西 尾 澄 人** 徐 芝 徳** 井 亀 優**
大 橋 厚 人** 桑 原 孫四郎**

Study on Improvement of Biofuel Combustion in Marine Diesel Engine

By Sumito NISHIO, Zhide XU, Masaru IKAME, Atsuto OHASHI, Magoshiro KUWABARA

Biofuel has lately attracted considerable attention as an effective renewable energy and as a countermeasure against global warming. This paper presents results of improvement of combustion in a 4 stroke cycle medium speed marine diesel engine using marine diesel oil (MDO), marine fuel oil (MFO) and biofuels without esterification such as rapeseed oil and used vegetable oil. The authors systematically investigated the effect of biofuel content of fuel oil, the effect of fuel injection timing, and the effect of assist injection system which is a new fuel injection system composed of a common rail system and a cam drive pump. The findings are the following: (1) In high engine load conditions, it is possible to reduce CO, PM and smoke by mixing used vegetable oil with MFO because the combustion of biofuel achieves low CO, PM, and smoke emissions in these conditions. (2) In low engine load conditions, the combustion of biofuel results in higher CO and smoke emissions, but it is possible to reduce CO and smoke significantly by using assist injection system (a small amount of low pressure pre-injection).

1. はじめに

植物油等のバイオ燃料は、地球温暖化対策に有効な再生可能エネルギーとして注目されている。バイオ燃料をディーゼル機関に適用する際、粘度を低くする等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フュエル（BDF、エステル化処理したバイオ燃料）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。一般的には米国再生可能エネルギー研究所（NREL）の調査にあるように、BDFの軽油への混合率を増やすと、NO_xは増加し、PM、HC、COは大幅に減少すると言われている。

（100%BDFの場合、軽油に比べてNO_xは10%増加、CO、PMは約50%低減、HCは70%低減）¹⁾

一方、BDFはエステル化処理等の前処理を必要とするためにコスト増となるが、高粘度の重油に対応できる船用ディーゼル機関では、高粘度の植物油でも加熱して直接利用する可能性がある。著者らは、エステル化処理をしていない菜種油、パーム油、廃食油を船用中速ディーゼル機関（3気筒、過給機付き、最大出力257.4kW/420rpm、松井鉄工所製）に適用し、排ガスに与える影響や機関特性に与える影響を明らかにした^{2), 3)}。

図1. 各種燃料がスモークに与える影響

その中で、船用ディーゼル機関へのバイオ燃料の使用は、軽油やA重油の場合に比べて、高負荷状態ではスモーク、COを減少させるが、NO_xを増加させ、低負荷状態ではスモーク、COを増加させ、これらの対策が必要であることを示した（図1）。

また、低負荷状態ではバイオ燃料の燃焼は悪いが、電子制御燃料噴射装置と機械式燃料噴射装置を組み合わせた新しい噴射系（アシスト噴射と呼ぶ）を船用ディーゼル機関に適用し、菜種油とA重油の混合油（菜種油：A重油＝50：50）を用いた実験において、低負

*原稿受付 平成23年9月21日。

**正会員 (独) 海上技術安全研究所 (三鷹市新川6-38-1)。

荷状態でのバイオ燃料の燃焼改善にアシスト噴射が有効であることを明らかにした⁴⁾。

高負荷状態ではバイオ燃料の燃焼が良いため、廃食油をC重油に混合して、C重油の燃焼を改善させる方法が考えられる。C重油排気のPMでは燃料中の硫黄分に由来するサルフェートとその結合水が重量の過半を占めることから、硫黄分の少ない廃食油を混合することは、燃料中の硫黄分の削減によるPM排出量の削減にも有効である。廃食油をエステル化処理せずに使用することは、コストを低く抑えられ、C重油と混合して使用することにより安く燃焼を改善できる可能性がある。そこで、C重油に廃食油を混合して、その混合割合が排ガス特性および機関特性に与える影響を調べたので報告する。

更に、低負荷状態（船用特性25%負荷率）で菜種油100%の燃料を用いて、アシスト噴射による燃焼改善方法について系統的に調べたので結果を報告する。なお、図1のスモークの結果から分かるように、菜種油と廃食油はほぼ同じような傾向を有しており、この結果は廃食油についても同様なことがいえる。

