なたね油乳化燃料による渦流室式ディーゼル機関の性能と排気特性*

浜崎 和則^{*1}, 高木 哲哉^{*2}
木下 英二^{*1}, 田中 義弘^{*3}Performance and Emission Characteristics
of a Swirl-Chamber Diesel Engine with Emulsified Rapeseed Oil FuelsKazunori HAMASAKI, Tetsuya TAKAKI,
Eiji KINOSHITA and Yoshihiro TANAKA

These have been much interest in the use of vegetable oils as diesel fuel since they are domestically produced and are a renewable energy source. The present work describes the results of experiments using stable water-emulsified rapeseed oils and gas oil in a swirl-chamber diesel engine. Furthermore, NO_x , HC, CO, and smoke emissions and energy consumption are compared with experimental values from a direct-injection diesel engine with no changes in engine equipment. The results show that a swirl-chamber diesel engine is more appropriate for use with water-emulsified rapeseed oils with regard to NO_x , HC, CO, and smoke emissions and BTE. In addition, NO_x and smoke emissions of emulsified rapeseed oil are lower than those of gas oil in a swirl-chamber diesel engine.

Key Words: Diesel Engine, Fuel, Alternative Energy, Emulsified Fuel, Rapeseed Oil, Swirl-Chamber, Exhaust Emission, Engine Performance, Renewable Energy

1. 緒 言

内燃機関燃料として特定のエネルギー源への依存度を低くし、将来の燃料多様化に向けて種々の代替燃料が検討されている。その中で、再生産可能な植物油をディーゼル機関燃料を補足するために利用することは CO_2 の増大がなく、その循環が確立されるなど他のエネルギー源にはない大きな利点⁽¹⁾⁽²⁾ をもっている。著者らはこれまで、直噴式ディーゼル機関になたね油乳化燃料を使用した場合の機関性能および排出ガス濃度に及ぼす各種影響について報告⁽³⁾⁽⁴⁾ した。すなわち、なたね油乳化燃料では、なたね油燃料だけを使用した場合より燃焼改善が見られ、機関性能向上と排気煙および NO_x 濃度の同時低減が得られるとともに、ノズル噴口径の変更によって軽油で運転した場合に劣らない排出ガス濃度が得られることを明らかにした。

本報告では渦流室式ディーゼル機関になたね油乳化燃料を使用し、乳化燃料中の水混合割合を変えた場合の機関性能と排出ガス濃度に与える影響について検討

した。また、これまで報告した直噴式機関の実験結果と比較検討して、機関に何らの変更を加えずに、なたね油乳化燃料を使用する場合、渦流室式機関は直噴式機関に比べ、なたね油乳化燃料の燃焼特性を引き出すことができ、機関性能・排出ガス濃度の点ではより適していることを示した。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置概略を示す。供試機関は単気筒、水冷、横形、渦流室式四サイクルディーゼル機関で表1に主要諸元を示す。機関回転数は2000 rpm一定で負荷を変化させて実験し、供試燃料として水混合割合を変えた4種類のなたね油乳化燃料となたね油を用い、比較のために軽油による実験も行った。表2になたね

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

* 1995年7月17日 九州支部・長崎地方講演会において講演、原稿受付 1996年11月5日。

^{*1} 正員、鹿児島大学工学部(☎890 鹿児島市郡元1-21-40)。

^{*2} 正員、宮崎県工業試験場(☎880 宮崎市恒久1-7-14)。

^{*3} 正員、第一工業大学工学部(☎899-43 国分市中央1-10-2)。

Table 1 Test engine specifications

Engine Type	1 Cylinder, 4 Stroke
Combustion Chamber Type	Water Cooled Swirl Chamber
Bore×Stroke	85×87 mm
Stroke Volume	493cm ³
Compression Ratio	23.1
Rated Power	5.88kW/2200rpm
Injection Nozzle Type	Pintle
Injection Timing	11.5°C A. BTDC

Table 2 Emulsified rapeseed oils specifications (% by mass)

Test Fuel	Rapeseed Oil	Water	Emulsifier
W10	89.2%	10%	0.8%
W20	79.2	20	0.8
W30	69.2	30	0.8
W40	59.2	40	0.8

