バイオエマルジョン燃料がディーゼル機関の 燃焼と排気特性に及ぼす影響*

西尾 澄人** 福田 哲吾**

Combustion and Emission Characteristics of Emulsified Biofuel Used for Diesel Engines

By Sumito NISHIO, Tetsugo FUKUDA

In April 2018, the International Maritime Organization (IMO) adopted its Initial GHG Strategy, which defined goals for the international shipping sector to achieve by 2050: reducing CO₂ emissions per transport work by 70% and total GHG emissions by at least 50% compared to 2008. As for SO_x 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. Biofuel is described as carbon neutral and, in general, has low levels of sulfur. For these reasons, it is expected to be more commonly used as a marine fuel in the future. However, biofuel emits more NO_x from diesel engines, because its oxygen content is higher than that of gas oil.

In this study, the authors conducted experiments to see how the use of emulsified biofuel can contribute to reducing NO_x emissions. The experiments were conducted in a small high-speed four-cycle diesel engine using Fatty Acid Methyl Ester (FAME) made from palm oil, gas oil, FAME-based and gas oil-based emulsion fuels, both of which contain 30% of water. The results found that the NO_x reduction rate of the FAME emulsion fuel is higher than that of the gas oil emulsion fuel, and that ignition delay times for the FAME emulsion fuel are shorter than those of the gas oil emulsion fuel.

1. はじめに

地球温暖化対策や SO_x 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 においても 2030 年までに 2008 年比で二酸化炭素排出率を少なくとも 40%削減、2050 年までに 70%削減、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¹⁾。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、CO₂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_x 排出量もほとんどないため、今後船用燃料への使用が期待されている。

しかし、バイオ燃料は含酸素燃料であり、NO_x が増加するなどの問題がある²⁾。船舶の NO_x 三次規制は 2016 年 1 月 1 日から指定海域 (ECA) で開始されており、船用ディーゼル機関から排出される NO_x の低減は、今後益々重要な課題となってくる。

そこで本研究では、NO_x 低減技術としてバイオ燃料をエマルジョン化させた場合の燃焼及び排気特性に与える影響を調べるために実験を行ったので報告する。

エマルジョン燃料の NO_x 低減効果については、薦田ら³⁾においては、燃費増加率 0~2%で NO_x 低減率は 40~50%とある。

東田⁴⁾らは MDO (Marine Diesel Oil) のエマルジョン燃料 (水添加率 (質量比) 0~50%) を 2 ストロークディーゼル機関 (2S50ME-C, 2 気筒, 3320kW/127rpm, ボア×ストローク: 500mm×2000mm) に用いて燃費と NO_x 排出に及ぼす影響を調べている。その結果は、75%エンジン負荷では水添加割合の増加に伴い NO_x 排出量は単調に減少し (水添加率 50%にて約 35%の NO_x 削減)、燃費については水添加率 40%までは僅かであるが改善し (1%以下)、50%では僅かに増加 (約 0.5%) の結果であった。

張ら⁵⁾は A 重油のエマルジョン燃料 (混合割合 (容積比) 20%) を 4 ストロークディーゼル機関 (3L13AHS, 3 気筒, 73.55kW/1200rpm, ボア×ストローク: 130mm×160mm) に用いて、エマルジョン燃料の水粒子径を変えて実験を行った。その結果は、NO_x 濃度は 10%~40%低減し、水粒子径の小さい方が NO_x 低減効果が大きくなった。燃料消費率については、水粒子径の大きい場合は A 重油より低くなった。水粒子径が小さい場合は A 重油より大きくなった。

Yamanishi ら⁶⁾は Gas Oil (軽油) のエマルジョン燃料 (水添加率 (質量比) 43%までのもの) を 4 ストロークディーゼル機関 (6LY-WST, 6 気筒, 214kW/3101rpm, ボア×ストローク: 100mm×110mm) に用いてエンジン実験を行った。

