得られるこのカプセル燃料は、下記のような特徴を有するエマルジョン化した新燃料となった。

表3 供試燃料油の構成内容 (体積割合)

Sample No.	C.Oil	WPD	Water	WOS21	Total
1	60%	40%	-	-	100%
2	70%	30%	-	-	100%
3	80%	20%	-	-	100%
4	90%	10%	-	-	100%
5	60%	-	40%	0.3%	-
	59.89%*	-	39.93%*	0.18%*	100%
6	70%	-	30%	0.3%	-
	69.85%*	-	29.94%*	0.21%*	100%
7	80%	-	20%	0.3%	-
	79.81%*	-	19.95%*	0.24%*	100%
8	90%	-	10%	0.3%	-
	89.76%*	-	9.97%*	0.27%*	100%
9	90%	10%	40%	0.3%	-
	53.89%*	5.99%*	39.93%*	0.18%*	100%
10	90%	10%	30%	0.3%	-
	62.87%*	6.99%*	29.94%*	0.21%*	100%
11	90%	10%	20%	0.3%	-
	71.83%*	7.98%*	19.52%*	0.24%*	100%
12	90%	10%	10%	0.3%	-
	80.78%*	8.98%*	9.97%*	0.27%*	100%

Note:

- Sample 1-3
WPD mixing ratio≡ WPD/(WPD+C.Oil)
- Sample 5-8
Water mixing ratio≡ Water/(C.Oil+Water)
WOS21 mixing ratio≡ WOS21/(C.Oil)
- Sample 9-12
WPD mixing ratio≡ WPD/(WPD+C.Oil)
Water mixing ratio≡ Water/(WPD+C.Oil+Water)
WOS21 mixing ratio≡ WOS21/(WPD+C.Oil)
- *: Converted mixing ratio to the total volume of the fuel sample.

図1 供試燃料油のWPD添加による特性の変化

- ① 乳化剤によりカプセル化された重質油と水は、強力な分子間相互作用により分離しない。
- ② 油滴の中に水滴が閉じ込められているが、保管・運用などは重質油と同様な取り扱いである。
- ③ 全体量の60%程度まで水を混入し、カプセル化できる。

図3は実際のカプセル燃料(水%(v)混入)を200倍拡大した写真である。もっとも大きく見える3油滴は焦点に合わせ撮影し、他の油滴は被写体深度の差により小さく見える。これらの性能試験結果は以下の通りであった。

- (a) 24時間保管したカプセル燃料を80℃にし、遠心分離器(相対遠心力600Gで20分間回転)にかけたが、分離はなかった。
- (b) 7日間保管したカプセル燃料を80℃にし、遠心分離器(相対遠心力600Gで20分間回転)にかけたが、分離はなかった。

図4にエマルジョン燃料油の動粘度と密度の変化を示した。図より、水添加率が10%から40%に増加

にかかわらずに、燃料油の密度がほぼ $0.97\text{g}/\text{cm}^3$ で一定である。しかしながら、エマルジョン燃料油の動粘度は167cStから454cStに急激に増加し、WPDと混合したエマルジョン燃料油の動粘度は167cStから232cStに漸増する。明らかになったことは、WPD添加により、WPD添加したC重油エマルジョン燃料の動粘度はC重油エマルジョン燃料の動粘度よりほぼ100~300cSt低い。

図5は供試燃料油の蒸留曲線を示す。図より水添加が増すほど燃料油の蒸留速度が増加する傾向が見られる。さらに、C重油及びWPD 10%(v) C重油90%(v)混合油と比べ、WPDエマルジョン燃料油の蒸留速度は速くなる。

3. 実験機関及び方法

表4には実験に使用した機関の細目を示した。使用した機関は単気管横型水冷式4ストロークディーゼル機関(NF19SK)であり、定格出力は2200rpm、12kWである。図6は機関性能及び排ガス測定系の

図2 供試燃料油の蒸留曲線

図3 エマルジョン燃料油の顕微鏡写真

図4 供試燃料油の水添加による特性の変化

図5 供試燃料油の水添加による蒸留特性の変化

概略を示す。

実験は機関回転数2200(rpm)及び 機関負荷75(%)一定で運転をし、各項目について測定を行った。また、混合燃料油の均一化を図るために燃料タンクに攪拌機を取りつけ、実験開始から終了時まで攪拌を行った。化学発光方式NO_x計、定電位電解方式ガス分析計、磁気風方式O₂計及び赤外線吸収方式SO₂計により燃焼ガス中のNO、NO_x、O₂、CO、CO₂、SO₂のガス測定を行うと共に、電子天秤及びフィルターを用いることにより排気ガス中のすす(PM)、ドライスート(DS)の分析を行った。可溶性有機物質(SOF)を抽出するために、ジクロロメタン溶液を使用した。大略的に過去報告してきた手法と大きく変わらない^{(5)~(7)}。表5には実験条件を示す。今回は次のように、大別して3種類の実験を行った。