油乳化燃料の質量組成を示す。乳化剤としては植物性のモノステアリン (HLB=3.8) を使用した。乳化燃料の作製方法および時間経過による分離比についてはこれまでの報告⁽³⁾と同様である。噴射系は軽油使用時の標準噴射系を用いて実験を行った。排出ガス中のCO濃度はNDIR, NO_x濃度はCLD, HC濃度はFID, 排気煙濃度はボッシュ式スモークメータを使用した測定した。供試機関の燃焼は主燃焼室と渦流室の両室で行われるので、厳密には両室の圧力を同時に測定記録し、熱発生率は別々に求め合計しなければならない。しかし、指圧計は渦流室への取付けが困難であったため主燃焼室のみに取付け、主燃焼室と渦流室を一つの容積と仮定し、圧力波形は50サイクル分の平均化処理を行い熱発生率を算出した。

3. 実験結果および考察

3・1 機関性能に及ぼす水混合割合の影響 なたね油乳化燃料中の水混合割合を変えた場合の正味燃料消費率BSFC, NO_x濃度および排気煙濃度を図2に示す。水混合割合0%はなたね油の場合である。負荷は100%と75% (BMEP=0.537, 0.403 MPa) の場合であるが、いずれの負荷においてもほぼ同一の傾向を示していると考えられる。BSFCに関しては、なたね油の場合に比べW10, W20では改善が見られ、W20の場合で3%弱の改善が得られる。さらに水混合割合を増すと、なたね油の場合よりBSFCは悪化する。これは、水混合割合を増すと粘度が高くなる⁽⁵⁾ため噴霧の微粒化が悪く、また燃焼時の水の蒸発潜熱量が多く、オーバークリング状態となり燃焼が悪化したためと考えられる。図3は水混合割合の違いによるシリンダ内圧力および熱発生率の比較を示したものである。乳化

Fig. 2 Effect of water mixing rate on BSFC and exhaust emissions

Fig. 3 Comparison of cylinder pressure and rate of heat release

燃料では水混合割合が多くなるほど着火遅れが増加し、予混合燃焼量の増加が認められる。しかし、W30の場合、着火時期は上死点後となっているので、シリンダ内最大圧力の値はW20の場合より小さく、燃焼による熱エネルギーのより有効な仕事への変換が阻害されている。熱発生率曲線では着火遅れが増加するほど、予混合燃焼期のピークは高くなるが、W30の場合は同時に後燃え期間が長期化し、燃焼の悪化が見られる。次に、図2においてNO_x濃度は水混合割合の増加とともに大幅に低減し、BSFCが最低となるW20では、なたね油の場合に比べて約34%の低減が可能であることを示している。またW20すなわち水混合割合20%以下では、負荷100, 75%ともほぼ同一NO_x濃度であると考えられる。排気煙濃度についても水混合割合が多くなるとともに減少するが、W30までの低減効果はNO_x濃度に対する低減効果と比較すると小さい。しかし、W40になると排気煙濃度は大きく低減する。これは噴霧束内の水蒸気濃度の増加によって燃焼領域の温度低下が大きくなり、すす生成領域の高温

Fig. 4 Effect of water mixing rate on NO_x and Smoke emissions

Fig. 6 Effect of water mixing rate on air-fuel ratio

Fig. 5 Relation between load and exhaust emissions

状態が短くなったためと考えられる。図4になたね油で運転した場合の排出ガス濃度を1.0とし、水混合割合に対する NO_x および排気煙濃度の割合を示す。両者の低減傾向は異なり、同一水混合割合では排気煙濃度の低減低果よりも NO_x 濃度に対する低減効果が大きい。同様の結果は直噴式機関で、なたね油乳化燃料を使用した実験⁽⁴⁾でも認められた。排気煙濃度の低減割合は負荷が小さいほど大きい。図5にHCおよびCO濃度と負荷の関係を示す。HCとCOは燃焼過程中的で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という点で、その生成原因はほぼ同じということになる。図5においてもHCとCO濃度はほぼ同一傾向にあると見られる。すなわち、HC、CO濃度はいずれも負荷50%付近で最小値を示し、それ以外の負荷域では増加している。またHC濃度は低く、W20以下の水混合割合の場合は負荷にかかわらず20 ppm以下である。しかし、W30以上の水混合割合になるとHC濃度は増加する傾向を示し、低負荷時にその傾向が著しい。これは水混合割合が多くなると、低負荷時の燃焼を悪化させ、一部の燃料が不完全燃焼したためと考えられる。高負荷でHC濃度はわずかに増加するものの、その増加傾

