

「漂着ゴミ」由来の廃プラスチック混合油を使用したディーゼル機関の燃焼特性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2024-08-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 溝口, 弘泰, 長谷川, 勝男, 古川, 秀雄, 宇野, 秀敏, 大貫, 伸 メールアドレス: 所属:
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2010486

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



原著論文

「漂着ゴミ」由来の廃プラスチック混合油を使用した ディーゼル機関の燃焼特性

溝口弘泰^{*1}・長谷川勝男^{*1}・古川秀雄^{*2}・宇野秀敏^{*2}・大貫 伸^{*3}

Combustion Characteristics of Diesel Engines Employing Diesel Fuel Blended with Waste Plastic Derived from Shore Litter

Hiroyasu MIZOGUCHI, Katsuo HASEGAWA, Hideo FURUKAWA,
Hidetoshi UNO and Shin OHNUKI

Large volumes of litter have washed ashore onto Japanese coasts, at a rate of approximately 150,000 tons per year. This problem ruins scenery and destroys ecosystems. A new recycling system of wreckage litter can be developed if styrene oil obtained by recovering and liquefying styrene foam from the litter can be blended with gas oil for equipments such as fishing boat engines. In the present research, diesel fuel oil was blended (at ratios of 5, 10, 15 and 20wt%) with styrene oil extracted from shore litter (styrene foam). Then engine tests were conducted, and their combustion characteristics, exhaust characteristics and durability were compared and examined. Since the styrene oil had low kinetic viscosity, the blend ratio of 20wt% was the use limit. The fuel consumption, the exhaust temperature and the CO₂ concentration of each blended oil were compared to the gas oil, and no particular changes were observed. NO_x concentration and smoke in the exhaust gas tended to be higher in the blended oil than in the gas oil. A 32 hours durability test was performed using blended oil (10wt%). After the test, the cylinder head was opened, and fouling of the combustion chamber was compared to the one in which gas oil was used. The results showed that carbon deposition and fouling on the back of intake valves were not different. This suggests that diesel fuel oil blended with styrene oil produced by liquefying styrene foam from the shore litter at up to 20 wt% can be used as a fuel for diesel engines.

2010年3月30日受付, 2010年7月23日受理

日本の海岸に漂着する大量のゴミは年間約15万トンと概算(平成12~17年度の漂着状況調査結果より(財)環日本海環境協力センター試算)され, 美観を損ねるだけでなく生態系まで破壊することより長年にわたり問題視されてきた(写真1)。特に, 季節風や海流の関係で, 漂流ごみの通り道となっている離島の状況は極めて深刻である。2006年に環境省が行った調査を基に, 日本海

難防止協会が算定した結果によると, 容積率約45%を発泡スチロール類が占めていた。海水分などを含んでいる海岸漂着ゴミは, 発泡スチロールなどのプラスチック製品が混在し, ダイオキシン等の有害物質の発生防止の観点から現場焼却などの簡易な方法で処理することはできず, 高温焼却が可能な適切な施設で処理する必要がある。日本の多くの離島は, 通常そのような施設が整備さ

*1 独立行政法人水産総合研究センター 水産工学研究所

〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7

National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency, Hasaki 7620-7, Kamisu, Ibaraki 3, Japan

hmizogu@affrc.go.jp

*2 サンライフ株式会社

*3 社団法人 日本海難防止協会



写真 1. 日本の離島に漂着するゴミ（長崎県対馬）

れておらず、減容化した上で最寄りの処理施設まで海上輸送するなどの対応を行っている。そのため、離島ならではの経済負担や新たな環境負荷を生み出しているのが現状である。離島における海岸漂着ゴミの処理は離島を有する地方自治体の財政にとって重要な問題である。

一方、廃プラスチックを油化し燃料として使用する技術は、1972年頃から開発が進められ¹⁾、現在では、いくつかの油化の方法ならびにシステムが考案され、大型プラントで実用化されている²⁻⁵⁾。プラスチックの一種である発泡スチロールは、油化の技術によって燃料油に変換することが可能である。表1に発泡スチロールより生成される油の組成（ガスクロマトグラフィ分析）について示す（サンライフ(株)提供）。抽出された液体の約60%はスチレンである（以下スチレン油）。スチレン油は灯油などと同じ引火性の液体であり、ディーゼル機関やバーナーなどの燃料として研究が進められ⁶⁻⁹⁾、実際に利用されている。しかしこれまで、漂着ゴミの中にある発泡スチロールからスチレン油が生成されたことはなく、さらには、漂着ゴミ由来のスチレン油が燃料として使用された事例はない。日本の離島で収集された漂着ゴミを油化することによって生成されたスチレン油を離島内のエネルギーとして有効活用することができれば、離島の海岸の美化や廃棄コストの削減が可能となり、さら

にスチレン油を漁船エンジン等に使用することができれば新しい循環サイクルを構築することができる。

本研究では、漂着ゴミから抽出されたスチレン油がディーゼル機関の燃料として使用可能かどうかを検討するためエンジン試験を行い、燃焼特性ならびに排気特性、耐久性、循環特性について明らかにした。

