

船用ディーゼル機関におけるバイオ燃料利用に関する研究  
—船用ディーゼル機関におけるパーム油 FAME の燃焼実験  
および FAME 混合油の混合安定性実験—

西尾 澄人\*, 福田 哲吾\*

**Use of biofuel in marine diesel engines**  
—Combustion experiment of palm oil FAME in marine diesel engine  
and mixing stability experiment of FAME mixed oil—

by

NISHIO Sumito \* and FUKUDA Tetsugo \*

Abstract

In April 2018, the International Maritime Organization (IMO) began its initial strategy for reducing greenhouse gases (GHGs), which outlined the following goals for the international shipping sector to achieve by 2050: reducing CO<sub>2</sub> emissions per transport work by 70% and total GHG emissions by at least 50% compared with 2008. As for SO<sub>x</sub> emissions from ships, the 0.5% global cap on the sulfur content of any fuel oil on board ships took effect on 1 January 2020. Biofuels can potentially contribute to GHG reduction as they are carbon neutral and can be used as the drop-in fuel without changing the engine system. Moreover, they are generally compliant with the sulfur cap. For these reasons, trial uses of biofuels have been increasing in the marine sector. In this study, we used fatty acid methyl ester (FAME) made from palm oil in a marine diesel engine to investigate its effect on combustion and exhaust properties. We also investigated the mixing stability of the mixed oil of FAME and heavy oil. The results showed that FAME had a higher NO<sub>x</sub> concentration and lower smoke concentration than marine diesel oil (MDO) at all engine loads. In addition, FAME ignites more quickly than MDO. In the 100-hour endurance engine test using B30 fuel, there were no particular problems in engine performance. In addition, we found that the mixed oil of FAME and heavy oil was stable in this test.

---

\* 環境・動力系

原稿受付 令和4年4月22日

審査日 令和4年5月24日

## 目 次

1. まえがき	45
2. 船用ディーゼル機関におけるパーム油 FAME の燃焼実験	46
2.1 実験装置及び実験方法	46
2.1.1 実験用ディーゼル機関	46
2.1.2 使用燃料	47
2.1.3 パーム油 FAME の凝固点	47
2.1.4 計測装置	48
2.1.5 実験方法	48
2.2 実験結果及び考察	49
2.2.1 FAME の混合割合が排ガスおよび機関特性に与える影響	49
2.2.2 FAME と A 重油の混合油 (B30) を用いたエンジン耐久テストの結果	52
3. FAME 混合油の混合安定性実験	54
3.1 実験装置及び実験方法	54
3.1.1 実験装置	54
3.1.2 使用燃料	55
3.1.3 実験方法	55
3.2 実験結果及び考察	55
4. まとめ	57
References	57

## 1. まえがき

地球温暖化対策や SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 対策が重大な課題となっている。特に地球温暖化に関しては、IMO において、2025 年までに 2008 年比で CO<sub>2</sub> 排出量を少なくとも 30%改善, 2030 年までに 40%改善, 2050 年までに 70%改善, GHG (温室効果ガス) 排出総量を 2050 年までに最低 50%削減という高い目標が掲げられている<sup>1)</sup>。

このため、再生可能エネルギー (風力, 太陽光, 水力) を利用して製造した水素, アンモニア並びに船上 CO<sub>2</sub> 回収やバイオマス中の炭素を利用した合成メタンなどのカーボンフリー燃料の利用が期待されている。

一方、バイオ燃料は、カーボンニュートラルな燃料として扱うことができるため、CO<sub>2</sub> 排出量をゼロとみなすことができるとともに、燃料に硫黄をほとんど含まず、SO<sub>x</sub> 排出量もほとんどない上に、エンジンを改造することなくそのまま使用できるドロップイン燃料として、特に上記のカーボンフリー燃料への移行期において重要な役割を果たすと言われている<sup>2)</sup>。

バイオ燃料の種類としては、FAME (Fatty Acid Methyl Ester) や HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) があげられる。FAME は植物油などの油脂をエステル交換反応したものである。HVO は植物油などの油脂を水素化処理して作られるものであり燃料油が酸化に対して安定になるなどのメリットがある。しかし通常、HVO は FAME よりコストが高くなるという課題があり、船用燃料油としての導入がすぐにできるものではない。

今回は、比較的成本が安く、導入が容易と考えられる FAME を用いて実験を行ったので、報告をする。

バイオ燃料である FAME については、小型ディーゼル機関に用いた実験結果はある。例えばバイオ燃料をディーゼル機関に適用する際、粘度を低くするためや着火性の向上のためにエステル化する技術がよく知られている。ディーゼル油代替燃料であるバイオディーゼル燃料 (FAME) が排ガスに与える影響については、自動車用ディーゼル機関に対しての研究が進んでいる。FAME を用いたエンジン実験の結果については下記のようなものがある。

一般的には米国再生可能エネルギー研究所 (NREL) の調査<sup>3)</sup> にあるように、FAME の軽油への混合率を増やすと、NO<sub>x</sub> は増加し、PM, HC, CO は大幅に減少すると言われている。(100%FAME の場合、軽油に比べて NO<sub>x</sub> は 10%増加, CO, PM は約 50%低減, HC は 70%低減)

武田ら<sup>4)</sup> は、新品の植物油や廃食油をメチルエステル化した燃料をエンジン YANMAR L60A (4.05kW/3600rpm, ボア×ストローク : 75mm×62mm) に用いてエンジン実験を行っている。その結果、メチルエステル化した燃料は軽油に比べて熱効率は若干悪くなることや、着火遅れは短くなることなどが分かっている。

奥井ら<sup>5)</sup> は、廃食油 FAME を直噴式ディーゼル機関 YANMAR L70A (4.4kW/3600rpm, ボア×ストローク : 75mm×62mm) に用いてエンジン実験を行っている。その結果、軽油に比べて FAME 混合油は、PM は減少傾向が顕著であり、NO<sub>x</sub> は同等であった。

奥井ら<sup>6)</sup> は、廃食油 FAME を急速圧縮膨張装置 RCEM (rapid compression and expansion machine, ボア×ストローク : 100mm×450mm) を用いて噴霧燃焼実験を行っている。そこで、100%廃食油 FAME は軽油に比べて噴霧特性が悪化することが分かっている。特に噴霧角の減少が顕著である。

鈴木ら<sup>7)</sup> は、廃食油 FAME を急速圧縮膨張装置 RCEM (rapid compression and expansion machine, ボア×ストローク : 100mm×450mm) を用いて噴霧燃焼実験を行っている。そこで、噴霧燃焼機構および火炎内すす生成機構の特性評価を行っている。軽油に比べて、100%廃食油 FAME のすす発光強度値は、時間の経過とともに顕著な減少傾向を示している。

浜崎ら<sup>8)</sup> は、パーム油メチルエステル (PME), なたね油メチルエステル (RME) および軽油を単気筒, 水冷, 横型直噴式 4 サイクルディーゼル機関 (11.77kW/2200rpm, ボア×ストローク : 110mm×106mm) に用いてエンジン実験を行っている。その結果、パーム油メチルエステルは軽油に比べて熱効率は同じか若干向上し、NO<sub>x</sub> と排気煙濃度が同時低減し、HC も低減することなどが分かっている。

