乳化パーム油メチルエステルのディーゼル燃焼特性*

木下 英二^{*1}, 浜崎 和則^{*1}
切手 政貴^{*2}, 亀田 昭雄^{*3}Diesel Combustion Characteristics of
Emulsified Palm Oil Methyl EsterEiji KINOSHITA^{*4}, Kazunori HAMASAKI,
Masataka KITTE and Akio KAMEDA^{*4} Department of Mechanical Engineering, Kagoshima University,
1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima, 890-0065 Japan

In order to reduce NO_x and smoke emissions from diesel engines with palm oil methyl ester (PME), the combustion characteristics and exhaust emissions of emulsified palm oil methyl ester (EPE) were investigated using a DI diesel engine. From the experimental results, stable EPE can be obtained without adding any emulsifier like as emulsified rapeseed oil methyl ester (ERE). EPE is able to reduce NO_x and smoke emissions as ERE. The optimum water mass fraction for EPE is 15% with regard to the exhaust emissions. Due to the higher ignitability and better combustion characteristics of PME, EPE with 15 mass% water has shorter ignition delay and lower NO_x , HC, CO and smoke emissions compared to ERE and the emulsified gas oil with same water content. EPE and ERE have higher NO_x reduction and lower smoke reduction, which are normalized by the base fuels, compared with the emulsified gas oil.

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

1. 結 論

バイオディーゼルは、毒性が低く、生分解性が良く、硫黄分をほとんど含まない再生可能な含酸素燃料であり、軽油に比べて排ガス中の CO , HC, PM (Smoke) 濃度が低減し⁽¹⁾, カーボンニュートラルと考えられるために燃料としてのライフサイクル CO_2 排出を削減できる⁽²⁾。バイオディーゼルの原料は主に植物油であり、その中でもパーム油は生産量が世界第1位⁽³⁾で、高生産性・低コストであり、バイオディーゼル原料として非常に期待されている。

著者らは、これまでに、パーム油メチルエステル (PME) をディーゼル機関に適用して実験を行い、軽油に比べて排ガス中の HC, CO, Smoke 濃度が低いこと、着火性も良いことから軽油代替ディーゼル燃料として有望であることを報告した^{(4), (5)}。

また、なたね油メチルエステル (RME) に水を添

加して乳化した乳化なたね油メチルエステル (ERE) を作製し、直噴式ディーゼル機関を用いて燃焼・排出ガス特性に関する実験を行い、ERE が RME に比べて燃焼を改善させ、排ガス中の NO_x と Smoke 濃度を同時に低減させることも報告した^{(6), (7)}。

本研究では、PME の排ガス中の NO_x と Smoke を低減させるために、乳化パーム油メチルエステル (EPE) を作製し、直噴式ディーゼル機関に適用して燃焼・排ガス特性の実験を行い、ディーゼル燃焼・排ガス特性及ぼす水混合割合の影響を検討した。さらに、ERE, 軽油および軽油乳化燃料の場合と比較するとともに、乳化燃料の燃料性状および燃焼・排ガス特性及ぼすベース燃料の影響を検討した。

2. 供 試 燃 料

乳化燃料のベース燃料として、パーム油メチルエステル (PME), なたね油メチルエステル (RME) および JIS 2 号軽油を使用した。表 1 に PME, RME および JIS 2 号軽油の燃料性状を示す。PME と RME のエステル変換率は、グリセリド (モノ, ジ, トリグリセリド) の値から 95% 以上である。軽油と比較す

* 原稿受付 2007 年 1 月 19 日。

^{*1} 正員, 鹿児島大学工学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)。^{*2} 学生員, 鹿児島大学大学院理工学研究科。^{*3} 鹿児島大学工学部。

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

ると、PME は 11.5 mass%，RME は約 10.5 mass% の酸素を含んでおり、硫黄をほとんど含有していない。PME および RME の動粘度は軽油の 1.5 倍程度であり、比較的低粘度である。また、PME、RME の低発熱量は軽油の 85% 程度である。表 2 に PME と RME の脂肪酸メチルエステルの組成割合を示す。表 2 において、C はメチルエステル中の炭素の数、N は炭素の二重結合の数を示す。PME は主にパルミチン酸、オレイン酸、リノール酸メチルエステルを多く含んでいる。一方で、RME は主にオレイン酸、リノール酸、リノレン酸メチルエステルを多く含んでおり、PME と RME における脂肪酸メチルエステル組成は、ディーゼル燃焼特性・排ガス特性に影響を与える⁽⁵⁾。