*原稿受付 令和2年3月27日。

**正会員 海上技術安全研究所 (三鷹市新川6-38-1)。

その結果は、燃料消費率を増加させることなく NOx 排出量を低減することができた。

バイオ燃料のエマルジョン燃料については下記の 3 つの例がある。

宮脇ら⁷⁾は、ジャトロファ油のエマルジョン燃料(水混合割合(質量比) 20%までのもの)を予燃焼室式の 4 ストロークディーゼル機関(3 気筒, 25.7kW/1500rpm, ボア×ストローク: 120mm×135mm)に用いてエンジン実験を行った。その結果は、NOx 排出量は水の混合割合とともに減少する。熱効率は水の混合割合とともに高くなる。

吉本ら⁸⁾は、廃食油のエステル化燃料(バイオディーゼル油)のエマルジョン燃料(水添加率(容積比) 50%までのもの)を 4 ストロークディーゼル機関(単気筒, 無過給, 7.35kW/1200rpm, ボア×ストローク: 110mm×150mm)に用いてエンジン実験を行った。その結果は、NOx は水添加率とともに低減し、燃料消費率は水添加率 40%までは水なしの場合と比べて低減するが、水添加率 40%を超えると増大した。

Kalam ら⁹⁾は、70℃に加熱された CPO(crude palm oil)とこれの 1%, 2%, 3%の水エマルジョン燃料を 4 ストロークディーゼル機関 YANMAR (7.4kW/3600rpm, ボア×ストローク: 107.95mm×152.4mm)に用いてエンジン実験を行っている。その結果は、CPO は軽油(diesel fuel)に比べて CO, HC は少なく、NOx は多く排出する。CPO の水分量を増やすと、CO および HC は増加するが、NOx は減少する。

以上のようにエマルジョン燃料については燃料消費率や熱効率に与える影響については、改善の有無しなどまだ不明な点がある。また、バイオ燃料を用いて作ったエマルジョン燃料についてはまだ実験結果がほとんどない状況である。そのため今回は、バイオ燃料であるパーム油から作られた FAME(Fatty Acid Methyl Ester)を水エマルジョン化させた場合の熱効率も含めた燃焼及び排気特性に与える影響を調べたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 供試機関

実験に使用したディーゼル機関は、表 1 に示した小型高速 4 ストロークディーゼル機関である。

2.2 使用燃料

使用した燃料は、表 2 に示す軽油(Gas Oil: GO), パーム油から作られた FAME(Fatty Acid Methyl Ester), さらにそれぞれの燃料のエマルジョン燃料

(Emulsified Fuel: EF)である。エマルジョン燃料はそれぞれの燃料と水を容積比で 70:30 にして、スタティック・ミキサを用いて製作したもの(以下、EF30 と表す)である。表 3 に使用した燃料と水の混合割合を示す。なお、エマルジョン燃料を安定させる乳化剤(セキエマール, 関口製)を軽油又は FAME 体積に対して 1%の比率で添加した。

Table 1 Test engine specifications

Manufacturer	AVL
Model	ISUZU IDS1 (AVL 520 Base)
Type	4 Stroke cycle diesel engine Natural Aspiration
Number of cylinders	1
Cylinder bore	112mm
Stroke	110mm
Maximum continuous output	7.7kW
Maximum continuous speed	1500rpm
Brake mean effective pressure	0.49MPa
Compression ratio	18.5
Fuel injection nozzle	Φ0.31mm×4

Table 2 Properties of test fuels

		Gas Oil	FAME (B100)
Density (15°C)	Kg/m ³	822	875.3
Kinematic viscosity (50°C)	mm ² /s	2.821	3.808
Pore point	°C	-15	≤15
Flash point	°C	58	157
Water	%	<0.01	0.04
Sulphur	%	0.00	0.00
High calorific value	kJ/kg	46000	39900
Cetane index		55.3	58.0
C	%	85.8	76.8
H	%	13.8	12.2
N	%	0.00	0.00
O	%	<0.1	10.5

