パーム油メチルエステル・軽油混合燃料のディーゼル燃焼*

木下 英二^{*1}, 下之門 智史^{*2}
浜崎 和則^{*1}, 塚田 真琴^{*2}Diesel Combustion of Palm Oil Methyl Ester
Blend Fuels with Various Gas OilsEiji KINOSHITA^{*3}, Satoshi SHIMONOKADO,
Kazunori HAMASAKI and Makoto TUKADA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kagoshima University,
1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima, 890-0065 Japan

In order to use palm oil methyl ester (PME) as an alternative diesel fuel at relatively low temperature condition (-15 to 0°C), the pour points at cold condition and the diesel combustion of PME blend fuels with various gas oils are investigated. The JIS No. 2 gas oil (GO2), No. 3 gas oil (GO3) and special No. 3 gas oil (GO3S) are used as base fuels. To make the pour point of blend fuel to be below that of GO2 (-12.5°C), the upper limit of PME content is about 5 vol% for GO3 blend and about 20 vol% for GO3S blend. Moreover, three PME 20 vol% blend fuels (GO2/PME 20, GO3/PME 20 and GO3S/PME 20) are tested using a DI diesel engine, and compared with the base gas oils. Thermal efficiency of the blend fuels are almost the same as that of GO2. The blend fuels have shorter ignition delay and lower HC and Smoke emissions compared with the base gas oils because of the higher cetane number of PME.

Key Words: Diesel Engine, Alternative Energy, Biomass Energy, Liquid Fuel, Biodiesel, Palm Oil, Methyl Ester, Exhaust Emission

1. 結 論

バイオディーゼルは動植物油とメタノールからエステル反応により得られる脂肪酸メチルエステル (FAME) の混合物であり、既に EU 諸国や米国ではなたね油や大豆油のバイオディーゼルがディーゼル代替燃料として利用されている。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) 濃度が低減する⁽¹⁾。また、バイオディーゼルはカーボンニュートラルと考えることができ、その燃焼によって排出される CO₂ は植物の成長過程で吸収される CO₂ とバランスするので、燃料としてのライフサイクル CO₂ 排出を削減できる⁽²⁾。

植物油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、パーム油にメタノール

を用いてエステル転換したパーム油メチルエステル (PME) は軽油と比較してディーゼル排ガス中の HC, CO, Smoke 濃度を低減でき、着火性も良いことから軽油代替燃料として非常に期待されている^{(4), (5)}。しかし、PME は流動点が 12.5°C と高く、日本などの冬季には固化して使用が難しい^{(4)~(6)}。これを解決する一つの方法として、PME を低温流動性に優れた燃料と混合して利用する^{(5), (6)}ことが考えられる。

バイオディーゼルはディーゼル機関の燃料ラインで使用されているニトリルゴムやポリプロピレン等のシール剤を膨潤させる⁽¹⁾ので、燃料ラインからの燃料漏れを引き起こす場合がある。また、既に軽油や A 重油で使用されているディーゼル機関にバイオディーゼルを使用する場合、バイオディーゼルは燃料ラインや燃料タンクに付着した堆積物を溶かす効果があるので、堆積物が剥離して燃料フィルタの目詰まりを引き起こす⁽¹⁾場合がある。このような問題を極力回避する一つの方法は、軽油にバイオディーゼルの混合させて使用することである。米国エネルギー省は、バイオディーゼルのディーゼル機関に使用する場合、ASTM 規格に適合したバイオディーゼルの体積割合

* 原稿受付 2006 年 11 月 20 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。

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

Table 1 Properties of the test fuels

Test fuels	PME	GO2	GO3	GO3S	BGO2	BGO3	BGO3S
Cetane number	64.5 ^a	56	53	49	—	—	—
Net calorific value MJ/kg	36.85	42.7	43.08	43.26	41.48 ^b	41.78 ^b	41.90 ^b
Density@288K kg/m ³	873	828	825	808	838	834	822
Kinematic viscosity@293K, mm ² /s	7.1	4.6	3.9	2.4	4.7	4.3	2.7
Pour point °C	12.5	-12.5	-20	-37.5	-5	-7.5	-12.5
C mass %	75.6	87.3	85.9	85.8	84.9 ^b	83.7 ^b	83.6 ^b
H mass %	12.9	12.5	14.1	14.2	12.6 ^b	13.8 ^b	13.9 ^b
O mass %	11.5	0	0	0	2.4 ^b	2.4 ^b	2.4 ^b
Sulfur mass %	0.0002	<0.05	0.0007	0.0006	—	—	—
50 % distillation temp. °C	329	284	275.5	230	—	—	—
Stoichiometric air-fuel ratio	12.60	14.30	14.69	14.71	13.96	14.23	14.25

