ディーゼル機関燃料としての乳化植物油メチルエステルの利用*

浜崎 和則^{*1}, 廣津 亜弥子^{*2}, Choesnul JAQIN^{*2}
高崎 講二^{*3}, 小山 隆行^{*1}

Utilization of Emulsified Vegetable Oil Methyl Esters for Diesel Fuel

Kazunori HAMASAKI^{*4}, Ayako HIROTSU, Choesnul JAQIN,
Koji TAKASAKI and Takayuki OYAMA^{*4} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kagoshima University,
1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima, 890-0065 Japan

Considering the CO₂ problem, regenerated vegetable oil methyl esters have many advantages as an alternative fuel for diesel engines. However, operating with them increases NO_x emissions as compared with the gas oil. The present work is concerned with emulsified vegetable oil methyl esters characteristics and the effects of emulsified vegetable oil methyl esters on the exhaust emissions of a DI diesel engine. Increasing the water mass fraction of emulsified fuel decreased NO_x and smoke emissions simultaneously below the 15% water mass fraction. It was suggested that the optimum water mass fraction was 15% with regard to the engine performance and exhaust emissions, and emulsified vegetable oil methyl esters can be used as an alternative fuel of petroleum diesel fuels.

Key Words: Diesel Engine, Alternative Energy, Biomass Energy, Liquid Fuel, Emulsified Fuel, Exhaust Emission, Methyl Ester

1. 結 言

植物油メチルエステルは生分解性がよく、再生産可能な含酸素燃料である。燃焼過程においてはCO₂を発生するが、原料である植物油は光合成過程においてCO₂を吸収し、さらに硫黄分をほとんど含まないために酸性雨などによる環境的な負荷が小さい燃料であると考えられる。これらの利点を生かして、植物油メチルエステルはディーゼル機関燃料として使用され始めている。軽油を使用した場合に比べて、排気煙濃度は低減され、機関性能上大きな問題はないと言われているが、NO_x濃度の増大が見られる⁽¹⁾⁽²⁾。そこで、植物油メチルエステルをディーゼル機関燃料として使用した場合のより一層の燃焼改善とNO_x濃度の低減をはかるため、乳化植物油メチルエステルを作製し、直噴式小形ディーゼル機関に使用して、ディーゼル機関燃料としての可能性を検討した。

本報告では、水との混合による安定した乳化植物油

メチルエステル作製時の乳化剤としては、植物油をエステル変換する際の副産物となる粗グリセリンを使用し、乳化植物油メチルエステルの燃料特性および水混合割合を変化させた場合の排出ガス特性、機関性能に及ぼす影響について検討した。その結果、作製した乳化植物油メチルエステルは、植物油メチルエステルおよび軽油を用いた場合と比較して排出ガス濃度、機関性能の点から、軽油代替燃料として使用可能であることを明らかにした。

2. 供試燃料について

乳化植物油メチルエステルの原料となる植物油は、日本農林規格に適合した市販のなたね油で、実験中は同一製造者のものを使用した。供試燃料として、なた

Table 1 Physical properties of RME and gas oil

	RME	Gas Oil
Cetane Number	51	56
Net Calorific Value (MJ/kg)	36.55	43.12
Density@288K (g/cm ³)	0.883	0.832
Viscosity@293K (mm ² /s)	7.7	4.7
C (wt%)	77.6	87.3
H (wt%)	11.9	12.5
O (wt%)	10.5	0
Sulfur (wt%)	0.001	0.04
Water (wt%)	0.03	—

* 原稿受付 2001年1月11日。

^{*1} 正員、鹿児島大学工学部(☎890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)。^{*2} 学生、鹿児島大学大学院。^{*3} 正員、九州大学大学院総合理工学研究院(☎816 8580 春日市春日公園6-1)。

E-mail: hamasaki@mech.kagoshima-u.ac.jp

Table 2 Emulsified rapeseed oil methyl esters specifications and Sauter's mean diameter

		Test Fuels		
		ERE10	ERE15	ERE20
RME	mass%	89.9	84.9	79.9
Water	mass%	10	15	20
Emulsifier	mass%	0.1	0.1	0.1
SMD	μm	63.3	121.2	144.1

Fig.1 Micrograph of emulsified rapeseed oil methyl esters

ね油メチルエステルを乳化した水混合割合の異なる 3 種類の乳化なたね油メチルエステル (ERE と称す) と比較のために、なたね油メチルエステル (RME と称す) および JIS2 号軽油を用いた。RME は文献 (2) に記述した方法で作製した。RME と軽油の性状を表 1 に、ERE の質量組成と図 1 の顕微鏡写真より実測した 100 個の乳化水粒子のザウタ平均粒径 (SMD) を表 2 に示す。ERE を作製するための乳化剤は、分散媒であ

