

ココナッツ油メチルエステルによる 直噴式ディーゼル機関の燃焼特性

Thet MYO* 木下 英二** 浜崎 和則**
切手 政貴*** 西 章吾*** 亀田 昭雄**

Diesel Combustion Characteristics of Coconut Oil Bio-diesel

Thet MYO, Eiji KINOSHITA, Kazunori HAMASAKI,
Masataka KITTE, Shogo NISHI and Akio KAMEDA

Coconut oil has high content of saturated fatty acids with low carbon number such as lauric acid and has about 4-wt% higher oxygen compared with palm, rapeseed and soybean oils. In this study, to utilize coconut oil as a biodiesel fuel, the diesel combustion of coconut oil methyl ester (CME) is investigated using a small DI diesel engine and is compared with palm, rapeseed and soybean oil methyl esters (PME, RME, SME) and gas oil. As the results, the thermal efficiency of CME is almost the same as other test fuels. Smoke emission from CME is the lowest among the test fuels because of the highest oxygen content. NOx emission from CME is lower than gas oil. CME can be used as an alternative petroleum diesel fuel.

Keywords : Diesel Engine, Alternative Energy, Bio-diesel, Methyl Ester, Coconut Oil

1. はじめに

植物油をディーゼル燃料として用いる場合、その粘度を低くし、揮発性を改善するために、一般にメタノールによりエステル転換される。植物油をエステル化した燃料は、バイオディーゼルと呼ばれ、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、軽油に比べて排気煙濃度が低減する^{1),2),3)}。

バイオディーゼルはカーボンニュートラルな燃料と考えることができ、CO₂による環境負荷は軽油に比べて小さい。また、バイオディーゼルは生分解性が良いため、事故等による燃料の流出が起きた場合でも環境に対する影響が小さい。このような理由から、バイオディーゼルは、現在、欧州ではなたね油、北米では大豆油からバイオディーゼルの製造し、ディーゼル代替燃料として使用されている。

表-1に世界の植物油生産量を示す⁴⁾。ココナッツ油は90%以上東南アジア地方で生産されており、ココナッツ油の生産量は大豆油、パーム油、なたね油に比べて少ないが、単位面積あたりの生産性は約2300kg oil/haと全植物油の中でパーム油(5000kg oil/ha)について第二位と高い。したがって、ココ

2005年8月31日受理

* 博士後期課程システム工学専攻

** 機械工学科

*** 博士前期課程機械工学専攻

ナッツ油はプランテーションにより増産が可能であると考えられ、東南アジア諸国を中心に、将来、軽油の一部代替燃料としての利用が期待される。

ココナッツ油は、ラウリン酸やカプリル酸等の炭素数の少ない直鎖飽和脂肪酸を多く含んでおり、酸素含有量は約 14.5wt% であり、なたね油、大豆油、パーム油に比べて約 4wt% 多い⁵⁾。したがって、ココナッツ油をメチルエステル化した燃料をディーゼル機関に用いた場合、排気煙濃度が低減すると予想される。しかし、現在までココナッツ油をバイオディーゼルとして利用することについての研究⁶⁾や報告は少なく、燃料性状と燃焼特性および排ガス特性の関連を検討した研究はほとんど見られない。

本研究では、ココナッツ油を理論量の約 1.1 倍のメタノールを使用して室温で反応させ、後処理の水洗を行わないココナッツ油メチルエステル (CME) を製造した。この CME を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、なたね油メチルエステル (RME)、大豆油メチルエステル (SME)、パーム油メチルエステル (PME) および JIS2 号軽油の場合と比較し、CME の軽油代替ディーゼル燃料としての利用の可能性を検討した。

2. 供試燃料

供試燃料として、CME、PME、RME、SME および JIS2 号軽油を用いた。CME 等のメチルエステル系燃料の製造には文献 7) と同様の方法を用いた。各植物油のエステル反応に必要なメタノールは理論量の約 1.1 倍を使用した。また、触媒として KOH を植物油に対して約 1wt% 使用した。製造は室温で行い、エステル反応が完了した後 (反応開始から約 4 ~ 5 時間)、反応容器の下層に沈殿した粗製グリセリンを分離した。後処理としての水洗処理は行っていない。

