パーム油 2 ブチルエステルのディーゼル燃焼特性

伏見 和代^{*1}, 久木崎 雅^{*1}, 大高 武士^{*1}, 木下 英二^{*1}, 吉本 康文^{*2}

Diesel combustion characteristics of palm oil 2-butyl ester

Kazuyo FUSHIMI^{*1}, Masashi KUKISAKI^{*1}, Takeshi OTAKA^{*1}, Eiji KINOSHITA^{*1}
and Yasufumi YOSHIMOTO^{*2}^{*1}Department of Mechanical Engineering, Kagoshima University
1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065, Japan^{*2}Department of Mechanical System Engineering, Niigata Institute of Technology
1719 Fujihashi, Kashiwazaki-shi, Niigata 945-1195, Japan

Received 13 January 2015

Abstract

In order to improve the pour point of palm oil biodiesel, palm oil 2-butyl ester (P2BE) was made from palm oil and 2-butanol by transesterification. As a result, the pour point of P2BE is -2.5 °C and it is lower than that of palm oil isobutyl ester (PiBE), 0 °C. The combustion characteristics and exhaust emissions of P2BE were investigated using a DI diesel engine, and were compared with that of palm oil 1-butyl ester (PBE), palm oil methyl ester (PME) and JIS No.2 diesel fuel (gas oil). The thermal efficiency of P2BE is almost the same as that of the other test fuels. Although the HC, CO and Smoke emissions of P2BE are slightly higher than that of PiBE, PBE and PME, these are lower than that of gas oil. It is concluded that P2BE is a good alternative diesel fuel.

Key words : Diesel engine, Alternative energy, Biomass energy, Liquid fuel, Biodiesel, Palm oil, Butyl ester, Isobutyl ester, 2-butyl ester

1. 緒 言

バイオディーゼル燃料 (BDF) は動・植物油とメタノールを原料として製造される脂肪酸メチルエステル (FAME) の混合物であり、毒性が低く、生分解性が良く、環境にやさしい、再生可能な含酸素燃料で、燃料としてのライフサイクル CO₂ 排出を削減できる有望な軽油代替ディーゼル燃料である (U.S. Department of Energy, 2006) (Sheehan, et al., 1998). パーム油は全植物油中で最も生産性が高く (5000 kg oil/ha), 生産量も世界第一位で、パーム油メチルエステル (PME) はパルミチン酸メチル等の飽和 FAME を多く含んでおり、なたね油や大豆油のメチルエステルより、着火性が良く、排ガス中の CO, HC および Smoke 濃度を低減できる (Kinoshita, et al., 2003). しかし、PME の流動点は 12.5~15°C と高く、寒冷地や冬季の使用には問題がある。

PME の低温流動性の改善に関する研究は、エタノール混合 (首藤他, 2006), DME 混合 (中里他, 2005), 流動点降下剤添加 (Jazair 他, 2002) などが行われている。BDF 製造にはメタノールを使うのが一般的であるが、他のアルコールを使用することも可能で、BDF を構成する脂肪酸エステルは製造に用いるアルコールに基づくアルキル基の炭素数が多いほど凝固点が低いこと (Knothe, 2005) から、著者の 1 人はこれまでに、高炭素数のアルコール (炭素数 2 のエタノールから炭素数 8 のオクタノールまで) を用いてパーム油 BDF を製造し、高炭素数のアルコールほど (炭素数 4 まで), また、同じ炭素数であれば側鎖構造のアルコールほど流動点が改善されること (パーム油ブチルエステル (PBE) の場合で 5.0°C, パーム油イソブチルエステル (PiBE) の場合で 0 °C) (木下他, 2011) を示し、また、製造した PBE および PiBE は JIS 規格程度の BDF であり、PME と同様に優れた着火性を示し、排ガ

ス中の HC, CO および Smoke 濃度を軽油より低減できることを報告している(木下他, 2009). また, Giraldo らにより, 2-ブタノールによるパーム油 2-ブチルエステル (P2BE) の流動点が -5°C であり, PiBE やパーム油イソブチルエステルの流動点より低いことが報告されている(Giraldo, et al., 2013). PBE, PiBE, P2BE の原料として用いたブタノールは, セルロース系を含む種々の有機物 (たとえば食品廃棄物) から発酵により製造することが可能で, バイオエタノールと並び燃料としての利用が期待されており, PBE, PiBE, P2BE は 100%バイオマス原料から製造できる BDF として期待される. これまでに, P2BE のディーゼル燃焼に関する実験的研究は著者の知る限り存在しない.