材料と方法

スチレン油生成方法 廃プラスチックのリサイクル手法としては、熱分解油化、熱減容ブロック化、高炉吹込みなどの開発が進められている²⁻⁴⁾。今回の対象となる漂着ゴミは種々さまざまな形状と特性を持った発泡スチロールであるが、漂着ゴミならではの問題である塩分含有や泥等の異物を含んでいるため、これに対応可能な熱分解油化の手法を用いた。また、油化装置のサイズは、離島で使用する場合の輸送ならびに設置コスト、機器のメンテナンス等を考え、コンテナ内に集約できるサイズとした（写真2）。図1に本試験で使用したスチレン油を精製した油化プラントシステム構成図を示す。

海岸より回収された漂着発泡スチロール（大半がフロートや魚箱）は専用の破砕機に投入され、粒径が8mm程度まで細かく破砕される。次に、この破砕片はス

表 1. 漂着ゴミ（発泡スチロール）より生成される油の組成（ガスクロマトグラフィ分析）

生成油成分	分子式	ガスクロ・ピーク面積比%	分子量	沸点(°C)	融点(°C)	引火点(°C)	発火点(°C)	蒸気圧(kPa)(20°C)	比重(20°C)
ベンゼン	C ₆ H ₆	1.0-1.0	78.11	80.1	5.5	-11.0	562.2	12.70 (25°C)	0.8765
トルエン	C ₆ H ₅ -CH ₃	5.9-6.7	92.14	110.6	-95.0	5.0	480.0	2.90	0.8669
エチルベンゼン	C ₆ H ₅ -C ₂ H ₅	4.9-4.7	106.17	136.2	-95.0	18.0	432.0	0.90	0.8660 (25°C)
スチレン	C ₆ H ₅ -CH=CH ₂	61.1-56.6	104.15	145.2	-30.6	32.0	490.0	0.60	0.9044
クメン	C ₆ H ₅ -C ₃ H ₇	0.4-0.5	120.19	152.0-153.0	-96.0	31.1-46.0	420.0-424.0	—	0.8620
α-メチルスチレン	C ₆ H ₅ -CH=CH-CH ₃	11.9-11.2	118.18	165.4	-23.2	54.0	—	0.25	—
1,3-ジフェニルプロパン	(C ₆ H ₅) ₂ -C ₃ H ₆	4.7-	208.2	—	—	—	—	—	—
スチレン2量体(ダイマ)	(C ₆ H ₅ -CH=CH ₂) ₂	—	—	—	—	—	—	—	—
スチレン3量体(トリマ)	(C ₆ H ₅ -CH=CH ₂) ₃	10.1-19.3	—	—	—	—	—	—	—
その他	—	—	—	—	—	—	—	—	—



写真2. 離島におけるスチレン油生成油化装置外観

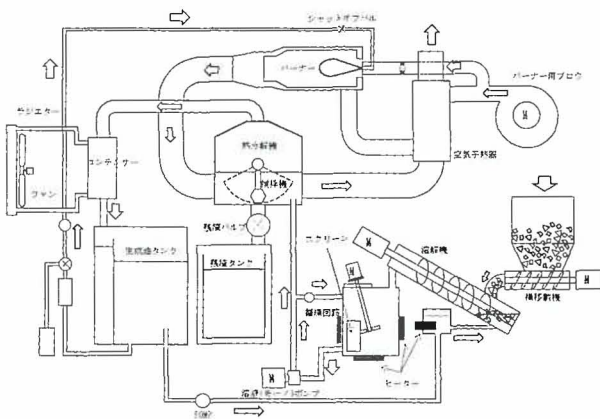


図1. 油化プラントシステム構成図

クレーンコンベヤで溶解機に供給される。溶解機では、破砕片の量に比例したスチレン油（これまでに生成された油）が供給されており、破砕片とスチレン油は、混合・攪拌されスラリー状の溶解液となり、溶解液タンクに入る。溶解液は粘度も高く、発泡スチロールに付着した塩分・泥等の異物も含んでいるが、このような溶液にも高い送油力を有するポンプにより一定量を連続的に熱分解釜へ供給される。熱分解機に入った溶解液は、燃焼ガスにより350～400度に加熱され、発泡スチロール（主成分はポリスチレン：スチレン分子が数千～数万個結合した高分子化合物）は化学的に分解され、大部分がスチレン（ $C_6H_5 \cdot CH=CH_2$ ）の蒸気となる。ただし、分解過程でスチレンが2～3個結合したオリゴマーやスチレン派生物質も生成されるため、複数の少量成分が混じった蒸気となる。熱分解釜で発生した蒸気は凝縮器に送りこまれ、約50～60度に冷却・液化され生成油タンクへ送られる。生成油タンクでは比重を利用して油水分離を行い、水を除いた油分を抽出する。漂着発泡スチロールに付着した塩分や泥等の異物は、残渣として熱分解機より排出

される。今回使用した油化装置は、漂着発泡スチロールの水分含有量や装置の運転条件にもよるが、概略1kgの漂着発泡スチロールから約0.6kgのスチレン油を精製することが可能である。

エンジン試験に使用した供試燃料の性状分析 エンジン試験は、日本の離島で回収された漂着ゴミ（発泡スチロール）から生成されたスチレン油と軽油の混合油を使用した。スチレン油は軽油と比較してセタン指数（スチレン油単独では測定不能）と動粘度が低く、そのままの状態ではディーゼル機関の燃料として使用不可能と判断し、軽油と混合し供試燃料油とした。混合比率は、5 wt%、10 wt%、15 wt%、20 wt%（混合率10 wt%は、重量割合で軽油90%：スチレン油10%の意味）とした。本試験に供試された軽油、スチレン油、10 wt%混合油、20 wt%混合油の性状（密度、引火点、動粘度、流動点、目詰まり点、セタン指数、10%残油残留炭素分、総発熱量、灰分、水分、硫黄分、中和価）については、日本工業規格（JIS）で定められた試験方法（それぞれ JIS K 2249, 2265, 2283, 2283, 2269, 2288, 2280, 2270, 2279, 2272, 2275, 2541-6, 2501）によって分析を行った。