崔ら<sup>9)</sup> はジェットロファから作られた FAME (JME) と軽油とそれらの混合油 J40 (JME : 軽油 = 40 : 60) を 4 ストロークディーゼル機関 (4 気筒, 103kW/4000rpm, ボア×ストローク : 85.0mm×97.1mm) に用いてエンジン実験を行っている。その結果の図を見ると、J40 は軽油に比べて NO<sub>x</sub> は増加せず、Soot は大幅に減少し、THC, CO

も減少し、また、燃費の悪化も見られない。パイロット噴射や高圧噴射やEGRを適用した場合も、J40のほうが軽油に比べて燃焼が促進され、Sootが低減している。

吉本ら<sup>10)</sup>は、菜種油、大豆油、パーム油を原料としたFAMEを4ストロークディーゼル機関(単気筒、5.1kW/2400rpm)に用いてエンジン実験を行っている。その結果は、いずれのFAMEも軽油に比べ黒煙濃度が顕著に低下し、NOx濃度は増加した。また良好な着火性であった。

Seppo Niemiら<sup>11)</sup>は、HVO (hydrotreated vegetable oil)、FISH (biodiesel from fish wastes)、AFME (animal fat based methyl ester) およびDFO (low-sulfur diesel fuel oil) を4ストロークディーゼル機関(4気筒、98kW/2200rpm、ボア×ストローク:108mm×120mm)に用いてエンジン実験を行っている。その結果、いずれのリニューアブル燃料もDFOに比べて熱効率や燃焼特性は同程度であった。CO、HC、NOx、Smokeの排出量はDFOと比較しておおよそ同程度または減少の結果であった(HVOは一部異なる傾向もある)。

FAMEをエンジンに適用する研究については吉本ら<sup>12)</sup>によくまとめられている。この中で、Murayamaら<sup>13)</sup>、Yamaneら<sup>14)</sup>は、FAMEは燃料蒸発性が悪いため、低負荷運転でPMが増加することが問題としている。

以上のように小型ディーゼル機関にFAMEを用いた実験結果はあるが、船用ディーゼル機関に用いた実験結果はほとんどない。そこでパーム油から作られたFAMEを船用ディーゼル機関に用いて、燃焼および排気特性に与える影響を調べたので報告する。また、FAME混合油の混合安定性についても調べたので報告する。

## 2. 船用ディーゼル機関におけるパーム油FAMEの燃焼実験

### 2.1 実験装置及び実験方法

#### 2.1.1 実験用ディーゼル機関

実験に使用した機関は、表1に示した船用中速4ストロークディーゼル機関(3気筒、過給機付き、最大出力257.4kW/420rpm、ボア×ストローク:230mm×380mm、圧縮比13、松井鉄工所製)である。

表1 船用4ストロークディーゼル機関の諸元

製作者	松井鉄工所
型名	MU323DGSC
型式	中速4ストロークディーゼルエンジン 過給機、空気冷却器付き
シリンダ数	3
シリンダ径	230mm
ストローク	380mm
連接棒長さ	751mm
連続最大出力	257.4kW (350.0PS)
回転数	420rpm
正味平均有効圧力	1.77MPa (18.10kgf/cm <sup>2</sup> )
圧縮比	13
吸気弁開/閉	BTDC66° / ABDC35°
排気弁開/閉	BBDC80° / ATDC35°
噴射ノズル	φ0.32mm×7
使用燃料	A重油

2.1.2 使用燃料

実験に使用した燃料は、表2に示すMDO(Marine Diesel Oil, A重油)とパームから作られたFAME, さらにそれぞれの燃料の混合油である。混合油はFAMEとMDOを容積割合で混合して、FAMEの混合割合により表記することとした。B30はFAME:MDO=30:70であり、B50はFAME:MDO=50:50である。

表2 使用燃料の性状

		MDO	FAME (B100)
Density (15°C)	kg/m <sup>3</sup>	0.8703	0.8753
Kinematic viscosity (50°C)	mm <sup>2</sup> /s	2.694	3.808
Flash point	°C	89	157
Sulphur	%	0.18	0
High calorific value	kJ/kg	45050	39900
C	wt%	87.5	76.8
H	wt%	12.4	12.2
N	wt%	0.02	0.0004
O	wt%	<0.1	10.5

2.1.3 パーム油 FAME の凝固点

パーム油 FAME は約 15°C以下で固体となる特性があるので、パーム油 FAME と軽油 (GO: Gas Oil) の混合割合 (容積比) が凝固点に与える影響について実験により調べた。ここでは、凝固した部分が見やすいように A 重油 (MDO) ではなく透明な軽油を用いた。(ここでは B25 は FAME:GO=25:75 を示す。)

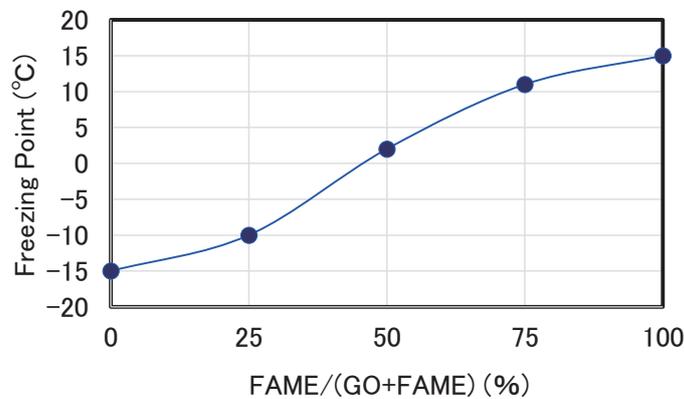


図1 パーム油 FAME と軽油の混合油の凝固点

図1は、パーム油 FAME と軽油の混合油の凝固点を調べた結果を示す。凝固点は FAME の混合割合が増えると単調に高くなる。

図2は約20°Cの時の各種燃料の状態である。左からGO(軽油), B25(FAME:軽油=25:75), B50(FAME:軽油=50:50), B75(FAME:軽油=75:25), FAMEである。どれも均一な液体であった。参考にCPO(Crude Palm Oil, 粗パーム油)とCPOとFAMEの混合油であるCPO50FAME50(CPO:FAME=50:50)も示す。CPOは凝固点が約40°Cであり、約20°Cの状態では固体であった。CPO50FAME50の場合は、約20°Cでコロイド状の沈殿物が生じた。

次に、この状態から温度を下げていった各種燃料の状態を示すが、FAME と軽油は一樣に混ざり、CPO と FAME の混合油のような沈殿物は生じなかった。図 3 は約 5°C の時の各種燃料の状態である。B75, FAME, CPO50FAME50 は固体の状態である。