これまでの研究⁽⁶⁾により、乳化剤としてグリセリンを使用することで、攪拌機なしで安定した乳化燃料を得ることができる。乳化なたね油メチルエステル (ERE) の最適水混合割合は、機関性能・排ガス特性から 15 mass% が最適である⁽⁶⁾。また、これまでの研究⁽⁷⁾により水混合割合 15 mass% の ERE は、乳化剤無添加、攪拌機なしで作製することができる。それは RME 中の微量に残留しているグリセリドのためであると考えられる。

本研究では、ERE と同様に、乳化剤を添加することなく、乳化パーム油メチルエステル (EPE) を作製することができた。供試燃料として PME、RME、JIS 2 号軽油、EPE (水混合割合 10、15、20 mass%)、ERE (水混合割合 10、15、20 mass%)、軽油乳化燃料 (EGO、水混合割合 15 mass%) を使用した。ERE と EPE の作製には乳化剤を使用せず、EGO の場合には石油系乳化剤を使用した。乳化燃料は攪拌機を用いて作製するが、機械的条件等が乳化状態 (乳化水粒子の粒径分布等) に影響を及ぼすので、攪拌機の回転数、時間および温度をほぼ同じ (約 25℃) にして作製した。

表 3 に乳化燃料のベース燃料と水混合割合を示し、乳化燃料の水粒子径を表すザウタ平均粒径 (S.M.D.) と動粘度を示す。動粘度はレッドウッド粘度計を使用し、20℃において測定を行った。表 3 の乳化燃料の動粘度はベース燃料に比べて大きい。乳化燃料は球状多分散系のエマルジョン⁽⁸⁾であるので、表 3 に示した動粘度はレッドウッド粘度計の測定による見かけの値であり、この動粘度が乳化燃料のディーゼル噴霧の微粒化特性にどのように影響するのかわか明かではない。動粘度の増加による影響はあると考えられるが、ERE は RME に比べて着火は遅れるものの燃焼は良好⁽⁷⁾なので、ERE の噴霧の微粒化は、

Table 1 Properties of base fuels

Test fuels	PME	RME	Gas Oil
Cetane number	53	51	56
Net calorific value MJ/kg	36.85	36.55	43.12
Density@288K kg/m ³	879	886	832
Viscosity@293K mm ² /s	7.1	7.7	4.7
Pour point °C	12.5	-7.5	-12.5
C mass %	75.7	77.6	87.3
H mass %	13.0	11.9	12.5
O mass %	11.5	10.5	0
Sulfur mass ppm	1.8	6	< 500
Water mass ppm	400	300	—
Stoichiometric air-fuel ratio	12.66	12.53	14.2
50% distillation temp. °C	327	335	302
Monoglycerides mass %	0.15	0.19	—
Diglycerides mass %	0.56	0.58	—
Triglycerides mass %	3.11	3.57	—

Table 2 Fatty acid methyl ester compositions

Fatty acid methyl ester	C : N	PME	RME
Palmitic acid methyl ester	16 : 0	44.1	4.9
Oleic acid methyl ester	18 : 1	43.3	58.1
Linoleic acid methyl ester	18 : 2	9.2	24.2
Linolenic acid methyl	18 : 3	1.0	11.0
Others	—	2.4	1.8

C: No. of carbon, N: No. of carbon-carbon double bonds

表 3 の動粘度の増加が示すほどには悪化しないと思われる。他の乳化燃料においても同様のことが言えると思われる。

図 1 に、乳化状態の顕微鏡写真を示す。EPE、ERE、EGO は W/O 型エマルジョンである。EPE、ERE の S.M.D. は写真の中の 100 個の水粒子径を測定した。図 1 より、水混合割合が乳化状態に影響を与えることが分かる。表 3 に示すように、水混合割合が増加すると、水粒子径は大きくなり動粘度が減少する。水混合割合が 20 mass% を超えると、乳化状態は不安定になることが分かる。EGO15 は直ぐに分離するので作製直後に供試機関に導いて実験を行う必要がある。EPE15 は約 5 日目から分離が始まり、ERE15 は 5 日以上安定している。したがって、EPE15 は比較的安定した乳化燃料である。

3. 実験装置および方法

供試機関は単気筒、水冷式、横型、直噴式四サイクルディーゼル機関で、表 4 に主要諸元を示す。噴射系

Table 3 Properties of test emulsified fuels

Test fuels	EPE10	EPE15	EPE20	ERE10	ERE15	ERE20	EGO15
Base fuel wt%	89.9	84.9	79.9	89.9	84.9	79.9	84.5
Water wt%	10	15	20	10	15	20	15
S.M.D. μm	45.7	59	98	54.5	69.3	192	23
Viscosity @293K, mm^2/s	170	142	52	150	127	30	240