Fig.2 Separation ratio versus lapses of time for ERE

る RME を作製する際の副産物となる粗グリセリンを使用した。乳化剤の選定基準として HLB 値があり、式 (1) の J. T. Davies の式⁽³⁾が提案されている。

$$\text{HLB 値} = 7 + \Sigma(\text{親水基の基数}) + \Sigma(\text{親油基の基数}) \cdots (1)$$

式 (1) より、グリセリンについて計算すると、HLB 値は 7.1 となる。RME を作製する際にメタノールを使用するので、粗グリセリン中には親油基の $-\text{CH}_3$ が残存していると考えられ、乳化剤として使用した粗グリセリンの HLB 値は計算値の 7.1 より幾分小さい値であると思われる。したがって、HLB 値から判断して、粗グリセリンは一般に言われている潤滑剤か W/O 型乳化剤として使用可能で、室温でふりまぜる程度で乳化油を作製できることを示している⁽³⁾。ERE の作製に際しては、粗グリセリンを水に溶解した後、これに RME をかきまぜながら徐々に加えて、ERE を作製することが可能であった。また、分離の少ない安定した ERE の作製を試みるために、出力 100W、100kHz の超音波を乳化燃料 4L 当たり 10 分間照射した超音波照射 ERE も作製した。図 1 に水混合割合の異なる 4 種類の ERE と、水混合割合 15% の ERE15 に超音波を照射した場合の作製直後の顕微鏡写真を示す。乳化燃料中の水粒子は水混合割合が増加するとともに大きくなる。超音波を照射することにより、乳化水粒子径が小さくなり均一な分布状態になっている。

図 2 に経過時間に対する ERE の分離率を示す。時間の経過に伴い、ERE は図 2 に示すように 3 層に分離する。上層は RME、中間層は ERE で下層は水である。超音波を照射しなかった ERE では、上層は 4 時間経過後に分離が始まり、10 日経過後で 5% 程度分離率である。下層では ERE10、15、20 はそれぞれ 140、12、

Fig.3 Viscosity-temperature diagram for test fuels

Table 3 Test engine specifications

Engine type	1 Cylinder, 4 Stroke
Combustion Chamber	Water Cooled
Bore x Stroke	D. I. Chamber
Stroke Volume	$\phi 110 \times 106$ mm
Compression Ratio	1007 cm ³
Rated Power	16.3
Nozzle Opening Pressure	11.77 kw / 2200 rpm
Nozzle Holes	19.6 MPa
	$\phi 0.33$ mm $\times$ 4

2時間後から分離が始まり、ERE15の場合で10日経過後の分離率は9%程度である。超音波を照射したERE15の場合、上層ではRMEの分離が18時間後から始まるが、10日経過しても2.5%程度の分離率である。下層では水の分離が24時間後から始まり、250時間経過しても6%以内の分離率にとどまる。したがって、超音波を照射したERE15は18時間経過するまでは分離を生じない安定した乳化燃料であり、10日経過後も全体の分離率は8.5%程度で、超音波を照射することによって、さらに安定したEREを作製することが可能である。しかし、ERE15と超音波照射したERE15を使用した場合の正味熱効率および排出ガス特性に差異は見られなかったため、超音波照射なしのEREを供試燃料として用いた。図3に供試燃料の動粘度と温度の関係を示す。RMEの粘度測定にはレッドウッド粘度計を使用した。乳化燃料であるEREは加熱して行くと分離し、RMEと同様の粘度測定は不可能であった。回転式粘度計による測定も試みたが、EREは攪拌によって粘度が変化する性状を有している。そこで、球状多分散系のエマルジョンについて提案されている式⁽³⁾

$$\eta = \eta_0(1 - \phi)^{-2.5} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を使用してEREの粘度を計算し、動粘度を求めた。ここで、 η ：乳化燃料の粘度、 η_0 ：分散媒であるRME

Fig.4 Effect of water content on NOx and Smoke concentrations

Fig.5 Effect of water content on NOx concentrations

の粘度、 ϕ ：分散相である水の体積濃度である。ERE15、20の場合で、RMEの粘度のそれぞれ1.44、1.65倍程度であり、ディーゼル燃料として使用する場合、粘度の点では問題はないと考えられる。