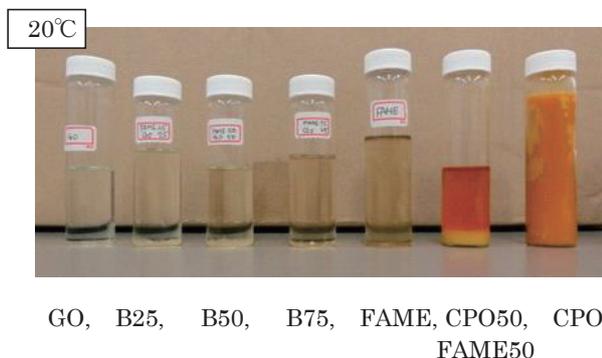


図 2 20°Cの時の各種燃料の状態

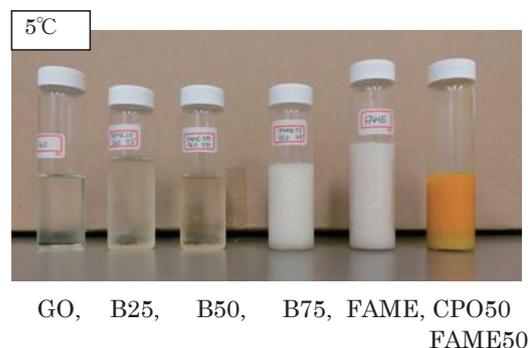


図 3 5°Cの時の各種燃料の状態

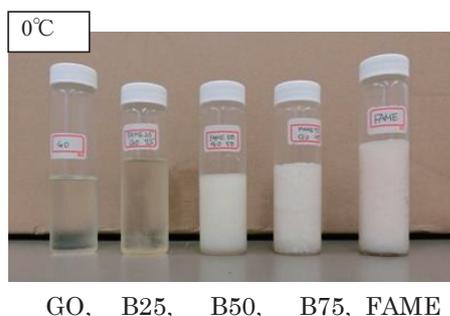


図 4 0°Cの時の各種燃料の状態

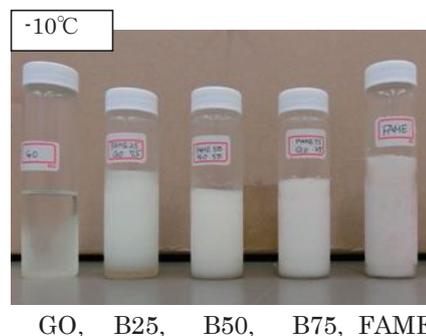


図 5 -10°Cの時の各種燃料の状態

図 4 は約 0°C の時の各種燃料の状態である。B50 は固体状態である。GO, B25 は液体の状態である。

図 5 は約 -10°C の時の各種燃料の状態である。B25 は固体の状態である。GO だけ液体の状態である。

#### 2.1.4 計測装置

船用ディーゼル機関にパーム油 FAME を用いた燃焼実験において、排ガス計測には排ガス測定装置 (MEXA-1600DEGR, 堀場製作所製) を、スモーク濃度の計測にはフィルタスモークメータ (415S, AVL 社製) を使用した。

#### 2.1.5 実験方法

バイオ燃料の混合割合が排ガス特性や機関特性に与える影響を調べるために、各種燃料を使用して船用特性の 25%, 50%, 75% および 100% 負荷率に設定して実験を行った。

実験に際し、実験用ディーゼル機関を各運転条件に設定後、30 分以上運転し、機関の状態が静定した後、筒内圧および燃料噴射圧データをクランク角度 0.5 度間隔で収集するとともに排ガス計測を実施した。筒内圧データは、50 波形の平均をとって、燃焼解析を行った。

また、B30 を使用してエンジン負荷率 75% で 100 時間 (8.5h/day×12days) の耐久性試験を実施し、エンジン性能の変化を観察し、最終的にエンジンを分解開放して付着した堆積物の状態を確認した。なお、全ての実験は同一時期に行っている(10月)。

## 2.2 実験結果及び考察

### 2.2.1 バイオ燃料の混合割合が排ガスおよび機関特性に与える影響

図6から図11に各燃料を用いて各エンジン負荷率（船用特性の25%、50%、75%、100%負荷）で実験した結果を示す。

図6に各燃料がNOx排出率(g/kW・h)に与える影響を示す。FAMEのNOx排出率はMDOより高い値である。B30およびB50の値は、MDOとFAMEの間の値で、FAMEの割合が高いほどNOx排出率は高くなる。FAMEの場合、MDOより高い理由はFAMEが分子構造中に酸素（約10%）を含んでいるため燃焼性が増したためと考えられる。

図7にMDOへのFAME混合割合とNOx変化との関係を示す。NOx変化は下記の式(1)で表されるように、NOx<sub>0</sub>に対する変化の割合(%)として示している。なお、NOx<sub>0</sub>はそれぞれのエンジン負荷率でのMDOでのNOx排出率の値である。

$$Y(\%) = \frac{(NOx - NOx_0)}{NOx_0} \times 100 \quad \dots(1)$$

図中のX軸は下記の式(2)で表される、FAMEとMDOの混合油中のFAMEの混合割合（容積比）である。

$$X(\%) = \frac{A}{A+B} \times 100 \quad \dots(2)$$

ここで、Aは混合油中のFAMEの容積、Bは混合油中のMDOの容積である。

MDOにFAMEを混合していくと、NOx排出率は全てのエンジン負荷率で増加する傾向にある。低負荷運転（25%、50%）でのNOx排出率の増加率は、高負荷運転（75%、100%）の増加率に比べて高い。100%エンジン負荷率では、FAMEのNOx排出率はMDOのNOx排出率に比べて約8%増加するが、25%エンジン負荷率では、FAMEのNOx排出率はMDOのNOx排出率に比べて約18%増加した。

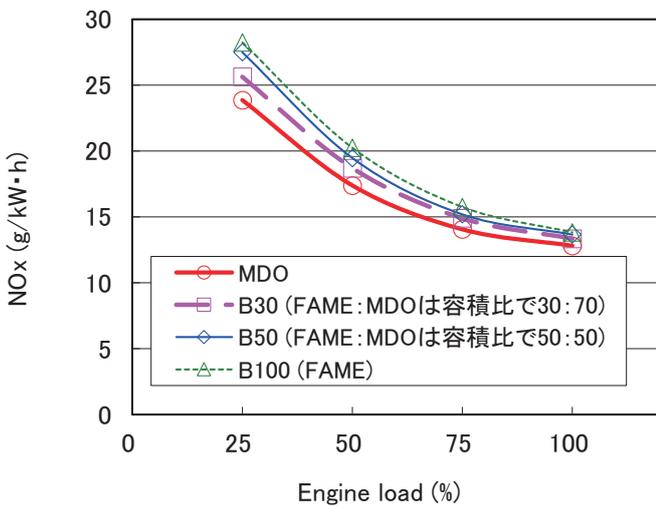


図6 燃料の種類がNOx排出率に与える影響

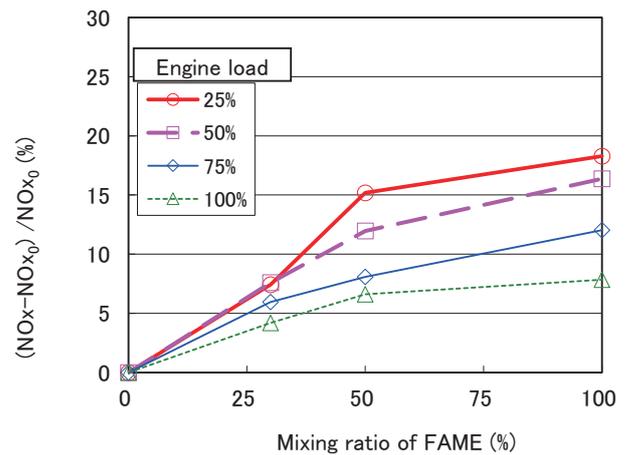


図7 MDOへのFAME混合割合とNOx変化との関係

図8に各燃料が Smoke 濃度に与える影響を示す。全てのエンジン負荷率で、FAME の Smoke 濃度は MDO の Smoke 濃度より低い値である。B30 および B50 の値は、MDO と FAME の間の値で、FAME の割合が高いほど Smoke 濃度は低くなる。FAME の Smoke 濃度が MDO より低かった理由は、FAME は含酸素燃料であり、燃焼場において酸素が不十分なところが少なくなったことと、FAME の着火性が良かったこと（図12と図13の燃焼解析の結果のところで説明する）が考えられる。