Fig.1 Microscopic photos of emulsified water particles for emulsified fuels

は軽油使用時の標準噴射系を用いた。排出ガス中の CO 濃度は NDIR, NO_x 濃度は CLD, HC 濃度は FID, 排気煙濃度は光学式スモークメータを使用して測定した。噴射ノズルのニードルリフトはホール素子センサにより測定し、シリンダ内圧力はひずみゲージ式高圧指圧計によって測定した。ニードルリフトおよびシリンダ内圧力は 50 サイクルの平均値である。実験は、機関回転数を 2000 rpm 一定として負荷（各燃料の負荷 100%は同じ正味平均有効圧力 0.67 MPa）を変化させて行った。本実験は噴射系を変更することなく燃料を変えた場合のディーゼル燃焼および排ガス特性の違いを検討したものである。

4. 実験結果および考察

4-1 乳化 PME の燃焼特性に及ぼす水混合割合の影響
 EPE は水混合割合が 20 mass% までは機関の始動および回転の安定性に問題はなかったが、20 mass% を超えると機関の始動は良好ではなく、回転が不安定になった。水混合割合 15 mass% の乳化 PME の正味熱効率は PME や軽油の場合とほぼ同じ

Table 4 Specifications of test engine

Engine Type	1 Cylinder, 4 Stroke, D.I., Water Cooled
Bore × Stroke	110 × 106 mm
Stroke Volume	1007 cm ³
Compression Ratio	16.3
Rated Power	11.77 kW / 2200 rpm
Nozzle Opening Pressure	19.6 MPa
Nozzle Holes	φ0.33 mm × 4

であった。

図 2 に負荷 100% における EPE および PME の熱発生率線図と噴射ノズルのニードルリフトを示す。ニードルリフトから、EPE の噴射終了は水混合割合が増加するほど長くなっている。これは、EPE が水を含んでいるので低発熱量が低くなり、同じ熱量を得るには燃料を多く噴射する必要があるためである。EPE は水混合割合が増加するほど、着火が遅れていることが分かる。また、EPE の最大熱発生率は着火遅れが

長いほど高くなっており、PME で最も低く、EPE20 で最も高くなっている。着火遅れが長いほど着火遅れ期間に形成される可燃予混合気量が多くなり、その可燃予混合気着火後に急激に燃焼するために最大熱発生率が高くなったと考えられる。しかしながら、EPE の燃焼終了は水混合割合を増加させても遅くならないことが分かる。EPE は PME より着火が遅れるが、燃焼終了は PME とほぼ同じであるので、EPE 噴霧の燃焼速度が速くなっていると考えられる。

図 3 に排ガス濃度に及ぼす水混合割合の影響を示す。全ての負荷において、NO_x 濃度は水混合割合の増加に伴って低減している。水の添加によって燃焼温度が低下したため NO_x 濃度が減少したと思われる。また、全ての負荷において、Smoke 濃度は水混合割合が増加するほど低減している。水混合割合が増加するほど燃料噴霧内への空気導入が増え⁽⁹⁾、燃焼が改善したために Smoke 濃度が減少したと考えられる。また、Smoke 濃度の低減の一因として、水滴のマイクロ爆発による燃焼場の混合促進効果が考えられ、水混合割合の増加によるマイクロ爆発の増大のため、燃焼場の混合が促進され、燃焼が改善し、Smoke 濃度が低減したと考えられる。これに対して、ERE の Smoke 濃度は水混合割合 15 mass% までは減少し、それ以降で急速に増加する⁽⁶⁾。EPE の Smoke に及ぼす水混合割合の影響は ERE の場合と異なっており、これは EPE と ERE の着火性の違いが一因であると考えられる。着火遅れが非常に長くなると燃焼悪化を引き起こすが、EPE は同じ水混合割合の ERE と比べて着火遅れが短い（次節および図 4 参照）ために、着火遅れ増大による燃焼悪化が引き起こされ難く、そのために Smoke 濃度の減少から増加へ転じる水混合割合の限界値が大きくなったものと考えられる。NO_x と Smoke 濃度の結果から、PME は RME の場合と同様に、水を添加して乳化することによって排ガス中の NO_x と Smoke の同時低減が可能である。