表-2 に供試燃料の性状を示す。軽油と比較して、CME、PME、RME および SME は酸素を各々 14.5wt%、11.5wt%、10.5wt%、10.9wt% 含有しており、硫黄をほとんど含有していない。メチルエステル系燃料のメタノール濃度は 0.5wt% 程度である。CME を除くメチルエステル系燃料の低発熱量は軽油の 85% 程度である。CME は他のメチルエステル系燃料より約 3wt% 多く酸素を含有しているので、低発熱量は若干低い値である。メチルエステル系燃料の動粘度は軽油の 1.5 倍程度であり、比較的動粘度である。CME の流動点は 10℃ と PME に比較し

表-1 世界の植物油生産量⁴⁾

Vegetable Oils	2002	2003	2004
Soy Bean	29,905,964	30,313,652	31,142,386
Palm	25,714,405	28,121,615	29,739,005
Rapeseed	12,412,087	11,933,859	12,405,334
Sunflower	8,018,008	9,219,731	9,376,775
Ground Nut	5,087,114	5,626,447	5,652,342
Palm Kernel	3,180,089	3,700,976	3,772,073
Coconut	3,155,735	3,345,456	3,438,465
Rice Bran	1,072,461	1,408,111	1,404,269

Unit: Metric Ton

て若干低い程度であり、低温時における目詰まりや流動性に問題がある。表-2 には、ガスクロマトグラフによる燃料中のトリグリセリドの分析結果も示している。トリグリセリドは植物油そのもの (この場合、未反応植物油) であり、エステル転換率が低いとトリグリセリドの値が大きくなる。CME のトリグリセリド濃度は RME の場合に比べて 75% ほど大きく、エステル転換率が低い。エステル転換率は RME では約 90%、CME では約 80% である。そのために CME の密度および動粘度が他のエステル系燃料に比べて若干大きくなったと考えられる。PME と SME のトリグリセリドの測定は行っていないが、密度および動粘度の値から、RME の場合とほぼ同程度になると推測される。

表-3 に CME、PME、RME および SME の脂肪酸メチルエステルの組成をガスクロマトグラフで分析した結果を示す。CME はラウリン酸メチルエステル等の炭素数の少ない飽和脂肪酸メチルエステルを多く含んでいることが分かる。一方、PME はパルチン酸メチルエステル、RME はオレイン酸メチルエステル、SME はリノール酸メチルエステルを多く含んでいる。

表-4 に主な脂肪酸メチルエステルの沸点⁸⁾と動粘度を示す。表-4 から脂肪酸メチルエステルは炭素数が少ないほど、また、同じ炭素数の場合は炭素の 2 重結合数が少ないほど、低い値の沸点を持つ。

3. 実験装置とその方法

供試機関は単気筒、水冷式、横型、直噴式四サイク

表－2 供試燃料の性状

Test fuels		CME	PME	RME	SME	Gas Oil
Cetane number		—	53	51	50	56
Net calorific value	MJ/kg	35.22	36.85	36.55	36.48	43.12
Density @ 288K	kg/m ³	894	879	886	890	832
Viscosity @ 293K	mm ² /s	8.5	7.1	7.7	7.5	4.7
Pour point	℃	10.0	12.5	−7.5	−7.5	−12.5
C	wt %	73.2	75.6	77.6	77.2	87.3
H	wt %	12.3	12.9	11.9	11.9	12.5
O	wt %	14.5	11.5	10.5	10.9	0
Sulfur	wt %	0.00018	0.00018	0.0006	0.0004	< 0.05
Water	wt %	0.04	0.04	0.03	0.03	—
Stoichiometric air-fuel ratio		11.99	12.60	12.53	12.47	14.2
50% distillation temp.	℃	—	328	335	—	302
Triglyceride	wt %	17.5	—	10.1	—	—