図9に MDO への FAME 混合割合と Smoke 変化との関係を示す。Smoke 変化はそれぞれのエンジン負荷率での FAME を含まない MDO での結果 (Smoke<sub>0</sub>) に対する変化の割合 (%) として示している (式(1)参照)。

MDO に FAME を混合していくと、Smoke 濃度は全てのエンジン負荷率で減少する傾向にある。高負荷運転 (75%, 100%) での Smoke 濃度の低減率は、低負荷運転 (25%, 50%) の低減率に比べて高い。高負荷運転では、FAME の Smoke 濃度は MDO の Smoke 濃度に比べて約 60%も低減する。50%エンジン負荷率では、FAME の Smoke 濃度は MDO の Smoke 濃度に比べて約 30%の低減であった。

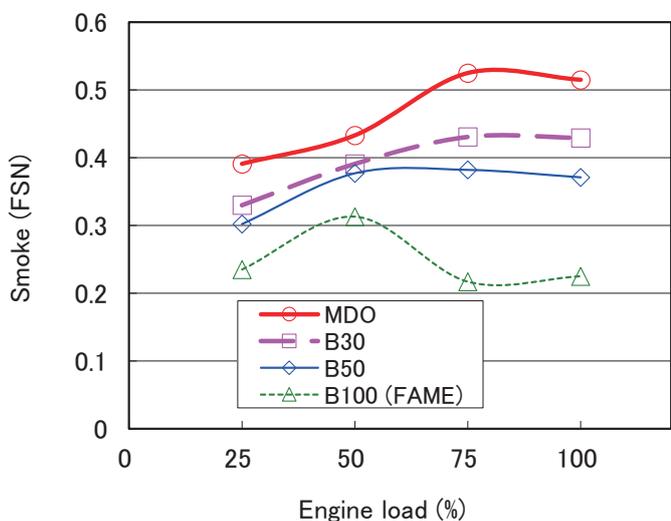


図8 燃料の種類が Smoke 濃度に与える影響

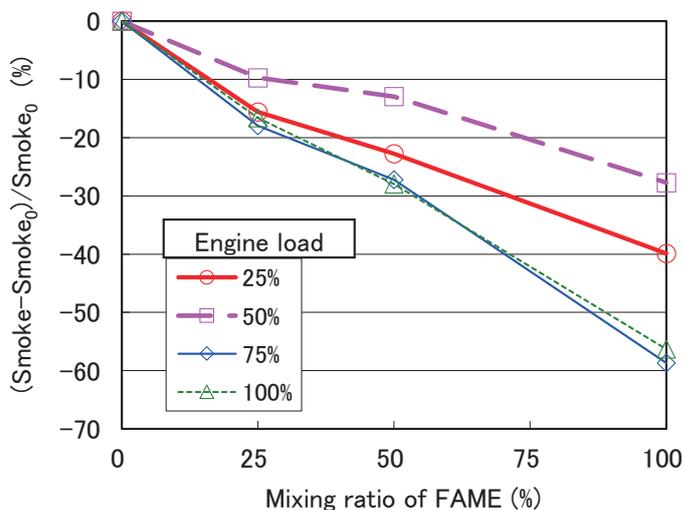


図9 MDO への FAME 混合割合と Smoke 変化との関係

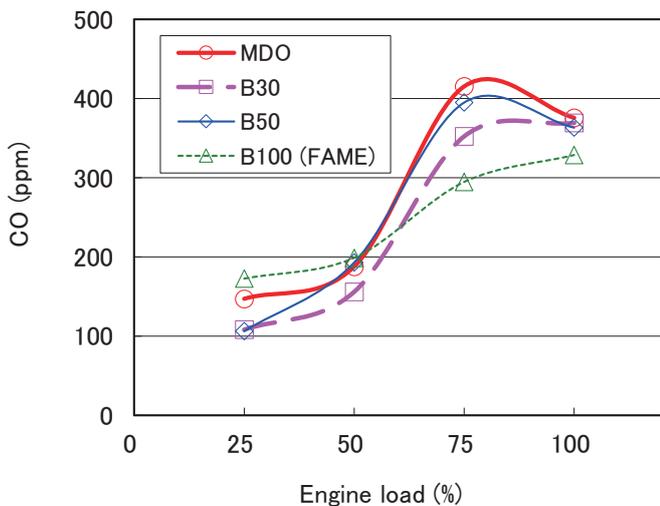


図10 燃料の種類が CO 濃度に与える影響

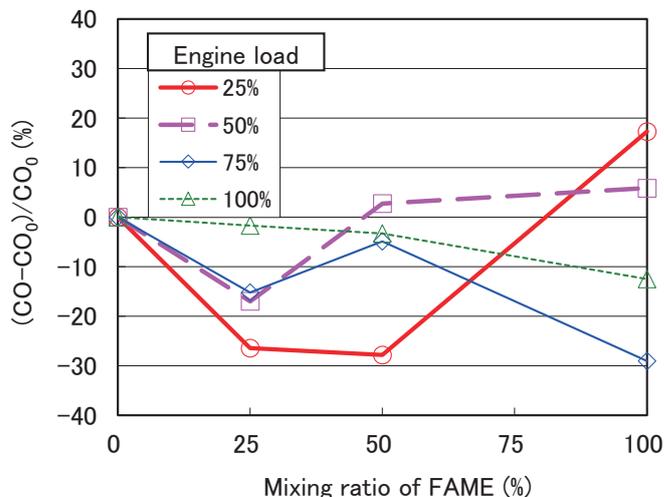


図11 MDO への FAME 混合割合と CO 変化との関係

CO 濃度についての結果を図 10 に示す. 高負荷運転 (75%, 100%) での CO 濃度は高い値であるが, 低負荷運転 (25%, 50%) での CO 濃度は低い値である.

図 11 に MDO への FAME 混合割合と CO 変化との関係を示す. CO 変化はそれぞれのエンジン負荷率での FAME を含まない MDO での結果 (CO<sub>0</sub>) に対する変化の割合 (%) として示している (式(1)参照).

高負荷運転では MDO に FAME を混合していくと, CO 濃度は減少する傾向にある. エンジン負荷率 75% では, FAME の CO 濃度は MDO の CO 濃度に比べて約 30% 低減した. しかし, 低負荷運転では FAME の混合割合が高い場合, CO 濃度が MDO の CO 濃度より高くなる場合があった. しかし, 低負荷運転では, それぞれの燃料の CO 濃度は低い値であり (約 100ppm~200ppm), FAME の場合でも大幅に CO 濃度が多くない.

