船用ディーゼルエンジンにおける各種燃料の燃焼と 排ガス特性に関する研究*

吉 本 隆 光** 重 枝 隆 男*** 浅 田 泰 洋****

By Takamitsu Yoshimoto, Takao Shigeeda and Yasuhiro Asada

The exhaust gas emitted from the marine diesel engines creates air pollution problems. Also, the quantity of petroleum fuel resources is decreasing, so a substitute for conventional petroleum fuel is needed. The thermal heat efficiency of diesel engine is high when their compression ratios are higher. Various types of fuel are widely used in diesel engines. Such fuels as light oil (diesel oil), A-heavy fuel oil, recycled bio-oil (soybean oil), fish oil, and waste plastic oil are recently substituted for diesel fuel oil., so we investigated the resulting efficiency and combustion characteristics. S.F.C.(specific fuel consumption) and concentrations of O₂, CO₂, CO, and NO_x in the exhaust gas were measured on loads of 10 to 50%. The properties and characteristics of each fuel are discussed as a substitute fuel of diesel engine.

1. はじめに

現在、内燃機関から排出されるガスによる大気汚染といった地球の環境問題が大きく取り上げられている。また、石油燃料の保存の面からも、燃料の多種多様化により従来の燃料の代替が必要になってきている⁽¹⁾⁽²⁾。そこで燃料を幅広く用いることが可能で、圧縮比が高く、熱効率が高いといった特徴があるディーゼル機関は、車両用、一般産業用から船用主機関に至る各種用途分野に幅広く用いられている。しかし環境問題が大きな問題となり、排ガス中の窒素酸化物(NO_x)や煤塵等の排ガス対策が求められている。

そこで、本報では石油燃料の代替の面から、従来から用いられている軽油をベースに比較的低質な石油燃料としてA重油⁽³⁾、海洋資源として魚油、リサイクルの観点からバイオ油(再生てんぷら大豆油)^{(4)~(9)}、さらに廃プラ油^{(10)~(13)}の各種燃料について、低負荷時(10~50%)でのディーゼル機関の性能を測定し、性能に影響を及ぼす各因子との関連性について調べる。

また、各種燃料に対する燃料消費率および排ガス中のO₂、CO₂、CO、NO_x濃度を測定して⁽¹⁾、代替燃料としての有用性を検討する⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

2. 実験装置と方法

実験に使用した機関はヤンマーディーゼル2TL4サイクル直接噴射式エンジンである。その諸元を表1に示す。

表1 供試機関諸元

Engine type	YANMAR diesel engine 2 T L
Cylinder bore×stroke	95×115 mm
Number of cylinders	2
Compression ratio	18.6
Maximum power	13.2kW/1800rpm
Connecting rod length	230 mm
Crank shaft length	57.5 mm
Clearance of Valve	0.15 mm
Injection timing	10~12° before T D C

供試機関の回転数を800rpm、1000rpm、1200rpmにして、直流電気動力計(定格11kW, 550~1650rpm, 220V, 37A)によりエンジンに負荷をかけ、エンジン性能面について燃料消費率を求める。また、排ガス濃度を測定して、気筒内燃焼状態と排ガス特性との関連を調べる。表2に各種燃料の成分を示す。

*原稿受付 平成16年2月7日

**正 会 員 神戸市立高専(神戸市西区学園東町8-3)

*** トヨタ自動車(株)

**** 神戸市立高専専攻科

表2 燃料成分分析表

	Light oil	A-Heavy oil	Soybean oil	Fish oil	Waste plastic oil
Kinematics Viscosity (mm ² /s)	5.3	7.0	211	234	16.4
Gross Calorific value (MJ/kg)	39.2	—	45.5	45.7	39.1
C (mass %)	81.1	84.7	77.2	77.7	85.7
N (mass %)	0.002	0.01	0.40	0.17	0.05
H (mass %)	13.7	13.0	11.7	11.4	13.4
CCAI	787	778	838	692	780
Density (kg/m ³)	850	850	970	825	801