2. 実験装置および方法

2.1 使用燃料 使用した燃料は、A重油、C重油、菜種油、廃食油であり、その性状を表1、表2に示す。菜種油等バイオ燃料は、粘度、引火点が軽油やA重油に比べて高く、総発熱量は軽油やA重油に比べて約10%低い。ただし、単位体積当たりの発熱量に換算すると、その差は小さくなり軽油と同等である。なお、バイオ燃料は約10%の酸素を含んでいる。

2.2 実験用ディーゼル機関 本研究に使用した実験用ディーゼル機関は、表3に示した船用中速4ストロークサイクルディーゼル機関である。本ディーゼル機関はA重油仕様で作られたものであるが、高粘度油で実験を行うため、恒温油槽、ヒータ付き燃料配管により燃料加熱ができるように燃料系統を改造してある。

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、NO_x、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。

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。

PM計測は、JIS B8008 に準拠した排気希釈装置 (エフテクノ製、MIT-2000CT型) を使用してフィルタ (東

表1. 使用燃料の一般性状分析結果

		A重油	C重油	菜種油	廃食油
密度(15℃)	g/cm ³	0.8824	0.9743	0.9215	0.9233
動粘度(50℃)	cSt	2.9	182.3	25.2	23.7
流動点	℃	-30.0	-7.5	-15.0	-7.5
引火点	℃	94	122	243	236
水分	%(m/m)	0.01	0	0.03	0.11
残留炭素	%(m/m)	0.03	11.9	0.33	0.34
灰分	%(m/m)	0.000	0.009	0.000	0.000
硫黄分	%(m/m)	0.07	2.14	0.01	0.01
アスファルテン	%(m/m)	0.29	5.15	0.17	0.22
ドライスラッジ	%(m/m)	0.001	0.0045	0.001	0.000
総発熱量	J/g	44470	42760	40750	39450
セタン指数		42.6	-	33.8	36.7
CCAI		843	844	820	823
90%留出温度	℃	-	-	333.5	362.0
低温目詰まり点	℃	-	-	-	-
酸価	mgKOH/g	-	0.11	0.05	2.77

表2. 使用燃料の元素分析結果

	Unit	A重油	C重油	菜種油	廃食油
H	(wt%)	12.53	11.02	11.98	11.66
C	(wt%)	87.43	85.9	77.35	77.16
N	(wt%)	0.20	0.26	0.08	0.11
O	(wt%)	<2.5(0.6)	<2.5(1.5)	10.7	11.1

表3 船用中速ディーゼル機関の諸元

製作者	松井鉄工所
型名	MU323D6SC
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 ²)
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

表4 排ガス測定原理

NO _x (NO (0~3000ppm), NO ₂ (0~500ppm))
: 定電位電解法
CO (0~10000ppm): 定電位電解法
O ₂ (0~25Vol.%) : ガルバニ電池式
CO ₂ (0~50Vol.%) : NDIR (非分散型赤外線吸収法)

京ダイレック製、TX40HI20-WW) に捕集したPMをマイクロ天秤 (メトラー製、MT5) で計量した。

2. 4 実験方法 はじめに、高負荷状態において、良好に燃焼するバイオ燃料を用いた燃焼改善効果を調べるために、廃食油と C 重油の混合油で廃食油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た。体積での混合割合を 0% (C 重油), 25%, 50%, 75%, 100% (廃食油) と変えて実験を行った。エンジン運転条件は船用特性の負荷率 75% (機関出力: 193.1kW (262.5PS), 機関回転数: 382rpm) とした。

次に、低負荷状態において、燃焼が悪いバイオ燃料の燃焼改善方法を系統的に調べるために、①A 重油混合による燃焼改善効果、②燃料噴射時期変更による燃焼改善効果、③アシスト噴射による燃焼改善効果について調べた。燃料噴射系統は機械式燃料噴射装置と電子制御式燃料噴射装置を併用できる配管に変更した。

一般に燃焼改善のためには、より燃焼性の良い燃料を混合することが知られている。そこで、菜種油と A 重油の混合油で菜種油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た。体積での混合割合を 0% (A 重油), 25%, 50%, 75%, 100% (菜種油) と変えて実験を行った。エンジン運転条件は船用特性の 25% 負荷率 (機関出力: 64.35kW (87.5PS), 機関回転数: 265rpm) とした。