エンジン試験装置ならびに試験方法 試験は水産工学研究所機械実験棟に設置してある KUBOTA ER2500DI（単気筒横型ディーゼル機関）を用いて行った。エンジン主要目を表2に示す。

表2. エンジン主要目

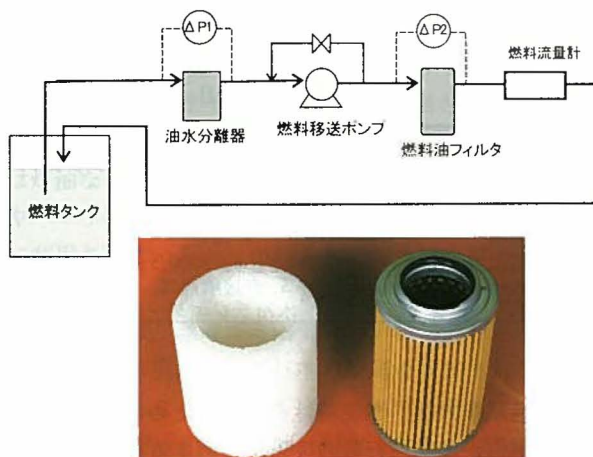
機関名称	KUBOTA ER2500DI
型式	横型4サイクルディーゼルエンジン
シリンダ数	1
シリンダ径×行程	118×108 [mm]
総行程容積	1.181 [L]
連続定格出力	14.7 [kW] / 2200 [rpm]
燃焼方式	直接噴射式
冷却方式	水冷ラジエター式

燃焼特性試験方法 燃焼特性を調べるためのエンジン試験は、出力が機関回転数の3乗に比例する船用負荷特性に従い、負荷率を1/8 (1.84 kW / 1100 rpm), 1/4 (3.68 kW / 1386 rpm), 2/4 (7.36 kW / 1746 rpm), 3/4 (11.03 kW / 1999 rpm), 4/4 (16.18 kW / 2200 rpm) と順次変化させながら試験を行った。計測項目は、機関回転数、動力計荷重、燃料流量、NOx濃度、CO濃度、CO₂濃度、Smoke、排気温度、筒内圧である。使用した燃料は、軽油、混合油5 wt%、10 wt%、15 wt%、20 wt%である。計測時間は、それぞれの負荷率で連続30分である。

耐久試験方法 長時間にわたりスチレン油混合油を使用してもエンジンに不具合を生じさせないことを確認する必要がある。そこで、実用性を評価するために、軽油ならびに混合油10 wt%を使用した32時間の耐久運転試験

(1日8時間×4日間、運転条件1/4負荷)を行い、シリンダヘッドを開放して燃焼室の汚れ(カーボン堆積)状況と潤滑油(エンジンオイル)への影響を調査した。試験を実施するに当たり開始前に潤滑油交換ならびに燃焼室の掃除を行った。耐久試験時の計測項目は、機関回転数、動力計荷重、燃料油流量、CO濃度である。エンジンオイルの性状(密度、残留炭素分、灰分、水分、引火点、動粘度、粘度指数、中和価、塩基価、不溶解分、燃料希釈)については、JIS規格及び日本石油学会規格(JPI)で定められた試験方法(それぞれJIS K 2249, 2270, 2272, 2275, 2265, 2283, 2283, 2501, 2501, JPI-5S-18-80, JPI-5S-23-04)によって分析を行った。

燃料系模擬装置での循環試験方法 混合油10wt%が燃料配管ならびに燃料フィルタで循環することによって、どのような問題が発生するか確認するため、燃料系模擬装置を用いて連続循環試験を行った。装置は、燃料油タンク、油水分離器(1次フィルタ)、燃料フィードポンプ、燃料フィルタ(2次フィルタ)と流量計で構成されている。油水分離器と燃料フィルタは、それぞれ入口(ΔP_1)と出口の圧力差(ΔP_2)の圧力損失を計測した。燃料油タンクに混合油10wt%を約16kg補給し、30日にわたり連続的に循環試験を行った。写真3に循環試験システム構成図・使用フィルタを示す。



油水分離器使用(200 μ m) 燃料油フィルタ使用(5 μ m)

写真3. 循環試験システム構成図・使用フィルタ

結果

エンジン試験に使用した供試燃料の性状分析 表3にJIS規格で定められた試験方法で分析された供試燃料油性状の分析結果を示す。図2に軽油ならびに混合油の動粘度・温度特性を示す。軽油規格(JIS K 2204-1997)の動粘度(30 $^{\circ}$ C)は、1号軽油で2.7 mm^2/s 以上、3号軽油で2.0 mm^2/s 以上となっており、20wt%混合油の動粘度が2.4 mm^2/s であるので問題ない範囲であった。しかし、これ以上の混合率ではセタン指数と動粘度が使用基準を