表4 実験機関要目

Engine type	Horizontal single cylinder 4 stroke diesel engine (YANMAR NF19-SK)
Cylinder bore x stroke	Φ110 x 106 mm
Swept volume	1007cm ³
Clearance volume	61.78 cm ³
Maximum power	14.0 kW/2400 rpm
Rated continuous power	12.0 kW/2200 rpm
Compression ratio	16.3
Effective compression ratio	14.5
Swirl ratio	2.20±0.1
Nozzle	Φ0.33mm, 4 hole injection
Nozzle injection angle	150°
Injection timing	19° ±1 B.TDC
Injection-valve opening pressure	19.6~20.1 Mpa (200~205kgf/cm ²)
Cooling type	Radiator
Weight	192 kg

- ① C重油とWPD油を8対2混合した燃料油で機関の負荷を1/2、3/4及び4/4と変えた場合について、燃料油非加熱状態で、実施した。
- ② さらなる低質油を考慮し、高硫黄燃料油のために、添加剤DBDS([(CH₃)₃CS-12])を加え、燃料非加熱状態で、硫黄分の変化による影響を検討した。
- ③ C重油とWPDを9対1で混合した基油に水を10、20%(v)混合し、乳化剤を基油量に対して0.3%(v)添加した。高速度エンジンのために、供試燃料油が80℃まで加熱された。機関負荷は75%一定とし、機関性能及び排ガス排出特性の試験を行った。

4. 実験での性能及び排ガス試験結果

4.1 負荷変動による結果 図7には負荷1/2、3/4、4/4の場合の筒内圧力線図結果を示した。高負荷になるほど着火遅れは短くなり、最高圧力値

図6 実験装置概略

表5 実験条件

		1	2	3	Unit
I	Engine load/Speed	50/2200	75/2200	100/2200	%/rpm
	WPD mixing ratio	20	20	20	% (v)
II	Engine load/Speed	75/2200	75/2200	75/2200	%/rpm
	DBDS mixing ratio	1	3	5	% (v)
	Sulfur content	1.76	2.33	2.82	% (m/m)
	WPD mixing ratio	20	20	20	% (v)
III	Engine load/Speed	75/2200	75/2200	75/2200	%/rpm
	WPD mixing ratio	10	10	10	% (v)
	Water mixing ratio	0	10	20	% (v)
	WOS21 mixing ratio	0.3	0.3	0.3	% (v)

Note:

1. Engine load: Percentage of Continuous Rated Output of the engine
2. WPD mixing ratio $\equiv$ WPD/(WPD+C.Oil)
3. DBDS mixing ratio $\equiv$ DBDS/(WPD+C.Oil+DBDS)
4. Water mixing ratio $\equiv$ Water/(WPD+C.Oil+Water)
5. WOS21 mixing ratio $\equiv$ WOS21/(WPD+C.Oil)

は高くなる。図8の(a)には着火遅れとともに排気ガス温度を示した。図より高負荷になるにしたがって最高圧力値が上がり排気ガス温度も上昇する。図8(b), (c)には O_2 , CO_x 及び NO_x の排出特性を示した。図より、高負荷になるにしたがって、燃焼温度が上がるため、 NO_x の濃度が増加する。特に NO の増加が顕著である。図8(d)には排出微粒子($PM \equiv DS + SOF$)の濃度分布を示す。負荷増加に伴い、 PM の減少は著しい、特に SOF の低減量は大きい。

4.2 高硫黄燃料油とWPDとの混合油 本研究に使用してきたC重油中の硫黄分を変えた場合の、WPD混合による影響を検討した。供試燃料油中の硫黄分を変えるために、C重油とWPDを8対2で混合した基油にDBDSを1, 3及び5%(v)添加することによって、全燃料量中の硫黄含有率を1.76, 2.33及び2.82%(m/m)と設定して実験を行った。図9, 10には筒内圧力線図、着火遅れ、排気ガス温度及び排気ガス特性を示した。図より、硫黄分が増すほど、着火遅れが短くなる⁽⁸⁾、 O_2 , CO_x , NO_x ,

図7 圧力線図

図8 負荷変動による実験結果

N_2O 及びPM(PM $\equiv$ DS+SOF)の排出量分布より、 O_2 、 CO_x 、 NO_x 、PMの排出量にはS分による大きな変化は見られないが、 SO_2 量の排出量増加に伴って、 N_2O が著しく増加する。過去の報告で⁽⁹⁾、 N_2O 値において、機関負荷の増大に伴って N_2O 生成は増し、硫黄分が1.76から2.82(m/m)へ増やすと N_2O 排出量は約1.5倍増加した。 N_2O 生成排出には SO_x 生成量は大きくかかわっている。