次に、燃焼改善のためには、適切な燃料噴射時期に設定することが知られている。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 13 度, 11 度, 9 度 (基準), 7 度, 5 度と変えて実験を行った。燃料には菜種油 100% を使用して実験を行った。

次に、燃焼を改善するためには、燃料噴射の高圧化や、噴射時期、噴射パターンを変更できる燃料噴射装置が有効であることから、機械式燃料噴射装置に電子制御燃料噴射装置を付加した燃料噴射系で、燃料には菜種油 100% を使用して実験を行った。アシスト噴射に用いるコモンレール式燃料噴射装置は、最大圧力 180MPa の自動車用コモンレールを使用して

いる。実験に際し、機関を各運転条件に設定後、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。機関の各種温度、圧力データは 1 秒間隔で収集した。

排ガス計測は、機関の状態が静定した後、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 15m 下流の穴に差し込み、排ガス成分濃度指示値が安定した約 5 分後にデータ収集した。

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 15m 下

流の穴に差し込み計測した。本エンジンのスモーク濃度は低いため、通常の 5 倍の体積の吸引を 5 回実施し、その平均値を計測値とした。

廃食油、C 重油およびこれらの混合油は粘度が高いため、動粘度を通常機関に適用できる 10cSt 程度にするために、恒温油槽内で約 60°C に加熱し、燃料配管内ヒータで加熱して燃料噴射ポンプ前で約 100°C になるように設定して実験を行った。A 重油、菜種油およびこれらの混合油も動粘度を 10cSt 程度にするために、燃料噴射ポンプ前の温度をそれぞれ次のように設定して実験を行った。A 重油および A 重油 75% 菜種油 25% 混合油: 約 25°C, A 重油 50% 菜種油 50% 混合油: 約 50°C, A 重油 25% 菜種油 75% 混合油: 約 65°C, 菜種油: 約 90°C。

なお、すべての実験は同一時期に行っている。

3. 実験結果および考察

3. 1 高負荷状態での排ガス特性 高負荷状態ではバイオ燃料の燃焼が軽油や A 重油より良いため、廃食油を C 重油に混合して、C 重油の燃焼を改善させる方法が考えられる。図 2 a), b) に C 重油と廃食油の混合割合が排ガスに与える影響を示す。エンジンの運転状態は船用特性の負荷率 75% である。

スモーク、PM、CO は廃食油の混合割合が増えるに従い、ほぼ混合割合に比例して低減した。PM の低減については燃焼改善効果に加え、廃食油の硫黄分が 0.01% と低いため、燃料中の硫黄分の削減、さらに PM 排出量の削減につながった結果である。NOx はバイオ燃料の混合割合が増えるに従い、燃焼改善により高くなる傾向にある。O₂ は混合割合の違いで特に大きな変化は見られなかった。

図 3 に廃食油と C 重油の混合割合を変えた実験の燃焼解析の結果を示す。熱発生率から分かるように、C 重油の着火時期は遅く、予混合燃焼での熱発生率は高くなっているが、廃食油の混合割合が増えるに従い、着火時期が早くなり、予混合燃焼の熱発生率が低くなる。

図 4 a), b) に廃食油と C 重油の混合割合が機関特性に与える影響として、最高筒内圧、排気温度、熱効率を示す。最高筒内圧は廃食油の混合割合の違いで特に大きな変化は見られなかった。最高筒内圧が変わらないにもかかわらず、廃食油の混合割合が増えるに従い NOx が増えた理由は、バイオ燃料は含酸素燃料 (分子構造中に酸素を 10% 含んでいる) であり、局所的な燃焼場の温度が高くなったためと考えられる⁵⁾。

排気温度は、廃食油の混合割合が増えるに従い、

図2. 混合割合が排ガスに与える影響
(エンジン負荷率: 75%)

図4. 混合割合が機関特性に与える影響
(エンジン負荷率: 75%)

図3. 混合割合が燃焼特性に与える影響
(エンジン負荷率: 75%)

