菜種油・軽油混合燃料の ディーゼル機関への適用に関する研究*

吉 本 康 文**

Application Study of Rapeseed Oil and Light Fuel Oil Mixture in DI Diesel Engine

By Yasufumi Yoshimoto

Vegetable oils are renewable fuels that offer reductions in carbon dioxide emissions, and a number of studies have been conducted with vegetable oils in diesel engines. This study investigated rapeseed oil blended with light fuel oil as a diesel fuel substitute. The spray characteristics, such as spray angle and penetration under high pressure and room temperature conditions (1.57 MPa and 298 K), are discussed for fuel injection rates measured by the Bosch long tube method. The performance and emissions of a small, single-cylinder, DI diesel engine equipped with a toroidal type combustion chamber and a multiple-hole nozzle of $4\text{-}\phi 0.2$ were also examined. Blended fuels with equal proportions of light fuel oil and rapeseed oil, as well as fuels with lower rapeseed oil ratios, showed spray characteristics as good as those for light fuel oil alone. It was found that unblended rapeseed oil has a lower injection rate than that of light fuel oil. Compared with light fuel oil operation, equal proportions of light fuel oil and rapeseed oil showed quite similar brake specific energy consumption (BSEC) and combustion characteristics, and demonstrated lower smoke emission.

1. まえがき

菜種油や大豆油などの植物油は再生可能な資源であり、燃料サイクルでの CO_2 排出量を削減しうるなど、在来石油燃料に比べ優位な側面をもっている。このため、植物油をディーゼル機関の代替燃料として適用すべく、国の内外において精力的な取組みがなされてきている。^{(1)~(18)} 植物油は粘度が高く、高沸点・低蒸発性であり、既存の機関にそのまま使用した場合には、炭素状物質が堆積するなどのために重大な障害を引き起こすことが指摘されている⁽¹⁾。この対策として、エステル交換燃料（バイオディーゼル油）に改質する方法が一般に広く採用されている。しかし、この改質工程は煩雑でありコストがかかること、副生成物であるグリセリンの処理、などの問題をともなう。

これに対して、軽油⁽¹⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁷⁾ や 灯油⁽¹³⁾⁽¹⁸⁾、A重油⁽¹²⁾ などの軽質油、沸点の低い低級アルコール⁽¹⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁶⁾ あるいは含酸素化合物⁽¹⁶⁾ などを植物油に直接混合して改質するという簡便な試みも報

告されている。このほかには、燃料の加熱⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽¹⁸⁾ や水との乳化⁽⁶⁾⁽⁷⁾ により燃焼改善を図る方式、さらにはセラミックスの採用⁽¹⁵⁾ などにより燃焼室を遮熱構造とするなど、機関自体を植物油に適合するように改造を施す対策⁽⁹⁾ など提案されている。

ここで、植物油として菜種油を用いた場合には通常燃料である軽油との混合・溶解性が良好であり、したがって、菜種油・軽油混合燃料のディーゼル噴霧特性や噴射特性、機関諸性能などを詳細に検討しておくことは重要と考えられる。そこで本研究では、軽油への菜種油混合がディーゼル噴霧の性状や噴射率に及ぼす影響について調べるとともに、直接噴射式ディーゼル機関に適用した際の性能や排出物に及ぼす影響を検討した。その結果、軽油に対して等量までの菜種油混合は、軽油のみの場合と同等の機関性能や排気特性が得られること、また、噴霧性状や噴射率の変化についても比較的小さい範囲に抑えうることがわかった。

以下、実験の詳細について述べる。

*原稿受付 平成15年6月6日

**正 会 員 新潟工科大学（柏崎市藤橋 1719 番地）

表 1 供試機関および燃料噴射系統の緒元

Engine model	4 cycle, Horizontal, Water cooled
Stroke volume	411cc (Single cylinder)
Compression ratio	18
Combustion chamber	DI (Toroidal type)
Rated output	5.1kW/2400rpm (BMEP=0.62MPa)
Injection pump	Bosch PFR (Plunger 7mm)
Injection nozzle	DLLA 150 (4 - ϕ 0.2)
Opening pressure	21.7MPa