下回ることが推測されるため、今回の試験では20wt%混合までとした。図3に使用した油の蒸留特性を示す。スチレン油は軽油と比較して揮発性が高く、大半がスチレンの沸点145.2 $^{\circ}$ Cで留出した。混合油10wt%の蒸留特性は、軽油100%とほぼ同様であったが、低沸点領域で混合油の留出温度が軽油と比較して低下する傾向となった。混合油20wt%ではその影響がより顕著になった。

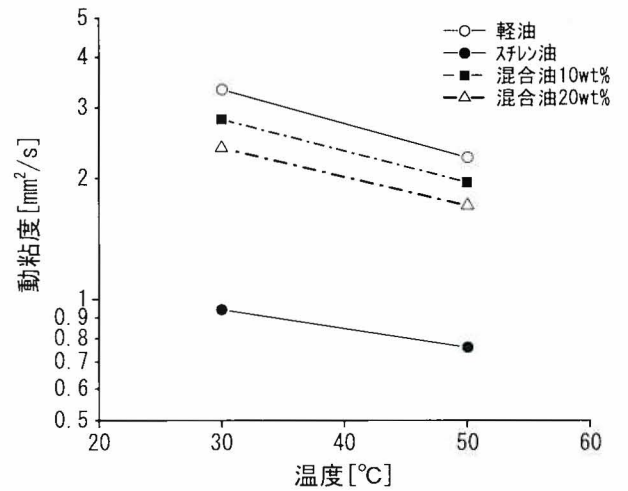


図2. 動粘度・温度特性

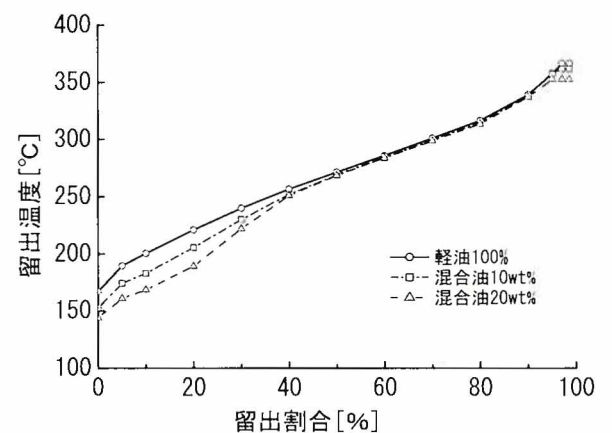
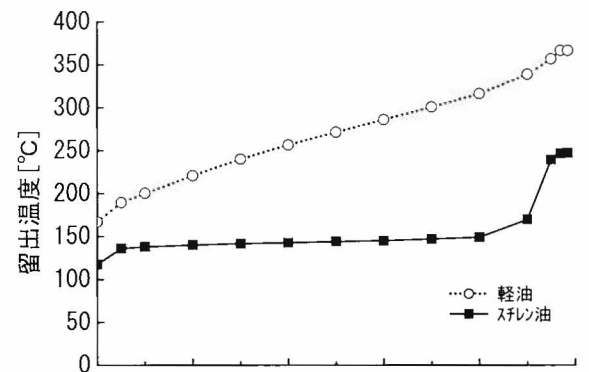


図3. 蒸留特性

表3. 供試燃料油性状の分析結果

性状分析項目	試験方法	単位	軽油	スチレン油	スチレン油	スチレン油
					10wt%混合軽油	20wt%混合軽
密度：振動式 15℃	JIS K 2249	g/cm ³	0.8301	0.9071	0.8346	0.8450
引火点(PMCC法)	JIS K 2265	℃	64.5	<25.0	53.5	46.5
動粘度：30℃	JIS K 2283	mm ² /s	3.323	0.943	2.803	2.377
動粘度：50℃	JIS K 2283	mm ² /s	2.254	0.76	1.954	1.71
流動点	JIS K 2269	℃	-17.5	<-50.0	-20	-15
目詰まり点：CFPP	JIS K 2288	℃	-13	<-35	-15	-13
セタン指数	JIS K 2280	-	54.5	測定不能	51	46.1
10%残油残留炭素分	JIS K 2270	mass%	0.01	0.02	0.02	0.05
総発熱量	JIS K 2279	J/g	45.850	44.600	45.790	45.630
灰分	JIS K 2272	mass%	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
水分(カールフィッシャ法)	JIS K 2275	mass ppm	72	1900	75	163
硫黄分：紫外蛍光法	JIS K 2541-6	mass ppm	7	3	7	9
中和価：酸化	JIS K 2501	mgKOH/g	0.02	0.65	0.04	0.31

燃焼特性試験 図4に燃焼特性試験時系列データ一例を示す。図5に排気ガス特性ならびに燃費率結果を示す。混合油の排気温度ならびにCO₂排出量は軽油と比較して、特段の変化は見られなかった。CO濃度は混合油5wt%使用時では軽油と比較して高くなったが、それ以外の混合油では特段の違いは見られなかった。混合油のNOx濃度とスモークは軽油と比較して増加傾向となった。燃費率は、軽油と比較して同等程度であった。図6に指圧線図(1/4負荷)を示す。軽油と比較して混合油使用での着火遅れが確認された。また、スチレン油の混合率が高くなるに従い着火遅れは長くなる傾向であった。