低下した。熱効率は、排気温度と対応する排気損失と関係しており、廃食油の混合割合が増えるに従い、向上した。

C 重油に廃食油を混合したことにより、燃焼が改善された。

3. 2 低負荷状態での排ガス特性

3. 2. 1 A 重油混合による燃焼改善効果 一般に燃焼改善のためには、より燃焼性の良い燃料を混合することが知られている。そこで、菜種油と A 重油の混合割合を変えて実験した結果を図 5a), b) に示す。CO, スモークは菜種油の混合割合が増えると、ほぼ混合割合に比例して増加する。NOx は菜種油の混合割合が増えると低くなる傾向にある。O₂ は混合割合の違いで特に大きな変化は見られなかった。

図 6 の燃焼解析図の熱発生率から分かるように、菜種油と A 重油の着火時期はほぼ同じであるが、菜種油の予混合燃焼の大きさが小さい。これは、菜種油の初期の燃焼が悪いことが推測される。

図 7a), b) に最高筒内圧, 排気温度, 熱効率を示す。最高筒内圧は菜種油の混合割合が増えるに従い低下しており、NOx の低下と対応している。排気温度と熱効率は菜種油の混合割合の違いで特に大きな傾向は見られなかった。

3. 2. 2 燃料噴射時期変更による燃焼改善効果

一般に燃焼改善のためには、適切な燃料噴射時期に設定することが知られている。そこで船用中速ディーゼル機関に菜種油 100% の燃料油を使用して、図 8 に示すように燃料噴射時期を変えて実験を行った。燃料噴射時期は図 8 の燃料噴射圧の加圧が始まる位置を上

図5. 混合割合が排ガスに与える影響
(エンジン負荷率: 25%)

図7. 混合割合が機関特性に与える影響
(エンジン負荷率: 25%)

図6. 混合割合が燃焼特性に与える影響
(エンジン負荷率: 25%)

図8. 燃料噴射時期が燃焼特性に与える影響
(エンジン負荷率: 25%)

死点前13度, 11度, 9度, 7度, 5度に変えて実験を行った(図中それぞれ-13°, -11°, -9°, -7°, -5°と記載). 基準の燃料噴射時期は上死点前9度(-9°)である. エンジンの運転条件は船用特性25%負荷率である.

燃料噴射時期が排ガスに与える影響を図9 a)~d)(図中 off の表示) に示す. CO, スモーク, NO_x は, 燃料噴射時期を遅くすると低減する. O₂ は, 燃料噴射時期を遅くすると若干増加する傾向にある. CO, スモークの結果から燃料噴射時期の変更は燃焼を改善するが, A 重油の値と比較すると, 大幅な低減には至っていない.

燃料噴射時期が最高筒内圧, 排気温度, 熱効率に与える影響を図10 a)~c) (図中 off の表示) に示す. 最高筒内圧は燃料噴射時期を遅くすると低下し, NO_x と対応している. 排気温度は燃料噴射時期を遅くする

図9. 燃料噴射時期, アシスト噴射が排ガスに与える影響
(エンジン負荷率: 25%, on, off はアシスト噴射の有無)

と高くなる. 熱効率は燃料噴射時期を遅くしすぎると悪化する.

図10. 燃料噴射時期, アシスト噴射が機関特性に与える影響
(エンジン負荷率: 25%, on, off はアシスト噴射の有無)

3. 2. 3 アシスト噴射による燃焼改善効果 燃焼を改善するためには, 燃料噴射の高圧化や, 噴射時期, 噴射パターンを変更できる燃料噴射装置が有効である. そこで, 図11に示すように, 機械式燃料噴射装置に電子制御燃料噴射装置を付加した燃料噴射系で, 燃料には菜種油 100%を使用して実験を行った. なお, 3.2.1 の A 重油混合の実験および 3.2.2 の燃料噴射時期変更の実験の結果もこの噴射系でアシスト噴射を使用しない状態で行った結果である.