3. 実験装置および方法

供試機関は単気筒水冷、横形、直噴式四サイクルディーゼル機関で、表3に主要諸元を示す。噴射系は軽油使用時の標準噴射系のままで、機関回転数は2000rpm一定のもとに負荷を変化させて実験した。排出ガス中のNOx濃度はCLD、HC濃度はFID、CO、CO₂濃度はNDIR、排気煙濃度はボッシュ式スモークメータ、O₂濃度はジルコニアセンサを使用して測定した。その他、燃料消費量、シリンダ内圧力、ニードルリフト等を測定した。シリンダ内の圧力波形は、50サイクル分の平均化処理を行い、それをもとに熱発生率を算出した。実験に使用した乳化なたね油メチルエス

Fig.6 Effect of water content on HC, CO and CO₂ concentrations

Fig.7 Variation of brake specific fuel consumption with water content

テルは表 2 に示すように 3 種類であるが、必要な場合には水混合割合 5% の ERE5 についても実験を行った。

4. 実験結果および考察

4・1 水混合割合の影響 水混合割合 10, 15, 20% の ERE10, 15, 20 を使用した場合には機関の始動に問題はなく、負荷 100% まで実験は可能であった。しかし、ERE30 を使用した場合、始動に問題はなく負荷 75% までは機関回転数も安定し実験は可能であったが、負荷 100% では機関回転数が安定せず実験は不可能であった。図 1 に示す ERE30 の顕微鏡写真を観察すると、水混合割合 20% 以下の場合のように安定した水粒子が少なく、不安定な乳化状態であった。このため ERE30 では実験が不可能であったと考えられる。

負荷 100% (BMEP = 0.669 MPa) で、乳化燃料中の水混合割合を変化させた場合の NO_x 濃度および排気煙濃度を図 4 に示す。水混合割合 0% は RME の場合である。乳化燃料に関して多くの報告によって明らかにされているように、本研究の場合も NO_x 濃度は、水混合割合の増加にほぼ比例して低減している。また、排気煙濃度は水混合割合が 15% 強までは減少し、それ以上の水混合割合では急激に増大している。水混合割合が 20% になると、特に噴霧の燃焼室壁面との衝突部分で温度低下を生じスムーズな水分の蒸発ができず、燃焼の悪化による排気煙濃度の増大を招いたものと考えられる。水混合割合 15% での NO_x 濃度および排気煙濃度は RME の場合に比較して、それぞれ 30%, 25% 程度低減されており、NO_x および排気煙濃度の同時低減が可能である。低減割合から同一水混合割合では、排気煙濃度の低減効果よりも NO_x 濃度に対する

低減効果大きい。同様の結果は渦流室式機関で、なたね油乳化燃料を使用した研究⁽⁴⁾でも認められた。図 5 に RME で運転した場合の NO_x 濃度を 1.0 とし、水混合割合の変化に対する NO_x 濃度の割合を示す。いずれの負荷においても NO_x 濃度は水混合割合の増加とともにほぼ直線的に低減する。負荷 100% と 75% では NO_x 濃度の低減割合はほぼ同じであると見られるが、それ以下の負荷では低負荷ほど NO_x 濃度の低減割合は大きくなる。なお、排気煙濃度は 75% 以下の負荷では RME および水混合割合 20% 以下の ERE とも供試機関では検出されなかった。

図 6 に水混合割合の変化に対する CO, HC および CO₂ 濃度を負荷 100% の場合について示す。CO と HC は燃焼過程での過剰な混合や放熱によって燃焼温度が低下し、反応が凍結した結果排出される点で、その生成原因はほぼ同じである。図 6 の CO と HC 濃度はほぼ同一傾向を示していると思われる。すなわち、CO, HC 濃度はいずれも水混合割合が増加するにつれて高くなり、水混合割合が 20% になると急激に高濃度となる。この理由としては水分の添加により燃焼ガス質量が増加し、さらに密度の増大が加わることによる乳化燃料の冷却作用⁽⁵⁾のため、反応が凍結した状態で CO, HC が排出されることが考えられる。また、CO の生成については、水性ガス反応によって水分が遊離炭素と反応し、CO 濃度が増大することも加わっていると考えられる。しかし、図 4 で排気煙濃度が最低となる水混合割合 15% でも CO 濃度は 1100 ppm 以下で、HC 濃度については 70 ppm 以下の低濃度であり、ディーゼル燃料として問題はないと考えられる。CO₂ 濃度は水混合割合が増加すると、わずかながら増大する。水混合割合 15% までは図 4 に示すように排気煙濃度は直線的に