表 2 供試燃料の性状

	Rapeseed oil	Gas oil
Density [288K] (g/cm^3)	0.921	0.830
Viscosity [303K] (mm^2/s)	51.0	3.0
Net calorific value (MJ/kg)	36.75	42.96
Cetane index	—	52
Carbon (mass %)	77.6	86.0
Hydrogen (mass %)	11.7	13.6
Oxygen (mass %)	10.5	—
Sulfur (mass %)	<0.0001	0.11

2. 実験装置, および方法

2.1 供試機関, および燃料噴射系統

実験に使用した機関は、水冷・単シリンダ・四ストローク・無過給の小形直接噴射式ディーゼル機関であり、機関および燃料噴射系統の諸元を表 1 に示す。機関の運転に際しては、冷却水出口温度 $357 \pm 2\text{K}$ 、潤滑油温度 $343 \pm 2\text{K}$ に調整し、トルクが最大となる機関回転速度 (1900 rpm) 一定のもとで実施した。なお、動力の吸収には渦電流制動形電気動力計を使用した。

2.2 供試燃料

市販の純正菜種油 (農林水産省規格適合品)、および自動車用軽油を用いた。表 2 に供試燃料の性状を示す。菜種油は軽油に比べると密度および動粘度が非常に高く、低発熱量が 15% 程度低い。また、燃料の分子構造中に 11% 近くの酸素を含有する、いわゆる含酸素燃料である。本実験における菜種油添加率は、燃料全体に占める菜種油の体積割合で定義しており、ニート軽油 (0%) からニート菜種油 (100%) まで 5 段階に分けて実施した。なお、菜種油は同一製造元のものを用いた。

図 1 は、供試燃料の動粘度を菜種油添加率に対して示したものである。図 1 に示されるように、

図 1 菜種油添加率と動粘度

図 2 供試燃料の蒸留特性

菜種油・軽油混合燃料の動粘度は菜種油添加率の増加とともに指数関数的に増大する。この図より、軽油に対して等量の菜種油を混合した場合 (菜種油添加率 50%) の動粘度は、303K の温度において約 $12 \text{ mm}^2/\text{s}$ の値を示すことがわかる。

図 2 には、軽油、菜種油と軽油との等量混合油、および菜種油、それぞれについての蒸留特性を示す。ここで、軽油は常圧蒸留試験 (JIS K2254)、菜種油を含有する燃料については減圧蒸留試験 (JIS K2254) による分析結果を示す。なお、後者に関しては分析装置の都合上、データの取得範囲が 735K 以下に限定されたものとなっている。前報⁽¹⁷⁾ではガスクロ蒸留試験法を用いて菜種油の蒸留特性を調べた。その結果、20%以上の分留成分における沸点の上昇はみられなかったことから、供試菜種油の沸点範囲はほぼ 735K 止まりであろうと思われる。図 2 に示されるように、菜種油は軽油に比べるとはるかに高沸点であり、蒸発特性はきわめて悪いことが明らかである。

図3 噴霧性状観測装置

2.3 測定装置 インジェクタ線図の測定には、ひずみゲージ式の指圧計を使用した。熱発生率は燃焼解析装置を用いて100サイクル分のシリンダ内圧力履歴を収録し、その平均値から求めた。3・3節において燃焼安定性を調査したが、その指標には定常運転状態における燃焼最高圧 $P_{\max}$ のサイクルごとの変動をとりあげた。すなわち、メモリレコーダを用いて燃焼圧力を約100サイクルにわたって収録し、そのピーク値 $P_{\max}$ の分布における標準偏差を平均値で除した値として燃焼変動率を定義した。

排気ガス中の NO_x の測定には CLA 、 THC については FIA 、ホルムアルデヒド HCHO の測定は検知管法、黒煙濃度はボッシュ式スモークメータを用いてそれぞれ測定した。