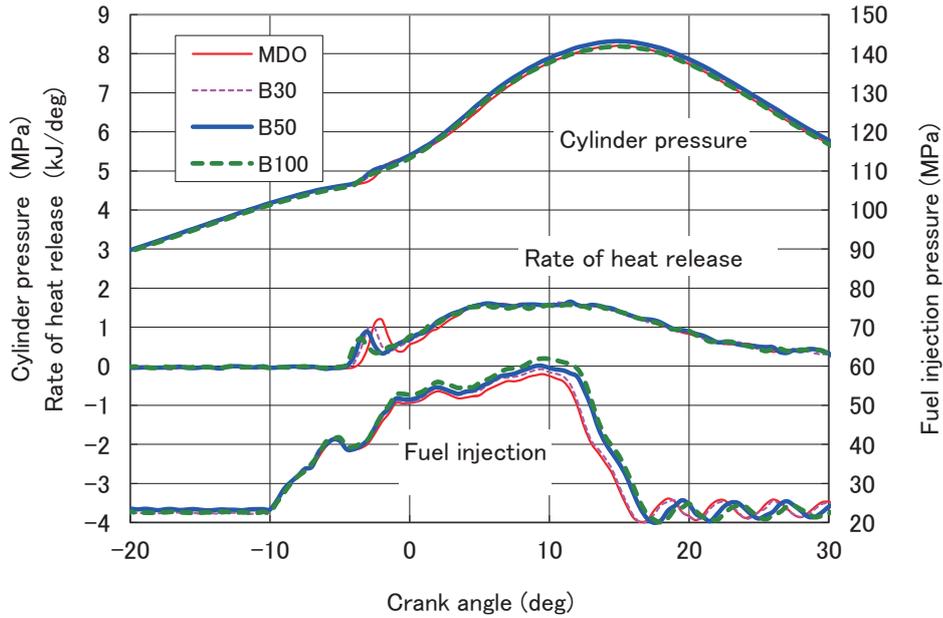


図 12 燃焼解析の結果 (75%負荷)

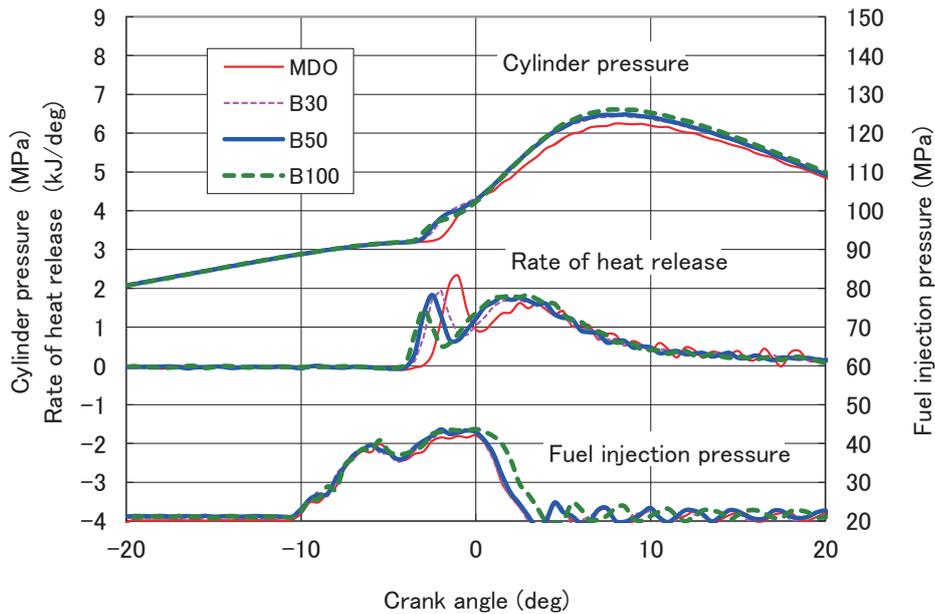


図 13 燃焼解析の結果 (25%負荷)

図 12, 図 13 に各燃料の燃焼解析の結果 (75%, 25%負荷) を示す. 図中には筒内圧, 燃料噴射圧, 熱発生率を示してある. 熱発生率の立ち上がりの位置を見て分かるように, FAME の着火時期は MDO の着火時期より早い. B30 および B50 は MDO と FAME の間で, FAME の混合割合が高いほど着火時期は早くなる傾向がある. また, 低負荷運転 (25%負荷) では, 高負荷運転 (75%負荷) に比べてクランク角度での着火時期の差が大きい.

75%負荷での各燃料の筒内圧波形を見てみると, ほぼ同じ波形であり, 各燃料の最高筒内圧もほぼ同じである. 25%負荷での各燃料の筒内圧波形を見てみると, 燃焼時の MDO の筒内圧波形は FAME の筒内圧波形に比べて若干低くなっており, MDO の最高筒内圧も FAME の最高筒内圧に比べて若干低い値となっている. 着火が遅れたことが影響していると考えられる. このため, 低負荷時の FAME の NO<sub>x</sub> 濃度と MDO の NO<sub>x</sub> 濃度の差が高負荷時の際の差に比べて大きくなったものと考えられる.

図 14 に各燃料の燃料消費率を, 図 15 に各燃料の熱効率を示す. 燃料消費率では, FAME は MDO より燃料の単位質量当たりの発熱量が約 10%小さいため, 燃料消費率は約 10%多くなっている. つまり同じ仕事をする場合, FAME は MDO より約 10%多く必要となる.

しかし, 図 15 に示す熱効率では, それぞれの燃料の熱効率ほとんど差がない.

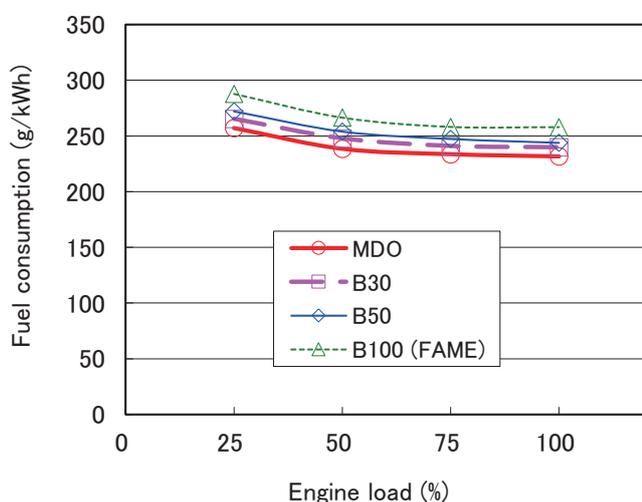


図 14 燃料の種類が燃費に与える影響

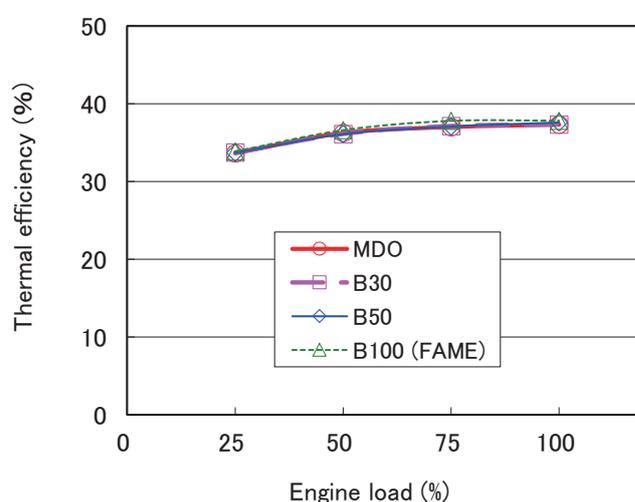


図 15 燃料の種類が熱効率に与える影響

### 2.2.2 FAME と A 重油の混合油 (B30) を用いたエンジン耐久テスト (75%エンジン負荷, 100 時間) の結果

B30 の燃料を用いて 75%エンジン負荷条件で 100 時間の耐久試験を行った. B30 を用いた耐久試験における Smoke 濃度 (FSN) の変化を図 16 に示す. Smoke 濃度は 100 時間ほぼ一定であり, この間の燃焼は良好であったと考えられる.