Fig.8 Correlation between smoke and oxygen concentrations in the exhaust gas

低減し、燃焼改善が図られたことを示している。水混合割合は変化しているが、同一負荷であるので RME の場合より、ERE15 の方が CO_2 濃度は低いはずである。しかし、図 6 では逆の結果が得られている。この理由としては、水混合割合が多くなると CO 濃度は増大し、水混合割合の増加とともに $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ の素反応⁽⁶⁾影響が大きくなったと考えられる。

水混合割合に対する正味燃料消費率 BSFC の関係を図 7 に示す。全負荷時の場合、BSFC は排気煙濃度と同様の傾向を示し、水混合割合 15% の場合が最も低く、20% になると BSFC は急激に悪化する。負荷 75%～50% の場合も水混合割合 15% で BSFC は最低となるが、水混合割合の増加による BSFC の低減効果は全負荷時が最大である。また、低負荷 25% では水混合割合の増加に伴い、燃焼の悪化によると考えられる BSFC の増加が認められる。したがって、中・高負荷で BSFC が最低となる水混合割合 15% でも低負荷では BSFC が悪化するので、負荷領域の広い機関の運転状態では、低負荷の場合の水混合割合には注意を要する。

以上のことから、ERE の場合、排出ガス濃度、機関性能の点から水混合割合 15% が最適水混合割合であると思われる。

4・2 機関性能と燃焼特性 図 8 に負荷 100% の場合の排気煙濃度と排出ガス中の酸素濃度の関係を示す。図中の () 内は水混合割合を示し、燃焼改善が図られていると考えられる水混合割合 15% までは排気煙濃度の低減とともに酸素濃度は直線的に減少する。ここでは、機関回転数と負荷が一定であるので、1 サイクル中にシリンダ内に吸入される空気量は水混合割合が変化しても一定であると考えられる。したがって、水混合割合の増大に比例して噴霧内への空気導入が増

Fig.9 Rate of heat release and injection period

え⁽⁷⁾、燃焼改善に寄与した結果、排気煙濃度が低減されるとともに排出ガス中の酸素濃度は減少することを示している。しかし、水混合割合が 20% になると排出ガス中の酸素濃度はわずかに減少するが、排気煙濃度は逆に増大し燃焼は悪化する。図 9 に最適水混合割合の乳化燃料である ERE15、軽油、RME の熱発生率線図とニードルリフト線図を示す。ニードルリフト線図より噴射開始時期は ERE15 が最も早く、RME、軽油の順である。噴射終了時期は軽油と RME がほぼ同一で、ERE15 が最も遅くなっている。燃料の噴射時期は、使用燃料の発熱量および粘度の違いにより異なり、高粘度で発熱量の最も低い ERE15 は噴射期間が軽油や RME より長くなっている。したがって、ERE15 では分散相である水を除いた場合の燃料噴射率は小さくなり、図 9 に示すような高負荷時においては、早い噴射時期での低噴射率が BSFC の低減に寄与している⁽⁸⁾と思われる。また、熱発生率線図より ERE15 の場合は水の蒸発のために熱を奪われ着火遅れが長くなり、予混合燃焼期の熱発生率の増大が顕著であるにもかかわらず、燃焼の終了時期は RME、軽油の場合とほぼ同じであることから燃焼期間は短縮し燃焼が改善されている。

4・3 軽油代替燃料としての可能性 最適水混合割合の ERE15 を軽油代替燃料として、ディーゼル機関に適用した場合、排出ガス特性や機関性能において、軽油および RME と同等かそれ以上の良好さが求められる。そこで、軽油を基準にして ERE15 と RME の排出ガス特性および機関性能の比較について検討する。

図 10 は軽油適用時の NO_x 濃度を 100 とした場合、各負荷に対する ERE15 および RME 適用時の NO_x 濃度割合を示す。RME は負荷 75% 以上の高負荷域にお

Fig. 10 Relative NOx emissions of ERE15, RME and gas oil (gas oil = 100)

Fig. 11 Relative brake thermal efficiency of ERE15, RME and gas oil (gas oil=100)

いて軽油より NOx 濃度は高く、全負荷では 7% 程度高濃度である。燃焼室温度が低い低負荷域では、軽油に比べて RME の蒸発燃焼状態が悪いために、RME の NOx 濃度は低い。しかし、75% 以上の高負荷域では燃焼室温度も高く、RME に含まれる予混合酸素のために過濃混合気域での局所的な酸素不足が減少し、燃焼状態が良好となり軽油以上に NOx 生成反応が促進されたと思われる。一方、ERE15 は軽油に比べて 25% 負荷で、60% 以上の NOx 濃度低減があり、全負荷でも 23% 強の低減が見られる。図 5 にも示したように、乳化燃料の使用は NOx 濃度低減に有効である。