そこで, 本研究では, パーム油 BDF の低温流動性の改善を目的として, ブタノール異性体の中でイソブタノールと同様に側鎖構造をもつ 2-ブタノールを用いてパーム油 2-ブチルエステル (P2BE) を製造し, 流動点を含む燃料性状を測定するとともに, P2BE を直噴式ディーゼル機関に適用して実験を行い, 燃料性状および燃焼・排ガス特性について, PME, PBE, PiBE および JIS 2 号軽油の場合と比較検討し, P2BE 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. また, ブチルエステル系燃料 (PBE, PiBE, P2BE) を比較することによって, エステル分子のブチル基の側鎖性の違いによる燃料性状およびディーゼル燃焼特性を検討した.

2. 供試燃料

供試燃料として, パーム油 2-ブチルエステル (P2BE), パーム油イソブチルエステル (PiBE), パーム油ブチルエステル (PBE), パーム油メチルエステル (PME) および JIS 2 号軽油を用いた. PBE, PiBE, PME は水酸化カリウム KOH を触媒として, それぞれ 1-ブタノール, イソブタノール, メタノールとパーム油から製造した. 一方, P2BE は硫酸 H_2SO_4 を触媒として 2-ブタノールとパーム油から製造した. 表 1 に製造に使用したパーム油の脂肪酸組成を示す. 製造には市販のアルコールを用いた. 表 2 に BDF 製造におけるエステル反応の条件 (アルコール使用量, 触媒使用量, 反応温度, 反応時間) を示す. PME, PBE, PiBE については, 可能な限り高品質になるように, 反応条件は試行錯誤の上, 表 2 の条件とした. また, P2BE の反応条件は文献 (Giraldo, et al., 2013) の条件を基にして表 2 のように決定した. エステル反応後, BDF 製造の一般的な工程 (静置, 粗製グリセリンの除去, 脱アルコール, 水洗, 脱水) を行った. 表 2 から分かるように, P2BE の製造にはアルコールを多く使用し,

Table 1 Fatty acid compositions of palm oil, mass%

Fatty acid	C:N	Palm oil
Lauric	12:0	0.5
Myristic	14:0	1.2
Palmetic	16:0	48.0
Stearic	18:0	1.7
Oleic	18:1	37.4
Linoleic	18:2	8.9
Linolenic	18:3	0.6
Others	-	1.6

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

Table 2 Transesterification reaction conditions

Palm oil esters	Alcohols		Catalysts		Reaction temperature	Reaction time
	Kind	Ratio to Stoichiometric amount	Kind	Ratio to oil (mass %)		
PME	Methanol	2 times	KOH	1.2 %	60°C	1 h
PBE	1-Butanol	3 times	KOH	1.5 %	80°C	3 h
PiBE	Isobutanol	4 times	KOH	1.8 %	80°C	3 h
P2BE	2-Butanol	5 times	H_2SO_4	6.0 %	97°C	7 h

高い反応温度, 長い反応時間が必要で, 他の BDF 製造より多くのエネルギーが必要で, 製造コストも高額になる. P2BE の実用化のためには, 製造に必要なエネルギーを少なくし, 低コスト化を図る必要がある.

表 3 に供試燃料の性状および BDF の JIS 規格 (JIS K2390) を示す. 密度, 動粘度, 流動点, 曇り点, 引火点, 水分, 50%蒸留温度は測定値である. 低発熱量は高発熱量の測定値と CHO の値から算出した. CHO の値はパーム油の脂肪酸組成から求めた. 流動点は, JIS 規格では 0°C を基準とする 2.5°C 刻みであるが, 参考として 1°C 刻みのデータも示している. 表 3 にはガスクロマトグラフにより測定したエステル系燃料 (P2BE, PiBE, PBE および PME) のアルコール, モノ・ジ・トリグリセライドの含有率も示している. これらの値は, ジグリセライド, PiBE および PBE のモノグリセライドを除いて, JIS 規格 (JIS K2390) に適合している. P2BE のジグリセライドは JIS 規格より高い値であるが, 製造した P2BE は JIS 規格程度の比較的高純度の燃料である. また, パーム油は, 表 1 に示すように, 約 50% が飽和脂肪酸 (そのほとんどがパルミチン酸), 約 37% が一価の不飽和脂肪酸であるオレイン酸で構成され, 多価の不飽和脂肪酸分が少ないため, パーム油 BDF (一般的には PME) はなたね油や大豆油の BDF に比べ酸化安定性に優れている (U.S. Department of Energy, 2006). したがって, P2BE は PME と同様に比較的酸化安定性に優れた BDF と考えられる.