表－3 供試燃料の脂肪酸メチルエステル組成

Fatty acid methyl ester	C:N	Methyl ester (wt%)			
		CME	PME	RME	SME
Caprylic	9:0	8.3	—	—	—
Capric	11:0	5.8	—	—	—
Lauric	13:0	48.7	—	—	—
Myristic	15:0	18.0	—	—	—
Palmitic	17:0	8.6	44.1	4.9	10.8
Stearic	19:0	2.6	—	—	—
Oleic	19:1	6.5	43.3	58.1	26.4
Linoleic	19:2	—	9.2	24.2	53.3
Linolenic	19:3	—	1.0	11.0	9.0
Other	—	1.5	2.4	1.8	0.5

C: Number of carbon, N: Number of double bonds for carbon

ルディーゼル機関で、表－5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。ニードルリフトはホール素子センサにより測定し、シリンダー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ー内圧力は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（負荷100%で正味平均有効圧力は0.67MPa）を変化させて行った。

表－4 脂肪酸メチルエステルの沸点⁸⁾と動粘度

Fatty acid methyl ester	Boiling point ⁸⁾ , K		Viscosity @298K, mm ² /s
	0.4 kPa	0.5 kPa	
Lauric	380.9	385.2	—
Myristic	408.5	413.2	—
Palmitic	430.2	436.7	6.6
Oleic	449.1	453.6	6.5
Stearic	452.1	456.8	—
Linoleic	—	465.2	5.7
Linolenic	455.2	—	—

4. 実験結果および考察

4.1 着火特性および燃焼特性

図-1 に燃料噴射ノズルのニードルリフトとシリンダー内圧力の測定から得られた燃料噴射開始時期、着火遅れおよび着火時期を示している。着火遅れは負荷 100% 以外では PME が最も短く、CME が最も長くなっていることが分かる。負荷 100% では CME の着火遅れは SME とほぼ同じである。

CME、PME、RME および SME は脂肪酸メチルエステルの混合物であるので、その着火性は燃料を構成している脂肪酸メチルエステルの組成に依存している。炭素数の多い脂肪酸メチルエステルの方が高セタン価で着火性が良く、また、同じ炭素の場合には、不飽和度が大きい(表3では、炭素の二重結合数 N が大きいということ)方が低セタン価で着火性が悪くなると言われている⁹⁾。これによると、表-3 から、飽和脂肪酸メチルエステル (N=0) の6種類では、炭素数 C=9 のカプリル酸メチルエステルが最も着火性が悪く、C=19 のステアリン酸メチルエステルが最も着火性が良いということになる。また、C=19 の4つの脂肪酸メチルエステルでは、N=0 のステアリン酸メチルエステルが最も着火性が良く、N=3 のリノレン酸メチルエステルが最も着火性が悪いということになる。

これまでの研究^{10),11)}から、パルミチン酸メチルエステル、オレイン酸メチルエステル、リノール酸メチルエステルの3つでは、パルミチン酸メチルエステルが最も着火性が良く、リノール酸メチルエステルが最も着火性が悪い。PME は RME に比べて着火性の良いパルミチン酸メチルエステルを多く含み、同時に着火性の悪いリノール酸およびリノレン酸メチルエステルの含有率が少ないため、PME の着火遅れは RME より短くなったものと思われる。SME は RME に比べてパルミチン酸メチルエステルを若干多く含むものの、着火性の悪いリノール酸メチルエステルの含有率が高いため、SME の着火遅れは RME より長くなったものと思われる。CME は脂肪酸メチルエステル組成の影響を強く受けながらも、表-2 に示すように他のメチルエステル系燃料よりトリグリセリドを 8wt%程度多く含むため、燃料の揮発性と微粒化特性が悪化し、着火性が最も悪くなったと考えられる。

図2 に負荷 100% の場合の熱発生率線図およびニードルリフトを示す。ニードルリフトから、燃料噴射期間はメチルエステル系燃料が軽油に比べて

表-5 供試機関の諸元

Engine	DI diesel 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
Injection Nozzle Type	Hole (φ0.33 mm×4)
Injection Timing	18 deg. CA BTDC