着火遅れについては、気筒内圧力を連続測定して指圧線図から着火時を読み取り、噴射時と着火時との差からを求める。噴射弁前導管にひずみゲージを取りつけ、燃料噴射時を測定する。

- ・燃料中C・H・N成分はTCD法を用いる。
- ・各種燃料の発熱量はボンブ熱量計を用いる。
- ・排ガス成分の測定には、ガスクロマトグラフィー・ガルバニ電池式O₂濃度計、低電位電解式CO濃度計を用いる。また、NO、NO_x濃度は汎用型分析計(CLA-510S)により測定する。

Vカップ法で動粘度係数を求める。Vカップに入れた燃料が無くなるまでの時間を測定して、式(1)より求める。着火性の目安であるCCAI⁽¹⁶⁾は以下の式(2)より求める。

$$V=\{0.0378\times(1.047\times t-2.24)-4.0/(1.047\times t-2.24)\}\times100\qquad\cdots(1)$$

t：測定時間(s)

$$CCAI=D-140.7\times\log_{10}\log_{10}(V+C)-A\qquad\cdots(2)$$

D：燃料密度(kg/m³) V：動粘度(mm²/s)
C：0.3 A：80.6

3. 実験結果及び考察

3. 1 燃料消費⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

図1は軽油と低質な石油燃料としてA重油、および粘性の高い魚油・大豆油ならびに低質な廃プラ油を用

いて、回転数・負荷(軸馬力)に対する燃料消費率をしめす。

図1 燃料消費率

(a) 図 は回転数 800rpm (c) 図は回転数 1200rpm における軽油と低質な石油燃料としてA重油, および粘性の高い大豆油での燃料消費率について負荷を変えて比較したものである。燃料の種類による差異はあまり見られない。

また(b)図は 1000rpm における軽油・A重油・大豆油と粘性の高い魚油・リサイクル油としての廃プラ油での燃料消費率を示す。

各回転数ごとにみて, 負荷(軸出力)に対し燃料消費率は低下して, また, 粘性の高い大豆油(バイオ油)においては, 軽油・A重油との差異もみられない。魚油・廃プラ油の場合, 他の燃料に比べて燃料消費率が多少高くなっており, 燃料種の違いの燃焼性への影響はみられる。

粘性が高いことによる燃焼性へ影響を及ぼしているとはいえない。また, 負荷の増加とともに各燃料における差異はなくなり, 燃焼性からみて, 代替燃料として使用できるようである。

3.2 O_2 濃度

燃料には軽油と低質で炭素量が多いA重油, および粘性の高く着火性が悪い大豆油をもちいる。図2は各燃料のそれぞれの回転数における排ガスでの O_2 濃度について負荷を変えて比較したものである。

各燃料とも O_2 濃度は負荷が増加するとともに低減している。燃料種の違いからみるとA重油の排ガス O_2 濃度が高くなる傾向がみられが, 回転数を上げるとその差がなくなる。また, 大豆油も各回転数においても十分燃焼が行われているといえる。