Table 3 Ratio of oil to water in test fuel

Oil : Water	Gas Oil	GO-EF30	FAME	FAME-EF30
Volume Ratio	100 : 0	70 : 30	100 : 0	70 : 30
Mass Ratio	100 : 0	66 : 34	100 : 0	67 : 33

2.3 計測装置

排ガス計測にはポータブル型燃焼ガス分析計(testo350XL)を用い、NOx, CO, O₂, CO₂濃度を計測した。本分析計の計測原理は表 4 のとおりである。

Table 4 Specification of gas analyzer

	range	Measuring principle
NO	0~3000 ppm	Controlled potential electrolysis
NO ₂	0~500 ppm	Controlled potential electrolysis
CO	0~10000 ppm	Controlled potential electrolysis
O ₂	0~25 Vol. %	Galvanic cell method
CO ₂	0~50 Vol. %	NDIR (Non-dispersive infrared detector)

スモーク濃度の計測には、JIS D 8004 に準拠したスモークメータ（ろ紙式ディーゼル排気黒煙濃度測定器、SOKKEN MODEL GSM-3）を使用した。このスモークメータは未使用のろ紙でメータの指示を図 1 の黒印マーク点として較正するため、スモーク濃度が低い場合は 0% 以下の指示となる。0% 以下の指示値の場合は、目盛りは表示されていないが、参考値として黒点を -4 として目視により指示値を読み取った。

Fig. 1 Smoke meter display

2.4 実験方法

エマルジョン燃料が排ガス特性や機関特性に与える影響を調べるために、FAME および FAME のエマルジョン燃料（FAME-EF30）、比較のために軽油および軽油のエマルジョン燃料（GO-EF30）を使用してエンジン実験を行った。エンジンの運転条件は、船用特性の 75% 負荷（5.8kW/1363rpm）である。

エマルジョン燃料は、水を入れない燃料に比べて着火遅れが長くなるため、燃料噴射時期を適切に調整することにより、熱効率の悪化を抑えつつ、NO_x を低減することもできるため、燃料噴射時期を変更した実験も行った。燃料噴射時期が排ガス特性や機関特性に与える影響を調べるために、燃料噴射時期を上死点前 15.5 度、13.5 度、11.5 度、9.5 度（基準）、7.5 度と変えて実験を行った。（図 2 参照）

実験に際し、機関を運転条件に設定後、20 分以上運転し、機関の状態が静定した後、筒内圧及び燃料噴射

圧データをクランク角度 1 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。機関の各種温度、圧力データは 5 秒間隔で収集した。

排ガス計測は、燃焼ガス分析計のサンプリングプローブを排気管のエンジン出口から約 3.7m 下流の穴に差し込み、約 5 分後に排ガスデータが安定したときにデータ収集した。

スモーク濃度の計測は、スモークメータのサンプリングプローブを排気管のエンジン出口から約 5m 下流の穴に差し込み計測した。なお、全ての実験は同一時期に行っている（8 月）。

3. 実験結果および考察

3.1 エマルジョン化が燃焼特性に与える影響

図 2 に FAME および FAME エマルジョン燃料の燃焼解析結果を示す。図 2 a) は FAME のもので、図 2 b) は FAME エマルジョン燃料のものである。

Fig. 2 Combustion characteristics of test fuels (75% engine load)

a) Fuel injection timing 13.5° BTDC

b) Fuel injection timing 7.5° BTDC

Fig. 3 Combustion characteristics of test fuels

燃料どうしの比較がしやすいように、同じ燃料噴射時期でまとめたものを図3に示す。図3 a)は燃料噴射時期が上死点前 13.5 度のもので、図3 b)は上死点前 7.5 度のものである。図の熱発生率から、FAME の着火時期が一番早く、次が軽油、その次が FAME のエマルジョン燃料で、軽油のエマルジョン燃料が一番遅い。