2.4 噴霧性状の観測装置 常温高压の定容器内に供試燃料を一回噴射し、シャドウグラフ法を用いて噴霧性状を観測した。図3に実験装置の概要を示す。噴霧観察容器は内径100 mm×長さ130 mmの円筒形であり、両端部に石英ガラス窓（有効視野 $\phi 60$ ）が備えられている。噴射ノズルは容器側面中央部に配置されており、鉛直下向きに燃料噴射が行われる。ノズル開弁圧を実際の機関と同じ値にまで高めた状態で燃料噴射を行うために、下流側に噴霧受け容器（内径60 mm×高さ75 mm）を設け、噴霧のガラスへの跳ね返りを防止した。噴射ノズルには噴孔径0.2 mmの単孔ホ

図4 噴射率計測装置

図5 圧力波伝播速度計測装置

ール形（DLL-S形）を用い、1.57 MPa一定に加圧された常温空气中に一回噴射を行った。一回噴射の方法としては、シーケンサで制御された電磁弁により流路を切り替えるダミーノズル方式を採用した。噴霧の撮影には、高速度ビデオカメラ（ナックイメージテクノロジー製、Flash Cam）を用い、噴射開始からの遅延時間を変えながら瞬間撮影を行った。カメラの露光時間は5 μs 一定である。

2.5 燃料噴射率の計測装置 菜種油・軽油混合燃料の噴射特性を把握することを目的として、ボッシュ長管法⁽¹⁹⁾による燃料噴射率の測定を行った。図4に使用した装置の概要を示す。この方法は、ノズル出口の管内圧力 P が噴射率に比例するという次元単一波の理論をその測定原理としており、次式で求められる。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{f}{a\rho} P \quad \dots (1)$$

ここで、 dQ/dt ：噴射率 (m^3/s)、 f ：圧力測定部の管断面積 (m^2)、 P ：圧力測定部の変動圧 (Pa)、 a ：燃料中の圧力波伝播速度 (m/s)、 ρ ：燃料の密度 (kg/m^3) である。ボッシュ長管法の測定原理を満足させるため

図6 噴霧性状の比較

に⁽¹⁹⁾、本実験ではテストチューブとして内径 4 mm、外形 6 mm、長さ 10 m の銅管を使用した。また、測定部管内の変動圧は、ひずみゲージを用いて測定した。実験は、供試機関と同じ噴射系（噴射ポンプ：Bosch PFR 7M、噴射ノズル：DLLA150）を用い、ポンプ回転速度 555 rpm 一定のもとで実施した。

図7 噴霧角と動粘度

式(1)に示されるように、噴射率は圧力波伝播速度 a の影響を受ける。そこで、菜種油・軽油混合燃料を使用した際の圧力波伝播速度を実測した。図5に、その測定装置を示す。供試燃料で満たされたテストチューブ内の2箇所に圧力センサ A, B を設置し、燃料噴射にともなう圧力波の位相差（時間差； Δt ）を測定することにより圧力波伝播速度を算出するものである。なお、A, B 間の距離は 8380 mm 一定である。センサ A には市販のひずみゲージ式噴射圧力計を用い、B にはひずみゲージ式圧力計を自作して実験に供した。

3. 実験結果、および考察

3.1 ディーゼル噴霧性状に及ぼす影響 図6は、燃料としてニートの軽油、菜種油と軽油との等量混合油、および菜種油を用い、噴霧が発達する様子を噴射開始からの経過時間に対して比較したものである。なお、噴射開始圧は 21.7 MPa 一定である。図6にみられるように、菜種油は軽油に比べると噴霧の広がり角が非常に小さい。そこで、到達距離が 40～50 mm の範囲に達した画像から噴霧角を求め、動粘度に対してプロットした。その結果を図7に示す。菜種油添加率の増加とともに噴霧角は減少する。この場合、添加率 50%までは比較的軽油に近い値であるが、75%になると噴霧角は大幅に減少するのが明らかである。

図8には噴霧の到達距離を求めた結果を示す。ここで、図8(a)は渦電流式変位計を用いて検出した針弁リフト信号の立下り時期を基準として得られた経過時間に対する到達距離であり、図8(b)は

図 8 (a) 噴霧の到達距離 (針弁上昇時基準)