a) Cetane number from Ref. 6

b) Estimated value

20%以下で軽油に混合することを推奨している⁽¹⁾。

本研究では、PME を比較的低温の環境下（-15 ～ 0 °C）で使用するための指針を得るために、PME を JIS 2 号，3 号および特 3 号軽油と混合させた燃料の流動点を測定するとともに、これら 3 種類の軽油に PME を体積割合で 20% 混合させた混合燃料を直噴式ディーゼル機関に適用して燃焼・排ガス特性に関する実験を行い、JIS 2 号軽油の場合と比較検討した。そして、PME・軽油混合燃料のディーゼル燃料としての有効性を検討した。

2. 供 試 燃 料

供試燃料として、パーム油メチルエステル（PME），JIS 2 号軽油（GO2），JIS 3 号軽油（GO3），JIS 特 3 号軽油（GO3S），および、これらの軽油に PME を体積割合で 20% 混合した 3 種類の混合燃料（それぞれ BGO2, BGO3, BGO3S）を用いた（3 種類の混合燃料をまとめて示す場合は B20 系燃料と表す）。表 1 に供試燃料の性状を示す。表 1 中の B20 系燃料の低発熱量および C, H, O の質量割合は混合したベース燃料の値から混合割合により算出した。表 1 から軽油は JIS 2 号，3 号，特 3 号の順に低沸点成分が増えるので、低発熱量が高くなっており、また、セタン価、密度、動粘度は低くなっている。PME は、酸素を 11.5 mass% 含んでいるため低発熱量が軽油に比べて低く、硫黄分をほとんど含んでいない。表 2 に単一成分の FAME のセタン価と凝固点、また、ガスクロマトグラフで測定した PME の

Table 2 Properties of single type FAMES and PME FAME compositions

FAME	C:N ^a	Cetane no.	Melting point ^d , °C	PME
Methyl laurate	12:0	61.4 ^b	5	0.3
Methyl myristate	14:0	66.2 ^b	18.5	1.1
Methyl palmitate	16:0	74.5 ^b	30.5	48.8
Methyl stearate	18:0	86.9 ^b	39.1	1.7
Methyl oleate	18:1	56.0 ^c	-20	38.4
Methyl linoleate	18:2	41.7 ^c	-35	9.1
Methyl linolenate	18:3	45.9 ^c	-57	0.5
Others	—	—	—	0.1

a) C: No. of carbon, N: No. of carbon-carbon double bond

b) Cetane number from Ref. 7

c) Cetane number from Ref. 8

d) Melting point from Ref. 9

Table 3 Properties of PME

Properties	PME	EU standard EN14214
Methanol mass %	< 0.001	0.2 max
Free glycerol mass %	0.008	0.02 max
Monoglyceride mass %	0.073	0.8 max
Diglyceride mass %	0.178	0.2 max
Triglyceride mass %	0.007	0.2 max

FAME 組成を示す。表 2 から、飽和脂肪酸メチルであるパルミチン酸メチルは高セタン価であり、PME はパルミチン酸メチルを約 50% 含んでいるために表

Fig. 1 Pour points of PME blend fuels

1のようにPMEのセタン価は64.5⁽⁶⁾と非常に高い。しかし、表2に示すように飽和脂肪酸メチルは不飽和脂肪酸メチルより凝固点が高く、特にパルミチン酸メチルは30.5℃と高いため、表1のようにPMEの流動点は12.5℃と高い。また、GO3Sの動粘度は2.4 mm²/sと非常に低いが、PMEの混合によりBGO3Sは2.7 mm²/sと多少増加している。

表3にはPMEのメタノール、遊離グリセリン、モノ・ジ・トリグリセリドの含有率およびEU規格を示している。PMEのメタノール、遊離グリセリン、モノ・ジ・トリグリセリドの含有率はEU規格を満たしており、EU規格に準ずる高品質な燃料である。