P2BE の流動点は -2.5°C で, PiBE より 2.5°C, PBE より 7.5°C, PME より 15.0°C 改善している. しかし, Giraldo らが製造した P2BE の流動点 -5°C (Giraldo, et al., 2013) には及ばなかった. 流動点は BDF 製造に用いたパーム油の脂肪酸組成, および燃料中に含まれるトリグリセライド等の残留量に影響され, 本研究で製造した P2BE は残留ジグリセライド量が多かったため, 流動点が -2.5°C になったと考えられる. しかし, Giraldo らの文献 (Giraldo, et al., 2013) にはパーム油の脂肪酸組成, トリグリセライド等の残留量が示されていないので, 詳しいことは分からない.

Table 3 Properties of test fuels

Properties		JIS K 2390	P2BE	PiBE	PBE	PME	Gas Oil (JIS No.2)
Cetane number		51 min	—	—	—	64.5 ^a	56
Net calorific value	MJ/kg	—	37.72	37.72	37.72	37.04	43.12
Density @ 288K	kg/m ³	860 - 900	864	866	865	876	824
Kinematic viscosity	@ 313K mm ² /s	3.5 - 5.0	6.2	5.8	5.8	4.5	2.1
Pour point (2.5°C scale)	°C	—	-2.5	0	5.0	12.5	-17.5
Pour point (1.0°C scale)	°C	—	-3.0	0	4.0	12.0	-17.5
Cloud point	°C	—	2.0	4.0	4.0	15.0	-3.0
Flash point	°C	120 min	194	192	190	171	78
C	mass %	—	77.5 ^b	77.5 ^b	77.5 ^b	76.2 ^b	87.3
H	mass %	—	12.6 ^b	12.6 ^b	12.6 ^b	12.4 ^b	12.5
O	mass %	—	9.9 ^b	9.9 ^b	9.9 ^b	11.4 ^b	—
Sulfur	mass ppm	10 max	< 10	< 10	< 10	< 10	< 500
Water	mg/kg	500 max	291	234	225	204	—
K	mg/kg	5 max	—	< 5	< 5	< 5	—
Alcohol	mass %	0.2 max	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	—
Monoglyceride	mass %	0.8 max	0.64	0.85	0.84	0.35	—
Diglyceride	mass %	0.2 max	0.77	0.31	0.33	0.39	—
Triglyceride	mass %	0.2 max	0.01	0.05	0.05	0.07	—
50 % Distillation temp.	°C	—	352	352	352	329	278
Stoichiometric air-fuel ratio		—	12.80	12.80	12.80	12.49	14.20

a) Cetane no. from Ref. 11

b) Estimated value

表3から製造に使用したブタノールの側鎖性が強くなるほど、パーム油 BDF の流動点および曇り点が改善している。この理由は、エステル分子のブチル基の側鎖性が強くなるほど、パラフィンワックスの形成が阻害され、流動点および曇り点が改善されたと考えられる。P2BE は流動点が -2.5°C であるが、さらなる低温流動性を確保するには、軽油やアルコールなど流動点の低い燃料との混合などの対策が必要である。

表3より、PME（脂肪酸メチルエステルの混合物）に比べ、PBE、PiBE、P2BE（これらは脂肪酸ブチルエステルの混合物）の動粘度が高くなっているが、これは、脂肪酸ブチルエステルの方が脂肪酸メチルエステルより分子量が大きいため動粘度が高くなる(Knothe, 2005)ためである。ブチルエステル系燃料（P2BE、PiBE、PBE）の間では、PBE および PiBE に比べ P2BE の動粘度が若干高くなっている。これは、P2BE の方が高動粘度のジグリセライド残留量が多いためと考えられ、エステル分子のブチル基の側鎖性と動粘度との関係は明確には分らなかった。P2BE の引火点は 194°C と高く、安全な BDF である。