図 8 (b) 噴霧の到達距離 (噴射開始時基準)

(Pa=1.57 MPa, Po=21.7 MPa, ϕ 0.2- single hole)

実際の噴射開始時期を基準としたものである。なお、図 8(b)中に例示したように、遅延時間を変えて多数回の噴霧を撮影する本実験の方法では測定値がばらつく。そこで、それぞれを二次曲線で近似した結果を表示した。図 8(a)にみられるように、軽油、ならびに菜種油と軽油との等量混合油では、針弁が上昇してから噴霧が十分発達するまでの全過程において、ほぼ同一の到達距離が得られている。一方、ニートの菜種油では、針弁が上昇してから実際に噴射が開始されるまでの遅れが大きい。このことに関しては、菜種油の動粘度が高いため、噴孔部分における流動抵抗が増加するためではないかと推察している。

図 8(b)にみられるように、ニートの菜種油、および菜種油と軽油との等量混合油は、いずれも噴射開始直後は同じ到達距離を示す。しかし、噴射開始後 0.2 ms を過ぎると、菜種油噴霧の到達距離は等量混合油に比べ増大していき、0.5 ms では 30% 近くもの差が生じている。このように、ニート菜種油の到達距離が軽油に比べ増加する理由としては、菜種油の高粘度特性が微粒化の悪化をもたらし、その結果、噴霧束内への空気導入が抑えられ、到達距離が増大するものと考えられる。

以上みてきたようなニート菜種油燃料における噴霧特性の変化は、高沸点・低蒸発特性と相まって混合気形成の悪化をもたらし、ひいてはカーボンデポジット生成の要因になると思われる。一方、図 7 から明らかなように、菜種油添加率が 50% 程度までは噴霧角の減少幅は比較的小さい範囲に抑えられており、到達距離 (図 8(a)) に関しては軽油と同等の特性である。

図 9 圧力波の一例

3.2 燃料噴射率に及ぼす影響 図 5 の装置を用い、センサ A, B 間を伝播する圧力波を測定した。図 9 は、管内の残留圧 (背圧) を 6.0 MPa 一定に保ち、燃料として菜種油と軽油との等量混合油を用いた際の測定結果の一例である。なお、ここではそれぞれのセンサで得られた連続 5 サイクル分の波形を重ねて表示している。図 9 に示されるように、管内を伝播する圧力波にサイクルごとの変動はなく、安定した測定値が得られている。

菜種油添加率が圧力波伝播速度に及ぼす影響を図 10 に示す。この図から、ニート菜種油の圧力波伝播速度は軽油に比べると 5% 程度小さい値を示すことが明らかである。なお、圧力波伝播速度 a は、燃料の密度 ρ 、体積弾性率 E との間に

$$a = \sqrt{E / \rho} \quad \cdots (2)$$

なる関係がある。これより、菜種油の体積弾性率は軽油とほぼ同じ値を有するものと思われる。

図10 圧力波伝播速度と菜種油添加率

図11 燃料噴射率の比較

図12 BSEC, NO_x, および黒煙濃度と菜種油添加率

図13 燃焼特性値、およびその他のエミッションと菜種油添加率

図11は、サイクルあたりの供給熱量を780J一定とした場合における軽油、菜種油と軽油との等量混合油、および菜種油の燃料噴射率を比較したものである。菜種油は軽油に比べ低発熱量が15%程度小さいために、供給熱量一定の条件では噴射体積は約6%増大する。図11に示されるように、菜種油の噴射期間は軽油に比べると長くなり、平均的な噴射率は顕著に低下するのが明らかである。一方、等量混合油の場合には初期噴射率が抑制される一方、後半の噴射率は軽油に近く、噴射期間についても若干軽油よりの特性を示す。

3.3 機関諸性能に及ぼす影響 図12は、BSEC(正味熱消費率)、NO_x、および黒煙濃度に及ぼす菜種油添加率の影響を、機関負荷をパラメータにとり比較したものである。BSECは、菜種油添加率が50%までは負荷の違いを問わず、軽油運転と同等の値が得られている。しかしながら、ニート菜種油を用いた場合には、高負荷運転時(BMEP=0.71 MPa)ではほぼ軽油に匹敵するBSECが得られるのに対して、負荷が低下するにつれて明らかに増大する。菜種油添加率50%の等量混合油に比べると、ニート菜種油の噴霧性状は