また, 100 時間耐久試験の後にオーバーホールを実施したが, 通常のオーバーホールの状態と変わらず, 特に問題はなかった. 図 17 にエンジン実験のタイムスケジュールを示す. 本実験を行う前にエンジン分解整備 (Engine maintenance) を行い, エンジンをきれいな状態にして実験を行った. エンジン分解整備の前後 (図 17 中の①Before maintenance と②After maintenance) に各部品の写真を撮った. その後, 前述のエンジン燃焼試験 (MDO, B30, B50, B100) を行い, 続いて B30 を用いた 100 時間耐久試験を行った. その後, オーバーホールを行い, 各部品の写真を撮った (図 17 中の③After 100 hours engine test).

図 18 にシリンダヘッドの状況を, 図 19 に燃料噴射ノズルの状況を示す. 耐久試験後のシリンダヘッドに損傷箇所はいっさい無かった. 耐久試験後の燃料噴射ノズルへの付着物は確認されたが, 通常の付着物の量であり, 特に問題はなかった.

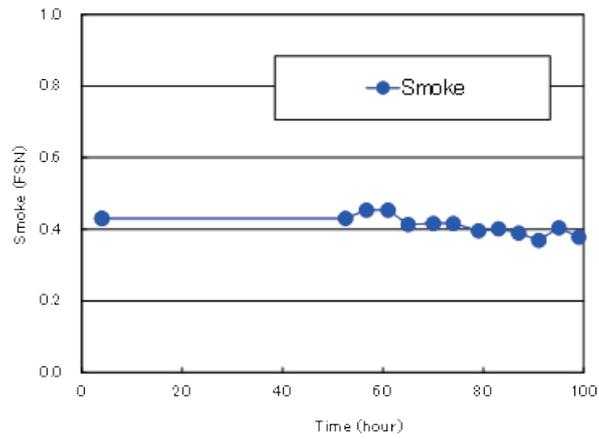


図16 スモーク濃度の変化 (B30 を用いた耐久性試験)

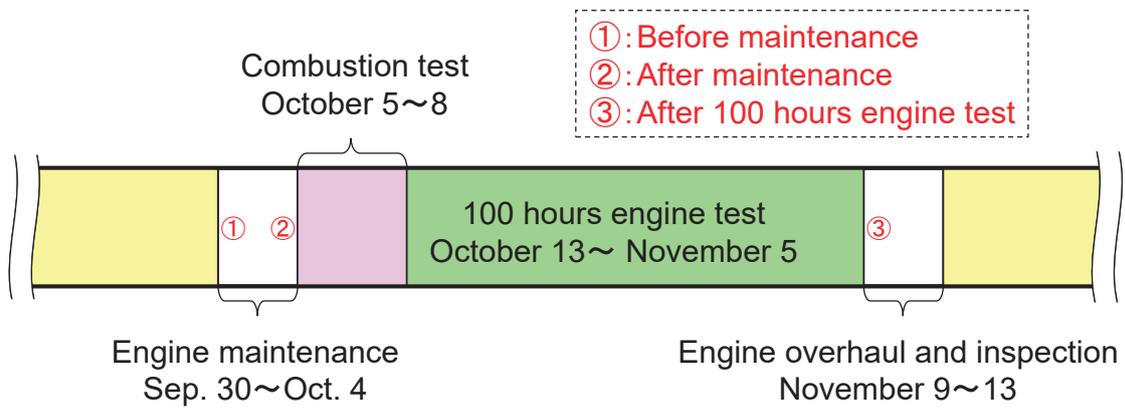


図17 実験のタイムスケジュール

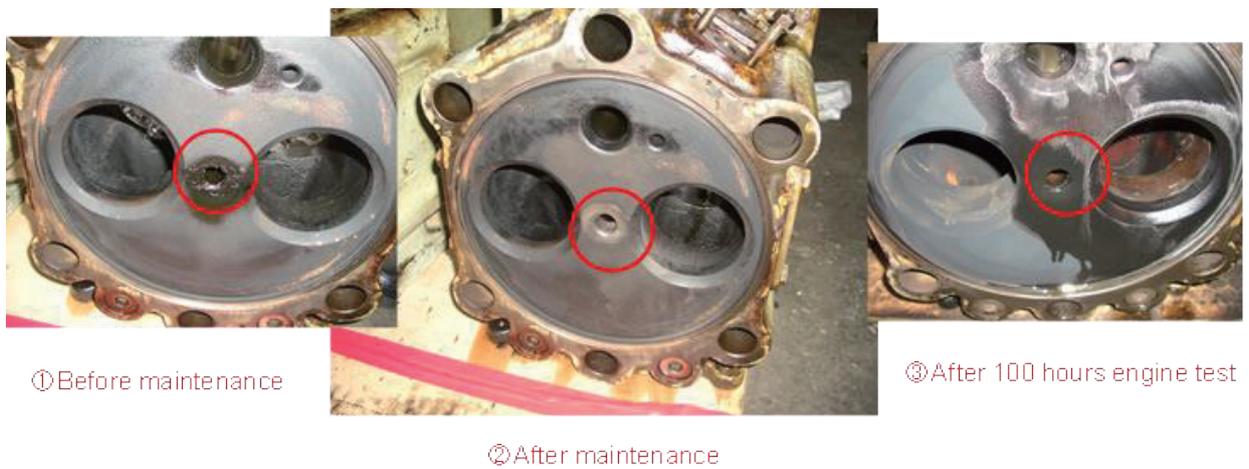


図18 シリンダヘッドの状況 (B30 を用いた耐久性試験)



図 19 燃料噴射ノズルの状況 (B30 を用いた耐久性試験)