向は小さい。CO濃度も水混合割合が多くなるにつれて増加するが、W20までは負荷にかかわらず、400 ppm以下の低濃度である。しかし、HC濃度と同様にW30以上の水混合割合では、CO濃度の増加傾向も大きく、低負荷時にその傾向が著しい。W30でCO濃度が増加するのは次のようなことが考えられる。すなわち、渦流室内での燃料占有率が水混合割合の分だけW20の場合よりも増し、その増加した水粒子が水蒸気となって半燃焼ガスを希釈することによって、渦流室内はさらに酸素不足の状態となる。したがって、熱分解過程で燃料の炭素成分が酸素不足のために酸化不十分となり、CO状態で止まっている段階に加えて、乳化燃料の冷却作用により急冷され、反応が凍結した状態で排出されるためと思われる。つまり、水分の増加による NO_x 生成の抑制因子がCO生成においては逆の影響を及ぼしたと考えられる。図6に空燃比 A/F と負荷の関係を示す。空燃比は全負荷域にわたってW20が最も高い値を示しているのに対し、W30になるとなたね油の場合より、わずかながら低い値を示している。一般に、なたね油乳化燃料では、なたね油の場合より噴射期間が長くなる⁽⁴⁾ためにベース燃料の噴射率が低下し、後燃え期間が長期化する。しかし、W20の場合は乳化燃料の燃焼上の特徴である噴霧の運動量増加による空気導入効果や噴霧内の乱れの増大など⁽⁶⁾が燃焼改善の要因として有効に作用し、なたね油の場合よりも空気利用率が向上した結果を示している。これに対し、W30の場合は乳化燃料のもつ燃焼促進作用が、噴射率のさらなる低下による後燃え期間の長期化で相殺され、なたね油やW20より空燃比が低く、BSFCが悪化したと思われる。以上のことより、 NO_x 濃度、排気煙濃度は水混合割合が増加するほど低減できるが、供試機関の場合、BSFC、CO濃度、HC濃度の点からW20が最も効果的な水混合割合であると考えられる。

3・2 排出ガス濃度に及ぼす乳化燃料の効果 渦流室式機関になたね油乳化燃料を適用した場合の燃焼特性を明らかにするために、軽油、なたね油、およびなたね油乳化燃料としては W20 の 3 種類の燃料を用いた場合の比較を行った。図 7 に排気煙および NO_x 濃度と負荷の関係を示す。排気煙濃度は各燃料とも 25%以上の負荷では、ほぼ直線的に増加する。燃料別に見ると、軽油の排気煙濃度が最も高く、次になたね油で W20 は最も低くなっている。排気煙は高温火炎内の酸素不足により生じたすす前駆物質を核として、これが凝集・成長合体を繰返して生成したものである⁽⁷⁾ から、図 8 に示した空燃比の結果から予想すると、空燃比の高い軽油の排気煙濃度が逆に最も低くなると考えられる。しかし、なたね油は分子構造中に約 10.4%酸素を含有していることにより局所的な酸素不

足が抑制され、排気煙濃度は軽油の場合より低くなったものと思われる。W20 の場合は燃焼促進作用により、軽油の場合に比べ負荷 100%で 16%程度の低減が可能となっている。NO_x 濃度は各燃料とも負荷 50%付近で最大となり、それ以上の高負荷側ではほぼ一定かいくぶん減少する傾向が見られる。この原因として、高負荷時においては渦流室内の混合気が過濃となり、予混合燃焼が負荷 50%の場合よりも低い温度で行われたことと、酸素不足による NO_x 生成反応の停止が見られたためであると思われる。燃料別の NO_x 濃度においても図 8 の空燃比からの予想に反し、なたね油が全負荷域にわたって高い値を示している。なたね油のもつ酸素の自給作用により、渦流室内で形成された過濃混合領域内での局所的な酸素不足が解消されることで、なたね油の場合は軽油以上の NO_x 生成反応が促進されたためである。これに対して、W20 の場合

Fig. 7 Smoke and NO_x concentrations with three different fuels

Fig. 9 Comparison of engine performance for DI and IDI engines

Fig. 8 Variation in air-fuel ratio with three different fuels

Fig. 10 Comparison of energy consumption for DI and IDI engines

は乳化燃料特有の水の蒸発潜熱による燃焼温度の抑制と高温ガスの滞留時間の短縮によって、最も低い NO_x 濃度となっている。なお、なたね油およびW20の CO 濃度と HC 濃度については図5に示しているが、軽油の場合はいずれもほぼなたね油と同程度の排出濃度を示した。なたね油、W20および軽油の CO 濃度と HC 濃度はかなり低く、特に HC 濃度は問題にならない程度であると考えられる。以上の結果より、未燃焼生成物である排気煙と燃焼生成物である NO_x の同時低減が可能で、そのうえこれらの排出ガス濃度が、直噴式機関の場合⁽⁴⁾の半分以下であることを考えると、なたね油乳化燃料を特徴づける効果が渦流室式機関においては、より発揮されていると思われる。