アシスト噴射を使用した際の結果を図9 a)~d) (図中 on の表示) に示す. アシスト噴射を使用した燃料噴射パターンは, 徐ら⁴⁾ が船用ディーゼル機関で

図11. アシスト噴射の概念図

図12. アシスト噴射が燃焼特性に与える影響

行った実験で有効であった低压少量のプレ噴射の噴射パターンを採用した。このプレ噴射は、燃料噴射ノズルの開弁圧を少し超える程度の低压で、徐ら⁴⁾の実験結果に示されるように、上死点前約10度のところから起こる、プレ噴射された燃料の燃焼による熱発生率の変化がほとんど無い程度の少量の噴射である。機械式燃料噴射装置の燃料噴射時期を上死点前11度、9度、7度、5度に変えて（図中それぞれ-11°、-9°、-7°、-5°と記載）、プレ噴射を上死点前20度に行い実験を行った。なお、燃料噴射ノズルの開弁圧は25.5MPaである。

スモーク、COは大幅に低減している。A重油の値と同等またはそれ以下まで低減している。

NOxについては、アシスト噴射onの場合は、アシスト噴射offの場合に比べて増加している。

図12の燃焼解析の結果を見ると、上死点前約10度から起こる、低压少量のプレ噴射による燃焼により、メイン噴射の着火遅れが短くなり、爆発的な予

混合燃焼が抑えられている。少量のプレ噴射の効果としては、「①主噴射が始まる前の燃焼室内の温度、圧力の上昇」と「②プレ噴射による火種の効果」が考えられる。低負荷時は、燃料が着火する時のシリンダ内圧が低く、燃料噴霧の到達距離が長くなるため、蒸発特性の悪い菜種油の場合、壁面の影響を受け、燃焼が悪化したものと考えられる。アシスト噴射を使用した場合、低压でプレ噴射された少量の燃料が燃焼室から離れた適切な場所で燃焼し、①、②の結果として、主噴射の燃料の着火遅れを少なくし、燃料噴霧の燃焼室壁面の影響を無くしたため、燃焼が改善されたと考える。この結果、低負荷状態においてもNOxは若増加するものの、CO、スモークの大幅な低減ができたものとする。バイオ燃料は含酸素燃料であり、低負荷状態においても適切に着火させれば高負荷状態同様、良好な燃焼が実現できると考える。

図10（図中onの表示）に最高筒内圧、排気温度、熱効率を示す。アシスト噴射onの最高筒内圧は、アシスト噴射offに比べて高く、NOxの結果と対応している。また、最高筒内圧は燃料噴射時期が遅くなるに従い低下しており、NOxの低下と対応している。排気温度は燃料噴射時期を遅くすると高くなるが、熱効率は今回の実験の範囲内では、悪化が起きていない。

低压少量のプレ噴射と遅延させた主噴射の併用で、スモーク、COを低く抑えつつ、NOxを低減することが可能である。

4. まとめ

①船用中速ディーゼル機関の高負荷状態（エンジン負荷率：75%load）で廃食油を使用して、C重油混合割合変更実験を行った。その結果、下記のことが分かった。

- ・廃食油をC重油に混合することによって、スモーク、PM、COの低減が可能である。

②船用中速ディーゼル機関の低負荷状態（エンジン負荷率：25%load）で菜種油を使用して、A重油混合割合変更実験、燃料噴射時期を変更した実験およびアシスト噴射（従来の機械式燃料噴射装置に電子制御式燃料噴射装置を加えた燃料噴射）による実験を行った。その結果、下記のことが分かった。

- ・A重油混合による燃焼改善では、A重油なみに改善するには多量のA重油が必要となる。
- ・燃料噴射時期変更による燃焼改善では、大幅な

改善は難しい.

- ・アシスト噴射の使用により（低圧少量のプレ噴射），大幅な燃焼改善が行える（A 重油のスモークやCO の値と同等またはそれ以下）.
- ・低圧少量のプレ噴射と遅延させた主噴射の併用で，スモークおよび CO を低く抑えつつ，NOx を低減することができる.

謝辞

本研究は独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」により実施しました. ここに謝意を表します.

参考文献

- 1) U.S.EPA, Draft Technical Report, EPA420-P-02-001, (2002), 1-118
- 2) 西尾他 8 名, 日マリ学誌,45-5(2010-9),743-749
- 3) 徐他 4 名, 日マリ学誌,46-1(2011-1),127-132
- 4) 徐他 3 名, 日マリ学誌,46-2(2011-3),252-256
- 5) 松村他 5 名,バイオディーゼル最前線, (2006) ,221, 工業調査会