耐久試験 図7に32時間耐久運転(1日分)の時系列データ一例を示す。どちらの燃料油とも1/4負荷の連続運転時では燃料流量とCO濃度とも一定で推移しており、燃焼状態は安定していた。写真4に耐久試験前シリンダヘッド・ピストン・吸排気弁を示す。写真5に耐久試験後シリンダヘッド・ピストン、写真6に耐久試験後吸排気弁・噴射ノズルを示す。スチレン混合油の燃焼室の汚れは軽油と比較して同等のカーボン堆積状況であった。表4に耐久試験後のエンジンオイル性状の分析結果を示す。試験開始前のエンジンオイル性状の分析結果と比較して、混合燃料10wt%使用後の中和価：酸価の項目で値が大きくなっていた。

燃料系模擬装置での循環試験 図8に循環試験中の圧力損失ならびに循環流量の経時変化を示す。循環試験中の循環流量ならびに、フィルタ差圧もほぼ一定であった。また、混合油10wt%が燃料系のフィルタ目詰まり、配管詰まりなどの不具合は観察されなかった。

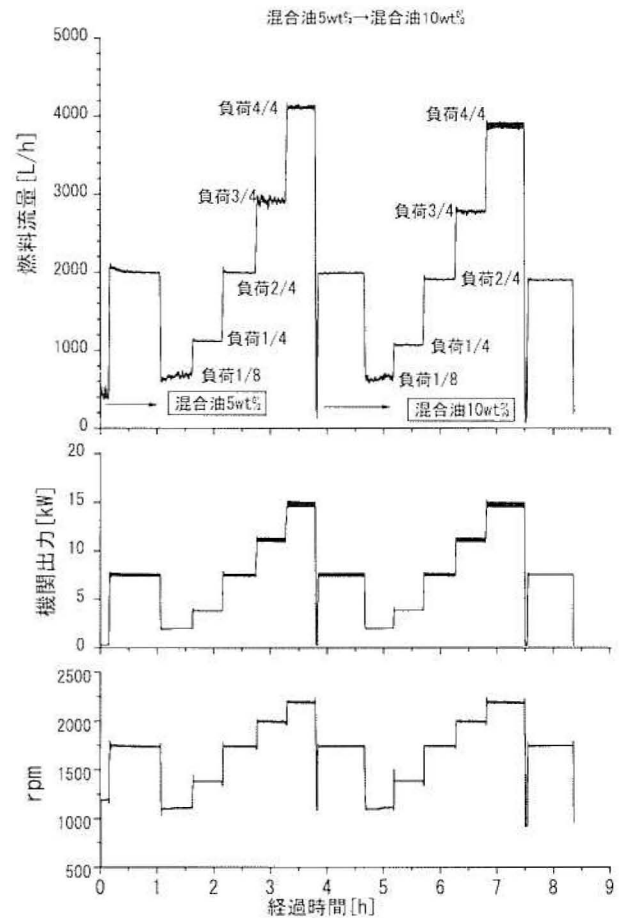


図4. 燃焼特性試験時系列データ一例

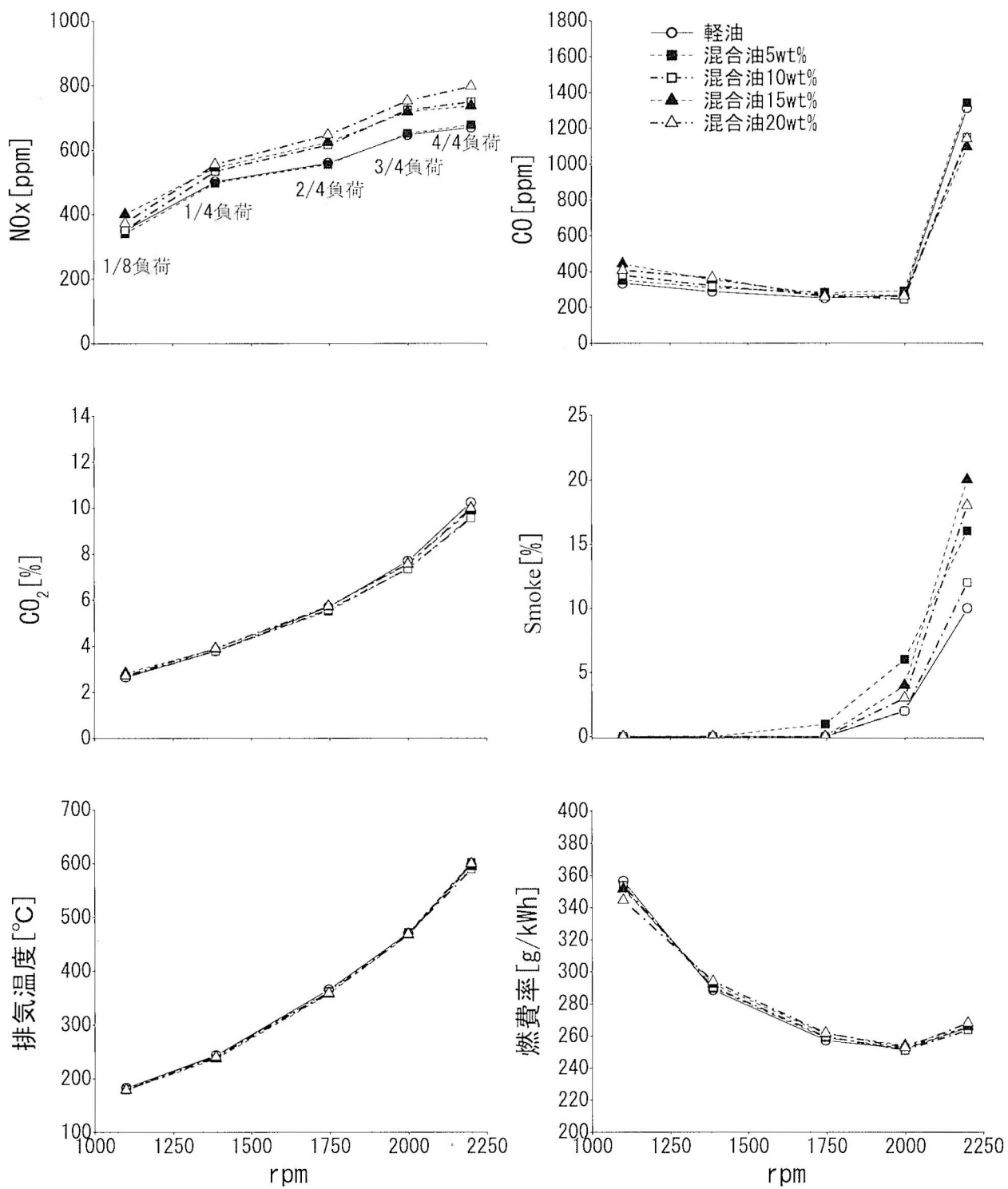


図 5. 排気ガス特性ならびに燃費率結果

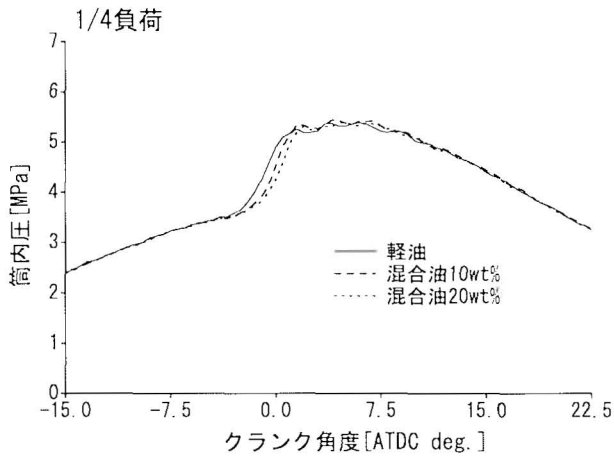


図 6. 指圧線図 (1/4 負荷時)