3.3 渦流室式機関でのなたね油乳化燃料の適合性

著者がこれまで報告した直噴式四サイクル単気筒機関の実験結果⁽⁴⁾と渦流室式機関である供試機関の実験結果との比較を図9に示す。両形式機関とも、なたね油乳化燃料を使用した場合の最適水混合割合は20%であると考えられ、したがって乳化燃料での実験結果はW20を使用した軽油対応の標準噴射系で行った場合である。なお、直噴式機関は内径×行程=88×90 mm、定格出力7.35 kW/2 600 rpmである。

W20を使用した場合の正味燃料消費率BSFCは直噴式、渦流室式機関ともに軽油の場合より悪化している。しかし、直噴式機関においてW20を使用した場合のBSFCは軽油の場合より26%程度悪化しているが、渦流室式機関でW20を使用した場合には軽油の場合に比べて、17%程度の悪化にとどまっている。また、直噴式機関にW20を使用した場合の正味熱効率BTEは、軽油の場合に比べて約2.3%低くなるが、渦流室式機関にW20を使用した場合は軽油の場合とほぼ同じBTEが得られている。渦流室式機関は、渦流室での強いスワールにより粘度が高いW20の場合でも混合気形成が速やかに行われ、燃焼が促進されとともに燃料性状に対して鈍感であることが、W20を使用しても軽油並みの熱効率が得られた理由であろう。図10に機関形式の違いによるエネルギー消費率を示す。直噴式機関にW20を使用した場合は軽油の場合に比べて、正味熱効率が低い分だけエネルギー消費率は高くなるが、渦流室式機関にW20と軽油を使用した場合のエネルギー消費率は正味熱効率と同様にほぼ同一である。一般に、渦流室式機関は直噴式機関に比べ、機関性能では劣るといわれているが、なたね油乳

化燃料を使用した場合、排出ガス濃度は低く、正味熱効率においても軽油を使用した場合とほぼ同等の結果が得られた。以上のことから、機関に何らの変更を加えることなしに、なたね油乳化燃料をディーゼル機関燃料として使用する場合、渦流室式機関のほうが適していると思われる。

4. 結 論

なたね油乳化燃料を渦流室式機関に使用して、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検討した。さらに、これまで報告した直噴式機関の結果と比較して、以下のことが明らかになった。

(1) 軽油対応の標準噴射系の機関に、なたね油乳化燃料を用いた場合、機関性能、排出ガス濃度の点から最適水混合割合は20%付近である。

(2) 水混合割合20%のなたね油乳化燃料をディーゼル機関燃料として用いる場合、渦流室式機関では軽油並みの正味熱効率が得られ、排出ガス濃度の点でも直噴式機関に比べ、より適していると思われる。

(3) なたね油乳化燃料を使用することにより、渦流室式機関においても NO_x 濃度と排気煙濃度の同時低減が可能である。

(4) 同一水混合割合のなたね油乳化燃料では、排気煙濃度の低減割合より、 NO_x 濃度の低減割合が大きい。

(5) 水混合割合20%のなたね油乳化燃料を使用した場合、 NO_x 濃度と排気煙濃度は全負荷域にわたり、軽油を使用した場合よりも低濃度である。

終わりに、本研究を実施するにあたり供試機関はヤンマーディーゼル(株)より、ニードルリフトセンサは(株)ゼクセルより提供していただき、実験には亀田昭雄文部技官、学生の勝智昭、中村卓也君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Hemmerlein, N., ほか3名, SAE Paper, No. 910848(1991).
- (2) Ziejewski, M., ほか3名, SAE Paper, No.911765(1991).
- (3) 浜崎和則・ほか2名, 機論, 59-548, B(1992), 1551-1556.
- (4) 浜崎和則・ほか3名, 機論, 61-581, B(1995), 339-343.
- (5) 辻薦, 乳化・可溶化の技術, (1992), 77, 工学図書.
- (6) 中川洋・ほか2名, 機論, 61-590, B(1995), 3554-3560.
- (7) 日本機械学会編, 機械工学便覧, B 7(1986), 28, 日本機械学会.