4.3 排ガス対策としてのエマルジョン燃料
C重油とWPDを9対1で混合した基油に水を0, 10,

20%(v)混合し、乳化剤を0.3%(v)添加した供試燃料油で種々実験を行った。図11には筒内圧力線図を示す。図12(a)で、水混合率を10%(v)増加すると、動粘度が低くなり、燃料噴霧が良くなるため、着火遅れが1.7msに若干短くなる。図12(b), (c)は O_2 、 CO_x 、 NO_x の排ガス特性を示すものである。 O_2 、 CO_2 に対しては、水混合率増加にかかわらず、ほぼ一定である。 NO_x 、 SO_x 排出量は水添加によって著しく減少することができた。水添加率が増すほど、燃焼温度が下がるため、 NO_x は

図9 圧力線図

図10 硫黄分添加による実験結果

1180ppmから497ppmまで、59%も急激に下がり、 SO_2 は882ppmから670ppmまで、24%低減することができた。図12(d)の微粒子結果より、水添加率増加にかかわらずに、DSはほぼ一定であった。しかし、水化合物の増加に伴って、燃焼温度減少による不完全燃焼のため、SOFが増した。

5. まとめ

本研究の目的は廃棄物の再利用による船用低質燃料油の新設計である。これらの推進のために、機関の負荷を変えた場合に使用できるか、また硫黄分含有量の異なるC重油を使用した場合にどのような機関性能が得られるか、さらに大気汚染物

図11 圧力線図

図12 水添加による実験結果

質低減策として、水添加によるエマルジョン燃料油でNO_xを抑制できるかを機関性能、並びに環境面から評価を試みた。

WPD添加による非加熱による重質油の実用化、NO_x抑制への応用的立場からディーゼル機関にて実験した結果、大略的に次のようなことが言えた。

- (1) 重質油(177cSt @50℃)にWPDを10～30%(v)添加するだけで、動粘度が10～20cSt (@50℃)に低下し、非加熱の状態で、小型高速ディーゼル機関に直接使用できた。
- (2) エンジン負荷の変動にかかわらずに、エンジン運転は問題なく、安定であった。エンジン負荷の増加に伴い、着火遅れは若干短くなり、排気ガス温度が上昇するため、排出NO_x濃度は激増するが、微粒子(DS, SOF)は大幅に低減できた。特にSOFの低減は著しかった。
- (3) DBDS(硫黄分)添加率増加に伴い、着火遅れは若干短くなり、排出NO₂濃度は若干減少した。DSの量には変化が見られなかったが、SOFは若干減少した。排ガス中のSO₂、N₂Oは増加した。
- (4) C重油とWPDとの混合油に水を20%(v)まで混合し、さらにカプセル式乳化剤で作成したエマルジョン燃料油で、実験した結果、水添加10%(v)の場合、DS及びSOFの量に変化は見られなかったが、NO_x濃度は半減し、NO_x生成抑制効果は大きかった。

参考文献

- (1) 岡屋裕造 (日邦産業株式会社), 「廃棄処理 (廃プラスチック類) の為の新技術の発表」資料, (1997年12月), P. 3.
- (2) 西田ら, 他7名, 日本船用機関学会第60 (平成10年度春季) 学術講演会講演論文集, (1998年5月), P. 156～163.
- (3) 西田ら, 他5名, 日本機械学会講演論文集No. 984-1 (1998年3月), P. 39～40.
- (4) 西田ら, 他9名, 日本船用機関学会第61回 (テクノオーション) (平成10年11月25～27日秋季) 学術講演会講演論文集, P. 13～16.
- (5) 西田ら, 他9名, 日本機械学会講演論文集No. 984-2 (1998年10月関西支部第256回講演会; 滋賀県立大), P. 11-5～6.
- (6) 西田ら, 他9名, 日本船用機関学会誌 第34巻第2号(1999-2), P. 101～105.
- (7) Nishida, et al. 9, "Application of Waste Plastic Disposals to Diesel Engines", Proceedings of 5th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, (1999-Oct), Shanghai, China.
- (8) Dan, et al. 4, "Effect of Sulfur compound in fuel oil to engine performance and exhaust emission", Proceedings of 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference (vol. 3), (2000-Oct), Kobe, Japan.
- (9) 西田ら, 他18名, エアロゾル科学・技術研究討論会第17回平成12年8月2～4日) 学術講演会講演論文集, P. 7～9.