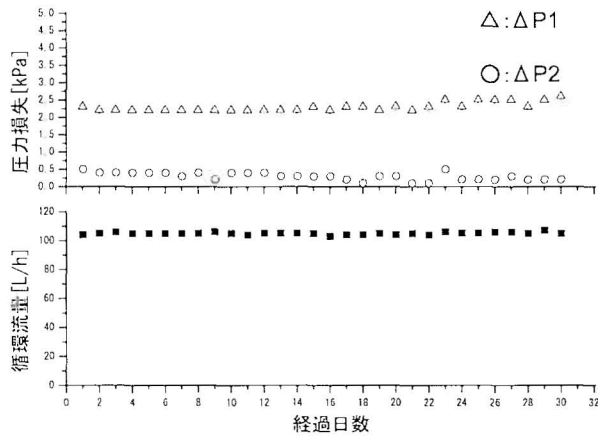


図 8. 圧力損失ならびに循環流量の経時変化

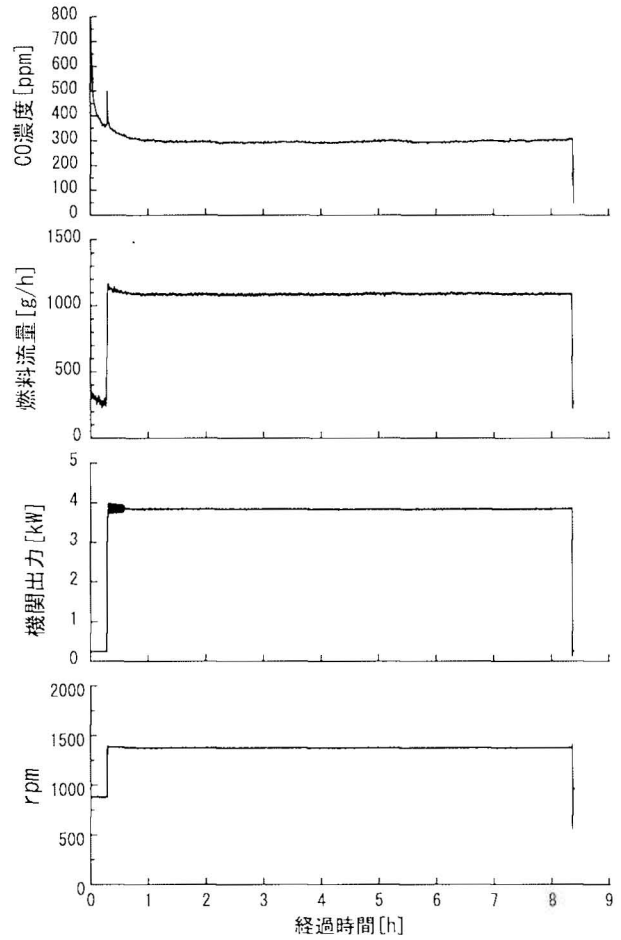


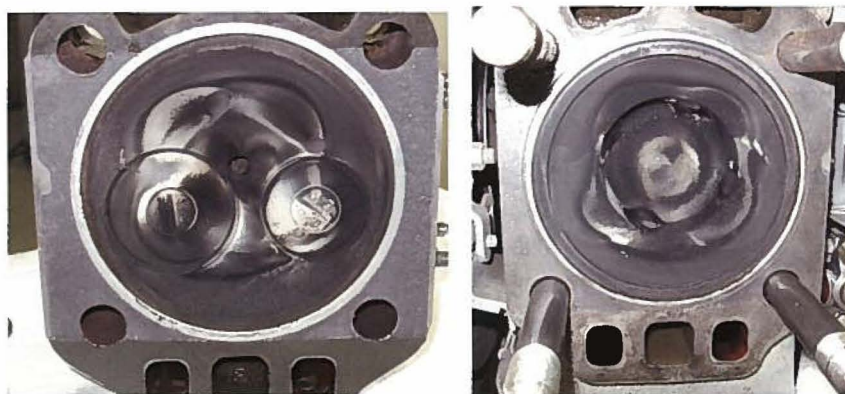
図 7. 耐久試験時系列データ一例

表 4. エンジンオイル性状の分析結果

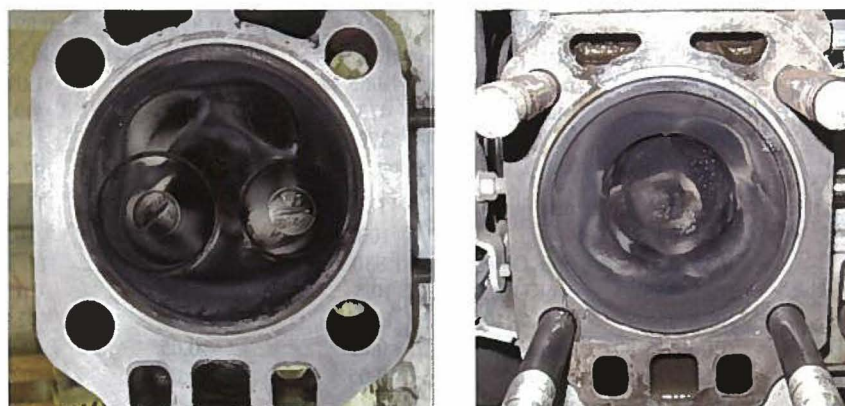
性状分析項目	試験方法	単位	軽油運転使用前		混合油10wt% 試験使用前		混合油10wt% 試験使用後	
			軽油運転使用前	軽油運転使用後	混合油10wt% 試験使用前	混合油10wt% 試験使用後		
密度：振動式 15°C	JIS K 2249	g/cm ³	0.8937	0.8938	0.8937	0.8937		
残留炭素分：マイクロ法	JIS K 2270	mass%	1.52	1.57	1.51	1.53		
灰分	JIS K 2272	mass%	1.065	1.081	1.095	1.041		
水分：カールフィシャー法	JIS K 2275	mass ppm	473	440	493	393		
引火点(COC法)	JIS K 2265	°C	270	260	270	268		
動粘度：40°C	JIS K 2283	mm ² /s	97.38	95.19	97.59	95.71		
動粘度：100°C	JIS K 2283	mm ² /s	11.33	11.16	11.31	11.18		
粘度指数	JIS K 2283	-	103	103	102	102		