3.3 CO_2 ・ CO 濃度⁽⁵⁾⁽⁶⁾

図3は軽油と炭素成分が軽油より多いA重油を燃料として, 各回転数で負荷(軸馬力)を変えて CO_2 濃度を比較したものである。

CO_2 濃度は負荷が増すとともに増加している。軽油・A重油とも回転数の影響はあまり見られない。

A重油のほうが濃度が高く排出されている。これは, 燃料成分中の炭素C分が多いことにより生成量も多くなったと思われる。

図4は軽油・A重油の 1000rpm における CO 濃度を示したものである。

両燃料とも多少の不完全燃焼が見られる。また, A重油のほうが少し高いが, これは燃料中の炭素C分が多いためと考える。

図2 排ガス O_2 濃度

(a) 800rpm

図4 排ガスCO濃度

(b) 1000rpm

(c) 1200rpm

図3 排ガスCO₂濃度

3.4 NO_x濃度 ^{(1) (5) (6)}

図5は1000rpmにおける軽油、A重油、大豆油の排ガスのNO_x濃度を示したものである。

NO_x濃度は各燃料とも軸出力の増加とともに増加している。また2～4kWでは大豆油は軽油とそれほど差異は見られないが、50%負荷付近(6kW)では大豆油が他の燃料よりもNO_x濃度が高くなっている。これは2～4kW(1/4負荷以下)では着火性が悪く、十分に燃焼していなかったためと思われる。エンジンの負荷の増加とともに燃焼性もよくなり、燃料中に含まれたFuel NによるNO_x生成の増加と考える。

図5 排ガスNO_x濃度

3. 5 着火遅れ^{(4) (6) (10) (13)}

図6に各燃料の1000rpmについて着火遅れのグラフを示す。燃料噴射時期は燃料噴射弁前の導管にひずみゲージを取りつけ着火遅れ時間を測定する。各種燃料とも1.0~1.5msで軸馬力による変化はあまり見られない。また、着火性の悪い大豆油と比較的よいとされる軽油やA重油との差も見られず燃料の種類の違いによる差異はみられない。

図6 各種燃料の着火遅れ

4. まとめ

(1) 燃料の燃料消費率を比較してみると、多少の差異は見られるが、負荷50%付近ではA重油、粘性の高い大豆油（バイオ油）・魚油では差異は見られない。廃プラ油は多少燃料消費率が高くなっている。各回転数による燃料消費率には、負荷（軸馬力）により変化している。

(2) 各燃料とも排ガス O_2 濃度は負荷が増加するとともに低減している。炭素C分の多いA重油の排ガス O_2 濃度が高くなる傾向がみられる。

(3) CO_2 濃度についてはA重油のほうが軽油よりも高い。また、 CO 濃度についても同じことがいえ、燃料中の炭素C分に影響される。

(4) NO_x 濃度については、A重油は軽油よりも高くなっている。また、大豆油は50%負荷では濃度が高くなり、負荷の増加とともに燃焼性が改善され燃料成分中のFuel N分の影響も見られる。

(5) 各種燃料における着火遅れの差異は見られない。

これらのことから、各種燃料による性能面ではA重油、大豆油、魚油また廃プラ油は代替燃料として、噴射

時期の調整や圧縮比の変更なしでも十分に使用できる。しかし排ガス特性からみて、燃料成分の影響はみられ、燃料中の窒素N分は NO_x 濃度に影響が見られる。また廃プラ油は温度による粘性の変化が激しく（特に温度10℃以下になると部分的に凝固状態になり燃料配管を閉塞する）、使用状況によっては10℃以上に保温する対策が必要となる。

本研究をはじめるにあたり、神戸大学海事科学部西田教授・藤田助教授のご助言を賜りここに記して謝意を表します。本研究をおこなうにあたり一部は日工記念財団助成金によりおこなわれものである。廃プラ油は（株）日本省エネ環境製品より提供を受けたものである。また、当時本校在学学生であった押川将之・小西祐司・三宅 翼・幸 貴史・柴 孝洋・長谷川 諭・尾崎宏史・河野 翔君の協力によるものある。