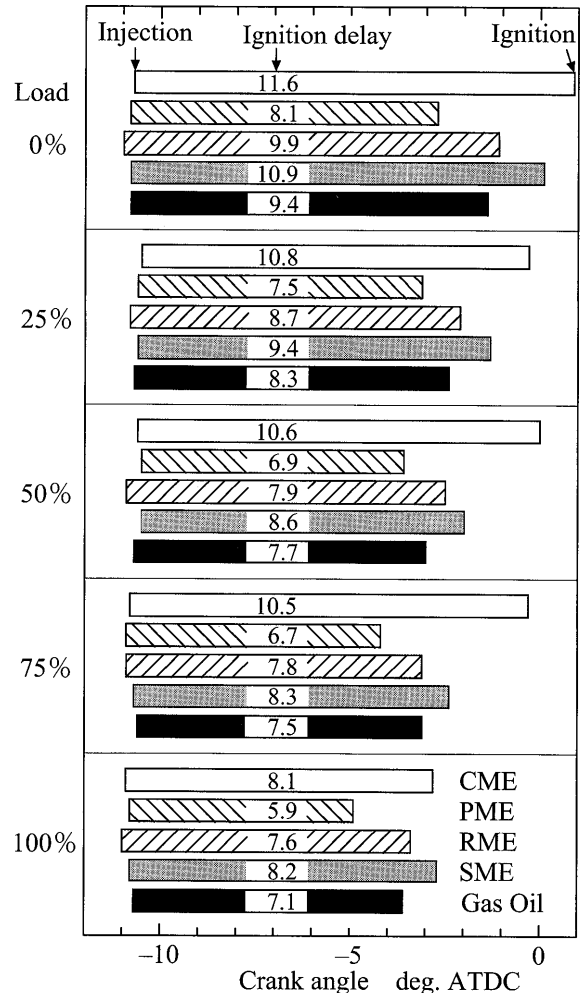


図-1 燃料噴射時期および着火遅れ

長くなっているが、これは低発熱量が約 15% 低い
 ために、同じ熱量を得るには燃料を多く投入する必
 要があるからである。特に、CME の場合、低発熱
 量が最も低いので、燃料噴射期間が最も長くなっ
 ている。CME は着火後の最大熱発生率が RME より
 若干高くなっているが、SME より若干低い。CME
 は RME より着火遅れが長いので、着火前に形成さ
 れる可燃予混合気量が RME に比べて多かったた
 めに、最大熱発生率が高くなったと考えられる。最
 も着火遅れが長い SME は最大熱発生率が最も高
 くなっており、また、最も着火遅れが短い PME
 は最大熱発生率が最も低くなっている。

4.2 機関性能と排出ガス特性

図-3 に各供試燃料に対する正味熱効率 BTE と
 排出ガス中の NO_x、排気煙、CO および HC 濃度
 を示す。メチルエステル系燃料の正味熱効率は軽油
 と同程度の値を示している。

図-3 の HC 濃度は各供試燃料とも低負荷側
 および高負荷側で増加している。メチルエステル系
 燃料は PME を除いて、軽油より HC 濃度が高い。
 これは、メチルエステル系燃料の燃料噴霧の微粒化
 と蒸発が軽油の場合より悪いことが原因である
 と考えられる。SME の HC 濃度は RME より高
 いが、図-1 に示すように SME の着火遅れが RME
 より若干長くなることから、着火遅れが長い分
 だけ低温の雰囲気空気に凍結される燃料の量が多
 くなり、HC 濃度が RME より高い値を示したと
 考えられる。CME の HC 濃度は RME や SME
 より低く、軽油よりいくぶん高い程度である。
 CME は着火遅れが RME や SME より長いもの
 の、他のメチルエステル系燃料に比べ酸素含有
 量が約 5 wt% 多いために不完全燃焼が少
 なくなり、RME や SME より低い HC 濃度
 を示したと考えられる。一方、PME は着火遅
 れが軽油より非常に短いため、低温の雰囲気空
 気に凍結される燃料の量が少なくなり、軽油よ
 り低い HC 濃度を示したと考えられる。