図1に供試燃料の蒸留性状を示す。エステル系燃料の蒸留温度は軽油に比べてほぼ一定の値（ $320\sim 360^{\circ}\text{C}$ ）であり、ブチルエステル系燃料の蒸留温度は PME より高い。炭素数の大きいアルコールを使用したエステルの方が高い蒸留温度を示し、また、ブチルエステル系燃料の間では、分子数が同じであるので、蒸留温度はほぼ同じであった。

Fig.1 Distillation temperature of test fuels. Palm oil ester fuels have the distillation temperature kept at about constant value of 320 to 360°C . Palm oil butyl esters have higher distillation temperature compared to PME. The distillation temperature of P2BE is almost the same as that of PBE and PiBE.

Table 4 Specifications of test engine

Engine Type	1 Cylinder, 4 Stroke, D.I., Water Cooled
Bore $\times$ Stroke	110 $\times$ 106 mm
Stroke Volume	1007 cm^3
Compression Ratio	16.3
Rated Power	11.77 kW / 2200 rpm
Nozzle Opening Pressure	19.6 MPa
Fuel Injection Pump	Jerk type
Nozzle Holes	$\phi 0.33 \text{ mm} \times 4$

3. 実験装置と実験方法

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。排ガス中のHC濃度はFID、CO濃度はNDIR、NO_x濃度はCLDおよびSmoke濃度は光透過式スモークメータ（Opacimeter）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、各供試燃料において、機関回転数を2000rpm一定となるようにして負荷を無負荷、負荷25%、負荷50%、負荷75%、負荷100%の5段階に変化させて行った。負荷100%で正味平均有効圧力BMEPは0.67MPaである。実験時の雰囲気温度は20±5℃であった。

4. 実験結果および考察

P2BEは機関を確実に始動することができ、無負荷を含む全ての負荷において2000rpm一定で安定して運転することができた。

4・1 P2BEのディーゼル燃焼特性

図2にBMEP=0MPa（負荷0%）およびBMEP=0.67MPa（負荷100%）の場合について、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時期、着火遅れおよび着火時期を示す。本実験では、全ての負荷において着火が起こる際、TDC近傍（クランク角-3〜0 deg. ATDC）において圧力上昇率が減少から増加に転じている。この圧力上昇率の極小値の点（これは熱発生率が正になる時期とほぼ同じ）を着火時期と定義した。図2より、P2BEの燃料噴射時期は他の供試燃料とほぼ同じであることが分かる。BDFの体積弾性率は軽油より大きい(Tat and Gerpen, 2003)ために、本供試機関においては通常、エステル系燃料（P2BE, PiBE, PBEおよびPME）の燃料噴射時期はクランク角で約0.5度だけ早くなる(木下他, 2009)が、理由は定かでは無いが本実験の燃料噴射時期は軽油とほぼ同じになった。図2より、P2BEの着火遅れはPiBEより僅かに長い、軽油より短く、P2BEの着火性は良好であることが分かる。また、着火遅れはP2BE>PiBE>PBEとなり、エステル分子のブチル基の側鎖性が増加するほど、着火遅れが長くなっている。図2と表3からP2BEのセタン価はPMEの約64.5より幾分低い値と見積られる。

Fig.2 Injection timing and ignition delay of test fuels. The fuel injection timings of palm oil ester fuels are same as that of the gas oil. Palm oil ester fuels have shorter ignition delay compared to gas oil. The ignition delay of palm oil butyl esters becomes longer with increasing the branching of molecule.