参考文献

- (1) 西田・吹田・藤田・原野, 日マリ学誌 vol. 36 No. 12 P44-53 (2003-12)
- (2) 前田・他 5 名, 日マリ学誌 vol. 38 No. 1 P28-35 (2003-3)
- (3) 西野・金岡・他 2 名, 内燃機関 vol. 25 No. 322 (1986-9)
- (4) 石井・樋谷, 日マリ学誌 vol. 35 No. 3, P222-226 (2000-3)
- (5) 西田・韓・原野・他 3 名, 日マリ学誌 vol. 37 No. 9, P54-60 (2002-9)
- (6) 武田・森田・柳沼, 日マリ学誌 vol. 36 No. 1, P49-56 (2001-1)
- (7) 村山他 5 名, 内燃機関 vol. 25 No. 314 P9-15 (1986-1)
- (8) 吉本, 日マリ学誌 vol. 38 No. 12 P53-60 (2003. 12)
- (9) 武田・森谷・棚沢, 日マリ学誌 vol. 38 No. 3 P82-90 (2003. 3)
- (10) 近藤・河野・増田, 日マリ学誌 vol. 37 No. 11 P12-16 (2002-11)
- (11) V.P.Hai・西田・藤田・他 3 名, 日マリ学誌 vol. 36 No. 3, P14-21 (2001-3)
- (12) P. H. Vu・西田・藤田・原野, 日マリ学誌 vol. 38 No. 1 P22-27 (2003. 1)
- (13) 野村他 3 名, 内燃機関 vol. 26 No. 336 P42-43 (1987-10)
- (14) 吉本・重枝・他 4 名, 日マリ学講 68 回論集 (平成 14-11) p177-180
- (15) 吉本・浅田・重枝, 日マリ学講 70 回論集 (平成 15-10) p27-28
- (16) 増田・近藤・河野, 日マリ学誌 vol. 34 No. 4 P269-275 (1999. 4)

質疑応答

質問者 大島商船高専 三原伊文

[質問 1]

魚油・大豆油は粘度が非常に高いようであるが、予め加熱するなど、前処理はしなかったのか、それによって結果はかなりかわってくるのではないのか。

[回答 1]

魚油・大豆油は粘性が高く、ご指摘のように前処理にて加熱することにより、粘性も小さくなり霧化状態もよくなります。燃料種によっては燃焼性が向上することも考えられますが、今回の実験では、加熱前処理設備もなくとも十分代替燃料として使用できるところをしめました。ただ、廃プラ油につきましては、10℃以上に保つ必要があります。

[質問 2]

魚油・大豆油は、その着火温度が化石燃料（軽油）とはかなり違うとおもわれるが、燃料噴射時期を変えることは考えていないのか。

[回答 2]

装置構造上変更ができません。各燃料における着火遅れの差異はみられませんでした。その結果を掲載しました。各燃料とも 1~2ms になりました。

質問者 水産大学校 前田和幸

[質問 3]

排気煙濃度は、通常低質な燃料ほど悪化する傾向にあると考えられる。軽油が A 重油の約 2 倍の値を示している理由

[回答 3]

一般には軽油に対して、低質油として A 重油を考えております。排ガス中の煤塵量（濃度）は高いといえます。ただし、A 重油と軽油の成分は、ほとんど差異はありません。また、着火性（C C A I）もそれほど変わりません。今回の実験結果では未燃分として C O 濃度は A 重油のほうが高く、燃料中 C 分が多少 A 重油のほうが多いためと考えます。一方、燃料消費率（S F C）からみて、軽油（図 1（b）参照）が高くなっており、燃焼性も悪かったとおもわれ、煤塵濃度は高くなりうると考えます。尚、ご指摘の 2 倍近くの煤塵濃度の差異は十分説明しきれません。今後実験等により検討は加

えていきたいと存じます。今回の結果は削除させていただきます。

[質問 4]

着火遅れは、常用負荷域において約 1 ms、低負荷域においても 2 ms 以内と考えられますが、本実験においては、いずれの負荷においても 3.5ms 以上になっている理由

[回答 4]

燃料噴射時期を上死点前 1 0° として着火時までの時間を着火遅れとしました。

講演でのご指摘後、噴射弁前にひずみ計を取りつけ確認しました。その結果を掲載しました。各燃料とも 1~2ms（図 6 参照）になりました。

質問者 海上保安大学校 吉田 肇

[質問 5] 大豆油および魚油の場合、排ガスの臭気はどのようなものか。

[回答 5]

ご指摘の通り臭気は環境問題として対処する必要があると思います。現時点で、これといった対策はなく、その基準についても、定量的に表すのは難しいと考えています。燃焼において、炭化水素 HC 濃度の大小も一つの判定基準になるのではと考えております。