図 3 から、EPE の CO と HC 濃度は水混合割合が増加するほど増加しており、低負荷での増加が著しいことが分かる。これは、乳化燃料中の水の冷却作用のために燃焼反応が凍結して CO と HC が多く排出されたためと考えられる。また、CO 濃度に関しては、乳化燃料中の水による遊離炭素の水性ガス反応も増加の一因と考えられる。CO と HC 濃度は低負荷において、水混合割合 15 mass% 以降で急速に増加しているが、これは水の冷却による燃焼の悪化が主な原因と考えられる。

以上の結果から、EPE の最適水混合割合は、機関

Fig. 2 Heat release rate and needle lift for EPE at 100% load

Fig. 3 Effects of water content on exhaust emissions of EPE

性能および排ガス特性から、ERE と同じ 15 mass% と判断される。次に EPE と ERE の最適水混合割合である 15 mass% における EPE15, ERE15, EGO15 の比較を行い、ベース燃料の違いを検討する。

4-2 乳化燃料の燃焼特性に及ぼすベース燃料の影響

ここで比較検討する燃料は、EPE15, ERE15 および EGO15 の 3 種類とそのベース燃料である PME, RME および軽油である。図 4 に負荷 100% における燃料噴射時期、着火遅れおよび着火時期を示す。これらの値は噴射ノズルのニードルリフトとシリンダ内圧力の測定から得られたものである。なお、燃料噴射時期は噴射ノズルのニードルが上昇するクランク角とし、着火時期はシリンダ内圧力上昇率の変曲点のクランク角とした。図 4 より、PME および RME は燃料噴射時期が軽油に比べてクランク角で約 0.5 度早くなっており、これは PME および RME の体積弾性率が軽油より高いためであると考えられる。また、乳化燃料においても EPE15 および ERE15 の燃料噴射時期は EGO15 より約 0.8 度早くなっている。PME は着火遅れが RME より短く、高着火性である。これは PME が RME に比べて高セタン価のパルミチン酸メチルエステルを多く含有し、オレイン酸メチルエステル等のセタン価の低い成分が少ないためである⁽¹⁰⁾。図 4 より、全ての乳化燃料はベース燃料に比べて着火遅れが長くなっており、また、ベース燃料の着火遅れが長い程、乳化燃料の着火遅れは長くなっていることが分かる。EPE15 の着火遅れは ERE15 および EGO15 より短く、RME と同程度である。

図 5 に負荷 100% における熱発生率線図とニードルリフトを示す。EPE15 の最大熱発生率は ERE15 よりかなり低く、RME と同程度である。これは PME の高着火性のためであり、EPE15 の着火遅れが ERE15 より非常に短く、RME 程度であるためである。EGO15 は着火遅れの増大による最大熱発生率の増加

Fig. 4 Injection timing and ignition delay at 100% load

が EPE15 や ERE15 より大きいことが分かる。図 4 および図 5 から、乳化燃料の着火・燃焼特性はベース燃料に依存していることが分かる。

Fig. 5 Heat release rate and needle lift at 100% load

Fig. 6 Brake thermal efficiency and exhaust emissions

Fig. 7 NOx emissions normalized by the value of gas oil

Fig. 9 NOx emissions normalized by the base fuels

Fig. 8 Smoke emissions normalized by the gas oil

Fig. 10 Smoke emissions normalized by the base fuels

図 6 に正味熱効率 BTE および排ガス濃度を示す。EPE15 の BTE は他の燃料の場合と同程度の値を示している。NOx および Smoke 濃度は全ての乳化燃料でベース燃料より低減している。また、EPE15 の NOx 濃度が最も低い値を示す。CO および HC 濃度は全ての乳化燃料でベース燃料より増加しているが、高負荷での増加率は小さい。図 6 より、全ての排ガス濃度において、EPE15 は ERE15 より低い値であることが分かる。

図 7 および図 8 に軽油を 100 としたときの乳化燃料の NOx と Smoke 濃度を示す。NOx および Smoke とともに、EPE15 が最も低くなっていることが分かる。図 7 において、負荷 75 と 100% の場合、RME の NOx が軽油より高くなっている。これは図 5 に示す