図3に $BMEP=0\text{ MPa}$ (負荷 0%) および $BMEP=0.67\text{ MPa}$ (負荷 100%) の場合について、熱発生率および噴射ノズルのニードルリフトを示す。エステル系燃料は軽油に比べて燃料噴射期間が長いことが分かる。これは、エステル系燃料の低発熱量が軽油より低く、同じ出力を得るには燃料が余計に必要なために、燃料噴射期間が長くなったものと思われる。ブチルエステル系燃料 (P2BE, PiBE, PBE) と PME の間で、ニードルリフトのプロファイルはほぼ同じであった。図3から、P2BE の着火後の最大熱発生率は軽油より低く、PME より若干高いことが分かる。また、図2と図3から、PME を除いて、着火遅れが長いほど、着火後の最大熱発生率が高くなっていることが分かる。これは、着火遅れが長いほど、着火前に形成される可燃予混合気量が増加し、着火後により多くの可燃予混合気は急激に燃焼したために、最大熱発生率が高くなったと考えられる。PME は PiBE に比べ、着火遅れは短いにも関わらず、最大熱発生率は若干高くなっている。これは、PME の方がブチルエステル系燃料に比べて動粘度が低く、蒸留温度が低いいため、噴霧形成が幾分良好であったため、着火遅れ期間が短くても着火前に形成される可燃予混合気量が増加したためと考えられる。また、P2BE の燃焼終了時期は、負荷 0% の場合、上死点後のクランク角で約 20 度のときであり、負荷 100% の場合、約 40 度のときであり、全ての供試燃料でほぼ同じであった。図3(b)から、P2BE を含むエステル系燃料は、軽油に比べて燃焼期間が長くなっているが、燃料噴射終了から燃焼終了までの期間が短くなっていることが分かる。最後に噴射された燃料に注目すると、その燃焼期間は軽油より短くなっており、エステル系燃料の燃焼は軽油に比べて同等、もしくはそれ以上に良好と考えられる。エステル系燃料は、軽油に比べ、動粘度が高く、高沸点成分で構成されているため、噴霧の微粒化・蒸発が幾分悪く、混合気形成が若干悪化すると考えられるが、着火後の噴霧燃焼においては、理論空燃比が低いいため、軽油に比べて少ない空気の混合により燃焼が可能で、このことが最後に噴射された燃料の燃焼期間短縮の原因になったと考えられる。

図4に正味燃料消費率 $BSFC$ と正味熱効率 BTE を示す。エステル系燃料の正味燃料消費率は軽油に比べて高い値を示している。これは、表3に示すようにエステル系燃料の低発熱量が軽油に比べて約 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、P2BE の正味熱効率は他の供試燃料とほぼ同じことが分かる。

Fig.3 Rate of heat release and needle lift of test fuels. The fuel injection durations of palm oil ester fuels are longer than that of the gas oil due to the lower net calorific values of palm oil ester fuels. With the exception of the PME, the peak of heat release rates rise when ignition delay becomes longer. The combustion end timing of P2BE is almost the same as that of other test fuels.

Fig. 4 Brake specific fuel consumption (BSFC) and brake thermal efficiency (BTE) of test fuels. Palm oil ester fuels have higher BSFC compared to gas oil due to the lower net calorific value. BTE of P2BE is almost the same as that of other test fuels.

4・2 P2BE のディーゼル排ガス特性

図5に排ガス中のHC濃度、CO濃度、Smoke濃度およびNO_x濃度を示す。図5(a)と図5(b)から、P2BEのHCおよびCO濃度はPiBEより若干高いことが分かる。また、ブチルエステル系燃料(P2BE, PiBE, PBE)の間では、エステル分子のブチル基の側鎖性が増加するほど、着火遅れが長くなり(図2より、PBE, PiBE, P2BEの順に着火遅れが長い)、HCおよびCOが特に低負荷で増加している。これは、着火遅れが長いほど、着火遅れ期間に燃料が空気と過剰に混合して燃料希薄部分を多く形成し、この部分が不完全燃焼を起こすためであると考えられる。特に、負荷が低下するほど燃焼室内ガス温度が低くなるために、着火遅れの増大が大きく、HCおよびCOの増加割合が高負荷に比べて大きくなったと考えられる。また、PMEは、PBEより着火遅れが幾分長いにも関わらず、最も低いHCおよびCO濃度を示している。これは、PMEはPBEに比べ、動粘度が低く、蒸留温度も低く、燃料中の酸素含有率が幾分高いために、噴霧形成が良好で、不完全燃焼が少なかったためと考えられる。