3.2 エマルジョン化が排ガス特性に与える影響

図4にエマルジョン化が NO_x 濃度に与える影響を示す。燃料噴射時期を早めると NO_x が増加する。また、軽油に比べて FAME の NO_x は若干高い値である。

軽油をエマルジョン化すると NO_x が低減されている (約 42%削減)。FAME のエマルジョン燃料は軽油のエマルジョン燃料より低い値まで変化している (59 ~ 64%削減)。

FAME のエマルジョン燃料は、軽油のエマルジョン燃料より NO_x 濃度の値が低い。図3の燃焼解析の結果より、FAME のエマルジョン燃料は軽油のエマルジョン燃料より着火時期は早い。それに関わらず、FAME のエマルジョン燃料が軽油のエマルジョン燃

料より NO_x が低くなった理由は次のように考える。

この原因の一つは、図5に示すように FAME は軽油より発熱量が約 10%低い。燃焼室内への FAME の噴射量は、軽油よりも約 10%多くなり、それに比例して水分量也多くなり、NO_x の低減効果が大きく出たものと考えられる。

図6にエマルジョン化がスモークに与える影響を示す。噴射時期を早めるとスモークが低減する。また、軽油に比べて軽油エマルジョン燃料や FAME 及び FAME エマルジョン燃料のスモークは低い。

Fig. 4 Effect of emulsified fuel on NO_x

Fig. 5 Conceptual diagram of fuel spray
(Same energy amount)

Fig. 6 Effect of emulsified fuel on smoke

エマルジョン燃料の効果としては次のことが挙げられる。

- ①水の混合による燃焼火炎温度の低下 (NO_x 低減)
- ②燃料噴射量の増大
(相対的な燃焼時期遅延の効果: NO_x 低減)
- ③セタン価の低下 (着火遅れ増加)
(予混合燃焼の拡大: スモーク低減)
- ④油より蒸発性の良い水の混合によるエマルジョン燃料の微粒化・蒸発の促進 (スモーク低減)
- ⑤空気の巻き込みによる局所空気過剰率の増大
(スモーク低減)
- ⑥水性ガス化反応による燃焼の改善 (スモーク低減)

NO_x 低減に関するものとして①, ②, スモーク低減に関するものとして③~⑥が考えられる。

3.3 エマルジョン化が熱効率に与える影響

燃料消費率や熱効率は、使用者にとって重要な関心事である。しかし、エマルジョン燃料の実験の場合、燃料消費率や熱効率の算出は慎重に行う必要がある。

燃料をエマルジョン燃料に切り替えても、燃料配管内はすぐにはエマルジョン燃料には切り替わらない。燃料を切り替えた部分から燃料噴射ノズルまでの配管内の容積の3倍以上のエマルジョン燃料を流さないと配管内は均一な濃度のエマルジョン燃料にはならない。これは乳白色の色をした軽油と水のエマルジョン燃料から軽油に燃料を切り替える場合に、視覚的に確認することができる。

今回のエマルジョン燃料の実験では、燃料配管内の容積の3倍以上の燃料を流すことにより燃料配管内の燃料を十分に入れ替えて実験を行っている。

それぞれの燃料の熱効率を式(1)より算出し、比較してみると図7のようになる。

$$\text{熱効率 } A (\%) = \frac{P \times t}{\text{Oil} \times LCV} \times 100 \quad \cdots (1)$$

ここで、 P は出力(kW)、 t は計測時間(s)、 Oil は消費した油(kg)、 LCV は低位発熱量(Lower Calorific Value)(kJ/kg)である。

軽油の場合の Oil は軽油の消費量 GO (kg) であり、FAME の場合の Oil は FAME の消費量 FAME (kg) であり、 LCV もそれぞれの燃料の低位発熱量を用いて計算する。低位発熱量は式(2)¹⁰⁾ と式(3)¹⁰⁾ から導出した式(4)により求める。