図14 等量混合油の機関諸性能

悪く、噴射率も低下している。このため、燃焼室内の圧力・温度レベルの低い低負荷運転時では混合気形成が緩慢となって、BSECが増加したものと考えられる。

つぎに、排出物特性についてみると、菜種油添加率が50%以上の場合に、軽油に比べ黒煙濃度の低減が得られている。菜種油は含酸素燃料であり、燃料中の酸素がすすの生成や酸化に対して影響を及ぼしているものと考えられる。一方、NO_x濃度に関しては菜種油添加率の影響をあまり受けず、とくに等量混合油では軽油と同じ排出レベルである。

図13には、燃焼特性値、およびその他の排出物特性を菜種油添加率に対して示す。BMEP=0.18 MPaの低負荷運転では、菜種油添加率が増加するにつれて燃焼最高圧 P_{max} が低下し、ホルムアルデヒドHCHOが増加する。この場合のTHCはニート菜種油を用いても顕著な変化は認められないが、定格出力では低下傾向を示す。なお、着火時期に関しては、負荷の違いを問わず、ニート菜種油運転のほうが軽油よりも、わずかではあるが早まる傾向を示している。したがって、菜種油を含有する燃料の着火性について、特段の支障があるとは思われない。

図15 等量混合油の燃焼特性値、および燃焼変動率

図14は、菜種油と軽油との等量混合油、および軽油を用い、機関負荷を変えて運転した際のBSEC、NO_x、ならびに黒煙濃度を比較したものである。等量混合油のBSECは負荷の全範囲にわたって軽油とまったく同等の値を示しており、黒煙濃度の低減も得られることが明らかである。

この場合における燃焼最高圧 P_{max} 、着火時期、および燃焼変動率の変化を調べたが、その結果を図15に示す。菜種油と軽油との等量混合油は、 P_{max} 、ならびに燃焼変動率(P_{max} の分布における標準偏差を平均値で除した値として定義)は軽油と同等であり、着火時期については前述したように若干早まる傾向を示している。以上のことから、菜種油と軽油との等量混合油は十分安定した燃焼が行われているものと考えられる。

4. 結論

菜種油をディーゼル機関の代替燃料として利用するために、軽油に直接混合する簡便な燃料改質法を採用した。菜種油添加率(燃料全体に対する菜種油の体積比率で定義)が噴霧性状、噴射率、ならびに機関諸性能に及ぼす影響について検討した結果を要約すると、おおむねつぎのとおりである。

(1) 常温高压の容器内に燃料の一回噴射を行い、

噴霧性状を観測した。実験の結果、噴霧角は菜種油添加率の増加とともに減少したが、添加率 50% までは比較的軽油に近い値を示した。一方、噴霧先端の到達距離に関しては、等量混合油（菜種油添加率 50%）では軽油と同じ特性を示したが、ニート菜種油では時間経過にともない顕著に増大した。

(2) ニート菜種油の圧力波伝播速度は、軽油よりも約 5%低い値をもつことがわかった。ボッシュの方法を用いて燃料噴射率を測定した結果、ニート菜種油の噴射期間は軽油に比べて長く、平均的な噴射率は顕著に低下した。菜種油と軽油との等量混合油では、比較的軽油よりの噴射率特性が得られた。

(3) 小形の DI ディーゼル機関に菜種油・軽油混合燃料を適用し、機関諸性能を調べた。実験の結果、菜種油と軽油との等量混合油では、負荷の違いによらず軽油と同等の正味熱消費率が得られた。また、黒煙濃度もわずかに低減する一方、その他の排出物特性、ならびに燃焼安定性については軽油とほぼ同等のレベルであった。