### 3. FAME 混合油の混合安定性実験

#### 3.1 実験装置及び実験方法

##### 3.1.1 実験装置

バイオ燃料と船用 A 重油との混合安定性を実船に近い条件で検討するため、新たに図 20 に示す試験装置を開発した。

フィルタ通油性試験装置に設置したフィルタは 80 メッシュ (185 ミクロン) と 200 メッシュ (75 ミクロン) の 2 種類を使用した。

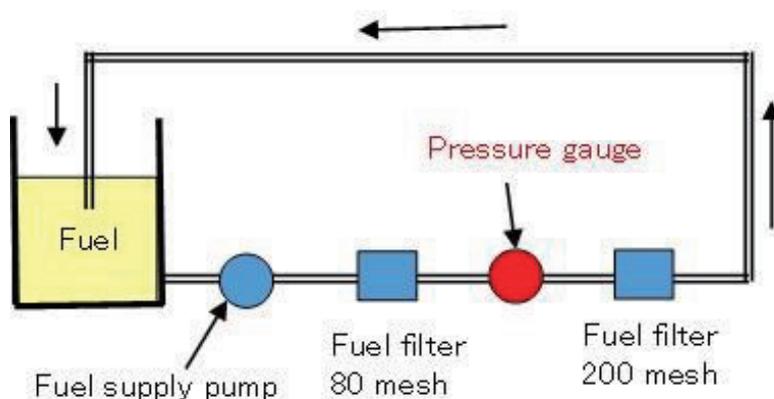


図 20 フィルタ通油性試験装置

### 3.1.2 使用燃料

実験に使用した燃料は、MDO(Marine Diesel Oil, A 重油)とパームから作られた FAME と GO (Gas Oil, 軽油) とさらにそれぞれの燃料の混合油である。MDO と FAME の燃料性状は表 2 を参照せよ。

混合油は FAME と MDO を同じ容積割合で混合して、FAME+MDO と表記することとした。

### 3.1.3 実験方法

実験装置に記載された試験装置を用いて、パーム油から製造された FAME と MDO との混合油 (10 リットル. FAME 5 リットル+MDO 5 リットル) などを用いて、フィルタ通油性試験を行い、混合安定性を調べた。実験条件は、通油量が約 10 リットル/h. 送油圧は約 0.1MPa (約 1 気圧)、試験時間は 40 時間 (8 時間×5 日) とした。

### 3.2 実験結果及び考察

FAME と MDO (A 重油) の混合油 (FAME:MDO=1 : 1), MDO と GO の混合油 (MDO : GO=1 : 1), MDO 単独の燃料 (比較のため), FAME を用いて、フィルタ通油試験を行った。

結果は全ての実験において燃料送油圧の変化や通油量の変化はなく問題はなかった。フィルタ通油試験の後、フィルタを取り外して観察したが、付着したスラッジもなく、特に問題はなかった。各種燃料の実験後のフィルタの写真を図 21 から図 25 に示す。

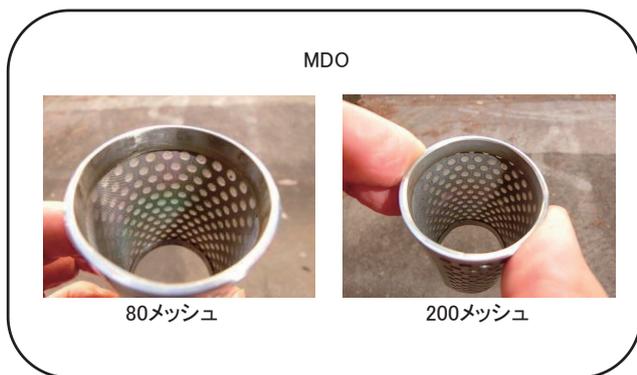


図 21 実験後のフィルタの観察 (MDO)

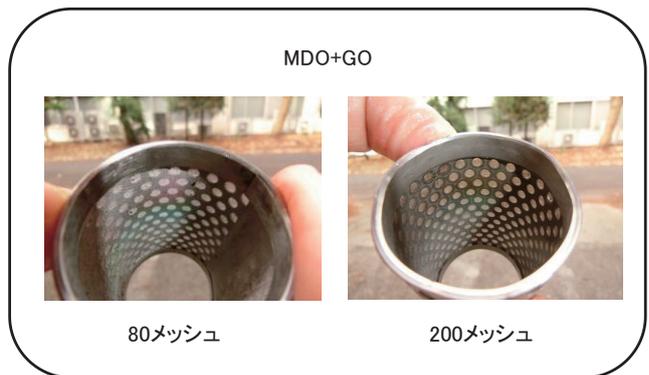


図 22 実験後のフィルタの観察 (MDO+GO)

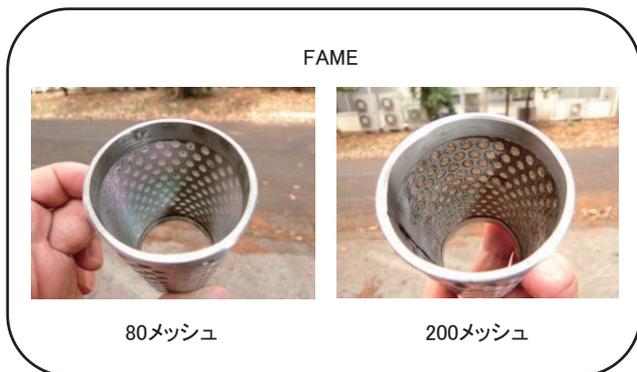


図 23 実験後のフィルタの観察 (FAME)

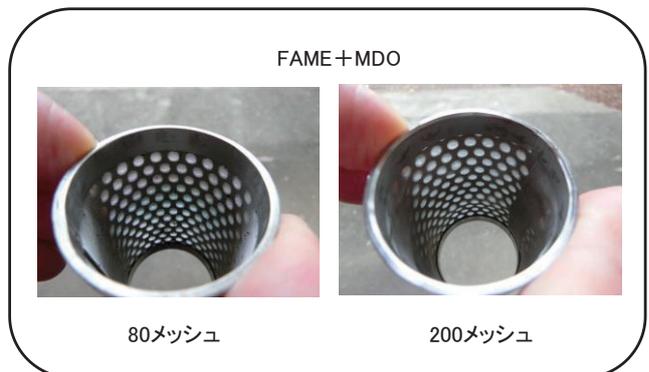


図 24 実験後のフィルタの観察 (FAME+MDO)

FAME と MDO の混合油 (FAME 5 リットル+MDO 5 リットル) に、さらに HFO (Heavy Fuel Oil, C 重油) を 1 リットル混ぜた燃料を用いて 40 時間フィルタ通油試験を行った。しかし、フィルタに付着物を確認することはできなかった。実験後のフィルタの写真を図 25 に示す。



図 25 実験後のフィルタの観察 (FAME+MDO+HFO)

前述したフィルタ通油性試験装置は、実際にエンジン実験で使用している燃料配管を改造して製作した。フィルタ通油性試験の実施に当たっては、燃料配管内に軽油を十分循環させ、燃料配管を十分きれいに洗浄した後にいった。しかし、最初の FAME+MDO や FAME+GO (軽油) の試験後の 200 メッシュのフィルタにはスラッジの付着が確認された。実験の再現性を確保するために同じ実験を複数回おこなっているが、その後の実験においては前に記載したとおり、フィルタに付着物は確認できなかった。

最初の実験で 200 メッシュのフィルタに付着した状況の写真を図 26 に示す。実験は①FAME+MDO、②MDO、③MDO+GO、④FAME+GO の順番に行った。フィルタ通油試験の後、フィルタを取り外して観察したが、① FAME+MDO の混合油では、200 メッシュのフィルタに黒いスラッジが付着していた。また、④BDF+GO の混合油でも 200 メッシュのフィルタにわずかなスラッジの付着が観察された。しかし、それらの実験の間に行った② MDO や③MDO+GO の実験の場合は 200 メッシュのフィルタにも何も付着していなかった。なお、全ての実験で 80 メッシュのフィルタには何も付着していなかった。