Fig. 7 Effect of emulsified fuel on thermal efficiency A

$HCV =$

$$1000 \times (33.8C + 142.1(H - O/8) + 9.4S) \quad \cdots (2)$$

$LCV =$

$$1000 \times (33.8C + 120.3H - 17.7O + 9.4S - 2.4W) \quad \cdots (3)$$

式(2)と式(3)より

$LCV =$

$$1000 \times (HCV - 21.8H + 0.0625O - 2.4W) \quad \cdots (4)$$

ここで、 HCV は総発熱量(高位発熱量, Higher Calorific Value)(kJ/kg)である。C, H, O, S, W は油 1kg 中の炭素, 水素, 酸素, 硫黄, 水分の質量 (kg) である。

エマルジョン燃料はそれぞれ元となる燃料に比べて少なくとも約 3%低い熱効率となっている。この理由については次のように考えられる。

エマルジョン燃料に加えられた水は、油の発熱量により加熱され、蒸発し、そのままエネルギーを持った状態で排気ガスとしてエンジンから排出される。このために水を混ぜた分のエネルギーのロスを生じる。燃料の低位発熱量の推定式(3)において水分(W)が増えれば、エマルジョン燃料自体の発熱量は低減する。これを確かめるために、それぞれのエマルジョン燃料の真の発熱量を算出し、熱効率を調べた。

$LCV_{em} =$

$$(\text{油の } LCV) \times (\text{油の割合}) - 2.4W \times 1000 \quad \cdots (5)$$

ここで、 LCV_{em} は燃料の低位発熱量(kJ/kg)である。(油の LCV) (kJ/kg) は、式(4)から求めると、軽油の場合は 42992(kJ/kg)、FAME の場合は 37246(kJ/kg) である。(油の割合) は、軽油エマルジョン燃料の場合は 0.66 で、FAME エマルジョン燃料の場合は 0.67 で

ある。W は水分の割合（エマルジョン燃料 1kg 中の水の質量 kg の値）であり、軽油エマルジョン燃料の場合は 0.34 で、FAME エマルジョン燃料の場合は 0.33 である。

これらを式(5)に代入して求めたエマルジョン燃料の LCV_{em} を用いて、エマルジョン燃料の水による影響（エネルギー損失）を考慮した熱効率を式(6)によって算出し、比較してみると図 8 のようになる。

$$\text{熱効率 } B (\%) = \frac{P \times t}{O_{ilem} \times LCV_{em}} \times 100 \quad \cdots (6)$$

ここで、 P は出力(kW)、 t は計測時間 (s)、 O_{ilem} は消費したエマルジョン燃料 (kg)、 LCV_{em} はエマルジョン燃料の低位発熱量 (kJ/kg) である。

図 8 から、燃料噴射時期が 13.5°BTDC の時はエマルジョン燃料とその元となる燃料との熱効率の差はほとんどなくなっている。これは、図 3a) の燃焼解析の結果からもエマルジョン燃料の着火遅れの影響がそれほど大きくないことと、エマルジョン燃料の燃焼終わりが比較的早く終わり、エマルジョン燃料の燃焼が上死点近くで行われているからである。

燃料噴射時期が遅くなると、エマルジョン燃料の熱効率はそれぞれ元となる燃料の熱効率と比べて低くなりその差は大きくなっている。これは、図 3b) の燃料噴射時期 7.5°BTDC の場合の燃焼解析の結果から、エマルジョン燃料の着火遅れの影響が大きくなり、エマルジョン燃料の燃焼が上死点から離れていくことによると考えられる。

図 9 に NOx と熱効率の関係を示す。図 9 の熱効率は通常使用する熱効率 A を使っている。燃料噴射時期を遅らせると NOx は低下するが熱効率も低下する。逆に燃料噴射時期を早めると NOx は増加するが熱効率は高くなる。いわゆるトレードオフの関係である。また、軽油（または FAME）をエマルジョン化すると NOx は低下するが熱効率も低下した。