図5(c)から、ブチルエステル系燃料のNO_x濃度はPMEや軽油とほぼ同等であることが分かる。また、ブチルエステル系燃料の間の違いはほとんど無かった。図3と図5(c)を比較すると、エステル系燃料(P2BE, PiBE, PBEおよびPME)は着火後の最大熱発生率が軽油より低くなっているが、NO_x濃度が軽油とほぼ同じである。エステル系燃料は軽油に比べ動粘度が高く、蒸留温度が高いため、噴霧の微粒化および燃料の蒸発が悪くなり、そのため噴霧形成が軽油より悪くなると考えられる。そのため、噴霧内において、エステル系燃料は軽油に比べ局所的に空気過剰率が低くなる可能性が高く、燃焼ガスが部分的に高温化し易くなると考えられる。しかし、エステル系燃料は着火後の最大熱発生率が軽油より低いので、燃焼温度上昇が抑制され、低空気過剰率による燃焼温度上昇分と相殺され、エステル系燃料の燃焼温度が軽油とほぼ同じとなり、NO_x濃度が軽油とほぼ同じになったと考えられる。

図5(d)から、P2BEのSmoke濃度は、BMEP=0.17MPa(負荷25%)まではPMEと同じで、それ以上の高負荷ではPMEより増加していることが分かる。高負荷においてP2BEのSmoke濃度がPMEより増加した理由は、P2BEはPMEに比べ燃料中の酸素含有率が幾分少ないために、噴霧の燃料過濃部分で酸素不足による‘すす’の発生が多かったためと考えられる。しかし、図5(d)より、P2BEのSmokeはBMEP=0.50MPa(負荷70%)以上で、軽油より低減している。また、ブチルエステル系燃料の間では、PBE, PiBE, P2BEの順でSmoke濃度は増加する傾向にある。P2BEの動粘度がPBE, PiBEに比べて若干大きいことが噴霧形成を幾分悪くし、Smokeを増加させたものと考えられるが、詳細は不明である。

Fig. 5 Exhaust emissions. The HC, CO and Smoke emissions of P2BE are lower than that of gas oil although P2BE has highest HC, CO and Smoke emissions among palm oil ester fuels. The NOx emissions of P2BE are almost the same as that of gas oil. HC and CO emissions among palm oil butyl esters increase when increasing the branching of molecule due to the longer ignition delay.

以上の結果から、P2BE は、PBE、PiBE および PME と同様に、着火性に優れ、排ガス中の HC、CO および Smoke 濃度を軽油よりも低減できるディーゼル代替燃料である。

5. 結 言

パーム油 BDF の低温流動性の改善を目的として、ブタノール異性体の中でイソブタノールと同様に側鎖構造をもつ 2-ブタノールを用いてパーム油 2 ブチルエステル (P2BE) を製造し、流動点を含む燃料性状を測定するとともに、P2BE を直噴式ディーゼル機関に適用して実験を行い、燃料性状および燃焼・排ガス特性について、PME、PBE、PiBE および JIS 2 号軽油の場合と比較検討し、P2BE 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。また、ブチルエステル系燃料 (PBE、PiBE、P2BE) を比較することによって、エステル分子のブチル基の側鎖性の違いによる燃料性状およびディーゼル燃焼特性を検討した。その結果、以下の結論を得た。

(1) JIS 規格程度の P2BE を製造することができ、P2BE の流動点は -2.5°C で、PiBE の 0°C より改善する。また、ブチルエステル系燃料の流動点および曇り点は、エステル分子のブチル基の側鎖性が増加するほど低下する。

(2) P2BE の着火遅れは、他のエステル系燃料より長くなるが、軽油より短くなる。ブチルエステル系燃料は、エステル分子のブチル基の側鎖性が増加するほど、着火遅れが長くなる。

(3) P2BE の正味熱効率他他のエステル系燃料および軽油とほぼ同じである。

(4) P2BE の排ガス中の HC、CO および Smoke 濃度は他のエステル系燃料より高くなるが、軽油より低減する。また、P2BE の NO_x 濃度は他の供試燃料とほとんど同じである。また、ブチルエステル系燃料は、エステル分子のブチル基の側鎖性が増加するほど、着火遅れの増大に伴い、HC および CO 濃度が特に低負荷で増加する。

以上の結果から、P2BE は流動点が -2.5℃ で、PME と同様に着火性に優れ、排ガス中の HC、CO および Smoke 濃度を軽油より低減することができ、ディーゼル代替燃料として有望である。実利用のため、さらなる低温流動性を確保するには、軽油やアルコールなど流動点の低い燃料との混合など対策が必要である。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