おわりに、本研究の一部は平成 14 年度科学研究費補助金(基盤研究 C, 研究課題番号 13680581)により行われたものであり、研究を進めるに際しては(株)ボッシュオートモーティブシステムのご好意により噴射ノズルの製作、ならびにご提供をいただいた。また、当時学生であった今井英樹、桑原充、新澤直也、須貝好一郎、水口琢磨、山端高行の諸君から実験の協力を得たことを付記して、深く謝意を表する。

参考文献

- (1) Murayama, T., ほか 5 名, Low Carbon Flower Buildup, Low Smoke, and Efficient Diesel Operation with Vegetable Oils by Conversion to Mono-Esters and Blending with Diesel Oil or Alcohols, SAE Paper 841161 (1984).
- (2) Ziejewski, M., ほか 2 名, Comparative Analysis of the Long-Term Performance of a Diesel Engine on Vegetable Oil Based Alternate Fuels, SAE Paper 860301 (1986).
- (3) Ishii, Y., Takeuchi, R., Transesterified Curcas Oil Blends for Farm Diesel Engines, Trans. of the ASAE, Vol.30, No. 3 (1987), 605-609.
- (4) 呉・ほか 5 名, ディーゼル機関における重質燃料加熱の効果, 自動車技術会論文集, No. 35 (1987 年), 21-27.
- (5) Hemmerlein, N., ほか 3 名, Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil, SAE Paper 910848 (1991).
- (6) 浜崎・ほか 2 名, なたね油乳化燃料による小形ディーゼル機関の性能と排気特性, 日本機械学会論文集, 59-548, B(1992 年 5 月), 1551-1556.
- (7) Crookes, R. J., ほか 2 名, Seed-oil bio-fuel of low Cetane Number: the effect of water emulsification on diesel-engine operation and emissions, J. of the Institute of Energy, Vol.68 (1995), 142-151.
- (8) Akasaka, Y., ほか 2 名, Exhaust Emissions of a DI Diesel Engine Fueled with Blends of Biodiesel and Low Sulfur Diesel Fuel, SAE Paper 972998 (1997).
- (9) 孫・岡田, 植物油を使用する直噴式ディーゼル機関の特徴と性能, 日本舶用機関学会誌, 33-12 (1998 年 12 月), 864-867.
- (10) Yoshimoto, Y., ほか 2 名, Reduction of NO_x, Smoke, and BSFC in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel Emulsion with Used Frying Oil, SAE Paper 1999-01-3598 (1999).
- (11) Hashimoto, M., ほか 3 名, Comparison of Exhaust Emissions from Internal Combustion Engines by Using of Blended Fuels, Proc. of the 6th International Symposium on Marine Engineering Tokyo (2000), 489-496.
- (12) 石井・桶谷, 植物廃油を燃料としたディーゼル機関の性能, 日本舶用機関学会誌, 35-3 (2000 年 3 月), 222-226.
- (13) 武田・ほか 2 名, 大豆油・灯油混合燃料によるディーゼル機関への適用, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 36-1 (2001 年 1 月), 49-56.
- (14) 西田・ほか 6 名, バイオマス燃料 (BDF) のディーゼル機関への適用と問題点, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 37-9 (2002 年 9 月), 54-60.
- (15) 佐々木・ほか 2 名, 廃食用油を燃料とする副室式遮熱エンジン, 第 17 回内燃機関シンポジウム講演論文集 (2002 年 10 月), 13-18.
- (16) Yoshimoto, Y., Onodera, M., Performance of a Diesel Engine Fueled by Rapeseed oil Blended with Oxygenated Organic Compounds, SAE Paper 2002-01-2854 (2002).
- (17) 吉本・玉木, 軽油ブレンドなたね油を燃料とするディーゼル機関の性能と排気特性, 日本機械学会論文集, 68-675, B (2002 年 11 月), 3191-3198.
- (18) 武田・ほか 2 名, 廃食用油・灯油混合燃料のディーゼルエンジンへの適用 (燃料加熱による諸特性), 日本マリンエンジニアリング学会誌, 38-3 (2003 年 3 月), 82-90.
- (19) 松岡, ディーゼル機関の燃料噴射率の測定, 内燃機関, 11-127 (1972 年 8 月), 94-104.