図-3 の CO 濃度は各供試燃料とも低負荷側
 で増加している。また、メチルエステル系燃料
 の CO 濃度は軽油に比べ高い値を示している。
 これは、HC 増加の理由と同様に、メチルエ
 ステル系燃料の燃料噴霧の微粒化と蒸発が軽
 油の場合より悪いことが原因であると思われ
 る。また、CO の主たる生成経路は炭化水素
 のフラグメントである CHO、HCHO の関与
 によるものであるため¹²⁾、分子構造
 中に酸素の存在するメチルエステル系燃料
 の燃焼

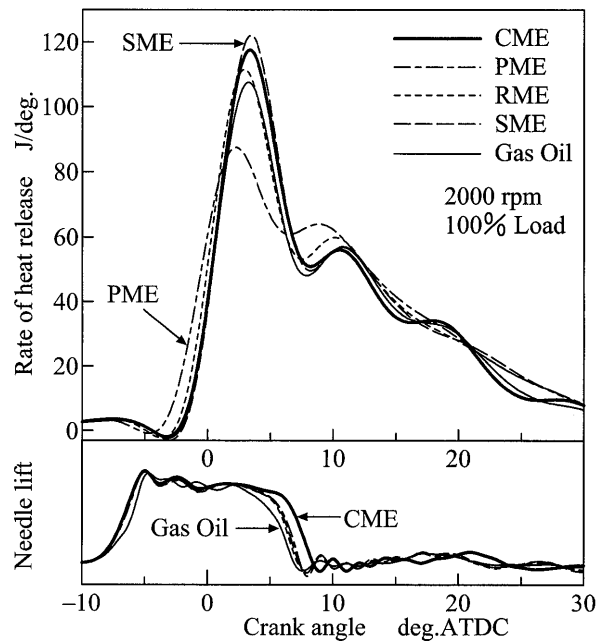


図-2 熱発生率線図およびニードルリフト

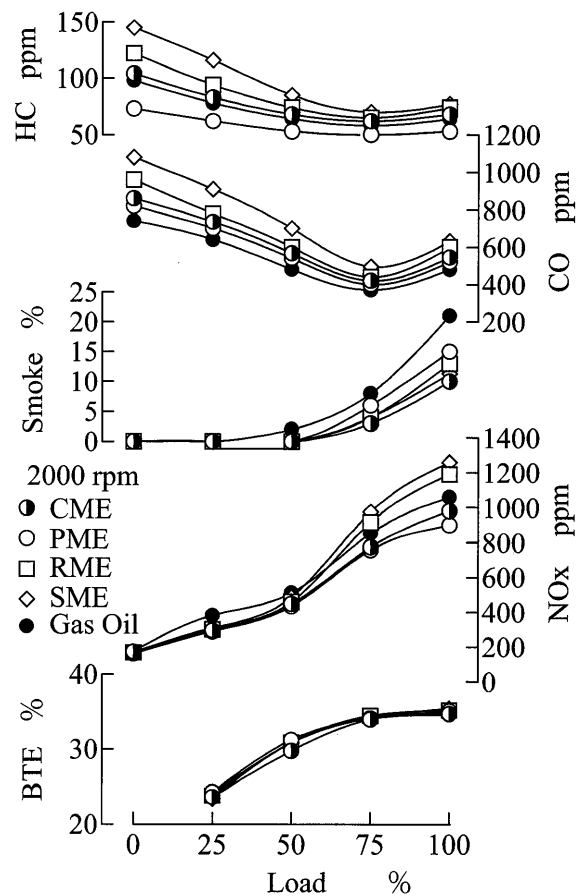


図-3 正味熱効率と排出ガス濃度

では CHO、HCHO を作り出す化学反応が軽油の場合より活発であるためにメチルエステル系燃料の CO 濃度は軽油よりも高くなったと考えられる。また、CME の CO 濃度は RME より低く、PME に近い値を示している。これは、図-1 に示すように CME の着火遅れが RME より長いものの、CME は RME より酸素含有量が多いため不完全燃焼が少なくなったためと考えられる。