- Giraldo, S, Y., Rios, L. A. and Suárez, N., Comparison of glycerol ketals, glycerol acetates and branched alcohol-derived fatty esters as cold-flow improvers for palm biodiesel, *Fuel*, Vol.108 (2013), pp.709-714.
- Jazair, W., 浜崎 和則, 佐竹 正一, Jaqin, C., 流動点降下剤を添加したパーム油メチルエステルのディーゼル燃焼特性, 日本機械学会講演論文集, No.028-1 (2002), pp.181-182.
- Kinoshita, E., Hamasaki, K. and Jaqin, C., Diesel combustion of palm oil methyl ester, SAE Paper 2003-01-1929 (2003), pp.1-7.
- 木下英二, 植田裕, 高田聖士, パーム油イソブチルエステルのディーゼル燃焼特性, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.5 (2009), pp.1357-1362.
- 木下英二, 高田聖士, 笹川裕樹, パーム油バイオディーゼルの流動点改善とディーゼル燃焼, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.1 (2011), pp.225-230.
- Knothe, G., Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters, *Fuel Processing Technology*, Vol.86 (2005), pp.1059-1070.
- 中里俊洋, 岡本毅, 金野満, パーム油メチルエステル/DME 複合燃料のディーゼル機関における性状および燃焼に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.36, No.5 (2005), pp.69-74.
- Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M. and Shapouri, H., An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles, NREL/TP-580-24772 (1998), pp.1-47.
- 首藤登志夫, 藤部淳史, 風早司治, 青柳友三, 石井素, 後藤雄一, 野田明, エタノール添加によるバイオディーゼル燃料の低温流動性向上および黒煙排出低減に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.37, No.5 (2006), pp.89-94.
- Tat, M.E. and Gerpen, J.H.V., Measurement of biodiesel speed of sound and its impact on injection timing, NREL/SR-510-31462 (2003), pp.1-114.
- U.S. Department of Energy, 2006 Biodiesel Handling and Use Guidelines, DOE/GO-102006-2358, Third Edition (2006), pp.1-69.

References

- Giraldo, S, Y., Rios, L. A. and Suárez, N., Comparison of glycerol ketals, glycerol acetates and branched alcohol-derived fatty esters as cold-flow improvers for palm biodiesel, *Fuel*, Vol.108 (2013), pp.709-714.
- Jazair, W., Hamasaki, K., Satake, S. and Jaqin, C., Diesel combustion characteristics of palm oil methyl esters added with pour point depressants, *Proceeding of JSME*, No.028-1 (2002), pp.181-182 (in Japanese).
- Kinoshita, E., Hamasaki, K. and Jaqin, C., Diesel combustion of palm oil methyl ester, SAE Paper 2003-01-1929 (2003), pp.1-7.
- Kinoshita, E., Ueda, Y. and Takata, S., Diesel combustion characteristics of palm oil isobutyl ester, *Transaction of JSAE*, Vol.40, No.5 (2009), pp.1357-1362 (in Japanese).
- Kinoshita, E., Takata, S. and Sasagawa, Y., Improvement of pour point of palm oil biodiesel and its diesel combustion, *Transaction of JSAE*, Vol.42, No.1 (2011), pp.225-230 (in Japanese).
- Knothe, G., Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters, *Fuel Processing Technology*,

Fushimi, Kukisaki, Otaka, Kinoshita and Yoshimoto, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.829 (2015)

Vol.86 (2005), pp.1059-1070.

Nakasato, T., Okamoto, T. and Konno, M., Combustion characteristics and fuel properties of a DI diesel engine fueled with palm oil methyl ester/DME composite fuel, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.36, No.5 (2005), pp.69-74 (in Japanese).

Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M. and Shapouri, H., An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles, NREL/TP-580-24772 (1998), pp.1-47.

Shudo, T., Fujibe, A., Kazahaya, M., Aoyagi, Y., Ishii, H., Goto, Y. and Noda, A., Improvement of cold flow performance and exhaust emissions of PME by ethanol addition, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.37, No.5 (2006), pp.89-94 (in Japanese).

Tat, M.E. and Gerpen, J.H.V., Measurement of biodiesel speed of sound and its impact on injection timing, NREL/SR-510-31462 (2003), pp.1-114.

U.S. Department of Energy, 2006 Biodiesel Handling and Use Guidelines, DOE/GO-102006-2358, Third Edition (2006), pp.1-69.