中和価：酸価	JIS K 2501	mgKOH/g	1.830	1.840	1.770	2.300		
塩基価：塩酸法	JIS K 2501	mgKOH/g	10.5	10.3	10.5	10.2		
塩基価：過塩素酸法	JIS K 2501	mgKOH/g	13.1	13.1	12.9	12.9		
不溶解分：ペンタンB法	JPI-5S-18-80	m%mass	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
不溶解分：トルエンB法	JPI-5S-18-80	m%mass	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
燃料希釈：軽油	JPI-5S-23-04	m%mass	-	0.2	-	0.3		



写真4. 耐久試験前シリンダヘッド・ピストン・吸排気弁

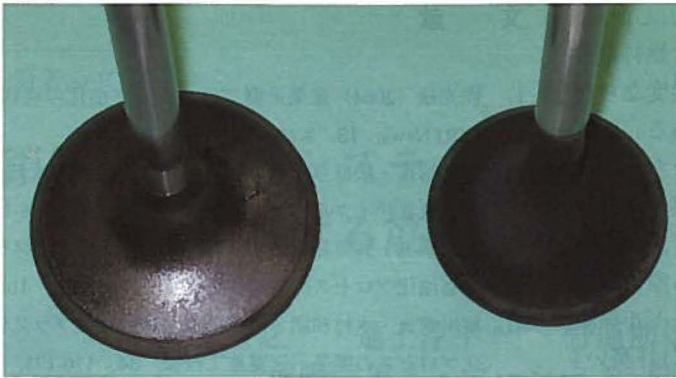


32 時間耐久試験後 (軽油使用)



32 時間耐久試験後 (混合油 10wt/%使用)

写真5. 耐久試験後シリンダヘッド・ピストン



32 時間耐久試験後（軽油使用）



32 時間耐久試験後（混合油 10wt%使用）

写真 6. 耐久試験後吸排気弁・噴射ノズル

考 察

漂着ゴミ由来のスチレン油を軽油と混合しディーゼル機関で軽油と同等に使用することができるか検証するために本研究を行った。

表 1 の燃料性状の分析結果よりスチレン油のセタン指数や動粘度は、軽油と比較して低いことが分かる。ディーゼル機関運転の安全上、軽油規格の動粘度下限を大きく下回る動粘度範囲での使用を避けるため、軽油と混合して使用することとした。