図-3 の排気煙濃度はメチルエステル系燃料が軽油よりも低い。CME は約 52%、PME は約 29%、RME は約 38%、SME は約 46% の低減が見られる。これは、メチルエステル系燃料の場合、燃料中に含まれる酸素のために、噴霧の燃料過濃部分やピストン壁面等のインピンジメント冷却部分において局所的な酸素不足になる部分が少なくなり、‘すす’の発生が抑制されたことによると考えられる。特に、酸素含有量が最も多い CME は排気煙濃度が最も低くなっている。

図-3 の NO_x 濃度は、低負荷ではメチルエステル系燃料が軽油より低い値を示し、負荷 75% 以上では RME や SME は軽油より高い値を、CME や PME は軽油より低い値を示している。また、負荷 100% の場合、CME の NO_x 濃度は PME より若干高い程度である。負荷 100% において、PME は着火後の最大熱発生率が最も低い(図-2 参照)のために、燃焼温度が最も低くなり、NO_x 濃度が最も低くなったと考えられる。一方、負荷 100% の RME や SME は最大熱発生率が軽油より高いため、燃焼温度が高くなり、NO_x 濃度が軽油より高くなったと思われる。この場合の SME と RME を比較すると、SME の方が最大熱発生率は高く、NO_x 濃度も高い。負荷 100% では、CME の最大熱発生率は RME に比べて高いが、CME は低発熱量が低いいため、同じ熱量を放出するには燃料の量が多くなり、燃焼ガスの熱容量が増加する。このために、CME は RME より燃焼温度が低く抑えられ、NO_x 濃度が低くなったと考えられる。

5. まとめ

ココナツ油を理論量の約 1.1 倍のメタノールを使用して室温で反応させ、水洗無しで製造した CME を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、PME、RME、SME および JIS 2 号軽油の場合と比較し、CME の軽油代替ディーゼル燃料として利用の可能性を検討した結果、以

下の結論を得た。

(1) CME はトリグリセリド濃度が 17wt% でエステル転換率が 80% 程度と低く、そのために密度および動粘度が PME、RME および SME に比べ若干高い。

(2) CME の熱効率は軽油および他のメチルエステル燃料に比べほぼ同じである。また、CME の着火遅れは PME、RME および SME に比べ長い。

(3) CME の排気煙濃度は軽油および他のメチルエステル燃料より低い。また、CME は NO_x 濃度が軽油よりも低く、PME と同程度である。

(4) CME は寒冷地で使用する場合は流動点を考慮して対策をとる必要があるが、軽油代替燃料として有望であると思われる。

謝辞：本研究の一部は平成 16 年度経済産業省地域新生コンソシアム研究開発事業の研究費により実施された。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) L. A. Perkins, C. L. Peterson and D. L. Auld, SAE Paper, No.911764, (1991).
- 2) H. Fiedler, In 21st CIMAC, D72, (1995).
- 3) 浜崎和則, ほか 3 名, 日本機械学会論文集 B 編, 65 巻 631 号, pp.1146-1151 (1999).
- 4) Food and Agriculture Organization of the United Nation, Statistical Databases, available in <http://www.fao.org/faostat>.
- 5) 日本油化学会, 基準油脂分析試験法, (1996).
- 6) A. Shaheed and E. Swain, SAE Paper, No.981156, (1998).
- 7) Choesnul JAQIN, ほか 5 名, 鹿児島大学工学部研究報告, 第 43 号, pp.9-16 (2001).
- 8) NIST Chemistry WebBook, available in <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
- 9) G. Knothe, ほか 2 名, Chapter 10 from Fuels and Chemicals from Biomass, ACS Symposium Series, V.666, Ed. By B.C. Saha and J. Woodward, American Chemical Society, Washington D.C., (1997).
- 10) K. Yamane, A. Ueta and Y. Shimamoto, Int. J. Engine Research, Vol.2, No.4, pp.1-13 (2001).
- 11) 木下英二, ほか 3 名, 日本機械学会論文集 B 編, 68 巻 667 号, pp.958-963 (2002).
- 12) 大竹一友, 藤原俊隆, “燃焼工学”, コロナ社, pp.185-186 (1994).