図 11 に軽油の正味熱効率 BTE を 100 とした場合、

Fig. 12 Engine performance with three different fuels (gas oil = 100)

各負荷に対する ERE15 および RME の BTE の割合を示す。RME と軽油の BTE は軽油とほぼ同一であるが、ERE15 は 50% 以上の負荷では、軽油や RME よりも 1 ~ 2% 程度の BTE の向上が見られる。しかし、25% の低負荷では図 7 で述べたように、ERE15 は軽油や RME よりも BSFC が悪化するため、BTE も低くなる。ERE15 が軽油代替燃料として可能性があるかを総合評価するために、負荷 100% の場合について図 12 に示す。軽油の場合を 100 とした、ERE15 およびそのベース燃料である RME の排出ガス濃度と BTE の割合を示す。軽油に比べ、ERE15 の NOx 濃度、排気煙濃度、HC 濃度はそれぞれ 23, 45, 12% 程度低減されている。しかし、CO 濃度は 2 倍弱高くなっている。これは、ERE の分散媒である RME の場合、分子構造中に酸素が存在し、CHO, HCHO などの炭化水素フラグメントによる化学反応が活発に行われるために軽油より 1.2 倍程度高くなっているのに加え、乳化燃料においては、水性ガス反応⁽⁹⁾により燃料中の水分が遊離炭素と反応して RME の場合より 1.8 倍程度、CO 濃度が増加したと考えられる。しかし、ERE15 の CO 濃度は全負荷時で 1100 ppm 以下であり、それほど問題にならないと思われる。また、BTE は軽油が 31.5%, ERE15 が 32.6% で、ERE15 が 1.1% 高くなっている。前述したように ERE15 の BSFC は RME より低く、図 9 に示すように ERE15 は、噴射期間が軽油や RME より長くなっているため、分散相である水を除いた燃料噴射率は小さくなり、高負荷時においては、早い噴射時期での低噴射率が BSFC の低減に寄与していると思われる。また、熱発生率線図より着火遅れが長くなるにもかかわらず、燃焼期間は短縮し燃焼が改善され、BTE が向

上したと思われる。

以上のことより、ERE15はCO濃度の増大はあるが、排出ガス濃度、正味熱効率の点では軽油より優れた燃料で、軽油の代替燃料として使用可能であると考えられる。

5. 結 論

乳化植物油メチルエステル燃料の作製方法および特性について検討し、その燃料を直噴式小形ディーゼル機関に使用して、機関性能および排出ガス濃度に与える水混合割合の影響について実験した。また、軽油およびベース燃料であるなたね油メチルエステルを用いた場合の実験結果と比較した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 植物油メチルエステルを作製する際に、副産物となる粗グリセリンを乳化剤として、分離の少ない安定した乳化植物油メチルエステルを作製することが可能になった。

(2) 新油の植物油で作製した乳化植物油メチルエステル燃料の最適水混合割合は、排出ガス特性、機関

性能の点から質量割合で15%程度であると思われる。

(3) 乳化植物油メチルエステル燃料では、排気煙濃度、NO_x濃度の同時低減が可能で、同一水混合割合ではNO_x濃度の低減割合が大きい。

(4) 水混合割合15%の乳化植物油メチルエステル燃料は、排出ガス濃度、正味熱効率の点から判断して、軽油代替燃料として使用可能である。

終わりに、本研究の実験には鹿児島大学亀田昭雄技術専門職員、学生中村博光君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) May, H,ほか4名,MTZ,59(1998)2,112-123.
- (2) 浜崎和則・ほか3名,機論,65-631,B(1999),1146-1151.
- (3) 北原・古澤,分散・乳化系の化学,(1983),61-63,工学図書.
- (4) 浜崎和則・ほか3名,機論,63-612,B(1997),2897-2901.
- (5) 石田正弘・陳之立,機論,61-590,B(1995),3541-3547.
- (6) 日本機会学会,技術資料「燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法」(1980),32,日本機械学会.
- (7) 中川洋・ほか2名,機論,61-590,B(1995),3554-3560.
- (8) 塚原・吉本,内燃機関,23-2396,(1994),27-36.
- (9) 中川洋・立石又二,機誌,81-720(1978),1201-1207.