混合率の選定を行うため混合油を作成し、動粘度と蒸留特性を検証した（図 2, 3）。前述したように混合率 20 wt% を超えるとディーゼル機関で使用できる燃料の使用基準を下回るため、ディーゼル機関の不具合発生の可能性が高まる。そこで、混合率混合油 20 wt% までではディーゼル機関の燃料として使用可能である。燃焼特性は軽油と比較して混合油使用時で着火遅れ期間の増加が確認された。これはスチレン油のセタン指数が低く、着

火点が高いという特性によると考えられる。これにより予混合燃焼期間が増加傾向となり、筒内圧最高値（Pmax）が大きくなることから NOx 濃度が増大したと考えられる。

32 時間耐久試験後ヘッドを開放し燃焼室の汚れ具合を軽油使用後と比較した。カーボンの付着具合ならびに吸排気弁の汚れについては軽油と比較して、同等の付着具合であった。表 2 のスチレン油性状分析結果に示されるようにスチレン油の中和価：酸価は軽油より大きくなっており、その影響により、耐久試験後のエンジンオイルの中和価：酸価が大きくなったと考えられる。今回の試験では 32 時間運転で検証を行ったが、さらに長時間運転での影響が懸念される。そのため、今後スチレン油中での浸漬試験、または、長時間運転により燃料ポンプのプランジャや噴射ノズルのニードル弁など燃料油と接する部材の酸化による錆の発生ならび腐食について確認する必要がある。

燃料系模擬装置での循環試験では、フィルタの目詰ま

りならびに配管の詰まりは確認されなかった。しかし、試験は屋内で行われ、循環試験に使用した混合燃料量も約 16 kg と少なかった。実際使用する際には湿度ならびに外気温の高いところで使用される可能性がある。船用機関で使用する際には、使用する燃料タンクならびに使用する場所の外的要因を考慮して使用する必要がある。

スチレン油は揮発性の高い低沸点成分が多く、スチレン油特有の「臭い」が発生する。常時使用する際は、密閉してあり「臭い」は感じられないが、ディーゼル機関のメンテナンスでフィルタ交換などを行う際には「臭い」の問題が起こると考えられる。そのためメンテナンスを行う際の換気対策が必要になると考える。

スチレン油と軽油の混合燃料は、使用するディーゼル機関の定期点検ならびにエンジンオイルの管理等をしっかりと行うことにより使用可能であると考えられる。これまで離島に流れ着いたゴミは、廃棄物として処理しなければならず、処理費用は離島を有する地方自治体の財政を圧迫し続けてきた。そのため、漂着ゴミから燃料を生成し使用することは、漂着ゴミ除去方法として画期的なものであると考えられる。今回の試験で使用した漂着ゴミは、発泡スチロールのみであったが、漂着ゴミの中には、ボンデンに用いられている大きな浮子や漁網、ペットボトル、プラスチックなどがある。これらも元来石油製品であり、油化可能な物質である。今後、発泡スチロールだけではなく石油に由来した漂着ゴミを油化プラントによって燃料へ変換することができ、さらに、安定した生産量ならびに品質を確保できるのであれば、漂着ゴミ回収、油化、エネルギー利用というサイクルが構築され、離島でのゴミ問題さらには石油資源問題を解決できる可能性がある。

謝 辞

本研究は日本財団助成事業「[漂着ごみ]の油化に関する調査及びモデル地区の設立」の一環として実施した。財政面で御支援頂いた同財団に対し、紙面を借りて深く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 梶光雄 (2004) 産業系廃プラスチック油化の現状と課題. FSRJ News, 13, 8-12.
- 2) 末岡靖裕・松原亘・石原伸夫 (1999) 廃プラスチックのケミカルリサイクル技術. 三菱重工技報, 36, 146-149.
- 3) 北村幸夫・貝原裕二・米田健一 (1998) 廃プラスチック熱分解油化プロセスの開発. 三菱重工技報, 35, 414-417.
- 4) 桜田秀夫・木村和明・堀添裕俊 (1997) 廃プラスチック油化プロセスの開発. 三菱重工技報, 34, 170-173.
- 5) Ishihara, Y., K. Saido, and T. Kuroki. (2003) Economic Evaluation of Small Liquefaction Plants for Waste Plastics. Journal of the Japan Petroleum Institute, 46, 77-83.
- 6) 西田修身・藤田浩嗣・原野亘 (1999) 廃プラスチック燃料油 (WPD) のディーゼル機関への適用. 日本船用機関学会誌, 34, 101-105.
- 7) 西田修身 (1999) 次世代船用燃料油への廃プラスチックの適用. 日本船用機関学会誌, 34, 647-649.
- 8) 西田修身・藤田浩嗣・原野亘 (2000) 廃プラスチック燃料油 (WPD) のディーゼル機関への適用 - 残さ油の場合 -. 日本船用機関学会誌, 35, 302-308.
- 9) 光原好人・V. A. Soloiu・中西康文 (2001) 廃プラスチック・重油混合燃料のディーゼル機関への適用. 日本船用機関学会論文集 (B 編), 67, 230-236.