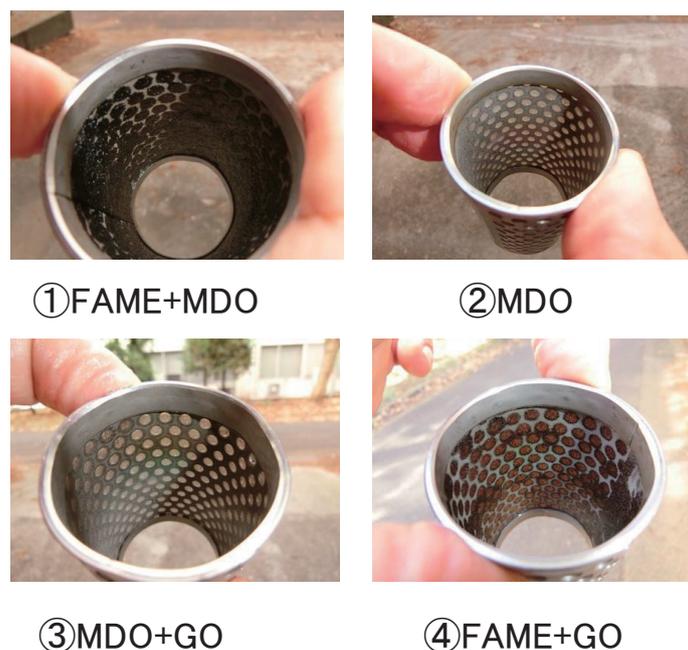


図 26 最初のフィルタ通油性試験の結果 (200 メッシュフィルタ)

この理由としては、FAMEは溶媒特性をもっており、燃料を重油からFAMEに切り替えた場合、燃料配管内（燃料装置内）の堆積物が洗い流され、200メッシュのフィルタに付着した可能性がある。

FAMEを実際に実用化していく場合、次の点に注意する必要があると考える。これまで重油を使っていたディーゼル機関に対して、燃料をFAMEに切り替えて使おうとする場合、最初のうちはフィルタにスラッジなどがつまらないかチェックする必要がある。

今回の実験では使用したフィルタは、80メッシュ（185ミクロン）と200メッシュ（75ミクロン）80メッシュのフィルタであった。今後は、精密フィルタ（10ミクロンのものを捕集できる）に対応する細かいメッシュのフィルタを用いたフィルタ通油試験を行い確認する必要がある。

#### 4. まとめ

##### 「船用ディーゼル機関におけるパーム油 FAME の燃焼実験」

FAME, MDO, および FAME と MDO の混合燃料を用いて船用中速 4 ストロークディーゼル機関で排気特性と燃焼特性を調べた。結果は次のとおりである。

- 1) FAME は全てのエンジン負荷で MDO に比べて、NO<sub>x</sub> は高い値であった。FAME の NO<sub>x</sub> は MDO の NO<sub>x</sub> に比べて 8%~18%増加した。
- 2) FAME は全てのエンジン負荷で MDO に比べて、Smoke 濃度は低い値であった。FAME の Smoke 濃度は MDO の Smoke 濃度に比べて 30%~60%低減した。
- 3) FAME の着火時期は MDO より早かった。
- 4) B30 の燃料を使用した 100 時間耐久エンジン試験で Smoke 濃度は増加しなかった。耐久試験後のエンジン分解・点検では、特に問題はなかった。

##### 「FAME 混合油の混合安定性実験」

FAME と MDO の混合安定性を調べるために、80メッシュ（185ミクロン）と200メッシュ（75ミクロン）のフィルタを用いて製作したフィルタ通油性試験装置で実験を行った。結果は下記の通りである。

- 5) FAME と MDO の混合油を用いたフィルタ通油試験において、燃料送油圧の変化や通油量の変化はなく問題はなかった。フィルタ通油試験の後、フィルタを取り外して観察したが、付着したスラッジもなく、特に問題はなかった。
- 6) フィルタ通油試験の初期に、FAME と MDO の混合油を用いた場合、200メッシュのフィルタに付着物を確認したが、FAMEは溶媒特性をもっており、燃料を重油からFAMEに切り替えた場合、燃料配管内（燃料装置内）の堆積物が洗い流され、200メッシュのフィルタに付着した可能性がある。FAMEに燃料を切り替える場合は、最初のうちはフィルタがつまらないかチェックする必要がある。

#### References

- 1) IMO's GHG reduction strategy, 2018 ClassNK Spring Technology Seminar, (2018-6), 1-22.
- 2) CIMAC White Paper 1 - Production Pathways for Hydrogen with a Zero Carbon Footprint, (2020-1), 1-5.
- 3) A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions: draft technical report, EPA420-P-02-001, 2002, p1-118.
- 4) 武田秀幸, 森谷信次, ディーゼル燃料としてのメチルエステルの諸特性—未使用油・廃食油の比較検討, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 2007-5, 42-3, p455-459.

- 5) 奥井伸宜, 鈴木哲平, 千田二郎, 廃食油バイオディーゼル燃料の直噴式ディーゼル機関適用化研究—第1報 機関性能および燃焼・排気特性, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 2005-11, 40-6, p797-804.
- 6) 奥井伸宜, 鈴木哲平, 千田二郎, 廃食油バイオディーゼル燃料の直噴式ディーゼル機関適用化研究—第2報 噴霧および着火・火炎特性の基礎解析, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 2005-11, 40-6, p805-811.
- 7) 鈴木哲平, 羽原輝晃, 奥井伸宜, 千田二郎, 廃食油バイオディーゼル燃料の直噴式ディーゼル機関適用化研究—第3報 噴霧燃焼機構および火炎内すす生成機構の基礎研究, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 2005-11, 40-6, p812-819.
- 8) 浜崎和則, 木下英二, 松尾佳朋, Wira JAZAIR, ディーゼル燃料としてのパーム油の利用, 日本機学会論文 文集 (B編), 2002-3, 68-667, p958-963.
- 9) 崔 暁丹, 金 兌根, 藤井 祐介, 草鹿 仁, 大聖 泰弘, バイオディーゼルを用いたディーゼル機関の燃焼と排 出ガス特性に関する研究—詳細な燃焼と反応解析—, 自動車技術会論文集, 2013-3, 44-2, p311-317.
- 10) 吉本康文, 金子和喜, 小野寺正幸, バイオディーゼル燃料の燃焼特性に及ぼす脂肪酸メチルエステル組成の 影響, 日本機械学会論文集 (B編), 2009-4, 75-752, p847-854.
- 11) Seppo Niemi, Michaela Hissa, Olav Nilsson, Katriina Sirviö, Tuukka Hartikka, Erkki Hiltunen, Performance and emissions of a commonrail non-road diesel engine driven with different renewable fuels, CIMAC Congress 2016, 2016-6, Paper No.029, p1-11.
- 12) 吉本康文, 木下英二, 植物油燃料のエンジン適用技術—バイオディーゼル燃料について—, 日本燃焼学会 誌, 2009, 51-156, p121-128.
- 13) Murayama, T., et al., Technical Report on Promoting and Planning Wide Use of Waste Edible Oil (in Japanese), Zaidan- hojin Seisakukagaku-kenkyuusyo(1999),1-174.
- 14) Yamane, K., Ueta, A., Shimamoto, Y., Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuels on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine, International Journal of Engine Research, 2-4(2001), 249-261.