ように RME の着火後の最大熱発生率が軽油より高く、そのために RME の燃焼温度が軽油より高くなったためと考えられる。

図 9 および図 10 にベース燃料を 100 としたときの乳化燃料の NOx と Smoke 濃度を示す。ベース燃料に対する NOx 低減率は乳化バイオディーゼル (EPE, ERE) の方が大きく、Smoke 低減率は軽油乳化の方が大きいことが分かる。したがって、Smoke 低減率の大きい軽油乳化の方が乳化バイオディーゼルより乳化による燃焼改善が大きいと考えられる。また、このベース燃料を基準とする低減率は、一部を除いて、NOx 低減率が大きいほど Smoke 低減率は小さくなっており、NOx 低減率と Smoke 低減率はトレードオフの関係になっていることが分かる。

以上の結果から、EPE15 は、PME より NOx と Smoke の同時低減が可能で、また、乳化燃料としては高着火性であり、ERE15 および EGO15 より排ガス特性に優れており、ディーゼル代替燃料として十分使用可能であると考えられる。

5. 結 論

パーム油メチルエステル (PME) の排ガス中の NOx と Smoke を低減させるために、乳化パーム油メチルエステル (EPE) を作製し、直噴式ディーゼル機関に適用して燃焼・排ガス特性の実験を行い、ディーゼル燃焼・排ガス特性及ぼす水混合割合の影響を検討した。さらに、ERE、軽油および軽油乳化燃料の場合と比較するとともに、乳化燃料の燃料性状および燃焼・排ガス特性及ぼすベース燃料の影響を検討した。その結果、以下の結論を得た。

(1) ERE と同様に、乳化剤無添加で比較的安定した EPE を作ることができる。

(2) EPE は、水混合割合が増加するほど排ガス中の NOx と Smoke 濃度が同時低減する。また、EPE の正味熱効率は PME および軽油とほぼ同じである。

(3) EPE の最適水混合割合は、機関性能および排ガス特性から判断して、ERE と同じ 15 mass% である。

(4) 乳化燃料の着火遅れは、ベース燃料の着火遅れより長くなり、ベース燃料に依存して変化する。最適水混合割合 15 mass% の EPE の着火遅れは、ベース燃料の PME の高着火性のために、同じ水混合割合の ERE に比べて短く、また、軽油とほぼ同じである。

(5) 最適水混合割合 15 mass% の EPE の排ガス中の NOx, Smoke, HC および CO 濃度は同じ水混合割合の ERE および軽油乳化より低濃度である。

(6) ベース燃料に対する NOx 低減率は乳化バイオディーゼル (EPE, ERE) の方が大きく、Smoke 低減率は軽油乳化の方が大きい。

以上の結論より、乳化パーム油メチルエステルは、乳化燃料としては高着火性であり、同じ水混合割合の乳化なたね油メチルエステルおよび軽油乳化より排ガス特性に優れており、ディーゼル代替燃料として十分使用可能であると考えられる。なお、本研究は燃焼特性に主眼をおいたものであり、燃料の違いによる機器の耐久性に関する潜在的な問題については、今後検討が必要である。

文 献

- (1) U.S. Department of Energy, 2004 Biodiesel Handling and Use Guidelines, (2004), pp. 1-60.
- (2) Sheehan, J. et al., An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles, *NREL/TP-580-24772*, (1998), pp. 1-47.
- (3) Food and Agriculture Organization of the United Nation, Statistical Databases, <http://www.fao.org/faostat>.
- (4) Hamasaki, K. et al., Utilization of Palm Oil for Diesel Fuel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 68, No. 667 (2002), pp. 958-963 (in Japanese).
- (5) Kinoshita, E. et al., Combustion Characteristics of A Diesel Engine with Palm Oil Methyl Ester and Its Blended Fuel with Gas Oil, *Proceeding of 2004 FISITA World Automotive Congress*, Paper no. F2004V077 (2004), pp. 1-15.
- (6) Hamasaki, K. et al., Utilization of Emulsified Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 67, No. 663 (2001), pp. 2898-2909 (in Japanese).
- (7) Hamasaki, K. et al., Utilization of West Vegetable Oil Methyl Ester for Diesel Fuel, *SAE Paper*, No. 2001-01-2021 (2001), pp. 1-6.
- (8) Kinoshita, E. et al., Combustion Characteristics of Diesel Engines with Emulsified Biodiesel without Adding Emulsifier, *SAE Paper*, No. 2004-01-1860, (2004), pp. 1-9.
- (9) Nakagawa, Y. et al., Research on Diesel Combustion of Emulsified Fuel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 61, No. 590 (1995), pp. 3554-3560 (in Japanese).
- (10) Kinoshita, E. et al., Diesel Combustion Characteristics of Coconut Oil and Palm Oil Biodiesels, *SAE Paper*, No. 2006-01-3251, (2006), pp. 1-10.