図1はPME・軽油混合燃料の流動点の測定値をPMEの体積混合割合に対して示したものである。PME・軽油混合燃料の流動点はPMEの混合割合が増加するほど上昇するが、図1より、PMEの僅かな混合で流動点は大幅に上昇していることが分かる。特にGO3SとPMEの混合（GO3S/PME）の場合、流動点はPMEの混合割合が5vol%で12.5℃、20vol%で25℃上昇している。PME・軽油混合燃料の流動点の目標値をJIS2号軽油の流動点-12.5℃とすると、PMEの混合割合の上限は、GO3とPMEの混合（GO3/PME）では約5vol%、GO3S/PMEでは約20vol%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。噴射系は軽油使用時の標準噴射系を用いた。排出ガス中の

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

Fig. 2 Injection and ignition timing, ignition delay

CO濃度はNDIR、NO_x濃度はCLD、HC濃度はFID、排気煙濃度は光透過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2000rpm一定として負荷（負荷100%で正味平均有効圧力は0.67MPa）を変化させて行った。また、全ての供試燃料において燃料温度は20℃で実験を行った。

4. 実験結果および考察

4・1 着火および燃焼特性 図2に負荷100%における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燃料噴射開始時期、着火遅れ期間および着火時期を示す。なお、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2よりPMEの燃料噴射開始時期は他の供

試燃料よりも若干早くなっていることが分かる。これは、PME の体積弾性率が軽油より大きいと予想され⁽¹⁰⁾、そのために燃料噴射開始時期が早くなったと考えられる。ベース燃料間 (GO2, GO3, GO3S, PME) ではセタン価の高い方が着火遅れは短く、セタン価が最も高い PME が最も着火遅れが短くなっていることが分かる。B20 系燃料の着火遅れはベース燃料の軽油よりそれぞれ短くなっており、これは高セタン価の PME を 20vol% 混合させることで着火性が良好になったと考えられる。また、B20 系燃料の間では、着火遅れは混合させる軽油に依存しており、より高セタン価の軽油を混合させた方が着火遅れは短く、PME を GO3S に混合させた BGO3S の着火遅れが最も長くなっている。

図3に負荷 100%における熱発生率およびニードルリフトを示す。図3には GO3 と BGO3 は示していないが、GO3 と BGO3 の熱発生率およびニードルリフトはそれぞれ GO2 と BGO2 の場合とほとんど同じであったので、GO3 と BGO3 は省略した。ニードルリフトから、燃料噴射期間は GO2, BGO2, GO3S, BGO3S, PME の順に長くなっている。PME の燃料噴射期間は GO2 や GO3S に比べて長くなっているが、これは、PME の低発熱量が GO2 や GO3S に比べて低いために、同じ熱量を得るには燃料を多く必要とするからである。また、GO2 より低発熱量の高い GO3S の方が燃料噴射期間は長くなっているが、これは、GO3S の密度が GO2 より低いために、体積当りの低発熱量では GO2 より GO3S の方が低く (GO2 : $353.6 \times 10^2 \text{ MJ/m}^3$, GO3S : $349.5 \times 10^2 \text{ MJ/m}^3$, PME : $321.7 \times 10^2 \text{ MJ/m}^3$)、そのため燃料噴射期間を長く要するからである。最大熱発生率は PME が最も低く、BGO2, BGO3S, GO2, GO3S の順に高くなっている。図2と図3より、着火遅れが短い程、最大熱発生率が低くなっていることが分かる。これは、着火遅れが短い程、着火遅れ期間に形成される可燃予混合気量が少なくなり、着火後の急激な燃焼が抑えられ、最大熱発生率が低下したと考えられる。

4・2 機関性能と排出ガステ性 図4に正味燃料消費率 BSFC と正味熱効率 BTE を示す。PME の正味燃料消費率は GO2 等の他の供試燃料に比べて高い値を示している。これは、表1に示すように PME の低発熱量が他の供試燃料に比べて約 13~15% 低いために、同じ出力を得るには余計に燃料が必要なためである。しかし、図4から、PME の正味熱効率は GO2 等の他の供試燃料とほぼ同じことが分かる。また、B20 系燃料の正味燃料消費率はベース燃料の軽

Fig. 3 Rate of heat release and needle lift

Fig. 4 Brake specific fuel consumption and brake thermal efficiency for the test fuels

油より若干増加傾向にあるが、B20 系燃料の正味熱効率はベース燃料の軽油とほぼ同じであることが分かる。

図5~8に、排ガス中の HC 濃度 (メタン換算値)、CO 濃度、NOx 濃度および Smoke 濃度をそれぞれ示す。HC 濃度は全負荷域において PME が最も低い値