軽油と FAME の違いについて見てみると、FAME（または FAME エマルジョン燃料）は軽油（または軽油エマルジョン燃料）に比べると、同じ熱効率では NOx が低い値であり、また、同じ NOx の値の場合は熱効率が低い状態であり、より有利な状態である。FAME の熱効率が良い理由の一つは、燃焼解析の結果から着火性が良いことが考えられる。FAME のエマルジョン燃料も図 3 b) から軽油のエマルジョン燃料に比べて着火性が良く、これが熱効率が良い理由の一つと考えられる。

Fig. 8 Effect of emulsified fuel on thermal efficiency B

Fig. 9 Relation between NOx and thermal efficiency (No data on injection timing 13.5°BTDC of GO-EF30)

4. まとめ

小型高速 4 サイクルディーゼル機関（運転条件：5.8kW/1363rpm）にパーム油から作られた FAME 及び軽油と、それぞれの燃料のエマルジョン燃料（水混合割合 30%（容積比））を用いて実験を行った結果、次のことが分かった。

- 1) FAME の着火時期は軽油より早い。FAME のエマルジョン燃料は軽油のエマルジョン燃料より着火性が良い。
- 2) 同じ水混合割合のエマルジョン燃料の場合、FAME のエマルジョン燃料の NOx 低減率は、軽油のエマルジョン燃料の NOx 低減率より大きい。FAME の発熱量が軽油より低いため、同じ発熱量あたりであると FAME の量が軽油より多く必要であり、FAME のエマルジョン燃料の場合、これに付随して水の量が多くなるのが理由の一つである。
- 3) スモークについては、軽油に比べて、FAME やそれぞれのエマルジョン燃料は低い値である。

- 4) 熱効率については、FAME は軽油より良い結果であった。それぞれの燃料のエマルジョン燃料は、水の混合割合によるエネルギー損失分は悪くなる結果であった。
- 5) FAME のエマルジョン燃料化は軽油のエマルジョン燃料化に比べて着火遅れを抑制しながら、NO_xを低減することが可能であることが分かった。
- 10) N. Awai, et.al., *Fuels*, (1994-4), 254, Sankaido.

参考文献

- 1) IMO's GHG reduction strategy, 2018 ClassNK Spring Technology Seminar, (2018-6), 1-22.
- 2) S. Nishio, et al., Combustion and Exhaust Characteristics of Bio-fuels in Marine Diesel Engine, *Proc. of ISME*, (2011-10), C3-4.
- 3) T. Komoda, et al., Actual Condition and Regulation of Air Pollution from Ships - Emission Control of Two-Stroke Low-Speed Diesel Engines -, *Journal of JIME*, 37-1(2002-1), 58-67.
- 4) M. Higashida and M. Hanafusa, Combined EGR and Water Emulsified Fuel System to Reduce NO_x Emission, *Journal of JIME*, 48-6(2013-11), 747-752.
- 5) T. ZHANG, et al., Emission Characteristics and Performance of Marine Four-stroke Diesel Engine Operated with Emulsified Marine Diesel Fuels in Different Mean Water Particle Diameter, *Journal of JIME*, 39-12(2004-12), 905-912.
- 6) D. Yamanishi, et.al., Application of a Newly Developed Water Mixture Fuel Generator to IMO Regulations, *Journal of JIME*, 53-3(2018-5), 380-385.
- 7) N. Miyawaki, et.al., Improvement of Combustion Characteristics of Jatropha Curcas Oil by Water Emulsification Combustion Analysis in Pre-Combustion Chamber Type Diesel Engine, *Journal of JIME*, 46-5(2011-9), 752-757.
- 8) Y. Yoshimoto, et.al., Performance of a Diesel Engine Using Transesterified Fuel from Vegetable Oil (Effects of Water Emulsification), *Transactions of JSME*, B 67-653(2001-1), 264-271.
- 9) M. A. Kalam and H. H. Masjuki, Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil, *Biomass and Bioenergy*, 27(2004-9), 289-297.