Fig. 5 HC emissions

Fig. 8 Smoke emissions

Fig. 6 CO emissions

Fig. 7 NOx emissions

を示す。これは PME が含酸素燃料であることにより燃焼が良好だったためと考えられる。全体として HC 濃度は B20 系燃料の方がベース燃料の軽油より低くなっていることが分かる。これは PME による着火および燃焼の改善によるものと考えられる。ベース燃料の軽油の間では、GO3S の HC が最も高い値を示す。これは、着火遅れに起因する燃焼悪化が原因と思われる。CO 濃度は各供試燃料間で明確な違いは見られないが、B20 系燃料の方が若干低い値を示す傾向である。NOx 濃度は全ての供試燃料の間で大きな差はないが、PME の NOx は他の供試燃料に比べて若干低くなっている。Smoke 濃度は低負荷域では大きな差は見られないが、高負荷域、特に負荷 100% では違いが大きく見られる。中でも BGO2 は GO2 より約 35% の低減を示す。その他の場合でも BGO3 は GO3 より約 20%、BGO3S は GO3S より約 10% 低減している。これは PME に含まれる酸素によって燃焼の改善がなされたためと考えられる。

以上の結果より、JIS 2 号、3 号、特 3 号軽油に PME を混合することにより、燃焼の改善が図られ、排ガス中の HC、Smoke 濃度は低減される。また、PME・軽油混合燃料の流動点は PME の僅かな混合により急激に高くなり、日本などでの使用には使用可能な地域や時期が限定されるが、地域や時期に対する気温を勘案して PME の混合割合と混合させる軽油の種類を選定することで、PME・軽油混合燃料はディーゼル燃料として十分使用可能であると考えられる。

本研究は、比較的低温の環境下 ($-15 \sim 0^{\circ}\text{C}$) で PME を使用できるかについてのおおまかな指標を得ることを目的としており、そのために流動

点のみを測定して低温流動性の評価を行ったが、今後、燃料フィルタの目詰点についても検討する必要がある。

5. 結 論

PME を比較的低温の環境下 ($-15 \sim 0^{\circ}\text{C}$) で使用できるための指針を得るために、PME を JIS 2 号、3 号および特 3 号軽油と混合させた燃料の流動点を測定するとともに、これら 3 種類の軽油に PME を体積割合で 20% 混合させた混合燃料を直噴式ディーゼル機関に適用して燃焼・排ガス特性に関する実験を行い、JIS 2 号軽油の場合と比較検討した。その結果、以下の結論を得た。

(1) PME・軽油混合燃料の流動点の目標値を JIS 2 号軽油の流動点 -12.5°C とすると、PME 混合割合の上限は、JIS 3 号軽油と PME の混合では約 5vol%、JIS 特 3 号軽油と PME の混合では約 20vol% である。

(2) B20 系燃料の排ガス中の HC と Smoke 濃度はベース燃料の軽油に比べ低減する。特に Smoke 濃度は負荷 100% において BGO2 で約 35%、BGO3 で約 20%、BGO3S で約 10% の低減を示す。

(3) B20 系燃料の着火性はベース燃料の軽油に比べ改善され、熱効率はおおむね同じである。

終わりに、実験に用いた JIS 3 号および特 3 号軽油は(株)ジャパンエナジーおよび(株)鹿島石油(株)に御提供頂いた。また、実験には(株)田沼雄雄技術専門職員の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

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) Kono, N. et al., Influence of FAME Blending into Diesel Fuel on Plugging Characteristics of Fuel Supply System in Diesel Vehicle at Low Temperatures, *Proceeding of 2005 JSAE Annual Autumn Congress*, No.117-05 (2005), pp. 25-30 (in Japanese).
- (7) Klopfenstein, W.E., Effect of Molecular Weights of Fatty Acid Esters on Cetane Number as Diesel Fuels, *JAOCS*, Vol.62, No.6 (1985), pp. 1029-1031.
- (8) Graboski, M.S. et al., The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine, NREL/SR-501-31461 (2003), pp. 1-81.
- (9) Knothe, G. et al., Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuel, *Fuels and Chemicals from Biomass, American Chemical Society Symposium*, Series 666 (1997), pp. 172-208.
- (10) Tat, M.E. et al., Measurement of Biodiesel Speed of Sound and Its Impact on Injection Timing, NREL/SR-510-31462 (2003), pp.1-114.